การทดลองที่ 19 การสื่อสารไร้สายเครื่องส่ง - รับ FM

เครื่องส่ง FM

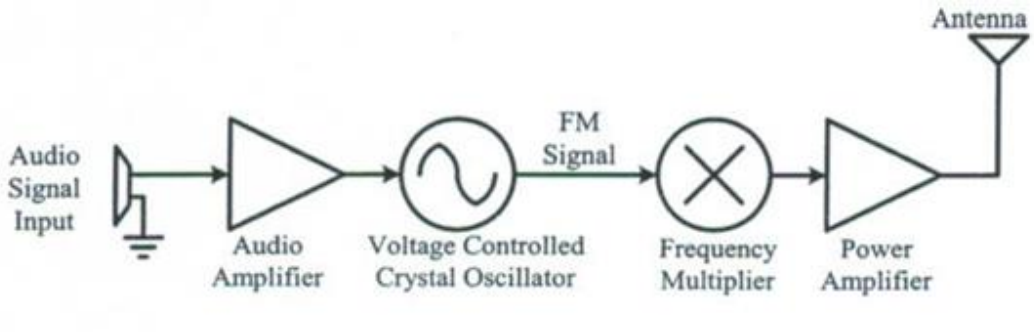
19.1. วัตถุประสงค์ในการทดลอง

1. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของ Frequency Modulation (FM) และ การส่งสัญญาณ Transmitter
2. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจคุณสมบัติของ Varactor Diode
3. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของ Voltage Controlled Oscillator (VCO)
4. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจวิธีการวัด และการปรับวงจรภาคส่งของ Frequency Modulation (FM)

19.2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในระบบการสื่อสารไร้สาย การรับและการส่งเป็นเรื่องที่เกิดขึ้นในชีวิตของเรา สามารถกำหนดรูปแบบการส่งโดยตรงให้ชัดเจนและไม่ชัดเจน ตัวอย่างเช่น การควบคุมระยะไกล หรือ การรับการส่ง ซึ่งควบคุมโดยไม่ต้องใช้คนควบคุม หรือใช้งานด้านความลับทางราชการ นอกจากการรับ การส่งวิทยุ วัตถุประสงค์ของการการส่งสัญญาณแบบไร้สายเป็นการแปลงสัญญาณไฟฟ้าและที่กระจายตามความยาวสัญญาณในอากาศผ่านเสาอากาศ ภาครับจะรับที่กระจายตามความยาวคลื่นไฟฟ้าผ่านอากาศและแปลงค่ากลับเป็นสัญญาณเดิมที่ส่งมา (Original Signal) อีกไม่นานการ Modulation ในการสื่อสารไร้สาย AM และ FM ซึ่งจะไม่ธรรมดา ความแตกต่างระหว่าง AM และ FM การใช้ประโยชน์ FM อัตราขยายของความถี่ที่ส่งเปลี่ยนเป็นคลื่นไฟฟ้าการส่งของสัญญาณความถี่จะสูงหรือต่ำจะเปลี่ยนแปลงและกลมกลืนกัน ในบอรด์ AM-6011 และ AM-6022 เราจะพูดถึงหลักการเกี่ยวกับอัตราการขยายของ Modulation และ Demodulation ในบทนี้เราจะเรียนเกี่ยวกับ FM Block Diagram ของระบบส่ง FM ในรูปที่ 1 รูปที่ 1 เราจะเห็นการส่ง FM ประกอบด้วย Audio Amplifier, Voltage Controlled Crystal Oscillator, Frequency Multiplier, Power amplifier และ Antenna

จากนี้ถ้าเราต้องการส่งสัญญาณ Audio ขั้นตอนแรกทำการเปลี่ยน Voltage ให้เป็น Waveform โดยใช้ Microphone และเมื่อเราส่งสัญญาณ audio amplifier ไปภาคขยายสัญญาณ หลังจากนั้นเพื่อ modulation frequency สัญญาณจะผ่านภาค Voltage Controlled Crystal Oscillator อย่างไรก็ตามความถี่ที่เกิดขึ้นโดย Voltage Controlled Crystal Oscillator นี้เป็นแถบความถี่พื้นฐาน Baseband ของภาคส่ง ดังนั้นเราใช้ความถี่ที่เพิ่มขึ้นส่งไปภาคขยายโดย Power Amplifier และ กระจายสัญญาณไปในอากาศผ่านเสาอากาศ



รูปที่ 1 System block diagram of FM transmitter

The theory of frequency modulation

เราจะพูดถึง Frequency Modulation (FM) เราใช้ประโยชน์ของอัตราการขยายสัญญาณวิทยุไป modulate ความถี่ของการส่งสัญญาณ การส่งสัญญาณความถี่สูงและต่ำจะเป็นไปตามสัญญาณความถี่ที่ภาครับซึ่งมีความแตกต่างบนความเปลี่ยนแปลง

$$X_{FM}(t) = A_c \cos \theta(t) = A_c \cos\left(2\pi f_c t + 2\pi f_D \int x(\lambda)\, d\lambda\right) \tag{1}$$

ถ้าสัญญาณเสียงเป็น $x(\lambda) = A_m \cos(2\pi f_m \lambda)$ ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} X_{FM}(t) &= A_c \cos\left(2\pi f_c t + \frac{f_D A_m}{f_m} \sin(2\pi f_m t)\right) \\ &= A_c \cos\left(2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)\right) \end{aligned} \tag{2}$$

$\theta(t)$ เป็นความถี่ชั่วขณะที่มอดูเลท (Instantaneous modulated frequency)

f_c เป็นความถี่คลื่นพาห์ (Carrier frequency)

f_m เป็นความถี่การมอดูเลท (modulating frequency)

จากสมการที่ (1) เรารู้ว่า

$$\theta(t) = 2\pi f_c t + 2\pi f_D \int x(\lambda)\, d\lambda \tag{3}$$

เมื่อเวลาของสมการที่ (3) ต่างกัน เราสามารถอธิบายความถี่ของสัญญาณเป็น

$$f = \frac{1}{2\pi}\frac{D\theta(t)}{Dt} = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}\theta(t) = \frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}[2\pi f_c t + \beta \sin 2\pi f_m t] \\ = f_c + f_m \beta \cos(2\pi f_m t) = f_c + A_m f_D \cos(2\pi f_m t) \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) เรารู้ว่าเมื่ออัตราการขยายของ audio signal เปลี่ยนแปลง ความถี่ของ FM ก็จะเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน และจุดศูนย์กลางของ Carrier Frequency จะคลาดเคลื่อนไป จากกฎของ Carson ความกว้างของสัญญาณ modulation จะเกิดขึ้นรวดเร็วมาก

$$BW \approx 2(\beta + 2) f_m = 2\left(\frac{A_m f_D}{f_m} + 2\right) f_m = 2(A_m f_D + 2 f_m) \quad (5)$$

ถ้าอัตราการขยายสัญญาณวิทยุและความถี่ยาวมาก (i.e. Am=1 และ $f_m = W$) เมื่อความกว้างของ FM ทำให้มันง่ายขึ้น

$$BW \approx 2(f_D + W)$$

Varactor Diode

Varactor Diode หรือเรียกว่าตัวปรับ diode, Varactor Diode เป็น Diode ชนิดหนึ่งซึ่งปรับเพิ่มค่า Reverse Bias Voltage ให้กับขา PN junction เมื่อเพิ่มค่า Reverse Bias Voltage ทำให้ขอบเขตความกว้างลดลงและทำให้คุณสมบัติการประจุลดน้อยลง อย่างไรก็ตามเมื่อลดการ Reverse Bias Voltage ขอบเขตความกว้างลดลงคุณสมบัติการประจุจะเพิ่มขึ้น เช่นกัน Varactor Diode สามารถปรับจากอัตราขยายของ AC Signal ถ้าปรับเพิ่ม Varactor Diode ที่กระจายตามความยาวตามอัตราการขยายของการ Modulating Signal

รูปที่ 2 Analog Diagram ของ Varactor Diode เมื่อไม่มีการ bias ความเข็มของสัญญาณลดลงต่างกันเล็กน้อยที่ PN Junction ดังนั้นการส่งหรือการแพร่กระจายของคลื่นจะลดลง ที่ขา P การส่งอิเล็กตรอนทางบวกจะลดลง หลังจากนั้นการส่งอิเล็กตรอนทางลบที่ขา N จะลดลงเราสามารถใช้แผ่นเพลดประจุแทนการลดลงบริเวณการถ่ายทอดประจุไฟฟ้าที่ขา PN junction

$$C = \frac{\varepsilon A}{d} \quad (6)$$

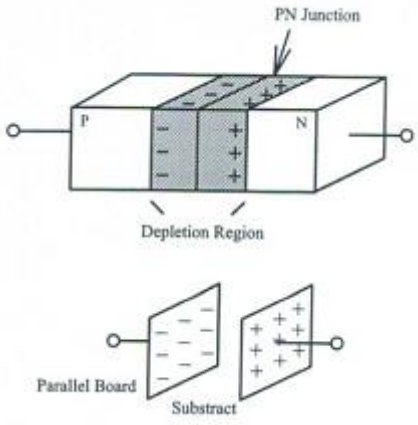
เมื่อกำหนดให้

ε มีค่าเท่ากับ 11.8 ε_0 (dielectric constant of Silicon)

ε_0 มีค่าเท่ากับ 8.85×10^{-12}

A เป็นรอยต่อ PN junction

d เป็นระยะทางการแพร่ (depletion width)



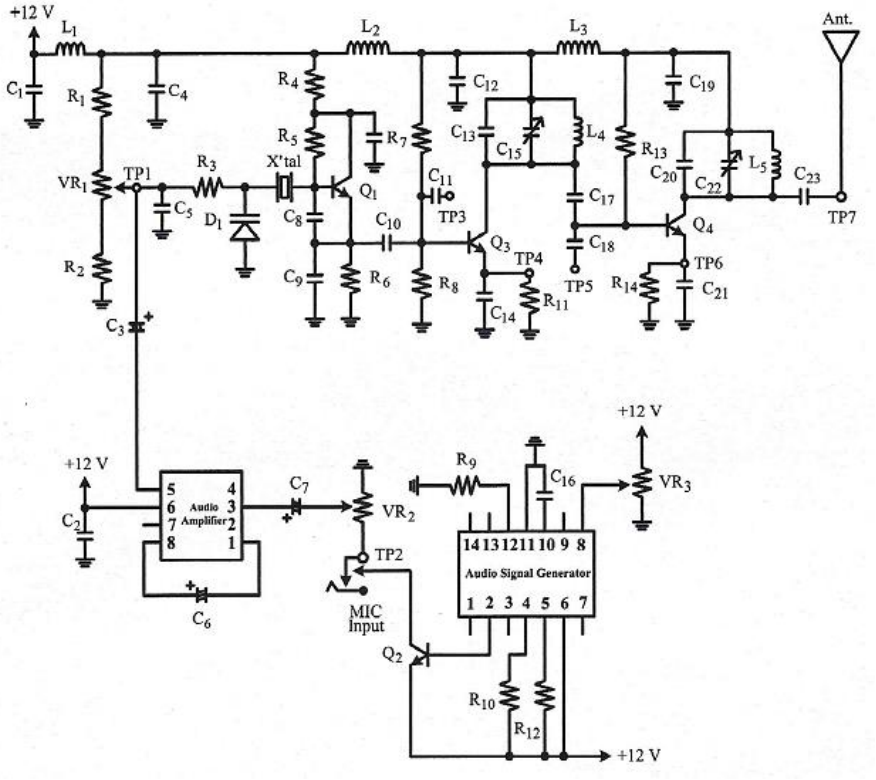
รูปที่ 2 Analog diagram of capacitance of varactor diode

เมื่อเพิ่มค่า Reverse Bias Voltage ความกว้างของ Depletion Region d จะเพิ่มขึ้นแต่พื้นที่ PN junction ยังคงเหมือนเดิม อย่างไรก็ตามค่าความจุจะลดลง ส่วนอื่นค่าความจุจะเพิ่มขึ้น Varactor Diode สามารถปรับค่า Rs และ Ls ได้ต่อเนื่องตามที่แสดงในรูปที่ 3 จากรูปที่ 3 Cj เป็นค่าความจุของเซมิคอนดัคเตอร์ซึ่งเฉพาะขาออกใน PN junction เท่านั้น Rs เป็นจำนวนรวมของค่าความจุความต้านทานและความต้านทานของหน้าสัมผัสของส่วนประกอบของเซมิคอนดัคเตอร์ซึ่งเกี่ยวข้องกับคุณภาพของ Varactor Diode ซึ่ง Ls เป็นค่าเหนี่ยวนำของการต่อสายและส่วนประกอบของเซมิคอนดัคเตอร์

รูปที่ 3 The circuit symbol and equivalent circuit of varactor diode

FM Transmitter

รูปที่ 4 วงจรของ FM Transmitter ซึ่งเป็นพื้นฐานของรูปที่ 1 มีห้าส่วนใน FM Transmitter ได้แก่ Audio Amplifier, Voltage Controlled Crystal Oscillator, Frequency Multiplier, Power Amplifier and Antenna สัญญาณวิทยุจะเข้ามาทาง Microphone เมื่อมีสัญญาณเข้ามา Audio Amplifier จะทำหน้าที่ขยาย gain โดย C6 ภาค Voltage Controlled Crystal Oscillator ประกอบด้วย Q1, R4, R5, R6, C5, C8, C9, D1 and X'tal ซึ่งจะสร้างสัญญาณที่ 20 MHz โดยปรับค่าที่ VR1 เราสามารถปรับเอาท์พุตความถี่ของ Voltage Controlled Crystal Oscillator ได้เล็กน้อย หลังจากนั้นสัญญาณวิทยุจะผ่าน R3, C3, C4 ไป D1 สัญญาณ frequency modulation จะลดลง เมื่อสัญญาณ frequency modulation สร้างขึ้นโดย Voltage Controlled Crystal Oscillator จะผ่านภาค Frequency Multiplier เพื่อเพิ่มการส่งสัญญาณ frequency modulation ภาค Frequency Multiplier ประกอบด้วย R7, R8, R11, C13, C14, C15, L4 and Q3 เมื่อใช้ Power Amplifier ซึ่งประกอบ ด้วย R13, R14, C20, C21, C22, L5 and Q4 เพื่อเพิ่มเอาท์พุตเพาเวอร์ของสัญญาณ modulated สุดท้ายสัญญาณจะกระจายในอากาศผ่านเสาอากาศ ในวงจรของ Frequency Multiplier เราจะได้สัญญาณออกมา five time โดยการปรับ VC ที่ C15 จากนั้นเอาท์พุตเพาเวอร์ของ Power Amplifier สามารถปรับ VC ที่ C22



รูปที่ 4 The circuit diagram of frequency modulation transmitter

19.3. อุปกรณ์การทดลอง

1. บอรด์ทดลอง ETEK FM-6021	1	บอร์ด
2. บอรด์ทดลอง ETEK FM-6022	1	บอร์ด
3. สโคปวัดสัญญาณ	1	เครื่อง
4. แหล่งจ่ายไฟ	1	เครื่อง

19.4. ขั้นตอนการทดลอง (Experiment Items)

Experiment 1: Measurement of Transmitter Carrier Signal

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ FM Transmitter ตามรูปที่ 4 บอร์ด FM-6021

2. สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Voltage Controlled Crystal Oscillator TP3 เมื่อปรับค่าที่ VR1 ดังนั้นเอาท์พุตความถี่ของเป็น 20 MHz ให้บันทึกรูปคลื่นและความถี่ลงในตารางที่ 1

3. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของเอาท์พุตความถี่ Frequency Multiplier TP5 ปรับค่าที่ C15 ดังนั้นเอาท์พุตความถี่ของ Frequency Multiplier เป็น five time ของ Input Frequency ให้บันทึกรูปคลื่นและความถี่ลงในตารางที่ 1

4. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณเอาท์พุตของ Power Amplifier (TP7) และเมื่อปรับค่าที่ C24 จะได้ Max Output Power ของ Power Amplifier ให้บันทึกรูปคลื่นและความถี่ลงในตารางที่ 1

5. ใช้ Spectrum Analyzer วัดดูสัญญาณของเอาท์พุตของ Voltage Controlled Crystal Oscillator TP3 และFrequency Multiplier TP5 และ Power Amplifier (TP7) ให้บันทึกรูปคลื่นและความถี่ลงในตารางที่ 1 ให้ทำขั้นตอนที่ 2 ถึง 4 และเปรียบเทียบผลการวัด

Experiment 2: Measurement of FM Signal Waveform

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ FM Transmitter ตามรูปที่ 4 บอร์ด FM-6021

2. สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Audio Signal TP2 และเมื่อปรับค่าที่ VR3 O/P ความถี่เป็น 1 kHz Sine Wave ให้ J1 เป็น Short Circuit และ J2 เป็น Open Circuit ใช้ Oscilloscope วัดสัญญาณเอาท์พุตของ Audio Amplifier (TP1) ปรับค่าที่ VR2 ดังนั้นเอาท์พุต Amplitude ของ Audio Signal เป็น 1 Vp-p

3. ใช้ Oscilloscope และ Spectrum Analyzer วัดดูสัญญาณเอาท์พุต ของ FM Transmitter TP7 ให้บันทึกรูปคลื่นและความถี่ลงในตารางที่ 2

4. ปรับค่าที่ VR2 อัตราการขยายของสัญญาณเอาท์พุต Audio Signal (TP2) คือ 2 Vp-p และ 3 Vp-p ทำขั้นตอนที่ 3 และ ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 2

5. ปรับค่าที่ VR3 สัญญาณเอาท์พุต Audio Signal (TP2) เป็นความถี่ 500 Hz, 800 Hz, 1.2 kHz Sine Wave ให้ J2 เป็น Short Circuit และ J1 เป็น Open Circuit ปรับค่าที่ VR2 อัตราการขยายของสัญญาณเอาท์พุต Audio Amplifier (TP1) เป็น 2 Vp-p ทำขั้นตอนที่ 3 และ ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 3

Experiment 3: Measurement of FM Transmitter

1. จัดเตรียมอุปกรณ์ FM Transmitter ตามรูปที่ 4 บอร์ด FM-6021

2. สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณเอาท์พุต ของ Audio Signal TP2 และเมื่อปรับค่าที่ VR3 เอาท์พุตความถี่เป็น 1 kHz Sine Wave ให้ J2 เป็น Short Circuit และ J1 เป็น Open Circuit

3. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณเอาท์พุตของ Audio Amplifier (TP1) ปรับค่าที่ VR2 ดังนั้นเอาท์พุต Amplitude ของ Audio Signal เป็น 4 Vp-p

4. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณเอาท์พุตของ TP1, TP2, TP3, TP4, TP6 and TP7 ให้บันทึกรูปคลื่นและความถี่ลงในตารางที่ 4

5. ให้ต่อ Microphone เข้า MIC I/P และใช้ Oscilloscope และ Spectrum Analyzer วัดดูรูปคลื่นสัญญาณเอาท์พุตของ FM Transmitter (TP7). ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 4

สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 1 Observe on the variation of the amplitude modulation signal by changing the frequency of the audio signal

Audio Signal amplitude	**Output Signal Waveform**	**Output Signal Frequency Spectrum**
1 V		
2 V		
3 V		

ตารางที่ 2 Observe on the variation of the frequency modulation signal by changing the frequency of the audio signal

Audio Signal frequency	**Output Signal Waveform**	**Output Signal Frequency Spectrum**
0.5 kHz		
800 Hz		
1.2 kHz		

ตารางที่ 3 Measured result of AM broadcasting received signal

Test Points	Output Signal Waveform	Test Points	Output Signal Waveform
TP1		TP2	
TP3		TP4	
TP5		TP5	
TP7		TP7 MIC I/P	

19.5. สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

เครื่องรับ FM

19.6. วัตถุประสงค์ในการทดลอง

1. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของ Frequency Modulation (FM) การรับสัญญาณ Receiver

2. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของ Phase Locked Loop (PLL) FM Demodulation

3. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของ Conversion ของ FM to AM Voltage Controlled Oscillator (VCO)

4. เพื่อเรียนรู้และเข้าใจหลักการทำงานของ Orthogonal Detector

19.7. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ภาครับเป็นอุปกรณ์ ซึ่งสามารถเลือกสัญญาณความถี่ที่แตกต่างของคลื่นไฟฟ้าที่เสากาศเทียบกับภาครับ สามารถขยายและ demodulate สัญญาณคืนมาใช้ได้อีก โครงสร้างของภาครับ FM เหมือนกับโครงสร้างของภาครับ AM ซึ่งทั้งสองระบบใช้ประโยชน์ได้ดีต่างกัน โครงสร้างของ Super Heterodyne จะประกอบด้วย RF Amplifier Mixer, Intermediate (IF), FM Demodulator ภาค RF Amplifier จะขยายสัญญาณจากเสาอากาศ. Mixer ใช้ผสมสัญญาณ RF Signal ใน IF Signal หลังจากนั้น IF Signal จะขยายสัญญาณโดย IF Amplifier

เมื่อสัญญาณผ่าน FM Demodulator จะเกิด Signal Source คืนมา อย่างไรก็ตาม ภาครับ FM ต้องการเพิ่ม Limiter และ de-emphasis circuit Modulated Signal ส่งโดย FM Transmitter แปรผันกับ Frequency และอัตราการ ขยายที่คงเหลืออยู่ อย่างไรก็ตามระหว่างขบวนการส่งสัญญาณจะเกิดการแทรกแซงของ Noise หรือ Multi-Path ซึ่งจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยาย เมื่ออุปกรณ์จับสัญญาณวิทยุได้ อย่างไรก็ตามภาครับ FM ต้องการ Limiter เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงของอัตราการขยายและ de-emphasis circuit และการได้รับ Pre-Emphasisโดย Transmitter

ในรูปที่ 1 Block Diagram ของระบบภาครับ FM ซึ่งประกอบด้วย RF amplifier, Local Oscillator และ Mixer สัญญาณ RF ซึ่งรับจากเสาอากาศภาครับผ่าน tuner and Convert, Intermediate Frequency (IF) ที่เกิดขึ้นตลอดเวลาหลังจากนั้นสัญญาณ IF จะขยายโดย IF amplifier. เมื่อสัญญาณถูกส่งถึง FM demodulator และ Stereo demodulator ถึง demodulated หน้าที่หลักการของแต่ละวงจรเป็นดังนี้

1. Antenna: เราสามารถเลือกความยาวของเสาอากาศ ขึ้นกับย่านความถี่ และ ความยาวคลื่น

2. Switch: ใช้เลือกสัญญาณ FM Broadcasting (88 MHz - 108 MHz) หรือ ภาครับ FM Signal ซึ่งส่งด้วย FM Transmitter ในบทที่ 1 ของบอร์ด FM-6021

3. Radio Frequency Amplifier: RF amplifier เป็นสิ่งสำคัญในภาครับ FM เพราะว่าสัญญาณ FM มากและกว้าง อย่างไรก็ตาม RF amplifier ใช้ขยายสัญญาณภาครับ Weak Signal และเพิ่ม Signal to Noise Ratio (S/N) ซึ่งหมายถึงความไวในการรับจะเพิ่มขึ้น การตอบสนองความถี่โดยการสะท้อนความถี่จะดีขึ้น และ RF Amplifier สามารถใช้เป็น Input Impedance ระหว่าง Antenna and Receiver

4. Mixer: หน้าที่หลักของวงจรนี้คือแปลงความถี่ ซึ่งใช้ผสมสัญญาณภาครับ RF Signal กับ Sine wave signal จาก LO Oscillator มันสามารถกำเนิดสัญญาณรวมหรือความถี่ที่แตกต่างกัน โดยทั่วไป IF Frequency จะต่ำกว่า RF Frequency ในภาครับฉะนั้น IF Frequency จะแตกต่างกันระหว่าง RF Frequency กับ LO Frequency

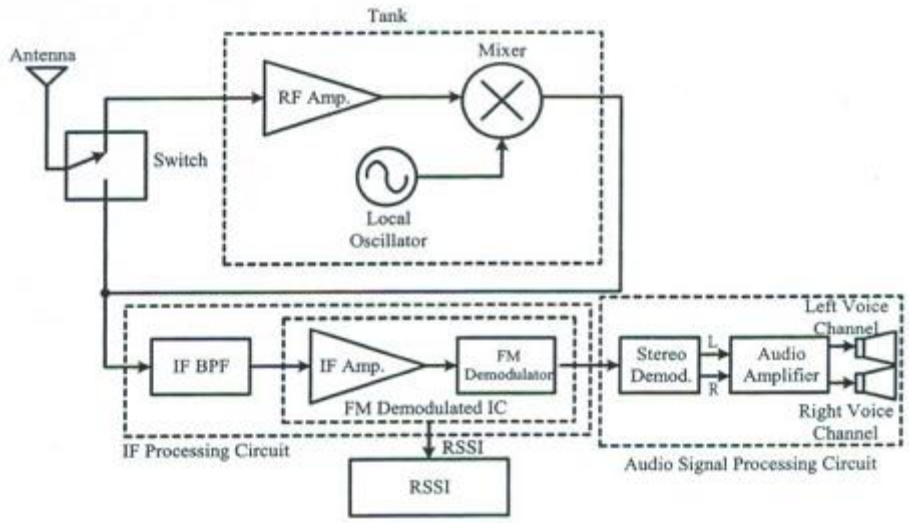
5. Local Oscillator: LO เป็นใช้ผลิตและส่งสัญญาณเพื่อ Mixer. หลักการของวงจรนี้ต้องการความสมดุลของสัญญาณ Oscillation เลือกความถี่ของภาครับจากการปรับความถี่ของ LO ซึ่งใช้ความคงที่ Fixed IF

6. IF Bandpass Filter: วัตถุประสงค์ของ IF Bandpass Filter คือทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณความถี่สูงต่ำ แต่ทำให้ frequency band signal ผ่านไปได้ Filter ที่ IF ใช้เคลื่อนย้ายสัญญาณ Noise จาก Mixer และลด IF Signal

7. Intermediate Frequency (IF) Amplifier: วงจรนี้ควรกำหนด gain ของภาครับมันจะสามารถตอบสนองการขยายสัญญาณ ปกติเราจะเพิ่ม Automatic Gain Control (AGC) ในวงจร IF amplifier เพื่อป้องกันการขยายสัญญาณเกินและการผิดเพียนของสัญญาณ

8. FM Demodulator: วัตถุประสงค์ของ FM Demodulator คือรับสัญญาณวิทยุของภาคส่ง หลักการคิดของตัวจับ Low Distortion ปัจจุบันนี้ FM Demodulator และ IF amplifier จะรวมอยู่ใน IF Integrated Circuit (IC)

9. Received Signal Strength Indicator (RSSI): RSSI ใช้บอกความแรงของภาครับ เราใช้ประโยชน์ FM Demodulator IC ซึ่งรวมอยู่ใน RSSI

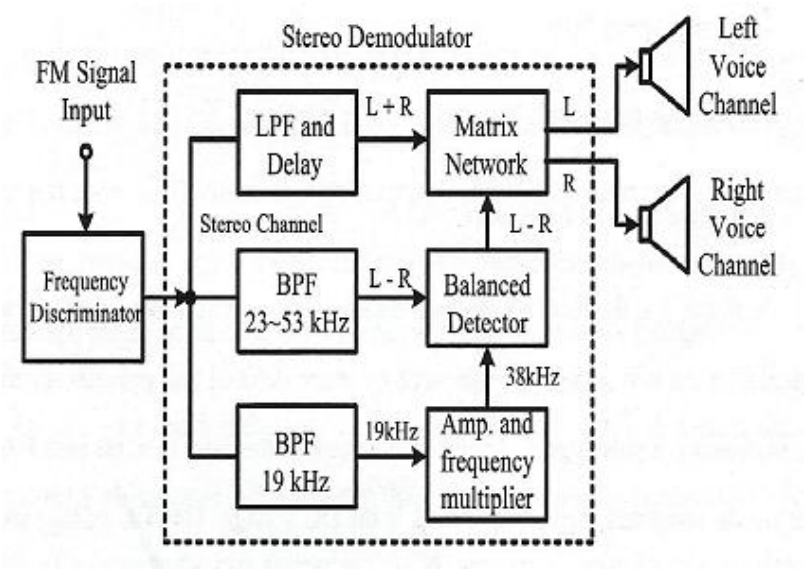


รูปที่ 1 The system block diagram of FM receiver

10. Stereo Demodulator: วัตถุประสงค์ของ Stereo Demodulator คือ Demodulate สัญญาณวิทยุ ซึ่งสัญญาณวิทยุจะทำ modulate โดย Stereo Demodulator ของภาคส่ง Stereo Demodulator ใช้ Low-pass filter ย้ายสัญญาณ ให้เหลือความถี่ที่ 23-53 kHz และใช้ Narrow Band Filter ให้เหลือความถี่ที่ 19 kHz จากนั้นเราใช้ Balance Detector เพื่อเพิ่มสัญญาณ L-R แค่ 15 kHz เท่านั้นสัญญาณ L+R ในเวลาเดียวกัน Stereo Demodulator ใช้ Band- pass filter ให้ L-R สัญญาณจะผ่านวงจร Matrix Network ซึ่งใช้แยกเสียง R และ Lในรูปที่ 2

11. Audio Frequency Amplifier: วัตถุประสงค์ของ Audio Frequency Amplifier ใช้ขยายสัญญาณวิทยุจนกระทั่งมากพอที่จะขับลำโพงได้ หลักการคิดของ Audio Frequency Amplifier เป็น Low Distortion เรารู้ว่าเราใช้ประโยชน์ของสัญญาณวิทยุเพื่อ Modulate และส่งสัญญาณ อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของความถี่ใช้เวลาสั้นมาก

Frequency Demodulator เป็นการเรียกการแยกความถี่ ซึ่งสามารถกลับค่าการปรับค่าของความถี่ Linear voltage ปกติพื้นฐานวงจร Phase Locked Loop (PLL) Demodulator วงจรกลับ FM เป็น AM, Quadrature Demodulator, Balanced Discriminator, Phase-Shift Discriminator ในบทนี้เราจะพูดถึงหลักการใช้งานของ PLL demodulator, FM to AM Conversion Circuit และ Quadrature Demodulator



รูปที่ 2 The circuit diagram of stereo demodulator

The Operation Theory of Phase Locked Loop

Phase Locked Loop (PLL) คือ feedback circuit ใน feedback loop สัญญาณ feedback จะล็อกสัญญาณความถี่และ Phase เหมือนความถี่และ Phase ของ Input signal ดังนั้นสำหรับการสื่อสารไร้สายถ้าความถี่ของการส่งคลาดเคลื่อนระหว่างการส่ง เมื่อ PLL ในภาครับจะ Lock และ Operate การส่งสัญญาณ ในการทดลองนี้มี PLL อยู่สองแบบ แบบที่หนึ่งเป็น demodulator ซึ่งใช้สำหรับ demodulation โดยการปรับ Phase และ Frequency แบบที่สองเป็นการส่งความถี่ Frequency Tracking ซึ่งจะจับที่ความถี่ที่เปลี่ยนไปและ Synchronize โดยปกติ PLL สามารถแบ่งเป็น 3 แบบ

1. Phase detector (PD)
2. Low-Pass fiklter (LPF)
3. Voltage Controlled Oscillator (VCO)

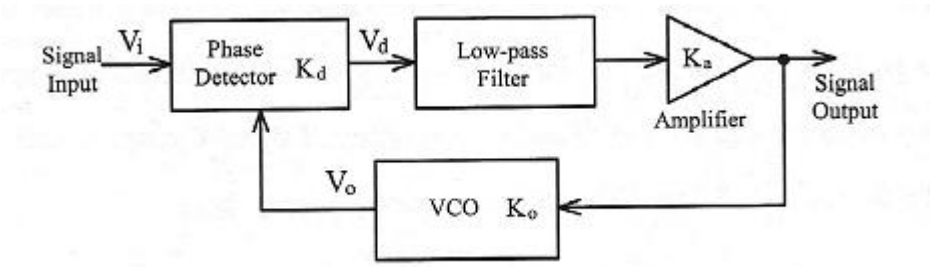
ในรูปที่ 3 หน้าที่ Phase detector (PD) เป็นภาครับ Input Signal และ VCO Signal เมื่อสัญญาณสองสัญญาณเปรียบเทียบกันโดย Phase detector และการสร้างสัญญาณเอาท์พุตเป็น Pulse Signal หลังจากนั้นสัญญาณนี้จะถูกส่ง Low-Pass Filter DC Voltage สามารถใช้ควบคุม Output Signal Frequency ของ VCO รูปที่ 3 Block Diagram ของ PLL

K_d is Gain of phase detector (Volts/Radian)

K_a is Gain of amplifier (Volt/Volt)

K_o is Gain of VCO (kHz/Volt)

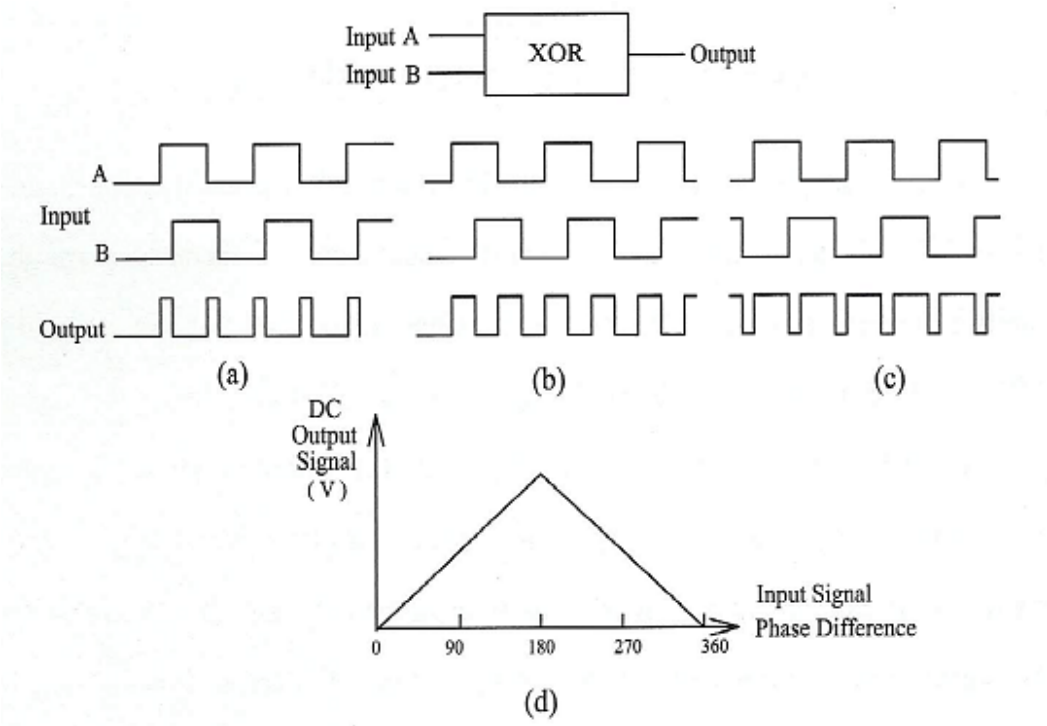
K_L is K_d K_a K_o equal gain of closed loop (kHz/Radian)



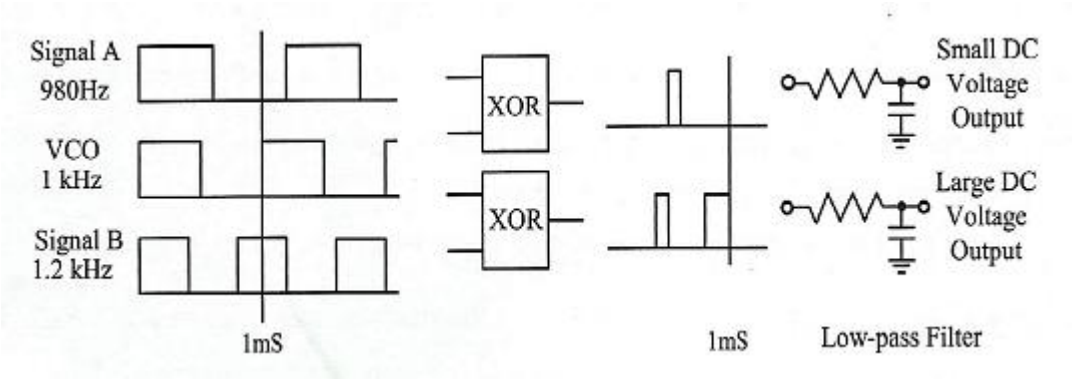
รูปที่ 3 Block diagram of phase locked loop

เราใช้วงจรตัวอย่างอธิบายพื้นฐานของ Phase detector รูปที่ 4 (a) แสดงความแตกต่างระหว่างสองอินพุท ความกว้าง ของสัญญาณ Pulse เป็น Narrowest รูปที่ 4 (b) แสดงความแตกต่างของ Phase ระหว่างสองอินพุทยาวกว่ารูปที่ 4 (a) ดังนั้นสัญญาณ O/P Pulse width กว้าวกว่ารูปที่ 4 (a) รูปที่ 4 (c) แสดงความแตกต่างของ Phase ระหว่างสองอินพุท สัญญาณยาวกว่า อย่างไรก็ตามสัญญาณ O/P Pulse width กว้าวกว่าถ้าสามสัญญาณนี้ผ่าน Low Pass Filter เพื่อย้าย AC Signal เมื่อขนาดของ DC Voltage ในรูปที่ 4 เป็นดังนี้

1. รูปที่ 4 (c) มีขนาด DC Voltage สูงกว่า
2. รูปที่ 4 (b) มีขนาด DC Voltage สูงเป็นอันดับสอง
3. รูปที่ 4 (a) มีขนาด DC Voltage ต่ำสุด ความสัมพันธ์ของ DC Voltage, Phase Difference ของ A, B I/P Signal แสดงดังรูปที่ 4 (d) กล่าวถึงการอธิบายแท้จริงวงจร Phase detector ไม่ใช่ง่ายอย่างที่เราคิด บนการควบคุมอื่นๆหลักการของระบบ PLL สามารถแสดงตัวอย่างในรูปที่ 5 เป็นที่เข้าใจ free-running frequency ของ VCO ตั้งค่า 1 kHz (Bias Voltage 2 V) ถ้าสัญญาณ I/P ต่ำกว่า 1 kHz และ สัญญาณ B สูงกว่า 1 kHz เราสามารถหาได้จากรูปที่ 5 เมื่อความถี่ของสัญญาณ A ต่ำกว่า free-running frequency ของ VCOนั้น O/P ของ Low-Pass Filter จะรับแรงดันในระดับต่ำ (1 V) แรงดันในระดับต่ำจะปรับ Oscillation Frequency ของ VCO ดังนั้น Oscillation Frequency จะลดลงจนกระทั่งความถี่ของสัญญาณ O/P ของ VCO และความถี่ของสัญญาณเท่ากัน เมื่ออินพุทความถี่ของสัญญาณ B สูงกว่าพื้นฐานของ Frequency ของ VCO, O/P ของ Low-Pass Filter ภาครับสูงกว่า (3 V) ดังนั้น Oscillation Frequency ของ VCO จะสูงกว่าจนกระทั่งความถี่ของสัญญาณ O/P ของ VCO และความถี่ของสัญญาณ B เท่ากัน โดยปกติต้องใช้เวลาเพื่อล็อก VCO นั้นสั้นมาก

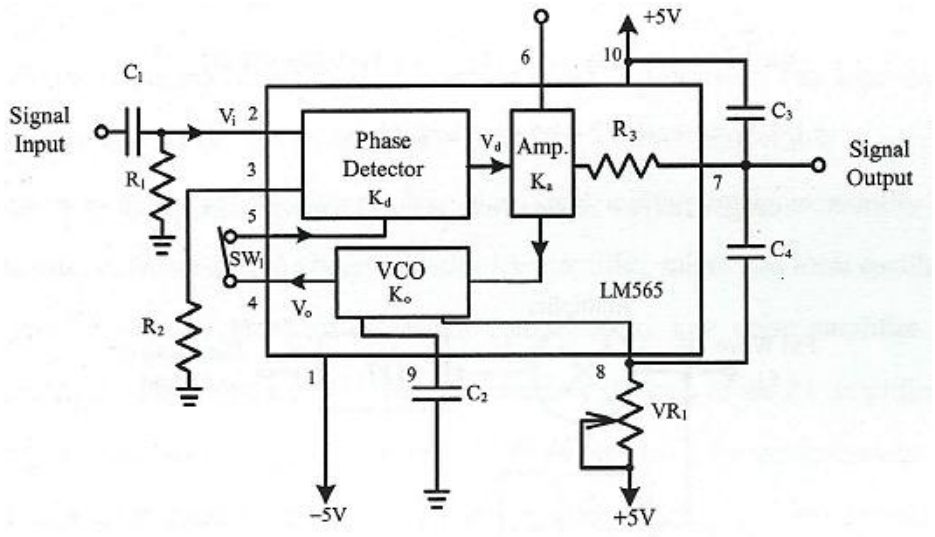


รูปที่ 4 The theory of phase detector



รูปที่ 5 The theory of locked frequency

รูปที่ 6 เป็นวงจรของ LM565 PLL เราสามารถวงจร Frequency Demodulator เมื่อสัญญาณอินพุทเพิ่มขึ้นสัญญาณ Output Voltage จะลดลงอย่างไรก็ตามเมื่ออินพุทความถี่ของสัญญาณลดลงสัญญาณ Output Voltage เพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามเราสามารถใช้ประโยชน์ของความสัมพันธ์ระหว่าง Voltage ของ PLL และ frequency เพื่อออกแบบ Frequency Demodulator



รูปที่ 6 LM 565 phase locked loop

LM565 Phase Detector และ VCO เป็นการออกแบบให้อยู่ภายใน IC ยิ่งกว่านั้น VCO ของ LM565 จะเหมือนกับ VCO ของ LM566 Free-running frequency (f_o) ของ VCO จะกำหนดจากภายนอกโดย C2 and VR1, Low-Pass Filter ประกอบด้วย R3 ที่ Pin 7 และ C3 จากภายนอก วัตถุประสงค์ของ C4 ซึ่งต่อระหว่าง Pins 7 และ Pin 8 คือลด Parasitic Oscillation ให้น้อยลง

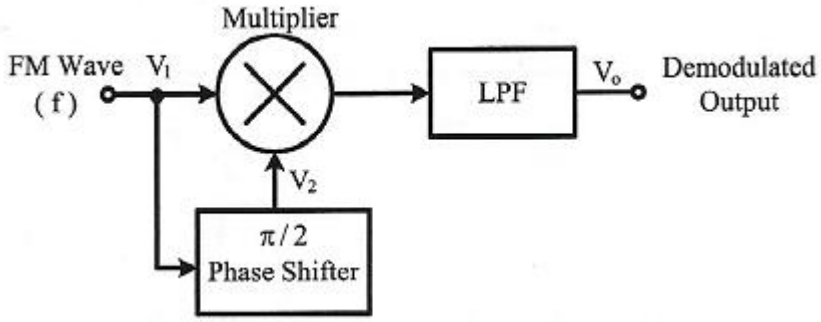
The Operation Theory of Quadrature Demodulator

รูปที่ 7 เป็นบล็อคไดอะแกรมของ Quadrature Demodulator หรือ Product Detector ตามรูปที่ 7 เราเรียนรู้หลักการทำงานของ Quadrature Demodulator การเพิ่มคลื่น FM V1 โดยหลังจาก Phase shift FM ที่ V2 เราจะได้รับสัญญาณ audio จากการใช้ Low-Pass Filter ให้ FM wave หลังจาก Phase shift FM ที่ V2

$$V_2 = A_2 \cos\left[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t) + \pi/2 + k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t\right]$$

เมื่อ k เป็น Constant Ratio เป็น Phase shift ของสัญญาณความถี่ FM หลังจากสัญญาณ V1 และ V2 ผ่าน Multiplier O.P signal จะเป็นตามนี้

$$\begin{aligned} V_1.V_2 &= A_1A_2 \cos\left[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t)\right] \cos\left[2\pi f_c t + \beta \sin(2\pi f_m t) + \pi/2 + k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t\right] \\ &= \tfrac{1}{2} A_1A_2 \left\{\cos\left[\pi/2 + k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t\right]\right. \\ &\quad \left. \cos\left[(2\pi f_c t) + 2\beta \sin(2\pi f_m t) + \pi/2 + k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t\right]\right\} \end{aligned} \quad (2.1)$$



รูปที่ 7 The block diagram of quadrature demodulator

ถ้าเราใช้ประโยชน์ของ Low-Pass Filter เพื่อย้าย เมื่อแรงดันของ demodulator เป็น

$$\begin{aligned} V_o &= \tfrac{1}{2} A_1 A_2 \left\{ \cos\left(\tfrac{\pi}{2} + k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t\right) \right\} \\ &= -\tfrac{1}{2} A_1 A_2 \sin\left(k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t\right) \end{aligned} \qquad (2.2)$$

ถ้าค่าของ น้อยมาก สมการ (2.2) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$V_o \approx -\tfrac{1}{2} A_1 A_2 k\Delta\omega \cos 2\pi f_m t \qquad (2.3)$$

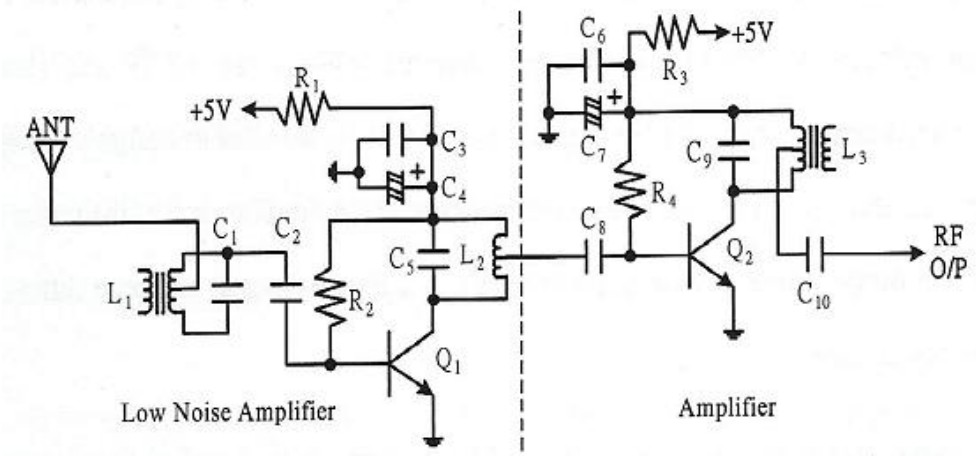
จากสมการเราจะรู้อัตราการขยายของ audio signal เป็นสัดส่วน $k\Delta\omega$ ในการออกแบบ Quadrature Demodulator ในรูปที่ 7 เราใช้ประโยชน์ Balance Modulator ใน AM Transmitter (ETEK AM-6011) ออกแบบ Multiplier เพื่อ phase shifter เราสามารถใช้ Tank Circuit , Delat-line , digital delay circuit เพื่อการออกแบบ phase shifter อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงโดยตรงของ Phase shift ควรจะดีและคุณสมบัติของความถี่เปรียบเทียบกับอัตราการขยายจะต้อง Flatness ซึ่งเป็นไปได้ที่ความบิดเบือนจะลดลง

The Operation Theory of FM Receiver

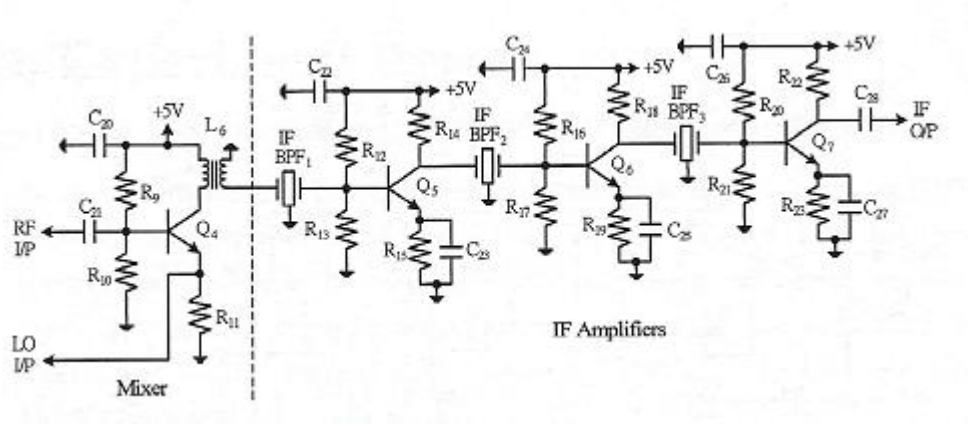
รูปที่ 8 เป็นวงจรไดอะแกรมของ Tuner ของ FM Receiver Tuner ของ FM Receiver ใช้กลับสัญญาณ (88 MHz – 108 MHz) ซึ่งรับจากเสาอากาศ IF Output สัญญาณจะง่ายต่อการขยายและ demodulate ตามรูปที่ 1 Tuner จะประกอบด้วย RF Amplifier, Mixer, Local Oscillator ในรูปที่ 8 RF Amplifier ประกอบด้วย Low Noise Amplifier และ Amplifier ซึ่งแสดงในรูปที่ 8 (a) เราสามารถกำหนด gain ของ RF Amplifier โดยเลือกผลของ Amplifier อย่างไรก็ตามคุณภาพไม่จำเป็นหลายๆ ช่วงของการขยายสัญญาณเราต้องการพิจารณา Impedance ระหว่างเวลา I/P

และ O/P ในการกลับค่า RF signal เป็น IF signal จำเป็นต้องปรับค่าและผสมสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 8 (b) Q4 เป็นการตอบสนองเพื่อการ Mix สัญญาณ Q5, Q6, Q7 และ Three bandpass filter เป็น IF Amplifier อย่างไรก็ตามการคงไว้ของเอาท์พุตความถี่ของ IF เราต้องการออกแบบ Voltage Controlled Oscillator (VCO) เพื่อเปลี่ยน Local Oscillator Signal Source ของ Mixer แสดงในรูป 2.8 (c) สัญญาณ IF ที่ช่องสัญญาณความถี่ของ RF signal

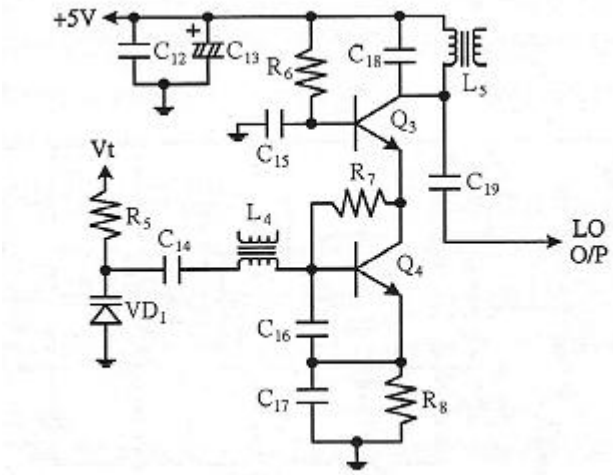
รูปที่ 9 เป็นวงจรไดอะแกรมของขั้นตอน IF และ Audio circuit ของ FM receiver ตามรูปที่ 9 ขั้นตอนการทำงานของ IF ประกอบด้วย IF Bandpass filter, IF Amplifier, FM Demodulator และขั้นตอนการทำงานของ Audio ประกอบด้วย Stereo Demodulator, Audio Amplifier โดยปกติเราใช้ FM Demodulate IC เพื่อออกแบบ IF ของ FM Receiver ซึ่ง FM demodulated IC ประกอบด้วย IF Amplifier และ FM demodulator ดังนั้นการออกแบบอย่างง่ายๆ ปกติ FM Demodulation ของ Demodulate IC เป็น Quadrature Demodulator ดังนั้น phase shifter ซึ่งประกอบด้วย L1 and C26 ควรจะเป็นเส้นตรงบนความแตกต่างของ phase shifter ขณะที่ขั้นตอนการทำงานของ Audio ในรูปที่ 1 เราใช้ประโยชน์ IC ซึ่งประกอบด้วย Stereo Demodulator, Audio Amplifier รูปที่ 9 (b) เป็นวงจรไดอะแกรมของ Stereo Demodulator Demodulated Audio Signal จะส่ง Stereo Demodulator IC เพื่อ demodulated ใช้ Low - Pass Filter เพื่อย้ายสัญญาณซ้ายเท่านั้น L+R Signal ความถี่ ภายใน 76 kHz จะแบ่งออก 19 kHz และเราสามารถปรับ VR เพื่อให้ได้สัญญาณ 19 kHz. หลังจากนั้น 19 kHz จะ Multiplied ไป 76 kHz และส่ง PLL และ เปรียบเทียบกับ phase ที่ I/P port. สุดท้าย เราใช้ Balance Modulator เพื่อได้ L+R Signal คืน Audio Signal และสัญญาณจะผ่าน Matrix Network เพื่อแยกช่อง R และช่อง L. รูปที่ 9 (c) เป็นวงจรไดอะแกรมของ Audio Amplifier มีสองชุดการใช้งาน Operational amplifier (OPA) ซึ่งสามารถขยาย ได้ 200 ครั้งของ gain เพื่อขับลำโพงช่องสัญญาณซ้าย และ ขวา



a) the circuit diagram of RF amplifier

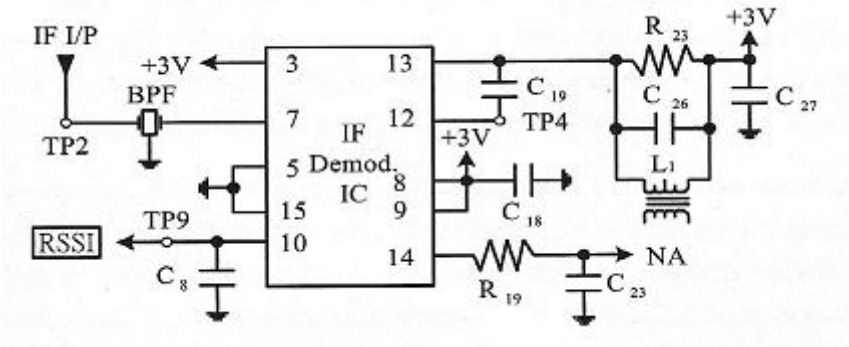


b) the circuit diagram of mixer and IF amplifier

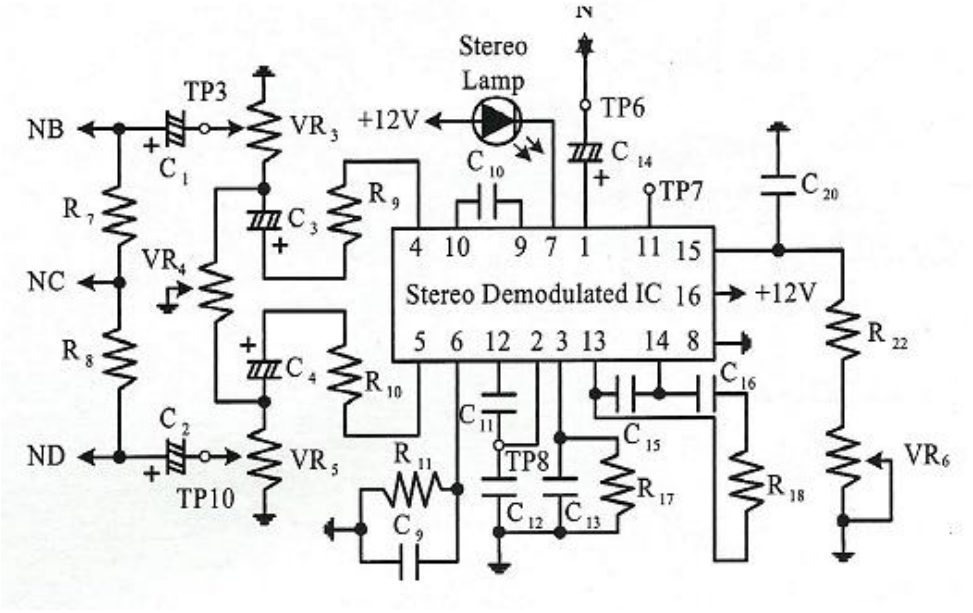


c) the circuit diagram of local oscillator

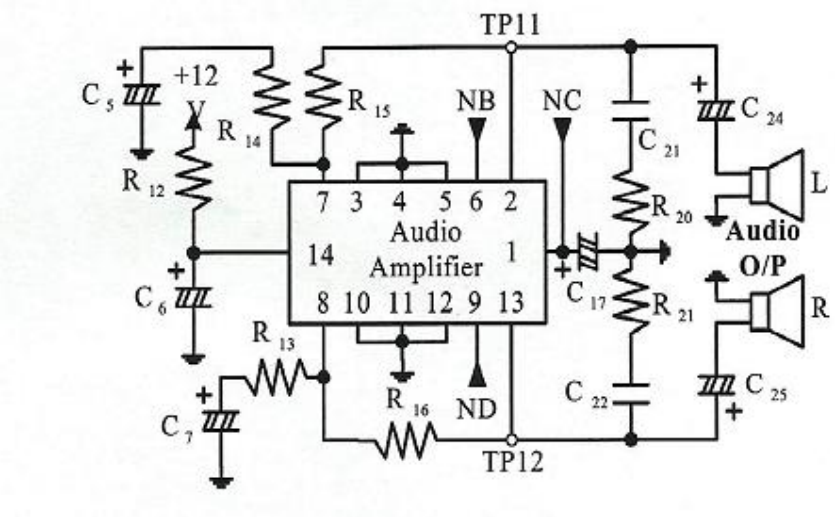
รูปที่ 8 the circuit diagram of the tuner



a) the circuit diagram of IF processing circuit



b) Circuit diagram of stereo demodulator



c) Circuit diagram of audio amplifier

รูปที่ 9 Circuit diagram of IF and audio processing circuit of FM receiver

19.8. อุปกรณ์การทดลอง

1. บอรด์ทดลอง ETEK FM-6021	1	บอร์ด
2. บอรด์ทดลอง ETEK FM-6022	1	บอร์ด
3. สโคปวัดสัญญาณ	1	เครื่อง
4. แหล่งจ่ายไฟ	1	เครื่อง

19.9. ขั้นตอนการทดลอง (Experiment Items)

Experiment 1: Measurement of FM Received signal Waveforms

1. เตรียม FM Transmitter ตามรูปที่ 4 หรือ ETEK FM-6021 สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Audio Signal TP2 และเมื่อปรับค่าที่ VR3 เอาท์พุต ความถี่เป็น 1 kHz Sine Wave ให้ J1 เป็น Short Circuit และ J2 เป็น Open Circuit ปรับค่าที่ VR2 ดังนั้นเอาท์พุต Amplitude ของ Audio Signal เป็น 2 Vp-p

2. จัดเตรียมอุปกรณ์ FM Transmitter ตามรูปที่ 8 และ 2.9 หรือ ETEK FM-6022 สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ปรับค่าที่ VR1 ดังนั้นช่องรับสัญญาณจะแสดงที่ 100 MHz ในตอนนี้ FM Receiver เลือกสัญญาณรับจาก FM Signal ETEK FM-6021 module

3. ปรับค่าที่ VR4 ไปที่กึ่งกลาง เมื่อปรับ VR3 และ VR5 ไปควบคุมเสียงซ้าย และ ขวาของ FM Receiver ดังนั้นปรับระดับความดังให้พอเหมาะ ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Output port (TP10) and (TP11) L, R ของ Audio Amplifier ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 2.1

4. ปรับค่าที่ VR2 ของ FM Transmitter ดังนั้นอัตราการขยายเอาท์พุตของ Audio Signal TP1 คือ 3 Vp-p and 4 Vp-p ตามลำดับทำขั้นตอน 2 และ3 ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 2.1

5. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Audio Signal TP2 ของ Transmitter ปรับค่าที่ VR3 ดังนั้นเอาท์พุตความถี่เป็น 500 Hz, 1 kHz และ 1.2 kHz Sine Wave ตามลำดับให้ J1 เป็น Short Circuit และ J2 เป็น Open Circuit ปรับค่าที่ VR2 ดังนั้นอัตราการขยายเอาท์พุตของ Audio Amplifier (TP1) เป็น 2 Vp-p ทำขั้นตอน 2 และ3 ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 2.2

6. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Audio Signal TP2 ของ Transmitter ปรับค่าที่ VR3 ดังนั้นเอาท์พุตความถี่เป็น 1 kHz Sine Wave ให้ J1 เป็น Short Circuit และ J2 เป็น Open Circuit ปรับค่าที่ VR2 ดังนั้นอัตราการขยายเอาท์พุตของ Audio Amplifier (TP1) เป็น 3Vp-p ทำขั้นตอน 2 และ3 ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณของ Audio Signal TP2 ถึง TP11 ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 2.3 เอาท์พุตของ FM Transmitter (TP7) ให้บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 4

Experiment 2: Measurement of Tunable Broadcast Signal

1. เตรียม FM Transmitter ตามรูปที่ 8 รูปที่ 9 หรือตามบอร์ด ETEK FM-6022 สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ภาครับ FM จะรับสัญญาณ Broadcasting ความถี่ FM ที่ 88 MHz-108 MHz

2. ปรับค่าที่ VR6 เอาท์พุตรูปคลื่นของจุดวัด TP6 เป็นสัญญาณ Squarewave 19 kHz

3. ปรับค่าที่ VR4 ไปที่กึ่งกลาง ปรับ VR3 และ VR5 ควบคุมระดับความดังช่องรับสัญญาณเสียงซ้าย และ ขวาของ FM Receiver ให้เอาท์พุตระดับความดังพอดีหรือเหมาะสม

4. ปรับค่าที่ VR1 จนกระทั่งสัญญาณเอาท์พุต Broadcasting คงที่

5. ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณจุดวัด TP1 ถึง TP11 ของ FM Receiver บันทึกผลการวัดลงในตารางที่ 2.4

Experiment 3: Measurement of FM Wireless Transceiver

1. เตรียม FM Transmitter ตามรูปที่ 4 หรือตามบอร์ด ETEK FM-6021 สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ใช้ Oscilloscope วัดดูสัญญาณเอาท์พุต Audio Signal จุดวัด TP2 ปรับ VR3 เอาท์พุตความถี่เป็น 1 kHz Sine Wave ให้ J2 เป็น Short Circuit และ J1 เป็น Open Circuit ปรับค่า VR2 อัตราการขยายสัญญาณเอาท์พุต Audio เป็น 3 Vp-p

2. เตรียม FM Receiver ตามรูปที่ 8 รูปที่ 9 หรือตามบอร์ด ETEK FM-6022 สับสวิทช์ SW1 and SW2 ไปที่ ON ปรับค่าที่ VR1 ดังนั้นช่องรับสัญญาณ Receiver จะแสดงผลที่ 100 MHz ในตอนนี้ FM Receiver เลือกสัญญาณรับจาก FM Signal ETEK FM-6021 module

3. ให้ต่อ Microphone ที่ I/P Audio Signal หลังจากนั้นปรับ VR3 และ VR5 ควบคุมระดับความดังช่องรับสัญญาณเสียง (Speaker) ซ้าย และ ขวาของ FM Receiver ให้เอาท์พุตระดับความดังพอดีหรือเหมาะสมสวิทช์ SW2 ไปที่ Off ในเวลาเดียวกันเราสามารถควบคุมระดับความดังของ Speaker ได้จากภายนอก

สรุปผลการทดลอง

ตารางที่ 2.1 Observe on the variation of the frequency modulation signal by changing the frequency of the audio signal

Audio Signal amplitude	**Output Signal Waveform**	**Output Signal Frequency Spectrum**
500 Hz		
1 kHz		
1.2 kHz		

ตารางที่ 2.2 Measured result of FM receiver

Test Points	Output Signal Waveform	Test Points	Output Signal Waveform
TP2		TP3	
TP4		TP5	
TP6		TP7	

ตารางที่ 2.2 Measured result of FM receiver (continue)

Test Points	Output Signal Waveform	Test Points	Output Signal Waveform
TP8		TP9	
TP10		TP11	

ตารางที่ 2.3 Measured result of FM broadcasting received signal

Test Points	Output Signal Waveform	Test Points	Output Signal Waveform
TP1		TP2	
TP3		TP4	
TP5		TP6	

ตารางที่ 2.2 Measured result of FM broadcasting received signal (continue)

Test Points	Output Signal Waveform	Test Points	Output Signal Waveform
TP7		TP8	
TP9		TP10	
TP11			

19.10. สรุปผลการทดลอง

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

19.11. คำถามท้ายการทดลอง

1. ให้อธิบายลักษณะการมอดูเลทแบบ FM อย่างละเอียด

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

2. ให้วาดรูปสเปคตรัมของมอดูเลทแบบ FM

.....

.....

.....

.....

.....

.....

3. ให้อธิบายข้อดีและข้อเสียของการมอดูเลทแบบ FM

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

4. ให้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องส่งแบบ FM แสดงสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

5. ให้อธิบายหลักการทำงานของเครื่องรับแบบ FM แสดงสัญญาณผลลัพธ์ที่ได้

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....

.....