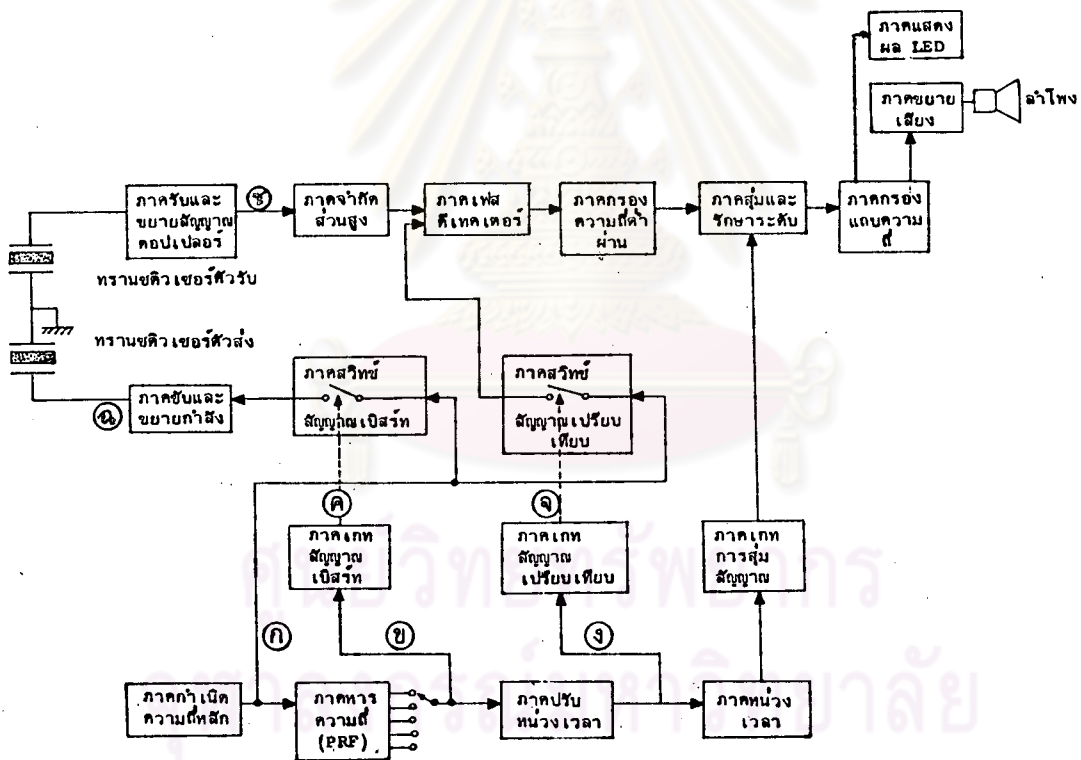


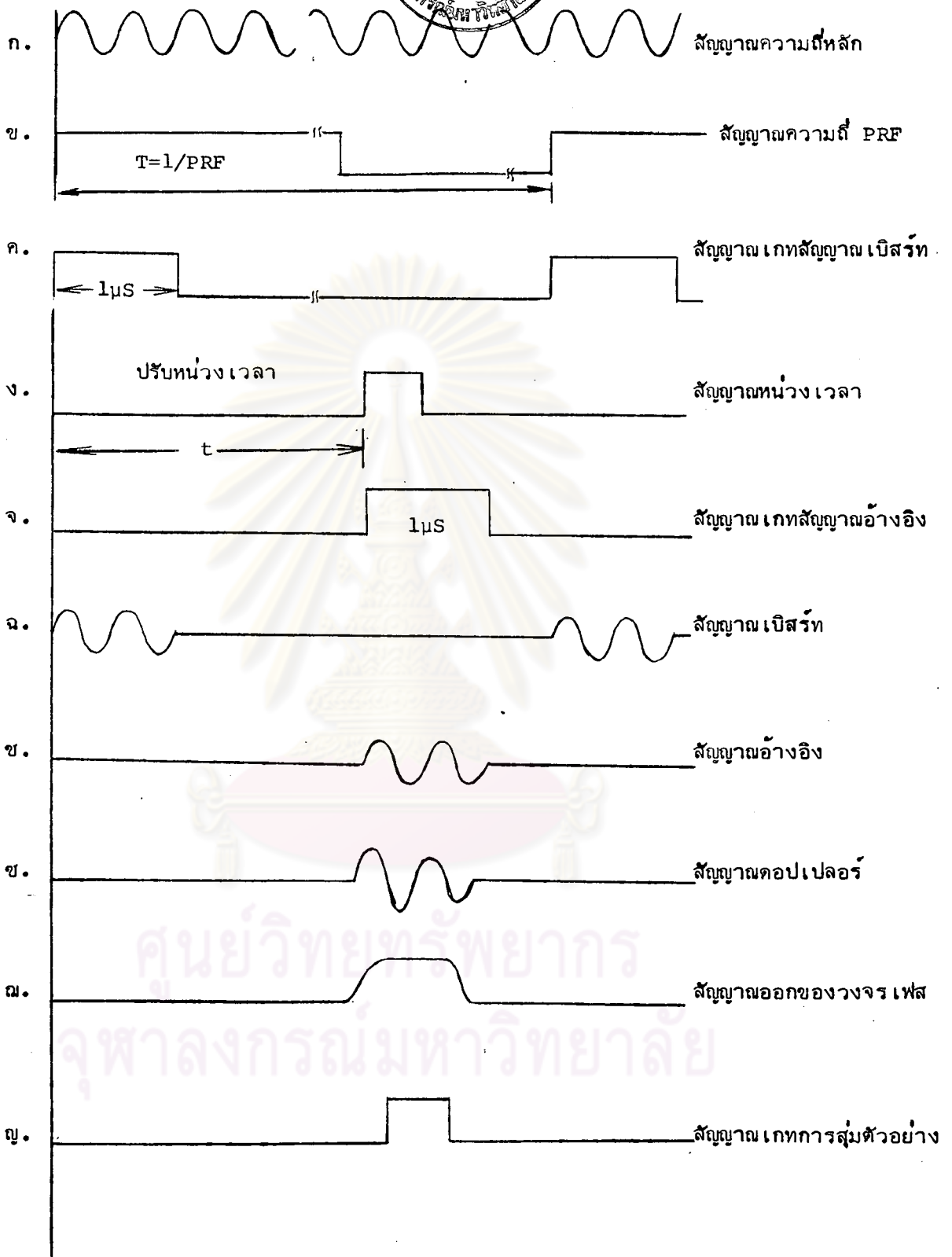


การออกแบบสร้างและทดลอง เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์
คอปเปลอร์ของอุลตราซาวน์เพื่อวัดการไหลของโลหิต

เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปลอร์ที่ทำการวิจัยและสร้างนี้ เป็นระบบฟิลส์คอปเปลอร์แบบโคฮีเรนต์ (COHERENT PULSE DOPPLER) มีรายละเอียดของบล็อกไดอะแกรม ดังรูปที่ 3.1 (16)

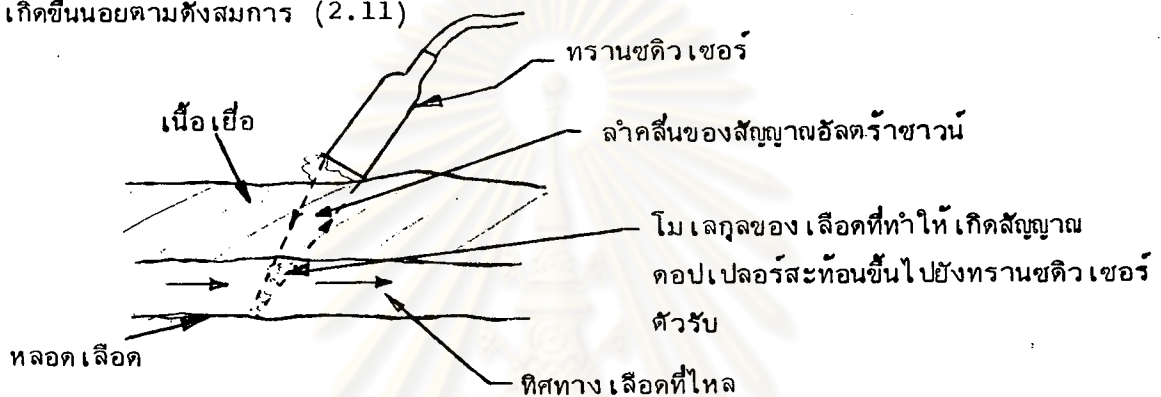


รูปที่ 3.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปลอร์ของอุลตราซาวน์เพื่อวัดการไหลของโลหิต
รูปคลื่นจุด ก. ฯลฯ ให้ดูรูปที่ 3.2 ก. ฯลฯ



รูปที่ 3.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ ที่ได้จากการบล็อกไดอะแกรมรูป 3.1

การทำงานของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์อาศัยหลักการของการส่งสัญญาณ เบิสร์ทของคลื่นอัลตราซาวด์ไปยังหลอดเลือดที่จะวัดการไหลของเลือดด้วยทรานซิวเซอร์ตัวส่ง เมื่อคลื่นเดินทางไปกระทบกับเลือดที่ไหลจะทำให้เกิดสัญญาณคอปเปิลอร์สะท้อนขึ้นมาและรับได้ด้วยทรานซิวเซอร์ตัวรับ ดังรูปที่ 3.3 สัญญาณคอปเปิลอร์ที่รับได้จะมีความถี่ของสัญญาณต่างไปจากเดิม จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับความเร็วของเลือดที่ไหล ถ้าความเร็วของเลือดที่ไหลมีมากความถี่ก็จะเกิดขึ้นมาก ถ้าความเร็วของเลือดที่ไหลน้อยความถี่ก็จะเกิดขึ้นน้อยตามดังสมการ (2.11)



รูปที่ 3.3 แสดงการส่งคลื่นสัญญาณ เบิสร์ทลงไปยังหลอดเลือดใต้ผิวหนังบริเวณที่วัดการไหลของเลือด และสัญญาณคอปเปิลอร์ที่สะท้อนจากโมเลกุลของเลือดกลับไปยังทรานซิวเซอร์ตัวรับ

สัญญาณคอปเปิลอร์ที่รับได้จะนำไปขยายให้มีความแรงมากขึ้น และนำมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงโดยวงจรเฟสดีเทคเตอร์ ผลของความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองจะทำให้มีสัญญาณออกที่วงจรเฟสดีเทคเตอร์ สัญญาณออกที่ได้สามารถนำไปแปรผลเป็นค่าความเร็วของเลือดที่ไหลในหลอดเลือดได้

เครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ของอัลตราซาวด์เพื่อวัดการไหลของโลหิตที่ออกแบบและสร้างนี้มีส่วนประกอบของภาคต่าง ๆ และรายละเอียดของคุณสมบัติไฟฟ้าที่ออกแบบดังต่อไปนี้

1) ภาคกำเนิดความถี่หลัก (MASTER OSCILLATOR)

ทำหน้าที่สร้างสัญญาณความถี่รูปไซน์ขนาดความถี่ที่ตรงกับความถี่รีโซแนนซ์ของทรานซิวเซอร์ที่ใช้ คือ 4.19 เมกกะเฮิรตซ์

- 2) ภาคการความถี่ที่โปรแกรมได้ (PROGRAMABLE DIVIDE BY-N)
ทำหน้าที่หารความถี่หลักลงให้เป็นความถี่ PRF ขนาดต่าง ๆ คือ 20, 10, 5, 2.5 และ 1.25 กิโลเฮิร்தซ
- 3) ภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ ประกอบด้วยภาคต่าง ๆ ได้แก่
 - ก) ภาคเกทสัญญาณเบิรสร்த ทำหน้าที่สร้างสัญญาณเกทขนาด .7-2.1 ไมโครวินาที เพื่อไปควบคุมการส่งสัญญาณจากภาคกำเนิดความถี่หลักไปยังภาคขยายกำลัง และทรานซิวเซอร์ตัวส่ง
 - ข) ภาคหน่วงเวลาการ เกทสัญญาณอ้างอิง
ทำหน้าที่ปรับหน่วง เวลาของสัญญาณอ้างอิงที่จะนำไปเปรียบเทียบกับสัญญาณคอปเปิลอร์ที่รับกลับมา เวลาของการหน่วงมีค่าจาก 0 ถึง $1/PRF$ ไมโครวินาที
 - ค) ภาค เกทสัญญาณอ้างอิง
ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ เกทขนาด .7-2.1 ไมโครวินาที เพื่อนำไปควบคุมภาคสวิทซ์สัญญาณอ้างอิงให้ทำการต่อสัญญาณจากภาคกำเนิดความถี่หลักให้ส่งไปยังภาคเฟสดีเทคเตอร์
 - ง) ภาคหน่วงเวลาการ เกทสัญญาณสุ่ม
ทำหน้าที่สร้างสัญญาณหน่วงเวลาขนาด .5 ถึง 1.5 ไมโครวินาที
 - จ) ภาค เกทสัญญาณสุ่ม
ทำหน้าที่สร้างสัญญาณ เกทขนาดประมาณ .5 ไมโครวินาที เพื่อนำไปควบคุมการสุ่มตัวอย่างของสัญญาณขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์
- 4) ภาคสวิทซ์สัญญาณต่าง ๆ ประกอบด้วยภาคต่าง ๆ ได้แก่
 - ก) ภาคสวิทซ์สัญญาณเบิรสร்த
 - ข) ภาคสวิทซ์สัญญาณอ้างอิง
 - ค) ภาคสวิทซ์การสุ่มสัญญาณของวงจรสุ่มและรักษาระดับ
- 5) ภาคขับและขยายกำลัง
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเบิรสร்தให้มีแอมพลิจูดของสัญญาณประมาณ 55 โวลท์ยอดถึงยอด เพื่อนำไปป้อนให้กับทรานซิวเซอร์ตัวส่ง
- 6) ภาครับและขยายสัญญาณคอปเปิลอร์ (RECEIVER & AMPLIFIER)
ทำหน้าที่รับและขยายสัญญาณคอปเปิลอร์ มีอัตราการขยายประมาณ 90 เดซิเบล

7) ภาคเฟสดีเทคเตอร์ (PHASE DETECTOR)

ทำหน้าที่เปรียบเทียบเฟสของสัญญาณตอบเพลอร์กับสัญญาณอ้างอิงที่ส่งไปเปรียบเทียบ ความต่างเฟสทั้งสองจะอยู่ในช่วง 0-180 องศา แรงดันขาออกที่ได้จากการเปรียบเทียบเฟสจะอยู่ในช่วง ± 3 โวลต์

8) ภาคลุ่มและรักษาระดับ (SAMPLE & HOLD)

ทำหน้าที่ลุ่มสัญญาณขาออกของภาคเฟสดีเทคเตอร์ด้วยเวลา .5 ไมโครวินาที และเก็บรักษาระดับไว้จนถึงการลุ่มสัญญาณช่วงต่อไป

9) ภาคกรองแถบความถี่ ประกอบด้วย

ก) ภาคกรองผ่านความถี่สูง ทำหน้าที่ลดสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นระหว่างการวัด เนื่องจากการเคลื่อนตัวของทรานซิวเซอร์ มีความถี่คutoffที่ 50 เฮิรท์ซและมีสโลป +18 dB/octave

ข) ภาคกรองผ่านความถี่ต่ำ ทำหน้าที่ลดสัญญาณความถี่ PRF ที่ปนอยู่ในสัญญาณขาออกของภาคลุ่มและรักษาระดับให้หมดไป ความถี่คutoffที่ใช้คือ 10, 5, 2.5, 1.25 และ .625 กิโลเฮิรท์ซ และมีสโลป -18 dB/octave

10) ภาคขยายเสียง (AUDIO AMPLIFIER)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณขาออกจากภาคกรองความถี่ให้มีความแรงพอสำหรับขับลำโพงให้ดัง ขนาดประมาณ 1 วัตต์

11) ภาคแสดงผล (DISPLAY)

ทำหน้าที่แสดงค่าของความถี่ตอบเพลอร์ที่ได้จากการวัดการไหลของเลือด ซึ่งประกอบด้วย LED (LIGHT EMITTING DIODE) 20 ตัว แสดงความถี่ได้ประมาณ 7 กิโลเฮิรท์ซ

12) ภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (POWER SUPPLY)

ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาคต่าง ๆ ได้แก่

+ 5 โวลต์ สำหรับภาคกำเนิดความถี่หลัก

ภาคหารความถี่

ภาคเกทสัญญาณต่าง

ภาคสวิทช์สัญญาณต่าง ๆ

± 12 โวลต์ สำหรับภาคขับกำลัง

ภาคขยายเสียง

± 12 โวลต์ สำหรับภาครับและขยายสัญญาณคอปเปิลอร์

ภาคเฟสดีเทคเตอร์

ภาคกรองแถบความถี่

± 28 โวลต์ สำหรับภาคขยายกำลังสำหรับขับทรานซิสเตอร์ตัวส่ง



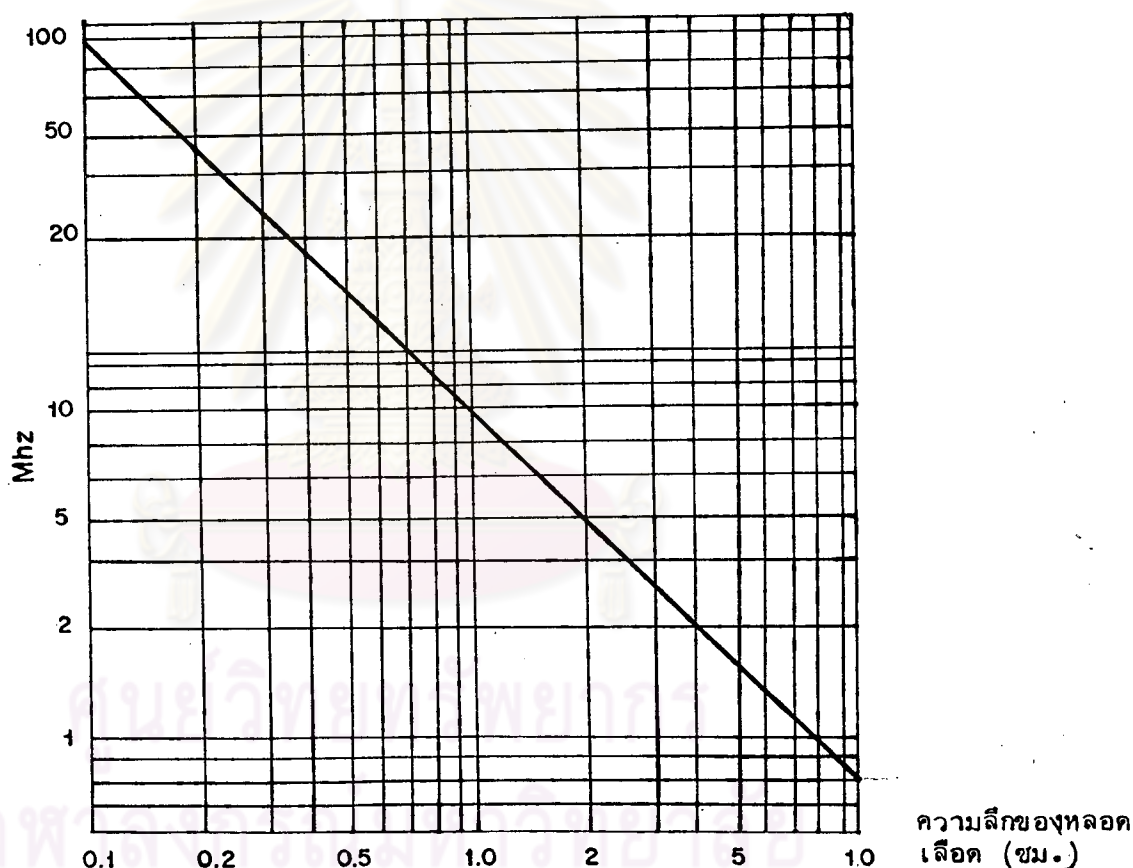
ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 ภาคกำเนิดความถี่หลัก

3.1.1 การเลือกความถี่สำหรับใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ดอปเปลอร์

การเลือกความถี่อัลตราซาวด์ของภาคกำเนิดความถี่หลักขึ้นอยู่กับส่วนต่าง ๆ หลายประการ และความถี่ที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปจะอยู่ในช่วง 2-10 เม็กกะเฮิรตซ์ จากการพัฒนาและประสบการณ์ที่ได้จากเครื่องดอปเปลอร์อัลตราซาวด์ชนิดเคลื่อนที่ เนื่องจากความถี่ 4-5 เม็กกะเฮิรตซ์สามารถใช้ตรวจจับการไหลของเลือดได้ดีที่ความลึกของหลอดเลือดประมาณ 4-6 ซม. (16) การเลือกความถี่สำหรับการใช้งานสำหรับความลึกอื่น ๆ สามารถดูได้จากกราฟรูปที่

3.1.1.1



รูปที่ 3.1.1.1 กราฟแสดงความถี่ที่เหมาะสมของดอปเปลอร์อัลตราซาวด์ที่ใช้วัด

การไหลของเลือดที่อยู่ลึกขนาดต่าง ๆ กัน

การเลือกความถี่อัลตราซาวด์ขึ้นอยู่กับส่วนต่าง ๆ คือ

3.1.1.1.1 ความลึกของหลอดเลือดที่จะวัด

ระดับความลึกของหลอดเลือดที่วัดมีความสำคัญต่อการเลือกความถี่ที่ใช้มาก เพราะคลื่นอัลตราซาวด์ที่ถูกส่งออกไปด้วยทรานซิวเซอ์ตัวส่งจะต้องเดินทางผ่านเนื้อ

เยื่อลงไปยังหลอดเลือดที่วัด แล้วจึงสะท้อนกลับขึ้นมา พลังงานที่สูงสูญเสียไปเนื่องจากคลื่นเดินทางผ่านเนื้อเยื่อคิดเป็นประมาณ 1.5-2 ดีบี ต่อระยะทาง 1 เซนติเมตร ต่อความถี่ 1 เม็กกะเฮิรตซ์ (1.5-2 dB/cm/MHz)⁽¹⁶⁾ จะเห็นได้ว่าความลึกของหลอดเลือดและความถี่ที่ใช้มีผลต่อกัน ดังนั้นการเลือกความถี่สำหรับใช้งานจึงต้องเลือกให้เหมาะกับงานที่จะใช้วัด ตัวอย่างของการนำความถี่มาใช้งานในการวัด⁽¹⁷⁾ ดังตารางที่ 3.1.1

ตารางที่ 3.1.1 แสดงการนำความถี่อัลตราซาวด์ไปใช้งานต่าง ๆ

ความถี่ (MHz)	งานที่ใช้วัด
2.25	Fetal heart beat
5	Medium depth arterial and venous
8.2	Superficial arterial and venous
10	Peripheral vessels

3.1.1.2 ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของหลอดเลือด

หลอดเลือดในร่างกายมนุษย์มีขนาดต่าง ๆ กันมากมายตั้งแต่น้อยกว่ามิลลิเมตร จนถึงขนาดโตกว่าเซนติเมตร การเลือกความถี่ที่ใช้ก็ควรให้เหมาะกับขนาดของหลอดเลือดที่จะใช้วัด โดยมากหลอดเลือดที่มีขนาดเล็ก ๆ มักนิยมใช้ความถี่สูง ๆ

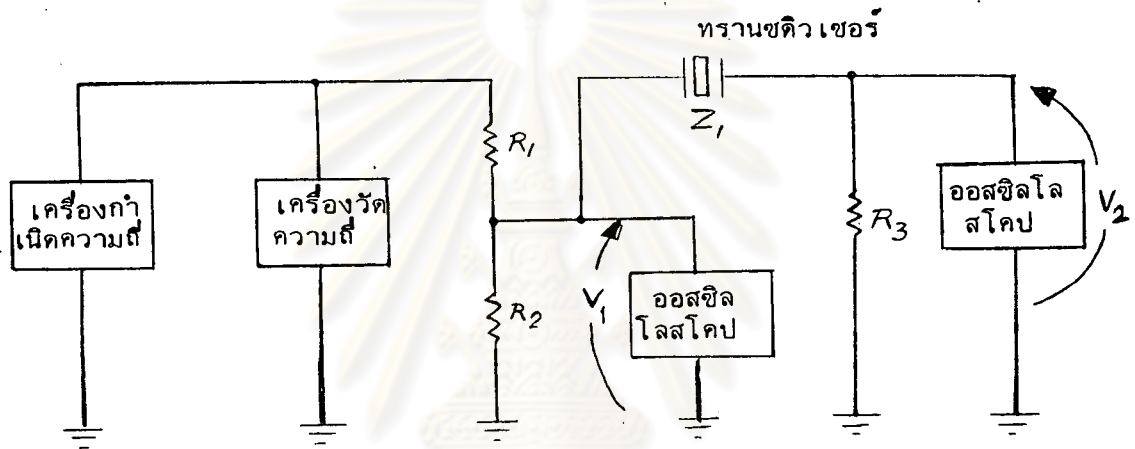
สำหรับเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ดอปเปลอร์เพื่อวัดการไหลของเลือดที่สร้าง จะใช้สำหรับวัดหลอดเลือดที่อยู่ลึกประมาณ 4-6 ซม. และมีขนาดความโตประมาณ 3 มม.ขึ้นไป ความถี่อัลตราซาวด์ที่เหมาะสมสำหรับการวัดคือ 4-5 เม็กกะเฮิรตซ์⁽¹⁶⁾

3.1.2 ความถี่ของทรานซิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับ

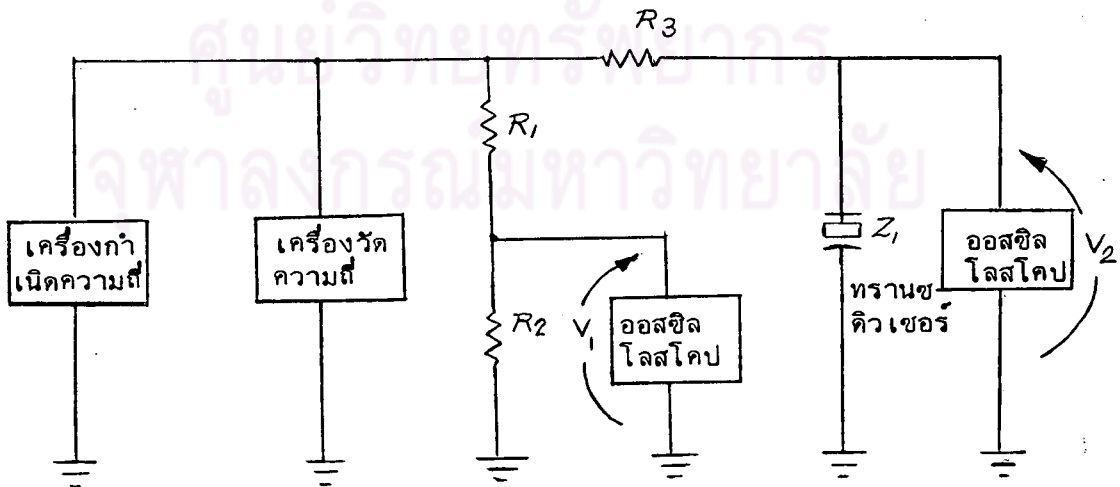
ทรานซิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับนับว่ามีความสำคัญมาก เพราะการที่จะตรวจจับการไหลของเลือดในหลอดเลือดได้จะต้องใช้อุปกรณ์ทั้งสองเป็นตัวส่งและรับคลื่น การส่งและรับคลื่นจะให้ประสิทธิภาพดีขึ้นอยู่กับการใช้ทรานซิวเซอร์ให้ตรงกับความถี่รีโซแนนซ์ การหาความถี่รีโซแนนซ์โดยประมาณ สามารถหาได้จากความหนาของแผ่นทรานซิวเซอร์หรืออาจหาได้จากการทดลองคือ

3.1.2.1 วัดแรงดันตกคร่อมระหว่างความต้านทานกับทรานซิวเซอร์ที่ต่ออนุกรมกัน (18)

จากคุณสมบัติของทรานซิวเซอร์ที่มีอิมพีแดนซ์เปลี่ยนไปตามความถี่ ดังนั้นถ้านำมาต่ออนุกรมกับความต้านทาน (R_3) ดังรูปที่ 3.1.2 และ 3.1.3 และเปลี่ยนความถี่ต่าง ๆ กัน แรงดัน V_2 ที่วัดได้โดยเครื่องออสซิลโลสโคปจะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ด้วย ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นตารางที่ 3.1.2, 3.1.3 และกราฟรูปที่ 3.1.4, 3.1.5



รูปที่ 3.1.2 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองหาผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานซิวเซอร์ที่จะนำไปใช้กับเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ดอปเปลอร์



รูปที่ 3.1.3 แสดงวงจรที่ใช้ทดลองหาผลตอบสนองต่อความถี่ของทรานซิวเซอร์

รูปที่ 3.1.2 เหมาะสำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิวเซอร์ที่มีค่าต่ำ การเลือกค่าความต้านทาน R_1 , R_2 และ R_3 ควรทำดังนี้

ก) ค่าความต้านทาน R_3 ควรจะมากกว่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิวเซอร์ที่ความถี่รีโซแนนซ์ ประมาณ 3 เท่า

ข) ค่าความต้านทาน R_2 ควรเลือกค่าเพื่อให้ V_1 ที่ความถี่รีโซแนนซ์ และ แอนตี้รีโซแนนซ์ ต่างกันกว่า 1 dB

ค) ความต้านทานรวมระหว่าง R_1 และ R_3 ควรให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของ เครื่องกำเนิดความถี่ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 600 โอห์ม

ในการทดลองตามวงจรรูปที่ 3.1.2 นี้ได้เลือกใช้ค่า

$$R_1 = 100 \text{ โอห์ม}$$

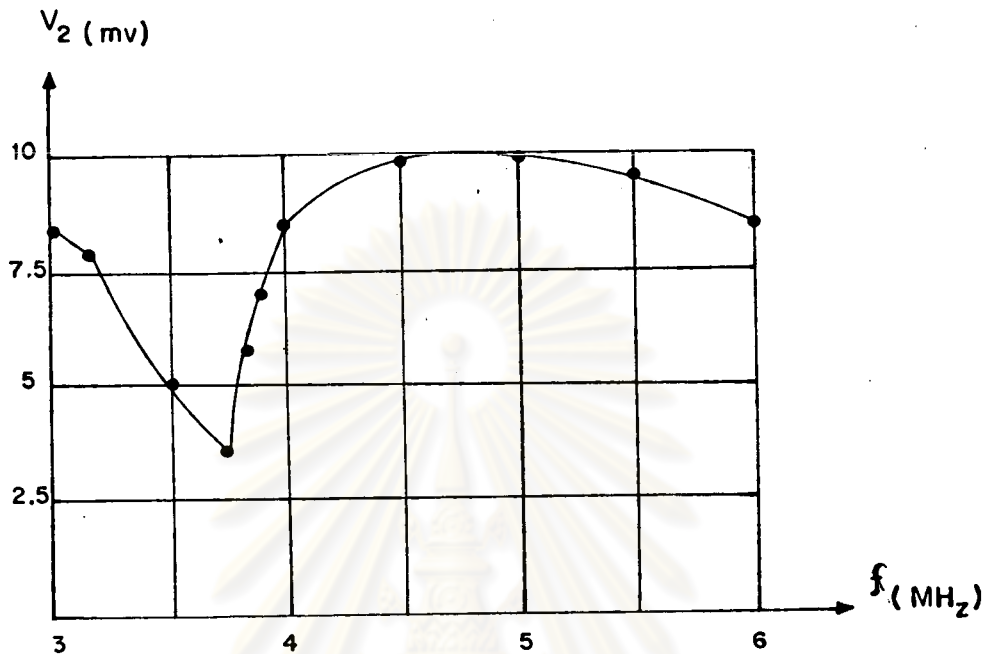
$$R_2 = 100 \text{ โอห์ม}$$

$$R_3 = 100 \text{ โอห์ม}$$

จากการทดลองนั้นนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อน V_2 และความถี่ ได้ดังตารางที่ 3.1.2 และกราฟดังรูปที่ 3.1.4

ตารางที่ 3.1.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน V_2 ที่ได้จากการวัดใน วงจรรูปที่ 3.1.2

V_1	F (MHz)	V_2 (mv)	F (MHz)	V_2 (mv)
10 mv	3	8.5	4.5	10
	3.1	8	4.6	10
	3.2	8	4.7	10
	3.3	7	4.8	10
	3.4	6	4.9	10
	3.5	5	5	9.5
	3.6	4	5.1	9.5
	3.7	3.5	5.2	9.5
	3.8	5.5	5.3	9.5
	3.9	7	5.4	9.5
	4	8.5	5.5	9
	4.1	9	5.6	9
	4.2	9.5	5.7	8.5
	4.3	10	5.8	8
	4.4	10	5.9	8



รูปที่ 3.1.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน V_2 ที่วัดได้จากวงจร
ในรูปที่ 3.1.2

รูปที่ 3.1.3 เหมาะสำหรับการวัดค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิวเซอร์ที่มีค่าสูง
การเลือกค่า R_1 , R_2 , R_3 ควรทำดังนี้

ก) ความต้านทาน R_3 ควรจะน้อยกว่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิวเซอร์ที่ความถี่
รีโซแนนซ์ ประมาณ 3 เท่า

ข) ความต้านทาน R_2 ควรเลือกค่าเพื่อให้ V_1 ที่ความถี่รีโซแนนซ์ และ
แอมพลิจูดรีโซแนนซ์ ต่างกันมากกว่า 1 dB

ค) ความต้านทานรวมระหว่าง R_1 และ R_3 ควรให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของ
เครื่องกำเนิดความถี่ ซึ่งจะอยู่ในช่วง 50 ถึง 600 โอห์ม

ในการทดลองนี้ใช้ค่า

$$R_1 = 100 \text{ โอห์ม}$$

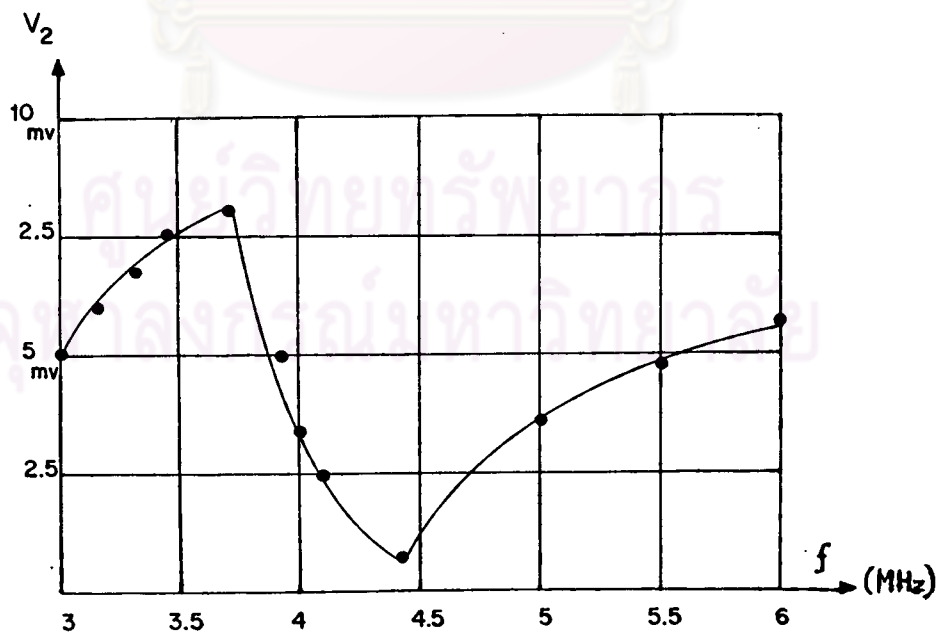
$$R_2 = 100 \text{ โอห์ม}$$

$$R_3 = 10 \text{ โอห์ม}$$

จากผลการทดลองนำมาเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และแรงดัน V_2 ได้ดังตารางที่ 3.1.3 และกราฟรูปที่ 3.1.5

ตารางที่ 3.1.3 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน V_2 ที่ได้จากการวัดในวงจรรูปที่ 3.1.3

V_1	F (MHz)	V_2 (mv)	F (MHz)	V_2 (mv)
10 mv	3	5	4.6	2
	3.1	5.5	4.7	2.5
	3.2	6	4.8	3
	3.3	6.5	4.9	3
	3.4	7	5	3.5
	3.5	7.5	5.1	3.5
	3.6	7.8	5.2	4
	3.7	8	5.3	4.2
	3.8	7.5	5.4	4.3
	3.9	5	5.5	4.7
	4	3.5	5.6	5
	4.1	2.5	5.7	5
	4.2	1.5	5.8	5
	4.3	1	5.9	5.5
	4.4	1	6	6
	4.5	1.7		

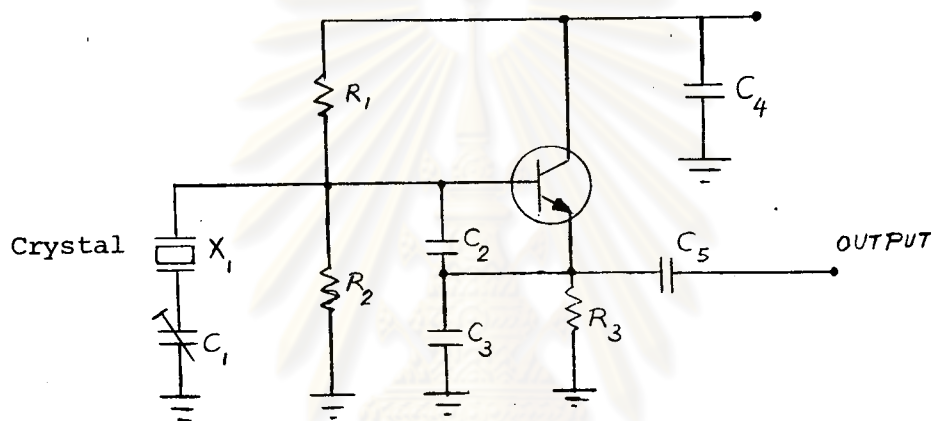


รูปที่ 3.1.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่กับแรงดัน V_2 ที่ได้จากการวัดในวงจรรูปที่ 3.1.3

จากกราฟรูปที่ 3.1.4 และ 3.1.5 เห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงของแรงดัน V_2 อยู่ในช่วงความถี่ 3-5 เมกกะเฮิรตซ์ การออกแบบวงจรกำเนิดความถี่นี้จะอยู่ในช่วงความถี่นี้ ด้วย สำหรับความถี่รีโซแนนซ์ของทรานซิวเซอร์จะได้จากการนำทรานซิวเซอร์ไปใช้งานจริง ๆ ซึ่งจะทดลองในภายหลัง

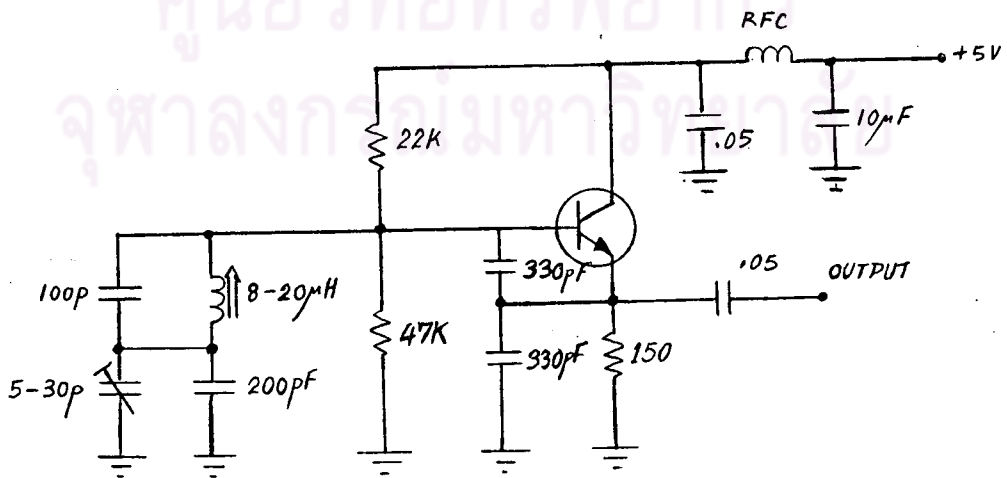
3.1.3 วงจรถ่ายทอดความถี่หลัก

วงจรถ่ายทอดความถี่หลักได้จากวงจรถ่ายทอดที่ใช้ผลึก (19) ดังรูปที่ 3.1.6



รูปที่ 3.1.6 แสดงวงจรถ่ายทอดความถี่ที่ใช้ผลึก

แต่เนื่องจากความถี่ที่ต้องการใช้ไม่ตรงกับความถี่ของผลึก ดังนั้นจึงดัดแปลงวงจรโดยแทนผลึกด้วยขดลวดตัวนำ (L) และตัวเก็บประจุ (C) วงจรถ่ายทอดความถี่หลักที่ใช้ในเครื่องเป็นดังแสดงในรูปที่ 3.1.7



รูปที่ 3.1.7 แสดงวงจรถ่ายทอดความถี่ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปลอร์

ความถี่ของวงจรสามารถปรับได้โดยการปรับค่า L ให้มากขึ้นหรือน้อยลง ช่วง
ความถี่ที่ปรับได้ประมาณ 3.5 ถึง 5.5 เม็กกะเฮิรตซ์ แอมพลิจูดของสัญญาณที่ได้ประมาณ 2.5
โวลต์จากยอดถึงยอด



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 ภาคหารความถี่

สำหรับเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์ระบบพัลส์โดยทั่ว ๆ ไป สัญญาณเบิรท์ของคลื่นอัลตราซาวด์ที่ส่งออกไปแต่ละครั้งจะมีเฟสตรงกับเฟสของสัญญาณความถี่หลัก ซึ่งทำได้โดยการหารความถี่หลักให้เป็นความถี่ PRF ด้วยวงจรหารความถี่ชนิดที่โปรแกรมได้ ความถี่ PRF ที่ได้จะนำไปควบคุมวงจรเกทสัญญาณเบิรท์ กล่าวคือควบคุมวงจรสวิตช์ให้ทำการต่อสัญญาณอัลตราซาวด์จากวงจรกำเนิดความถี่เข้ากับภาคขยายกำลังและทรานซิวเซอร์ตัวส่ง ดังรูปที่ 3.1 รูปคลื่นสัญญาณจะเป็นดังรูปที่ 3.2.1 ช่วงระยะห่างของการส่งคลื่นสัญญาณเบิรท์แต่ละครั้งหาได้จากสมการ (3.2.1)

$$T = 1/PRF \dots \dots \dots (3.2.1)$$

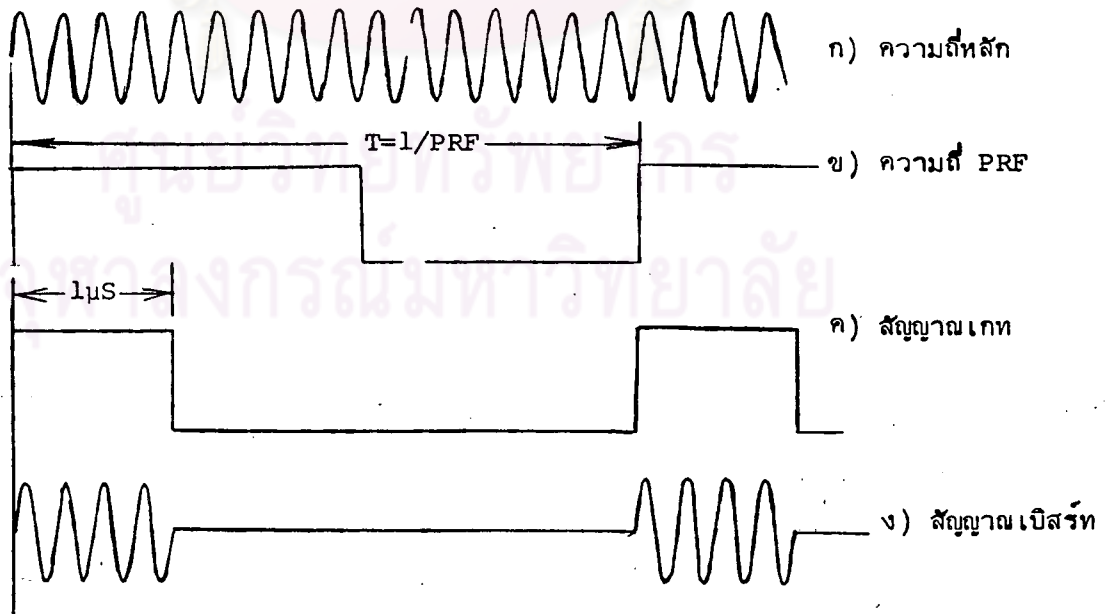
จำนวนของตัวหาร (N) ที่ใช้หารความถี่หลักขึ้นอยู่กับความถี่ PRF ที่ใช้ซึ่งหาได้จากสมการ (3.2.2)

$$N = F/PRF \dots \dots \dots (3.2.2)$$

F = ความถี่หลัก

N = ตัว เลขจำนวนเต็มบวก

ดังนั้นก่อนที่จะถึงวงจรหารควรเลือกความถี่ PRF ที่จะนำไปใช้งานก่อน



รูปที่ 3.2.1 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ของวงจรหารที่จะนำไปใช้งาน

3.2.1 การเลือกความถี่ PRF สำหรับใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์โดยทั่ว ๆ ไป

การเลือกความถี่ PRF สำหรับใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์ขึ้นอยู่กับสิ่งต่าง ๆ คือ

3.2.1.1 ระยะทางของหลอดเลือดที่วัด (16)

สัญญาณคอปเปอเรอร์ที่เกิดจากการสะท้อนของเลือดที่ไหลในหลอดเลือดที่อยู่ลึกระดับต่าง ๆ กันจะใช้เวลาการเดินทางของคลื่นทั้งไปและกลับต่าง ๆ กัน เช่นที่ระยะทางของหลอดเลือดถึงทรานซิวเซอร์ 4 ซม. เวลาของคลื่นที่ใช้ในการเดินทางหาได้จากสมการที่ (3.2.3)

$$T = d/v \quad (3.2.3)$$

T = เวลาที่คลื่นใช้เดินทาง

d = ระยะทางจากทรานซิวเซอร์ถึงหลอดเลือด 4 ซม.

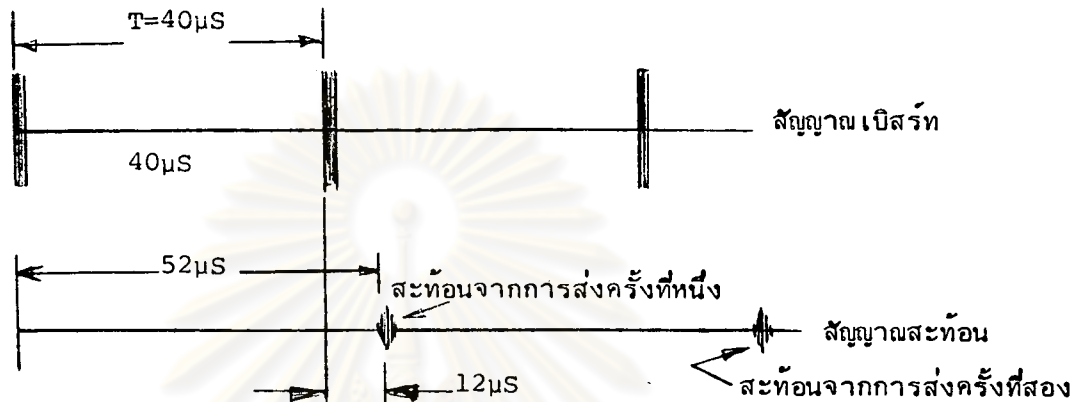
v = ความเร็วของคลื่นเสียงที่เดินทางในเนื้อเยื่อ

1530 ซม/นาที่

$$= \frac{2 \times 4}{1530 \times 100} = 52 \text{ ไมโครวินาที}$$

เวลา 52 ไมโครวินาที ที่ได้นี้อาจใช้เป็นตัวกำหนดความถี่ได้โดยเลือกให้ช่วงระยะห่าง ($T = 1/PRF$) ของการส่งคลื่นสัญญาณเบสร์มากกว่าเวลาที่คลื่นใช้เดินทางทั้งไปและกลับ (T) ซึ่งอาจใช้ 100 ไมโครวินาทีหรือมากกว่าก็ได้

ในกรณีที่เกิดใช้ช่วงระยะห่างของการส่งคลื่นน้อยกว่า เช่น ความถี่ PRF เท่ากับ 40 กิโลเฮิรตซ์ ช่วงระยะห่างของการส่งคลื่นสัญญาณเบสร์แต่ละครั้งเท่ากับ 25 ไมโครวินาที เมื่อนำไปวัดหลอดเลือดที่อยู่ลึก 4 เซนติเมตร เวลาที่คลื่นใช้เดินทางทั้งไปและกลับใช้เวลา 52 ไมโครวินาที ซึ่งมากกว่าเวลาของการส่งคลื่นในแต่ละครั้ง ในกรณีนี้จะเกิดการผิดพลาดในการวัดได้ กล่าวคือสัญญาณที่สะท้อนกลับจากการส่งคลื่นครั้งแรกจะเกิดอยู่ในช่วงเวลาของการส่งสัญญาณครั้งที่สองและสัญญาณสะท้อนจากการส่งครั้งที่สองจะเกิดในช่วงเวลาของการส่งครั้งที่สาม และเป็นเช่นนี้เรื่อยไปดังรูปที่ 3.2.2



รูปที่ 3.2.2 แสดงรูปคลื่นสัญญาณที่เลือกใช้ช่วงระยะห่างของการส่งคลื่น (T) น้อยกว่าเวลาที่คลื่นสะท้อนใช้เดินทาง (τ)

จะทำให้เห็น เป็นสัญญาณสะท้อนใช้เวลาเดินทางเพียง 12 ไมโครวินาที ซึ่งผิดจากความเป็นจริงมาก ดังนั้นการเลือกความถี่ PRF ที่ใช้ก็ควรให้เหมาะกับระยะทางที่วัด

3.2.1.2 ความถี่ตอบเปเปอร์ที่คาดว่าจะวัดได้

ความถี่ PRF ที่ใช้ในเครื่องอัลตราซาวด์ระบบพัลส์ตอบเปเปอร์ โดยทั่วไปจะถูกกำหนดไว้จากทฤษฎีของการสุมตัวอย่าง โดยให้ความถี่ PRF ที่ใช้ควรเป็นสองเท่าของความถี่ตอบเปเปอร์ที่คาดว่าจะวัดได้ ทั้งนี้เพื่อความกว้างของแถบความถี่ PRF ครอบคลุมแถบความถี่ของสัญญาณตอบเปเปอร์ที่วัดได้⁽²⁰⁾ เช่น ในระบบเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ตอบเปเปอร์ที่ใช้ความถี่ 4 MHz ใช้วัดความเร็วเลือดที่ไหลในหลอดเลือดขนาด 100 ซม/วินาที จากการวัดที่ลำคลื่นเสียงทำมุม 70° กับหลอดเลือด สามารถนำไปคำนวณหาค่าโดยประมาณของความถี่ตอบเปเปอร์ที่คาดว่าจะวัด ได้ดังสมการ (3.2.4)

$$\Delta f = \frac{2vfo \cos \theta}{c} \dots \dots \dots (3.2.4)$$

$$c = \text{ความเร็วของคลื่นเสียงในเนื้อเยื่อ} = 1530 \text{ ม/วินาที}$$

$$f_0 = \text{ความถี่ของคลื่นอัลตราซาวด์} = 4 \text{ MHz}$$

$$v = \text{ความเร็วของเลือดที่ไหล} = 100 \text{ ซม/วินาที}$$

$$\theta = \text{มุมระหว่างลำคลื่นเสียงกับหลอดเลือด} = 70^\circ$$

$$\Delta f = \frac{2 \times 100 \times 4 \times 10^6 \times \cos 70^\circ}{1530 \times 100}$$

$$= 4.8 \text{ kHz}$$



จากการวัดการไหลของเลือดที่มีความเร็ว 100 ซม/วินาที

ให้เกิดความถี่ดอปเปลอร์ประมาณ 4.8 กิโลเฮิรซ์ จากทฤษฎีของการสุม่ตัวอย่างทีกล่าวข้างต้น ความถี่ PRF ทีใช้ควรเป็น $2 \times 4.8 = 9.6$ กิโลเฮิรซ์ และสำหรับการวัดความเร็วของเลือด ทีไหลค่าอื่นก็จะทำให้เกิดค่าความถี่ดอปเปลอร์ค่าอื่น ๆ ความถี่ PRF ทีใช้ก็ไม่สามารถกำหนด ได้นั่นเอง จึงต้องมีหลายค่าที่สามารถปรับเลือกใช้ให้เหมาะกับงาน

3.2.1.3 การสูญเสียพลังงานของสัญญาณที่ส่ง

สัญญาณ เป็รที่ถูส่งจากทรานซิวเซอร์ตัวส่งไปยังหลอดเลือดที่วัด จะเดินทางผ่านเนื้อเยื่อจนถึงหลอดเลือดและสะท้อนกลับมายังทรานซิวเซอร์ตัวรับ ระหว่าง การเดินทางของคลื่นทั้งไปและกลับจะเกิดการสูญเสียพลังงาน เนื่องจากสาเหตุหลายประการ เช่น (16)

- การสูญเสียที่เกิดจากทรานซิวเซอร์ตัวส่งและตัวรับ
- การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากเนื้อเยื่อประมาณ 1.5 ถึง 2 dB/cm/MHz
- การสูญเสียที่เกิดขึ้นเนื่องจากโมเลกุลของเลือดประมาณ .1 dB/cm/MHz
- การสูญเสียที่เกิดขึ้นจากสาเหตุอื่น ๆ

จากการสูญเสียพลังงานเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ เหล่านี้เป็นการยากที่จะทราบค่าที่แน่นอนของ ความแรงของสัญญาณที่จะรับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับ ความลึกของหลอดเลือดที่วัดการไหล ของเลือดทีระดับต่าง ๆ กัน จะทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของการส่งไม่เท่ากัน ยิ่งความลึก ของหลอดเลือดยิ่งมากความแรงของสัญญาณทีรับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับก็ยิ่งน้อย

3.2.2 ความถี่ PRF ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์

จากผลต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว เป็นการยากที่จะเลือกค่าความถี่ PRF ที่แน่นอนได้ โดยทั่ว ๆ ไปมักจะกำหนดให้ช่วงระยะห่างของการส่งคลื่นสัญญาณเบิรท์ ($T = 1/PRF$) มากกว่าเวลาของสัญญาณคอปเปิลอร์ที่สะท้อนกลับมาประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์⁽¹⁶⁾ ตัวอย่างของความถี่ PRF ที่ใช้อยู่ดังตารางที่ 3.2.1

ตารางที่ 3.2.1 แสดงความสัมพันธ์ของความถี่ PRF ที่ใช้สำหรับวัดที่ระดับความลึกต่าง ๆ และความถี่คอปเปิลอร์ที่วัดได้

ความถี่ PRF (KHz)	ความลึก (cm)	ความถี่คอปเปิลอร์สูงสุด
25	3	12.5 KHz
18	4.3	9 KHz
12.5	6	6.25 KHz

จากตารางและข้อกำหนดที่กล่าวค่าความถี่ PRF ที่จะออกแบบใช้จึงควรกำหนดค่าที่สามารถใช้งานในย่านการวัดได้กว้าง ๆ จึงเลือกค่าความถี่ PRF ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ไว้หลายค่าคือ 20, 10, 5, 2.5 และ 1.25 กิโลเฮิรซ์ ซึ่งสามารถนำไปคิดเป็นคาบเวลาได้ต่าง ๆ กันคือ

ความถี่ 20	กิโลเฮิรซ์	คาบ = 50	ไมโครวินาที
10	" "	" = 100	" "
5	" "	" = 200	" "
2.5	" "	" = 400	" "
1.25	" "	" = 800	" "

ค่าความถี่ PRF ต่าง ๆ เหล่านี้สามารถนำไปใช้งานสำหรับการวัดการไหลของเลือดที่มีความถี่คอปเปิลอร์สูงถึง 10 กิโลเฮิรซ์ ($PRF/2$) ซึ่งคิดเป็นความเร็วของเลือดได้ดังสมการ (3.2.4)

$$v = \frac{\Delta f \cdot c}{2f_0 \cos\theta}$$

$$= \frac{10 \times 10^3 \times 1530 \times 100}{2 \times 4 \times 10^6 \times \cos 70^\circ}$$

ความเร็วของเลือด = 136 ซม./วินาที

ซึ่งความเร็วนี้เพียงพอสำหรับวัดในคน นอกจากนี้ที่ช่วงห่างของการส่งคลื่นสัญญาณเบียร์ท (T) มีค่าถึง 800 ไมโครวินาที ซึ่งคิดเป็นระยะทางดั่งสมการ (3.2.3) แล้วได้ถึง

$$d = \frac{800 \times 10^{-6} \times 1530 \times 100}{2}$$

$$= 61 \text{ เซนติเมตร}$$

ซึ่งระยะทางนี้มากกว่าความลึกของหลอดเลือดที่วัดการไหลของเลือดมากมาย จึงคิดว่าความถี่ PRF ที่ใช้นี้สามารถครอบคลุมการใช้งานทั้งหมดได้

3.2.3 การออกแบบวงจรหารความถี่

วงจรหารความถี่ทำหน้าที่รับความถี่จากภาคกำเนิดความถี่หลัก แล้วหารลงไปให้เป็นความถี่ PRF ขนาดต่าง ๆ กันคือ 20, 10, 5, 2.5 และ 1.25 กิโลเฮิรตซ์ วงจรหารดังกล่าวต่อกันเป็นบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 3.2.3

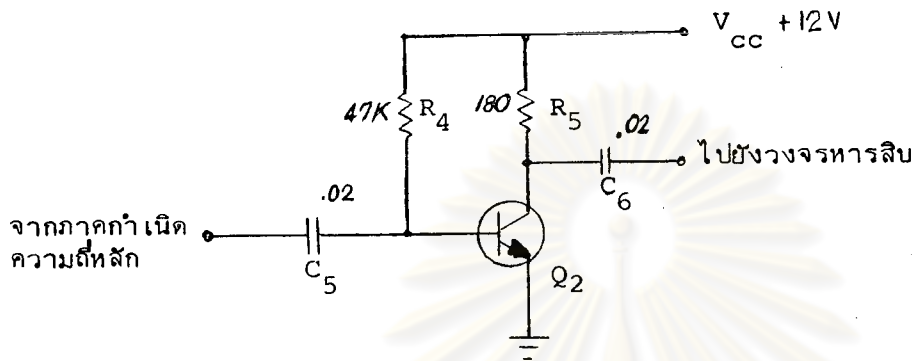


รูปที่ 3.2.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรหารความถี่

N = ค่าที่เลือกได้ระหว่าง 1 ถึง 255 เมื่อความถี่หลักเท่ากับ 4.2 เมกกะ-เฮิรตซ์ ค่า N ที่ใช้เท่ากับ 21

3.2.3.1 ภาคขยาย

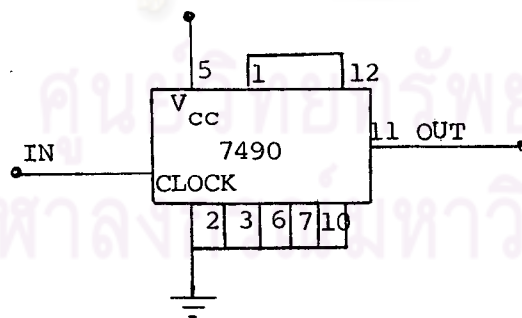
ทำหน้าที่ขยายสัญญาณความถี่หลักให้มีความแรงมากขึ้นจนถึงระดับที่สามารถทำให้วงจรทรานซิสเตอร์ทำงานได้ วงจรที่ใช้ดังรูปที่ 3.2.4



รูปที่ 3.2.4 แสดงวงจรขยายสัญญาณความถี่หลักให้แรงขึ้นก่อนนำไปป้อนให้กับ
วงจรทรานซิส

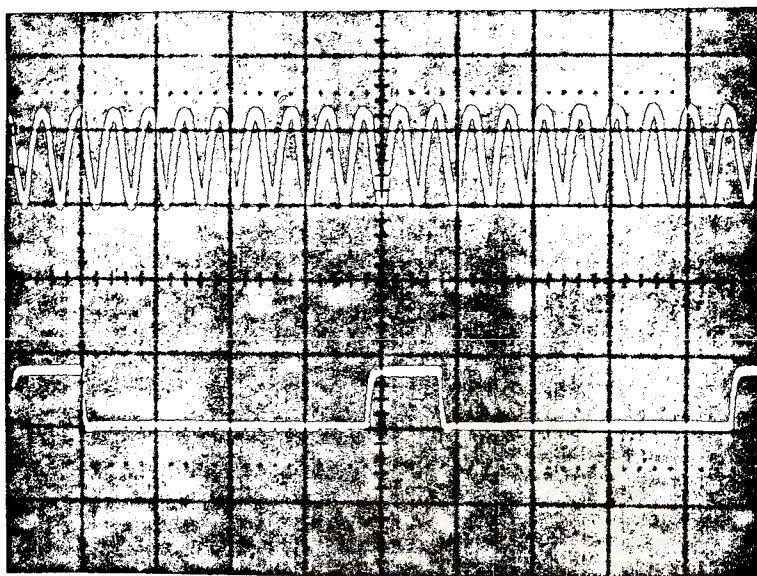
3.2.3.2 วงจรทรานซิส

ทำหน้าที่รับสัญญาณจากวงจรขยายความถี่หลักที่ได้จากทรานซิสเตอร์ Q₂ และทรานซิส วงจรทรานซิสที่ใช้ได้จากไอซีเบอร์ 7490 ซึ่งเป็น DECADE COUNTER⁽²¹⁾ การต่อวงจรใช้งานดังแสดงในรูปที่ 3.2.5



รูปที่ 3.2.5 แสดงวงจรทรานซิสที่ใช้งาน

รูปคลื่นสัญญาณที่วัดได้ที่ขาอินพุท และขาเอาต์พุท ดังรูปที่ 3.2.6



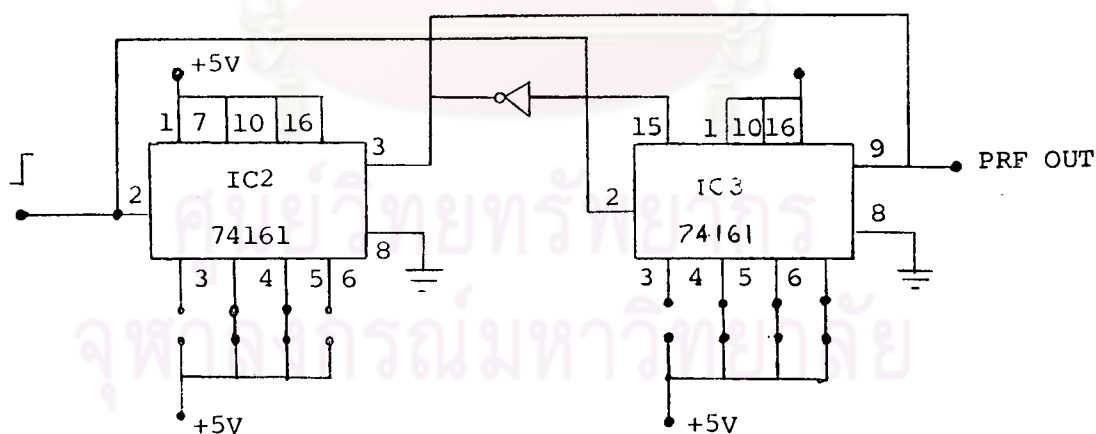
สัญญาณความถี่หลัก
2V/div
.5 μ S/div

สัญญาณออก 5V/div
.5 μ S/div

รูปที่ 3.2.6 แสดงรูปคลื่นสัญญาณขาเข้าและขาออกของวงจรถรหารลิป

3.2.3.3 วงจรถรหารที่โปรแกรมได้

วงจรถรหารชนิดโปรแกรมได้ใช้ไอซีเบอร์ 74161 ซึ่งเป็นวงจรมัลติเพล็กซ์ 4 บิต 2 ตัวต่อ CASCADE กัน สามารถโปรแกรมจำนวนเลขของการหารได้จาก 1-255⁽²¹⁾



รูปที่ 3.2.7 แสดงวงจรถรหาร 1-255 ที่สามารถโปรแกรมได้

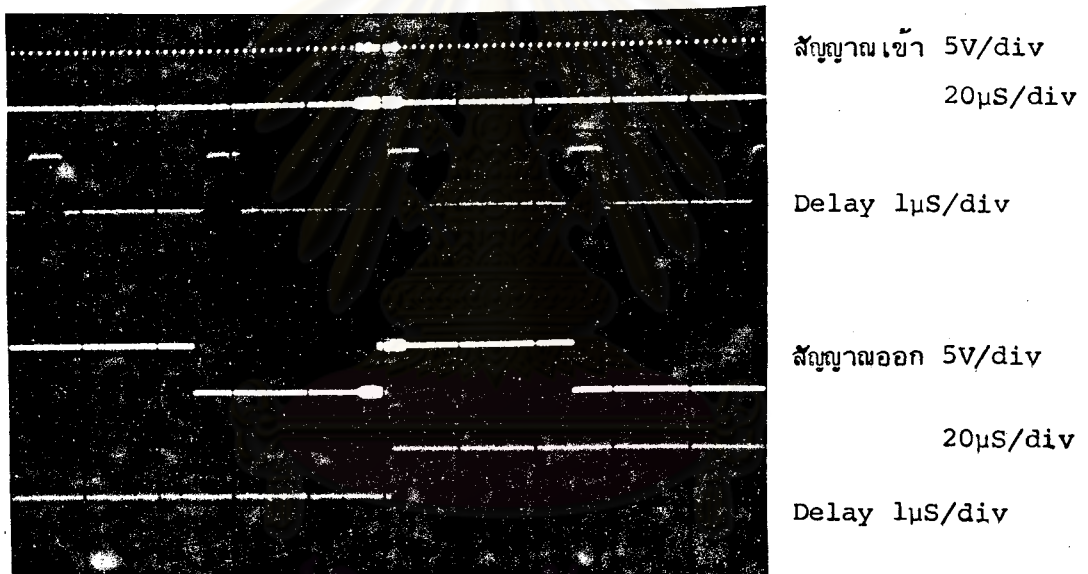
ขา 3,4,5,6 ของ IC₂ และขา 3,4,5,6 ของ IC₃ จะเป็นตัวโหลตจำนวนเลขที่ต้องการนับ คือ 1,2,4,8,16,32,64 และ 128 จำนวนเลขที่ต้องการนับต้องนำมาลบบอกจาก 255 ผลที่เหลือแปลงเป็นเลขฐานสองแล้วนำค่าที่ได้ไปโหลตที่ขาอินพุทของวงจรถรหาร ในเครื่องตอบเปเลอร์อัลตราซาวด์ ความถี่ PRF ที่ต้องการคือ 20 กิโลเฮิรตซ์ ดังนั้นค่าจำนวนเลข (N) ที่ต้องการ

ใช้เท่ากับ

$$\begin{aligned} N &= \frac{F}{10 \times \text{PRF}} \\ &= \frac{4.2 \text{ MHz}}{10 \times 20 \text{ KHz}} \\ &= 21 \end{aligned}$$

ดังนั้นจำนวนเลขที่นำไปไหลดวงจรหารจะเท่ากับ $255 - 21 = 234$ แปลง 234 ให้เป็นเลขฐานสองได้เท่ากับ $2+8+32+64+128$ ดังนั้นขา 4,5 ของ IC₂ และขา 4,5,6 ของ IC₃ จะต่อกับไฟบวก 5 โวลต์

รูปคลื่นสัญญาณของวงจรถหาร 1-255 ดังรูปที่ 3.2.8

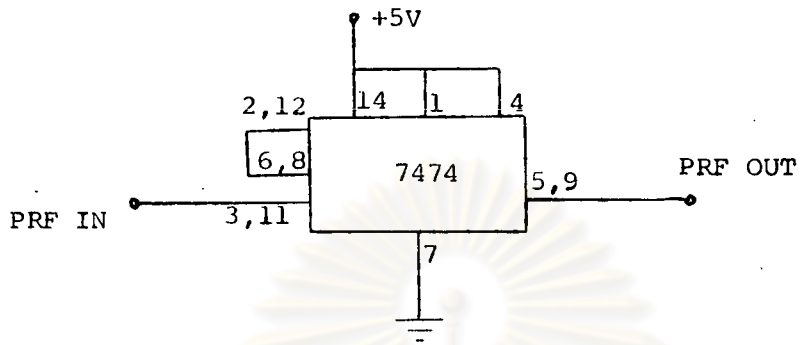


รูปที่ 3.2.8 รูปคลื่นสัญญาณเข้าและออกของวงจรถหารที่โปรแกรมได้

3.2.3.4 วงจรถหารสอง

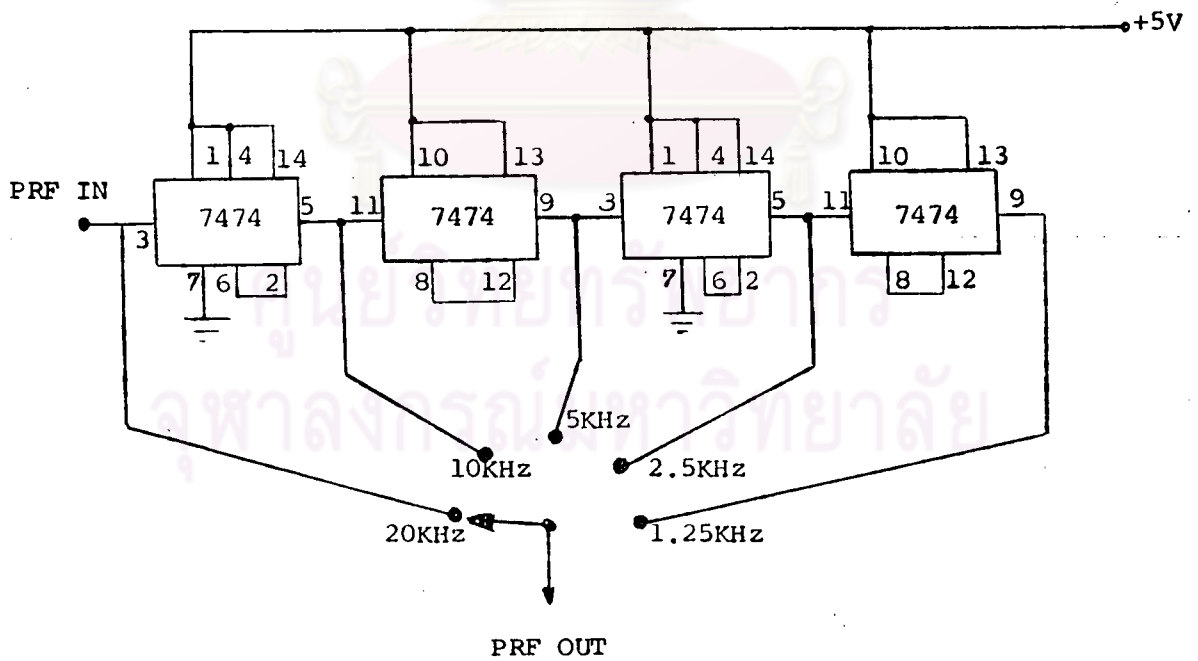
ทำหน้าที่หารความถี่ PRF 20 กิโลเฮิรตซ์ ที่ได้จากวงจรถหาร N ให้เป็นความถี่ 10, 5, 2.5 และ 1.25 กิโลเฮิรตซ์ ตามลำดับ วงจรถหารสองที่ใช้ได้จากไอซีเบอร์ 7474 ซึ่งเป็น D-FLIP-FLOP 2 ตัวในตัวเดียวกันและเนื่องจากความถี่ที่ต้องการมี 4 ค่า ดังนั้นจึงใช้ไอซี จำนวน 2 ตัวต่อกัน

วงจรถหารสองที่ใช้ไอซีเบอร์ 7474 ดังแสดงในรูปที่ 3.2.9

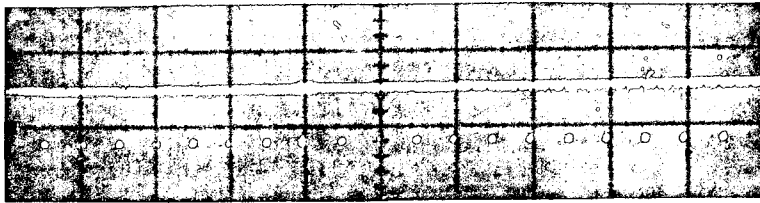


รูปที่ 3.2.9 แสดงวงจรหารสองที่ใช้ D-FLIP-FLOP เบอร์ 7474

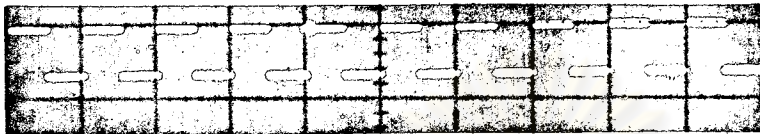
วงจรหารสองทั้งหมดที่ใช้ดังรูปที่ 3.2.10



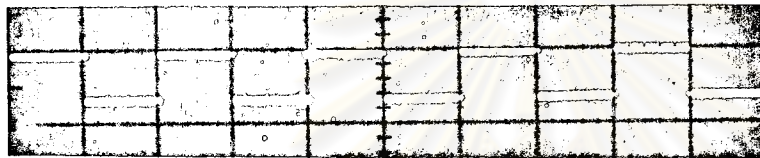
รูปที่ 3.2.10 แสดงวงจรหารสองที่ใช้ในเครื่องคอปเปิลอร์อัลตราซาวน์



5V/div (20 kHz)
20μS/div



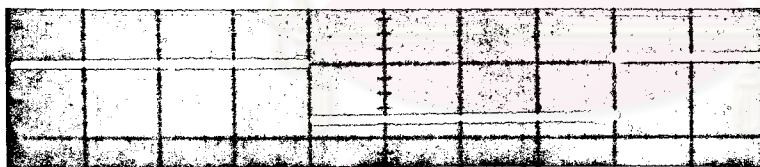
5V/div (10 kHz)
20μS/div



5V/div (5 kHz)
20μS/div



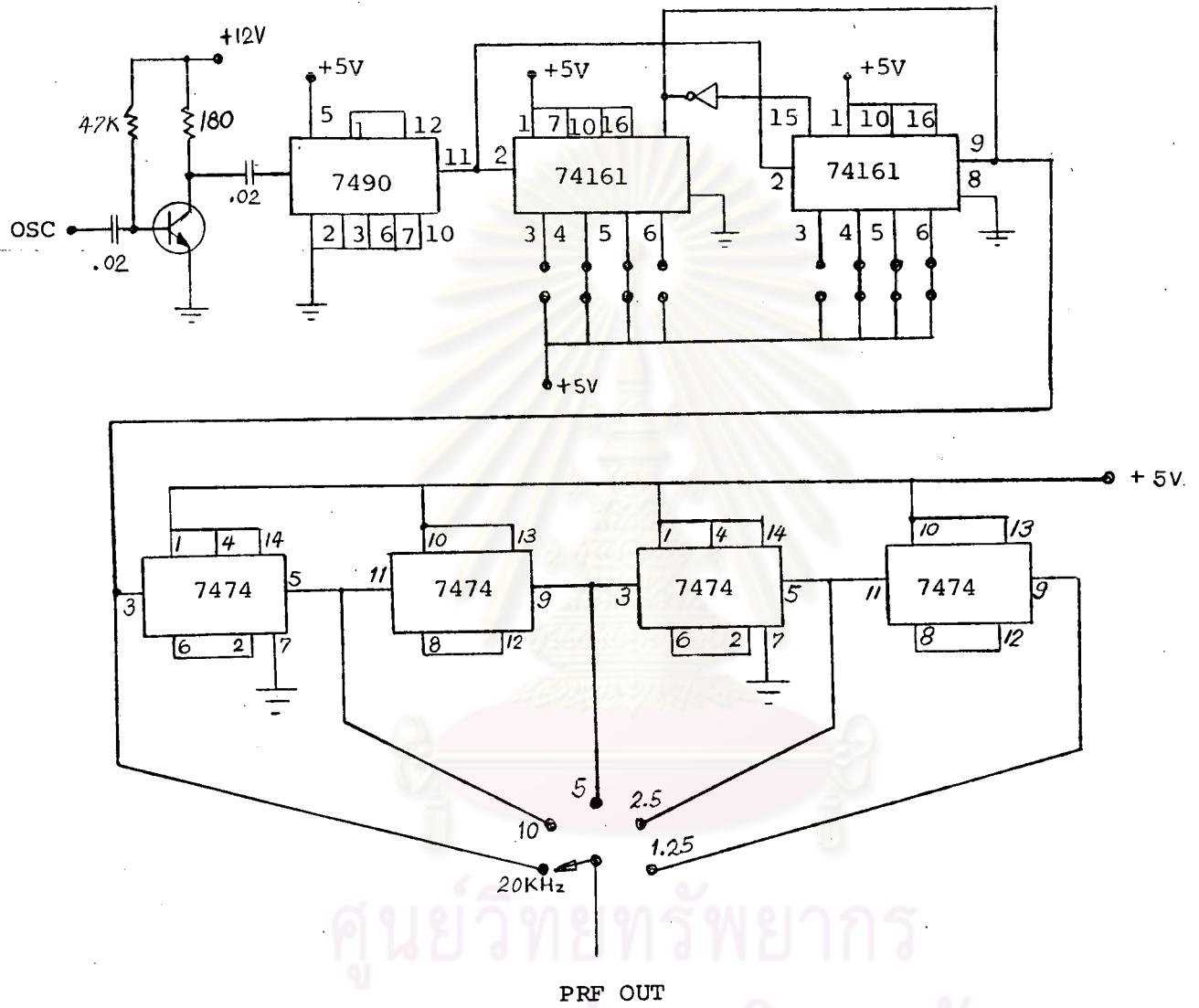
5V/div (2.5 kHz)
50μS/div



5V/div (1.25 kHz)
50μS/div

รูปที่ 3.2.11 แสดงรูปคลื่นที่วัดได้จากจุดต่าง ๆ ของวงจรหาร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
 วงจรสมบรูณ์ของภาคหารความถี่ที่ออกแบบใช้ในเครื่องตอบเปลี่ยนอัตราเร็ว

ดังรูปที่ 3.2.12



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

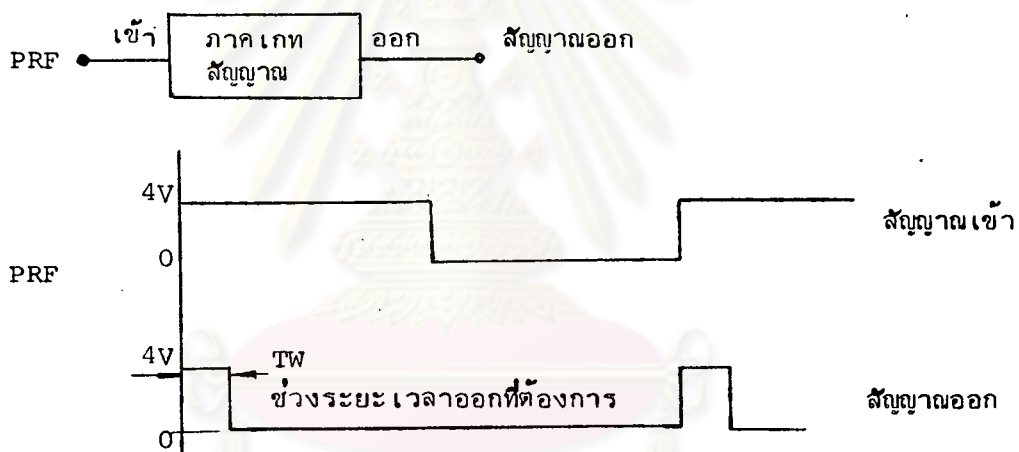
รูปที่ 3.2.12 วงจรสมบูรณ์ของภาคหารความถี่ที่ใช้ในเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวนด์

3.3 ภาคเกทสัญญาณ

ภาคเกทสัญญาณประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนคือ

- ก) ภาคเกทสัญญาณเบสรีท (TW_1)
- ข) ภาคหน่วงเวลาของการเกทสัญญาณอ้างอิง (TW_2)
- ค) ภาคเกทสัญญาณอ้างอิง (TW_3)
- ง) ภาคหน่วงเวลาการเกทสัญญาณลุ่ม (TW_4) และภาคเกทสัญญาณลุ่ม (TW_5)

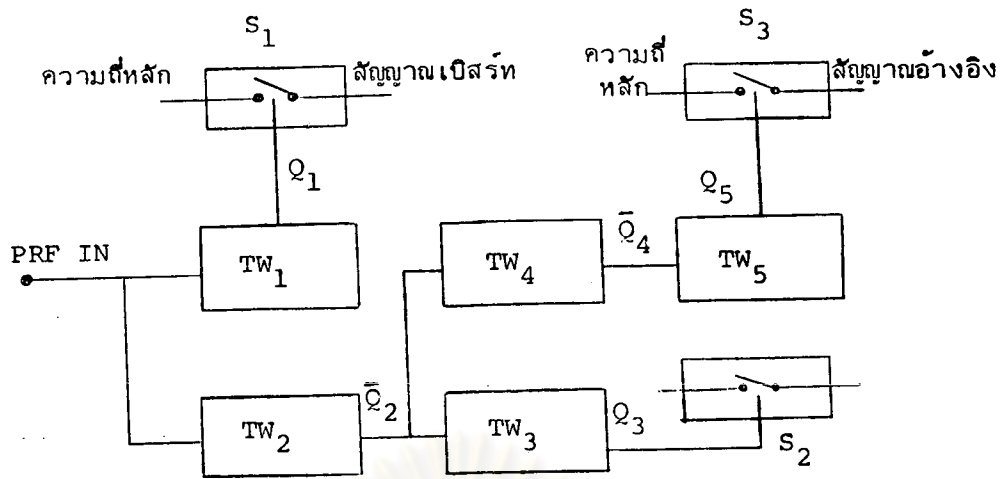
ภาคเกทสัญญาณทั้ง 4 ส่วนที่กล่าวมามีหลักการทำงานเหมือนกันคือ รับสัญญาณนาฬิกาที่ป้อนเข้ามาเป็นตัวกระตุ้น และให้สัญญาณออกที่มีช่วงระยะเวลาของสัญญาณตามต้องการ ดังรูปที่ 3.3.1



รูปที่ 3.3.1 แสดงสัญญาณของวงจร เกททั้งขา เข้าและออกที่มีช่วงระยะเวลาของสัญญาณออก (TW) ตามต้องการ

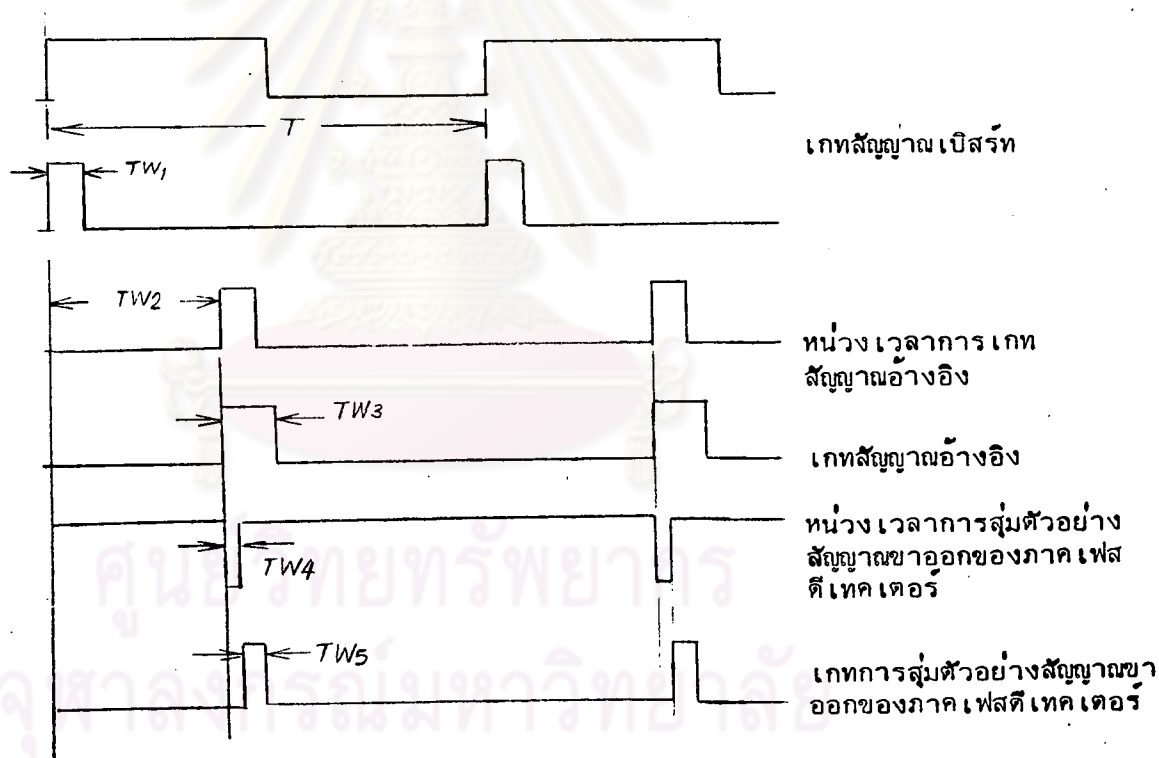
ภาคเกทสัญญาณที่ใช้ใน เครื่องคอมพิวเตอร์ รัสวานต์กันดังบล็อกไดอะแกรม

ดังรูปที่ 3.3.2



รูปที่ 3.3.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์ตอปเปเลอร์

สัญญาณต่าง ๆ ที่ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 3.3.3



รูปที่ 3.3.3 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ของวงจรเกททั้งหมดที่ใช้ในเครื่อง

สัญญาณ PRF ที่ออกจากวงจรหารความถี่จะนำมาป้อนให้กับภาคเกทสัญญาณ 2 ชุด

คือ TW_1 และ TW_2 ชุดแรก TW_1 จะออกแบบให้สัญญาณขาออกมีช่วงกว้างระยะเวลาประมาณ 1 ไมโครวินาที ซึ่งจะนำไปควบคุมวงจรสวิตช์ S_1 ให้ทำการต่อสัญญาณอัลตราซาวด์จากภาคกำเนิดความถี่หลักให้ส่งออกไปยังภาคขับภาคขยายกำลังและทรานสดิวเซอร์ตัวส่ง ดังรูปที่ 3.1 ชุดที่สอง

TW_2 เป็นวงจรถ่ายทอดที่สามารถปรับเวลาของสัญญาณที่ออกได้จากประมาณ 0 ถึง $1/PRF$ สำหรับใช้เป็นตัวปรับหน่วงเวลาของวงจรถ่ายทอดสัญญาณอ้างอิง เพื่อให้ระยะเวลาที่ปรับพอดีกับเวลาที่คลื่นสัญญาณคอปเปอเรอร์ใช้ในการเดินทางกลับมายังทรานซิวเซอร์ตัวรับ

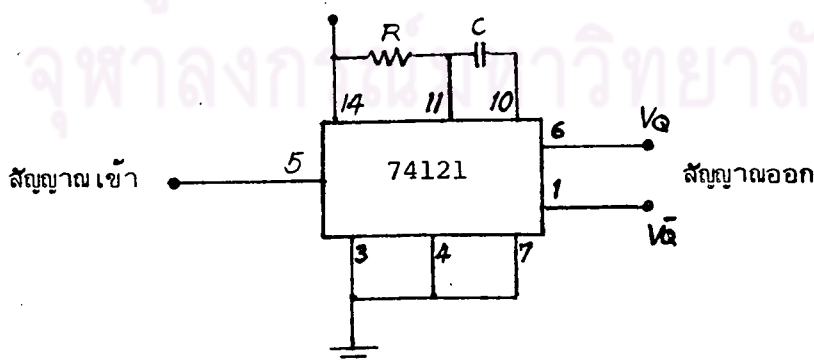
ซึ่งทำให้เกิดการเปรียบเทียบความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองเกิดขึ้นในช่วงเวลานี้ สัญญาณที่ออกจากวงจรถ่ายทอด TW_2 (Q_2) จะนำไปป้อนให้กับวงจรถ่ายทอด TW_3 และ TW_4 ดังรูปที่ 3.3.2 วงจรถ่ายทอด TW_3 ใช้เป็นตัวควบคุมวงจรถ่ายทอด S_2 ให้ต่อสัญญาณคลื่นอัลตราซาวด์จากภาคกำเนิดความถี่สูงให้ไปยังภาคเฟสดีเทคเตอร์ สัญญาณที่ส่งไปนั้นใช้เป็นสัญญาณอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบเฟสกับเฟสของสัญญาณคอปเปอเรอร์ที่กลับมามีดังรูปที่ 4.3ข, ช

วงจรถ่ายทอด TW_4 ใช้เป็นตัวหน่วงเวลาของสัญญาณจาก TW_5 และสามารถปรับให้สัญญาณที่ออกจาก TW_5 เกิดขึ้นระหว่างกลางของสัญญาณขาออกที่ได้จากวงจรถ่ายทอดเฟสดีเทคเตอร์

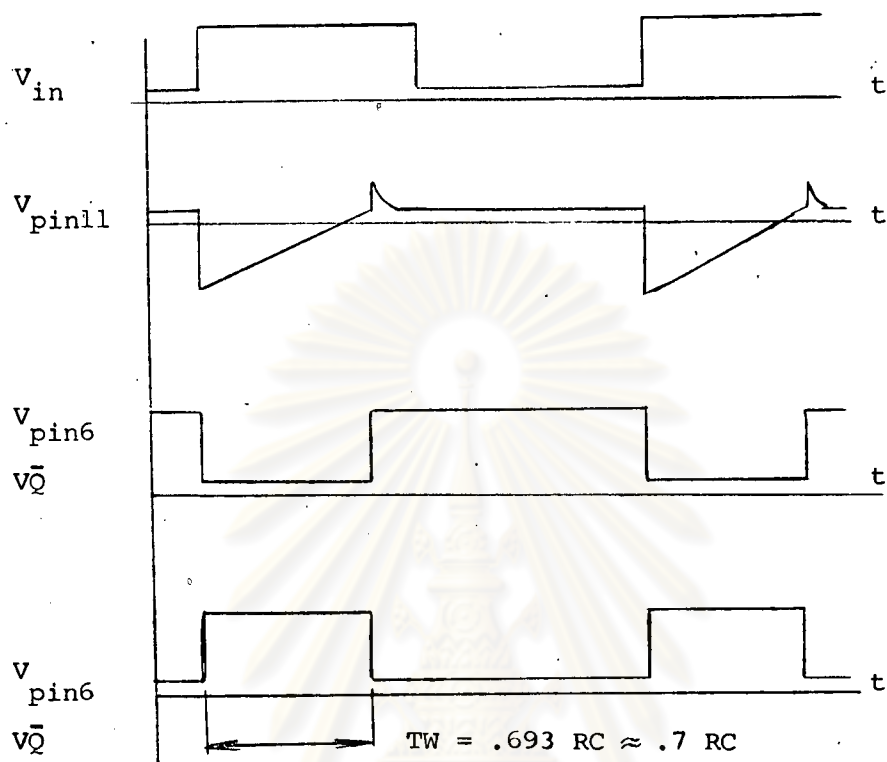
วงจรถ่ายทอด TW_5 ทำงานต่อจากวงจรถ่ายทอด TW_4 สัญญาณขาออกของ TW_5 จะตั้งความกว้างของเวลาไว้ประมาณ 0.5 ไมโครวินาที ใช้เป็นตัวควบคุมวงจรถ่ายทอด S_3 ให้ทำการต่อวงจรถ่ายทอดและรักษาระดับให้เกิดการสุมตัวอย่าง สัญญาณออกที่ได้จากวงจรถ่ายทอดเฟสดีเทคเตอร์ และรักษาระดับไว้จนถึงการสุมในช่วงต่อไป

3.3.1 การออกแบบวงจรถ่ายทอด

วงจรถ่ายทอดสำหรับใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์นี้ใช้วงจรถ่ายทอดเบอร์ 74121 ซึ่งเป็นวงจรถ่ายทอดโมโนสเตเบิลที่สามารถปรับเวลาของสัญญาณที่ออกได้โดยค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุต่อภายนอก⁽²¹⁾ ดังรูปที่ 3.3.4 และมีรูปสัญญาณเข้าและออกตามขาต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.3.5



รูปที่ 3.3.4 แสดงวงจรถ่ายทอดโมโนสเตเบิลกับค่าความต้านทาน (R) และตัวเก็บประจุ (C) ที่ต่อร่วมกัน



รูปที่ 3.3.5 สัญญาณเข้าและออกของวงจรถ่ายตามขาต่าง ๆ ของวงจรถ่ายปรวมอลเบอร์ 74121

การทำงานของโมโนสเตเบิล สัญญาณเข้าที่เป็นรูปคลื่นสี่เหลี่ยมที่มีการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเป็น "1" (+5 โวลต์) และ "0" (0 โวลต์) จะบ่อนเข้าไปยังขา 5 ซึ่งเป็นขาอินพุท ในช่วงสัญญาณเข้าที่เป็น "1" จะทำให้สัญญาณออกที่ขา 6 (V_Q) ของวงจรถ่ายปรวมอลเป็น "1" ซึ่งมีช่วงความกว้างของเวลาที่ออกเท่ากับ TW หลังจากพ้นเวลาของ TW แล้ว สัญญาณออกที่เป็น "1" อยู่จะตกลงเป็น "0" และคงที่ตลอดไปจนกระทั่งมีสัญญาณที่เป็น "1" เข้ามาที่ขาอินพุทอีก

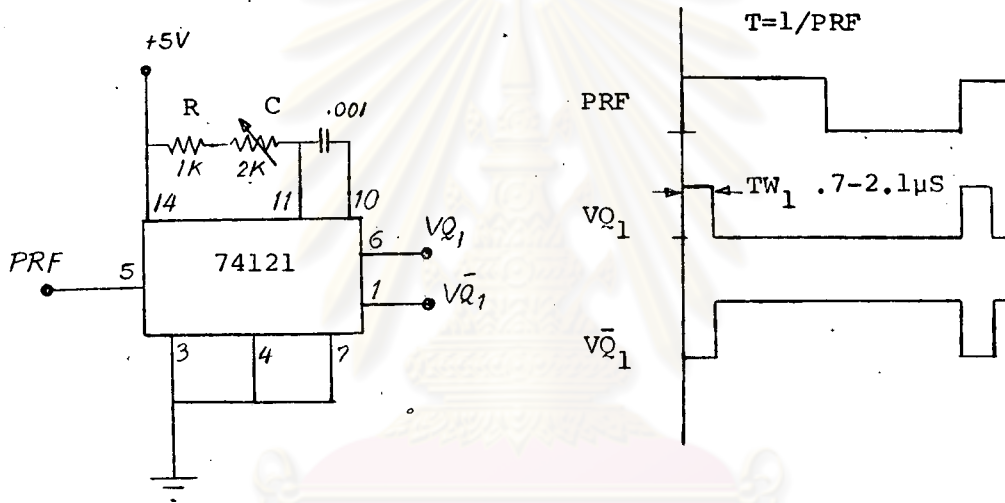
ความกว้างของเวลาของสัญญาณที่ออก (TW) ของวงจรถ่ายปรวมอลสามารถหาได้

สมการ (3.3.1)

$$TW = .693 RC \approx .7 RC \dots \dots (3.3.1)$$

3.3.2 การออกแบบวงจรเกตสัญญาณเป็สร์ท (TW_1)

วงจรถูกเกต TW_1 สัญญาณขาออกที่ได้จะนำไปควบคุมสวิตช์ S_1 ให้ต่อสัญญาณอัลตราซาวด์จากภาคกำเนิดความถี่สูงไปยังภาคขับภาคขยายกำลังและทรานซิวเซอร์ตัวส่ง สวิตช์ S_1 จะต่อในช่วงที่สัญญาณควบคุมเป็น "1" ($V_{Q_1}=4V$) และจะตัดในช่วงที่สัญญาณควบคุมเป็น "0" ($V_{Q_1}=0$) ช่วงเวลาของสัญญาณควบคุมการสวิตช์ S_1 หาได้จากสมการที่ (3.3.1) วงจรของภาคเกตสัญญาณเป็สร์ทดังแสดงในรูปที่ 3.3.6



รูปที่ 3.3.6 แสดงวงจรถูกเกตสัญญาณเป็สร์ทและรูปคลื่นสัญญาณเป็สร์ท

เลือกใช้ตัวเก็บประจุขนาด .001 ไมโครฟารัด ความกว้างของสัญญาณออกที่ใช้ประมาณ 1 ไมโครวินาที ดังนั้นค่าความต้านทานหาได้ $= T/.7C$

$$= \frac{1 \times 10^{-6}}{.7 \times .001 \times 10^{-6}} = 1428 \text{ โอห์ม}$$

ปรับค่าความต้านทานที่หาได้ให้เป็นค่ามาตรฐานคือ 1.5 กิโลโอห์ม

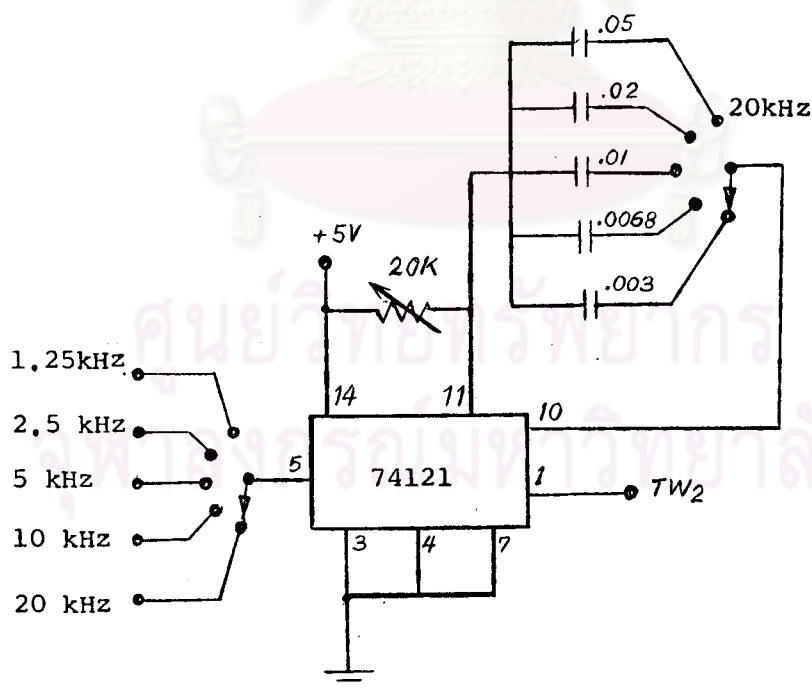
และเพื่อให้สะดวกแก่การปรับแต่งและใช้งานจึงออกแบบวงจรถูกเกตที่สามารถปรับค่าความกว้างของเวลาที่ออกจากวงจรถูกเกตได้ โดยการต่อค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ อนุกรมกับความต้านทานที่มีค่าคงที่ดังรูปที่ 3.3.6 ความต้านทานคงที่ใช้นาต 1 กิโลโอห์ม และความ

ต้านทานปรับค่าที่ใช้มีขนาด 2 กิโลโห์ม สามารถปรับช่วงความกว้างของเวลาที่ออกได้จาก .7 ถึง 2.1 ไมโครวินาทีซึ่งครอบคลุมความกว้างของเวลาที่ต้องการใช้งาน

3.3.3 การออกแบบวงจรหน่วงเวลาการเกิดสัญญาณอ้างอิง (TW_2)

สัญญาณคอปเปอเรอร์ที่ได้รับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับจะใช้เวลาในการเดินทางของคลื่นหลังจากการส่งช่วงเวลาหนึ่ง ช่วงระยะเวลานี้ขึ้นอยู่กับความลึกของหลอดเลือดที่วัดการไหลของเลือดซึ่งไม่แน่นอน ช่วงเวลาของการส่งสัญญาณอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบเฟสกับสัญญาณคอปเปอเรอร์นั้นจะต้องปรับให้ตรงกัน ซึ่งสามารถทำได้โดยการปรับการหน่วงเวลาของการเกิดสัญญาณอ้างอิง วงจรหน่วงเวลาการเกิดสัญญาณที่ใช้จะรับสัญญาณ PRF จากวงจรหารความถี่ซึ่งมีค่าหลายค่าคือ 20, 10, 5, 2.5 และ 1.25 กิโลเฮิร์ตซ์ตามลำดับ ช่วงความกว้างของเวลาที่ออกจะต้องปรับได้จาก 0 ถึง $1/PRF$ ซึ่งมีหลายค่าเช่นกันคือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ไมโครวินาที การออกแบบค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุ จึงต้องทำหลายชุดเพื่อให้สอดคล้องกับความถี่ PRF ที่ใช้ การคำนวณคล้ายกับการออกแบบวงจรเกิดสัญญาณเบิรท์ในหัวข้อที่ผ่านมา

วงจรหน่วงเวลาการเกิดสัญญาณเปรียบเทียบที่ได้ดังรูปที่ 3.3.7



รูปที่ 3.3.7 แสดงวงจรหน่วงเวลาการเกิดสัญญาณอ้างอิง

ความต้านทานปรับค่าได้ (R_1) ที่ใช้มีค่า 20 กิโลโอห์ม และปรับได้ 10 รอบ และเวลาที่ต้องการปรับเพื่อหน่วงสัญญาณเปรียบเทียบกับมี 5 ค่าคือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ไมโครวินาที สามารถนำมาคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุได้ คือ

$$C_1 = \frac{50 \times 10^{-6}}{.7 \times 20 \times 10^3} \quad \text{ฟารัด} \approx .003 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

$$C_2 = \frac{100 \times 10^{-6}}{.7 \times 20 \times 10^3} \quad \text{ฟารัด} \approx .0068 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

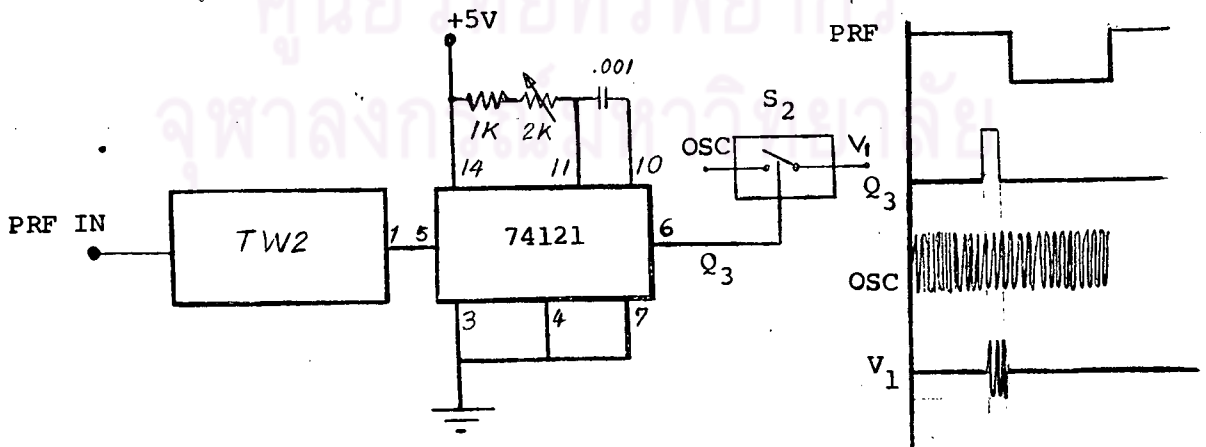
$$C_3 = \frac{200 \times 10^{-6}}{.7 \times 20 \times 10^3} \quad \text{ฟารัด} \approx .01 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

$$C_4 = \frac{400 \times 10^{-6}}{.7 \times 20 \times 10^3} \quad \text{ฟารัด} \approx .02 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

$$C_5 = \frac{800 \times 10^{-6}}{.7 \times 20 \times 10^3} \quad \text{ฟารัด} \approx .05 \quad \text{ไมโครฟารัด}$$

3.3.4 การออกแบบวงจรเกตสัญญาณอ้างอิง (TW_3)

สัญญาณจากวงจรหน่วงเวลาการเกิดสัญญาณอ้างอิง (TW_2) จะเป็นตัวกระตุ้นให้วงจรเกต TW_3 ทำงาน เวลาของสัญญาณที่ออกจากวงจรเกต TW_3 มีค่าประมาณ 1-2 ไมโครวินาที ซึ่งจะนำไปควบคุมวงจรสวิตช์ S_2 ให้ทำงานเพื่อสวิตช์ส่งสัญญาณจากภาคกำเนิดความถี่หลักไปเป็นสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณตอบเปลี่ยนที่รับกลับมา วงจรเกตสัญญาณอ้างอิง ดังรูปที่ 3.3.8

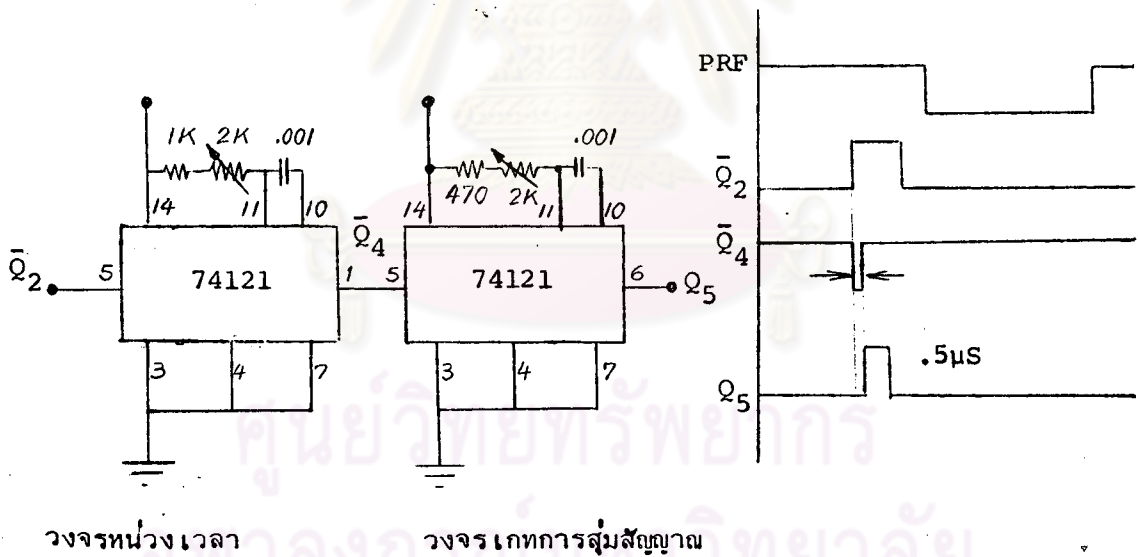


รูปที่ 3.3.8 แสดงวงจรเกตสัญญาณอ้างอิง

การออกแบบค่าองค์ประกอบของวงจรนี้เหมือนกับภาค เกทสัญญาณเบิสร์ท ค่าความต้านทานที่ใช้คือค่าคงที่ขนาด 1 กิโลโอห์ม ค่าความต้านทานที่ปรับค่าได้ขนาด 2 กิโลโอห์ม ตัวเก็บประจุที่ใช้ขนาด .001 ไมโครฟารัด ซึ่งสามารถปรับ เวลาของสัญญาณเกตที่ออกได้จาก .7 ถึง 2.1 ไมโครวินาที

3.3.5 การออกแบบวงจรหน่วงเวลาของการ เกทสัญญาณลุ่มและวงจร เกทสัญญาณลุ่ม

เนื่องจาก เวลาของการลุ่มตัวอย่างของสัญญาณที่ได้จากวงจร เฟลตี เทคเตอร์ มีค่าน้อยมากประมาณ .5 ไมโครวินาที ดังนั้นการลุ่มตัวอย่างของสัญญาณจากวงจร เฟลตี เทคเตอร์ จึงต้อง เลือกจุดที่จะลุ่มตรงจุดที่เหมาะสม ซึ่งส่วนมากจะอยู่บริเวณกึ่งกลาง แต่การที่จะให้การลุ่ม ตัวอย่างของสัญญาณเกิดขึ้นตรงกึ่งกลางนั้น จำเป็นที่จะต้องหน่วงเวลาของสัญญาณเกตที่จะนำไปควบคุมการลุ่มวงจรหน่วงเวลาและวงจรลุ่มตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.3.9



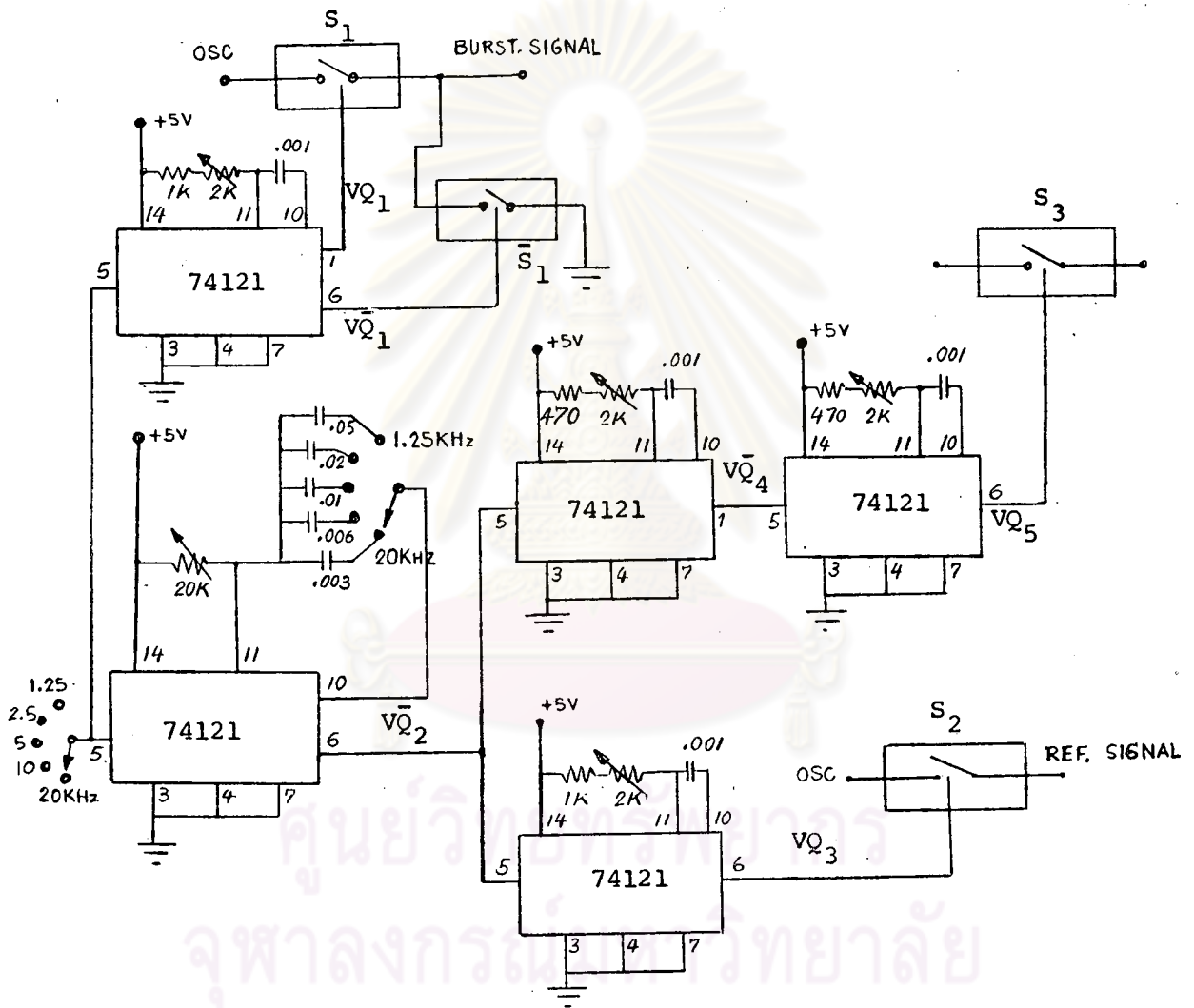
รูปที่ 3.3.9 แสดงวงจรถ่วงเวลาเกตการลุ่มตัวอย่าง

ค่าความต้านทานที่ใช้ในวงจรถ่วงเวลาและวงจรเกตการลุ่มตัวอย่างของสัญญาณเหมือนกัน การออกแบบค่าอุปกรณ์คล้ายกับวงจรเกตที่กล่าวมาแล้ว ผิดกันที่เวลาที่ต้องการคือ .5 ไมโครวินาที ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้คือ .001 ไมโครฟารัด ดังนั้นค่าความต้านทานเท่ากับ $T/.7C = 714$ โอห์ม และเพื่อให้สะดวกในการปรับแต่งในภายหลังจึงใช้ความต้านทานที่ปรับค่าได้ 2 กิโลโอห์มต่อ

อนุกรมกับความต้านทานค่าคงที่ 470 โอห์ม ช่วงความกว้างของเวลาสามารถปรับได้จาก .33 ถึง 1.7 ไมโครวินาที

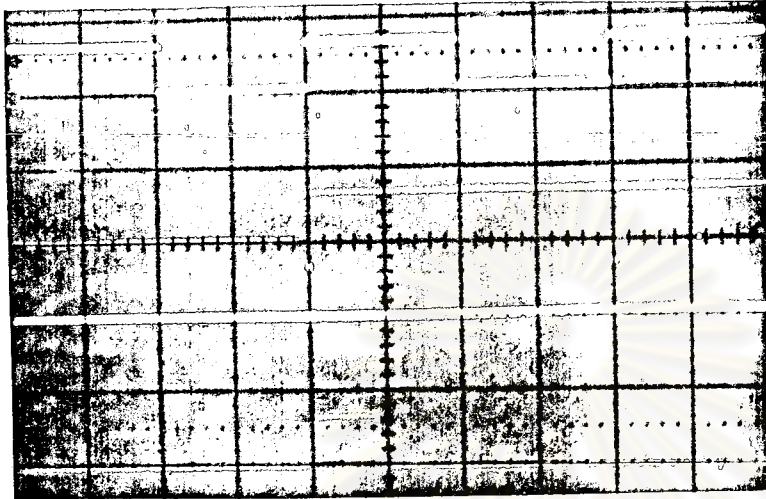
จากวงจรทั้งหมดที่ได้ออกแบบไว้สามารถนำมาต่อรวมกันเป็นวงจร เกท

ทั้งหมดได้ดังรูปที่ 3.3.10



รูปที่ 3.3.10 แสดงวงจรสมบูรณของภาคเกทสัญญาณที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์

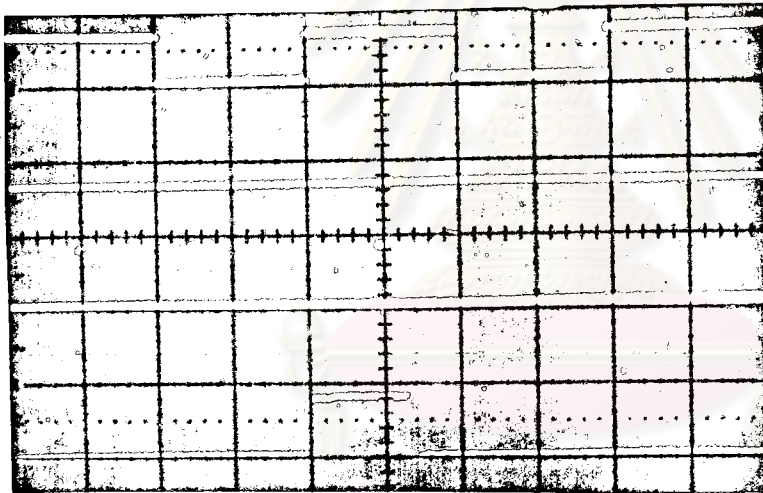
จากการต่อวงจรแล้วนำไปใช้งานสามารถวัดรูปคลื่นต่าง ๆ ของสัญญาณที่ได้ จากภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.3.11



PRF

เกทสัญญาณ เบิสรัท

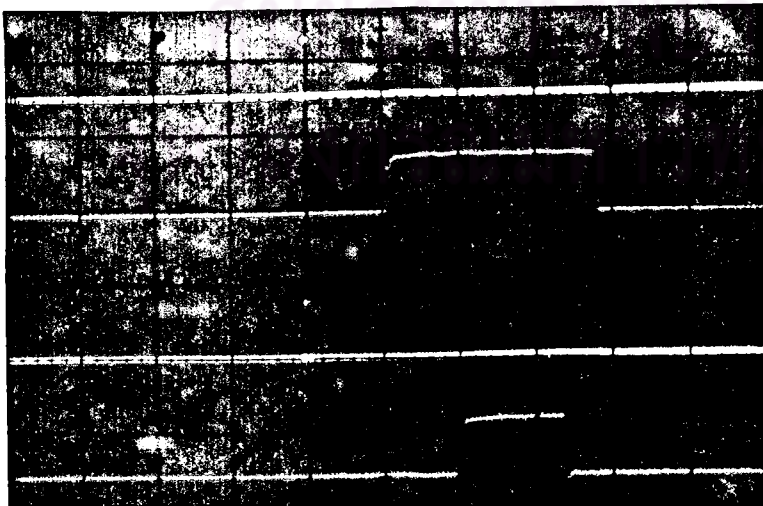
1 μ S/div



PRF

เกทสัญญาณอ้างอิง

1 μ S/div



เกทสัญญาณอ้างอิง

.5 μ S/div

สัญญาณเกทการสุ่ม

.5 μ S/div

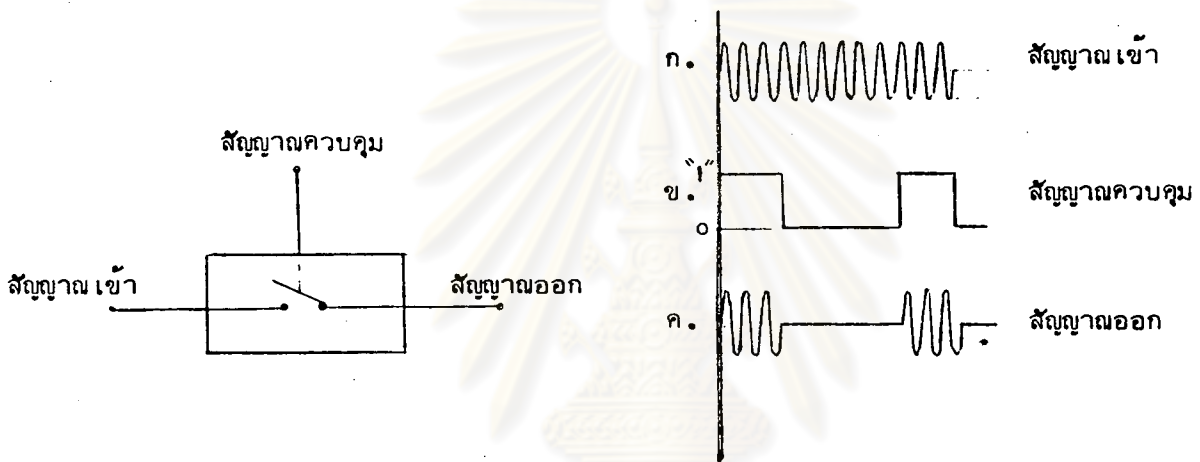
รูปที่ 3.3.11 แสดงรูปคลื่นสัญญาณตามจุดต่าง ๆ ของวงจรเกทสัญญาณ

3.4 ภาคสวิตช์สัญญาณต่าง ๆ

ภาคสวิตช์สัญญาณต่าง ๆ ประกอบด้วย

- ก) ภาคสวิตช์สัญญาณเบิรท์
- ข) ภาคสวิตช์สัญญาณอ้างอิง
- ค) ภาคสวิตช์สัญญาณสุ่ม

จากวงจรรูปที่ 3.4.1 เป็นวงจรสวิตช์ที่ทำงานได้โดยใช้สัญญาณ เกทควบคุม



รูปที่ 3.4.1 แสดงวงจรสวิตช์ที่ทำงานได้โดยสัญญาณควบคุม

เกิดการสวิตช์ตามที่ต้องการคือ ขณะที่ระดับของสัญญาณควบคุม เป็น "0" สวิตช์จะตัดทำให้ไม่มีสัญญาณออกไปยังภาคต่อไป แต่เมื่อขณะที่ระดับของสัญญาณควบคุม เป็น "1" สวิตช์จะต่อทำให้มีสัญญาณออกไปยังภาคต่อไป ช่วงระยะเวลาของการต่อของสวิตช์ขึ้นอยู่กับระยะเวลาของสัญญาณควบคุม และจากคู่มือการใช้งานซีมอส เบร CD4066 ซึ่งทำหน้าที่เป็นวงจรรอนาล็อคสวิตช์มีสวิตช์ 4 ตัวในตัวเดียวกัน⁽²²⁾ สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานกับสัญญาณเกทที่ได้จากภาคสัญญาณต่าง ๆ ได้

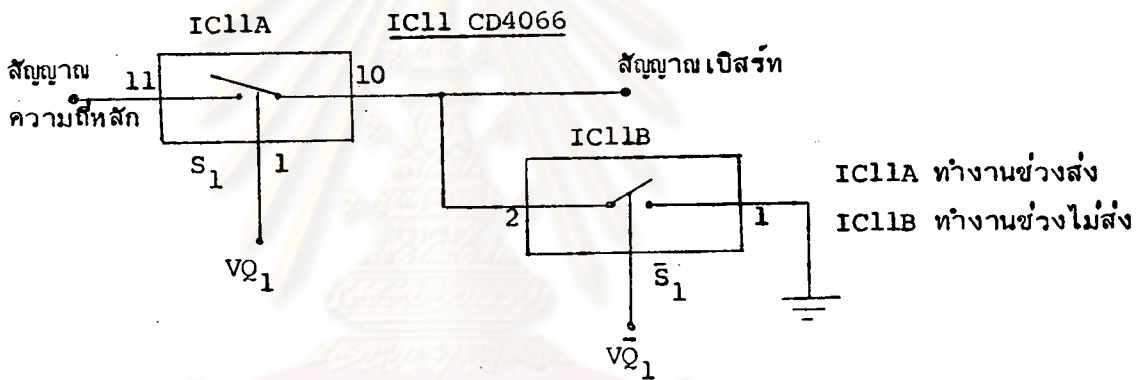
3.4.1 ภาคสวิตช์สัญญาณเบิรท์

วงจรสวิตช์สัญญาณเบิรท์ถูกควบคุมการทำงานโดยสัญญาณเกทจากภาคเกทสัญญาณเบิรท์ทั้งสองช่วงคือ ช่วงส่งสัญญาณเบิรท์ไปยังภาคขับและขยายกำลัง และช่วงที่ไม่ส่ง

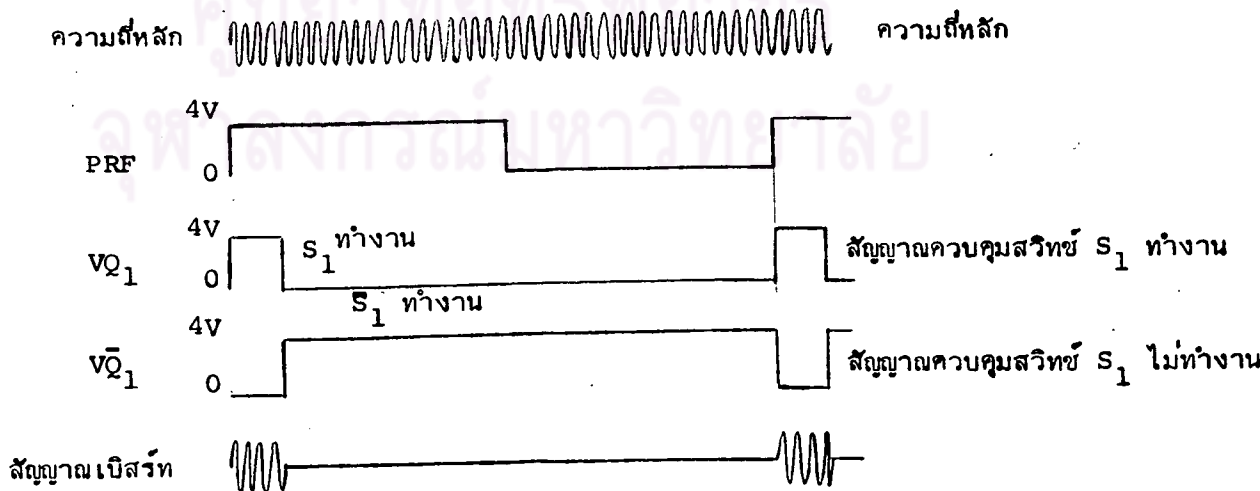
ดังรูปที่ 3.4.3 ทั้งนี้เพื่อให้สัญญาณเบิสร์ทที่จะถูกสวิทช์ไปยังภาคขับ ภาคขยายกำลังและทรานซิวเซอร์ตัวส่ง มีในเฉพาะในช่วงที่ต้องการส่งเพียงอย่างเดียว เป็นการป้องกันมิให้ทรานซิวเซอร์ทำงานในช่วงที่ไม่ต้องการ ซึ่งจะ เป็นผลดีต่อการใช้งานของทรานซิวเซอร์ตัวส่งที่ไม่ทำงานมากเกินไป และ เป็นการลดคลื่นรบกวนที่เกิดจากการรั่วของสัญญาณ ระหว่างทรานซิวเซอร์ตัวส่งกับตัวรับที่วางใกล้กันซึ่งอาจจะเกิดขึ้นในช่วงที่ไม่ได้ส่งสัญญาณเบิสร์ท ที่สำคัญคือ การใช้สัญญาณเบิสร์ทช่วยให้สามารถทำการวัดปรากฏการณ์คอปเปเลอร์ ณ จุดที่มีความลึกระดับหนึ่งได้พอดี ทั้งนี้โดยการหน่วงเวลาสัญญาณอ้างอิงให้พอเหมาะ

ภาคสวิทช์สัญญาณเบิสร์ท และสัญญาณที่ใช้ในภาคนี้ดังแสดงในรูปที่ 3.4.2

และ 3.4.3



รูปที่ 3.4.2 แสดงวงจรสวิทช์สัญญาณ เบิสร์ท

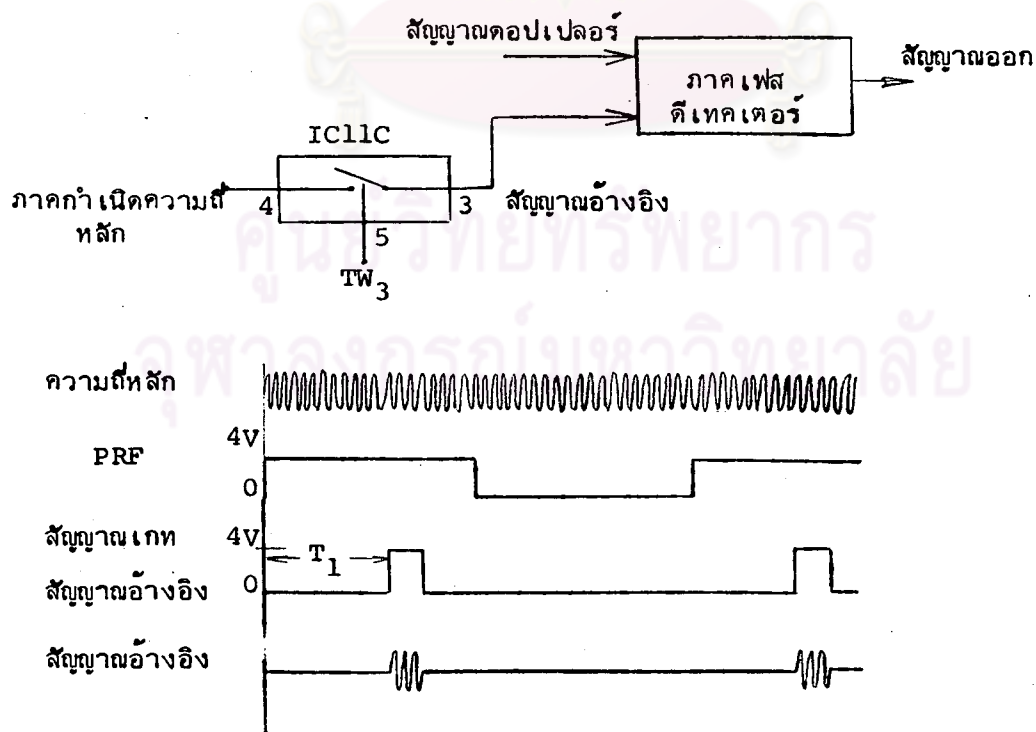


รูปที่ 3.4.3 แสดงสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากวงจรเกทสัญญาณเบิสร์ท

การทำงานของวงจรรูปที่ 3.4.2 IC11A และ IC11B จะต่ออนุกรมและขนานระหว่างวงจรถ้าเปิดความถี่หลักกับวงจรถับและขยายกำลังตามลำดับ สัญญาณ V_{Q_1} เป็นตัวควบคุมการสวิตช์ของ IC11A ส่วน $\overline{V_{Q_1}}$ จะเป็นตัวควบคุมการสวิตช์ของ IC11B ในขณะที่ V_{Q_1} เป็น "1" $\overline{V_{Q_1}}$ จะเป็น "0" และเมื่อ V_{Q_1} เป็น "0" $\overline{V_{Q_1}}$ จะเป็น "1" เช่นนี้เสมอไปเป็นเหตุให้ IC11A และ IC11B จะทำงานสลับกัน นั่นคือ IC11A ปิดวงจรถับ IC11B จะเปิดวงจรถับ และเมื่อ IC11A เปิดวงจรถับ IC11B จะปิดวงจรถับ สัญญาณที่ออกจากวงจรถับมีเฉพาะช่วงที่ S_1 ทำงานเท่านั้น สัญญาณควบคุม S_1 (V_{Q_1}) ได้จากภาคเกทสัญญาณเบิรท์ (TW_1) ที่ตั้งช่วงความกว้างของสัญญาณควบคุมไว้ประมาณ 1 ไมโครวินาที ทำให้สัญญาณเบิรท์ที่ออกจากวงจรถับที่เกิดขึ้นเพียง 1 ไมโครวินาทีเท่านั้น

3.4.2 ภาคสวิตช์สัญญาณอ้างอิง

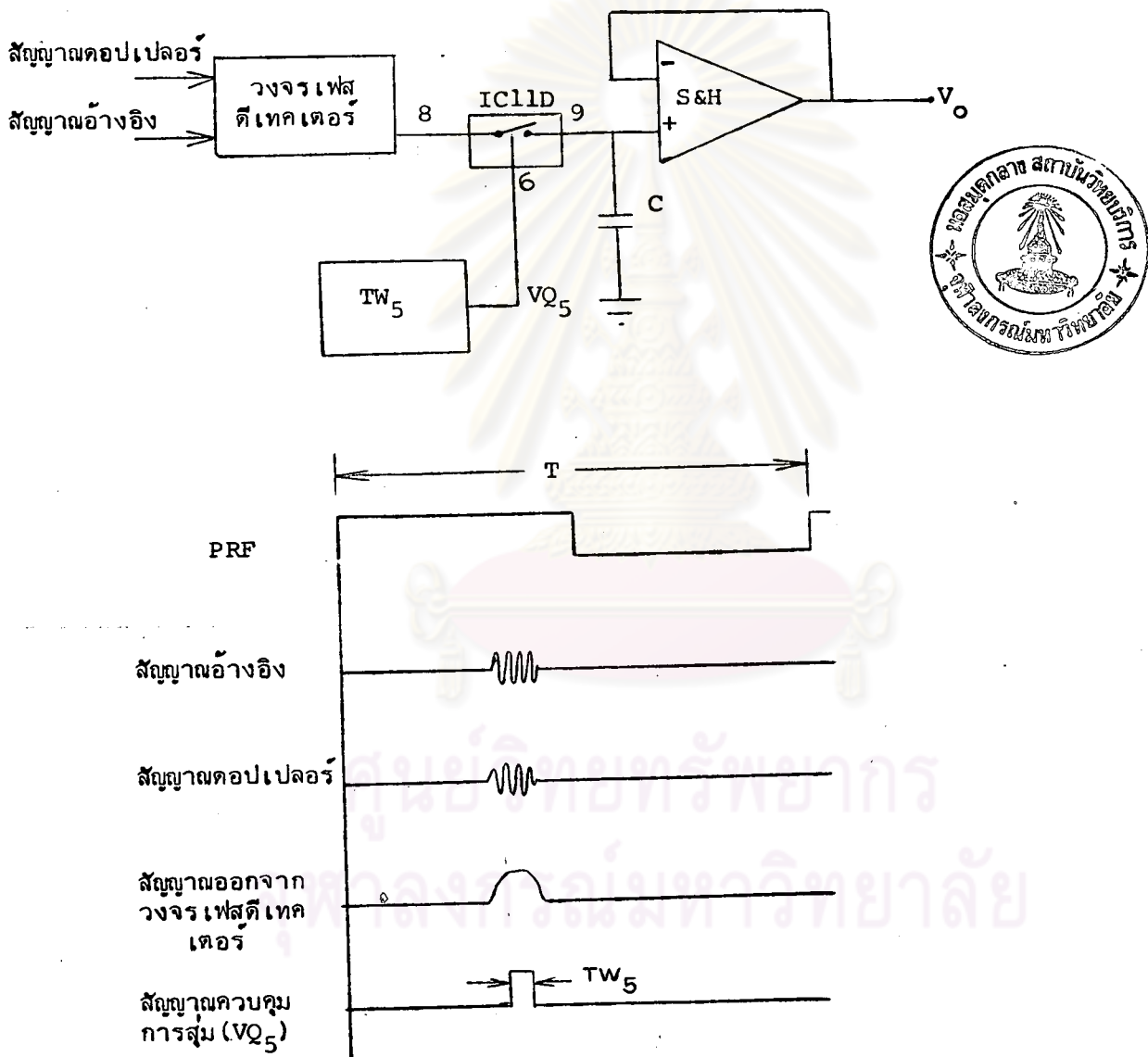
วงจรถับสัญญาณอ้างอิงคล้ายกับวงจรถับสัญญาณเบิรท์ต่างกันตรงที่วงจรถับนี้ควบคุมการสวิตช์ด้วยสัญญาณเพียงสัญญาณเดียว คือ TW_3 ที่ได้จากภาคเกทสัญญาณอ้างอิง การออกแบบก็เหมือนกับวงจรถับสัญญาณเบิรท์ วงจรถับที่ใช้งานดังแสดงในรูปที่ 3.4.4



รูปที่ 3.4.4 แสดงวงจรถับและรูปคลื่นสัญญาณที่ได้จากวงจรถับสัญญาณอ้างอิง

3.4.3 วงจรสวิตช์สัญญาณสุ่ม

วงจรนี้อยู่ในภาคสุ่มและรักษาระดับ (SAMPLE & HOLD) ทำหน้าที่สวิตช์เพื่อต่อสัญญาณขาออกจากวงจรเฟสดีเทคเตอร์เข้ากับตัวเก็บประจุ (C) ดังรูปที่ 3.4.5



รูปที่ 3.4.5 แสดงวงจรสวิตช์การสุ่มและสัญญาณต่าง ๆ ที่ใช้งาน

ในขณะที่ V_{Q_5} เป็น "1" ขา 8 และ 9 ของ IC11D จะต่อวงจรทำให้สัญญาณที่ออกจากวงจรเฟลตตีเทคเตอร์ไปประจุไว้ที่ C และในช่วงขณะที่ V_{Q_5} เป็น "0" วงจรสวิตซ์ขา 8 และ 9 จะตัดวงจรทำให้ตัวเก็บประจุจะคายประจุผ่านไปทางขานอนอินเวรติ่งของ IC แต่เนื่องจาก IC ที่ใช้นี้มีค่าอินพุทอิมพีแดนซ์สูงมากจึงทำให้ระดับแรงดันที่ประจุไว้ในตัวเก็บประจุ C คงที่อยู่จนถึงช่วงของการลุ่มครั้งต่อไป ระดับแรงดันที่ลุ่มตัวอย่างครั้งใหม่ก็จะถูกประจุไว้ที่ตัวเก็บประจุ และรักษาระดับจนถึงการลุ่มตัวอย่างครั้งใหม่ต่อไป เป็นเช่นนี้เรื่อย ๆ ไป



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5 ภาคขับและขยายกำลัง

สัญญาณ เบิร์ทที่ได้จากภาคสวิตซ์สัญญาณมีความแรงประมาณ 2.5 โวลท์ จะถูกนำมาขยายโดยวงจรขับและขยายกำลังให้มีความแรงเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 60 โวลท์ ยอดถึงยอด เพื่อนำไปป้อนให้กับทรานซิวเตอร์ตัวส่งให้ทำการปล่อยสัญญาณลงไปยังหลอดเลือกที่จะวัดการไหลของเลือด แต่ก่อนที่จะถึงการออกแบบวงจรขับและขยายกำลัง จะต้องประกอบทรานซิวเตอร์เข้ากับตัวหุ้มก่อน ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายอันอาจจะเกิดขึ้นกับทรานซิวเตอร์ได้

3.5.1 ทรานซิวเตอร์ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์

ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์ที่สร้างทรานซิวเตอร์ที่ใช้เป็นแผ่นกลมเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 ซม. และหนาประมาณ 0.5 มม. ดังรูป 3.5.2 ซึ่งจะแยกออกเป็น 2 ส่วน ส่วนหนึ่งใช้สำหรับเป็นตัวส่งคลื่น และอีกส่วนหนึ่งใช้สำหรับเป็นตัวรับคลื่น ทั้งนี้เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาที่เกิดขึ้นจากการรบกวนของคลื่นส่งที่เกิดขึ้น ในทางอุดมคติสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นควรต่ำกว่าระดับของสัญญาณส่งประมาณ 100 ดีบี ภายในเวลาน้อย ๆ ไมโครวินาทีหลังจากการส่ง⁽¹⁶⁾ และแม้จะแยกทรานซิวเตอร์ออกเป็นสองส่วนแล้วก็ตาม ก็ยังไม่สามารถขจัดสัญญาณรบกวนให้หมดสิ้นเหลืออยู่บ้างเพียงเล็กน้อย ซึ่งดีกว่าการใช้ทรานซิวเตอร์ทั้งตัวส่งและตัวรับรวมกัน

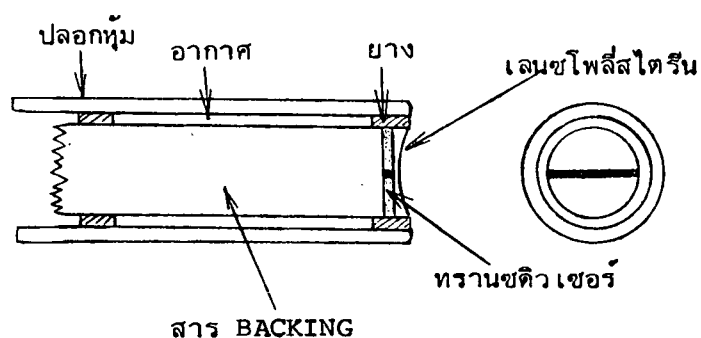
3.5.1.1 การประกอบทรานซิวเตอร์เพื่อนำไปใช้งาน

สาร BACKING

ในการนำทรานซิวเตอร์ไปใช้งานในการส่งและรับคลื่นเพื่อให้ทิศทางของการส่งและรับคลื่นเกิดขึ้นในทิศทางข้างหน้าเพียงอย่างเดียว จะต้องใช้สารตัวกลางมาวางติดที่ผิวด้านหลังสารตัวกลางที่ใช้ควรมีค่า Characteristic impedance (ρc) เท่ากับของทรานซิวเตอร์⁽¹⁷⁾

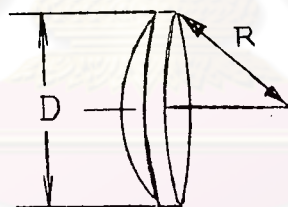
ทั้งนี้ เพื่อให้การสันสะ เทือนที่ผิวด้านหลังของทรานซิวเตอร์ถูกถ่ายทอดไปยังสารตัวกลางนั้นได้ดี สารที่นิยมใช้กันได้แก่ กาวอีพอกซีผสมผงทังสเตน (TUNGSTEN LOADED EPOXY RESIN) และสำหรับสารตัวกลางที่ใช้ทำในครั้งนี่คือ กาวอีพอกซีผสมผงเหล็ก ซึ่งผลจากการทดลองใช้งานก็สามารถใช้ได้ดีเช่นเดียวกัน ส่วนประกอบของทรานซิวเตอร์ดังแสดงในรูป

3.5.1



รูปที่ 3.5.1 ภาพแสดงส่วนประกอบของทรานซิวเตอร์

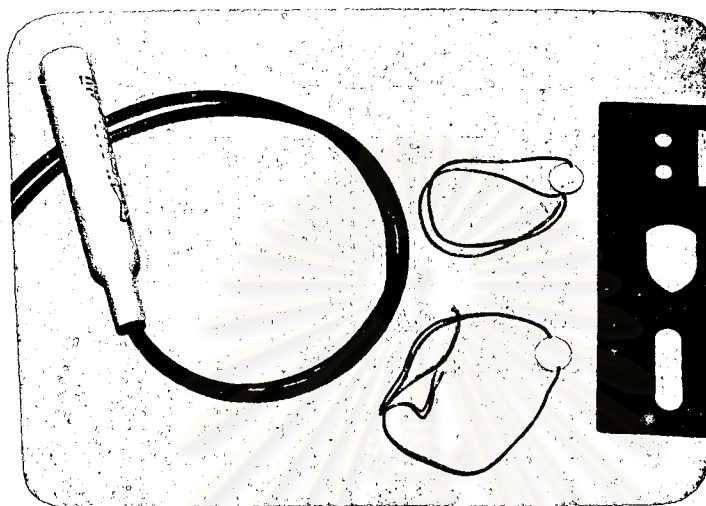
เลนซ์ ที่ติดอยู่ด้านหน้าของทรานซิวเตอร์ในรูป 3.5.1 ใช้สำหรับหักเหลำคลื่นอัลตราไวโอเล็ตให้ไปรวมกันยังจุดที่ต้องการ ได้จากสารโฟลีสไตรีนมีลักษณะเป็นพลาสติกเหลว ซึ่งจะแข็งตัวเมื่อนำไปผสมกับตัวทำให้แข็งและตั้งไว้ที่อุณหภูมิพอเหมาะ จุดโฟกัสของลำคลื่นอัลตราไวโอเล็ตขึ้นอยู่กับความโค้งของ เลนซ์พอประมาณได้จากรูป⁽²³⁾ 3.5.2



$R \pm 10\%$ ม.ม.	D mm	ความถี่รีโซแนนซ์ของทรานซิวเตอร์
15	5	
30	11.1	1 - 6 MHz
62	16.2	

รูปที่ 3.5.2 แสดงจุดโฟกัสของเลนซ์

ภาพแสดงทรานซิวเซอร์ที่ประกอบ เรียบร้อยและนำไปใช้งานดังแสดงในรูป 3.5.3



รูปที่ 3.5.3 ภาพแสดงทรานซิวเซอร์ที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์
คอปเปิลอร์

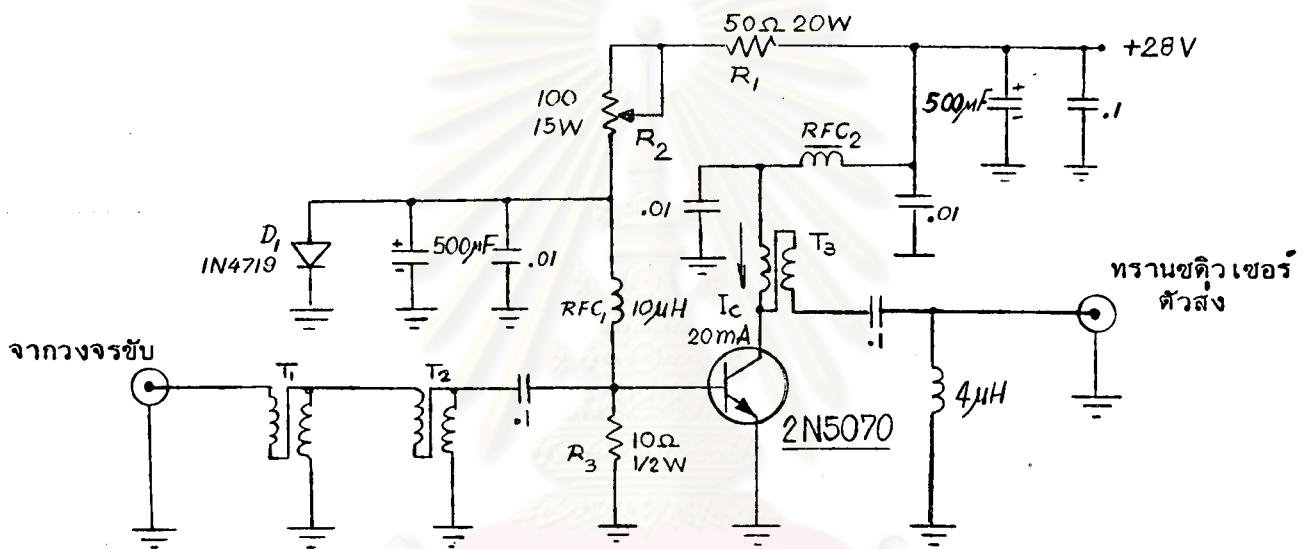
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 การออกแบบวงจรขยายกำลัง ⁽²⁴⁾

การออกแบบวงจรขยายกำลัง ต้องพิจารณาถึง ส่วนประกอบที่สำคัญคือ

- ก) การแมช (MATCHING) อิมพีแดนซ์ของวงจรขาเข้าและขาออก
- ข) การไบแอสของทรานซิสเตอร์

วงจรขยายกำลังที่ใช้สามารถขับกำลังได้ 7 วัตต์ PEP (PEAK ENVELOPE POWER) โดยใช้ ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N5070 ซึ่งมีรายละเอียดของวงจรดังรูป 3.5.4



รูปที่ 3.5.4 แสดงวงจรขยายกำลังที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปลอร์

3.5.2.1 แมชชิงทรานซฟอร์เมอร์ T_1, T_2, T_3

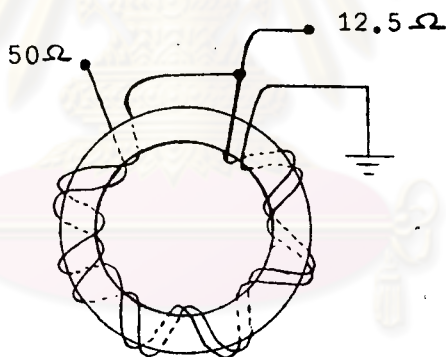
แมชชิงทรานซฟอร์เมอร์ T_1 และ T_2 เป็นตัวปรับค่าอิมพีแดนซ์ขาเข้าของวงจรเบสของ ทรานซิสเตอร์ที่มีค่าต่ำประมาณ 6.25 โอห์ม ให้มีค่าสูงขึ้นพอเหมาะกับอิมพีแดนซ์ขาออกของ วงจรขับ อัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ $T_1 = T_2 = T_3 = 4 : 1$ T_1 และ T_2 จะต่ออนุกรม กันอยู่ ซึ่งทำให้อัตราส่วนของอิมพีแดนซ์ที่ปรับเป็น 16 : 1 คิดเป็นอิมพีแดนซ์ขาเข้าของวงจร ขยายกำลังได้ประมาณ 100 โอห์ม ซึ่งไม่โหลดต่อวงจรขับมากนัก ส่วน T_3 เป็นตัวปรับอิมพี แคนซ์ขาออกที่นำไปใช้กับทรานซิสเตอร์ตัวส่ง ซึ่งมีค่าประมาณ 53 โอห์ม (ได้จากการคำนวณ ค่าจากการทดลองในหัวข้อ 3.1)

3.5.2.2 การพันแมชชิงทรานซฟอร์เมอร์ T_1 , T_2 และ T_3 (24)

แมชชิงทรานซฟอร์เมอร์ประกอบด้วยสาย "TRANSMISSION LINE" ที่เคลือบน้ำยา พันบิดกันเป็นเกรียว และพันรอบบนแกนทอรรอยด์ การพันทรานซฟอร์เมอร์ T_1 , T_2 และ T_3 คล้ายกันต่างกันว่า T_1 เป็น 2 Twisted Pairs ส่วน T_2 เป็น 4 Twisted Pairs และ T_3 เป็น 1 Twisted Pairs ซึ่งมีขั้นตอนการพันดังนี้

ก) นำสาย "TRANSMISSION LINE" เบอร์ 26 AWG ที่ต่างสีกัน มาบิดรวมกัน ให้เป็นเกลียวด้วยสว่านไฟฟ้า จะได้เป็น 1 Twisted pairs สำหรับ T_3 จากนั้นนำสายที่ บิดแล้วมาบิดรวมกันอีกครั้งโดยให้จำนวนเกลียวของการบิดเป็น 6 เกลียวต่อนิ้ว ก็จะได้สายเป็น 2 Twisted Pairs สำหรับ T_1 ส่วน T_2 นำสาย 2 Twisted Pairs ที่ได้มาบิดกันอีกครั้งจึงจะได้ 4 Twisted Pairs

ข) นำสายที่บิดแล้วมาพันรอบแกนทอรรอยด์ชนิดที่เป็นวงแหวน จำนวน 6 รอบ และ เชื่อมปลายสายตามรูปที่ 3.5.5



รูปที่ 3.5.5 แสดงการพันแมชชิงอิมพีแดนซ์ทรานซฟอร์เมอร์ T_1 , T_2 และ T_3

ชนิดอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ 4 : 1

แกนทอรรอยด์ที่ใช้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายนอกเท่ากับ ๕ นิ้ว และภายในเท่ากับ ๕ นิ้ว

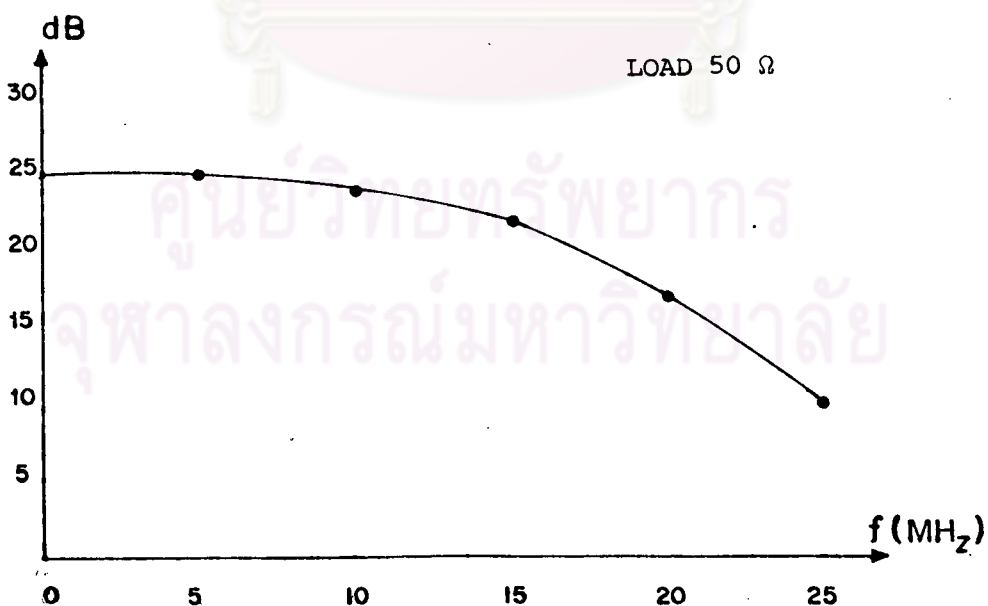
3.5.2.3 การไบแอสวงจรรขยายกำลัง

ไบแอสของวงจรมอนิเตอร์เป็นเงื่อนไขไฟตรงสำหรับกำหนดจุดทำงาน วงจรที่ใช้เป็นแบบคอมมอนอีมิเตอร์ แรงไฟไบแอสของวงจรมอนิเตอร์ได้จากเน็ตเวิร์ค (NETWORK) R_1 , R_2 , R_3 และ D_1 ต่อกับแหล่งจ่าย 28 โวลต์ แรงไฟฟอร์เวิร์ด (FORWARD) ที่ได้จากไดโอด D_1 จะผ่าน RFC_1 ไปจ่ายให้กับขั้วเบสของทรานซิสเตอร์เพื่อเป็นไบแอสซึ่งมีค่าประมาณ .7 โวลต์ ขณะที่ไม่มีสัญญาณป้อนกระแสเบสจะมีค่าประมาณ 3 มิลลิแอมป์ และเมื่อป้อนสัญญาณให้กับวงจรรขยายเพื่อให้ได้

กำลังขยายถึง 25 วัตต์ PEP จะทำให้มีกระแสเบสไหลเพิ่มขึ้น การเปลี่ยนแปลงของกระแสเบสนี้จะทำให้แรงไฟที่เบสเปลี่ยนแปลงและยังผลให้จุดทำงานของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนไปได้ ไดโอด D_1 ทำหน้าที่คล้ายกับซีเนอร์ไดโอด ซึ่งจะช่วยรักษาระดับแรงไฟที่ปรากฏที่เบสให้คงที่ จึงทำให้จุดทำงานของทรานซิสเตอร์ไม่เปลี่ยนแปลงตาม นอกจากนี้ไดโอด D_1 ยังทำหน้าที่เป็นตัวชดเชยอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์ขณะทำงาน โดย D_1 ติดอยู่กับแผ่นระบายความร้อนบนแผ่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ทำให้รับความร้อนจากทรานซิสเตอร์ขณะทำงาน ความต้านทาน R_3 ช่วยลดค่าอิมพีแดนซ์รวมจากเบสถึงดินและเป็นตัวช่วยให่วงจรขยายมีเสถียรภาพดี ค่าความต้านทาน R_3 ที่ใช้มีค่าเท่ากับ 10 โอห์ม ทนกำลังงานได้ 1/2 วัตต์

ความต้านทาน R_1 และ R_2 เป็นตัวลดแรงดันจากแหล่งจ่าย 28 โวลต์ เพื่อจ่ายให้กับวงจรเบสของทรานซิสเตอร์ ค่าความต้านทาน R_1 มีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม 20 วัตต์ และ ความต้านทาน R_2 เป็นความต้านทานที่ปรับค่าได้ 100 โอห์ม 15 วัตต์ เพื่อใช้สำหรับปรับกระแสของคอลเลกเตอร์ให้มีค่าเท่ากับ 20 มิลลิแอมป์ขณะไม่มีสัญญาณป้อนเข้า

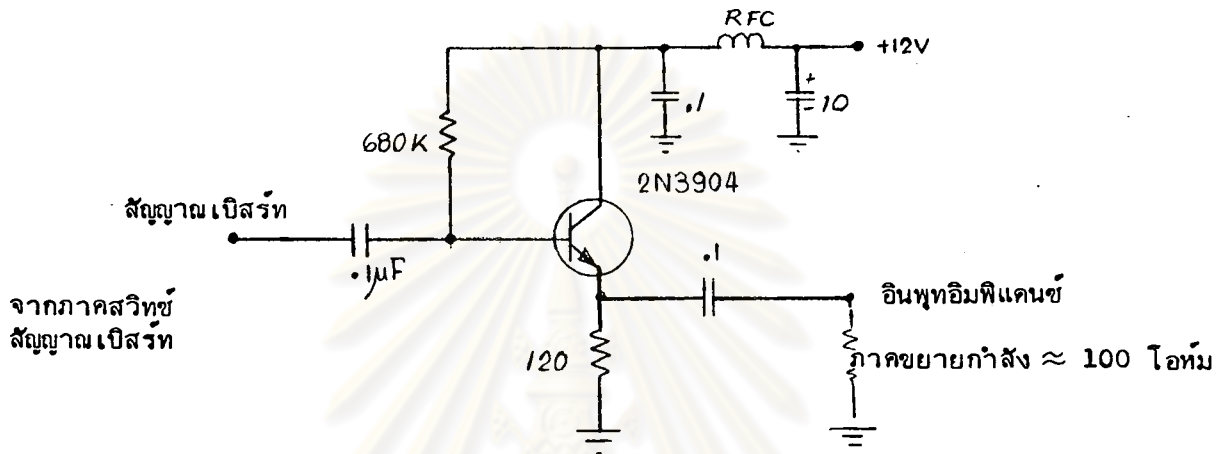
จากวงจรขยายกำลังนำไปทดสอบโดยการป้อนสัญญาณความถี่รูปคลื่นไซน์แบบต่อเนื่อง และหาค่าอัตราขยายกำลังได้ดังรูป 3.5.6



รูปที่ 3.5.6 กราฟแสดงอัตราขยายกำลังของภาคขยายกำลัง

3.5.3 ภาคขับกำลัง

สัญญาณเบสร์ทที่ได้จากภาคสวิทช์สัญญาณเบสร์ทมีความแรงประมาณ 2.5 Vpp ซึ่งเพียงพอที่จะขับภาคขยายกำลังให้สามารถขับกำลังได้เต็มที่ และเพื่อมิให้เกิดการไหลดแก่วงจรกำเนิดความถี่หลัก จึงใช้วงจรบัฟเฟอร์เป็นตัวขับกำลังวงจรที่ใช้ดังรูป 3.5.7

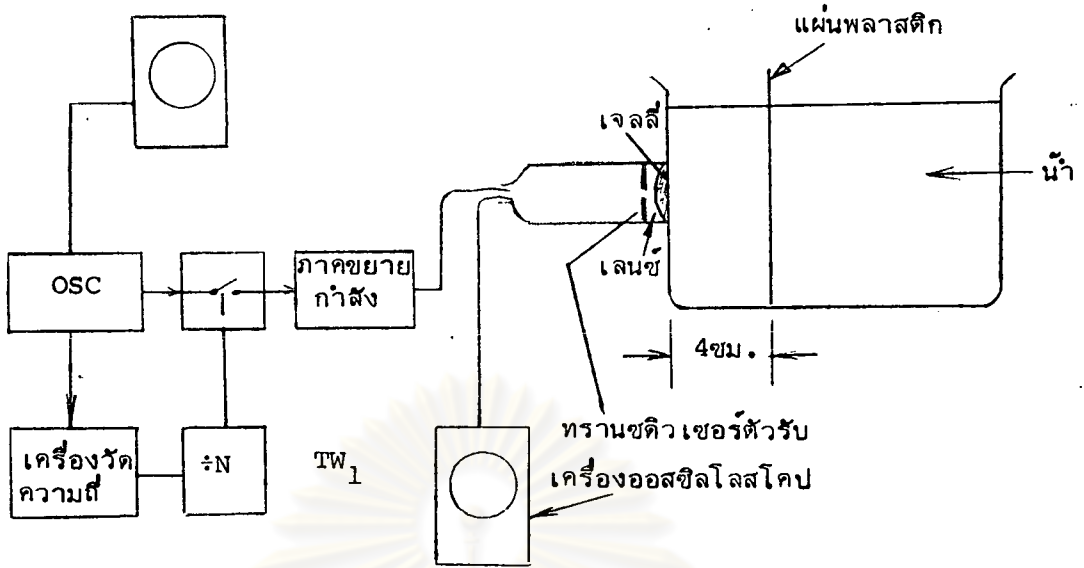


รูปที่ 3.5.7 แสดงวงจรขับกำลัง

จากวงจรขับและขยายกำลังที่ได้นำมาต่อรวมกันโดยการป้อนสัญญาณเบสร์ทเข้าที่อินพุท และใช้โหลดที่เป็นทรานซิวเซอร์ วัตต์แรงดันขาออกตกคร่อมทรานซิวเซอร์ได้ประมาณ 55 โวลท์ยอดถึงยอด

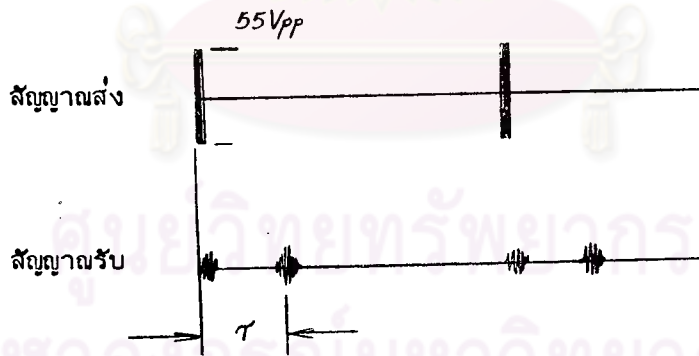
3.5.4 การทดลองวัดความแรงของคลื่นสะท้อนกับความถี่ของคลื่นส่ง

การทดลองได้จากการส่งคลื่นสัญญาณเบสร์ทไปในอ่างน้ำที่มีแผ่นพลาสติกตั้งอยู่ในน้ำ ห่างจากทรานซิวเซอร์ 4 ซม. ระหว่างหัวทรานซิวเซอร์กับอ่างน้ำ ใช้เจลลี่เป็นสารตัวกลางให้คลื่นเดินทางผ่านได้ดี การต่อวงจรทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5.8



รูปที่ 3.5.8 แสดงการต่อวงจรที่ใช้วัดความแรงของสัญญาณคลื่นสะท้อนเมื่อปรับความถี่ต่าง ๆ กัน

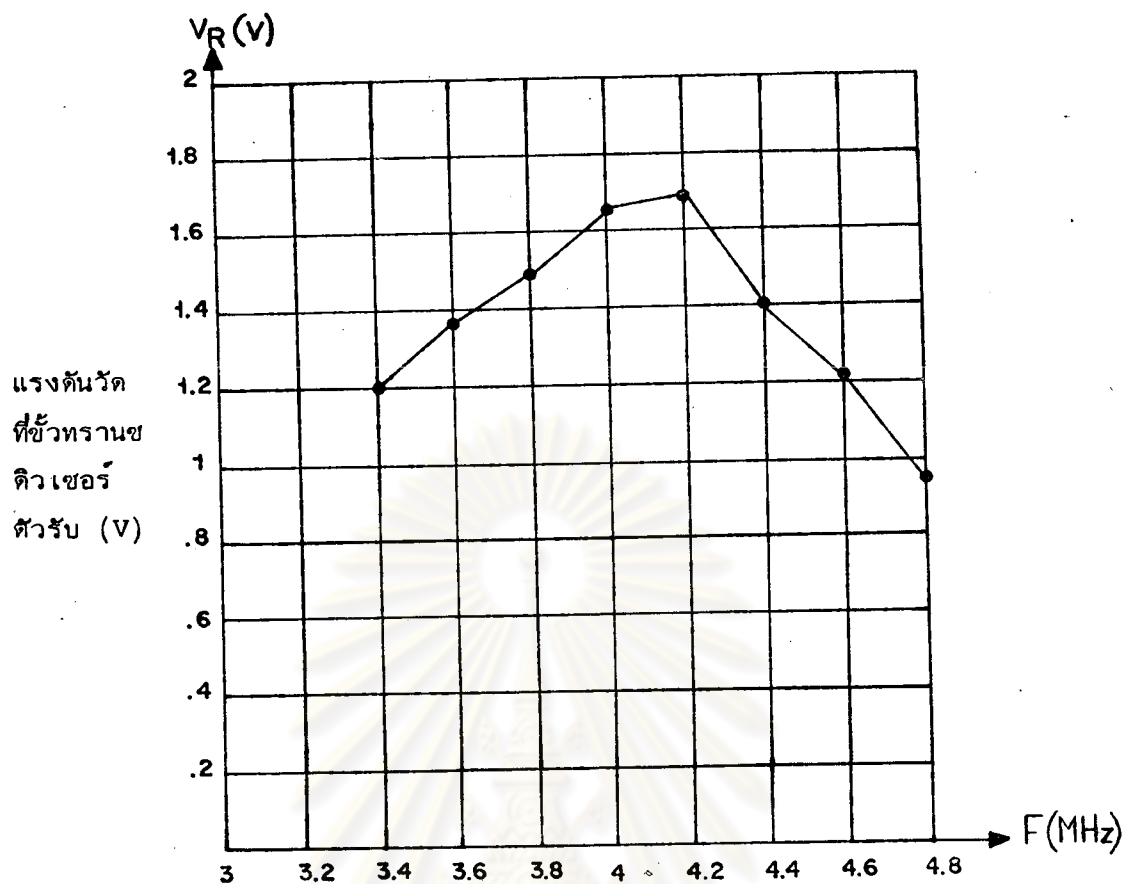
รูปแสดงคลื่นสัญญาณ เบิสร์ทที่ส่งและสัญญาณสะท้อนที่รับได้ดังรูปที่ 3.5.9



รูปที่ 3.5.9 แสดงความสัมพันธ์ของการส่ง การรับคลื่น และเวลาของคลื่นสะท้อนที่ใช้เดินทางในน้ำจากพลาสติกถึงทรานซิวเซอร์ทั้งไปและกลับ

จากวงจรรูปที่ 3.5.8 ปรับความถี่ของภาคกำเนิดความถี่หลัก และวัดค่าความแรงของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่รับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับด้วย เครื่องออสซิลโลสโคป

จะได้ความสัมพันธ์ของความถี่กับแอมพลิจูดของสัญญาณที่รับได้ดังรูปที่ 3.5.10



รูปที่ 3.5.10 ภาพแสดงแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่รับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับ เมื่อปรับความถี่ต่าง ๆ กัน

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าความถี่ที่ตัวรับสามารถรับคลื่นสะท้อนได้แรงที่สุดคือ

4.19 เม็กกะเฮิร်ทซ์

3.5.5 กำลังงานของทรานซิวเซอร์

กำลังงานของทรานซิวเซอร์ที่ใช้ในการส่งคลื่นไปยังหลอดเลือกโดยประมาณหาได้จากสมการ (3.5.1)

$$P = \frac{\tau}{T} \frac{E^2}{8Z} \quad \dots \dots (3.5.1)$$

τ = ช่วงเวลาที่ส่งคลื่น (1 μ s)

T = คาบเวลาของคลื่นที่ใช้ส่ง (50, 100, 200, 400, 800 μ s)

Z = อิมพีแดนซ์ของทรานซิวเซอร์ตัวส่ง จากการวัดได้ = 53 โอห์ม

V = แรงดันที่คร่อมตัวทรานซิวเซอร์ (55 V)

จากคาบเวลาต่างคือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ไมโครวินาที สามารถหาค่าพลังงานของทรานซิวเซอร์ได้เท่ากับ .14, .07, .035, .018, .009 วัตต์

คลื่นสัญญาณเบสิร์ทที่ส่งออกไปยังหลอดเลเซอร์ที่วัด จะถูกเกณฑ์ด้วยเวลา ไมโครวินาที ทุกคาบเวลา T ไมโครวินาที สามารถนำมาเขียนเป็นสมการของคลื่นส่งได้ดังสมการ (3.5.2)

คลื่นส่ง $T_x(t)$ ที่เวลา t จะอยู่ในรูปของ

$$T_x(t) = A [u(t) - u(t-T) + u(t-T) - u(t-2T) + u(t-2T) - u(t-3T) + \dots \sin(2\pi ft)]$$

เมื่อ $u(t) = 0 \quad t < 0$

$u(t) = 1 \quad t \geq 0$

$A =$ ค่าคงที่

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

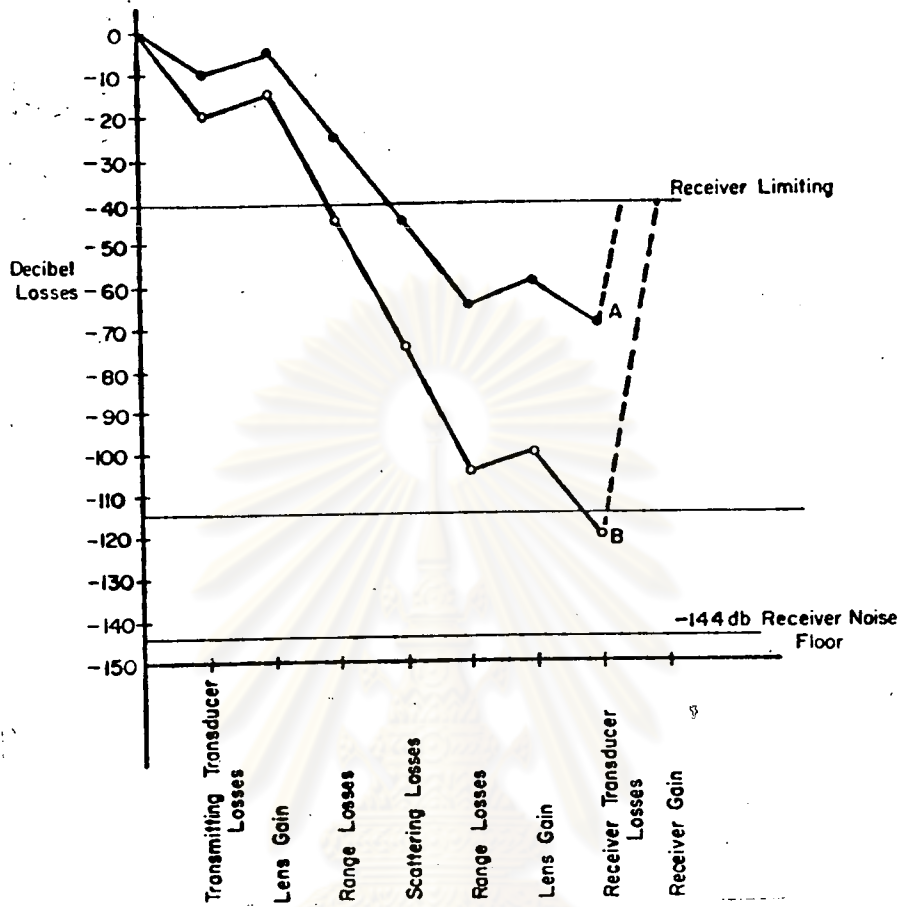
3.6 ภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์และภาคจำกัดส่วนสูงของสัญญาณคอปเปอเรอร์

สัญญาณคอปเปอเรอร์ที่เกิดจากการสะท้อนจากโมเลกุลของเลือดในหลอดเลือด จะมีความแรงของระดับสัญญาณต่ำลงไปจากระดับของสัญญาณที่ส่งจากทรานซิวเซอร์ตัวส่ง อยู่ในช่วง 50 ถึงมากกว่า 120 เดซิเบล สาเหตุต่าง ๆ ที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเหล่านั้นพอนำมาใช้ประมาณค่าสำหรับการออกแบบอัตราการขยายของภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ได้ สาเหตุที่ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงาน (16) ได้แก่

- 1) การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากประสิทธิภาพของทรานซิวเซอร์ตัวส่งประมาณ 10-20 dB
- 2) อัตราการขยายที่ได้จากเลนซ์ของทรานซิวเซอร์ตัวส่งประมาณ +5-+10 dB
- 3) การสูญเสียพลังงานเนื่องจากคลื่นเสียงเดินทางในเนื้อเยื่อประมาณ 2 dB/cm/MHz
- 4) การสูญเสียพลังงานเนื่องจากโมเลกุลของเลือดที่วัดการไหลประมาณ 20-40 dB
- 5) การสูญเสียพลังงานเนื่องจากคลื่นเสียงเดินทางในเนื้อเยื่อประมาณ 2 dB/cm/MHz
- 6) อัตราการขยายที่ได้จากเลนซ์ของทรานซิวเซอร์ตัวรับประมาณ +5-+10 dB
- 7) การสูญเสียพลังงานที่เกิดจากประสิทธิภาพของทรานซิวเซอร์ตัวรับประมาณ 10-20 dB

จากข้อมูลเหล่านั้นนำมาเขียนเป็นกราฟแสดงการสูญเสียพลังงานได้ดังรูปที่ 3.6.1

จากกราฟรูปที่ 3.6.1 เป็นกราฟที่คิดค่าการสูญเสียพลังงานโดยประมาณของการวัดการไหลของเลือดในหลอดเลือดที่อยู่ลึก 3 เซนติเมตร ที่ใช้คลื่นส่งขนาดความถี่ 5 เมกกะเฮิรตซ์ จะเห็นได้ว่าการสูญเสียที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 70-120 ดีบี ดังนั้นการออกแบบวงจรขับและขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ ควรมีอัตราการขยายประมาณ 70 ถึง 120 ดีบี ภาคขยายที่ออกแบบสร้างใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์นี้มีอัตราการขยายแรงดันประมาณ 90 ดีบี โดยใช้วงจรประมวลเบอร์ 733 ซึ่งเป็นวงจรประมวลผลใช้สำหรับขยายสัญญาณภาพ (25)

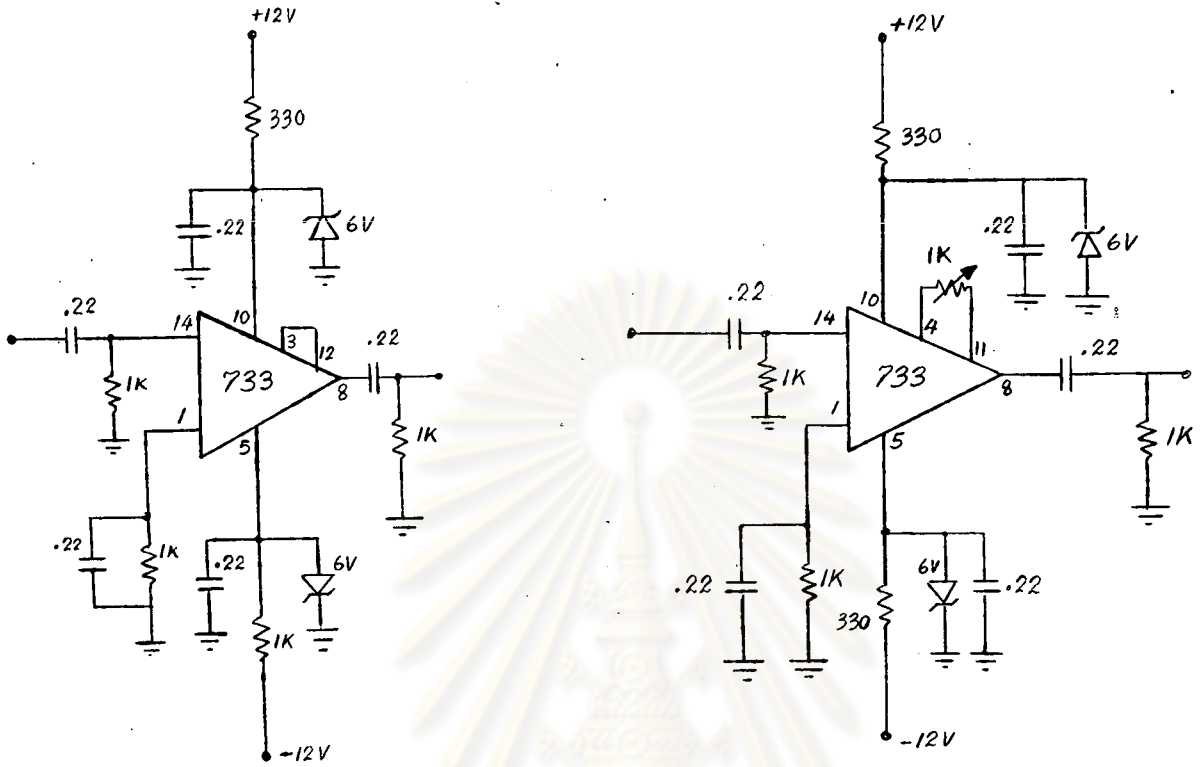


รูปที่ 3.6.1 กราฟแสดงค่าการสูญเสียพลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ (16)

3.6.1 การออกแบบวงจรภาครับและขยายสัญญาณคอปเปิลเลอร์

วงจรประมวลเบอร์ LM733 นี้เป็นวงจรขยายสัญญาณความถี่สูงสามารถนำมาใช้งานได้โดยต่อร่วมกับอุปกรณ์ภายนอก และอัตราการขยายแรงดันขึ้นอยู่กับการต่อวงจรใช้งาน⁽²⁵⁾ ซึ่งในที่นี้ประมาณ 30 dB ต่อหนึ่งตัว วงจรขยายสัญญาณคอปเปิลเลอร์ที่ใช้จึงต้องใช้ถึง 3 ตัวต่อกันจึงจะได้อัตราการขยายตามต้องการ วงจรที่ใช้แต่ละชุดจะคล้ายกันดังรูปที่

3.6.2



ภาคขยายชุดที่ 1 และชุดที่ 3

ภาคขยายชุดที่ 2

รูปที่ 3.6.2 แสดงวงจรขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ชุดที่ 1, 2 และ 3

จากรูปที่ 3.6.2 ค่าความต้านทาน R_1 , R_2 , R_3 และ R_4 ใช้เป็นตัวลดแรงเคลื่อนจากแหล่งจ่าย ± 12 โวลต์ให้เหลือ ± 6 โวลต์ ค่าความต้านทานหาได้จากสูตร

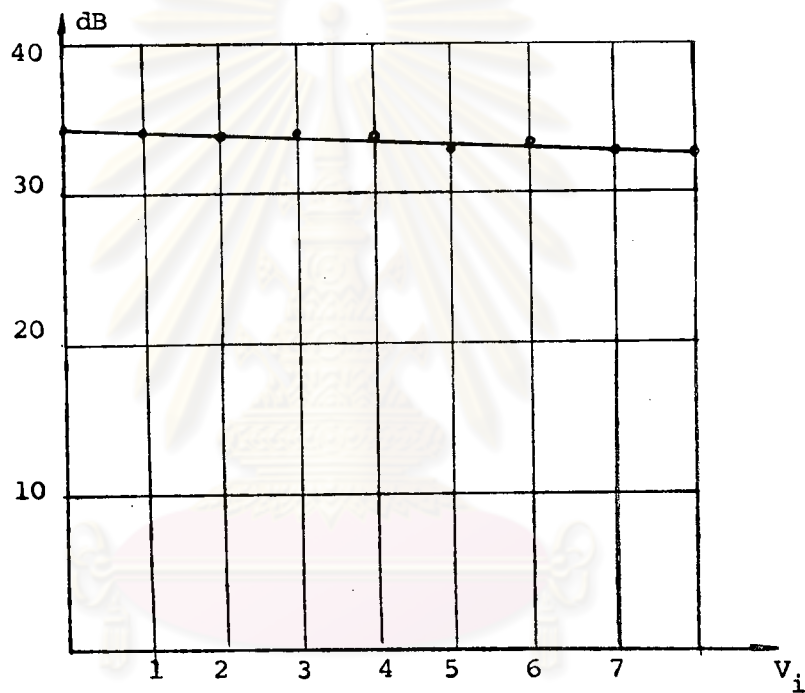
$$R_1, R_2, R_3, R_4 = \frac{12-6}{I} \quad \Omega \dots \dots \dots (3.6.1)$$

จากคู่มือการใช้งานของวงจรประมวล $I = 18 \text{ mA}$

$$R_1 = \frac{6V}{18mA} = 333 \Omega$$

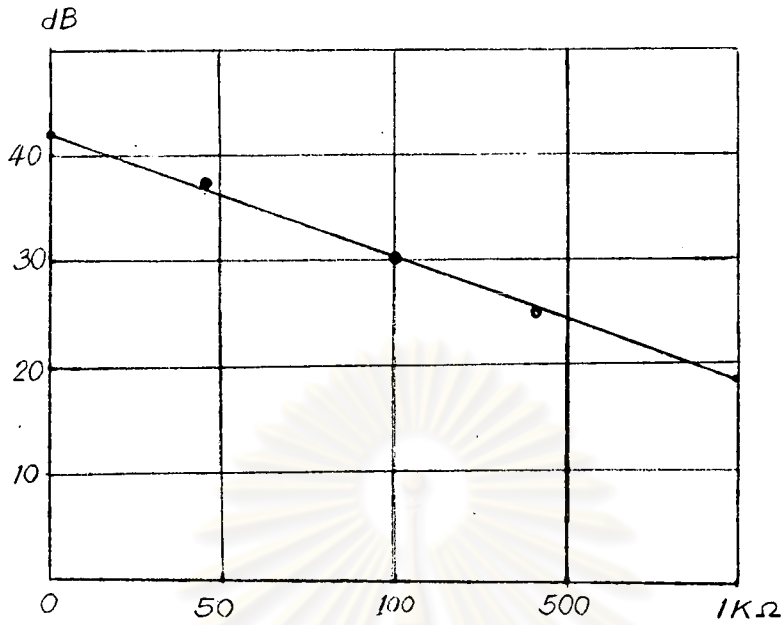
เลือกค่าความต้านทาน R_1, R_2, R_3 และ R_4 ให้ได้ตามค่ามาตรฐานคือ 330 โอห์ม ซีเนอร์ไดโอด D_1-D_4 ต่ออยู่กับขา $V+$ และ $V-$ ของวงจรประมวลเพื่อใช้รักษาระดับแรงดันให้คงที่ ค่าเบรคความไวลงเตจที่ใช้มีค่าเท่ากับ 6 โวลท์ ตัวเก็บประจุ C_1, C_2, C_3 และ C_4 ต่อคร่อมอยู่ระหว่างขา $V+$ และ $V-$ ของวงจรประมวลกับดิน เพื่อช่วยรักษาระดับแรงดันของแหล่งจ่าย และใช้ลดคลื่นความถี่สูงจากวงจรขยายที่ขา $V+$ และ $V-$ มิให้ไปรบกวนกับวงจรอื่นที่ใช้ไฟร่วมอยู่ มีค่า $.22\mu F$ วงจรขยายชุดที่ 1 นำไปทดลองวัดอัตราการขยายแรงดัน ซึ่งได้ประมาณ 33

เดซิเบล ผลของการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6.3



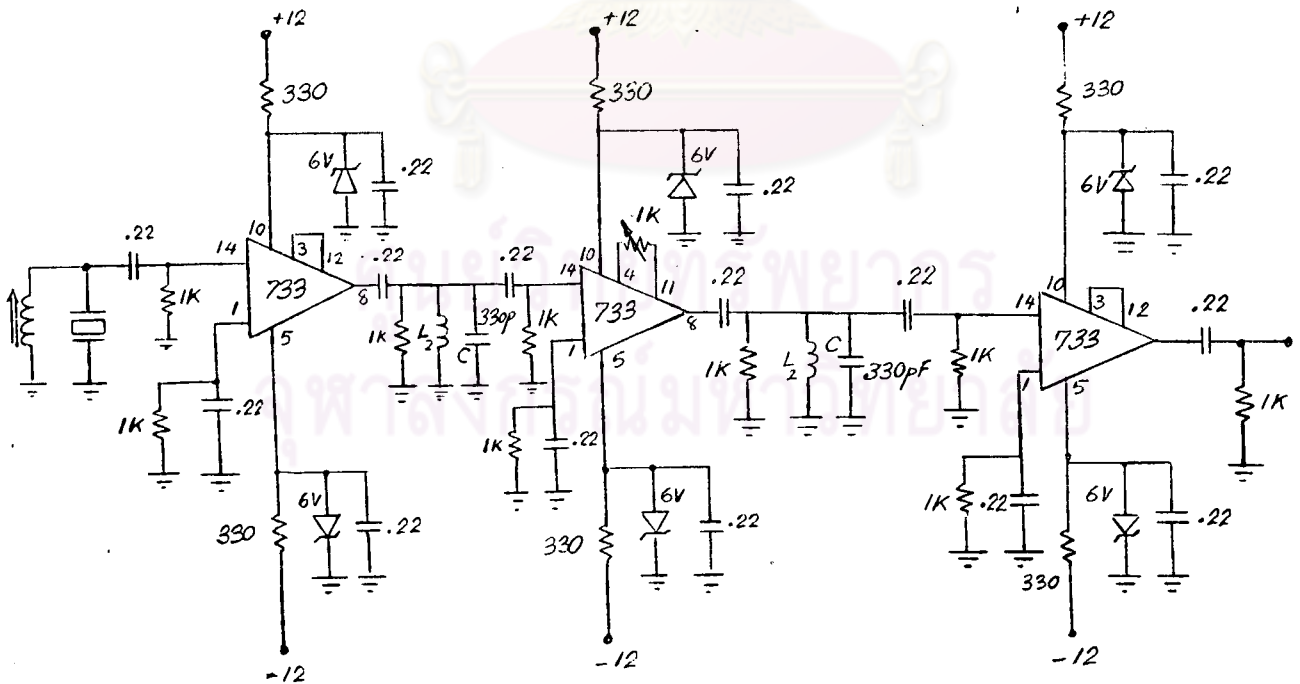
รูปที่ 3.6.3 กราฟแสดงอัตราการขยายแรงดันของวงจรขยายชุดที่ 1 และ 3

และจากวงจรขยายชุดที่ 2 อัตราการขยายของชุดนี้สามารถปรับได้โดยการปรับค่าความต้านทาน R_5 ที่ต่ออยู่ระหว่างขา 4 กับขา 11 ค่า R_5 ที่ใช้มีค่า 1 กิโลโอห์ม อัตราการขยายสามารถปรับได้จากประมาณ 20 ถึง 44 เดซิเบล ผลของการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6.4



รูปที่ 3.6.4 กราฟแสดงอัตราการขยายแรงดันของวงจรขยายชุดที่ 2

เมื่อนำเอาวงจรขยายทั้ง 3 ชุดมาต่อรวมกันจะทำให้อัตราการขยายแรงดันเป็นประมาณ 80 ถึง 100 ดีบี การต่อวงจรทั้งสามชุดเข้าด้วยกันจะมีวงจรดังแสดงในรูปที่ 3.6.5



รูปที่ 3.6.5 แสดงวงจรสมบูรณ์ของภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์

จากรูปที่ 3.6.5 จะมีวงจรจูน L_2C ต่อระหว่างภาคขยายของแต่ละชุด เพื่อใช้จูนเลือกความถี่ที่ต้องการ ค่า L_2 และ C หาได้จากสมการ

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \dots \dots \dots (3.6.2)$$

เลือกใช้ค่า $C = 330 \text{ pF}$ ความถี่ที่ต้องการ 4.19 MHz

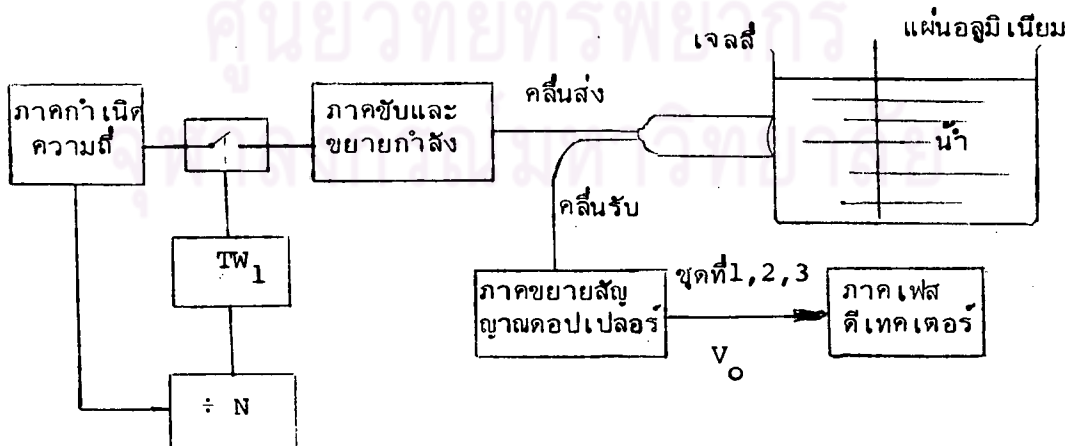
ดังนั้นค่า $L_1 = \frac{1}{4 \pi^2 f_r^2 C}$
 $= \frac{1}{4 \times (3.14)^2 (4.19)^2 \times 330 \times 10^{-12}}$

$L_1 = 4.3 \text{ } \mu\text{H}$ (L_1 ที่ใช้สามารถปรับค่าได้จาก 2-6 μH)

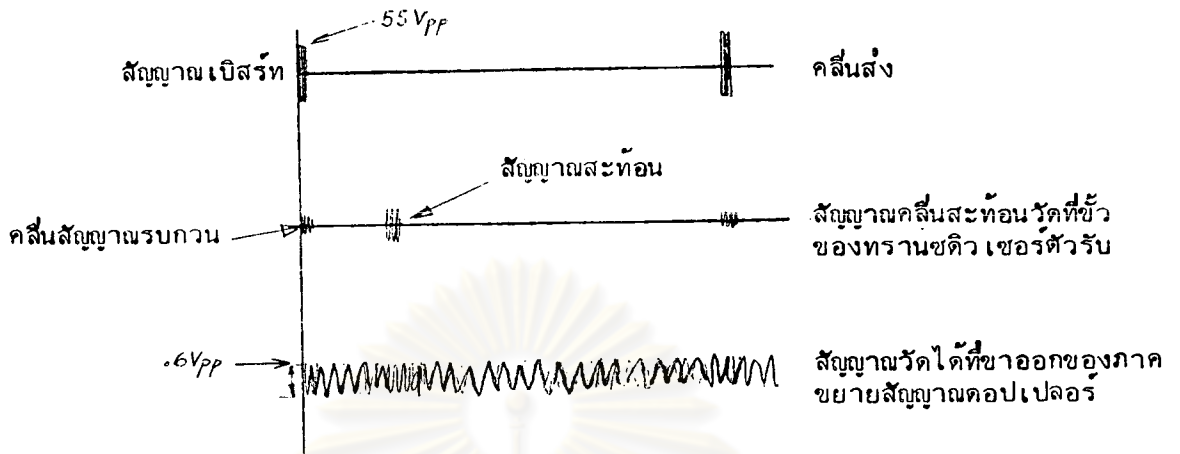
สัญญาณขาออกที่วัดได้จากวงจรรูป 3.6.5 จะอยู่ในลักษณะอิมพัลส์ และเมื่อนำไปป้อนให้กับภาคเฟสดีเทคเตอร์แล้ววัดค่าแรงดันได้ประมาณ 0.6 โวลท์

3.6.2 การทดลองและผลที่ได้จากการนำภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ไปใช้งาน

ภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ที่สร้างประกอบขึ้นเมื่อนำไปใช้งาน ทางด้านขาเข้าจะต่อกับทรานซิวเวอร์ตัวรับ ส่วนทางด้านขาออกจะต่อไปยังภาคเฟสดีเทคเตอร์ การทดลองนี้เพื่อหาคุณสมบัติของวงจรขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ที่ออกแบบสร้าง ตลอดจนปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในการใช้รับสัญญาณจริง ๆ บล็อกไดอะแกรมของภาคต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6.6 และรูปที่ 3.6.7 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง

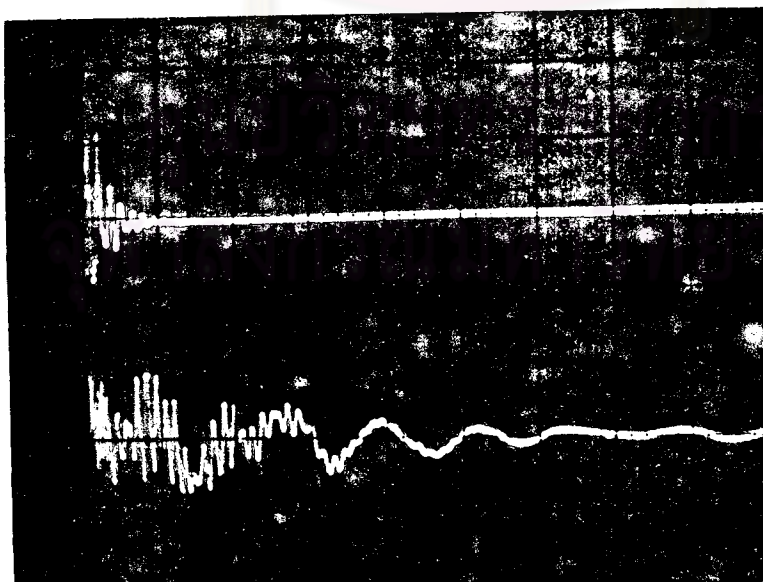


รูปที่ 3.6.6 แสดงบล็อกไดอะแกรมของการทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์



รูปที่ 3.6.7 แสดงรูปคลื่นสัญญาณต่างที่วัดได้จากภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์

จากรูปที่ 3.6.7 ในช่วงเวลาของการส่งคลื่นจะเกิดคลื่นสัญญาณรบกวนจากทรานซิวเซอร์ตัวส่งมายังทรานซิวเซอร์ตัวรับ สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะเป็นแอมป์บิง (DAMPED OSCILLATION) ที่มีแอมพลิจูดสูง และมีช่วงระยะเวลาของการแอมป์หลายไมโครวินาทีดังรูปที่ 3.6.8



สัญญาณ เบิสร์ท

สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นจากการส่งคลื่นมาจกที่ทรานซิวเซอร์ตัวรับ

รูปที่ 3.6.8 ภาพแสดงสัญญาณแอมป์ของคลื่นรับที่เกิดขึ้นที่ทรานซิวเซอร์ตัวรับ

การแก้การแกว่งของสัญญาณทำได้โดยการต่อขดลวดขนานกับวงจรถาเข้าของภาคขยาย สัญญาณคอปเปอเรอร์ ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่นำมาต่อหาได้จากความถี่รีโซแนนซ์ของทรานซิวเซอร์ ค่าความจุของตัวทรานซิวเซอร์ที่ใช้ซึ่งจากการวัดด้วยเครื่อง "อิมพีแดนซ์มิเตอร์" เท่ากับ 1.083 นาโนฟารัด ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำของขดลวดที่ใช้ หาได้จากสูตร

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C} \dots \dots (3.6.3)$$

$$= \frac{1}{4 \times 3.14 \times 3.14 \times 4.19 \times 4.19 \times 10^6 \times 1.083 \times 10^{-9}} \quad H$$

ดังนั้นค่าความเหนี่ยวนำที่ใช้ = 1.33 ไมโครเฮนรี่

เมื่อนำขดลวดความเหนี่ยวนำไปต่อจะทำให้สัญญาณที่เกิดการแกว่งลดน้อยลงคงเหลือแต่คลื่นรบกวนที่เกิดจากการส่งเท่านั้น ซึ่งก็น้อยลงกว่าเดิมมาก รูปคลื่นที่วัดหลังจากการใส่ขดลวดความเหนี่ยวนำขนานกับวงจรถาเข้าแล้วแสดงในรูปที่ 3.6.9

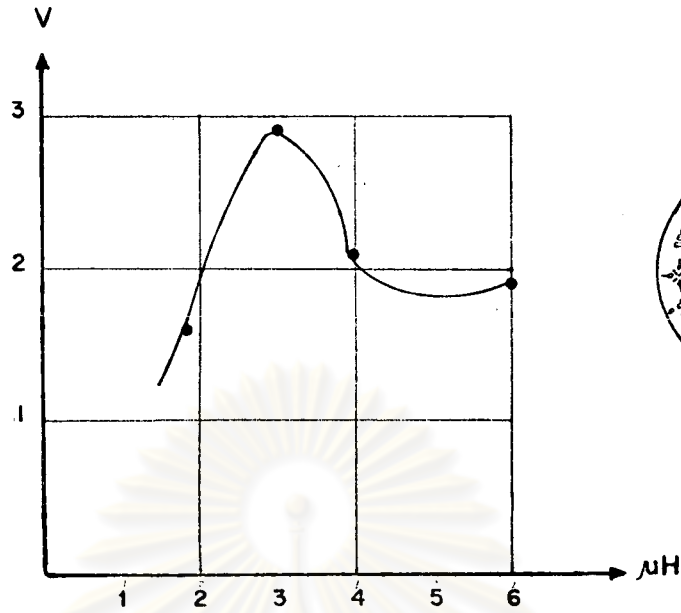


สัญญาณ เบิสรท์

สัญญาณรบกวนหลังจากใส่ขดลวดตัวนำ

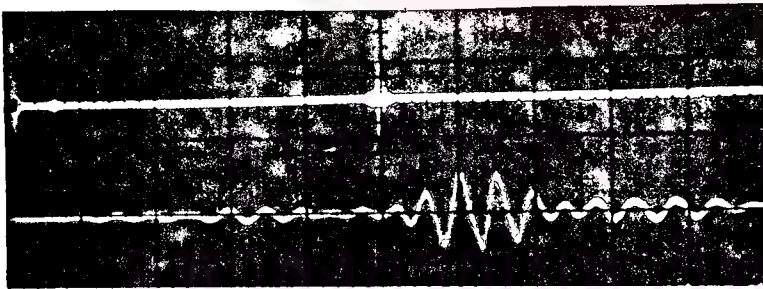
รูปที่ 3.6.9 แสดงรูปคลื่นของสัญญาณที่วัดได้หลังจากการต่อขดลวดความเหนี่ยวนำขนานกับวงจรถาเข้าของภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์

จากการปรับค่า L ที่ต่อคร่อมที่ขั้วทรานซิวเซอร์และวัดค่าแอมพลิจูดของคลื่นสะท้อนที่รับได้ปรากฏว่าได้ผลดังรูปที่ 3.6.10



รูปที่ 3.6.10 กราฟแสดงผลของการปรับค่า L กับความแรงของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่ได้รับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับ

จากการทดสอบและใช้งานของภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ปรากฏว่าสามารถนำไปใช้งานได้ดี ภาพตัวอย่างของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่ถ่ายจากจอเครื่องออสซิลโลสโคปดังแสดงในรูปที่ 3.6.11



สัญญาณคลื่นสะท้อน
200mV/div 10 μs /div

การขยายของสัญญาณคลื่นสะท้อน
200mV/div .5 μs /div

รูปที่ 3.6.11 ภาพถ่ายของสัญญาณคลื่นสะท้อนที่ได้จากเครื่องออสซิลโลสโคป

สัญญาณคอปเปอเรอร์ที่สะท้อนกลับมาจะถูกส่งด้วยเวลา t^* ทุก ๆ T ไมโครวินาที ในทางปฏิบัติค่า t^* จะน้อยกว่า T มาก และค่า T ที่ใช้ในการส่งคลื่นจะต้องมากกว่าเวลาที่เวลาของคลื่นที่ใช้เดินทางทั้งไปและกลับจากทรานซิวเซอร์ถึงหลอดเล็ดที่วัด

ถ้าโมเลกุลของเลือดที่เคลื่อนที่ในหลอดเล็ดที่ระยะทาง $x = x^*$ คลื่นสัญญาณคอปเปอเรอร์ที่สะท้อนกลับมาและรับได้โดยทรานซิวเซอร์ตัวรับสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการ (3.6.4)²⁰

$$R_s(t^*) = AB(x^*)k \left[u\left(t^* - \frac{2x^*}{c}\right) - u\left(t^* - T - \frac{2x^*}{c}\right) \right] x \sin \left[2\pi f\left(t^* - \frac{2x^*}{c}\right) + \psi \right]$$

เมื่อ $B(x^*)$ = เป็นการสูญเสียที่เกิดขึ้นตลอดระยะทาง x^* ทั้งไปและกลับ

k = สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับ

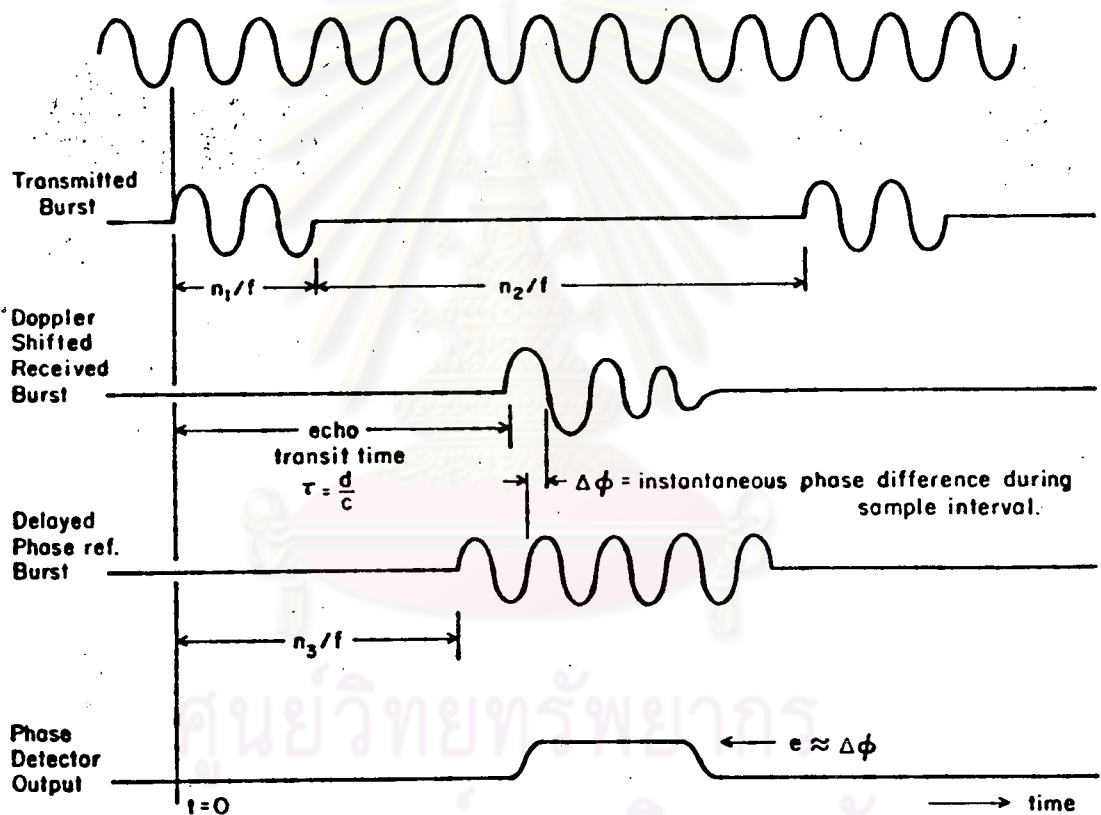
ψ = เฟสของสัญญาณคอปเปอเรอร์ที่ shift ไป

ศูนย์วิทยุทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.7 ภาคเฟสดีเทคเตอร์

สัญญาณคอปเปอเรอร์ที่เกิดจากสะท้อนของ เลือดที่ไหลในหลอดเลือดหลังจากที่ขยายโดย ภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์แล้ว จะนำมาเปรียบเทียบความต่างเฟสกับสัญญาณอ้างอิงเฟสที่ได้ จากภาคกำเนิดความถี่หลักโดยวงจรเฟสดีเทคเตอร์ รูปคลื่นของสัญญาณทั้งสองและสัญญาณขาออก ที่ได้จากวงจรเฟสดีเทคเตอร์ ดังรูปที่ 3.7.1

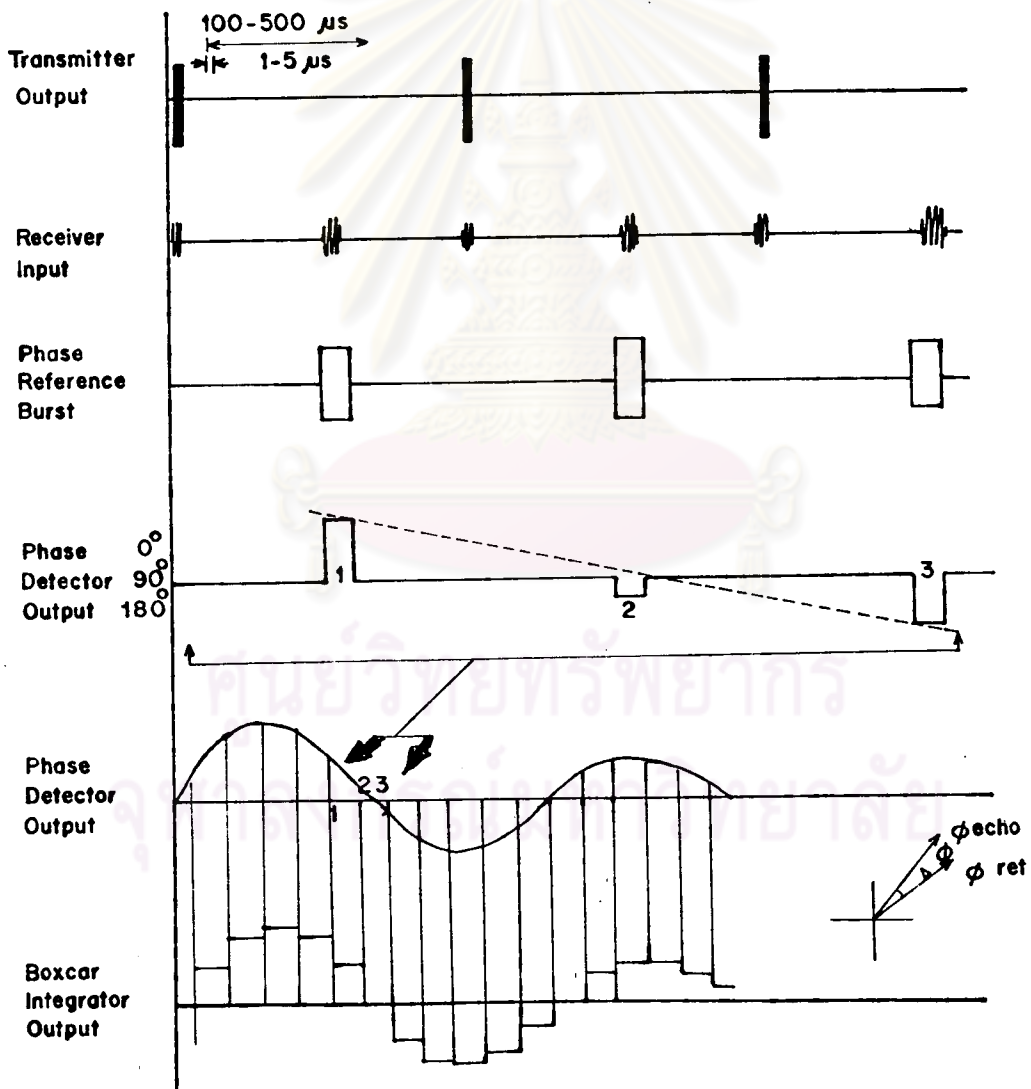
Master Oscillator



รูปที่ 3.7.1 แสดงสัญญาณที่จำเป็นของ เครื่องอัลตราซาวด์พัลส์คอปเปอเรอร์ที่วงจรเฟส ดีเทคเตอร์ตรวจจับความต่างเฟสของสัญญาณคอปเปอเรอร์กับสัญญาณอ้างอิง

ความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองจะเกิดขึ้นเพียงชั่วขณะตามการล่งคลื่นสัญญาณเบิรท์
แต่ละครั้ง ถ้าความถี่ PRF ที่ใช้มีค่าน้อยเป็นสองเท่าของความถี่ต่อเพลอร์ที่คาดว่าจะวัด
ได้แล้ว จะทำให้ความต่างเฟสของสัญญาณทั้งสองที่เกิดขึ้นชั่วขณะ เป็นสคงช่นนารีฟังก์ชัน
(nontime varying)⁽¹⁶⁾

ถ้าสัญญาณต่อเพลอร์ที่สะท้อนกลับจากการไหลของเลือดที่วัดเป็นส่วนประกอบของความ
ต่างเฟสหลาย ๆ ค่า แอมพลิจูดของสัญญาณขาออกของวงจรเฟลติเทคเตอร์ที่ได้หลาย ๆ ค่า จะ
เปลี่ยนตามไปโดยสัมพันธ์กัน การลุ่มตัวอย่างสัญญาณขาออกของวงจรเฟลติเทคเตอร์แต่ละจุดเช่น
1, 2, 3 จะเป็น



รูปที่ 3.7.2

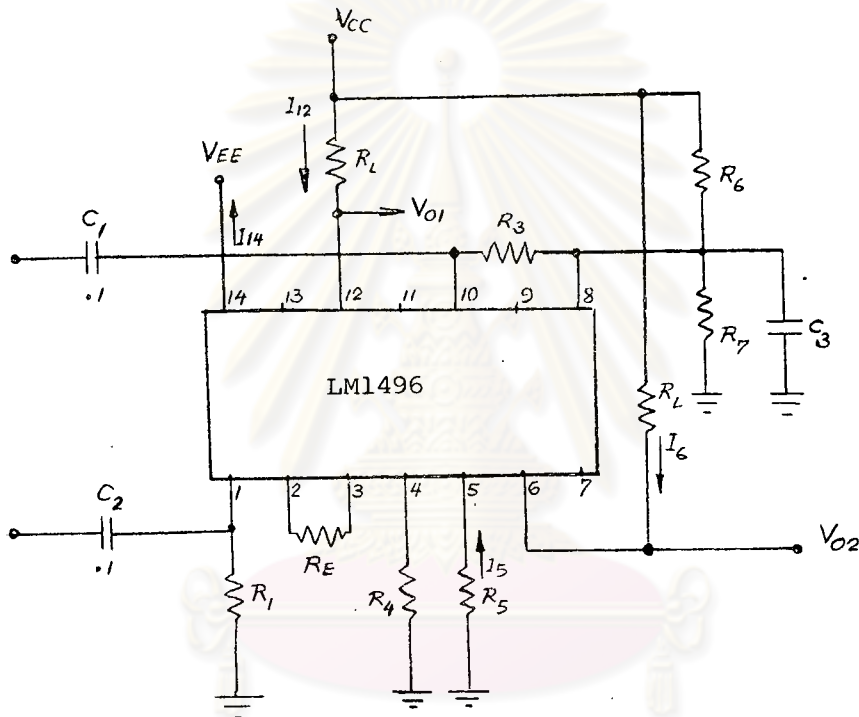
แสดงขบวนการ เกิดสัญญาณ

ดังแสดงในรูปที่ 3.7.2 นั่นคือ ค่ายอดของสัญญาณแต่ละจุดถ้าต่อกันโดยการลุ่มและรักษาระดับแล้ว จะได้ envelope ของสัญญาณซึ่งเป็นปฏิภาคกับความถี่คอปเปลอร์นั่นเอง

3.7.1 การออกแบบวงจรเฟลสตีเทคเตอร์

จากคู่มือการใช้งานของโมโตโรล่าไอซีเบอร์ LM1496⁽²⁶⁾ ซึ่งเป็นมอดคูเลเตอร์และดีมอดคูเลเตอร์สามารถนำมาประยุกต์ใช้เป็นวงจรเฟลสตีเทคเตอร์ที่ต้องการได้ ดังแสดงในรูปที่

3.7.3



รูปที่ 3.7.3 แสดงการต่อวงจรเฟลสตีเทคเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

ข้อกำหนด

แหล่งจ่ายไฟ $V_{CC} = 12 \text{ V}$

$V_{EE} = -12 \text{ V}$

กระแส bias $I_5 = 1 \text{ mA}$

กระแส $I_6 = I_{12} = 1 \text{ mA}$

แรงเคลื่อนที่ขา 6 และ 12 (V_6, V_{12}) = 8 V

$$\text{คำนวณค่า } R_5 = \frac{V_{cc} - \phi - 500 \text{ } \Omega}{I_5} \dots \dots \dots 3.7.1$$

$$\phi = .75 \text{ V}$$

$$R_5 = \frac{12 - .7 - 500}{1 \times 10^{-3}} = 10800 \text{ } \Omega$$

เนื่องจากค่านี้หาได้ยาก จึงใช้ค่า $R_5 = 11 \text{ k}\Omega$ แทน

คำนวณค่า ตัวเก็บประจุ C_1 , C_2 และ C_3

ค่าตัวเก็บประจุที่ใช้ในการคัพปลิ่ง (C_1 , C_2) และใช้ในการบายพาสสัญญาณ (C_3) ควรจะเลือกค่าที่เหมาะสมคือ ควรให้มีค่าของรีแอกแตนซ์น้อยกว่า 5 โอห์ม หรือน้อยกว่า ๗ ความถี่ที่ใช้งาน ซึ่งในที่นี้ใช้ความถี่ประมาณ 4 เมกกะเฮิรตซ์ ดังนั้นค่า C_1 , C_2 และ C_3 สามารถหาได้ดังสมการ 3.7.2

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c} < 5 \text{ } \Omega \dots \dots \dots 3.7.2$$

เลือกใช้ค่าตัวเก็บประจุมีค่า $.1 \text{ } \mu\text{F}$

$$X_c = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 4 \times 10^6 \times .1 \times 10^{-6}} = .4 \text{ } \Omega$$

ดังนั้น C_1 , C_2 , C_3 ใช้ค่า $.1 \mu\text{F}$ ได้

คำนวณค่า R_L จากค่ากระแส $I_6 = I_{12} = 1 \text{ mA}$

$$V_6 = V_{12} = 8 \text{ V}$$

$$\text{ดังนั้น } R_L = \frac{V_{cc} - V_6}{I_6} \dots \dots \dots 3.7.3$$

$$= \frac{12 - 8}{1 \text{ mA}} = 4 \text{ K}\Omega$$

ในทางปฏิบัติค่า $4 \text{ K}\Omega$ หาได้ค่อนข้างยาก จึงใช้ค่า $R_L = 3.9 \text{ K}\Omega$ แทน

คำนวณค่า R_6 , R_7

ความต้านทาน R_1 และ R_2 ต่อกันเป็นวงจรแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่าย V_{cc} ต่อ R_1 , R_2 ขึ้นอยู่กับแรงดันที่ต้องการใช้ (V_8) ในที่นี้ใช้ 6 โวลต์ ดังนั้นค่า R_1 และ R_2

หาได้จากสมการ
$$V_8/R_2 = V_{CC}/R_1 + R_2 \quad \dots \dots (3.7.4)$$

ในที่นี้ $V_{CC} = 12 \text{ V}$, $V_8 = 6 \text{ V}$ ดังนั้น $R_1 = R_2$ เลือกใช้ค่า $R_1=R_2=1\text{K}\Omega$ และค่า R_1 , R_3 และ R_4 ก็เลือกเท่ากับ $1\text{K}\Omega$ เช่นกัน

ระดับสูงสุดของสัญญาณขาเข้า

การกำหนดค่า R_E ของวงจร เป็นตัวที่จะทำให้การทำงานที่ลิเนียร์ของวงจร การเลือกค่า R_E ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันขาเข้าสูงสุด ซึ่งประมาณได้จากสมการ 3.7.5

$$V_{in} = I_5 R_E \quad \text{โวลต์สูงสุด} \quad \dots \dots (3.7.5)$$

ถ้าใช้ $R_E = 1 \text{ K}\Omega$

$$V_{in} = 1 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^3 = 1 \text{ V}_{peak}$$

ซึ่งค่าสัญญาณเข้าจริง ๆ ที่นำมาป้อนให้วงจรน้อยกว่า 1 V_{pp} มาก จึงสามารถใช้ค่า $1 \text{ K}\Omega$ โห้หมได้

ค่ากำลังงานที่เกิดขึ้นในตัววงจรประมวล

$$P_D = \text{ผลรวมของผลคูณของแรงดันกับกระแสในส่วนต่างๆ} \dots (3.7.6)$$

$$= 2I_5(V_6, V_{12}) + I_5(V_5, V_{EE})$$

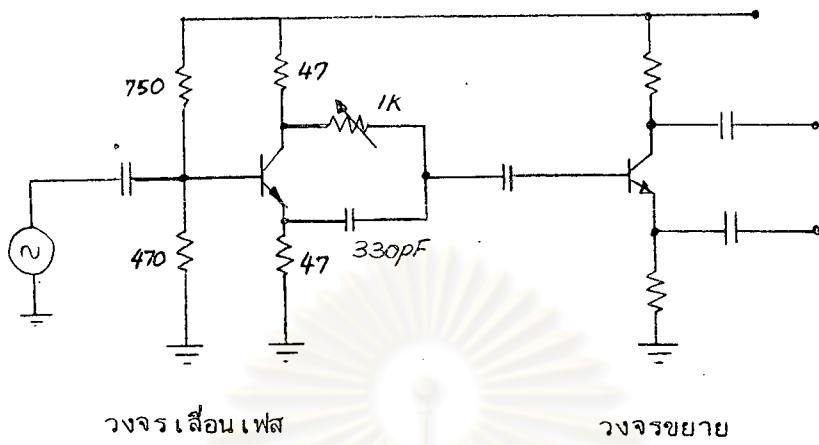
$$\text{กำลังงานที่เกิดขึ้นในตัววงจรประมวล} = 2 \times 10^{-3} (8) + 10^{-3} (12 - 7) \approx 27 \text{ mw}$$

จากตารางคุณสมบัติค่ากำลังงานที่เกิดขึ้นในตัววงจรประมวลคือ 575 mW ซึ่งมากกว่าที่ใช้งานนี้มาก จึงนับว่าวงจรที่ออกแบบนี้สามารถนำไปใช้งานได้โดยไม่เกิดการเสียหาย

3.7.2 การทดสอบคุณสมบัติของวงจร

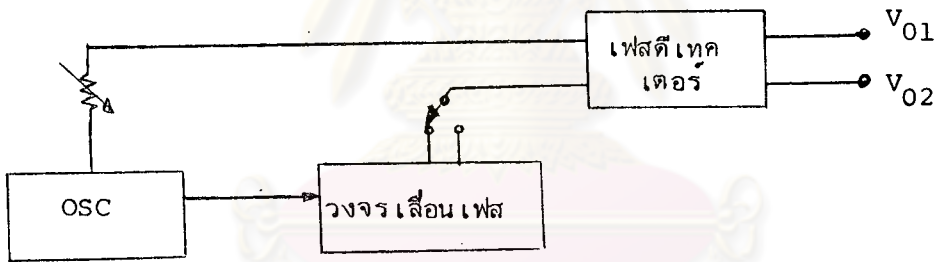
จากวงจรที่ออกแบบทดลองในแผงทดลองและวัดแรงดันที่จุดต่าง ๆ ปรากฏว่าได้ใกล้เคียงกับที่คำนวณ การทดสอบคุณสมบัติของการเปรียบเทียบเฟสจะทำได้จะต้องมีวงจรเลื่อนเฟส

ซึ่งวงจรเลื่อนเฟสที่ใช้ดังแสดงในรูปที่ 3.7.4



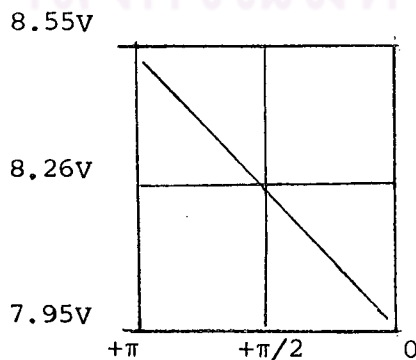
รูปที่ 3.7.4 แสดงวงจรเลื่อนเฟสและวงจรขยายที่ใช้ในการทดสอบวงจรเฟลตีเทคเตอร์

จากนั้นต่อวงจรเฟลตีเทคเตอร์และวงจรเลื่อนเฟสดังบล็อกไดอะแกรม 3.7.5

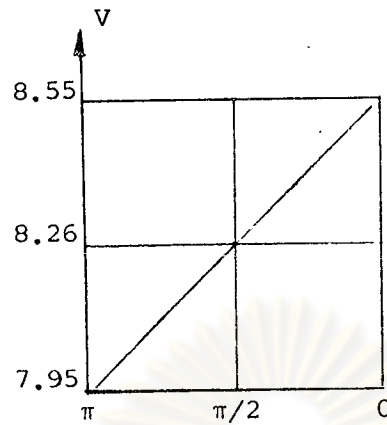


รูปที่ 3.7.5 แสดงการต่อวงจรเพื่อทดสอบเฟลตีเทคเตอร์

ผลการทดลองได้คุณสมบัติ ดังกราฟรูปที่ 3.7.6 และ 3.7.7



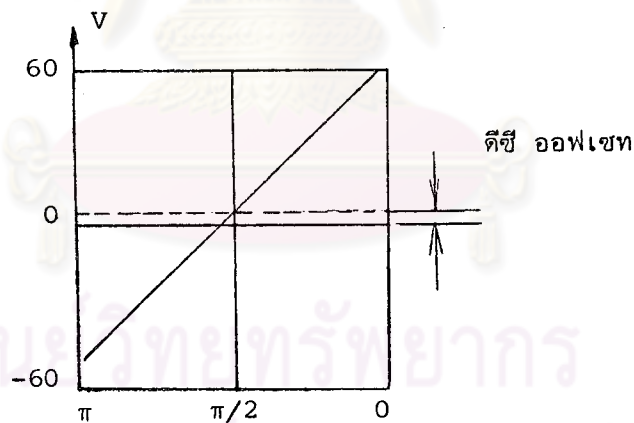
รูปที่ 3.7.6 แสดงความสัมพันธ์ของเฟสกับแรงดันขาออกซึ่งวัดที่ขา 6 (V_{01})



รูปที่ 3.7.7 แสดงความสัมพันธ์ของ เฟสกับแรงดันขาออกซึ่งวัดที่ขา 12 (V_{O2})

กราฟทั้งสองได้จากการป้อนสัญญาณ V_i เข้าที่ขา 1 และ 10 ของไอซี เท่ากับ 60 mV ทั้งคู่

จากแรงดันขาออกที่วัดคร่อมระหว่างขา 6 กับขา 12 ของวงจรประมวล จะได้กราฟ ดังรูปที่ 3.7.8

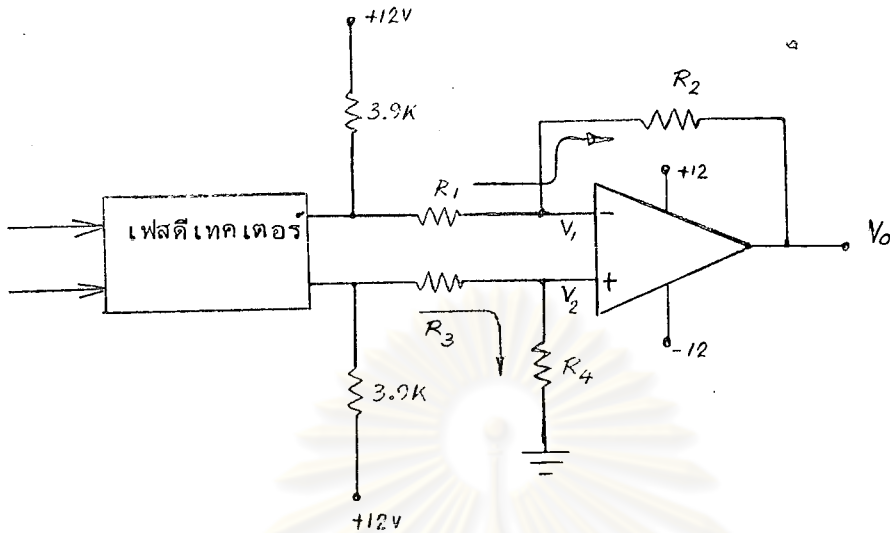


รูปที่ 3.7.8 แสดงความสัมพันธ์ของ เฟสกับแรงดันขาออกซึ่งวัดระหว่างขา 6 กับขา 12 ของวงจรประมวล

3.7.3 การปรับแต่งวงจรเพิ่มเติมให้ทำงานได้ดีขึ้น

จากกราฟรูปที่ 3.7.8 ถ้านำแรงดันที่ได้ (V_{O1} , V_{O2}) ไปต่อเข้ากับวงจรที่ขยายสัญญาณ และสามารถปรับแรงดันดีซีขาออกได้แล้วจะทำให้สะดวกในการใช้งานมากขึ้น ซึ่งวงจร

ตั้งกล่าวดังแสดงในรูป 3.7.9



รูปที่ 3.7.9 แสดงวงจร เฟลตี เทคเตอร์ ต่อกับวงจรขยาย

กำหนดให้ $R_1 = R_3$ และ $R_2 = R_4$

เมื่อ $V_1 = V_2$

กระแสไหลผ่าน R_1 และ R_2 คือ

$$\frac{V_{o1} - V_1}{R_1} = \frac{V_1 - V_o}{R_2} \quad \dots (3.7.7)$$

กระแสไหลผ่าน R_3 และ R_4 คือ

$$\frac{V_{o2} - V_1}{R_3} = \frac{V_1}{R_4} \quad \dots (3.7.8)$$

$$\therefore V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_{o2} - V_{o1}) \quad \dots (3.7.9)$$

เลือกค่า $R_1 = R_3 = 18 \text{ K}\Omega$ และ $R_2 = R_4 = 47 \text{ k}\Omega$

$$\text{จะได้ค่า } V_o = \frac{47}{18} (V_{o2} - V_{o1})$$

$$= 2.6 (V_{o2} - V_{o1})$$

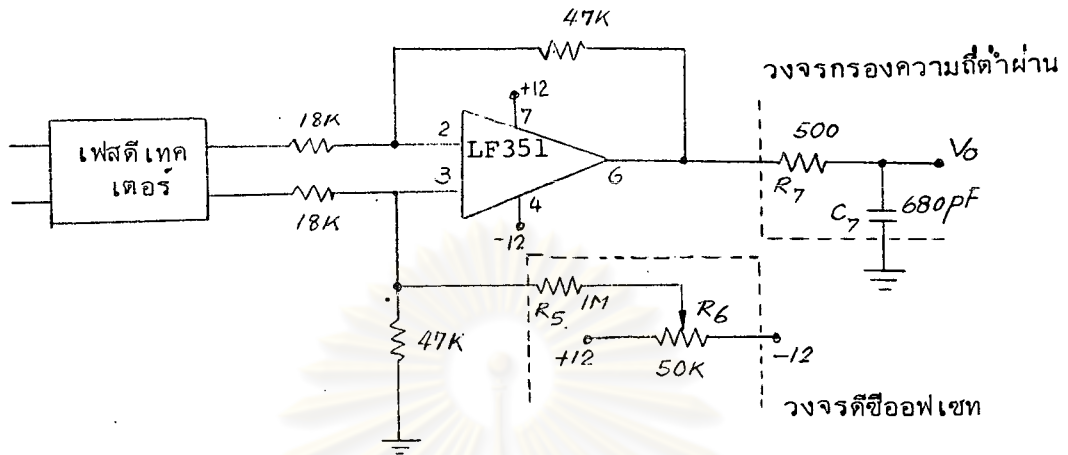
จะเห็นว่า มีอัตราขยายเพิ่มขึ้นอีก 2.6 เท่า

ในทางปฏิบัติ แรงดัน V_1 และ V_2 จะไม่เท่ากันซึ่งจะทำให้ V_o ที่ได้ไม่เป็นศูนย์

ดังนั้น เพื่อแก้ปัญหานี้จึงต้องมีวงจรตีช้อฟเฟตที่ขานอนอินเวรติงของวงจรขยาย ซึ่งจะทำให้

$V_1 = V_2$ และทำให้ $V_o = 0$ เมื่อไม่มีสัญญาณเข้า การต่อวงจรดิซิปอเฟสททำได้ดังรูป

3.7.10



รูปที่ 3.7.10 แสดงวงจรเฟสดีเทคเตอร์และวงจรขยายที่สามารถปรับค่าดิซิปอเฟสทได้

ค่าความต้านทาน R_5 เลือกใช้ค่ามาก ๆ คือ $1 \text{ M}\Omega$ และ R_6 เป็นความต้านทานที่ปรับค่าได้เลือกใช้ค่า $50 \text{ K}\Omega$

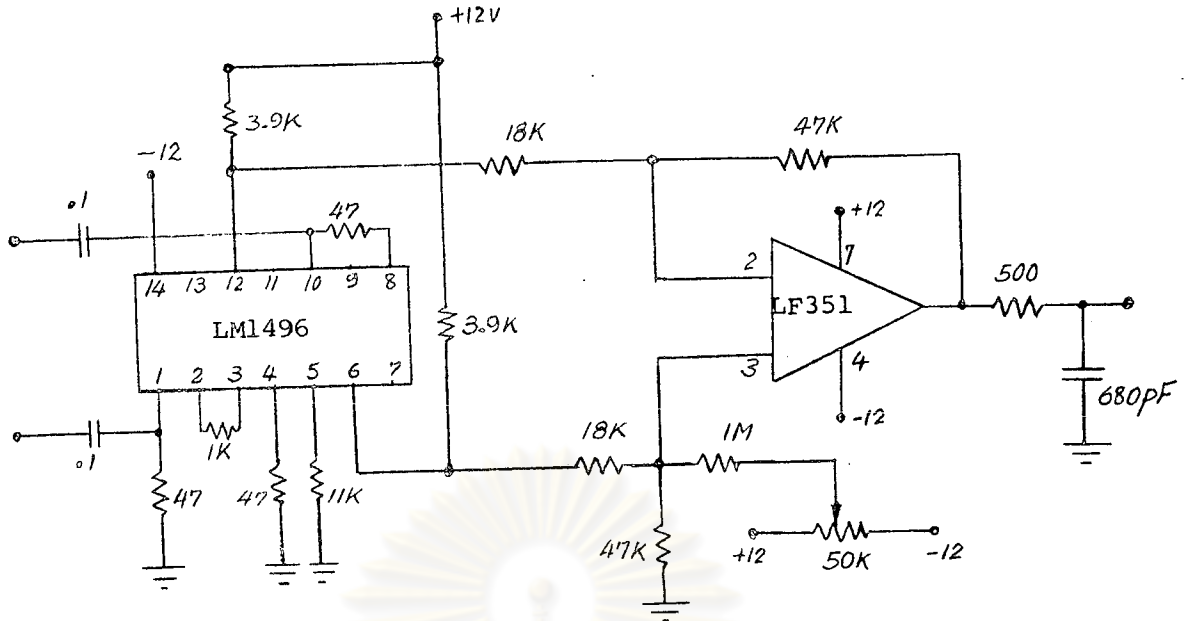
นอกจากวงจรดิซิปอเฟสทแล้วสิ่งที่จำเป็นอีกอย่างหนึ่งก็คือต้องมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต่ออยู่กับเอาต์พุทของวงจรขยาย เพื่อใช้กรองความถี่สูงที่ออกมาให้มีค่าต่ำลง โดยใช้ R_7 C_7 ต่อกันดังรูปที่ 3.7.11 ค่า R_7 และ C_7 ที่ใช้ขึ้นอยู่กับค่าความถี่ที่ต้องการกรองซึ่งในที่นี้มีค่าประมาณ 4.2 MHz จากสมการ

$$1/f = .7R_7C_7 \quad \dots \dots \dots 3.7.10$$

เลือกใช้ค่า $C_7 = 680 \text{ pF}$

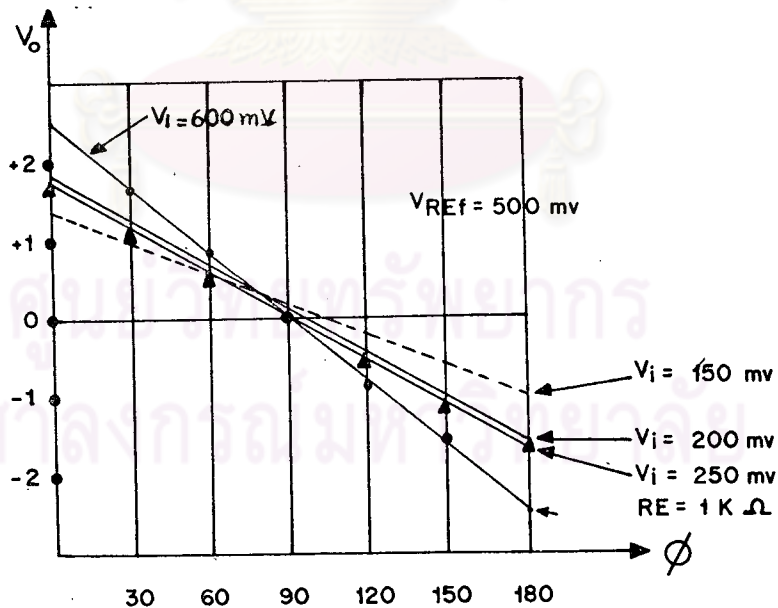
$$R_7 = 1 / (4.2 \times 10^6 \times .7 \times 680 \times 10^{-12}) = 500 \text{ }\Omega$$

จากการออกแบบที่ผ่านมาจะได้วงจรสมบูรณ์ของวงจรเฟสดีเทคเตอร์ดังรูป 3.7.11



รูปที่ 3.7.11 แสดงวงจรสมมุติของ เฟลตี เทคเตอร์ที่ใช้ในงานในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปลอร์

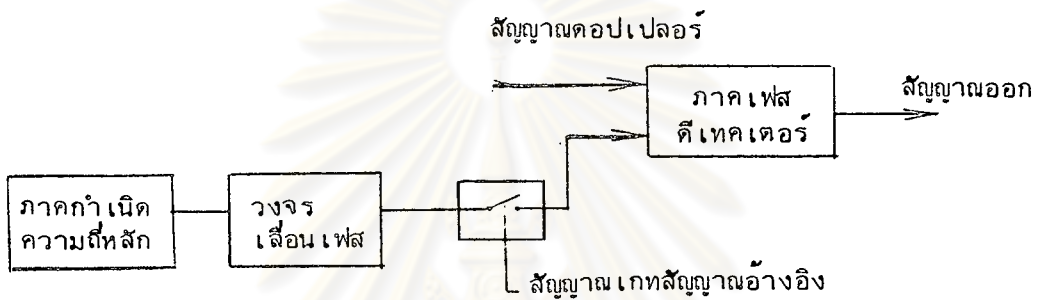
หลังจากที่ได้เพิ่มเติมวงจรบางส่วนของภาคเฟลตี เทคเตอร์แล้ว นำไปทดสอบวัดผลตอบสนองต่อความต่าง เฟลของสัญญาณขาเข้ากับแรงไฟขาออกได้ดังรูปที่ 3.7.12



รูปที่ 3.7.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของความต่างเฟลของสัญญาณขาเข้ากับแรงดันขาออกของวงจรเฟลตี เทคเตอร์ เมื่อแรงดันอ้างอิงมีแอมพลิจูดคงที่เท่ากับ 500 mV

3.7.4 วงจรเลื่อนเฟส

ในการวัดความต่างเฟสระหว่างสัญญาณคอปเปอเรอร์กับสัญญาณอ้างอิงของวงจรเฟสดีเทคเตอร์ บางครั้งจะต้องมีการปรับเฟสของสัญญาณอ้างอิง เพื่อให้ระดับแรงไฟของสัญญาณขาออกเป็นศูนย์ เพื่อให้สะดวกในการอ่านค่าและนอกจากนี้ยังมีประโยชน์โดยไม่ต้องวัดกั่วงวลเกี่ยวกับเรื่องเฟสของสัญญาณที่ล่าช้า เนื่องจากการทำงานของวงจรต่าง ๆ ซึ่งวงจรเลื่อนเฟสนี้จะต่อกันระหว่างภาคกำเนิดความถี่หลักกับวงจรเฟสดีเทคเตอร์ดังรูป 3.7.13

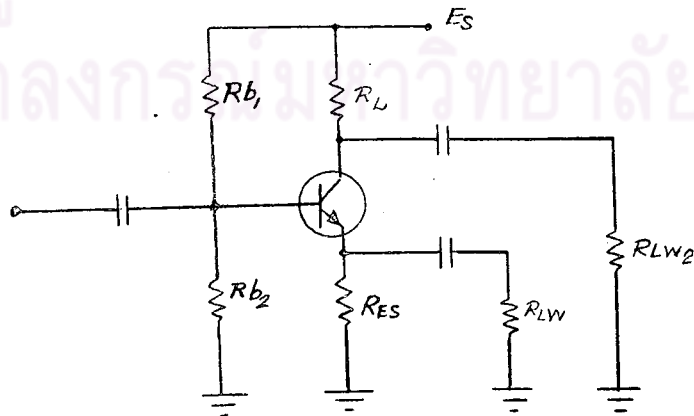


รูปที่ 3.7.13 แสดงการต่อวงจรเลื่อนเฟสกับภาคกำเนิดความถี่หลักและภาคเฟสดีเทคเตอร์

3.7.4.1 การออกแบบวงจรเลื่อนเฟส

วงจรขยายที่ใช้เป็นแบบ split-load (para - phase)⁽²⁷⁾ ซึ่งวงจรนี้จะใช้ค่าของความต้านทานที่ขาอิมิตเตอร์เท่ากับความต้านทานที่ขาคอลเลคเตอร์ และจะใช้เป็นตัวแยกเฟสของสัญญาณขาออกที่ขาทั้งสองให้มีความต่างเฟสกัน 180° วงจรที่ใช้ดังแสดงในรูป

3.7.14



รูปที่ 3.7.14 แสดงวงจร split - load ที่นำมาดัดแปลงเป็นวงจรเลื่อนเฟส

ค่าของโหลดที่ต่อ RLW_1 และ RLW_2 ควรมีค่าใกล้เคียงกันหรือเท่ากัน

เงื่อนไขการทำงานของวงจร

1. $E_{RL} = E_{Res}$
2. $RL = Res$
3. $E_{RL} (MIN) = .5E_{op-p}$
4. $E_o (MIN) = 1+E_{op-p}$
5. $K = 1-5$ ซึ่ง $R_L = K \times R_{LW}$
6. $S = 10$

ค่าพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์

1. $\beta = 100$
2. $I_C (max) = 100 \text{ mA}$
3. $E_C (max) = 25 \text{ V}$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจร

1. Stability factor = 10
2. $RL = 47\Omega$
3. $E_o \text{ p-p} = 1.5 \text{ V}$
4. Input impedance = 25 k Ω หรือมากกว่า

การออกแบบวงจรทางด้านขาคอลเลคเตอร์

$$\begin{aligned} \text{เลือกใช้ค่า } K = 1 \quad \therefore R_L &= K \times RLW \\ &= 1 \times 47\Omega = 47\Omega \end{aligned}$$

$$\text{คำนวณค่า } Res \quad Res = R_E = 47\Omega$$

$$\begin{aligned} \text{คำนวณค่า } E_{RL} (MIN) \quad E_{RL} (MIN) &= .5 E_{op-p} \\ &= .5 \times 1.5 = .75 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\text{คำนวณค่า } E_{Res} (MIN) \quad E_{Res} (MIN) = E_{RL} = .75 \text{ V}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่านวณค่า } E_Q(\text{MIN}) \quad E_Q(\text{MIN}) &= 1 + E_{op-p} \\ &= 1 + 1.5 \\ &= 2.5 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่านวณค่า } E_{S(\text{MIN})} \quad E_{S(\text{MIN})} &= E_{Res} + E_{RL} + E_Q \\ &= .75 + .75 + 2.5 \\ &= 4 \text{ V} \end{aligned}$$

ในทางปฏิบัติ E_S มากกว่า $E_{S(\text{MIN})}$ แรงไฟจากแหล่งจ่ายใช้ +6 โวลต์ กับ วงจรนี้

ซึ่งจะเห็นว่าแต่ละค่าของแรงดันที่ได้มากกว่าแรงดันที่ค่านวณ

การออกแบบวงจรทางด้านขาเบส

$$\begin{aligned} \text{ค่านวณค่า } QI_C &= \frac{E_{RL}}{R_L} \\ &= \frac{.75}{47\Omega} = 15.9 \text{ mA} \end{aligned}$$

จากวงจรรูปที่ 3.7.14 เห็นว่าคล้ายกับวงจร current-mode common emitter ซึ่งมีการ ออกแบบวงจรไบแอส ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ค่านวณค่า } R_{b_2} \quad R_{b_2} &= S \times R_{es} \\ &= 10 \times 47 \\ &= 470 \Omega \end{aligned}$$

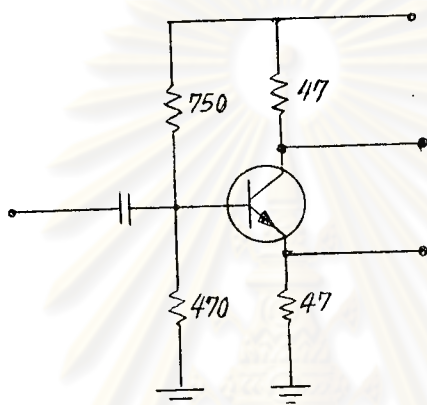
$$\begin{aligned} \text{ค่านวณค่า } R_{int} \quad R_{int} &= R_{b_2} // \beta R_{es} \\ &= \frac{470 \times 100 \times 47}{470 + 100 \times 47} \\ R_{int} &= 427 \Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ค่านวณค่า } E_{R_{b_1}} \quad E_{R_{b_1}} &= E_Q + E_{RL} - V_j \\ &= 2.5 + .75 - .7 \\ E_{R_{b_1}} &= 2.55 \text{ V} \end{aligned}$$

คำนวณค่า R_{b1}

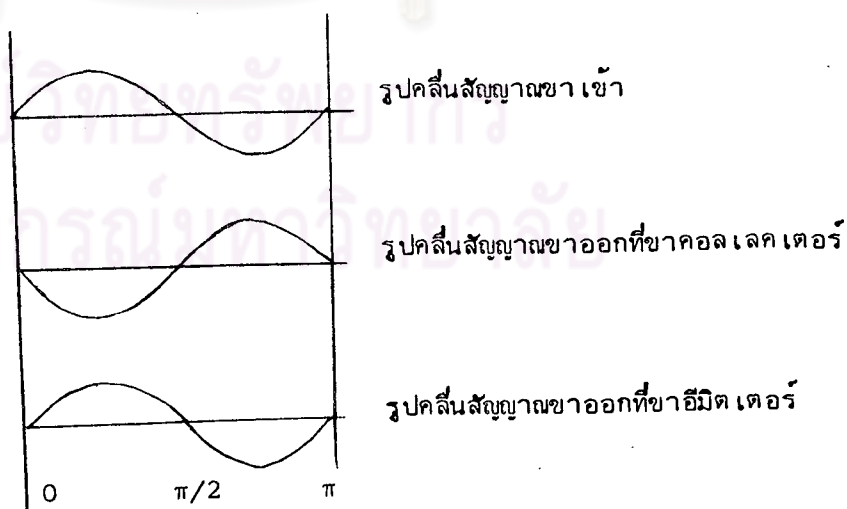
$$\begin{aligned} R_{b1} &= \frac{E R_{b1} \times R_{int}}{E_{Res} + V_j} \\ &= \frac{2.55 \times 427}{.75 + .7} \\ &= 750 \text{ } \Omega \end{aligned}$$

วงจรสมมูลที่ออกแบบแล้วดังแสดงในรูป 3.7.15



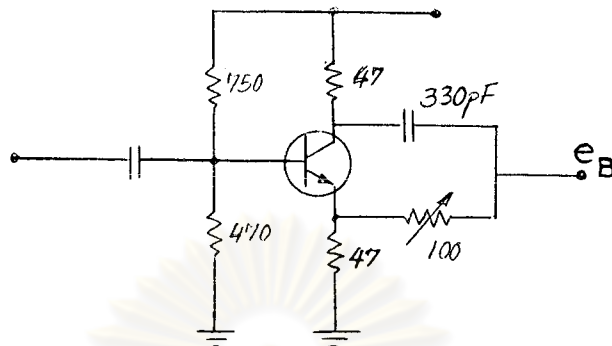
รูปที่ 3.7.15 แสดงวงจรแยก เฟสของ สัญญาณที่ออกแบบ

จากวงจรรูปที่ 3.7.15 รูปคลื่นของสัญญาณขาออกที่ขาคอล เลคเตอร์และขาอีมีตเตอร์ จะต่างเฟสกัน 180 องศา และมีแอมพลิจูดเท่ากันดังรูป 3.7.16



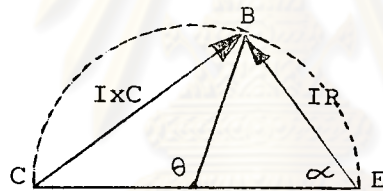
รูปที่ 3.7.16 แสดงรูปคลื่นสัญญาณขาเข้าและขาออกตามจุดต่าง ๆ

จากรูปสัญญาณที่ได้สามารถดัดแปลงเป็นวงจรเลื่อนเฟสโดยใช้ตัวเก็บประจุ และความต้านทานที่ปรับค่าได้ ดังรูปที่ 3.7.17



รูปที่ 3.7.17 แสดงวงจรเลื่อนเฟสที่ออกแบบสำหรับใช้

รูปคลื่นสัญญาณที่จุด e_B สามารถปรับค่าได้เป็นมุม θ โดยปรับค่าความต้านทาน R ดังแสดงในรูป 3.7.18



รูปที่ 3.7.18 แสดงค่ามุมของสัญญาณขาออก θ ที่ปรับได้

จากรูป Δ CBE ที่อยู่ภายในเครื่องวงจรสามารถหาค่าของมุม θ ได้ดังสมการ (3.7.12)

$$Z_1 = I_x c$$

$$Z_2 = I R$$

$$\theta + (180 - 2\alpha) = 180^\circ$$

$$\theta = 2\alpha = 2 \tan^{-1} \frac{Z_2}{Z_1}$$

$$\theta = 2 \tan^{-1} WCR \dots (3.7.12)$$

เฟสที่ต้องการเลื่อนคือ 90° ดังนั้น จะได้

$$90 = 2 \tan^{-1} WCR$$

$$WCR = \tan 45^\circ = 1$$

เลือกใช้ค่า $C = 330 \text{ pF}$ ความถี่ที่ใช้สำหรับเลื่อนเฟสเท่ากับ 4.19 เมกกะ
 เฮิรตซ์ ความต้านทานหาได้คือ

$$R = \frac{1}{\omega C}$$

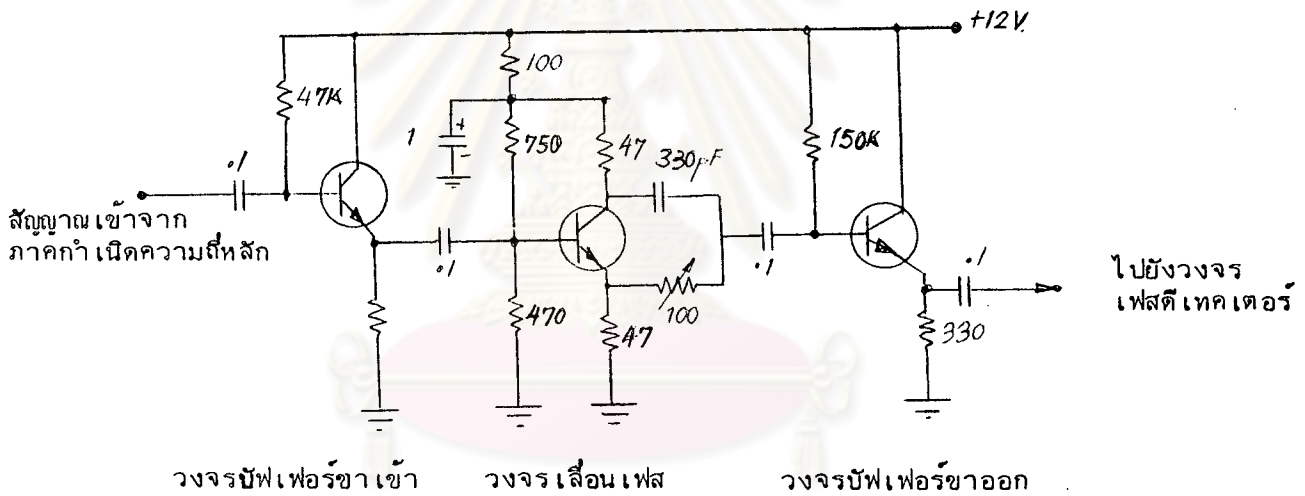
$$= \frac{1}{2\pi \times 4.19 \times 10^6 \times 330 \times 10^{-12}}$$

โอห์ม

ความต้านทาน $R = 74.5$ โอห์ม

ดังนั้นความต้านทาน R ปรับค่าที่เลือกใช้ควรมากกว่า 74 โอห์ม คือใช้ 100 โอห์ม
 ซึ่งสามารถปรับมุม θ ให้เลื่อนได้จาก 0 ถึง 106 องศา

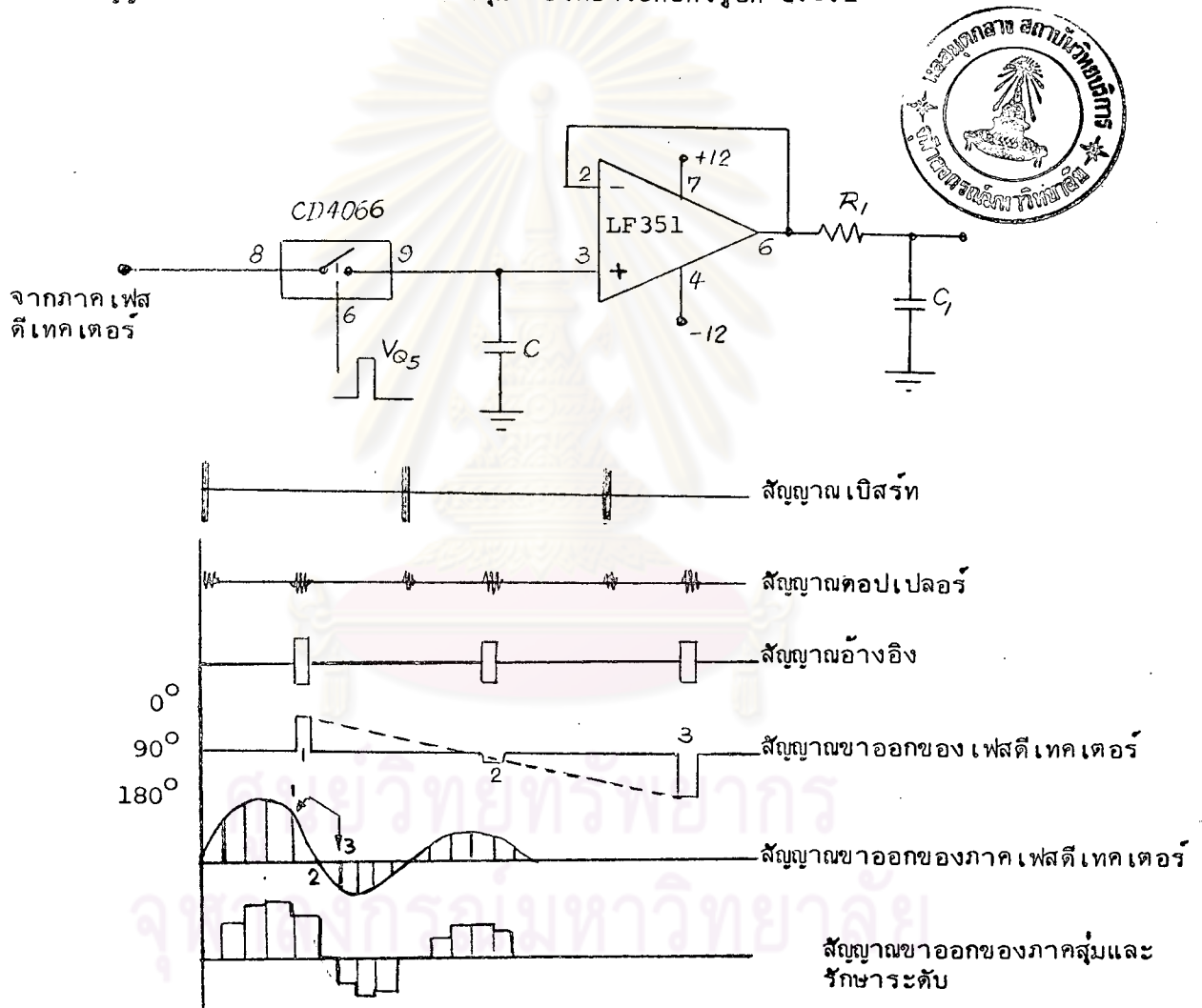
และเพื่อไม่ให้เกิดการไหลของสัญญาณทางด้านขาเข้าและวงจรขาออกที่ต่อไปใช้งาน
 จึงต่อวงจรบัฟเฟอร์ทั้งทางด้านขาเข้าและขาออกดังรูป 3.7.19



รูปที่ 3.7.19 แสดงการต่อวงจรับัฟเฟอร์กับวงจรเลื่อนเฟสทั้งขาเข้าและขาออก

3.8 ภาคลุ่มและรักษาระดับ

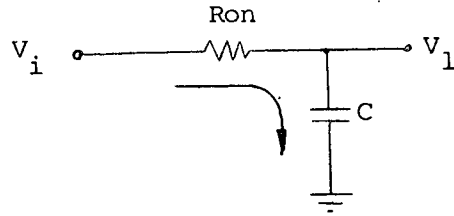
สัญญาณขาออกของภาคเฟลตีเทคเตอร์ที่ได้จากการเปรียบเทียบเฟลของสัญญาณคอปเปเลอร์และสัญญาณอ้างอิงที่เกิดขึ้นมีระยะเวลาสั้นมาก ประมาณ 1 ไมโครวินาที และมีช่วงห่างของการเกิดสัญญาณแต่ละครั้งค่อนข้างมากตามความถี่ PRF ที่ใช้คือ 50, 100, 200, 400 และ 800 ไมโครวินาที เพื่อให้สัญญาณที่เกิดขึ้นด้วยเวลาสั้น ๆ นี้สามารถรักษาระดับอยู่จนเกิดสัญญาณครั้งใหม่ จึงต่อเข้ากับวงจรลุ่มและรักษาระดับดังรูปที่ 3.8.1



รูปที่ 3.8.1 แสดงวงจรลุ่มและรักษาระดับและสัญญาณ ณ จุดต่าง ๆ

ในการพิจารณาออกแบบตัวเก็บประจุ C ต้องพิจารณาถึงคาบเวลาที่รักษาระดับมากที่สุดคือ 800 ไมโครวินาที

พิจารณาช่วงสุมตัวอย่าง สามารถเขียนวงจรสมมูลได้ดังรูปที่ 3.8.2



รูปที่ 3.8.2 แสดงวงจรสมมูลของภาคสุมและรักษาระดับช่วงสุมตัวอย่าง

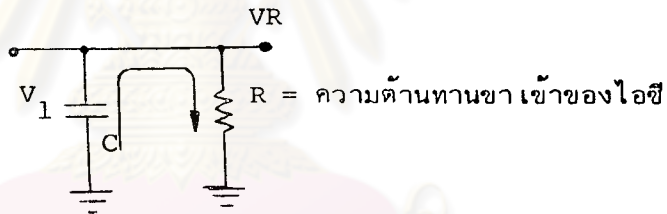
แรงดัน $V_1 = V_i (1 - e^{-t/RonC})$ (3.8.1)

ช่วงการสุมตัวอย่าง $t = .5$ ไมโครวินาที เมื่อให้ $V_1 = V_i$

ดังนั้น

$RC \ll .5 \mu S$ (3.8.2)

พิจารณาช่วงรักษาระดับ วงจรสมมูลช่วงขณะรักษาระดับดังรูปที่ 3.8.3



รูปที่ 3.8.3 แสดงวงจรสมมูลของภาคสุมและรักษาระดับช่วงรักษาระดับ

$V_R = V_1 e^{-t/RC}$ (3.8.3)

เวลาช่วงรักษาระดับที่ต้องก่าร์คือ 800 ไมโครวินาที

ดังนั้น

$RC \gg 800 \mu S$ (3.8.4)

วงจรสวิตซ์ที่ใช้ได้จากไอซีเบอร์ CD 4066 มีความต้านทานช่วง "ON" ประมาณ 270 โอห์ม ไอซีเบอร์ LF351 มีความต้านทานช่วง "OFF" เท่ากับ 10^{12} โอห์ม เลือกใช้ตัวเก็บประจุ C เท่ากับ 680 พิโกฟารัด พิจารณาสมการ (3.8.2) จะได้ $.1836 \ll 0.5$ ไมโครวินาที

และสมการ (3.8.4)

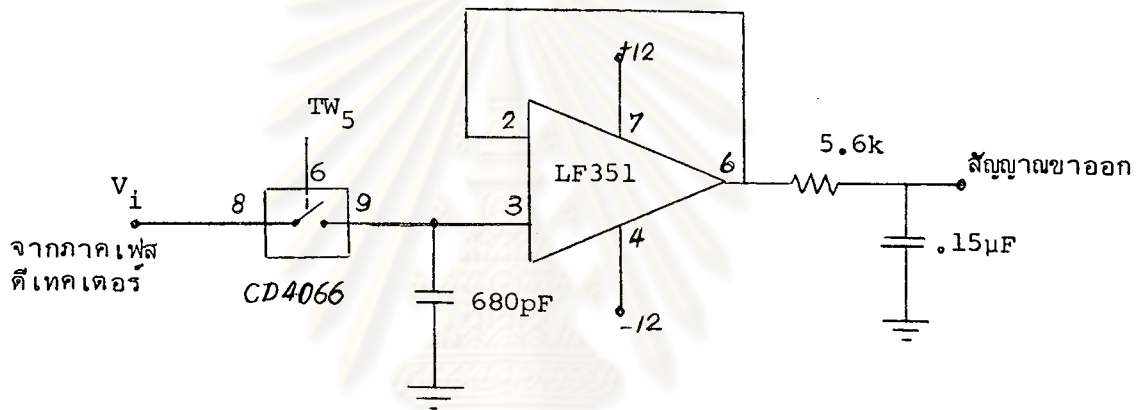
$680 \gg 800 \times 10^{-6}$ ไมโครวินาที

ความต้านทาน R_1 และ C_1 เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ใช้สำหรับกรองความถี่ PRF ที่มีปนอยู่ในสัญญาณขาออกของวงจรสุ่มและรักษาระดับ

$$T = R_1 C_1 \dots \dots \dots (3.8.5)$$

เลือกใช้ $C = .15$ ไมโครฟารัด, T ที่ใช้ = 800 ไมโครวินาที นำมาคำนวณค่า R_1 ได้เท่ากับ $5.2 \text{ k}\Omega$ ปรับค่าให้เป็นมาตรฐานจึงใช้ค่า $5.6 \text{ k}\Omega$ แทน

วงจรสมบูรณ์ของภาคสุ่มและรักษาระดับที่ออกใช้งานดังรูปที่ 3.8.4



รูปที่ 3.8.4 แสดงวงจรสมบูรณ์ของภาคสุ่มและรักษาระดับที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คออปเปเลอร์

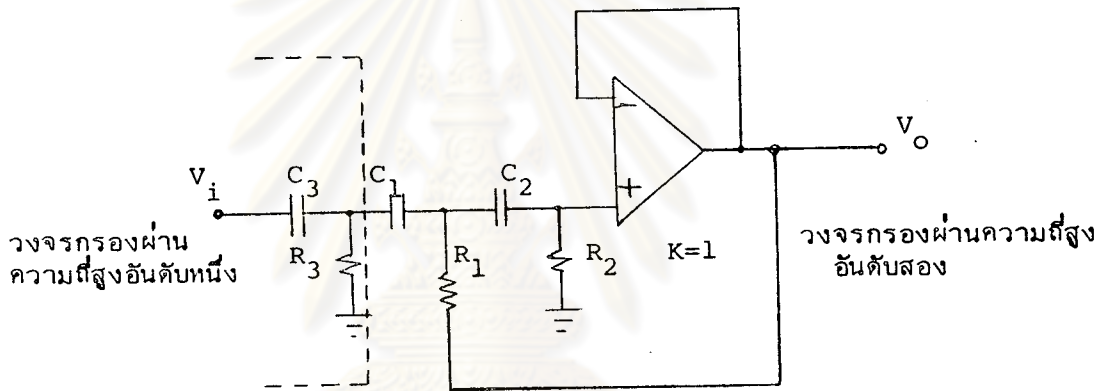
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.9 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำและวงจรกรองผ่านความถี่สูง

สัญญาณที่ออกจากภาคสุ่มและรักษาระดับที่ได้ยังมีส่วนประกอบของความถี่ PRF และมีสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เนื่องจากการเคลื่อนที่ของทรานซิสเตอร์ขณะทำการวัดบนอยู่ ดังนั้น จึงใช้สัญญาณวงจรกรองผ่านความถี่สูง และความถี่ต่ำผ่านกรองสัญญาณรบกวนเหล่านี้ทิ้ง

3.9.1 วงจรกรองผ่านความถี่สูง (28)

วงจรกรองผ่านความถี่สูงที่ใช้มีความชันของสัญญาณ +18 dB/octave ที่ความถี่คัตออฟ 50 เฮิรตซ์ วงจรที่ใช้ดังรูปที่ 3.9.1



รูปที่ 3.9.1 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำอันดับสาม

จากฟังก์ชันของวงจรกรองผ่านความถี่สูงอันดับสอง

$$G(S) = \frac{KS^2}{S^2 + \left[\frac{1}{R_2C_1} + \frac{1}{R_2C_2} + \frac{1-K}{R_1C_1} \right] S + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}} \quad \dots (3.9.1)$$

พิจารณาสมการ (3.9.1) เทียบกับสมการมาตรฐาน

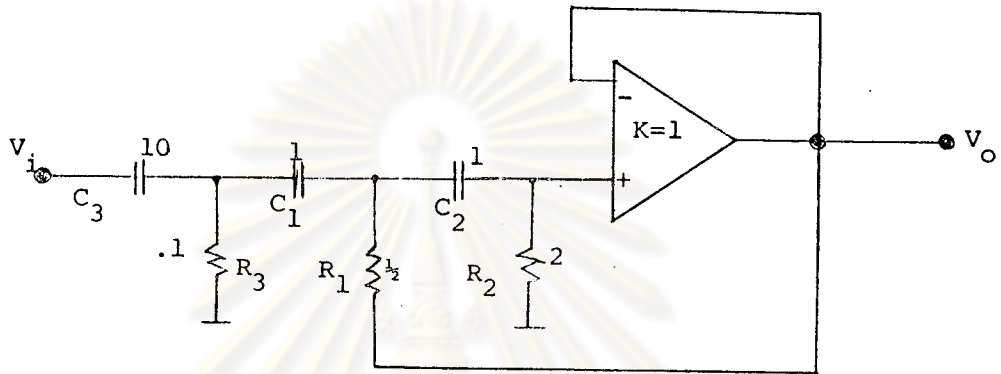
$$G(S) = \frac{K}{S^2 + dS + 1}$$

กำหนดให้ $C_1 = C_2 = 1$ สำหรับ $W = 1$, $R_1R_2C_1C_2 = 1$

นั่นคือ $C_1 = C_2 = 1$ และ $R_1 = 1/R_2$

จะได้ $R_2 = 2/d$ และ $R_1 = d/2$

จากวงจรกรองอันดับหนึ่ง เมื่อนำไปต่อเข้ากับวงจรกรองอันดับสองเพื่อทำเป็นวงจรกรองอันดับสามนั้น โดยวิธีการประมาณ ตัวเก็บประจุ C_1 จะต้องเพิ่มเป็น 10 เท่า ดังนั้น $C_3 = 10$ ฟารัด และความต้านทานลดลง 10 เท่า จะได้ $R_3 = .1$ โอห์ม เมื่อกำหนดให้ $d = 1$ สามารถเขียนวงจรกรองผ่านความถี่สูงได้ดังรูป 3.9.2



รูปที่ 3.9.2 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่สูงอันดับสามมีความถี่ตัดอยู่ที่ 1 rps

การนำวงจรกรองไปใช้งานต้องสเกลความถี่ให้ได้ตามต้องการคือ 50 เฮิรตซ์

ความถี่สเกล (a) = $2\pi \times 50$

ความต้านทานสเกล = b

$R_n = bR \dots \dots (3.9.2)$

$C_n = \frac{C}{ab} \dots \dots (3.9.3)$

เลือกค่า $C_2 = C_3 = .005 \mu F$

$R_1 = \frac{1}{2ac} = \frac{1}{2 \times 2 \times 3.14 \times 50 \times .005 \times 10^{-6}}$
 $= 318 \text{ K}\Omega$

เลือกใช้ค่าที่ได้มาตรฐานคือ 330 KΩ แทน

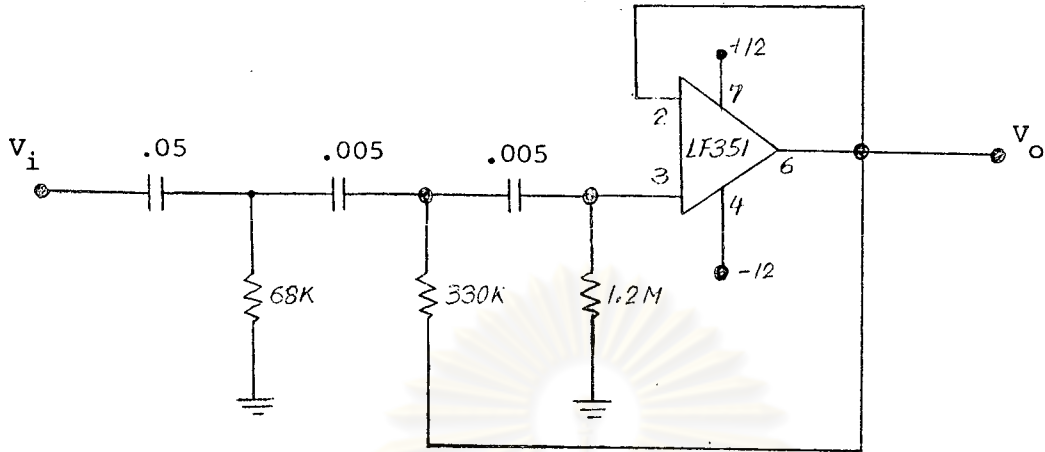
$R_2 = \frac{2}{ac} = \frac{2}{2 \times 3.14 \times 50 \times .005 \times 10^{-6}} = 1.27 \text{ M}\Omega$

$C_3 = 10C_1 = 10 \times .005 = .05 \mu F$

$R_3 = .1(2R_1) = .1(2 \times 330) = 66 \text{ k}\Omega$

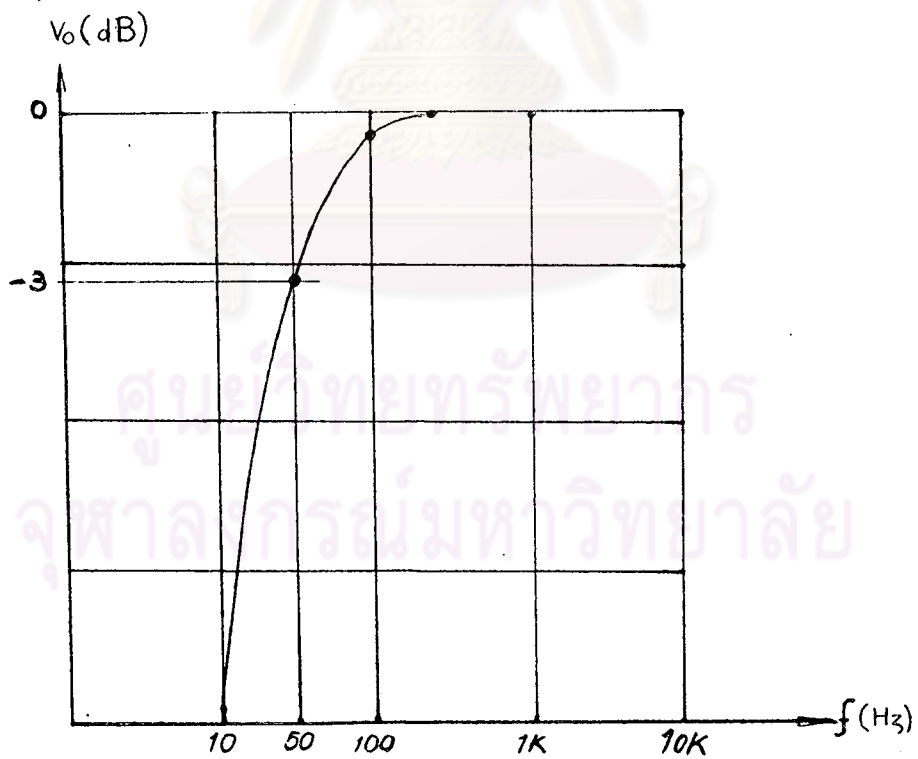
เลือกใช้ค่า $R_3 = 68 \text{ k}\Omega$

วงจรสมบรูณ์ที่ออกแบบนำมาเขียนได้ดังรูป 3.9.3



รูปที่ 3.9.3 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่สูงและค่าอุปกรณ์

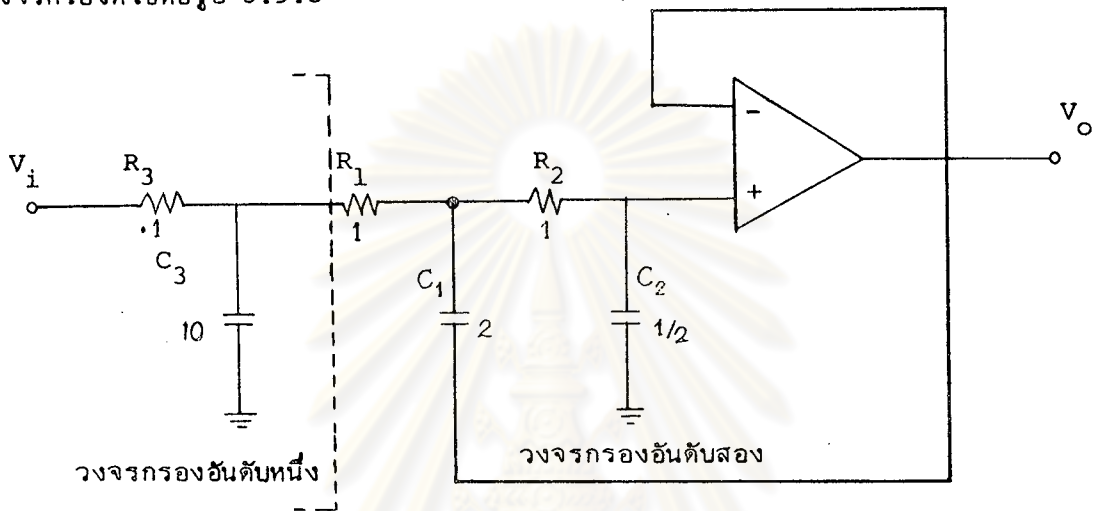
จากวงจรนำไปทดลองหาค่าผลตอบสนองต่อความถี่ได้ดังรูป 3.9.4



รูปที่ 3.9.4 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่ของวงจรกรองผ่านความถี่สูงที่
ความถี่คัตออฟ: 50 เฮิรตซ

3.9.2 วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่ใช้เป็นอันดับสามได้จากวงจรกรองอันดับหนึ่งและสองต่อกัน และเนื่องจากความถี่ PRF มีหลายค่า คือ 20, 10, 5, 2.5 และ 1.25 กิโลเฮิรท์ซ ดังนั้นความถี่คัตออฟที่ใช้มีหลายค่าเช่นกันคือ 10, 5, 2.5, 1.25 และ .625 กิโลเฮิรท์ซ วงจรกรองที่ใช้ดังรูป 3.9.5



รูปที่ 3.9.5 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับสามมีความถี่คัตออฟ 1 rps

จากฟังก์ชันของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำอันดับสอง

$$G(s) = \frac{K/R_1 C_1 R_2 C_2}{s^2 + \left[\frac{1}{R_2 C_1} + \frac{1}{R_1 C_1} + (1-K) \frac{1}{R_2 C_2} \right] s + 1/R_1 C_1 R_2 C_2} \dots (3.9.4)$$

พิจารณาเทียบกับสมการมาตรฐาน

$$G(s) = \frac{K}{s^2 + ds + 1}$$

ให้ความต้านทาน $R_1 = R_2 = 1$, $R_1 R_2 C_1 C_2 = 1$ และ $d = 1$

ที่ $w = 1$ จะได้ $C_1 = 1/c_2$

$$C_1 = 2 \quad \text{และ} \quad C_2 = 1/2$$

จากการนำวงจรกรองอันดับหนึ่งและอันดับสองมาต่อรวมกันโดยวิธีการประมาณ ความต้านทาน R_3 จะต้องลดลง 10 เท่า ดังนั้น $R_3 = .1$ โอห์ม และตัวเก็บประจุ C_3 จะเพิ่มขึ้น 10 เท่า ดังนั้น $C_3 = 10$ ฟารัด

การนำวงจรกรองไปใช้งานจะต้องสเกลความถี่ (f) ให้ได้ตามต้องการคือ 10, 5, 2.5, 1.25 และ .625 กิโลเฮิรตซ์

ความถี่สเกล (a) = 2πf

ความต้านทานสเกล (b) = 240 kΩ

$R_n = bR \dots \dots (3.9.5)$

$C_n = \frac{C}{ab} \dots \dots (3.9.6)$

ที่ความถี่คัตออฟ 625 เฮิรตซ์ $R_1 = R_2 = 240 \text{ k}\Omega$

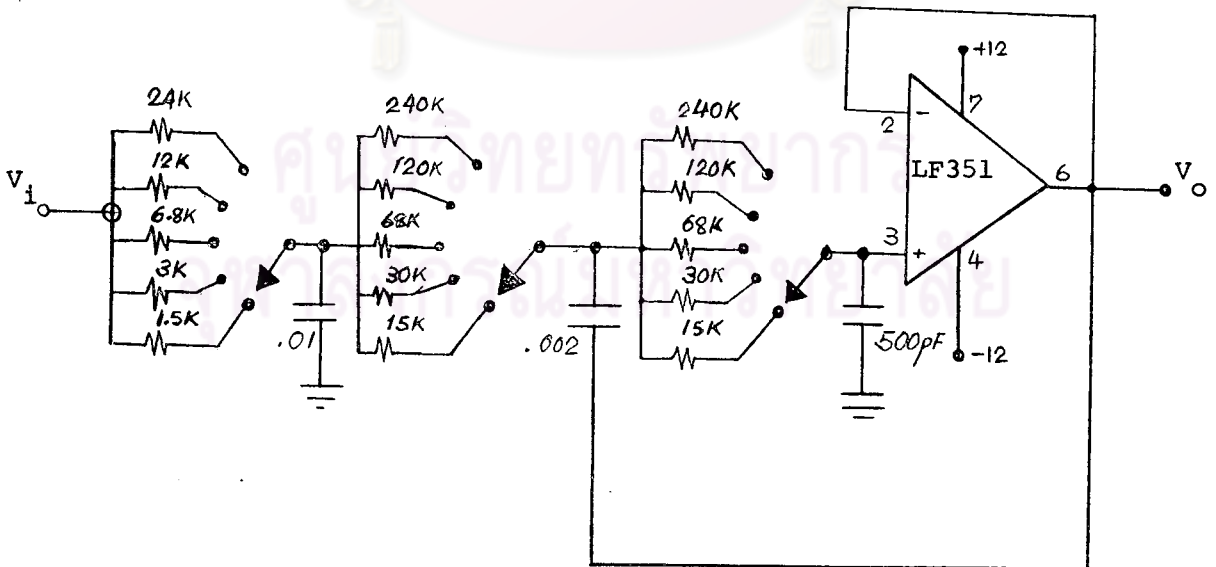
$R_3 = .1 R_1 = 24 \text{ k}\Omega$

$C_1 = \frac{2}{ab} = .002 \mu\text{F}$

$C_2 = \frac{1}{2ab} = 500 \text{ pF}$

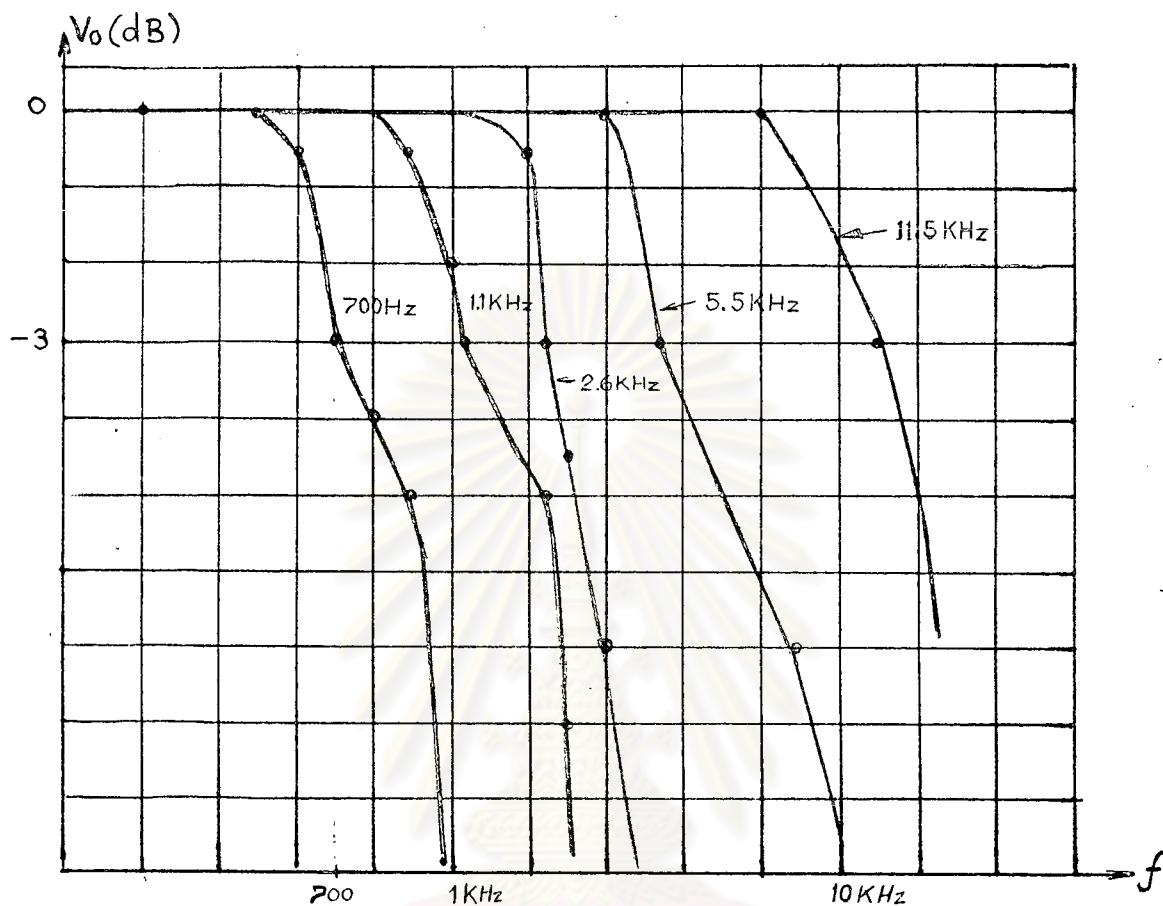
$C_3 = \frac{10}{ab} = .01 \mu\text{F}$

และที่ความถี่คัตออฟอื่นคือ 1.25, 2.5, 5 และ 10 กิโลเฮิรตซ์ สามารถหาค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุได้คล้ายกับที่ความถี่คัตออฟ 625 เฮิรตซ์ วงจรสมบูรณ์ของวงจรกรองผ่านความถี่สูงดังรูป 3.9.6



รูปที่ 3.9.6 แสดงวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำพร้อมทั้งค่าอุปกรณ์ที่ใช้งาน

จากวงจรที่ออกแบบนำไปหาผลตอบสนองต่อความถี่ได้ดังกราฟรูป 3.9.7



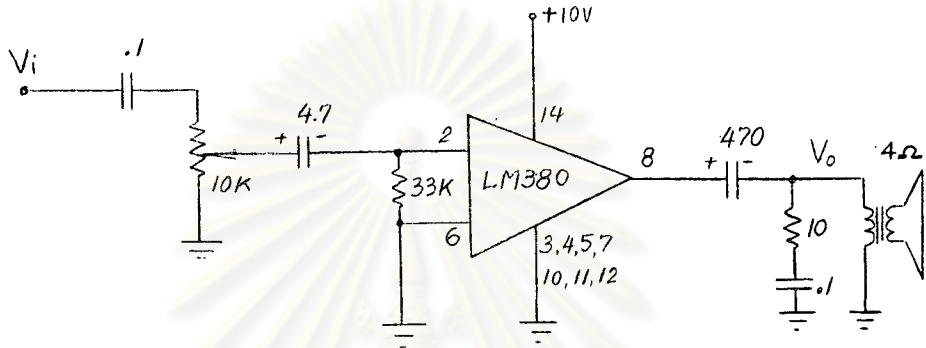
รูปที่ 3.9.7 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่คัตออฟต่าง ๆ ของวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำรูป 3.9.6

ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.10 ภาคขยายเสียง

สัญญาณที่ได้จากภาคกรองความถี่ จะอยู่ในย่านความถี่เสียงซึ่งมีแอมพลิจูดต่ำและไม่สามารถขับลำโพงให้ทำงานได้ จึงนำสัญญาณที่ได้มาขยายให้มีกำลังมากขึ้นจนสามารถขับลำโพงให้ดังได้ วงจรขยายเสียงได้จากการใช้วงจรประมวลเบอร์ LM380 ซึ่งมีวงจรที่ใช้งานดังรูป

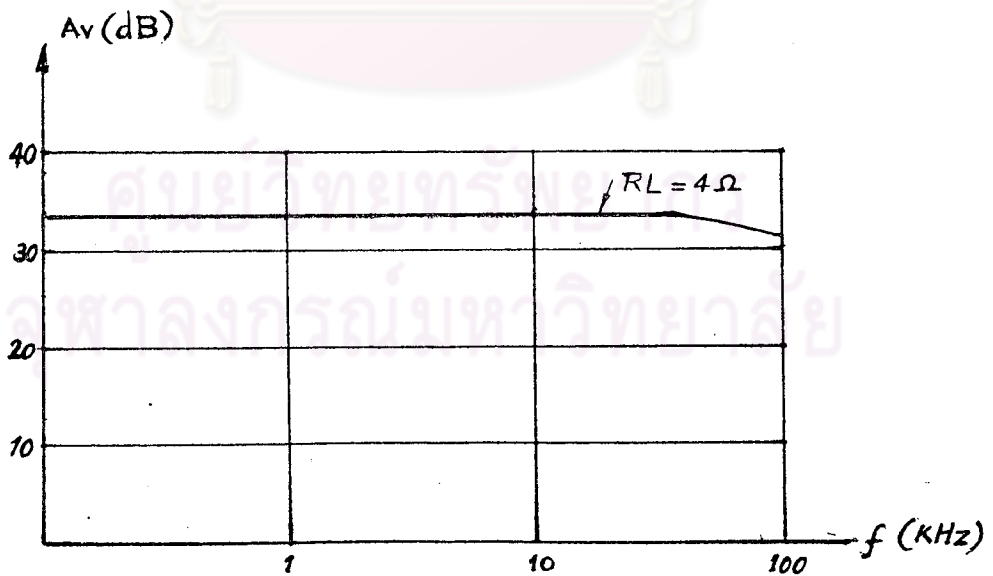
3.10.1



รูปที่ 3.10.1 แสดงวงจรขยายเสียงที่ใช้ในเครื่องคอปเปอเรอร์อัลตราซาวด์

จากวงจรรูป 3.10.1 นำไปวัดผลตอบสนองต่อความถี่และอัตราการขยายได้ดังรูป

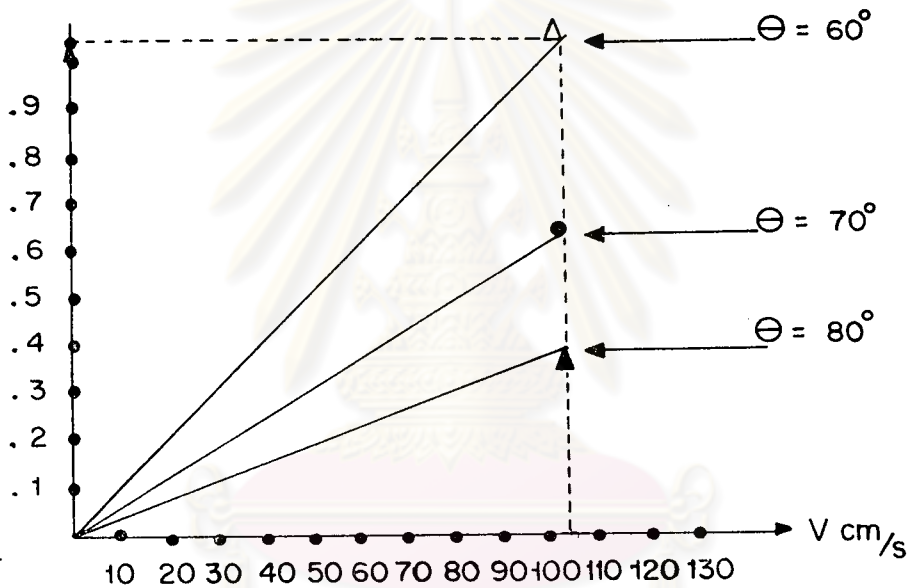
3.10.2



รูปที่ 3.10.2 กราฟแสดงผลตอบสนองต่อความถี่และอัตราการขยายของภาคขยายเสียง

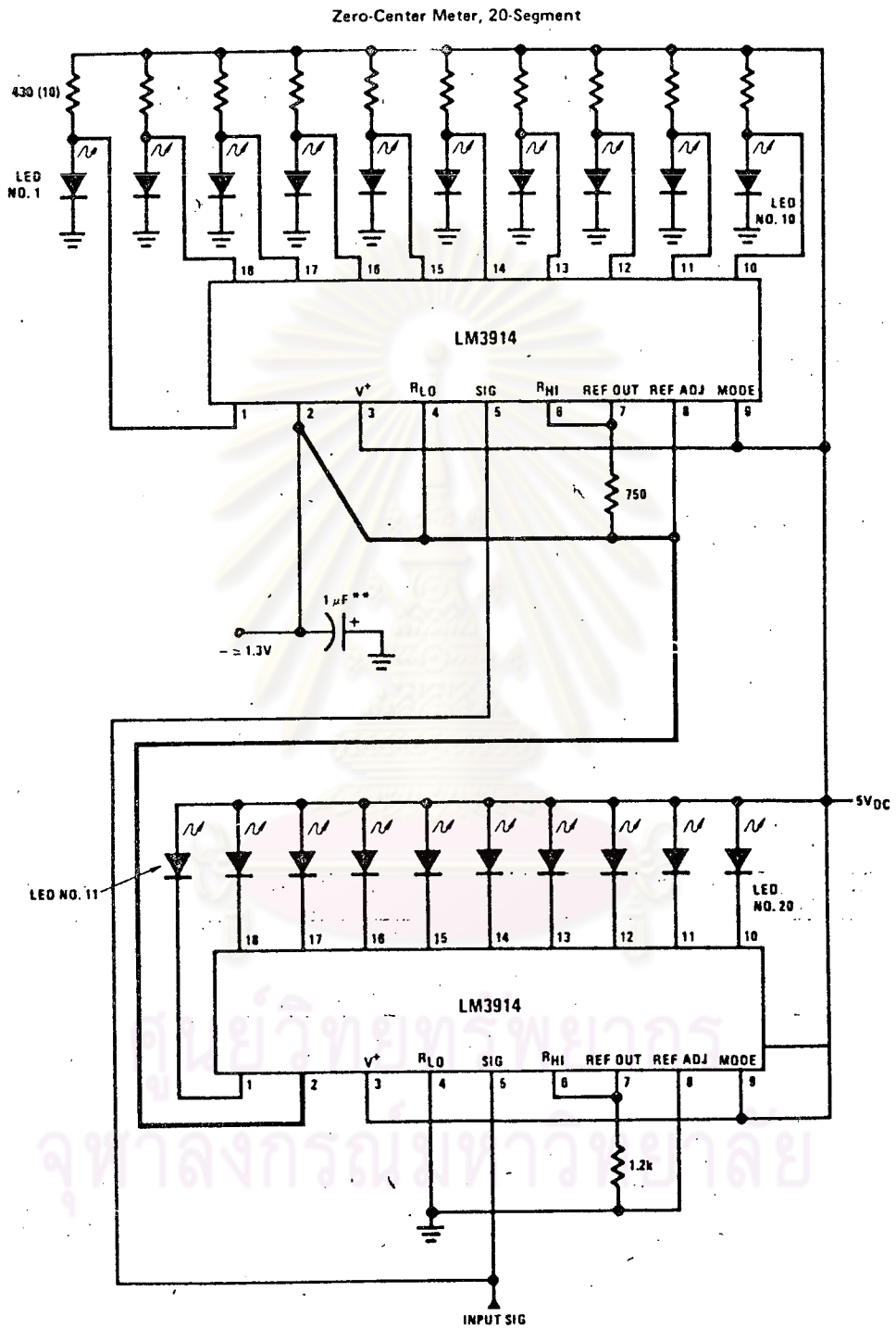
3.11 ภาคแสดงผล

สัญญาณที่ได้จากภาคกรองความถี่จะมีแอมพลิจูดของสัญญาณเป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเร็วเลือดที่ไหล วิธีการแสดงค่าความเร็วเลือดที่ไหลสามารถทำได้หลายวิธี และวิธีที่สะดวกในการอ่านวิธีหนึ่งก็คือการใช้ LED หลาย ๆ ตัวต่อกัน ซึ่งวิธีนี้จะนำมาใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ที่สร้างวงจรที่ใช้ได้จากวงจรประมวลเบอร์ LM3914⁽²⁵⁾ ซึ่งมีหน้าที่เป็น DOT/BAR DISPLAY DRIVER นำมาต่อกัน จากกราฟความสัมพันธ์ของความเร็วและแรงดันขาออกที่ได้จากภาคกรองความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 3.11.1



รูปที่ 3.11.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วกับแรงดันขาออก

จะเห็นว่ากราฟที่ได้มีลักษณะเป็นเส้นตรง การออกแบบวงจรสำหรับค่าความเร็วนี้จึงสะดวก วงจรที่ใช้ดังรูป 3.11.2



รูปที่ 3.11.2

แสดงวงจรแสดงผลของค่า LED

จากค่าของความเร็วสามารถนำมาคำนวณหาค่าของความถี่ดอปเปลอร์

ความเร็ว cm/s	ความถี่ดอปเปลอร์ (KHz)	
10	.28	$\Delta f = \frac{2f_0 v \cos 60^\circ}{C}$
20	.56	
30	.84	$C = 1490 \text{ cm/s}$
40	1.1	$f_0 = 4.19 \text{ MHz}$
50	1.4	
60	1.7	
70	1.9	
80	2.2	
90	2.5	
100	2.8	
110	3	
120	3.3	
130	3.6	
140	3.9	
150	4.2	
160	4.5	
170	4.8	
180	5	
190	5.3	
200	5.6	

จากการทดลองค่าของแรงดัน V_o ที่ได้จากภาคเฟลด์เทคเตอร์ จะมีทั้งบวกและลบซึ่งค่าที่ได้ขึ้นอยู่กับเฟสของสัญญาณคอปเปอเรอร์กับสัญญาณอ้างอิง ดังนั้นวงจรที่ใช้ต้องสามารถแสดงค่าทั้งสองได้วงจรที่ใช้ได้จากการประยุกต์ใช้ของไอซีเบอร์ LM 3914⁽²⁵⁾ ดังวงจรรูปที่ 3.11.2 ระดับความแรงของสัญญาณที่เข้าที่ขา 5 ของวงจรจะมีค่า ± 1.2 โวลต์ ผลของความต่างระดับของแรงดันจะทำให้ LED ตัวที่ 1 ถึง 20 แสดงค่าออกมา



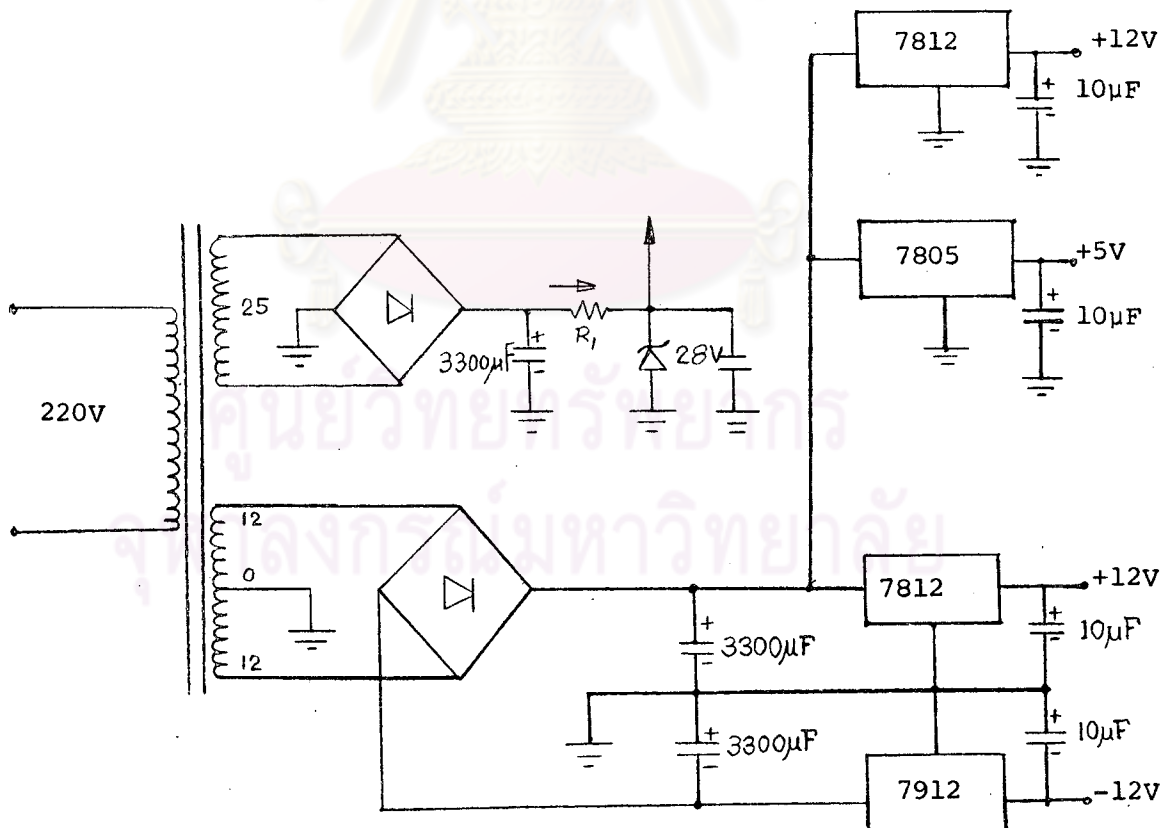
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.12 ภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าที่ใช้ในเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์มีหลายชุด ได้แก่

- ก) + 28 โวลต์ จ่ายให้กับภาคขยายกำลัง
- ข) + 12 โวลต์ จ่ายให้กับภาคขยายเสียง ภาคขับกำลัง และภาคแสดงผล
- ค) ± 12 โวลต์ จ่ายให้กับภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ ภาคเฟสดีเทคเตอร์ ภาคลุ่มและรักษาระดับ ภาคกรองความถี่
- ง) + 5 โวลต์ จ่ายให้กับภาคกำเนิดความถี่ ภาคหารความถี่ ภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ ภาคสวิทช์สัญญาณต่าง ๆ

ซึ่งวงจรที่ใช้งานของทั้งหมดดังแสดงในรูป 3.12.1



รูปที่ 3.12.1 แสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า

3.12.1 แหล่งจ่ายกำลังไฟ +28 โวลต์

ใช้จ่ายกำลังงานให้กับภาคขยายกำลังซึ่งกินกำลังงานน้อยมาก เพราะการทำงานของ วงจรเป็นช่วง ๆ ช่วงละ 1 ไมโครวินาที ซีเนอร์ไดโอด ZD_1 เป็นตัวจำกัดแรงดันให้คงที่ที่ 28 โวลต์ R_1 เป็นตัวจำกัดกระแส

$$\text{หาได้จากสมการ} \quad R_1 = \frac{V_1 - 28}{I} \quad \dots (3.12.1)$$

$$V_1 \text{ วัดได้} = 32 \text{ V}$$

$$I = 40 \text{ mA}$$

$$\text{ดังนั้นความต้านทาน} \quad R_1 = 100 \text{ โอห์ม}$$

3.12.2 แหล่งจ่ายกำลังไฟ +12 โวลต์

แหล่งจ่ายกำลังไฟ +12 โวลต์ได้จากการใช้วงจรประมวลที่เป็นเรกกูเรเตอร์เบอร์ 7812 ซึ่งมีแรงดันขาออก 12 โวลต์และสามารถจ่ายกระแสได้สูงถึง 1.5 แอมแปร์ ใช้จ่ายให้แก่ภาคขยายเสียง ภาคขับกำลัง และภาคแสดงผล จากการวัดค่ากระแสรวมของวงจรทั้งหมดที่ใช้แรงไฟ +12 โวลต์ ปรากฏว่ากระแสที่วัดได้น้อยกว่ากระแสที่วงจรประมวลสามารถจ่ายให้กับวงจรได้

3.12.3 แหล่งจ่ายกำลังไฟ ± 12 โวลต์

แหล่งจ่ายกำลังไฟ ± 12 โวลต์ ได้จากการใช้วงจรประมวลที่เป็นเรกกูเรเตอร์เบอร์ 7812 สำหรับแรงไฟบวก และเบอร์ 7912 สำหรับแรงไฟลบ ใช้จ่ายให้แก่ภาคขยายสัญญาณคอปเปอเรอร์ ภาคเฟลด์เทคเตอร์ ภาคลุ่มและรักษาระดับ และภาคกรองความถี่ และจากการวัดค่ากระแสรวมของวงจรทั้งหมดที่ใช้แรงไฟ ± 12 โวลต์ ปรากฏว่ากระแสที่วัดได้น้อยกว่ากระแสที่วงจรประมวลสามารถจ่ายให้กับวงจรได้

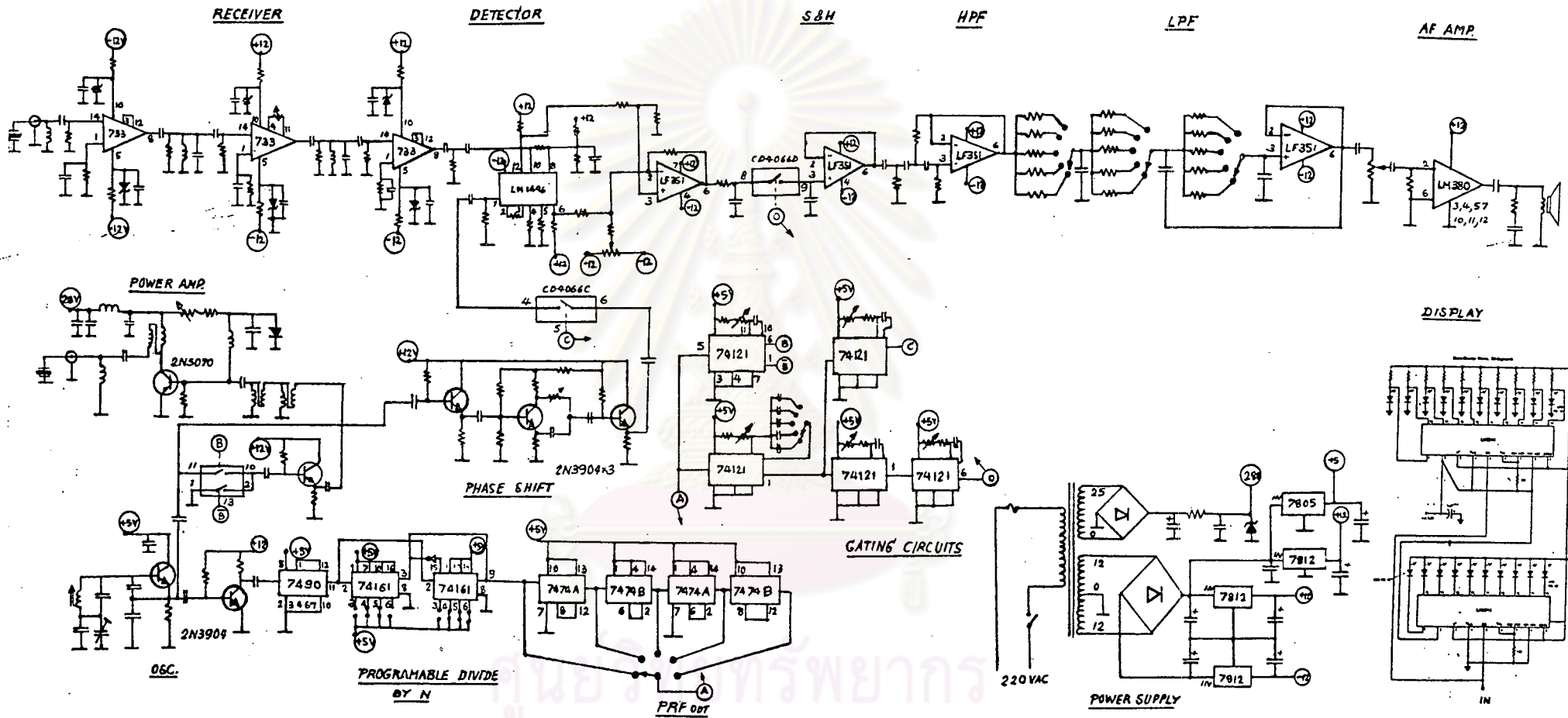
3.12.4 ภาคแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า +5 โวลต์

ได้จากการใช้วงจรประมวลที่เป็นเรกกูเรเตอร์ เบอร์ 7805 มีแรงดันขาออก 5 โวลต์ และสามารถจ่ายกระแสได้ถึง 1.5 แอมแปร์ ซึ่งใช้จ่ายกำลังให้กับภาคต่าง ๆ ได้แก่ ภาคทาร ความถี่ ภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ และภาคสวิทซ์สัญญาณต่าง ๆ กระแสต่าง ๆ ของวงจรที่ใช้น้ำ

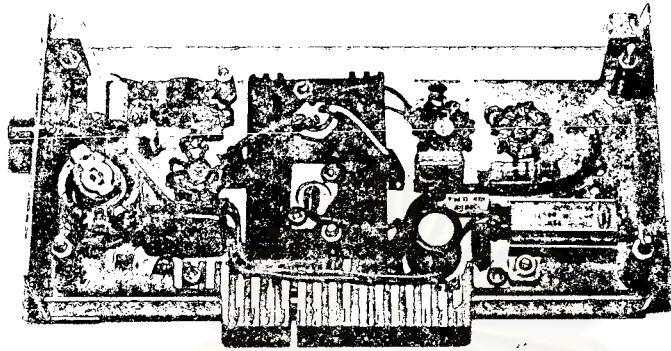
มารวมกัน จากการวัดค่ากระแสรวมของวงจรทั้งหมดที่ใช้แรงไฟ +5 โวลต์ ปรากฏว่ากระแสที่วัดได้น้อยกว่ากระแสที่วงจรประมวลสามารถจ่ายให้กับวงจรได้



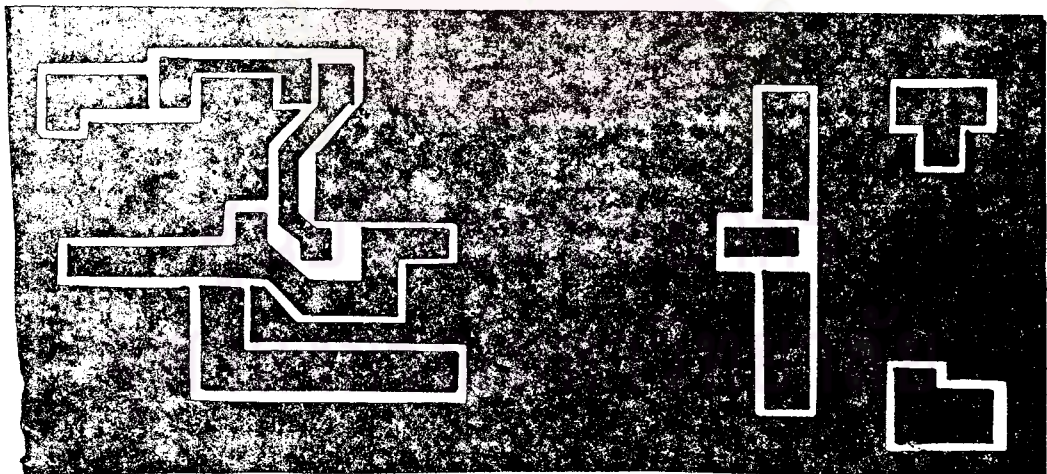
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



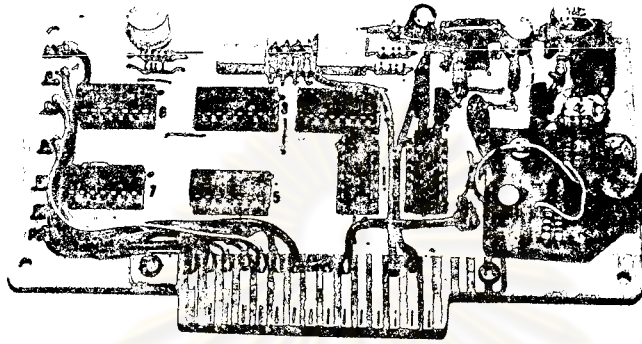
รูปที่ 3.13.1 วงจรสมมุติของภาคต่าง ๆ ของเครื่องจับปรากฏการณ์คอปเปิลอร์ของอัลตราซาวนด์เพื่อ
วัดการไหลของโลหิต



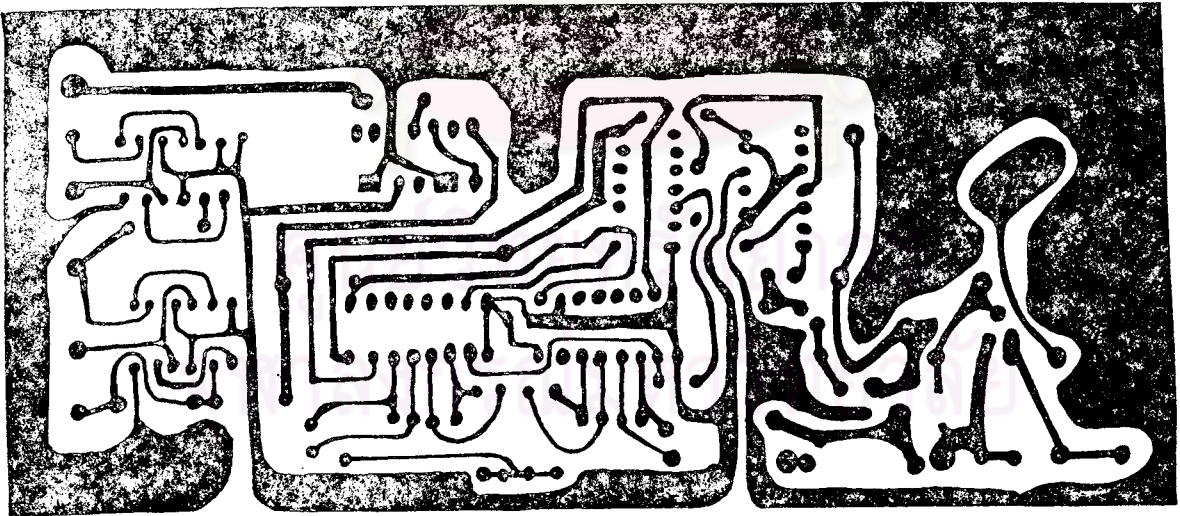
รูปที่ 3.13.2 แสดงภาพนำยปรินซ์บอร์ดของภาคขยายกำลัง



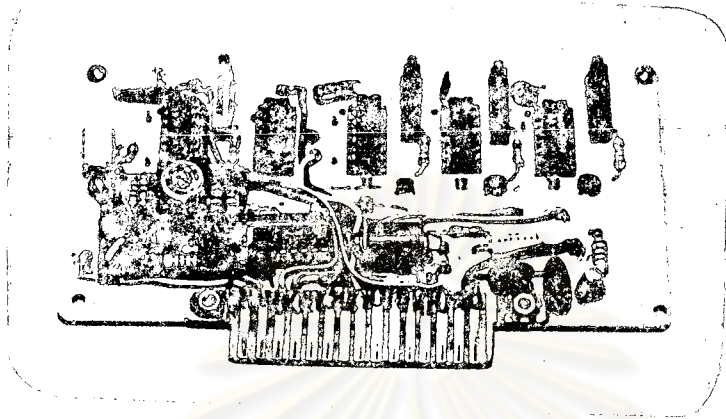
รูปที่ 3.13.3 แสดงลายปรินซ์ของภาคขยายกำลัง



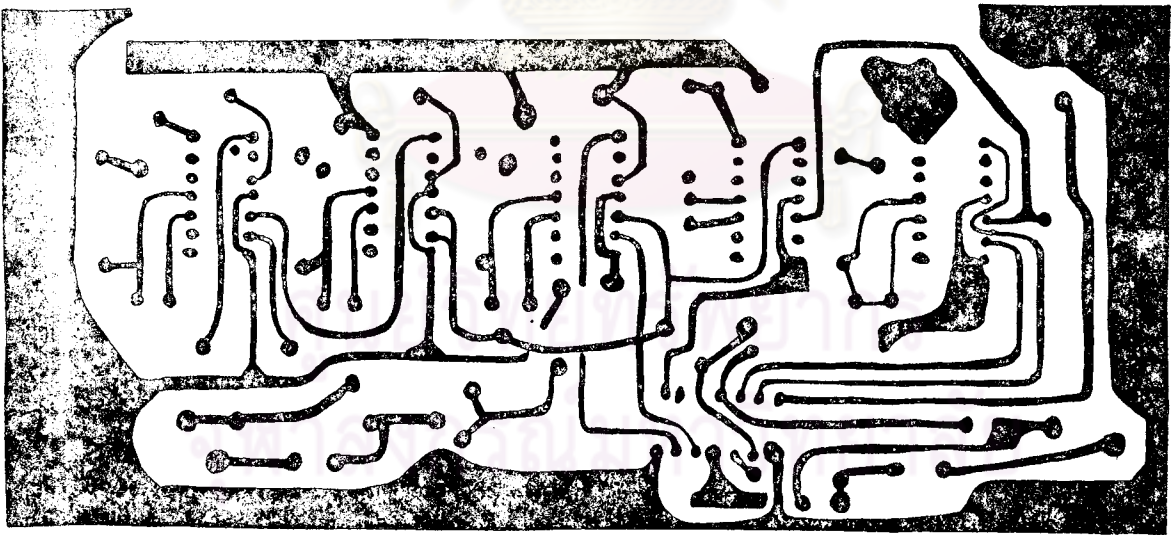
รูปที่ 3.13.4 ภาพถ่ายของปริ้นซ์ภาคกำเนิดความถี่และภาคหารความถี่



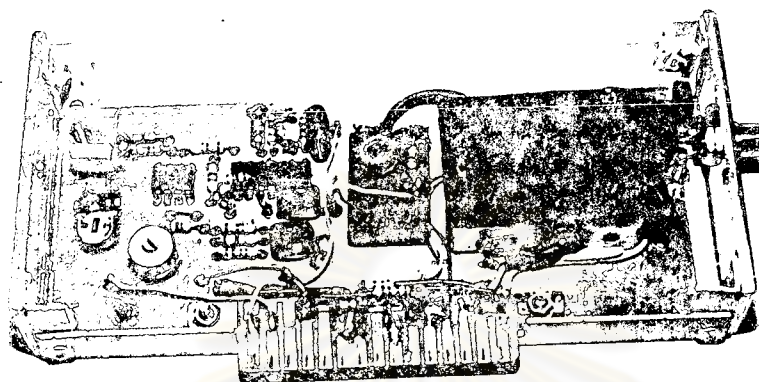
รูปที่ 3.13.5 ลายปริ้นซ์ของภาคกำเนิดความถี่และภาคหารความถี่



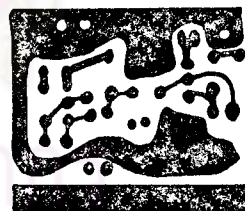
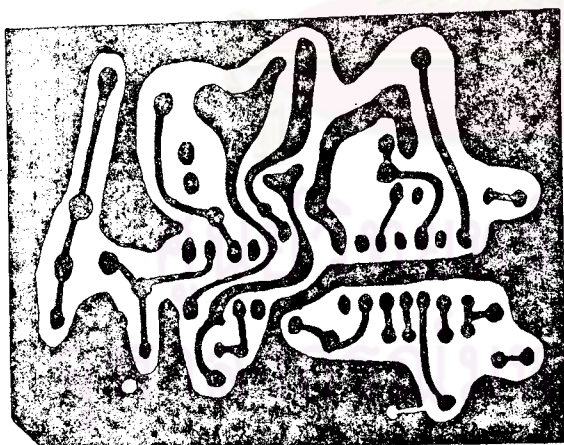
รูปที่ 3.13.6 ภาพถ่ายปริ้นซ์บอร์ดของภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ



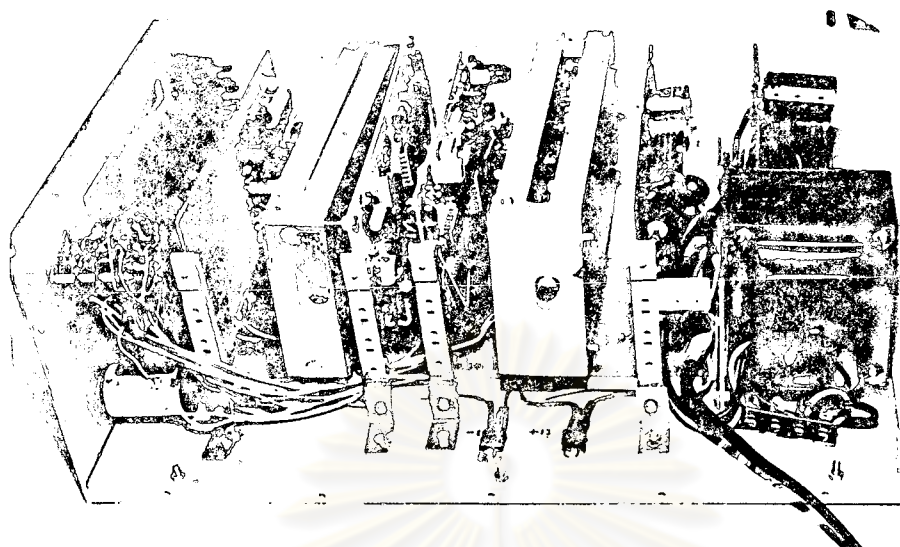
รูปที่ 3.13.7 ฉายปริ้นซ์ของภาคเกทสัญญาณต่าง ๆ



รูปที่ 3.13.8 ภาพถ่ายปริทรรศน์ของภาครับและขยายสัญญาณคอปเปิลอร์
และภาคเฟสดีเทคเตอร์

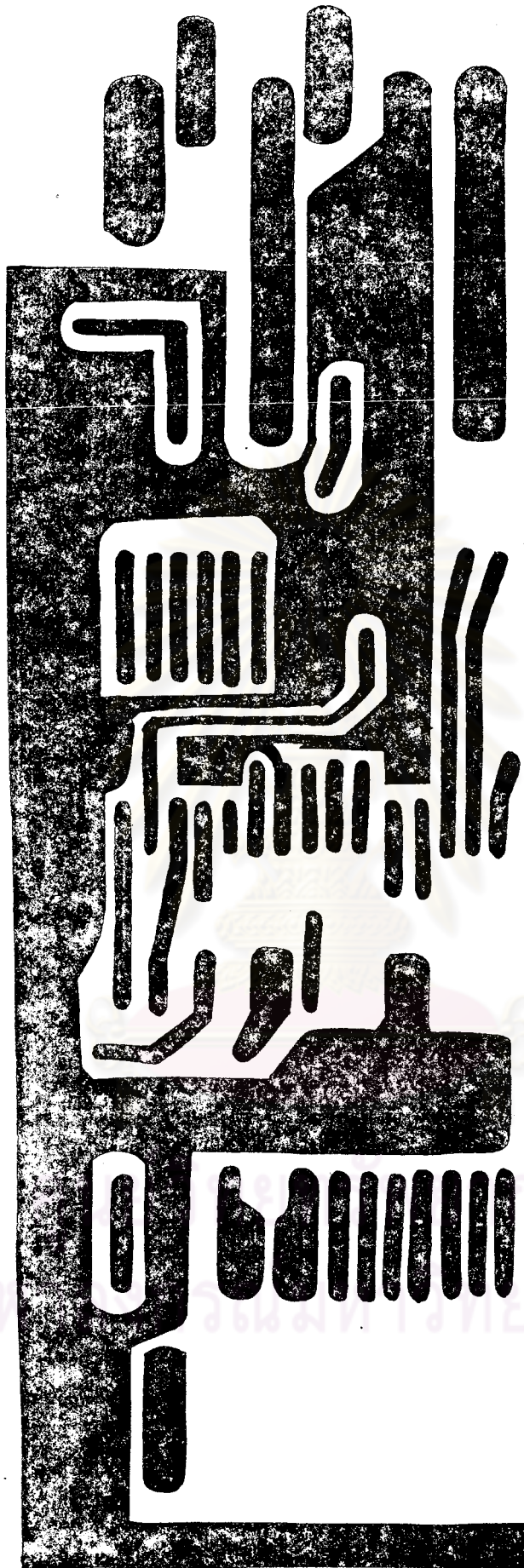


รูปที่ 3.13.9 ฉายาปริทรรศน์ของภาคเฟสดีเทคเตอร์และภาคขยายสัญญาณคอปเปิลอร์



รูปที่ 3.13.11 ภาพนำของส่วนประกอบของภาคต่าง ๆ ภายในเครื่อง
พิมพ์แปดกรัสม์ตัวอักษร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.13.11 ลายปรีนซ์ของ MAIN BROAD ของเครื่องตรวจจับปรากฏการณ์คอปเปอเรอร์