

เครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน

BASIC WIRELESS CONFERENCE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

ร.พ.

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

3335

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

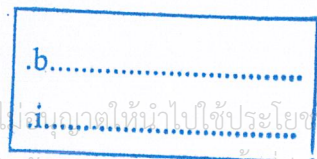
8525

ปีการศึกษา 2545

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน 50116

วัน,เดือน,ปี 21 เม.ย. 2547



เพื่อใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน

BASIC WIRELESS CONFERENCE



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2545

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2545

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

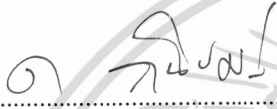
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง เครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน

BASIC WIRELESS CONFERENCE

ผู้จัดทำ

1. นายวรุณ ชุนจินดา 42010314
2. นายสุวิชัย ปรียาพัทธพงษ์ 42010410


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผศ.ดร. ทองตด วานิชศรี)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน

BASIC WIRELESS CONFERENCE

โดย นายวรุณ ชุนจินดา 42010314

นายสุวิชัย ปรียาพัทธพงษ์ 42010410

อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร. ทองทศ วานิชศรี

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรออกแบบและสร้างเครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน เครื่องประชุมไร้สายชุดนี้จะประกอบไปด้วย ตัวแม่ ตัวลูก และ ลำโพง ซึ่งตัวแม่จะสามารถควบคุมการปิดเปิดของตัวลูกแต่ละตัวได้ โดยอุปกรณ์ชุดนี้ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม ซึ่งใช้ย่านความถี่ วีเอชเอฟ (VHF) ประมาณ 86 เมกะเฮิร์ต และมีกำลังส่งประมาณ 10 มิลลิวัตต์

ABSTRACT

This project is a design and implementation of basic wireless conference. The basic wireless conference consists of main device sub-device and speaker. It operates based on frequency modulation technique. It uses very high frequency band (VHF) about 86 MHz and 10 mW power.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	
2.1 การมอดูเลตทางความถี่	8
2.2 วงจรกรองความถี่	12
2.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท	12
2.2.2 วงจรกรองความถี่ช่วงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท	14
2.3 วงจรมิกเซอร์	15
2.4 ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบใช้เฟสล็อกกลูป	18
2.4.1 ระบบเฟสล็อกกลูป	20
2.4.2 การหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบเฟสล็อกกลูป	25
2.4.3 วงจรวิเคราะห์ความถี่เฟสล็อกกลูปแบบพริสเกลเลอร์สองโมดูลัส	29
2.5 ออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า	30
2.6 วงจรขยายกำลัง	35
2.6.1 การไบอัสวงจรรขยาย	35
2.6.2 วงจรขยายคลาสเอ	36
2.6.3 วงจรขยายคลาสบี	36
2.6.4 วงจรขยายคลาสซี	38
2.6.5 การออกแบบวงจรรขยายกำลัง	39
2.7 ควอดราเจอร์รีตีเทกชัน	39
2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51	41
2.8.1 กล่าวนำ	41
2.8.2 โครงสร้างของ MCS-51	41
2.8.3 การจัดการหน่วยความจำของ MCS-51	42
2.8.4 สถาปัตยกรรมของ MCS-51	42
2.8.5 การทำงานของ MCS-51	45
2.9 เอฟเอสเค	46
2.9.1 การจัดสัญญาณเอฟเอสเค	46
2.9.2 โคฮีเร้นท์เอฟเอสเค	46
บทที่ 3 การคำนวณและการสร้าง	
การคำนวณและสร้างตัวแม่	
3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเอกทีพ	48
3.2 วงจรขยายสัญญาณเสียง	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3	วงจรรวมสัญญาณ	52
3.4	วงจรมอดูเลชัน	53
3.5	วงจรมอดูเลชันด้วยเฟสล็อกกรุป 86 เมกะเฮิร์ตซ์	54
3.5.1	วงจรมอดูเลชันแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	54
3.5.2	วงจรมอดูเลชันสองโมดูลัส	57
3.5.3	วงจรมอดูเลชันและการตั้งโปรแกรมหารความถี่	57
3.5.4	วงจรมอดูเลชัน	59
3.5.5	วงจรรวมของการมอดูเลชันความถี่ที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	61
3.6	วงจรมอดูเลชันความถี่เอฟเอ็ม	61
3.7	วงจรมอดูเลชันความถี่ต่ำผ่าน 86 เมกะเฮิร์ตซ์	62
การคำนวณและการสร้างตัวคูณ		
3.8	วงจรมอดูเลชันด้วยเฟสล็อกกรุป 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	63
3.8.1	วงจรมอดูเลชันแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	63
3.8.2	วงจรมอดูเลชันสองโมดูลัส	66
3.8.3	วงจรมอดูเลชันและการตั้งโปรแกรมหารความถี่	66
3.8.4	วงจรมอดูเลชัน	68
3.8.5	วงจรรวมของการมอดูเลชันความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	70
3.9	วงจรมอดูเลชันความถี่เอฟเอ็ม	70
3.10	วงจรมอดูเลชันความถี่ต่ำผ่าน 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	71
3.11	วงจรมอดูเลชันที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ	72
3.12	วงจรมอดูเลชัน	72
3.13	วงจรมอดูเลชันด้วยเฟสล็อกกรุป 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	73
3.13.1	วงจรมอดูเลชันแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	73
3.13.2	วงจรมอดูเลชันสองโมดูลัส	75
3.13.3	วงจรมอดูเลชันและการตั้งโปรแกรมหารความถี่	76
3.13.4	วงจรมอดูเลชัน	77
3.13.5	วงจรรวมของการมอดูเลชันความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	79
3.14	วงจรมอดูเลชันความถี่ต่ำผ่าน 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	80
3.15	วงจรมอดูเลชันไอเอฟ	80
3.16	วงจรมอดูเลชันความถี่เอฟเอ็ม	82
3.17	วงจรมอดูเลชันความถี่ต่ำผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์	83
3.18	วงจรมอดูเลชันความถี่ต่ำผ่าน 84	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณและสร้างลำโพง

3.19 วงจรมิกเซอร์	87
3.20 วงจรมิกเซอร์	88
3.21 วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์	88
3.22 วงจรหารสอง	89

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง

ตัวแม่

4.1 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดเอกที่ฟ อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	95
4.2 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเสียง	96
4.3 ผลการทดลองจากขา Serial Output Port ของ MCS-51	97
4.4 ผลการทดลองวงจรพีเอแอมป์อิมมูเนชัน	98
4.5 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูบ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	99
4.5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	99
4.5.2 วงจรพรีสเกลเลอร์	100
4.5.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	101
4.5.4 วงจรรูปฟิลเตอร์	103
4.5.5 วงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	103
4.6 ผลการทดลองเมื่อผ่านการมอดูเลตสัญญาณแบบเอฟเอ็ม	104
4.7 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์	105

ตัวลูก

4.8 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดเอกที่ฟ อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	107
4.9 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเสียง	108
4.10 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูบ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	108
4.10.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	109
4.10.2 วงจรพรีสเกลเลอร์	110
4.10.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	110
4.10.4 วงจรรูปฟิลเตอร์	113
4.10.5 วงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	113

4.11 ผลการทดลองเมื่อผ่านการมอดูเลตสัญญาณแบบเอฟเอ็ม	114
--	-----

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.12 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิร์ตซ์	115
--	-----

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ดูแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.13 ผลการทดลองของวงจรขยายความถี่วิทยุ	117
4.14 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลุ่ม 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	119
4.14.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	119
4.14.2 วงจรพรีสเกลเลอร์	121
4.14.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	121
4.14.4 วงจรรูปฟิลเตอร์	124
4.14.5 จรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	124
4.15 ผลการทดลองของวงจรมิกซ์เซอร์	126
4.16 ผลการทดลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	127
4.17 ผลการทดลองของวงจรขยายความถี่กลาง	128
4.18 ผลการทดลองวงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์	130
4.19 ผลการทดลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100 -110 กิโลเฮิร์ตซ์	131
4.20 ผลการทดลองวงจรพีเอมซีพียูอิงดีมอดูเลชัน	133
ลำโพง	
4.21 ผลการทดลองของวงจรขยายความถี่วิทยุ	134
4.22 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลุ่ม 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	136
4.22.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	136
4.22.2 วงจรพรีสเกลเลอร์	138
4.22.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	139
4.22.4 วงจรรูปฟิลเตอร์	141
4.22.5 จรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	141
4.23 ผลการทดลองวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์	143
4.24 ผลการทดลองของวงจรหารสอง	143
4.25 ผลการทดลองของวงจรมิกซ์เซอร์	144
4.26 ผลการทดลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	147
4.27 ผลการทดลองของวงจรขยายความถี่กลาง	148
4.28 ผลการทดลองวงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์	150
4.29 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดเอกที่ฟ อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	151
4.30 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเสียง	152
บทที่ 5 บทสรุปและวิจารณ์	153

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1	รูปบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องประทุมไร้สายแบบพื้นฐาน	1
รูปที่ 1.2	รูปบล็อกไดอะแกรมตัวแม่	2
รูปที่ 1.3	รูปบล็อกไดอะแกรมตัวลูก	4
รูปที่ 1.4	รูปบล็อกไดอะแกรมลำโพง	6
รูปที่ 2.1	สัญญาณเอฟเอ็ม	8
รูปที่ 2.2	วงจรมอดูเลเตอร์ใช้วาเรกเตอร์	10
รูปที่ 2.3	วงจรรีแอกแตนซ์มอดูเลเตอร์	11
รูปที่ 2.4	วิธีเอฟเอ็มโดยอ้อม ใช้เฟสมอดูเลเตอร์	11
รูปที่ 2.5	รูปคลื่นสัญญาณการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท	12
รูปที่ 2.6	ลักษณะการส่งผ่านของแถบความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนอุปกรณ์รีแอกทีฟ	13
รูปที่ 2.7	การแปลงองค์ประกอบวงจรจากความถี่ต่ำไปเป็นความถี่ช่วงผ่าน	14
รูปที่ 2.8	แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมิกเซอร์	16
รูปที่ 2.9	แสดงตัวอย่างวงจรมิกเซอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์	17
รูปที่ 2.10	วงจร Diode Ring Mixer	18
รูปที่ 2.11	บล็อกไดอะแกรมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้เฟสล็อกกลูป	19
รูปที่ 2.12	บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกกลูป	20
รูปที่ 2.13	ผลต่างเฟสเมื่อความถี่อินพุทเท่ากัน	21
รูปที่ 2.14	ผลต่างเฟสเมื่อความถี่อินพุทไม่เท่ากัน	21
รูปที่ 2.15	บล็อกไดอะแกรมของทรานสเฟอร์ฟังก์ชันของเฟสล็อกกลูป	25
รูปที่ 2.16	วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอย่างง่าย	26
รูปที่ 2.17	ผลตอบสนองความถี่ของระบบเฟสล็อกกลูป	27
รูปที่ 2.18	ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณอินพุทเป็นสเต็ปฟังก์ชัน	28
รูปที่ 2.19	วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกกลูปแบบพริสเกลเลอส์สองโมดูลัส	29
รูปที่ 2.20	บล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบบวก	30
รูปที่ 2.21	วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม	31
รูปที่ 2.22	วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน	31
รูปที่ 2.23	วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ใช้วงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียลหาอินพุตรีซีสแตนซ์	32
รูปที่ 2.24	วงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ปรับความถี่ได้ตามแรงดัน	33
รูปที่ 2.25	วงจรรอสซิลเลเตอร์ (FET Oscillator)	33
รูปที่ 2.26	วงจรรอสซิลเลเตอร์	34
รูปที่ 2.27	วงจรรอสซิลเลเตอร์ปรับค่าได้ตามแรงดัน	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกครั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.28	วงจรมายากลศาสตร์แบบ พุช-พูล	36
รูปที่ 2.29	การไบแอสกลศาสตร์แบบใช้ไดโอดตัวเดียว	37
รูปที่ 2.30	แสดงกสณใช้วงจรมิตเตอร์ตามในการไบแอส	37
รูปที่ 2.31	แสดงการใช้ขั้วอปปแอมป์ในการไบแอสวงจรมายากลศาสตร์	38
รูปที่ 2.32	แสดงการไบแอสกลศาสตร์	38
รูปที่ 2.33	แสดงการไบแอสกลศาสตร์โดยวิธีไบแอสตัวเอง (Self Bias)	39
รูปที่ 2.34	บล็อกไดอะแกรมของระบบควอดราเจอร์ดีเทกชัน	40
รูปที่ 2.35	บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของ MCS-51	42
รูปที่ 2.36	สถาปัตยกรรมภายในของ MCS-51	43
รูปที่ 2.37	ตำแหน่งของขาของ MCS-51	43
รูปที่ 2.38	แสดงสถานการณ์ทำงานใน MCS-51	45
รูปที่ 3.1	วงจรมายากลศาสตร์ความถี่ต่ำผ่านแบบ Sallen and Key	49
รูปที่ 3.2	วงจรมายากลศาสตร์ความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟ ความถี่คัทออฟ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	50
รูปที่ 3.3	วงจรมายากลศาสตร์แบบกลับเฟส	51
รูปที่ 3.4	วงจรมายากลศาสตร์แบบกลับเฟสที่มีอัตราขยาย 50 เท่า	51
รูปที่ 3.5	รูปวงจรมายากลศาสตร์แบบ Inverting	52
รูปที่ 3.6	รูปวงจรมายากลศาสตร์แบบ Inverting ที่ใช้งาน	52
รูปที่ 3.7	วงจรมายากลศาสตร์ที่ขั้วอินพุต	53
รูปที่ 3.8	วงจรมายากลศาสตร์แบบคอลพิตต์ (Colpitt Oscillator)	54
รูปที่ 3.9	วงจรมายากลศาสตร์ทาง DC ของวงจรมายากลศาสตร์	55
รูปที่ 3.10	วงจรมายากลศาสตร์ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต้องการออกแบบ	55
รูปที่ 3.11	วงจรมายากลศาสตร์เมื่อรวม C_m กับ C_v	55
รูปที่ 3.12	วงจรมายากลศาสตร์	56
รูปที่ 3.13	วงจรมายากลศาสตร์ที่ปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้า	56
รูปที่ 3.14	การต่อวงจรของไอซี MC12017	57
รูปที่ 3.15	ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายใน MC145152-2	57
รูปที่ 3.16	โครงสร้างวงจรมายากลศาสตร์	59
รูปที่ 3.17	วงจรมายากลศาสตร์	60
รูปที่ 3.18	วงจรมายากลศาสตร์ของวงจรมายากลศาสตร์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	61
รูปที่ 3.19	แสดงวงจรมายากลศาสตร์ความถี่ต่ำผ่านแบบเชอว์เชฟ อันดับที่ 7 ที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว	62
รูปที่ 3.20	แสดงวงจรมายากลศาสตร์ความถี่ต่ำผ่านแบบเชอว์เชฟ อันดับที่ 7	62
รูปที่ 3.21	วงจรมายากลศาสตร์แบบคอลพิตต์ (Colpitt Oscillator)	63
รูปที่ 3.22	วงจรมายากลศาสตร์ทาง DC ของวงจรมายากลศาสตร์	64
รูปที่ 3.23	วงจรมายากลศาสตร์ที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต้องการออกแบบ	64

รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลเมื่อรวม C_{in} กับ C_v	64
รูปที่ 3.25 วงจรกำเนิดความถี่	65
รูปที่ 3.26 วงจรกำเนิดความถี่ที่ปรับ ค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้า	65
รูปที่ 3.27 การต่อวงจรของไอซี MC12017	66
รูปที่ 3.28 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายใน MC145152-2	66
รูปที่ 3.29 โครงสร้างวงจรรูปฟิลเตอร์	68
รูปที่ 3.30 วงจรรูปฟิลเตอร์	69
รูปที่ 3.31 วงจรที่สมมูลของวงจรสังเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	70
รูปที่ 3.32 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว	71
รูปที่ 3.33 แสดงวงจรกรองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7	71
รูปที่ 3.34 วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ	72
รูปที่ 3.35 วงจรมิกเซอร์โดยใช้ IC เบอร์ MC12002	72
รูปที่ 3.36 วงจรกำเนิดความถี่แบบคอลพิตต์ (Colpitt Oscillator)	73
รูปที่ 3.37 วงจรสมมูลทาง DC ของวงจรถักกำเนิดความถี่	73
รูปที่ 3.38 วงจรสมมูลที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต้องการออกแบบ	74
รูปที่ 3.39 วงจรสมมูลเมื่อรวม C_{in} กับ C_v	74
รูปที่ 3.40 วงจรกำเนิดความถี่	74
รูปที่ 3.41 วงจรกำเนิดความถี่ที่ปรับ ค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้า	75
รูปที่ 3.42 การต่อวงจรของ ไอซี MC12017	75
รูปที่ 3.43 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายใน MC145152-2	76
รูปที่ 3.44 โครงสร้างวงจรรูปฟิลเตอร์	77
รูปที่ 3.45 วงจรรูปฟิลเตอร์	79
รูปที่ 3.46 วงจรที่สมมูลของวงจรสังเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	79
รูปที่ 3.47 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	80
รูปที่ 3.48 วงจรสมมูลทาง AC ของวงจรคอมมอนอิมิตเตอร์	80
รูปที่ 3.49 วงจรสมมูลทาง DC ของวงจรคอมมอนอิมิตเตอร์	81
รูปที่ 3.50 วงจรขยาย IF ที่ใช้งานจริง	82
รูปที่ 3.51 วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ LM3089	82
รูปที่ 3.52 วงจรของ Delyiannis – friend	83
รูปที่ 3.53 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์	84
รูปที่ 3.54 วงจรดีมอดูเลทเฟรีควนซีซีพียอิ่ง	84
รูปที่ 3.55 วงจรภายในไอซีเบอร์ TUF-5	87
รูปที่ 3.56 วงจรมิกเซอร์ที่ไอเอฟ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	87
รูปที่ 3.57 วงจรมิกเซอร์โดยใช้ IC เบอร์ MC12002	88

รูปที่ 3.58 วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ 11 เมกะเฮิร์ตซ์	89
รูปที่ 3.59 แสดงวงจรหารสอง	89
รูปที่ 3.60 รูปวงจรรวมตัวแม่	90
รูปที่ 3.61 รูปวงจรรวมตัวลูก	91
รูปที่ 3.62 รูปวงจรรวมตัวลูก (ต่อ)	92
รูปที่ 3.63 รูปวงจรรวมลำโพง	93
รูปที่ 3.64 รูปวงจรรวมลำโพง (ต่อ)	94
รูปที่ 4.1 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	96
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง	96
รูปที่ 4.3 รหัสสัญญาณการปิดเครื่องลูก (มีรหัสคือ 00110011)	97
รูปที่ 4.4 รหัสสัญญาณการเปิดเครื่องลูก (มีรหัสคือ 11001100)	97
รูปที่ 4.5.a แสดงผลที่ได้จากวงจรพีแควนซ์ซิงคิงค์ มอดูเลชัน โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2206	98
รูปที่ 4.5.b แสดงผลที่ได้จากวงจรพีแควนซ์ซิงคิงค์ มอดูเลชัน โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2206	98
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก วงจรมอดูเลชันแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	100
รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพีแควนซ์ซิงคิงค์	100
รูปที่ 4.8 สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ (ขา 26) ของ MC145152	101
รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152	101
รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152	102
รูปที่ 4.11 สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152	102
รูปที่ 4.12 ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากฟิลเตอร์ที่ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	103
รูปที่ 4.13 สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่ ด้วยเฟสล็อกที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีตัวลดทอน 20 dB ต่อภายนอก)	103
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์	104
รูปที่ 4.15.a สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นพาหะที่ถูกมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับ สัญญาณไซน์ความถี่ 4 กิโลเฮิร์ตซ์	104
รูปที่ 4.15.b สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นพาหะที่ถูกมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับ สัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์	104
รูปที่ 4.16 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์	106
รูปที่ 4.17 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	107

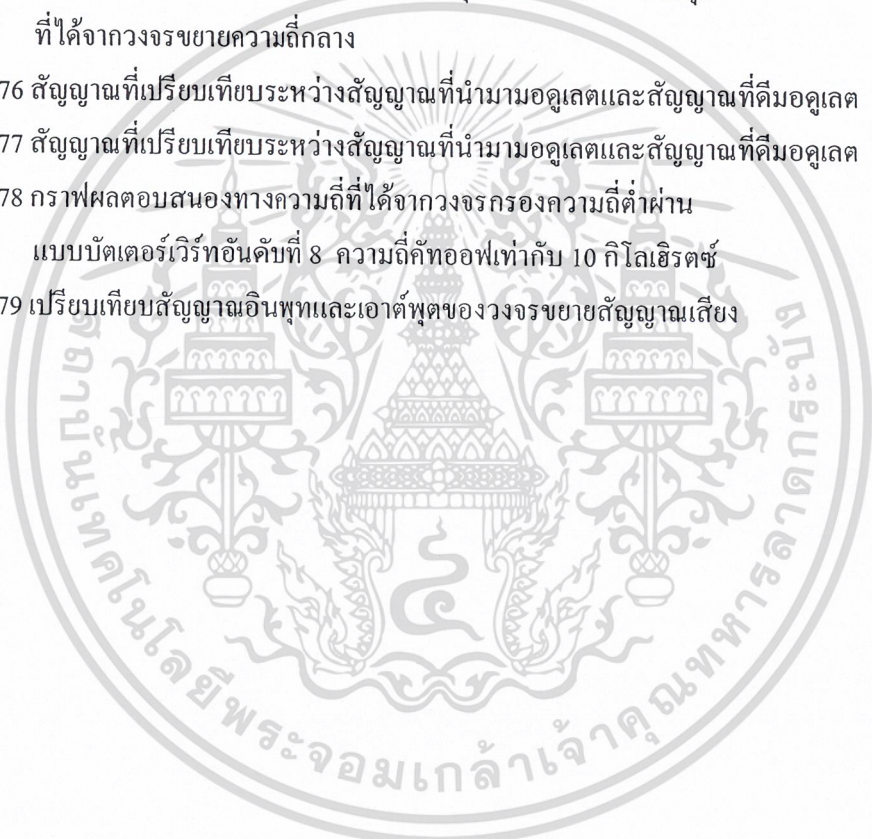
รูปที่ 4.18	เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง	108
รูปที่ 4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	109
รูปที่ 4.20	สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรฟรีสเกลเลอร์	110
รูปที่ 4.21	สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ (ขา 26) ของ MC145152	111
รูปที่ 4.22	สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152	111
รูปที่ 4.23	สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152	112
รูปที่ 4.24	สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152	112
รูปที่ 4.25	ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากลูปฟิลเตอร์ที่ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	113
รูปที่ 4.26	สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่ ด้วยเฟสล็อกที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีตัวลดทอน 20 dB ต่อภายนอก)	113
รูปที่ 4.27	สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์	114
รูปที่ 4.28	สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นพาหะที่ถูกมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับ สัญญาณไซน์ความถี่ 4 กิโลเฮิร์ตซ์	114
รูปที่ 4.29	กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิร์ตซ์	116
รูปที่ 4.30	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm	118
รูปที่ 4.31	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz	119
รูปที่ 4.32	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	120
รูปที่ 4.33	สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรฟรีสเกลเลอร์	121
รูปที่ 4.34	สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ (ขา 26) ของ MC145152	122
รูปที่ 4.35	สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152	122
รูปที่ 4.36	สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152	123
รูปที่ 4.37	สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152	123
รูปที่ 4.38	ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากลูปฟิลเตอร์ที่ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	124
รูปที่ 4.39	สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่ ด้วยเฟสล็อกที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีตัวลดทอน 20 dB ต่อภายนอก)	124
รูปที่ 4.40	สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	125
รูปที่ 4.41	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	126

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าตีพิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ลีททั้งหมดมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.42	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	126
รูปที่ 4.43	สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	126
รูปที่ 4.44	กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	127
รูปที่ 4.45	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยาย ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm	128
รูปที่ 4.46	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลาง	129
รูปที่ 4.47	สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมามอดูเลตและสัญญาณที่ดีมอดูเลต	130
รูปที่ 4.48	สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมามอดูเลตและสัญญาณที่ดีมอดูเลต	130
รูปที่ 4.49	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์	132
รูปที่ 4.50.a	แสดงผลที่ได้จากวงจรฟรีแควนซ์ซีพิกอิ้งค์ ดีมอดูเลชัน โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2211	133
รูปที่ 4.50.b	แสดงผลที่ได้จากวงจรฟรีแควนซ์ซีพิกอิ้งค์ ดีมอดูเลชัน โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2211	133
รูปที่ 4.51	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm	135
รูปที่ 4.52	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz	136
รูปที่ 4.53	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควมคุมกับความถี่ที่ได้จาก วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	137
รูปที่ 4.54	สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรฟรีสเกลเลอร์	138
รูปที่ 4.55	สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ (ขา 26) ของ MC145152	139
รูปที่ 4.56	สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152	139
รูปที่ 4.57	สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152	140
รูปที่ 4.58	สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152	140
รูปที่ 4.59	ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากลูปีลเตอร์ที่ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	141
รูปที่ 4.60	สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่ ด้วยเฟสล็อกที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีตัวลดทอน 20 dB ต่อภายนอก)	141
รูปที่ 4.61	สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์	142
รูปที่ 4.62	แสดงรูปสัญญาณและความถี่ที่ได้จากวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ที่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์	143
รูปที่ 4.63	แสดงผลที่ได้จากวงจรหารสอง	143
รูปที่ 4.64	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	144
รูปที่ 4.65	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	144
รูปที่ 4.66	สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	144
รูปที่ 4.67	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	145

รูปที่ 4.68	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	145
รูปที่ 4.69	สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	145
รูปที่ 4.70	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 5.2 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	146
รูปที่ 4.71	สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	146
รูปที่ 4.72	สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)	146
รูปที่ 4.73	กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	147
รูปที่ 4.74	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยาย ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm	148
รูปที่ 4.75	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลาง	149
รูปที่ 4.76	สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมามอดูเลตและสัญญาณที่ดีมอดูเลต	150
รูปที่ 4.77	สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมามอดูเลตและสัญญาณที่ดีมอดูเลต	150
รูปที่ 4.78	กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	151
รูปที่ 4.79	เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง	152



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1	แสดงตัวอย่างค่าอินคิกแดนซ์ โดยใช้วงจรมัลติเพล็กซ์	13
ตารางที่ 3.1	ค่า Q ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่อันดับต่างๆ	48
ตารางที่ 3.2	ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่คัทออฟ 10 kHz	49
ตารางที่ 4.1	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์	95
ตารางที่ 4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่แบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	99
ตารางที่ 4.3	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิรตซ์	105
ตารางที่ 4.4	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์	107
ตารางที่ 4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่แบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	109
ตารางที่ 4.6	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิรตซ์	115
ตารางที่ 4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm	117
ตารางที่ 4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz	118
ตารางที่ 4.9	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่แบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	120
ตารางที่ 4.9	ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิรตซ์	127
ตารางที่ 4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm	128
ตารางที่ 4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่กลางที่ความถี่ 10.7 MHz	129
ตารางที่ 4.13	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิรตซ์	131
ตารางที่ 4.14	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm	134

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.15	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz	135
ตารางที่ 4.16	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควมคุมกับความถี่ที่ได้จาก วงจรถ่ายความถี่แบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า	137
ตารางที่ 4.17	ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์	147
ตารางที่ 4.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายที่ได้จาก วงจรถ่ายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm	148
ตารางที่ 4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต ที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่กลางที่ความถี่ 10.7 MHz	149
ตารางที่ 4.20	ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คutoffเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์	151



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

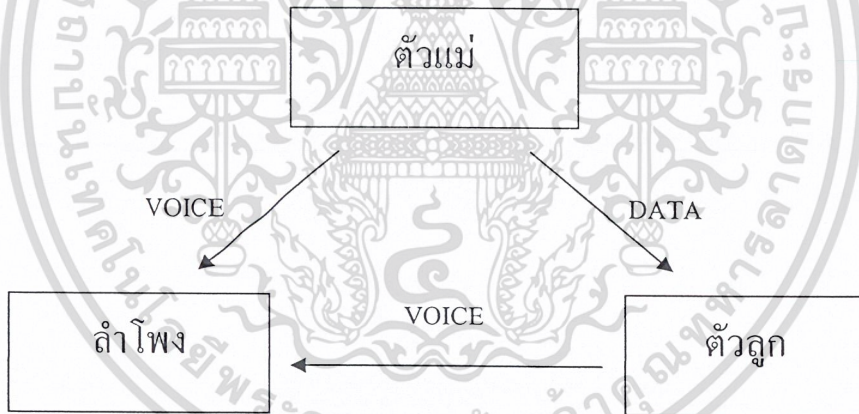
บทที่ 1

บทนำ

เทคโนโลยีการสื่อสารในยุคปัจจุบันนี้ได้มีการพัฒนาเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งเทคโนโลยีการสื่อสารโดยการสื่อสารไร้สายได้มีการนำมาพัฒนาและประยุกต์เพื่อการใช้งานในหลายๆ ด้านซึ่งเทคโนโลยีการสื่อสารไร้สายในยุคแรกนั้น เป็นการพัฒนาเพื่อการสื่อสารไร้สายเพื่อการสื่อสารแบบต่อเนื่อง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสื่อสารเพื่อการส่งสัญญาณเสียง ซึ่งการสื่อสารในช่วงนี้ได้เป็นพื้นฐานการสื่อสารแบบไร้สายในยุคต่อๆ มา

โครงการนี้ได้นำพื้นฐานการสื่อสารในยุคแรกๆ ของการสื่อสารแบบไร้สายมาศึกษาและนำประยุกต์ใช้ เพื่อผลิตเครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐานขึ้นมา โดยเครื่องได้นำการสื่อสารแบบอนาล็อกมาใช้เพื่อการติดต่อสื่อสารระหว่างกัน เครื่องประชุมไร้สายนี้ได้แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ตัวแม่
2. ตัวลูก
3. ลำโพง

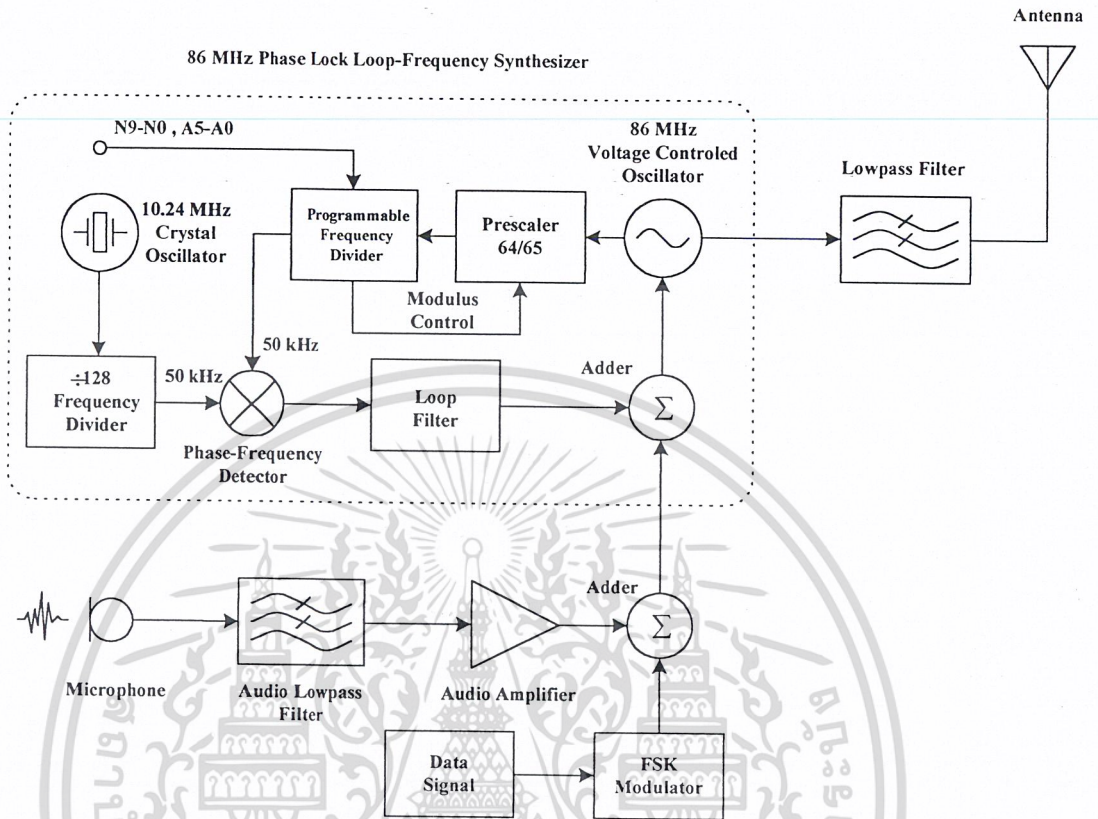


รูปที่ 1.1 รูปบล็อกไดอะแกรมการทำงานของเครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน

โดยรายละเอียดการทำงานของแต่ละส่วนสามารถอธิบายการทำงานได้ โดยพิจารณา บล็อกไดอะแกรมดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวแม่



รูปที่ 1.2 รูปบล็อกไดอะแกรมตัวแม่

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1.2 พบว่าตัวแม่ ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ไมโครโฟน (Microphone) เป็นไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมีขนาดของสัญญาณที่ต่ำ

2. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านเข้ามาทางคอนเดนเซอร์ไมโครโฟนจะมีความถี่ที่ไม่ต้องการปนเข้ามาด้วย จึงต้องใช้วงจรกรองความถี่ต่ำกรองเฉพาะช่วงความถี่เสียงที่ต้องการเท่านั้น

3. วงจรขยายสัญญาณความถี่เสียง (Audio Frequency Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่รับมาจากคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน เนื่องจากระดับสัญญาณที่ได้จากคอนเดนเซอร์ไมโครโฟนนั้นมีระดับต่ำ จึงจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดเพียงพอที่จะทำการมอดูเลตได้

4. วงจรกำเนิดสัญญาณข่าวสาร(Data signal Generator) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่ในการผลิตสัญญาณข่าวสารที่จะส่งไปยังตัวลูกเพื่อทำการเปิดปิดการทำงานของเครื่อง

5. วงจรมอดูเลตแบบ FSK (FSK modulator) ทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณข่าวสารเข้ากับคลื่นพาห้แบบ FSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือการสงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น และผู้จัดทำสงวนลิขสิทธิ์ไว้ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. วงจรรวมสัญญาณ (Adder) เป็นวงจรที่ทำการรวมสัญญาณระหว่างความถี่เสียง กับ สัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณที่ผ่านการมอดูเลตแล้ว

7. วงจรสังเคราะห์ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ด้วยเฟสล็อกคูลูป(Frequency Synthesizer) เป็นวงจรกำเนิดความถี่โดยใช้เฟสล็อกคูลูป ซึ่งนำคลื่นที่ได้มาเป็นคลื่นพาหะในการมอดูเลต โดยจะประกอบด้วยวงจรรย่อยที่สำคัญ คือ

7.1 วงจรโวลเตจคอนโทรลอสซิลเลเตอร์ (Voltage Controled Osillator : VCO)

7.2 วงจรหารความถี่แบบโปรแกรมได้ (Programmable Frequency Divider หรือ Prescaler)

7.3 วงจรเปรียบเทียบเฟส (Phase Detector)

7.4 วงจรลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

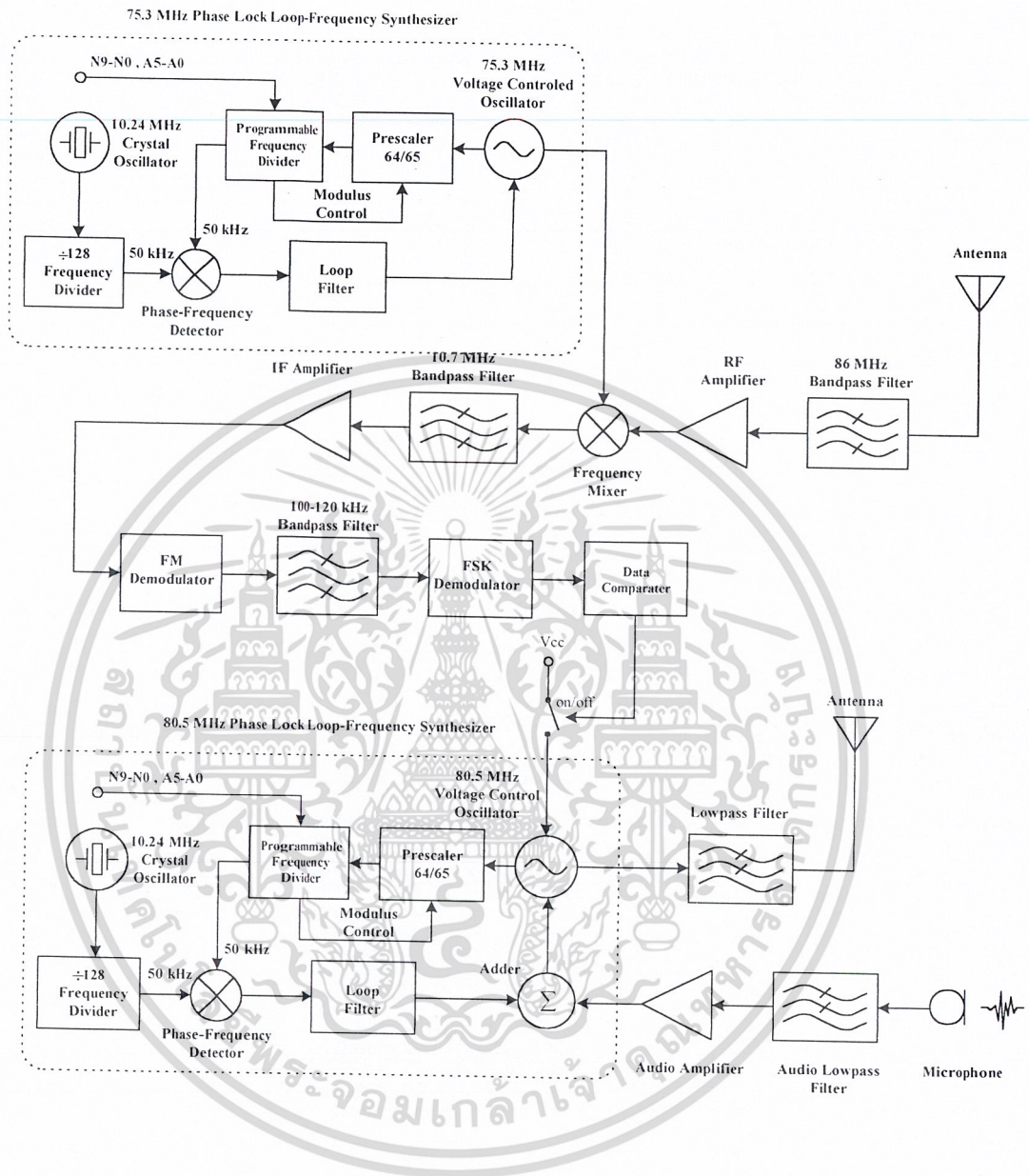
8. วงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ (FM Modulator) ย้ายย่านความถี่ของสัญญาณเสียง โดยอาศัยคลื่นพาหะเป็นตัวช่วยให้เกิดความเหมาะสมของการส่งสัญญาณผ่านตัวกลางไปยังเครื่องรับ

9. วงจรขยายย่านความถี่วิทยุ (Radio Frequency Amplifier) ทำหน้าที่ขยายกำลังของสัญญาณเอฟเอ็มเพื่อให้มีกำลังมากเพียงพอที่จะส่งออกอากาศให้ได้ระยะทางที่ไกลขึ้น แต่ถ้ากำลังของสัญญาณเอฟเอ็มดังกล่าวมีระดับสัญญาณที่ต้องการแล้ว วงจรส่วนนี้ก็ไม่จำเป็นที่จะต้องใช้

10. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เนื่องจากเอาต์พุตที่ออกมาจากวงจรรขยายกำลังอาจมีสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออกมาด้วย ดังนั้นจึงนำสัญญาณที่จะส่งออกอากาศมาผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดฮาร์โมนิกที่ไม่ต้องการก่อนที่จะส่งไปยังสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถูก



รูปที่ 1.3 รูปบล็อกโคอะแกรมตัวถูก

จากบล็อกโคอะแกรมในรูปที่ 1.3 พบว่าตัวถูกประกอบด้วยส่วนสำคัญต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ไมโครโฟน (Microphone) เป็นไมโครโฟนชนิดคอนเดนเซอร์ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานเสียงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะมีขนาดของสัญญาณที่ต่ำ
 2. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เนื่องจากสัญญาณที่ผ่านเข้ามาทางคอนเดนเซอร์ไมโครโฟนจะมีความถี่ที่ไม่ต้องการปนเข้ามาด้วย จึงต้องใช่วงจรกรองความถี่ต่ำกรองเฉพาะช่วงความถี่เสียงที่ความต้องการเท่านั้น
- นอกจากนี้ ยังมีวงจรอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น วงจรขยายสัญญาณเสียง (Audio Amplifier) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Lowpass Filter) สำหรับกรองสัญญาณเสียงที่ไม่ต้องการออก

3. วงจรขยายสัญญาณความถี่เสียง (Audio Frequency Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่รับมาจากคอนเดนเซอร์ไมโครโฟน เนื่องจากระดับสัญญาณที่ได้จากคอนเดนเซอร์ไมโครโฟนนั้นมีระดับต่ำ จึงจำเป็นต้องทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดเพียงพอที่จะทำการมอดูเลตได้

4. วงจรสังเคราะห์ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ด้วยเฟสล็อกกลูป(Frequency Synthesizer) ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณความถี่โลคอล (Local) โดยผลิตความถี่ 80.5เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อเข้าไปผสมความถี่กับวงจรมิกเซอร์ความถี่ตัวที่ 1 ต่อไปองค์ประกอบภายในเหมือนกันกับวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูปด้านบน

5. วงจรเอฟเอ็มมอดูเลเตอร์ (FM Modulator) ย้ายย่านความถี่ของสัญญาณเสียงโดยอาศัยคลื่นพาห้เป็นตัวช่วยให้เกิดความเหมาะสมของการส่งสัญญาณผ่านตัวกลางไปยังเครื่องรับ

6. วงจรขยายความถี่วิทยุ (RF Amplifier) ถูกนำมาใช้เป็นวงจขยายกำลังภาคสุดท้ายก่อน ส่งสัญญาณออกอากาศ

7. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) เนื่องจากเอาท์พุทที่ออกมาจากวงจขยายกำลังอาจมีสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออกมาด้วย ดังนั้นจึงนำสัญญาณที่จะส่งออกอากาศมาผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อลดฮาร์โมนิกที่ไม่ต้องการก่อนที่จะส่งไปยังสายอากาศ

8. วงจรกรองแถบความถี่ผ่านช่วงความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (Band Pass Filter 86 MHz) ทำหน้าที่จำกัดแถบความถี่ของสัญญาณอินพุทที่เข้าสายอากาศเพื่อเลือกเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการและป้องกันสัญญาณความถี่อื่นที่มีขนาดสัญญาณแรงกว่าเพื่อไม่ให้วงจขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำในภาคถัดไปเกิดการอิมิตัว

9. วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่เข้ามาจากสายอากาศและผ่านการเลือกกรองช่วงความถี่แล้ว ให้มีขนาดสัญญาณแรงขึ้นเพื่อส่งต่อให้กับวงจรมิกเซอร์

10. วงจรมิกเซอร์ความถี่ (Frequency Mixer) ทำหน้าที่เลื่อนแถบความถี่จากช่วงความถี่สูงของสัญญาณที่ต้องการ (86 เมกะเฮิร์ตซ์) โดยทำการผสมกับความถี่ที่ได้จากวงจสังเคราะห์ความถี่ช่วง 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ มาเป็นช่วงความถี่ต่ำโดยมีความถี่กลางที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์

11. วงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ด้วยเฟสล็อกกลูป(Frequency Synthesizer) ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณความถี่โลคอล โดยผลิตความถี่ในช่วง 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อเข้าไปผสมความถี่กับวงจรมิกเซอร์ความถี่ ต่อไปองค์ประกอบภายในเหมือนกันกับวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูปด้านบน

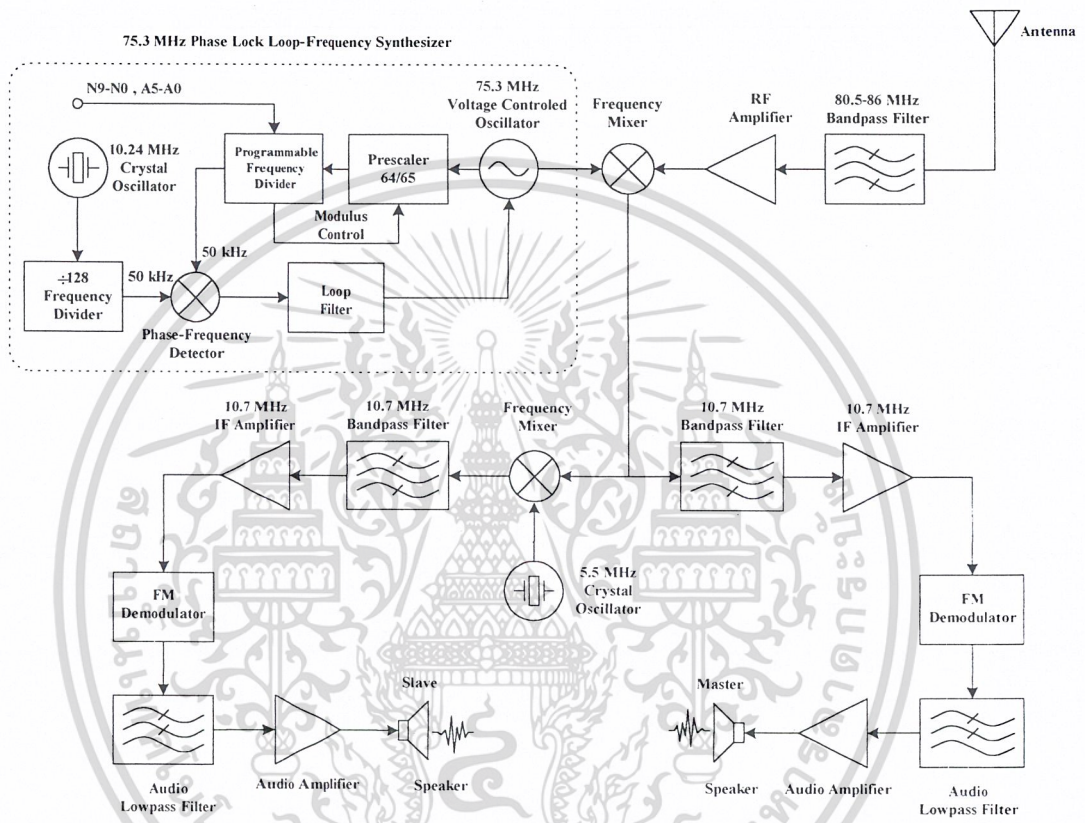
12. วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (IF Band Pass Filter 10.7 MHz) ใช้กรองแถบความถี่ต่ำที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ความถี่ โดยเลือกเอาผลต่างทางความถี่มาใช้งานจะได้เป็นความถี่กลางออกมาที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ วงจรกรองแถบความถี่นี้เป็นวงจรกรองชนิดที่ทำจากเซรามิก มีอัตราการสูญเสีย (Loss) ประมาณ 10 dB

13. วงจรขยายสัญญาณความถี่กลางที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (IF Amplifier 10.7 MHz) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากวงจกรองแถบความถี่ผ่านช่วง 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (วงจกรองแถบความถี่กลาง)

14. วงจรดีมอดูเลเตอร์ (FM Demodulator) ทำหน้าที่แยกเอาสัญญาณเสียงออกจากคลื่นพาห้ที่รับมา
เอกสารนี้เป็นเอกสารทูลสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าตีพิมพ์เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาต
ไปว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มาแก้ไข
ได้ทางสายอากาศของเครื่องรับออกมา

15. วงจรเปรียบเทียบสัญญาณ (Data Comparater) เป็นวงจรที่ทำหน้าที่เปรียบเทียบข้อมูลระหว่างข้อมูลที่ถูส่งมาจากตัวแม่ กับข้อมูลที่ระบุไว้ในเครื่องว่าตรงกันหรือไม่

ลำโพง



รูปที่ 1.4 รูป บล็อกไดอะแกรมลำโพง

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 1.4 พบว่า ลำโพง ประกอบด้วยส่วนสำคัญต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. วงจรกรองแถบความถี่ในช่วงความถี่ 80.5-86 เมกะเฮิรตซ์ (Band Pass Filter 80.5-86 MHz) ทำหน้าที่จำกัดแถบความถี่ของสัญญาณอินพุตที่เข้าสายอากาศเพื่อเลือกเฉพาะช่วงความถี่ที่ต้องการและป้องกันสัญญาณความถี่อื่นที่มีขนาดสัญญาณแรงกว่าเพื่อไม่ให้วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise Amplifier) ในภาคถัดไปเกิดการอิ่มตัว (Saturation)

2. วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ (Low Noise Amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่วิทยุที่เข้ามาจากสายอากาศและผ่านการเลือกรองช่วงความถี่แล้ว ให้มีขนาดสัญญาณแรงขึ้นเพื่อส่งต่อไปให้กับวงจรมิกเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

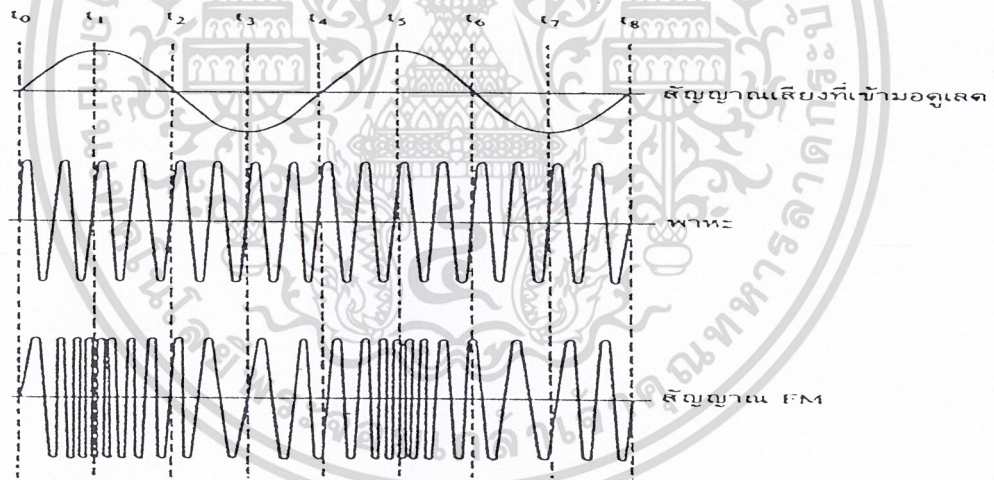
3. วงจรมิกเซอร์ความถี่ตัวที่ 1 (1st Frequency Mixer) ทำหน้าที่เลื่อนแถบความถี่จากช่วงความถี่สูงของสัญญาณที่ต้องการ (80.5 และ 86 เมกะเฮิร์ตซ์) โดยทำการผสมกับความถี่ที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ มาเป็นช่วงความถี่ต่ำโดยมีความถี่กลาง (IF Frequency) ที่ 10.7 และ 16.2 เมกะเฮิร์ตซ์
4. วงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ด้วยเฟสล็อกคัล (Frequency Synthesizer) ทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณความถี่โลคอล (Local) โดยผลิตความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ เพื่อเข้าไปผสมความถี่กับวงจรมิกเซอร์ความถี่ตัวที่ 1 ต่อไปองค์ประกอบภายในเหมือนกันกับวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัลด้านบน
5. วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (IF Band Pass Filter 10.7 MHz) ใช้กรองแถบความถี่ต่ำที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ความถี่ตัวที่ 1 โดยเลือกเอาผลต่างทางความถี่มาใช้งานจะได้เป็นความถี่กลางออกมาที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ วงจรกรองแถบความถี่เป็นวงจรกรองชนิดที่ห้าจากเซรามิก มีอัตราการสูญเสีย (Loss) ประมาณ 10 dB
6. วงจรขยายสัญญาณความถี่กลางที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (IF Amplifier 10.7 MHz) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่านช่วง 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (วงจรกรองแถบความถี่กลาง)
7. วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ 16.2 เมกะเฮิร์ตซ์ (IF Band Pass Filter 16.2 MHz) ใช้กรองแถบความถี่ต่ำที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ความถี่ตัวที่ 1 โดยเลือกเอาผลต่างทางความถี่มาใช้งานจะได้เป็นความถี่กลางออกมาที่ 16.2 เมกะเฮิร์ตซ์
8. วงจรคริสตัลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ (Crystal oscillator 5.5 MHz) เป็นวงจรที่ทำการผลิตความถี่ โดยอาศัยการสั่นของแร่มาเป็นตัวที่ผลิตสัญญาณความถี่ โดยวงจรนี้จะทำการผลิตความถี่เพื่อเข้าไปผสมความถี่ในมิกเซอร์ตัวที่ 2
9. วงจรมิกเซอร์ความถี่ตัวที่ 2 (2nd Frequency Mixer) ทำหน้าที่เลื่อนแถบความถี่จากช่วงความถี่กลางของสัญญาณที่ทำการมิกเซอร์มาจากครั้งแรก (16.2 เมกะเฮิร์ตซ์) โดยทำการผสมกับความถี่ที่ได้จากวงจรคริสตัลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ มาเป็นช่วงความถี่ต่ำโดยมีความถี่กลาง (IF Frequency) ที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์
10. วงจรดีมอดูเลเตอร์ (FM Demodulator) ทำหน้าที่แยกเอาสัญญาณเสียงออกจากคลื่นพาที่รับมาได้ทางสายอากาศของเครื่องรับออกมา
11. วงจรกรองความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) วงจรกรองความถี่ต่ำในส่วนนี้จะทำหน้าที่กรองสัญญาณ เสียงออกจากสัญญาณข้อมูลที่ส่งมาจากตัวควบคุมหลัก (ตัวแม่) เพื่อป้องกันการรบกวนจากสัญญาณความถี่สูงที่รับมาด้วยรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ

2.1 การมอดูเลตทางความถี่ (Frequency Modulation)

ในการมอดูเลตทางความถี่ แอมพลิจูดของคลื่นพาห้จะไม่มีผลหรือไม่มีการเปลี่ยนแปลง แต่ความถี่ของคลื่นพาห้จะเกิดการเปลี่ยนแปลง โดยความถี่จะเกิดการเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่ที่นำมาผสม ความถี่ของคลื่นพาห้ขณะที่ไม่มีการผสม เรียกว่า ความถี่กึ่งกลาง (Center Frequency) เมื่อแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่เสียงมีขนาดเพิ่มขึ้นทางบวกจะทำให้ความถี่ของคลื่นพาห้เพิ่มขึ้น และถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่เสียงลดลง ความถี่ของคลื่นพาห้ก็จะลดลงจนกระทั่งสัญญาณความถี่เสียงลดลงเป็นศูนย์ ความถี่ของคลื่นพาห้ก็จะเป็ความถี่กึ่งกลาง ในทำนองเดียวกันเมื่อสัญญาณที่ต้องการผสมเป็นลบ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห้ก็จะลดลง และความถี่ของคลื่นพาห้จะมีค่าต่ำสุดเมื่อคลื่นความถี่เสียงมีขนาดลดลงต่ำสุด ความถี่ของคลื่นพาห้จะเป็นความถี่กึ่งกลางอีกครั้งก็ต่อเมื่อสัญญาณความถี่เสียงผ่านครึ่ง ไซเคิลกลับไปถึงศูนย์



รูปที่ 2.1 สัญญาณ FM

จะเห็นได้ว่าขนาดของคลื่นวิทยุจะคงที่เสมอไม่ว่าสัญญาณเสียงจะเปลี่ยนแปลงอย่างไร ส่วนที่เปลี่ยนแปลงคือ ความถี่ของคลื่นพาห้เท่านั้น การเปลี่ยนแปลงความถี่ตามความแรงของสัญญาณข่าวสารนั้นเรียกว่า การเบี่ยงเบนความถี่ (Frequency deviation) ถ้ามีการเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาห้มาก ค่าเปลี่ยนแปลงความถี่จะมีค่าสูงเป็นอัตราส่วนโดยตรงต่อกันนั้น ไม่นอญูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้คลื่นพาห์ (Carrier) ที่ยังไม่มอดูเลตคือ

$$\phi(t) = A_c \cos(\omega_c t + \theta) \tag{2-1}$$

ตามปกติค่า θ คือเฟสของคลื่นรูปไซน์ ทั้งนี้โดยอ้างอิงเทียบกับสัญญาณ \cos ดังนั้นการทำให้ แปรผันตามสัญญาณข่าวสาร $m(t)$ ได้กล่าวคือ

$$\theta = k_f m(t) \tag{2-2}$$

เมื่อ k_f คือ ค่าคงที่จะกล่าวว่าเป็นสัญญาณคลื่นรูปไซน์ $\phi(t)$ นั้นเป็นสัญญาณชนิดมอดูเลตเฟส (Phase modulated signal) ซึ่งเรียกว่าสัญญาณพีเอ็ม (PM signal)

อย่างไรก็ตาม ถ้าค่า θ นี้แปรผันตามค่าอินทิเกรตของสัญญาณข่าวสารได้ กล่าวคือ

$$\theta = k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau \tag{2-3}$$

โดยในที่นี้ k_f คือค่าคงที่ที่ซึ่งจะเรียกสัญญาณที่เกิดขึ้นว่าเป็นสัญญาณชนิดมอดูเลตความถี่ (Frequency modulated signal) ซึ่งเรียกว่าสัญญาณเอฟเอ็ม (FM signal)

จากสมการ 2-1, 2-2 จะได้สมการของเอฟเอ็ม คือ

$$\phi_{FM}(t) = A_c \cos\{\omega_c t + k_f \int_{-\infty}^t m(\tau) d\tau\} \tag{2-4}$$

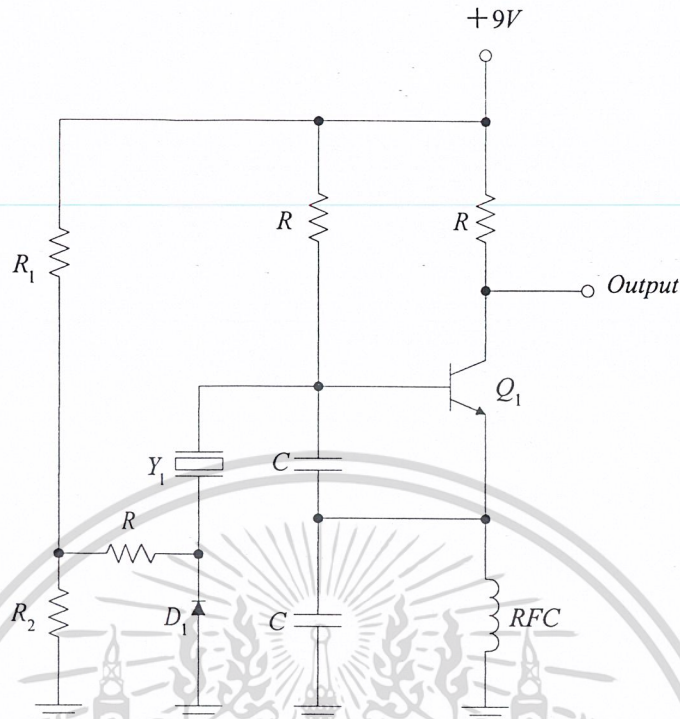
สเปกตรัมจะประกอบด้วยคลื่นพาห์และฮาโมนิกข้างเคียงของความถี่ของสัญญาณข่าวสาร ความสูงของสเปกตรัมต่างๆ สามารถคำนวณได้จาก Bessel's Function

การกำเนิดสัญญาณ FM สามารถทำได้ 2 วิธี คือ

1. วิธี FM โดยตรง (Direct FM)

วิธีการนี้จะต่อวงจรรีแอกแตนซ์เข้ากับแร่บังคับความถี่ (Crystal) แล้วเปลี่ยนความถี่ของคริสตัลอสซิลเลเตอร์ โดยเปลี่ยนค่ารีแอกแตนซ์ของวาร์เพกเตอร์ไดโอด ตัวอย่างเช่น

วงจรในรูปที่ 2.2 เป็นวงจรมอดูเลตอีกชนิดหนึ่ง ประกอบด้วยวาร์เพกเตอร์ไดโอด (D1) ในวงจรเพียซอสซิลเลเตอร์ (Pierce oscillator) แร่บังคับความถี่ (Y1) สำหรับ R1 กับ R2 เป็นวงจรไบแอสให้แก่วาร์เพกเตอร์ แรงดันเสียงก็จะบวกและลบกับไฟไบแอส ทำให้ความจุเปลี่ยนแปลง และความถี่ของออสซิลเลเตอร์ก็เปลี่ยนแปลงไปด้วย



รูปที่ 2.2 วงจรมอดูเลเตอร์ใช้วาแรกเตอร์

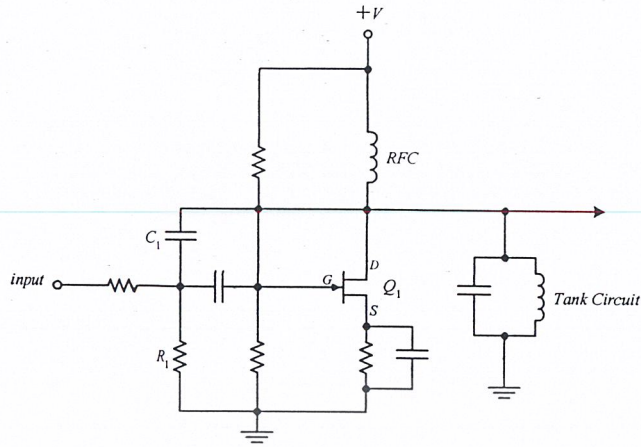
เมื่อสัญญาณเสียงแกว่ง (Swing) หรือเปลี่ยนค่าไปทางบวก แรงดันไบแอสแบบกลับทาง ที่คร่อมวาแรกเตอร์ก็จะเพิ่มขึ้น ความจุจะลดลงทำให้ความถี่ออสซิลเลเตอร์สูงขึ้น เมื่อสัญญาณเสียงแกว่งไปทางลบ ไบแอสกลับทางคร่อมวาแรกเตอร์ก็จะลดลง ความจุของวาแรกเตอร์จะมากขึ้นทำให้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์ลดลง

ถ้าสัญญาณเสียงเป็นโตน (เสียง) 1000 เฮิรตซ์ ความถี่ของออสซิลเลเตอร์จะแกว่งไปมาระหว่างความถี่กลางด้วยอัตรา 1000 ครั้งต่อวินาที (อัตราเบี่ยงเบนนั่นเอง) อัตราการเบี่ยงเบนความถี่จะเท่ากับความถี่ของสัญญาณเสียง ถ้าแอมพลิจูดของสัญญาณเสียงเพิ่มขึ้น ช่วงเปลี่ยนแปลงความจุของวาแรกเตอร์จะกว้างมากขึ้น นั่นคือช่วงความถี่เบี่ยงเบนกว้างขึ้น การมอดูเลชันที่ใช้วาแรกเตอร์นี้ ได้รับความนิยมน้อยเพราะสะดวกและมีเสถียรภาพดีเนื่องจากใช้แร่บั้งคัปความถี่ (Crystal)

รีแอกแตนซ์มอดูเลเตอร์

หลักการของวงจรรีแอกแตนซ์มอดูเลตก็คือ ไบแอส FET หรือทรานซิสเตอร์ เป็นตัวที่ทำหน้าที่เป็นรีแอกแตนซ์ (ความจุหรือความเหนี่ยวนำ) ในวงจรแท่งของออสซิลเลเตอร์ ฉะนั้นเมื่อป้อนสัญญาณเสียงมอดูเลเตอร์ ค่ารีแอกแตนซ์จะแปรเปลี่ยนไป ทำให้ความถี่ของออสซิลเลเตอร์เปลี่ยนแปลงไปด้วย

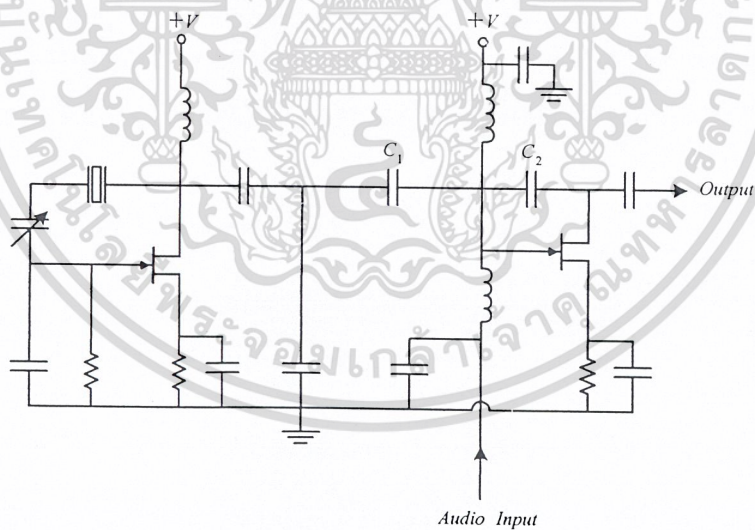
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 วงจรรีแอกแทนซ์มอดูเลเตอร์

2. วิธี FM โดยอ้อม (Indirect FM)

เราใช้วิธีมอดูเลตทางเฟสได้เป็นสัญญาณ PM แล้วเปลี่ยนสัญญาณให้เป็น FM โดยการแก้ผลตอบสนองความถี่ของสัญญาณเสียงที่จะทำการมอดูเลตปกติความถี่เบี่ยงเบนจะมีค่า ± 5 กิโลเฮิรตซ์ (คิดรวม 2 ข้างเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์) โดยทั่วไปแรมบ์กับความถี่จะเปลี่ยนแปลงได้ประมาณ 0.05 % นั่นคือสามารถมอดูเลตให้ความถี่เบี่ยงเบนไปได้ ประมาณ ± 5 กิโลเฮิรตซ์



รูปที่ 2.4 วิธี FM โดยอ้อม ใช้เฟสมอดูเลเตอร์

ความจริงการกำเนิดสัญญาณ FM ทั้ง 2 วิธีก็ให้ผลคล้ายๆ กันจะแตกต่างกันตรงที่ในกรณีเฟสมอดูเลชัน ความถี่เบี่ยงเบนมีค่าเป็นสัดส่วนกับความถี่ของสัญญาณที่มอดูเลต เมื่อความถี่เสียงยิ่งสูงความถี่เบี่ยงเบนยิ่งมาก นั่นคือที่ความถี่ศูนย์ หรือเป็น DC จะไม่มีการมอดูเลต ฉะนั้นเมื่อสัญญาณ PM จากเฟสมอดูเลเตอร์จะต้องถูกแปลงให้เป็นสัญญาณ FM ก็ยังสามารถทำได้โดยนำสัญญาณเสียงมาผ่านกรรรมวิธีเพื่อให้สัญญาณค่าความถี่ต่ำๆ แรงขึ้น ก่อนที่จะป้อนเข้ามอดูเลต

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันฯ หรือเป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันฯ ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

2.2 วงจรกรองความถี่ (Filter)

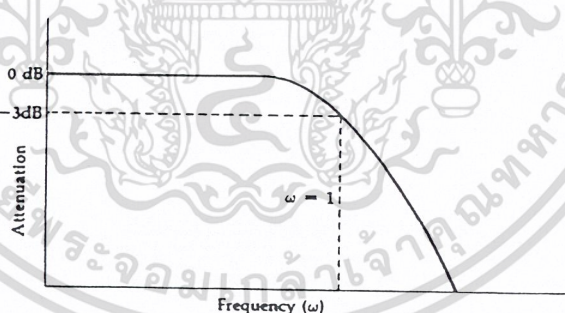
โดยทั่วไปวงจรกรองความถี่แบ่งออกเป็นหลายรูปแบบ ดังนี้

1. วงจรกรองความถี่ชนิด Analog หรือ ชนิด Digital
2. วงจรกรองความถี่ประเภท Passive หรือ Active
3. วงจรกรองความถี่ย่านความถี่เสียง (Audio Frequency) หรือย่านวิทยุ (Radio Frequency)

วงจรกรองความถี่ชนิด Analog ออกแบบมาเพื่อใช้กับสัญญาณ Analog ส่วนวงจรกรองความถี่ชนิด Digital ใช้งานกับสัญญาณ Analog โดยอาศัยเทคนิคทาง Digital มาช่วย ถ้าคำนึงถึงชิ้นส่วน(element) ที่นำมาประกอบเป็นวงจรกรองความถี่ แบ่งออกเป็นประเภท Passive และ Active ชิ้นส่วนวงจรที่ใช้ใน Passive Filter ได้แก่ ตัวต้านทาน (R) , ตัวเก็บประจุ (C) และขดลวดเหนี่ยวนำ (L) ส่วน Active Filter ประกอบด้วยตัวขยายสัญญาณจำพวก ทรานส์ซิสเตอร์ หรือ IC ในรูป Op-amp และตัวต้านทาน , ตัวเก็บประจุ ทำงานร่วมกัน

2.2.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท

วงจรกรองแบบนี้จะมีค่า Q อยู่ที่ระดับปานกลาง (medium Q) จึงมีลักษณะพิเศษตรงที่ทำให้อัตราการขยายของการตอบสนองมีค่าเท่ากันตลอดย่านความถี่ที่ผ่านไปได้ (มีความราบเรียบสม่ำเสมอตลอดย่าน) และไม่มีการเกิดสัญญาณกระเพื่อม มีลักษณะของรูปคลื่นสัญญาณที่ผ่านจากวงจรมีลักษณะดังรูป 2.5 ซึ่งมีความราบเรียบสูงมากแต่ในช่วงการลดทอนของสัญญาณไม่ค่อยชัน ทำให้เกิดการส่งผ่านของแถบความถี่ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มจำนวนของอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติทางรีแอกแตนซ์เข้าไปอีก



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นสัญญาณการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท

สูตรการหาค่าอัตราการลดทอนของวงจรสามารถหาได้จาก

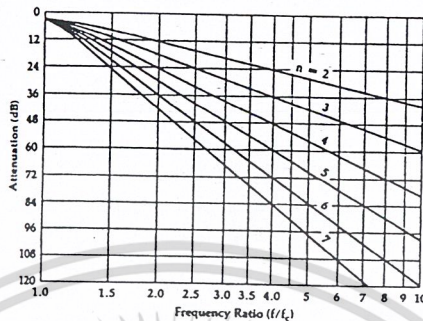
$$A_{dB} = 10 \log \left[1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2n} \right] \quad (2-5)$$

โดยที่ A_{dB} = ค่าอัตราการลดทอนของวงจร

ω = ค่าความถี่ลดทอนที่ต้องการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ ω_c = จุดตัดความถี่ของวงจรกรองความถี่ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง n = จำนวนอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติทางรีแอกแตนซ์ที่ต่อกับวงจรกรองความถี่ นำไปใช้

ซึ่งจากสมการการลดทอนเมื่อนำมาหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าของอัตราการลดทอนและการตอบสนองความถี่ในช่วงต่างๆ แล้วผลที่ได้จะมีลักษณะดังรูป 2.6 โดยเมื่อค่า n เพิ่มขึ้นความชันของกราฟจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำให้ผลที่ได้ใกล้เคียงกับอุดมคติมากขึ้น



รูปที่ 2.6 ลักษณะการส่งผ่านของแถบความถี่เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนอุปกรณรีแอคทีฟ

ในวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท เมื่อทำการนอร์มอลไลซ์ (คิดเสมือนนำความต้านทาน 1 โอห์มไปต่อ) จะได้

$$A_k = 2 \sin \frac{(2k-1)\pi}{2n}, \quad k=1,2,3,\dots,n \tag{2-6}$$

โดย n = จำนวนขององค์ประกอบในวงจรกรองความถี่

A_k = เป็นค่ารีแอคแตนซ์ที่ k ในแลคเคอร์และอาจจะเป็นได้ทั้งตัวเหนี่ยวนำหรือตัวเก็บประจุ ค่าของ A_k หาได้จากตารางที่ 2.1

n	C ₁	L ₂	C ₃	L ₄	C ₅	L ₆	C ₇
2	1.414	1.414					
3	1.000	2.000	1.000				
4	0.765	1.848	1.848	0.765			
5	0.618	1.618	2.000	1.618	0.618		
6	0.518	1.414	1.932	1.932	1.414	0.518	
7	0.445	1.247	1.802	2.000	1.802	1.247	0.445
n	L ₁	C ₂	L ₃	C ₄	L ₅	C ₆	L ₇

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับบุคลากรในหน่วยงานที่ขอรับบริการเท่านั้น ไม่สามารถเผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ตารางที่ 2.1 แสดงตัวอย่างค่าอินดักแตนซ์ โดยใช้วงจรบัตเตอร์เวิร์ท
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการ scaling จะได้ว่า

$$L_{new} = \frac{K_m}{K_f} L_{old} \tag{2-7}$$

$$C_{new} = \frac{1}{K_m K_f} C_{old} \tag{2-8}$$

เมื่อ K_m คือค่าที่กำหนด

$$K_f = 2\pi f_c$$

2.2.2 วงจรกรองความถี่ช่วงผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ธ

วงจรกรองความถี่ช่วงผ่าน จะยอมให้ความถี่ที่เหมาะสมย่านหนึ่ง (ย่านความถี่ผ่าน) เท่านั้นที่ผ่านไปได้กล่าวคือ ย่านความถี่สูงและต่ำจะถูกบล็อกเอาไว้ ช่วงความถี่ที่ผ่านได้ เรียกว่า "ช่วงกว้างความถี่ (Bandwidth :BW)" โดยจะหาได้จาก

$$BW = f_v - f_L \tag{2-9}$$

และค่าของความถี่กลาง (f_0) สามารถหาได้โดย

$$f_0 = \sqrt{f_v \cdot f_L} \tag{2-10}$$

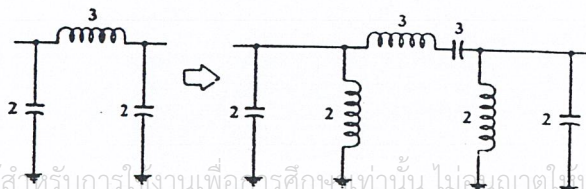
เมื่อ f_v และ f_L คือ lower และ upper frequency ของช่วงผ่าน

พารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งของ bandpass filter คือ selectivity หรือ Q หาได้จาก

$$Q = \frac{f_0}{BW} \tag{2-11}$$

วิธีสร้างวงจรกรองความถี่ช่วงผ่านมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการแปลงความต้องการของวงจรกรองความถี่ช่วงผ่าน ไปเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจากสมการที่ 2.10
2. ทำการหาอันดับที่เหมาะสมของวงจร โดยพิจารณาจากกราฟตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
3. หาผลตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
4. ทำการแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านไปเป็นวงจรกรองความถี่ช่วงผ่าน โดยเพิ่มส่วนประกอบเข้าไปในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ถ้าหากองค์ประกอบเป็นตัวเก็บประจุก็ใส่ตัวเหนี่ยวนำเพิ่มเข้าไปและเช่นกันกับตัวเหนี่ยวนำโดยค่าที่เพิ่มเข้าไบนั้นมีค่าเท่ากับองค์ประกอบตัวเดิมที่มีอยู่ และองค์ประกอบที่เพิ่มเข้าไปในวงจรมันจะขนานหรืออนุกรมตามองค์ประกอบตัวเดิมที่เพิ่มเข้าไปดังรูปที่ 2.7



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งรูปที่ 2.7 การแปลงองค์ประกอบวงจรจากควมถี่ต่ำผ่านไปเป็นความถี่ช่วงผ่าน

5. ทำการสเกลลิงค่าขององค์ประกอบจากสูตรดังนี้
สำหรับส่วนที่เป็นรีโซแนนซ์ขนาน

$$C = \frac{C_n}{2\pi RB} \quad (2.12)$$

$$L = \frac{RB}{2\pi f_0^2 L_n} \quad (2.13)$$

สำหรับส่วนที่เป็นรีโซแนนซ์อนุกรม

$$C = \frac{B}{2\pi f_0^2 C_n R} \quad (2.14)$$

$$L = \frac{RL_n}{2\pi B} \quad (2.15)$$

โดย R = โหลดอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ

B = ความกว้างแถบความถี่ 3-dB ที่ต้องการ

f_0 = ความถี่กึ่งกลางของวงจรความถี่ช่วงผ่าน

L_n = ค่าตัวเหนี่ยวนำนอร์มอลไลซ์ของวงจรความถี่ช่วงผ่าน

C_n = ค่าตัวเก็บประจุนอร์มอลไลซ์ของวงจรความถี่ช่วงผ่าน

2.3 วงจรมิกเซอร์(Mixer)

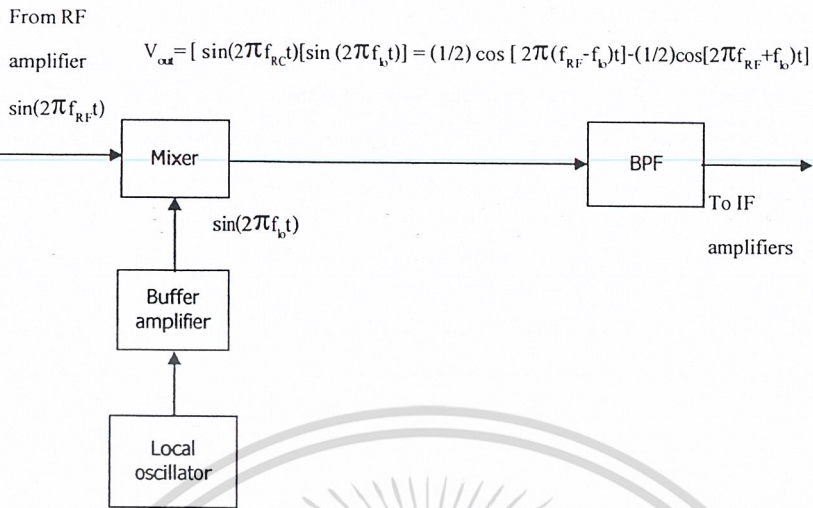
วงจรมิกเซอร์หรือวงจรคอนเวอร์เตอร์ มีหน้าที่ในการลดความถี่จากความถี่วิทยุ (RF) มาเป็นความถี่กลาง (IF) ในเครื่องรับวิทยุ หรือทำการเพิ่มความถี่จากความถี่กลางเป็นความถี่วิทยุในเครื่องส่งวิทยุ เนื่องจากการมอดูเลตโดยตรงกับความถี่วิทยุทำได้ได้ยาก จึงทำการมอดูเลตกับความถี่ IF ก่อนแล้วจึงขยายความถี่ขึ้นเป็นความถี่วิทยุ หรือการดีมอดูเลตกับความถี่วิทยุ การมิกซ์สัญญาณทำได้โดยใช้วงจรมิกเซอร์ โดยการป้อนสัญญาณอินพุต 2 อินพุต คือความถี่วิทยุกับความถี่โลคอล การผสมสัญญาณวิทยุเข้ากับความถี่ที่กำหนดได้จากวงจรกำเนิดความถี่โลคอล (Local Oscillators) เรียกวิธีนี้ว่า Heterodyning วงจรมิกเซอร์ส่วนใหญ่อาศัยอุปกรณ์อนลิเนียร์ เช่น ไดโอด รูปที่ 2.7 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมิกเซอร์ซึ่งเอาต์พุตของวงจรมิกเซอร์เป็นผลคูณของความถี่วิทยุและความถี่โลคอลดังสมการ

$$V_{out} = [\sin 2\pi f_{RF} t][\sin 2\pi f_{LO} t]$$

เมื่อ f_{RF} คือ ความถี่วิทยุที่เข้า (Radio Frequency Input)

f_{LO} คือ ความถี่โลคอล (Local Oscillators)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แสดงบล็อกโคอะแรมของวงจรมิกเซอร์

ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้จากการคูณความถี่ทั้งสองจะเป็นเอาต์พุตของวงจรมิกเซอร์ คือ

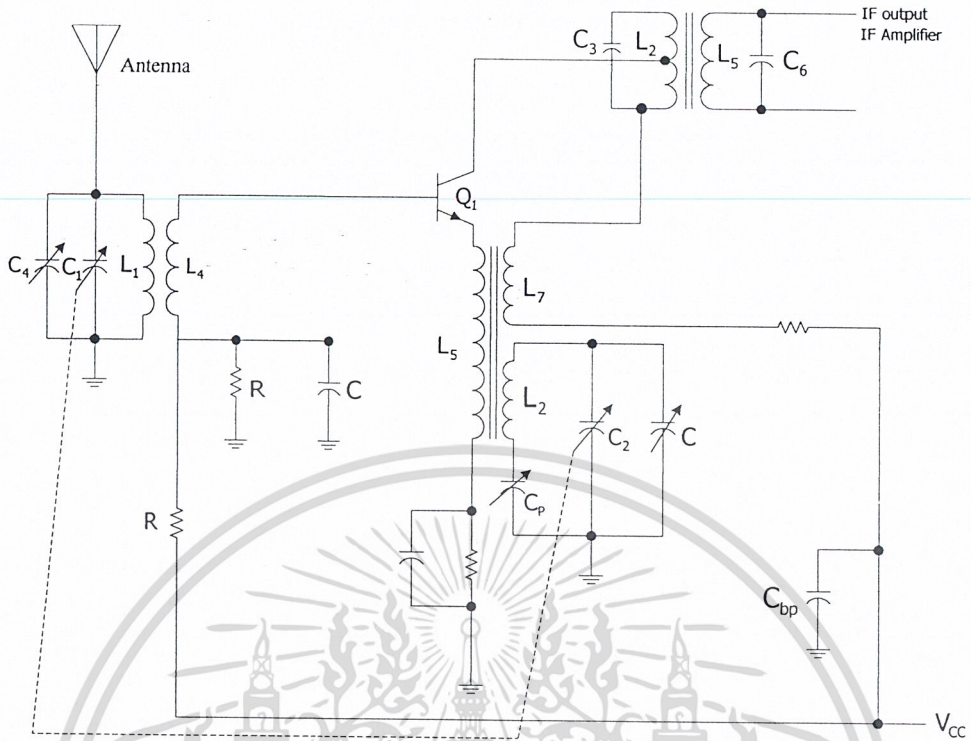
$$V_{out} = \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_{RF} - f_{LO})t] - \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_{RF} + f_{LO})t]$$

เมื่อนำสัญญาณที่ได้ผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หรืออาจเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านจะได้เอาต์พุตของวงจรกรองความถี่ คือ

$$V_{out} = \frac{1}{2} \cos[2\pi(f_{RF} - f_{LO})t]$$

ซึ่งผลต่างของความถี่กับความถี่โลกอลจะเรียกว่าความถี่กลาง (Intermediate Frequency) หรือความถี่ IF หรือความถี่กึ่งกลางนั่นเอง อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าอุปกรณ์อนาลิเนียร์จะใช้ในวงจรมิกเซอร์ แต่การใช้อุปกรณ์จำพวกทรานซิสเตอร์จะเป็นที่นิยมมากกว่าไดโอด เนื่องจากสามารถปรับปรุงและพัฒนาด้วยวิธีการต่างๆ ได้มากกว่า เนื่องจากเอาต์พุตของวงจรมิกเซอร์เป็นผลคูณของความถี่สองความถี่ ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสีย(Loss)เกิดขึ้น ซึ่งการสูญเสียนั้นจะเรียกว่า Conversion Loss เป็นผลทำให้แอมพลิจูดของสัญญาณ IF มีขนาดต่ำ รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างวงจรมิกเซอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

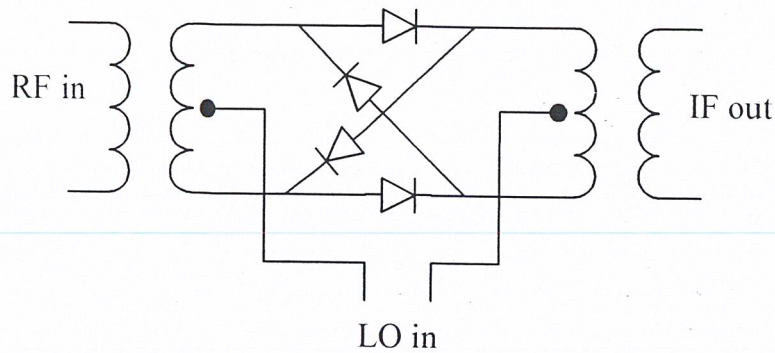


รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างวงจรมิกเซอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์

จากรูปที่ 2.9 วงจรมิกเซอร์มีประสิทธิภาพในการทำงาน มีราคาถูกเหมาะสมกับระบบเอเอ็มธรรมดาทั่วไป สำหรับการทำงานของวงจรรูปที่ 2.8 นั้น สัญญาณวิทยุจากสายอากาศจะถูกเลือกหรือถูกจูนจาก L_1, C_1 ผ่านหม้อแปลงไปยังอีกด้านหนึ่ง โดยมีทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่ที่ถูกผลิตจากวงจรกำเนิดความถี่โลคอล เรียกว่าเป็น "Self excited" มิกเซอร์ เพราะวงจรมิกเซอร์อาศัยสัญญาณความถี่โลคอลที่ได้จากการป้อนพลังงานย้อนกลับจากพลังงานของคความถี่วิทยุที่รับเข้ามาได้ ทำให้ L_2 และ C_2 ผลิตความถี่ออกมา โดยไม่ต้องอาศัยจากแหล่งภายนอก

ในตอนเริ่มต้นกำลังงานถูกส่งให้กับทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณวิทยุและสัญญาณรบกวนไปพร้อมกันด้วย กำลังงานส่วนหนึ่งจะถูกส่งไปให้กับวงจร tank (L_1, C_1) เมื่อมีพลังงานเพียงพอวงจร tank ก็จะมีผลผลิตความถี่โลคอลออกมาเป็นความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ และความถี่ที่ได้จะกลับปลั่งผ่าน L_2 และ L_3 เข้าทางขาคีมิตเตอร์ของทรานซิสเตอร์ Q_1 ทำให้เอาต์พุตทางขาคอลเลกเตอร์เป็นผลรวมและผลต่างของความถี่ทั้งสองนั่นเอง L_3 และ C_3 ทำหน้าที่จูนความถี่ให้ตรงกับความถี่ปานกลางที่ต้องการ โดยการทำงานเป็นวงรอบนี้จะเกิดขึ้นตลอดที่มีความถี่วิทยุเข้ามา C_1 และ C_2 ทำหน้าที่เลือกความถี่วิทยุและความถี่โลคอลไปพร้อมๆ กัน เพื่อให้ได้ความถี่กึ่งกลางเท่าเดิม แต่ข้อเสียของวงจรนี้คือ ไม่สามารถกำจัดความถี่เงา(Image Frequency)ได้ และทรานซิสเตอร์ยังผลิตฮาร์โมนิคความถี่อื่นออกมาด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจร Diode Ring Mixer

จากรูปที่ 2.10 เป็นวงจรมิกเซอร์ที่ใช้ไดโอด 4 ตัวในการทำงาน ซึ่งเป็นวงจรที่สำคัญมากในการสื่อสารปัจจุบัน วงจรนี้เรียกว่า "Balanced Modulators" หรือ "Product Modulator" หรือ "Product Detector" วงจรประเภทนี้ถูกใช้ในวงจรเครื่องรับและเครื่องส่งทั้งในระบบเอเอ็มและเอฟเอ็ม และในวงจรมอดูเลชันหลายๆวงจร เช่น PSK, QAM วงจรนี้มีข้อดีตรงที่ว่ามอดูเลชันที่ต่ำและกำจัดคลื่นพาห้ได้ดี แต่มีข้อเสียตรงที่ว่า ในวงจรมอดูเลเตอร์ของ AM-DSBSC ถ้าหม้อแปลงที่ใช้มีการเทปไม่ตรงจุดกึ่งกลางจะเกิดการไหลของกระแสลูปบนและลูปล่างไม่เท่ากัน จะปรากฏความถี่คลื่นพาห้รวมไปกับสัญญาณเอาต์พุตด้วย มีผลทำให้ประสิทธิภาพในการกคความถี่ของคลื่นพาห้ไม่ดีได้ นอกจากวงจรที่กล่าวมาแล้วยังมี IC ที่ทำหน้าที่เป็นมิกเซอร์อีก เช่น

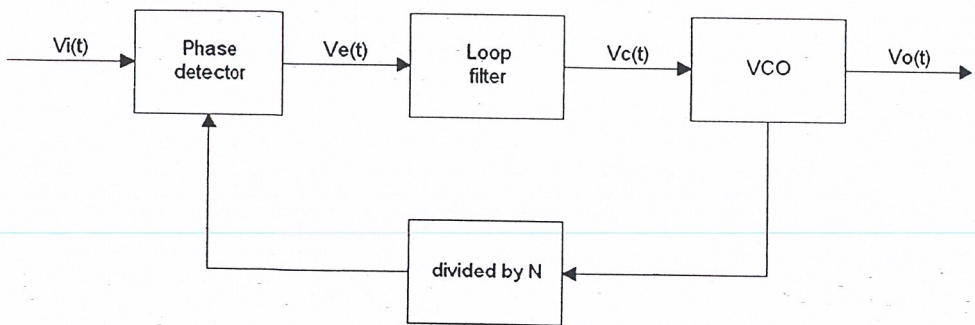
- NE/SE6024 : Double - Balanced Mixer and Oscillators
- MC1496 : Balanced Modulators and Balanced Demodulators

2.4 ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบใช้เฟสล็อกกลูป (Phase-Locked Loop Frequency Synthesizer)

ระบบสังเคราะห์ความถี่แบบใช้เฟสล็อกกลูปเป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่ชนิดโปรแกรมได้ ทำหน้าที่ผลิตสัญญาณความถี่ขนาดพอเหมาะ และให้มีความถี่ตามที่เรากำหนดโดยการประยุกต์ใช้งานของเฟส ล็อกกลูป ซึ่งเป็นระบบป้อนกลับที่มีการเปลี่ยนความถี่และเฟสของวงจรของออสซิลเลเตอร์ตามสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามา บล็อกไดอะแกรมเบื้องต้นของระบบสังเคราะห์ความถี่แบบใช้เฟสล็อกกลูป แสดงดังรูปที่ 2.11 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน ดังนี้

1. ส่วนเปรียบเทียบเฟส (Phase Detector : PD)
2. ลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter:LF)
3. วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (Voltage Control Oscillator : VCO)
4. วงจรหารความถี่ที่สามารถโปรแกรมได้ (Programmable Divider)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 บล็อกไดอะแกรมของวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้เฟสล็อกกลู

สามารถอธิบายการทำงานคร่าว ๆ ได้ดังนี้ ขณะที่ยังไม่มีสัญญาณเข้าไปในระบบ แรงดันควบคุม $V_c(t)$ จะเท่ากับศูนย์ วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะทำงานโดยตั้งความถี่ไว้ที่ f_0 เรียกว่า ความถี่ฟรีรันนิ่ง (Free Running Frequency) ถ้ามีสัญญาณเข้าไปในระบบ เฟสดีเทกเตอร์จะทำการเปรียบเทียบเฟสและความถี่ของสัญญาณอินพุต f_R กับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน ถ้าเกิดความแตกต่างของสัญญาณทั้งสองเนื่องจากความถี่ไม่ตรงกันจะเกิดแรงดันคลาดเคลื่อนออกมา $V_c(t)$ แรงดันคลาดเคลื่อนนี้จะถูกกรองผ่านวงจรลูปฟิลเตอร์ ขยาย แล้วป้อนให้กับวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน ในกรณีนี้แรงดันควบคุม $V_c(t)$ จะไปบังคับความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันให้เปลี่ยนไปในทิศทางที่จะลดความถี่ที่แตกต่างระหว่างความถี่ f_0 กับความถี่ f_R ใกล้เคียงกับความถี่ f_0 จากการป้อนกลับของเฟสล็อกกลูซึ่งสัญญาณที่ป้อนกลับไปยังลูปฟิลเตอร์จะเป็นความถี่เอาต์พุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันที่ถูกหารโดย N จะทำให้วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันซึ่งโครโมสหรือล็อก (lock) กับสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้ามา ขณะที่ทำการล็อกนั้นความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุตพอดี

ในสภาวะล็อกความถี่จะได้ว่า

$$f_R = f_d \tag{2.16}$$

และความถี่ที่ได้จากการหาร

$$f_d = f_0 / N \tag{2.17}$$

ดังนั้นความถี่ที่เอาต์พุตจะได้เป็น

$$f_0 = Nf_i \tag{2.18}$$

แต่ในสภาวะล็อกความถี่ เฟสของสัญญาณทั้งสองจะยังคงต่างกันอยู่ซึ่งมีความจำเป็นต่อการผลิตแรงดันคลาดเคลื่อน $V_c(t)$ ที่จะไปคอยปรับความถี่ถึงวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน จากค่าความถี่ฟรีรันนิ่งให้เท่ากับความถี่ที่เข้ามา ดังนั้นเฟสล็อกกลูจะยังคงรักษาสภาพการล็อกอยู่ การที่ระบบสามารถที่ปรับตัวเองทำให้เฟสล็อกกลูสามารถติดตามการล็อกกับระบบซึ่งจะขึ้นอยู่กับแรงดันคลาดเคลื่อน (capture range) จะขึ้นอยู่กับขอบแบนด์ของวงจรรองความถี่และอัตราขยายลูปปิดของ

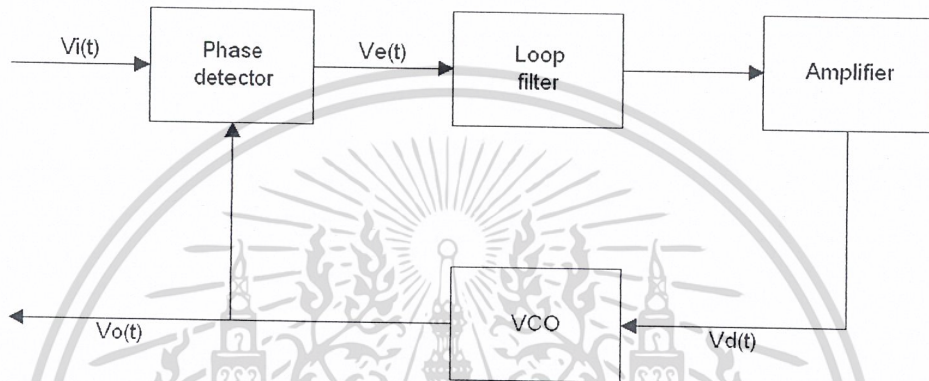
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบทั้งหมด เฟสล็อกกลุ่ที่มีกรหารความถี่ชนิด โปรแกรมได้ภายในลูบเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการสังเคราะห์ความถี่ที่มีค่ามากจากความถี่อ้างอิงความถี่เดียว

คุณสมบัติที่ต้องการของวงจรสังเคราะห์ความถี่จะต้องผลิตสัญญาณความถี่ขนาดพอเหมาะและให้มีความถี่ตามที่เรากำหนด ช่วงความถี่ใช้งานของวงจรสังเคราะห์ความถี่จะจำกัดอยู่ในช่วงที่แน่นอนแล้วแต่การใช้งานและความละเอียดของความถี่ที่เปลี่ยนแปลงได้ที่ละขั้น ซึ่งเรียกว่า รีโซลูชัน (resolution)

2.4.1 ระบบเฟสล็อกกลุ่

ระบบเฟสล็อกกลุ่เบื้องต้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 บล็อกไดอะแกรมของวงจรเฟสล็อกกลุ่

แต่ละส่วนมีผลต่อคุณสมบัติและการทำงานของระบบ หน้าทีของแต่ละส่วนจะอธิบายได้ดังนี้

1. เฟสดีเทคเตอร์ (Phase detector) ทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสของอินพุตซึ่งจะมีสองผลของเฟสที่ต่างกันเรียกว่า เฟสเออเรอร์ (Phase error) เฟสเออเรอร์นี้จะมีค่าน้อยที่สุดเป็นศูนย์ และจะมีค่ามากที่สุดเป็น $\pi/2$ เฟสดีเทคเตอร์จะทำการเปลี่ยนเฟสเออเรอร์นี้ให้กลายเป็นระดับโวลต์เตจด้วยค่าคอนเวอร์ชันเกน K_d (volt/radian) ลักษณะการเปรียบเทียบเฟสของอินพุตทั้งสองของเฟสดีเทคเตอร์จะได้แสดงดังรูปที่ 2.13

2. ลูบฟิลเตอร์ (Loop filter) ทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่สูงที่ออกมาจากเฟสดีเทคเตอร์ เนื่องจากเฟสดีเทคเตอร์ให้เอาต์พุตเป็นสัญญาณคิซีที่มีเอซีโวลต์เตจร่วมมาด้วย สัญญาณความถี่ที่ได้เกิดจากความต่างเฟส ยิ่งต่างเฟสมากความถี่ยิ่งสูง ดังนั้นลูบฟิลเตอร์จึงช่วยกรองเอาสัญญาณความถี่สูงซึ่งแสดงว่ามีความต่างเฟสมากออกทำให้ระบบสามารถแคปเจอร์ สัญญาณได้ในช่วงหนึ่งและช่วยให้ระบบรักษาการล็อกไว้ได้อีกด้วย

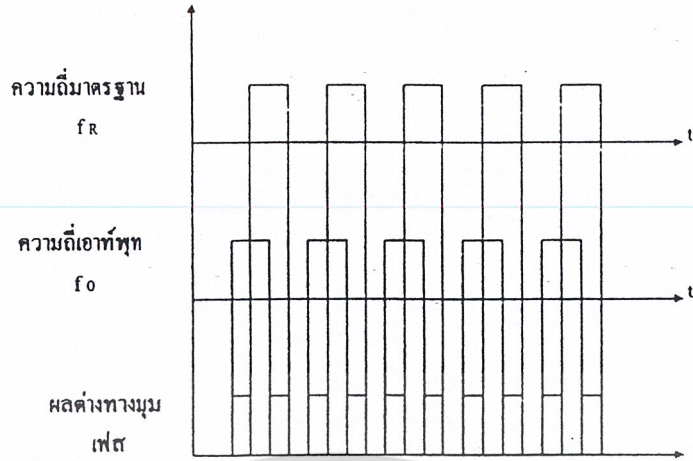
3. วงจรขยายสัญญาณ (Amplifier) ใช้ปรับขนาดสัญญาณไฟตรง เพื่อให้การควบคุมดีขึ้น เอาต์พุตของวงจรมีจะป้อนให้แก่วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน

4. วงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (Voltage-Controlled Oscillator) จะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณความถี่โดยการควบคุมระดับโวลต์เตจอินพุตด้วยคอนเวอร์ชันเกน K_0 (radian/volt) ระดับโวลต์เตจนี้จะได้จากเอาต์พุตของลูบฟิลเตอร์

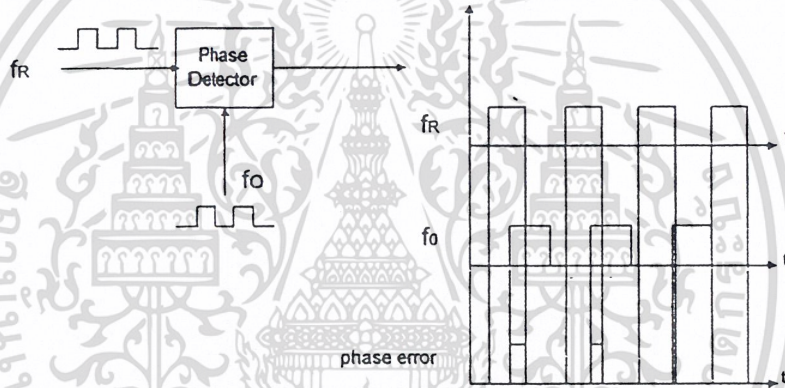
ความถี่ที่สื่อออกมาจากลูบฟิลเตอร์จะมีผลทำให้เอาต์พุตของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันเปลี่ยนความถี่ด้วยเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 ผลต่างเฟสเมื่อความถี่อินพุตเท่ากัน



รูปที่ 2.14 ผลต่างเฟสเมื่อความถี่อินพุตไม่เท่ากัน

การทำงานของระบบเฟสล็อกสามารถอธิบายอย่างคร่าว ๆ ได้ดังนี้ เฟสดีเทกเตอร์จะเปรียบเทียบเฟสของสัญญาณอินพุต $V_i(t)$ กับความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันและทำให้ได้เออเรียร์โวลท์เตจ $V_e(t)$ และกรองผ่านลูปฟิลเตอร์ไปยังคอนโทรลอินพุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันในรูปของแรงดัน เพื่อควบคุมความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน

ตามปกติเมื่อไม่มีสัญญาณอินพุตป้อนให้กับระบบเฟสล็อกเออเรียร์โวลท์เตจที่ผ่านลูปฟิลเตอร์ $V_e(t)$ ในฟีดแบ็คลูปจะมีค่าเป็นศูนย์ วงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะทำงานที่ความถี่ศูนย์กลาง $\omega_0 = 2\pi f_0$ ซึ่งเราเรียกว่า ความถี่ฟรีรันนิ่งของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน

ถ้ามีสัญญาณอินพุตเป็นเอซีป้อนให้กับระบบเฟสล็อกและสัญญาณดังกล่าวมีความถี่อินพุต

$\omega_R = 2\pi f_R$ โกล้เดียวกับความถี่ฟรีรันนิ่งเพียงพอ การฟีดแบ็คของเฟสล็อกจะทำให้ได้เออเรียร์โวลท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปจำหน่ายให้ผู้อื่นบนด้านการค้า
 เติงไปขับวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันให้มีความถี่ซึ่ง โครในสัทกับความถี่อินพุตซึ่งแสดง
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิใช้ต้นฉบับเอกสารและตัวอย่างอ้างอิงใดๆ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ว่าระบบเฟสล็อกมีความถี่เอาต์พุตกับกับความถี่ของสัญญาณอินพุต

การทำงานของระบบเฟสล็อกสามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะตามคุณสมบัติของรูปดังนี้

ก. เมื่อระบบไม่อยู่ในสภาวะล็อก $\omega_R \neq \omega_0$

จากเฟสล็อกในรูปแบบที่ 2.18 เราสมมติสัญญาณ V_i และ V_o เป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีค่าเป็น

$$\begin{aligned} V_i(t) &= E_i \cos(\omega_i t + \theta_i) \\ V_o(t) &= E_o \cos(\omega_o t + \phi_o) \end{aligned} \quad (2.19)$$

ถ้าเฟสดีเทกเตอร์มีคุณสมบัติเป็นอนาล็อกมัลติพลายเออร์ เราจะได้สัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทกเตอร์เป็น

$$V_c(t) = K_d \cos[(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i - \phi_o] + K_d \cos[(\omega_i + \omega_o)t + \theta_i + \phi_o] \quad (2.20)$$

เมื่อนำสัญญาณผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะได้ว่า

$$V_d(t) = K_d \cos[(\omega_i - \omega_o)t + \theta_i - \phi_o] \quad (2.21)$$

เนื่องจาก V_i และ V_o ไม่ซิงโครไนซ์กัน ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทกเตอร์ V_d จะเป็นสัญญาณรูปคลื่นไซน์ที่มีแอมพลิจูดสูงสุดเท่ากับ K_d และมีความถี่เชิงมุมเท่ากับความถี่เชิงมุมระหว่างสัญญาณและ V_o คือ ω_i และ ω_o มีค่าแตกต่างกันมาก ดังนั้นโวลเตจ V_d จะไม่สามารถผ่านลูปฟิลเตอร์ได้ ทำให้ได้ค่า V_c และการฟีดแบ็คของลูปจะไม่มีผลอะไรคือไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงใด ๆ ภายในลูป เอาต์พุตโวลต์เดจของวงจรรอสซิทเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะมีค่าอยู่ที่ความถี่ฟรีรันนิ่ง แต่ถ้า $\omega_i - \omega_o = \pm \omega$ มีค่าน้อยกว่าแถบความถี่ของลูปซึ่งกำหนดได้โดยพารามิเตอร์ของลูปและการฟีดแบ็คจะมีผลทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะล็อกได้

ข. เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะล็อก ($\omega_i = \omega_o$)

ในกรณีที่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรรอสซิทเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันมีความถี่ซิงโครไนซ์กับสัญญาณอินพุต V_i สัญญาณเอาต์พุต V_o จะมีค่าเป็น

$$V_o = E_o \cos(\omega_i t + \psi_o) \quad (2.22)$$

นอกจากนั้นค่าของเฟสของสัญญาณเอาต์พุต จะเป็นลิเนียร์ฟังก์ชันกับเวลาซึ่งมีค่าเป็น

$$\phi_o = (\omega_i - \omega_o)t + \psi_o \quad (2.23)$$

และสัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทกเตอร์หรือสัญญาณเออริเออร์จะกลายเป็นสัญญาณดีซี มีค่าเท่ากับ

$$V_d = K_d \cos(\theta_i - \psi_o) \quad (2.24)$$

ลูปฟิลเตอร์จะยอมให้สัญญาณดีซี V_d ผ่านได้และมีค่าเท่ากับ

$$V_d = K_d \cos(\theta_i - \psi_o) \quad (2.25)$$

วงจรรอสซิทเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะเป็นฟรีควานซีโมดูลเทคคอสซิทเลเตอร์ ความถี่เชิงมุมที่เปลี่ยนแปลงทันทีทันใดของวงจรรอสซิทเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (ω_{inst}) จะเป็นลิเนียร์ฟังก์ชันกับสัญญาณคอนโทรลอินพุต V_c โดยรอบความถี่เชิงมุมศูนย์กลาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\omega_{inst} = \frac{d(\omega_o t + \phi_o)}{dt} = \omega_o + K_o V_d$$

$$\frac{d(\phi_o)}{dt} = K_o V_d$$
(2.26)

เมื่อ K_o เป็นคอนเวอร์ชันคอนสแตนต์ซึ่งหมายถึงความไวในการมอดูเลชันของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน

แทนค่าสมการ 2.25 ลงใน 2.26 จะได้

$$\omega_i - \omega_o = K_d K_o \cos(\theta_i - \psi_o)$$

$$\psi_o = \theta_i - \cos^{-1}[(\omega_i - \omega_o) / K_d K_o]$$
(2.27)

ดังนั้นสัญญาณเอาต์พุตของเฟสดีเทกเตอร์ V_d สามารถเขียนได้เป็น

$$V_d = (\omega_i - \omega_o) / K_o$$
(2.28)

ส่วนประกอบคี่ซึ่ของเฟสดีเทกเตอร์เอาต์พุต V_d จะผ่านวงจรรองความถี่ต่ำผ่านไปเป็นคอนโทรลโวลท์เทจให้กับอินพุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน

จากสมการ 2.28 จะเห็นได้ชัดเจนว่า สัญญาณคี่ซึ่ V_d จะไปทำให้ความถี่เชิงมุมของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันมีค่าเปลี่ยนไปจากศูนย์กลางของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันคือ ω_o ไปเท่ากับความถี่เชิงมุมของสัญญาณอินพุต ω_i นั่นคือ

$$\omega_{inst} = \omega_o + K_o V_d = \omega_o + (\omega_i - \omega_o) = \omega_i$$
(2.29)

ถ้าความแตกต่างของความถี่เชิงมุมเริ่มต้น $\omega_i - \omega_o$ มีค่าน้อยกว่าผลคูณของ $K_d K_o$ อย่างมาก สมการ 2.28 จะมีค่าเป็น

$$\theta_i - \psi_o \cong \cos^{-1} 0 = \pi/2$$
(2.30)

จากสมการ 2.30 หมายความว่าถ้าความถี่ออฟเซทระหว่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณจากวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะมีค่าน้อยเมื่อลูบไม่อยู่ในสภาวะล็อกและสัญญาณจากวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะมีเฟสต่างกับสัญญาณอินพุต 90 องศาเมื่อลูบอยู่ในสภาวะล็อก หรือเฟสควอดราเจอร์จะสอดคล้องกับ $\omega_i = \omega_o$ ด้วยเหตุผลนี้จึงแทนค่า ψ_o ด้วยค่าเฟสเอาต์พุต θ_o ดังนั้น

$$\theta_o = \psi_o - \pi/2$$
(2.31)

เอาต์พุตโวลท์เทจของเฟสดีเทกเตอร์เขียนได้ใหม่เป็น

$$V_d = K_d \cos(\theta_i - \psi_o)$$

$$= K_d \cos[(\theta_i - \theta_o) - \pi/2]$$

$$= K_d \sin(\theta_i - \theta_o)$$
(2.32)

และจากสมการ 2.30 และ 2.31 จะได้ค่าเฟสเออเรอร์เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\theta_i - \theta_o = \sin^{-1}[(\omega_i - \omega_o) / K_d K_o]$$
(2.33)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งนั้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก แล่งหรือหาและต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อผลต่างของเฟส $\theta_i - \theta_o$ มีค่าน้อยเพียงพอจะได้ว่า

$$V_d = K_d(\theta_i - \theta_o) \cong K_d\theta_c \quad (2.34)$$

เมื่อ $\theta_c = \theta_i - \theta_o$ แต่เนื่องจากคุณสมบัติของเฟสดีเทคเตอร์แบบนี้เมื่อลูปเข้าสู่การล็อก สัญญาณของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน จะมีเฟสต่างไปจากสัญญาณอินพุต 90° คือ $[\theta_i - (\theta_o + \pi/2)]$ ลักษณะของเฟสควอดคราเจอร์ ดังนั้นเฟสดีเทคเตอร์จะให้เอาต์พุตโวลต์เฉจที่เป็นสัดส่วนกับความต่างเฟสระหว่างสัญญาณอินพุต V_i กับสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน คือ V_o ในลักษณะของควอดคราเจอร์ คือ

$$\begin{aligned} V_d &= K_d[(\theta_i - \theta_o) - \pi/2] \\ &= K_d(\theta_c - \pi/2) \end{aligned} \quad (2.35)$$

สัญญาณเฟสเซ็นซิติฟ V_d นี้จะผ่านลูปฟิลเตอร์ไปป้อนให้กับคอนโทรลอินพุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันเพื่อแก้ไขให้ความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันเปลี่ยนจาก ω_o ไปเป็น ω_i และคำสั่งการล็อกให้คงอยู่ได้

$$\begin{aligned} V_d &= (\omega_i - \omega_o)/K_o \\ \omega_i &= \omega_o + K_o V_d \end{aligned} \quad (2.36)$$

จากสมการ 2.31 และ 2.32 จะหาค่าของเฟสเออเรอร์ θ_c ได้เป็น

$$\theta_c = \pi/2 + [(\omega_i - \omega_o)]/K_d K_o \quad (2.37)$$

จากสมการ 2.22 จะสังเกตได้ว่าเมื่อ $\omega_i = \omega_o$ โวลต์เฉจเอาต์พุตของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะมีเฟสควอดคราเจอร์ คือ มีเฟสต่างไปจากเฟสของสัญญาณอินพุตโวลต์เฉจ 90° ไปสู่ค่าสูงสุด 180° ที่อยู่เหนือสุดของพิคการล็อก และถ้า ω_i เคลื่อนไปทางต่ำกว่า ω_o มุมเฟสจะลดลงจาก 90° ไปสู่ค่า 0° ที่ต่ำสุดของพิคการล็อก

ถ้าความถี่ของสัญญาณอินพุตเปลี่ยนแปลงไปอย่างช้า ๆ ระบบเฟสล็อกลูปจะสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงและอยู่ในสภาวะล็อกได้โดยจะเพิ่มค่า θ_c ให้มากขึ้นตามเวลา θ_c ที่เพิ่มขึ้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นดีซีเออเรอร์โวลต์เฉจ V_d ไปขับให้ความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันเลื่อนไปเท่ากับความถี่ของสัญญาณอินพุต โดย V_d จะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับผลต่างระหว่าง ความถี่สัญญาณอินพุต ω_i กับความถี่ฟรีรันนิง ω_o ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน แต่ถ้าจะสามารถแทรกักกิ้งได้นั้นจะต้องมีเฟสเออเรอร์น้อย

สมมติว่าระบบเฟสล็อกลูปมีเฟสอินพุตเปลี่ยนแปลงเป็นสเต็ปเท่ากับ $\Delta\omega = \omega_i - \omega_o$ ลูปต้องการโวลต์เฉจควบคุมเพื่อ ไปขับวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันให้มีความถี่เลื่อนไปเท่ากับ $\Delta\omega$ ดังนั้น V_c จะมีค่าเป็น

$$V_c = \Delta\omega / K_o \quad (2.38)$$

เมื่อลูปเข้าสู่สภาวะคงที่ $V_c = V_d F(s)$ เมื่อ $F(s)$ คืออัตราขยายต่อสัญญาณดีซีของลูปฟิลเตอร์ สัญญาณ V_c จะทำให้ลูปเข้าสู่สภาวะล็อกคั้งเดิม ดังนั้นเฟสเออเรอร์จะต้องเป็น

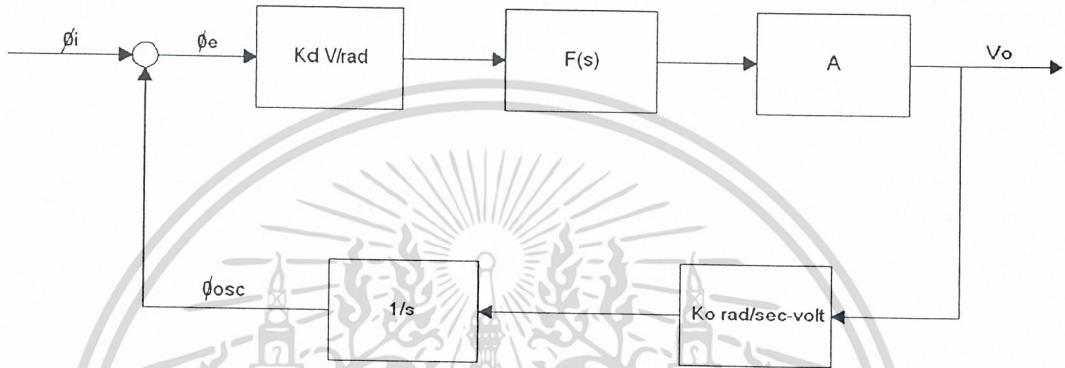
$$\begin{aligned} \theta - \pi/2 &= V_d K_d \\ &= \Delta\omega / K_o K_d F(s) \end{aligned} \quad (2.39)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเฟสเออเรอร์มีค่าเพิ่มขึ้นลูบจะสามารถปรับตัวเองให้ความถี่เอาต์พุตแทรกตามการเปลี่ยนแปลงของอินพุตได้คงเดิม

เมื่อระบบอยู่ในสภาวะลือก เราสามารถจะวิเคราะห์ระบบเฟสล็อกกลูบได้ในลักษณะระบบป้อนกลับที่เป็นลิเนียร์ โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์ระบบป้อนกลับทั่วไปด้วยลาปลาซทรานส์ฟอร์ม และสมการคิฟเฟอร์เรนเซียล

2.4.2 การหาทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของระบบเฟสล็อกกลูบ



รูปที่ 2.15 บล็อกไดอะแกรมของทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของเฟสล็อกกลูบ จากรูปที่ 2.15

- K_d = ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของเฟสดีเทคเตอร์ (โวลต์/เรเดียน)
- $F(s)$ = ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของลูปฟิลเตอร์
- A = อัตราขยายของวงจรรขยายสัญญาณ
- K_o = ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันของวงจรรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน (เรเดียน/โวลต์)

จาก
$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \tag{2.40}$$

และ
$$\omega = s\theta$$

$$\theta = \int \omega dt$$

และ
$$\theta = \frac{\omega}{s} \tag{2.41}$$

เนื่องจากเอาต์พุตของวงจรรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันจะเป็นค่าความถี่ที่ขึ้นอยู่กับอินพุตที่เป็นสัญญาณไฟตรง แต่เราต้องการค่าเฟส ϕ_{osc} เพื่อที่จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณอินพุต ϕ_i ฉะนั้นจึงต้องใส่บล็อก $1/s$ เพื่อเปลี่ยน ω_{osc} ให้เป็น ϕ_{osc} ตามสมการ

จากทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน
$$= \frac{A}{1+AF} \tag{2.42}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 เมื่อ A = อัตราการขยายไปข้างหน้า
 F = อัตราการขยายป้อนกลับ

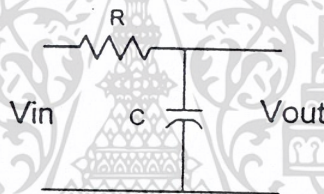
จากรูปที่ 2.13 และ 2.14 ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชันคือ

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{\theta_i} &= \frac{K_d F(s) A}{1 + K_d F(s) A \frac{K_o}{s}} \\ &= \frac{s K_d F(s) A}{s + K_d F(s) s K_o} \end{aligned} \quad (2.43)$$

โดยปกติเรามักจะให้ตัวแปรอินพุตเป็นความถี่มากกว่าจะเป็นเฟส จากสมการ 2.39 เราจะได้ทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน คือ

$$\begin{aligned} H(s) &= \frac{V_o}{\omega_i} = \frac{V_o}{s \phi_i} \\ &= \frac{K_d F(s) A}{s + K_d K_o A F(s)} \end{aligned} \quad (2.44)$$

ถ้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้เป็นดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอย่างง่าย

จากรูปที่ 2.16

$$\begin{aligned} F(s) &= \frac{V_o}{V_i} \\ &= \frac{1/sC}{R + 1/sC} \\ &= \frac{1}{1 + sRC} \\ &= \frac{1}{1 + s/\omega_i} \end{aligned} \quad (2.45)$$

เมื่อ $\omega_i = 1/RC$

แทนค่าสมการ 2.41 ลงในสมการ 2.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

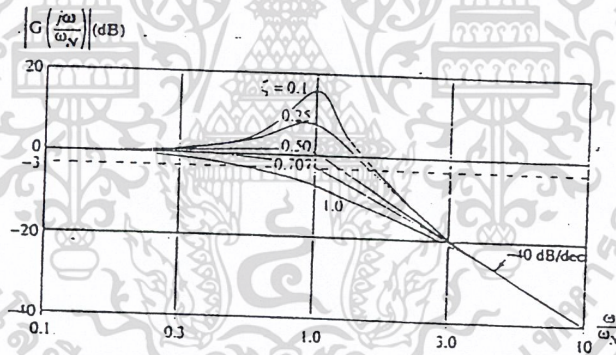
$$H(s) = \frac{V_o}{\omega_i} = \frac{1}{K_o} \left[\frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_n} + \frac{s^2}{\omega_n^2}} \right]$$

$$= \frac{1}{K_o} \left[\frac{1}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi s}{\omega_n} + 1} \right] \tag{2.46}$$

$$\omega_n = \sqrt{K_v \omega_1}$$

$$\xi = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_1}{K_v}}$$

เมื่อ $K_v = K_d K_o A$
 เราสามารถนำทรานส์เฟอร์ฟังก์ชัน $H(s)$ นี้ไปหาผลตอบสนองของระบบได้ดังนี้



รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองความถี่ของระบบเฟสล็อกกลูป

จะสังเกตเห็นได้ว่า หากแถบความถี่ของลูปลิเตอร์ ω_1 ลดลง หรือค่า K_v เพิ่มขึ้น ค่า ξ ของลูปลิเตอร์ลดลง ผลตอบสนองทางความถี่ของลูปลิเตอร์จะเป็นพีก (peaking) และผลตอบสนองต่อสแต็ปของลูปลิเตอร์ในช่วงเริ่มต้นชั่วขณะจะเกิดการออสซิลเลท ค่าพีกในผลตอบสนองทางความถี่จะเป็นสาเหตุให้เกิดความผิดเพี้ยนในสัญญาณเอาต์พุต และเป็นสาเหตุให้เกิดการแกว่งหรือให้ ผลตอบสนองที่เลวเมื่อลูปลิเตอร์มีการรบกวนเกิดขึ้นชั่วขณะ การออกแบบระบบเฟสล็อกกลูปให้มีคุณสมบัติการทำงานให้ดีที่สุดจึงควรกำหนดให้ ξ มีค่าเท่ากับ $1/\sqrt{2}$ จะได้ ω_1

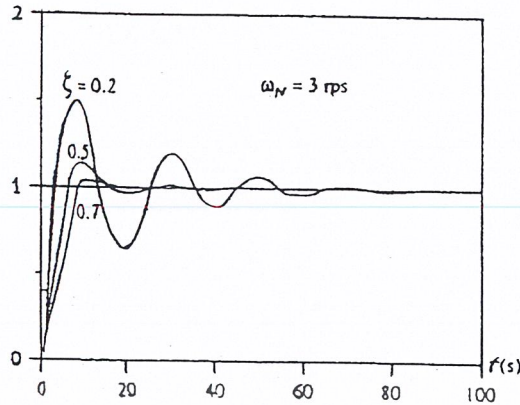
$$\omega_1 = 2K_v \tag{2.47}$$

และความถี่ที่ตัดออฟ -3 dB แถบความถี่ของลูปลิเตอร์จะได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$$\omega_n = \sqrt{K_v \omega_1} = \sqrt{2K_v} \tag{2.48}$$

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ผลตอบสนองเมื่อสัญญาณอินพุตเป็นสเต็ปฟังก์ชัน

วงจรเฟสล็อกที่用在ระบบสื่อสารทั่วไป จะต้องให้มีพิสัยการล็อกกว้าง เพื่อที่จะได้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุตได้ช่วงกว้าง นอกนั้นก็ต้องการให้ระบบมีแถบความถี่ของรูปแคบ ๆ เพื่อกำจัดสัญญาณที่อยู่นอกแบนด์

พิสัยความถี่ตลอดช่วงที่ระบบเฟสล็อกสามารถดำรงการล็อกไว้ได้กับสัญญาณอินพุตเราเรียกว่า “พิสัยการล็อก” เราสามารถหาพิสัยการล็อกได้โดยพิจารณาจากสมการของเฟสเออเรอร์ ซึ่งเราพบว่าเฟสเออเรอร์จะมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับศูนย์ และมีค่ามากที่สุดเท่ากับ π ดังนั้นจากสมการที่ 2.37 จะได้พิสัยการล็อก $\Delta\omega = \omega_i - \omega_o$ เท่ากับ

$$\Delta\omega = (\theta_e - \pi/2)K_o K_d F(s)$$

แทนค่า $\theta_{e\max} = \pi$ และ $\theta_{e\min} = 0$

$$\Delta\omega = (\pm \pi/2)K_o K_d F(s)$$

$$2\Delta\omega_L = \pm \pi K_o K_d F(s) \tag{2.49}$$

เมื่อ $2\Delta\omega_L$ คือพิสัยการล็อก

เราจะสังเกตได้ว่า ถ้า ω_i เบี่ยงเบนไปจากความถี่ศูนย์กลาง ω_o มาก โดยมีค่าไม่สอดคล้องกับสมการ 2.49 สถานะสมดุลของการชิงโครโมสจะไม่สามารถดำรงอยู่ต่อไปได้และลูบจะหลุดออกไปจากการล็อกกับความถี่ของสัญญาณอินพุต

การวิเคราะห์ถึงพิสัยการล็อกระบบต้องมีสถานะเดิมล็อกอยู่กับความถี่อินพุตแล้ว แต่มีอีกอย่างที่เราควรพิจารณา โดยจะอยู่ในสถานะที่ระบบยังไม่ล็อกกับสัญญาณอินพุต เพื่อกำหนดช่วงความถี่ซึ่งระบบเฟสล็อกสามารถล็อกกับสัญญาณอินพุตในช่วงความถี่ดังกล่าว ความถี่ช่วงนี้เราเรียกว่า พิสัยแคปเจอร์ ซึ่งจะสัมพันธ์กับค่าความถี่ทอพอของลูบฟิลเตอร์ ω_1 และพิสัยล็อก $\Delta\omega_L$ จะได้พิสัยแคปเจอร์เท่ากับ

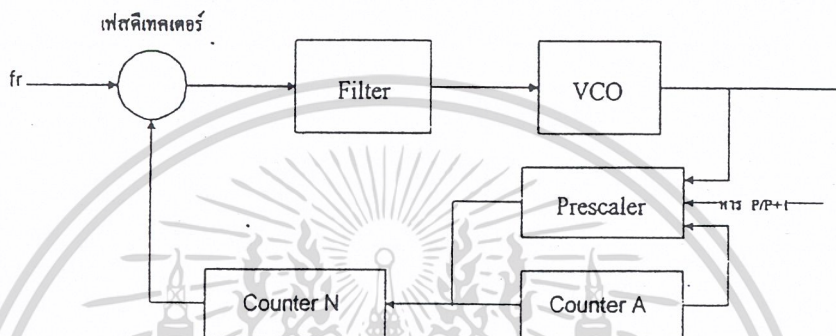
$$\Delta\omega_c = \pm \sqrt{\omega_1 \Delta\omega_L}$$

$$2\Delta\omega_c \cong 2\sqrt{\omega_o \omega_1} \tag{2.50}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าในกรณีทั่วไป $\Delta\omega_c \gg \omega_1$ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกกลุ่แบบพริสเกลเลอร์สองโมดูลัส

วงจรสังเคราะห์ความถี่มีอยู่หลายแบบ ตัวอย่างที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้เป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกกลุ่แบบพริสเกลเลอร์สองโมดูลัส ซึ่งมีขั้นตอนการตั้งความถี่ขั้นละ f_r เท่ากับความถี่อ้างอิง วงจรเฟสล็อกกลุ่ในรูปที่ 2.19 ใช้พริสเกลเลอร์ซึ่งเป็นวงจรรับที่ตัวหารเปลี่ยนค่าได้ระหว่าง P กับ $P+1$ เราเรียกพริสเกลเลอร์แบบนี้ว่า “พริสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัส” วงจรรับหาร N , ซึ่งโปรแกรมตัวหารได้นั้นทำงานที่ความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.19 วงจรสังเคราะห์ความถี่เฟสล็อกกลุ่แบบพริสเกลเลอร์สอง โมดูลัส

เหตุผลที่ใช้พริสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัสก็เพื่อลดทอนความถี่ลง และให้ใช้ได้กับวงจรหาร N ตระกูล TTL และ CMOS ได้ ทำให้สามารถสังเคราะห์ความถี่ไปยังย่าน VHF, UHF ได้

ส่วนสำคัญของวงจรคือพริสเกลเลอร์แบบสองโมดูลัส ซึ่งเป็นไอซีตระกูล ECL มีความสามารถในการทำงานที่ความถี่สูง จะทำการหารล่วงหน้า (prescale) ก่อน และทำงานในลักษณะที่หารได้ 2 ค่าสลับกันในไอซีตัวเดียว โดยที่ตัวหารความถี่มีค่าต่างกันอยู่หนึ่ง คือ P และ $P+1$ เช่น หาร 64/65 เอาต์พุตของพริสเกลเลอร์จะป้อนไปให้แก่วงจรเคาน์เตอร์ตระกูล TTL สองตัว ตัวหนึ่งเป็นเคาน์เตอร์หลัก (main counter) ส่วนอีกตัวหนึ่งเป็นเคาน์เตอร์เสริม

เคาน์เตอร์เสริมจะเป็นตัวบังคับให้พริสเกลเลอร์หารด้วย P หรือ $P+1$ สมมติว่าป้อนข้อมูลหรือพริเซตตัวเลขให้เคาน์เตอร์เสริม และในขณะที่พริสเกลเลอร์ให้ $P+1$ เป็นตัวหาร เคาน์เตอร์เสริมจะนับก่อน หลงลงไปเรื่อย ๆ เคาน์เตอร์หลักจะนับถอยหลังไปพร้อม ๆ กับเคาน์เตอร์เสริม เมื่อเคาน์เตอร์เสริมหยุดนับจะส่งสัญญาณบังคับให้พริสเกลเลอร์เปลี่ยนเป็นหารด้วย P และเคาน์เตอร์หลักจะนับถอยหลังต่อไปจนเป็นศูนย์ เมื่อเคาน์เตอร์หลักและเคาน์เตอร์เสริมนับถึงศูนย์เมื่อใด ทั้งคู่จะถูกพริเซตด้วยตัวเลขข้อมูล (ความถี่) ใหม่อีกครั้ง ดังนั้นตัวเลขที่พริเซตให้เคาน์เตอร์เสริมจะต้องน้อยกว่าตัวเลขที่พริเซตให้เคาน์เตอร์หลัก

สมมติตัวเลขที่พริเซตให้เคาน์เตอร์หลักเป็น N และเคาน์เตอร์เสริมเป็น A เริ่มแรกให้พริสเกลเลอร์อยู่ที่สภาวะหาร $P+1$ ซึ่งจะยังคงหารด้วย $P+1$ ไปจนกว่าเคาน์เตอร์เสริมจะนับลงเป็นศูนย์นั่นคือเวลาที่ใช้ในการนับของเคาน์เตอร์เสริมเป็นศูนย์คิดเป็นจำนวน ไชเคิลของวงจรออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันที่ผ่าน ไปเท่ากับ $P+1$ คูณด้วย A ไชเคิล

หลังจากนั้นพรีสเลเตอร์จะถูบบังคับให้เปลี่ยนตัวหารเป็น P โดยสัญญาณบังคับจากแกนเตอร์ A ในขณะที่แกนเตอร์หลักนับผ่านไปแล้ว A ยังเหลืออยู่ N-A นั่นคือ ต้องใช้เวลานับแกนเตอร์หลักคิดเป็นจำนวนไซเคิลของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดันที่ผ่านไปเท่ากับ P คูณด้วย N-A ดังนั้นรวมค่าตัวหารทั้งหมดจะได้เท่ากับ

$$\begin{aligned} N_t &= (P+1)A + P(N-A) \\ &= PN + A \end{aligned} \quad (2.51)$$

ความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน จะเท่ากับ $PN+A$ เท่าของความถี่อ้างอิงหรือ

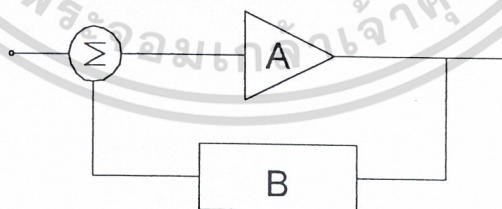
$$F_{synth} = F_{ref} (PN + A) \quad (2.52)$$

2.5 ออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมแรงดันไฟฟ้า

โดยทั่วไปมักเรียกสั้น ๆ ว่า วิชีโอ (VCO: Voltage Control Oscillator) หรือ โวลท์เตจคอนโทรล ออสซิลเลเตอร์ เป็นวงจรที่เป็นส่วนประกอบสำคัญของระบบการสื่อสารอนาล็อกแทบทุกชนิด เป็นการแปลงจากดีซีไปเป็นสัญญาณอาร์เอฟ ซึ่งมันจะผลิตสัญญาณอาร์เอฟเอาต์พุตเพียงแค่นี้สัญญาณดีซีอินพุตเป็นวงจรที่ใช้สำหรับการปรับแต่งความถี่ของวงจรรอสซิลเลเตอร์ซึ่งวิธีการที่ใช้ก็คือ ใช้คาปาซิเตอร์ไดโอดแบบสารกึ่งตัวนำ หรือที่เรียกว่าวาริแคป (varicap) หรือ วาเร็กเตอร์ (varactor) คุณสมบัติของไดโอดชนิดนี้คือค่าคาปาซิแตนซ์จะแปรผันตามค่าแรงดันไฟฟ้ารีเวิร์สที่ป้อนให้แก่ตัวมัน ดังนั้นเมื่อวาเร็กเตอร์ต่อคร่อม L ในวงจรจูนของออสซิลเลเตอร์ จึงทำให้มีคุณสมบัติในการปรับความถี่ได้โดยการควบคุมระดับแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมไดโอด

การออกแบบวงจรรอสซิลเลเตอร์ที่ปรับค่าความถี่ตามแรงดัน

การออกแบบวงจรรอสซิลเลเตอร์อาศัยหลักการของการป้อนกลับแบบบวก (positive feedback) ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมของระบบป้อนกลับแบบบวก

โดย A คือ เกน (Gain) ของวงจรขยายในส่วนของฟอร์เวิร์ด พาท (Forward Path)

B คือ อัตราส่วนป้อนกลับ (Feedback Ratio) ในส่วนย้อนกลับ

วงจรรอสซิลเลเตอร์ได้ก็ต่อเมื่อ (Barkhausen Criterion)

1. $|AB| = 1$ และ

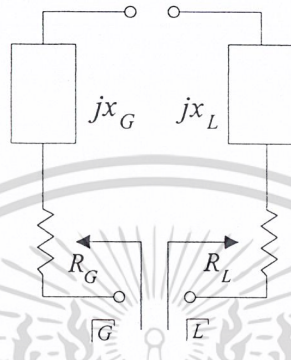
2. $\angle AB = 360^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น $A_{รวม} = \frac{A}{1-AB}$ จะมีค่า = 1 เมื่อเกิดการออสซิลเลต

วงจรถยาย (A) จะทำการขยายสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นการเริ่มต้นให้วงจรเกิดการออสซิลเลต หลังจากนั้นความถี่ที่ถูกออสซิลเลตจะถูกเลือกโดยวงจรเรโซแนนซ์ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 รูปแบบ คือ

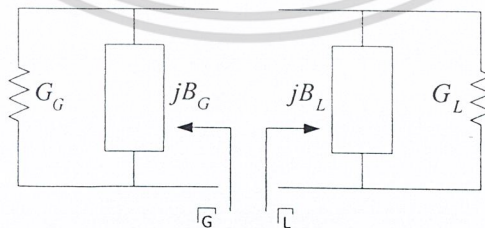
การเรโซแนนซ์แบบอนุกรม (Series Resonance)



รูปที่ 2.21 วงจรเรโซแนนซ์แบบอนุกรม

- ในสภาวะเริ่มต้นของการออสซิลเลต
 $|G_G| > G_L$ เมื่อ G_G มีค่าเป็น เนกาทีฟ คอนดักแตนซ์ (Negative Conductance)
- ในสภาวะเรโซแนนซ์ (Steady State)
 $R_G + R_L = 0$
 $X_G + X_L = 0$

การเรโซแนนซ์แบบขนาน (Parallel Resonance)



รูปที่ 2.22 วงจรเรโซแนนซ์แบบขนาน

- ในสภาวะเริ่มต้นการออสซิลเลต
 $|G_G| > G_L$ เมื่อ G_G มีค่าเป็น เนกาทีฟ คอนดักแตนซ์

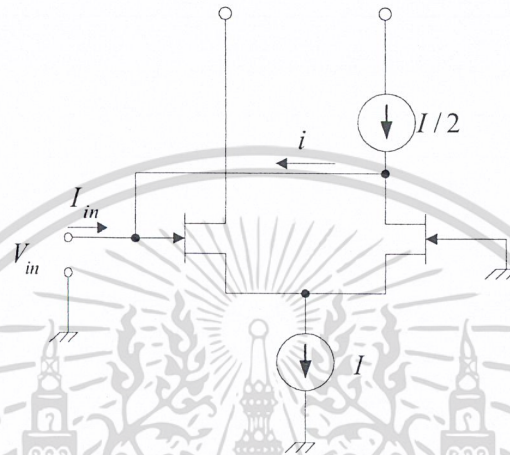
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 - ในสภาวะเรโซแนนซ์
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G_G + G_L = 0$$

$$B_G + B_L = 0$$

เราต้องการวงจรที่มีการสูญเสียต่ำแต่มีค่า Q (Quality Factor) สูงๆ

การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์จะอาศัยหลักการของ เนกาทีฟ รีซีสแตนซ์(Negative Resistance) มาอธิบายเพราะง่ายกว่า ตัวอย่างของวงจรที่จะยกตัวอย่างมาอธิบายอาศัยการอธิบายในเชิงเนกาทีฟ รีซีสแตนซ์ เช่นเดียวกัน เริ่มต้นจาก



รูปที่ 2.23 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ใช้วงจรขยายแบบดิฟเฟอเรนเชียล (Differential Amplifier)

หา อินพุตรีซีสแตนซ์(Input Resistance)

$$i = g_m \frac{V_i}{2}$$

เมื่อสมมติให้ อินพุตรีซีสแตนซ์ ของ เฟท (FET) และคอนสแตนท์เคอร์เรนท์(Constant Current) มีค่ามากๆ ดังนั้น V ที่ตกคร่อม

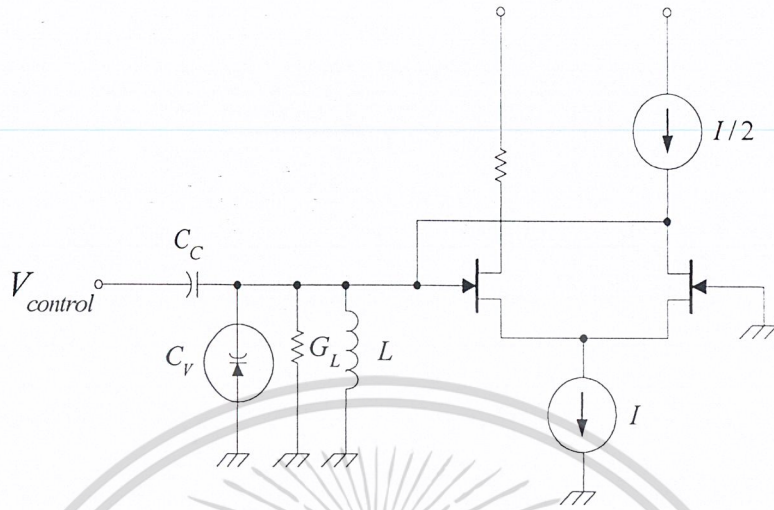
$$V_{gs} \approx V_{in} / 2$$

$$\frac{V_{in}}{i_m} = \frac{-2}{g_m}$$

$$R_{in} = \frac{-2}{g_m}$$

ดังนั้นหากทำการใช้ เรโซเนเตอร์ ทางด้านอินพุตของออสซิลเลเตอร์ (V_{in}) เพื่อเลือกความถี่ และ ใช้ วาริแคป แทนตัวเก็บประจุ จะได้วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ปรับความถี่ได้ตามแรงดัน ตามรูปที่ 2.24 ไอซีสำเร็จรูปที่อาศัยองค์ประกอบภายในเป็นออสซิลเลเตอร์ประเภทนี้ เช่น MC 1648 ทำงานได้ดีที่ความถี่น้อยกว่า 500 เมกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ปรับความถี่ได้ตามแรงดัน

เงื่อนไขการทำงานของวงจรประเภทนี้ คือ

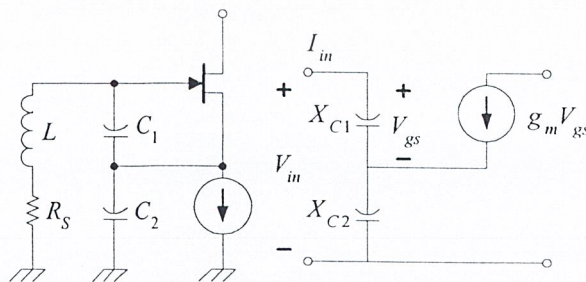
$$|G_C| > G_L$$

$$\frac{g_m}{2} > G_L$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Q = \frac{R_L}{j\omega L} = R_L j\omega C$$

เฟต(FET)

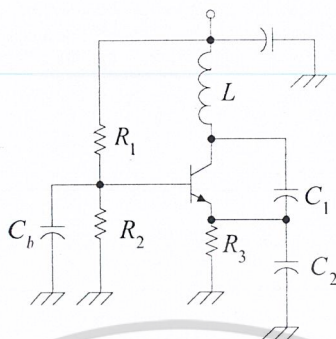


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_m = i_m (X_{C1} + X_{C2}) + g_m V_{gs} X_{C2}$$

$$V_{gs} = V_{X_{C1}} = i_m X_{C1}$$

วงจรคอลลิตออสซิลเลเตอร์ (Collpit Oscillator)



รูปที่ 2.26 วงจรคอลลิตออสซิลเลเตอร์

อาศัยหลักการอธิบายเช่นเดียวกัน จะได้

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L[C_1 C_2 / (C_1 + C_2)]}} \quad (2.52)$$

เมื่อ R_3 มากกว่า X_{C2} มากๆ

และ

$$R_{in} = \frac{-g_m}{\omega^2 C_1 C_2}$$

เมื่อ

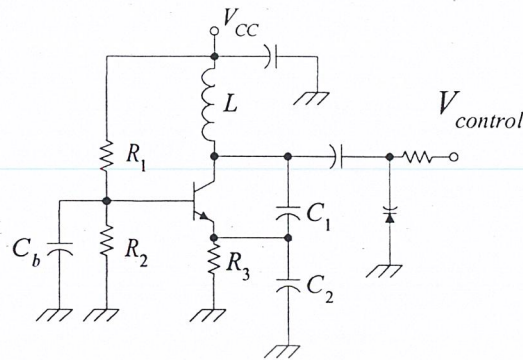
$$g_m = \frac{I_c}{V_T}; \quad V_T \approx 25 \text{ mV} \quad \text{ที่ } 25^\circ\text{C}$$

ดังนั้น

$$Z_{in} = \frac{-g_m}{\omega^2 C_1 C_2} + \frac{1}{j\omega [C_1 C_2 / (C_1 + C_2)]} \quad (2.54)$$

หากต้องการทำออสซิลเลเตอร์ที่ปรับความถี่ได้โดยใช้แรงดันสามารถใช้วารีแคปในการทำงานโดยวงจรจะอยู่ในรูปแบบของวงจรในรูปที่ 2.27 ทำหน้าที่บัสค็อก ดีซี ดังนั้นจึงต้องมีค่ามากๆ ที่ความถี่สูงๆ อาจมากกว่า $0.1 \mu\text{F}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 คอลพิทออสซิลเลเตอร์ ปรับค่าได้ตามแรงดัน

ดังนั้นความถี่ที่กำเนิดได้ คือ

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \left[\left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) \parallel C_v \right]}} \quad (2.55)$$

เอาต์พุตสามารถเห็นช่วงนำกระแสที่ขดลวดเหนี่ยวนำไปใช้งานได้หรืออาจดึงจากขาคอลเลคเตอร์ได้ แต่ต้องระวังค่าตัวต้านทานด้วย มิฉะนั้นวงจรอาจไม่เกิดการออสซิลเลตได้เนื่องจากค่าเนกาทีฟ รีซีสแตนซ์ น้อยกว่า โพลซิทีฟ รีซีสแตนซ์ (Load) และที่สำคัญ Q และ L ควรมีค่ามาก ๆ เพื่อไม่ให้เกิดการสูญเสีย(Loss)ในวงจรมากซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้ไม่เกิดการออสซิลเลตได้เช่นเดียวกัน

2.6 วงจรขยายกำลัง (Power Amplifier)

ในการออกแบบวงจรขยายแบบสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Amplifier) นั้น ค่าของ S-พารามิเตอร์สามารถวัดได้ง่ายและจะให้เท่ากับค่าค่าชิตโดยผู้ผลิตอุปกรณ์นั้นแล้ว แต่สำหรับกรณีของสัญญาณที่มีกำลังมากนั้น การวัดเป็นไปได้ยากเนื่องจากเครื่องมือวัดไม่สามารถทนกำลังขนาดสูงได้ในทางปฏิบัติ ในบางกรณีสามารถประมาณค่า S-พารามิเตอร์ของวงจรขยายสัญญาณขนาดใหญ่ (Large Signal) ได้จากของสัญญาณขนาดเล็ก เพราะว่าค่าของ S-พารามิเตอร์ ทุกตัวคงที่ภายใต้สัญญาณขนาดใหญ่ยกเว้นค่าของ S_{21} โดยที่ S_{21} จะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของสัญญาณมีขนาดใหญ่อขึ้น

แต่โดยส่วนใหญ่แล้วทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในงานด้านสัญญาณขนาดใหญ่ นั้นผู้ผลิตมักจะใช้ค่าของอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์สำหรับสัญญาณขนาดใหญ่เท่ากับค่าค่าชิต และค่าอิมพีแดนซ์นั้น วัดเมื่อสภาวะที่เป็นคอนจูเกตแมตซ์และทรานซิสเตอร์ทำงานมีไฟเลี้ยงและระดับกำลังงานเอาต์พุตที่กำหนดมา

2.6.1 การไบแอสวงจขยาย

ชนิดของการไบแอสวงจขยายกำลังนั้นอาจเรียกอีกอย่างว่าเป็นคลาส (Class) การเลือกชนิดของคลาสขึ้นอยู่กับชนิดของการใช้งานในขณะนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

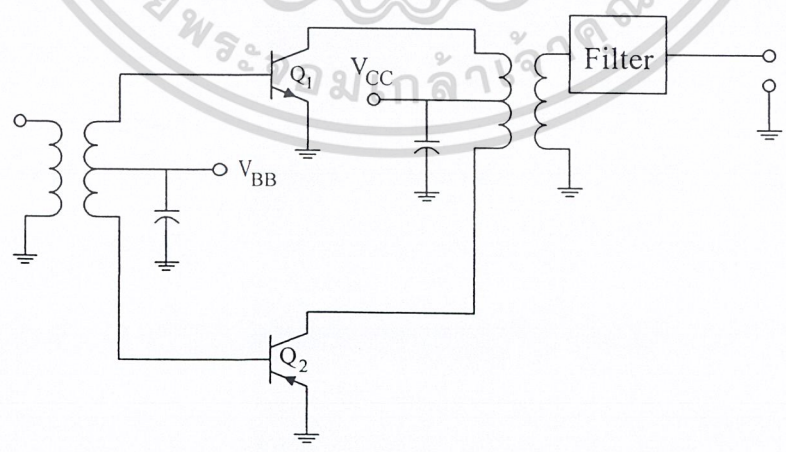
2.6.2 วงจรขยายคลาสเอ (Class A Amplifier)

เป็นวงจขยายที่ทำการไบแอสให้มีกระแสไหลตลอดเวลา และสัญญาณอินพุตเข้าไปหรือสัญญาณใดรัวจะต้องมีขนาดไม่มากเกินไปจนทำให้ทรานซิสเตอร์เข้าสู่สภาวะคัทออฟ (Cut off) หรืออาจกล่าวได้ว่า วงจขยายแบบคลาสเอนี้ทำงานตลอด 360 องศาหรือเต็มลูกคลื่น และวงจขยายคลาสเอเป็นวงจขยายที่มีความเป็นเชิงเส้น (Linear) มากที่สุดของวงจขยายทุกๆคลาส ความเป็นเชิงเส้นคือการพิจารณาความใกล้เคียงกันของรูปร่างสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต แต่ในทางปฏิบัติจริงไม่มีอุปกรณ์ตัวใดมีความเป็นเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ โคนที่มักจะมีสัญญาณที่ไม่ต้องการ (spurious signal) รวมอยู่กับสัญญาณซึ่งอาจอยู่ในรูปของฮาร์โมนิกหรือในรูปของการมอดูเลตภายใน (Intermodulation Distortion)

การไบแอสวงจขยายคลาสเอนั้นเป็นแบบเดียวกับการไบแอสวงจขยายสัญญาณเล็ก ในความเป็นจริงแล้วข้อแตกต่างระหว่างสัญญาณขนาดเล็ก (Small Signal Amplifier) กับวงจขยายสัญญาณขนาดใหญ่ คลาสเอนั้นไม่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนนัก แต่มีข้อแตกต่างอยู่เพียงอย่างเดียวคือขนาดของสัญญาณอินพุตและสัญญาณเอาต์พุต

2.6.3 วงจขยายคลาสบี (Class B Amplifier)

เป็นวงจขยายที่ทำงานแค่ 180 องศาเท่านั้น หรือทำงานแค่ครึ่งหนึ่งของสัญญาณอินพุต อาจเป็นครึ่งรอบด้านบวกหรือด้านลบ และการพิจารณาว่าเป็นคลาสบีนั้นก็ขึ้นกับการไบแอสเป็นตัวกำหนด วงจขยายคลาสบีนี้มีประสิทธิภาพมากกว่าคลาสเอ (70 % เมื่อเทียบกับ 50% ของคลาสเอ) แต่อย่างไรก็ตามก็ทำให้คลาสบีมีความเป็นเชิงเส้นน้อยกว่าคลาสเอ ดังนั้นวงจขยายคลาสบีโดยทั่วไปมักจะเกิดฮาร์โมนิกขึ้นและจำเป็นต้องทำการกรองออกไป วงจขยายขนาดใหญ่ที่นิยมใช้โดยทั่วไป เช่น วงจขยายคลาสบีแบบ พูช - พูล (Class B Push Pull Amplifier) ดังแสดงในรูป



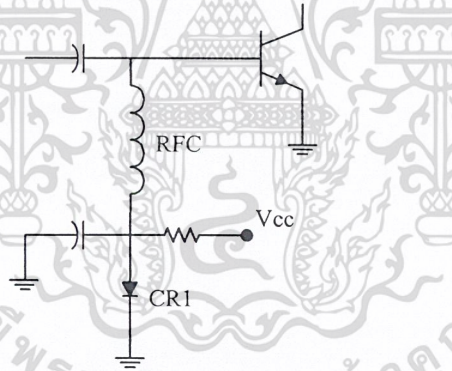
รูปที่ 2.28 วงจขยายคลาสบีแบบ พูช - พูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์เฉพาะเท่านั้น มิใช่ผูกขาดให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

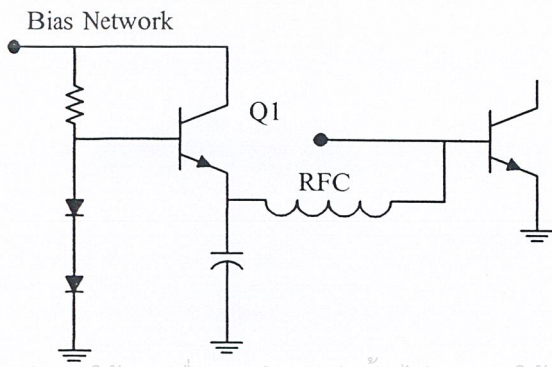
ในการไบอัสแบบนี้ Q_1 จะทำงานในช่วงซิกบวคของสัญญาณอินพุต และ Q_2 จะทำงานในช่วงซิกลบของสัญญาณอินพุต นั่นคือไม่มีทรานซิสเตอร์ตัวไหนที่ขยายสัญญาณที่มีรูปแบบเดียวกับสัญญาณอินพุต แต่แบ่งสัญญาณอินพุตออกเป็น 2 ส่วน แบ่งกันไปขยายแล้วมารวมกันที่ด้านเอาท์พุต

การออกแบบวงจรขยายคลาสบีนั้น สามารถใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเดียวได้เช่นกันแต่จำเป็นต้องมีวงจรไบอัสเพื่อให้อีกซีกหนึ่งของสัญญาณกลับมา รูปแบบการไบอัสวงจรขยายคลาสบีนี้มีหลายรูปแบบแบบที่นิยมกันมากแสดงในรูปที่ 2.28 วิธีนี้จะทำการจ่ายไฟ 0.7 โวลต์ที่ขาเบสโดยการใส่ไดโอด ในทรานซิสเตอร์บางตัวได้มีการนำไดโอดฝั่งไว้กับทรานซิสเตอร์เพื่อช่วยในด้านการควบคุมอุณหภูมิ (Thermal runaway) ซึ่งเป็นปัญหาของการไบอัสทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในงานด้านสัญญาณขนาดใหญ่ผิดพลาด การไบอัสดังกล่าวไดโอดจะต้องรับภาระเรื่องกระแสความร้อนจากการเลือกค่าความต้านทานให้มีกระแสไหลมาก

และเพื่อเป็นการแน่ใจว่าระดับสัญญาณไบอัสมีเสถียรภาพมากขึ้น อาจใช้ไดโอด 2 ตัว ดังแสดงในรูปที่ 2.29 โดยที่ไดโอด 2 ตัว ดังกล่าวใช้ไบอัสวงจรอิมิตเตอร์ตาม (Emitter Follower) ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายกระแส โดยที่ระดับโวลต์เตจที่ขาอิมิตเตอร์ของ Q_1 และที่ขาเบสของ Q_2 จะยังคงมีค่า 0.7 โวลต์ เป็นผลสืบเนื่องมาจาก V_{BE} ตกคร่อม Q_1 ในส่วนของ RFC และคาปาซิเตอร์ทำหน้าที่แค่ป้องกันสัญญาณความถี่ไปรบกวนไบอัสเท่านั้น



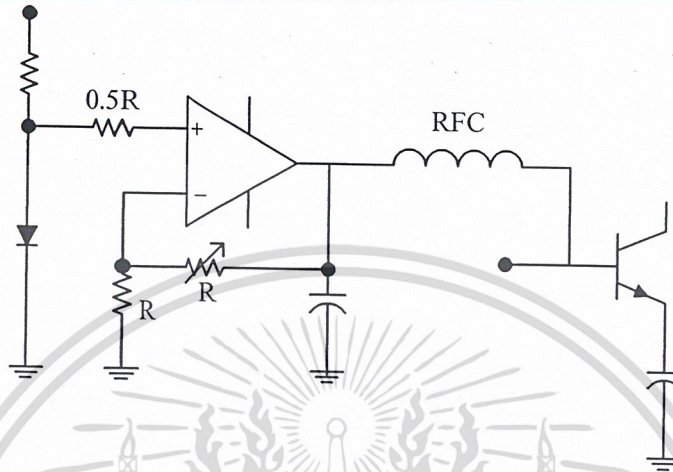
รูปที่ 2.29 การไบอัสคลาสบีแบบใช้ไดโอดตัวเดียว



รูปที่ 2.30 แสดงการใช้วงจรอิมิตเตอร์ตามในการไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุที่เปลี่ยนแปลงได้ และต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

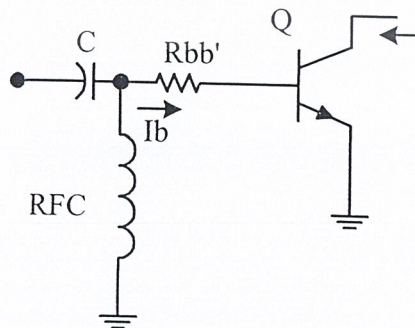
และการไบแอสคลาสิกอีกแบบในรูปที่ 2.30 รูปนี้แสดงให้เห็นว่าโวลท์ไบแอสสามารถเปลี่ยนแปลงค่าได้ เพื่อที่ว่าผลที่ได้จะมีค่ามอดูเลชันภายใน (Intermodulation Distortion) น้อยที่สุด และควรพิจารณาถึง RFC อย่างระมัดระวังเพื่อให้แน่ใจว่าใช้ค่านั้นมีค่า Q (Quality Factor) สำหรับการทำงาน



รูปที่ 2.31 แสดงการใช้อปแอมป์ในการไบแอสวงจรรขยายคลาสิก

2.6.4 วงจรรขยายคลาสิก (Class C Amplifier)

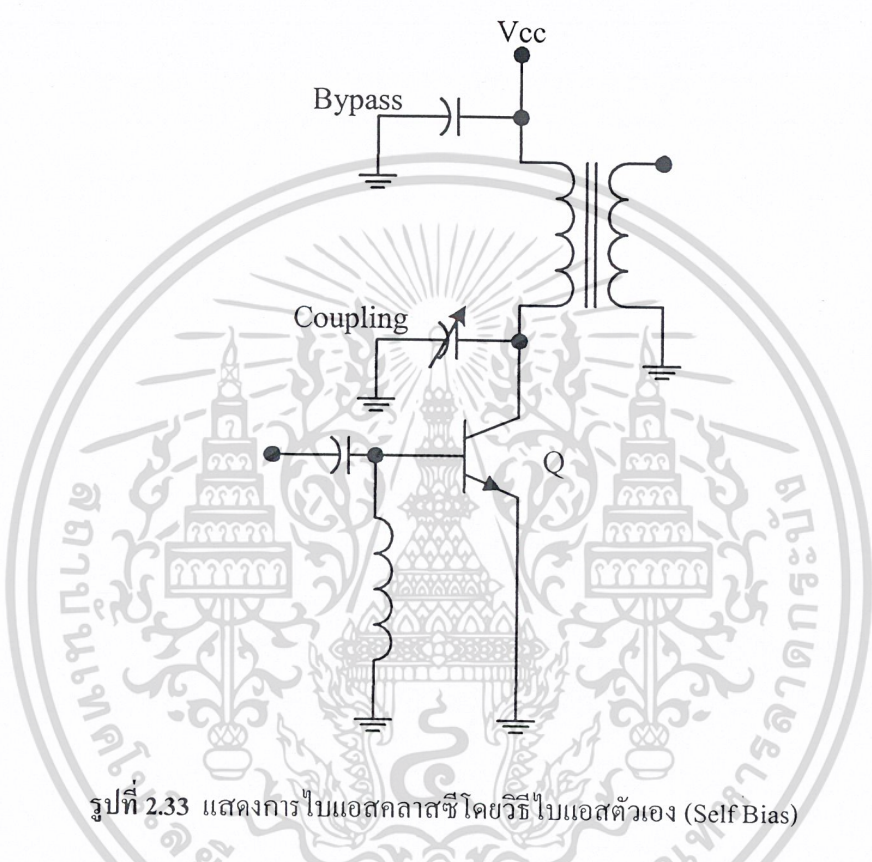
เป็นวงจรรขยายที่ทำงานน้อยกว่า 180 องศา หรือน้อยกว่าครึ่งหนึ่งของลูกคลื่นของสัญญาณอินพุต โดยไบแอสไว้ ณ จุดที่สภาวะปกติ (ไม่มีสัญญาณอินพุต) ไม่มีกระแสคอลเลคเตอร์ไหล หรืออยู่ในสภพคัทออฟ (Cut Off) และวงจรรขยายแบบคลาสิกนี้เป็นวงจรรขยายที่มีความเป็นเชิงเส้นน้อยที่สุด แต่อย่างไรก็ตาม การไบแอสที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุด (85% เมื่อเทียบกับ 70% และ 50% ของคลาสิกและคลาสิกบีตามลำดับ) หากต้องการจะไบแอสทรานซิสเตอร์ให้เป็นแบบคลาสิกจำเป็นจะต้องทำการไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias) ให้แก่อรอยต่อของเบส-อิมิตเตอร์ การไบแอสจากภายนอกนั้นไม่จำเป็น เนื่องจากขนาดของสัญญาณอินพุตจะเป็นตัวที่จัดการไบแอสให้แก่วงจรรขยายในแบบนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.32



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกไปลงเว็บไซต์หรือต้องอ้างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.32 แสดงการไบแอสคลาสิก

ถ้าขาเบสของทรานซิสเตอร์เชื่อมต่อกับกราวด์โดยผ่านโช้ค (RF Choke) กระแสเบสไหลผ่านความต้านทานภายในของด้านเบส จะทำให้เกิดการไบแอสย้อนกลับของรอยต่อเบส-อิมิตเตอร์ ซึ่งเป็นไปตามที่ ต้องการและในบางกรณีก็สามารถจ่ายระดับสัญญาณไฟตรงจากภายนอกเพื่อให้ทำการไบแอสย้อนกลับซึ่งแต่ ละวิธีควรเลือกตามความเหมาะสมโดยพิจารณาจากการประยุกต์ในแต่ละงาน



รูปที่ 2.33 แสดงการไบแอสคลาสซีโดยวิธีไบแอสตัวเอง (Self Bias)

2.6.5 การออกแบบวงจรขยายกำลัง

จากที่ได้กล่าวมาแล้ว สำหรับสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ (Large Signal) ค่า S-parameter นั้นวัดได้ยาก และค่าที่สามารถนำมาใช้ในการออกแบบวงจรขยายกำลังได้ คือค่า อิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์นั้นๆ ขณะทำงานกับสัญญาณที่มีขนาดใหญ่ นั่นคือ ต้องพิจารณาค่าซ้ำหาค่าของอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของ ทรานซิสเตอร์ดังกล่าว โดยพิจารณาที่ความถี่จะใช้งาน และเมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวแล้ว ก็เพียงแต่ทำการแมทซ์ อินพุตและเอาต์พุตเข้ากับความต้านทานของแหล่งจ่ายและโหลดตามลำดับ

2.7 ควอดราเจอร์ตีเทกชัน (Quardrature Detection)

การคีมอดูเลตสัญญาณเอ็ฟเอ็มแบบควอดราเจอร์ตีเทกชัน เป็นการใช้การแยกแยะเฟส (Phase discriminator) ในการคีมเอาสัญญาณเบสแบนด์ออกมาจากสัญญาณเอ็ฟเอ็ม ดังนั้นจึงต้องกล่าวถึง หลักการของวงจรแยกแยะเฟสเสียก่อนดังต่อไปนี้ วงจรแยกแยะเฟสจะอาศัยหลักการพื้นฐานของการดิฟเฟอเรนชิเอท (differentiate) กล่าวคือ แสดงการดิฟเฟอเรนชิเอทให้อยู่ในรูปของการประมาณค่าดังนี้

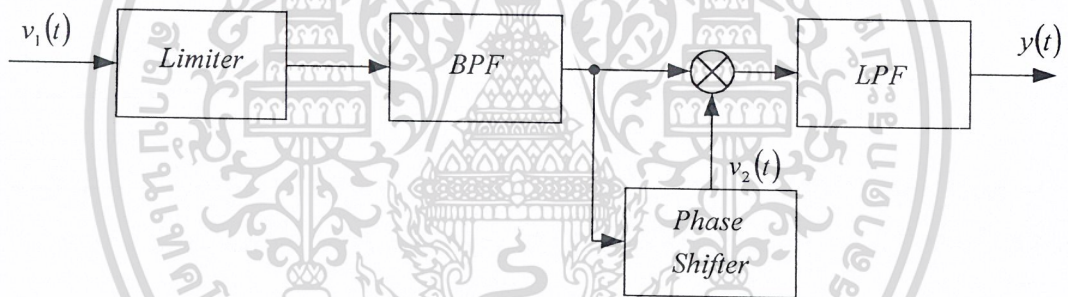
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d}{dt}\phi(t) = \frac{1}{\tau}[\phi(t) - \phi(t-\tau)] \tag{2.56}$$

ในกรณีของสัญญาณเอพเอ็มนั้น เนื่องจาก $\phi(t) = k \int_{-\infty}^t m(t) dt$ ดังนั้นจะสามารถผูกพันสมการ (2.56) กับสัญญาณเบสแบนด์ $m(t)$ ได้ในรูปต่อไปนี้

$$[\phi(t) - \phi(t-\tau)] = \tau \frac{d}{dt}\phi(t) = k m(t) \tag{2.57}$$

นั่นคือสามารถสร้าง $\phi(t-\tau)$ และสร้างวงจรที่จะให้ผลต่างระหว่าง $\phi(t)$ และ $\phi(t-\tau)$ สัญญาณขาออกที่ได้ก็จะแปรตรงกับสัญญาณเบสแบนด์ $m(t)$ การสร้างสัญญาณ $\phi(t-\tau)$ จากสัญญาณเอพเอ็มก็จะทำได้โดยใช้วงจรหน่วงเวลาหรือวงจรเลื่อนเฟสแบบเชิงเส้น (Linear phase shifter) นั่นเอง สำหรับการสร้างสัญญาณ $\phi(t) - \phi(t-\tau)$ นั้นจะทำได้โดยนำสัญญาณเอพเอ็มเดิมกับสัญญาณเอพเอ็มที่ถูกหน่วงเวลาเข้ามาเข้าวงจรคูณแล้วกรองด้วยวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน รูปที่ 2.34 แสดงบล็อกไดอะแกรมของกระบวนการที่กล่าวมานี้ วงจรลิมิตเตอร์และวงจรกรองความถี่เฉพาะผ่านมีไว้จัดการกับระดับสัญญาณที่อาจจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา และให้ผ่านเฉพาะแถบความถี่ที่เกี่ยวข้องตามลำดับ



รูปที่ 2.34 บล็อกไดอะแกรมของระบบควอดราเจอร์ซีเทกชัน

ควอดราเจอร์ซีเทกชันนั้นเป็นชื่อเรียกระบบซีเทกชันข้างต้นที่จัดการหน่วงเวลาของวงจรหน่วงเวลาให้มีค่า τ ที่ทำให้ $\omega_c \tau = \pi/2$ ดังนั้นถ้าให้สัญญาณเอพเอ็มที่เข้ามาเขียนได้เป็น $v_1(t) = \cos(\omega_c t + \phi(t))$ สัญญาณที่ผ่านวงจรหน่วงเวลาก็จะเขียนได้เป็น

$$v_2(t) = \cos[\omega_c(t-\tau) + \phi(t-\tau)] = \sin[\omega_c t + \phi(t-\tau)] \tag{2.58}$$

เมื่อคูณสัญญาณ $v_1(t)$ และ $v_2(t)$ ด้วยวงจรคูณแล้วผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ผลที่ได้ ออกมาก็จะเขียนได้เป็น

$$y(t) \approx \sin[\phi(t) - \phi(t-\tau)] \tag{2.59}$$

และเนื่องจาก τ มีค่าเล็กมากทำให้ $\phi(t) - \phi(t-\tau) \ll \pi$ เราจึงสามารถประมาณค่าสมการ(2.79) เป็นดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ $y(t) \approx [\phi(t) - \phi(t-\tau)] = k\tau m(t)$ ตั้หน้าไปใช้ประโยชน์ได้ (2.60) ถ้าไม่ว่ากรณีใดๆ จะเห็นได้ว่าสามารถแยกสัญญาณข้อมูลออกมาได้ด้วยวิธีแยกแยะเฟสนี้ การทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51

2.8.1 กล่าวนำ

ไมโครคอนโทรลเลอร์แบบชิปเดี่ยว (Single Chip Microcontroller) คือ ไมโครคอมพิวเตอร์แบบที่มีขนาดเล็กโดยบรรจุในแผงวงจรรวม (Integrated Circuit) เพียงชนิดเดียวเหมาะสำหรับควบคุมอุปกรณ์อื่นโดยอัตโนมัติ โดยผู้ใช้สามารถเขียนโปรแกรมควบคุมได้ตามต้องการ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์ชิปเดี่ยวตระกูล 51 หรือ mcs-51 ที่เลือกใช้ในโครงการนี้คือเบอร์ AT89C51 ของบริษัท ATMAL ซึ่งเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่มีหน่วยความจำโปรแกรม (ROM) ภายในแบบ Flash memory ขนาด 4Kbyte ซึ่งเป็นหน่วยความจำที่สามารถเขียนและลบข้อมูลได้ใหม่ถึง 1,000 ครั้งโดยไม่ต้องใช้หน่วยความจำแบบ EPROM ภายนอก และสะดวกต่อการพัฒนาโปรแกรม

คุณสมบัติของ ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51

ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ AT89C51 ผลิตโดยบริษัท ATMEL เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 8 บิต ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญดังนี้

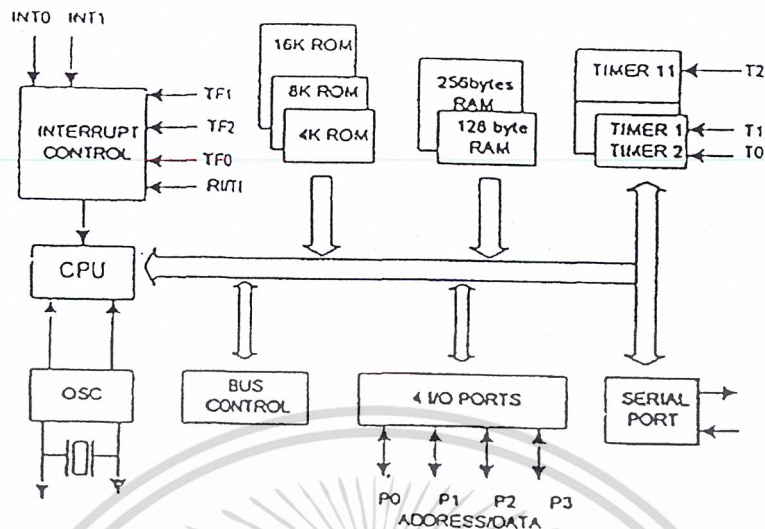
- * มีหน่วยความจำสำหรับเก็บโปรแกรมควบคุมการทำงานอยู่ภายใน 4Kbytes ซึ่งเพียงพอต่อการทำงานของโครงการนี้
- * สามารถต่อหน่วยความจำข้อมูล (Data Memory) ซึ่งเป็นหน่วยความจำสำหรับเก็บข้อมูลในระหว่างการทำงานของโปรแกรม (RAM) ได้ 64 Kbyte
- * สามารถใช้กับหน่วยความจำโปรแกรมภายนอก (Program Memory) ซึ่งเป็นหน่วยความจำซึ่งใช้สำหรับเก็บชุดคำสั่งที่จะทำให้ mcs-51 ทำงานได้สูงสุด
- * มีคำสั่งคูณและหารเลขขนาด 8 บิต
- * มีการติดต่อสื่อสารข้อมูลแบบอนุกรม (Serial) หรือ Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)
- * มีวงจร Timer/Counter ขนาด 16 บิต 2 ชุด
- * มีการขอขัดจังหวะการทำงานของโปรแกรม (Interrupt)
- * ต้องการแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์เพียงชุดเดียว
- * สามารถเลือกการทำงานให้อยู่ในโหมดของ Idle (การทำงานปกติ) และ Powerdown (การประหยัดพลังงานไฟฟ้า)

จากคุณสมบัติที่กล่าวมา ทำให้ MCS-51 เป็นที่นิยมใช้ในการควบคุมระบบอัตโนมัติซึ่งบรรจุไว้ในไอซีวงจรรวมเดี่ยว (Single Chip) ขนาด 40 ขา ดังนั้นจึงสามารถออกแบบให้ระบบมีขนาดเล็ก ทำให้ตรวจสอบหาข้อผิดพลาดได้ง่าย รวมถึงการลดต้นทุนการผลิต หากจะต้องมีการผลิตเป็นจำนวนมาก

2.8.2 โครงสร้างของ MCS-51

โครงสร้างภายในของ MCS-51 ประกอบด้วย เกทต่างๆ เช่น AND OR NOT ซึ่งเกทเหล่านี้จะถูกออกแบบให้มีหน้าที่การทำงานต่างๆ เช่น วงจรถอดรหัสคำสั่งวงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา โครงสร้างภายในของ MCS-51 จะประกอบด้วย ส่วนย่อยๆ ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูในวง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.35 บล็อกไดอะแกรมแสดงโครงสร้างของ MCS-51

จากรูปที่ 2.35 โครงสร้างของ MCS-51 ประกอบด้วย 3 ส่วนใหญ่ๆ คือ

1. CPU (Central processing Unit) ซึ่งมีส่วนปลีกย่อยอีกแต่ละส่วนมีหน้าที่ต่างกันได้แก่ส่วนสร้างสัญญาณควบคุม (Control Unit) ในการติดต่อกับส่วนอื่นๆ ส่วนประมวลผลทางคณิตศาสตร์ (Arithmetic Unit)
2. หน่วยความจำ (Memory) มีไว้สำหรับจดจำข้อมูล สำหรับนำข้อมูล ไปเก็บไว้และอ่านเอาข้อมูลออกมาจากหน่วยความจำ
3. Input/Output Device ทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลกับอุปกรณ์ภายนอก

2.8.3 การจัดการหน่วยความจำของ MCS-51

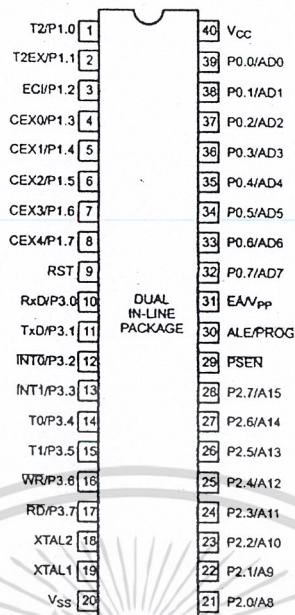
หน่วยความจำของ MCS-51 แบ่งออกเป็น 2 แบบ

1. Program Memory เป็นหน่วยความจำที่ใช้เก็บโปรแกรมการทำงาน ซึ่งจะเป็น ROM (Read Only memory) เท่านั้น แบ่งเป็นหน่วยความจำภายใน (Internal Memory) ซึ่งจะอยู่ภายใน MCS-51 จำนวน 4 กิโลไบต์ ตำแหน่งของหน่วยความจำจะอยู่ที่ 1FFFH ถึง FFFFH
2. Data Memory แบ่งเป็น 2 ส่วนคือหน่วยความจำข้อมูลภายในชิพมีเพียง 128 ไบต์ สำหรับเบอร์ 8051 และ 256 ไบต์สำหรับเบอร์ 8052 ขึ้นไปและหน่วยความจำข้อมูลภายนอกชิพมีความจุ 64 กิโลไบต์

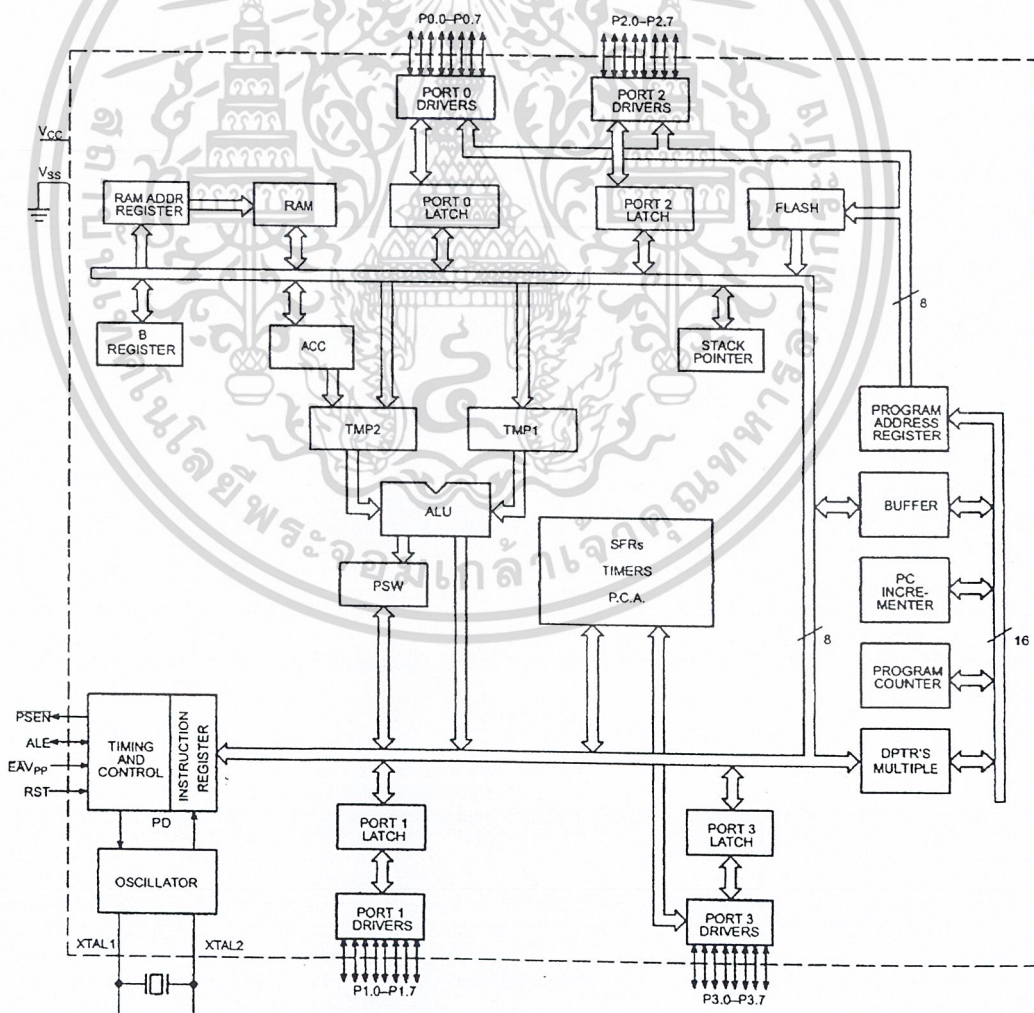
2.8.4 สถาปัตยกรรมของ MCS-51

สถาปัตยกรรมภายในของ MCS-51 ซึ่งจะอธิบายถึงส่วนย่อยๆ ภายใน MCS-51 เพียงชิพเดียวดังรูปที่ 2.36 และสัญญาณจากภายในจะออกมาต่อออกมาสู่ภายนอกขา (Pin) ต่างๆ ของ MCS-51 ที่มีอยู่ 40ขา ดังรูปที่ 2.37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.36 สถาปัตยกรรมภายในของ MCS-51



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

SU01065

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแบบรูปนี้ลงหรือเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.37 ตำแหน่งของขาของ MCS-51

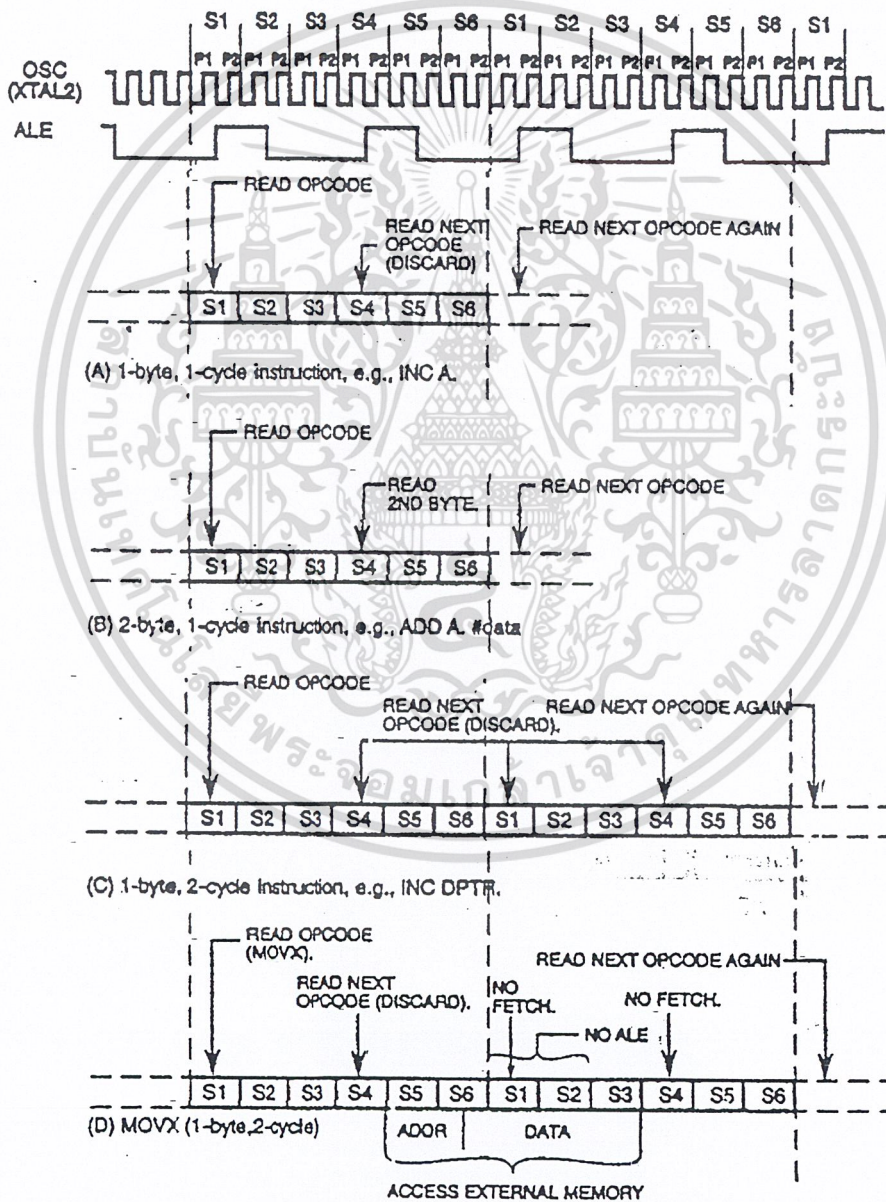
ไมโครคอนโทรลเลอร์ MCS-51 บรรจุอยู่ในไอซีวงจรรวมแบบ Dual Inline Package (DIP) มีขาอยู่ข้างละ 40 ขา นั้น จะใช้งานต่างกัันดังนี้

- * Vcc ขาที่ 40 เป็นขาที่ต้องป้อนไฟเลี้ยง +5v
 - * Vss ขาที่ 20 เป็นขาที่ต้องต่อกับกราวด์
 - * Port 0 เป็นพอร์ตขนาน 8 บิต อยู่ที่ขา 32 ถึง 39 เริ่มจากบิตที่ 0 ถึงบิตที่ 7ตามลำดับ (P0.0-P0.7) พอร์ต 0 นี้ใช้ได้ทั้ง การรับ – ส่ง ตำแหน่งและข้อมูลกับหน่วยความจำหรือใช้เป็นพอร์ตรับส่งข้อมูล
 - * Port 1 เป็นพอร์ตขนาน 8 บิต คือขา P 1.0-P1.7 (ขาที่ 1-8) ใช้สำหรับรับ-ส่งข้อมูลเท่านั้น
 - * Port 2 เป็นพอร์ตขนาน 8 บิต คือขา P 2.0-P2.7 (ขาที่ 1-8) พอร์ตนี้ถูกนำมาใช้งาน 2 ลักษณะคือใช้ส่งค่าตำแหน่งหน่วยความจำภายนอก ค่าตำแหน่งนี้เป็น 8 บิต ของตำแหน่งและใช้เป็นพอร์ตรับ-ส่งข้อมูลกันภายนอก
 - * Port 3 คือขา P3.0-P3.7 (ขา 10-17) พอร์ตนี้ทำหน้าที่เป็น I/O port และอีกหน้าที่หนึ่งคือส่งสัญญาณควบคุมออกมาและรับสัญญาณเข้าไปสัญญาณต่างๆแต่ละบิตมีดังนี้
 - P3.0 RXD (Serial Input Port) เป็นขาที่ใช้รับข้อมูลแบบอนุกรม
 - P3.1 TXD (Serial Output Port) เป็นขาที่ใช้ส่งข้อมูลแบบอนุกรม
 - P3.2 INT 0 (External Interrupt) ใช้รับสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก
 - P3.3 INT 1 (External Interrupt) ใช้รับสัญญาณขัดจังหวะจากภายนอก
 - P3.4 T 0 (Time/Counter 0 External interrupt) ขารับสัญญาณเข้าไปยังวงจร Time/Counter ที่ทำหน้าที่นับจำนวนไซเคิลของสัญญาณ T 0 นี้หรือสัญญาณนาฬิกา
 - P3.5 T 1 (Time/Counter 1 External interrupt) ขารับสัญญาณเข้าไปยังวงจร Time/Counter ที่ทำหน้าที่นับจำนวนไซเคิลของสัญญาณ T 1 นี้หรือสัญญาณนาฬิกา
 - P3.6 WR (External Data Memory Write Strobe) ขาสัญญาณควบคุมการเขียนข้อมูลไปยังหน่วยความจำภายนอก
 - P3.7 RD (External Data Memory Read Strobe) ขาสัญญาณควบคุมการอ่านข้อมูลไปยังหน่วยความจำภายนอก
 - * RST ขาที่ 9 ใช้ในการรีเซ็ตการทำงานของ MCS-51
 - * ALE (Program Store Enable) อุปกรณ์ภายนอก จะใช้สัญญาณนี้ในการแลดซ์ข้อมูลที่ส่งออกมาทางพอร์ต 0
 - * PSEN(Program Store Enable) ขาที่ 29 ใช้เมื่อต้องการอ่านคำสั่งที่จะนำไปใช้งานมาจากหน่วยความจำสำหรับโปรแกรมภายนอก
 - * EA (External Access) คือขาที่ 31 เป็นขาอินพุต ที่ต่อเข้าไปยังวงจร Timing and Control เพื่อควบคุมการสร้างสัญญาณ PS
 - * XTAL1 (ขา 19) ขานี้จะต่อเข้ากับวงจรขยายแบบป้อนกลับเฟส (Inverting Amplifier) ที่ประกอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นอินพุตเข้าสู่วงจร
- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

* XTAL2 (ขา 20) ขานี้จะต่อเข้ากับวงจรขยายแบบป้อนกลับเฟส (Inverting Amplifier) ที่ประกอบด้วยวงจรออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเป็นอินพุตเข้าสู่วงจร

2.8.5 การทำงานของ MCS-51

การทำงานของ MCS-51 ผู้ใช้จะต้องเขียนโปรแกรมเป็นภาษาเครื่องซึ่งอยู่ในรูปของเลขฐาน 2 ที่เก็บไว้ในหน่วยความจำประเภท Program Memory แต่ละคำสั่งอาจจะประกอบไปด้วย 1, 2 หรือ 3 ไบต์ก็ได้ ภากระทำตามคำสั่งนั้นโดยจะเริ่มจากการทำงานภายใน MCS-51 เองแล้วช่วงต่อไปจะเป็นช่วงการทำงานตามคำสั่ง (Execute Cycle) ซึ่งการทำงานดังกล่าว จะขึ้นอยู่กับสัญญาณควบคุมที่สร้างจากวงจร Oscillator ทำให้การทำงานต่างๆ เป็นไปตามลำดับ ที่ผู้ผลิตได้ออกแบบไว้ดังรูปที่ 2.38



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบุคคลที่ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้ารูปที่ 2.38 แสดงสถานการณ์ทำงานใน MCS-51

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.9 เอฟเอสเค (Frequency Shift Keying)

2.9.1 การจัดสัญญาณเอฟเอสเค (FSK signaling)

สัญญาณเอฟเอสเคเป็นสัญญาณดิจิทัลที่ความถี่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของเบสแบนด์พัลส์ โดยทั่วไป เอฟเอสเคมักใช้ในการส่งข้อมูลที่มีอัตราความเร็วต่ำตามข้อกำหนดครายละเอียด CCITT V.21 และนิยมใช้เอฟเอสเคชนิด 2 ความถี่ทำนองนี้ เพราะเอฟเอสเคอนโคฮีเร้นท์ชนิด 2 ความถี่สามารถกำเนิดและรับได้ง่าย ทำให้มีราคาถูก

$$S_1(t) = A \cos(\omega_c + \omega_d)t \quad , \quad \text{สำหรับสัญญาณมาร์ค}$$

$$\text{และ} \quad S_2(t) = A \cos(\omega_c - \omega_d)t \quad , \quad \text{สำหรับสัญญาณสเปส}$$

ในที่นี้ ω_d คือความถี่เบี่ยงเบน , $0 < 1 < T$

จะเห็นได้ว่า สัญญาณมาร์คมีความถี่ $\omega_1 = \omega_c + \omega_d$ และสัญญาณสเปสมีความถี่ $\omega_2 = \omega_c - \omega_d$ สัญญาณเอฟเอสเค จึงเป็นสัญญาณที่สามารถกำเนิดได้โดยง่ายโดยการสวิตช์ไปมาของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ω_1 และเครื่องกำเนิดสัญญาณ ω_2 สัญญาณเอฟเอสเคดังกล่าวจะมีเฟสไม่ต่อเนื่องในจังหวะที่เปลี่ยนสวิตช์ แต่ถ้าค่อย ๆ เปลี่ยนเฟสของสัญญาณเอฟเอสเคตามขนาดของพัลส์ เช่น เอฟเอสเคที่เกิดจากเอฟเอ็มโมดูเลทพัลส์พีซีเอ็ม เป็นต้น

2.9.2 โคฮีเร้นท์เอฟเอสเค (Coherent FSK)

ถ้าเราตีโมดูเลทสัญญาณเอฟเอสเคด้วยเครื่องรับคอร์รีเลชัน สัญญาณตัวพาท้องถิ่นที่ต้องการคือ

$$S_1(t) - S_2(t) = A \cos(\omega_c t + \omega_d t) - A \cos(\omega_c t - \omega_d t) \quad (2.61)$$

สัญญาณขาออก ณ เวลาสุ่มตัวอย่าง $t = kT$ คือ $S_{o1}(kT)$ และ $S_{o2}(kT)$ ในที่นี้

$$S_{o1}(kT) = \int_0^T S_1(t) [S_1(t) - S_2(t)] dt \quad (2.62)$$

$$S_{o2}(kT) = \int_0^T S_2(t) [S_1(t) - S_2(t)] dt \quad (2.63)$$

ถ้าพลังงานของสัญญาณ E_1 และ E_2 เท่ากัน $S_{o1}(kT) = S_{o2}(kT)$ ฉะนั้นเทรตโฮลด์ของเครื่องรับจึงตั้งไว้ที่ค่าศูนย์ พรอบบะบิลิตีความผิดพลาด P_e สำหรับเครื่องรับคอร์รีเลชัน เท่ากับ

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\gamma_{\max} / 2) \quad (2.64)$$

ในที่นี้

$$\gamma_{\max}^2 = \frac{1}{\eta_0} \int_0^T [S_1(t) - S_2(t)]^2 dt \quad (2.65)$$

แทน $S_1(t)$ และ $S_2(t)$ และอินทิเกรท จะได้

$$\gamma_{\max}^2 = \frac{2A^2 T}{\eta} \left[1 - \frac{\sin 2\omega_d T}{2\omega_d T} + \frac{1 \sin [2(\omega_c + \omega_d)T]}{2(\omega_c + \omega_d)T} - \frac{1 \sin [2(\omega_c - \omega_d)T]}{2(\omega_c - \omega_d)T} - \frac{\sin 2\omega_c T}{2\omega_c T} \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (2.66)

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติว่า $\omega_c T \gg 1$, $\omega_c \gg \omega_d$ ซึ่งเป็นจริงในทางปฏิบัติและ 3 เทอมหลังในสมการ 2.149 มีค่าน้อยจนไม่ต้องคำนึงถึงได้ เราจะได้

$$\gamma_{\max}^2 = \frac{2A^2 T}{\eta} \left[1 - \frac{\sin 2\omega_d T}{2\omega_d T} \right] \quad (2.67)$$

ค่า γ_{\max}^2 จะมีค่ามากที่สุดถ้าเลือกความถี่เบี่ยงเบนให้ $2\omega_d T = 3\pi/2$ มีค่า ω_d ค่านี้จะได้

$$\gamma_{\max}^2 = (2.42)(A^2 T/\eta)$$

และ

$$P_c = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{0.61 \frac{A^2 T}{\eta}} \right]$$

ถ้าเรากำหนด $S_{AV} = A^2/2$ และ $E_{AV} = A^2 T/2$ เราสามารถแสดง P_c ในรูปของ

$$P_c = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{1.2 S_{AV} T/\eta} \right)$$

$$P_c = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{1.2 E_{AV}/\eta} \right)$$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การคำนวณและการสร้าง

ในบทที่ 3 จะเป็นเรื่องของ การคำนวณและการสร้างวงจรขึ้นมา โดยอาศัยบล็อกโคอะแกรมที่กล่าวมาในบทที่ 1 รวมถึงอาศัยทฤษฎีและหลักการในบทที่ 2 มาใช้ร่วมกันในการสร้างวงจร โดยสร้างวงจรให้ได้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับทางทฤษฎีมากที่สุด

การคำนวณและการสร้างจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. การคำนวณและการสร้างตัวแม่
2. การคำนวณและการสร้างตัวลูก
3. การคำนวณและการสร้างลำโพง

การคำนวณและสร้างตัวแม่

3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอกทีฟ

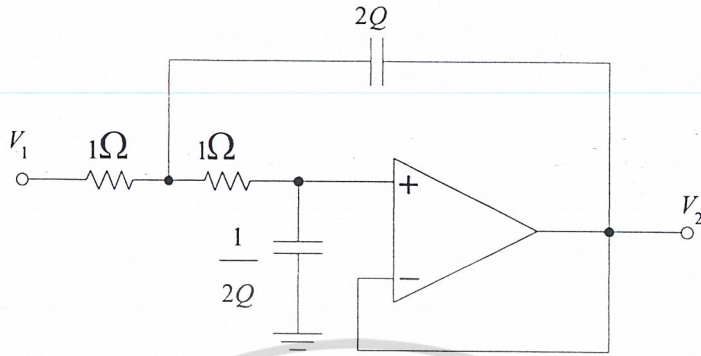
ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดแอกทีฟ อันดับที่ 8 กำหนดให้ ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ โดยค่า Q แสดงได้ตามตาราง

Even Order	2	4	6	8	10	Odd Order	3	5	7	9	11
Q_1	0.71	0.54	0.52	0.51	0.51	Q_1	1	0.62	0.55	0.53	0.52
Q_2		1.31	0.71	0.6	0.6	Q_2		1.62	0.8	0.65	0.59
Q_3			1.93	0.9	0.71	Q_3			2.24	1	0.76
Q_4				2.56	1.1	Q_4				2.88	1.2
Q_5					3.2	Q_5					3.51

ตารางที่ 3.1 ค่า Q ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทที่อันดับต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลือกรวงจร Sallen and Key โดยนอร์มอลไลซ์ที่ 1 Rad/s และมีค่า อิมพีแดนซ์เท่ากับ 1 โอห์ม ดังรูป



รูปที่ 3.1 วงจรต้นแบบของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ Sallen and Key

เมื่อ $C_1 = 2Q$ และ $C_2 = \frac{1}{2Q}$

ทำการสเกลเพื่อให้ได้วงจรที่สมบูรณ์โดยใช้สมการ

$$R_{new} = R_{old} \times k_m$$

$$C_{new} = \frac{C_{old}}{k_m k_f}$$

โดยที่ $k_f = \omega_{new} = 2\pi f_c$ และ $k_m = \text{magnetude scale}$

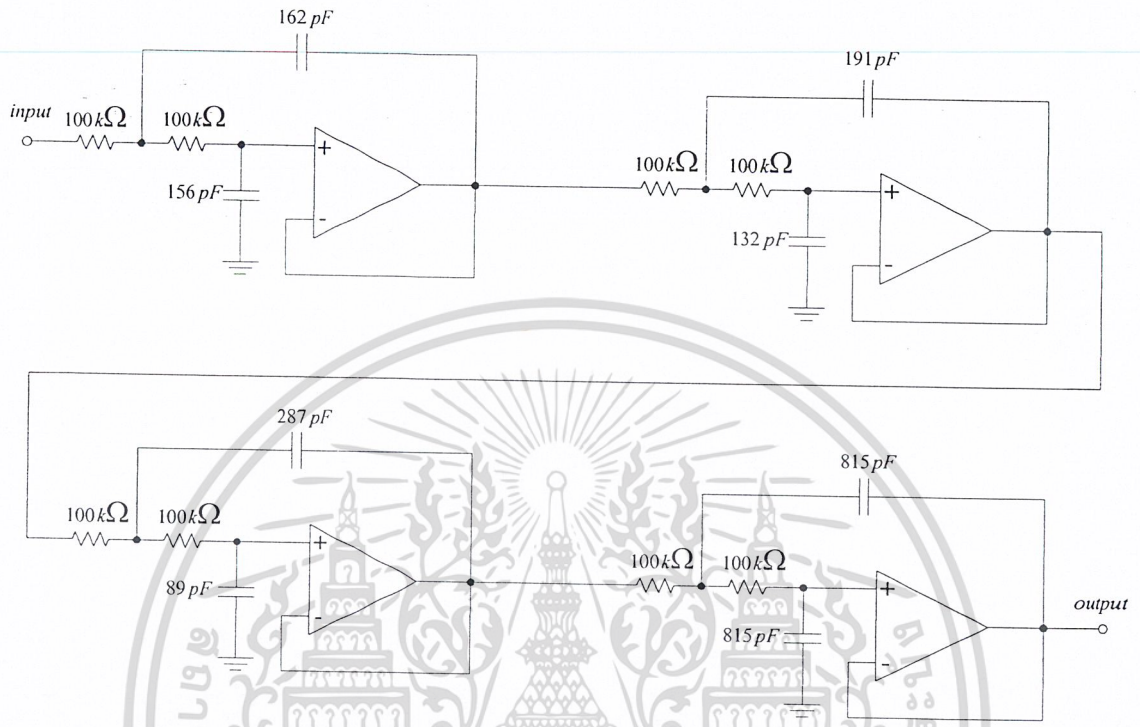
เมื่อกำหนดให้ค่า $k_m = 100 \text{ k}\Omega$ และนำไปแทนค่าในสมการ จะได้ผลดังตาราง

ความถี่		Q_1	Q_2	Q_3	Q_4
100 kHz	$R_1 = R_2$	100 kΩ	100 kΩ	100 kΩ	100 kΩ
	C_1	162.33 pF	190.98 pF	286.47pF	814.87 pF
	C_2	155.97 pF	132.09 pF	89.12 pF	31.035 pF

ตารางที่ 3.2 ค่าของอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ความถี่คัทออฟ 10 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าต่างๆที่ได้จากการคำนวณมาทำการสร้างวงจร ซึ่งจะได้วงจรที่สมบูรณ์ดังรูป



รูปที่ 3.2 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแบคทีฟ ความถี่คutoff 10 กิโลเฮิร์ตซ์

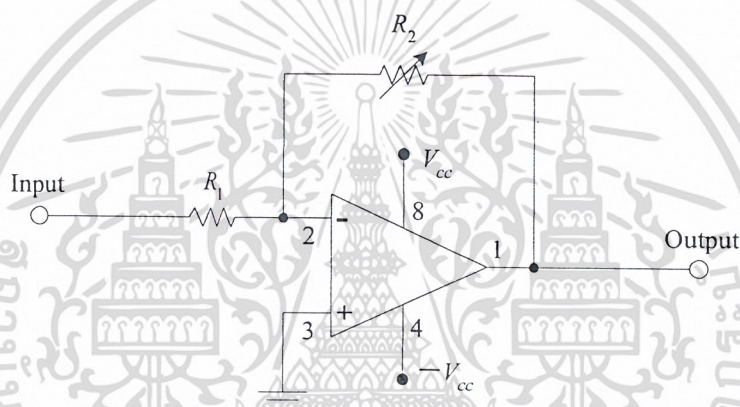
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 วงจรขยายสัญญาณเสียง

สัญญาณเสียงที่รับเข้ามาส่วนมากมักมีขนาดต่ำ ดังนั้นจึงต้องทำการขยายสัญญาณให้มีขนาดสัญญาณที่แรงขึ้นเพื่อที่จะนำไปใช้ในส่วนอื่นต่อไป เราเลือกใช้วงจรขยายแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) โดยเลือกใช้ออปแอมป์ LF353 ซึ่งอัตราขยายสามารถคำนวณได้จาก

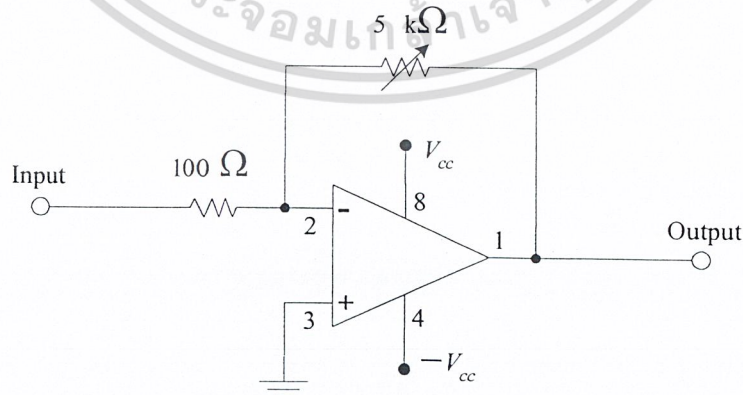
$$\text{อัตราขยายแรงดัน } A_{v(\max)} = -\frac{R_2}{R_1}$$

วงจรมูลของวงจรขยายสัญญาณเสียงแบบกลับเฟสสามารถเขียนได้ดังรูป



รูปที่ 3.3 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

เราเลือกใช้ $R_1 = 100 \Omega$ และ $R_2 = 5 \text{ k}\Omega$ จากการแทนค่าเราจะได้อัตราขยายสูงสุดเท่ากับ 50 เท่า ซึ่งจะได้วงจรดังรูป

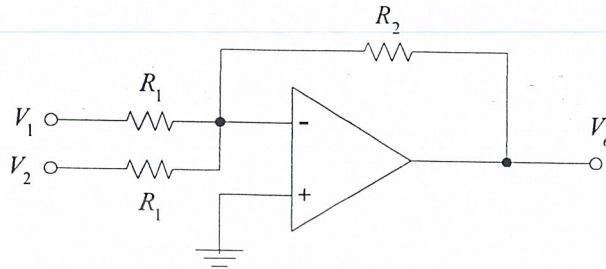


รูปที่ 3.4 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสที่มีอัตราขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วงจรรวมสัญญาณ

เป็นวงจรที่ทำหน้าที่รวมสัญญาณเข้าด้วยกัน เลือกใช้แบบ Inverting ซึ่งวงจรเป็นดังรูป



รูปที่ 3.5 รูปวงจรรวมสัญญาณแบบ Inverting

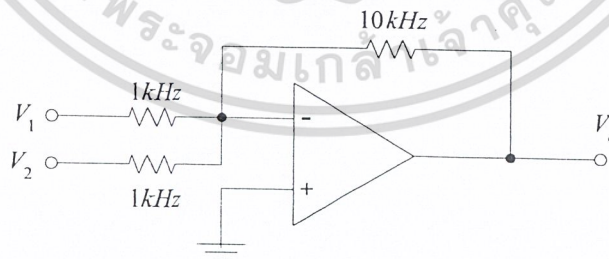
จากรูป เราจะได้

$$V_o = -\frac{R_2}{R_1}(V_1 + V_2)$$

เราเลือกค่า $R_1 = 1 \text{ kHz}$ และ $R_2 = 10 \text{ kHz}$ จะได้

$$\therefore V_o = -10(V_1 + V_2)$$

ซึ่งมีรูปวงจรดังรูป

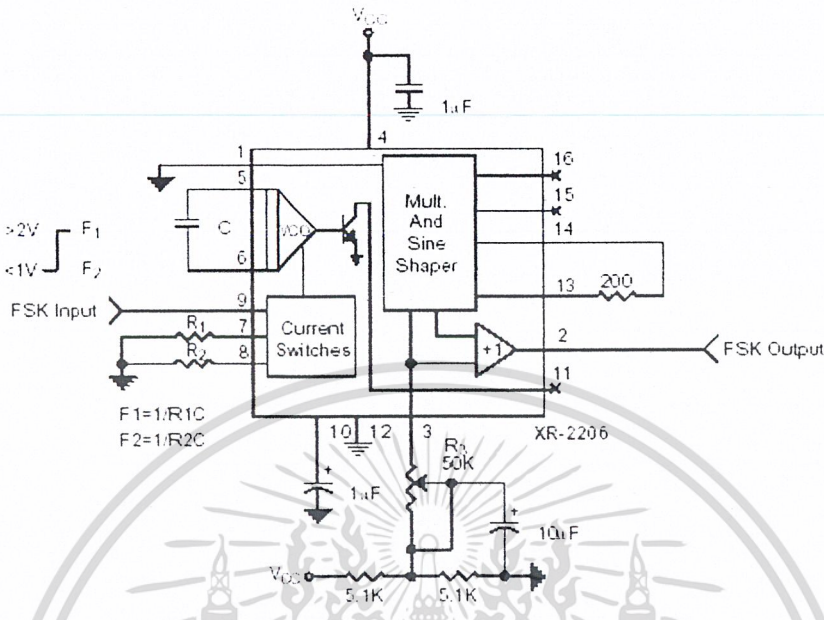


รูปที่ 3.6 รูปวงจรรวมสัญญาณแบบ Inverting ที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วงจรพรีแอมป์ซีพียูยี่ห้อมอดูลชั้น

เลือกใช้ IC เบอร์ XR2206 ซึ่งจากคำแนะนำจากคาต้าล๊อก จะได้วงจรดังรูป



รูปที่ 3.7 วงจรพรีแอมป์ซีพียูยี่ห้อมอดูลชั้น

จากการออกแบบพรีแอมป์ซีพียูของ โครงงานนี้ ได้กำหนดความถี่ของการสื่อสารไว้ที่ความถี่ 100 Hz และความถี่ 110 Hz ซึ่งมีอัตราบิตเรตที่ 1200 บิตต่อวินาที จากค่าดังกล่าวสามารถออกแบบได้ดังนี้

จาก

$$F_1 = \frac{1}{R_1 \times C}$$

$$F_2 = \frac{1}{R_2 \times C}$$

โดยกำหนดค่า C = 0.01µF

ดังนั้นที่ความถี่ 100 kHz

$$100 \times 10^3 = \frac{1}{R_1 \times 0.01 \times 10^{-6}}$$

$$R = \frac{1}{100 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}} = 1000 \Omega$$

ที่ความถี่ 110 kHz

$$110 \times 10^3 = \frac{1}{R_1 \times 0.01 \times 10^{-6}}$$

$$R_2 = \frac{1}{110 \times 10^3 \times 0.01 \times 10^{-6}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

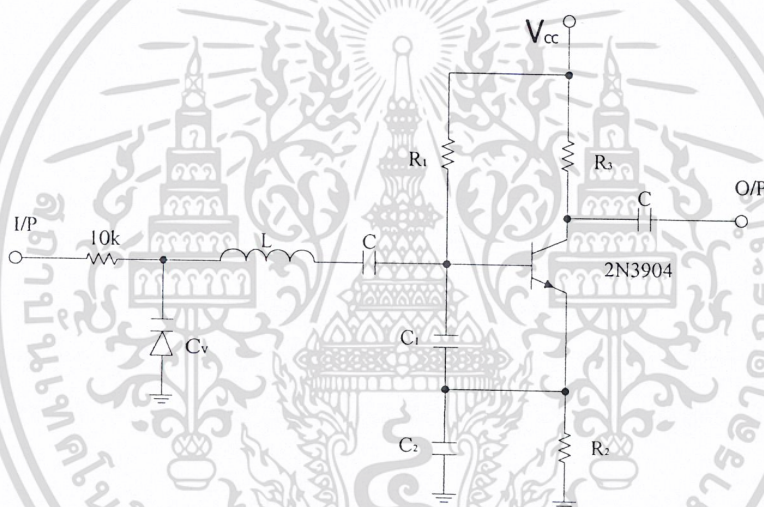
3.5 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูป 86 เมกะเฮิรตซ์

ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ได้แก่

1. วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า
2. วงจรพรีสเกลเลอร์สองโมดูลัส ใช้ไอซีเบอร์ MC12017
3. วงจรเฟสดีเทกเตอร์ ซึ่งอยู่ในไอซีเบอร์ MC145152-2
4. วงจรลูปฟิลเตอร์ ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM358

3.5.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นจากการออกแบบสร้างวงจรถ่ายความถี่ซึ่งในโครงงานนี้ได้ใช้วงจรถ่ายความถี่แบบคอลพิตซ์ชนิดอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter)



รูปที่ 3.8 วงจรกำเนิดความถี่แบบคอลพิตซ์ (Colpitt Oscillator)

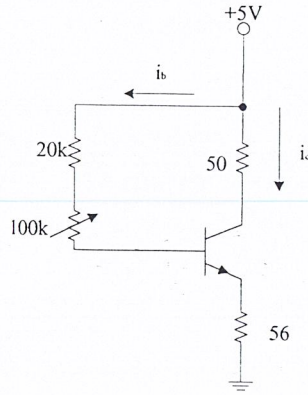
ทำการไบอัสโดยให้

$$R1 = 100k\Omega + 20k\Omega$$

$$R2 = 56 k\Omega$$

โดยในที่นี้ค่า β_{dc} ของ 2N3904 มีค่าเท่ากับ 110 (จากค่าตัวชี้ทและการวัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



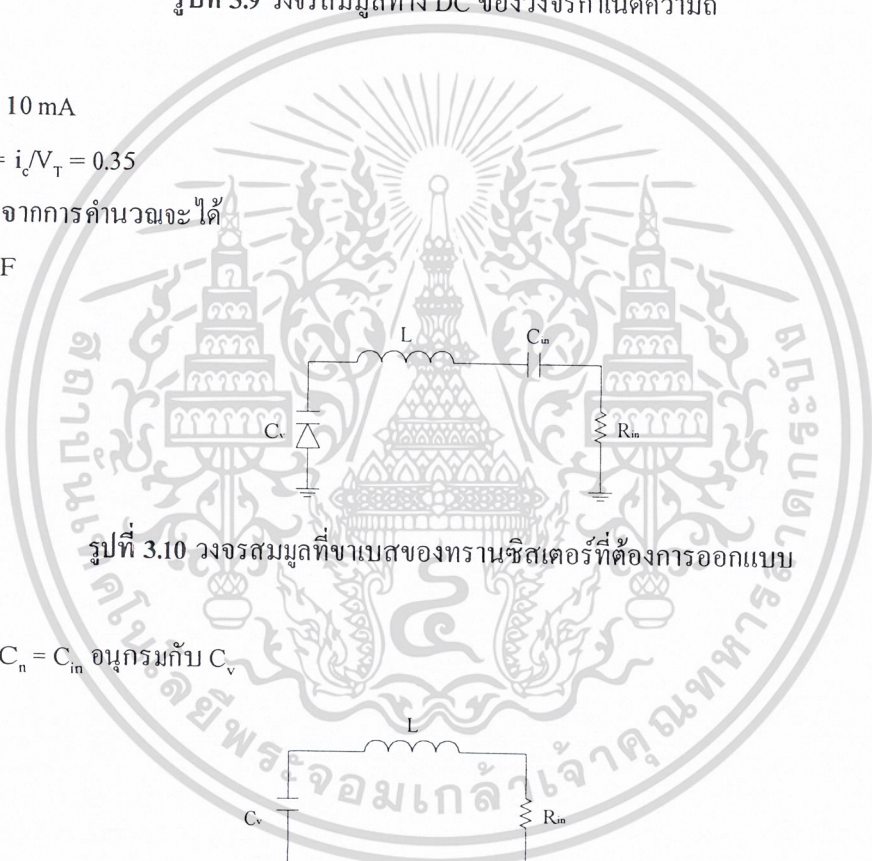
รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลทาง DC ของวงจรกำเนิดความถี่

ต้องการ $i_c = 10 \text{ mA}$

$$g_m = i_c / V_T = 0.35$$

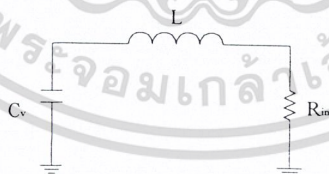
เพราะฉะนั้นจากการคำนวณจะได้

$$C_{in} = 16.5 \text{ pF}$$



รูปที่ 3.10 วงจรสมมูลที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต้องการออกแบบ

จากรูปได้ว่า $C_n = C_{in}$ อนุกรมกับ C_v



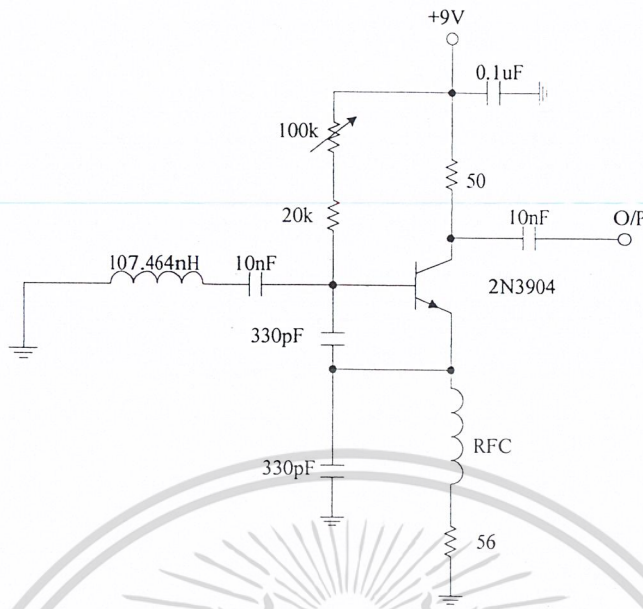
รูปที่ 3.11 วงจรสมมูลเมื่อรวม C_{in} กับ C_v

วารีแคปไซเบอร์ MV104 ซึ่งมีค่าความจุประมาณ 37-42 pF เลือกค่า C_v กลางๆ ประมาณ 39.5 pF ดังนั้นได้ค่า C_n และ L ดังนี้

$$C_n = 31.87 \text{ pF}$$

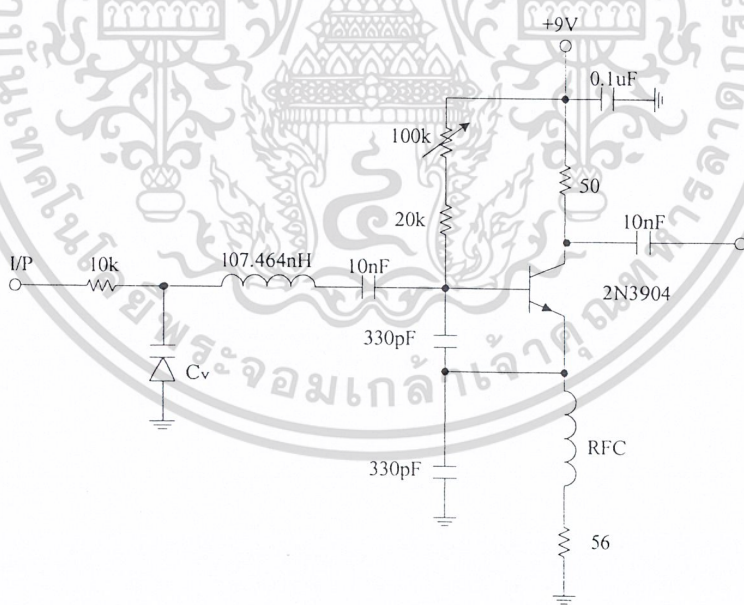
$$L = 107.464 \text{ nH}$$

เมื่อทำการใส่ค่าตามที่คำนวณแล้วจะได้วงจรกำเนิดความถี่ดังรูป 3.12 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 วงจรกำเนิดความถี่

จากค่าภายในวงจรที่ได้ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้าได้
ดังรูป 3.13

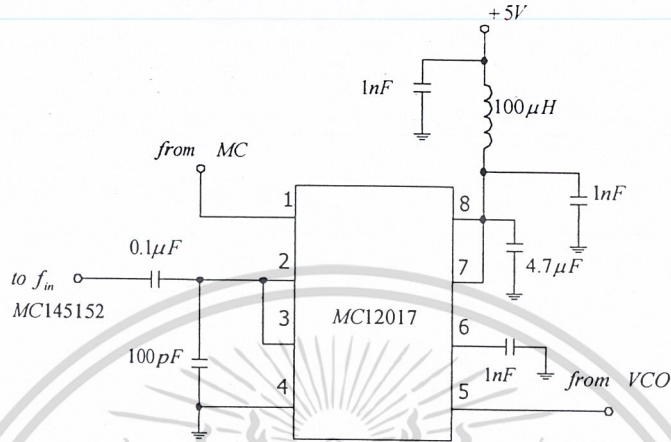


รูปที่ 3.13 วงจรกำเนิดความถี่ที่ปรับ ค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.2 วงจรเฟรียสเกลเลอร์สองโมดูลัส

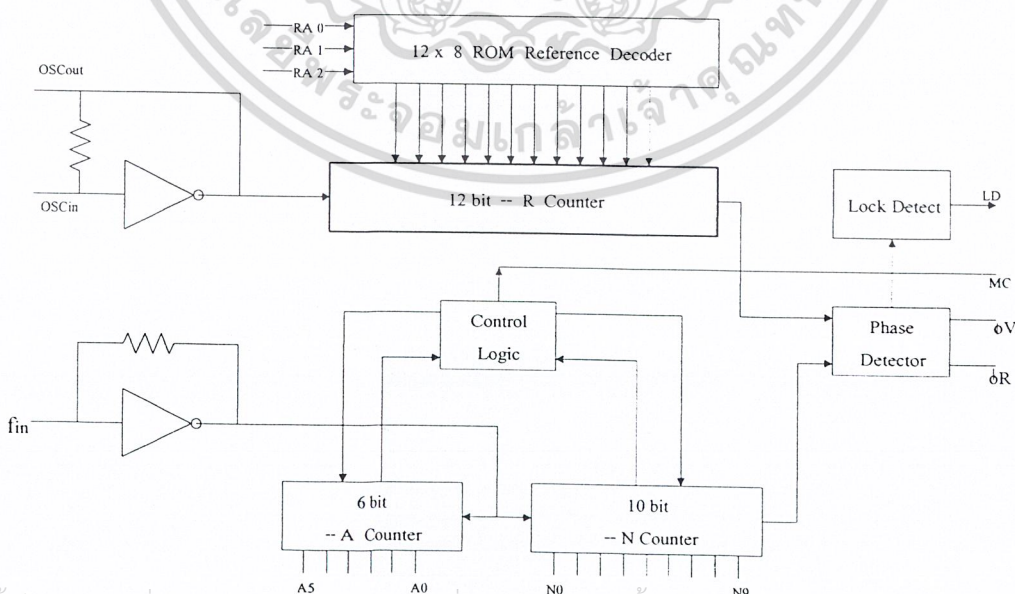
เฟรียสเกลเลอร์เป็นตัวหารความถี่ที่เข้ามาให้ต่ำลงเพื่อที่จะป้อนให้กับวงจรเฟสดีเทกเตอร์โดยใช้ไอซี MC12017 ซึ่งจะถูกรับค่าเท่ากับ 64/65 โดยทำการต่อวงจรดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 การต่อวงจรของไอซี MC12017

3.5.3 วงจรเฟสดีเทกเตอร์และการตั้งโปรแกรมหารความถี่

ไอซี MC145152-2 ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการโปรแกรมเพื่อหารความถี่ที่เข้ามาส่วนของความถี่อ้างอิง และส่วนของเฟสดีเทกเตอร์ดังแสดงได้ตามรูป ซึ่งไอซีนี้สามารถตั้งโปรแกรมเพื่อหารความถี่ที่เข้ามาได้ 16 บิตแบบขนาน โดย 10 บิตสำหรับตัวหาร N (10 bit / N Counter) และ 6 บิตสำหรับตัวหารของไอซีเฟรียสเกลเลอร์ นอกจากนี้ยังมีล็อกดีเทก (Lock Detect : LD) เพื่อใช้บอกสถานะการล็อกของเฟสดีเทกอีกด้วย



รูปที่ 3.15 ส่วนประกอบต่าง ๆ ภายใน MC145152-2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังที่ห้ามเผยแพร่เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนความถี่อ้างอิงจะใช้คริสตอล 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นตัวอ้างอิงและหารความถี่ลงมาโดยกำหนดจากค่า RA_0, RA_1, RA_2

โดยในการโปรแกรมการหารความถี่ จำนวนได้ดังนี้ คือ

เนื่องจากค่าความถี่ที่ต้องการ (f_0)

ค่าช่วงความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณ (Channel Spacing : f_s)

จากค่าชี้ทของโมโตโรล่า ค่าอัตราส่วนในการหารของฟีดแบคลูป (Total Division Ratio In Feedback Loop) เทียบกับสมการ $N_t = NP + A$

โดยที่ N คือ ตัวโปรแกรม $N_0 - N_9 = 10$ บิต หารตั้งแต่ 3-1023

A คือ ตัวโปรแกรม $A_0 - A_5 = 6$ บิต หารตั้งแต่ 0-63

P คือ ตัวหารของพรีสเกลเลอร์ หาร 64

ในวงจรนี้เราต้องการที่จะกำเนิดความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้ความถี่อ้างอิงจากคริสตอลความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถออกแบบค่าตัวหารต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$f_s = \frac{f_{\text{crystal}}}{R}$$

โดย f_{crystal} คือ ความถี่ของคริสตอล

R คือ ค่าตัวหารคริสตอลภายในไอซีเบอร์ MCI45152-2 โดยสามารถตั้งค่าได้จาก

$$RA_0 - RA_2$$

ในวงจรนี้เราใช้ $f_{\text{crystal}} = 10.24 \text{ MHz}$ และตัวหาร $R = 512$ (ตั้งค่า $RA_0 - RA_2$ เป็น 001) เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$f_s = \frac{10,240,000}{512}$$

$$f_s = 20,000$$

นั่นคือจะได้ค่าช่วงความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะสามารถหาค่าตัวหาร N_t ได้จาก

$$N_t = \frac{f_0}{f_s}$$

$$N_t = \frac{86,000,000}{20,000}$$

$$N_t = 4,300$$

และจาก $N_t = NP + A$ จะได้ว่า

$$N_t = (64 \times N) + A$$

ดังนั้นเราจะได้ $N = 67$ แปลงเป็นเลขฐานสองได้ 0001000011

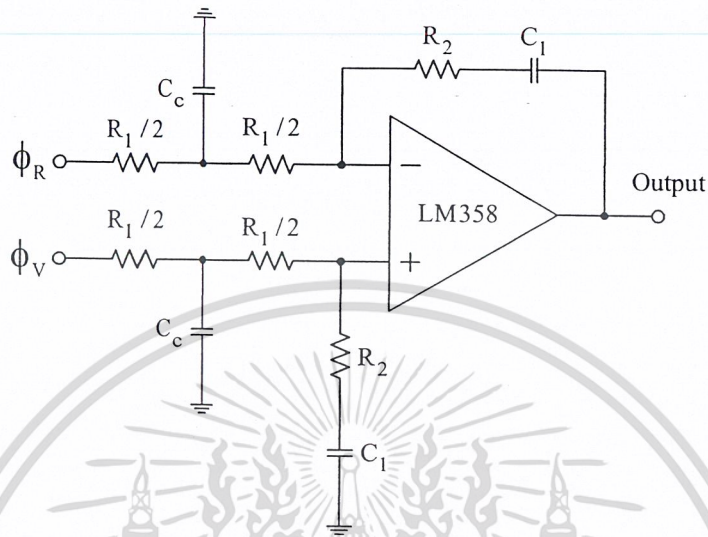
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$A = 12$ แปลงเป็นเลขฐานสองได้ 001100

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.4 วงจรรูปฟิลเตอร์

การออกแบบวงจรรูปฟิลเตอร์ออกแบบโดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM358 โดยทำการออกแบบและคำนวณมีโครงสร้างวงจดังนี้



รูปที่ 3.16 โครงสร้างวงจรูปฟิลเตอร์

กำหนดให้ (ตามคำแนะนำในค่าดัชนีของโมโตโรล่า)

- $f_0 = 86 \text{ MHz}$ (Oscillator Frequency)
- $f_s = 20 \text{ kHz}$ (Channel Spacing)
- $f_b = 0.01 f_s = 200 \text{ Hz}$ (Loop Bandwidth)
- $\zeta = 0.8$ (Loop Damping Factor)
- $V_{DD} = 5 \text{ V}$ (PLL Power Supply)
- $C_1 = 0.1 \mu\text{F}$ (Active Integrator Component)
- $K_\phi = \frac{V_{DD}}{2\pi} = 0.795 \text{ V/Rad}$

$$K_{VCO} = \frac{2\pi \Delta f_{VCO}}{\Delta V_{VCO}}$$

$= 11.724 \times 10^6 \text{ Rad/V}$ (ได้จากกราฟของความถี่เทียบกับแรงดัน

ควบคุมของออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน)

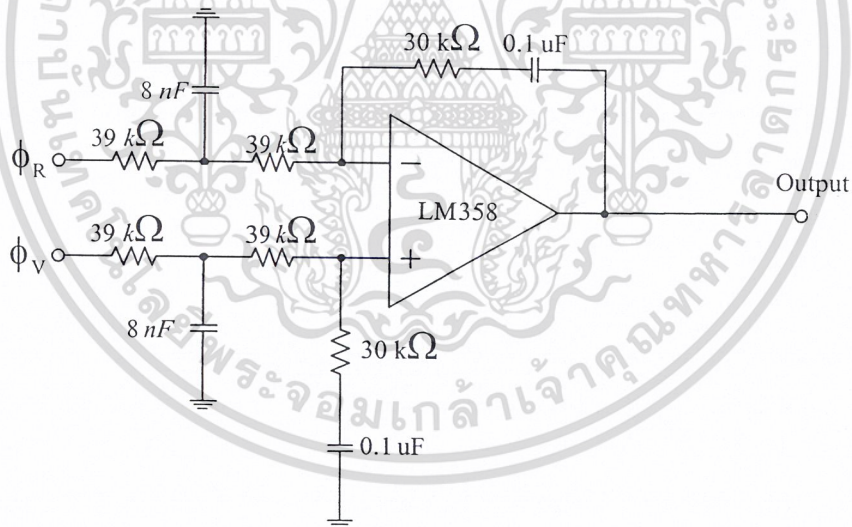
$$\omega_n = \frac{2\pi f_b}{\sqrt{2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(2\zeta^2 + 1)^2 + 1}}} \quad (\text{Natural Frequency})$$

$$= \frac{2\pi \times 200}{\sqrt{2(0.8)^2 + 1 + \sqrt{(2 \times 0.8^2 + 1)^2 + 1}}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ $\sqrt{2(0.8)^2 + 1 + \sqrt{(2 \times 0.8^2 + 1)^2 + 1}}$ นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอก 576.439 Rad/sec อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \frac{K_\phi K_{VCO}}{C_1 N_t \omega_n^2} \\
 &= \frac{0.795 \times 11.724 \times 10^6}{(0.1 \times 10^{-6}) \times 4300 \times (576.439)^2} \\
 &= 158.074 \text{ k}\Omega \\
 R_2 &= \frac{2\zeta}{\omega_n C_1} \\
 &= \frac{2 \times 0.8}{(576.439) \times (0.1 \times 10^{-6})} \\
 &= 27.756 \text{ k}\Omega \\
 C_c &= \frac{4}{2R_1 f_{rc}} = \frac{4}{2 \times 65,233.063 \times 20 \times 200} \\
 &= 7.664 \times 10^{-9} \text{ F}
 \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้นจะได้วงจรตามรูป

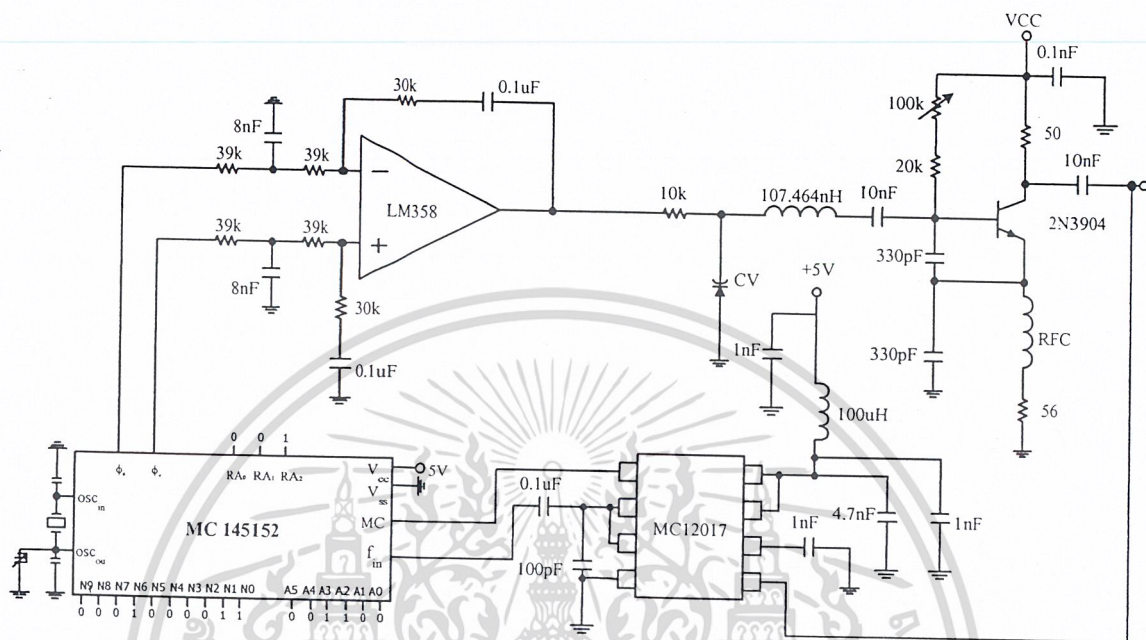


รูปที่ 3.17 วงจรลูฟฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.5 วงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์

หลังจากที่ออกแบบวงจรในแต่ละส่วนแล้วก็นำมาต่อเข้ารวมให้ครบรูปได้ดังรูป 3.18



รูปที่ 3.18 วงจรที่สมบูรณ์ของวงจรสังเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์

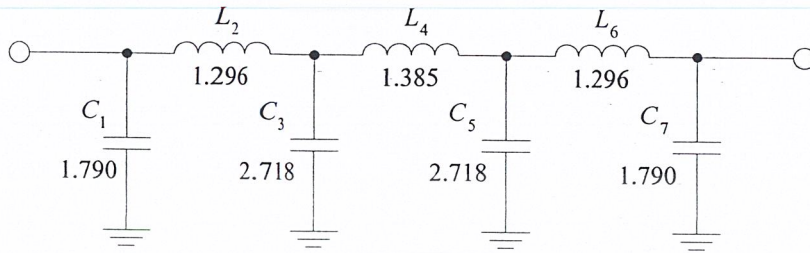
3.6 วงจรมอดูเลตความถี่เอฟเอ็ม

การมอดูเลตความถี่เอฟเอ็มในโครงการนี้จะทำการมอดูเลตโดยใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้หลักการที่ว่าวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า จะเปลี่ยนความถี่เนื่องจากแรงดันควบคุมที่วงจรสังเคราะห์ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ก็จะสามารถทำการมอดูเลตความถี่เอฟเอ็มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 86 เมกะเฮิร์ตซ์

เลือกใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งได้วงจรที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้วดังนี้



รูปที่ 3.19 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว

ทำการสเกลโดย ค่า L และ C คำนวณได้จาก

$$C = \frac{C_n}{(2\pi f_c R)}$$

$$L = \frac{RL_n}{(2\pi f_c)}$$

โดยที่ R = 50 และ f_c คือความถี่คัทออฟ ในกรณีนี้ $f_c = 100 \text{ MHz}$ จะได้

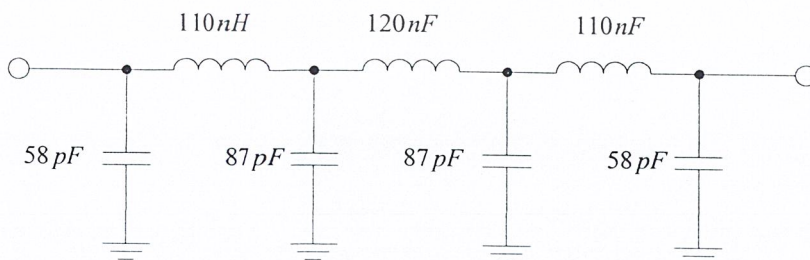
$C_1 = C_7 = 58 \text{ pF}$

$C_3 = C_5 = 87 \text{ pF}$

$L_2 = L_6 = 110 \text{ nH}$

$L_4 = 120 \text{ nH}$

จะได้วงจรที่สมบูรณ์ดังรูป



รูปที่ 3.20 แสดงวงจรกรองวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณและการสร้างตัวลูก

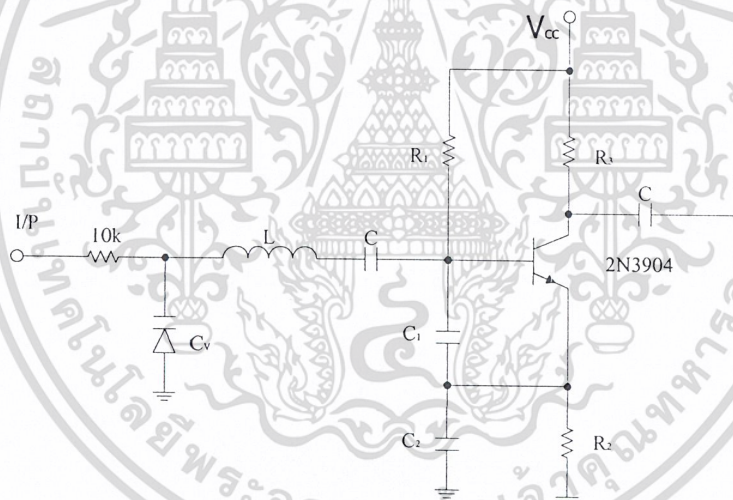
3.8 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกลูป 80.5 เมกะเฮิรตซ์

ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ได้แก่

1. วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า
2. วงจรพรีแอมพลิฟายเออร์สองโมดูลัส ใช้ไอซีเบอร์ MC12017
3. วงจรเฟสดีเทกเตอร์ ซึ่งอยู่ในไอซีเบอร์ MC145152-2
4. วงจรลูปฟิลเตอร์ ใช้ออปแอมป์เบอร์ LM358

3.8.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นจากการออกแบบสร้างวงจรถูกกำเนิดความถี่ซึ่งในโครงงานนี้ได้ใช้วงจรถูกกำเนิดความถี่แบบคอลพิตต์ชนิดอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter)



รูปที่ 3.21 วงจรกำเนิดความถี่แบบคอลพิตต์ (Colpitt Oscillator)

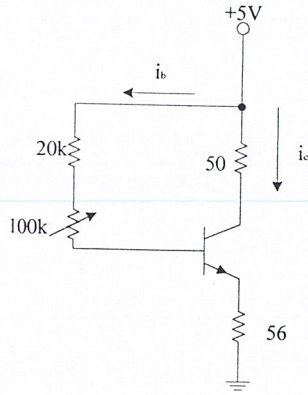
ทำการไบอัสโดยให้

$$R1 = 100k\Omega + 20k\Omega$$

$$R2 = 56 k\Omega$$

โดยในที่นี้ค่า β_{dc} ของ 2N3904 มีค่าเท่ากับ 110 (จากค่าตัวชี้และการวัด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



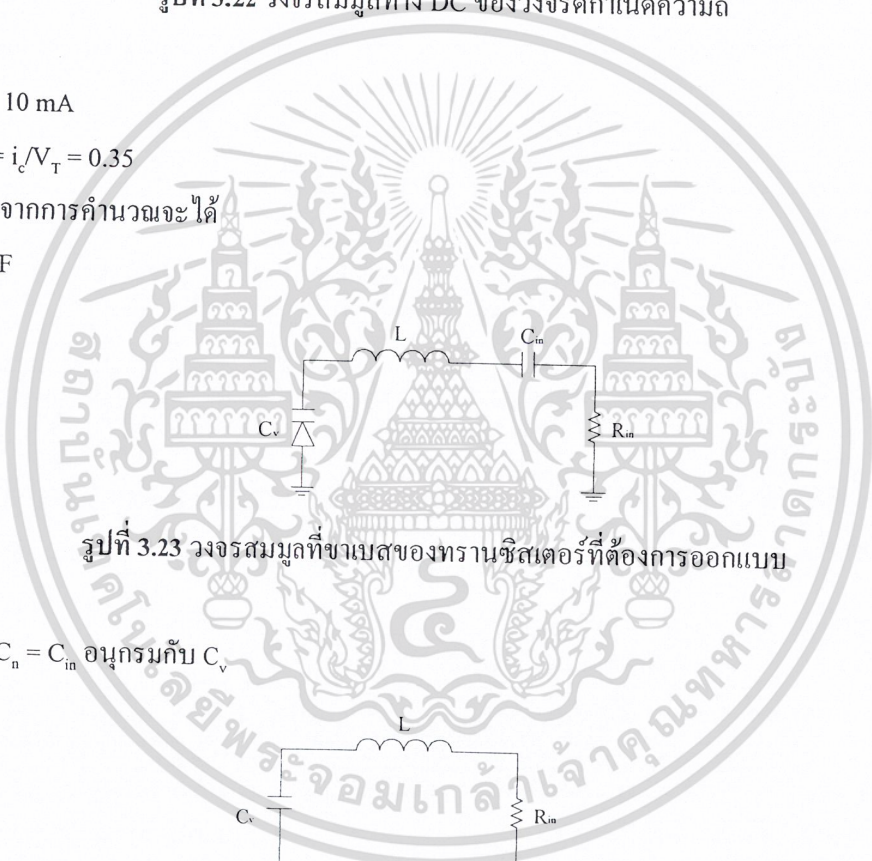
รูปที่ 3.22 วงจรสมมูลทาง DC ของวงจรกำเนิดความถี่

ต้องการ $i_c = 10 \text{ mA}$

$$g_m = i_c / V_T = 0.35$$

เพราะฉะนั้นจากการคำนวณจะได้

$$C_{in} = 16.5 \text{ pF}$$



รูปที่ 3.23 วงจรสมมูลที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต้องการออกแบบ

จากรูปได้ว่า $C_n = C_{in}$ อนุกรมกับ C_v



รูปที่ 3.24 วงจรสมมูลเมื่อรวม C_{in} กับ C_v

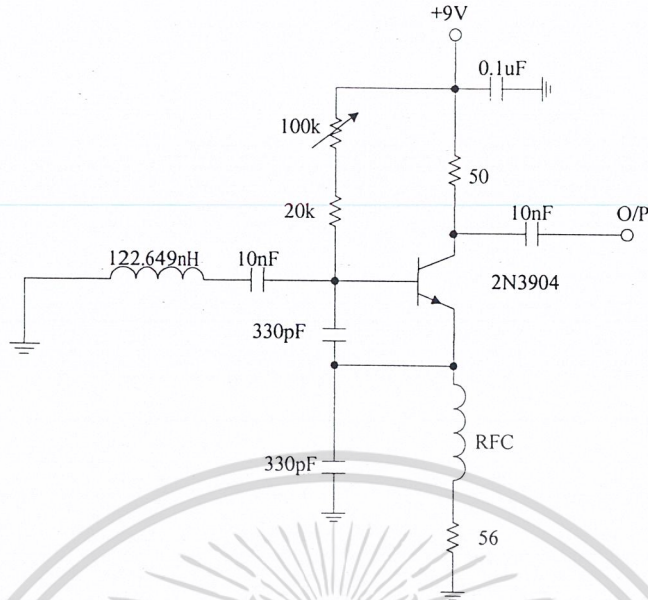
วาริแคปใช้เบอร์ MV104 ซึ่งมีค่าความจุประมาณ 37-42 pF เลือกค่า C_v กลางๆ ประมาณ 39.5 pF ดังนั้นได้ค่า C_n และ L ดังนี้

$$C_n = 31.87 \text{ pF}$$

$$L = 122.649 \text{ nH}$$

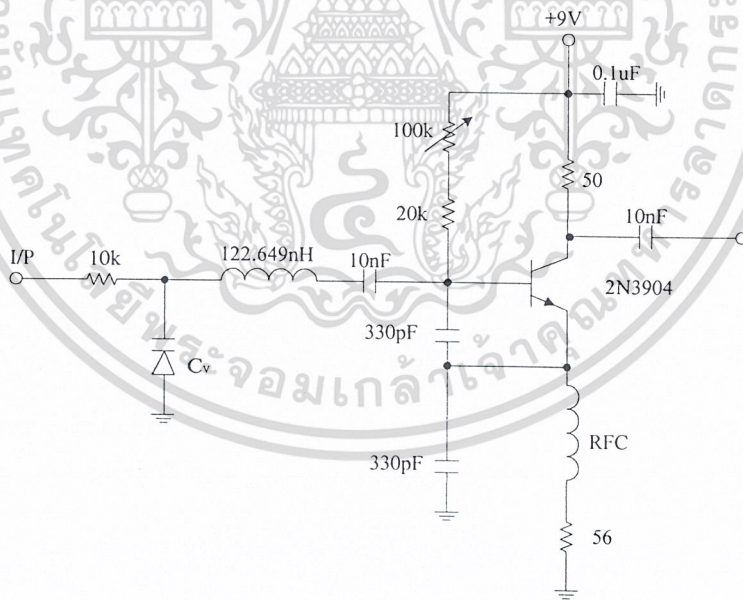
เมื่อทำการใส่ค่าตามที่คำนวณแล้วจะได้วงจรกำเนิดความถี่ดังรูป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.25 วงจรกำเนิดความถี่

จากค่าภายในวงจรที่ได้ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้าได้
คังรูป



รูปที่ 3.26 วงจรกำเนิดความถี่ที่ปรับ ค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนความถี่อ้างอิงจะใช้คริสตอล 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นตัวอ้างอิงและหารความถี่ลงมาโดยกำหนดจากค่า RA_0 , RA_1 , RA_2

โดยในการโปรแกรมการหารความถี่ จำนวนได้ดังนี้ คือ

เนื่องจากค่าความถี่ที่ต้องการ (f_0)

ค่าช่วงความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณ (Channel Spacing : f_s)

จากค่าดัชนีของโมโดโรล่า ค่าอัตราส่วนในการหารของฟีดแบคคูป (Total Division Ratio In Feedback Loop) เทียบกับสมการ $N_t = NP + A$

โดยที่ N คือ ตัวโปรแกรม $N_0 - N_9 = 10$ บิต หารตั้งแต่ 3-1023

A คือ ตัวโปรแกรม $A_0 - A_5 = 6$ บิต หารตั้งแต่ 0-63

P คือ ตัวหารของพรีสเกลเลอร์ หาร 64

ในวงจรนี้เราต้องการที่จะกำเนิดความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้ความถี่อ้างอิงจากคริสตอลความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถออกแบบค่าตัวหารต่างๆ ได้ดังนี้

$$f_s = \frac{f_{\text{crystal}}}{R}$$

โดย f_{crystal} คือ ความถี่ของคริสตอล

R คือ ค่าตัวหารคริสตอลภายในไอซีเบอร์ MC145152-2 โดยสามารถตั้งค่าได้จาก

$$RA_0 - RA_2$$

ในวงจรนี้เราใช้ $f_{\text{crystal}} = 10.24 \text{ MHz}$ และตัวหาร $R = 512$ (ตั้งค่า $RA_0 - RA_2$ เป็น 001) เพราะฉะนั้นจะ
ได้ว่า

$$f_s = \frac{10,240,000}{512}$$

$$f_s = 20,000$$

นั่นคือจะได้ค่าช่วงความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะสามารถหาค่าตัวหาร N_t ได้จาก

$$N_t = \frac{f_0}{f_s}$$

$$N_t = \frac{80,500,000}{20,000}$$

$$N_t = 4025$$

และจาก $N_t = NP + A$ จะได้ว่า

$$N_t = (64 \times N) + A$$

ดังนั้นเราจะได้ $N = 62$ แปลงเป็นเลขฐานสองได้ 0000111110

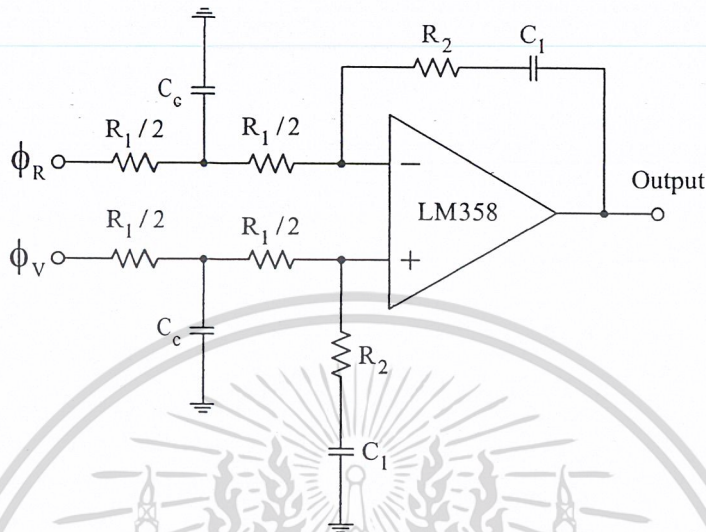
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

$A = 57$ แปลงเป็นเลขฐานสองได้ 111001

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.4 วงจรรูปฟิลเตอร์

การออกแบบวงจรรูปฟิลเตอร์ออกแบบโดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM358 โดยทำการออกแบบและคำนวณมีโครงสร้างวงจรถังนี้



รูปที่ 3.29 โครงสร้างวงจรรูปฟิลเตอร์

กำหนดให้ (ตามคำแนะนำในค่าดัชนีของโมโตโรล่า)

$$\begin{aligned}
 f_0 &= 80.5 \text{ MHz} && \text{(Oscillator Frequency)} \\
 f_s &= 20 \text{ kHz} && \text{(Channel Spacing)} \\
 f_b &= 0.01 f_s = 200 \text{ Hz} && \text{(Loop Bandwidth)} \\
 \zeta &= 0.8 && \text{(Loop Damping Factor)} \\
 V_{DD} &= 5 \text{ V} && \text{(PLL Power Supply)} \\
 C_1 &= 0.1 \mu\text{F} && \text{(Active Integrator Component)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 K_\phi &= \frac{V_{DD}}{2\pi} \\
 &= 0.795 \text{ V/Rad}
 \end{aligned}$$

$$K_{VCO} = \frac{2\pi\Delta f_{VCO}}{\Delta V_{VCO}}$$

$$= 10.812 \times 10^6 \text{ Rad/V} \text{ (ได้จากกราฟของความถี่เทียบกับแรงดัน}$$

ควบคุมของออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน)

$$\begin{aligned}
 \omega_n &= \frac{2\pi f_b}{\sqrt{2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(2\zeta^2 + 1)^2 + 1}}} && \text{(Natural Frequency)} \\
 &= \frac{2\pi \times 200}{\sqrt{2(0.8)^2 + 1 + \sqrt{(2(0.8)^2 + 1)^2 + 1}}}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_1 = \frac{K_\phi K_{VCO}}{C_1 N_1 \omega_n^2}$$

$$= \frac{0.795 \times 10.812 \times 10^6}{(0.1 \times 10^{-6}) \times 4025 \times (576.439)^2}$$

$$= 64.289 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{2\zeta}{\omega_n C_1}$$

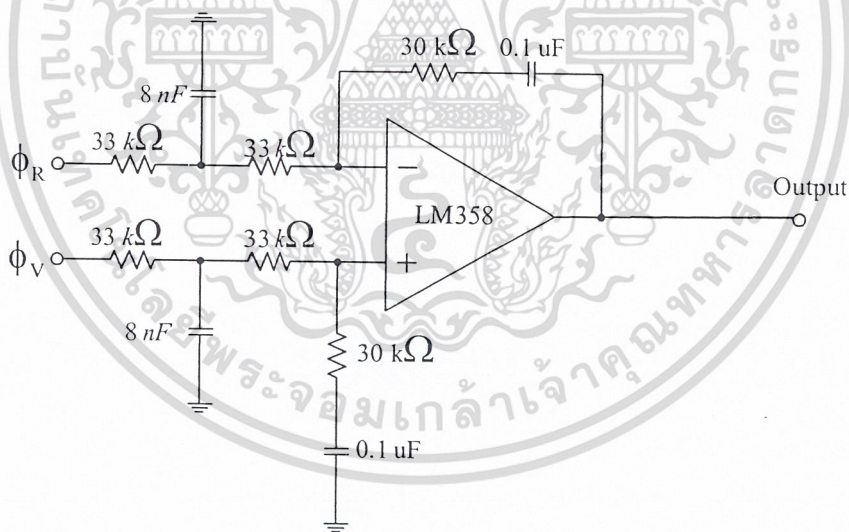
$$= \frac{2 \times 0.8}{(576.439) \times (0.1 \times 10^{-6})}$$

$$= 27.756 \text{ k}\Omega$$

$$C_c = \frac{4}{2R_1 f_{rc}} = \frac{4}{2 \times 64,268.856 \times 20 \times 200}$$

$$= 7.779 \times 10^{-9} \text{ F}$$

เพราะฉะนั้นจะได้วงจรตามรูป

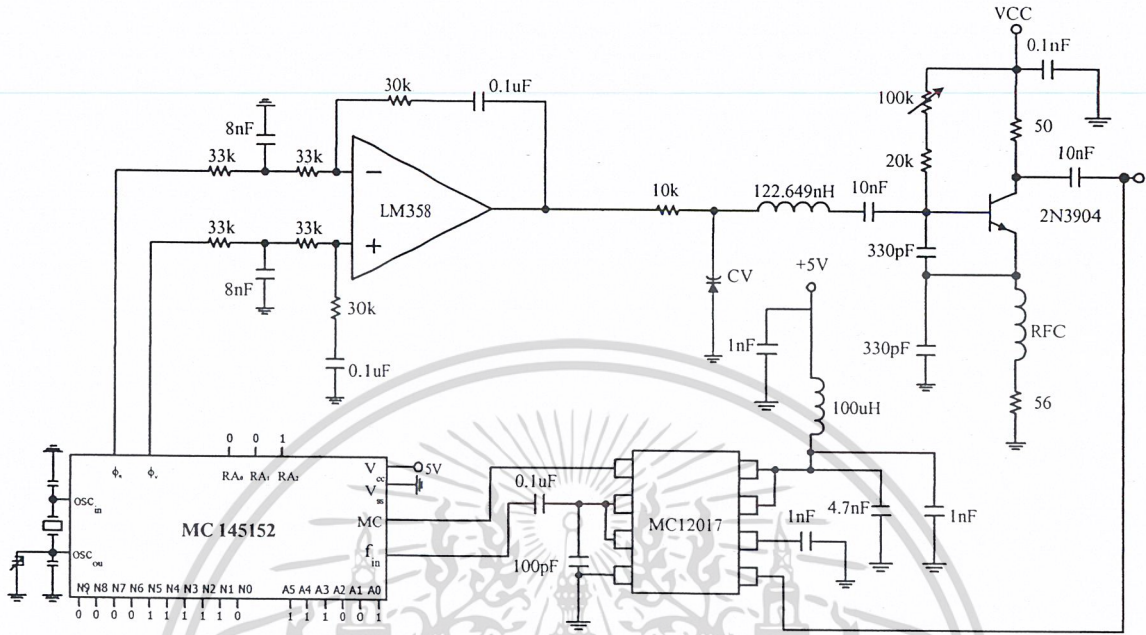


รูปที่ 3.30 วงจรรูปฟิลเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.5 วงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

หลังจากที่ออกแบบวงจรในแต่ละส่วนแล้วก็นำมาต่อเข้ารวมให้ครบรูปได้ดังรูป



รูปที่ 3.31 วงจรที่สมบูรณ์ของวงจรสังเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

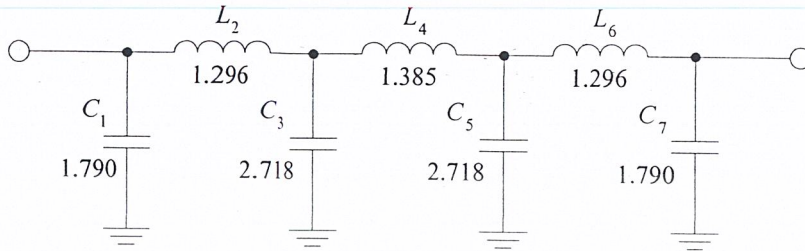
3.9 วงจรมอดูเลตความถี่เอฟเอ็ม

การมอดูเลตความถี่เอฟเอ็มในโครงการนี้จะทำการมอดูเลตโดยใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่ซึ่งสามารถทำได้โดยใช้หลักการที่ว่าวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า จะเปลี่ยนความถี่เนื่องจากแรงดันควบคุมที่วงจรสังเคราะห์ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ก็จะสามารถทำการมอดูเลตความถี่เอฟเอ็มได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.10 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

เลือกใช้วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งได้วงจรที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้วดังนี้



รูปที่ 3.32 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7 ที่ทำการนอร์มอลไลซ์แล้ว

ทำการสเกลโดย ค่า L และ C กำหนดได้จาก

$$C = \frac{C_n}{(2\pi f_c R)}$$

$$L = \frac{RL^n}{(2\pi f_c)}$$

โดยที่ $R = 50$ และ f_c คือความถี่คัทออฟ ในกรณีนี้ $f_c = 90 \text{ MHz}$ จะได้

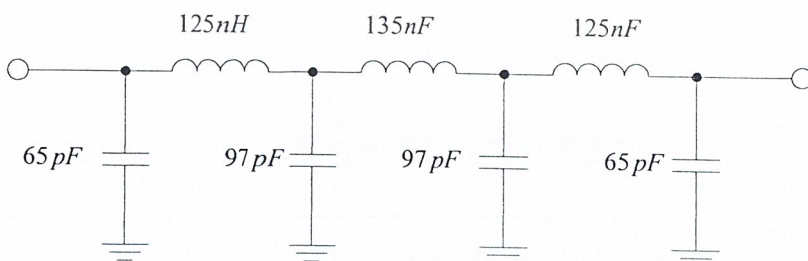
$$C_1 = C_7 = 65 \text{ pF}$$

$$C_3 = C_5 = 97 \text{ pF}$$

$$L_2 = L_6 = 125 \text{ nH}$$

$$L_4 = 135 \text{ nH}$$

จะได้วงจรที่สมบูรณ์ดังรูป



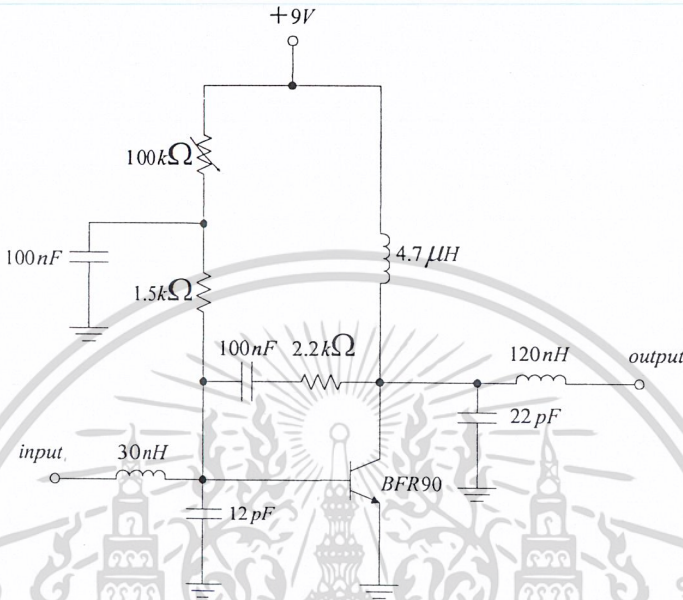
รูปที่ 3.33 แสดงวงจรกรองวงจรถองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิร์ตซ์ ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.11 วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ

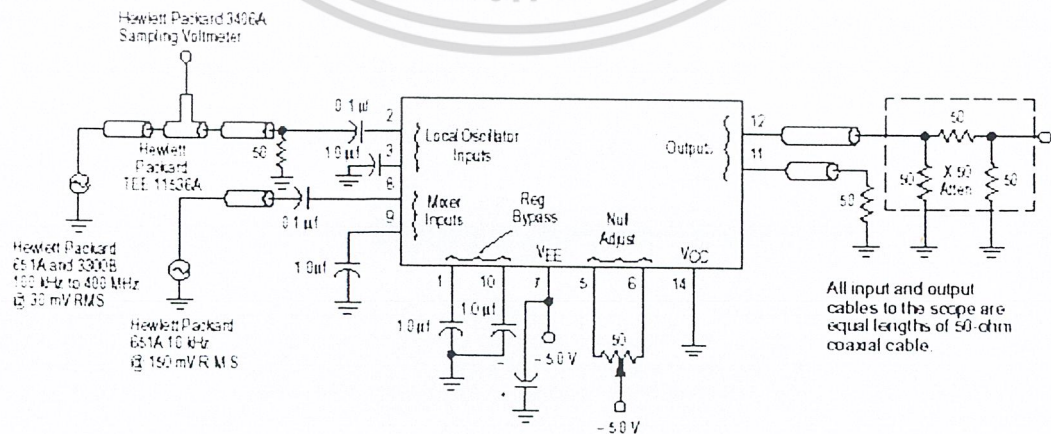
วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำใช้ทรานซิสเตอร์ชนิด BFR90 ทำการไบอัสกระแสเท่ากับ 10 มิลลิแอมป์ แรงดันไฟเลี้ยง 8 โวลต์ วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.34 วงจรขยายสัญญาณที่มีระดับสัญญาณรบกวนต่ำ

3.12 วงจรมิกเซอร์

ใช้ไอซีเบอร์ MC12002 โดยให้สัญญาณความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่วิทยุ และให้สัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่โลคอล ซึ่งทำการต่อวงจรตามคำแนะนำของค่าชิตดั่งรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งรูปที่ 3.35 วงจรมิกเซอร์โดยใช้ IC เบอร์ MC12002 เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

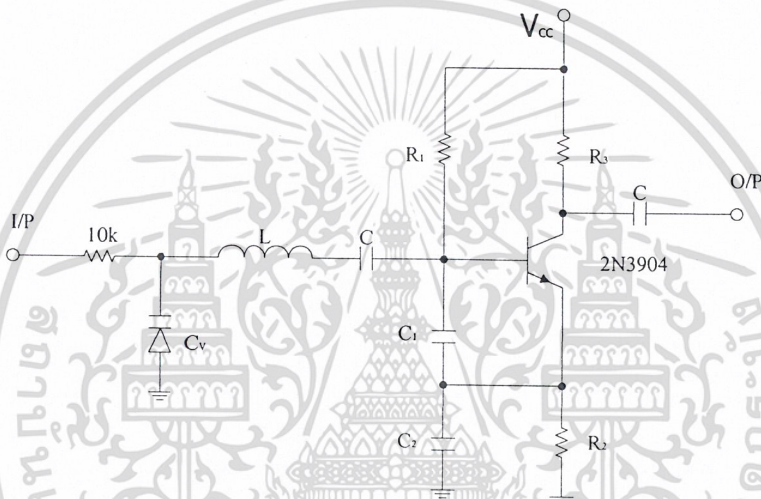
3.13 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูบ 75.3 เมกะเฮิรตซ์

ประกอบด้วยวงจรต่างๆ ได้แก่

1. วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า
2. วงจรพรีแอมพลิฟายเออร์สองโมดูลัส ใช้ไอซีเบอร์ MC12017
3. วงจรเฟสดีเทกเตอร์ ซึ่งอยู่ในไอซีเบอร์ MC145152-2
4. วงจรลูปฟิลเตอร์ ใช้โอปแอมป์เบอร์ LM358

3.13.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เริ่มต้นจากการออกแบบสร้างวงจรถ่ายความถี่ซึ่งในโครงงานนี้ได้ใช้วงจรถ่ายความถี่แบบคอลพิตต์ชนิดอิมิตเตอร์ร่วม (common emitter)



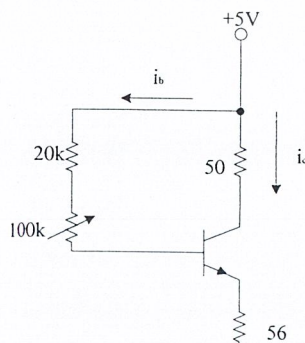
รูปที่ 3.36 วงจรกำเนิดความถี่แบบคอลพิตต์ (Collpit Oscillator)

ทำการไบอัสโดยให้

$$R1 = 100k\Omega + 20k\Omega$$

$$R2 = 56 k\Omega$$

โดยในที่นี้ค่า β_{dc} ของ 2N3904 มีค่าเท่ากับ 110 (จากดาต้าชีทและการวัด)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมิได้คุ้มครองลิขสิทธิ์ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

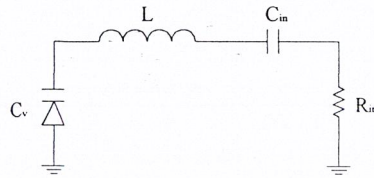
รูปที่ 3.37 วงจรสมมูลทาง DC ของวงจรถ่ายความถี่

ต้องการ $i_c = 10 \text{ mA}$

$$g_m = i_c / V_T = 0.35$$

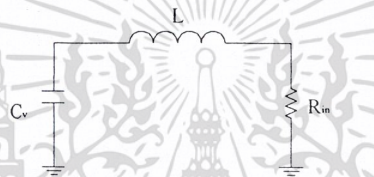
เพราะฉะนั้นจากการคำนวณจะได้

$$C_{in} = 16.5 \text{ pF}$$



รูปที่ 3.38 วงจรสมมูลที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ที่ต้องการออกแบบ

จากรูปได้ว่า $C_n = C_{in}$ อนุกรมกับ C_v



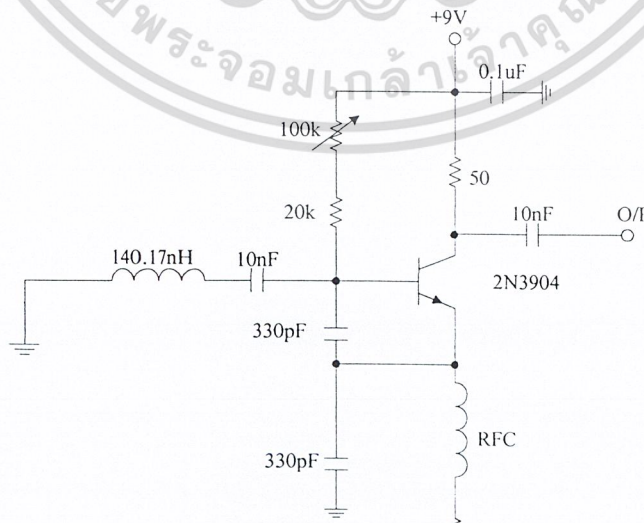
รูปที่ 3.39 วงจรสมมูลเมื่อรวม C_{in} กับ C_v

วารีแคปไซเตอร์ MV104 ซึ่งมีค่าความจุประมาณ 37-42 pF เลือกค่า C_v กลางๆ ประมาณ 39.5 pF ดังนั้นได้ค่า C_n และ L ดังนี้

$$C_n = 31.87 \text{ pF}$$

$$L = 140.17 \text{ nH}$$

เมื่อทำการใส่ค่าตามที่คำนวณแล้วจะได้วงจรกำเนิดความถี่ดังรูป

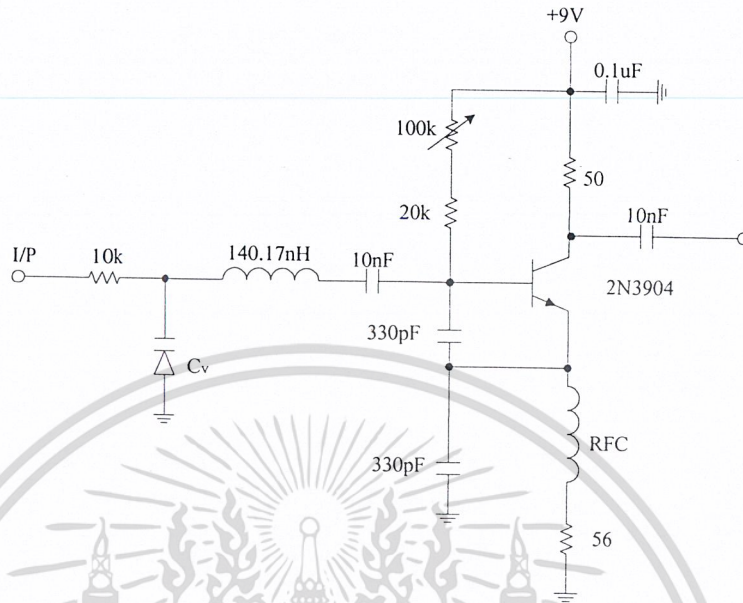


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.40 วงจรกำเนิดความถี่

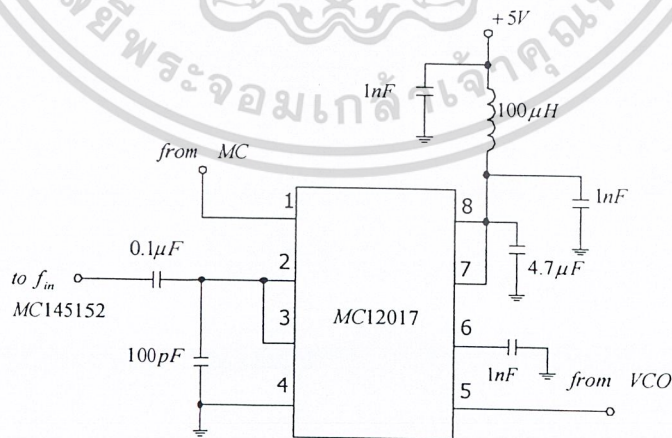
จากค่าภายในวงจรที่ได้ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้าได้ดังรูป



รูปที่ 3.41 วงจรกำเนิดความถี่ที่ปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้า

3.13.2 วงจรพริสเกลเลอร์สองโมดูลัส

พริสเกลเลอร์เป็นตัวหารความถี่ที่เข้ามาให้ต่ำลงเพื่อที่จะป้อนให้กับวงจรเฟสดีเทกเตอร์โดยใช้ไอซี MC12017 ซึ่งจะถูกรั้งหารเท่ากับ 64/65 โดยทำการต่อวงจรดังรูป

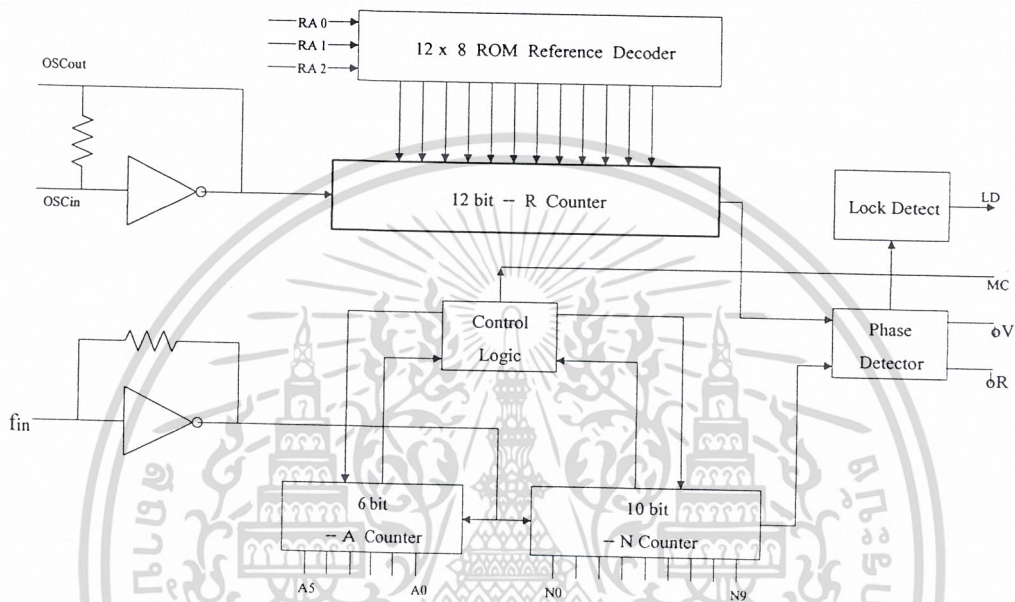


รูปที่ 3.42 การต่อวงจรของไอซี MC12017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13.3 วงจรเฟสดีเทกเตอร์และการตั้งโปรแกรมหารความถี่

ไอซี MC145152-2 ประกอบด้วยส่วนที่เป็นการโปรแกรมเพื่อหารความถี่ที่เข้ามาส่วนของความถี่อ้างอิง และส่วนของเฟสดีเทกเตอร์ดังแสดงได้ตามรูปที่ 3.43 ซึ่งไอซีนี้สามารถตั้งโปรแกรมเพื่อหารความถี่ที่เข้ามาได้ 16 บิตแบบขนานโดย 10 บิตสำหรับตัวหาร N (10 bit / N Counter) และ 6 บิตสำหรับตัวหารของไอซีฟรีสเทลเลอร์ นอกจากนี้ยังมีล็อกดีเทก (Lock Detect : LD) เพื่อใช้บอกสถานะการล็อกของเฟสล็อกอีกด้วย



รูปที่ 3.43. ส่วนประกอบต่างๆ ภายใน MC145152-2

ในส่วนความถี่อ้างอิงจะใช้คริสตอล 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นตัวอ้างอิงและหารความถี่ลงมาโดยกำหนดจากค่า RA_0 , RA_1 , RA_2

โดยในการโปรแกรมการหารความถี่ คำนวณได้ดังนี้ คือ

เนื่องจากค่าความถี่ที่ต้องการ (f_0)

ค่าช่วงความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณ (Channel Spacing : f_s)

จากคาตาชีทของโมโตโรล่า ค่าอัตราส่วนในการหารของฟีดแบคคูล (Total Division Ratio In Feedback Loop) เทียบกับสมการ $N_t = NP + A$

โดยที่ N คือ ตัวโปรแกรม $N_0 - N_9 = 10$ บิต หารตั้งแต่ 3-1023

A คือ ตัวโปรแกรม $A_0 - A_5 = 6$ บิต หารตั้งแต่ 0-63

P คือ ตัวหารของฟรีสเทลเลอร์ หาร 64

ในวงจรนี้เราต้องการที่จะกำเนิดความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้ความถี่อ้างอิงจากคริสตอลความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถออกแบบค่าตัวหารต่าง ๆ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 $f_s = \frac{f_{crystal}}{R}$
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย f_{crystal} คือ ความถี่ของคริสตอล

R คือ ค่าตัวหารคริสตอลภายในไอซีเบอร์ MC145152-2 โดยสามารถตั้งค่าได้จาก RA_0 - RA_2

ในวงจรนี้เราใช้ $f_{\text{crystal}} = 10.24 \text{ MHz}$ และตัวหาร $R = 512$ (ตั้งค่า RA_0 - RA_2 เป็น 001) เพราะฉะนั้นจะ

ได้ว่า

$$f_s = \frac{10,240,000}{512}$$

$$f_s = 20,000$$

นั่นคือจะได้ค่าช่วงความถี่ของแต่ละช่องสัญญาณเท่ากับ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นจะสามารถหาค่าตัวหาร N_t ได้จาก

$$N_t = \frac{f_0}{f_s}$$

$$N_t = \frac{75,300,000}{20,000}$$

$$N_t = 3,765$$

และจาก $N_t = NP + A$ จะได้ว่า

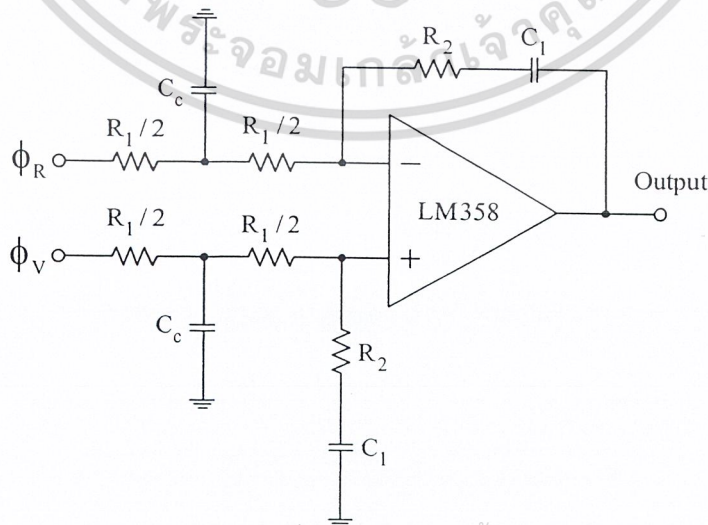
$$N_t = (64 \times N) + A$$

ดังนั้นเราจะได้ $N = 58$ แปลงเป็นเลขฐานสองได้ 0000111010

$A = 53$ แปลงเป็นเลขฐานสองได้ 110101

3.13.4 วงจรรูปฟิลเตอร์

การออกแบบวงจรรูปฟิลเตอร์ออกแบบโดยใช้ออปแอมป์เบอร์ LM358 โดยทำการออกแบบและคำนวณมีโครงสร้างวงจรดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 3.44 โครงสร้างวงจรรูปฟิลเตอร์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ (ตามคำแนะนำในค่าตัวชี้ของโมโตโรล่า)

$$f_0 = 75.3 \text{ MHz} \quad (\text{Oscillator Frequency})$$

$$f_s = 20 \text{ kHz} \quad (\text{Channel Spacing})$$

$$f_b = 0.01 f_s = 200 \text{ Hz} \quad (\text{Loop Bandwidth})$$

$$\zeta = 0.8 \quad (\text{Loop Damping Factor})$$

$$V_{DD} = 5 \text{ V} \quad (\text{PLL Power Supply})$$

$$C_1 = 0.01 \mu\text{F} \quad (\text{Active Integrator Component})$$

$$K_\phi = \frac{V_{DD}}{2\pi}$$

$$= 0.795 \text{ V/Rad}$$

$$K_{VCO} = \frac{2\pi\Delta f_{VCO}}{\Delta V_{VCO}}$$

$$= 6.660 \times 10^6 \text{ Rad/V} \quad (\text{ได้จากกราฟของความถี่เทียบกับแรงดัน})$$

ควบคุมของออสซิลเลเตอร์ควบคุมความถี่ด้วยแรงดัน)

$$\omega_n = \frac{2\pi f_b}{\sqrt{2\zeta^2 + 1 + \sqrt{(2\zeta^2 + 1)^2 + 1}}} \quad (\text{Natural Frequency})$$

$$= \frac{2\pi \times 200}{\sqrt{2(0.8)^2 + 1 + \sqrt{(2 \times 0.8^2 + 1)^2 + 1}}}$$

$$= \frac{2\pi \times 200}{\sqrt{2(0.8)^2 + 1 + \sqrt{(2 \times 0.8^2 + 1)^2 + 1}}}$$

$$= 576.439 \text{ Rad/sec}$$

$$R_1 = \frac{K_\phi K_{VCO}}{C_1 N_1 \omega_n^2}$$

$$= \frac{0.795 \times 6.660 \times 10^6}{(0.01 \times 10^{-6}) \times 3,765 \times (576.439)^2}$$

$$= 423.234 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = \frac{2\zeta}{\omega_n C_1}$$

$$= \frac{2 \times 0.8}{(576.439) \times (0.01 \times 10^{-6})}$$

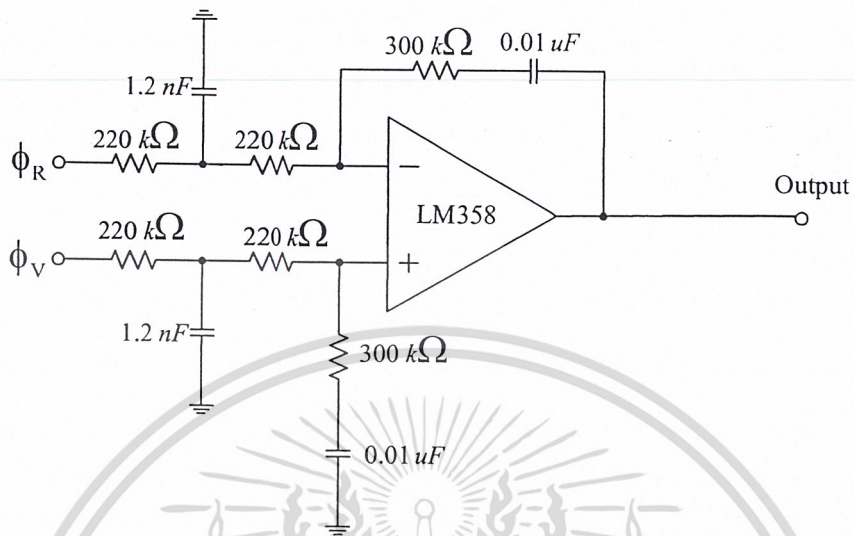
$$= 277.566 \text{ k}\Omega$$

$$C_c = \frac{4}{2R_1 f_{rc}} = \frac{4}{2 \times 423,234 \times 20 \times 200}$$

$$= 1.181 \times 10^{-9} \text{ F}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

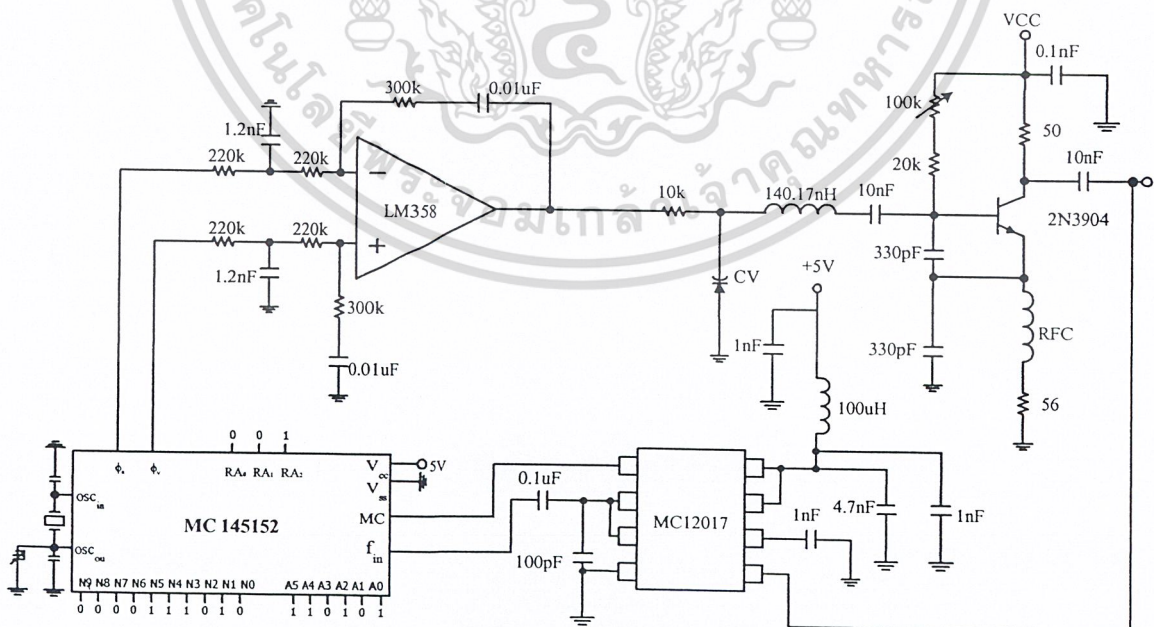
เพราะฉะนั้นจะได้วงจรตามรูป



รูปที่ 3.45 วงจรรูปฟีดเตอร์

3.13.5 วงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

หลังจากที่ออกแบบวงจรในแต่ละส่วนแล้วก็นำมาต่อเข้ารวมให้ครบรูปได้ดังรูป



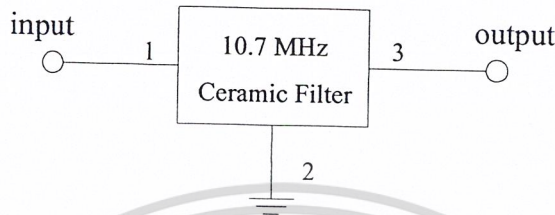
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ผู้จัดทำหนังสือให้ตัดแปลงเนื้อหาและข้อมูลเชิงฉันทุ้เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.46 วงจรที่สมบูรณ์ของวงจรสังเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

3.14 วงจรกรองความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิรตซ์

สัญญาณที่ออกมาจากวงจรมิกเซอร์นั้นจะมีฮาร์โมนิกอื่น ๆ รวมอยู่ด้วย ฉะนั้นจึงต้องมีวงจรกรองความถี่ผ่านเพื่อกรองเฉพาะความถี่ 10.7 เมกะเฮิรตซ์ โดยเลือกใช้เซรามิกฟิลเตอร์ (Ceramic Filter) 10.7 เมกะเฮิรตซ์มากรองสัญญาณหลังผ่านวงจรมิกเซอร์ มีลักษณะการต่อดังรูป

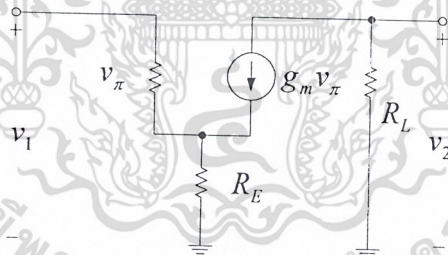


รูปที่ 3.47 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิรตซ์

3.15 วงจรขยายความถี่ไอเอฟ

สัญญาณที่ผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน จะมีขนาดสัญญาณเล็ก จึงจำเป็นต้องมีวงจรขยายสัญญาณ ในส่วนนี้ให้มีขนาดสัญญาณแรงขึ้นเพื่อนำไปใช้ในส่วนอื่นต่อไป

พิจารณาวงจรสมมูลทาง AC



รูปที่ 3.48 วงจรสมมูลทาง AC ของวงจรคอมมอนอีมิเตอร์

จะได้

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{-g_m v_\pi R_L}{v_\pi + g_m v_\pi R_E}$$

$$-A_v = \frac{-g_m v_\pi R_L}{v_\pi + g_m v_\pi R_E}$$

โดยพิจารณาให้ $i_c \approx i_e = g_m v_\pi$

จะได้

$$R_E = \frac{g_m R_L - A_v}{A_v g_m}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้

$$A_v = 10$$

$$R_L = 50\Omega$$

$$I_C = 20\text{mA}$$

$$V_T = 25\text{mV}$$

จะได้ $g_m = \frac{I_C}{V_T} = 0.8$

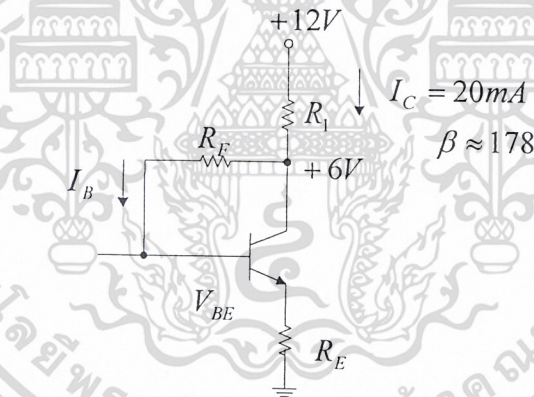
$$\therefore R_E = 3.75\Omega$$

และ

$$R_F = \frac{g_m (Z_o)^2}{1 + g_m R_E}$$

$$\therefore R_F = 500\Omega$$

พิจารณาวงจรสมมูลย์ทาง DC



รูปที่ 3.49 วงจรสมมูลย์ทาง DC ของวงจรคอมมอนอิมิตเตอร์

กำหนดให้

$$V_{CC} = +9V_{dc}$$

$$V_{BE} = 0.65V$$

$$\beta = 191 \text{ (จากค่าตัวชี้ท)}$$

และ $I_E \approx I_C = 10\text{mA}$

จะได้

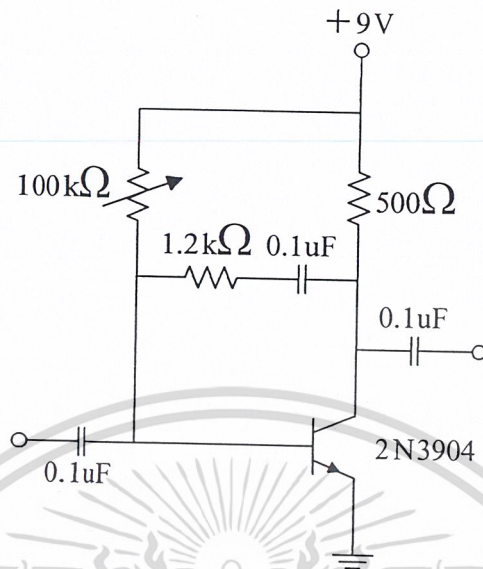
$$R_1 = \frac{V_{CC} - V_C}{I_C} = 500\Omega$$

$$R_F = \frac{V_C - V_{BE} - I_E R_E}{I_B} = 47.39\text{k}\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งผู้จัดทำเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

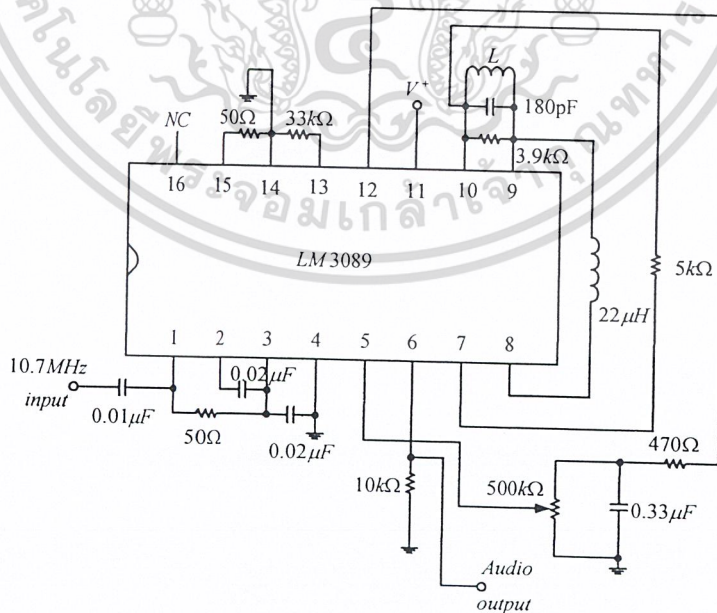
คั้งนั้นจะได้วงจรดังรูป



รูปที่ 3.50 วงจรขยาย IF ที่ใช้งานจริง

3.16 วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์

สัญญาณที่รับได้เป็นสัญญาณที่มอดูเลตแบบเอฟเอ็ม จึงทำการออกแบบวงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์ เพื่อให้ได้สัญญาณข่าวสารเดิมกลับคืนมาใช้ไอซีเบอร์ LM3089 โดยต้องวงจรตามคำแนะนำในคาต้าชีต ซึ่งจะได้อวงจรตามรูป



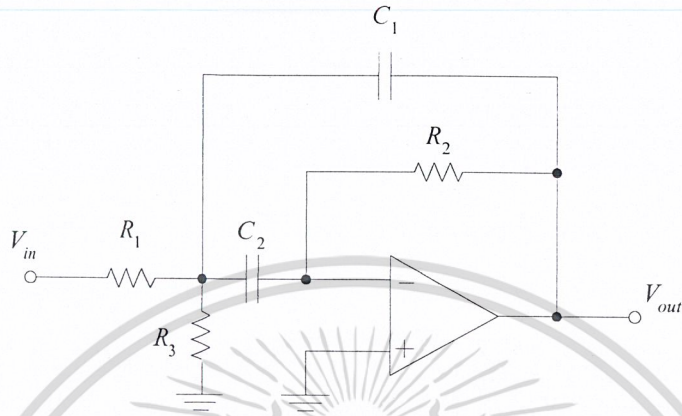
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 3.51 วงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์ที่ใช้ไอซีเบอร์ LM3089

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องยกย่องผู้จัดทำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.17 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์

เลือกใช้งานของ Delyiannis – friend ซึ่งมีรูปวงจรดังรูป



รูปที่ 3.52 วงจรของ Delyiannis – friend

ซึ่งเราสามารถทำการคำนวณหาค่าต่างๆได้ดังนี้

$$f_r = 100 \text{ kHz}, \quad \omega_r = 2\pi f_r = 628.318 \times 10^3 \text{ rad/sec}$$

$$B = \frac{\omega_r}{Q} = 62.8318 \times 10^3 \text{ rad/sec}; \quad Q = 10$$

$$C_1 = C_2 = 10 \text{ nF}$$

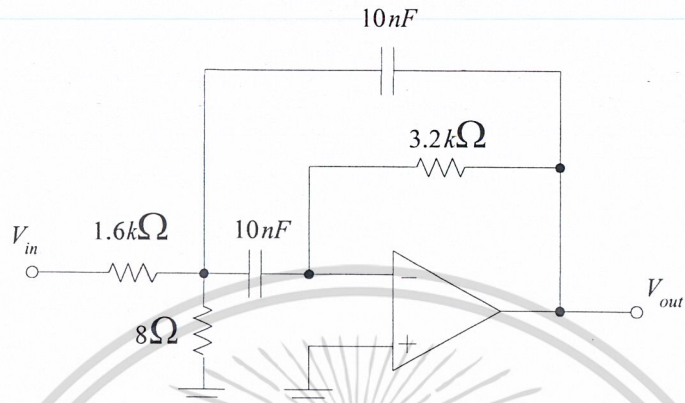
$$R_2 = \frac{2}{BC} = 3.183 \text{ k}\Omega$$

$$R_1 = \frac{R_2}{2} = 1.591 \text{ k}\Omega$$

$$R_3 = \frac{R_2}{4Q^2} = 7.9577 \text{ }\Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

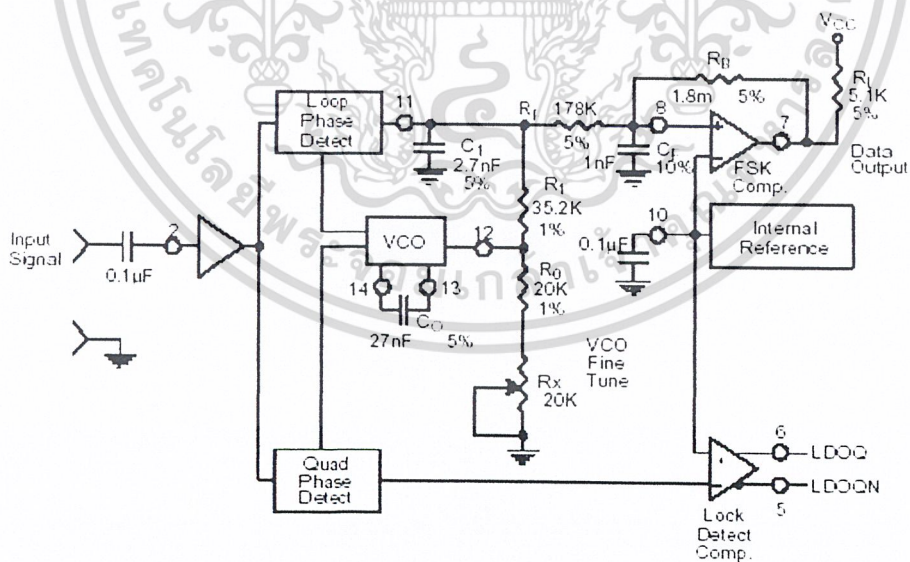
ดังนั้นจะได้วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่สมบรูณ์ดังรูป



รูปที่ 3.53 วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์

3.18 วงจรตีมอดูเลทเฟรีควนซีซิปคียอิง

เลือกใช้ IC เบอร์ XR2211 ซึ่งจากคำแนะนำจากดาต้าชีต จะได้วงจรดังรูป



รูปที่ 3.54 วงจรตีมอดูเลทเฟรีควนซีซิปคียอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบวงจรดีมอดูเลทพีรีแควนซีซีพียูซึ่งมีค่าบิตเรต 1200บิตต่อวินาที และมีความถี่ที่ 100Hz และความถี่ 110Hz สามารถออกแบบดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการคำนวณหาค่า f_0 จากค่าที่กำหนดข้างต้น

$$(ก) \text{ จาก } f_0 = \sqrt{F_1 \times F_2}$$

$$f_0 = \sqrt{100000 \times 110000} = 104,880.884817 \text{ Hz}$$

ขั้นตอนที่ 2 ทำการคำนวณหาค่า R_i โดยการกำหนดค่า R_0 และ ค่า R_x คือค่า 20k

$$(ข) \text{ จาก } R_i = R_0 + \frac{R_x}{2}$$

$$R_i = 20k + \frac{20k}{2} = 30k \Omega$$

ขั้นตอนที่ 3 ทำการคำนวณหาค่า C_0

$$(ค) \text{ จาก } C_0 = \frac{1}{R_i \times f_0}$$

$$= \frac{1}{30k \times 104.88k} = 3.1728 \times 10^{-10} F$$

ขั้นตอนที่ 4 ทำการคำนวณหาค่า R_1

$$(ง) \text{ จาก } R_1 = \left(\frac{R_0 \times f_0}{F_2 - F_1} \right) \times 2$$

$$= \left(\frac{20k \times 104.88k}{(110k - 100k)} \right) \times 2 = 419,520 \Omega$$

ขั้นตอนที่ 5 ทำการคำนวณหาค่า C_1

$$(จ) \text{ จาก } C_1 = \frac{1250 \times C_0}{R_1 \times \zeta^2}$$

$$= \frac{1250 \times 3.1782 \times 10^{-10}}{419,520 \times 0.5^2} = 3.7879 \times 10^{-12} F$$

ขั้นตอนที่ 6 ทำการคำนวณหาค่า R_F

$$\text{จาก } R_F = 5 \times R_1$$

$$= 5 \times 419,520 = 2,097,600 \Omega$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 7 ทำการคำนวณหาค่า R_B

$$\begin{aligned} \text{จาก } R_B &= 5 \times R_F \\ &= 5 \times 2,097,600 \\ &= 10,488,000 \Omega \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 8 ทำการคำนวณหาค่า R_{sum}

$$\begin{aligned} \text{จาก } R_{sum} &= \frac{(R_F + R_1) \times R_B}{(R_F + R_1 + R_B)} \\ &= \frac{(2,097,600 + 419,520) \times 10,488,000}{(2,097,600 + 419,520 + 10,488,000)} = 2,029,935.484 \Omega \end{aligned}$$

ขั้นตอนที่ 9 ทำการคำนวณหาค่า C_F

$$\begin{aligned} \text{จาก } C_F &= \frac{0.25}{(R_{sum} \times \text{BaudRate})} \\ &= \frac{0.25}{2,029,935.484 \times 1200} = 1.0263 \times 10^{-10} F \end{aligned}$$

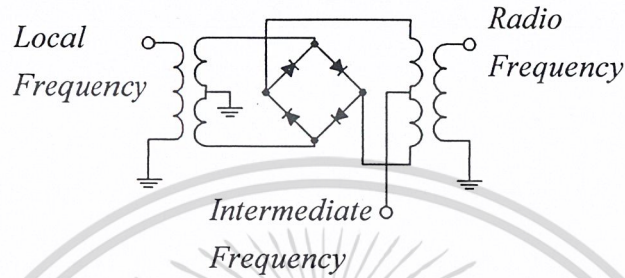


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณและสร้างลำโพง

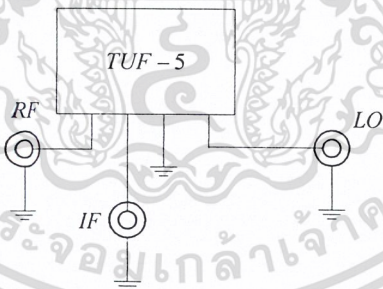
3.19 วงจรมิกเซอร์

ใช้ไอซีเบอร์ TUF-5 โดยให้สัญญาณความถี่ 86 เมกะเฮิรตซ์ และ 80.5 เมกะเฮิรตซ์ เป็นความถี่วิทยุ และให้สัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์ เป็นความถี่โลคอล ต่อวงจรดังรูปที่ 3.



รูปที่ 3.55 วงจรภายในไอซีเบอร์ TUF-5

จะได้เอาต์พุตเป็นค่าความถี่กลางออกมา ซึ่งเราต้องการเฉพาะค่าผลต่างของความถี่วิทยุและความถี่โลคอลเท่านั้น ดังนั้นจึงต้องนำเอาต์พุตจากวงจรนี้ไปผ่านวงจรกรองความถี่อีกครั้งหนึ่งเพื่อกรองเอาฮาร์โมนิกสูงๆ ทิ้งไป

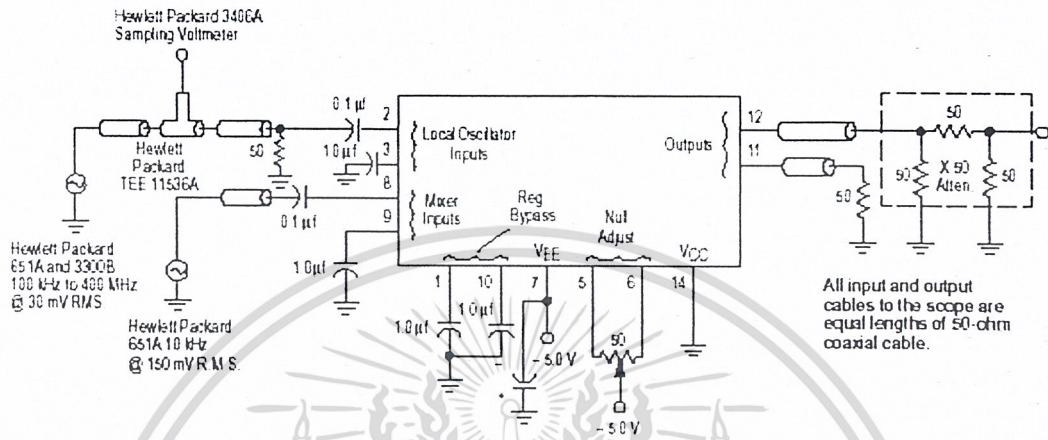


รูปที่ 3.56 วงจรมิกเซอร์ที่ไอเอฟ 10.7 เมกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.20 วงจรมิกเซอร์

ใช้ไอซีเบอร์ MC12002 โดยให้สัญญาณความถี่ 5.2 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่วิทยุ และให้สัญญาณจาก วงจรสังเคราะห์ความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ เป็นความถี่โลคอล ซึ่งทำการต่อวงจรตามคำแนะนำของคาต้าชีตดังรูป

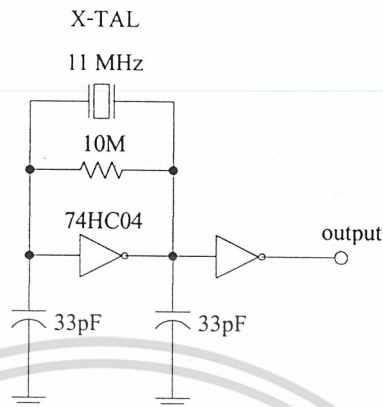


รูปที่ 3.57 วงจรมิกเซอร์โดยใช้ IC เบอร์ MC12002

3.21 วงจรคริสตอลอสซิลเลเตอร์ความถี่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์

เราเลือกใช้วงจรคริสตอลอสซิลเลเตอร์เนื่องจากอสซิลเลเตอร์ประเภทนี้มีเสถียรภาพในการทำงานสูงเพราะใช้ผลึกแร่ (crystal) เป็นตัวกำหนดค่าความถี่ ให้ค่า Q สูง การสร้างวงจรคริสตอลอสซิลเลเตอร์ทำได้ง่าย อาศัยการทำงานของอุปกรณ์อื่นๆ จำนวนน้อย ลำพังแต่ตัวคริสตอลเองนั้นไม่สามารถที่จะกำเนิดความถี่ได้เอง จะต้องใช้ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุและอินเวอร์สเตอร์ในการทำงาน ค่าตัวเก็บประจุส่วนใหญ่จะเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่ค่าน้อย คืออยู่ในช่วงระหว่าง 10-100 pF แต่ในการทดลองเลือกใช้ค่า 33 pF ส่วนความต้านทานที่ขนานกับผลึกแร่จะต้องใช้ความต้านทานที่มีค่ามากๆ ซึ่งจะมีค่าอยู่ในช่วง 1-10MΩ ในการทดลองจะเลือกใช้ค่าประมาณ 10 M ส่วนอินเวอร์สเตอร์ที่จะใช้งานมีให้เลือกหลายตระกูลด้วยกัน เช่น ซิมอส หรือ ทีทีแอล เป็นต้น การทดลองเลือกใช้ไอซี ตระกูลซิมอส เนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่าง เช่น มีความต้านทานอินพุตสูงทำให้ไม่เกิดปัญหาเรื่องการโหลดของวงจร กินกระแสน้อยทำให้ประหยัดพลังงาน แต่ก็มีข้อเสียของไอซีตระกูลนี้ คือ อาจพังเสียหายจากไฟฟ้าสถิตย์ได้ ในการทดลองเลือกใช้ไอซีเบอร์ 74HC04 เลือกใช้ผลึกแร่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งวงจรสมบูรณ์แสดงได้ดังรูป

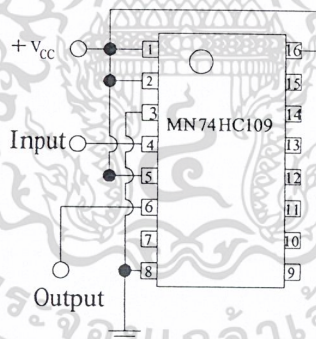
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.58 วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ 11 เมกะเฮิร์ตซ์

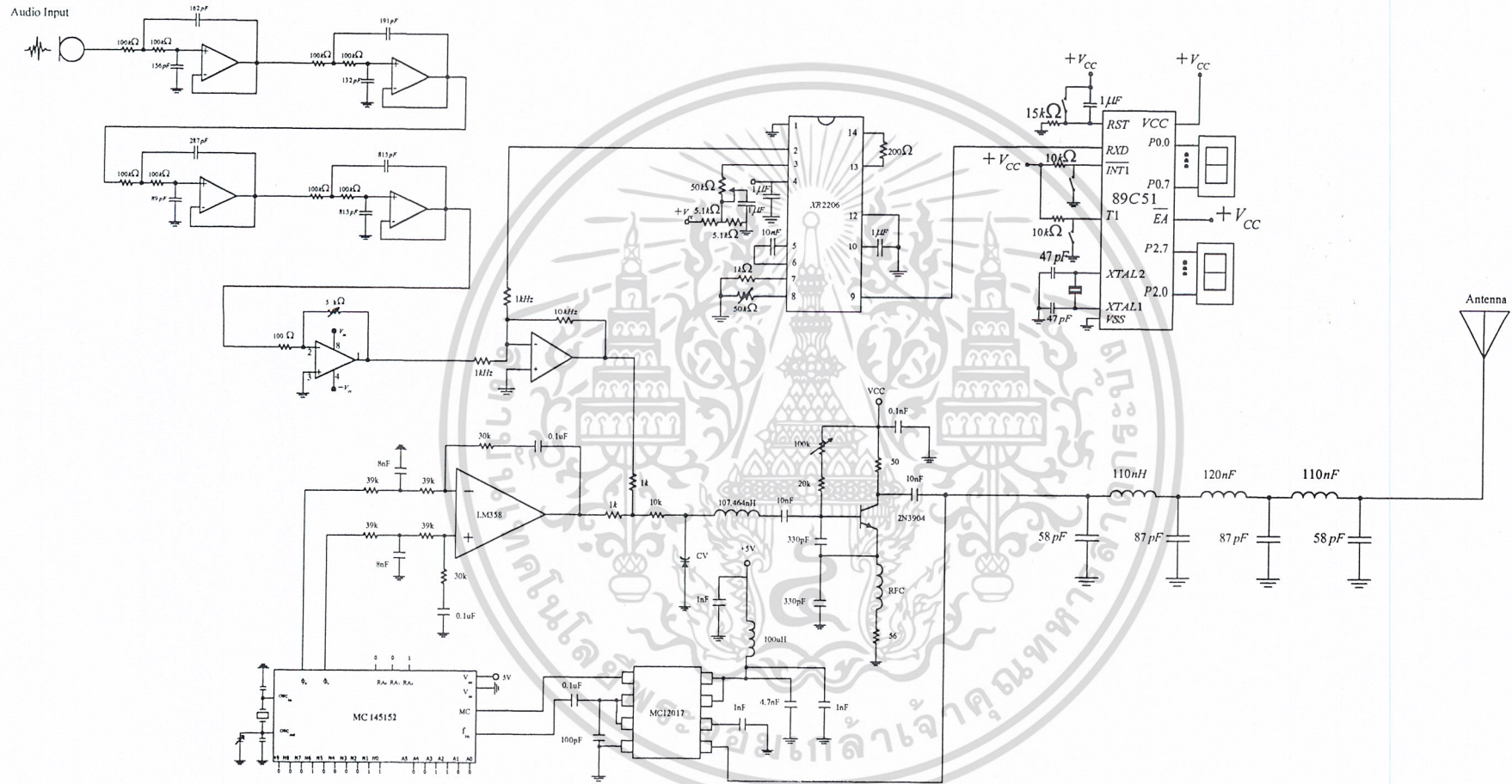
3.22 วงจรหารสอง

จากวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ เราจะได้สัญญาณที่มีความถี่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์ แต่เราต้องการความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ เราจึงต้องนำไปผ่านวงจรหารสอง ซึ่งทำตามคำแนะนำของคาต้าชีท ดังรูป

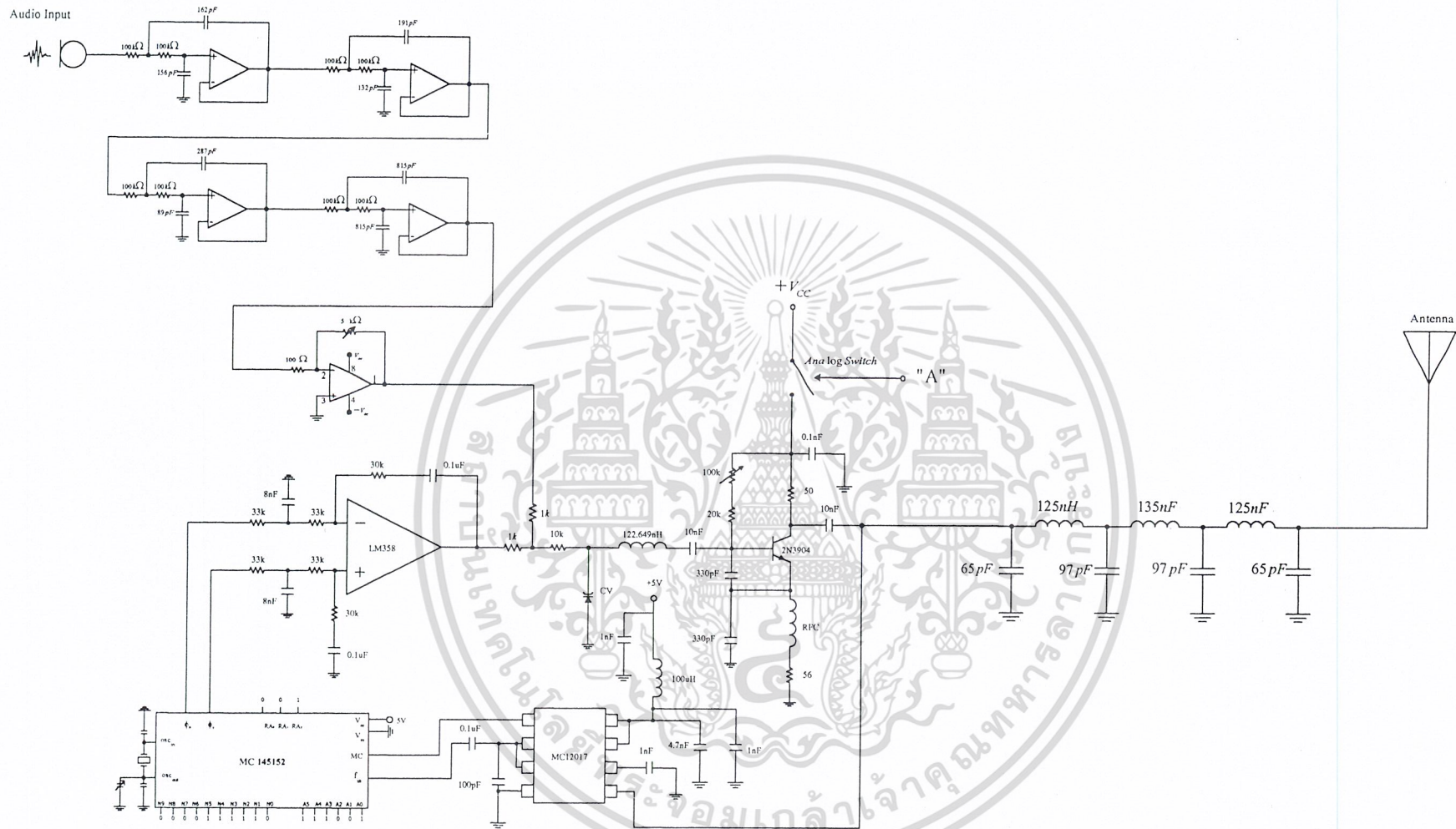


รูปที่ 3.59 แสดงวงจรหารสอง

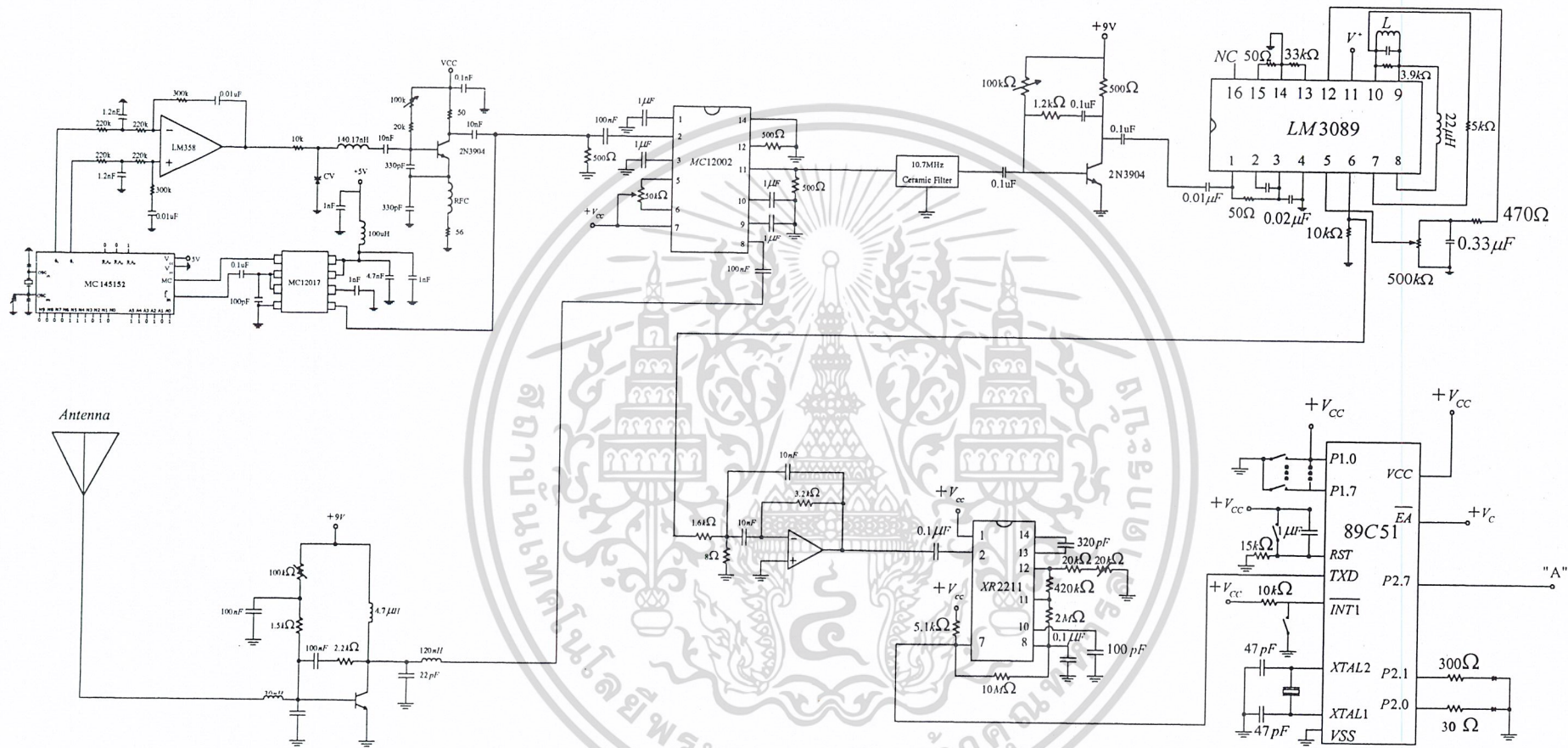
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



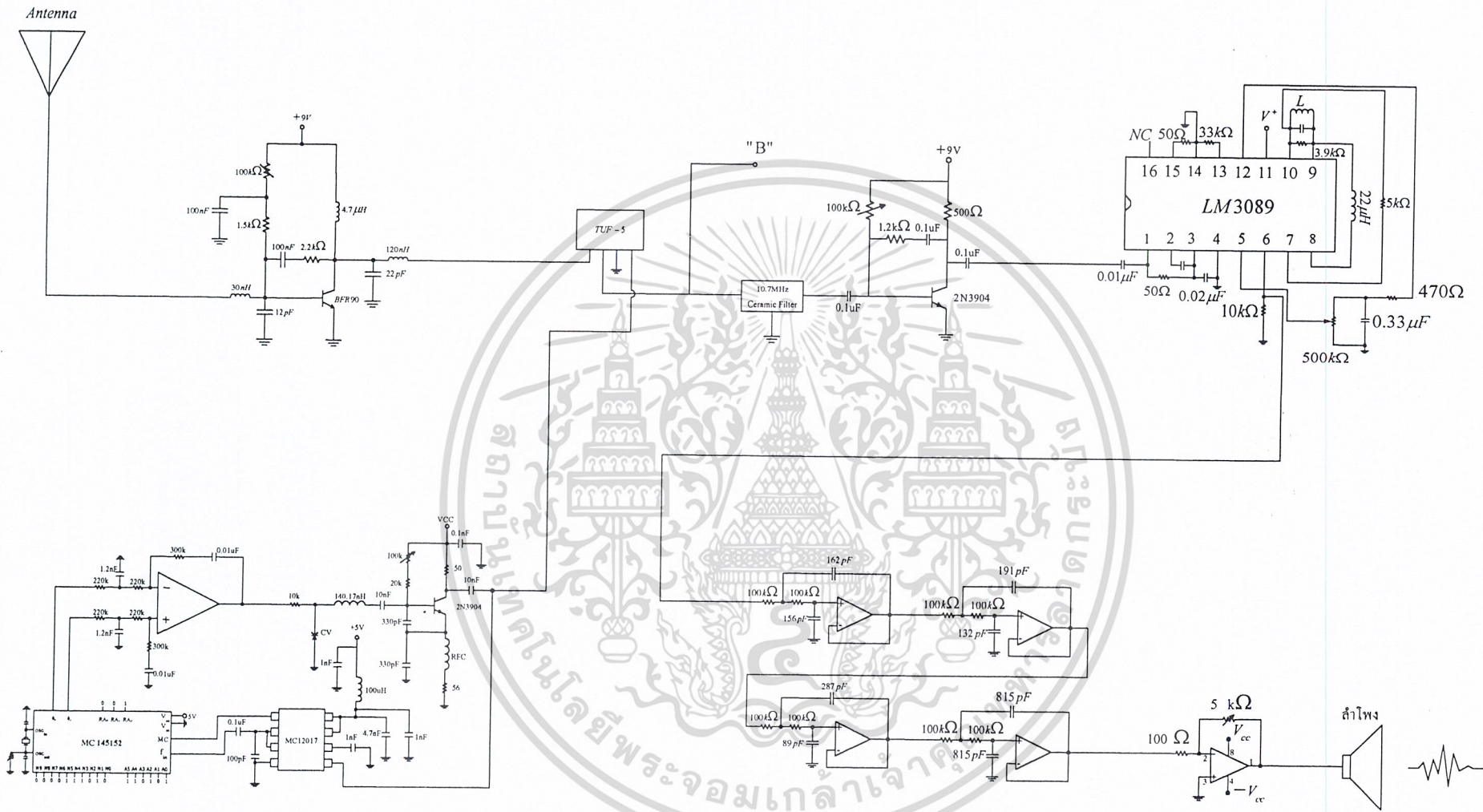
รูปที่ 3.60 รูปวงจรรวมตัวแม่



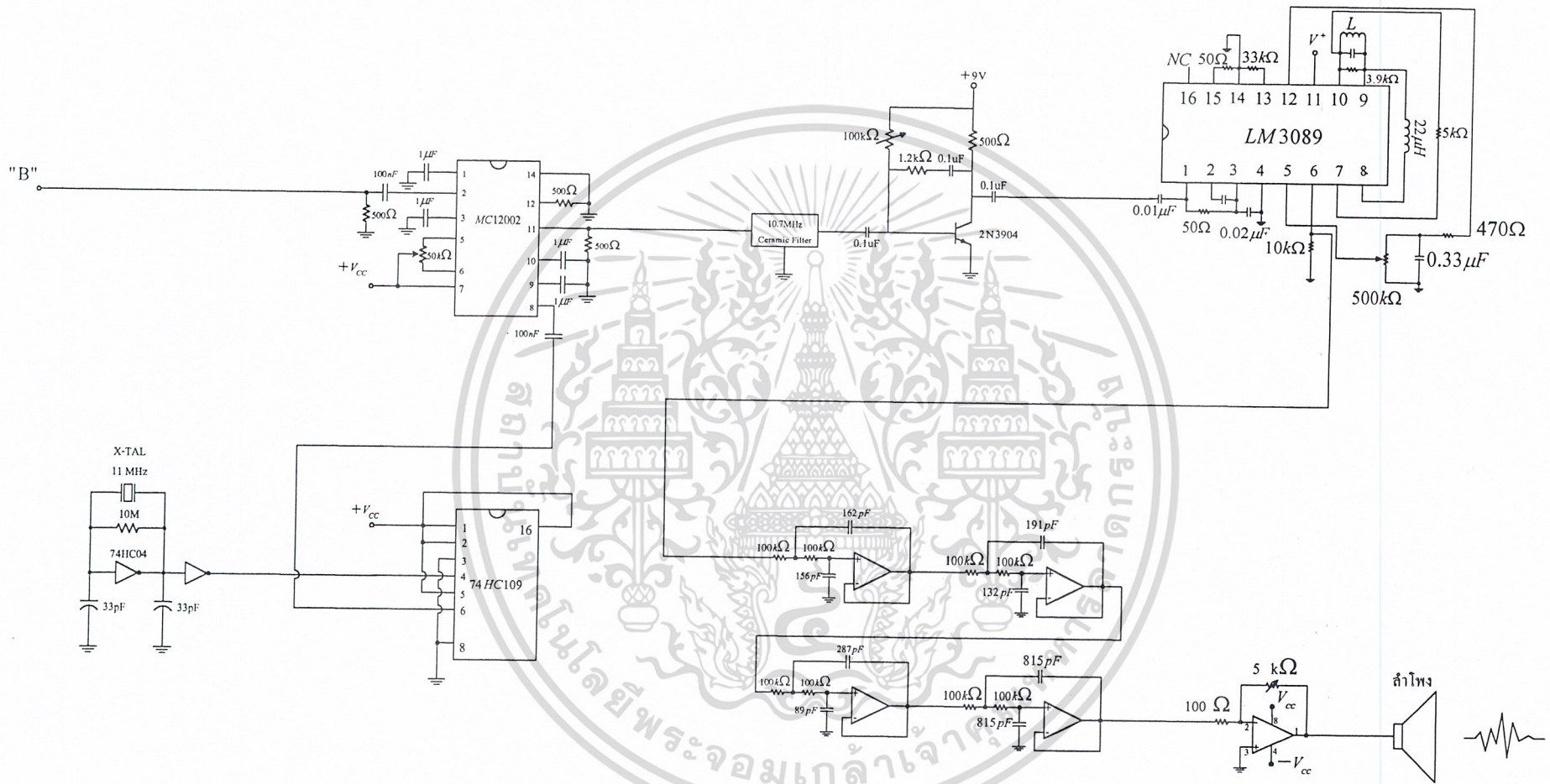
รูปที่ 3.61 รูปวงจรรวมตัวลูก



รูปที่ 3.62 รูปวงจรรวมตัวลูก (ต่อ)



รูปที่ 3.63 รูปวงจรรวมลำโพง



รูปที่ 3.64 รูปวงจรรวมลำโพง (ต่อ)

บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ผลการทดลองในบทที่ 4 นี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ส่วนด้วยกันคือ

1. ผลการทดลองตัวแม่
2. ผลการทดลองตัวลูก
3. ผลการทดลองลำโพง

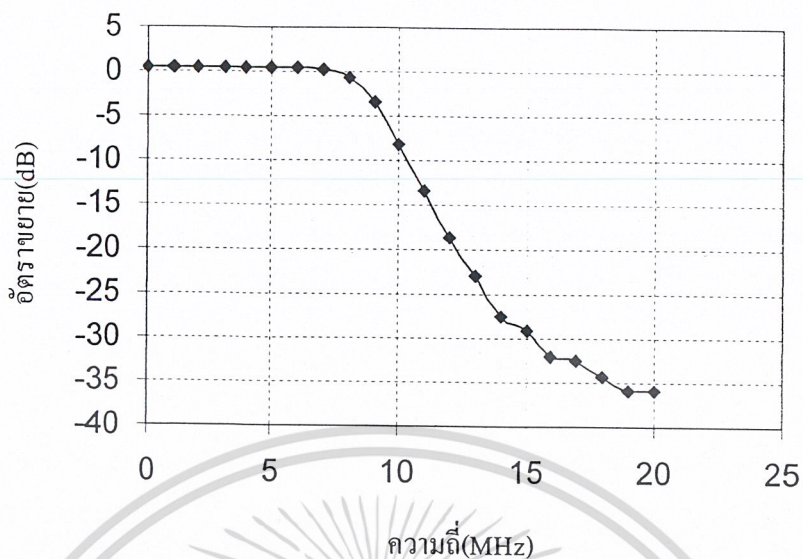
ตัวแม่

4.1 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดแอกทีฟ อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
0	0.341	7	0.206	14	-27.535
1	0.341	8	-0.724	15	-29.119
2	0.341	9	-3.453	16	-32.041
3	0.341	10	-8.134	17	-32.396
4	0.341	11	-13.392	18	-34.425
5	0.341	12	-18.711	19	-35.918
6	0.341	13	-22.975	20	-35.918

ตารางที่ 4.1 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

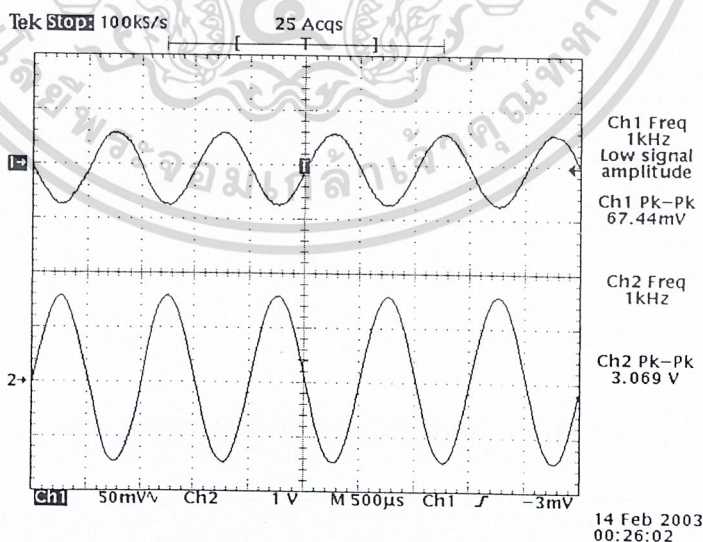
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท
อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิร์ตซ์

4.2 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเสียง

วงจรขยายสัญญาณเสียงทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงที่รับได้จากไมโครโฟน ทำให้ขนาดแรงดันของสัญญาณสูงขึ้น จากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเสียงนี้สามารถปรับอัตราขยายแรงดันได้ โดยมีอัตราขยายแรงดันได้สูงสุด 50 เท่า ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง

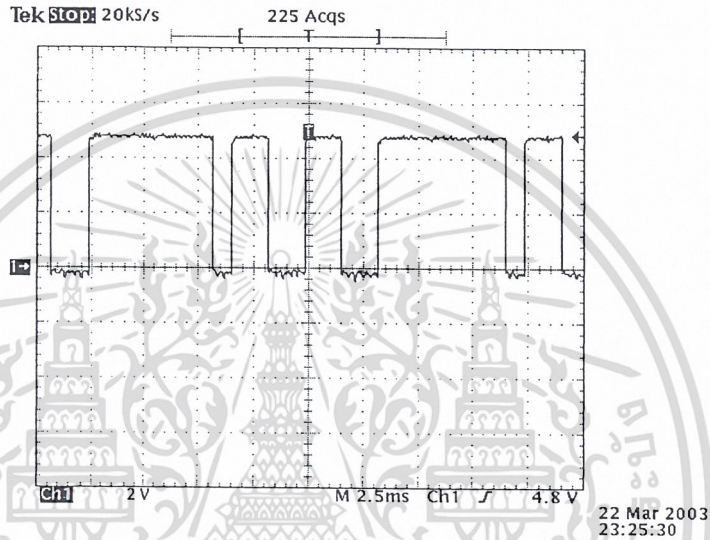
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้นำข้อมูลใดๆ จากเอกสารนี้ไปเผยแพร่หรือใช้ข้อมูลจากเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Ch1: สัญญาณอินพุตความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

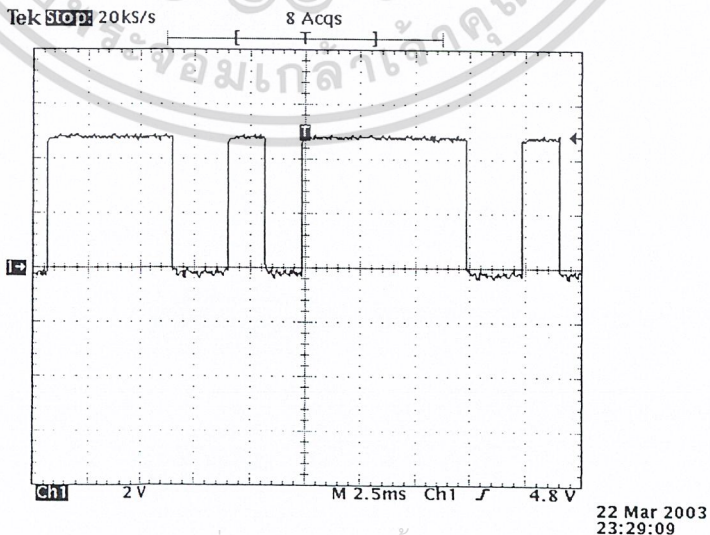
Ch2: สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง

4.3 ผลการทดลองจากขา Serial Output Port ของ MCS-51

รูปสัญญาณที่ถูกกำหนดขึ้น เพื่อสร้างรหัสไปควบคุมการเปิด-ปิด เครื่องลูก จากขา Serial Output Port ของ MCS-51 ทางด้านเครื่องแม่ โดยรหัสสัญญาณที่ออกมาจาก Serial Output Port ของ MCS-51 นี้จะมีสัญญาณการเริ่มต้นของสัญญาณ และสัญญาณการสิ้นสุดของสัญญาณรวมมาอยู่ในตัวสัญญาณด้วย แสดงดังรูป



รูปที่ 4.3 รหัสสัญญาณการปิดเครื่องลูก (มีรหัส คือ 00110011)



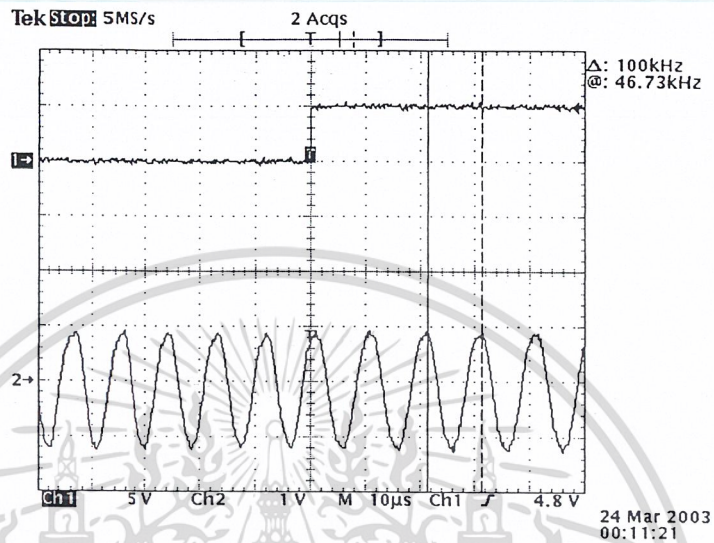
รูปที่ 4.4 รหัสสัญญาณการเปิดเครื่องลูก (มีรหัสคือ 11001100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อธิบายเพิ่มเติมในคู่มือการใช้งานชุดควบคุมอาคารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการทดลองวงจรฟริควเอนซีซีฟตี้อิงมอดูเลชั่น

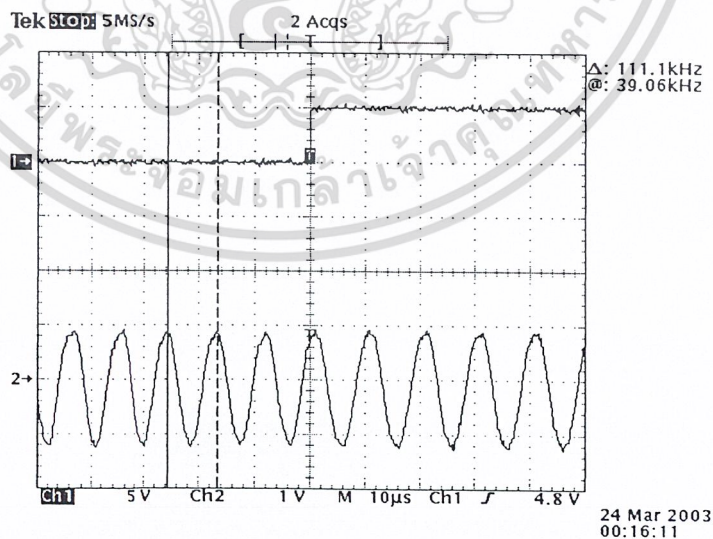
เมื่อนำสัญญาณจาก Serial Output Port ของ MCS-51 ไปผ่านวงจรฟริควเอนซีซีฟตี้อิงค้ มอดูเลชั่น ได้ผลแสดงดังรูป



รูปที่ 4.5.a แสดงผลที่ได้จากวงจรฟริควเอนซีซีฟตี้อิงค้ มอดูเลชั่น โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2206

Ch1 : สัญญาณอินพุตที่ได้จาก Serial Output Port ของ MCS-51

Ch2 : สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรฟริควเอนซีซีฟตี้อิงค้ มอดูเลชั่น



รูปที่ 4.5.b แสดงผลที่ได้จากวงจรฟริควเอนซีซีฟตี้อิงค้ มอดูเลชั่น โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2206

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวน Ch1 : สัญญาณอินพุตที่ได้จาก Serial Output Port ของ MCS-51 ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีก Ch2 : สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรฟริควเอนซีซีฟตี้อิงค้ มอดูเลชั่น

4.5 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูป 86 เมกะเฮิรตซ์

วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูปใช้ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิรตซ์ ประกอบด้วยวงจรย่อยภายในระบบ 4 ส่วนด้วยกัน ผลการทดลองในวงจรต่างๆประกอบด้วย

4.5.1 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 86 เมกะเฮิรตซ์

4.5.2 ผลการทดลองจากวงจรพรีสเกลเลอร์

4.5.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 86 เมกะเฮิรตซ์

- คริสตัลลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์

- สัญญาณล็อกดีเทก (Lock Detect : LD)

- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V

- สัญญาณ โมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

4.5.4 ผลการทดลองจากวงจรลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

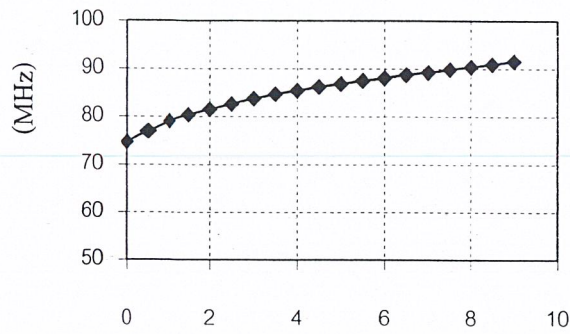
4.5.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิรตซ์

4.5.1 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 86 เมกะเฮิรตซ์

ผลการทดลองอยู่ในรูปแบบของตาราง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ควบคุมกับความถี่และความถี่เอาต์พุตที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูปที่ 86 เมกะเฮิรตซ์ อีกที่หนึ่ง ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)	แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)
0	74.701	5	86.884
0.5	76.985	5.5	87.560
1	79.082	6	88.075
1.5	80.447	6.5	88.757
2	81.550	7	89.264
2.5	82.666	7.5	89.523
3	83.796	8	90.373
3.5	84.721	8.5	90.916
4	85.432	9	91.495
4.5	86.251		

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้มีการใช้ประโยชน์ด้านการค้า
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

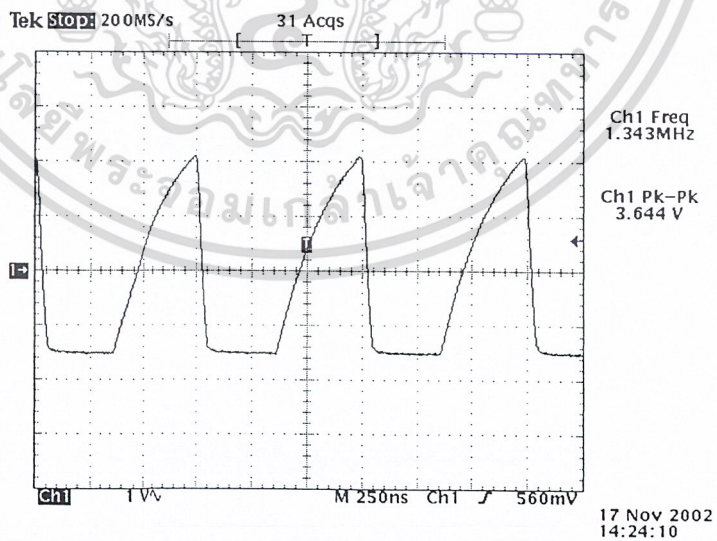


(V)

รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

4.5.2 ผลการทดลองจากวงจรพรีสเกลเลอร์

วงจรพรีสเกลเลอร์ใช้ไอซีเบอร์ MC12017 ทำการหารที่ความถี่ 64/65 โดยอินพุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ได้มาจากวงจรถ่ายสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า และเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์ (ขาที่ 4) จะถูกส่งต่อไปให้กับเฟสดีเทกเตอร์ (ขาที่ 1) ใน MC145152 โดยทำการทดลองป้อนความถี่ 86 เมกะเฮิรตซ์ซึ่งมาจากวงจรถ่ายสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า ได้ผลการทดลองเป็นดังรูป



รูปที่ 4.7 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์

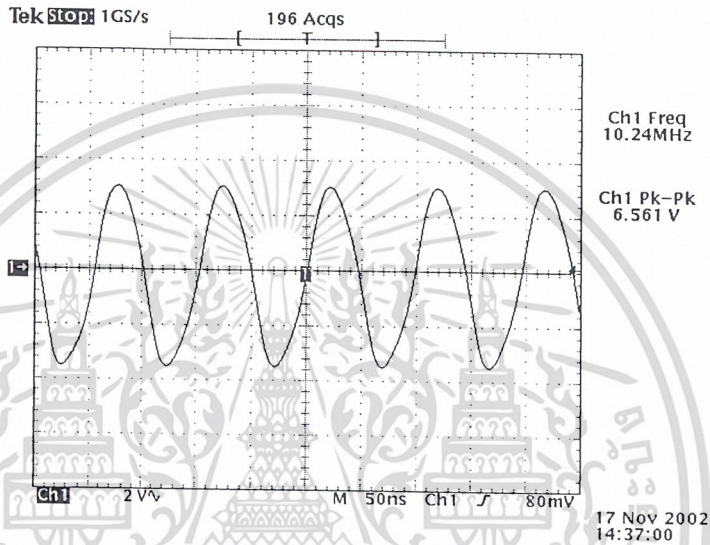
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์

ในส่วนของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูลูปที่ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ใช้ไอซี MC145152 ประกอบด้วยผลการทดลองแยกเป็นส่วนต่างๆ โดยเมื่อทำการล็อกความถี่แล้วมีผลการทดลองดังนี้

- คริสตอลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์

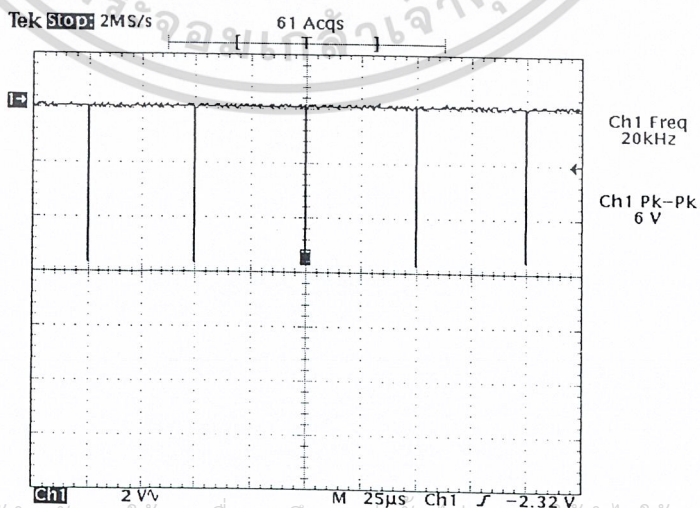
คริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการเปรียบเทียบกับเฟสกับเอาต์พุตที่ได้จากฟรีสเคลเลอร์ ผลการทดลองเป็นดังรูป



รูปที่ 4.8 สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์ (ขา 26) ของ MC145152

- สัญญาณล็อกคิเทก (Lock Detect : LD)

หากความถี่ในวงจรสังเคราะห์ความถี่ถูกล็อกความถี่แล้ว สัญญาณที่ได้จากขาล็อกคิเทก (ขาที่ 28) ของ MC145152 แสดงดังรูป



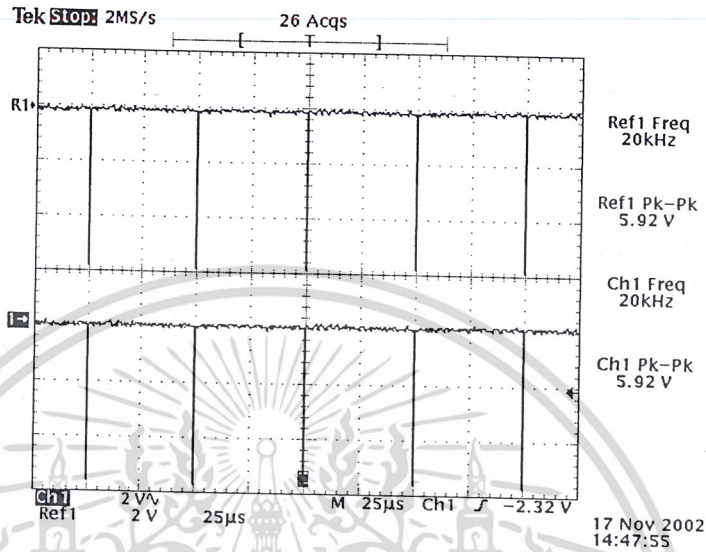
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ขออนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น ถือว่าให้ท่านมีให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152

- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V

สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นหรือลง หากวงจรตั้งคราะห์ความถี่ล็อกความถี่แล้วจะได้รูปสัญญาณดังรูป



รูปที่ 4.10 สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152

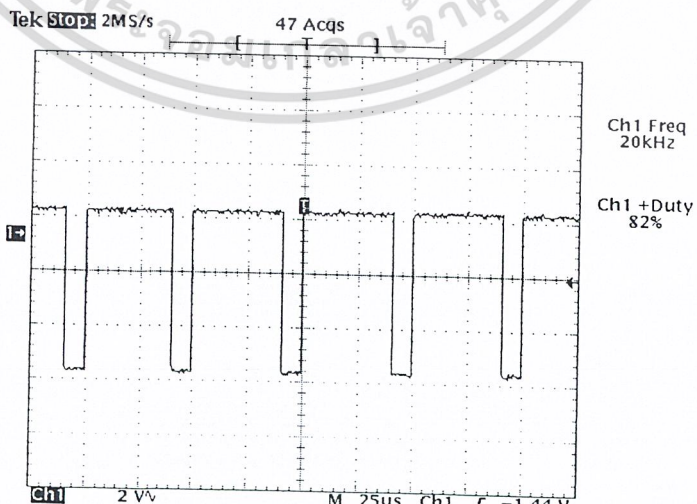
Ch1 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_R

Ch2 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_V

- สัญญาณโมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

สัญญาณโมดูลัสคอนโทรลใช้ควบคุมการหารของพริสเกลเตอร์ (duty cycle) ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับการตั้งหารที่ขา $A_0 - A_5$ และ $N_0 - N_9$ สัญญาณที่ได้จากโมดูลัสคอนโทรลแสดงดังรูป

โดยคิวตี้ไซเคิล

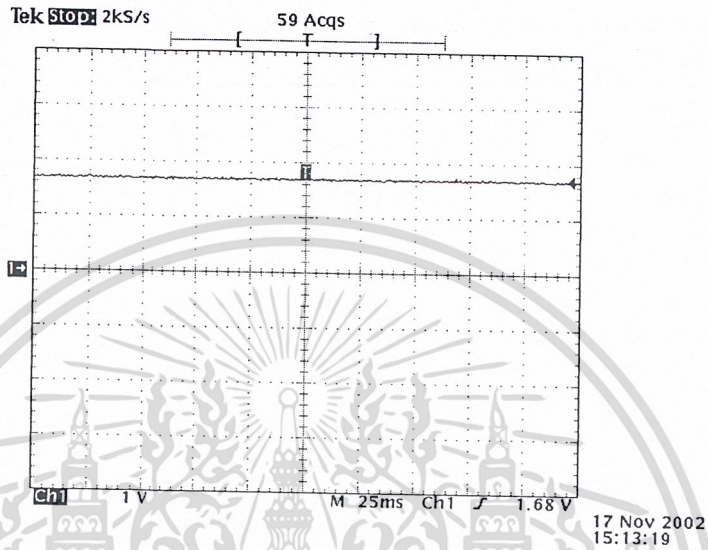


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ 17 Nov 2002 15:03:14 โยชนด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกครั้งหนึ่ง สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152

4.5.4 ผลการทดลองจากวงจรฟิลเตอร์ (Loop Filter)

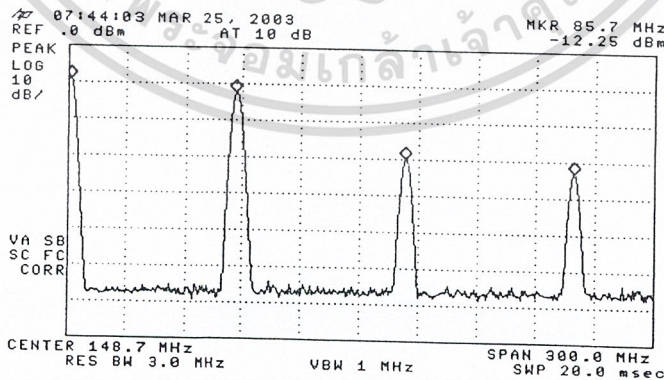
นำสัญญาณจากขา ϕ_R (ขาที่ 7) และ ϕ_V (ขาที่ 8) ของไอซี MC145152 ป้อนอินพุตให้กับวงจรฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาแต่ส่วนที่เป็นไฟตรง ซึ่งใช้เป็นแรงดันควบคุมป้อนกลับไปยังวงจรถ่ายสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตที่ได้จากวงจรฟิลเตอร์แสดงดังรูป



รูปที่ 4.12 ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากฟิลเตอร์ที่ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์

4.5.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์

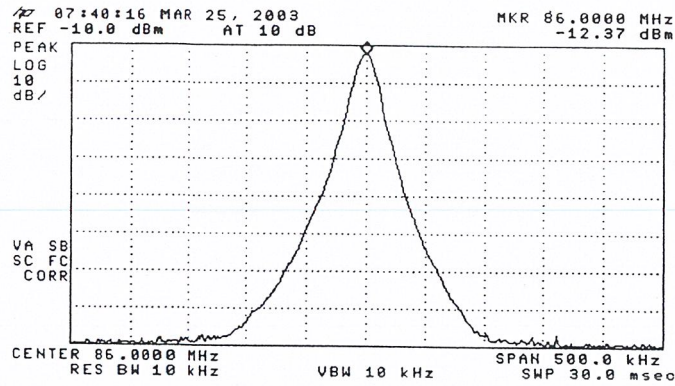
สเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์หลังจากล็อกความถี่แล้วได้ผลเมื่อวัดด้วยสเปกตรัมอานาไลเซอร์เป็นดังรูปที่ 4.13 ฮาร์โมนิกที่ 1 (ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์) ฮาร์โมนิกที่ 2 (ความถี่ 172 เมกะเฮิร์ตซ์) และฮาร์โมนิกที่ 3 (ความถี่ 258 เมกะเฮิร์ตซ์) มีขนาดดังรูป 4.14



รูปที่ 4.13 สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่

ด้วยเฟสล็อกที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีตัวลดทอน 20 dB ต่อภายนอก)

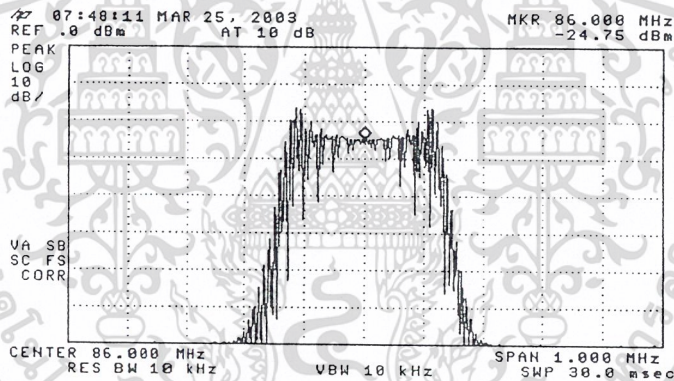
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



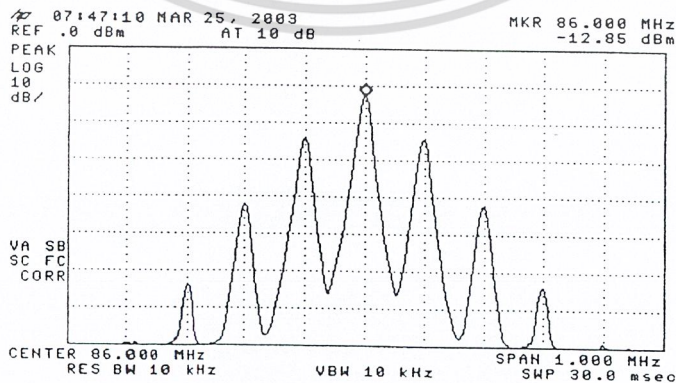
รูปที่ 4.14 สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์

4.6 ผลการทดลองเมื่อผ่านการมอดูเลตสัญญาณแบบเอฟเอ็ม

เมื่อทำการป้อนสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่ 4 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ เข้าไปมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับสัญญาณพาหะที่ความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ ผลของสเปกตรัมเป็นดังรูป



รูปที่ 4.15. a สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นพาหะที่ถูกมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับสัญญาณไซน์ความถี่ 4 กิโลเฮิร์ตซ์



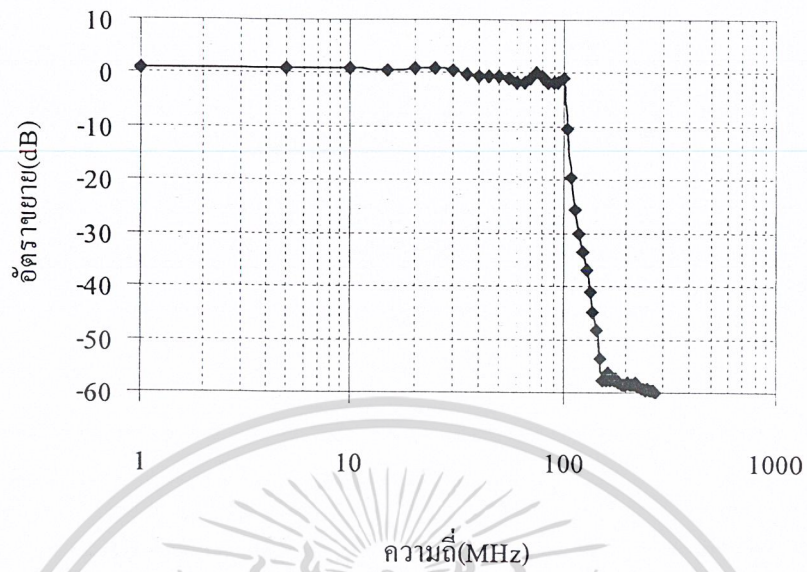
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยที่การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารเป็นการกระทำที่ผิดกฎหมาย
รูปที่ 4.15. b สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นพาหะที่ถูกมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับสัญญาณไซน์ความถี่ 100 กิโลเฮิร์ตซ์

4.7 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7
ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
1	1	95	-1.69	190	-58.5
5	1	100	-1.11	195	-58.6
10	0.86	105	-10.39	200	-58.4
15	0.44	110	-19.37	205	-58.2
20	0.86	115	-25.65	210	-58.3
25	0.86	120	-30.17	215	-58.5
30	0.4	125	-33.6	220	-58.4
35	-0.34	130	-37.04	225	-58.1
40	-0.65	135	-40.96	230	-58.8
45	-0.58	140	-44.78	235	-58.7
50	-0.49	145	-48.19	240	-59.1
55	-1.08	150	-53.7	245	-59.4
60	-1.85	155	-57.9	250	-59.6
65	-1.8	160	-57.7	255	-59.3
70	-0.83	165	-56.2	260	-59.7
75	0.02	170	-57.8	265	-59.8
80	-0.75	175	-57.8	270	-59.8
85	-1.7	180	-57.2	275	-60
90	-1.9	185	-58.1	280	-60.2

ตารางที่ 4.3 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7
ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ
อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 100 เมกะเฮิร์ตซ์

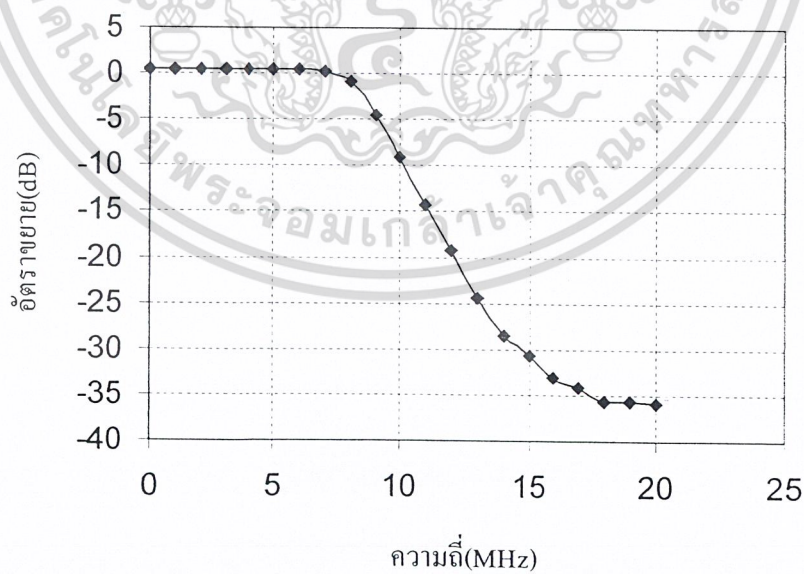
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวถูก

4.8 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดเอกทรีฟ อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
0	0.356	7	0.196	14	-28.621
1	0.356	8	-0.862	15	-30.658
2	0.356	9	-4.625	16	-33.145
3	0.356	10	-9.156	17	-34.265
4	0.356	11	-14.362	18	-35.682
5	0.356	12	-19.125	19	-35.692
6	0.356	13	-24.325	20	-35.789

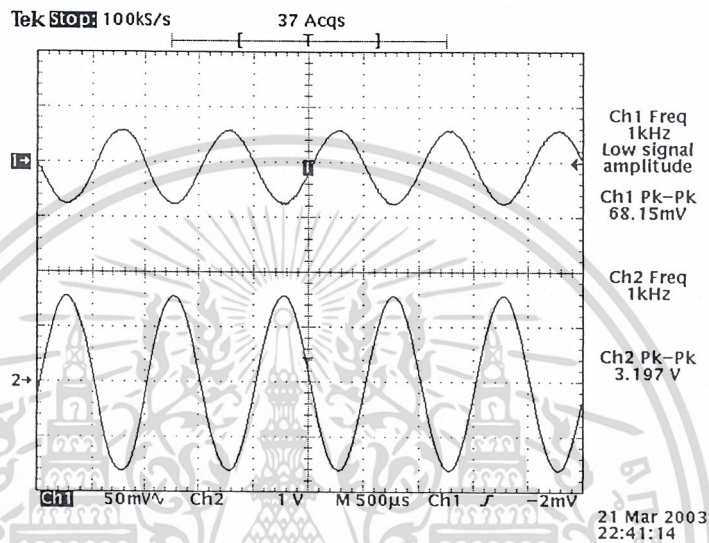
ตารางที่ 4.4 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ 4.17 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท การคำนวณค่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้าม อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์ เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเสียง

วงจรขยายสัญญาณเสียงทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงที่รับได้จากไมโครโฟน ทำให้ขนาดแรงดันของสัญญาณสูงขึ้น จากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเสียงนี้สามารถปรับอัตราขยายแรงดันได้โดยมีอัตราขยายแรงดันได้สูงสุด 50 เท่า ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.18 เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง

Ch1: สัญญาณอินพุตความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

Ch2: สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง

4.10 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ใช้ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยวงจรร้อยภายในระบบ 4 ส่วนด้วยกัน ผลการทดลองในวงจรต่างๆประกอบด้วย

4.10.1 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

4.10.2 ผลการทดลองจากวงจรฟรีสเกลเลอร์

4.10.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

- คริสตัลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์
- สัญญาณล็อกดีเทก (Lock Detect : LD)
- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V
- สัญญาณ โมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

4.10.4 ผลการทดลองจากวงจรรูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

4.10.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

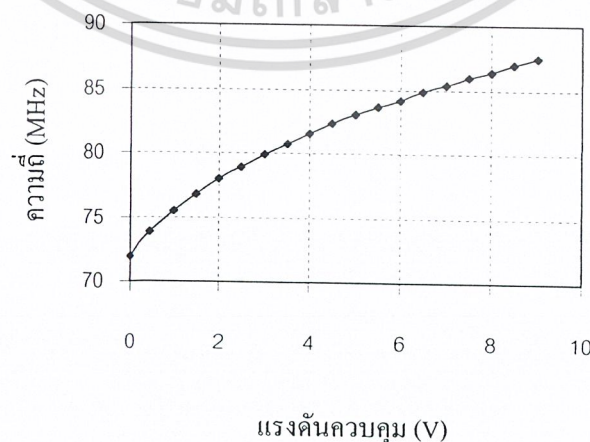
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.10.1 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

ผลการทดลองอยู่ในรูปแบบของตาราง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ควบคุมกับความถี่และความถี่เอาต์พุตที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลูบที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์อีกทีหนึ่ง ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)	แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)
0	71.963	5	83.012
0.5	73.813	5.5	83.612
1	75.450	6	84.162
1.5	76.763	6.5	84.850
2	78.013	7	85.350
2.5	78.913	7.5	86.000
3	79.938	8	86.400
3.5	80.687	8.5	86.925
4	81.562	9	87.450
4.5	82.300		

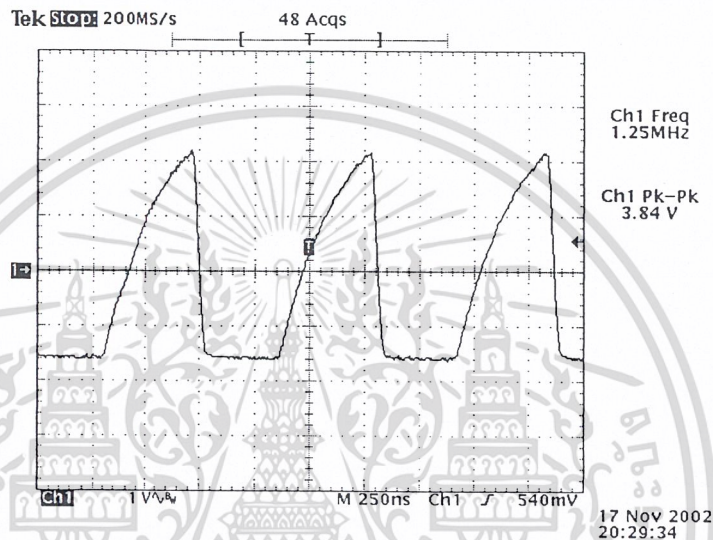
ตารางที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปดสิ่งนี้ออกไปและต้องอ้างอิงถึงชื่อของเขื่อนที่มี การนำไปใช้
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

4.10.2 ผลการทดลองจากวงจรพรีสเกลเลอร์

วงจรพรีสเกลเลอร์ใช้ไอซีเบอร์ MC12017 ทำการหารที่ความถี่ 64/65 โดยอินพุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ได้มาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า และเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์ (ขาที่ 4) จะถูกส่งต่อไปให้กับเฟสดีเทกเตอร์ (ขาที่ 1) ใน MC145152 โดยทำการทดลองปรับความถี่ 80.5 เมกะเฮิรตซ์ซึ่งมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า ได้ผลการทดลองเป็นดังรูป



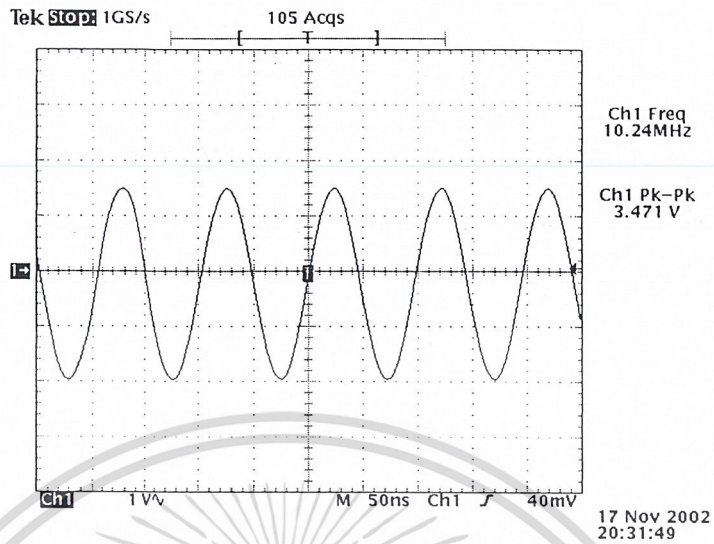
รูปที่ 4.20 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์

4.10.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 80.5 เมกะเฮิรตซ์

ในส่วนของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ความถี่ 80.5 เมกะเฮิรตซ์ใช้ไอซี MC145152 ประกอบด้วยผลการทดลองแยกเป็นส่วนต่างๆ โดยเมื่อทำการล็อกความถี่แล้วมีผลการทดลองดังนี้

- คริสตอลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์

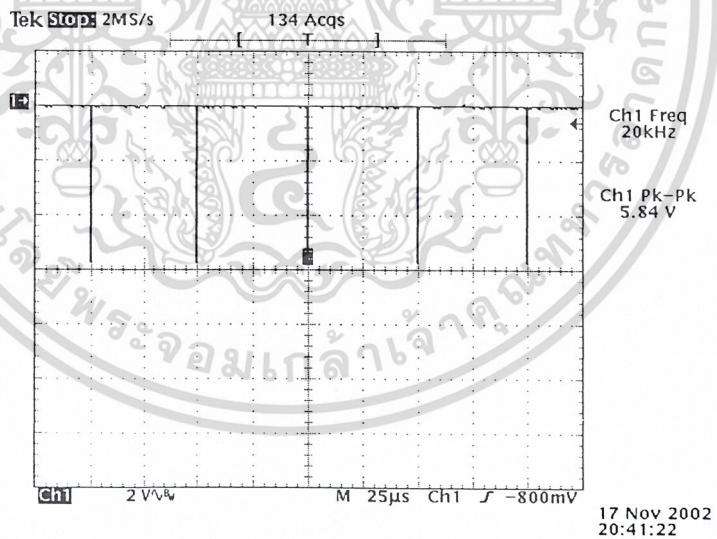
คริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการเปรียบเทียบเฟสกับเอาต์พุตที่ได้จากพรีสเกลเลอร์ ผลการทดลองเป็นดังรูป



รูปที่ 4.21 สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์ (ขา 26) ของ MC145152

- สัญญาณล็อกดีเทก (Lock Detect : LD)

หากความถี่ในวงจรสังเคราะห์ความถี่ถูกล็อกความถี่แล้ว สัญญาณที่ได้จากขาล็อกดีเทก (ขาที่ 28) ของ MC145152 แสดงดังรูป

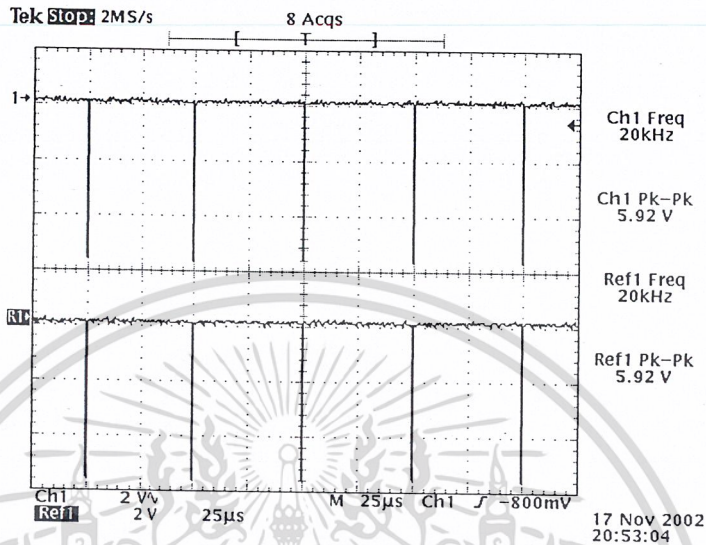


รูปที่ 4.22 สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V

สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นหรือลง หากวงจร
สังเคราะห์ความถี่ล็อกความถี่แล้วจะได้อุปสัญญาณดังรูป



รูปที่ 4.23 สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152

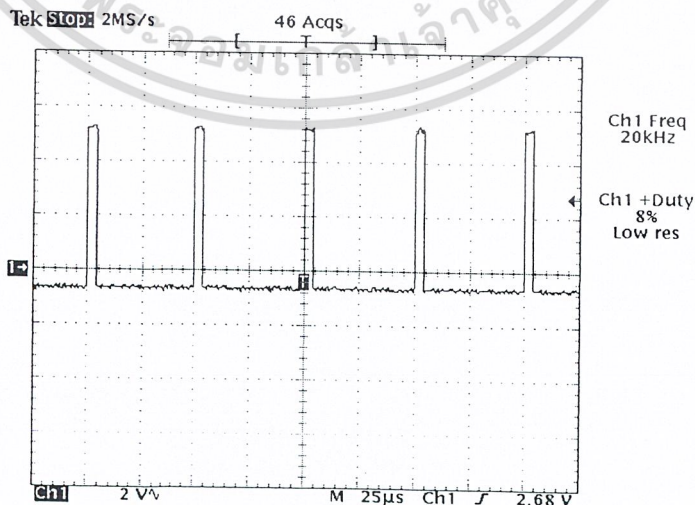
Ch1 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_R

Ch2 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_V

- สัญญาณโมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

สัญญาณ โมดูลัสคอนโทรล ใช้ควบคุมการหารของพริสเกลเลอร์ (duty cycle) ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับการตั้งหารที่ขา A_0 - A_5 และ N_0 - N_9 , สัญญาณที่ได้จาก โมดูลัสคอนโทรลแสดงดังรูป

โดยคิวตี้ไซเคิล

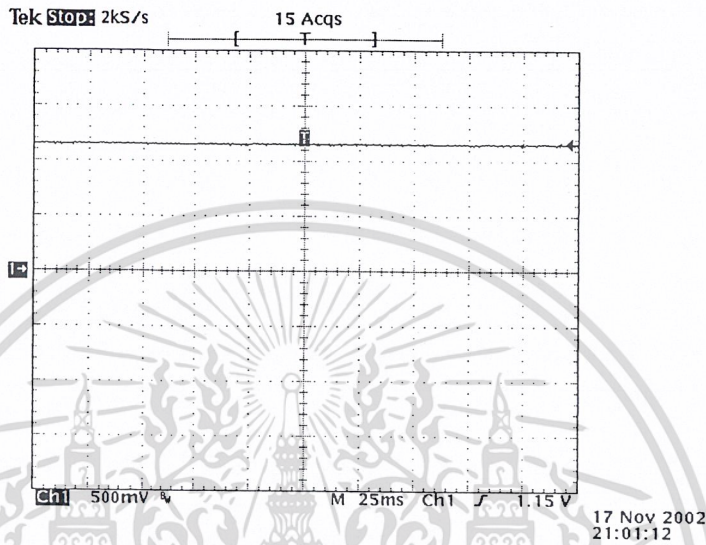


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังประชาชนโดยไม่ขออนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกรูปที่ 4.24 สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152

4.10.4 ผลการทดลองจากวงจรรูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

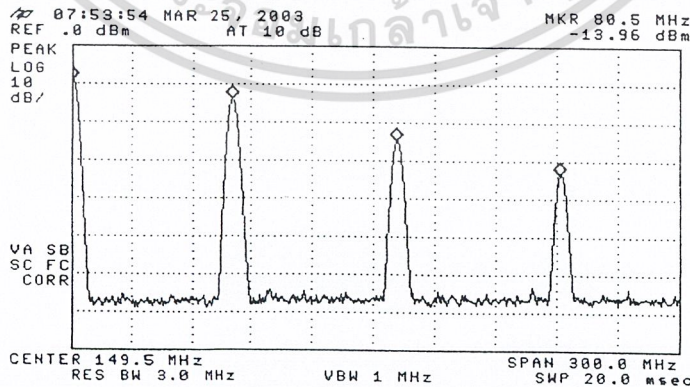
นำสัญญาณจากขา ϕ_R (ขาที่ 7) และ ϕ_V (ขาที่ 8) ของไอซี MC145152 ป้อนอินพุตให้กับ วงจรรูปฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาแต่ส่วนที่เป็นไฟตรง ซึ่งใช้เป็นแรงดันควบคุมป้อนกลับไปยังวงจรถ่ายความถี่ สัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตที่ได้จากวงจรรูปฟิลเตอร์แสดงดังรูปที่



รูปที่ 4.25 ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากฟิลเตอร์ที่ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

4.10.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

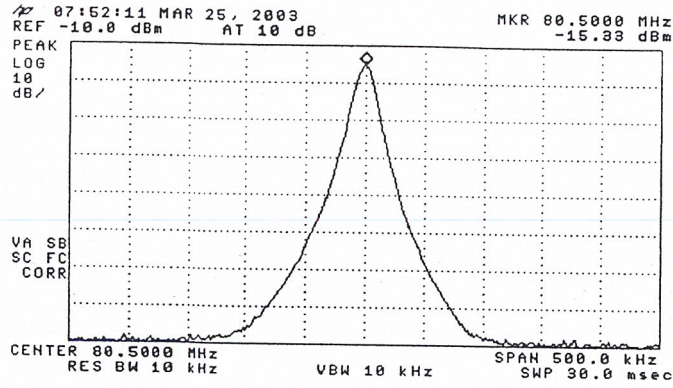
สเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์หลังจากล็อกความถี่แล้วได้ผลเมื่อวัดด้วย สเปกตรัมอนาล็อกเป็นดังรูปที่ 4.26 ฮาร์โมนิกที่ 1 (ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์) ฮาร์โมนิกที่ 2 (ความถี่ 161 เมกะเฮิร์ตซ์) และฮาร์โมนิกที่ 3 (ความถี่ 241.5 เมกะเฮิร์ตซ์) มีขนาดดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.26 สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

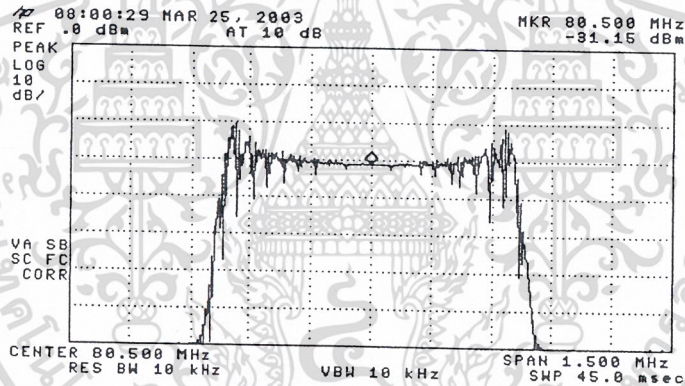
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์

4.11 ผลการทดลองเมื่อผ่านการมอดูเลตสัญญาณแบบเอฟเอ็ม

เมื่อทำการป้อนสัญญาณรูปไซน์ที่ความถี่ 4 กิโลเฮิร์ตซ์ และ 100 กิโลเฮิร์ตซ์ เข้าไปมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับสัญญาณพาหะที่ความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ ผลของสเปกตรัมเป็นดังรูป



รูปที่ 4.28 สเปกตรัมของสัญญาณคลื่นพาหะที่ถูกมอดูเลตแบบเอฟเอ็มกับสัญญาณไซน์ความถี่ 4 กิโลเฮิร์ตซ์

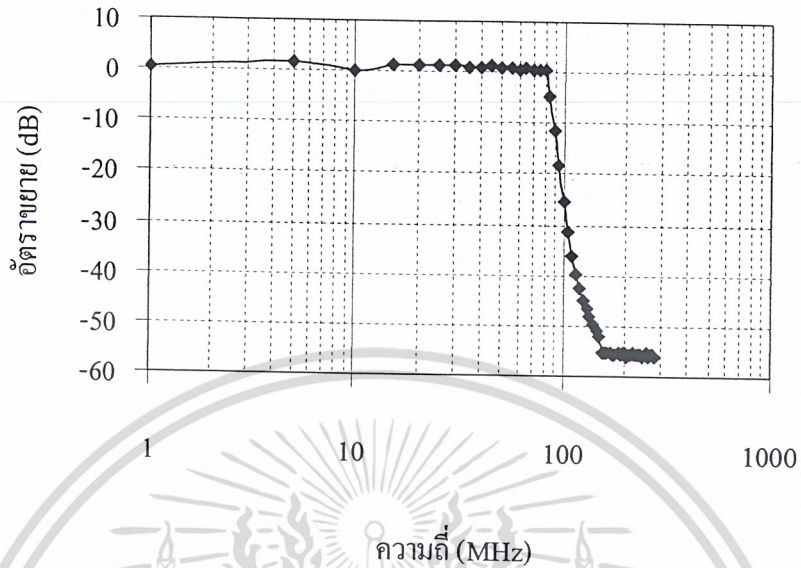
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.12 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7
ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิรตซ์

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
1	0.3	95	-18.35	190	-55.6
5	1.77	100	-25.49	195	-55.2
10	0	105	-31.52	200	-55.3
15	1.2	110	-36.31	205	-55.9
20	1.2	115	-39.64	210	-55.8
25	1.32	120	-42.31	215	-55.7
30	1.35	125	-44.92	220	-55.4
35	0.9	130	-46.32	225	-55.8
40	1	135	-48.21	230	-55.6
45	1.1	140	-49.53	235	-55.6
50	1	145	-50.69	240	-55.7
55	0.7	150	-52.19	245	-55.9
60	0.65	155	-55.3	250	-55.8
65	0.81	160	-55.4	255	-55.4
70	0.62	165	-55.3	260	-55.9
75	0.36	170	-55.1	265	-55.8
80	0.31	175	-55.8	270	-55.7
85	-4.6	180	-55.6	275	-55.9
90	-11.36	185	-55.4	280	-55.9

ตารางที่ 4.6 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ อันดับที่ 7
ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเชบีเชฟ
อันดับที่ 7 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 90 เมกะเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

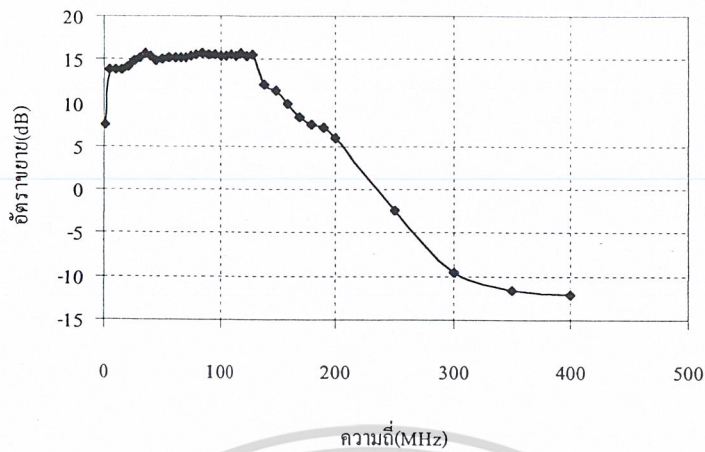
4.13 ผลการทดลองของวงจรรขยายความถี่วิทยุ

เนื่องจากสัญญาณที่รับเข้าเกิดการลดทอนทำให้ขนาดของสัญญาณลดต่ำลง เราจึงต้องนำมาผ่านวงจรรขยาย ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
1	7.5	65	15.18	130	15.50
5	13.86	70	15.23	140	12.13
10	13.89	75	15.36	150	11.50
15	13.92	80	15.56	160	9.85
20	14.20	85	15.78	170	8.31
25	14.86	90	15.63	180	7.56
30	15.21	95	15.51	190	7.13
35	15.68	100	15.46	200	6.01
40	15.43	105	15.32	250	1.69
45	14.96	110	15.63	300	-9.62
50	15.12	115	15.35	350	-11.63
55	15.23	120	15.69	400	-12.13
60	15.25	125	15.41		

ตารางที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรรขยายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

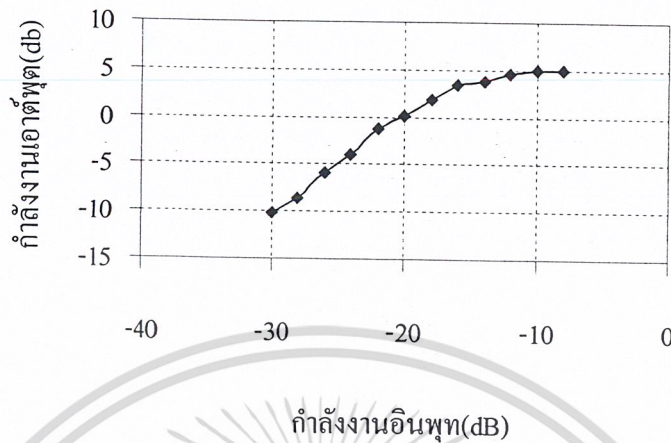


รูปที่ 4.30 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm

กำลังงานอินพุต (dBm)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)
-30	-10.12
-28	-8.53
-26	-5.86
-24	-3.98
-22	-1.32
-20	0.12
-18	1.92
-16	3.36
-14	3.89
-12	4.53
-10	4.98
-8	4.99

ตารางที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้จากวงจรรขยายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz ตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุที่มีความถี่ 86 MHz

4.14 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ใช้ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยวงจรย่อยภายในระบบ 4 ส่วนด้วยกัน ผลการทดลองในวงจรต่างๆประกอบด้วย

4.14.1 ผลการทดลองของวงจรถ่ายสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

4.14.2 ผลการทดลองจากวงจรฟรีสเกิลเลอร์

4.14.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

- คริสตัลลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์

- สัญญาณล็อกคีย์เทค (Lock Detect : LD)

- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V

- สัญญาณโมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

4.14.4 ผลการทดลองจากวงจรรูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

4.14.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

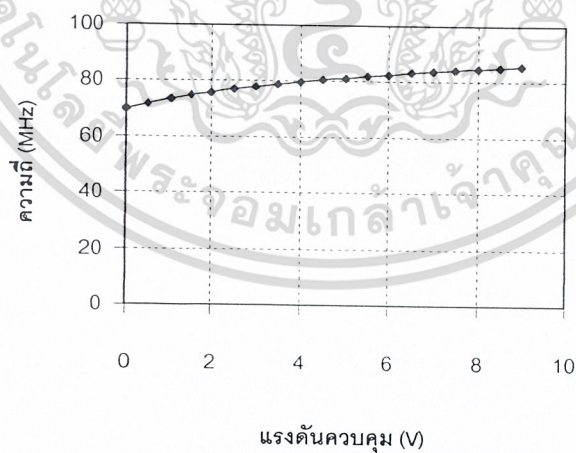
4.14.1 ผลการทดลองของวงจรถ่ายสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

ผลการทดลองอยู่ในรูปแบบของตาราง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ควบคุมกับความถี่และความถี่เอาต์พุตที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์อีกทีหนึ่ง ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)	แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)
0	69.65	5	81.19
0.5	71.50	5.5	81.88
1	73.50	6	82.48
1.5	74.90	6.5	83.11
2	75.85	7	83.76
2.5	77.05	7.5	84.22
3	78.05	8	84.75
3.5	79.00	8.5	85.23
4	79.65	9	85.81
4.5	80.49		

ตารางที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

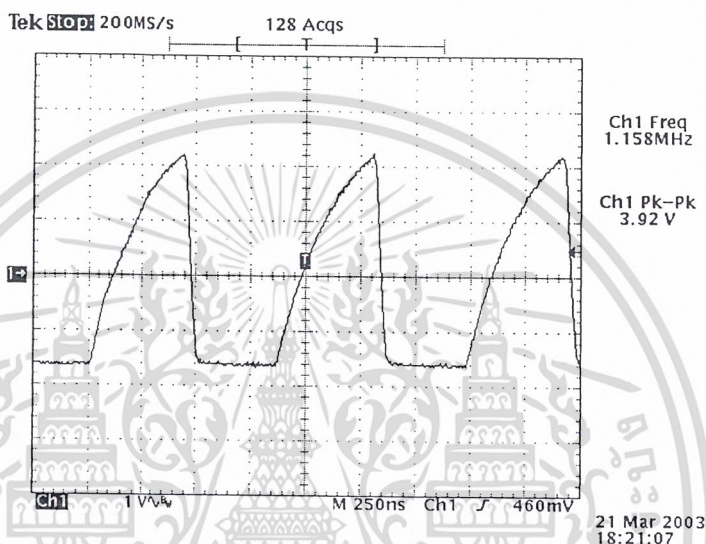


รูปที่ 4.32 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14.2 ผลการทดลองจากวงจรพรีสเกลเลอร์

วงจรพรีสเกลเลอร์ใช้ไอซีเบอร์ MC12017 ทำการหารที่ความถี่ 64/65 โดยอินพุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ได้มาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า และเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์ (ขาที่ 4) จะถูกส่งต่อไปให้กับเฟสดีเทกเตอร์ (ขาที่ 1) ใน MC145152 โดยทำการทดลองป้อนความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์ซึ่งมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า ได้ผลการทดลองเป็นดังรูป



รูปที่ 4.33 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์

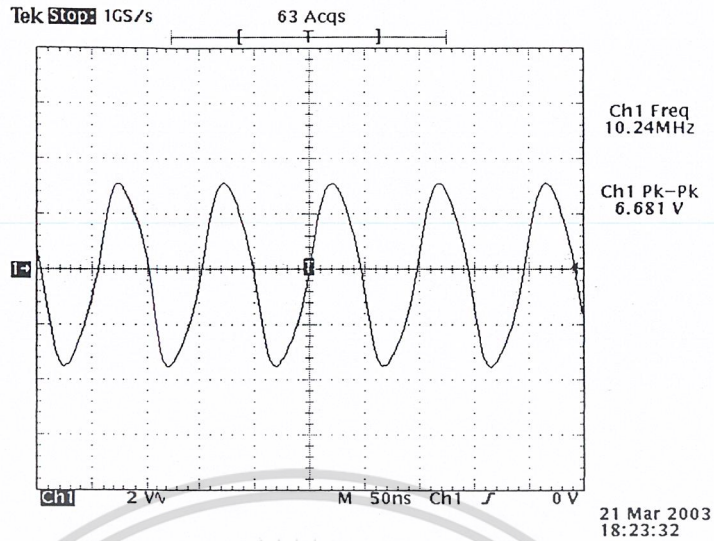
4.14.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์

ในส่วนของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกที่ความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์ใช้ไอซี MC145152 ประกอบด้วยการทดลองแยกเป็นส่วนต่างๆ โดยเมื่อทำการล็อกความถี่แล้วมีผลการทดลองดังนี้

- คริสตอลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์

คริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการเปรียบเทียบเฟสกับเอาต์พุตที่ได้จากพรีสเกลเลอร์ ผลการทดลองเป็นดังรูป

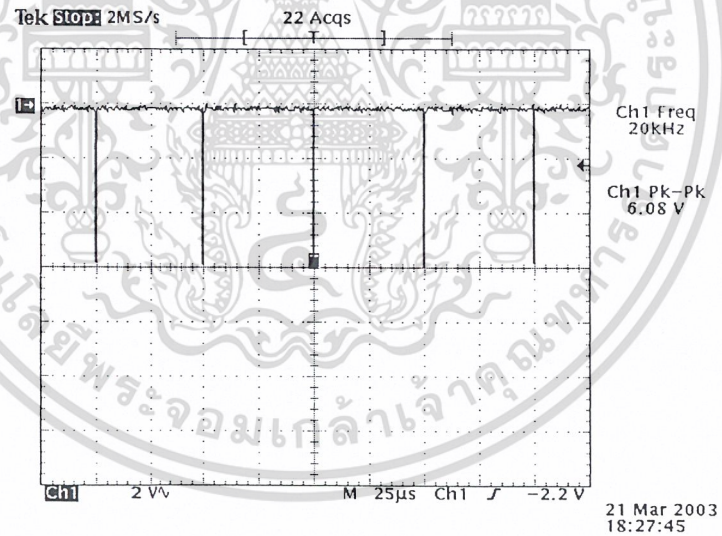
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 สัญญาณจากคริสตอลอสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์ (ขา 26) ของ MC145152

- สัญญาณล็อกดีเทก (Lock Detect : LD)

หากความถี่ในวงจรตั้งเคราะห์ความถี่ถูกล็อกความถี่แล้ว สัญญาณที่ได้จากขาล็อกดีเทก (ขาที่ 28) ของ MC145152 แสดงดังรูป

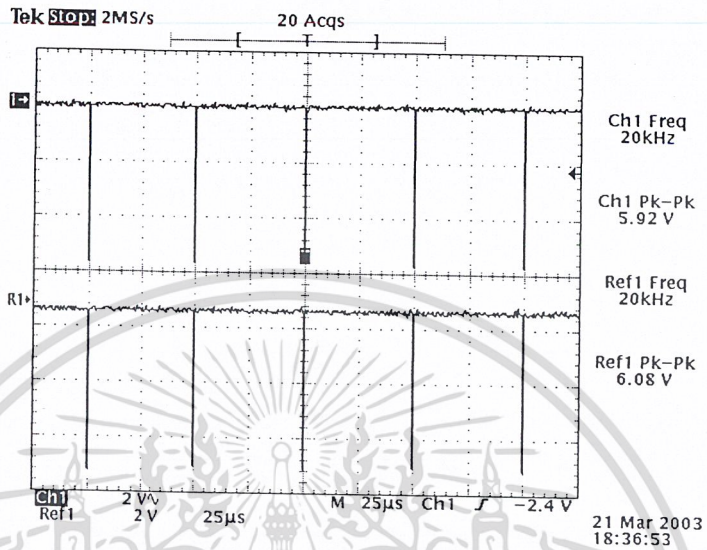


รูปที่ 4.35 สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V

สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นหรือลง หากวงจร
สังเคราะห์ความถี่ล็อกความถี่แล้วจะได้รูปสัญญาณดังรูป



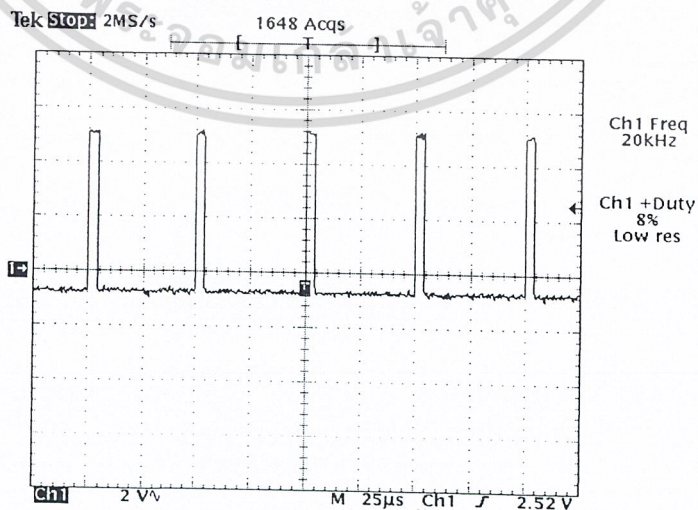
รูปที่ 4.36 สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152

Ch1 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_R

Ch2 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_V

- สัญญาณโมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

สัญญาณโมดูลัสคอนโทรลใช้ควบคุมการหารของพริสเกลเลอร์ (duty cycle) ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับการตั้งหารที่ขา $A_0 - A_5$ และ $N_0 - N_9$ โดยคิวตี้ไซเคิล
สัญญาณที่ได้จาก โมดูลัสคอนโทรลแสดงดังรูป

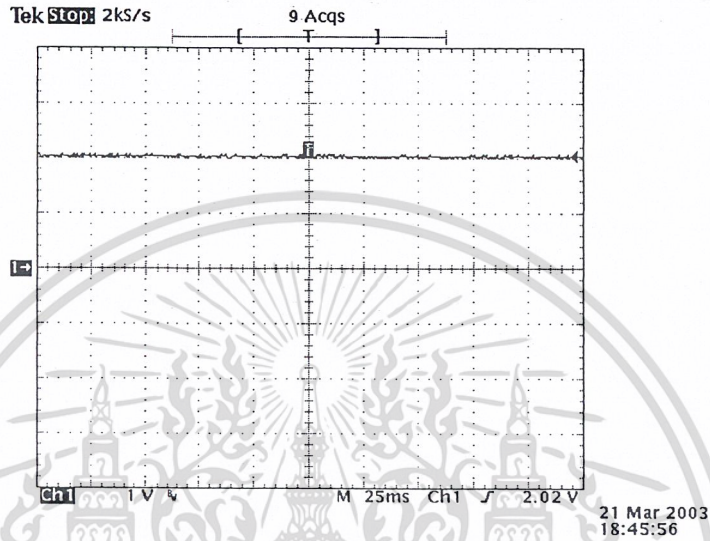


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ 21 Mar 2003 18:41:59
18:41:59 ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น รูปที่ 4.37 สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152

4.14.4 ผลการทดลองจากวงจรรูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

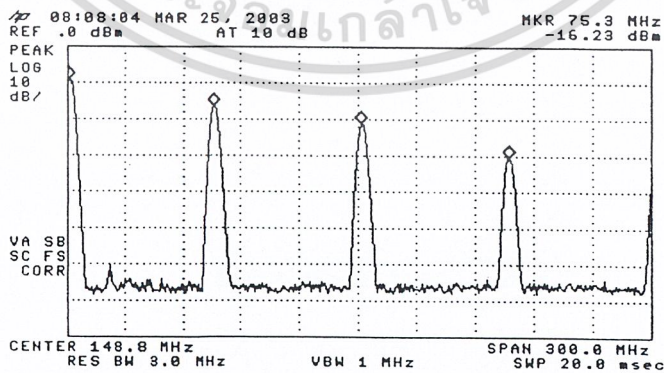
นำสัญญาณจากขา ϕ_R (ขาที่ 7) และ ϕ_V (ขาที่ 8) ของไอซี MC145152 ป้อนอินพุตให้กับ วงจรรูปฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาแต่ส่วนที่เป็นไฟตรง ซึ่งใช้เป็นแรงดันควบคุมป้อนกลับไปยังวงจรกำเนิด สัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตที่ได้จากวงจรรูปฟิลเตอร์แสดงดังรูป



รูปที่ 4.38 ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากฟิลเตอร์ที่ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

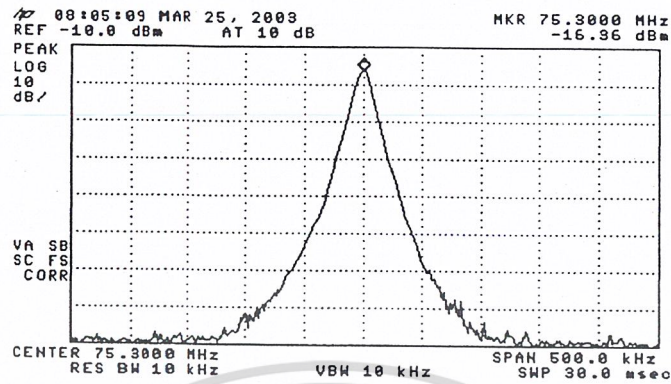
4.14.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

สเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์หลังจากล็อกความถี่แล้วได้ผลเมื่อวัดด้วย สเปกตรัมอนาลิเซอร์เป็นดังรูปที่ 4.39 ฮาร์โมนิกที่ 1 (ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์) ฮาร์โมนิกที่ 2 (ความถี่ 150.6 เมกะเฮิร์ตซ์) และฮาร์โมนิกที่ 3 (ความถี่ 225.9 เมกะเฮิร์ตซ์) มีขนาดดังรูปที่ 4.40

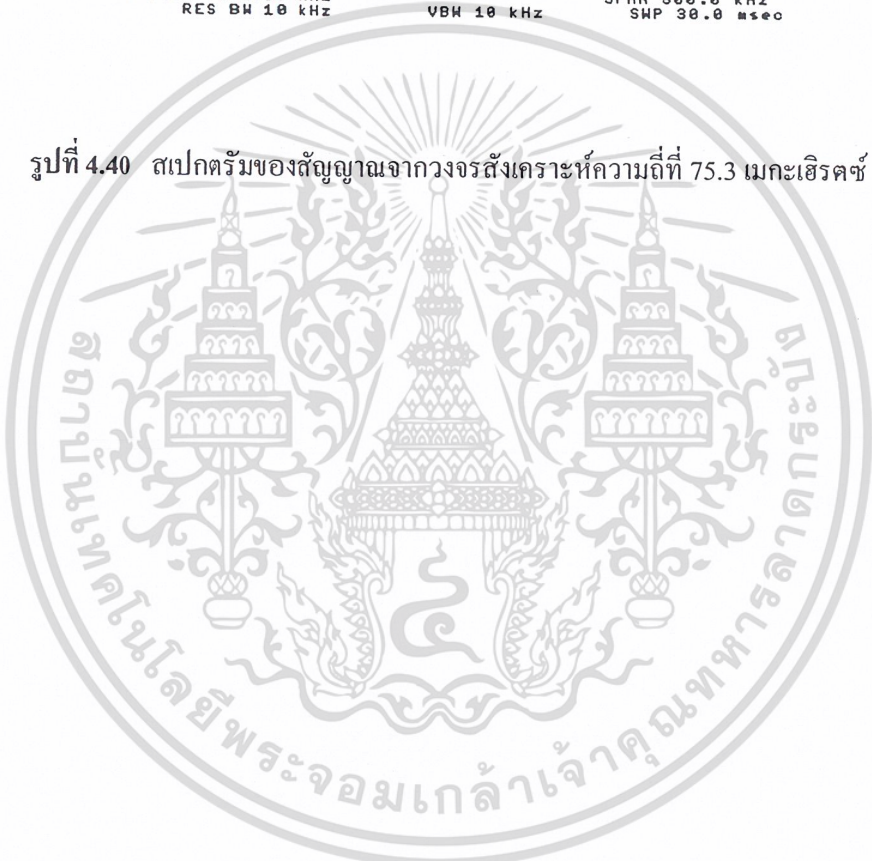


รูปที่ 4.39 สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเบื้องต้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ด้วยเฟสล็อกที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีตัวลดทอน 20 dB ต่อภายนอก)
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



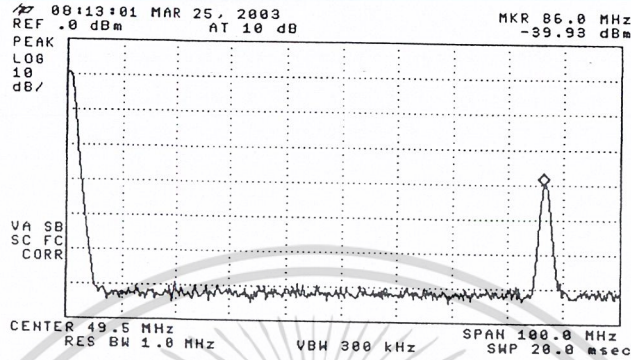
รูปที่ 4.40 สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรส่งเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์



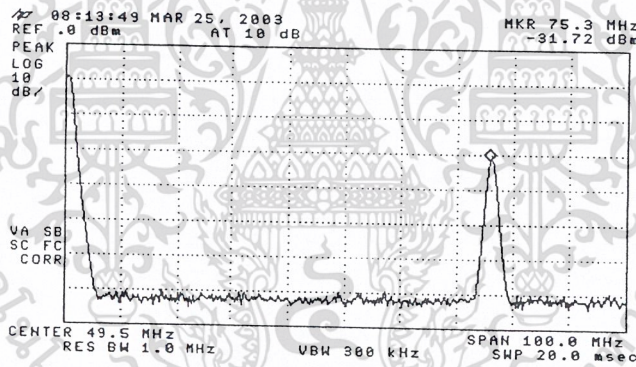
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.15 ผลการทดลองของวงจรมิกซ์เซอร์

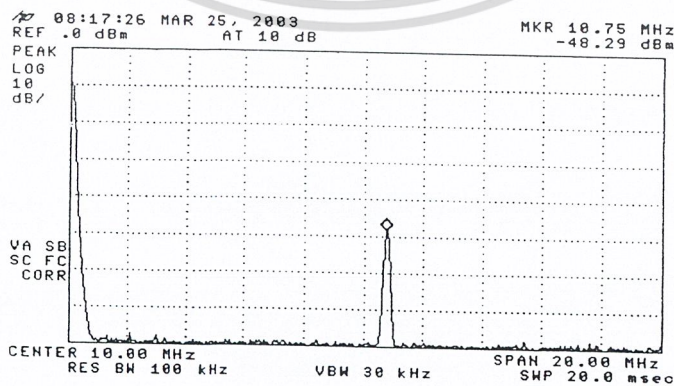
วงจรมิกซ์เซอร์ทำหน้าที่ลดความถี่จาก 86 เมกะเฮิร์ตซ์มาเป็นความถี่ที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (ความถี่กลาง) ได้ผลการทดลองดังรูป



รูปที่ 4.41 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)



รูปที่ 4.42 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)



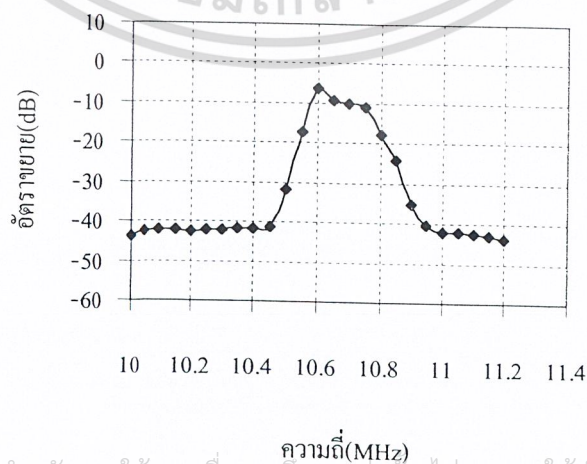
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.43 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกซ์เซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.16 ผลการทดลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์

ผลการวัดการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่โดยใช้เซรามิกซ์ฟิลเตอร์แสดงได้ดังต่อไปนี้

ความถี่ (MHz)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)	อัตราขยาย (dB)
10	-63.63	-43.63	10.65	-29.26	-9.26
10.05	-62.53	-42.53	10.7	-30.10	-10.10
10.1	-62.20	-42.20	10.75	-30.86	-10.86
10.15	-62.16	-42.16	10.8	-37.62	-17.62
10.2	-62.05	-42.05	10.85	-44.12	-24.12
10.25	-61.98	-41.98	10.9	-55.21	-35.21
10.3	-61.86	-41.86	10.95	-60.53	-40.53
10.35	-61.73	-41.73	11	-61.86	-41.86
10.4	-61.65	-41.65	11.05	-61.96	-41.96
10.45	-61.01	-41.01	11.1	-62.35	-42.35
10.5	-51.89	-31.89	11.15	-62.74	-42.74
10.55	-37.52	-17.52	11.2	-63.63	-43.63
10.6	-26.23	-6.23			

ตารางที่ 4.9 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์



รูปที่ 4.44 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์

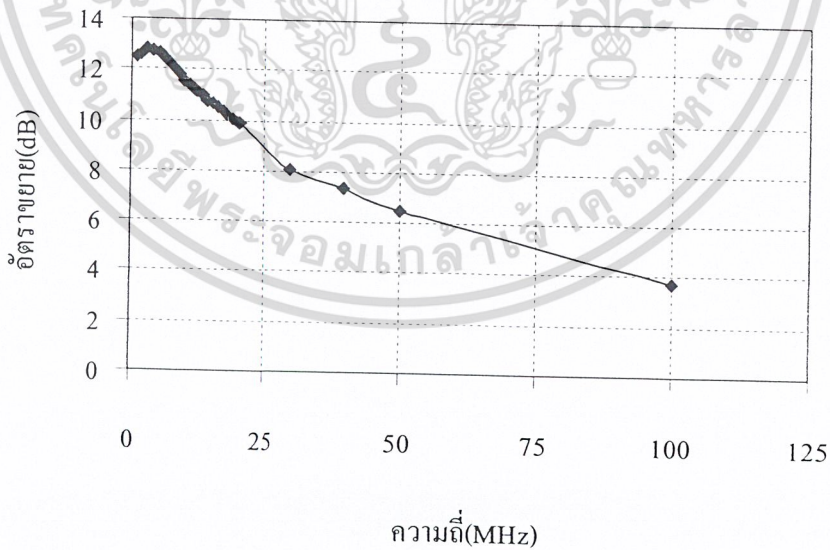
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ผู้รับบริการจะรับผิดชอบต่อข้อมูลและต้องอ้างถึงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.17 ผลการทดลองของวงจรถ่ายความถี่กลาง

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
1	12.53	9	11.81	17	10.36
2	12.54	10	11.58	18	10.23
3	12.8	11	11.37	19	10.05
4	12.75	12	11.18	20	9.91
5	12.65	13	11.02	30	8.05
6	12.48	14	10.79	40	7.35
7	12.26	15	10.65	50	6.46
8	12.04	16	10.52	100	3.72

ตารางที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายที่ได้จากวงจรถ่ายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm



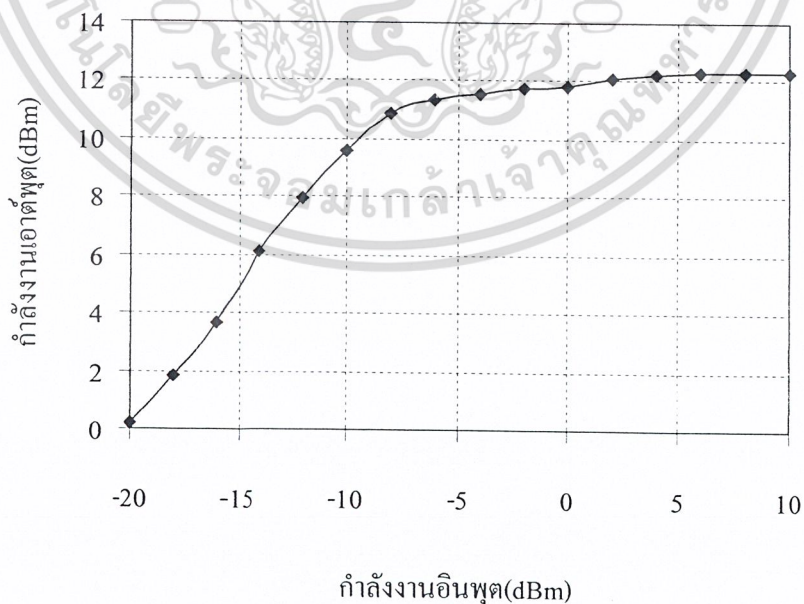
รูปที่ 4.45 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส ที่ได้จกัวงจรถ่ายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานอินพุต (dBm)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)	กำลังงานอินพุต (dBm)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)
-20	0.23	-4	11.53
-18	1.86	-2	11.76
-16	3.65	0	11.80
-14	6.12	2	12.12
-12	7.95	4	12.25
-10	9.56	6	12.30
-8	10.89	8	12.31
-6	10.95	10	13.36

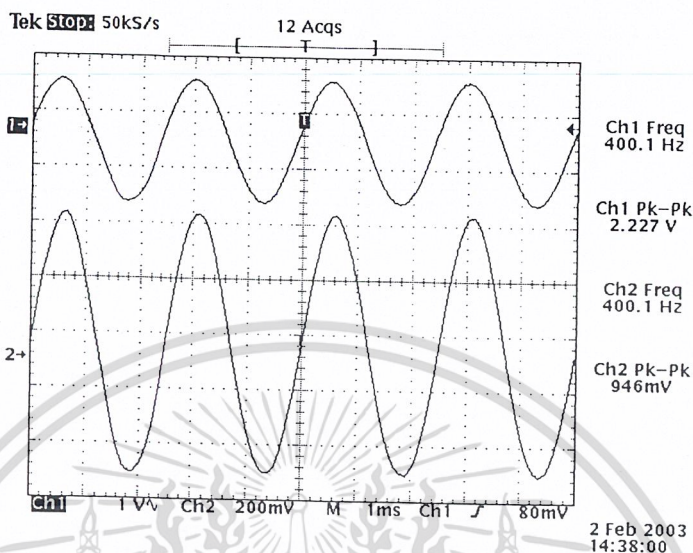
ตารางที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลางที่ความถี่ 10.7 MHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเบื้องต้นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.46 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดสิทธิ์เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลาง

4.18 ผลการทดลองวงจรเฟอเอ็มดีมอดูเลเตอร์

ผลการทดลองเมื่อป้อนความถี่กลางที่มอดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

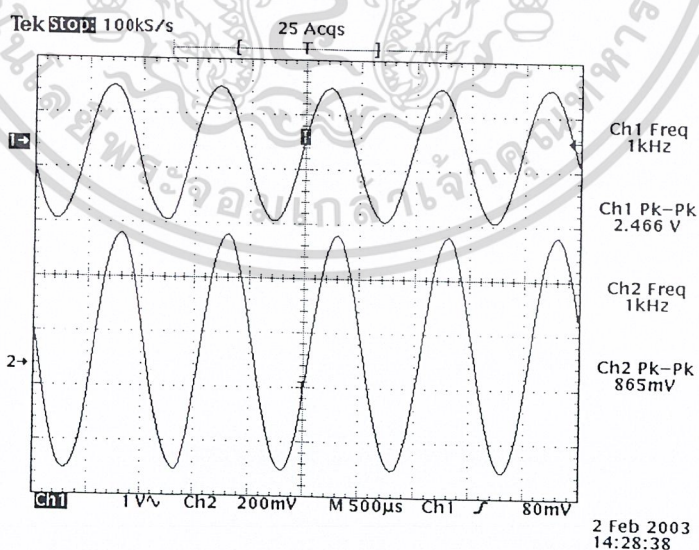


รูปที่ 4.47 สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมอดูเลตและสัญญาณที่คิมอดูเลต

Ch1:สัญญาณที่ผ่านการคิมอดูเลต

Ch2:สัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์ที่นำมอดูเลต

ผลการทดลองเมื่อป้อนความถี่กลางที่มอดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงได้ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.48 สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมอดูเลตและสัญญาณที่คิมอดูเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการวิจัยและพัฒนาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องขออนุญาตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

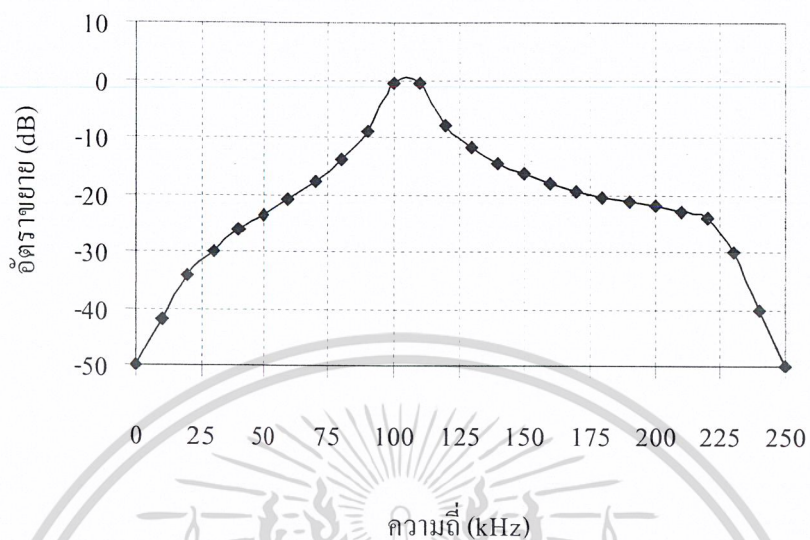
4.19 ผลการทดลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100 -110 กิโลเฮิรตซ์

เอาท์พุทที่ได้จากวงจร FM Demodulator อาจจะมีสัญญาณเสียงที่ไม่ต้องการปนมากับสัญญาณที่ต้องการจึงต้องทำการกรองโดยผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิรตซ์ ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

ความถี่ (kHz)	กำลังขยาย (dB)	ความถี่ (kHz)	กำลังขยาย (dB)
10	-41.938	120	-7.96
20	-34.334	130	-11.904
30	-30.116	140	-14.424
40	-26.232	150	-16.478
50	-23.556	160	-17.992
60	-20.876	170	-19.332
70	-17.722	180	-20.354
80	-13.98	190	-21.11
90	-9.118	200	-21.938
100	-0.574	210	-23.098
110	-0.428	220	-23.876

ตารางที่ 4.13 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

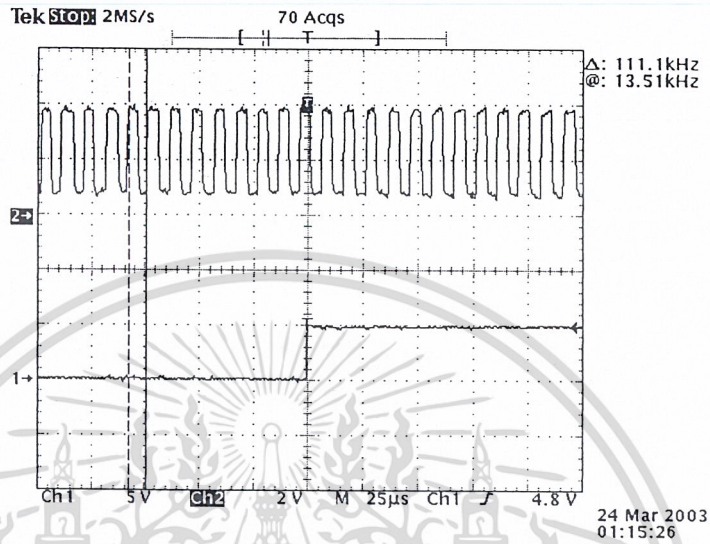


รูปที่ 4.49 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 100-110 กิโลเฮิร์ตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.20 ผลการทดลองวงจรพีแอมป์ที่ขั้วอินพุตมอดูเลชั่น

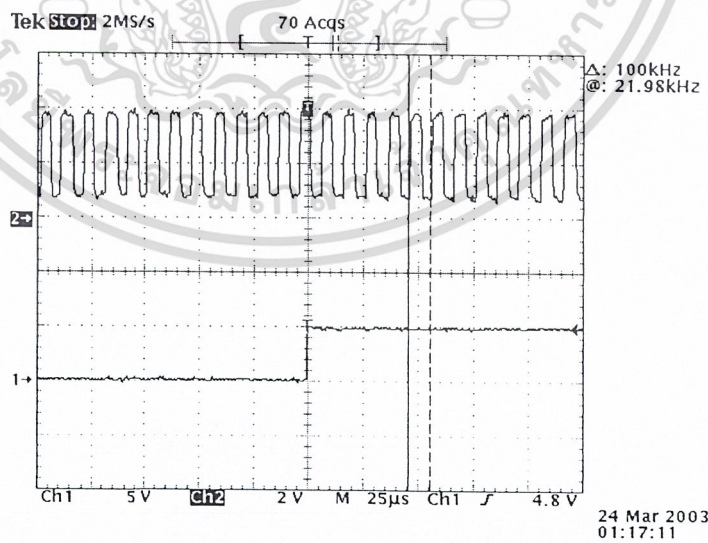
เมื่อนำสัญญาณจากวงจรเอฟเอ็มมอดูเลชั่น ไปผ่านวงจรพีแอมป์ที่ขั้วอินพุตมอดูเลชั่น ได้ผลแสดงดังรูป



รูปที่ 4.50.a แสดงผลที่ได้จากวงจรพีแอมป์ที่ขั้วอินพุตมอดูเลชั่น โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2211

Ch1 : สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพีแอมป์ที่ขั้วอินพุตมอดูเลชั่น

Ch2 : สัญญาณอินพุตที่ได้จากวงจรเอฟเอ็มมอดูเลชั่น



รูปที่ 4.50.b แสดงผลที่ได้จากวงจรพีแอมป์ที่ขั้วอินพุตมอดูเลชั่น โดยใช้ไอซีเบอร์ XR2211

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส Ch1 : สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพีแอมป์ที่ขั้วอินพุตมอดูเลชั่น ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น Ch2 : สัญญาณอินพุตที่ได้จากวงจรเอฟเอ็มมอดูเลชั่นของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลำโพง

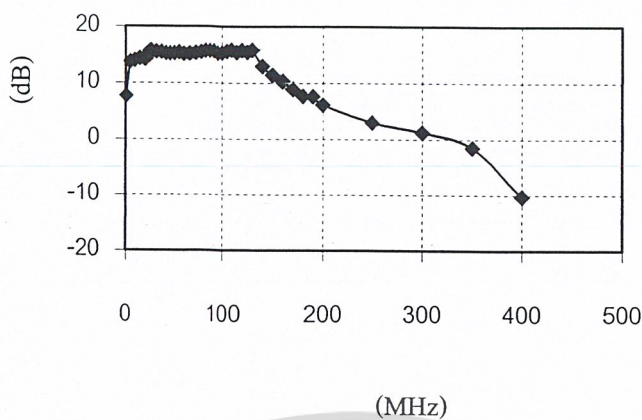
4.21 ผลการทดลองของวงจรรขยายความถี่วิทยุ

เนื่องจากสัญญาณที่รับเข้าเกิดการลดทอนทำให้ขนาดของสัญญาณลดต่ำลง เราจึงจ้องนำมาผ่านวงจรรขยาย ซึ่งได้ผลการทดลองดังนี้

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
1	7.7	65	15.16	130	15.78
5	13.71	70	15.30	140	12.93
10	13.94	75	15.46	150	11.38
15	14.28	80	15.68	160	10.28
20	14.19	85	15.70	170	9.88
25	15.70	90	15.60	180	8.00
30	15.50	95	15.20	190	7.63
35	15.43	100	15.30	200	6.15
40	15.25	105	15.59	250	2.96
45	15.16	110	15.78	300	-8.82
50	15.20	115	15.40	350	-1.50
55	15.41	120	15.74	400	-10.28
60	15.12	125	15.46		

ตารางที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรรขยายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

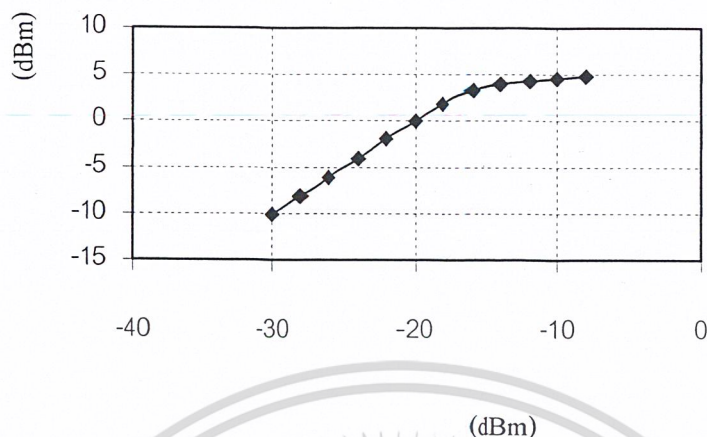


รูปที่ 4.51 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด -10 dBm

กำลังงานอินพุต (dBm)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)
-30	-10.09
-28	-8.11
-26	-6.08
-24	-4.06
-22	-1.94
-20	0.01
-18	1.83
-16	3.26
-14	3.96
-12	4.28
-10	4.57
-8	4.81

ตารางที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.52 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่วิทยุที่ความถี่ 86 MHz

4.22 ผลการทดลองของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลุ๊ป 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลุ๊ปใช้ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ ประกอบด้วยวงจรร้อยภายในระบบ 4 ส่วนด้วยกัน ผลการทดลองในวงจรต่างๆประกอบด้วย

4.22.1 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

4.22.2 ผลการทดลองจากวงจรพรีสเกลเลอร์

4.22.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

- คริสตัลลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิร์ตซ์
- สัญญาณล็อกคิเทก (Lock Detect : LD)
- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V
- สัญญาณโมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

4.22.4 ผลการทดลองจากวงจรลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

4.22.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

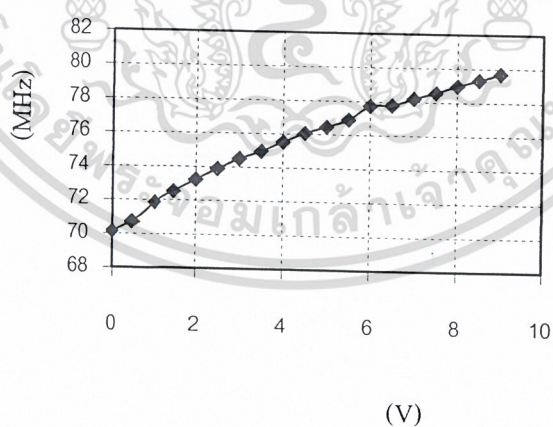
4.22.1 ผลการทดลองของวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าได้ตามแรงดันไฟฟ้าที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

ผลการทดลองอยู่ในรูปแบบของตาราง และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ใช้ควบคุมกับความถี่และความถี่เอาต์พุตที่ได้ เพื่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกกลุ๊ปที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์อีกทีหนึ่ง ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)	แรงดันควบคุม (Volts)	ความถี่ (MHz)
0	70.15	5	76.44
0.5	70.73	5.5	76.89
1	71.87	6	77.37
1.5	72.53	6.5	77.79
2	73.23	7	78.20
2.5	73.89	7.5	78.55
3	74.51	8	78.97
3.5	74.95	8.5	79.32
4	75.52	9	79.69
4.5	76.06		

ตารางที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

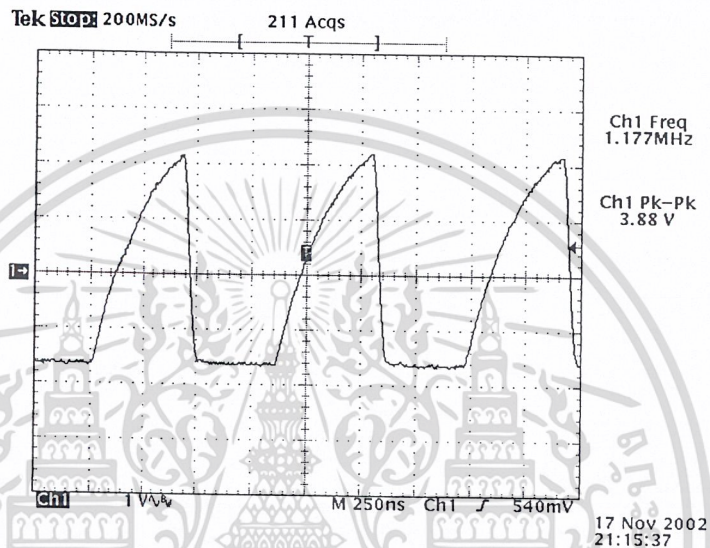


รูปที่ 4.53 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันควบคุมกับความถี่ที่ได้จาก
วงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.22.2 ผลการทดลองจากวงจรพรีสเกลเลอร์

วงจรพรีสเกลเลอร์ใช้ไอซีเบอร์ MC12017 ทำการหารที่ความถี่ 64/65 โดยอินพุตของวงจรพรีสเกลเลอร์ได้มาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า และเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์ (ขาที่ 4) จะถูกส่งต่อไปให้กับเฟสดีเทกเตอร์ (ขาที่ 1) ใน MC145152 โดยทำการทดลองป้อนความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์ซึ่งมาจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า ได้ผลการทดลองเป็นดังรูป



รูปที่ 4.54 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรพรีสเกลเลอร์

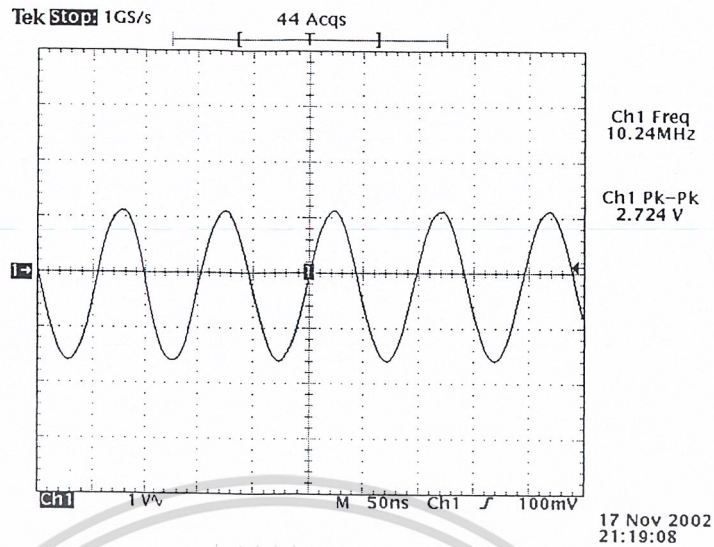
4.22.3 ผลการทดลองจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์

ในส่วนของวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคิปรูปร่างที่ความถี่ 75.3 เมกะเฮิรตซ์ใช้ไอซี MC145152 ประกอบด้วยผลการทดลองแยกเป็นส่วนต่างๆ โดยเมื่อทำการล็อกความถี่แล้วมีผลการทดลองดังนี้

- คริสตอลออสซิลเลเตอร์ ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์

คริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงในการเปรียบเทียบเฟสกับเอาต์พุตที่ได้จากพรีสเกลเลอร์ ผลการทดลองเป็นดังรูป

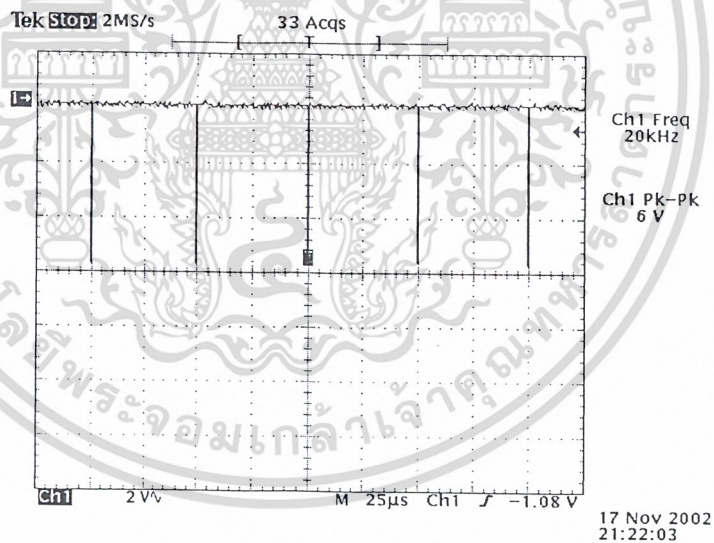
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.55 สัญญาณจากคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 10.24 เมกะเฮิรตซ์ (ขา 26) ของ MC145152

- สัญญาณล็อกคิทเทก (Lock Detect : LD)

หากความถี่ในวงจรตั้งคราะห์ความถี่ถูกล็อกความถี่แล้ว สัญญาณที่ได้จากขาล็อกคิทเทก (ขาที่ 28) ของ MC145152 แสดงดังรูปที่

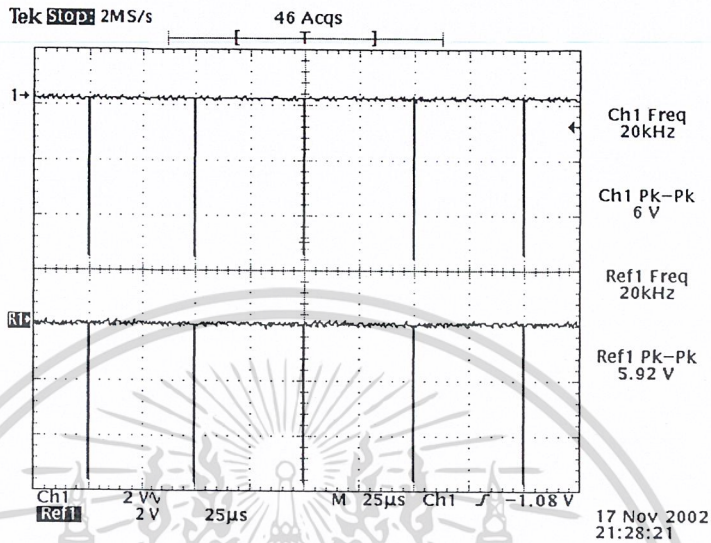


รูปที่ 4.56 สัญญาณที่ได้จากขา Lock Detect (ขาที่ 28) ของ MC145152

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V

สัญญาณ ϕ_R และ ϕ_V ใช้ในการเปลี่ยนแปลงความถี่ขึ้นหรือลง หากวงจร
สังเคราะห์ความถี่ล็อกความถี่แล้วจะได้รูปสัญญาณดังรูป



รูปที่ 4.57 สัญญาณที่ขา ϕ_R (ขาที่ 7), ϕ_V (ขาที่ 8) ของ MC145152

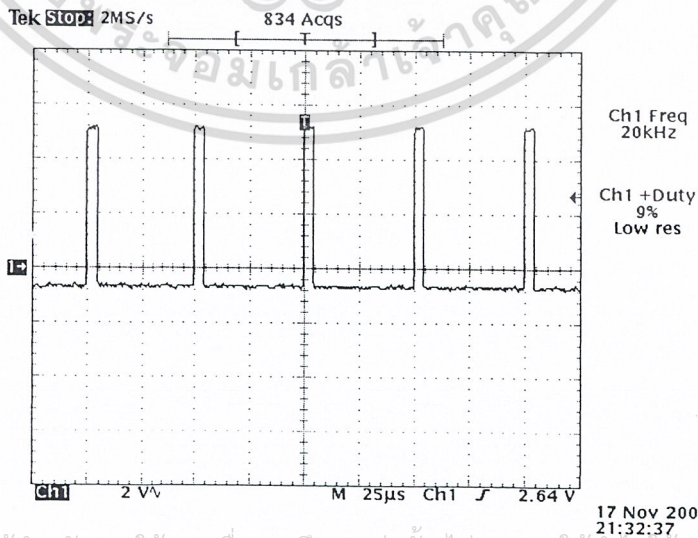
Ch1 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_R

Ch2 : สัญญาณที่ได้จากขา ϕ_V

- สัญญาณโมดูลัสคอนโทรล (Modulus Controlled : MC)

สัญญาณ โมดูลัสคอนโทรลใช้ควบคุมการหารของพริสคัลเลอรั (duty cycle) ที่ได้จะมีความสัมพันธ์กับการตั้งหารที่ขา $A_0 - A_5$ และ $N_0 - N_9$ สัญญาณที่ได้จาก โมดูลัสคอนโทรลแสดงดังรูป

โดยดิวิตซ์ไซเคิล



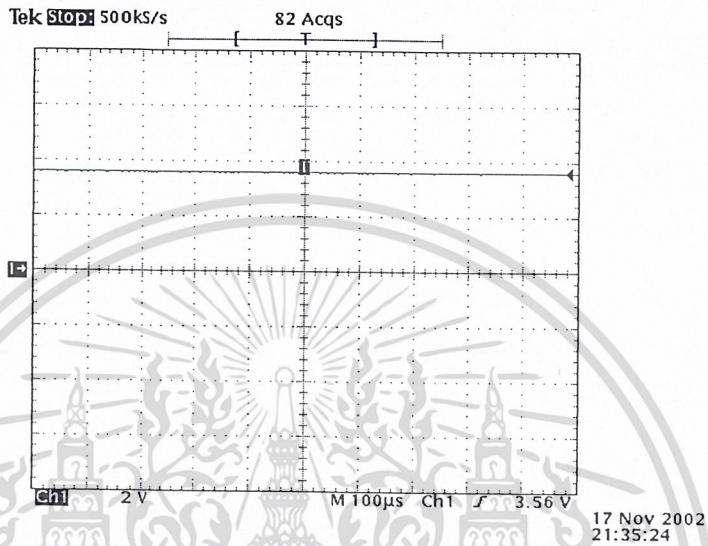
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

รูปที่ 4.58 สัญญาณที่ได้จากขา MC (ขาที่ 9) ของ MC145152

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกสิ่งที่ไม่ได้เห็นคือรูปคลื่นภายในแต่ละตอปวงจรมีของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.22.4 ผลการทดลองจากวงจรรูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

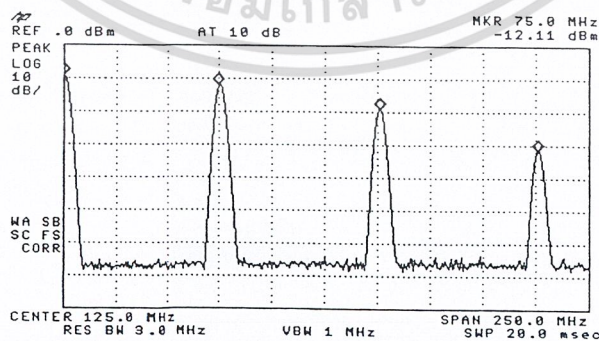
นำสัญญาณจากขา ϕ_R (ขาที่ 7) และ ϕ_V (ขาที่ 8) ของไอซี MC145152 ป้อนอินพุตให้กับ วงจรรูปฟิลเตอร์เพื่อกรองเอาแต่ส่วนที่เป็นไฟตรง ซึ่งใช้เป็นแรงดันควบคุมป้อนกลับไปยังวงจรกำเนิด สัญญาณแบบปรับค่าความถี่ได้ตามแรงดันไฟฟ้า เอาต์พุตที่ได้จากวงจรรูปฟิลเตอร์แสดงดังรูปที่



รูปที่ 4.59 ระดับแรงดันไฟตรงที่ได้จากลูปฟิลเตอร์ที่ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

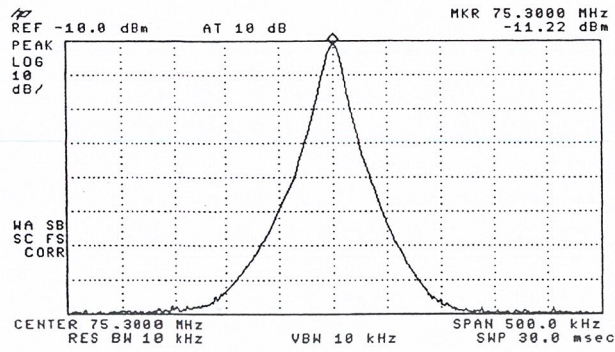
4.22.5 ผลการทดลองวงจรรวมของการสังเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์

สเปกตรัมของสัญญาณความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์หลังจากล๊อคความถี่แล้วได้ผลเมื่อวัดด้วย สเปกตรัมอนาลิเซอร์เป็นดังรูปที่ 4.60 ฮาร์โมนิกที่ 1 (ความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์) ฮาร์โมนิกที่ 2 (ความถี่ 150.6 เมกะเฮิร์ตซ์) และฮาร์โมนิกที่ 3 (ความถี่ 225.9 เมกะเฮิร์ตซ์) มีขนาดดังรูปที่ 4.61



รูปที่ 4.60 สเปกตรัมแสดงฮาร์โมนิกของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรสังเคราะห์ความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานวิชาการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



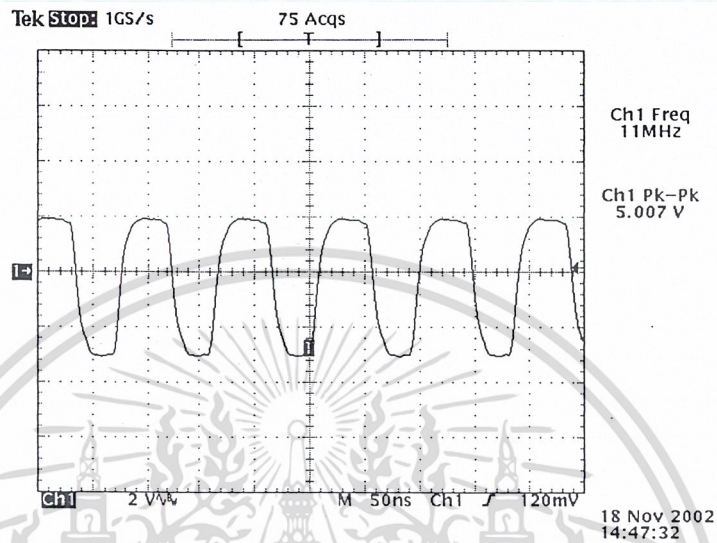
รูปที่ 4.61 สเปกตรัมของสัญญาณจากวงจรส่งเคราะห์ความถี่ที่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.23 ผลการทดลองวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ความถี่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์

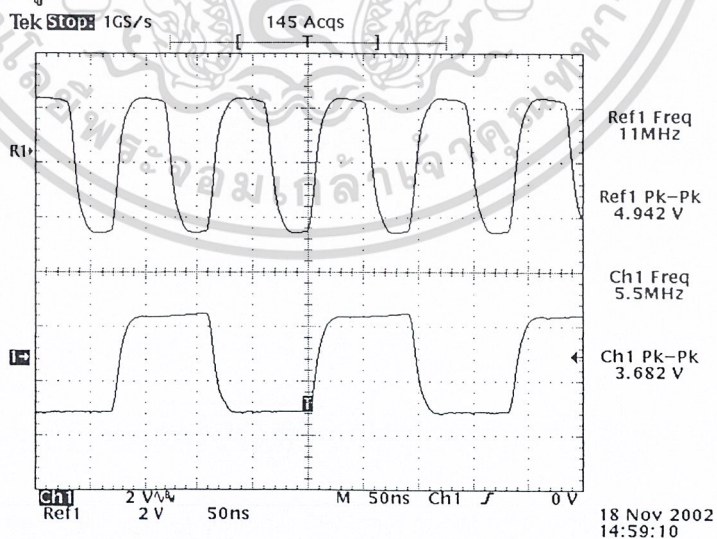
วงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ใช้คริสตอลความถี่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์เป็นตัวกำหนดค่าความถี่ร่วมกับการทำงานของอินเวอร์เตอร์ซีมอส (CMOS) เบอร์ 74HC04 ได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.62 แสดงรูปสัญญาณและความถี่ที่ได้จากวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ที่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์

4.24 ผลการทดลองของวงจรหารสอง

จากวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์เราต้องการสัญญาณที่มีความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์เราจึงต้องนำผ่านวงจรหารสองซึ่งได้ผลดังรูป

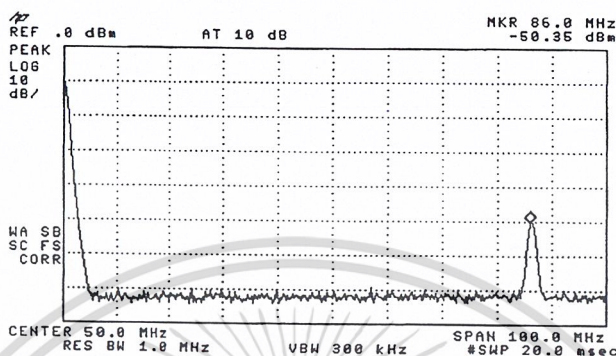


รูปที่ 4.63 แสดงผลที่ได้จากวงจรหารสอง

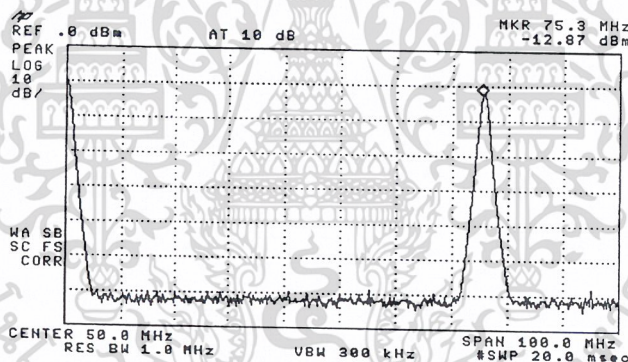
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่...
 CH1:สัญญาณอินพุตที่ได้จากวงจรคริสตอลออสซิลเลเตอร์ที่ 11 เมกะเฮิร์ตซ์
 CH2:สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรหารสอง

4.25 ผลการทดลองของวงจรมิกซ์เซอร์

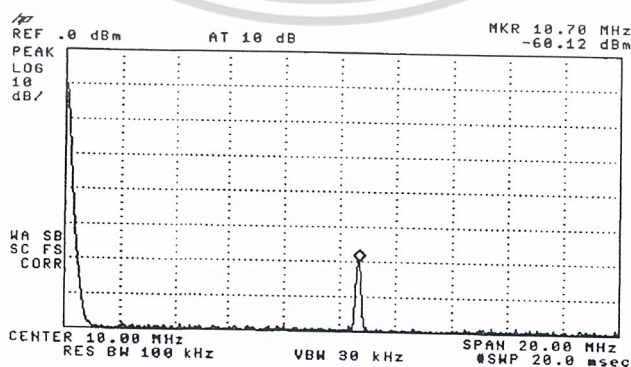
วงจรมิกซ์เซอร์ทำหน้าที่ลดความถี่จาก 86 เมกะเฮิร์ตซ์มาเป็นความถี่ที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (ความถี่กลาง) ได้ผลการทดลองดังรูป



รูปที่ 4.64 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 86 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)

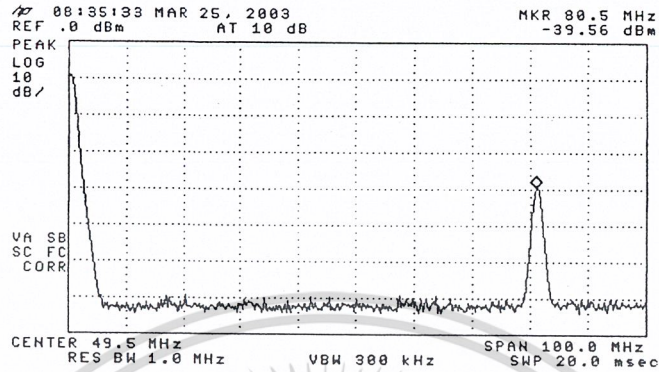


รูปที่ 4.65 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)

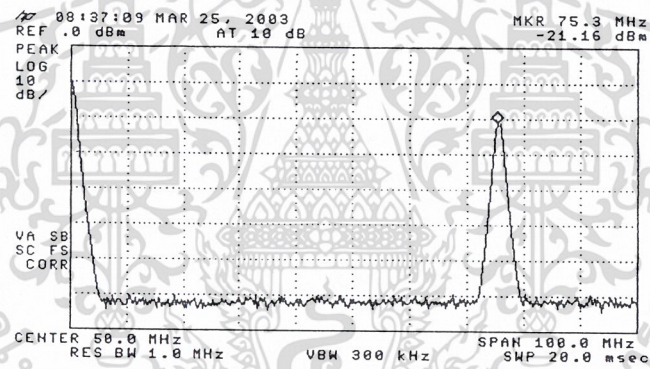


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.66 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกซ์เซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

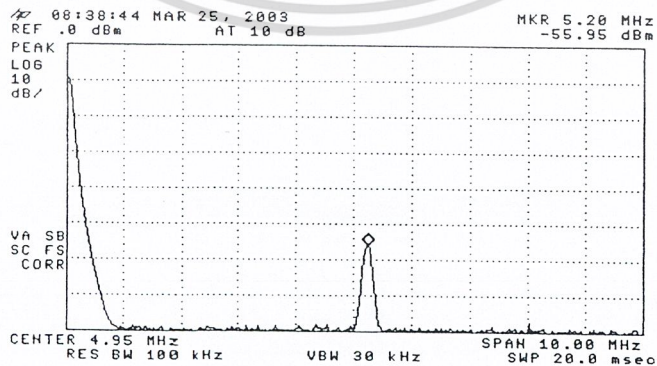
วงจรมิกเซอร์ทำหน้าที่เพิ่มความถี่จาก 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์มาเป็นความถี่ที่ 5.2 เมกะเฮิร์ตซ์ (ความถี่กลาง) ได้ผลการทดลองดังรูป



รูปที่ 4.67 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 80.5 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)

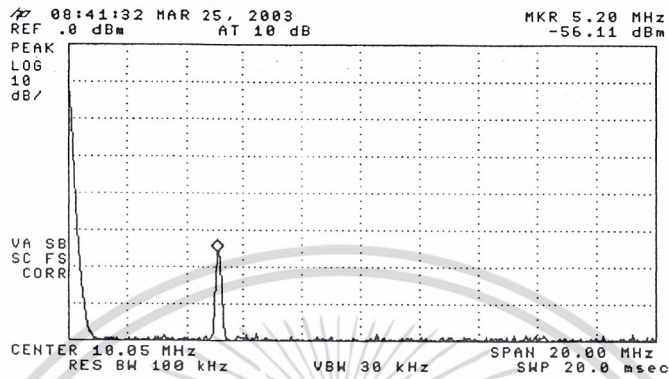


รูปที่ 4.68 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 75.3 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)

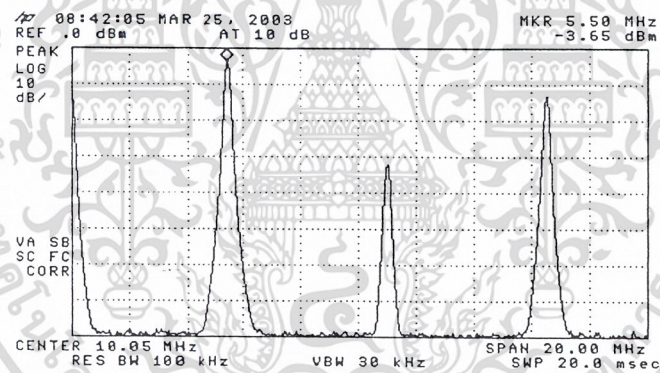


เอกสารนี้รูปที่ 4.69 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB) ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

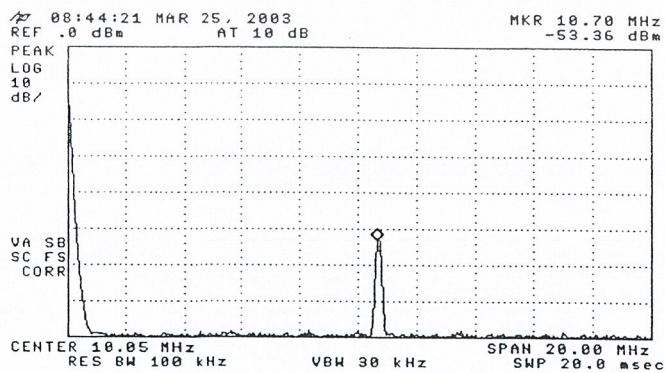
วงจรมิกเซอร์ทำหน้าที่เพิ่มความถี่จาก 5.2 เมกะเฮิร์ตซ์มาเป็นความถี่ที่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์ (ความถี่กลาง) ได้ผลการทดลองดังรูป



รูปที่ 4.70 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 5.2 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)



รูปที่ 4.71 สเปกตรัมของสัญญาณวิทยุความถี่ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

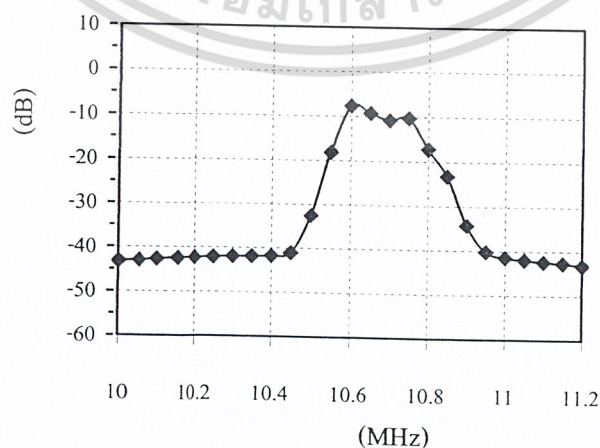
รูปที่ 4.72 สเปกตรัมของสัญญาณเอาต์พุตที่ได้จากวงจรมิกเซอร์ (มีการลดทอนภายนอก 20 dB) นำไปใช้

4.26 ผลการทดลองของวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์

ผลการวัดการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่โดยใช้เซรามิกซ์ฟิลเตอร์แสดงได้ดังต่อไปนี้

ความถี่ (MHz)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)	อัตราขยาย (dB)
10	-63.21	-43.21	10.65	-29.32	-9.32
10.05	-62.97	-42.97	10.7	-30.87	-10.87
10.1	-62.67	-42.67	10.75	-30.34	-10.34
10.15	-62.43	-42.43	10.8	-37.2	-17.2
10.2	-62.29	-42.29	10.85	-43.19	-23.19
10.25	-62.1	-42.1	10.9	-54.29	-34.29
10.3	-61.98	-41.98	10.95	-60.17	-40.17
10.35	-61.89	-41.89	11	-61.46	-41.46
10.4	-61.76	-41.76	11.05	-61.98	-41.98
10.45	-61.03	-41.03	11.1	-62.41	-42.41
10.5	-52.49	-32.49	11.15	-62.69	-42.69
10.55	-38.14	-18.14	11.2	-63.21	-43.21
10.6	-27.68	-7.68			

ตารางที่ 4.17 ผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์

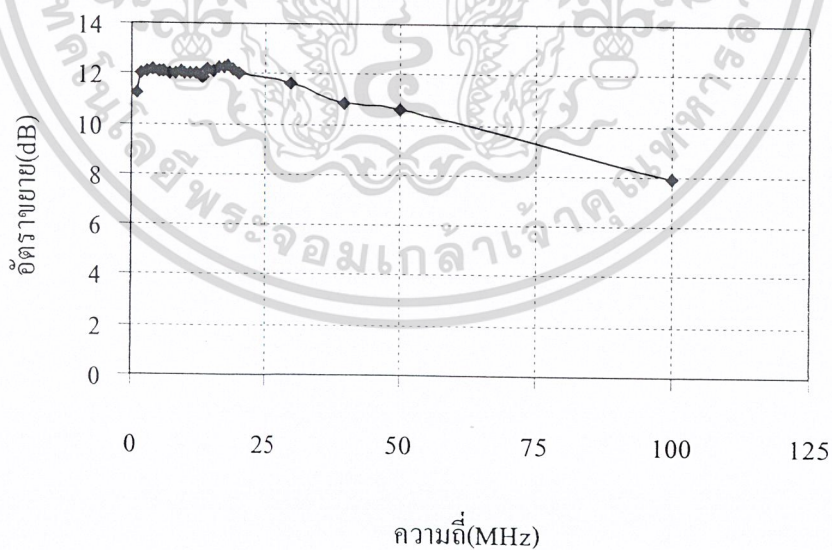


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 รูปที่ 4.73 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองแถบความถี่ 10.7 เมกะเฮิร์ตซ์
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงชื่อเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.27 ผลการทดลองของวงจรรขยายความถี่กลาง

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
1	11.2	9	12.09	17	12.29
2	12.02	10	12.06	18	12.32
3	12.11	11	11.99	19	12.21
4	12.16	12	12.02	20	12.05
5	12.11	13	11.83	30	11.59
6	12.09	14	12.19	40	10.85
7	12.04	15	12.11	50	10.59
8	12.02	16	12.29	100	7.92

ตารางที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยายที่ได้จากวงจรรขยายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm



รูปที่ 4.74 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และอัตราขยาย

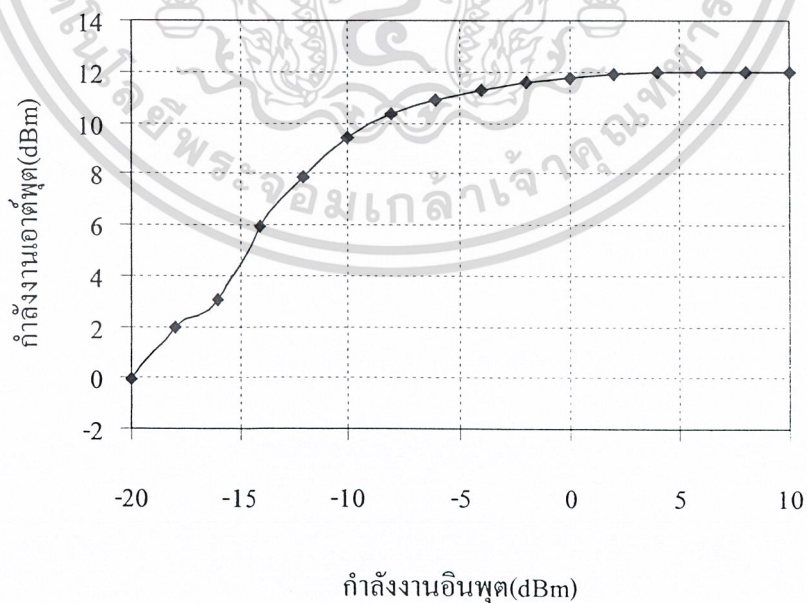
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ที่ได้อำจวงจรรขยายความถี่กลางเมื่อสัญญาณอินพุตมีขนาด 0 dBm

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำลังงานอินพุต (dBm)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)	กำลังงานอินพุต (dBm)	กำลังงานเอาต์พุต (dBm)
-20	-0.02	-4	11.30
-18	1.98	-2	11.58
-16	3.03	0	11.76
-14	5.90	2	11.88
-12	7.83	4	11.97
-10	9.44	6	12.00
-8	10.34	8	12.00
-6	10.93	10	11.95

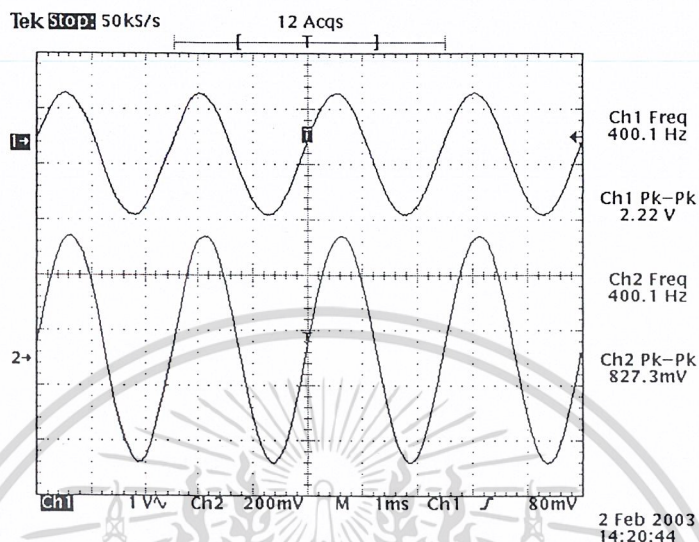
ตารางที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ที่ได้จากวงจรขยายความถี่กลางที่ความถี่ 10.7 MHz



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่
รูปที่ 4.75 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกำลังงานอินพุตและกำลังงานเอาต์พุต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่ข้อมูลใดๆ
ที่ได้ออกจากรายการความถี่กลางที่ความถี่ 10.7 MHz

4.28 ผลการทดลองวงจรเอฟเอ็มดีมอดูเลเตอร์

ผลการทดลองเมื่อป้อนความถี่กลางที่มอดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์ แสดงได้ดังต่อไปนี้

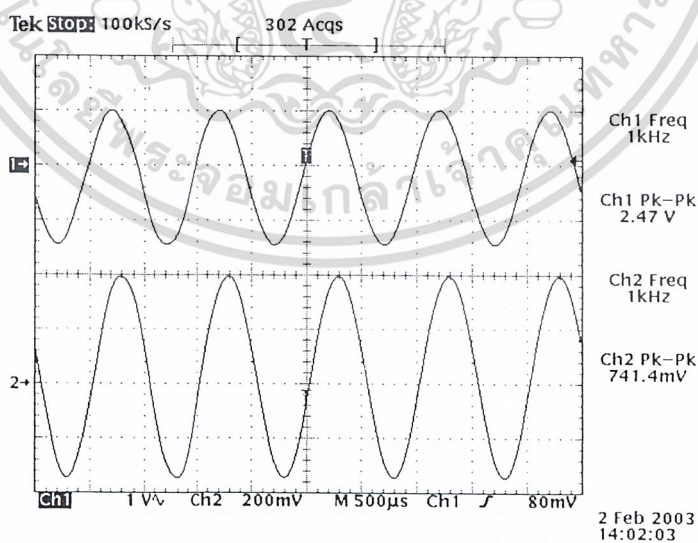


รูปที่ 4.76 สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมอดูเลตและสัญญาณที่คีมอดูเลต

Ch1:สัญญาณที่ผ่านการคีมอดูเลต

Ch2:สัญญาณความถี่ 400 เฮิรตซ์ที่นำมอดูเลต

ผลการทดลองเมื่อป้อนความถี่กลางที่มอดูเลตด้วยสัญญาณความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ แสดงได้ดังต่อไปนี้



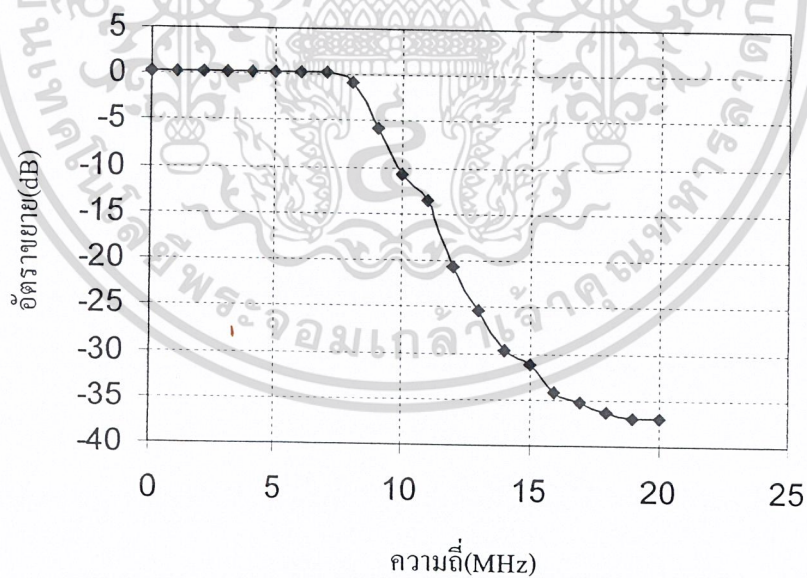
รูปที่ 4.77 สัญญาณที่เปรียบเทียบระหว่างสัญญาณที่นำมอดูเลตและสัญญาณที่คีมอดูเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ Ch1:สัญญาณที่ผ่านการคีมอดูเลตก่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ Ch2:สัญญาณความถี่ 1 กิโลเฮิรตซ์ที่นำมอดูเลตทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.29 ผลการทดลองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทชนิดแอกทีฟ อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)	ความถี่ (MHz)	อัตราขยาย (dB)
0	0.332	7	0.185	14	-29.658
1	0.332	8	-0.756	15	-31.265
2	0.332	9	-5.692	16	-34.256
3	0.332	10	-10.685	17	-35.158
4	0.332	11	-13.569	18	-36.253
5	0.332	12	-20.689	19	-36.987
6	0.351	13	-25.268	20	-37.012

ตารางที่ 4.20 ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

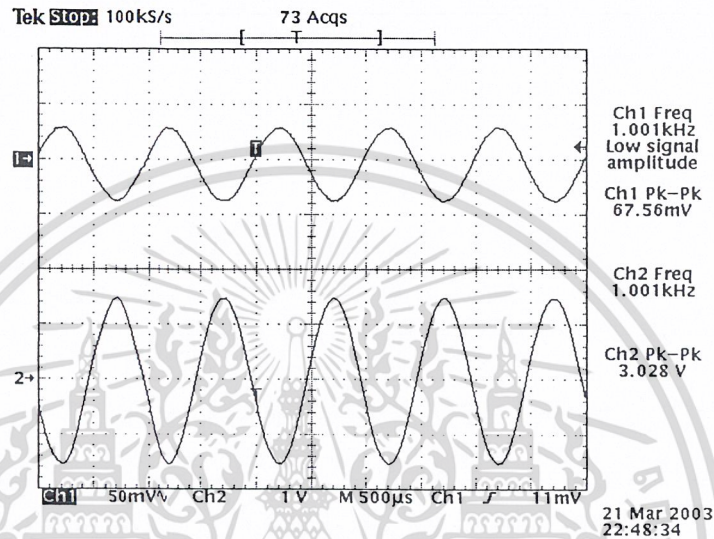


รูปที่ 4.78 กราฟผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ท อันดับที่ 8 ความถี่คัทออฟเท่ากับ 10 กิโลเฮิรตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.30 ผลการทดลองของวงจรขยายสัญญาณเสียง

วงจรขยายสัญญาณเสียงทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงที่ทำการคิมอดได้จากวงจรคิมอดเอฟเอ็ม ทำให้ขนาดแรงดันของสัญญาณสูงขึ้นก่อนที่จะทำการส่งผ่านลำโพง จากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเสียงนี้สามารถปรับอัตราขยายแรงดันได้ โดยมีอัตราขยายแรงดันได้สูงสุด 50 เท่า ผลการทดลองแสดงได้ดังรูป



รูปที่ 4.79 เปรียบเทียบสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง

Ch1: สัญญาณอินพุตความถี่ 1 กิโลเฮิร์ตซ์

Ch2: สัญญาณเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

บทสรุปและวิจารณ์

โครงการนี้เป็นารออกแบบและสร้างเครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐาน เครื่องประชุมไร้สายชุดนี้จะประกอบไปด้วย เครื่องแม่ และเครื่องลูกข่าย ซึ่งเครื่องแม่จะสามารถควบคุมการปิดเปิดของเครื่องลูกข่ายแต่ละตัวได้ โดยอุปกรณ์ชุดนี้ใช้เทคนิคการมอดูเลตแบบเอฟเอ็ม ซึ่งใช้ย่านความถี่วีเอชเอฟ (VHF) ซึ่งในการทำโครงการนี้ได้พบปัญหาต่างๆ ได้แก่ วงจรส่งเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกลูป เพราะการคำนวณหาค่าต่างๆ ยุ่งยากเล็กน้อย และสัญญาณที่ได้จากวงจรส่งเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกลูปมักจะมีสัญญาณรบกวนปะปนออกมาด้วย ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้เล็กน้อยโดยการกราวด์ดิ้ง (Grounding) นอกจากนี้ปัญหาจากสัญญาณรบกวนแล้วยังพบปัญหาเกี่ยวกับตัวอุปกรณ์ด้วย เช่น ขดลวด ไม่สามารถพันได้ตามค่าที่ต้องการจากการคำนวณ เพราะขาดเครื่องมือวัดค่าที่แม่นยำ ส่วนเครื่องมือที่มีอยู่ก็มีวิธีใช้งานที่ค่อนข้างยุ่งยาก ปัญหาที่มักจะมีอีกปัญหาหนึ่งในการสร้างวงจรส่งเคราะห์ความถี่โดยใช้เฟสล็อกลูปก็คือ สัญญาณที่ได้มักจะมีความถี่ผิดพลาดจากที่ต้องการเล็กน้อย เราต้องทำการปรับปรุงตัววงจรบางอย่างเพื่อที่จะกำจัดปัญหานี้ วงจรอีกวงจรที่มักจะมีปัญหาในการสร้างก็คือ วงจรกรองความถี่ ซึ่งสามารถกรองความถี่ที่เราต้องการได้แต่ก็มักจะมีผลต่อการลดทอน และไม่ได้แบนด์วิดท์ที่เราคำนวณมา ซึ่งสาเหตุเกิดมาจากค่าคาปาซิแตนซ์และค่าอินดักแตนซ์ที่นำมาใช้กับค่าที่คำนวณมาได้ไม่ตรงกัน แต่ผลที่ได้ก็พอยอมรับได้ ซึ่งวิธีการแก้ปัญหานี้ทำได้โดยพยายามเลือกใช้ค่าให้ใกล้เคียงกับที่คำนวณมากที่สุด

สรุปคุณสมบัติของเครื่องประชุมไร้สายแบบพื้นฐานได้ดังนี้

- กำลังส่งของตัวแม่และตัวลูกมีค่าประมาณ 10 มิลลิวัตต์
- Bit rate ในการส่งข้อมูลควบคุมมีค่าเท่ากับ 1,200 บิต/วินาที
- Band width ที่ใช้ในการสื่อสารข้อมูลเสียงและสัญญาณควบคุมของเครื่องแม่และลูกมีค่าประมาณ 200 กิโลเฮิรตซ์
- Sensitivity ของลำโพงมีค่า ≤ -60 dBm และ Sensitivity ของตัวลูกมีค่าเท่ากับ -70 dBm
- ตัวแม่ กินกระแสไฟประมาณ 120 มิลลิแอมป์
- ตัวลูกกินกระแสไฟประมาณ 140 มิลลิแอมป์
- และลำโพงกินกระแสไฟประมาณ 190 มิลลิแอมป์
- ส่งได้ไกลประมาณ 10 เมตร

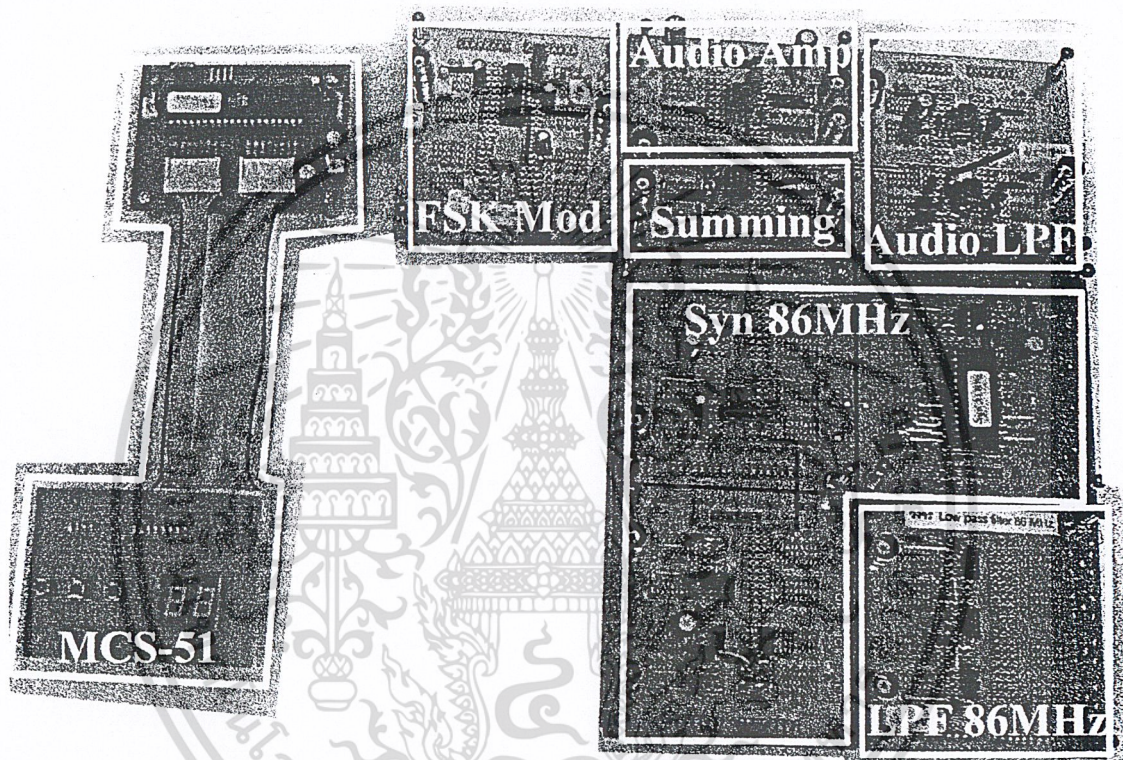
ในการทำโครงการในครั้งนี้ทำให้ผู้จัดทำได้มีประสบการณ์ในการนำทฤษฎีที่เรียนมา มาปฏิบัติและทำการทดลองจริง เพื่อให้ได้รู้ปัญหาและวิธีการแก้ไข ในที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



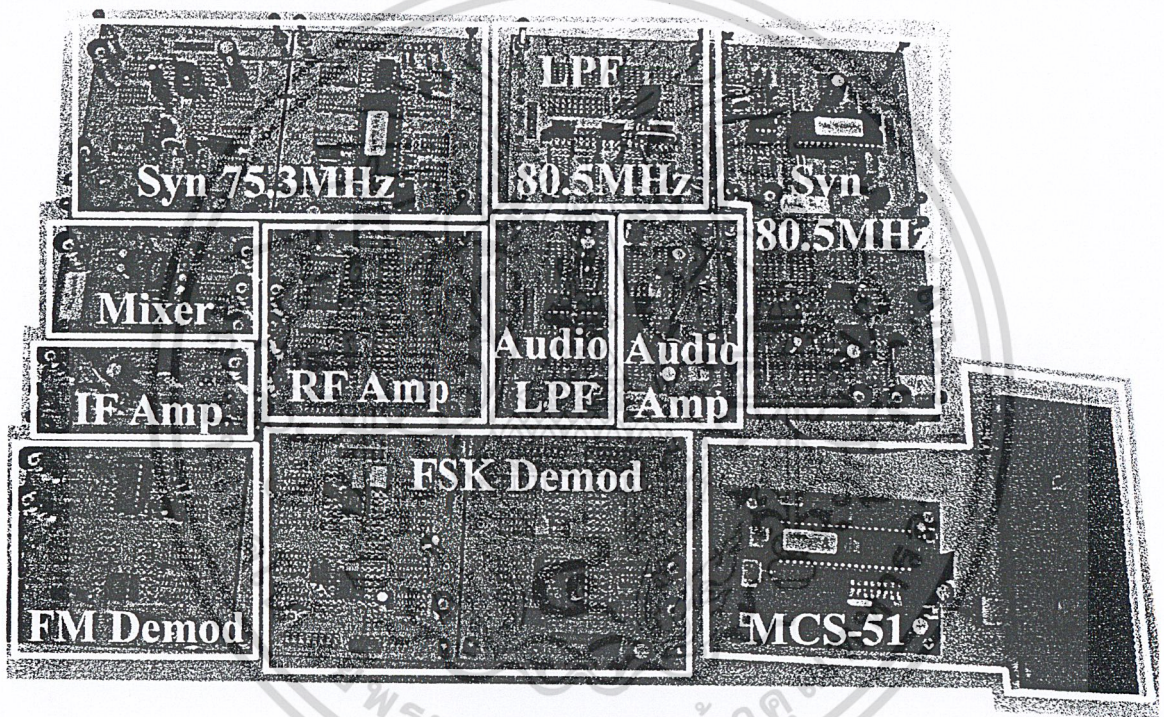
ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



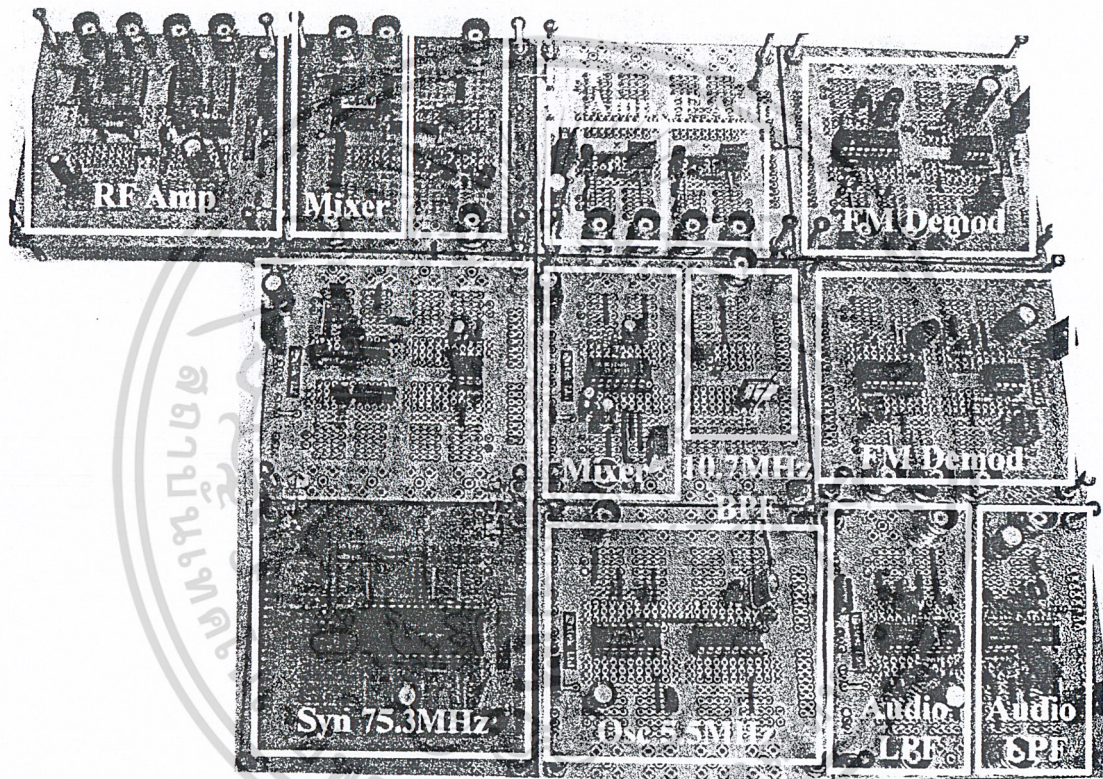
รูปวงจรตัวแม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปวงจรตัวถูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปวงจรถ้าโพง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

1:          ORG          0000H
2:          LJMP        MAIN1
3:          ORG          0013H
4:          LJMP        SAND_TX
5:  MAIN1:    MOV         PCON,#000H
6:          MOV         SCON,#040H
7:          MOV         TMOD,#020H
8:          MOV         TH1,#0E8H
9:          MOV         IE,#84H
10:         SETB        IT1
11:         SETB        TR1
12:         MOV         P2,#0BFH
13:         MOV         P0,#0FDH
14:         MOV         R2,#00H
15:  MAIN:    JB          P3.5,MAIN
16:         LCALL       DELAY
17:         JNB         P3.5,MAIN
18:         INC         R2
19:         LJMP        DISPLAY
20:  DISPLAY:  CJNE       R2,#003H,DISPLAY_0
21:         MOV         R2,#00H
22:  DISPLAY_0 CJNE       R2,#000H,DISPLAY_1
23:         MOV         P2,#0BFH
24:         LJMP        MAIN
25:  DISPLAY_1 CJNE       R2,#001H,DISPLAY_2
26:         MOV         P2,#00EH
27:         LJMP        MAIN
28:  DISPLAY_2 CJNE       R2,#002H,DISPLAY_0
29:         MOV         P2,#077H
30:         LJMP        MAIN
31:
32:  SAND_TX:  MOV         R5,#003H
33:  CLOSS_ALL: MOV        SBUF,#00110011B
34:         LCALL       WAIT
35:         LCALL       DELAY
36:         DJNZ        R5,CLOSS_ALL
37:
38:  SAND_0_OPEN: CJNE      R2,#000H,SAND_1_OPEN
39:         MOV         R4,#003H
40:         MOV         P0,#0FDH
41:  THREE_TIME_0: MOV        SBUF,#00110011B
42:         LCALL       WAIT
43:         LCALL       DELAY
44:         DJNZ        R4,THREE_TIME_0
45:         MOV         P2,#0BFH
46:         MOV         R2,#00H
47:         RETI
48:
49:  SAND_1_OPEN: CJNE      R2,#001H,SAND_2_OPEN
50:         MOV         R4,#003H
51:         MOV         P0,#070H
52:  THREE_TIME_1: MOV        SBUF,#11001100B
53:         LCALL       WAIT
54:         LCALL       DELAY
55:         DJNZ        R4,THREE_TIME_1
56:         MOV         P2,#0BFH
57:         MOV         R2,#00H
58:         RETI
59:
60:  SAND_2_OPEN: CJNE      R2,#002H,SAND_0_OPEN
61:         MOV         R4,#003H
62:         MOV         P0,#0EEH
63:  THREE_TIME_2: MOV        SBUF,#11001001B
64:         LCALL       WAIT
65:         LCALL       DELAY

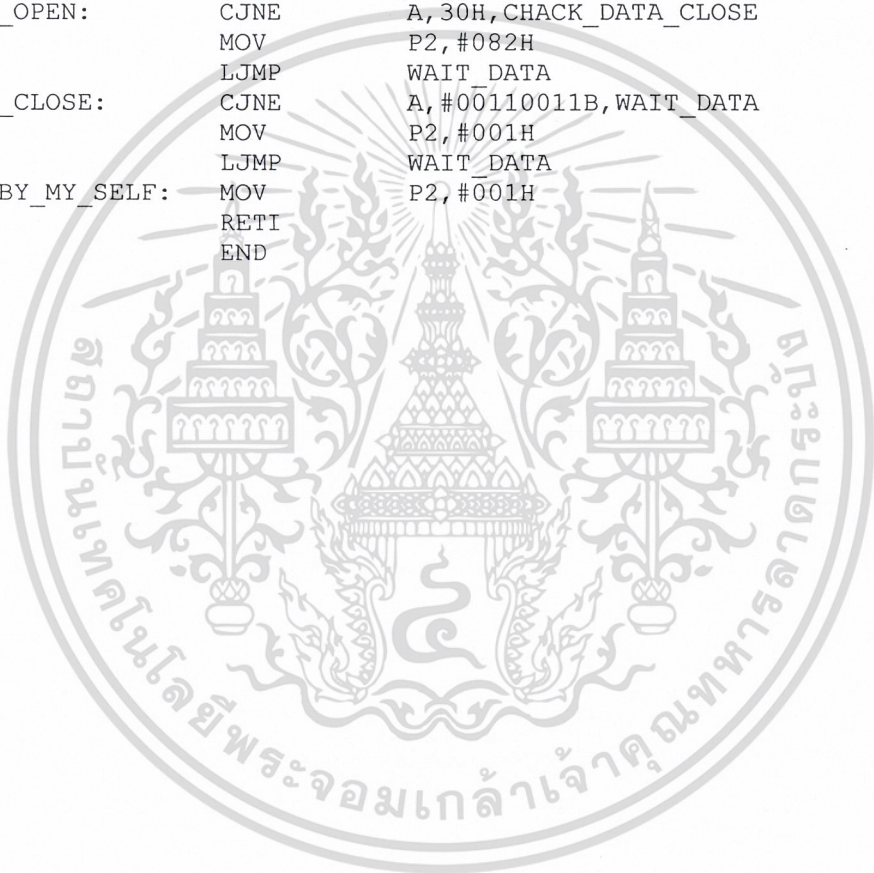
```

```
66:          DJNZ      R4, THREE_TIME_2
67:          MOV       P2, #0BFH
68:          MOV       R2, #000H
69:          RETI
70: WAIT:    JNB       TI, WAIT
71:          CLR       TI
72:          RET
73: DELAY:   MOV       R1, #00AH
74: CO:      MOV       R6, #000H
75: CO1:    DJNZ      R6, CO1
76:          DJNZ      R1, CO
77:          RET
78:
79:          END
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
1:          ORG          0000H
2:          LJMP        MAIN
3:          ORG          0013H
4:          LJMP        CLOSE_ALL_BY_MY_SELF
5:  MAIN:    MOV          PCON,#000H
6:          MOV          SCON,#050H
7:          MOV          TMOD,#020H
8:          MOV          TH1,#0E8H
9:          MOV          IE,#084H
10:         SETB        TR1
11:         SETB        IT1
12:         MOV          P2,#001H
13:         MOV          30H,P1
14:  WAIT_DATA: JNB        RI,WAIT_DATA
15:         CLR          RI
16:         MOV          A,SBUF
17:         LJMP        CHACK_DATA_OPEN
18:  CHACK_DATA_OPEN: CJNE        A,30H,CHACK_DATA_CLOSE
19:         MOV          P2,#082H
20:         LJMP        WAIT_DATA
21:  CHACK_DATA_CLOSE: CJNE        A,#00110011B,WAIT_DATA
22:         MOV          P2,#001H
23:         LJMP        WAIT_DATA
24:  CLOSE_ALL_BY_MY_SELF: MOV        P2,#001H
25:         RETI
26:         END
27:
28:
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สามารถทำได้ด้วยคำปรึกษาและแนะนำให้ความช่วยเหลือของ
ดร.ทองทศ วานิชศรี อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ และบุคคลอื่นที่มีได้กล่าวถึงในที่นี้

จึงขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนังสืออ้างอิง

1. L.W. Couch. “ Digital and Analog Communication Systems”, : Macmillan Publishing Company, 1987.
2. J. Bignell and R. Donovan. “Digital Electronics”, New York :Delmar Pubishers Inc.,1994
3. C. Bowick. “RF Circuit Design”, Carmel: Howard W. Sam & Company, 1982
4. วิวัฒน์ กิรานนท์ “วิศวกรรมการสื่อสาร”, อักษรสยามการพิมพ์ , 2540



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้