

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

**ระบบสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าบ้าน**

**AC POWER LINE COMMUNICATION SYSTEM**



๒๗.  
๑/๘๒๖  
๒๕๕๐

เลขหาง.....  
เลขทะเบียน..... 82176  
วัน,เดือน,ปี..... 9 ก.ค. 2551

ปริญญาโทสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

๑๑๙๔๖๐๘๔  
.b.....  
.f.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ระบบสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าบ้าน

## AC POWER LINE COMMUNICATION SYSTEM



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง ระบบสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าบ้าน (AC power line communication system)

ผู้จัดทำ

1. นาย วรกิจ นามวิชัย รหัส 48015266
2. นาย อนุสรณ์ กุลเพิ่มทวีรัชต์ รหัส 48015279



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# ระบบสื่อสารผ่านสายไฟบ้าน

นาย วรกิจ นามวิชัย รหัส 48015266  
 นาย อนุสรณ์ กุลเพิ่มทวีรัชต์ รหัส 48015279  
 ผศ. ประภากร สุวรรณะ (อาจารย์ที่ปรึกษา)  
 ปีการศึกษา 2550

## บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรออกแบบและศึกษาการส่งข้อมูลผ่านสายไฟบ้าน เพื่อใช้ในการสื่อสารกันระหว่างตัวอุปกรณ์ภายในที่พักอาศัย ซึ่งประกอบไปด้วยตัวรับข้อมูล และตัวส่งข้อมูล โดยมีหลักการทำงานคือ ข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างตัวอุปกรณ์จะเป็นสัญญาณเสียงแบบสเตอริโอ อาศัยการรับส่งสัญญาณโดยมีการมอดูเลตแบบเอฟเอ็มที่ความถี่ 23.5 MHz ถึง 24.7 MHz ถูกแบ่งออกเป็น 7 ช่องสัญญาณ มีไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นตัวควบคุมเพื่อเลือกช่องสัญญาณทั้งภาครับและภาคส่ง การรับส่งข้อมูลเป็นแบบทิศทางเดียว วงจรในภาครับใช้หลักการทำงานเหมือนเครื่องรับวิทยุเอฟเอ็มระบบสเตอริโอมัลติเพล็กซ์ทั่วไป ซึ่งประกอบด้วยภาคอาร์เอฟแอมพลิฟลายเออร์ มิกเซอร์ โคลออลออสซิลเลเตอร์ และเอฟเอ็มมัลติเพล็กซ์สเตอริโอคิมอดคูเลเตอร์ ส่วนหลักการทำงานของภาคส่งนั้นจะใช้วงจรเข้ารหัสสัญญาณสเตอริโอมัลติเพล็กซ์ เพื่อสร้างสัญญาณข้อมูลขึ้นมา จากนั้นจึงนำไปมอดูเลตกับสัญญาณคลื่นพาห์ และใช้ภาคขยายสัญญาณทำการขยายสัญญาณก่อนที่จะส่งผ่านไปยังสายไฟบ้าน 1 เฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## AC Power Line communication systems

Mr.Worakit Namwichai ID.48015266

Mr.Anusorn Kunpermtaweerat ID.48015279

Assist.Prof.Prapakorn Suwanna Advisor

Education year 2007

### Abstract

This project presents a design and study in sending data pass through the AC power line for communication between transmitter and receiver devices in residence. The data that use are the stereo sound signals and transfer to AC power line by FM modulation at radiofrequency range 23.5 MHz – 24.7 MHz in 7 channels. The channels of transmitter and receiver are all controlled by Microcontroller devices with simplex communication. The receiver device uses a principle like a common FM Stereo Multiplex Radio. It consists of RF amplifier, Mixer, Local Oscillator and FM multiplex stereo demodulator. At transmitter part that uses stereo multiplex signal encoder circuits for build data signal. Thereafter then modulate it with carrier signal and the last, this radiofrequency will be increased by power amplifier circuit again before transfer to 1 Phase AC power line.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ทั้งนี้เพราะได้รับความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่าน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผศ. ประภากร สุวรรณะ (อาจารย์ที่ปรึกษา) ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเกี่ยวกับเทคนิคต่างๆ ในการต่อวงจรในโครงการระบบสื่อสารผ่านสายไฟฟ้าภายในบ้าน อีกทั้งเพื่อนๆ ทุกคนที่ช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน และให้คำปรึกษาเป็นอย่างดีมาโดยตลอด จนทำให้โครงการนี้สำเร็จโดยสมบูรณ์ อีกทั้งยังได้รับความรู้ ประสบการณ์ และเทคนิคใหม่ๆ ในการต่อวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้นอย่างมาก

จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

นายอนุสรณ์ กุลเพิ่มทวีรัชต์  
นายวรกิจ นามวิชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อไทย	I
บทคัดย่ออังกฤษ	II
สารบัญ	III
สารบัญรูป	V
สารบัญตาราง	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์โครงการ	1
1.2 ขอบเขตของโครงการ	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์	2
2.1 ระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Communication Systems)	2
2.2 แถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	4
2.3 รูปแบบของการสื่อสาร	5
2.4 การมอดคูเลชัน และการดีมอดคูเลชัน	6
2.4.1 การมอดคูเลชัน	6
2.4.1.1 การมอดคูเลชันเชิงขนาด (Amplitude Modulation:AM)	6
2.4.1.2 การมอดคูเลชันเชิงมุม (Angular Modulation)	7
2.4.2 การดีมอดคูเลชันหรือการดีเทกท์	8
2.5 ดัชนีการผสมคลื่น (Modulation Index)	9
2.6 ไซด์แบนด์วิททู FM (FM Side Bands)	10
บทที่ 3 วงจรเฟสล็อกคูลูป	12
3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเฟสล็อกคูลูป	12
3.2 การพิจารณาสถานะชั่วขณะของเฟสล็อกคูลูปในสภาวะล็อก	15
3.3 เสถียรภาพของเฟสล็อกคูลูปแบบพื้นฐาน	17
บทที่ 4 เครื่องรับส่งวิทยุ	23
4.1 เครื่องส่งวิทยุ FM (FREQUENCY MODULATION TRANSMITTER)	23
4.1.1 เครื่องส่งแบบ FM โดยตรง (Direct FM.)	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
4.1.2 เครื่องส่งแบบ FM โดยอ้อม (Indirect FM.)	24
4.2 เครื่องรับวิทยุซูเปอร์เฮเทอไดน์ (SUPERHETERODYNE RECIEVER)	25
4.3 Phase shift or Quadrature detector	28
4.4 ระบบ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	29
4.4.1 เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ ( FM Stereo Multiplex Transmitter )	30
4.4.2 เครื่องรับ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์	32
4.5 มัลติเพล็กซ์เซอร์ (MULTIPLEXER)	33
4.5.1 หลักการของการ Multiplexing	34
บทที่ 5 การออกแบบและการสร้าง	36
5.1 การออกแบบและสร้างภาครับ	36
5.1.1 การออกแบบเฟสล็อกคูลูปในการหารค่า R และ N ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	36
5.1.2 การทดลองในส่วนของ Voltage Control Oscillator (VCO)	40
5.1.3 การออกแบบ Low Pass Filter	42
5.1.4 ผลการทดลองภาค Demultiplexer และภาครับโดยรวมทั้งหมด	42
5.2 การออกแบบและสร้างภาคส่ง	47
5.2.1 การทดลองส่วนของ Voltage Control Oscillator (VCO)	47
5.2.2 การออกแบบเฟสล็อกคูลูปในการหารค่า R และ N ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์	48
5.2.3 การออกแบบ Low Pass Filter	52
5.2.4 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ Stereo Multiplex	52
5.2.5 การออกแบบ Isolate Transformer	53
5.2.6 ผลการทดลองในส่วนของภาคส่ง	54
5.3 สรุปผลของโครงการ	55

ภาคผนวก

กิตติกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

บทที่ 2	รูปที่ 2.1	บล็อกไดอะแกรมของระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์	2
	รูปที่ 2.2	รูปแบบการสื่อสารตามทิศทาง	6
	รูปที่ 2.3	AM Modulated wave	7
	รูปที่ 2.4	สเปกตรัมความถี่ของวิทยุ FM ประกอบด้วยความถี่พาหะและไซด์แบนด์	11
บทที่ 3	รูปที่ 3.1	การเข้าสู่สภาวะล็อกของเฟสล็อกคูลูป	13
	รูปที่ 3.2	รูปคลื่นสัญญาณของเฟสล็อกคูลูปในสภาวะล็อก	14
	รูปที่ 3.3	ผลการตอบสนองของเฟสล็อกคูลูปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่อินพุต	16
	รูปที่ 3.4	ผลตอบสนองของเฟสล็อกคูลูปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่อินพุต	17
	รูปที่ 3.5	การเปลี่ยนแปลงของเฟสกับเวลา	18
	รูปที่ 3.6	รูปแบบเชิงเส้นของเฟสล็อกคูลูปชนิดที่หนึ่ง (type I PLL)	18
	รูปที่ 3.7	การตอบสนองของเฟสล็อกคูลูปต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบขั้นบันได	21
	รูปที่ 3.8	การตอบสนองของระบบเมื่อค่า $\zeta$ เปลี่ยนแปลง	22
	รูปที่ 3.9	กราฟไบคพล็อตแสดงเสถียรภาพของ type I PLL	22
บทที่ 4	รูปที่ 4.1	แผนผังเครื่องส่ง FM อย่างง่าย	23
	รูปที่ 4.2	ภาคต่างๆของเครื่องส่ง FM แบบ FM โดยตรง	24
	รูปที่ 4.3	ภาคต่างๆของเครื่องส่ง FM และ FM โดยอ้อม	24
	รูปที่ 4.4	บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่องรับ SUPERHETERODYNE	25
	รูปที่ 4.5	วงจร FM Demodulator	28
	รูปที่ 4.6	องค์ประกอบความถี่ของ Stereo Multiplex	30
	รูปที่ 4.7	เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอโมัลติเพล็กซ์	31
	รูปที่ 4.8	เครื่องรับวิทยุ FM สเตอริโอโมัลติเพล็กซ์	32
	รูปที่ 4.9	หลักการของการ Multiplexing	34
บทที่ 5	รูปที่ 5.1	การใช้ MCS-51 โปรแกรม IC MC145162	36
	รูปที่ 5.2	แสดง Flowchart ของโปรแกรมใน MCS-51	36
	รูปที่ 5.3	Timing Diagram ของส่วน Control Register	37
	รูปที่ 5.4	Timing Diagram ของส่วน Transmit and Receive Counters (ท15 R)	37
	รูปที่ 5.5	Timing Diagram ของส่วน Reference Frequency Counter (ท15 R)	38
	รูปที่ 5.6	แสดงการเลือกใช้ Register ภายใน IC MC145162	39

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่ 5.7 วงจรในส่วนของ Voltage Control Oscillator	40
รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ของวงจร VCO	41
รูปที่ 5.9 วงจร Lowpass Filter	42
รูปที่ 5.10 วงจรตัวอย่างในการใช้งาน IC เบอร์ LA3361	42
รูปที่ 5.11 วงจร Low Pass Filter 15KHz	43
รูปที่ 5.12 สัญญาณที่วัดได้ที่ขา 12 IC เบอร์ LA3361	43
รูปที่ 5.13 สัญญาณ sine wave ความถี่ 50 Hz ที่ Demodulate ออกมา ก่อนเข้าไปยังภาค Demux	44
รูปที่ 5.14 สัญญาณ sin wave ความถี่ 50 Hz หลังจาก Demux และผ่าน Low Pass Filter แล้ว	44
รูปที่ 5.15 สัญญาณ sin wave ความถี่ 100 Hz ที่ Demodulate ออกมา ก่อนเข้าไปยังภาค Demux	45
รูปที่ 5.16 สัญญาณ sine wave ความถี่ 100 Hz หลังจาก Demux และผ่าน Low Pass Filter แล้ว	45
รูปที่ 5.17 สัญญาณ sine wave ความถี่ 1KHz ที่ Demodulate ออกมา ก่อนเข้าไปยังภาค Demux	46
รูปที่ 5.18 สัญญาณ sine wave ความถี่ 1KHz หลังจาก Demux และผ่าน Low Pass Filter แล้ว	46
รูปที่ 5.19 วงจรในส่วนของ Voltage Controlled Oscillator ที่ใช้ทดลอง	47
รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ของวงจร VCO	48
รูปที่ 5.21 การใช้ MCS-51 โปรแกรม IC MC145162	48
รูปที่ 5.22 แสดง Flowchart ของ โปรแกรมใน MCS-51	49
รูปที่ 5.23 Timing Diagram ของส่วน Reference Frequency Counter (หาร R)	50
รูปที่ 5.24 แสดงการเลือกใช้ Register ภายใน IC MC145162	51
รูปที่ 5.25 วงจร Lowpass Filter	52
รูปที่ 5.26 วงจรสร้างสัญญาณ Stereo Multiplex	53
รูปที่ 5.27 วงจร Lowpass Filter 15 KHz	53
รูปที่ 5.28 สัญญาณที่ป้อนเข้ายังอินพุตข้างใดข้างหนึ่งของวงจร	54
รูปที่ 5.29 สัญญาณที่วัดที่ขา 4 ของ IC เบอร์ 74HC4053	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

บทที่4	ตารางที่ 4.1 ความถี่ IF ที่นิยมเลือกใช้	26
บทที่5	ตารางที่ 5.1 แสดงการโปรแกรมค่าหาร N จากคิพสวิดซ์	38
	ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการโปรแกรมเฟสล็อคลูป	39
	ตารางที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่เอาต์พุตเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง	41
	ตารางที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่เอาต์พุตเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง	47
	ตารางที่ 5.5 แสดงการโปรแกรมค่าหาร N จากคิพสวิดซ์	50
	ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการโปรแกรมเฟสล็อคลูป	51
	ตารางที่5.7 ผลการการพัน Isolate Transformer เพื่อหาค่าการส่งผ่านสัญญาณสูงสุด	54



## บทที่ 1

### บทนำ

ปัจจุบันภายในบ้านพักอาศัยมีการเดินสายไฟฟ้าภายในบ้านไว้แทบจะทุกพื้นที่ภายในบ้านพักอาศัย เพื่อสามารถใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆภายในบ้านให้ได้ทุกพื้นที่ของบริเวณบ้านพัก จึงทำให้เกิดแนวความคิดที่จะทำการส่งสัญญาณเสียงในระบบสเตอริโอผ่านสายไฟฟ้าภายในบ้านพักอาศัย(AC line) ทั้งนี้เพื่อเป็นการลดการเดินสายภายในบ้านพักอาศัย ทำให้ดูสวยงาม และสะดวกในการที่จะติดตั้งอุปกรณ์ในจุดต่างๆ โดยไม่ต้องมีการเดินสายใหม่ โดยการนำวงจรในภาครับและภาคส่งวิทยุระบบสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ มาเป็นตัวรับและส่งสัญญาณผ่านสายไฟฟ้าภายในบ้าน ทำให้สามารถส่งสัญญาณเสียงจากเครื่องขยายเสียงไปยังจุดต่างๆภายในบ้านพักอาศัยได้โดยสะดวก โดยไม่ต้องมีการเดินสายใหม่จากแนวความคิดนี้จึงจำเป็นต้องศึกษา การทำงานของ Microcontroller ทฤษฎี เฟสล็อกคูลูป ทฤษฎี การรับและส่งคลื่นวิทยุระบบ เอฟเอ็มสเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ โดยจะบรรยายเนื้อหาในบทต่อไป

#### 1.1 วัตถุประสงค์โครงการ

1. เพื่อศึกษาและเรียนรู้การประยุกต์ใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์
2. เพื่อศึกษาและเรียนรู้การ ใช้งานเฟสล็อกคูลูปเป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่
3. เพื่อศึกษาและออกแบบลยวงจรที่ใช้กับความถี่สูงและเทคนิคการต่อวงจรความถี่สูง
4. เพื่อศึกษาและเรียนรู้การมอดูเลตและดีมอดูเลตสัญญาณแบบการผสมคลื่นเชิงความถี่

#### 1.2 ขอบเขตของโครงการ

สามารถส่งสัญญาณเสียงระบบสเตอริโอผ่านสายไฟฟ้าภายในบ้านไปยังเครื่องรับสัญญาณ และสารถดอครหัสสัญญาณเสียงระบบสเตอริโอ โดยแยกข้างซ้ายขวาได้

#### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการประยุกต์ใช้งาน ไมโครคอนโทรลเลอร์
2. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูลูป
3. ได้รับความรู้เกี่ยวกับการมอดูเลตสัญญาณแบบ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์
4. สามารถประยุกต์ใช้งานเครื่องรับส่งวิทยุได้
5. ได้รับความรู้ในการออกแบบวงจรมอดูเลตและดีมอดูเลต
6. ได้รับความรู้ในการออกแบบลยวงจรความถี่สูงและเทคนิคการต่อวงจรความถี่สูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

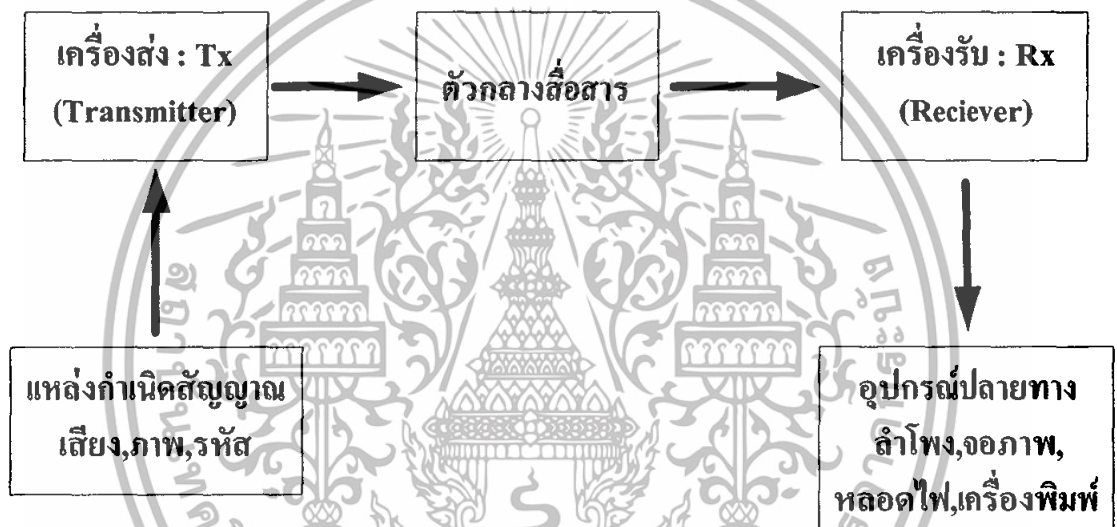
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเกี่ยวกับระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์

#### 2.1 ระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Communication Systems)

การสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์ หมายถึง การส่ง(Transmission) , การรับ(Reception) , และการประมวลผลของข้อมูลหรือข่าวสาร (Information , Intelligence , Data , Signal ) ระหว่าง 2 จุดหรือมากกว่าด้วยการใช้อิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบสื่อสารอิเล็กทรอนิกส์

ตัวกลางการสื่อสาร (Communication Medium) เป็นช่องทางหรือตัวกลางซึ่งสัญญาณของระบบสื่อสารใช้เป็นทางจากจุดส่งไปยังจุดรับซึ่งเราสามารถแบ่งชนิดของการสื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ตามชนิดของตัวกลางการสื่อสารได้ 2 แบบ คือ

- แบบมีสาย (WIRE) สายในที่นี้อาจเป็นสายตัวนำไฟฟ้า 1 คู่ หรือเส้นใยนำแสง (OPTIC FIBER)
- แบบไร้สาย (WIRELESS) หรือวิทยุ (RADIO) สัญญาณของระบบสื่อสารแบบไร้สายจะอยู่ในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งรวมถึงแสง

เครื่องส่ง (Transmitter) เป็นอุปกรณ์หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่ถูกออกแบบสำหรับแปลงสัญญาณจากแหล่งกำเนิดสัญญาณที่จะสื่อสารให้กลายเป็นสัญญาณที่มีรูปแบบและระดับพลังงานที่เหมาะสมกับตัวกลางการสื่อสารของแต่ละระบบ เครื่องส่งอาจเป็นเพียงคีย์สวิตช์ของระบบโทรเลข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบบใช้สายหรืออาจเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์สลับซับซ้อนของระบบสื่อสารดาวเทียม สัญญาณที่จะสื่อสารอาจอยู่ในรูปของสัญญาณเสียง ภาพ หรือข้อมูลในรูปของสัญญาณดิจิทัล ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะมีค่าความกว้างของแถบความถี่(Bandwidth) แตกต่างกัน ซึ่งความกว้างของแถบความถี่ของสัญญาณนี้ถือเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สุดในการพิจารณาเลือกใช้หรือออกแบบระบบสื่อสาร

เครื่องรับ (Receiver) จะเป็นอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์อีกชุดหนึ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่แปลงสัญญาณที่รับมาได้จากตัวกลางให้กลายเป็นสัญญาณที่มีรูปแบบและระดับพลังงานที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ปลายทางด้านรับ เช่น เครื่องรับของระบบโทรเลขใช้สายจะเป็นเพียงขดลวด โซลินอยด์ (Solenoid) หรือวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนของการรับสัญญาณโทรทัศน์ผ่านดาวเทียม

สัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกสัญญาณจะเกิดจากผลรวมของคลื่นขายน้หลาย ๆ ความถี่การเดินทางของสัญญาณในวงจรจากจุดหนึ่ง ไปยังอีกจุดหนึ่งหรือการเดินทางของสัญญาณจากวงจรหนึ่ง ไปยังอีกวงจรหนึ่ง หรือการเดินทางของสัญญาณจากระบบหนึ่ง ไปยังอีกระบบหนึ่ง สามารถพิจารณาเป็นการเดินทางของคลื่นขายน้ทุกความถี่ที่มีอยู่ในสัญญาณนั้นจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ในรูปแบบของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic waves) ซึ่งอาจจะเป็นการเคลื่อนที่ผ่านตัวนำไฟฟ้า หรือตัวอุปกรณ์ต่าง ๆ และการเคลื่อนที่ผ่านอากาศหรืออวกาศในรูปของการแผ่รังสี (Radiation)

ความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณ คือ ค่าแถบความถี่ของคลื่นขายน้หลายความถี่ที่รวมกันเป็นสัญญาณ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลต่างของความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดที่มีอยู่ในสัญญาณ

ถ้ามีสัญญาณมากกว่าหนึ่งสัญญาณในอาณาบริเวณเดียวกัน และสัญญาณเหล่านั้นมีค่าแถบความถี่ที่ทับซ้อนกัน จะทำให้เกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน ถ้าระดับกำลังของสัญญาณต่างๆ ที่มีแถบความถี่ซ้อนทับกันมีค่าใกล้เคียงกัน ก็จะเกิดการรบกวนซึ่งกันและกัน แต่ถ้าระดับกำลังของสัญญาณแตกต่างกันมาก สัญญาณที่มีกำลังมากแทบไม่ถูกรบกวนจากสัญญาณที่มีกำลังต่ำกว่ามาก ในทางตรงกันข้ามสัญญาณที่มีกำลังต่ำจะถูกสัญญาณที่มีกำลังสูงกว่ากลบจนหมด

ในระบบสื่อสาร เราไม่สามารถส่งสัญญาณที่มีแถบความถี่ซ้อนทับกันผ่านตัวกลางของการสื่อสารเดียวกันภายในเวลาเดียวกัน ได้ สัญญาณใดก็ตามที่มีแถบความถี่ซ้อนทับกับสัญญาณที่เราต้องการสื่อสาร จะถูกเรียกว่า “สัญญาณรบกวน (NOISE)”

การเดินทางของสัญญาณจากเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับจะถูกลดทอนให้มีกำลังต่ำลงในขณะที่ผ่านตัวกลาง เมื่อสัญญาณมีกำลังไฟฟ้าลดลงจะมีโอกาสถูกรบกวนจากสัญญาณรบกวนที่อยู่ระหว่างเส้นทาง ยิ่งไปกว่านั้นภายในตัวอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนอีกด้วย ถ้าความกว้างแถบความถี่ของสัญญาณยิ่งกว้างก็จะยิ่งเพิ่ม โอกาสที่จะถูกรบกวนมากยิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตเห็นาเป็เซปรีะโยชนดานการค้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

## 2.2 แถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

จุดประสงค์ของ Electronic Communication คือ การติดต่อสื่อสารระหว่างจุด 2 จุด ข้อมูลข่าวสารของการสื่อสารจะต้องอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้จะสามารถแผ่กระจายผ่านตัวนำไฟฟ้า หรืออากาศ/อวกาศได้

แถบความถี่ของสัญญาณ(Signal Bandwidth) คือ แถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่สัญญาณครอบครองอยู่ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับผลต่างของความถี่สูงสุดกับความถี่ต่ำสุดของสัญญาณ

ความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสาร (Communication Channel Bandwidth) จะต้องมีค่าพอที่จะให้ความถี่ที่มีนัยสำคัญทั้งหมดของสัญญาณข้อมูลข่าวสารผ่านไปได้อย่างหมด โดยที่ความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสาร :  $BW_{CH}$  จะต้องมีค่าเท่ากับหรือมากกว่าความกว้างของแถบความถี่ของช่องสัญญาณ :  $BW_{SIGNAL}$

$$BW_{CH} \geq BW_{SIGNAL} \quad (2.1)$$

เช่น แถบความถี่ของเสียงมนุษย์ คือ 300 Hz - 3 kHz ความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสาร สำหรับเสียงมนุษย์ จะต้องมีค่าอย่างน้อยที่สุดเป็น 2.7 kHz ( $3 \text{ kHz} - 300 \text{ Hz} = 2.7 \text{ kHz}$ )

ความจุของข้อมูลข่าวสาร (Information Capacity) ของระบบสื่อสารเป็นจำนวนที่ใช้วัดความสามารถของระบบสื่อสารว่าสามารถจะส่งข้อมูลข่าวสารผ่านระบบได้เป็นประมาณเท่าใดต่อหนึ่งหน่วยของเวลา จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าระบบที่มีความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสารกว้างก็จะมีค่าความจุของข้อมูลข่าวสารสูง

กฎของ “ฮาร์ตลีย์” (Hartley’s law) กล่าวว่า

$$I \propto BW_{CH} \times t \quad (2.2)$$

เมื่อ

I	:	ความจุของข้อมูลข่าวสาร (Information Capacity)
$BW_{CH}$	:	ความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสาร
T	:	เวลาที่ใช้ในการส่ง

ถึงแม้ว่าระบบสื่อสารที่มีความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสารกว้าง จะมีความจุของข้อมูลข่าวสารมาก อย่างไรก็ตามกฎพื้นฐานในการออกแบบระบบสื่อสารที่วิศวกรผู้ออกแบบพึงระลึกอยู่ตลอดเวลา คือ จะต้องพยายามทำให้ความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสาร มีความกว้างให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยไม่ทำให้สูญเสียข้อมูลข่าวสารที่มีนัยสำคัญ เพื่อให้มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำนวนของช่องสื่อสารให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งจะเป็นการเปิดโอกาสให้คนจำนวนมากได้ใช้ประโยชน์จากแถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งเป็นทรัพยากรที่มีจำกัดร่วมกัน

ความถี่บางความถี่ เช่น ความถี่ที่สูงกว่าย่าน HF จะสามารถแพร่กระจายได้ในขอบเขตจำกัด เราสามารถใช้ความถี่ของระบบสื่อสารซ้อนทับกันในบริเวณที่ห่างไกลกัน สัญญาณของการแพร่กระจายคลื่นอาจทำได้โดยไม่ใช้เครื่องส่งที่มีกำลังสูงเกินกว่าความจำเป็น แต่บางความถี่ เช่น ในย่าน HF จะมีความสามารถสะท้อนกับบรรยากาศโลก (ชั้น Ionosphere) ได้ดี จะสามารถแพร่กระจายคลื่นไปได้ไกลมาก

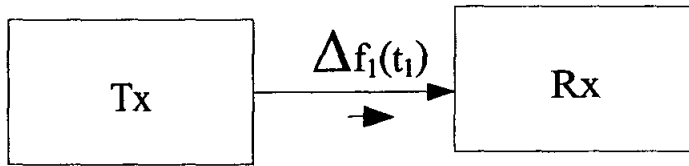
## 2.3 รูปแบบของการสื่อสาร

เราสามารถแบ่งรูปแบบของการสื่อสารได้หลายรูปแบบหรือหลายชนิด เช่น แบ่งตามลักษณะของตัวกลางก็จะสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ แบบมีสายกับแบบไร้สาย ถ้าแบ่งตามรูปแบบของสัญญาณก็จะสามารถแบ่งได้ 2 แบบ คือ การสื่อสารแบบแถบฐานกับการสื่อสารแบบมอดูเลชัน ซึ่งไม่ว่าจะเป็นแบบใดในการส่งสัญญาณจำนวน  $n$  สัญญาณ ผ่านระบบสื่อสารในเวลาเดียวกันและผ่านตัวกลางเดียวกัน จะต้องใช้ช่องสื่อสารจำนวน  $n$  ช่องสื่อสาร แถบความถี่ของช่องสื่อสารแต่ละช่องจะซ้อนทับกันไม่ได้ และความกว้างของแถบความถี่ของช่องสื่อสารแต่ละช่องควรมีความกว้างให้น้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้โดยต้องไม่สูญเสียข้อมูลที่มีนัยสำคัญเราอาจแบ่งรูปแบบของการสื่อสารตามทิศทางของการสื่อสารหรือจำนวนของช่องสื่อสารได้ 3 แบบ คือ

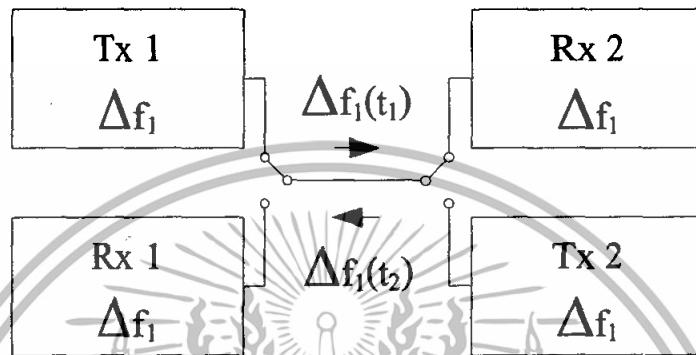
2.3.1. แบบทิศทางเดียว (SIMPLEX ; SPX , XS) คือ ฝ่ายหนึ่งจะส่งเพียงอย่างเดียวและอีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นฝ่ายรับเพียงอย่างเดียวการสื่อสารแบบทิศทางเดี่ยวนี้นี้ต้องการช่องสื่อสารเพียง 1 ช่อง ตัวอย่าง เช่น การส่งวิทยุกระจายเสียง (Broad casting)

2.3.2. แบบกึ่งสองทาง (HALF DUPLEX ; HDX , HX) เป็นการสื่อสารแบบ 2 ทางแต่สลับเวลากันในขณะที่ยกฝ่ายหนึ่งเป็นฝ่ายส่ง อีกฝ่ายหนึ่งจะเป็นฝ่ายรับ การสื่อสารแบบกึ่งสองทางนี้ต้องการช่องสื่อสารเพียงช่องเดียว ตัวอย่าง เช่น วิทยุโทรคมนาคม หรือ Walkie – Talkie

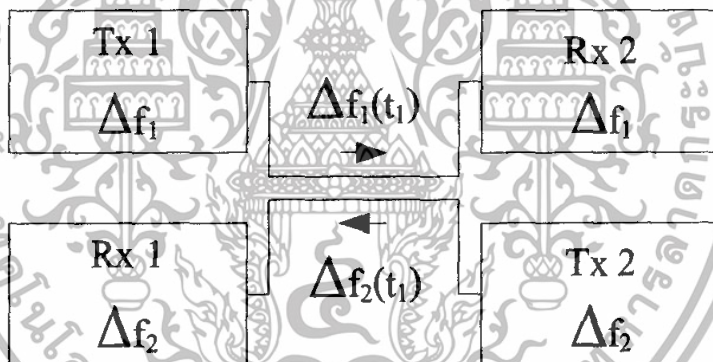
2.3.3. แบบสองทาง (FULL DUPLEX ; FDX , FX) เป็นการสื่อสารแบบ 2 ทิศทาง โดยที่ทั้ง 2 ฝ่ายสามารถรับและส่งได้พร้อมกัน ในเวลาเดียวกันการสื่อสารแบบ 2 ทิศทางนี้ต้องการช่องสื่อสาร 2 ช่อง ตัวอย่างเช่น โทรศัพท์ และ โทรศัพท์เคลื่อนที่



ก. การสื่อสารแบบทิศทางเดียว



ข. การสื่อสารแบบกึ่งสองทิศทาง



ค. การสื่อสารแบบสองทิศทาง

รูปที่ 2.2 รูปแบบการสื่อสารตามทิศทาง

## 2.4 การมอดูเลชัน และการดีมอดูเลชัน

2.4.1 การมอดูเลชัน คือ ขบวนการเลื่อนความถี่ของสัญญาณ โดยสัญญาณ Modulating Signal จะทำให้ parameter บางประการของคลื่นพาห์ (Carrier) ซึ่งมักจะมีความถี่สูงกว่าสัญญาณเปลี่ยนแปลง

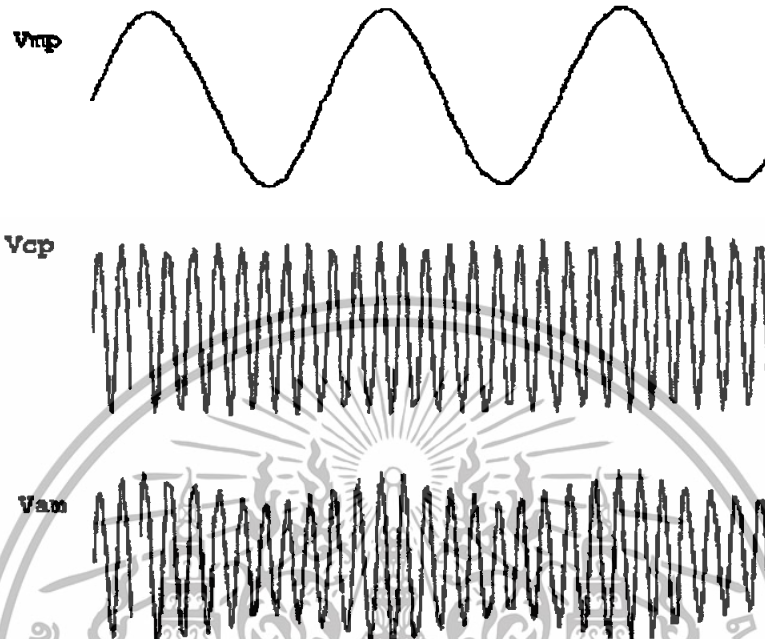
การมอดูเลตสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ

2.4.1.1 การมอดูเลตเชิงขนาด (Amplitude Modulation : AM) ขนาดของคลื่นพาห์

จะเปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_{AM} = [V_{cp} + V_{mp} \sin(\omega_m t)] \sin(\omega_c t) \quad (2.3)$$



รูปที่ 2.3 AM Modulated wave

#### 2.4.1.2 การมอดูเลตเชิงมุม (Angular Modulation)

##### 2.4.1.2.1 Frequency Modulation (FM) ความถี่ของคลื่นพาห้จะ

เปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสัญญาณ

$$V_{FM} = V_{CF} \sin \left[ \omega_c t + \frac{KV_{mp}}{\omega_m} \sin \omega_m t \right] \quad (2.4)$$

เมื่อ  $K$  : ค่าคงที่ของการมอดูเลต

สำหรับการมอดูเลตสัญญาณแบบ FM สามารถจะแยกย่อยออกได้เป็น 2 ประเภทตามขนาดของ  $\beta$  คือ

- การมอดูเลตสัญญาณแบบ FM แถบความถี่แคบ (Narrow-band FM)
- การมอดูเลตสัญญาณแบบ FM แถบความถี่กว้าง (Wide-band FM)

การมอดูเลตสัญญาณแบบ FM จะจัดเป็นแบบความถี่แคบเมื่อ  $\beta$  มีค่าน้อยเมื่อเทียบกับหนึ่งเรเดียน และจะจัดเป็นแบบความถี่กว้างเมื่อ  $\beta$  มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับหนึ่งเรเดียน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.2.2 Phase Modulation (PM) เฟสของคลื่นพาห้จะเปลี่ยนแปลงไปตามขนาดของสัญญาณ

$$V_{PM} = V_{cp}[\sin\omega_c t + K V_{mp} \sin\omega_m t] \quad (2.5)$$

**2.4.2 การดีมอดูเลทหรือการดีเทกต์ (Demodulation or Detection)** เป็นกระบวนการย้อนกลับของการมอดูเลท คือการแยกสัญญาณออกจากคลื่นพาห้ สัญญาณของระบบสื่อสารที่ไม่ผ่านขบวนการมอดูเลท เรียกว่า สัญญาณแถบฐาน (Base band)

เราสามารถแบ่งชนิดของการสื่อสารตามรูปแบบของสัญญาณได้ 2 แบบ คือ

1. การสื่อสารแบบแถบฐาน (Base Band Communication) ในการสื่อสารแบบแถบฐานนี้ จะต้องเป็นการสื่อสารแบบใช้สายเท่านั้น เราไม่สามารถส่งสัญญาณแถบฐานแบบวิทยุได้ และยิ่งไปกว่านี้สายส่ง 1 คู่สายสามารถส่งสัญญาณแถบฐานได้เพียง 1 สัญญาณในระยะเวลาเดียวกันเท่านั้น ในการส่งสัญญาณแถบฐานหลายสัญญาณผ่านตัวกลางเดียวกัน อาจทำได้โดยการสลับเวลาในการรับส่ง

2. การสื่อสารแบบมอดูเลชัน หรือแบบผ่านแถบความถี่ (Band Pass Communication) ซึ่งจะเป็นการสื่อสารแบบมีสายหรือ ไร้สายก็ได้ ในกรณีที่เป็นแบบมีสาย สายส่ง 1 คู่สายสามารถส่งสัญญาณพร้อมกันได้หลายสัญญาณ

เหตุผลสำคัญที่จะต้องมีการมอดูเลชัน สำหรับระบบสื่อสารไร้สายมีดังต่อไปนี้

- สัญญาณแถบฐานที่เกิดจากต้นกำเนิดชนิดเดียวกันจะมีแถบความถี่ใกล้เคียงกัน เช่น เสียงมนุษย์ทุกคนก็จะมีแถบความถี่ประมาณ 300 Hz – 3 KHz คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่แผ่กระจายออกไปจะมีแถบความถี่ที่ซ้อนทับกัน ทำให้ข้อมูลของแต่ละข้อมูลรบกวนซึ่งกันและกันโดยผ่านการมอดูเลท เราสามารถเลื่อนแถบความถี่ของสัญญาณแถบฐานไม่ให้ซ้อนทับกัน ได้จากการเลื่อนแถบความถี่คลื่นพาห้ที่ไม่เท่ากัน

- เป็นการยากมากในการที่จะสร้างสายอากาศที่จะแผ่กระจายคลื่นของสัญญาณแถบฐานให้มีคุณภาพสูงตลอดย่านแถบความถี่ของสัญญาณแถบฐาน เนื่องจากสัญญาณแถบฐานมักมีความถี่ต่ำ และแถบความถี่กว้าง (ค่าความถี่ต่ำสุดและความถี่สูงสุดต่างกันหลายเท่า) โดยการผ่านขบวนการมอดูเลทแถบความถี่ของสัญญาณ สัญญาณที่ถูกมอดูเลทจะมีค่าแถบความถี่เชิงสัมพัทธ์แคบลงมาก ทำให้สามารถสร้างสายอากาศที่สามารถแผ่กระจายคลื่น ได้ดี ตลอดแถบความถี่ของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่ถูกมอดูเลต โดยในการใช้สายอากาศแผ่กระจายคลื่น สายอากาศควรมีความยาวเป็นครึ่งหนึ่งของความยาวคลื่น

- ในการส่งสัญญาณมากกว่า 1 สัญญาณผ่านสายตัวนำเพียง 1 คู่ จะต้องมียขบวนการมอดูเลตเข้ามาเกี่ยวข้อง

## 2.5 ดัชนีการผสมคลื่น (Modulation Index)

ในระบบ FM ปริมาณการมอดูเลต เรานิยามวัดเป็นเปอร์เซ็นต์การมอดูเลต โดยดูจากการเปลี่ยนแปลงความถี่ ซึ่งเรานิยามเรียกชื่อว่า ดัชนีการมอดูเลต

$$m = \frac{\Delta F}{f} \quad (2.6)$$

โดยที่  $m$  = ดัชนีการผสมคลื่น  
 $\Delta F$  = อัตราการเปลี่ยนแปลงสูงสุดของความถี่ที่ถูกผสมแล้ว หน่วย Hz  
 $f$  = ความถี่สูงสุดของสัญญาณเสียงที่จะเข้ามาผสมคลื่น หน่วย Hz

ค่าตัวเลขของดัชนีการมอดูเลตจะมีค่าสูง (แตกต่างจากเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตซึ่งเมื่อคิดเป็นอัตราส่วนจะได้อยู่ระหว่าง 0 ถึง 1) ตัวอย่างเช่น ในระบบวิทยุกระจายเสียง FM เรากำหนดให้ความถี่เบี่ยงเบนของระบบสูงสุดไว้เท่ากับ 75 กิโลเฮิร์ตซ์ สมมติว่าเราใช้สัญญาณเสียง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ มอดูเลตให้เกิดความถี่เบี่ยงเบนเต็มที่ ค่าดัชนีการมอดูเลตจะเป็น

$$m = \frac{75\text{kHz}}{1\text{kHz}} = 75$$

สังเกตว่า ค่าดัชนีการมอดูเลตในระบบ FM ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณเสียงที่เข้ามามอดูเลต ในทางปฏิบัติเรานิยามวัดเป็นอัตราส่วนการเบี่ยงเบน (Deviation Ratio) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างความถี่เบี่ยงเบน(ของระบบ)สูงสุด ( $f_{d\max}$ ) ต่อความถี่สูงสุดของสัญญาณที่เข้ามามอดูเลต ( $f_{m\max}$ ) ในระบบกระจายเสียง FM ค่าอัตราส่วนการเบี่ยงเบน ( $\Delta$ ) จะเท่ากับ

$$\Delta = \frac{f_{d\max}}{f_{m\max}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \frac{75\text{kHz}}{15\text{kHz}} = 5$$

ในระบบ FM เมื่อเพิ่มแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามอดูเลตสูงขึ้น การเบี่ยงเบนความถี่ของพาหะจะเปลี่ยนแปลงมากขึ้น ในระบบวิทยุกระจายเสียง FM กำหนดให้ความถี่เบี่ยงเบนของระบบเต็มที่ไม่เกิน 75 กิโลเฮิร์ตซ์ ถ้าเรามอดูเลตทำให้ความถี่ของพาหะเบี่ยงเบนไปเท่ากับ 75 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงว่าเรามอดูเลตเต็มที่ 100 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเราเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การมอดูเลต} = \frac{f_d}{f_{d \max}} \times 100 \quad (2.8)$$

ในที่นี้  $f_d$  คือ ความถี่เบี่ยงเบน เนื่องจากสัญญาณที่เข้ามอดูเลต

$f_{d \max}$  คือ ความถี่เบี่ยงเบนสูงสุดของระบบ

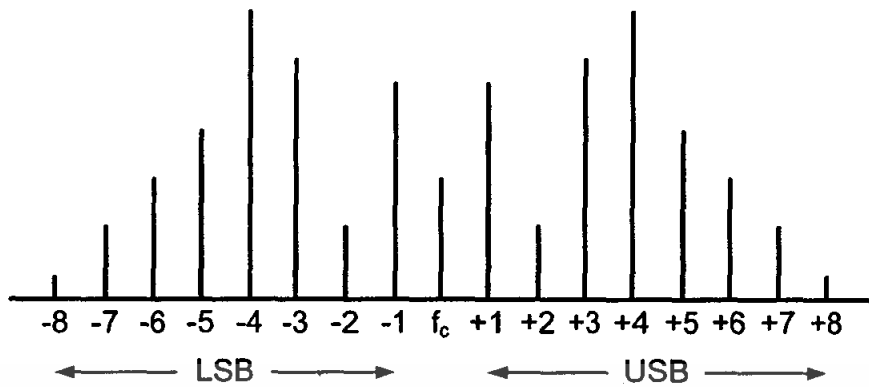
## 2.6 ไซด์แบนด์วิทยุ FM (FM Side Bands)

ระบบ FM การผสมคลื่นระหว่างสัญญาณเสียงกับคลื่นพาหะ จะเกิดไซด์แบนด์จำนวนมากมายเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของความถี่คลื่นพาหะ ทำให้เกิดความถี่เพิ่มขึ้นอีกมากมาย เพราะการผสมคลื่นแบบ FM นั้นความแรงของสัญญาณคลื่นพาหะจะคงที่ นั่นคือกำลังของคลื่นพาหะจะถูกกระจาย ไปอยู่ที่ไซด์แบนด์ ความสัมพันธ์ของคลื่นพาหะกับไซด์แบนด์ที่สำคัญขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ

1. ขนาดความแรงของสัญญาณเสียงที่ผสมกับคลื่นพาหะ ถ้าขนาดความแรงของสัญญาณเสียงที่ส่งเข้ามาผสมกับคลื่นพาหะที่เปลี่ยนแปลงความแรงสูงขึ้นหรือต่ำลงก็จะไปทำให้คลื่นพาหะมีระดับความถี่เปลี่ยนแปลงสูงขึ้นหรือต่ำลงไปจากศูนย์กลางความถี่ (Center Frequency) ระยะของความถี่ที่กระจายออกไปจากคลื่นพาหะก็จะเปลี่ยนแปลงกว้างหรือแคบตามไปด้วย ถ้าสัญญาณเสียงมีความแรงมาก แบนด์วิดท์ของคลื่น FM ก็จะกว้าง และถ้าสัญญาณเสียงมีความแรงน้อยแบนด์วิดท์ของคลื่น FM ก็จะแคบ

2. ความถี่ของสัญญาณเสียงที่ผสมกับคลื่นพาหะ ถ้าความถี่ของสัญญาณเสียงเปลี่ยนแปลงมากแบนด์วิดท์ของคลื่น FM ก็จะกว้างแคบเปลี่ยนแปลงมากเช่นกัน กล่าวคือ ถ้าสัญญาณเสียงมีความถี่ต่ำแบนด์วิดท์คลื่น FM ก็จะกว้าง และถ้าสัญญาณเสียงมีความถี่สูงแบนด์วิดท์ของคลื่น FM จะแคบเพราะที่สัญญาณเสียงความถี่สูง ระดับความแรงของความถี่ฮาร์โมนิกจะต่ำลงสามารถตัดความถี่ฮาร์โมนิกสูงๆออกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 สเปกตรัมความถี่ของวิทยุ FM ประกอบด้วยความถี่พาหะและไซด์แบนด์

จากรูปแสดงย่านความถี่ของการส่งกระจายเสียงของคลื่น FM จะเห็นได้ว่าไซด์แบนด์ของคลื่นจะมีจำนวนมาก ขนาดไซด์แบนด์ในแต่ละฮาร์โมนิกก็มีความแรงต่างกัน ไซด์แบนด์บางฮาร์โมนิก มีระดับความแรงมากกว่าความถี่คลื่นพาหะ แต่ไซด์แบนด์ที่ห่างจากจุดศูนย์กลางความถี่มาก ๆ ความแรงของไซด์แบนด์ก็จะลดลง และจะเป็นศูนย์ในที่สุด จะเห็นได้ว่าไซด์แบนด์จะมีไม่จำกัด แต่ในทางปฏิบัติ ไซด์แบนด์บางความถี่ก็ไม่สำคัญเพราะความแรงต่ำสามารถตัดทิ้งได้

## บทที่ 3

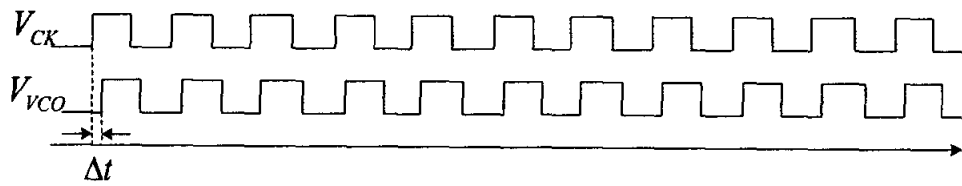
### วงจรเฟสล็อกคูลูป

เฟสล็อกคูลูปเป็นอุปกรณ์หรือวงจรที่ใช้ในการรักษาอัตราการเปลี่ยนแปลงเฟสของสัญญาณระหว่างเฟสของสัญญาณเอาต์พุตกับสัญญาณอินพุตให้มีค่าเท่ากัน โดยจะมีผลทำให้มีความถี่เท่ากันด้วย จากคุณสมบัติดังกล่าว จึงมีการนำเฟสล็อกคูลูปไปใช้งานอย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ในการดีมอดสัญญาณและใช้ในการสร้างหรือกำเนิดความถี่ โดยองค์ประกอบพื้นฐานของเฟสล็อกคูลูปมีอยู่สามส่วนคือ ตัวตรวจจับเฟส วงจรออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยแรงดันไฟฟ้า และส่วนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งองค์ประกอบในแต่ละส่วนก็มีหลายแบบดังนั้นเมื่อนำองค์ประกอบดังกล่าวมาประกอบกันเป็นเฟสล็อกคูลูปก็จะได้เฟสล็อกคูลูปหลายแบบเช่นกันซึ่งในแต่ละแบบก็จะมีคุณสมบัติการทำงานที่แตกต่างกันการศึกษาทำความเข้าใจจึงเป็นเรื่องจำเป็นที่จะทำให้สามารถเลือกใช้และออกแบบได้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งาน

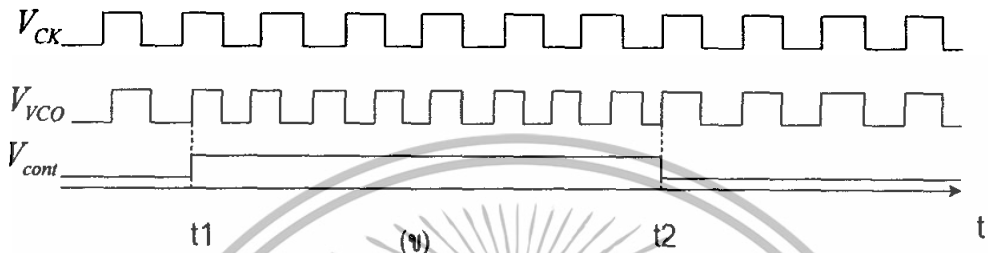
#### 3.1 หลักการทำงานพื้นฐานของเฟสล็อกคูลูป

การทำงานของเฟสล็อกคูลูปในสภาวะล็อกคือ การที่ความถี่เอาต์พุตจากวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยแรงดันไฟฟ้ามีค่าเท่ากับความถี่อ้างอิงหรืออินพุต และอัตราการเปลี่ยนแปลงของเฟสอินพุตและเอาต์พุตเทียบกับเวลาจะมีค่าเท่ากัน

พิจารณาถึงการเข้าสู่สภาวะล็อก พิจารณารูป 3.1(ก) แสดงการเปรียบเทียบเฟส ระหว่างเอาต์พุตจาก VCO กับเฟสของอินพุตอ้างอิงหรือคล็อก จะเห็นว่าที่ขอบขาขึ้นของ  $V_{VCO}$  จะเกิดมีเฟสผิดพลาดขึ้นเป็นเวลา  $\Delta t$  เมื่อเทียบกับ  $V_{CK}$  และเราต้องการกำจัดความผิดพลาดนี้ออกไปโดยกำหนดให้  $V_{cont}$  แรงดันอินพุตของ VCO โดยเมื่อ  $V_{cont}$  สูงขึ้นความถี่เอาต์พุตที่จะสูงขึ้นพิจารณารูปที่ 3.1(ข) ความถี่ของ VCO เริ่มสูงขึ้นที่เวลา  $t = t_1$  วงจรจะมีการเพิ่มของเฟสอย่างรวดเร็วจนที่เวลา  $t = t_2$  ความผิดพลาดของเฟสจะมีค่าเป็นศูนย์และ  $V_{cont}$  กลับเข้าสู่สภาวะแรกโดยเฟสของเอาต์พุตจาก VCO กับเฟสของอินพุตอ้างอิงหรือคล็อกอินเฟสกัน



(ก)

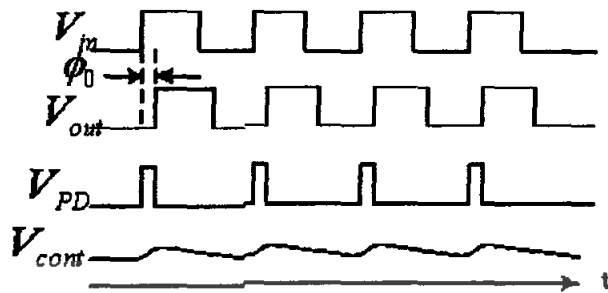


(ข)

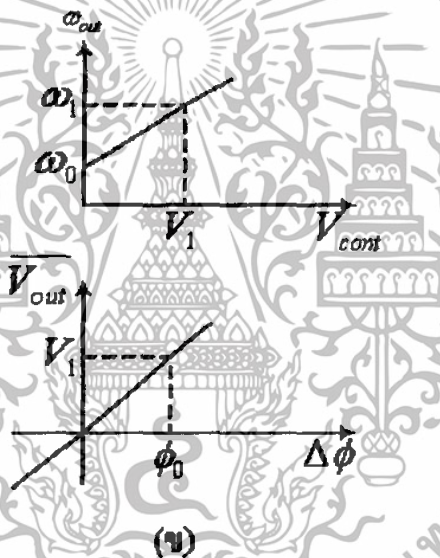
- (ก) เฟสเอท์หลุดจาก VCO กับเฟสของอินพุต  
 (ข) การปรับเฟสของวงจรถูกปรับเฟสผิดพลาด  
 รูปที่ 3.1 การเข้าสู่สถานะล็อกของเฟสล็อกคูลูป

จากหลักการข้างต้นทำให้เราสามารถทราบได้ว่าวงจรเฟสล็อกคูลูปแบบง่ายนั้นประกอบด้วย ตัวคัทจัมเฟส (PD) และวงจรออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCO) ต่อกันใน ลักษณะป้อนกลับดังรูปที่ 3.2(ก) โดย PD จะเป็นตัวเปรียบเทียบเฟสระหว่าง  $V_{out}$  กับ  $V_{in}$  โดยจะให้ ค่าแรงดันเฟสผิดพลาดออกไปปรับ VCO จนเฟสมีการปรับและเข้าสู่สถานะล็อก

พิจารณารูป 3.2(ก) พารามิเตอร์ที่ยังไม่ทราบค่าคือ  $\phi_0$  และระดับแรงดันคิซีของ  $V_{cont}$  สามารถหาค่าได้จากการพิจารณาโดยใช้กราฟแสดงคุณสมบัติของ PD และ VCO ดังแสดงในอยู่รูป 3.2(ข) โดยถ้าเฟสล็อกคูลูปอยู่ในสถานะล็อกแล้วความถี่ของอินพุตและเอท์พุตจะมีค่าเท่ากัน โดย กำหนดให้มีค่าเท่ากับ  $\omega_1$  และทำให้แรงดันที่วงจร VCO ต้องการคือ  $V_1$  ดังในรูป 3.2(ก)



(ก)



(ข)

(ก) รูปคลื่นสัญญาณในแต่ละจุด

(ข) กราฟแสดงคุณสมบัติของ VCO และ PD

รูปที่ 3.2 รูปคลื่นสัญญาณของเฟสล็อกคูลูปในสภาวะล็อก

โดยขนาดแรงดัน  $V_1$  ได้จากส่วนของ PD ซึ่งเกิดจากค่าความผิดพลาดเฟส 0 จากกราฟ  
คุณสมบัติของ PD และ VCO จะได้  $\omega_{out} = \omega_0 + K_{VCO} V_{cont}$  และ  $V_{PD} = K_{PD} \Delta\phi$  ทำให้ได้

$$V_1 = \frac{\omega_1 - \omega_0}{K_{VCO}} \quad (3.1)$$

และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\phi_0 = \frac{V_1}{K_{PD}} \quad (3.2)$$

$$= \frac{\omega_1 - \omega_0}{K_{PD}K_{VCO}} \quad (3.3)$$

จากสมการ 3.3 ทำให้ทราบคุณสมบัติที่สำคัญสองประการ คือ เมื่อความถี่อินพุตเกิดการเปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดความต่างเฟสหรือความผิดพลาดของเฟสขึ้น และค่าผิดพลาดของเฟสจะมีค่าต่ำเมื่อค่า  $K_{PD}K_{VCO}$  ต้องมีค่าสูง โดย  $K_{PD}$  ก็คือ ค่าอัตราขยายของวงจรถักจับเฟสหรือ PD และ  $K_{VCO}$  คือค่าอัตราขยายของวงจรรอสซิทเลเตอร์แบบควบคุมความถี่ด้วยแรงดันไฟฟ้า

### 3.2 การพิจารณาสถานะชั่วขณะของเฟสล็อกในสถานะล็อก

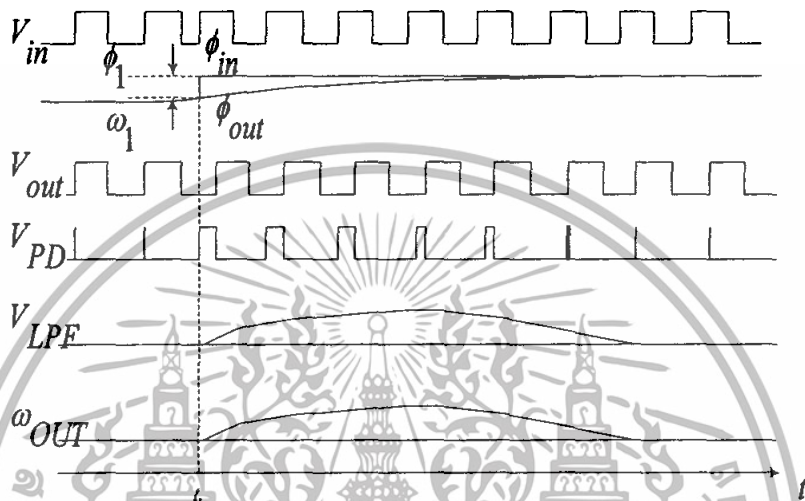
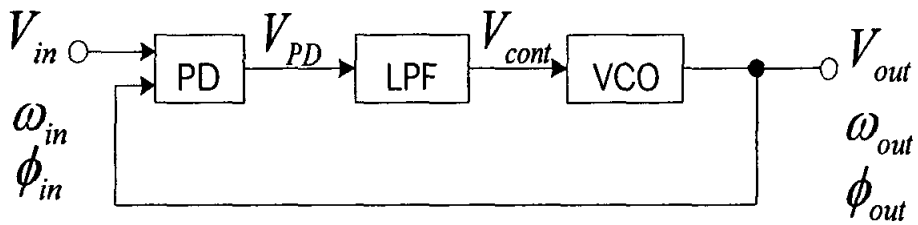
เมื่อวงจรถักจับเฟสอยู่ในสถานะล็อกแล้วเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส หรือความถี่ที่อินพุต จะทำการพิจารณาหาผลการตอบสนองของเฟสล็อกดูว่าเป็นอย่างไร

โดยจะพิจารณาเมื่อเกิดการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่อินพุตก่อน โดยสมมติให้รูปแบบของอินพุตและเอาต์พุตเป็นดังนี้

$$V_{in}(t) = V_A \cos \omega_1 t \quad (3.4)$$

$$V_{out}(t) = V_B \cos(\omega_1 t + \phi_0) \quad (3.5)$$

โดยที่ไม่พิจารณาความถี่ฮาร์โมนิกที่สูงและ  $\phi_0$  คือค่าความผิดพลาดเฟสคงที่ ที่พิจารณารูป 3.3 จะเห็นว่าเฟสอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นในลักษณะเป็นขั้นคือ  $\phi_1$  และเกิดขึ้นที่เวลา  $t = t_1$  จะทำให้เฟสที่อินพุตมีค่าเท่ากับ  $\phi_{in} = \omega_1 t + \phi_{1u}(t + t_1)^2$  ณ เวลานั้นเอาต์พุตของ LPF ยังไม่เพิ่มขึ้นอย่างทันทีทันใดและ VCO ยังคงออสซิลเลตที่ความถี่เดิมคือ  $\omega_1$



รูปที่ 3.3 ผลการตอบสนองของเฟสล็อกคิปรูเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเฟสที่อินพุต

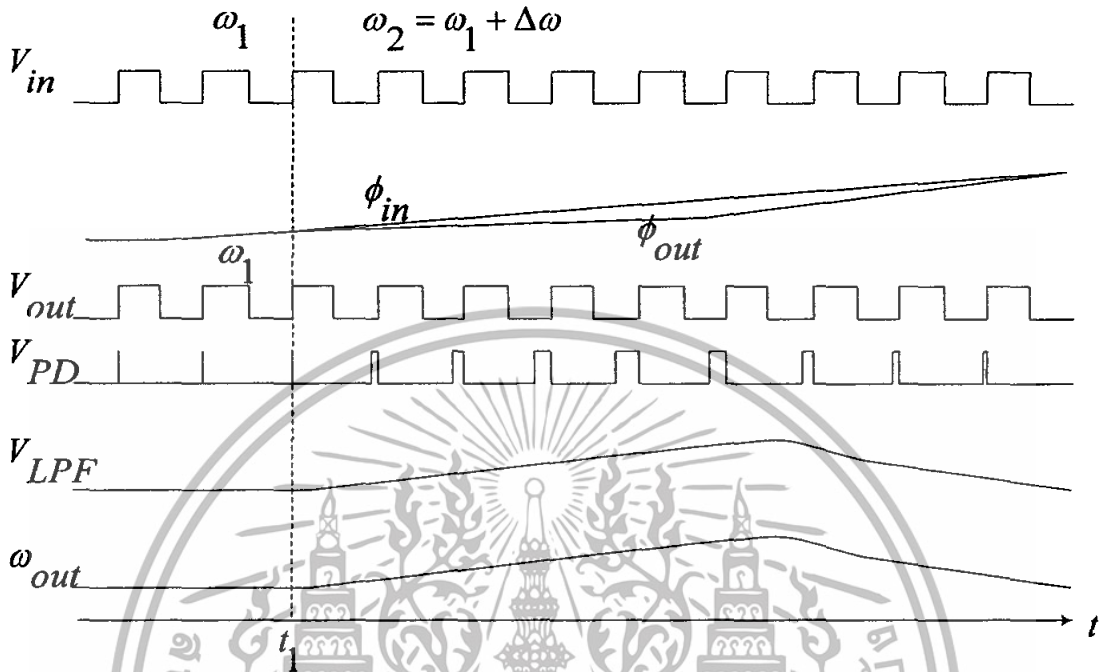
หลังจากนั้นค่าความต่างเฟสของอินพุตกับเอาต์พุตค่อย ๆ เพิ่มขึ้นทำให้พัลส์ขึ้นที่เอาต์พุตของ PD และส่งผลให้เกิด  $V_{LPF}$  เพิ่มขึ้นผลลัพธ์คือทำให้ความถี่ของ VCO เพิ่มขึ้นเพื่อพยายามลดค่าผิดพลาดของเฟสที่สถานะช่วงขณะนี้จะไม่เกิดการลื่นขึ้นเนื่องจากค่าความผิดพลาดเฟสเปลี่ยนแปลงตามเวลา ภายหลังจากที่ความถี่ของ VCO เริ่มเปลี่ยนแล้วเฟสล็อกคิปรูจะกลับสู่สถานะลื่นตามเดิมโดย  $\omega_{out}$  จะกลับมาเท่ากับ  $\omega_1$  นั่นคือ  $V_{LPF}$  และ  $\phi_{out} - \phi_{in}$  จะกลับสู่ค่าเริ่มต้นตามเดิมโดยเมื่อลูปอยู่ในสถานะสงบเอาต์พุตจะมีค่าเท่ากับ

$$V_{out}(t) = V_B \cos[\omega_1 t + \phi_0 + \phi_1 u(t - t_1)] \quad (3.6)$$

สิ่งที่สำคัญเมื่อลูปกลับเข้าสู่สถานะลื่นคือ พารามิเตอร์ทุกตัวจะกลับเข้าสู่สถานะเริ่มต้นทั้งหมดคือ  $\phi_{out} - \phi_{in}$ ,  $V_{LPF}$  และค่าความถี่ของ VCO จะเท่ากับสถานะเริ่มต้น

## สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ต่อไปเป็นการพิจารณาผลการตอบสนองของเฟสล็อกคูลูปเมื่อความถี่อินพุตเปลี่ยนแปลงชั่วขณะ โดยอินพุตเพิ่มขึ้นจากความถี่เดิม  $\Delta\omega$  ที่เวลา  $t = t_1$  ดังแสดงในรูป 3.4



รูปที่ 3.4 ผลตอบสนองของเฟสล็อกคูลูปเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่อินพุต

โดยความถี่เริ่มต้นของ VCO คือ  $\omega_1$  เมื่อความถี่อินพุตเปลี่ยน PD จะกำเนิดพัลส์ความกว้างค่อย ๆ เพิ่มมากขึ้นและ  $V_{LPF}$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นจน  $\omega_{out}$  เข้าใกล้  $\omega_1 + \Delta\omega$  หรือก็คือความถี่อินพุตโดยเอาที่หักจาก PD จะมีค่าลดลง ภายใต้อาณัติสงบ ระดับแรงดันคั่นคี่ที่วางจกรองความถี่มีค่าเท่ากับ  $(\omega_1 + \Delta\omega) - \omega_0/K_{VCO}$  จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของเฟสหรือความถี่ที่อินพุตจะนำมาซึ่งระดับแรงดันเพื่อควบคุมความถี่ VCO เพื่อลดค่าเฟสผิดพลาดลง

### 3.3 เสถียรภาพของเฟสล็อกคูลูปแบบพื้นฐาน

การพิจารณาเกี่ยวกับเสถียรภาพของเฟสล็อกคูลูปจะต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ ดังนั้น ต้องพิจารณาหา  $\Phi_{out}(s)/\Phi_{in}(s)$  ทั้งแบบรูปเปิดและรูปปิด

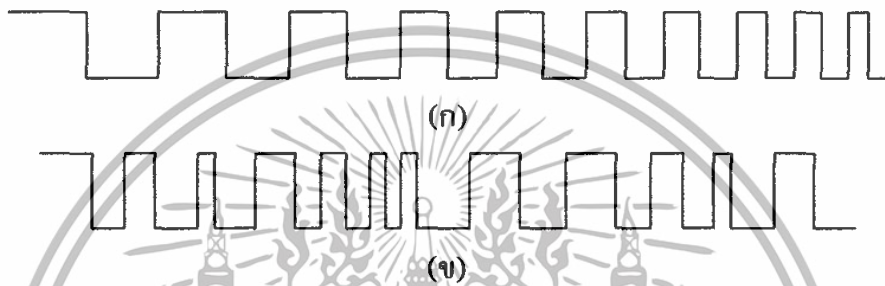
พิจารณา  $\Phi_{out}(s)/\Phi_{in}(s)$  เป็นตัวออกให้ทราบถึงอะไรนั้นให้เปรียบเทียบกับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจกรองความถี่อันดับหนึ่งอย่างง่ายคือ

$$V_{out}(s)/V_{in}(s) = 1/(1 + s/\omega_0)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลง 82176 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากฟังก์ชันถ่ายโอนจะเห็นว่าถ้า  $V_{in}$  เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว  $V_{out}$  ไม่สามารถที่จะตามอินพุตได้ตลอดย่านที่เปลี่ยนแปลงในทำนองเดียวกัน  $\Phi_{out}(s)/\Phi_{in}(s)$  จะแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ว่าเฟสของเอาต์พุตมีการเปลี่ยนแปลงไปกับเฟสของอินพุตอย่างไรเมื่อเฟสอินพุตมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้าหรือเร็ว

การเปลี่ยนแปลงของเฟสกับเวลาแสดงดังรูป 3.5 โดยรูป 3.5(ก) เป็นการเปลี่ยนแปลงของเฟสอย่างรวดช้า ๆ และรูป 3.5(ข) เฟสมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว

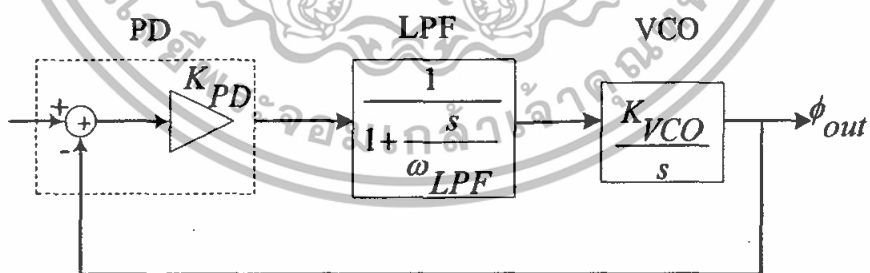


(ก) การเปลี่ยนแปลงของเฟสอย่างช้า ๆ

(ข) การเปลี่ยนแปลงของเฟสอย่างรวดเร็ว

รูปที่ 3.5 การเปลี่ยนแปลงของเฟสกับเวลา

พิจารณา  $\Phi_{out}(s)/\Phi_{in}(s)$  โดยทำการสร้างรูปแบบเชิงเส้นของเฟสล็อกคูปดังแสดงในรูป 3.6



รูปที่ 3.6 รูปแบบเชิงเส้นของเฟสล็อกคูปชนิดที่หนึ่ง (type I PLL)

โดยพิจารณาจากรูป 3.6 ประกอบด้วยวงจร PD ซึ่งเอาต์พุตประกอบด้วยแรงดันคิซีมีค่าเท่ากับ  $K_{PD}(\phi_{out} - \phi_{in})$  โดยความถี่สูงจะถูกจำกัดทิ้งโดยวงจรกรองความถี่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของ PD ในรูปแบบวงจรขยายซึ่งมีค่าอัตราขยายเท่ากับ  $K_{PD}$  และวงจร LPF เป็นวงจรแบบ

อันดับหนึ่งอย่างง่ายมีฟังก์ชันถ่ายโอนคือ  $1/(1 + s/\omega_{LPF})$  ในส่วนวงจร VCO มีฟังก์ชันถ่ายโอน คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$K_{vco}/s$  ส่วน  $\Phi_{in}$  และ  $\Phi_{out}$  คืออินพุตและเอาต์พุตเฟส ตัวอย่างเช่น ถ้าผลรวมของอินพุตเฟสเป็นฟังก์ชันแบบขั้นบันได คือ  $\mathcal{O}_{in}(t)$  นั่นคือ  $\Phi_{in} = \mathcal{O}_{in}/s$

จากรูป 3.6 ฟังก์ชันถ่ายโอนของรูปเปิดคือ

$$H(s) = \frac{\phi_{out}(s)}{\phi_{in}} \Big|_{open} \quad (3.7)$$

$$= K_{PD} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_{LPF}}} \frac{K_{VCO}}{s} \quad (3.8)$$

จากสมการ 3.8 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งโพลของระบบอยู่ที่  $s = -\omega_{LPF}$  และ  $s = 0$  โดยอัตราขยายรูปจะเท่ากับ  $H(s) \Big|_{open}$  เพราะป้อนกับแบบเดิมที่เฟกเตอร์การป้อนกับเป็นหนึ่งโดยระบบที่มีโพลหนึ่งตัวที่จุดกำเนิดเรียกว่า “ชนิดที่หนึ่ง (type 1)”

ต่อไปพิจารณาหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิด ซึ่งมีความสำคัญมากโดยเฟลลือคูลูปจะเข้าสู่สภาวะลือคเมื่อ  $\mathcal{O}_{out}$  เปลี่ยนแปลงเข้าใกล้  $\mathcal{O}_{in}$  โดย  $s$  จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ โดยฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบปิดแสดงดังสมการ 3.9

$$H(s) \Big|_{close} = \frac{K_{PD} K_{VCO}}{\frac{s^2}{\omega_{LPF}^2} + s + K_{PD} K_{VCO}} \quad (3.9)$$

สิ่งที่เราต้องการคือ  $H(s) \Big|_{open}$  จะต้องมีค่าเข้าใกล้หนึ่งเมื่อ  $s$  มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ นั่นก็คืออัตราขยายของรูปมีค่าเป็นอนันต์ ภายใต้สภาวะดังกล่าวจะทำให้เฟลลือคูลูปเข้าสู่สภาวะลือค

จากสมการ 3.9 สามารถหาผลตอบสนองแบบขั้นบันได (step response) ของระบบชนิดที่หนึ่ง (type 1) ได้โดยการพิจารณาเปรียบเทียบกับทฤษฎีของระบบควบคุม (Control System) จากรูปแบบของสมการอันดับสองของระบบดังสมการ 3.10 นำมาเปรียบเทียบกับสมการ 3.9 เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบเพื่อวิเคราะห์ผลตอบสนองแบบขั้นบันไดของระบบแบบที่หนึ่ง (type 1)

$$H(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ  $\omega_n$  คือความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และ  $\zeta$  คือตัวประกอบหน่วง (Damping factor) ซึ่งจากสมการ 3.9 ถ้าจัดให้อยู่ในรูปแบบบรรทัดฐานจะได้ค่าความถี่ธรรมชาติและค่าตัวประกอบหน่วงคือ

$$\omega_n = \sqrt{\omega_{LPF} K_{PD} K_{VCO}} \quad (3.11)$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\omega_{LPF}}{K_{PD} K_{VCO}}} \quad (3.12)$$

และโพลของทั้งสองตัวของระบบอยู่ที่ตำแหน่ง

$$s_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \sqrt{(\zeta^2 - 1)\omega_n^2} \quad (3.13)$$

$$s_{1,2} = (-\zeta \pm \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n \quad (3.14)$$

โดยถ้า  $\zeta > 1$  โพลทั้งสองเป็นจำนวนจริงซึ่งจะทำให้ระบบเกิดโอเวอร์แดมและในทางตรงกันข้ามถ้า  $\zeta < 1$  โพลเป็นจำนวนจินตภาพจะได้ผลการตอบสนองของเอาต์พุตต่อความถี่อินพุตแบบขั้นบันไดโดย  $\omega_{in} = \Delta\omega(t)$  ผลของเอาต์พุตคือ

$$\omega_{out}(t) = \left\{ 1 - e^{-\zeta\omega_n t} \left[ \cos(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t) \right] \right\} \Delta\omega(t) \quad (3.15)$$

$$= \left[ 1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} t + \theta) \right] \Delta\omega(t) \quad (3.16)$$

โดย  $\omega_{out}$  คือผลการเปลี่ยนแปลงของความถี่เอาต์พุต และ  $\theta$  มีค่าเท่ากับ

$$\theta = \sin^{-1} \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.17)$$

รูปคลื่นเอาต์พุตแสดงดังรูป 3.7 จะเห็นว่ามีส่วนประกอบของรูปคลื่นไซน์โดยมีความถี่เท่ากับ

$$\omega = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.18)$$

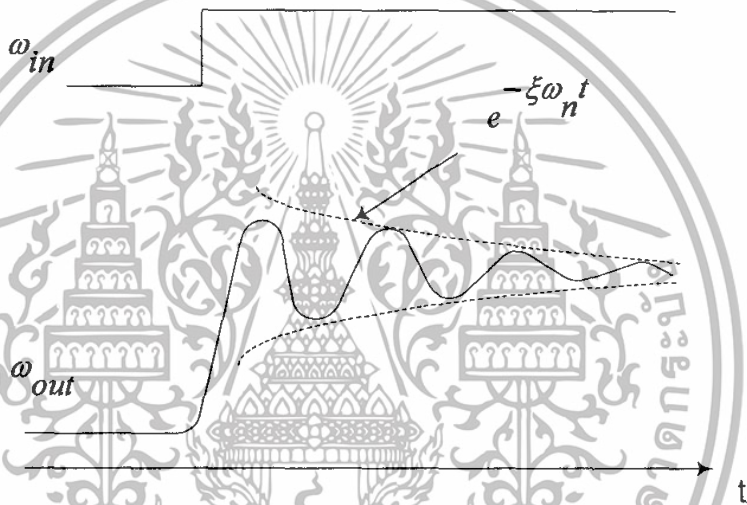
และขนาดของรูปคลื่นไซน์ดังกล่าวจะมีค่าลดลงด้วยค่าเวลากงที่เท่ากับ  $(\zeta\omega_n)^{-1}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเข้าสู่สภาวะสงบของเฟสล็อกดูอย่างรวดเร็วมีความจำเป็นในการนำไปใช้งาน จากสมการ 3.16 ค่าของเอ็กซ์โปเนนเชียลจะลดลงสัมพันธ์กับค่าของเทอม  $\zeta\omega_n$  โดยมีค่าเท่ากับ

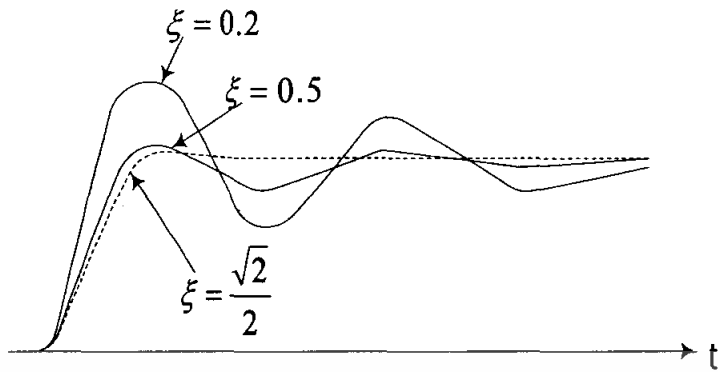
$$\zeta\omega_n = \frac{1}{2} \omega_{LPF} \quad (3.19)$$

จากผลลัพธ์ที่ได้จะเห็นว่าจะต้องมีการเลือกระหว่างความสามารถเข้าสู่สภาวะสงบอย่างรวดเร็วกับแรงดันริบเปิ้ลที่จะไปควบคุม VCO เช่น ถ้าต้องการให้  $\omega_{LPF}$  มีค่าต่ำเพื่อให้สามารถกำจัดความถี่สูงออกจากเอาต์พุต PD แต่มีค่าเวลาเข้าสู่สภาวะสงบ (Settling time) มาก



รูปที่ 3.7 การตอบสนองของเฟสล็อกดูต่อการเปลี่ยนแปลงความถี่แบบขั้นบันได

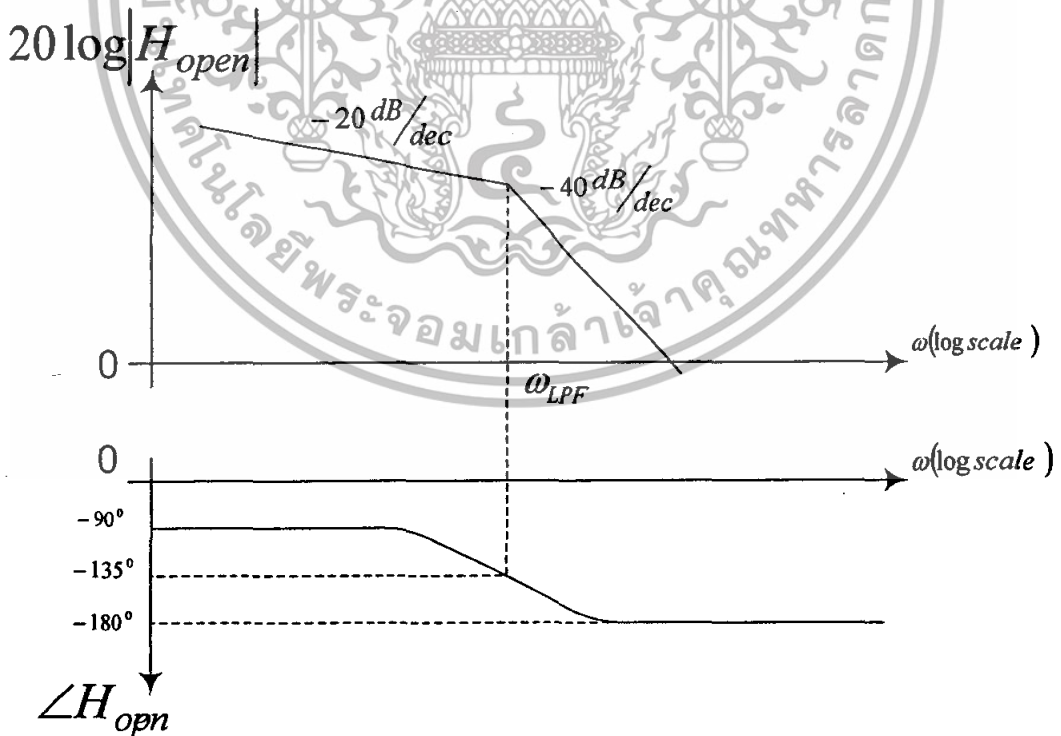
การเลือกค่าของ  $\zeta$  นั้นมีความสำคัญมาก ดังแสดงในรูป 3.8 แสดงผลการตอบสนองเมื่อค่า  $\zeta$  เปลี่ยนเป็นค่าหลายค่าโดยที่  $\omega_n$  มีค่าคงที่ โดยผลการตอบสนองจะไม่มีการกระเพื่อม เมื่อค่าของ  $\zeta < 1$  ดังนั้นการเลือกค่า  $\zeta$  จึงมีความสำคัญและนำมาซึ่งการต้องเลือกระหว่าง LPF และค่าเวลาเข้าสู่สภาวะสงบ (Settling time) และจากสมการ 3.3 ถ้าเราต้องการลดค่าความผิดพลาดเฟสให้น้อยลงจะต้องลดค่าของ  $K_{PD}K_{VCO}$  ลงแต่จากสมการ 3.12 จะทำให้  $\zeta$  เพิ่มขึ้นทำให้ระบบมีเสถียรภาพต่ำลง



รูปที่ 3.8 การตอบสนองของระบบเมื่อค่า  $\zeta$  เปลี่ยนแปลง

สรุปแล้วคุณสมบัติของเฟสล็อคลูปชนิดที่หนึ่ง (type I PLL) จะต้องมีการเลือกระหว่างค่าเวลาเข้าสู่สภาวะสงบ (Settling time), แร่งดันริบเบิลที่จะไปควบคุม VCO, ค่าผิดพลาดเฟสและเสถียรภาพของระบบ

การแสดงเสถียรภาพของระบบอาจแสดงได้ด้วยกราฟโบดพล็อตทั้งขนาด และ ความถี่ ดังรูป 3.9 โดยใช้สมการ 3.8



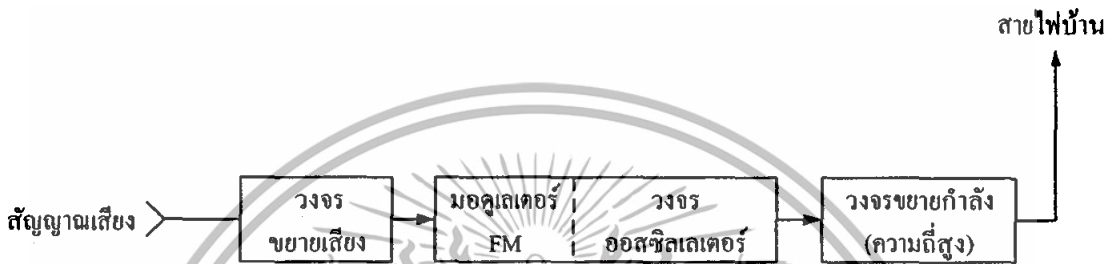
รูปที่ 3.9 กราฟโบดพล็อตแสดงเสถียรภาพของ type I PLL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### เครื่องรับส่งวิทยุ

#### 4.1 เครื่องส่งวิทยุ FM (FREQUENCY MODULATION TRANSMITTER)



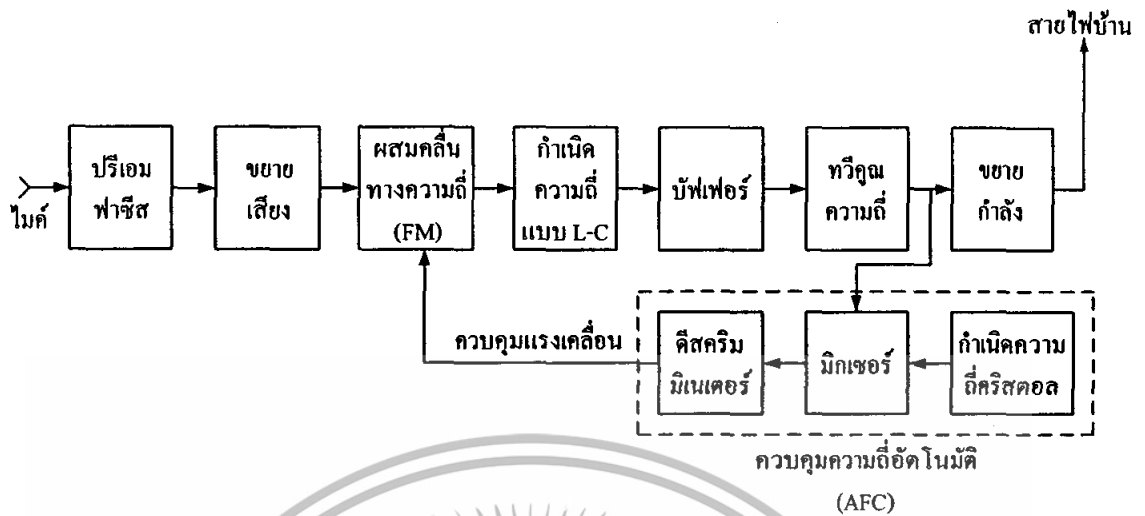
รูปที่ 4.1 แผนผังเครื่องส่ง FM อย่างง่าย

จากแผนผังของเครื่องส่ง FM สัญญาณเสียงผ่านการขยายแล้วป้อนสู่มอดูเลเตอร์ วงจรมอดูเลเตอร์นี้จะทำการเปลี่ยนความถี่ของออสซิลเลเตอร์ โดยมีช่วงความถี่เบี่ยงเบนและอัตราการเบี่ยงเบนขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดและความถี่ของสัญญาณเสียงตามลำดับ พาหะ FM ที่ถูกมอดูเลตแล้วจะถูกขยายโดยภาตขยายกำลังสุดท้ายป้อนสู่สายอากาศเพื่อส่งผ่านสายไฟบ้านต่อไป

เครื่องส่งวิทยุ FM แบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ แบบ FM โดยตรง (Direct FM) และแบบ FM โดยอ้อม (Indirect FM.)

##### 4.1.1 เครื่องส่งแบบ FM โดยตรง (Direct FM)

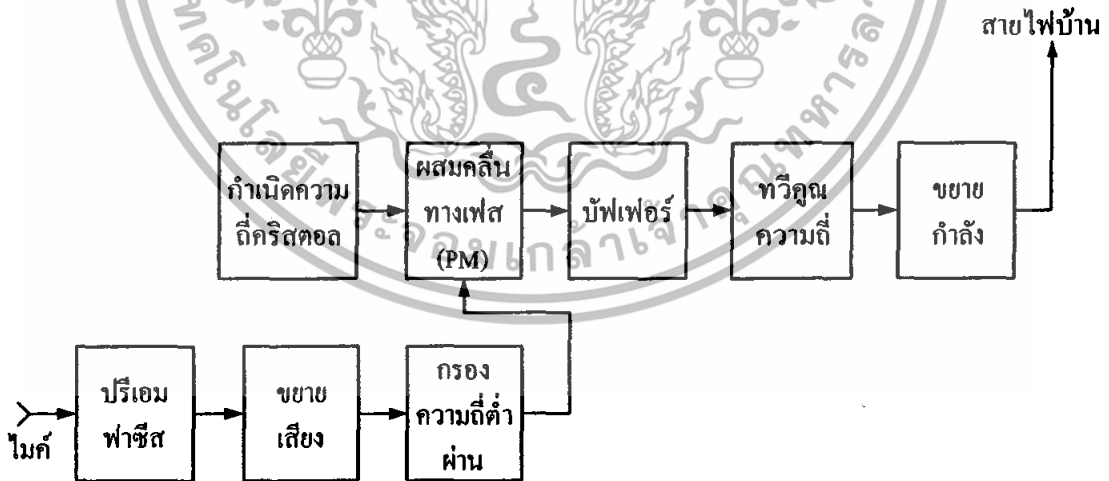
หลักการสำคัญอยู่ที่ว่าจะต้องใช้ส่วนประกอบที่เป็นรีแอกแตนซ์ (Reactance) ไปควบคุมความถี่ของวงจรกำเนิดความถี่ (OSC.) เพื่อให้ความถี่นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามสัญญาณของความถี่เสียงโดยตรง ดังนั้นวงจรกำหนดความถี่ของวงจรกำเนิดความถี่ จึงต้องเป็นแบบ LC



รูปที่ 4.2 ภาคว่างๆของเครื่องส่ง FM แบบ FM โดยตรง

4.1.2 เครื่องส่งแบบ FM โดยอ้อม (Indirect FM)

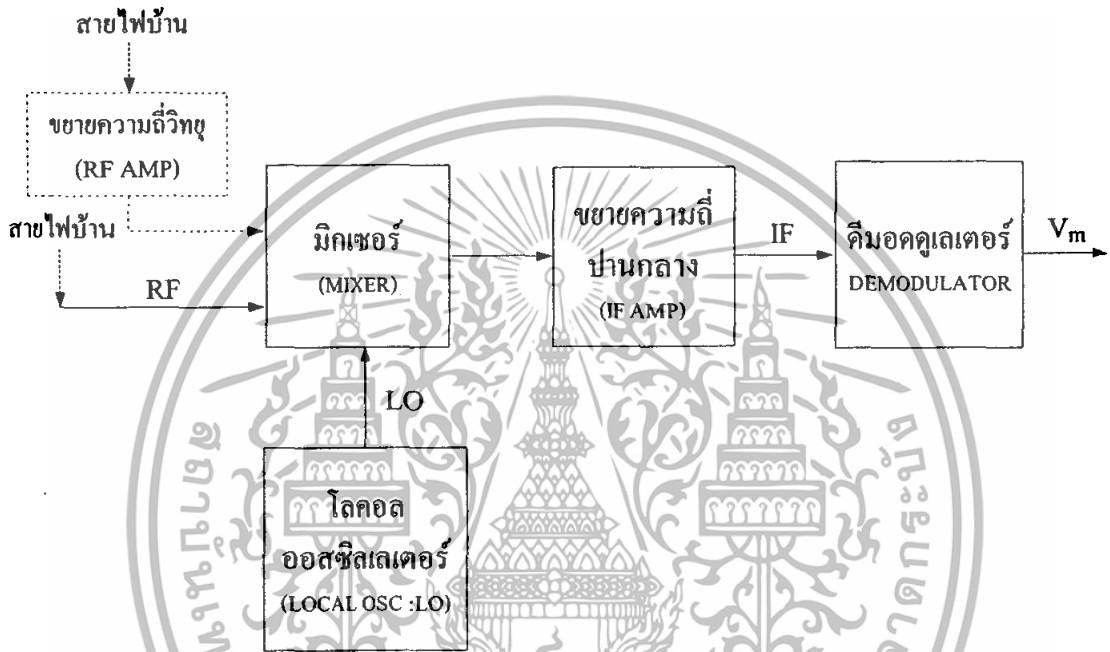
หลักการสำคัญคือระบบการผสมคลื่นจะต้องเป็นแบบ FM และทำให้เป็น FM โดยอาศัย วงจรเปลี่ยนสัญญาณเชิง ความมุ่งหมายหลักของเครื่องส่งแบบนี้คือ ต้องการดัดแปลงให้ระบบ FM สามารถใช้คริสตอลควบคุมวงจรกำเนิดความถี่ได้



รูปที่ 4.3 ภาคว่างๆของเครื่องส่ง FM และ FM โดยอ้อม

## 4.2 เครื่องรับวิทยุซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (SUPERHETERODYNE RECIEVER)

จากข้อบกพร่องของเครื่องรับ TRF ได้ถูกปรับปรุงแก้ไขโดย เปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่รับได้จากสายไฟฟ้า เป็นความถี่เดียวกัน ซึ่งเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่ปานกลาง (Intermediate Frequency : IF) ซึ่งมีบล็อกไดอะแกรมดังรูป



รูปที่ 4.4 บล็อกไดอะแกรมอย่างง่ายของเครื่องรับ SUPERHETERODYNE

สัญญาณที่รับได้จากสายไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนให้เป็นความถี่ปานกลางหรือ IF โดยสัญญาณจากสายไฟฟ้าจะถูกมิกซ์กับความถี่จากวงจรออสซิลเลเตอร์ : LO ที่อยู่ในเครื่องรับ

วงจรมิกเซอร์ (MIXER) หรือคอนเวอร์เตอร์ (CONVERTOR) ใช้หลักการทํางานเหมือน AM มอดูเลเตอร์ ซึ่งอาจใช้ตัวอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น หรือ วงจรบาลานซ์มอดูเลเตอร์ ความถี่ปานกลางหรือ IF อาจเป็นความถี่ผลบวกหรือผลต่างของความถี่จากสายไฟฟ้ากับความถี่ที่ออสซิลเลเตอร์ผลิต

จากการที่ความถี่ของสัญญาณวิทยุที่รับได้ :  $f_{RF}$  ทุกค่า ถูกเปลี่ยนเป็นความถี่ IF ค่าเดียวกัน วงจรกรองความถี่ IF จึงเป็นวงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่มีค่า  $f_p$  คงที่ จึงสามารถออกแบบให้ความกว้างของแถบความถี่ให้คงที่ตามที่ต้องการได้ ดังนั้นความกว้างของแถบความถี่ของเครื่องรับ SUPERHETERODYNE จึงขึ้นอยู่กับค่าความกว้างของแถบความถี่ของ IF ซึ่งจะมีค่าคงที่ไม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลี่ยนแปลงตามค่าความถี่ของคลื่นวิทยุ นั่นคือความสามารถในการเลือกรับช่องรับสัญญาณได้ถูกปรับปรุงขึ้น

ในเวลาเดียวกัน จากการศึกษาที่สามารถกำหนดค่า BW ของเครื่องรับได้ ระดับของสัญญาณรบกวนจะสามารถควบคุมได้เช่นเดียวกัน ยิ่งไปกว่านั้นความถี่ IF ของเครื่องรับวิทยุส่วนใหญ่ จะเลือกใช้ค่าผลต่างของความถี่  $f_{RF}$  กับ  $f_{LO}$  ความถี่ IF จึงมีค่าต่ำกว่าความถี่  $f_{RF}$  จึงสามารถขยายได้ง่ายกว่า

นั่นคือจากการที่สามารถกำหนด BW ได้ ระดับของสัญญาณรบกวนจึงถูกทำให้ลดลง ประกอบกับการที่ความถี่ IF มีค่าต่ำลงมาจากความถี่ RF จึงสามารถสร้างวงจรขยาย IF ที่มีอัตราขยายที่สูงมาก ความไวในการรับสัญญาณก็ได้ถูกปรับปรุงให้ไวมากขึ้นด้วยค่าความถี่ IF ที่นิยมเลือกใช้แสดงในตารางที่ 4.1

ความถี่ที่โคคอลลอสซิลเลเตอร์ผลิตจะต้องเปลี่ยนตามความถี่ของช่องสัญญาณที่รับ ดังนั้นในวงจรเครื่องรับแบบ SUPERHETERODYNE จะใช้ C ที่สามารถปรับค่าพร้อมกันได้ 2-4 ตัว

ตารางที่ 4.1 ความถี่ IF ที่นิยมเลือกใช้

ความถี่	ตัวกรองความถี่	BW ของตัวกรองความถี่	ระบบที่ใช้งาน
455 KHz	LC ตัวกรองเซรามิก	$\pm 5\text{KHz}$ หรือ เลือกรับได้ $\pm 5\text{KHz}$ หรือต่ำกว่าครึ่งที่ คาบตัวขึ้นอยู่กับตัวกรอง แต่ละเบอร์	* เครื่องรับ AM * ใช้เป็น IF2 ในเครื่องรับ FM แถบความถี่แคบหรือ AM ในย่าน HF
10.7MHz	LC ตัวกรองเซรามิก	$\pm 100\text{KHz}$ หรือ เลือกรับได้ $\pm 100\text{KHz}$	* เครื่องรับ FM แถบความถี่กว้าง * IF1 ในเครื่องรับ FM แถบ ความถี่แคบหรือ AM ในย่าน HF
38.9 MHz 43.75 MHz 58.0 MHz			เครื่องรับโทรทัศน์
60.0 MHz 70.0 MHz 140.0 MHz			เครื่องรับไมโครเวฟหรือดาวเทียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถึงแม้ว่า ความกว้างแถบความถี่ของเครื่องรับ SUPERHETERODYNE จะสามารถกำหนดได้จากแถบความถี่ของตัวกรองความถี่ปานกลาง สัญญาณที่เครื่องรับ SUPERHETERODYNE รับผิดชอบ อาจถูกรบกวนจากความถี่เงา (Image Frequency) ถ้าหากเราไม่กำจัดมันออกไป

ความถี่เงา (Image Frequency) คือความถี่ของสัญญาณวิทยุอีกสัญญาณหนึ่ง ที่ MIX กับ ความถี่ของ LOCAL OSCILLATOR แล้วได้ความถี่ปานกลางค่าเดียวกับ ช่องสัญญาณที่เราต้องการรับ

ถ้าให้

$f_{RF}$  คือ ช่องความถี่ที่ต้องการรับ

$f_{LO}$  คือ ความถี่ของ LOCAL OSCILLATOR ที่เราผลิต

$f_{IF}$  คือ ค่าความถี่ปานกลาง

$f_{LO}$  จะมีค่าเป็น  $f_{RF} + f_{IF}$  หรือ  $f_{RF} - f_{IF}$

ถ้า  $f_{LO}$  มีค่าเป็น  $f_{RF} + f_{IF}$  อีกความถี่หนึ่งที่ MIX กับ  $f_{RF} + f_{IF}$  แล้วได้ความถี่ IF ก็คือ  $f_{RF} + 2f_{IF}$

$$f_{LO} - f_{RF} = f_{RF} + f_{IF} - f_{RF} = f_{IF} \quad (4.1)$$

และ  $f_{RF} + 2f_{IF} - f_{LO} = f_{RF} + 2f_{IF} - (f_{RF} + f_{IF}) = f_{IF}$  (4.2)

ความถี่เงา:  $f_{im}$  ก็คือ  $f_{RF} + 2f_{IF}$

ถ้าความถี่  $f_{LO} = f_{RF} - f_{IF}$  ความถี่เงาจะมีค่าเป็น  $f_{im} = f_{RF} - 2f_{IF}$

นั่นคือ ความถี่เงา อาจมีค่าสูงกว่า หรือต่ำกว่า ช่องความถี่ที่เราต้องการรับอยู่ สองเท่าของค่าความถี่ปานกลาง หรือ

$$F_{im} = f_{RF} \pm 2f_{IF} \quad (4.3)$$

โดยที่  $f_{LO} = f_{RF} \pm 2f_{IF}$  (4.4)

การกำจัดกรบกวนของช่องความถี่เงา ทำได้โดย

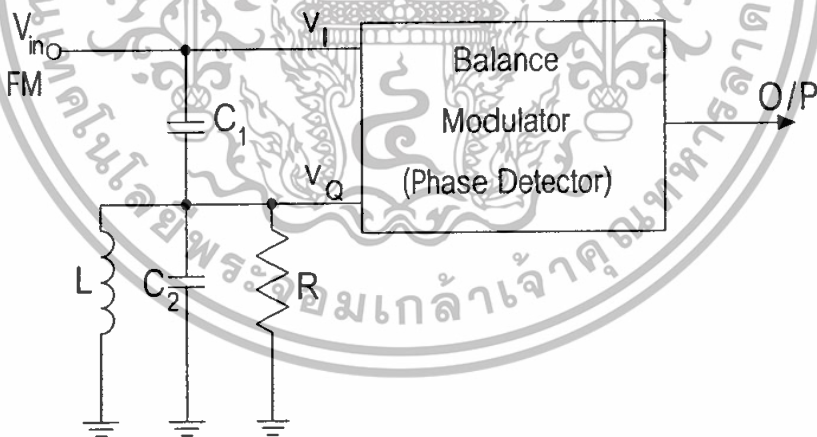
- นำสัญญาณ RF ของช่องที่ต้องการรับไปผ่านวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ก่อนที่จะนำไป MIX กับ LOCAL OSCILLATOR และ
- เลือกค่าความถี่ IF ให้สูงเพียงพอที่จะทำให้ความถี่เงา ซึ่งมีค่าความถี่ ห่างจากช่องสัญญาณที่ต้องการอยู่  $2 f_{IF}$  สามารถถูกรองออกไปโดยวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน ของช่องสัญญาณที่ต้องการ

วงจรกรองแถบความถี่ผ่านของช่องสัญญาณ RF ที่เราต้องการนั้น สามารถใช้วงจรกรองแถบความถี่ที่มีความกว้างของแถบผ่านกว้างๆ หรือ Q ต่ำๆ ได้ หน้าที่ของวงจรกรองแถบความถี่นี้เพียงเพื่อกำจัดความถี่เงาออกไปเท่านั้น ไม่จำเป็นต้องกำจัดช่องความถี่ข้างเคียง ช่องความถี่ข้างเคียงจะถูกกำจัดออกโดยวงจรกรองแถบความถี่ผ่านของ IF

ดังนั้นการออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ของช่อง RF ผ่าน จึงสามารถใช้วงจรกรองแถบความถี่ผ่านที่ Q ต่ำ ( $Q \leq 5$ ) ซึ่งเป็นวงจรที่ออกแบบและสร้างได้โดยง่าย

### 4.3 Phase shift or Quadrature detector

วงจร FM Demodulator ที่นิยมใช้กันมากที่สุดวงจรหนึ่งคือ Quadrature detector เพราะสามารถแปลงเป็น IC ได้ง่าย ในการนำไปใช้งาน IC ตัวนี้ต้องการเพียงสัญญาณสองสัญญาณป้อนให้ balance modulator (Phase Detector) เท่านั้น โดยสัญญาณหนึ่งเป็นสัญญาณ FM อีกสัญญาณหนึ่งเป็นสัญญาณจากวงจรที่เปลี่ยนแปลงค่าเฟสโดยวงจร Tuned ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเฟสจะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณอินพุต FM ทำให้เอาต์พุตของ balance modulator (Phase Detector) ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณอินพุต



รูปที่ 4.5 วงจร FM Demodulator

Phase Detector สร้างมาจากวงจร balance modulator ซึ่งเอาต์พุต (output) ของ balance modulator มีลักษณะดังนี้

$$X_o(V_o \text{ or } I_o) = a_1 v_1 + a_2 v_1 v_Q$$

โดย  $v_1 = V_1 \sin \omega_c t$  และ  $v_Q = V_2 \sin(\omega_c t + \phi)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 a_2 V_1 V_Q &= a_2 V_1 \sin \omega_c t \cdot V_2 \sin(\omega_c t + \phi) \\
 &= B \cos(\omega_c t + \phi - \omega_c t) - B \cos(\omega_c t + \phi + \omega_c t) \\
 &= B \cos \phi - B \cos(2\omega_c t + \phi)
 \end{aligned}$$

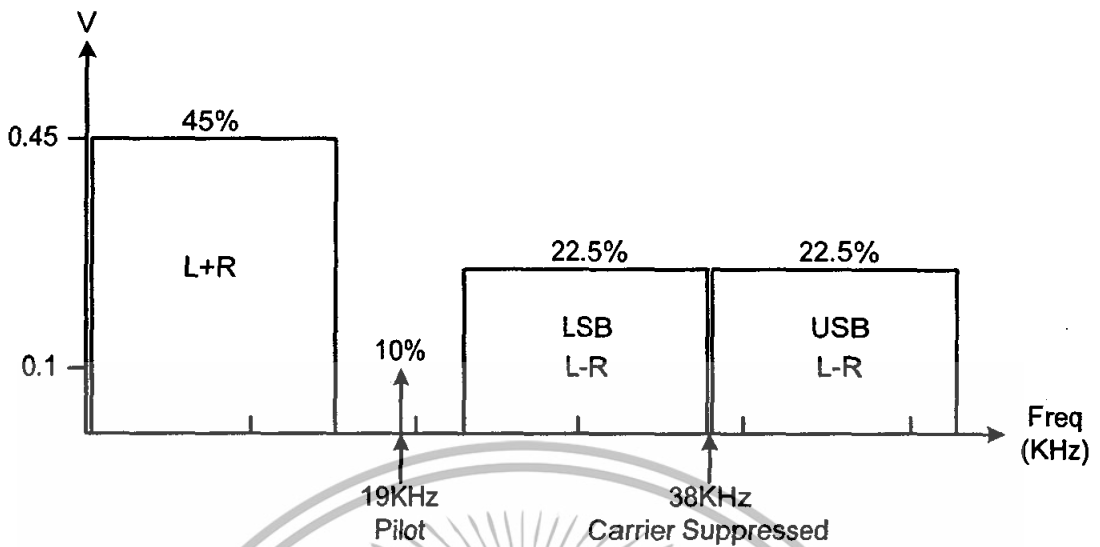
องค์ประกอบความถี่สูงสามารถกรองออกด้วยวงจรกรองความถี่ได้ ดังนั้น เมื่อนำมาใช้เป็น Phase Detector ค่า  $\phi$  จะเป็นผลมาจาก  $m_f$   $\omega_m$  ทำให้สมการของ balance modulator เป็นดังนี้

$$X_o = C \sin(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t) + B \cos(\phi(m_f, \omega_m)) - B \cos[2(\omega_c t + m_f \sin \omega_m t) + \phi(m_f, \omega_m)]$$

ทำให้ได้  $B \cos(\phi(m_f, \omega_m))$  องค์ประกอบที่ประกอบด้วย  $\omega_c$  และ  $2\omega_c$  สามารถกรองทิ้งได้

#### 4.4 ระบบ FM สเตอริโอมัลติเพล็กซ์

ระบบ FM สเตอริโอจะต้องทำการออกแบบให้เครื่องรับระบบ FM ธรรมดา (โมโน) สามารถรับสัญญาณได้ตามปกติ เรียกว่า ออกแบบให้คอมแพติเบิ้ล (Compatible) ดังนั้นเครื่องส่งจะต้องส่งข่าวสารทั้งช่องซ้ายและขวาทั้งคู่ โดยคงย่านความถี่ของสัญญาณเสียง (50 เฮิรตซ์ ถึง 15 กิโลเฮิรตซ์) ตามปกติเอาไว้ สัญญาณนี้เรียกว่า สัญญาณ (L+R) นอกจากนี้ในระบบ FM สเตอริโอจะต้องส่งสัญญาณ (L-R) มาด้วย สัญญาณ (L-R) นี้จะผ่านการมอดูเลตแบบ DSBSC มาก่อน เนื่องจากการคิ่อมอดสัญญาณ DSB ก่อนข้างขั้วบวก ดังนั้นเครื่องส่งจำเป็นต้องส่งพาหะนำคลื่น (Pilot Carrier) มาด้วย เพื่อช่วยในการซิงค์ (Synchronize) กับพาหะรอง (Sub carrier) ที่เครื่องส่งความถี่ของพาหะนำคลื่นเท่ากับ 19 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งเท่ากับครึ่งหนึ่งของพาหะรอง 38 กิโลเฮิรตซ์พอดีกรรมวิธีที่นำเอาสัญญาณ 2 ชนิด คือ (L+R) กับ (L-R) ส่งมาพร้อมกัน โดยใช้พาหะหลักร่วมกันนี้เรียกว่า การมัลติเพล็กซ์ (Multiplex)

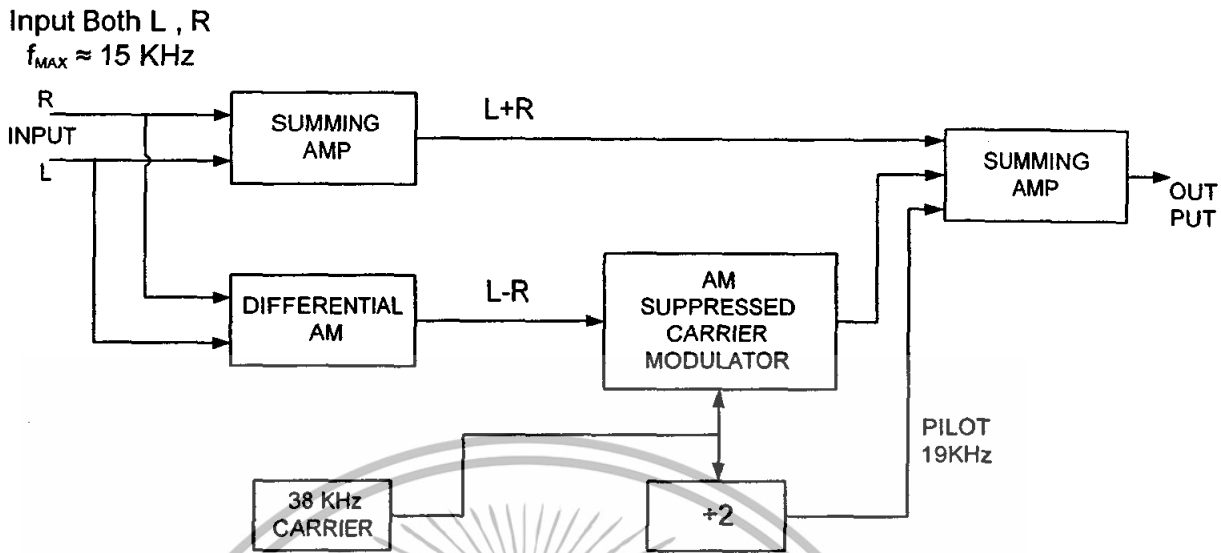


รูปที่ 4.6 องค์ประกอบความถี่ของ Stereo Multiplex

จากรูปสัญญาณที่เกิดจากการมอดูเลตเฟล็กซ์จะประกอบด้วยสัญญาณ (L+R) สัญญาณไฟลัด 19 กิโลเฮิร์ตซ์ และสัญญาณพาหะรอง (L-R) 38 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็น DSB เครื่องรับ FM โมโนธรรมดาคงจะรับได้แต่เฉพาะสัญญาณ (L+R) ในช่วงความถี่ประมาณ 50 เฮิร์ตซ์ ถึง 15 กิโลเฮิร์ตซ์ เท่านั้น สัญญาณเสียงที่ออกจากลำโพงจะเป็นสัญญาณรวมทั้งแขนเนลซ้ายและขวาไม่มีการแยกเสียงเป็นสเตอริโอ (Stereo Separation) สำหรับเครื่องรับ FM สเตอริโอจะรับเอาสัญญาณทั้งหมดมาผ่านขบวนการดีมัลติเพล็กซ์ (Demultiplex) ซึ่งเป็นขบวนการตรงข้ามกับการมอดูเลตเฟล็กซ์เพื่อแยกสัญญาณเสียงออกเป็นแขนเนลซ้ายและขวา

#### 4.4.1 เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอ มอดูเลตเฟล็กซ์ ( FM Stereo Multiplex Transmitter )

วิทยุ FM สเตอริโอ มอดูเลตเฟล็กซ์ เป็นวิทยุที่กำเนิดขึ้นมาเพื่อตอบสนองความต้องการของมนุษย์ ที่ต้องการให้เสียงที่เครื่องรับ รับ ได้มีทิศทางของแหล่งกำเนิดเสียงมาจากหลายทิศทางเหมือนต้นกำเนิดเสียงจริงๆ



รูปที่ 4.7 เครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

จากบล็อกไดอะแกรมของเครื่องส่งวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์ สัญญาณเสียงที่กำหนดขึ้นจากไมโครโฟนเซ็นเซอร์ซ้าย (L) และขวา (R) จะผ่านวงจรขยายแล้วนำมาป้อนแก่วงจร Summing Amp เกิดเป็นสัญญาณ (L+R) สำหรับสัญญาณ (R) อีกทางหนึ่งจะป้อนแก่วงจร Differential Amp เกิดเป็นสัญญาณ (L-R) สัญญาณ (L-R) จะป้อนไปให้วงจร AM Suppressed Carrier Modulator โดยใช้พาหะรอง 38 กิโลเฮิร์ตซ์ พาหะรองนี้กำเนิดจากออสซิลเลเตอร์ 38 กิโลเฮิร์ตซ์ เอาต์พุตที่ได้จาก วงจร Modulator จะเป็นสัญญาณ DSB ของ (L-R) สัญญาณนี้จะผ่านการขยายแล้วป้อนไปให้แก่อากาศส่งเช่นเดียวกับสัญญาณ (L+R) ซึ่งจะต้องหน่วงเวลาไว้เล็กน้อยเพื่อชดเชยเวลาที่สัญญาณ (L-R) ต้องเสียไปในการมอดูเลต ทำให้สัญญาณทั้ง (L+R) และ (L-R) มาถึงอากาศส่งพร้อมๆกัน นอกจากนี้สัญญาณไฟล๊อคความถี่ 19 กิโลเฮิร์ตซ์จากการนำเอาพาหะรอง 38 กิโลเฮิร์ตซ์ เข้าวงจรหาร 2 ก็ป้อนให้อากาศส่งด้วยเช่นกัน สัญญาณทั้งหมดนี้จะมอดูเลตแบบ FM (โดยใช้พาหะหลักร่วมกัน)

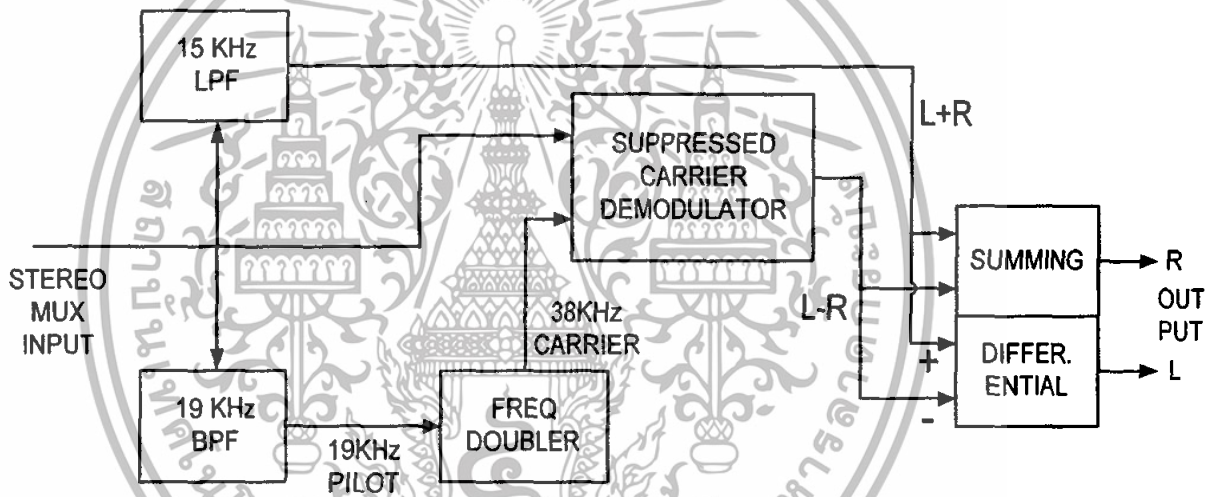
มาตรฐานวิทยุกระจายเสียง FM กำหนดไว้ว่าความถี่เบี่ยงเบนจะต้องเท่ากับ  $\pm 75$  กิโลเฮิร์ตซ์ ไม่ว่าจะ เป็น โม โน หรือ สเตอริโอ ดังนั้นในระบบสเตอริโอ สัญญาณเสียงจะต้องลดเปอร์เซ็นต์การมอดูเลตลงไปเล็กน้อยเนื่องจากเราต้องมอดูเลตสัญญาณไฟล๊อค 19 กิโลเฮิร์ตซ์ไปด้วย สัญญาณไฟล๊อคนี้จะมอดูเลตไว้ 10 เปอร์เซ็นต์ของความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด  $\pm 75$  กิโลเฮิร์ตซ์ หรือ  $\pm 75$  กิโลเฮิร์ตซ์  $\times 10$  เปอร์เซ็นต์ =  $\pm 7.5$  กิโลเฮิร์ตซ์ ฉะนั้นสัญญาณเสียงที่เข้ามอดูเลตจึงมอดูเลตลดลงไปอีก 90 เปอร์เซ็นต์ หรือ  $\pm 75$  กิโลเฮิร์ตซ์  $\times 90$  เปอร์เซ็นต์ =  $\pm 67.5$  กิโลเฮิร์ตซ์ ปริมาณการมอดูเลต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

90 เฮอร์เซ็นต์ กับ 100 เฮอร์เซ็นต์ ผิดกันเพียง 10 เฮอร์เซ็นต์เท่านั้น ผู้ฟังจะสังเกตไม่ออกว่าความดังลดลง

สังเกตว่า ในส่วนที่จะเข้ามาออกดูเลต 90 เฮอร์เซ็นต์ของสัญญาณเสียงนี้ ยังจะต้องแบ่งอีก 2 ส่วนสำหรับ (L+R) กับ (L-R) เท่าๆกันอีก แต่ความจริงไม่เป็นเช่นนั้น เพราะสัญญาณ (L+R) กับ (L-R) รวมกันจะไม่ทำให้ความถี่เบี่ยงเบนเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า เนื่องจากเมื่อสัญญาณ (L+R) มีค่ามาก สัญญาณ (L-R) จะมีค่าน้อยและในทางกลับกันเมื่อสัญญาณ (L+R) มีค่าน้อย สัญญาณ (L-R) จะมีค่ามาก ดังนั้นการเบี่ยงเบนความถี่จะไม่มีโอกาสเกินได้

#### 4.4.2 เครื่องรับ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์



รูปที่ 4.8 เครื่องรับวิทยุ FM สเตอริโอ มัลติเพล็กซ์

เครื่องรับสเตอริโอจะนำสัญญาณที่รับได้มากรองแยกเอาแต่ละส่วนออกมาโดยใช้ฟิลเตอร์ชนิดโลพาซซึ่งจะได้ความถี่ต่ำผ่าน 15 กิโลเฮิร์ตซ์ และกรองเอาสัญญาณ (L+R) และใช้ฟิลเตอร์ชนิดแบนด์พาสเพื่อกรองสัญญาณพาหะไฟลิต 19 กิโลเฮิร์ตซ์ แล้วนำสัญญาณไฟลิตเข้าวงจรคูณ 2 กลายเป็นสัญญาณพาหะรอง 38 กิโลเฮิร์ตซ์ ที่มีค่าความถี่และเฟสสอดคล้องกับพาหะรองที่เครื่องส่ง นำสัญญาณมัลติเพล็กซ์ และสัญญาณ 38 กิโลเฮิร์ตซ์ เข้าสู่วงจรดีมอดสัญญาณ จะได้สัญญาณ (L-R) เมื่อได้สัญญาณ (L-R) กับ (L+R) จะแยกนำไปรวมกันที่วงจร Summing เพื่อแยกสัญญาณเสียงสเตอริโอ (R) และวงจร Differential เพื่อแยกสัญญาณเสียงสเตอริโอ (L) ออกไปยังลำโพงแต่ละข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.5 มัลติเพล็กซ์เซอร์ (MULTIPLEXER)

มัลติเพล็กซ์เซอร์ หรือนิยมเรียกว่า มุก (MUX) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการรวมข้อมูล (Multiplexer) จากอุปกรณ์ส่งข้อมูล (Terminal) การทำงานของมัลติเพล็กซ์เซอร์ มัลติเพล็กซ์เซอร์จะรับสัญญาณข้อมูลจากผู้ส่งข้อมูลจากแหล่งต้นทางต่างๆ ซึ่งต้องการจะส่งข้อมูลไปยังปลายทางในที่แตกต่างกัน ดังนั้นสัญญาณข้อมูลต่างๆ เมื่อผ่านมัลติเพล็กซ์เซอร์ มัลติเพล็กซ์เซอร์ก็จะเรียงรวม (มัลติเพล็กซ์) กันอยู่ในสายส่งข้อมูลเพียงสายเดียว และเมื่อสัญญาณข้อมูลทั้งหมดมา ถึงเครื่องมัลติเพล็กซ์เซอร์ซึ่งเรียกว่า อุปกรณ์ดีมัลติเพล็กซ์เซอร์อีกเครื่องหนึ่งทางปลายทางสัญญาณทั้งหมดก็จะถูกแยก (ดีมัลติเพล็กซ์) ออกจากกัน ไปตามเครื่องรับปลายทางของแต่ละช่องทางสายส่งข้อมูลที่ใช้ในการส่งข้อมูลจะต้องมีความจุสูง จึงจะสามารถรองรับปริมาณข้อมูลจำนวนมากที่ถูกส่งผ่านมพร้อมๆ กันได้ สายส่งข้อมูลดังกล่าว ได้แก่ สายโคแอก สายไฟเบอร์ออปติคัล ไลน์ไมโครเวฟ และคลื่นดาวเทียม

วิธีการรวมช่องทางการสื่อสารข้อมูล หรือการมัลติเพล็กซ์ที่จะกล่าวถึงในที่นี้มีอยู่ 3 วิธี คือ

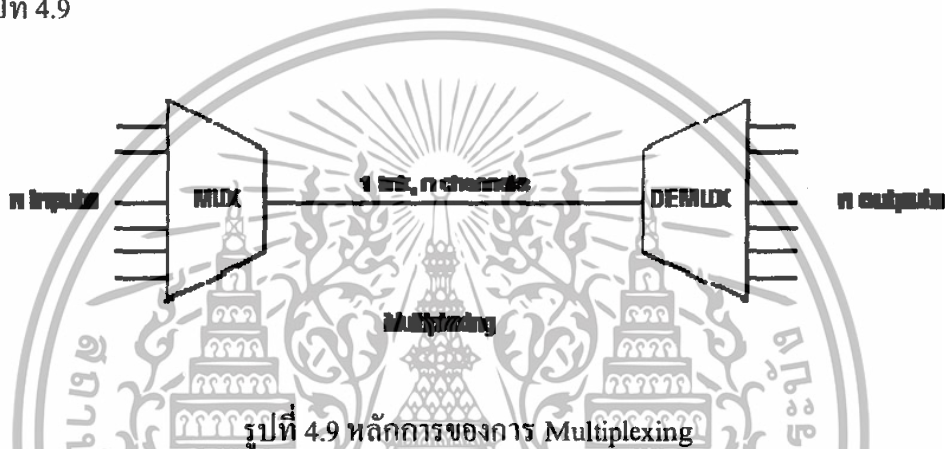
1. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามความถี่ (Frequency Division Multiplexing) หรือ FDM ซึ่งเป็นแบบที่นิยมใช้กันมากที่สุด โดยเฉพาะด้านวิทยุและโทรทัศน์
2. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลา (Time Division Multiplexing) หรือ TDM ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อของซิงโครนัส TDM (Synchronous TDM) ส่วนใหญ่จะใช้ในการมัลติเพล็กซ์สัญญาณเสียงดิจิทัล เช่น แผ่นเพลง CD
3. การมัลติเพล็กซ์แบบแบ่งตามเวลาด้วยสถิติ (Statistical Time Division Multiplexing) หรือ STDM ซึ่งมีชื่อเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า อะซิงโครนัส TDM (Asynchronous TDM) หรืออินเทลลิเจนต์ TDM (Intelligent TDM) ในที่นี้เราจะใช้ชื่อเรียกสั้นๆ ว่า STDM สำหรับ STDM เป็นวิธีการมัลติเพล็กซ์ที่ปรับปรุงการทำงานมาจากวิธีซิงโครนัส TDM ให้มีประสิทธิภาพสูงยิ่งขึ้น เพื่อรองรับจำนวนช่องทางให้ได้มากขึ้น

**Multiplexing** เป็นเทคนิควิธีการส่งข้อมูลไปพร้อมกันในเส้นทางเดียวกัน ระบบ Multiplexing มีอยู่ 2 ระบบ คือ

1. MUX เช้ารหัส
2. DEMUX ถอดรหัส

#### 4.5.1 หลักการของการ Multiplexing

ในระบบการสื่อสารที่ทรัพยากรต่างๆ(เช่นความถี่ในการใช้งาน, ปริมาณคู่สาย ฯลฯ) ที่ถูกนำมาใช้งานนั้นล้วนมีอยู่อย่างจำกัด เราจึงต้องใช้ทรัพยากรต่างๆที่มีอยู่ให้คุ้มค่าที่สุด การ Multiplexing ก็เป็นเทคนิคอย่างหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าว ความหมายของ Multiplexing ก็คือการรวม(combination) ให้ช่องสัญญาณที่มีขนาดความจุของข่าวสารต่ำ สามารถใช้งานผ่านสื่อสัญญาณ(transmission Media) ที่มีขนาดความจุสูงสุดเดียวกันได้ ทำให้ความจุของระบบสื่อสารสัญญาณนั้นถูกใช้งานอย่างคุ้มค่า (utilization) ที่สุด หลักการของการ Multiplexing สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 หลักการของการ Multiplexing

จากรูปที่ 4.9 เราให้  $n$  input data channel ถูกส่งเข้าไปยัง MUX ซึ่งมันจะทำหน้าที่ในการรวมช่องสัญญาณทั้งหมด แล้วส่งผ่านไปเป็น communication link ที่มีขนาดความจุขนาด  $n$  data channel ชุดหนึ่ง เมื่อถึงปลายทางแล้ว ช่องสัญญาณที่ถูกรวมไปใน communication link นั้น ก็จะถูกแยก (DEMUX) ออกมาเป็น  $n$  channel data output ตามเดิม

การที่หลักการ Multiplexing ได้รับการใช้งานอย่างกว้างขวางก็เนื่องจาก

- การที่สามารถทำให้ communication link มีความจุสูงมากขึ้นเท่าใด ก็จะเป็นการทำให้ต้นทุนของการใช้งาน transmission ต่ำลงเท่านั้น (More cost-effective) หมายถึงว่า เมื่อมีการใช้งาน application อย่างไม่หนึ่ง ใน ระยะทางช่วงหนึ่ง ค่าใช้จ่ายในการสื่อสารต่อ kbps จะลดลงเมื่อ data rate ของ transmission facility เพิ่มสูงขึ้น ในทำนองเดียวกันก็คือ ราคาของ transmission และ receiving equipment ต่อ kbps จะถูกลงเมื่อ data rate เพิ่มสูงขึ้น

- ในการส่งข้อมูลทั่วไปนั้น อุปกรณ์ที่ถูกนำมาใช้งานเช่น data terminal equipment มักมีความเร็วไม่สูงนัก เช่นในการส่งข้อมูลที่มีขนาด file ไม่ใหญ่จนเกินไปนัก data rate ระหว่าง 9,600 bps ถึง 64 kbps ก็มักเพียงพอแล้ว
- ความมืออยู่อย่างจำกัดของ transmission media ดังได้กล่าวแล้ว ทำให้ความต้องการส่งสัญญาณต่างๆไปใน transmission media ชุดเดียวกันมีความจำเป็นมากขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

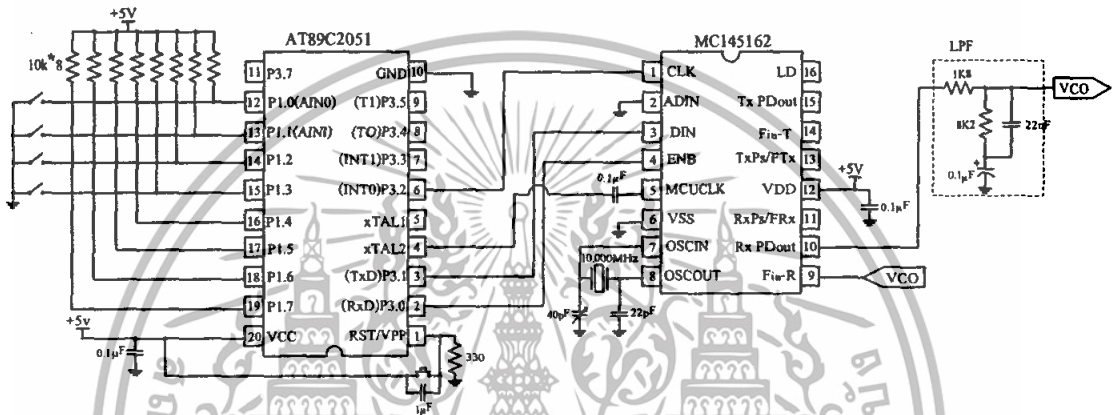
### การออกแบบและการสร้าง

#### 5.1 การออกแบบและสร้างภาครับ

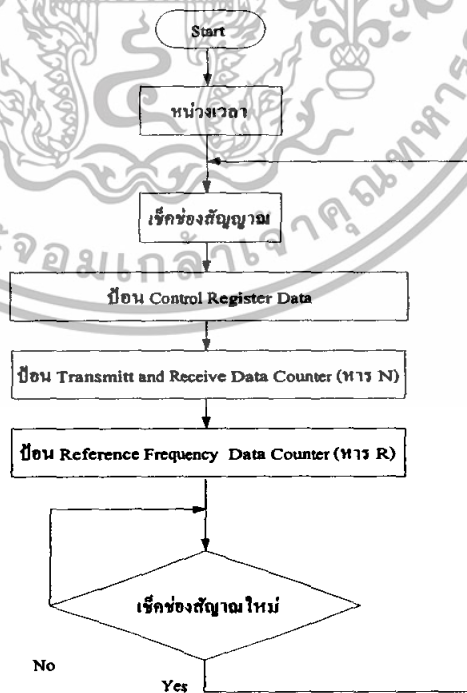
##### 5.1.1 การออกแบบเฟสล็อกคูปในการหาค่า R และ N ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับเฟสล็อกคูปที่โปรแกรมการหาร R และ N ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) มี

วงจรดังรูป



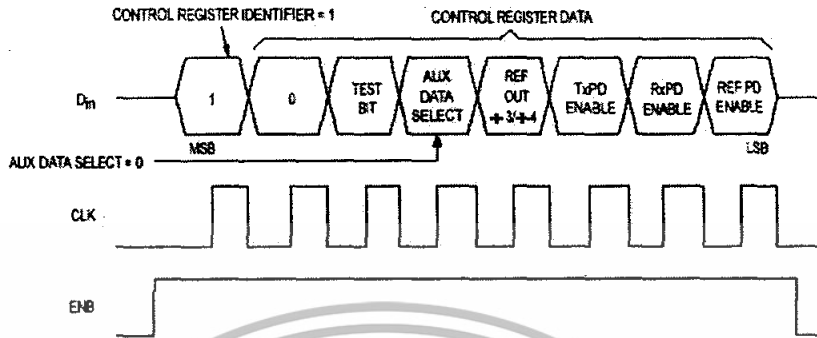
รูปที่ 5.1 การใช้ MCS-51 โปรแกรม IC MC145162 สามารถเขียน Flowchart ของโปรแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 5.2 แสดง Flowchart ของโปรแกรมใน MCS-51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนของโปรแกรมสำหรับ Control Register ป้อนค่า Din , ENB , CLK จาก Timing Diagram ดังรูป

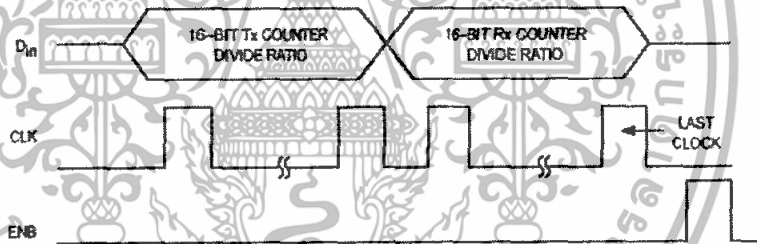


NOTE: ENB must be high during the serial transfer.

Programming Format for Control Register (3-Pin Interfacing Scheme)

รูปที่ 5.3 Timing Diagram ของส่วน Control Register

ส่วนของโปรแกรมสำหรับ Transmit and Receive Counters (หาร N) ป้อนค่า Din , ENB , CLK จาก Timing Diagram ดังรูป



NOTE: ENB must be low during the serial transfer.

Programming Format for Transmit and Receive Counters (3-Pin Interfacing Scheme)

รูปที่ 5.4 Timing Diagram ของส่วน Transmit and Receive Counters (หาร N)

มีค่าหาร N ของ Rx ทั้งหมด 7 ค่า (7 channel) ดังนี้

$$N = 128 = 0000000010000000$$

$$N = 130 = 0000000010000010$$

$$N = 132 = 0000000010000100$$

$$N = 134 = 0000000010000110$$

$$N = 136 = 0000000010001000$$

$$N = 138 = 0000000010001010$$

$$N = 140 = 0000000010001100$$

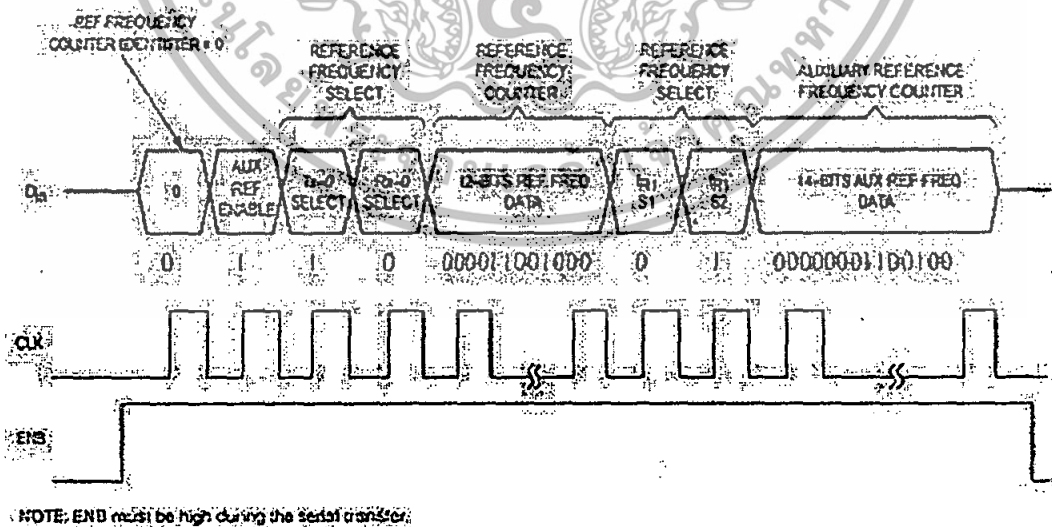
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วทำการ โปรแกรมโดยการเซตค่า Channel จากคิพสวิตช์ ได้ค่าดังตารางส่วนสวิตช์ที่ พอร์ต P1.3 เป็นการเลือกโหมดการทำงานระหว่าง “1” =Test Mode และ “0” =Normal Application

ตารางที่ 5.1 แสดงการ โปรแกรมค่าหาร N จากคิพสวิตช์

สวิตช์เลือกช่องสัญญาณ			ช่องสัญญาณ	ค่าหาร N
P1.0	P1.1	P1.2		
0	0	0	ช่องที่ 1	128
0	0	1	ช่องที่ 2	130
0	1	0	ช่องที่ 3	132
0	1	1	ช่องที่ 4	134
1	0	0	ช่องที่ 5	136
1	0	1	ช่องที่ 6	138
1	1	0	ช่องที่ 7	140
1	1	1	ช่องที่ 7	140

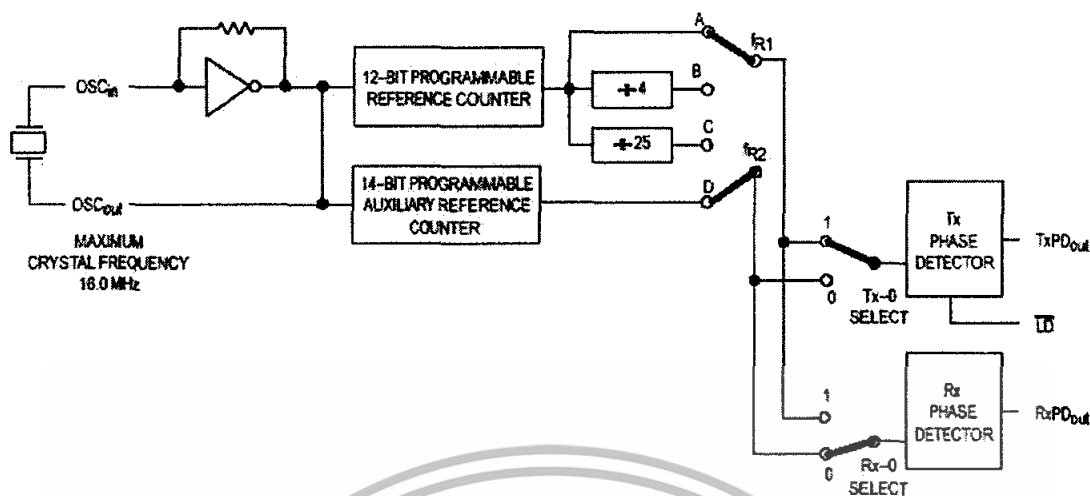
ส่วนของโปรแกรมสำหรับ Reference Frequency Counter (หาร R) ป้อนค่า Din , ENB , CLK จาก Timing Diagram และเลือกใช้ Register ดังรูป



Reference Frequency Counter/Selection Programming Mode

รูปที่ 5.5 Timing Diagram ของส่วน Reference Frequency Counter (หาร R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.6 แสดงการเลือกใช้ Register ภายใน IC MC145162

โดยที่

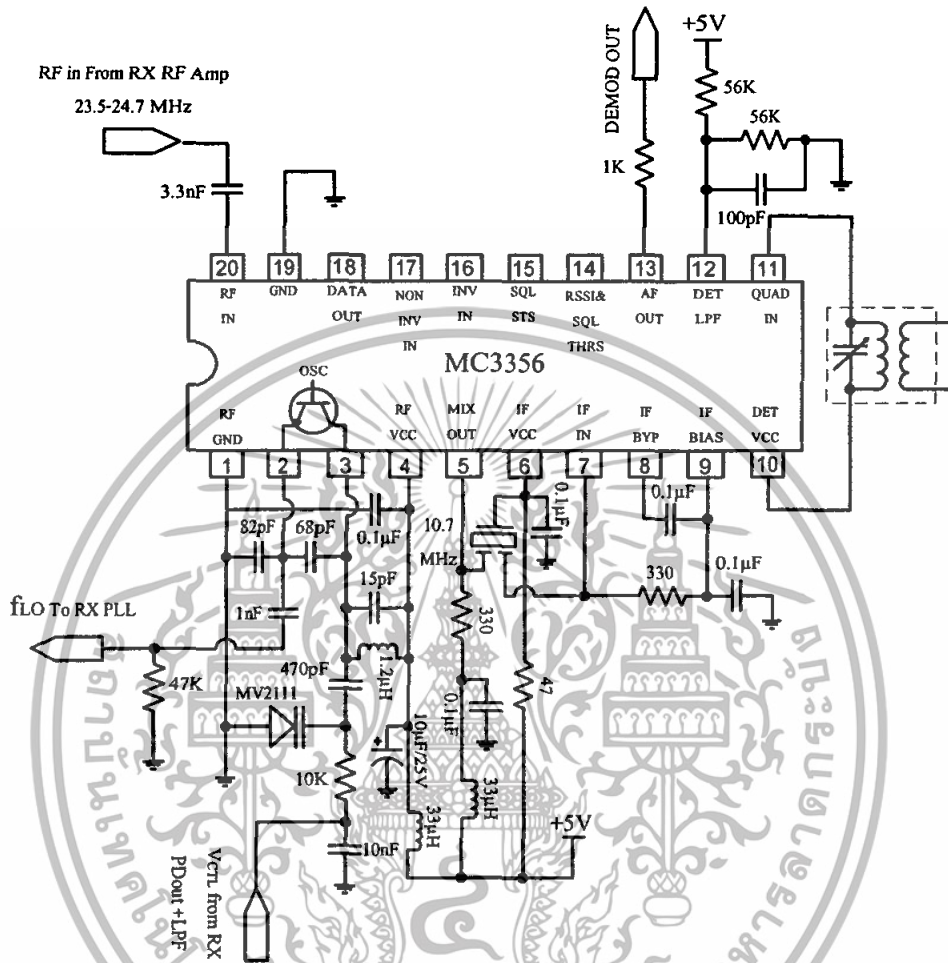
- Din = 01100000110010000100000001100100
- Crystal = 10.000 MHz
- R = 100
- Fref = 100 KHz

ผลการทดสอบ เมื่อคอสัญญาณจาก OSC<sub>out</sub> ของ MC145162 (ขา 8) เข้าที่ขา  $f_{in}$  R (ขา 9) แล้วทำให้พอร์ต P1.3 มีสถานะ "1" เพื่อเลือกโหมดทดสอบ แล้ววัดสัญญาณที่ขา RxPS/ $f_{Rx}$  (ขา 11) ได้ค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามา หากด้วยค่า N ที่โปรแกรมไว้ ดังตาราง ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการ โปรแกรมเฟสล็อก

ช่องสัญญาณ	ค่าหาร N	ความถี่ที่วัดได้จาก TxPS/ $f_{Tx}$ หรือ RxPS/ $f_{Rx}$
1	128	78.125 KHz (10MHz/128)
2	130	76.923 KHz (10MHz/130)
3	132	75.757 KHz (10MHz/132)
4	134	74.627 KHz (10MHz/134)
5	136	73.529 KHz (10MHz/136)
6	138	72.464 KHz (10MHz/138)
7	140	71.428 KHz (10MHz/140)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.2 การทดลองในส่วนของ Voltage Control Oscillator (VCO)



รูปที่ 5.7 วงจรในส่วนของ Voltage Control Oscillator

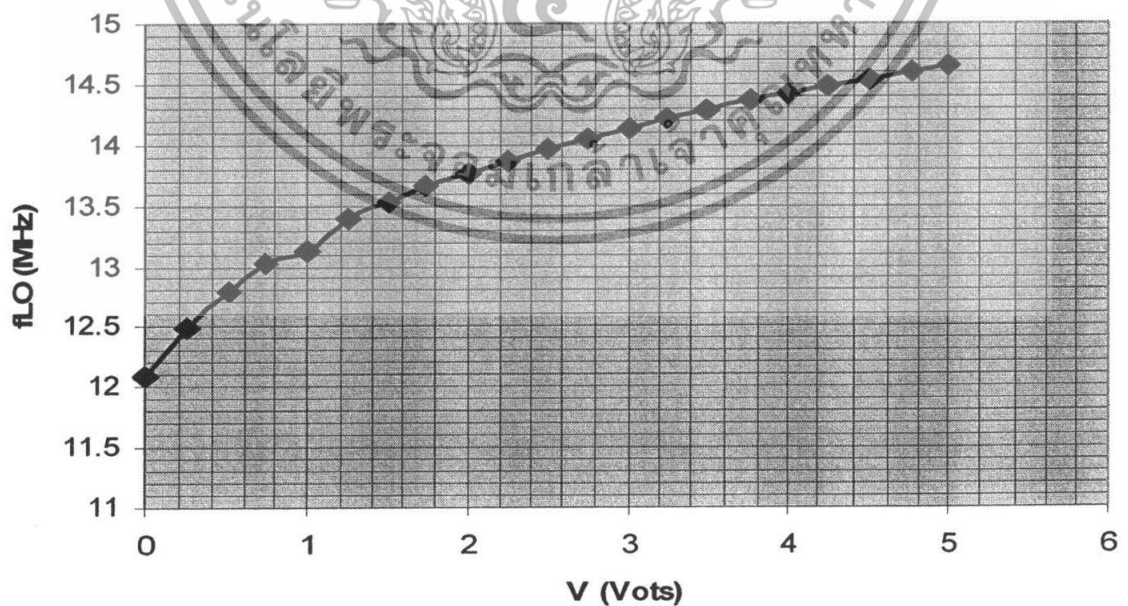
ทดลองป้อนแรงดันตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ โดยเพิ่มทีละ 0.25 โวลต์ ที่ตำแหน่ง  $V_{CTL}$  from Rx PLL LPF จากนั้นวัดค่าความถี่ที่ตำแหน่ง  $f_{LO}$  to Rx PLL MIXER Or Rx PLL ที่แรงดันค่าต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 5.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่เอาต์พุทเมื่อแรงดันอินพุตเปลี่ยนแปลง

แรงดัน (Volts)	ความถี่ (MHz)	แรงดัน (Volts)	ความถี่ (MHz)
0	12.094	2.75	14.048
0.25	12.495	3.00	14.128
0.5	12.791	3.25	14.210
0.75	13.020	3.50	14.283
1.00	13.125	3.75	14.363
1.25	13.385	4.00	14.421
1.50	13.528	4.25	14.480
1.75	13.657	4.50	14.535
2.00	13.765	4.75	14.596
2.25	13.856	5.00	14.649
2.50	13.970		

รูปที่ 5.8 นำค่าที่ได้จากตารางมาแสดงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ได้ดัง

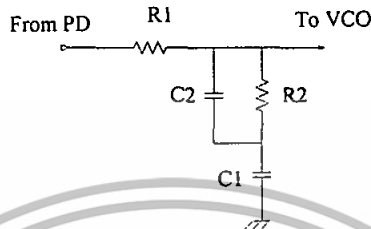


รูปที่ 5.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ของวงจร VCO

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.3 การออกแบบ Low Pass Filter

Phase Detector ของเฟสล็อกคูลูป จะต้องมียวงจร Low Pass Filter เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงมาเป็นแรงดันในการควบคุมความถี่ในส่วนของ VCO ให้ผลิตความถี่ออกมาได้ค่าตรงกับความต้องการของในแต่ละช่องสัญญาณในการรับสัญญาณ RF จากสายไฟบ้าน ใช้ค่าดังนี้



รูปที่ 5.9 วงจร Lowpass Filter

R1 = 6.8 KΩ

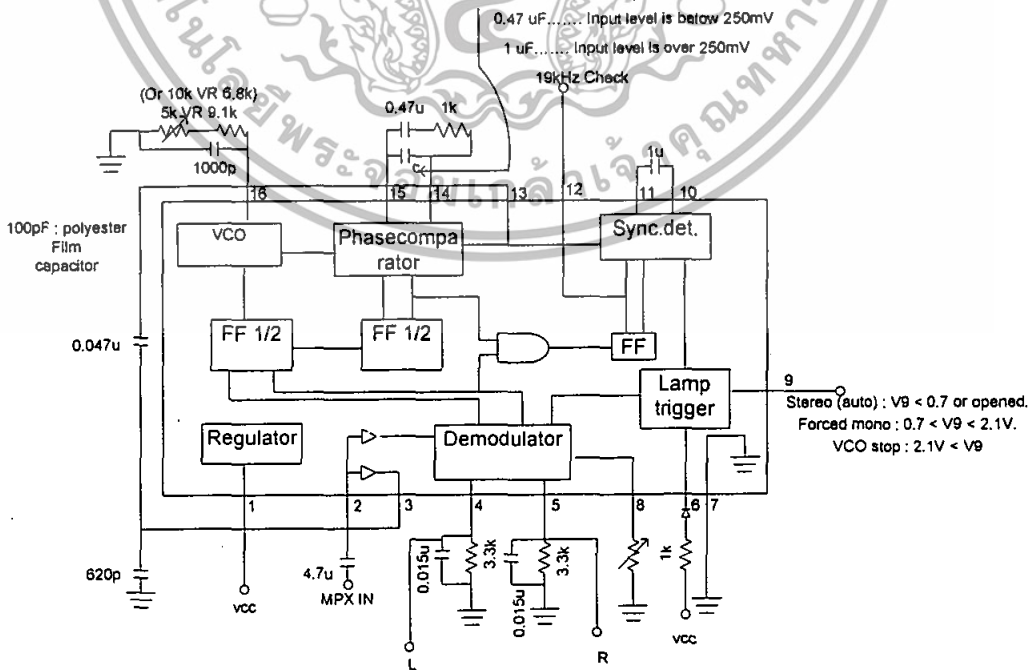
R2 = 8.2 KΩ

C1 = 0.1 μF

C2 = 0.022 μF

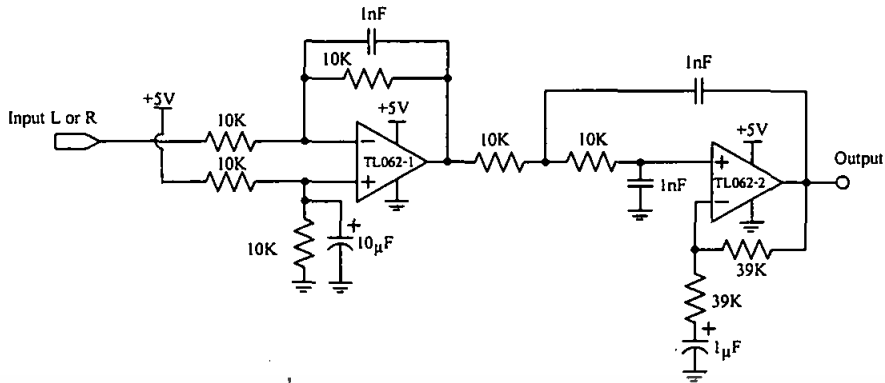
5.1.4 ผลการทดลองภาค Demultiplexer และภาครับโดยรวมทั้งหมด

วงจรที่ใช้ในการทดลองภาค Demultiplexer นั้นเป็นวงจรตัวอย่างใน Data Sheet ของ IC เบอร์ LA3361 ดังรูป



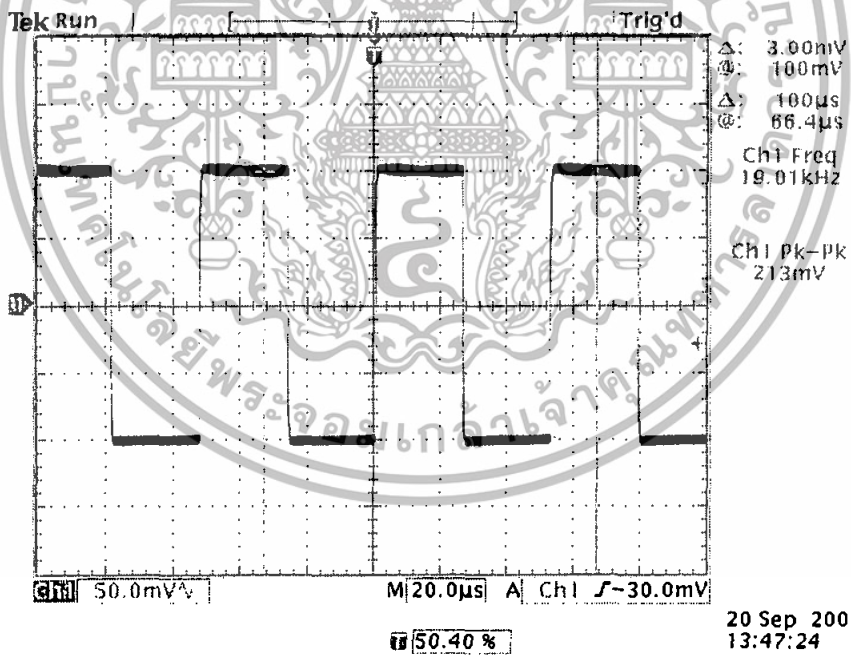
รูปที่ 5.10 วงจรตัวอย่างในการใช้งาน IC เบอร์ LA3361

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.11 วงจร Low Pass Filter 15KHz

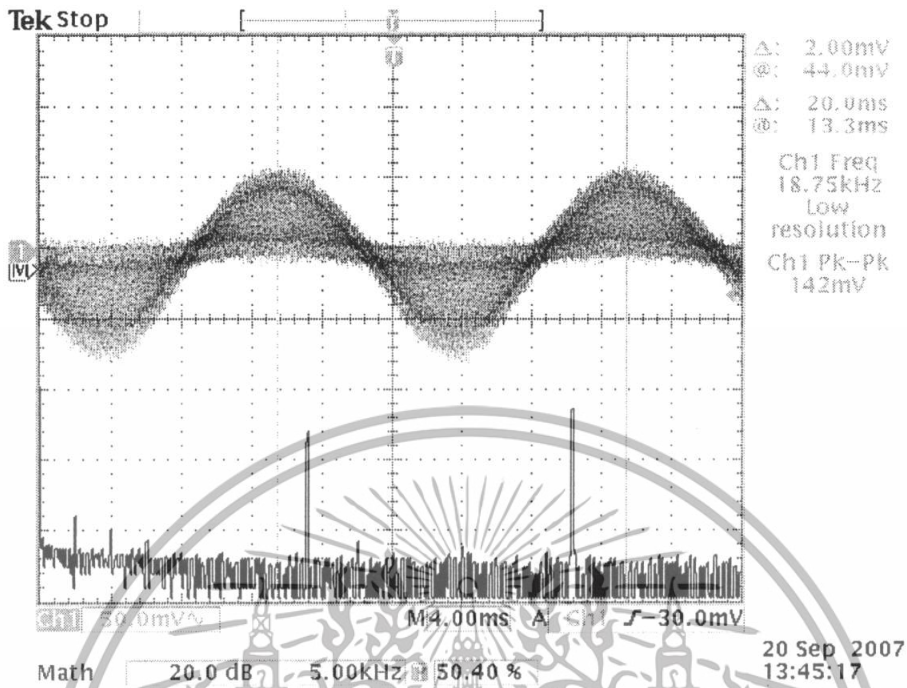
1. ทดลองปรับค่า VR 5 KΩ ให้ได้ค่าความถี่ที่ขา 12 ของ IC มีค่า 19 KHz เพื่อให้ภาค VCO ภายในตัว IC ผลิตความถี่ 76 KHz ก่อนถูกหารความถี่ลงเป็น 38 KHz เพื่อใช้เป็น Subcarrier ในการ Demultiplex และถูกหารความถี่ลงเป็น 19 KHz ซึ่งเป็นสัญญาณ Pilot ของระบบ Stereo Multiplex เพื่อเข้าวงจร Phase Comparator เทียบกับสัญญาณ Pilot ที่ถูกส่งมาจากภาคส่งเพื่อบ่งบอกว่าเป็นสัญญาณ Stereo Multiplex ที่ส่งมา



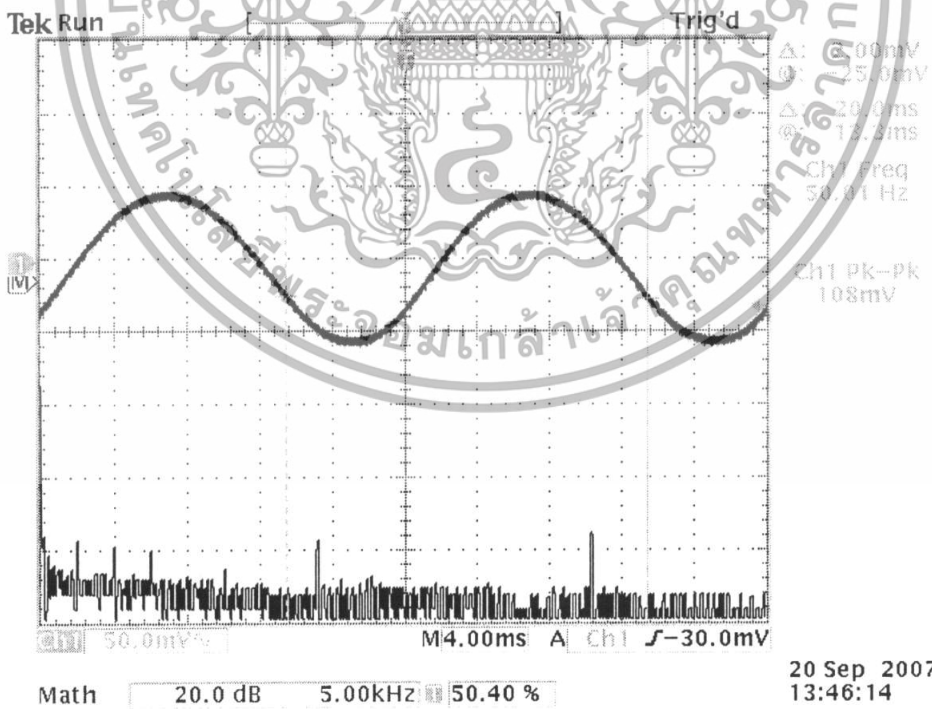
รูปที่ 5.12 สัญญาณที่วัดได้ที่ขา 12 IC เมอร์ LA3361

2. ใช้ RF Generator ป้อนความถี่ที่ต้องการรับในที่นี้ใช้ช่อง ที่ 1 คือ ความถี่ 23.5 MHz และใช้สัญญาณจาก Function Generator ป้อนสัญญาณรูปซายน์ 3 Vp-p ค่าความถี่ต่างๆ ในย่านความถี่เสียงที่มนุษย์ได้ยิน เข้าไปยัง RF Generator เพื่อ Modulate สัญญาณ sine wave เหล่านี้

ออกมาเข้าที่วงจรภาครับที่ออกแบบไว้และวัดสัญญาณที่จุดต่างๆ ดังรูป  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการเรียนการสอน เมื่อผู้จัดทำให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

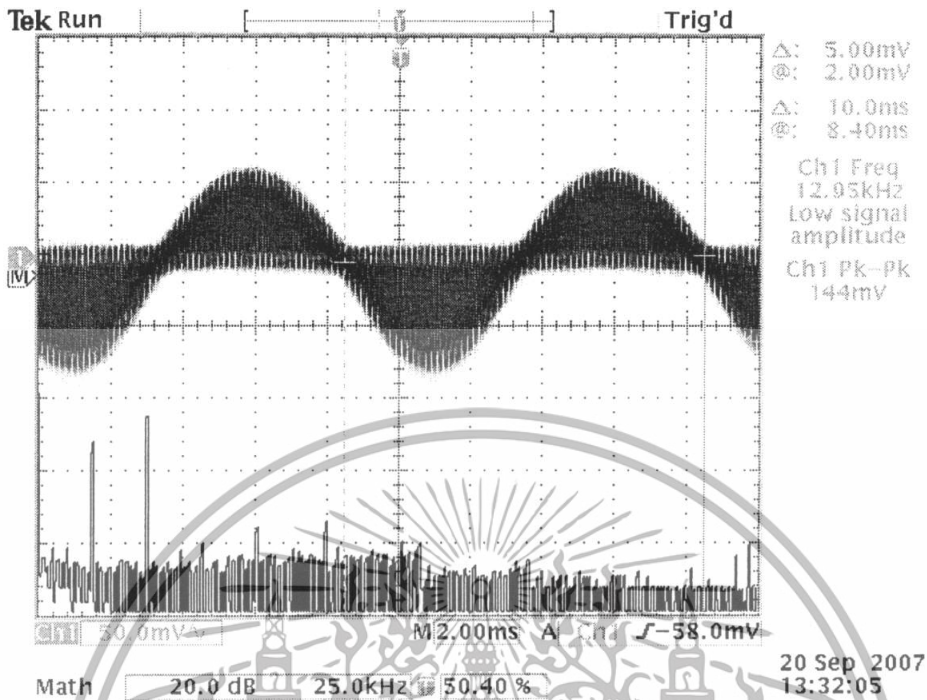


รูปที่ 5.13 สัญญาณ sine wave ความถี่ 50 Hz ที่ Demodulate ออกมาก่อนเข้าไปยังภาค Demux

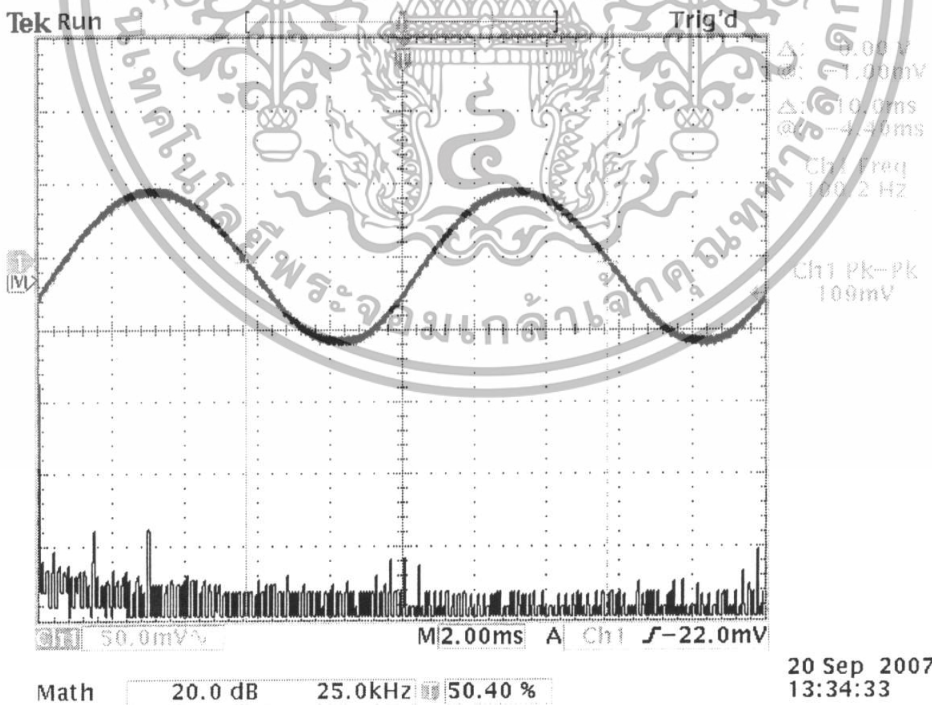


รูปที่ 5.14 สัญญาณ sin wave ความถี่ 50 Hz หลังจาก Demux และผ่าน Low Pass Filter แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

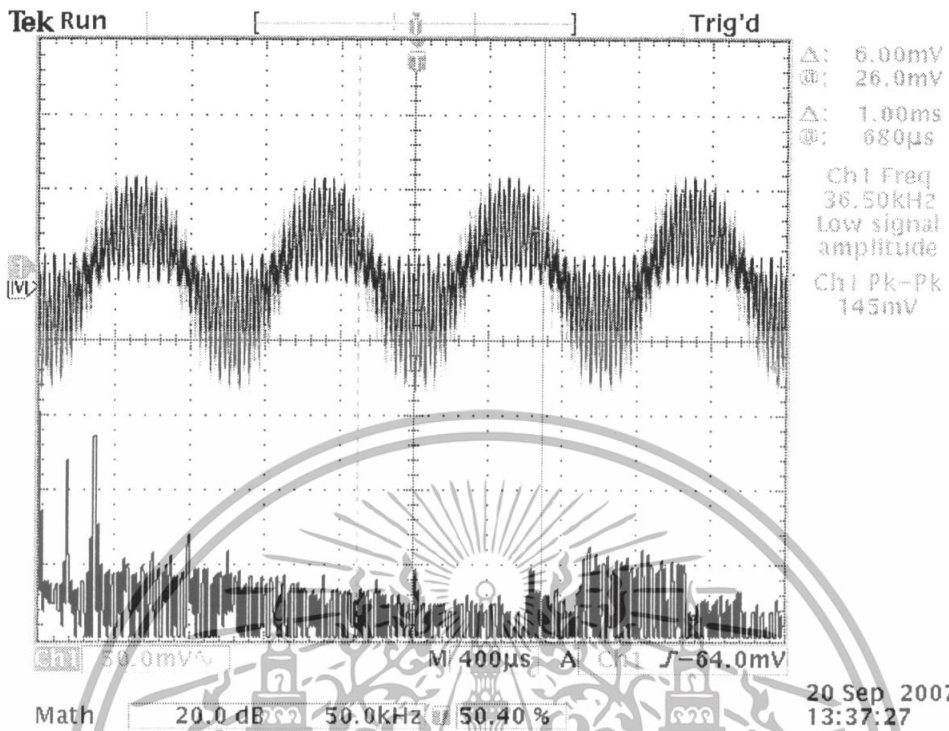


รูปที่ 5.15 สัญญาณ sin wave ความถี่ 100 Hz ที่ Demodulate ออกมาก่อนเข้าไปยังภาค Demux

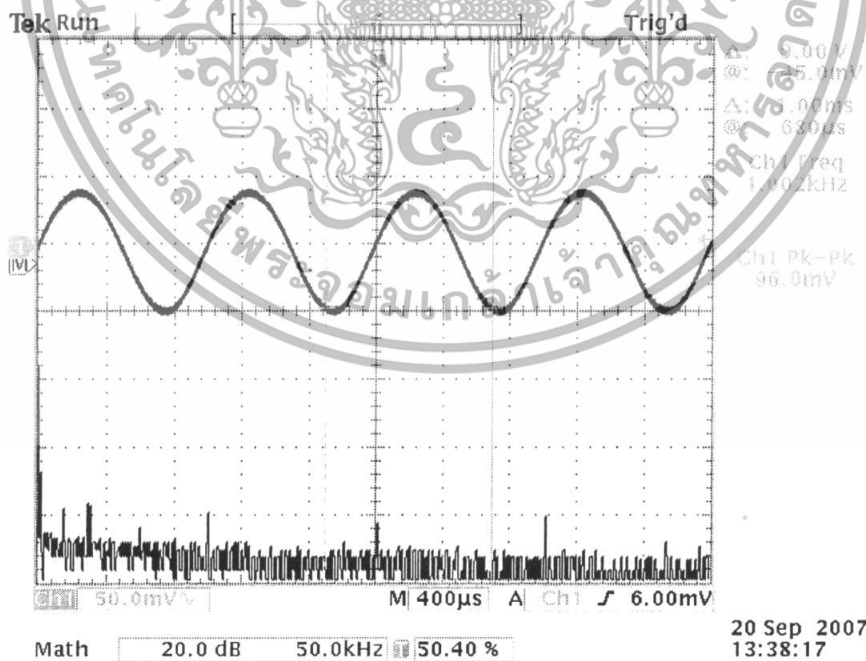


รูปที่ 5.16 สัญญาณ sine wave ความถี่ 100 Hz หลังจาก Demux และผ่าน Low Pass Filter แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.17 สัญญาณ sine wave ความถี่ 1KHz ที่ Demodulate ออกมาก่อนเข้าไปยังภาค Demux

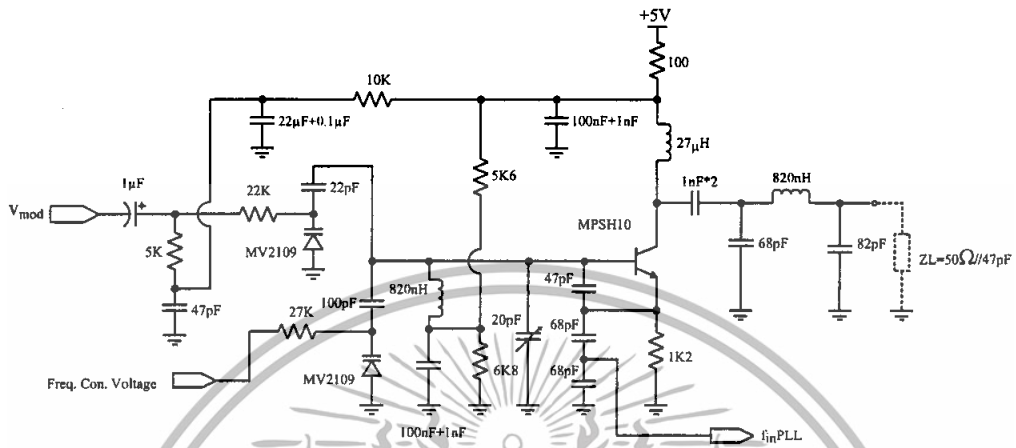


รูปที่ 5.18 สัญญาณ sine wave ความถี่ 1KHz หลังจาก Demux และผ่าน Low Pass Filter แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 การออกแบบและสร้างภาคส่ง

### 5.2.1 การทดลองส่วนของ Voltage Control Oscillator (VCO)



รูปที่ 5.19 วงจรในส่วนของ Voltage Controlled Oscillator ที่ใช้ทดลอง

ทดลองป้อนแรงดันตั้งแต่ 0 โวลต์ ถึง 5 โวลต์ โดยเพิ่มทีละ 0.25 โวลต์ ที่ตำแหน่ง Freq. Con. Voltage จากนั้นวัดค่าความถี่ที่ตำแหน่ง  $f_n$  to Tx PLL ที่แรงดันค่าต่างๆ ได้ผลดังตารางที่ 5.4 ตารางที่ 5.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความถี่เอาท์พุทเมื่อแรงดันอินพุทเปลี่ยนแปลง

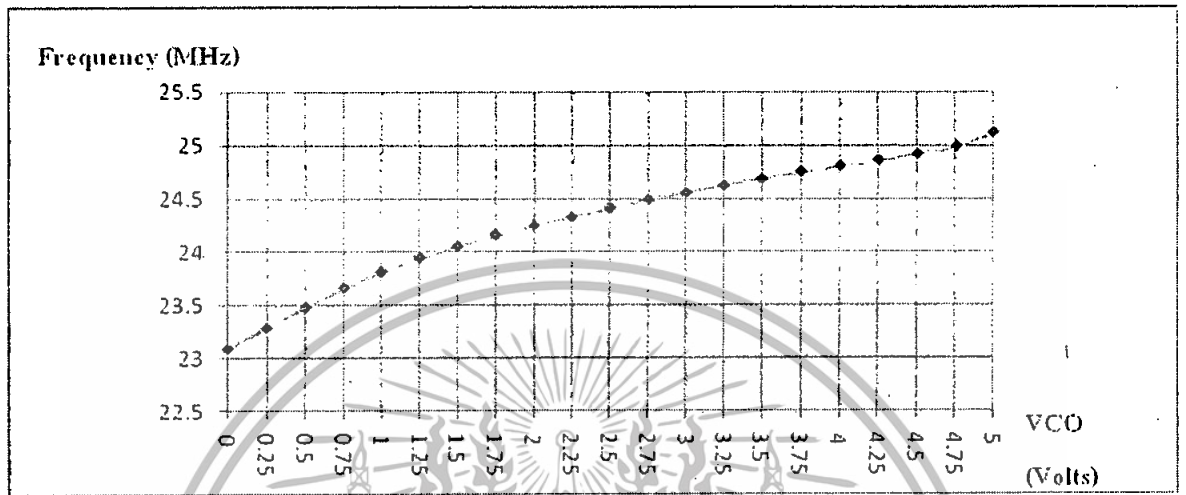
แรงดัน (Volts)	ความถี่ (MHz)
0	23.091
0.25	23.286
0.5	23.477
0.75	23.664
1.00	23.815
1.25	23.944
1.50	24.061
1.75	24.163
2.00	24.248
2.25	24.334
2.50	24.414

แรงดัน (Volts)	ความถี่ (MHz)
2.75	24.494
3.00	24.562
3.25	24.628
3.50	24.691
3.75	24.750
4.00	24.808
4.25	24.863
4.50	24.923
4.75	24.990
5.00	25.120

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำค่าที่ได้จากตารางมาแสดงเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ได้ดัง

รูปที่ 5.20

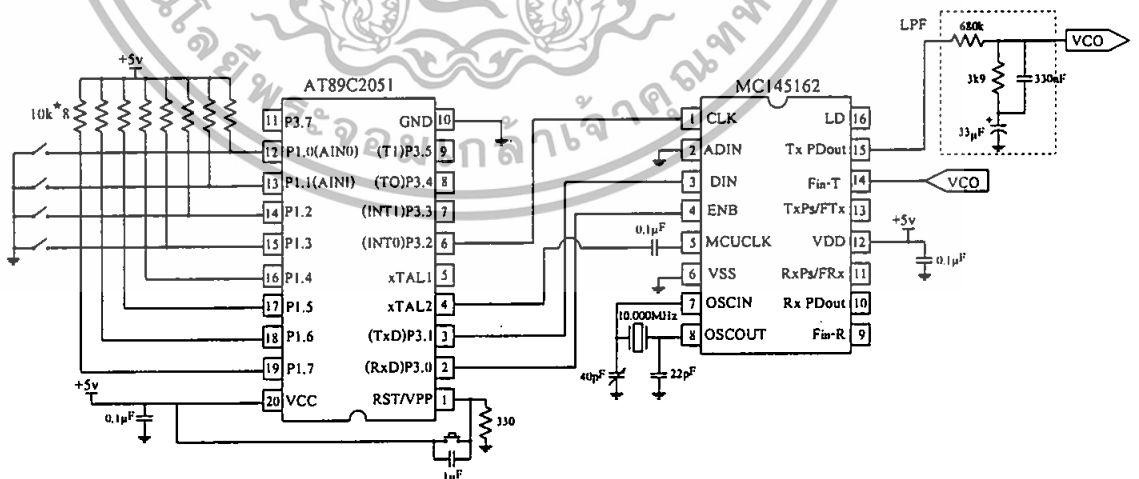


รูปที่ 5.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันและความถี่ของวงจร VCO

### 5.2.2 การออกแบบเฟสล็อกคูปในการหารค่า R และ N ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

สำหรับเฟสล็อกคูปที่โปรแกรมการหาร R และ N ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCS-51) มี

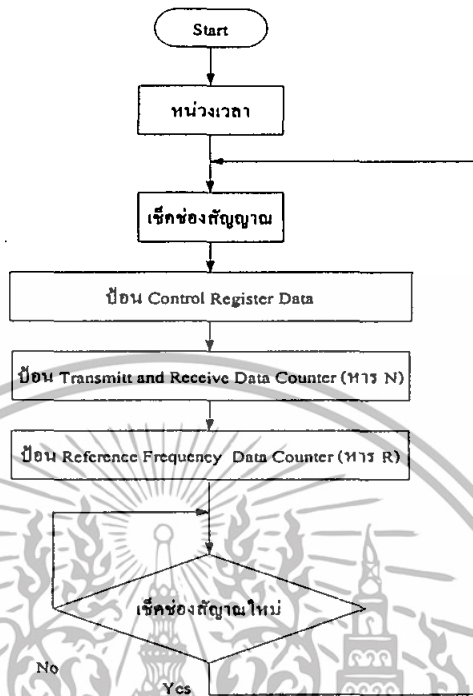
วงจรดังรูป



รูปที่ 5.21 การใช้ MCS-51 โปรแกรม IC MC145162

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียน Flowchart ของโปรแกรมได้ดังนี้



รูปที่ 5.22 แสดง Flowchart ของโปรแกรมใน MCS-51

มีค่าหาร N ของ Tx ทั้งหมด 7 ค่า (7 channel) ดังนี้

$$N = 470 = 0000000111010110$$

$$N = 474 = 0000000111011010$$

$$N = 478 = 0000000111011110$$

$$N = 482 = 0000000111100010$$

$$N = 486 = 0000000111100110$$

$$N = 490 = 0000000111101010$$

$$N = 494 = 0000000111101110$$

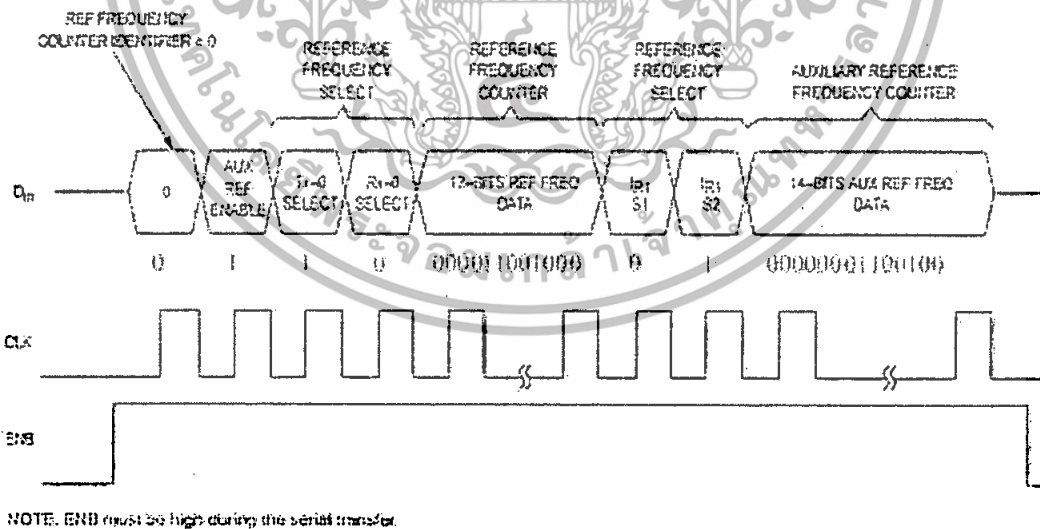
แล้วทำการโปรแกรมโดยการเซตค่า Channel จากคิพสวิตช์ ได้ค่าดังตารางส่วนสวิตช์ที่พอร์ต P1.3 เป็นการเลือกโหมดการทำงานระหว่าง "1" =Test Mode และ "0" =Normal Application

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5.5 แสดงการ โปรแกรมค่าหาร N จากคิพสวิดซ์

สวิทซ์เลือกช่องสัญญาณ			ช่องสัญญาณ	ค่าหาร N
P1.0	P1.1	P1.2		
0	0	0	ช่องที่ 1	470
0	0	1	ช่องที่ 2	474
0	1	0	ช่องที่ 3	478
0	1	1	ช่องที่ 4	482
1	0	0	ช่องที่ 5	486
1	0	1	ช่องที่ 6	490
1	1	0	ช่องที่ 7	494
1	1	1	ช่องที่ 7	494

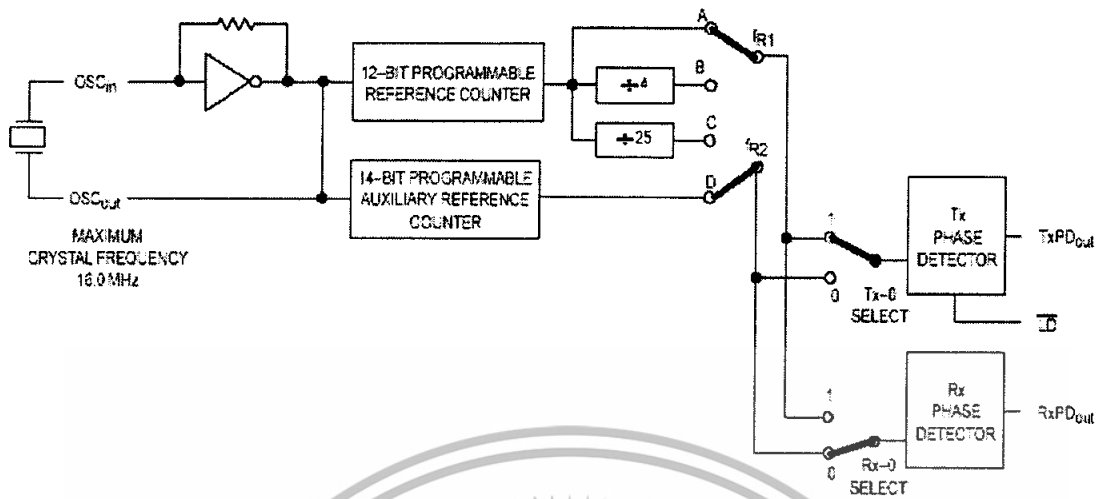
ส่วนของโปรแกรมสำหรับ Reference Frequency Counter (หาร R) ป้อนค่า Din , ENB , CLK จาก Timing Diagram และเลือกใช้ Register ดังรูป



Reference Frequency Counter/Selection Programming Mode

รูปที่ 5.23 Timing Diagram ของส่วน Reference Frequency Counter (หาร R)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.24 แสดงการเลือกใช้ Register ภายใน IC MC145162

โดยที่

- Din = 01100000110010000100000001100100
- Crystal = 10.000 MHz
- R = 200
- Fref = 50 KHz

ผลการทดสอบ เมื่อต่อสัญญาณจาก OSC<sub>out</sub> ของ MC145162 (ขา 8) เข้าที่ขา f<sub>in</sub> T (ขา 14) แล้วทำให้พอร์ต P1.3 มีสถานะ “1” เพื่อเลือกโหมดทดสอบ แล้ววัดสัญญาณที่ขา TxPS/f<sub>Tx</sub> (ขา 13) ได้ค่าความถี่เท่ากับค่าความถี่ที่ป้อนเข้ามา หาค่าด้วยค่า N ที่โปรแกรมไว้ ดังตาราง

ตารางที่ 5.6 แสดงค่าความถี่ที่ได้จากการโปรแกรมเฟสล็อกคัล

ช่องสัญญาณ	ค่าหาร N	ความถี่ที่วัดได้จาก TxPS/f <sub>Tx</sub> หรือ RxPS/f <sub>Rx</sub>
1	470	21.276 KHz (10MHz/470)
2	474	21.097 KHz (10MHz/474)
3	478	20.920 KHz (10MHz/478)
4	482	20.746 KHz (10MHz/482)
5	486	20.576 KHz (10MHz/486)
6	490	20.408 KHz (10MHz/490)
7	494	20.242 KHz (10MHz/494)

### 5.2.3 การออกแบบ Low Pass Filter

Phase Detector ของเฟสล็อกคูลูป จะต้องมีการ Low Pass Filter เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงมาเป็นแรงดันในการควบคุมความถี่ในส่วนของ VCO ให้ผลิตความถี่ของคลื่นพาห์ออกมาได้ค่าตรงกับความต้องการของในแต่ละช่องสัญญาณในการส่งสัญญาณ RF ไปยังสายไฟบ้านแต่ต้องไม่ทำให้เฟสล็อกคูลูปนั้นมองเห็นและล็อกค่าความถี่ที่เบี่ยงเบนไปจากการที่มีสัญญาณข้อมูลที่มีความถี่ต่ำสุดที่เข้ามาคือ 20 Hz อันจะทำให้การทำงานของภาคส่งนั้นผิดพลาดได้ ใช้ค่าดังนี้



### 5.2.4 การออกแบบวงจรสร้างสัญญาณ Stereo Multiplex

เนื่องด้วยความต้องการที่จะส่งสัญญาณเสียงทั้งข้างซ้ายและขวาไปพร้อมๆกันในคลื่นวิทยุความถี่เดียวกันจึงจำเป็นต้องนำสัญญาณเสียงทั้งข้างซ้ายและขวามาสร้างเป็นสัญญาณ Stereo Multiplex ก่อน โดยการนำสัญญาณเสียงข้างซ้ายและขวามาทำการ Sampling ด้วยความถี่ 38 KHz ที่เรียกว่า Subcarrier จะได้สัญญาณ L-R จากนั้นก็สร้างสัญญาณ L+R ที่เป็นสัญญาณ Mono เพื่อที่หากเครื่องรับไม่สามารถรับสัญญาณ Stereo ได้ก็สามารถรับแบบ Mono ได้ และเนื่องจากสัญญาณ Subcarrier 38 KHz นั้นหายไปโดยการนำไปใช้ Sampling สัญญาณ L และ R เครื่องรับจึงยังไม่สามารถแยกสัญญาณข้างซ้ายและขวาได้จึงต้องส่งสัญญาณ 19 KHz ที่เรียกว่า สัญญาณ Pilot รวมไปถึงสัญญาณ L+R และ L-R ด้วย ในอัตราส่วนของสัญญาณทั้งหมด 100% จะประกอบด้วย สัญญาณ L+R 45% สัญญาณ L-R 45% และสัญญาณ Pilot 10%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### 5.2.5 การออกแบบ Isolate Transformer

เพื่อเป็นการแยกระบบระหว่างเครื่องส่งและเครื่องรับออกจาก AC Powerline อย่างเด็ดขาด และสัญญาณความถี่สูงหลายๆชนิดไม่สามารถ Coupling ผ่าน Isolate Transformer ได้ เนื่องจากคุณสมบัติของ Transformer ที่ไม่สามารถตอบสนองความถี่ได้ทุกย่านส่วนความถี่ต่ำของ ไฟสลับ (50Hz) ก็ไม่สามารถ Coupling เข้ามาได้เนื่องจากค่า C ที่ใช้ Coupling มีค่าน้อย ให้มี อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำสูงมาก โดยในการทดลองจะทำการพัน Isolate Transformer ในจำนวนรอบ ที่แตกต่างกัน ในอัตราการส่งผ่านเป็น 1 : 1 จากนั้นใช้ RF Generator ทำการป้อนความถี่ 23.5 – 24.7 MHz ขนาด 100 dB $\mu$  หรือ 100 mV<sub>p-p</sub> เข้าที่ด้านใดด้านหนึ่ง โดยอีกด้านจะต่อตัวต้านทานค่า 50  $\Omega$  เพื่อเป็น Impedance Matching และวัดสัญญาณที่ตกคร่อมตัวต้านทานเพื่อหาจำนวนรอบที่ทำให้เกิดการส่งผ่านสัญญาณในย่านความถี่ 23.5 – 24.7 MHz ได้ดีที่สุดได้ผลดังตาราง

ตารางที่ 5.7 ผลการการพัน Isolate Transformer เพื่อหาค่าการส่งผ่านสัญญาณสูงสุด

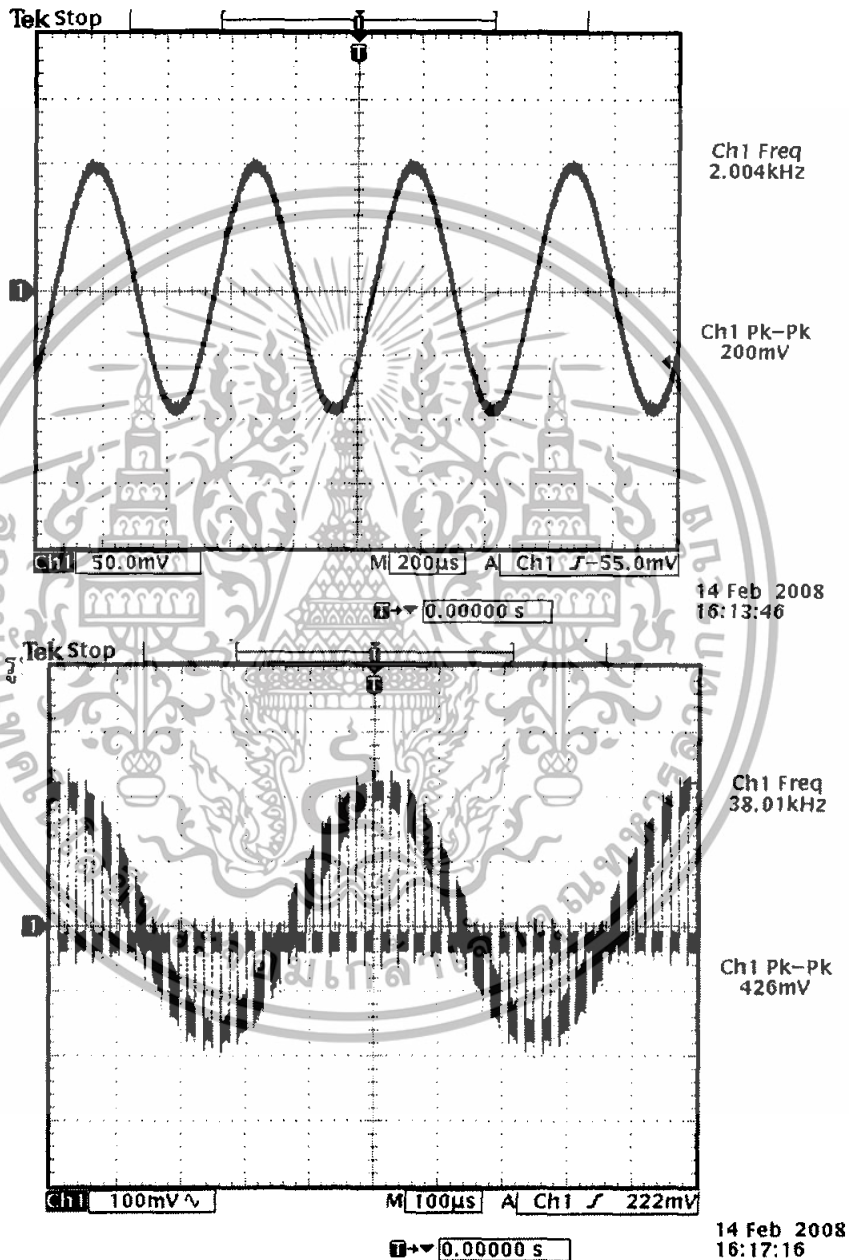
ความถี่		23.5	23.7	23.9	24.1	24.3	24.5	24.7	(MHz)
3รอบ	V <sub>out</sub> NoLoad	101.2	109.6	109.0	106.4	106.4	106.4	106.4	mV <sub>p-p</sub>
	V <sub>out</sub> Load 50 $\Omega$	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	70.4	mV <sub>p-p</sub>
4รอบ	V <sub>out</sub> NoLoad	115.6	115.6	115.6	115.0	114.0	113.6	113.2	mV <sub>p-p</sub>
	V <sub>out</sub> Load 50 $\Omega$	74.8	74.8	74.4	73.2	72.8	72.4	72.4	mV <sub>p-p</sub>
5รอบ	V <sub>out</sub> NoLoad	117.8	117.4	116.8	115.8	115.2	114.4	113.4	mV <sub>p-p</sub>
	V <sub>out</sub> Load 50 $\Omega$	72.8	73.4	73.4	72.8	72.4	71.8	71.4	mV <sub>p-p</sub>

จากตารางที่ 5.7 จึงเลือกใช้ Isolate Transformer ที่จำนวนรอบ 4 รอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.2.6 ผลการทดลองในส่วนของภาคส่ง

ทดสอบการทำงานของวงจรสร้างสัญญาณ L-R โดยการป้อนสัญญาณรูปซายน์ ความถี่ 2 KHz ขนาด 200 mVp-p เข้าที่อินพุตข้างใดข้างหนึ่ง และทำการวัดสัญญาณที่ขาที่ 4 ของ IC เบอร์ 74HC4053



รูปที่ 5.28 สัญญาณที่วัดที่ขา 4 ของ IC เบอร์ 74HC4053

จากรูปที่ 5.27 จะเห็นได้ว่าสัญญาณจะถูก Sampling ด้วยสัญญาณ Subcarrier 38 KHz ออกมาส่วนอีกข้างหนึ่งไม่มีการป้อนสัญญาณจึงได้รูปสัญญาณที่สลับระหว่าง สัญญาณซายน์ 2 KHz กับ เส้นตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.3 สรุปผลการทำงานของวงจร

เมื่อทดลองการทำงานของวงจรทั้งภาครับและภาคส่งในห้องกว้างประมาณ 5\*7 เมตร โดยทำการป้อนสัญญาณเสียงจากเครื่องเล่น mp3 เข้าที่วงจรของภาคส่งเพื่อทำการมอดูเลตและส่งออกไปยังสายไฟบ้าน โดยเสียบสายป้อนที่เต้าเสียบที่ตำแหน่งหน้าห้อง จากนั้นทำการเสียบปลั๊กของวงจรภาครับเข้าที่เต้าเสียบที่ตำแหน่งหลังห้อง โดยขณะนั้นภายในห้องได้มีการใช้เครื่องใช้ไฟฟ้า คือ พัดลมจำนวน 1 ตัว หลอดฟลูออเรสเซนต์จำนวน 8 หลอด และทดลองต่อลำโพงเพื่อรับฟังเสียงที่ออกจากรวมขยายเสียง ผลปรากฏว่าวงจรสามารถทำงานได้ดี และรับฟังเสียงเพลงได้ชัดเจน แต่มีเสียงความถี่สูงดังออกมาเล็กน้อย ภายหลังจากที่มีการใช้งานคอมพิวเตอร์ภายในห้อง ผลปรากฏว่ามีเสียงรบกวนดังมากจนแทบไม่สามารถรับฟังเสียงเพลงได้เลย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า วงจรสามารถทำงานได้ดีในสภาวะที่ไม่มีการใช้งานคอมพิวเตอร์อยู่ภายในห้อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. ผศ. ประภากร สุวรรณะ, “High Frequency Communication”, ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. ผศ. ประภากร สุวรรณะ, “Electronics Engineering 2”, ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. ผศ. ดร. ลัญจกรวุฒิสิทธิกุลกิจ, “หลักการไฟฟ้าสื่อสาร”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย พ.ศ.2546



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก

### โปรแกรมที่เขียนให้กับ ไมโครคอนโทรลเลอร์

```

;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
;Serial data transfer between AT89C2051 with MC145162;
;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;;
DATAIN EQU P3.1 ;Port 3.1 connected to Din
CLOCK EQU P3.2 ;Port 3.2 connected to CLK
ENABLE EQU P3.0 ;Port 3.0 connected to Enable
DIN EQU 7FH
LOOP EQU 7EH
TX1 EQU 7DH ;MSB of Tx Counter DATA
TX2 EQU 7CH ;LSB of Tx Counter DATA
RX1 EQU 7BH ;MSB of Rx Counter DATA
RX2 EQU 7AH ;LSB of Rx Counter DATA
REGCON EQU 79H ;Address of Register Control DATA
CHIN EQU 78H ;Address of Input DATA
TEMP EQU 77H
ORG 0000H
MOV R0,#50H ;MSB of Reference Frequency Counter DATA
MOV R1,#64H
MOV R2,#40H
MOV R3,#0C8H ;LSB of Reference Frequency Counter DATA
ACALL DELAY
MOV A,#00H
MOV P3,A ;Clear port 3
MOV CHIN,#07FH
START: MOV A,P1 ;Read port 1 (Input)
MOV TEMP,A
CJNE A,CHIN,CHKMODE ;Check again of DATA
AJMP START
CHKMODE: MOV A,TEMP ;Check Test mode or Normal Application
MOV CHIN,A
ANL A,#08H
CJNE A,#00H,TESTMODE
ACALL NORMAL
AJMP CHKCH0
TESTMODE: ACALL TEST
;
;Check Channel of User ;
;
CHKCH0: MOV A,CHIN
ANL A,#07H
CJNE A,#00H,CHKCH1
ACALL CH0
AJMP TRANSFER
CHKCH1: MOV A,CHIN
ANL A,#07H
CJNE A,#01H,CHKCH2
ACALL CH1
AJMP TRANSFER
CHKCH2: MOV A,CHIN
ANL A,#07H
CJNE A,#02H,CHKCH3

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ACALL  CH2
AJMP   TRANFER
CHKCH3: MOV   A,CHIN
        ANL   A,#07H
        CJNE  A,#03H,CHKCH4
        ACALL CH3
        AJMP  TRANFER
CHKCH4: MOV   A,CHIN
        ANL   A,#07H
        CJNE  A,#04H,CHKCH5
        ACALL CH4
        AJMP  TRANFER
CHKCH5: MOV   A,CHIN
        ANL   A,#07H
        CJNE  A,#05H,CHKCH6
        ACALL CH5
        AJMP  TRANFER
CHKCH6: MOV   A,CHIN
        ANL   A,#07H
        CJNE  A,#06H,CHKCH7
        ACALL CH6
        AJMP  TRANFER
CHKCH7: MOV   A,CHIN
        ANL   A,#07H
        CJNE  A,#07H,START
        ACALL CH6
        AJMP  TRANFER

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Test mode DATA //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
TEST:   MOV   REGCON,#0A0H
        RET

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// Normal Application DATA //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
NORMAL: MOV   REGCON,#80H
        RET

////////////////////////////////////
//////////////////////////////////// 7 Channel DATA //////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
CH0:   MOV   TX1,#01H
        MOV   TX2,#0D6H
        MOV   RX1,#00H
        MOV   RX2,#80H
        RET
CH1:   MOV   TX1,#01H
        MOV   TX2,#0DAH
        MOV   RX1,#00H
        MOV   RX2,#82H
        RET
CH2:   MOV   TX1,#01H
        MOV   TX2,#0DEH
        MOV   RX1,#00H
        MOV   RX2,#84H
        RET
CH3:   MOV   TX1,#01H
        MOV   TX2,#0E2H
        MOV   RX1,#00H

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOV      RX2,#86H
RET
CH4:    MOV      TX1,#01H
        MOV      TX2,#0E6H
        MOV      RX1,#00H
        MOV      RX2,#88H
        RET
CH5:    MOV      TX1,#01H
        MOV      TX2,#0EAH
        MOV      RX1,#00H
        MOV      RX2,#8AH
        RET
CH6:    MOV      TX1,#01H
        MOV      TX2,#0EEH
        MOV      RX1,#00H
        MOV      RX2,#8CH
        RET
//////////
////////// Transfer all DATA to MC145162 //////////
//////////
TRANSFER: MOV      A,REGCON      ;Load Register Control DATA
        MOV      DIN,A
        SETB     ENABL          ;Enable is set before transfer DATA
        ACALL    SEND           ;Send Register control DATA
        CLR      ENABL          ;Enable is clear Later Transfer
        MOV      A,TX1          ;Load Upper Byte of Tx Counter DATA
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND           ;Send Upper Byte of Tx Counter DATA
        MOV      A,TX2          ;Load Lower Byte of Tx Counter DATA
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND           ;Send Lower Byte of Tx Counter DATA
        MOV      A,RX1          ;Load Upper Byte of Rx Counter DATA
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND           ;Send Upper Byte of Rx Counter DATA
        MOV      A,RX2          ;Load Lower Byte of Rx Counter DATA
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND           ;Send Lower Byte of Rx Counter DATA
        SETB     ENABLE         ;Enable is set
        CLR      ENABLE
        MOV      A,R0           ;Load Ref. Freq. Counter/Select Program
        MOV      DIN,A
        SETB     ENABLE
        ACALL    SEND
        MOV      A,R1
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND
        MOV      A,R2
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND
        MOV      A,R3
        MOV      DIN,A
        ACALL    SEND
        CLR      ENABLE         ;Enable is clear
        AJMP     START          ;Go to Begin

```

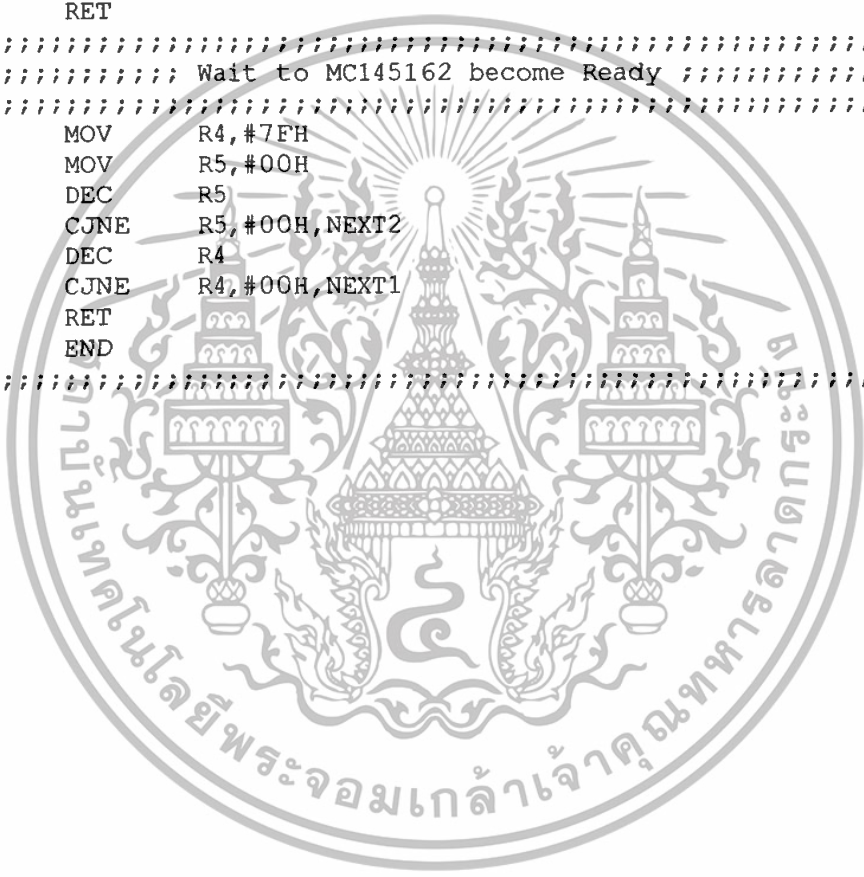
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

////////////////////////////////////
// Send data by Serial DATA Transfer //
////////////////////////////////////
SEND:   MOV     LOOP,#08H
        CLR     C
        MOV     A,DIN
AGAIN:   RLC     A
        JC      SETDATA
        CLR     DATAIN
        AJMP    CLK
SETDATA: SETB    DATAIN
CLK:     SETB    CLOCK
        CLR     CLOCK
        DJNZ    LOOP,AGAIN
        RET

////////////////////////////////////
// Wait to MC145162 become Ready //
////////////////////////////////////
DELAY:  MOV     R4,#7FH
NEXT1:  MOV     R5,#00H
NEXT2:  DEC     R5
        CJNE    R5,#00H,NEXT2
        DEC     R4
        CJNE    R4,#00H,NEXT1
        RET
        END
////////////////////////////////////

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



