



การส่งข้อมูลไบนารีเฟสซิกซ์อี้งผ่านคลื่นวิทยุ
(BPSK Transmission using VHF Radio)

ผู้จัดทำ

นายเชาวลิต	ธรรมวิริยะกุล	321083
นายตามพ์เมฆ	บุญยะ เวศ	321094
นายศักดิ์พงษ์	จันทร์ ไบ	321329

อาจารย์ที่ปรึกษา

ดร. รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์

ปริญญาโท สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2535

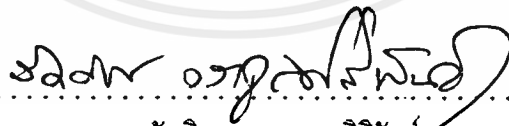
ปริญญาโทปีการศึกษา 2535

เรื่อง การส่งข้อมูลไบนารีเฟสซิกซ์อ็องควอนคลื่นวิทยุ

(BPSK Transmission using VHF Radio)

ผู้จัดทำ

1. นายเชาวลิต ธรรมวิริยะกุล 321083
2. นายตามพ์เมฆ นุชยะเวศ 321094
3. นายศักดิ์พงษ์ จันทรไพบ 321329



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร. รัตติกร วรากุลศิริพันธ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การส่งข้อมูล โบนารีเฟสซิงคีย์อิงผ่านคลื่นวิทยุ

นายเชาวลิต	ธรรมวิริยะกุล	321083
นายตามพ์เมษ	บุญยะเวศ	321094
นายศักดิ์พงษ์	จันทร์ใบ	321329

อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.รัตติกร วรากุลศิริพันธ์

บทคัดย่อ

โครงการนี้เสนอการออกแบบ และสร้างต้นแบบของเครื่องส่งข้อมูล โบนารีเฟสซิงคีย์อิงผ่านคลื่นวิทยุ ชุดเครื่องส่งข้อมูล โบนารีเฟสซิงคีย์อิงจะนำข้อมูลดิจิทัลมาผ่านมอดูเลเตอร์แบบเฟสซิงคีย์อิง (BPSK) แล้วส่งผ่านข้อมูลทางคลื่นวิทยุ ชุดรับส่ง 1 ชุด ประกอบด้วยเครื่องส่ง 1 ชุด และเครื่องรับ 1 ชุด ใช้สายอากาศร่วมกัน ความถี่ที่ใช้อยู่ในช่วงความถี่วีเอชเอฟ (VHF) 144-168 เมกกะเฮิร์ต สร้างความถี่พาห้ โดยใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer) ซึ่งสามารถปรับความถี่ได้ง่าย

Binary Phase Shift Keying Transmission using VHF Radio

Chaovalit Thamviriyakul 321083

Dahmmaet Bunnjaweht 321094

Sakphong Chanbai 321329

Advisor

Dr. Ruttikorn Varakulsiripunth

Abstract

This project presents how to design and construct a prototype of BPSK transmission equipment, uses radio wave as a transmission channel. An incoming digital data will be modulated into binary phase shift keying (BPSK) and sent out over radio wave link. A transceiver consists of one transmitter and one receiver which are connected to common antenna. Transceiver is in VHF band, between 144-168 MHz. Carriers are generated by synthesizer and their frequency can be adjust easily.

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 โครงสร้างของระบบ	
1.1 ส่วนส่ง	1
1.2 ส่วนรับ	1
1.3 ส่วนมอดูเลเตอร์	2
1.4 ส่วนดีมอดูเลเตอร์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีเบื้องต้น	
2.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่	3
2.1.1 การออกแบบวงจรผลิตความถี่	3
2.1.2 วงจรผลิตความถี่อ้างอิง	9
2.1.3 เฟสดีเทคเตอร์	10
2.1.4 วงจรหารโปรแกรมได้	12
2.1.5 ลูปฟิลเตอร์	12
2.2 วงจรลดทอนสัญญาณ	13
2.3 วงจรขยายสัญญาณ	14
2.4 การออกแบบวงจรแมชชิงด้วยคอมพิวเตอร์	20
2.5 เครื่องรับชนิดแปลงความถี่สองครั้ง	32
2.6 ดูเพลกเซอร์	32
2.7 การสร้างสัญญาณไบนารีเฟสซิกซ์อิ่ง	38
2.8 การดีมอดูเลทสัญญาณ BPSK	40
2.9 การรีคัพเวอร์แคร้เรีย	40
2.10 การรีคัพเวอร์สัญญาณนาฬิกา	47
บทที่ 3 การออกแบบสร้างวงจร	
3.1 การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูลูป	55
3.2 การออกแบบวงจรลดทอนสัญญาณ	60
3.3 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่	60
3.4 การออกแบบวงจรกำจัดแถบความถี่	62
3.5 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณ	63

3.6	การออกแบบวงจรภาครับเอฟเอ็ม	65
3.7	การสร้างสัญญาณ BPSK	66
3.8	การออกแบบวงจรรีฟเวอร์แคร่เรีย	70
บทที่ 4	สรุปผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1	ผลการทดลอง	75
4.2	วิจารณ์ผลการทดลอง	87
4.3	อุปสรรคในการสร้างวงจร	88
4.4	แนวทางการพัฒนาส่วนที่เหลือ	88

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



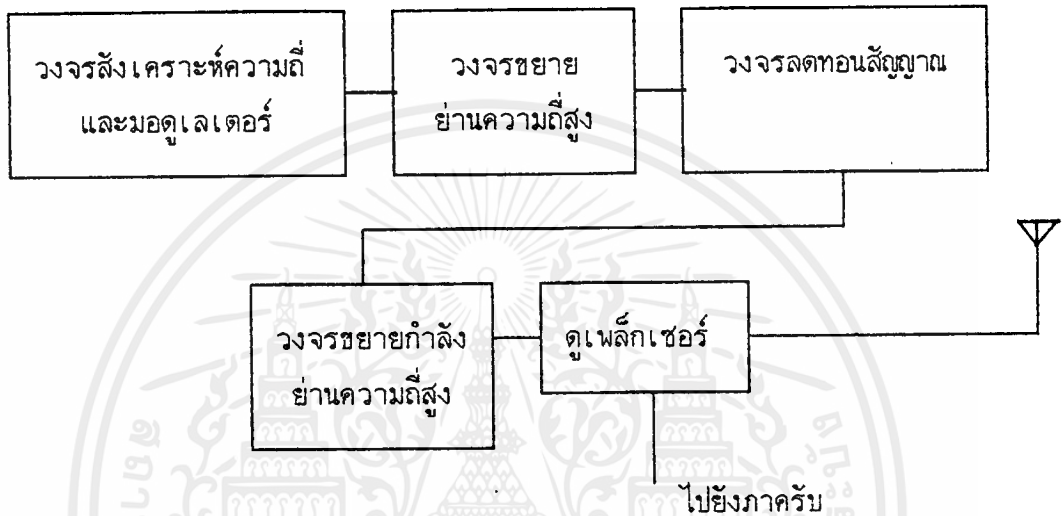
บทที่ 1

โครงสร้างของระบบ

โครงสร้างของระบบจะแยกเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนส่ง ส่วนรับ ส่วนมอดูเลเตอร์ และ ส่วนดีมอดูเลเตอร์ ซึ่งแต่ละส่วนแสดงดังนี้

1.1 ส่วนส่ง

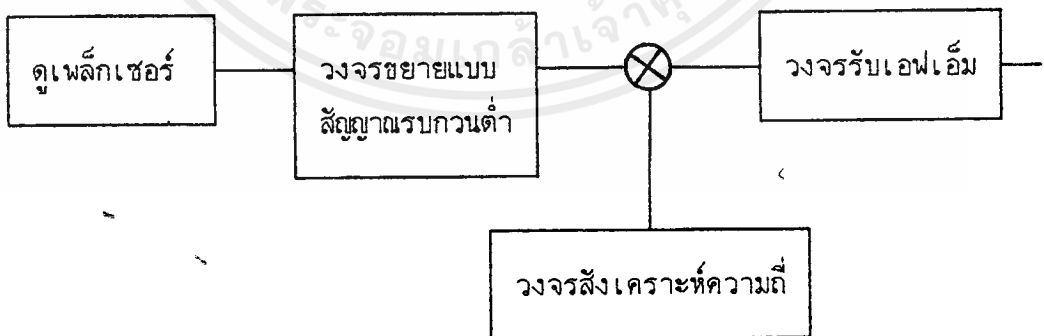
วงจรในภาคส่งจะประกอบด้วยวงจรสังเคราะห์ความถี่ ที่สามารถมอดูเลตสัญญาณแบบเอฟเอ็ม เข้าไปในลูบได้ วงจรขยายย่านความถี่สูง วงจรลดทอนสัญญาณ วงจรขยายกำลังย่านความถี่สูง และดูเพล็กซ์เซอร์ (duplexer) ดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภาคส่ง

1.2 ส่วนรับ

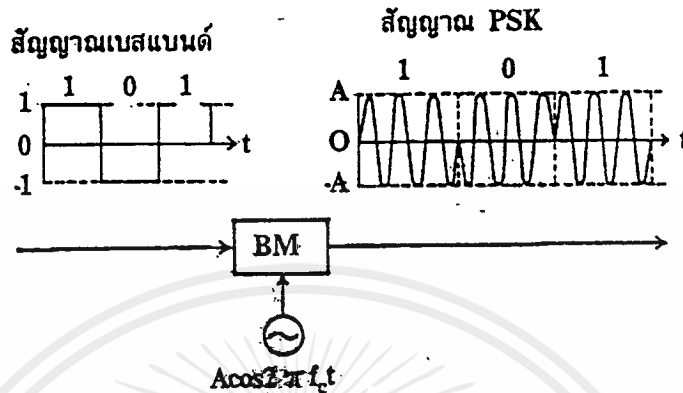
วงจรในภาครับ ประกอบด้วย วงจรขยายแบบสัญญาณรบกวนต่ำ (Low-noise Amplifier) วงจรสังเคราะห์ความถี่ และวงจรรับเอฟเอ็ม ดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรภาครับ

1.3 ส่วนมอดูเลเตอร์

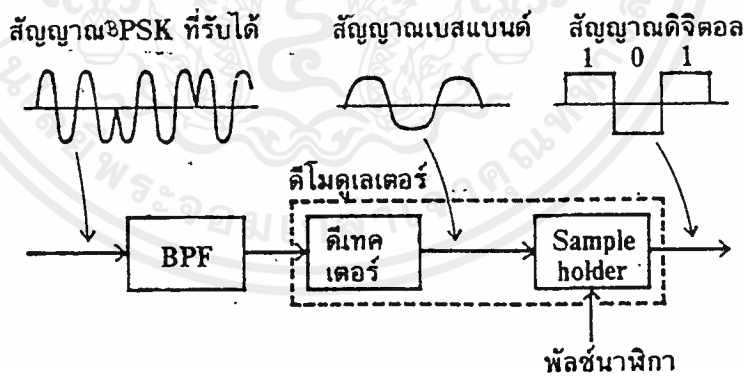
วงจรส่วนมอดูเลเตอร์จะทำหน้าที่มอดูเลตสัญญาณที่รับจาก RS232C โดยมอดูเลทแบบ BPSK (Binary-Phase Shift Keying) แล้วจึงนำสัญญาณที่ได้ มาแปลงความถี่ให้อยู่ในรูปของคลื่นวิทยุเพื่อส่งออกทางสายอากาศ ดังรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์แบบ BPSK

1.4 ส่วนดีมอดูเลเตอร์

ส่วนดีมอดูเลเตอร์จะประกอบด้วย วงจรรีคัพเวอริ์แคเรียร์ วงจรรีคัพเวอริ์สัญญาณนาฬิกาและวงจรดีมอดูเลตสัญญาณ BPSK ดังรูปที่ 1.4



รูปที่ 1.4 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจร BPSK ดีมอดูเลเตอร์

บทที่ 2
ทฤษฎีเบื้องต้น

2.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่ (Frequency Synthesizer)

วงจรสังเคราะห์ความถี่ที่เลือกใช้ในโครงการนี้ เป็นวงจรสังเคราะห์ความถี่โดยทางอ้อม (indirect) โดยใช้เฟสล็อกคูล (Phase-Locked Loop) เนื่องจากลู่อันดับที่สองไม่มีจริง [1] ดังนั้นโครงการนี้จะใช้เฟสล็อกคูลชนิดที่ 2 อันดับที่ 3 (Type 2, 3rd order) ในการสังเคราะห์ความถี่

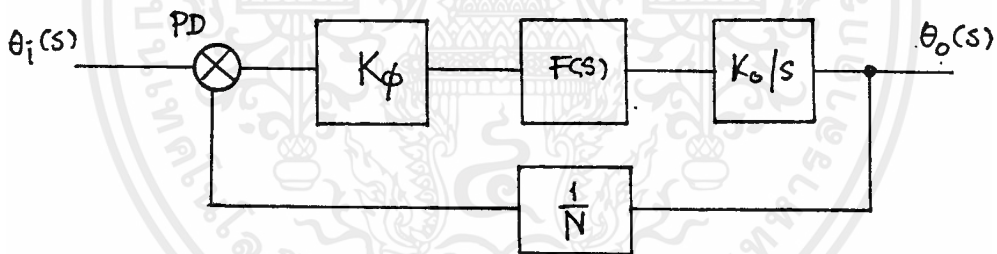
โครงสร้างของลู่อันดับที่สามนั้น จะมีลักษณะคล้ายกับลู่อันดับอื่นๆ เนื่องจากอันดับของลู่อันดับสามารถกำหนดได้จากลู่อันดับฟิลเตอร์ โดย

$$\text{อันดับของลู่อันดับ} = \text{อันดับของลู่อันดับฟิลเตอร์} + 1$$

ดังนั้นเราจึงสามารถสร้างลู่อันดับที่สามได้โดยใช้ลู่อันดับฟิลเตอร์อันดับที่สอง

ส่วนประกอบของลู่อันดับ

วงจรสังเคราะห์ความถี่โดยทั่วๆ ไปจะมีโครงสร้างดังรูปที่ 1 โดยมี θ_i เป็นเฟสอ้างอิงของระบบ



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมโดยทั่วไปของเฟสล็อกคูล

อันดับของลู่อันดับฟิลเตอร์ $F(s)$ จะเป็นตัวกำหนดอันดับของลู่อันดับ K_0/s ในรูป คือ วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน (voltage-controlled oscillator) ซึ่งทำหน้าที่ผลิตความถี่ $\theta_o(s)$ โดยมีวงจรหารแบบไพโรนิกรมได้ $1/N$ เป็นตัวกำหนดความถี่ $\theta_o(s)$ ซึ่งแต่ละส่วนสามารถสรุปแนวทางการออกแบบ ดังนี้

2.1.1 การออกแบบวงจรผลิตความถี่ (Oscillator)

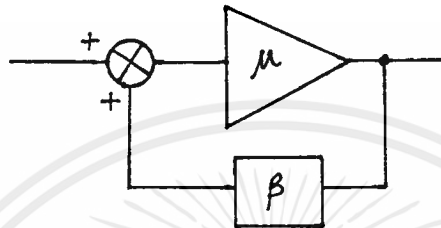
วงจรผลิตความถี่ที่ใช้ในวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคูล จะเป็นวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน การออกแบบสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งในโครงการจะกล่าวถึงวิธีที่นิยมใช้ คือ

วิธีการสังเคราะห์ความต้านทานลบ และการออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ S (s-parameter) [2]

2.1.1.1 การสังเคราะห์ความต้านทานลบ

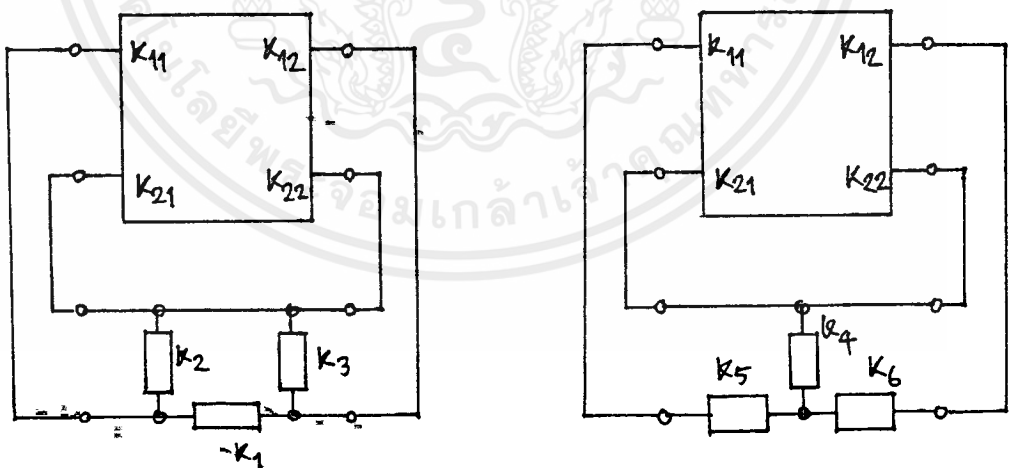
ในการสังเคราะห์ความต้านทานลบ เพื่อให้เกิดการออสซิลเลชันนั้น สามารถพิจารณาได้จากวงจรขยายสัญญาณที่มีการป้อนกลับแบบบวก ดังรูปที่ 2.2 โดยอัตราขยายจะเป็นไปตามสมการที่ 2.1

$$A = \mu / (1 - \mu\beta) \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.2 วงจรขยายป้อนกลับแบบบวก

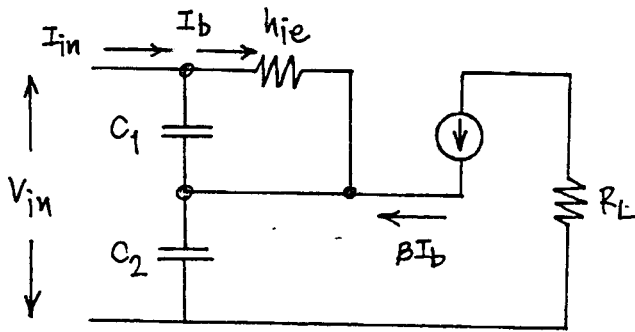
และอัตราขยายจะเป็นอนันต์ เมื่ออัตราขยายลูป (loop gain) เท่ากับ 1 และการเลื่อนเฟส (Phase Shift) เท่ากับ 360 องศา ซึ่งเงื่อนไขดังกล่าวจำเป็นสำหรับการออสซิลเลชัน หรือเรียกว่า Barkhausen Criterion เน็ตเวอร์กที่ใช้สำหรับการป้อนกลับอาจจะเป็นแบบพายหรือที (Pi, T) ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรผลิตความถี่ 2 แบบ

การอธิบายปรากฏการณ์การเกิดความต้านทานลบของเน็ตเวอร์ก 2 พอร์ต จะอธิบายได้

โดยพิจารณาวงจรตามอิมิตเตอร์ (emitter follower) ในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การสังเคราะห์ความต้านทานลบโดยใช้คาปาซิเตอร์เป็นตัวป้อนกลับ

โดยการประมาณว่า $h_{oe} \ll 1/R_L$ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} V_{in} &= I_{in}(X_{c1} + X_{c2}) - I_b(X_{c1} - \beta X_{c2}) \\ I_{in}X_{c1} &= I_b(X_{c1} + h_{ie}) \\ Z_{in} &= V_{in}/I_{in} = \frac{(1+\beta)X_{c1}X_{c2} + h_{ie}(X_{c1} + X_{c2})}{X_{c1} + h_{ie}} \end{aligned}$$

ถ้า $X_{c1} \ll X_{c2}$ จะประมาณ Z_{in} ได้เป็น

$$\begin{aligned} Z_{in} &= \left(\frac{1+\beta}{h_{ie}} \right) X_{c1}X_{c2} + (X_{c1} - X_{c2}) \\ &= \frac{-g_m}{\omega^2 C_1 C_2} + \frac{1}{j\omega [C_1 C_2 / (X_{c1} - X_{c2})]} \end{aligned} \quad (2.2)$$

จาก (2.2) จะพบว่าส่วนจริงของ Z_{in} หรือ r_{in} มีค่าเป็นลบคือ

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

ถ้านำอินดักเตอร์ L ที่มีค่าความต้านทานอนุกรมเท่ากับ R_s ต่อที่อินพุตพอร์ทของวงจร จะได้เงื่อนไขของการออสซิลเลชัน เป็น

$$R_s = \frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2} \quad (2.3)$$

และความถี่ของการออสซิลเลชันหาได้จาก

$$F_o = \frac{1}{2\pi L[C_1 C_2 / (C_1 + C_2)]}$$

ในการออกแบบนั้น จะพยายามใช้ค่า C_1 ให้มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เพื่อให้ $X_{C_1} \ll h_{1o}$ และ C_2 ต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้ $X_{C_1} \ll 1/h_{1o}$ แต่ค่า C_1 และ C_2 จะต้องสัมพันธ์กับสมการที่ (2.4)

$$R_u \ll \frac{g_m}{\omega^2 C_1 C_2} \ll \frac{G}{\omega^2 C_1 C_2} \quad (2.4)$$

โดยที่ G คือค่า g_m ที่มากที่สุด สมการที่ (2.4) นั้นจะเป็นความสัมพันธ์ที่แสดงการออสซิลเลชันยังคงออสซิลเลตต่อเนื่อง ซึ่ง R_u หรือความต้านทานอนุกรมของอินดักเตอร์ L จะต้องมิต่ำน้อยกว่าความต้านทานลบทที่สังเคราะห์ได้

2.1.1.2 การออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ S [2, 3]

เงื่อนไขสำหรับการออสซิลเลชัน โดยพิจารณาในรูปของพารามิเตอร์ S คือ

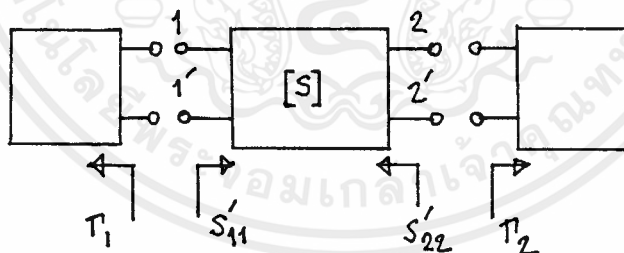
$$k < 1$$

$$\Gamma_1 S'_{11} = 1$$

$$\Gamma_2 S'_{22} = 1$$

(2.5)

การพิจารณาเงื่อนไขดังกล่าวนี้ จะพิจารณาจากรูปที่ 2.5 ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า



==

รูปที่ 2.5 เน็ตเวอร์ก 2 พอร์ตที่ใช้พิจารณาเงื่อนไขของการออสซิลเลชัน

จากรูป สามารถเขียน S'_{22} ได้เป็น

$$S'_{22} = \frac{S_{22} + S_{12} S_{21} \Gamma_1}{1 - S_{11} \Gamma_1}$$

และ
$$S_{11} = \frac{S'_{11} - S_{12}S_{21}\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}$$

$$\frac{1}{S'_{22}} = \frac{1 - S_{11}\Gamma_1}{S_{22} - S_{11}\Gamma_1}$$

โดยการแทนค่า S_{11} จะได้ว่า

$$\frac{1}{S'_{22}} = \frac{(1 - S'_{11}\Gamma_1) + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_1\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2}}{S_{22}(1 - S'_{11}\Gamma_1) + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_1}{1 - S_{22}\Gamma_2}}$$

และแทนค่า $S'_{11}\Gamma_1 = 1$ จะได้

$$\frac{1}{S'_{22}} = \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_1\Gamma_2}{S_{12}S_{21}\Gamma_1} = \Gamma_2 \quad \text{หรือ}$$

$$S'_{22}\Gamma_2 = 1$$

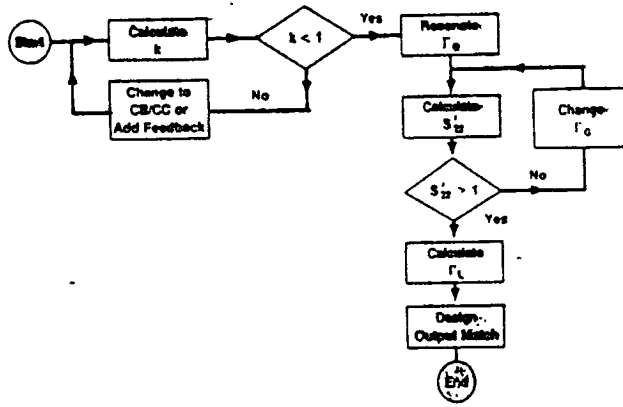
ดังนั้น การออกแบบวงจรออสซิลเลเตอร์ หรือวงจรผลิตความถี่ สามารถสรุปได้ ดังนี้

1. เลือกทรานซิสเตอร์หรืออุปกรณ์แอคทีฟที่มีค่าอัตราขยาย และกำลังเอาต์พุตเพียงพอ ที่ความถี่ที่ใช้งาน โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ S
2. เลือกโทโพโลยีของวงจรที่ทำให้ $k < 1$ ที่ความถี่ออสซิลเลชัน หรือเพิ่มการป้อนกลับถ้า $k > 1$ จนกระทั่ง $k < 1$ โดยที่ k คือ stability factor หาได้จาก

$$k = \frac{1 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 + |D|^2}{2|S_{12}||S_{21}|}$$

$$D = S_{11}S_{22} - S_{12}S_{21}$$

3. เลือกวงจรแมชซึ่งที่โหลดที่ทำให้ $|S'_{11}| > 1$ ตลอดช่วงของความถี่ออสซิลเลชัน
4. หาค่า Γ_1 จาก $\Gamma_1 S_{11} = \bar{1}$
หรืออาจจะเลือกแมชซึ่งจาก Γ_1 ดังรูปที่ 2.6

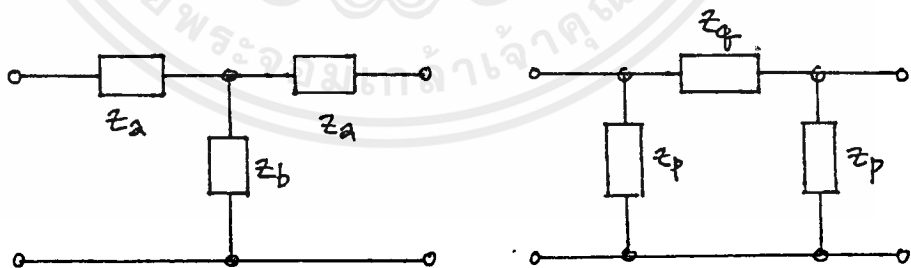


รูปที่ 2.6 โพลว์ชาร์ตแสดงขั้นตอนการออกแบบวงจรผลิตความถี่ โดยเริ่มจากอินพุตไปยังเอาต์พุต

2.1.2 เรโซเนเตอร์แบบค่า Q สูง

จากวิธีออกแบบวงจรผลิตความถี่ทั้งสองวิธีที่ผ่านมา จะพบว่าผลลัพธ์ของทั้งสองวิธีจะได้ค่าของเรโซเนเตอร์ออกมา ดังนั้นการเลือกชนิดของเรโซเนเตอร์จึงมีผลโดยตรงต่อความถี่ของวงจร ค่า Q ของเรโซเนเตอร์ ปกติแล้วจะพยายามให้มีความมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนทางเฟส (Phase noise) จะแปรผกผันกับค่า Q ในโครงการนี้ เลือกใช้เรโซเนเตอร์ที่ทำจากสายโคแอกเซียลแบบกึ่งแข็ง (Semi-rigid Coaxial) ซึ่งเป็นเรโซเนเตอร์ที่มีค่า Q สูงพอสมควร

ค่า Q ของสายโคแอกเซียลแบบกึ่งแข็ง ปกติจะมีค่า Q ที่ยังไม่ถูกโหลดประมาณ 700-800 [4] ในการใช้งานเรามักจะไม่คิดความสูญเสียในเรโซเนเตอร์ โดยมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของสายโคแอกเซียลแบบกึ่งแข็ง



จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่า วงจรสมมูลของสายโคแอกเซียลมี 2 แบบ คือ แบบที่ และแบบพาย ซึ่งปกติเราจะได้แบบพายกัน และไม่คิดค่า Z_p เนื่องจาก Z_p มีค่าน้อยมากถ้าเทียบกับ Z_o โดยเฉพาะที่ความถี่ต่ำๆ (<1GHz) โดยที่ [4]

$$Z_o = jZ_o \sin(pl)$$

$$Z_o = -jZ_o \cot(pl/2)$$

l = ความยาวของสายโคแอกเซียล

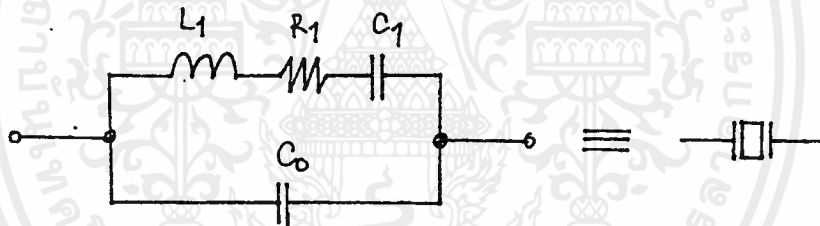
Z_o = Characteristic impedance ของสาย

$$= 2\pi / \lambda_g$$

λ_g = ความยาวคลื่นที่แพร่ในสาย (ขึ้นกับค่า ϵ ของไดอิเล็กทริกในสาย)

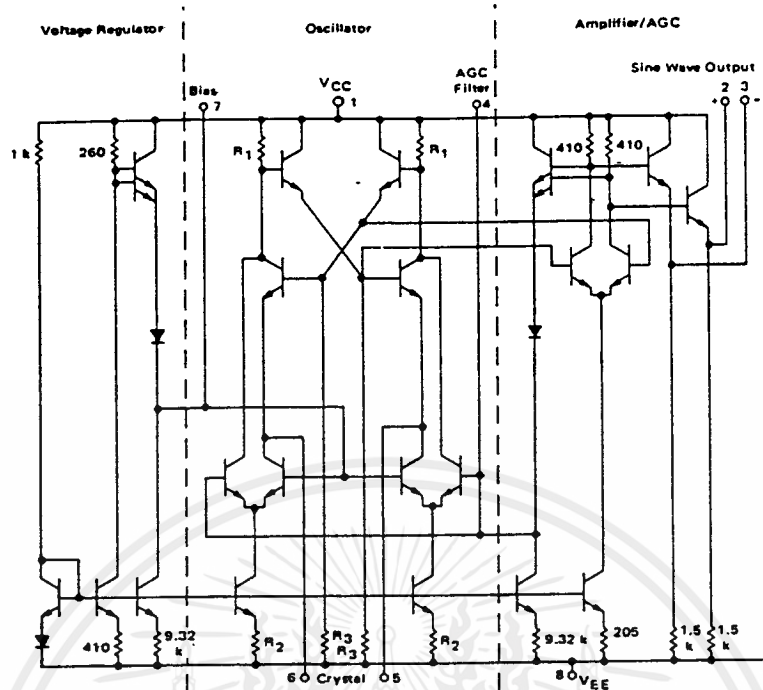
2.1.2 วงจรผลิตความถี่อ้างอิง (Reference Oscillator)

วงจรผลิตความถี่อ้างอิงที่ป้อนให้กับลูป โดยมากจะผลิตจากแหล่งกำเนิดที่มีความเที่ยงตรงสูง เช่น ผลิตจากก๊าซรูบิเดียม ซีเซียม [5] หรืออาจจะผลิตจากผลึกคริสตอล ดังเช่นที่ใช้ในโครงการนี้ก็ได้



รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลย์ของคริสตอล

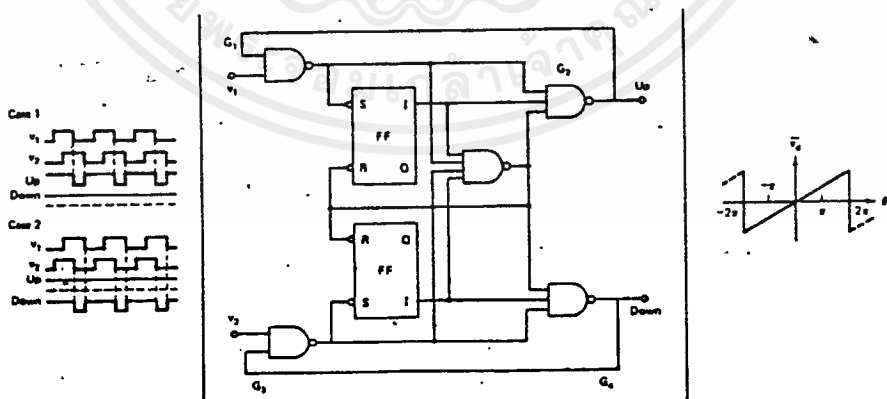
ในที่นี้จะขอกล่าวถึง เฉพาะวงจรผลิตความถี่จากผลึกคริสตอลที่ใช้การป้อนกลับของสัญญาณ เพื่อควบคุมแอมพลิจูดของการออสซิลเลชัน และยังทำให้สัญญาณที่ได้ มีสัญญาณรบกวนทางเฟสต่ำมากๆ [6, 7, 8] วงจรดังกล่าวแสดงดัง ในรูปที่ 2.9



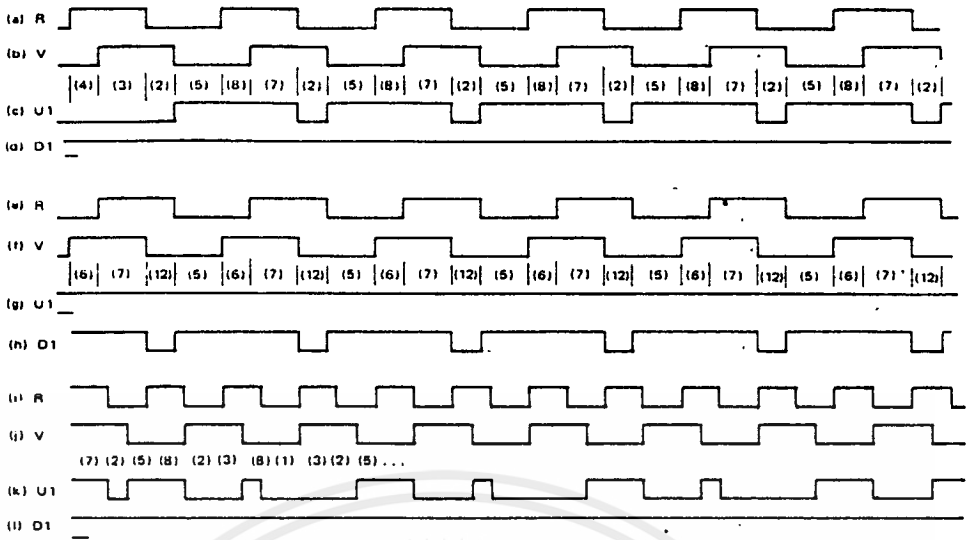
รูปที่ 2.9 วงจรผลิตความถี่ความคมด้วยผลึกคริสตอล

2.1.3 วงจรเฟสดีเทคเตอร์ (Phase Detector)

เฟสดีเทคเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้จะเป็น เฟส-ฟรีควนซีดีเทคเตอร์ หรือเป็น เฟสดี-เทคเตอร์แบบที่ 4 [9] ซึ่งมีเอาท์พุทเป็น ดับเบิลเอนด์ (Double-ended) ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรเฟส-ฟรีควนซีดีเทคเตอร์ แบบที่ 4

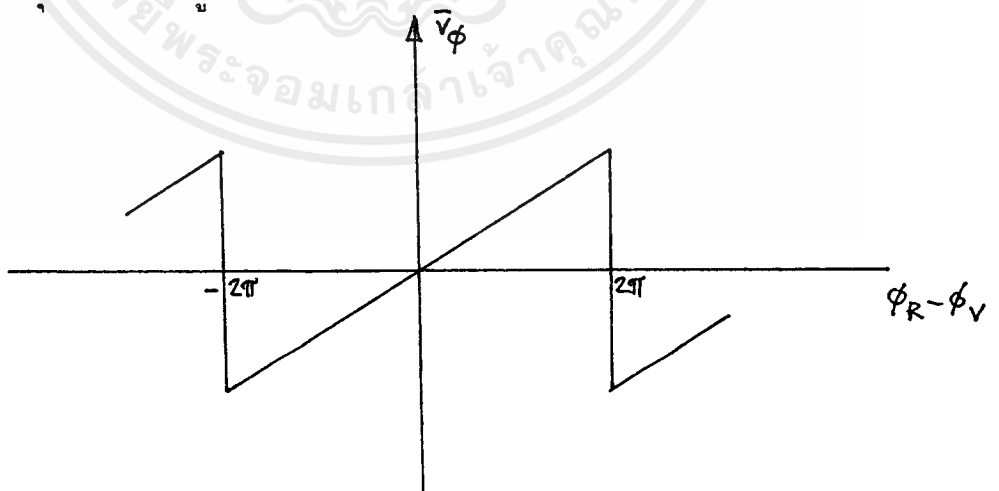


รูปที่ 2.11 แสดงรูปสัญญาณของวงจรมัลติเฟส-ฟรีควเอนซีดีเทคเตอร์ ในรูปที่ 2.10

วงจรมัลติเฟสดีเทคเตอร์ในวงจรมัลติเฟสล็อคคัล จะทำหน้าที่เปรียบเทียบความต่างเฟส เอาท์พุทของวงจรมัลติเฟสจะแปรผันกับความต่างเฟสของอินพุตทั้งสอง โดย

$$V_{\phi} = K_{\phi}(\theta_R - \theta_V) \quad (2.6)$$

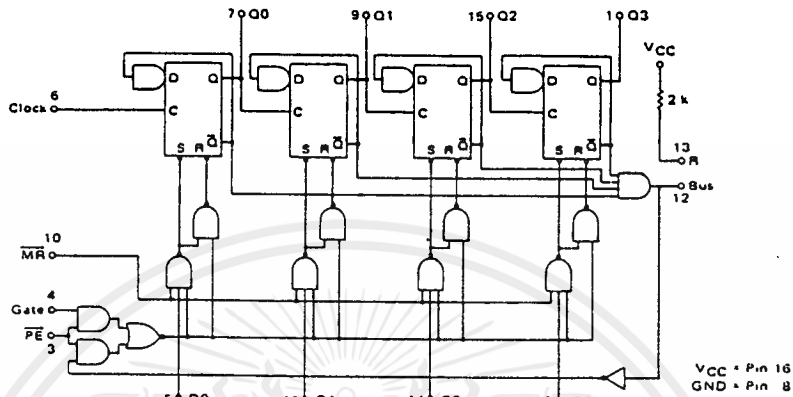
เมื่อ K_{ϕ} เป็นเกนเฟลคเตอร์ มีหน่วยเป็น โวลต์/เรเดียน ความสัมพันธ์ของ V_{ϕ} ต่ำ ความต่างเฟสที่อินพุต แสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{ϕ} และความต่างเฟส

2.1.4 วงจรหารความถี่แบบโปรแกรมได้ (Programmable Divider)

วงจรถหารความถี่แบบโปรแกรมได้ที่นิยมใช้ในวงจรถ่ายเฟสล็อกคูลูป ส่วนมากจะนิยมใช้วงจรถับแบบโมดูลุโล-N (modulo-N Counter) ซึ่งสามารถคาดเดาได้ ซึ่งปัจจุบัน วงจรถหารประเภทนี้จะมีให้ใช้งานในรูปของวงจรรวมแล้ว รูปตัวอย่างของวงจรถับแบบโมดูลุโล-N แสดงในรูปที่ 2.13

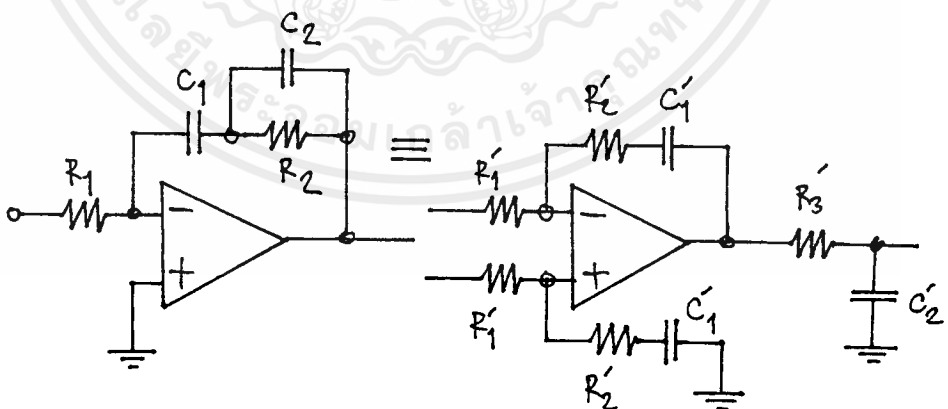


รูปที่ 2.13 แสดงวงจรถับแบบโมดูลุโล-N โดยที่ N เท่ากับ 16

2.1.5 ลูปฟิลเตอร์ (Loop Filter)

ลูปฟิลเตอร์ในวงจรถ่ายเฟสล็อกคูลูปมีความสำคัญที่สุดของระบบก็ว่าได้ เนื่องจากคุณสมบัติทางไดนามิกของลูป (dynamic) จะถูกกำหนดด้วยลูปฟิลเตอร์นี้

ในโครงงานนี้จะกล่าวถึงเพียงลูปฟิลเตอร์อันดับที่ 2 ที่ใช้ในเฟสล็อกคูลูปอันดับที่ 3 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.14 เท่านั้น



รูปที่ 2.14 แสดงวงจรถ่ายเฟสล็อกคูลูปอันดับที่ 3

จากรูปที่ 2.14 ทรานสเฟอว์ฟังก์ชันของวงจรถ่ายเท่ากับ

$$F(s) = \frac{ST_2 + 1}{ST_1(ST_3 + 1)} \quad (2.7)$$

$$\text{เมื่อ } T_1 = R_1 C_1 \quad (2.8)$$

$$T_2 = R_2 (C_1 + C_2) \quad (2.9)$$

$$T_3 = R_2 C_2 \quad (2.10)$$

ในการออกแบบวงจรถ่ายเฟสล็คคูลูปนี้ ในโครงงานนี้เนื่องจากใช้ลู่อันดับที่ 3 การออกแบบจะสามารถทำได้ง่ายโดยการกำหนดช่วงความถี่ของลู่อุป (Loop bandwidth) และ เฟสมาร์จิน (Phase margin) ของลู่อุปเสียก่อน กล่าวคือ [10]

$$\text{Loop bandwidth} = \omega$$

$$\text{Phase margin} = \phi$$

ขั้นแรกคำนวณค่า T_3 จากความสัมพันธ์

$$T_3 = \frac{\text{Sec } \phi - \text{Tan } \phi}{\omega} \quad (2.11)$$

และค่าเวลาคงตัว (time constant) อื่นๆ จาก

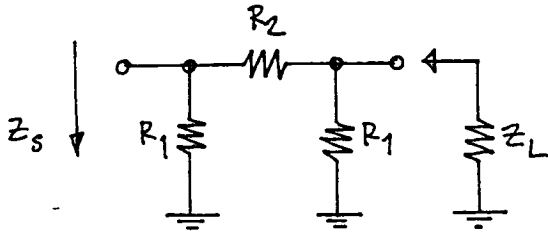
$$T_2 = \frac{1}{\omega^2 T_3} \quad (2.12)$$

$$T_1 = \frac{K_\phi K_v}{N\omega^2} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_2^2}{1 + \omega^2 T_3^2}} \quad (2.13)$$

หลังจากนั้นใช้ค่าเวลาคงตัวทั้งหมดที่คำนวณได้ หาค่าอุปกรณ์จากสมการ 2.7 ถึง 2.10 ก็จะได้วงจรถ่ายฟิลเตอร์อันดับสอง

2.2 วงจรถ่ายลดทอนสัญญาณ (Attenuator)

วงจรถ่ายลดทอนสัญญาณในโครงงานทำหน้าที่ควบคุมกำลังส่งที่เอาต์พุตของวงจรถ่ายขยายกำลังย่านความถี่สูง โดยเป็นวงจรถ่ายพาสซีฟ (Passive) ซึ่งมีอยู่ 3 แบบคือ แบบพาย (Pi), แบบที (T) และแบบแอล (L) ดังแสดงในรูปที่ 2.15

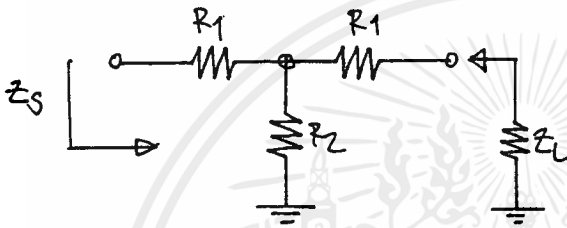


$$R_1 = Z \cdot \frac{10^{0.05A} + 1}{10^{0.05A} - 1}$$

$$R_2 = \frac{Z R_1 (10^{0.05A} + 1)}{Z + R_1}$$

$$Z_S = Z_L$$

(ก)



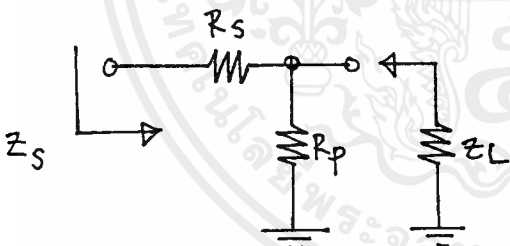
$$R_1 = Z \cdot \frac{10^{0.05A} - 1}{10^{0.05A} + 1}$$

$$R_2 = \frac{-R_1 + Z}{10^{0.05A} - 1}$$

$$Z_S = Z_L$$

(ข)

ให้ $Z_S > Z_L$



$$R_s = \sqrt{Z_s (Z_s - Z_L)}$$

$$R_p = \frac{Z_s Z_L}{R_s}$$

$$A = 20 \log \left[\frac{(Z_L + R) \sqrt{Z_s Z_L}}{Z_L R_p} \right]$$

(ค)

รูปที่ 2.15 แสดงวงจรลดทอนสัญญาณ 3 แบบ
(ก) แบบพาย (ข) แบบที และ (ค) แบบแอล

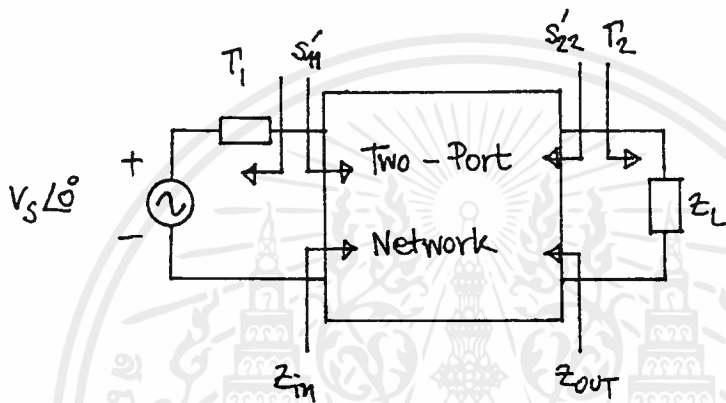
2.3 วงจรขยายสัญญาณ (Small-Signal Amplifier)

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็ก (Small-Signal) ในย่านความถี่สูง สิ่งที่

สำคัญที่จะต้องพิจารณา คือ เสถียรภาพของวงจร วิธีการออกแบบที่เห็นภาพจนได้ชัดเจนและใช้ได้ผลดี โดยเฉพาะที่ความถี่สูงวิธีหนึ่ง คือ การออกแบบโดยใช้พารามิเตอร์ S ซึ่งวิธีออกแบบจริงนั้นเป็นขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อน จึงขอสรุปวิธีการออกแบบอย่างคร่าวๆ ดังนี้

2.3.1 การพิจารณาเสถียรภาพของวงจร

ในเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตใดๆ ไม่ การออสซิลเลชันหรือการที่วงจรไม่มีเสถียรภาพ (Stability) นั้นจะเกิดเมื่ออินพุตพอร์ท และ/หรือ เอาท์พุตพอร์ทที่มีความต้านทานลบเกิดขึ้นซึ่งได้แสดงไว้แล้วในเรื่องการออกแบบวงจรผลิตความถี่โดยใช้พารามิเตอร์ S ดังนั้นในทางตรงกันข้ามจะแสดงได้ว่าเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตใดๆ จะมีเสถียรภาพเมื่อ [11, 12]



รูปที่ 2.16 แสดงรูปที่ใช้พิจารณาเสถียรภาพของเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ต

$$|\Gamma_1| < 1 \text{ และ } |\Gamma_2| < 1 \quad (2.14)$$

$$|S'_{11}| = \left| S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_2}{1 - S_{22} \Gamma_2} \right| < 1 \quad (2.15)$$

$$S_{22} = \left| S_{22} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_1}{1 - S_{11} \Gamma_1} \right| < 1 \quad (2.16)$$

ถ้าเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตใด มีคุณสมบัติตาม (2.14) ถึง (2.16) จะเรียกว่าเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตนั้นเสถียรภาพอย่างไม่มีเงื่อนไข (unconditionally stability) เสถียรภาพของเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตยังสามารถพิจารณาได้อีกเป็น เสถียรภาพอย่างมีเงื่อนไข (Potentially unstable) กล่าวคือ จะมีค่า Γ_1 และ Γ_2 บางค่าเท่านั้นที่ทำให้ไม่เกิดความต้านทานลบที่อินพุตพอร์ทและ/หรือเอาท์พุตพอร์ท ต่างจากกรณีของความเสถียรภาพอย่างไม่มีเงื่อนไขซึ่งจะไม่เกิดความต้านทานลบ ไม่ว่า Γ_1 และ Γ_2 จะเป็นค่าเท่าใด

การพิจารณาเสถียรภาพ เพื่อให้เห็นภาพพจน์มากที่สุดจะนิยมใช้การวาดวงกลมของความเสถียร (Stability circle) บนสมิทชาร์ท (smith chart) ซึ่งสามารถสรุปความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์ S ของเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ต และสมการของวงกลมได้ดังนี้

- วงกลมของความเสถียรที่เอาท์พุท ($|S'_{11}| = 1$)

$$r_L = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{22}|^2 - |D|^2} \right|$$

$$C_L = \frac{(S_{22} - DS_{11}^*)^*}{|S_{22}|^2 - |D|^2}$$

- วงกลมของความเสถียรที่อินพุท

$$r_S = \left| \frac{S_{12}S_{21}}{|S_{11}|^2 - |D|^2} \right|$$

$$C_S = \frac{(S_{11} - DS_{22}^*)^*}{|S_{11}|^2 - |D|^2}$$

เมื่อ r คือ รัศมีของวงกลม

C คือ จุดศูนย์กลางของวงกลม

การพิจารณาเสถียรภาพจะสังเกตจากพื้นที่ครอบคลุมค่าโหลด 50 โอห์ม ดังรูปที่ 2.17

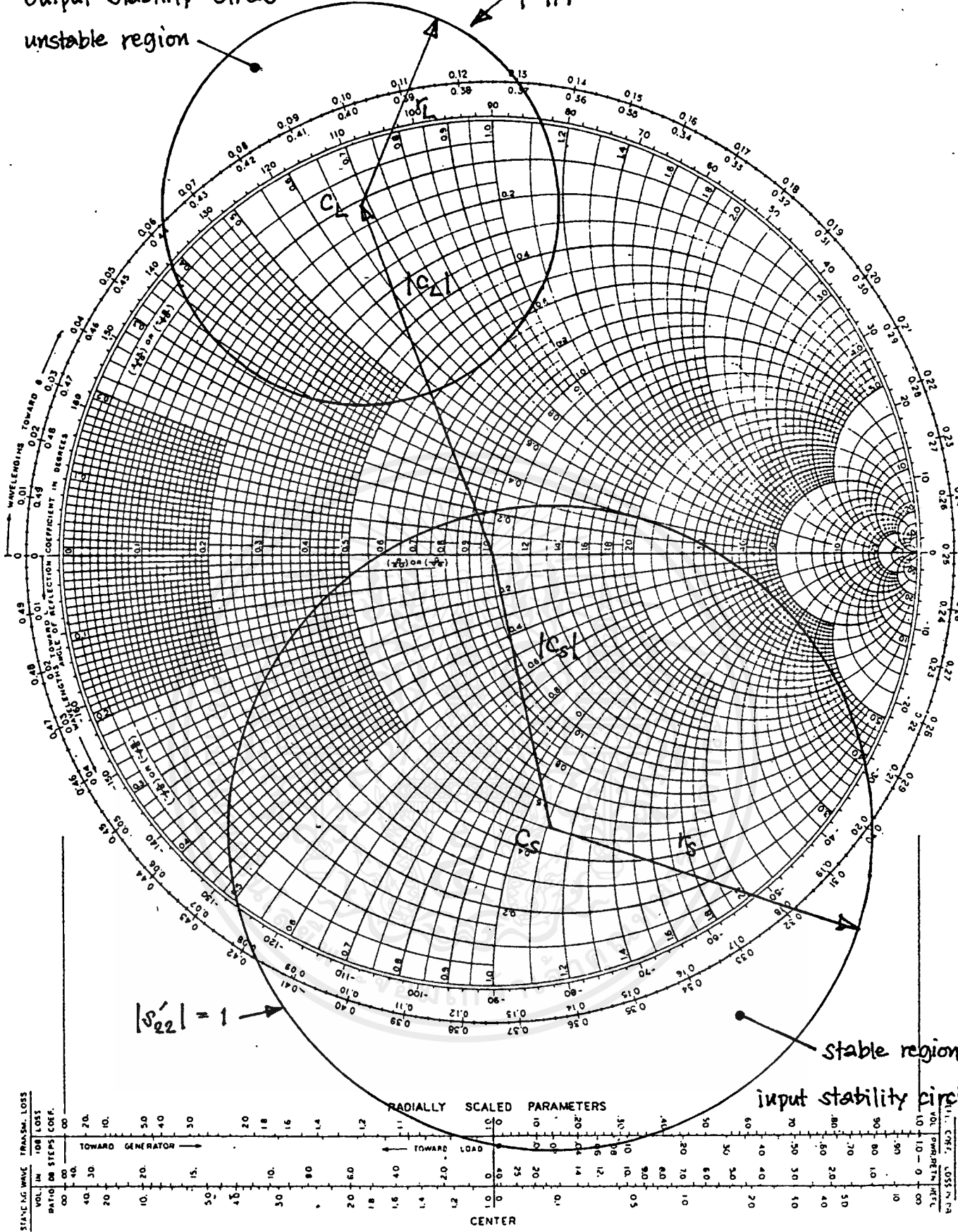
2.3.2 อัตราขยายกำลัง (Power Gain)

โดยปกติ การพิจารณาเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ต เราสามารถพิจารณา ได้เป็น 2 แบบ คือ

1. เน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตแบบทางเดียว (unilateral) คือเน็ตเวิร์กที่มีพารามิเตอร์ส่งย้อนกลับ (Reverse Transmission Parameter) เป็นศูนย์ เน็ตเวิร์กประเภทนี้จะไม่พบได้บ่อยนัก จึงไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้

2. เน็ตเวิร์ก 2 พอร์ตแบบสองทาง (bilateral) คือเน็ตเวิร์กที่มีพารามิเตอร์ส่งย้อนกลับไม่เท่ากับศูนย์ เช่น $S_{12} \neq 0$ และ $S_{21} \neq 0$

การพิจารณาอัตราขยายกำลัง ในที่นี้ จะพิจารณาเฉพาะเน็ตเวิร์กแบบสองทาง ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ของอัตราขยายกำลังที่สำคัญได้ คือ



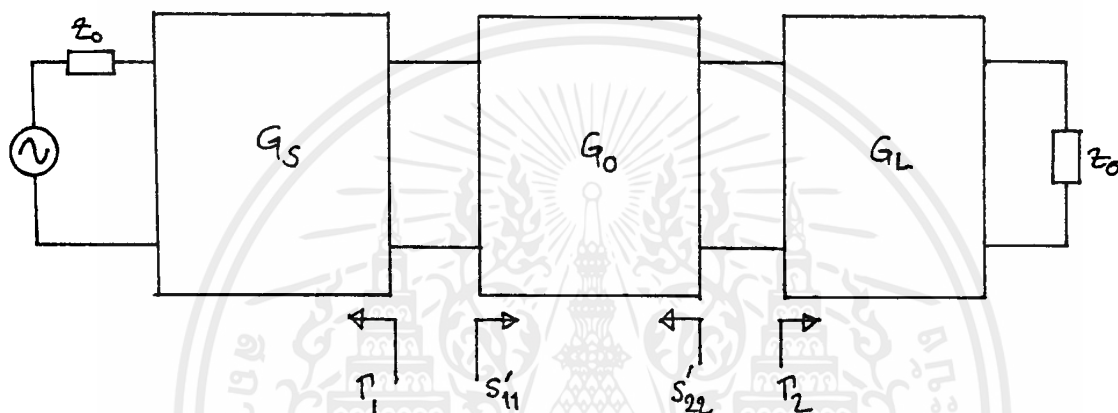
รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างการวิเคราะห์เสถียรภาพของเน็ตเวิร์ก 2 พอร์ต โดยใช้สมิธชาร์ท

- อัตราขยายกำลัง (Operating Power Gain)

$$G_p = \frac{P_L}{P_{in}} = \frac{\text{power delivered to the load}}{\text{power input to the network}}$$

- อัตราขยายกำลังส่งผ่าน (Transducer Gain)

$$G_T = \frac{P_L}{P_{AVS}} = \frac{\text{power delivered to load}}{\text{power available from the source}}$$



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรที่ใช้พิจารณาหาอัตราขยายกำลัง

การพิจารณาอัตราขยายกำลังจะพิจารณาจากรูปที่ 2.18 โดยพิจารณาที่อัตรากำลังส่งผ่านเป็นอันดับแรก โดยจะเขียนอัตราขยายกำลังส่งผ่านได้เป็น [2, 11, 15]

ในกรณีของการเสถียรแบบไม่มีเงื่อนไข ($k > 1$ และ $|D| < 1$)

$$G_T = G_S G_O G_L$$

เมื่อ

$$G_S = \frac{1 - |\Gamma_1|^2}{|1 - S_{11}\Gamma_1|^2} \quad (2.17)$$

$$G_O = |S_{21}|^2 \quad (2.18)$$

$$G_L = \frac{1 - |\Gamma_2|^2}{1 - S_{22}\Gamma_2} \quad (2.19)$$

ขั้นตอนการออกแบบสรุปได้ดังนี้

1. จาก (2.19) วาดวงกลมอัตราขยายกำลังคงที่ (constant-gain circle)

ของ G_L จาก [15]

$$g_1 = G_1 (1 - |S_{11}|^2)$$

รัศมี $R_1 = \frac{\sqrt{1 - g_1} (1 - |S_{11}|^2)}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_1)}$

จุดศูนย์กลาง $U_c = \frac{g_1 A_{11}}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_1)}$

$$V_c = \frac{-g_1 A_{11}}{1 - |S_{11}|^2 (1 - g_1)}$$

เมื่อ i คือ 1 หรือ 2 และเลือกค่า Γ_2 ที่ให้อัตราขยายกำลังเป็น G_L

2. คำนวณ S'_{11} จาก $S'_{11} = S_{11} + \frac{S_{12} S_{21} \Gamma_2}{1 - S_{22} \Gamma_2}$ ซึ่งจะเห็นว่า

ค่า S'_{11} ขึ้นกับค่า Γ_2 และ G_S ขึ้นกับค่า G_L

3. จาก (2.17) วาดวงกลมอัตราขยายกำลังคงที่ของ G_S โดยแทนที่ S_{11} ด้วย S'_{11} และเลือกค่า Γ_1 ที่ต้องการสำหรับที่ G_S ถ้าไม่ได้ G_S ตามต้องการต้องเลือก Γ_2 ใหม่ แล้วทำซ้ำข้อ 1

4. ออกแบบแมชชีนเน็ตเวิร์ก

สำหรับกรณีของความเสถียรแบบมีเงื่อนไข (Potentially Unstable) จะไม่นิยมออกแบบด้วยอัตราขยายกำลังส่งผ่าน แต่จะใช้อัตราขยายกำลัง (operating gain) ในการออกแบบ ดังจะได้กล่าวต่อไป

- อัตราขยายกำลัง (Operating Gain)

กรณีของการเสถียรแบบไม่มีเงื่อนไข (Unconditionally Stable)

$$G_p = \frac{|S_{21}|^2 (1 - |\Gamma_2|^2)}{\left(1 - \left| \frac{S_{11} - D\Gamma_2}{1 - S_{22}\Gamma_2} \right| \right) |1 - S_{22}\Gamma_2|^2} \quad (2.20)$$

$$= |S_{21}|^2 g_p$$

$$g_p = \frac{1 - |\Gamma_2|^2}{|1 - S_{22}\Gamma_2|^2 - |S_{11} - D\Gamma_2|^2}$$

$$= \frac{1 - |\Gamma_2|^2}{1 - |S_{11}|^2 + |\Gamma_2|^2(|S_{22}|^2 - |D|^2) - 2\text{Re}[\Gamma_2 C_2]}$$

ซึ่ง $C_2 = S_{22} - DS_{11}^*$

จุดศูนย์กลางของวงกลมหาได้จาก

$$U_p = \frac{g_p \text{Re}[C_2^*]}{1 + g_p(|S_{22}|^2 - |D|^2)} \quad (2.21)$$

$$U_p = \frac{g_p \text{Im}[C_2^*]}{1 + g_p(|S_{22}|^2 - |D|^2)} \quad (2.22)$$

และรัศมีหาได้จาก

$$R_p = \frac{[1 - 2k|S_{12}S_{21}|g_p + |S_{12}S_{21}|^2 g_p]^{1/2}}{|1 - g_p(|S_{22}|^2 - |D|^2)|} \quad (2.23)$$

กรณีของการเสถียรแบบมีเงื่อนไข (Potentially Unstable)

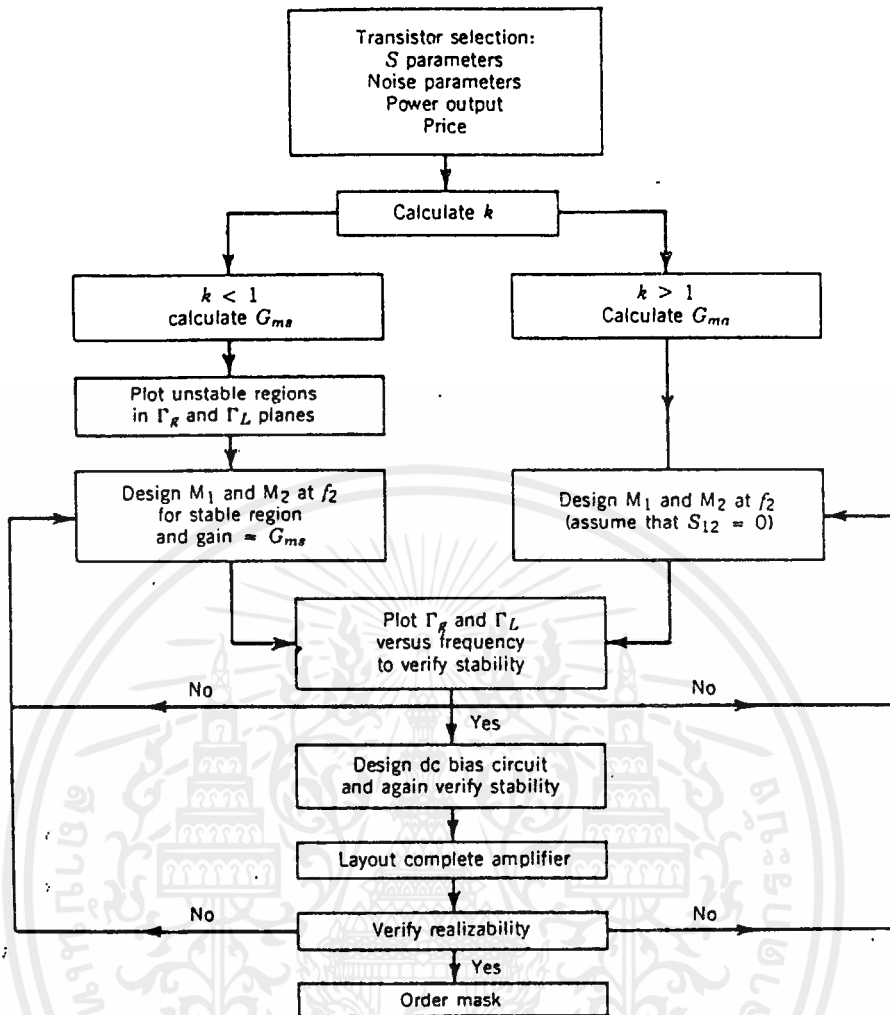
สรุปขั้นตอนการออกแบบได้ ดังนี้

1. จากค่า G_p วาดวงกลมอัตราขยายกำลังคงที่จาก (2.21) ถึง (2.23) และวาดวงกลมของความเสถียรทางเอพท์พุด เลือกค่า Γ_2 ที่อยู่ในพื้นที่ที่เสถียร แต่อย่าใกล้วงกลมมากนัก
2. คำนวณ S_{11} และวาดวงกลมของความเสถียรที่อินพุต
3. ถ้าค่า $\Gamma_1 = S_{11}^*$ อยู่ในพื้นที่ที่ไม่เสถียรหรืออยู่ใกล้มากเกินไป ต้องเลือกค่า G_p ใหม่ หรือค่า Γ_1 ใหม่

จากที่กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปเป็น แผนภาพดังรูปที่ 2.19

2.4 การออกแบบวงจรแมชชิงด้วยคอมพิวเตอร์ [17]

จากที่ผ่านมา จะพบว่าวงจรหรือเน็ตเวิร์กที่มีปรากฏอยู่เสมอในวงจรย่านความถี่สูง คือ วงจรแมชชิง อาจถือได้ว่า การออกแบบวงจรแมชชิงเป็นส่วนสำคัญมากที่สุดของวงจรประเภทนี้ ดังนั้น เราจะพิจารณาดังวงจรแมชชิงที่นิยมใช้กันมากในวงจรย่านความถี่สูง ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งในรูปที่ 2.20 ได้แสดงทั้งรูปและตารางค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์เน็ตเวิร์กที่ค่า Q และโพลดิอิมพีแดนซ์ต่างๆ โดยเน็ตเวิร์กทั้ง 4 มีข้อจำกัดต่างกันดังนี้



รูปที่ 2.19 ขั้นตอนการออกแบบวงจรมายสัญญาณความถี่สูง

- เน็ตเวอร์ก A ใช้ในกรณีที่มีค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมของอุปกรณ์ที่ต้องการแมชจะมีค่าเกิน 50 โอห์มไม่ได้
- เน็ตเวอร์ก B ใช้ในที่ ค่าส่วนจริงของซัสเซปแตนซ์ (susceptance) ที่ต่อขนานของอุปกรณ์ จะต้องสูงกว่า 50 โอห์ม ไม่เช่นนั้นค่าอินดักแตนซ์และคาปาซิแตนซ์จะมีค่าสูงและต่ำเกิน
- เน็ตเวอร์ก C ใช้ในกรณี ที่มีค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ที่ต่ออนุกรมของอุปกรณ์ หรือค่าส่วนจริงของซัสเซปแตนซ์ที่ต่อขนานของอุปกรณ์มีค่าต่ำกว่า 50 โอห์ม
- เน็ตเวอร์ก D สามารถใช้ได้กับค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ ที่ต่ออนุกรมของอุปกรณ์ต่ำและสูงกว่า 50 โอห์ม

รูปที่ 2.20 การออกแบบวงจรแมชชิง (matching)

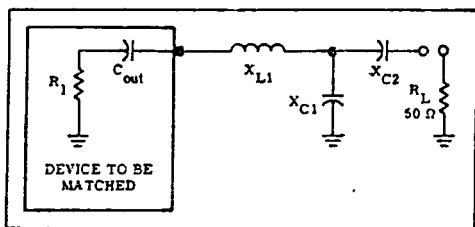


FIGURE 1 - NETWORK A

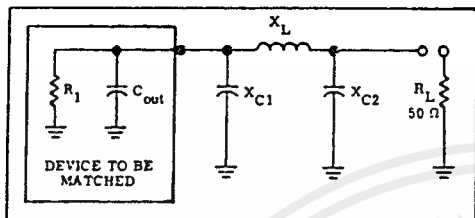
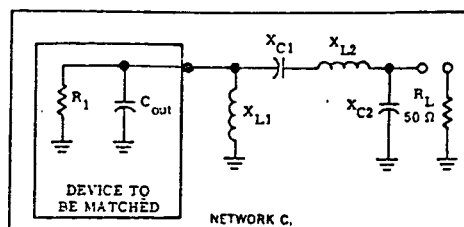
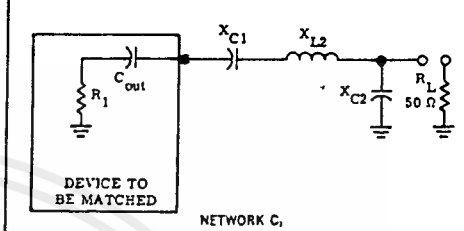


FIGURE 2 - NETWORK B



NETWORK C.



NETWORK C.

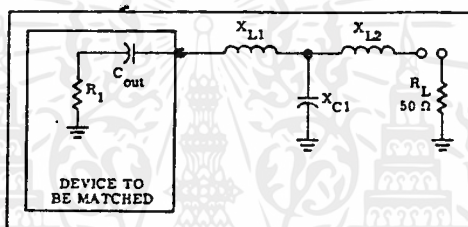


FIGURE 4 - NETWORK D

To convert a parallel resistance and reactance combination to series:

$$R_s = \frac{R_p}{1 + (R_p/X_p)^2}$$

$$X_s = \frac{R_p X_p}{R_s}$$

To convert a series resistance and reactance combination to parallel:

$$R_p = R_s [1 + (X_s/R_s)^2]$$

$$X_p = \frac{R_p X_s}{R_s}$$

To solve network A:

1. Select a Q

$$X_{L1} = QR_1 + X_{C\ out}$$

$$X_{C2} = AR_L$$

$$X_{C1} = \frac{(B/A)(B/Q)}{(B/A) - (B/Q)} = \frac{B}{Q - A}$$

$$\text{where } A = \sqrt{\left[\frac{R_1(1 - Q^2)}{R_L}\right] - 1}$$

$$B = R_1(1 - Q^2)$$

To solve network B:

1. Select a Q

$$X_{C1} = R_1/Q$$

$$X_{C2} = R_L \sqrt{(Q^2 - 1) - (R_1/R_L)}$$

$$X_L = \frac{QR_1 - (R_1 R_L / X_{C2})}{Q^2 - 1}$$

To solve network C₁:

1. Select a Q

$$X_{L1} = X_{C\ out}$$

$$X_{C1} = QR_1$$

$$X_{C2} = R_L \sqrt{\frac{R_1}{R_L - R_1}}$$

$$X_{L2} = X_{C1} \cdot \left(\frac{R_1 R_L}{X_{C2}}\right)$$

To solve network C₂:

1. Select a Q

2. L₁ is not used in this network

$$X_{C1} = QR_1$$

$$X_{C2} = R_L \sqrt{\frac{R_1}{R_L - R_1}}$$

$$X_{L2} = X_{C1} \cdot \left(\frac{R_1 R_L}{X_{C2}}\right) \cdot X_{C\ out}$$

To solve network D:

1. Select a Q

$$X_{L1} = (R_1 Q) - X_{C\ out}$$

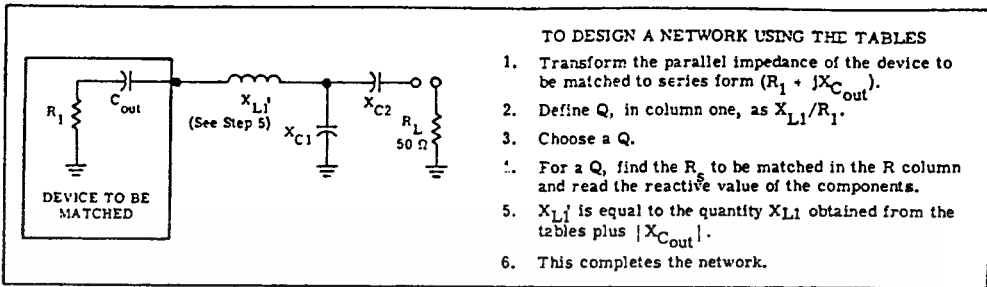
$$X_{L2} = R_L B$$

$$X_{C1} = \frac{(A/Q)(A/B)}{(A/Q) - (A/B)} = \frac{A}{Q - B}$$

where A = R₁(1 - Q²)

$$B = \sqrt{\left[\frac{A}{R_L}\right] - 1}$$

NETWORK A



Q	X_{L1}	X_{C1}	X_{C2}	R_1
1	26	65	10	26
1	27	75.3	14.14	27
1	28	85.68	17.32	28
1	29	96.66	20	29
1	30	108.5	22.36	30
1	32	136	26.46	32
1	34	170	30	34
1	36	213.8	33.16	36
1	38	272.5	36.05	38
1	40	355	38.7	40
1	42	479	41.23	42
1	44	686.32	43.59	44
1	46	1102	45.83	46
1	48	2351	48	48
2	22	32.7	15.8	11
2	24	38.6	22.4	12
2	26	45	27.4	13
2	28	51.2	31.6	14
2	30	58	35.4	15
2	32	65.3	38.7	16
2	34	73.1	41.8	17
2	36	81.4	44.7	18
2	38	90.3	47.4	19
2	40	100	50	20
2	42	110.4	52.4	21
2	44	122	55	22
2	46	134	57	23
2	48	147	59	24
2	50	161	61	25
2	52	177	63	26
2	54	194	65	27
2	56	213	67	28
2	58	233	69	29
2	60	256	71	30
2	64	310	74	32
2	68	377	77	34
2	72	464	81	36
2	76	582	84	38
2	80	746	87	40
2	84	995	89	42
2	88	1409	92	44
2	92	2241	95	46
2	96	4739	97	48
3	18	23.5	22.3	6
3	21	29.6	31.6	7
3	24	35.9	38.7	8
3	27	42.7	44.7	9
3	30	50	50	10
3	33	57.8	54.8	11
3	36	66	59	12
3	39	75	63.2	13

Q	X_{L1}	X_{C1}	X_{C2}	R_1
3	42	84	67	14
3	45	95	71	15
3	48	105	74	16
3	51	117	77	17
3	54	130	81	18
3	57	143	84	19
3	60	158	87	20
3	63	173	89	21
3	66	190	92	22
3	69	209	95	23
3	72	228	97	24
3	75	250	100	25
3	78	274	102	26
3	81	299	105	27
3	84	327	107	28
3	87	358	110	29
3	90	393	112	30
3	96	473	116	32
3	102	575	120	34
3	108	706	124	36
3	114	882	128	38
3	120	1129	132	40
3	126	1502	136	42
3	132	2124	140	44
3	138	3372	143	46
3	144	7119	146	48
4	12	13.2	7.1	3
4	16	20	30	4
4	20	26.9	41.8	5
4	24	34.2	51	6
4	28	42.1	58.7	7
4	32	50.6	66	8
4	36	60	72	9
4	40	69	77	10
4	44	80	83	11
4	48	91	88	12
4	52	103	92	13
4	56	115	97	14
4	60	129	101	15
4	64	144	105	16
4	68	159	109	17
4	72	176	113	18
4	76	194	117	19
4	80	214	120	20
4	84	235	124	21
4	88	257	127	22
4	92	282	131	23
4	96	308	134	24
4	100	337	137	25
4	104	368	140	26
4	108	403	143	27

Q	X_{L1}	X_{C1}	X_{C2}	R_1
4	112	440	146	28
4	116	482	149	29
4	120	527	152	30
4	128	635	157	32
4	136	770	162	34
4	144	945	168	36
4	152	1180	173	38
4	160	1510	177	40
4	168	2007	182	42
4	176	2837	187	44
4	184	4500	191	46
4	192	9497	196	48
5	10	10.8	10	2
5	15	18.3	37.4	3
5	20	26.3	52	4
5	25	34.8	63.2	5
5	30	44	73	6
5	35	54	81	7
5	40	65	89	8
5	45	76	96	9
5	50	88	102	10
5	55	101	108	11
5	60	115	114	12
5	65	130	120	13
5	70	146	125	14
5	75	163	130	15
5	80	181	135	16
5	85	201	140	17
5	90	222	145	18
5	95	245	149	19
5	100	269	153	20
5	105	295	157	21
5	110	323	162	22
5	115	354	166	23
5	120	387	169	24
5	125	423	173	25
5	130	462	177	26
5	135	505	181	27
5	140	553	184	28
5	145	604	188	29
5	150	662	191	30
5	160	796	198	32
5	170	965	204	34
5	180	1184	210	36
5	190	1477	217	38
5	200	1890	222	40
5	210	2510	228	42
5	220	3548	234	44
5	230	5628	239	46
5	240	11874	245	48

Q	X _{L1}	X _{C1}	X _{C2}	R ₁
6	12	13.9	34.6	2
6	18	22.7	55.2	3
6	24	32.2	70	4
6	30	42.5	82	5
6	36	53.6	93	6
6	42	65.5	102	7
6	48	78	110	8
6	54	92	119	9
6	60	107	126	10
6	66	122	133	11
6	72	139	140	12
6	78	157	147	13
6	84	176	153	14
6	90	197	159	15
6	96	219	165	16
6	102	242	170	17
6	108	267	175	18
6	114	295	181	19
6	120	324	186	20
6	126	355	191	21
6	132	389	195	22
6	138	426	200	23
6	144	466	205	24
6	150	509	209	25
6	156	556	214	26
6	162	608	218	27
6	168	664	222	28
6	174	727	226	29
6	180	795	230	30
6	192	957	238	32
6	204	1160	246	34
6	216	1422	253	36
6	228	1775	260	38
6	240	2270	267	40
6	252	3015	274	42
6	264	4260	281	44
6	276	6755	287	46
6	288	14250	294	48
7	14	16.7	50	2
7	21	26.8	71	3
7	28	38	87	4
7	35	50	100	5
7	42	63	112	6
7	49	77	122	7
7	56	92	132	8
7	63	108	141	9
7	70	125	150	10
7	77	143	158	11
7	84	163	166	12
7	91	184	173	13
7	98	206	180	14
7	105	230	187	15
7	112	256	193	16
7	119	283	200	17
7	126	313	206	18
7	133	344	212	19
7	140	379	218	20
7	147	415	224	21
7	154	455	229	22
7	161	498	234	23
7	168	544	239	24
7	175	595	245	25
7	182	650	250	26

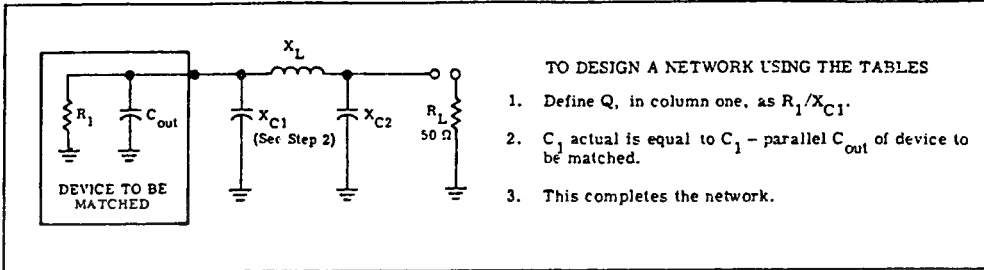
Q	X _{L1}	X _{C1}	X _{C2}	R ₁
7	189	710	255	27
7	196	776	260	28
7	203	849	265	29
7	210	929	269	30
7	224	1117	278	32
7	238	1354	287	34
7	252	1661	296	36
7	266	2071	304	38
7	280	2649	312	40
7	294	3518	320	42
7	308	4971	328	44
7	322	7882	335	46
7	336	16626	343	48
8	8	8.7	27.4	1
8	16	19.3	63.2	2
8	24	31	85	3
8	32	43.6	102	4
8	40	57.4	117	5
8	48	72	130	6
8	56	88	142	7
8	64	105	153	8
8	72	124	164	9
8	80	143	173	10
8	88	164	182	11
8	96	187	191	12
8	104	211	199	13
8	112	236	207	14
8	120	264	215	15
8	128	293	222	16
8	136	324	230	17
8	144	358	237	18
8	152	394	243	19
8	160	433	250	20
8	168	475	256	21
8	176	521	263	22
8	184	570	269	23
8	192	623	275	24
8	200	681	281	25
8	208	744	286	26
8	216	812	292	27
8	224	888	297	28
8	232	971	303	29
8	240	1062	308	30
8	256	1277	318	32
8	272	1548	329	34
8	288	1899	338	36
8	304	2368	348	38
8	320	3028	357	40
8	336	4022	366	42
8	352	5682	375	44
8	368	9009	383	46
9	9	10	40	1
9	18	21.9	76	2
9	27	35	99	3
9	36	49.4	118	4
9	45	65	134	5
9	54	82	149	6
9	63	100	162	7
9	72	119	174	8
9	81	139	185	9
9	90	162	196	10
9	99	185	206	11

Q	X _{L1}	X _{C1}	X _{C2}	R ₁
9	108	210	216	12
9	117	237	225	13
9	126	266	234	14
9	135	297	243	15
9	144	330	251	16
9	153	365	259	17
9	162	403	267	18
9	171	444	275	19
9	180	488	282	20
9	189	535	289	21
9	198	586	296	22
9	207	641	303	23
9	216	701	310	24
9	225	766	316	25
9	234	837	323	26
9	243	914	329	27
9	252	999	335	28
9	261	1092	341	29
9	270	1196	347	30
9	288	1438	359	32
9	306	1743	370	34
9	324	2137	381	36
9	342	2665	391	38
9	360	3407	402	40
9	378	4525	412	42
9	396	6393	422	44
10	10	11.2	50.5	1
10	20	24.5	87	2
10	30	39	112	3
10	40	55	133	4
10	50	72	151	5
10	60	91	167	6
10	70	111	181	7
10	80	132	195	8
10	90	155	207	9
10	100	180	219	10
10	110	206	230	11
10	120	234	241	12
10	130	264	251	13
10	140	296	261	14
10	150	330	271	15
10	160	367	280	16
10	170	406	289	17
10	180	448	297	18
10	190	494	306	19
10	200	543	314	20
10	210	595	322	21
10	220	652	330	22
10	230	713	337	23
10	240	780	345	24
10	250	852	352	25
10	260	930	359	26
10	270	1016	366	27
10	280	1111	373	28
10	290	1214	379	29
10	300	1329	383	30
10	320	1598	399	32
10	340	1937	411	34
10	360	2375	423	36
10	380	2961	435	38
10	400	3787	446	40
10	420	5029	458	42
10	440	7104	469	44

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรี-24-เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NETWORK B

The following is a computer solution for the Pi network when R_L equals 50 ohms.



TO DESIGN A NETWORK USING THE TABLES

1. Define Q, in column one, as R_1/X_{C1} .
2. C_1 actual is equal to C_1 - parallel C_{out} of device to be matched.
3. This completes the network.

Q	X_{C1}	X_{C2}	X_L	R_1	Q	X_{C1}	X_{C2}	X_L	R_1	Q	X_{C1}	X_{C2}	X_L	R_1
1	1	5.03	5.47	1	3	0.33	2.24	2.53	1	5	20	14.43	32.55	100
1	2	7.14	8	2	3	0.67	3.17	3.76	2	5	25	16.31	38.78	125
1	3	8.79	10.03	3	3	1	3.88	4.76	3	5	30	18.06	44.82	150
1	4	10.21	11.8	4	3	1.33	4.49	5.65	4	5	35	19.72	50.72	175
1	5	11.47	13.4	5	3	1.67	5.03	6.47	5	5	40	21.32	56.5	200
1	10	16.67	20	10	3	3.33	7.14	10	10	5	45	22.87	62.18	225
1	15	21	25.35	15	3	5	8.79	13.03	15	5	50	24.4	67.78	250
1	20	25	30	20	3	6.67	10.21	15.8	20	5	60	27.39	78.76	300
1	25	28.87	34.15	25	3	8.33	11.47	18.4	25	5	80	33.33	100	400
1	30	32.73	37.91	30	3	10	12.63	20.87	30	5	100	39.53	120.48	500
1	35	36.69	41.35	35	3	11.67	13.72	23.26	35	5	120	46.29	140.31	600
1	40	40.82	44.49	40	3	13.33	14.74	25.56	40	5	140	54.01	159.54	700
1	45	45.23	47.37	45	3	15	15.72	27.81	45	5	160	63.25	178.17	800
1	50	50	50	50	3	16.67	16.67	30	50	5	180	75	196.15	900
1	55	55.28	52.37	55	3	18.33	17.58	32.14	55	5	200	91.29	213.37	1000
1	60	61.24	54.49	60	3	20	18.46	34.25	60	5	220	117.26	229.58	1100
1	65	68.14	56.35	65	3	21.67	19.33	36.32	65	5	240	173.21	244.09	1200
1	70	76.38	57.91	70	3	23.33	20.17	38.35	70	6	0.17	1.16	1.32	1
1	75	86.6	59.15	75	3	25	21	40.35	75	6	4.17	5.85	9.83	25
1	80	100	60	80	3	26.67	21.82	42.33	80	6	8.33	8.33	16.22	50
1	85	119.02	60.35	85	3	28.33	22.63	44.28	85	6	12.5	10.28	22.02	75
1	90	150	60	90	3	30	23.43	46.21	90	6	16.67	11.95	27.52	100
2	0.5	3.17	3.56	1	3	31.67	24.22	48.12	95	6	20.83	13.46	32.82	125
2	1	4.49	5.25	2	3	33.33	25	50	100	6	25	14.85	37.97	150
2	1.5	5.51	6.64	3	3	41.67	28.87	59.12	125	6	29.17	16.16	43.01	175
2	2	6.38	7.87	4	3	50	32.73	67.91	150	6	33.33	17.41	47.96	200
2	2.5	7.14	9	5	3	58.33	36.69	76.35	175	6	37.5	18.61	52.83	225
2	5	10.21	13.8	10	3	66.67	40.82	84.49	200	6	41.67	19.76	57.63	250
2	7.5	12.63	17.87	15	3	75	45.23	92.37	225	6	50	22	67.08	300
2	10	14.74	21.56	20	3	83.33	50	100	250	6	66.67	26.26	85.45	400
2	12.5	16.67	25	25	4	6.25	8.7	14.33	25	6	83.33	30.43	103.29	500
2	15	18.46	28.25	30	4	12.5	12.5	23.53	50	6	100	34.64	120.7	600
2	17.5	20.17	31.35	35	4	18.75	15.55	31.83	75	6	116.67	39.01	137.76	700
2	20	21.82	34.33	40	4	25	18.26	39.64	100	6	133.33	43.64	154.5	800
2	22.5	23.43	37.21	45	4	31.25	20.76	47.12	125	6	150	48.67	170.94	900
2	25	25	40	50	4	37.5	23.15	54.36	150	6	166.67	54.23	187.08	1000
2	27.5	26.55	42.71	55	4	43.75	25.46	61.39	175	6	183.33	60.55	202.93	1100
2	30	28.1	45.35	60	4	50	27.74	68.27	200	6	200	67.94	218.46	1200
2	32.5	29.64	47.93	65	4	56.25	30	75	225	6	216.67	76.87	233.66	1300
2	35	31.18	50.45	70	4	62.5	32.27	81.61	250	6	233.33	88.19	248.48	1400
2	37.5	32.73	52.91	75	4	75	36.93	94.48	300	6	250	103.51	262.83	1500
2	40	34.3	55.32	80	4	100	47.14	119.07	400	6	266.67	126.49	276.55	1600
2	42.5	35.89	57.69	85	4	125	59.76	142.25	500	6	283.33	168.33	289.32	1700
2	45	37.5	60	90	4	150	77.46	163.96	600	6	300	300	300	1800
2	47.5	39.14	62.27	95	4	175	108.01	183.77	700	7	0.14	1	1.14	1
2	50	40.82	64.49	100	4	200	200	200	800	7	3.57	5.03	8.47	25
2	62.5	50	75	125	5	0.2	1.39	1.58	1	7	7.14	7.14	14	50
2	75	61.24	84.49	150	5	5	7	11.67	25	7	10.71	8.79	19.03	75
2	87.5	76.38	92.91	175	5	10	10	19.23	50	7	14.29	10.21	23.8	100
2	100	100	100	200	5	15	12.37	26.08	75	7	17.86	11.47	28.4	125
2	112.5	150	105	225										

Q	X _{C1}	X _{C2}	X _L	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _L	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _L	R ₁
7	21.43	12.63	32.87	150	10	0.1	0.7	0.8	1	16	18.75	7.73	26.23	300
7	25	13.72	37.26	175	10	5	5	9.9	50	16	25	8.96	33.59	400
7	28.57	14.74	41.56	200	10	10	7.11	16.87	100	16	31.25	10.06	40.8	500
7	32.14	15.72	45.81	225	10	15	8.75	23.34	150	16	37.5	11.07	47.9	600
7	35.71	16.67	50	250	10	20	10.15	29.55	200	16	43.75	12	54.83	700
7	42.86	18.46	58.25	300	10	25	11.41	35.6	250	16	50	12.88	61.89	800
7	57.14	21.82	74.33	400	10	30	12.57	41.52	300	16	56.25	13.72	68.79	900
7	71.43	25	90	500	10	40	14.66	53.11	400	16	62.5	14.52	75.65	1000
7	85.71	28.1	105.35	600	10	50	16.57	64.44	500	16	75	16.05	89.26	1200
7	100	31.18	120.45	700	10	60	18.36	75.58	600	16	87.5	17.48	102.74	1400
7	114.29	34.3	135.32	800	10	70	20.06	86.58	700	16	100	18.86	116.12	1600
7	128.57	37.5	150	900	10	80	21.69	97.46	800	16	112.5	20.18	129.42	1800
7	142.86	40.82	164.49	1000	10	90	23.28	108.24	900	16	125	21.47	142.64	2000
7	171.43	48.04	192.98	1200	10	100	24.85	118.94	1000	16	137.5	22.73	155.8	2200
7	200	56.41	220.82	1400	10	120	27.91	140.09	1200	16	150	23.96	168.9	2400
7	228.57	66.67	248	1600	10	140	30.97	161	1400	16	162.5	25.18	181.95	2600
7	257.14	80.18	274.45	1800	10	160	34.05	181.68	1600	16	175	26.39	194.96	2800
7	285.71	100	300	2000	10	180	37.21	202.17	1800	16	187.5	27.59	207.92	3000
7	314.29	135.4	324.25	2200	10	200	40.49	222.47	2000	16	218.75	30.59	240.16	3500
7	342.86	244.95	345.8	2400	10	220	43.93	242.61	2200	16	250	33.61	272.18	4000
					10	240	47.58	262.59	2400	16	281.25	36.71	304.01	4500
										16	312.5	39.9	335.66	5000
										16	343.75	43.25	367.15	5500
										16	375	46.8	398.49	6000
8	0.13	0.88	1	1	12	25	10.39	34.79	300	18	16.67	6.86	23.35	300
8	3.13	4.4	7.45	25	12	33.33	12.08	44.52	400	18	22.22	7.94	29.9	400
8	6.25	6.25	12.31	50	12	41.67	13.61	54.05	500	18	27.78	8.91	36.33	500
8	9.38	7.68	16.74	75	12	50	15.02	63.43	600	18	33.33	9.79	42.66	600
8	12.5	8.91	20.94	100	12	58.33	16.35	72.7	700	18	38.89	10.61	48.92	700
8	15.63	10	25	125	12	66.67	17.61	81.87	800	18	44.44	11.38	55.13	800
8	18.75	11	28.95	150	12	75	18.82	90.97	900	18	50	12.11	61.28	900
8	21.88	11.93	32.82	175	12	83.33	20	100	1000	18	55.56	12.8	67.4	1000
8	25	12.8	36.63	200	12	100	22.27	117.89	1200	18	66.67	14.12	79.54	1200
8	28.13	13.64	40.38	225	12	116.67	24.46	135.6	1400	18	77.78	15.35	91.57	1400
8	31.25	14.43	44.09	250	12	133.33	26.61	153.15	1600	18	88.89	16.52	103.51	1600
8	37.5	15.94	51.4	300	12	150	28.73	170.57	1800	18	100	17.65	115.38	1800
8	50	18.73	65.66	400	12	166.67	30.86	187.86	2000	18	111.11	18.73	127.2	2000
8	62.5	21.32	79.58	500	12	183.33	33	205.06	2200	18	122.22	19.79	138.95	2200
8	75	23.79	93.25	600	12	200	35.17	222.15	2400	18	133.33	20.81	150.66	2400
8	87.5	26.2	106.71	700	12	216.67	37.39	239.16	2600	18	144.44	21.82	162.33	2600
8	100	28.57	120	800	12	233.33	39.66	256.07	2800	18	155.56	22.81	173.96	2800
8	112.5	30.94	133.14	900	12	250	42.01	272.9	3000	18	166.67	23.79	185.55	3000
8	125	33.33	146.15	1000	12	291.67	48.3	314.64	3500	18	194.44	26.2	214.4	3500
8	150	38.25	171.82	1200	12	333.33	55.47	355.9	4000	18	222.22	28.57	243.08	4000
8	175	43.5	197.07	1400	12	375	63.96	396.67	4500	18	250	30.94	271.6	4500
8	200	49.24	221.82	1600	12	416.67	74.54	436.92	5000	18	277.78	33.33	300	5000
8	225	55.71	246.39	1800	12	458.33	88.64	476.57	5500	18	305.56	35.76	328.27	5500
8	250	63.25	270.48	2000	12	500	109.54	515.44	6000	18	333.33	38.25	356.44	6000
8	275	72.37	294.15	2200						20	15	6.16	21.03	300
8	300	84.02	317.36	2400						20	20	7.13	26.94	400
					14	21.43	8.86	29.91	300	20	25	8	32.73	500
					14	28.57	10.29	38.3	400	20	30	8.78	38.44	600
					14	35.71	11.56	46.51	500	20	35	9.51	44.09	700
					14	42.86	12.73	54.6	600	20	40	10.19	49.69	800
					14	50	13.83	62.59	700	20	45	10.84	55.24	900
					14	57.14	14.87	70.51	800	20	50	11.46	60.76	1000
					14	64.29	15.86	78.37	900	20	60	12.62	71.71	1200
					14	71.43	16.81	86.17	1000	20	70	13.7	82.57	1400
					14	85.71	18.62	101.63	1200	20	80	14.72	93.35	1600
					14	100	20.35	116.95	1400	20	90	15.7	104.07	1800
					14	114.29	22.02	132.15	1600	20	100	16.64	114.73	2000
					14	128.57	23.64	147.24	1800	20	110	17.55	125.35	2200
					14	142.86	25.24	162.25	2000	20	120	18.44	135.93	2400
					14	157.14	26.81	177.17	2200	20	130	19.3	146.47	2600
					14	171.43	28.38	192.02	2400	20	140	20.14	156.98	2800
					14	185.71	29.94	206.81	2600	20	150	20.97	167.46	3000
					14	200	31.51	221.54	2800	20	175	22.99	193.54	3500
					14	214.29	33.09	236.21	3000	20	200	24.96	219.48	4000
					14	250	37.12	272.66	3500	20	225	26.9	245.3	4500
					14	285.71	41.34	308.82	4000	20	250	28.82	271.01	5000
					14	321.43	45.86	344.7	4500	20	275	30.74	296.62	5500
					14	357.14	50.77	380.33	5000	20	300	32.67	322.15	6000
					14	392.86	56.22	415.69	5500					
					14	428.57	62.42	450.79	6000					

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ -26- ไม่นุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NETWORK C₁

The following is a computer solution for an RF matching network. This computer solution is applicable for two forms of matching networks.

TO DESIGN A NETWORK USING THE TABLES

1. $X_{L1} = X_{Cout}$.
2. Define Q , in column one, as X_{C1}/R_1 .
3. All network values can now be read from the charts in terms of reactance.
4. This completes network C_1 .

NETWORK C₂

TO DESIGN A NETWORK USING THE TABLES

1. L_1 is not used in this network.
2. Transform the impedance of the device to be matched to series form $(R_1 + jX_{Cout})$.
3. Define Q , in column one, as X_{C1}/R_1 .
4. For a desired Q , find the R_L to be matched in the R_1 column and read the reactive value of the components.
5. X_{L2}' is equal to the quantity X_{L2} obtained from the tables plus $|X_{Cout}|$.
6. This completes network C_2 .

Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	
1	1	7.14	8	1	1	38	88.98	59.35	38	2	54	54.17	78.92	27	
1	2	10.21	11.8	2	1	40	100	60	40	2	56	56.41	80.82	28	
1	3	12.63	14.87	3	1	42	114.56	60.33	42	2	58	58.76	82.68	29	
1	4	14.74	17.56	4	1	44	135.4	60.25	44	2	60	61.24	84.49	30	
1	5	16.67	20	5	1	46	169.56	59.56	46	2	64	66.67	88	32	
1	6	18.46	22.25	6	1	48	244.95	57.8	48	2	68	72.89	91.32	34	
1	7	20.17	24.35	7	2	2	7.14	9	1	2	72	80.18	94.45	36	
1	8	21.82	26.33	8	2	4	10.21	13.8	2	2	76	88.98	97.35	38	
1	9	23.43	28.21	9	2	6	12.63	17.87	3	2	80	100	100	40	
1	10	25	30	10	2	8	14.74	21.56	4	2	84	114.56	102.33	42	
1	11	26.55	31.81	11	2	10	16.67	25	5	2	88	135.4	104.25	44	
1	12	28.1	33.35	12	2	12	18.46	28.25	6	2	92	169.56	105.56	46	
1	13	29.64	34.93	13	2	14	20.17	31.35	7	2	96	244.95	105.8	48	
1	14	31.13	36.45	14	2	16	21.82	34.33	8	3	3	7.14	10	1	
1	15	32.73	37.91	15	2	18	23.43	37.21	9	3	6	10.21	15.8	2	
1	16	34.3	39.32	16	2	20	25	40	10	3	9	12.63	20.87	3	
1	17	35.89	40.69	17	2	22	26.55	42.71	11	3	12	14.74	25.56	4	
1	18	37.5	42	18	2	24	28.1	45.35	12	3	15	16.67	30	5	
1	19	39.14	43.27	19	2	26	29.64	47.93	13	3	18	18.46	34.25	6	
1	20	40.82	44.49	20	2	28	31.18	50.45	14	3	21	20.17	38.35	7	
1	21	42.55	45.68	21	2	30	32.73	52.91	15	3	24	21.82	42.33	8	
1	22	44.32	46.82	22	2	32	34.3	55.32	16	3	27	23.43	46.21	9	
1	23	46.15	47.92	23	2	34	35.89	57.69	17	3	30	25	50	10	
1	24	48.04	48.98	24	2	36	37.5	60	18	3	33	26.55	53.71	11	
1	25	50	50	25	2	38	39.14	62.27	19	3	36	28.1	57.35	12	
1	26	52.04	50.98	26	2	40	40.82	64.49	20	3	39	29.64	60.98	13	
1	27	54.17	51.92	27	2	42	42.55	66.68	21	3	42	31.18	64.45	14	
1	28	56.41	52.82	28	2	44	44.32	68.82	22	3	45	32.73	67.91	15	
1	29	58.76	53.68	29	2	46	46.15	70.92	23	3	48	34.3	71.32	16	
1	30	61.24	54.49	30	2	48	48.04	72.98	24	3	51	35.89	74.69	17	
1	32	66.67	56	32	2	50	50	75	25	3	54	37.5	78	18	
1	34	72.89	57.32	34	2	52	52.04	76.98	26	3	57	39.14	81.27	19	
1	36	80.18	58.45	36											

Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁
3	60	40.82	84.49	20	5	60	28.1	81.35	12	7	28	14.74	41.56	4
3	63	42.55	87.68	21	5	65	29.64	86.93	13	7	35	16.67	50	5
3	66	44.32	90.82	22	5	70	31.18	92.45	14	7	42	18.46	58.25	6
3	69	46.15	93.93	23	5	75	32.73	97.91	15	7	49	20.17	66.35	7
3	72	48.04	96.98	24	5	80	34.3	103.32	16	7	56	21.82	74.33	8
3	75	50	100	25	5	85	35.89	108.69	17	7	63	23.43	82.21	9
3	78	52.04	102.98	26	5	90	37.5	114	18	7	70	25	90	10
3	81	54.17	105.92	27	5	95	39.14	119.27	19	7	77	26.55	97.71	11
3	84	56.41	108.82	28	5	100	40.82	124.49	20	7	84	28.1	105.35	12
3	87	58.76	111.68	29	5	105	42.55	129.68	21	7	91	29.64	112.93	13
3	90	61.24	114.49	30	5	110	44.32	134.82	22	7	98	31.18	120.45	14
3	96	66.67	120	32	5	115	46.15	139.92	23	7	105	32.73	127.91	15
3	102	72.89	125.32	34	5	120	48.04	144.98	24	7	112	34.3	135.32	16
3	108	80.18	130.45	36	5	125	50	150	25	7	119	35.89	142.69	17
3	114	88.98	135.35	38	5	130	52.04	154.98	26	7	126	37.5	150	18
3	120	100	140	40	5	135	54.17	159.92	27	7	133	39.14	157.27	19
3	126	114.56	144.33	42	5	140	56.41	164.82	28	7	140	40.82	164.49	20
3	132	135.4	148.25	44	5	145	58.76	169.68	29	7	147	42.55	171.68	21
3	138	169.56	151.56	46	5	150	61.24	174.49	30	7	154	44.32	178.82	22
3	144	244.95	153.8	48	5	160	66.67	184	32	7	161	46.15	185.92	23
4	4	7.14	11	1	5	170	72.89	193.32	34	7	168	48.04	192.98	24
4	8	10.21	17.8	2	5	180	80.18	202.45	36	7	175	50	200	25
4	12	12.63	23.87	3	5	190	88.98	211.35	38	7	182	52.04	206.98	26
4	16	14.74	29.56	4	5	200	100	220	40	7	189	54.17	213.92	27
4	20	16.67	35	5	5	210	114.56	228.33	42	7	196	56.41	220.82	28
4	24	18.46	40.25	6	5	220	135.4	236.25	44	7	203	58.76	227.68	29
4	28	20.17	45.35	7	5	230	169.56	243.56	46	7	210	61.24	234.49	30
4	32	21.82	50.33	8	5	240	244.95	249.8	48	7	224	66.67	248	32
4	36	23.43	55.21	9	6	6	7.14	13	1	7	238	72.89	261.32	34
4	40	25	60	10	6	12	10.21	21.8	2	7	252	80.18	274.45	36
4	44	26.55	64.71	11	6	18	12.63	29.87	3	7	266	88.98	287.35	38
4	48	28.1	69.35	12	6	24	14.74	37.56	4	7	280	100	300	40
4	52	29.64	73.93	13	6	30	16.67	45	5	7	294	114.56	312.33	42
4	56	31.18	78.45	14	6	36	18.46	52.25	6	7	308	135.4	324.25	44
4	60	32.73	82.91	15	6	42	20.17	59.35	7	7	322	169.56	335.56	46
4	64	34.3	87.32	16	6	48	21.82	66.33	8	7	336	244.95	345.8	48
4	68	35.89	91.69	17	6	54	23.43	73.21	9	8	8	7.14	15	1
4	72	37.5	96	18	6	60	25	80	10	8	16	10.21	25.8	2
4	76	39.14	100.27	19	6	66	26.55	86.71	11	8	24	12.63	35.87	3
4	80	40.82	104.49	20	6	72	28.1	93.35	12	8	32	14.74	45.56	4
4	84	42.55	108.68	21	6	78	29.64	99.93	13	8	40	16.67	55	5
4	88	44.32	112.82	22	6	84	31.18	106.45	14	8	48	18.46	64.25	6
4	92	46.15	116.92	23	6	90	32.73	112.91	15	8	56	20.17	73.35	7
4	96	48.04	120.98	24	6	96	34.3	119.32	16	8	64	21.82	82.33	8
4	100	50	125	25	6	102	35.89	125.69	17	8	72	23.43	91.21	9
4	104	52.04	128.98	26	6	108	37.5	132	18	8	80	25	100	10
4	108	54.17	132.92	27	6	114	39.14	138.27	19	8	88	26.55	108.71	11
4	112	56.41	136.82	28	6	120	40.82	144.49	20	8	96	28.1	117.35	12
4	116	58.76	140.68	29	6	126	42.55	150.68	21	8	104	29.64	125.93	13
4	120	61.24	144.49	30	6	132	44.32	156.82	22	8	112	31.18	134.45	14
4	128	66.67	152	32	6	138	46.15	162.92	23	8	120	32.73	142.91	15
4	136	72.89	159.32	34	6	144	48.04	168.98	24	8	128	34.3	151.32	16
4	144	80.18	166.45	36	6	150	50	175	25	8	136	35.89	159.69	17
4	152	88.98	173.35	38	6	156	52.04	180.98	26	8	144	37.5	168	18
4	160	100	180	40	6	162	54.17	186.82	27	8	152	39.14	176.27	19
4	168	114.56	186.33	42	6	168	56.41	192.82	28	8	160	40.82	184.49	20
4	176	135.4	192.25	44	6	174	58.76	198.68	29	8	168	42.55	192.68	21
4	184	169.56	197.56	46	6	180	61.24	204.49	30	8	176	44.32	200.82	22
4	192	244.95	201.8	48	6	192	66.67	216	32	8	184	46.15	208.92	23
5	5	7.14	12	1	6	204	72.89	227.32	34	8	192	48.04	216.98	24
5	10	10.21	19.8	2	6	216	80.18	238.45	36	8	200	50	225	25
5	15	12.63	26.87	3	6	228	88.98	249.35	38	8	208	52.04	232.98	26
5	20	14.74	33.56	4	6	240	100	260	40	8	216	54.17	240.92	27
5	25	16.67	40	5	6	252	114.56	270.33	42	8	224	56.41	248.82	28
5	30	18.46	46.25	6	6	264	135.4	280.25	44	8	232	58.76	256.68	29
5	35	20.17	52.35	7	6	276	169.56	289.56	46	8	240	61.24	264.49	30
5	40	21.82	58.33	8	6	288	244.95	297.8	48	8	256	66.67	280	32
5	45	23.43	64.21	9	7	7	7.14	14	1	8	272	72.89	295.32	34
5	50	25	70	10	7	14	10.21	23.8	2	8	288	80.18	310.45	36
5	55	26.55	75.71	11	7	21	12.63	32.87	3	8	304	88.98	325.35	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 -28-
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁	Q	X _{C1}	X _{C2}	X _{L2}	R ₁
8	320	100	340	40	9	414	169.56	427.56	46	10	120	28.1	141.35	12
8	336	114.56	354.33	42	9	432	244.95	441.9	48	10	130	29.64	151.93	13
8	352	135.4	368.25	44	9	216	46.04	240.98	24	10	140	31.18	162.45	14
8	368	169.56	381.56	46	9	225	50	250	25	10	150	32.73	172.91	15
8	384	244.95	393.8	48	9	234	52.04	258.98	26	10	160	34.3	183.32	16
9	9	7.14	16	1	9	243	54.17	267.82	27	10	170	35.89	193.69	17
9	18	10.21	27.8	2	9	252	56.41	276.82	28	10	180	37.5	204	18
9	27	12.63	38.87	3	9	261	58.76	285.88	29	10	190	39.14	214.27	19
9	36	14.74	49.56	4	9	270	61.24	294.49	30	10	200	40.82	224.49	20
9	45	16.67	60	5	9	288	66.67	312	32	10	210	42.55	234.68	21
9	54	18.46	70.25	6	9	306	72.89	329.32	34	10	220	44.32	244.82	22
9	63	20.17	80.35	7	9	324	80.18	346.45	36	10	230	46.15	254.92	23
9	72	21.82	90.33	8	9	342	88.98	363.35	38	10	240	48.04	264.96	24
9	81	23.43	100.21	9	9	360	100	380	40	10	250	50	275	25
9	90	25	110	10	9	378	114.56	396.33	42	10	260	52.04	284.98	26
9	99	26.55	119.71	11	9	396	135.4	412.25	44	10	270	54.17	294.92	27
9	108	28.1	129.35	12	10	10	7.14	17	1	10	280	56.41	304.82	28
9	117	29.64	138.93	13	10	20	10.21	28.8	2	10	290	58.76	314.68	29
9	126	31.18	148.45	14	10	30	12.63	41.87	3	10	300	61.24	324.49	30
9	135	32.73	157.91	15	10	40	14.74	53.56	4	10	320	66.67	344	32
9	144	34.3	167.32	16	10	50	16.67	65	5	10	340	72.89	363.32	34
9	153	35.89	176.69	17	10	60	18.46	76.25	6	10	360	80.18	382.45	36
9	162	37.5	186	18	10	70	20.17	87.35	7	10	380	88.98	401.35	38
9	171	39.17	195.27	19	10	80	21.82	98.33	8	10	400	100	420	40
9	180	40.82	204.49	20	10	90	23.43	109.21	9	10	420	114.56	438.33	42
9	189	42.55	213.68	21	10	100	25	120	10	10	440	135.4	456.25	44
9	198	44.32	222.82	22	10	110	26.55	130.71	11	10	460	169.56	473.56	46
9	207	46.15	231.92	23	10	120	28.1	141.35	12	10	480	244.95	489.8	48

NETWORK D

The following is a computer solution for an RF "Tee" matching network. Tuning is accomplished by using a variable capacitor for

C₁. Variable matching may also be accomplished by increasing X_{L2} and adding an equal amount of X_C in series in the form of a variable capacitor.

(See Step 3)

TO DESIGN A NETWORK USING THE TABLES

1. Define Q, in column one, as X_{L1}/R₁.
2. For an R₁ to be matched and a desired Q, read the reactances of the network components from the charts.
3. X_{L1}' is equal to the quantity X_{L1} obtained from the tables plus |X_{Cout}|.
4. This completes the network.

Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁	Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁	Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁
1	26	10	43.33	26	1	175	122.47	101.45	175	2	68	77.46	47.9	34
1	27	14.14	42.09	27	1	200	132.29	109.72	200	2	72	80.62	49.83	36
1	28	17.32	41.59	28	1	225	141.42	117.54	225	2	76	83.67	51.72	38
1	29	20	41.43	29	1	250	150	125	250	2	80	86.6	53.59	40
1	30	22.36	41.46	30	1	275	158.11	132.14	275	2	84	89.44	55.43	42
1	32	26.46	41.85	32	1	300	165.83	139	300	2	88	92.2	57.23	44
1	34	30	42.5	34	2	22	15.81	23.75	11	2	92	94.87	59.01	46
1	36	33.17	43.29	36	2	24	22.36	24.52	12	2	96	97.47	60.77	48
1	38	36.06	44.16	38	2	26	27.39	25.51	13	2	100	100	62.5	50
1	40	38.72	45.08	40	2	28	31.62	26.59	14	2	110	106.07	66.73	55
1	42	41.23	46.04	42	2	30	35.36	27.7	15	2	120	111.8	70.82	60
1	44	43.59	47.01	44	2	32	38.73	28.83	16	2	130	117.26	74.8	65
1	46	45.83	48	46	2	34	41.83	29.96	17	2	140	122.47	78.66	70
1	48	47.96	48	48	2	36	44.72	31.09	18	2	150	127.48	82.43	75
1	50	50	50	50	2	38	47.43	32.22	19	2	160	132.29	86.1	80
1	55	54.77	52.49	55	2	40	50	33.33	20	2	170	136.93	89.69	85
1	60	59.16	54.96	60	2	42	52.44	34.44	21	2	180	141.42	93.2	90
1	65	63.25	57.4	65	2	44	54.77	35.54	22	2	190	145.77	96.63	95
1	70	67.08	69.79	70	2	46	57.01	36.82	23	2	200	150	100	100
1	75	70.71	82.13	75	2	48	59.16	37.7	24	2	250	169.56	115.93	125
1	80	74.16	94.43	80	2	50	61.24	38.76	25	2	300	187.08	130.62	150
1	85	77.46	106.69	85	2	52	63.25	39.82	26	2	350	203.1	144.34	175
1	90	80.62	118.9	90	2	54	65.19	40.86	27	2	400	217.94	157.26	200
1	95	83.67	131.07	95	2	56	67.08	41.9	28	2	450	231.84	169.51	225
1	100	86.6	143.21	100	2	58	68.92	42.92	29	2	500	244.95	181.19	250
1	125	100	185.33	125	2	60	70.71	43.93	30	2	550	257.39	192.37	275
1	150	111.8	227.71	150	2	64	74.16	45.93	32	2	600	269.26	203.11	300

Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁	Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁	Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁
3	18	22.36	17.41	6	4	112	145.95	68.8	28	5	625	400	250	125
3	21	31.62	19.27	7	4	116	148.83	70.67	29	5	750	438.75	283.12	150
3	24	38.73	21.19	8	4	120	151.66	72.51	30	5	875	474.34	314.08	175
3	27	44.72	23.11	9	4	128	157.16	76.16	32	5	1000	507.44	343.26	200
3	30	50	25	10	4	136	162.48	79.73	34	5	1125	538.52	370.95	225
3	33	54.77	26.86	11	4	144	167.63	83.24	36	5	1250	567.89	397.36	250
3	36	59.16	28.69	12	4	152	172.63	86.68	38	5	1375	595.82	422.67	275
3	39	63.25	30.48	13	4	160	177.48	90.07	40	5	1500	622.49	446.99	300
3	42	67.08	32.25	14	4	168	182.21	93.4	42	6	72	34.64	11.06	2
3	45	70.71	33.98	15	4	176	186.82	96.69	44	6	18	55.23	15.62	3
3	48	74.16	35.69	16	4	184	191.31	99.92	46	6	24	70	20	4
3	51	77.46	37.37	17	4	192	195.7	103.11	48	6	30	82.16	24.2	5
3	54	80.62	39.02	18	4	200	200	106.25	50	6	36	92.74	28.26	6
3	57	83.67	40.66	19	4	220	210.36	113.93	55	6	42	102.23	32.2	7
3	60	86.6	42.26	20	4	240	220.23	121.36	60	6	48	110.91	36.02	8
3	63	89.44	43.85	21	4	260	229.67	128.59	65	6	54	118.95	39.74	9
3	66	92.2	45.42	22	4	280	238.75	135.61	70	6	60	126.49	43.38	10
3	69	94.87	46.96	23	4	300	247.49	142.46	75	6	66	133.6	46.93	11
3	72	97.47	48.49	24	4	320	255.93	148.15	80	6	72	140.36	50.41	12
3	75	100	50	25	4	340	264.1	155.68	85	6	78	146.8	53.83	13
3	78	102.47	51.49	26	4	360	272.03	162.07	90	6	84	152.97	57.18	14
3	81	104.88	52.97	27	4	380	279.73	168.32	95	6	90	158.9	60.47	15
3	84	107.24	54.42	28	4	400	287.23	174.46	100	6	96	164.62	63.71	16
3	87	109.54	55.87	29	4	500	322.1	203.5	125	6	102	170.15	66.89	17
3	90	111.8	57.29	30	4	600	353.55	230.33	150	6	108	175.5	70.03	18
3	96	116.19	60.11	32	4	700	382.43	255.4	175	6	114	180.69	73.12	19
3	102	120.42	62.87	34	4	800	409.27	279.02	200	6	120	185.74	76.17	20
3	108	124.5	65.57	36	4	900	434.45	301.44	225	6	126	190.66	79.18	21
3	114	128.45	68.23	38	4	1000	458.26	322.82	250	6	132	195.45	82.15	22
3	120	132.29	70.85	40	4	1100	480.88	343.3	275	6	138	200.12	85.08	23
3	126	136.01	73.42	42	4	1200	502.49	362.99	300	6	144	204.69	87.97	24
3	132	139.64	75.96	44	5	10	10	10	2	6	150	209.17	90.83	25
3	138	143.18	78.45	46	5	15	37.42	13.57	3	6	156	213.54	93.66	26
3	144	146.63	80.91	48	5	20	51.96	17.22	4	6	162	217.83	96.46	27
3	150	150	83.33	50	5	25	63.25	20.75	5	6	168	222.04	99.23	28
3	165	158.11	89.25	55	5	30	72.8	24.16	6	6	174	226.16	101.96	29
3	180	165.83	94.99	60	5	35	81.24	27.47	7	6	180	230.22	104.67	30
3	195	173.21	100.56	65	5	40	88.88	30.69	8	6	192	238.12	110.01	32
3	210	180.28	105.97	70	5	45	95.92	33.82	9	6	204	245.76	115.25	34
3	225	187.08	111.25	75	5	50	102.47	36.88	10	6	216	253.18	120.39	36
3	240	193.65	116.4	80	5	55	108.63	39.87	11	6	228	260.38	125.45	38
3	255	200	121.43	85	5	60	114.46	42.8	12	6	240	267.39	130.42	40
3	270	206.16	126.35	90	5	65	120	45.68	13	6	252	274.23	135.31	42
3	285	212.13	131.17	95	5	70	125.3	48.49	14	6	264	280.89	140.13	44
3	300	217.94	135.89	100	5	75	130.38	51.26	15	6	276	287.4	144.88	46
3	375	244.95	158.25	125	5	80	135.28	53.99	16	6	288	293.77	149.55	48
3	450	269.26	178.89	150	5	85	140	56.67	17	6	300	300	154.17	50
3	525	291.55	198.17	175	5	90	144.57	59.31	18	6	330	315.04	165.44	55
3	600	312.25	216.33	200	5	95	149	61.91	19	6	360	329.39	176.36	60
3	675	331.66	233.57	225	5	100	153.3	64.47	20	6	390	343.15	186.97	65
3	750	350	250	250	5	105	157.48	67	21	6	420	356.37	197.3	70
3	825	367.42	265.74	275	5	110	161.55	69.49	22	6	450	369.12	207.36	75
3	900	384.06	280.87	300	5	115	165.53	71.96	23	6	480	381.44	217.19	80
4	12	7.07	12.31	3	5	120	169.41	74.39	24	6	510	393.38	226.79	85
4	16	30	14.78	4	5	125	173.21	76.79	25	6	540	404.97	236.18	90
4	20	41.83	17.57	5	5	130	176.92	79.17	26	6	570	416.23	245.38	95
4	24	50.99	20.32	6	5	135	180.55	81.52	27	6	600	427.2	254.4	100
4	28	58.74	23	7	5	140	184.12	83.85	28	6	630	437.91	263.33	105
4	32	65.57	25.6	8	5	145	187.62	86.15	29	6	660	448.36	272.12	110
4	36	71.76	28.15	9	5	150	191.05	88.43	30	6	690	458.54	280.77	115
4	40	77.46	30.64	10	5	155	194.34	90.67	31	6	720	468.46	289.2	120
4	44	82.76	33.07	11	5	160	197.74	92.91	32	6	750	478.28	297.13	125
4	48	87.75	35.45	12	5	165	201.21	95.11	33	6	780	487.94	304.9	130
4	52	92.47	37.78	13	5	170	204.21	97.31	34	6	810	497.44	312.44	135
4	56	96.95	40.07	14	5	175	207.48	99.48	35	6	840	506.79	319.8	140
4	60	101.24	42.32	15	5	180	210.48	101.63	36	6	870	516.0	327.0	145
4	64	105.36	44.54	16	5	185	213.53	103.75	37	6	900	525.04	334.0	150
4	68	109.32	46.72	17	5	190	216.56	105.88	38	6	930	533.94	340.8	155
4	72	113.14	48.86	18	5	195	219.56	108.0	39	6	960	542.7	347.4	160
4	76	116.83	50.97	19	5	200	222.49	110.06	40	6	990	551.33	353.8	165
4	80	120.42	53.06	20	5	210	228.25	114.17	42	6	1020	559.84	360.0	170
4	84	123.9	55.11	21	5	220	233.88	118.21	44	6	1050	568.24	366.1	175
4	88	127.28	57.14	22	5	230	239.37	122.2	46	6	1080	576.54	372.1	180
4	92	130.58	59.14	23	5	240	244.74	126.13	48	6	1110	584.74	378.0	185
4	96	133.79	61.12	24	5	250	260	130	50	6	1140	592.84	383.8	190
4	100	136.93	63.07	25	5	275	262.68	139.46	55	6	1170	600.84	389.5	195
4	104	140	65	26	5	300	274.77	148.64	60	6	1200	608.74	395.1	200
4	108	143	66.91	27	5	325	286.36	157.54	65	6	1230	616.54	400.6	205
					5	350	297.49	166.21	70	6	1260	624.24	406.0	210
					5	375	308.22	174.66	75	6	1290	631.84	411.3	215
					5	400	318.59	182.91	80	6	1320	639.34	416.5	220
					5	425	328.63	190.97	85	6	1350	646.74	421.6	225
					5	450	338.38	198.85	90	6	1380	654.04	426.6	230
					5	475	347.85	206.57	95	6	1410	661.24	431.5	235
					5	500	357.07	214.14	100	6	1440	668.34	436.3	240
										7	14	50	12.5	2
										7	21	70.71	17.83	3
										7	28	86.6	22.9	4
										7	35	100	27.78	5
										7	42	111.8	32.48	6
										7	49	122.47	37.04	7
										7	56	132.29	41.47	8
										7	63	141.42	45.79	9
										7	70	150	50	10
										7	77	158.11	54.12	11
										7	84	165.83	58.16	12
										7	91	173.21	62.12	13
										7	98	180.28	66	14
										7	105	187.08	69.82	15
										7	112	193.65	73.58	16

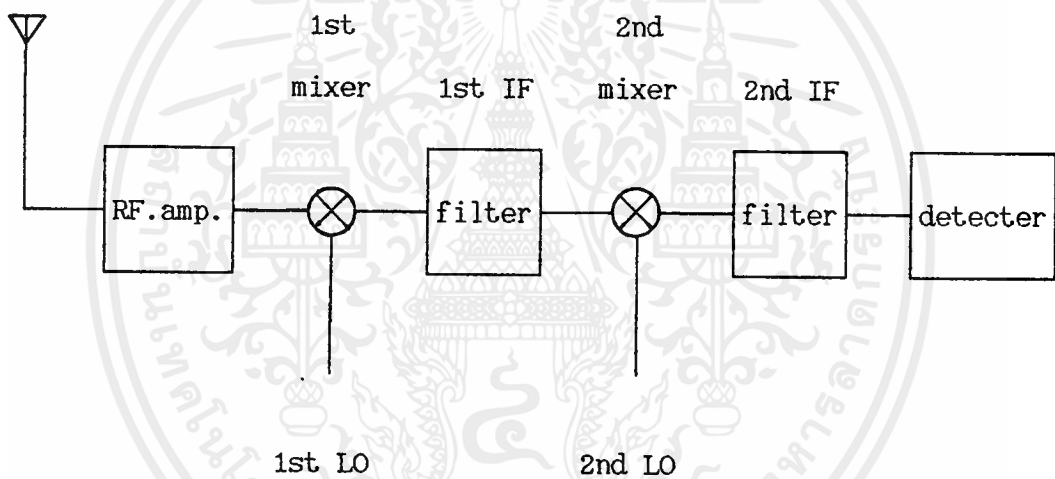
Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁	Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁	Q	X _{L1}	X _{L2}	X _{C1}	R ₁
7	119	200	77.27	17	8	256	318.59	144.73	32	9	675	552.27	306.8	75
7	126	206.16	80.91	18	8	272	328.63	151.65	34	9	720	570.53	321.4	80
7	133	212.13	84.5	19	8	288	338.38	158.46	36	9	765	588.22	335.67	85
7	140	217.94	88.04	20	8	304	347.85	165.14	38	9	810	605.39	349.63	90
7	147	223.61	91.53	21	8	320	357.07	171.71	40	9	855	622.09	363.31	95
7	154	229.13	94.97	22	8	336	366.06	178.18	42	9	900	638.36	376.71	100
7	161	234.52	98.37	23	8	352	374.83	184.56	44	9	1125	714.14	440.24	125
7	168	239.79	101.73	24	8	368	383.41	190.83	46	9	1350	782.62	498.94	150
7	175	244.95	105.05	25	8	384	391.79	197.02	48	9	1575	845.58	553.81	175
7	182	250	108.33	26	8	400	400	203.13	50	9	1800	904.16	605.54	200
7	189	254.95	111.58	27	8	440	419.82	218.04	55	9	2025	959.17	654.64	225
7	196	259.81	114.79	28	8	480	438.75	232.49	60	9	2250	1011.19	701.48	250
7	203	264.58	117.97	29	8	520	456.89	246.53	65	9	2475	1060.66	746.36	275
7	210	269.26	121.11	30	8	560	474.34	260.2	70	9	2700	1107.93	789.51	300
7	224	278.39	127.31	32	8	600	491.17	273.52	75	10	10	50.5	9.17	1
7	238	287.23	133.39	34	8	640	507.44	286.52	80	10	20	87.18	17.2	2
7	252	295.8	139.36	36	8	680	523.21	299.23	85	10	30	112.47	24.74	3
7	266	304.14	145.23	38	8	720	538.52	311.66	90	10	40	133.04	31.91	4
7	280	312.25	151	40	8	760	553.4	323.84	95	10	50	150.83	38.8	5
7	294	320.16	156.68	42	8	800	567.89	335.78	100	10	60	166.73	45.45	6
7	308	327.87	162.27	44	8	1000	635.41	392.36	125	10	70	181.25	51.89	7
7	322	335.41	167.78	46	8	1200	696.42	444.63	150	10	80	194.68	58.16	8
7	336	342.78	173.21	48	8	1400	752.5	493.49	175	10	90	207.24	64.26	9
7	350	350	178.57	50	8	1600	804.67	539.57	200	10	100	219.09	70.23	10
7	365	367.42	181.66	55	8	1800	853.67	583.29	225	10	110	230.33	76.06	11
7	420	384.06	204.34	60	8	2000	900	625	250	10	120	241.04	81.78	12
7	455	400	216.87	65	8	2200	944.06	664.96	275	10	130	251.3	87.38	13
7	490	415.33	228.66	70	8	2400	986.15	703.38	300	10	140	261.15	92.89	14
7	525	430.12	240.35	75	9	9	40	8.37	1	10	150	270.65	98.29	15
7	560	444.41	251.76	80	9	18	75.5	15.6	2	10	160	279.82	103.61	16
7	595	458.86	262.91	85	9	27	98.99	22.4	3	10	170	288.7	108.85	17
7	630	471.7	273.82	90	9	36	117.9	28.88	4	10	180	297.32	114.01	18
7	665	484.77	284.51	95	9	45	134.16	35.09	5	10	190	305.7	119.09	19
7	700	497.49	294.99	100	9	54	148.66	41.09	6	10	200	313.85	124.1	20
7	735	510.33	304.63	105	9	63	161.86	46.91	7	10	210	321.79	129.05	21
7	770	523.17	314.37	110	9	72	174.07	52.56	8	10	220	329.55	133.93	22
7	805	536.01	324.11	115	9	81	185.47	58.07	9	10	230	337.12	138.75	23
7	840	548.86	333.85	120	9	90	196.21	63.45	10	10	240	344.53	143.51	24
7	875	561.71	343.59	125	9	99	206.4	68.71	11	10	250	351.78	148.22	25
7	910	574.56	353.33	130	9	108	216.1	73.86	12	10	260	358.89	152.87	26
7	945	587.41	363.07	135	9	117	225.39	78.92	13	10	270	365.86	157.47	27
7	980	599.26	372.81	140	9	126	234.31	83.88	14	10	280	372.69	162.03	28
7	1015	611.11	382.55	145	9	135	242.9	88.76	15	10	290	379.41	166.53	29
7	1050	622.96	392.29	150	9	144	251.2	93.55	16	10	300	386.01	170.99	30
7	1085	634.81	402.03	155	9	153	259.23	98.28	17	10	320	398.87	179.78	32
7	1120	646.66	411.77	160	9	162	267.02	102.93	18	10	340	411.34	188.4	34
7	1155	658.51	421.51	165	9	171	274.59	107.51	19	10	360	423.44	196.87	36
7	1190	670.36	431.25	170	9	180	281.96	112.03	20	10	380	435.2	205.2	38
7	1225	682.21	440.99	175	9	189	289.14	116.49	21	10	400	446.65	213.39	40
7	1260	694.06	450.73	180	9	198	296.14	120.89	22	10	420	457.82	221.44	42
7	1295	705.91	460.47	185	9	207	302.99	125.23	23	10	440	468.72	229.37	44
7	1330	717.76	470.21	190	9	216	309.68	129.53	24	10	460	479.37	237.19	46
7	1365	729.61	479.95	195	9	225	316.23	133.77	25	10	480	489.8	244.9	48
7	1400	741.46	489.69	200	9	234	322.65	137.97	26	10	500	500	252.5	50
7	1435	753.31	499.43	205	9	243	328.94	142.12	27	10	550	524.64	271.07	55
7	1470	765.16	509.17	210	9	252	335.11	146.22	28	10	600	548.18	289.07	60
7	1505	777.01	518.91	215	9	261	341.17	150.28	29	10	650	570.75	306.56	65
7	1540	788.86	528.65	220	9	270	347.13	154.3	30	10	700	592.45	323.58	70
7	1575	800.71	538.39	225	9	288	358.75	162.23	32	10	750	613.39	340.18	75
7	1610	812.56	548.13	230	9	306	370	170	34	10	800	633.64	356.37	80
7	1645	824.41	557.87	235	9	324	380.92	177.63	36	10	850	653.26	372.21	85
7	1680	836.26	567.61	240	9	342	391.54	185.14	38	10	900	672.31	387.7	90
7	1715	848.11	577.35	245	9	360	401.87	192.52	40	10	950	690.83	402.87	95
7	1750	859.96	587.09	250	9	378	411.95	199.78	42	10	1000	708.87	417.74	100
7	1785	871.81	596.83	255	9	396	421.78	206.93	44	10	1250	792.94	488.23	125
7	1820	883.66	606.57	260	9	414	431.39	213.98	46	10	1500	868.91	553.36	150
7	1855	895.51	616.31	265	9	432	440.79	220.93	48	10	1750	938.75	614.25	175
7	1890	907.36	626.05	270	9	450	450	227.78	50	10	2000	1003.74	671.66	200
7	1925	919.21	635.79	275	9	495	472.23	244.52	55	10	2250	1064.78	726.14	225
7	1960	931.06	645.53	280	9	540	493.46	260.74	60	10	2500	1122.5	778.12	250
7	1995	942.91	655.27	285	9	585	513.81	276.51	65	10	2750	1177.39	827.92	275
7	2030	954.76	665.01	290	9	630	533.39	291.85	70	10	3000	1229.84	875.8	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการเรียน-31-เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใด ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 เครื่องรับชนิดแปลงความถี่สองครั้ง (Dual Conversion Receiver) [19]

เครื่องรับที่เน้นสภาพการเลือกเฟ้นของวงจรส่วนหน้า (front end selectivity) จะต้องมีความสามารถกำจัดความถี่เงา (image frequency) ที่อยู่ ณ สองเท่าของความถี่ไอเอฟเหนือความถี่สัญญาณข้อมูล การที่จะแยกความถี่เงาให้ห่างออกมามากๆ นั้น มักจะเลือกให้ค่าไอเอฟมีค่าสูงๆ แต่การเลือกค่าไอเอฟให้สูงก็ทำให้วงจรรบกวนทำงานที่ความถี่สูงด้วย ดังนั้นจะเห็นว่าในย่านความถี่เอชเอฟ (ความถี่ประมาณ 30 เมกกะเฮิร์ต) การทำให้วงจรรบกวนมีคุณสมบัติตามต้องการและมีความถี่ในการกำจัดความถี่เงาที่ดีที่สุดจึงเป็นเรื่องที่ยากมาก

เครื่องรับแบบแปลงความถี่สองครั้งจึงเป็นวิธีแก้ปัญหาลักษณะนี้ โดยที่เครื่องรับจะมีความสามารถในการกำจัดความถี่เงาที่ดีที่สุดและมีแถบผ่านไอเอฟแคบ รูปที่ 2.21 แสดงผังการทำงานของเครื่องรับแบบดังกล่าว



รูปที่ 2.21 ผังแสดงการทำงานของเครื่องรับแบบแปลงความถี่สองครั้ง

เครื่องรับทำงานที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต โดยมีความถี่ไอเอฟแรกที่ 10.7 เมกกะเฮิร์ต สามารถกำจัดความถี่เงาที่ความถี่ 165.4 เมกกะเฮิร์ต ปัจจุบันนิยมใช้ตัวกรองเซรามิก (ceramic filter) เป็นตัวกรองความถี่ไอเอฟ ทั้งสองความถี่ที่ 10.7 เมกกะเฮิร์ต และ 455 กิโลเฮิร์ต เนื่องจากตัวกรองชนิดนี้มีราคาถูก การใช้ความถี่ไอเอฟมาตรฐานทั้งสองนี้ ทำให้สภาพการเลือกเฟ้นของเครื่องรับมีคุณสมบัติที่ดีและสามารถกำจัดความถี่เงาได้ดีด้วย

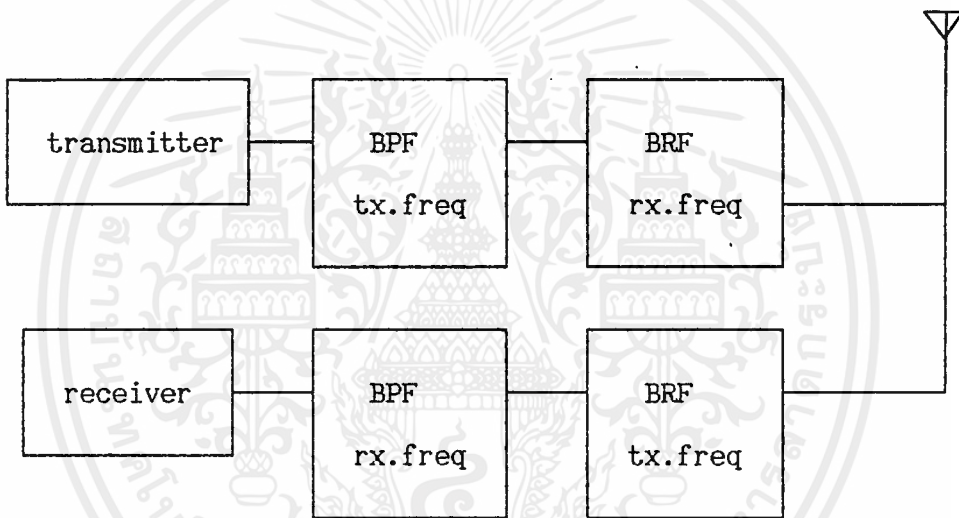
2.6 ดูเพลกเซอร์ (Duplexer) [16]

ดูเพลกเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำให้เครื่องส่งและเครื่องรับสามารถเชื่อมต่อกัน และทำงานได้โดยใช้สายอากาศร่วมกัน ถ้าเรามีดูเพลกเซอร์ที่มีคุณสมบัติดีพร้อมขณะรับสัญญาณ สัญญาณจะสามารถ

ผ่านไปยังเครื่องรับทั้งหมด ขณะเดียวกันก็จะป้องกันสัญญาณจากเครื่องส่งไม่ให้ผ่านไปยังเครื่องรับได้ แต่ในทางปฏิบัติ การสร้างดูเพลกเซอร์ให้มีคุณสมบัติ ก็ยังมีการสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (insertion loss)

ดูเพลกเซอร์เป็นอุปกรณ์ที่ให้ค่า Q สูงในแถบผ่านสำหรับทั้งเครื่องส่งและเครื่องรับ โดยที่ในช่วงแถบผ่านของเครื่องรับจะมีการลดทอนน้อยกว่าความถี่รับ ในขณะที่เดียวกันจะมีการลดทอนมากกว่าความถี่ส่ง โดยปกติแล้ว เครื่องส่งมักจะออกแบบให้ระดับสัญญาณรบกวนขาว (white noise) ต่ำกว่าคลื่นพาห้ (carrier) ประมาณ 80dB แต่หากไม่เป็นเช่นนั้นสัญญาณรบกวนก็จะมาปรากฏที่เครื่องรับ ดังนั้นดูเพลกเซอร์จึงถูกเพิ่มขึ้นมาเพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากเครื่องส่ง ไปยังเครื่องรับ

ดูเพลกเซอร์ในย่านความถี่วีเอชเอฟ/ยูเอชเอฟ (VHF/UHF) นั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่จะนำเสนอ นั้น เรานำวงจรกรองมาประยุกต์ทำเป็นดูเพลกเซอร์ได้ แสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 การประยุกต์ใช้วงจรกรองกับดูเพลกเซอร์

วงจรกำจัดแถบความถี่ (band rejection filter) ของเครื่องรับจะกำจัดความถี่ส่ง ในขณะที่วงจรกำจัดแถบความถี่ของเครื่องส่งจะกำจัดความถี่รับ โดยวงจรกรองที่ทำหน้าที่ดูเพลกเซอร์จะต้องมีค่า Q สูงในแถบผ่าน เพื่อให้ดูเพลกเซอร์ที่สร้างขึ้นสามารถใช้งานได้ดี

2.6.1 วงจรกรองผ่านแถบความถี่ (Band Pass Filter) [13]

วงจรกรองผ่านแถบความถี่ จะให้ความถี่ช่วงหนึ่งผ่าน โดยมีการลดทอนน้อย และลดทอนอย่างมากในความถี่นอกเหนือจากแถบผ่าน แถบผ่านจาก ω_1 ถึง ω_2 มีการลดทอนน้อย

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองผ่านแถบความถี่อันดับสอง คือ

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{as}{s^2+as+b} = \frac{\omega_p s/Q_p}{s^2+\omega_p s/Q_p+\omega_p^2} \quad (2.24)$$

2.6.2 วงจรกำจัดแถบความถี่ (Band Rejection Filter) [13]

วงจรวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ ใช้ในการกำจัดสัญญาณในช่วงความถี่หนึ่งส่วนแถบความถี่ผ่านต่ำกว่า ω_1 และความถี่สูงกว่า ω_2

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่อันดับสอง คือ

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{s+d}{s^2+as+d} = \frac{s^2+\omega_z^2}{s^2+\omega_p s/Q_p+\omega_p^2} \quad (2.25)$$

2.6.3 วงจรกรองผ่านแถบความถี่ชนิดแบนด์แคบ (Narrow-band Bandpass Filter)

ความถี่ศูนย์กลาง ω_0 (center frequency) ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ในกรณีแบนด์แคบสามารถประมาณโดยค่าเฉลี่ยเลขคณิตของ ω_1 และ ω_2 ดังนี้

$$\omega_0 = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (2.26)$$

กำหนด

$$\gamma = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$$

โดยที่ γ คือ แบนด์วิดท์สัมพัทธ์ (relative bandwidth)

ความถี่นอร์มาไลซ์ (normalized frequency)

$$\Omega = \frac{1}{\gamma} \frac{(\omega - \omega_0)}{\omega_0} \quad (2.27)$$

ความถี่ ω ใดๆ ภายในขอบเขตของการประมาณสามารถกำหนดได้ว่า

$$\omega = \omega_0 + \frac{\Delta\omega}{2}$$

โดยที่ $\Delta\omega = 2(\omega - \omega_0)$

เป็นบวกเมื่อ $\omega > \omega_0$ และเป็นลบเมื่อ $\omega < \omega_0$ แทนค่า ω ลง (2.27)

$$\Omega = \frac{(\omega + \omega_0)(\omega - \omega_0)}{\omega(\omega_2 - \omega_1)} \quad (2.28)$$

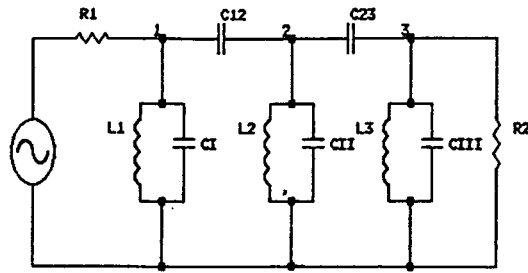
$$\approx \frac{\Delta\omega}{\omega_2 - \omega_1}$$

สำหรับการหาค่าการลดทอนสามารถได้จากฟังก์ชันของบัตเตอร์เวิร์ท

$$A = 10 \log(1 + \Omega^{10}) \text{ dB} \quad (2.29)$$

สำหรับการกำหนดค่าของวงจรมัน วงจรกรองที่จะใช้เป็นเน็ตเวิร์กแบบคาปาซิฟ-

เป็ลโน้ดัลแบนด์พาส (capacitive coupled nodal BP network) ซึ่งทำการแปลงมาจากวงจรความถี่ต่ำผ่านของบัตเตอร์เวิร์ทอันดับที่ 3



รูปที่ 2.23 เน้ทเวอร์กแบบคาปาซิทีฟคัปเปิลโน้ดัลแบนด์พาส

กำหนดให้ ตัวประกอบคุณภาพ (quality factor) คือ q

$$q = \frac{\omega L}{R} = R\omega C \quad (2.30)$$

นอร์มาไลซ์ q , q_n , และ นอร์มาไลซ์ LP element, x_n

$$q_1 = x_1 \quad q_2 = \alpha \quad q_3 = x_n$$

ในกรณีวงจรกรองอันดับที่ 3 $x_1 = 1 \quad x_2 = 2 \quad x_3 = 1$

สัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ (coupling coefficient) $k_{1j}; (j=1+1)$

$$k_{1j} = \frac{1}{\sqrt{x_1 x_j}} \quad (2.31)$$

โดยที่ค่า Q และ K มีค่าดีนอร์มาไลซ์ เป็น

$$Q_1 = q_1 / Y \quad \text{และ} \quad K_{ij} = Y k_{ij}$$

ตัวเก็บประจุเชื่อมต่อ (coupling capacitance) $C_{1j}; (j=1+1)$

$$C_{1j} = K_{1j} \sqrt{C_1 C_j} \quad (2.32)$$

C_1 เป็น ค่าตัวประจุทั้งหมดที่มองจากจุดที่ 1 จนถึงกราวด์ เมื่อลัดวงจร ณ. จุดที่ 2

$$C_1 = C_1 + C_{12} \quad (2.33)$$

C_2 เป็น ค่าตัวประจุทั้งหมดที่มองจากจุดที่ 2 จนถึงกราวด์ เมื่อลัดวงจร ณ. จุดที่ 1

และจุดที่ 3

$$C_2 = C_{11} + C_{12} + C_{23} \quad (2.34)$$

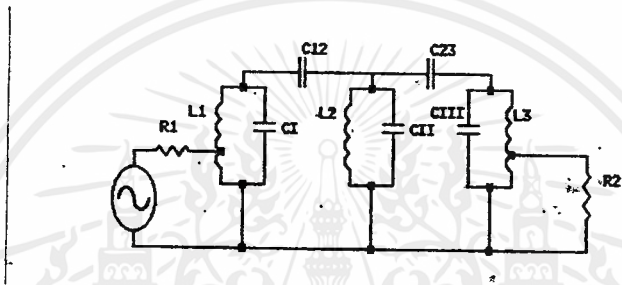
ความต้านทานของแหล่งจ่ายและโหลด จะต้องมามีค่าเหมาะสมกับค่า Q ขณะมีโหลด (loaded Q) ซึ่งสามารถหาค่าได้ดังนี้.

$$R_1 = R_2 = Q_1 \omega_0 L_1 \quad (2.35)$$

สำหรับการออกแบบในทางปฏิบัตินั้น เรามักเลือกกำหนดค่าของขดลวดค่าใดค่าหนึ่งเสียก่อนแล้วจึงคำนวณหาค่าตัวเก็บประจุ ดังนั้นค่าที่ได้ออกมาจะไม่เหมาะสมกับค่าความต้านทานของแหล่งจ่ายและโหลด เราสามารถแก้ปัญหาโดยการแทนที่ขดลวดโดยการแทน, N_T

$$N_T = N_1 \sqrt{\frac{R_s}{R_1}} \quad (2.36)$$

เมื่อ N_1 เป็นจำนวนรอบของขดลวด และ R_s เป็นความต้านทานของแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.24 Tap-L Nodal BP Network

2.6.4 วงจรกำจัดแถบความถี่ (Band Rejection Filter) [13]

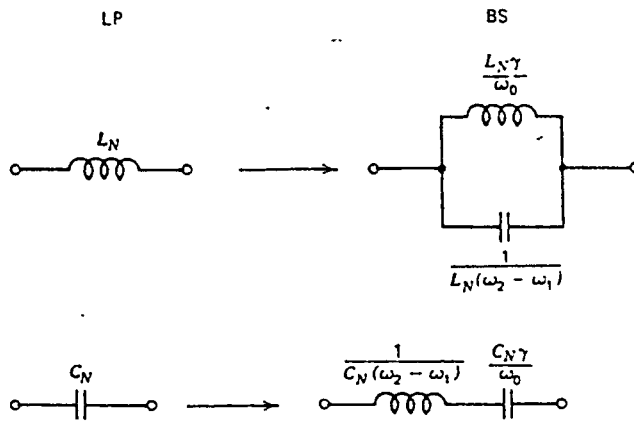
การสร้างวงจรกำจัดแถบความถี่ ได้จากการแปลงเป็นส่วนกลับของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ นั่นคือ

$$S = \frac{1}{s/\omega_0 + \omega_0/s} \quad (2.37)$$

ความถี่นอร์มาไลซ์

$$\Omega = \frac{-\gamma}{\omega/\omega_0 - \omega_0/\omega} \quad (2.38)$$

โดยที่ ω_0 เป็นค่าเฉลี่ยเรขาคณิตของ ω_1 และ ω_2



รูปที่ 2.25 การแปลงค่าอุปกรณ์

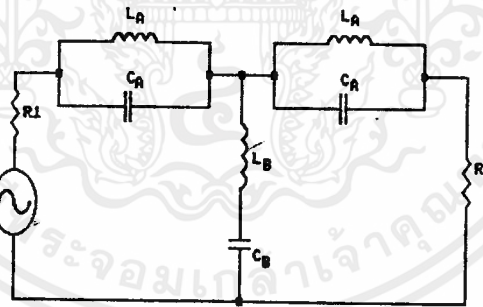
$$L_A = R \gamma L_N / \omega_0 \quad (2.39)$$

$$C_A = 1 / (L_A \omega_0^2) \quad (2.40)$$

$$L_B = R / [C_N (\omega_2 - \omega_1)] \quad (2.41)$$

$$C_B = 1 / (L_B \omega_0^2) \quad (2.42)$$

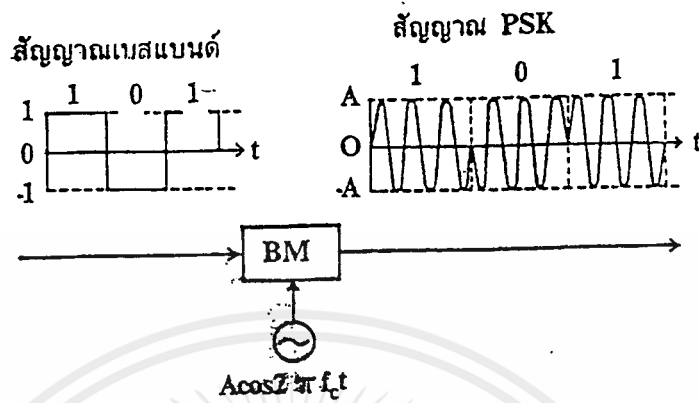
วงจรที่จะนำมาใช้สร้างวงจรกรองกำจัดแถบความถี่นั้น ได้มาจากการแปลงวงจรอง
ความถี่ต่ำผ่านอันดับที่ 3 ซึ่งแสดง ได้ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 วงจรกำจัดแถบความถี่ อันดับที่ 3

2.7 การสร้างสัญญาณโบนารีเฟสซิปคีย์อิง (BPSK)

การสร้างสัญญาณ BPSK ทำได้โดยนำสัญญาณดิจิทัลมาทำการมอดูเลทกับสัญญาณรูปไซน์แบบบาลานซ์ (Balance)

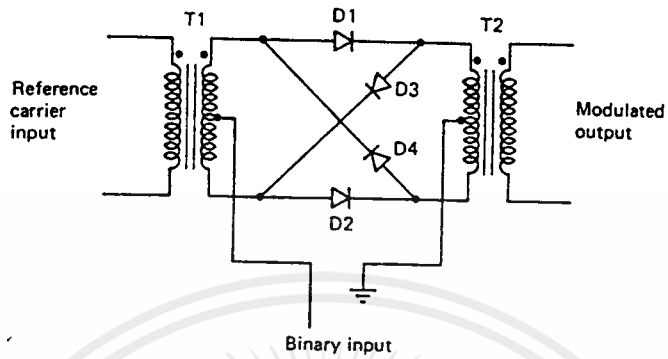


รูปที่ 2.27 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของ BPSK มอดูเลเตอร์

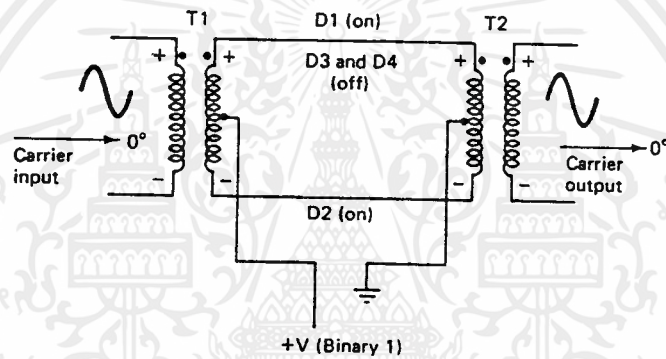
ในทางปฏิบัติมีวิธีทำได้โดยใช้บาลานซ์มอดูเลเตอร์ (Balance Modulator) ชนิดต่าง ๆ เช่น

2.7.1 รিংมอดูเลเตอร์ (Ring Modulator)

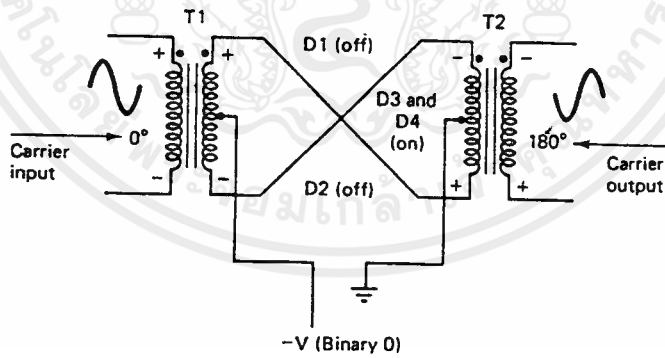
ริงมอดูเลเตอร์ เป็นวงจรคุณเชิงทวิภาค สามารถใช้สร้างสัญญาณเอเอ็มและสัญญาณแบบดับเบิลไซด์แบนด์ซัพเพรสแคเรีย (Double-Sideband Suppressed Carrier) วงจรริงมอดูเลเตอร์ ประกอบด้วย หม้อแปลงแบบความถี่กว้าง 2 ตัว และไดโอด 4 ตัว ขณะทำงานแบบบาลานซ์ ไดโอดจะสลับกันทำงานทีละสองตัว ซึ่งสัญญาณอินพุตต้องมีขนาดใหญ่พอที่จะทำให้ไดโอดทำหน้าที่เป็นสวิตช์ได้ ซึ่งทำได้โดยป้อนสัญญาณดิจิทัลที่มีขนาดเป็นบวกและลบ



(a)



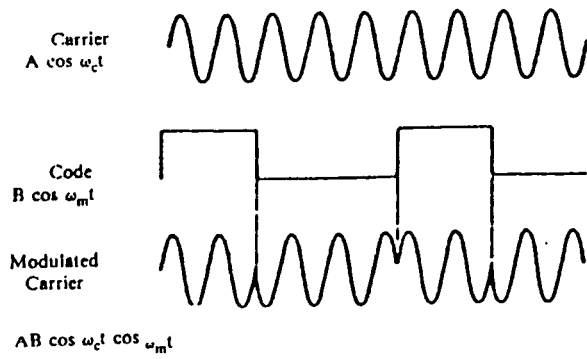
(b)



(c)

รูปที่ 2.28 แสดงวงจร BPSK มอดูเลเตอร์ซึ่งใช้ริงก์มอดูเลเตอร์

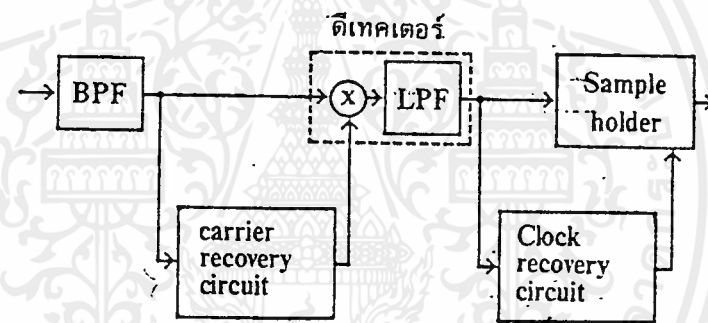
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.29 แสดงสัญญาณ BPSK ที่ออกมาจากมอดูเลเตอร์

2.8 การตีมอดูเลตสัญญาณ BPSK กลับเป็นสัญญาณดิจิทัล

การตีมอดูเลตสัญญาณ BPSK กลับเป็นสัญญาณดิจิทัลมีหลักการง่ายๆ ดังบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 แสดงการตีมอดูเลตสัญญาณ BPSK กลับเป็นสัญญาณดิจิทัล

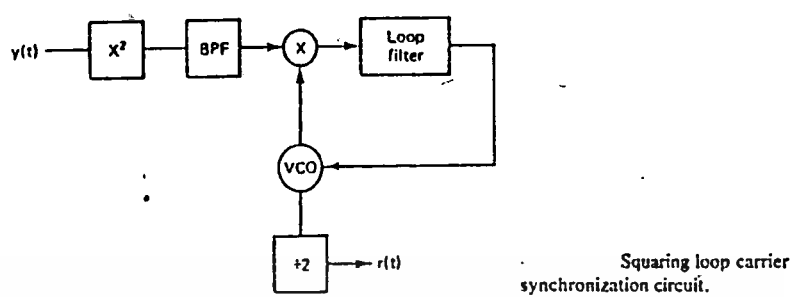
2.9 การรีคัพเวอร์แคร์เรียจ (Carrier Recovery)

การรีคัพเวอร์แคร์เรียจมีวิธีทำหลายวิธี บางวิธีก็สามารถทำไปพร้อมกับการรีคัพเวอร์สัญญาณนาฬิกาและได้สัญญาณไบนารีออกมาเลย ในโครงงานนี้ใช้วิธีรีคัพเวอร์แคร์เรียจแบบ square loop

2.9.1 Square Loop

มีหลักการทำงานคือ นำสัญญาณ BPSK ที่รับมาได้มาแยกกำลังสอง ซึ่งอาจทำได้โดยใช้วงจรรวมหรือบาลานซ์มอดูเลเตอร์ จากนั้นนำเอาที่พู่ที่ป้อนเข้าวงจรเฟสล็อกคูลูป ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวงจรรองผ่านแถบความถี่ที่มีแบนด์วิดท์แคบมากๆ เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนทั้ง วงจรเฟสล็อกคูลูปจะถูกใช้งานที่สองเท่าของความถี่แคร์เรียจเดิม เอาที่พู่ของวงจรเฟสล็อกคูลูปจะถูกหารความถี่ด้วยสอง ก็จะได้ความถี่แคร์เรียจกลับมา หลังจากนั้นอาจจะต้องใช้วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อกรองเอาเฉพาะ

ความถี่มูลฐานมาใช้ คือ ความถี่แครี่เรียที่เป็นคลื่นรูปซายน์นั่นเอง บล็อกไดอะแกรมการทำงานของ วงจรแสดงในรูปที่ 2.31



รูปที่ 2.31 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรรีตีฟเวอร์แครี่เรีย สมมติสัญญาณ BPSK คือ $X(t)$ เขียนในรูปฟังก์ชันของซายน์ได้เป็น

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

โดยที่ $\phi = 0$ เมื่อข้อมูลดิจิทัลเป็น "0"

1 เมื่อข้อมูลดิจิทัลเป็น "1"

$\omega =$ ความถี่ของแครี่เรีย

เพราะฉะนั้น

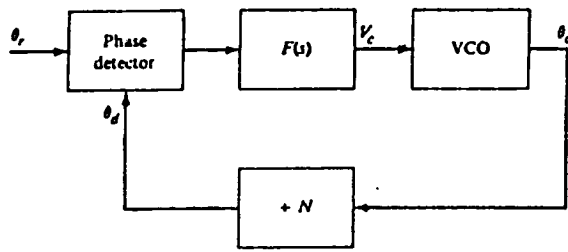
$$\begin{aligned} X^2(t) &= A \sin(\omega t + \phi) A \sin(\omega t + \phi) \\ &= \frac{A^2 [\cos(\phi) - \cos(2\omega t + 2\phi)]}{2} \end{aligned}$$

$$= \frac{\text{องค์ประกอบดีซี} - A^2 \cos(2\omega t + 2\phi)}{2} \quad (2.43)$$

เมื่อผ่านวงจรเฟสล็อกคูลูปซึ่งมีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่มีความถี่ศูนย์กลาง เป็นสองเท่าของแครี่เรีย เพราะฉะนั้นสัญญาณที่ผ่านไปได้ก็คือสัญญาณความถี่ 2 เท่านั้นและจะถูกหาร ด้วยสองได้เป็นความถี่ เอกลักษณ์จากเฟสล็อกคูลูปจะเป็นสัญญาณรูปเหลี่ยม (square wave) ที่สมมาตร ซึ่งประกอบด้วยความถี่ $+ 3 + 5 + \dots + (n-1) + \dots$ โดยที่ $n = 0, 1, 2, \dots$ ดังนั้นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะทำหน้าที่กรองเอาเฉพาะความถี่ต่ำที่เป็นคลื่นรูปซายน์มาใช้งานต่อไป

ปัญหาที่จะพบในทางปฏิบัติ คือการใช้เฟสล็อกคูลูปเพื่อที่จะล็อกความถี่แครี่เรียโดยทั่วไปจะใช้เฟสดีเทคเตอร์แบบมิกเซอร์ ซึ่งจะสามารถกำจัดสัญญาณการรบกวนได้ดีที่สุด เฉพาะตอนที่วงจรอยู่

ในสภาวะลอคเท่านั้น กล่าวคือจะใช้เฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 1 [9]



รูปที่ 2.32 แสดงวงจรเฟสล็อคที่ใช้เฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 1

สมมติว่า เฟสล็อคลูปลอคที่ความถี่ ω_1 ดังนั้นอินพุตที่ป้อนเข้าเฟสดีเทคเตอร์ คือ

$$\text{สัญญาณอ้างอิง} \quad U_1(t) = U_{10} \sin(\omega_1 t + \theta_1)$$

$$\text{เอาท์พุทของเฟสล็อคลูป} \quad U_2(t) = U_{20} \cos(\omega_1 t + \theta_2)$$

ดังนั้นเอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์คือ

$$\begin{aligned} U_d(t) &= K U_1(t) U_2(t) \\ &= K/2 U_{10} U_{20} [\sin(\theta_1 - \theta_2) + \sin(2\omega_1 t + \theta_1 + \theta_2)] \end{aligned}$$

เมื่อ K คือ เกนแพลคเตอร์ของเฟสดีเทคเตอร์

เอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์จะผ่านฟิลเตอร์ก่อนป้อนเข้าวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน ดังนั้น สิ่งที่ป้อนเข้าวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดันก็คือ องค์ประกอบตีสี่ที่เป็นฟังก์ชันของผลต่างของ θ_1 และ θ_2

$$\text{ถ้า } \theta_e = \theta_1 - \theta_2$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad U_d(t) = K_d \sin \theta_e$$

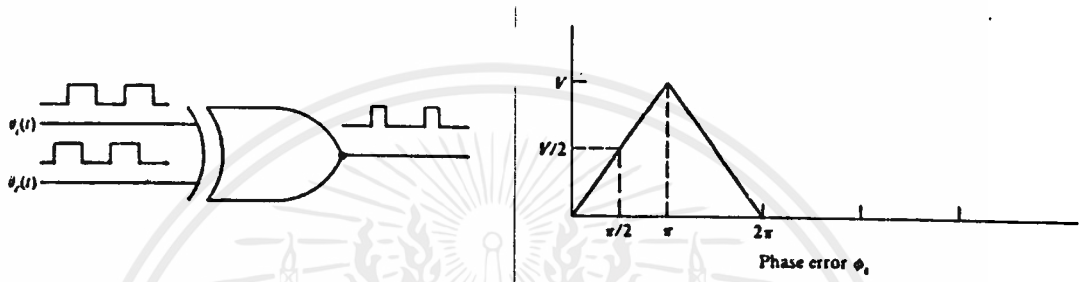
$$\text{โดย} \quad K_d = K U_{10} U_{20} / 2$$

ซึ่งปกติค่า K_d จะมีค่าสูงมากและจะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับ U_{10} ในช่วงหนึ่งเท่านั้น เพราะ เฟสดีเทคเตอร์จะอิ่มตัวเมื่อ U_{10} มีค่าสูงมากเกินไป ดังนั้นเฟสดีเทคเตอร์แบบนี้จึงถูกจำกัดการใช้งานในย่านที่สัญญาณอ้างอิงมีค่าจำกัด

เมื่อ ω_1 ไม่เท่ากับ ω_2 จะทำให้ $U_d(t)$ ไม่มีองค์ประกอบตีสี่ ทำให้เฟสล็อคลูปหลุดจากสภาวะลอค ข้อเสียของเฟสดีเทคเตอร์แบบนี้คือ การทำให้ลูปลอคนั้นยากมาก ขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ตัวอื่นๆ อีกมาก แต่ข้อดีก็คือเมื่อลอคแล้วจะได้ว่า $\omega_1 = \omega_2$ พอดี ทำให้สัญญาณรบกวนที่มีความถี่อื่นถูกกำจัดไปได้อย่างมาก เฟสดีเทคเตอร์แบบนี้จึงนิยมใช้ในวงจรภาครับของวงจรสื่อสารโดยทั่วไป จากการทำให้ลูปลอคได้ค่อนข้างยากเมื่อใช้เฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 1 โครงการนี้จึงใช้เฟสดีเทคเตอร์

ชนิดที่ 2 [9] ซึ่งรูปจะลือคในชวงที่ ω_1 ต่างกับ ω_2 ได้มากกว่าเฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 1 และคุณสมบัติอื่นๆ ของเฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 2 ยังคงคล้ายกับชนิดที่ 1

เฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 2 เป็นเฟสดีเทคเตอร์แบบดิจิตอล จึงต้องมีการขยายสัญญาณอนาลอกให้มีระดับสัญญาณขนาดใหญ่พอที่จะป้อนเข้าเฟสดีเทคเตอร์ แต่ข้อเสียของเฟสดีเทคเตอร์ชนิดนี้คือ ดิวตี้ไซเคิล (duty cycle) ของสัญญาณอ้างอิงจะต้องเท่ากับ 50% ค่าเกนแพลคเตอร์ของเฟสดีเทคเตอร์จึงเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับค่าความต่างเฟส ถ้าสัญญาณอ้างอิงมีดิวตี้ไซเคิลไม่เท่ากับ 50% จะทำให้ค่าเกนแพลคเตอร์ลดลงอย่างมาก ทำให้ลูปล็อคสัญญาณได้ยาก

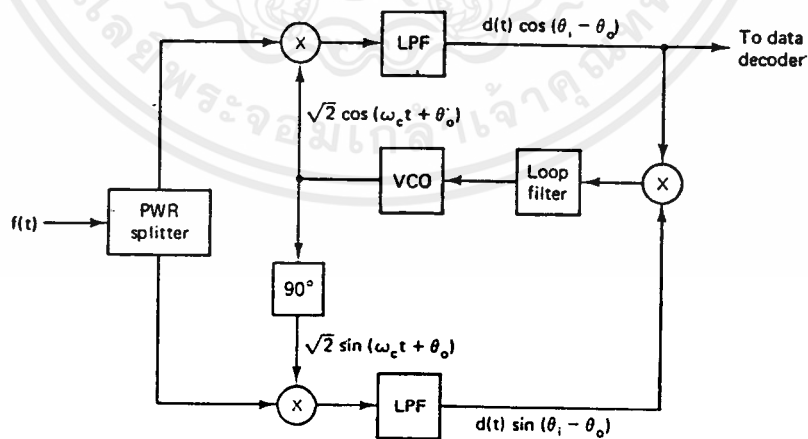


รูปที่ 2.33 แสดงเฟสดีเทคเตอร์ชนิดที่ 2 [9]

2.9.2 คอสตาสลูป (Costas Loop)

คอสตาสลูปมีการป้อนกลับจากเอาท์พุท ทำให้มีเสถียรภาพที่ดีกว่าแบบ Square Loop และเอาท์พุทที่ได้ก็ได้เป็นข้อมูลไบนารีเลย บล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของลูปแสดงในรูปที่

2.34



รูปที่ 2.34 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงานของคอสตาสลูป

$$\text{สมมติ } f(t) = \sqrt{2A} d(t) \cos(\omega_c t + \theta_1)$$

$$\text{ดังนั้น } Y_1(t) = A d(t) \sin(\theta_1 - \theta_0) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

$$\text{และ } Y_2(t) = A d(t) \cos(\theta_1 - \theta_0) \cdot \frac{\sqrt{2}}{2}$$

ดังนั้นเอาท์พุทของเฟสดีเทคเตอร์ที่ป้อนไปยังลูปลิเตอร์จึงเป็น

$$\begin{aligned} Y_1(t)Y_2(t) &= e(t) \\ &= K_m/4 A^2 d^2(t) \sin[2(\theta_1 - \theta_0)] \\ &= K_p \sin(2\theta_0) \end{aligned} \quad (2.44)$$

ซึ่ง $2(\theta_1 - \theta_0)$ มีค่าได้เป็น $0, 2\pi$ จะทำให้ค่า $\sin 2\theta_0$ เป็น 0 ทั้งคู่ ดังนั้นลูปลิเตอร์จะสามารถล๊อคได้ทั้งสี่เฟสของสัญญาณอินพุทและสัญญาณเอาท์พุทของคออสตาสลิป คือ

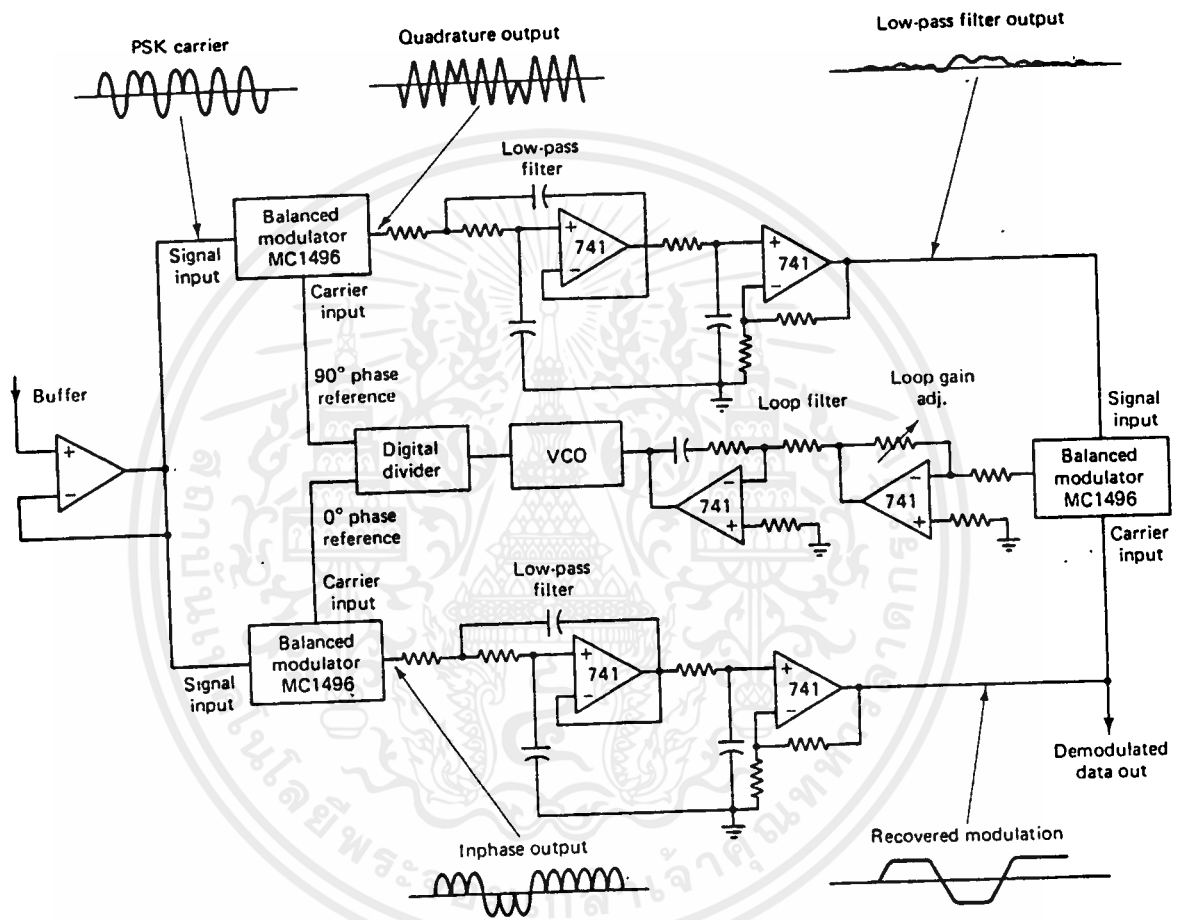
$$Y_2(t) = d(t) \cos(2\theta_0) - d(t)$$

เมื่อ $\theta_0 \approx 0$

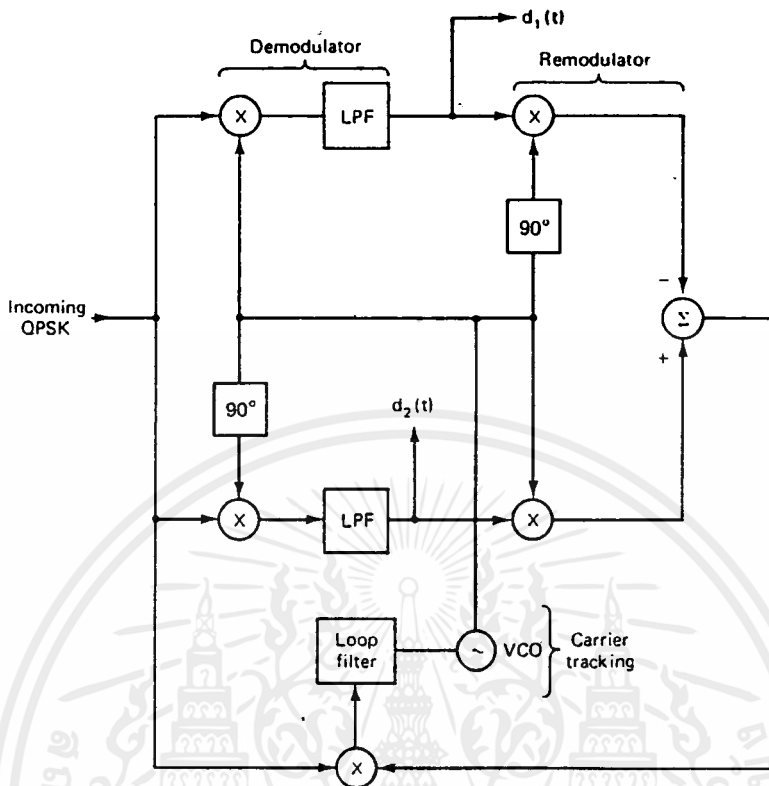
วิธีการของคออสตาสลิปสามารถใช้ได้กับสัญญาณ QPSK โดยที่ $Y_1(t)$ จะให้ $d_1(t)$ และ $Y_2(t)$ จะให้ $d_2(t)$

2.9.3 รีโมดูลเลเตอร์ (Remodulator)

เป็นวิธีการคล้ายกับ Square Loop มาก เพราะมีการป้อนกลับสัญญาณดิจิทัล จากเอาท์พุทมาโมดูลเลทเป็นสัญญาณ BPSK อีกครั้งเพื่อนำไปสร้างแครี่เรีย โดยใช้วิธีคูณกับสัญญาณ BPSK ที่เข้ามาทางอินพุท แล้วป้อนเข้าวงจรเฟสล๊อคลูปเพื่อสร้างแครี่เรียอีกครั้งหนึ่งเพื่อไปทำการตีโมดูลเลทกับสัญญาณ BPSK อีกทีหนึ่ง รูปที่ 2.36 และ 2.37 แสดงบล็อกไดอะแกรมแสดงการทำงานของรีโมดูลเลเตอร์ลูปที่ใช้ตีโมดูลเลทสัญญาณ BPSK และ QPSK

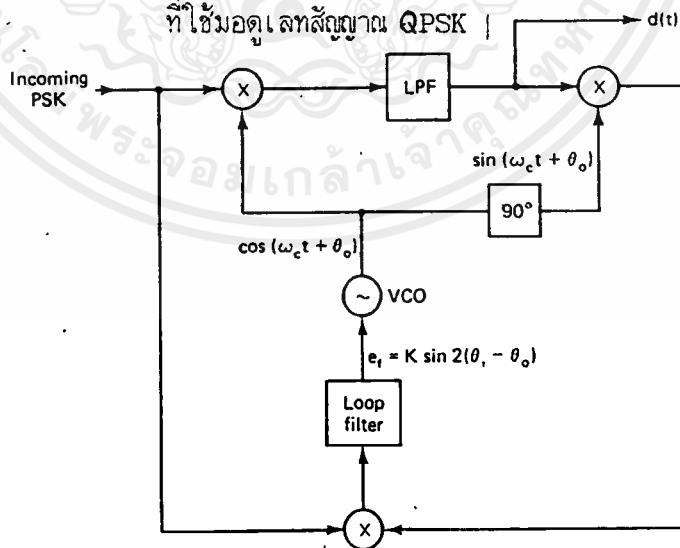


รูปที่ 2.35 แสดงตัวอย่างวงจรคอสตาสลูป



รูปที่ 2.36 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์

ที่ใช้มอดูเลทสัญญาณ QPSK

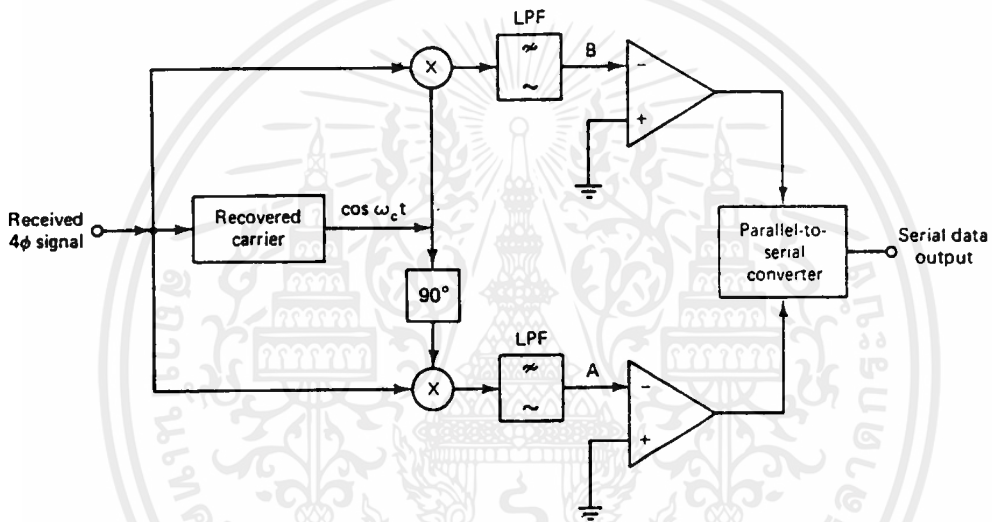
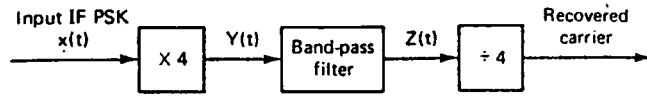


รูปที่ 2.37 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรมอดูเลเตอร์

ที่ใช้มอดูเลทสัญญาณ BPSK

2.9.4 วงจรคูณ-กรอง-หาร (Multiply - filter - divider Circuit)

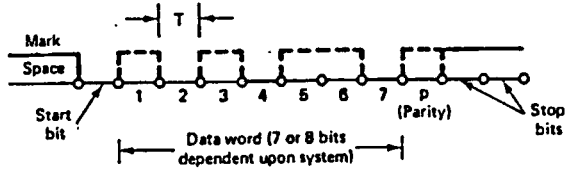
เป็นวิธีรีคัพเวอร์แควร์เรียของสัญญาณ QPSK ที่มีบิตเรทสูงมากๆ วิธีการเหมือนกับ Square Loop แต่เป็นยกกำลังสี่แทนยกกำลังสอง ดึงบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 แสดงบล็อกไดอะแกรมของวงจรคูณ-กรอง-หาร

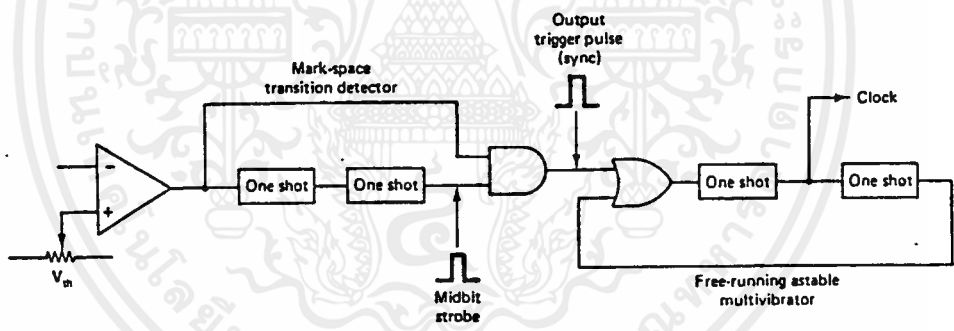
2.10 การรีคัพเวอร์สัญญาณนาฬิกา (Clock Recovery)

ในการสื่อสารข้อมูลแบบอะซิงโครนัส จะไม่มีการส่งสัญญาณนาฬิกาไปพร้อมกับข้อมูล ต่างกับการสื่อสารข้อมูลแบบซิงโครนัส การส่งข้อมูลแบบอะซิงโครนัสจะเริ่มต้นด้วยบิตเริ่มต้น ตามด้วยข้อมูลชุดหนึ่ง (มักจะเป็น 8 บิต) และลงท้ายด้วยบิตสิ้นสุด ซึ่งอาจจะเป็น 1, 1.5 หรือ 2 บิต แล้วแต่จะเลือกใช้ และในช่วงที่ไม่มีการส่งข้อมูล จะเรียกว่าอยู่ในภาวะมาร์ค (mark, มักเป็นลอจิก 1) ซึ่งภาวะที่เปลี่ยนแปลงจากมาร์คเป็นสเปซ (space, ลอจิก 0) เรียกว่าบิตเริ่มต้น ดังรูปที่ 2.39



รูปที่ 2.39 แสดงช่วงการเปลี่ยนจากสัญญาณมาร์คเป็นสเปซ

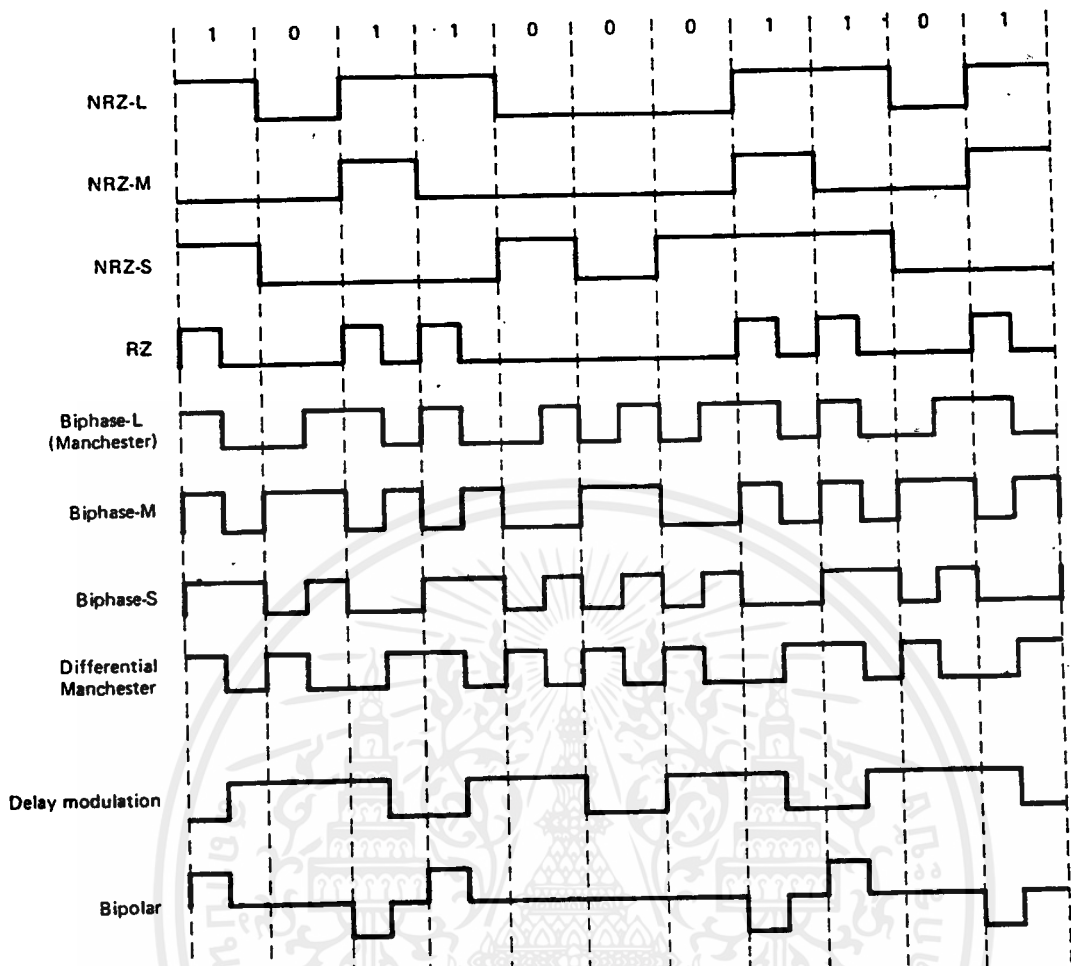
วิธีการหนึ่งที่ใช้ในการสร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาจากสัญญาณเดิติดอล คือ ตรวจสอบว่ามีบิตเริ่มต้นแล้วหรือยัง ถ้ามีบิตเริ่มต้นเข้ามาก็จะกระตุ้นให้วงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบเตอร์ (Astable Multivibrator) ทำการสร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาสำหรับข้อมูลหนึ่งชุด วิธีการนี้จะใช้งานวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบเตอร์ที่มีความถี่น้อยกว่าความถี่ของสัญญาณนาฬิกาเล็กน้อย โดยวงจรอะสเตเบิลมัลติไวเบเตอร์ จะเริ่มทำงานเมื่อถูกกระตุ้นจากวงจรตรวจสอบภาวะ (Mark-Space Transition Detector) ซึ่งจะสร้างสัญญาณเทริกเกอร์ (trigger pulse) ตรงกึ่งกลางของบิตข้อมูล ในการใช้งานจริงควรมีวงจรนับ คอยนับจำนวนสัญญาณนาฬิกา เพื่อจะปิดกั้นไม่ให้มีสัญญาณนาฬิกาออกไปเมื่อถึงบิตสิ้นสุด



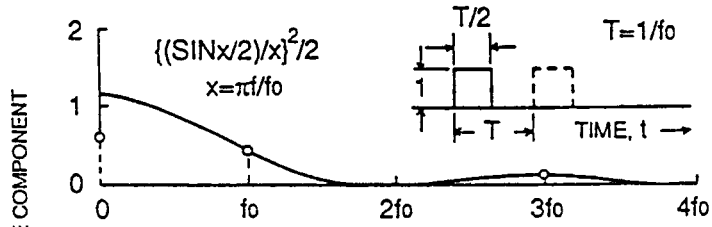
รูปที่ 2.40 แสดงบล็อก ไดอะแกรมของวงจรรีตีฟเวอร์สัญญาณนาฬิกา

วงจรแบบนี้ราคาถูกแต่จะมีความแตกต่างระหว่างความถี่ของสัญญาณนาฬิกาของภาคส่งกับสัญญาณนาฬิกาของภาครับ และขึ้นอยู่กับความกว้างของสัญญาณซิงค์ (sync pulse) จึงไม่นิยมใช้ วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกาแบบนี้ และ ได้มีการพัฒนาวิธีการสร้างสัญญาณนาฬิกาขึ้นมาอีกหลายวิธี

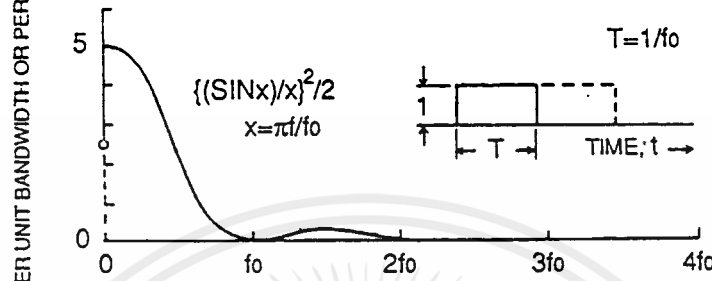
ถ้าเราพิจารณากำลังของสเปคตรัมของสัญญาณชนิดต่างๆ เช่น NRZ, RZ, Bipolar NRZ ดังรูปที่ 2.41



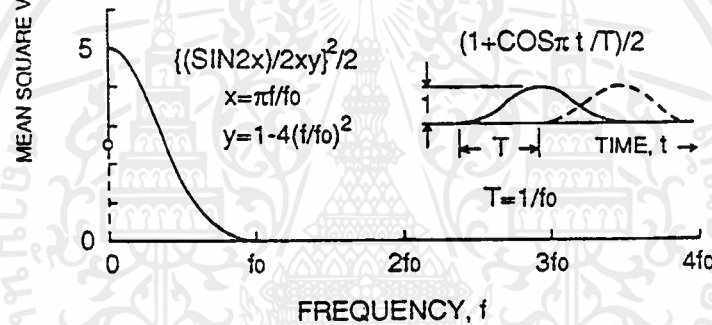
รูปที่ 2.41 สัญญาณชนิดต่างๆ



(a) RZ Pulse



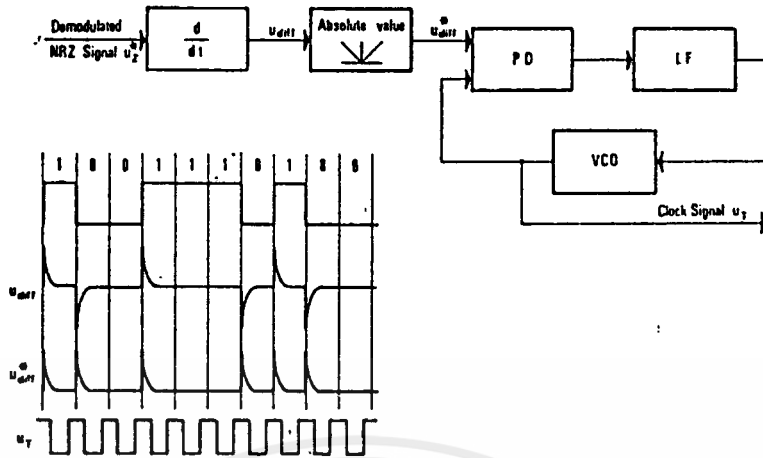
(b) NRZ Pulse



(c) Raised Cosine Pulse

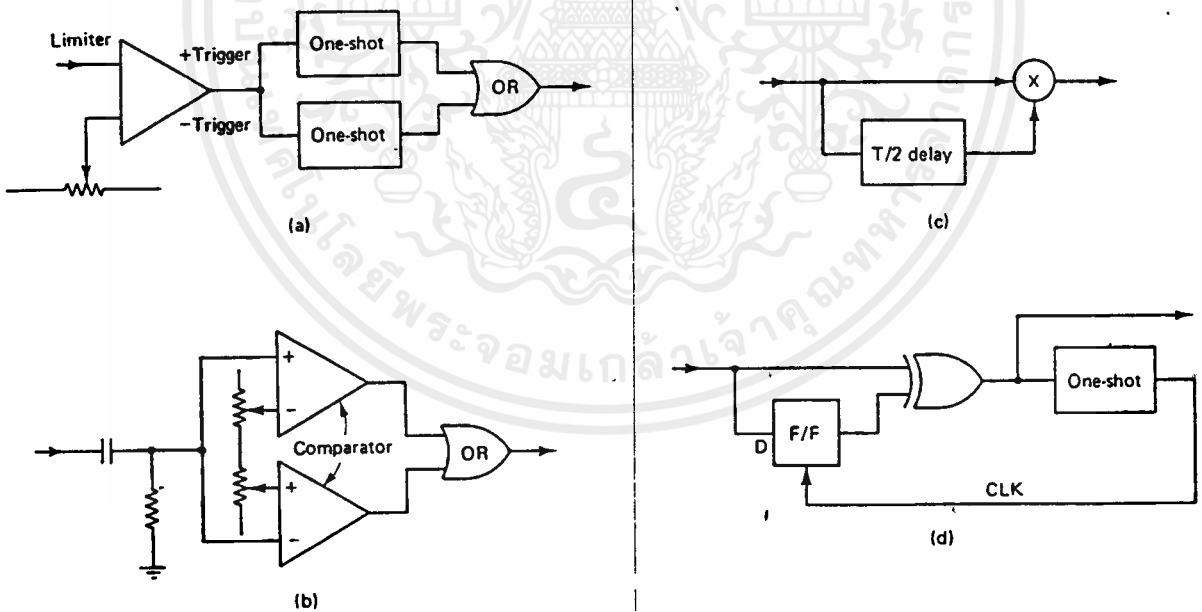
รูปที่ 2.42 ความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณชนิดต่างๆ

จะเห็นว่าจากความหนาแน่นสเปกตรัมของสัญญาณ NRZ จะไม่มีส่วนประกอบของความถี่สัญญาณนาฬิกา (f_0 , Power เป็น 0 ที่ความถี่ f_0) จึงไม่สามารถใช้วงจรกรองความถี่เพื่อกรองสัญญาณนาฬิกาออกจากสัญญาณข้อมูลได้โดยตรง จึงจำเป็นต้องทำการจัดการกับสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ได้สเปกตรัมที่มีความถี่ของสัญญาณนาฬิกา เนื่องจากการจัดการกับสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นสามารถอธิบายได้ด้วยอนุกรมกำลัง เช่น การไบอัสตรงของไดโอด จะได้เทอมที่เป็นค่าคงที่และเทอมที่มีองค์ประกอบของความถี่สัญญาณนาฬิกาอยู่ การทำงานของไดโอดที่เป็นวงจรจัดเรียงกระแสแบบเต็มรูปคลื่นให้ผลเหมือนกับอุปกรณ์ที่เป็นไปตาม สแควร์ลอว์ (Square Law) ซึ่งถ้าผ่านสัญญาณข้อมูลก็แปลงกลับคืนมาได้ เขายังอุปกรณ์ที่เป็นสแควร์ลอว์ ก็จะได้เอาเทอมที่มีองค์ประกอบของความถี่สัญญาณนาฬิกาอยู่ด้วย สามารถใช้ฟิลเตอร์กรองออกมาใช้งานได้

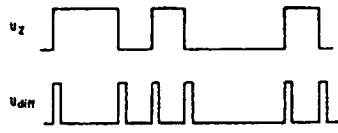


รูปที่ 2.43 การรีคัพเวอร์สัญญาณนาฬิกา

อีกวิธีการหนึ่งที่ใช้สำหรับสัญญาณดิจิทัล คือการตรวจจับช่วงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณ โดยวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 2.44



รูปที่ 2.44 วงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2.45 เอาท์พุทของวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลง

สัญญาณเอาท์พุทที่ได้จากวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลง จะมีคาบที่เท่ากับคาบของความเร็วของข้อมูล ซึ่งสามารถนำไปใช้สร้างสัญญาณนาฬิกาได้โดยใช้วงจรเฟลลือคูลูปเข้าช่วย เพราะว่าข้อมูลจะมีบางช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงเลย วงจรเฟลลือคูลูปจะสร้างสัญญาณนาฬิกาในช่วงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรเฟลลือคูลูปจะทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ ซึ่งมีคุณสมบัติเหมือนกัน คือ สามารถสร้างสัญญาณที่มีความถี่เท่ากับค่าความถี่กลาง ได้ชั่วระยะเวลาหนึ่ง เมื่อความถี่อินพุทหายไปชั่วขณะ ในโครงการนี้ ก็ใช้วิธีตรวจจับการเปลี่ยนแปลงในการสร้างสัญญาณนาฬิกา โดยใช้วงจรเฟลลือคูลูปเข้าช่วย

ความจริงแล้ว เอาท์พุทของวงจรตรวจจับการเปลี่ยนแปลง สามารถป้อนเข้าวงจรกรองผ่านแถบความถี่เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาได้เช่นกัน แต่ต้องทำการเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณให้มีทั้งซิกบวกลบ เพราะการผ่านจุดศูนย์ของสัญญาณ (Zero Crossing) จะทำให้วงจรกรองผ่านแถบความถี่ออสซิลเลทตามความถี่อินพุทตั้งนั้น ยิ่งวงจรกรองผ่านแถบความถี่สามารถออสซิลเลทที่ความถี่นี้ได้นานเท่าไร (เมื่ออินพุทหายไป) ก็จะทำให้การแกว่งของสัญญาณนาฬิกา (Clock Jitter) ลงได้เท่านั้น สิ่งสำคัญอีกอย่างก็คือ วงจรกรองผ่านแถบความถี่ต้องมีแถบความถี่ผ่านแคบมากๆ มีค่า Q สูงมากๆ และมีค่าความถี่กลางที่ความถี่ของสัญญาณนาฬิกา ถ้าให้จำนวนบิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมีได้สูงที่สุดเท่ากับ N บิตติดต่อกัน จะได้ว่า

$$N = K t_r (BR) \text{ bits}$$

เมื่อ $K = \text{Constance}$ ปกติมีค่า 1, 2

$$t_r = \text{ไรซีไทม์ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่}$$

$$BR = \text{บิตเรทของข้อมูล}$$

กรณีใช้วงจรเฟลลือคูลูปในการสร้างสัญญาณนาฬิกา ซึ่งวงจรเฟลลือคูลูปจะมีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่แคบมากๆ จึงสามารถสร้างสัญญาณนาฬิกาได้อย่างต่อเนื่อง และลดสัญญาณรบกวนไปได้มาก และยังสามารถติดตาม (tracking) ความถี่สัญญาณนาฬิกาที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาเล็กน้อยได้ ซึ่งวงจรกรองผ่านแถบความถี่ธรรมดาไม่สามารถทำได้ ชนิดของวงจรเฟลลือคูลูปจะแบ่งตามชนิดของเฟลลือคูลูปที่ใช้ เฟลลือคูลูปจะกำหนดคุณสมบัติของเฟลลือคูลูป เพื่อที่จะ

หาว่าจำนวนบิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงติดต่อกันมีได้สูงที่สุดกี่บิต จะต้องหาช่วงเวลาที่ยังจรเฟสล็อกคูลูบใช้ในการล็อกความถี่และล็อกเฟส

การหาช่วงเวลาที่ยังจรเฟสล็อกคูลูบใช้ล็อกความถี่ (Frequency Lock time) นั้นค่อนข้างยากมาก เวลาที่ยังจรเฟสล็อกคูลูบใช้ล็อกความถี่โดยประมาณหาได้จาก

$$T_{FL} \sim \frac{4\Delta f^2}{B_L^3}$$

โดยที่ Δf เป็นความแตกต่างระหว่างความถี่ที่เข้ามากับความถี่ของ VCO เดิม

B_L คือ ลูบแบนด์วิดธ์ของวงจรเฟสล็อกคูลูบ ซึ่งหาได้จาก

$$B_L = \int_0^\infty |A(j\omega)|^2 df \quad \text{เอิร์ท}$$

$A(j\omega)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของลูบ

2.10.1 การหาช่วงเวลาที่ยังจรเฟสล็อกคูลูบใช้ล็อกเฟส

การหาช่วงเวลาที่ยังจรเฟสล็อกคูลูบใช้ล็อกเฟส หากจากผลตอบสนองของการเปลี่ยนแปลงของอินพุตอย่างทันทีทันใด ซึ่งเวลาที่ใช้ล็อกเฟสจะเป็นฟังก์ชันของแบนด์วิดธ์ของสัญญาณรบกวนของลูบ, แดมป์ลิ่ง และขึ้นกับชนิดของเฟสดีเทคเตอร์ด้วย แต่จริงๆ แล้ว เวลาที่ใช้ไม่ขึ้นกับแดมป์ลิ่งแพคเตอร์มากนัก

ดังนั้นจะได้

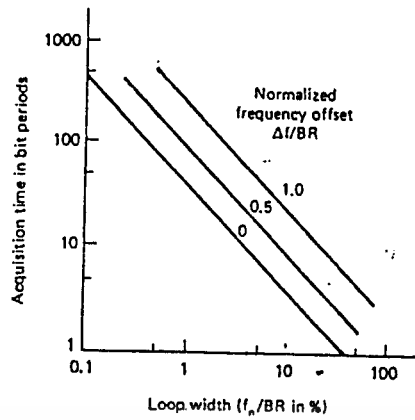
$$T_{PL} \sim 1.3 / B_L$$

เพราะฉะนั้น เวลาที่ใช้ล็อกทั้งหมดเป็น (T_{ACQ} , Acquisition Time)

$$\begin{aligned} T_{ACQ} &\sim T_{FL} + T_{PL} \\ &\sim \frac{4\Delta f^2}{B_L^3} + \frac{1.3}{B_L} \end{aligned}$$

ดังนั้นจำนวนบิตที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมีได้ติดต่อกัน N บิต

$$N \sim 4 \left[\frac{\Delta f/B_L}{B_L/B_R} + \frac{1.3}{B_L/B_R} \right]$$



รูปที่ 2.46 แสดง เวลาที่ใช้ล๊อคกับลูปแบนด์วีรด์

ข้อสังเกตคือในช่วงที่ความถี่ออฟเซต $f = 0$ จะได้ $N = (1.3)/(B_L/B_R)$ นั่นคือ N จะขึ้นกับค่าของลูปแบนด์วีรด์ของเฟสล๊อคคูลูบ ซึ่งปกติจะมีค่าไม่เกิน $2/B_L$

วิธีตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลอีกวิธีที่ยังไม่ได้แสดงไว้ สามารถทำได้ โดยใช้ อาร์ซีเอ็นเทเวอร์กิตไฟเฟอเรนซีเอทสัญญาณอินพุต แล้วเร็คติไฟ (rectify) อีกครั้งหนึ่ง ก็จะได้สัญญาณที่แสดงการเปลี่ยนแปลงของขอบสัญญาณข้อมูล

วงจรรีตีไฟเวอร์สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในโครงงานนี้ประกอบด้วย วงจรตรวจจับขอบสัญญาณ วงจรเฟสล๊อคคูลูบ, วงจรแก้ไขความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณนาฬิกา และวงจรหารความถี่ วงจรเฟสล๊อคคูลูบที่ใช้งาน จะมีความถี่เอาท์พุทเป็นสองเท่าของความถี่ของสัญญาณนาฬิกา เพื่อที่ว่า จะได้มีแบนด์วีรด์แคบ เพราะแบนด์วีรด์ของเฟสล๊อคคูลูบที่มีอัตราขยายของวงจรรองเป็นหนึ่งหาได้จาก

$$\text{Bandwidth} = K_V = K_d K_o / N$$

ในบทนี้จะเป็นการนำทฤษฎีจากบทที่ 2 มาใช้ในการออกแบบวงจรจริงที่ใช้งาน โดย วงจรแต่ละวงจรจะแสดงผลการทดลองในบทที่ 4

3.1 การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัลป์

3.1.1 การออกแบบวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดันที่ใช้ในโครงการนี้ จะใช้วงจรรวมของ โมโตโรล่า เบอร์ MC1648 ซึ่งใช้หลักการของการสังเคราะห์ความถี่ตามทฤษฎีที่กล่าวไปแล้วในบทที่ 3 โดยการใช้สายโคแอกเซียลแบบกึ่งแข็ง (semi-rigid coaxial) และวาริแคป (varicap) เป็น เรโซเนเตอร์ นอกจากนี้ วงจรนี้ยังสามารถมอดูเลตสัญญาณแบบเอฟเอ็มเข้าไปได้โดยใช้ไดโอด (pin diode)

การคำนวณค่าอุปกรณ์ส่วนที่สำคัญที่สุด คือ เรโซเนเตอร์ กำหนดว่าสายโคแอกเซียลแบบกึ่งแข็งที่ใช้มีอิมพีแดนซ์ 75 โอห์ม ยาว 5.5 ซม. มีค่า $\epsilon_r = 2.5$ และเรโซแนนท์ที่ความถี่ 144-148 เมกกะเฮิรต์ สามารถคำนวณค่าอินดักเตอร์ได้จาก

$$Z_a = jZ_0 \sin \beta l$$

$$\text{แทนค่า } jL_a = 75j \cdot \frac{\sin 2\pi \cdot 5.5 \text{ ซม.}}{\lambda_g}$$

$$\lambda_g = \frac{3 \times 10^8}{146 \times 10^6} \times \frac{1}{\sqrt{2.5}} = 1.3 \text{ เมตร}$$

$$\text{เพราะฉะนั้น } L_a = \frac{75}{2\pi \cdot 146 \times 10^6} \times \frac{\sin [2\pi \times 0.055]}{1.3}$$

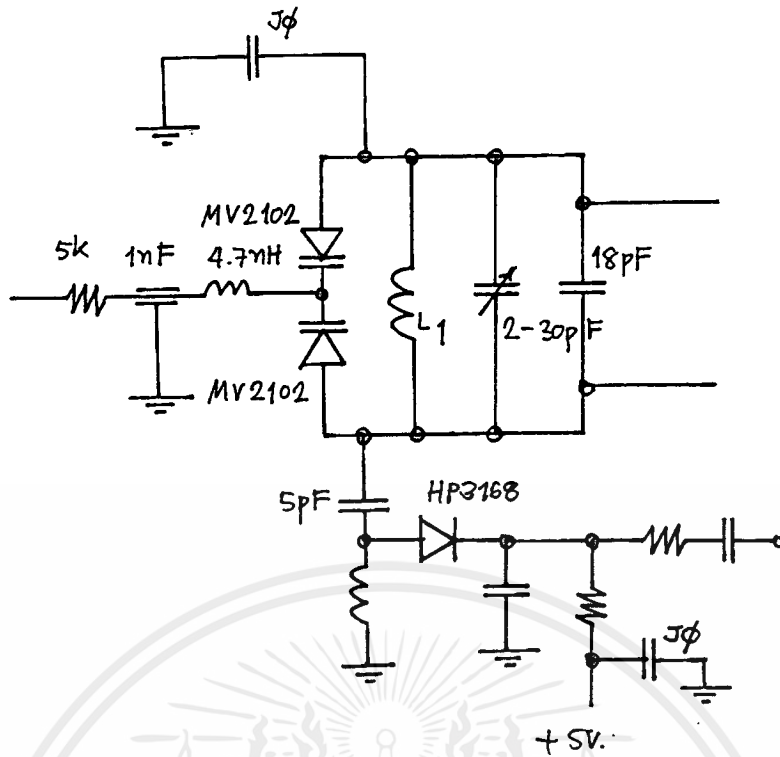
$$= 21.5 \text{ นาโนเฮนรี่}$$

และสามารถคำนวณค่า C ได้จาก

$$C_T = \frac{1}{\omega^2 L}$$

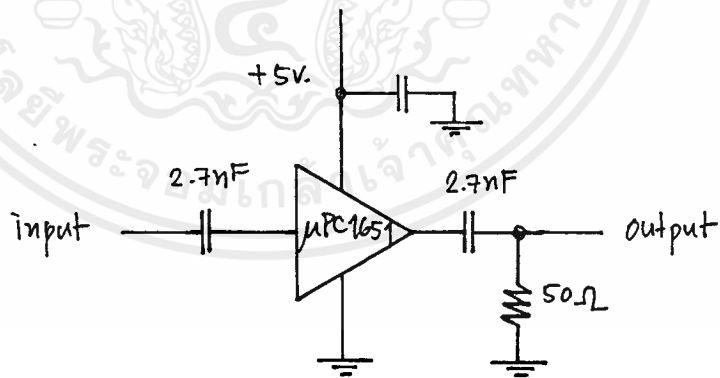
$$= 55.3 \text{ พิโคฟารัด}$$

ซึ่งสามารถใช้วาริแคปและทรिमเมอร์มาต่อขนานกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.1

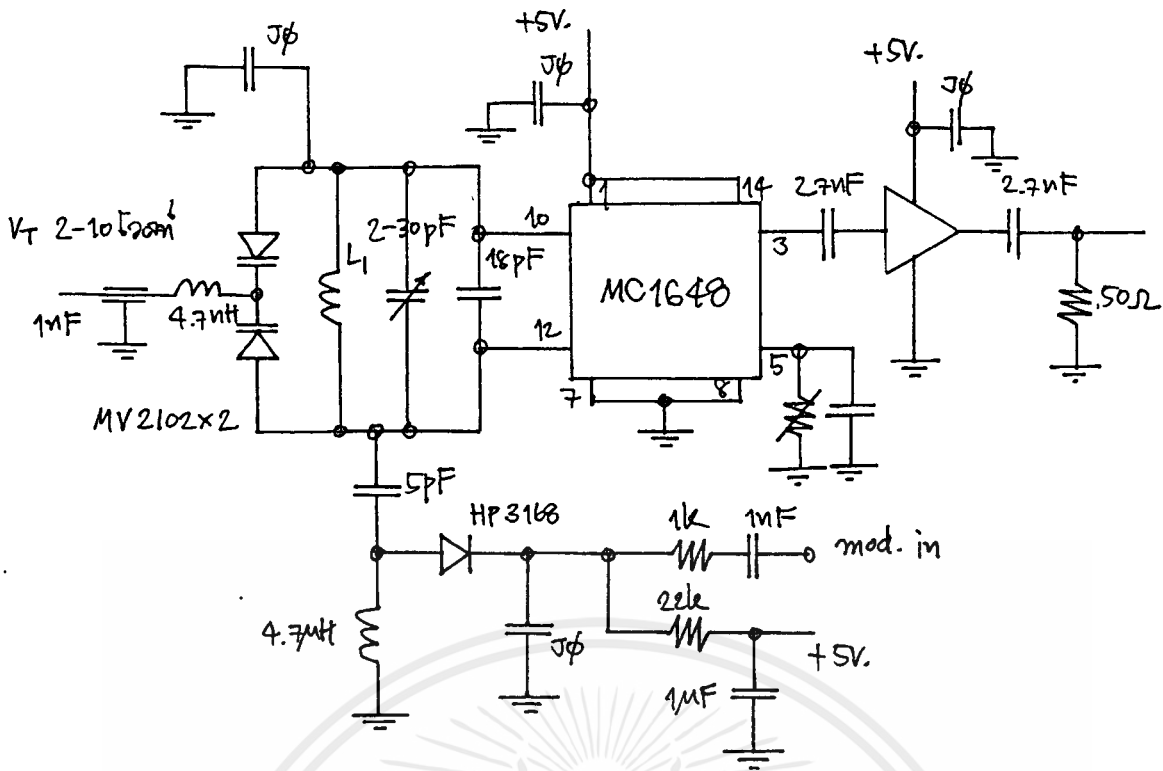


รูปที่ 3.1 วงจรเรโซเนเตอร์ที่คำนวณได้

นอกจากนี้ เพื่อไม่ให้โหลดมีผลต่อสัญญาณที่ได้ ที่เอาต์พุตของวงจรจะมีการต่อวงจรบัฟเฟอร์ไว้ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการต่อบัฟเฟอร์ให้กับวงจร

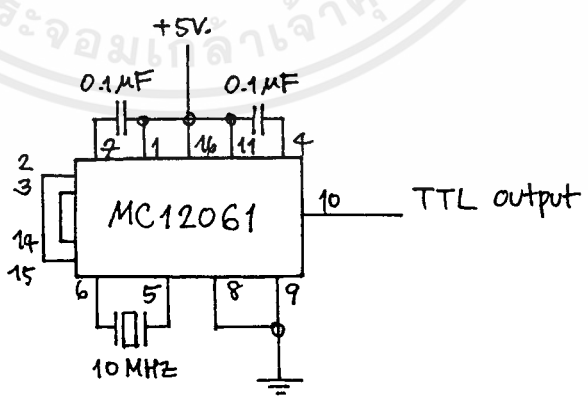


$L_1 = \text{semi-rigid coaxial } \text{cm } 5.5 \text{ ซม. } 75 \text{ โดห์น}$
 $J\phi = 4.7 \mu\text{F} \parallel 2.7 \text{ nF}$

รูปที่ 3.3 แสดงวงจรสมบรูณ์ของวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน

3.1.2 วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยผลิกคริสตอล

ในการสร้างวงจรผลิตความถี่อ้างอิงให้กับระบบ จะใช้วงจรรวมประเภท ECL ผลิต (Emitter Couple Logic) เบอร์ MC12061 ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยผลิกคริสตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 วงจรลูฟิเตอร์

ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในบทที่ 2 ว่า การออกแบบลูฟิเตอร์โดยเฉพาะอันดับที่ 2 (2nd-order) นั้น จะนิยมกำหนดเฟสมาร์จินและลูฟิเตอร์เลี้ยวก่อนซึ่งเฟสมาร์จินที่เหมาะสมมักจะเท่ากับ 45 องศา เนื่องจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ใช้ในการทดลองมีการรวมสัญญาณภายในลูฟิเตอร์ (mixing in loop) ดังนั้นจึงไม่สามารถกำหนดลูฟิเตอร์เลี้ยวก่อนเป็นสูงมาก โดยจะกำหนดไว้เพียง 50 เฮอร์ทเท่านั้น การคำนวณค่าอุปกรณ์สามารถคำนวณได้จาก

$$T_3 = \frac{\sec \phi - \tan \phi}{\omega}$$

$$= \frac{\sec(45^\circ) - \tan(45^\circ)}{2\pi \cdot 50}$$

$$= 1.32 \times 10^{-3}$$

$$T_2 = \frac{1}{\omega^2 T_3}$$

$$= \frac{1}{(2\pi \times 50)^2 \times 1.32 \times 10^{-3}}$$

$$= 7.68 \times 10^{-3}$$

และ $T_1 = \frac{K_\phi K_v}{N \omega^2} \sqrt{\frac{1 + \omega^2 T_2^2}{1 + \omega^2 T_3^2}}$

เมื่อ K_ϕ คือ เกนเฟคเตอร์ของเฟสดีเทคเตอร์
 N คือ ตัวหารซึ่งคำนวณจาก

$$N = \frac{\text{ความถี่ที่เอาท์พุท}}{\text{ความถี่อ้างอิง}}$$

$$= \frac{146 \times 10^6}{5 \times 10^3} = 29200$$

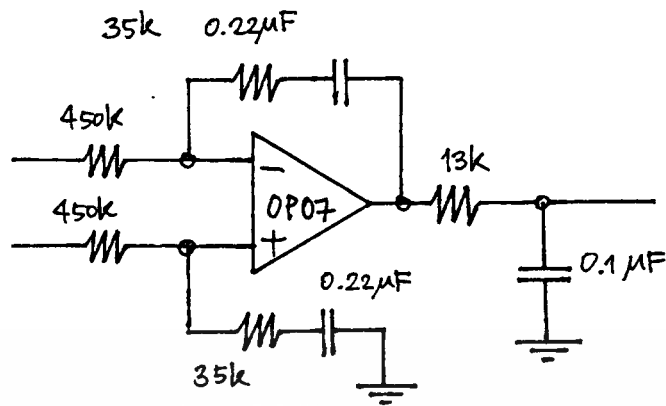
K_v คือ เกนเฟคเตอร์ของวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน

เพราะฉะนั้น

$$T_1 = \frac{0.11 \times 0.5 \times 10^6}{29200 \times (2 \times 50)^2} \cdot \sqrt{\frac{1 + (2 \times 50)^2 (7.68 \times 10^{-3})^2}{1 + (2 \times 50)^2 (1.32 \times 10^{-3})^2}}$$

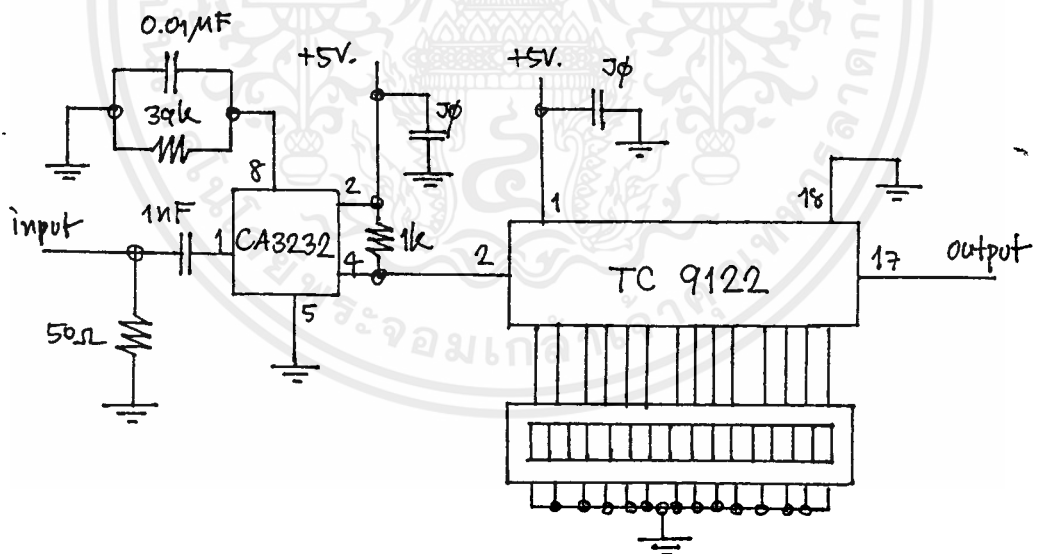
$$= 46.04 \times 10^{-6}$$

วงจรรูปฟิลเตอร์ที่คำนวณจากค่าเวลาคงตัว T_1 ถึง T_3 แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรรูปฟิลเตอร์ที่ใช้ในวงจรสังเคราะห์ความถี่

3.1.4 วงจรหารความถี่และวงจรวีลัสเกลเลอร์ (Prescaler)



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรรหารความถี่และวีลัสเกลเลอร์

เนื่องจากอัตราส่วนการหารที่ใช้ในวงจรสังเคราะห์ความถี่มีค่ามาก วงจรหารความถี่แบบโปรแกรมได้จะไม่สามารถหารได้ สามารถแก้ไขโดยเพิ่มวงจรพรีสเกลเลอร์เข้าไป ดังรูปที่ 3.6

3.2 วงจรลดทอนสัญญาณ

วงจรลดทอนสัญญาณที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นแบบสเตป (step) โดยใช้วงจรแบบพายร่วมกับสวิตช์โยกแบบสองทาง DPDT (Double Pole Double Throw) ดังรูปที่ 3.7

dB Atten.	R1 (Ohms)	R2 (Ohms)	dB Atten.	R1 (Ohms)	R2 (Ohms)
1	870.0	5.8	1	2.9	433.3
2	436.0	11.6	2	5.7	215.2
3	292.0	17.6	3	8.5	141.9
4	221.0	23.8	4	11.3	104.8
5	178.6	30.4	5	14.0	82.2
6	150.5	37.3	6	16.6	66.9
7	130.7	44.8	7	19.0	55.8
8	116.0	52.8	8	21.5	47.3
9	105.0	61.6	9	23.8	40.6
10	96.2	71.2	10	26.0	35.0
11	89.2	81.6	11	28.0	30.6
12	83.5	93.2	12	30.0	26.8
13	78.8	106.0	13	31.7	23.5
14	74.9	120.3	14	33.3	20.8
15	71.6	136.1	15	35.0	18.4
16	68.8	153.8	16	36.3	16.2
17	66.4	173.4	17	37.6	14.4
18	64.4	195.4	18	38.8	12.8
19	62.6	220.0	19	40.0	11.4
20	61.0	247.5	20	41.0	10.0



รูปที่ 3.7 วงจรลดทอนสัญญาณแบบสเตป (step)

3.3 การออกแบบสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่ [13]

การออกแบบสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่นั้น เราจะใช้สูตรที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ วงจรผ่านแถบความถี่ชนิดแบนด์แคป โดยเราจะคำนวณวงจรกรองสำหรับความถี่ 144 เมกกะเฮิรท์ ซึ่งเป็นค่า f_0

$$\text{กำหนด } f_1 = 140 \text{ เมกกะเฮิรท์; } \omega_1 = 2\pi 140M$$

$$f_2 = 148 \text{ เมกกะเฮิรท์; } \omega_2 = 2\pi 148M$$

$$\gamma = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0 = 0.06$$

$$k_{12} = 1 / (\sqrt{x_1 x_2}) = 0.71$$

$$Q = 1 / \gamma = 17.99$$

$$K_{12} = \sqrt{k_{12}} = 0.04$$

กำหนดค่าอินดักแตนซ์ไว้ที่ 80nH โดยได้จากการพันลวดอาบนํ้ายาเบอร์ 16SWG บนแกนอากาศขนาด 1/4 นิ้ว จำนวน 5 รอบ

$$C_1 = C_2 = C_3 = 1/\omega_o^2 L = 15.28 \text{ pF}$$

$$C_{12} = C_{23} = K_{12} C_1 = 0.6 \text{ pF}$$

$$C_{11} = C_1 - C_{12} = 14.68 \text{ pF}$$

$$C_{111} = C_2 - C_{12} - C_{23} = 14.8 \text{ pF}$$

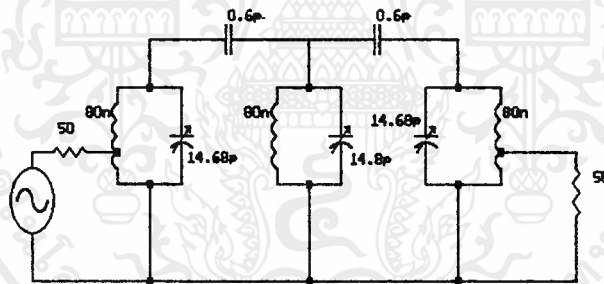
$$C_{1111} = C_3 - C_{23} = 14.68 \text{ pF}$$

$$R_1 = Q\omega_o L = 1.3 \text{ K}$$

R_1 เป็นความต้านทานที่เกิดจากผลของขดลวดและค่า Q อันทำให้ความต้านทานของวงจรกับความต้านทานของแหล่งจ่ายไม่เหมาะสมกัน ในกรณีเช่นนี้เกิดขึ้นทั้งด้านอินพุทและเอาต์พุท เราสามารถแก้ไข โดยการแมทซิงแบบแทบขดลวด

$$N_t = (N_1 \sqrt{R_s / R_1}) = 0.98$$

จากค่าที่คำนวณได้จะได้วงจรที่ใช้งานจริงที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิรตซ์ ดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 วงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ 144 เมกกะเฮิรตซ์

ในกรณีของวงจรกรองที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรตซ์นั้น กำหนด $f_1 = 160$ เมกกะเฮิรตซ์ และ $f_2 = 168$ เมกกะเฮิรตซ์ แล้วทำการคำนวณตั้งวิธีการข้างต้นจะได้ค่าอุปกรณ์ที่ใช้ดังนี้

$$L = 80\text{nH}$$

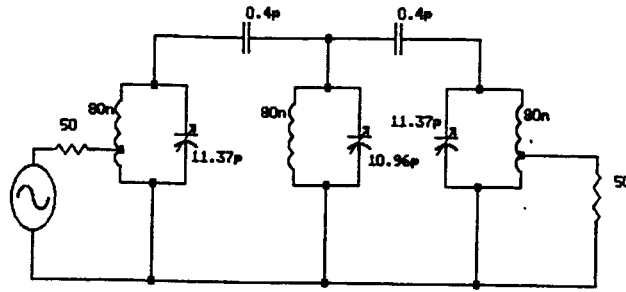
$$C_{I} = C_{III} = 11.37\text{pF}$$

$$C_{II} = 10.96\text{pF}$$

$$C_{12} = C_{23} = 0.4\text{pF}$$

$$N_t = 0.86$$

วงจรกรองที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิร์ต จะได้ดังวงจรในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 วงจรกรองผ่านแถบความถี่ที่ 164 เมกกะเฮิร์ต

3.4 การออกแบบสร้างวงจรกรองกำจัดแถบความถี่

การออกแบบวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ ในหัวข้อนี้เราจะใช้สูตรการคำนวณที่เสนอไปแล้วในหัวข้อวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ การคำนวณเริ่มพิจารณาจากวงจรกรองที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต

$$\text{กำหนด } f_1 = 128 \text{ เมกกะเฮิร์ต; } \omega_1 = 2 \times 128 \text{M}$$

$$f_2 = 162 \text{ เมกกะเฮิร์ต; } \omega_2 = 2 \times 162 \text{M}$$

$$\gamma = (\omega_2 - \omega_1) / \omega_0 = 0.236$$

วงจรที่ใช้เป็นการแปลงมาจาก วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านต้นแบบ (LP Prototype)

อันดับที่ 3 โดยที่ $L_n = 1$ และ $C_n = 2$

$$L_A = (R L_n \gamma) / \omega_0 = 13.1 \text{ nH}$$

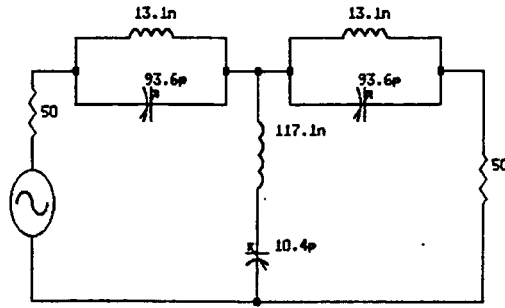
$$C_A = 1 / (L_A \omega_0^2) = 93.6 \text{ pF}$$

$$L_B = R / [C_n (\omega_2 - \omega_1)] = 117.1 \text{ nH}$$

$$C_B = 1 / (L_B \omega_0^2) = 10.4 \text{ pF}$$

ค่า L_A ได้จากการพันขดลวดอาน้ำยาเบอร์ 16 SWG จำนวน 1 รอบ บนแกนอากาศขนาด 1/4 นิ้ว และค่า L_B ได้จากการพันขดลวดอาน้ำยาเบอร์ 16 SWG จำนวน 8.5 รอบ บนแกนอากาศขนาด 1/4 นิ้ว

จากค่าของอุปกรณ์ที่คำนวณได้ จะสามารถสร้างวงจรกรองที่กำจัดสัญญาณที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต ดังแสดงวงจรรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 วงจรกรองกำลังจัดแถบความถี่ที่ 144 เมกกะเฮิร์ต

ในกรณีวงจรกรองที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิร์ต สามารถคำนวณเช่นเดิมดังนี้

กำหนด $f_1 = 148$ เมกกะเฮิร์ต

$f_2 = 182$ เมกกะเฮิร์ต

ใช้สูตรการคำนวณค่าอุปกรณ์ตั้งวิธีการข้างต้น

$$L_A = 10.05 \text{ nH}$$

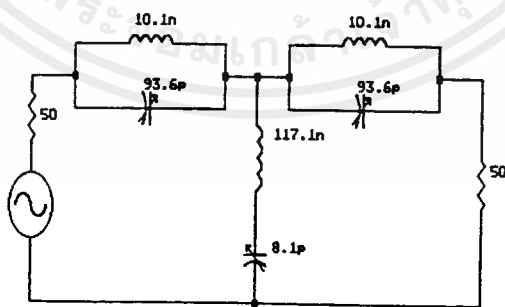
$$C_A = 93.62 \text{ pF}$$

$$L_B = 117.03 \text{ nH}$$

$$C_B = 8.04 \text{ pF}$$

ค่า L_A ได้จากการพันขดลวดอาน้ำยาเบอร์ 16 SWG จำนวน 1 รอบ บนแกนอากาศขนาด $1/4$ นิ้ว และค่า L_B ได้จากการพันขดลวดอาน้ำยาเบอร์ 16 SWG จำนวน 8.5 รอบ บนแกนอากาศขนาด $1/4$ นิ้ว

จากค่าของอุปกรณ์ที่คำนวณได้ จะสามารถสร้างวงจรกรองที่กำจัดสัญญาณที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิร์ต ดังแสดงวงจรรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 วงจรกรองกำลังจัดแถบความถี่ที่ 164 เมกกะเฮิร์ต

3.5 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต

วงจรขยายเป็นวงจรขยายสัญญาณขนาดเล็ก ใช้ JFET-N เบอร์ J310 ใช้พารามิเตอร์

Y ในการออกแบบ

พารามิเตอร์ Y ของ J310 ที่ 144 เมกกะเฮิร์ต

$$Y_{11} = 13.74 + j2.33 \text{ mmho} \quad Y_{12} = -53.58 - j84.43 \text{ } \mu\text{mho}$$

$$Y_{21} = -13.93 + j1.41 \text{ mmho} \quad Y_{22} = 165.61 + j1.99 \text{ } \mu\text{mho}$$

จากการคำนวณจะได้ค่าเสถียรภาพ $C = 0.38$ และ

$$\text{ค่าเสถียรภาพ } K = 6.146$$

ค่าเสถียรภาพ $C < 1$ และ ค่าเสถียรภาพ $K > 4$ แสดงว่าทรานซิสเตอร์ J310 สามารถทำงานที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต โดยมีแนวโน้มที่จะไม่เกิดการออสซิลเลชัน

$$Y_{in} = 10 - j0.99 \text{ mmho}$$

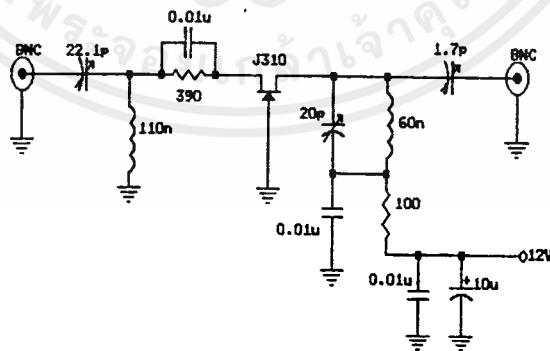
$$Y_{out} = 124.1 - j38.1 \text{ } \mu\text{mho}$$

การแมทซิ่งใช้การประมาณ โดยแมทซิ่งส่วนจริง

$$Z_{in} = 97.1 \text{ ohm} \quad \text{และ} \quad Z_{out} = 8.06 \text{ kohm}$$

วงจรแมทซิ่งด้านอินพุตเป็นชนิดแอล ส่วนด้านเอาต์พุตเป็นวงจรแมทซิ่งที่มีลักษณะเดียวกันกับวงจรแมทซิ่ง

สำหรับการไบอัสทางดีซีนั้น เนื่องจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นพารามิเตอร์ที่สภาวะ $V_{DS} = 10V$, $I_D = 10mA$ และ $V_{GS} = -1.6V$ การไบอัสจึงต้องคำนึงถึงสภาวะนี้ด้วย เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้เป็นค่าที่ถูกต้อง วงจรการไบอัสและวงจรที่ใช้งานจริงที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต แสดงดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิร์ต

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิร์ต

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิร์ต ก็ใช้วิธีการคำนวณที่ใช้กับ

วงจรที่ 144 เมกกะเฮิรต์

พารามิเตอร์ Y ของ J310 ที่ 164 เมกกะเฮิรต์

$$Y_{11} = 14.23 + j2.77 \text{ mmho} \quad Y_{12} = -48.48 - j87.46 \text{ } \mu\text{mho}$$

$$Y_{21} = -13.90 + j1.71 \text{ mmho} \quad Y_{22} = 149.95 + j1.99 \text{ } \mu\text{mho}$$

จากการคำนวณจะได้ค่าเสถียรภาพ $C = 0.41$ ค่าเสถียรภาพ $C < 1$ และ

ค่าเสถียรภาพ $K = 5.792$ ค่าเสถียรภาพ $K > 4$

แสดงว่าทรานซิสเตอร์ J310 สามารถทำงานที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์ โดยมี
แนวโน้มที่จะไม่ออสซิลเลชัน

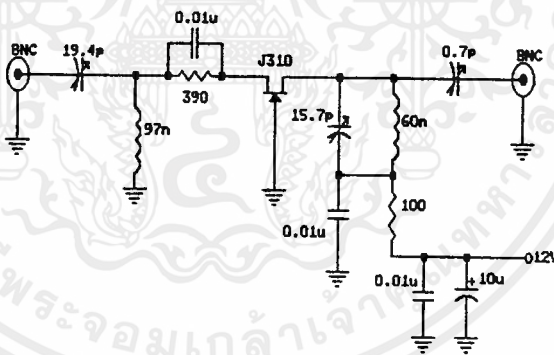
$$Y_{in} = 10 - j1 \text{ mmho}$$

$$Y_{out} = 110.6 - j37.81 \text{ } \mu\text{mho}$$

$$Z_{in} = 95.31 \text{ โอห์ม}$$

$$Z_{out} = 9.05 \text{ กิโลโอห์ม}$$

วงจรการไบอัสและวงจรที่ใช้งานจริงที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์ แสดงดังรูปที่ 3.13

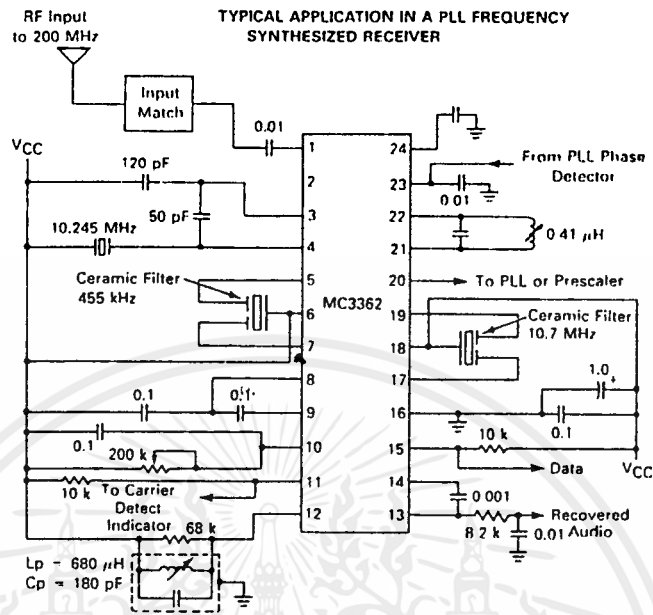


รูปที่ 3.13 วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์

3.6 การใช้งานวงจรรวมเบอร์ MC3362 [19]

วงจรรวม MC3362 เป็นวงจรเครื่องรับเอฟเอ็มชนิดแบบตั้งแคปที่ค่อนข้างสมบูรณ์และเป็น
เครื่องรับที่ใช้การแปลงความถี่สองครั้ง ซึ่งภายในประกอบด้วยออสซิลเลเตอร์, มิกเซอร์ดีเทคเตอร์
แบบควอดราราเจอร์ นอกจากนี้ยังมีส่วนของบัฟเฟอร์สำหรับออสซิลเลเตอร์ทั้งสองชุด MC3362 ถูกออกแบบ
มาให้ใช้กับไฟเลี้ยงต่ำและกินกระแสต่ำ มีความไวของเครื่องรับดี และความสามารถกำจัดความถี่
เงาที่ดี

การประยุกต์ใช้งานสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.14 มิกเซอร์ชุดแรกแปลงสัญญาณอาร์เอฟ เป็น 10.7 เมกกะเฮิรต์ ถูกกรองและผ่านไปยังมิกเซอร์ชุดที่สองแปลงเป็น 455 กิโลเฮิรต์ผ่าน วงจรกรองแล้วถูกจำกัดขนาดโดยลิมิตเตอร์แล้วส่งต่อไปยังวงจรถีเทคเตอร์



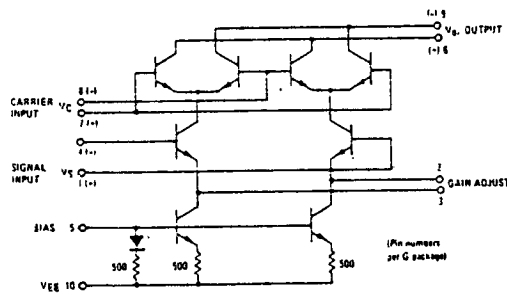
รูปที่ 3.14 การใช้งาน MC3362 กับระบบเฟสล็อกกลุ่

การใช้งาน MC3362 นั้น โคล์ลออสซิลเลเตอร์ชุดที่หนึ่งสามารถทำงานได้ถึงความถี่ 190 เมกกะเฮิรต์ โดยกำหนดความถี่จากวงจร LC แห้งก็ หรืออาจประยุกต์ใช้เป็นวีซีโอเมื่อเป็นระบบ เฟสล็อกกลุ่ มีเอาต์พุตบัฟเฟอร์ที่ขา 20 โคล์ลออสซิลเลเตอร์ชุดที่สองเป็นแบบเบสร่วมโคลนิก ทำงานที่ ความถี่ 10.245 เมกกะเฮิรต์ โดยคริสตอล มีเอาต์พุตบัฟเฟอร์ที่ขา 2

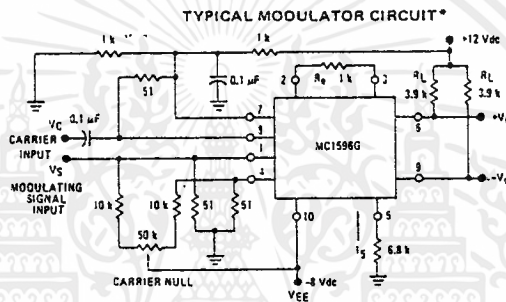
วงจรกรอง ไอเอฟชุดแรกเป็นตัวกรองเซรามิกที่ความถี่ 10.7 เมกกะเฮิรต์ สัญญาณที่ กรองแล้วจะผ่านไปยังอินพุทของมิกเซอร์ชุดที่สอง วงจรกรอง ไอเอฟชุดที่สองเป็นตัวกรองเซรามิกที่ ความถี่ 455 กิโลเฮิรต์ ผ่านจากตัวกรองนี้ก็จะผ่านไปยังลิมิตเตอร์ที่สามารถจำกัดขนาดสัญญาณให้ราบ เรียบตลอดแบนด์กว้าง 1 เมกกะเฮิรต์

3.7 การสร้างสัญญาณไบนารีเฟสชิปคีย์อิง (BPSK)

ในโครงการนี้การสร้างสัญญาณ BPSK ทำได้โดยนำสัญญาณคีย์จิตอลมาทำการมอดูเลทกับ สัญญาณรูปซายน์แบบบาลานซ์ โดยใช้วงจรรวมทำหน้าที่เป็นบาลานซ์มอดูเลเตอร์ คือ MC1496 ซึ่งหา ซื้อได้ในท้องตลาดเมืองไทย หรืออาจจะใช้ MC1494 ซึ่งเป็นวงจรคูณเช่นเดียวกับ MC1496

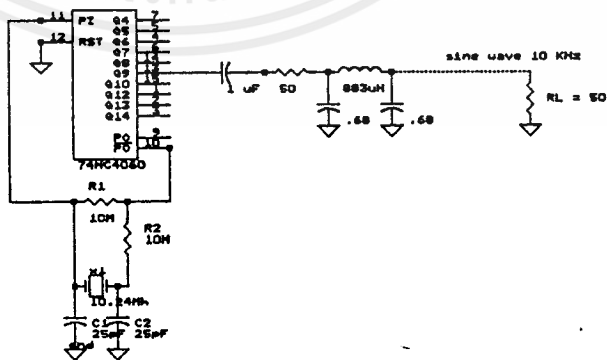


รูปที่ 3.15 แสดง โครงสร้างภายใน MC1496



รูปที่ 3.16 แสดง วงจรมอดูเลเตอร์ที่ใช้ MC1496

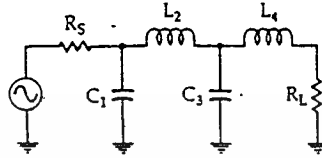
ในโครงงานนี้ใช้คลื่นพาหะความถี่ 10 กิโลเฮิรต์ โดยที่สร้างจากวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยผลิกคริสตอล 10.24 เมกกะเฮิรต์ แล้วหารความถี่ด้วย 2^{10} จะได้สัญญาณรูปเหลี่ยมความถี่ 10 กิโลเฮิรต์ และใช้วงจรรองความถี่ต่ำผ่านกรองจึง ได้คลื่นรูปซายน์ที่มีความถี่ 10 กิโลเฮิรต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.17



รูปที่ 3.17 แสดง วงจรผลิตคลื่นพาหะความถี่ 10 กิโลเฮิรต์

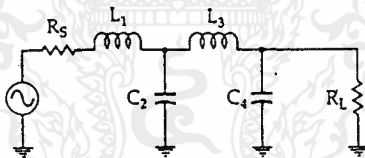
สำหรับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ใช้เป็นวงจรแบบพาสซีฟซึ่งออกแบบโดยใช้โพลีโนเมียลของเซฟบีเซฟ โดยการเลือกค่าอุปกรณ์ต้นแบบจากรางซึ่งหาได้จากคู่มือการออกแบบทั่วไป

ตารางแสดงค่าอุปกรณ์ต้นแบบ โดยใช้โพลีโนเมียลของเซฟบีเซฟ



n	R_s/R_L	C_1	L_2	C_3	L_4
2	3.000	0.572	3.132		
	4.000	0.365	4.600		
	8.000	0.157	9.658		
	∞	1.213	1.109		
3	1.000	2.216	1.088	2.216	
	0.500	4.431	0.817	2.216	
	0.333	6.647	0.726	2.216	
	0.250	8.862	0.680	2.216	
	0.125	17.725	0.612	2.216	
	∞	1.652	1.460	1.108	
4	3.000	0.653	4.411	0.814	2.535
	4.000	0.452	7.083	0.612	2.848
	8.000	0.209	17.164	0.428	3.281
	∞	1.350	2.010	1.488	1.106

n	R_L/R_s	L_1	C_2	L_3	C_4
-----	-----------	-------	-------	-------	-------



ในโครงการนี้ เลือกให้ $R_s/R_L = 1$ และเลือกอันดับ $n = 3$ คือใช้คาปาซิเตอร์ 2 ตัว ใช้อินดักเตอร์ 1 ตัว ซึ่งจะได้ค่าต้นแบบ $C_1 = C_2 = 2.216$ และ $L = 1.088$

ทำการสเกลค่าคาปาซิเตอร์โดยใช้

$$C = C_n / 2\pi f_c R$$

$$L = RL_n / 2\pi f_c$$

ในที่นี้ $C_n = C_1 = C_2 = 2.216$

$$L_n = L = 1.088$$

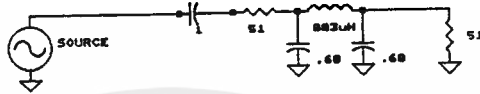
$$f_c = 10 \text{ กิโลเฮิรท์}$$

$$R = R_L = \text{ค่าความต้านทานโหลด} \\ = 51 \text{ โอห์ม}$$

เพราะฉะนั้นได้ค่า $C = 0.69 \mu\text{F}$ ใช้ค่า $0.68 \mu\text{F}$

$$L = 883 \mu\text{H}$$

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่ออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.18 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ในทางปฏิบัติ วงจรกรองความถี่ต่ำแบบพาสซีฟ จะต้องระวังเรื่องฮอर्सและโหนด อิมพีแดนซ์มากๆ บางครั้งเพื่อแก้ปัญหานี้จะใช้วงจรกรองแบบแอกทีฟแทน ข้อดีของวงจรแบบแอกทีฟก็คือ สามารถเลือกค่า Q ได้สูงมากกว่า ในทางปฏิบัตินิยมใช้วงจรของ Sallen-Key [21]

ในโครงการนี้เลือกการออกแบบวิธีที่ 3 ใช้ $r_1 = 1.5\text{k}$, $r_2 = 500$ โอห์ม และ $Q = 12$

$$R_2 = 1 / \sqrt{3} \cdot 2\pi(10\text{K}) = 9.2$$

$$R_1 = 1 / (12)(2\pi)(10\text{K}) = 1.33$$

$$C_2 = 1$$

$$C_1 = \sqrt{3} Q_p = 20.8$$

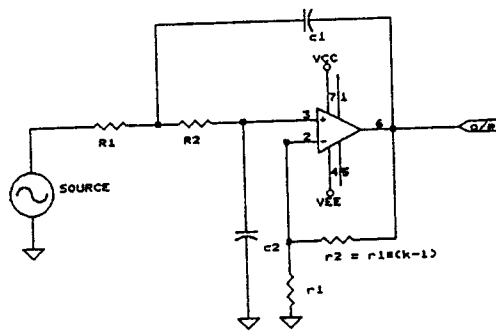
ทำการสเกลด้วยค่า 10^9

เพราะฉะนั้น $R_1 \approx 1\text{K}3$

$$R_2 \approx 9\text{K}2$$

$$C_2 \approx 1 \text{ nF}$$

$$C_1 \approx 0.022 \mu\text{F}$$



รูปที่ 3.19 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบ Sallen-Key

3.8 การออกแบบวงจรรีตีฟเวอร์แคร์เรีย

วงจรรีตีฟเวอร์แคร์เรียในโครงงานนี้ใช้แบบ Square Loop มีหลักการทำงาน คือนำสัญญาณ BPSK ที่รับมาได้มายกกำลังสองซึ่งทำได้โดยใช้ MC1496 ซึ่งเป็นบาลานซ์มอดูเลเตอร์ แต่เราจะป้อนสัญญาณ BPSK เข้าที่ขาแคร์เรียและขาสัญญาณพร้อมกัน จากนั้นป้อนเอาท์พุทที่ได้เข้าวงจรเฟสล็อกคูลูป ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นวงจรกรองผ่านแถบความถี่ เอาท์พุทของวงจรเฟสล็อกคูลูปจะถูกหารความถี่ด้วยสอง ทำโดยใช้ดี-ฟลิปฟลอป จะได้ความถี่แคร์เรียกลับมา จากนั้นก็ผ่านสัญญาณเข้าไปยังวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อกรองเอาเฉพาะความถี่ที่เป็นคลื่นรูปซายน์ดังแสดงในรูปที่ 3.20

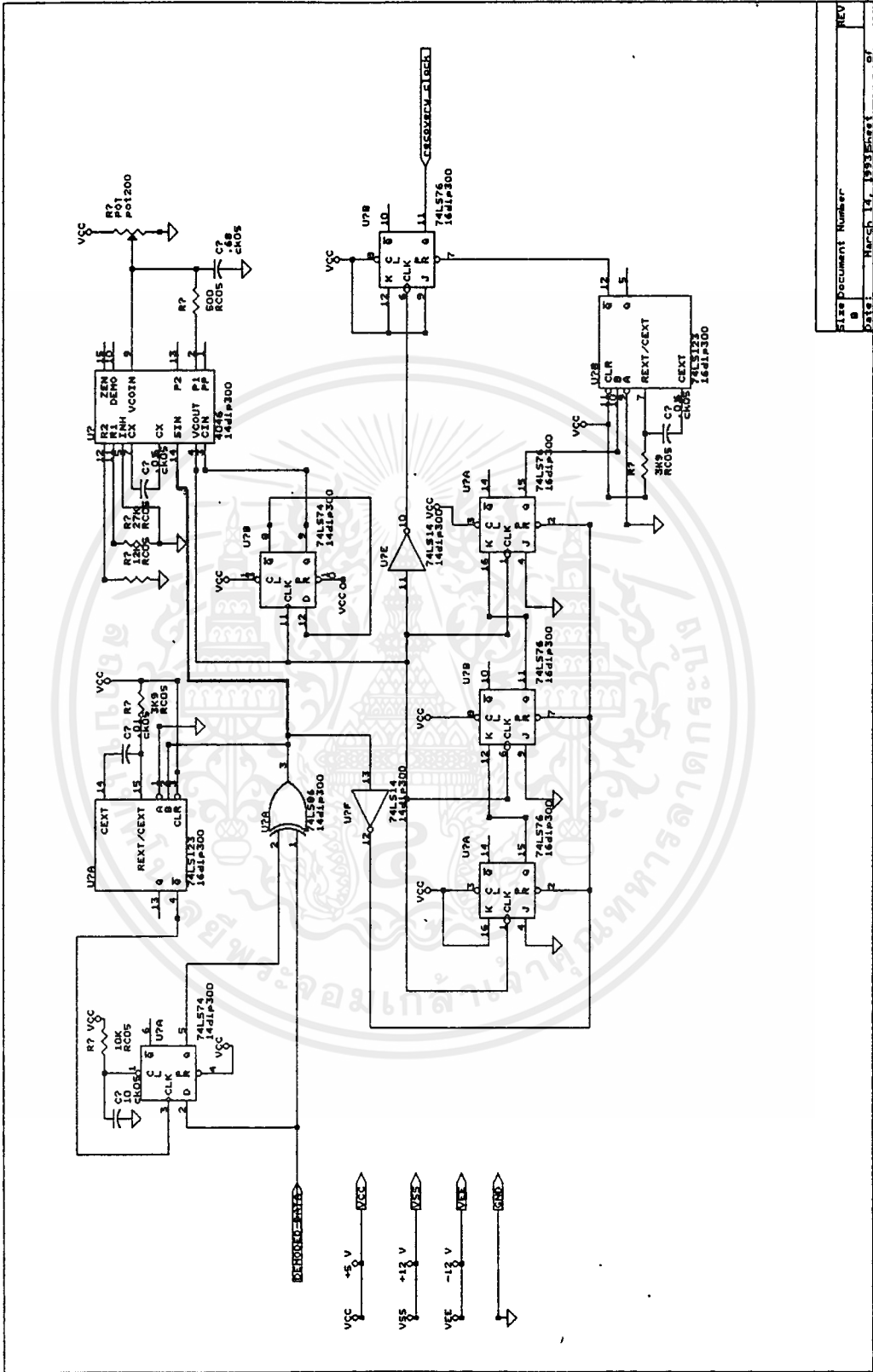
วงจรรีตีฟเวอร์สัญญาณนาฬิกา

ในโครงงานนี้ใช้วิธีตรวจจับการเปลี่ยนแปลงดังที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 วงจรรีตีฟเวอร์สัญญาณนาฬิกาที่ใช้ในโครงงานนี้ประกอบด้วย วงจรตรวจจับขอบสัญญาณ, วงจรเฟสล็อกคูลูป, วงจรแก้ไขความผิดพลาดทางเฟสของสัญญาณนาฬิกา และวงจรหารความถี่

จากรูปวงจรรีตีฟเวอร์สัญญาณนาฬิกา เจเค-ฟลิปฟลอป 3 ตัวทางด้านล่างซ้ายมือทำหน้าที่ตรวจสอบ บิต 101 ระหว่างช่วงเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุทซึ่งจะแก้ไขเฟสของสัญญาณนาฬิกาที่วงจรหารสอง ให้ถูกต้องและมีค่าตรงกึ่งกลางของบิตข้อมูล

เมื่อรวมวงจรภาคต่างๆ ของการมอดูเลตและดีมอดูเลต วงจรสมบูรณ์แสดงไว้ในรูปที่

3.20 - 3.23



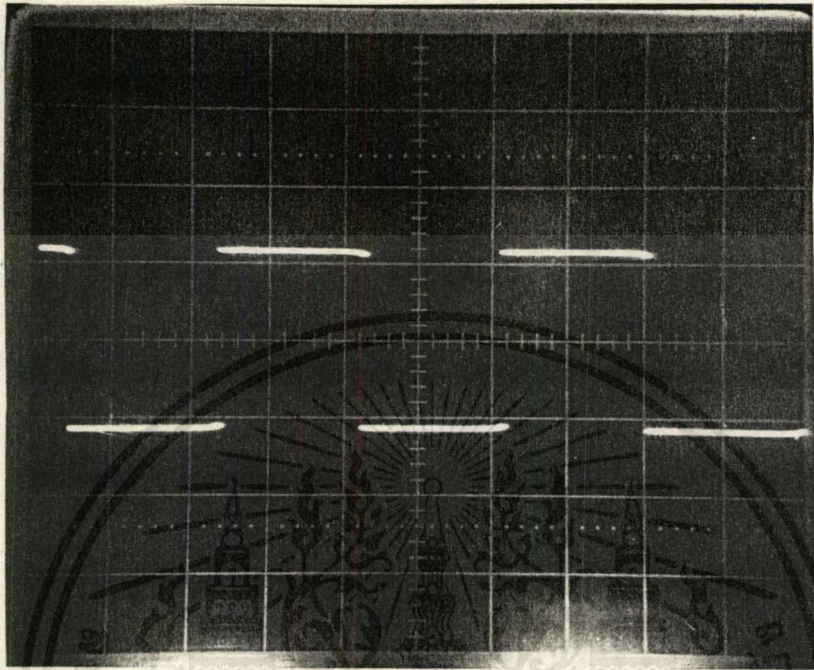
รูปที่ 3.21 แสดงวงจรรีฟเฟอรัลสัญญาณนาฬิกา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

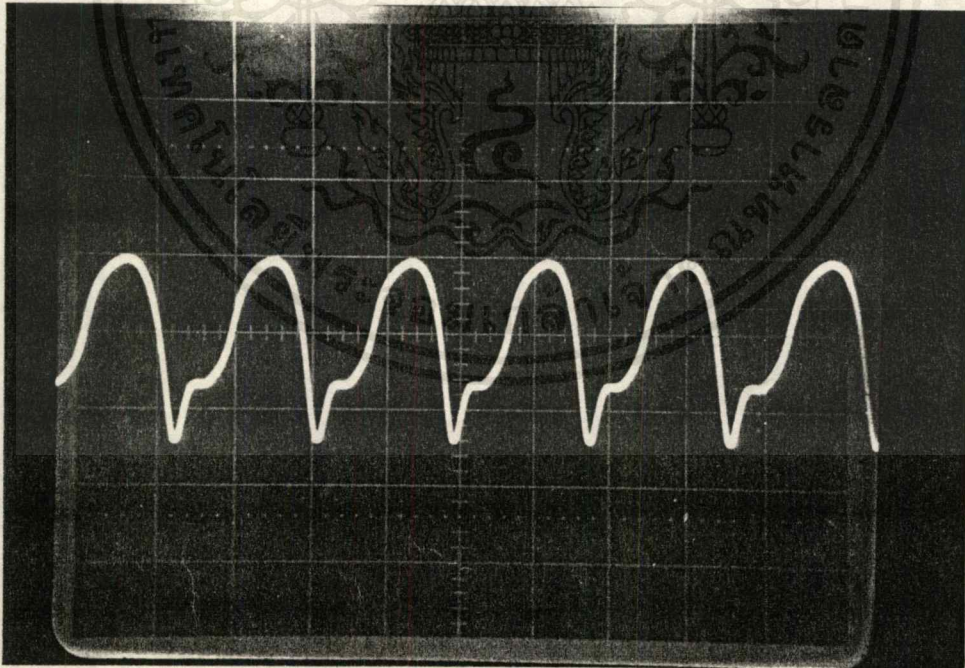
สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

4.1 ผลการทดลอง ผลการทดลองแยกเป็นแต่ละส่วน ดังนี้

4.1.1 วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัล

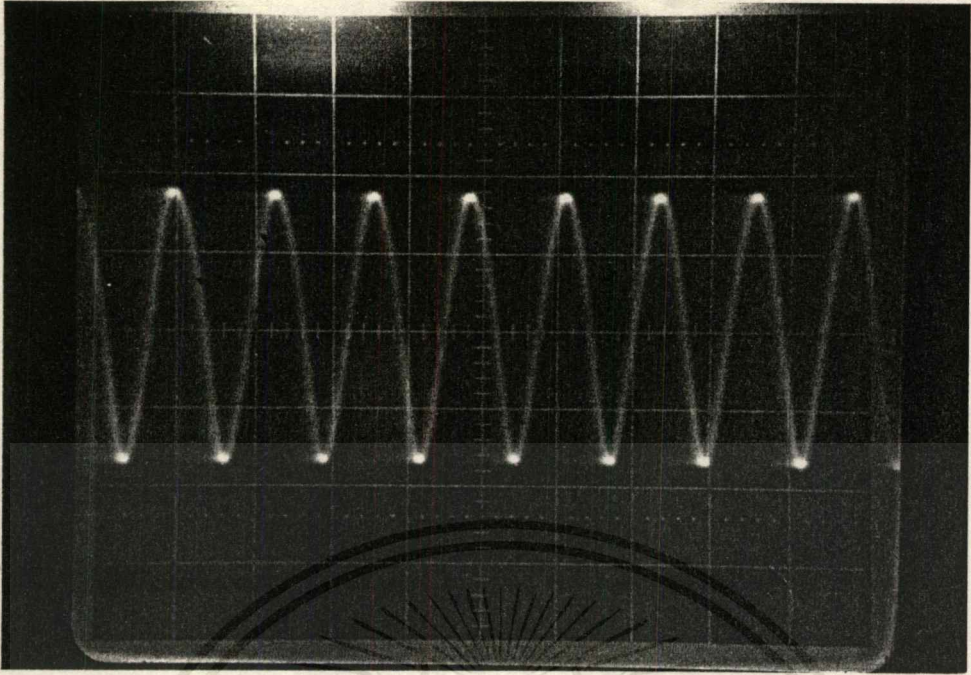


รูปที่ 4.1 สัญญาณอ้างอิงความถี่ 5 กิโลเฮิรตซ์ของวงจรเฟสล็อกคัล

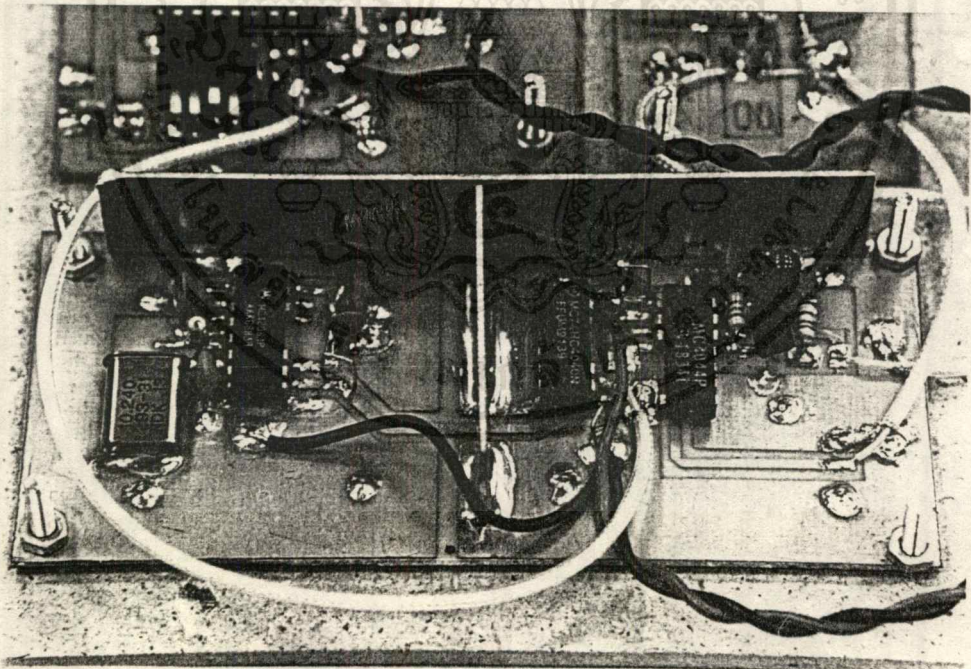


รูปที่ 4.2 ผลการวัดสัญญาณความถี่ 10 เมกกะเฮิรตซ์จาก

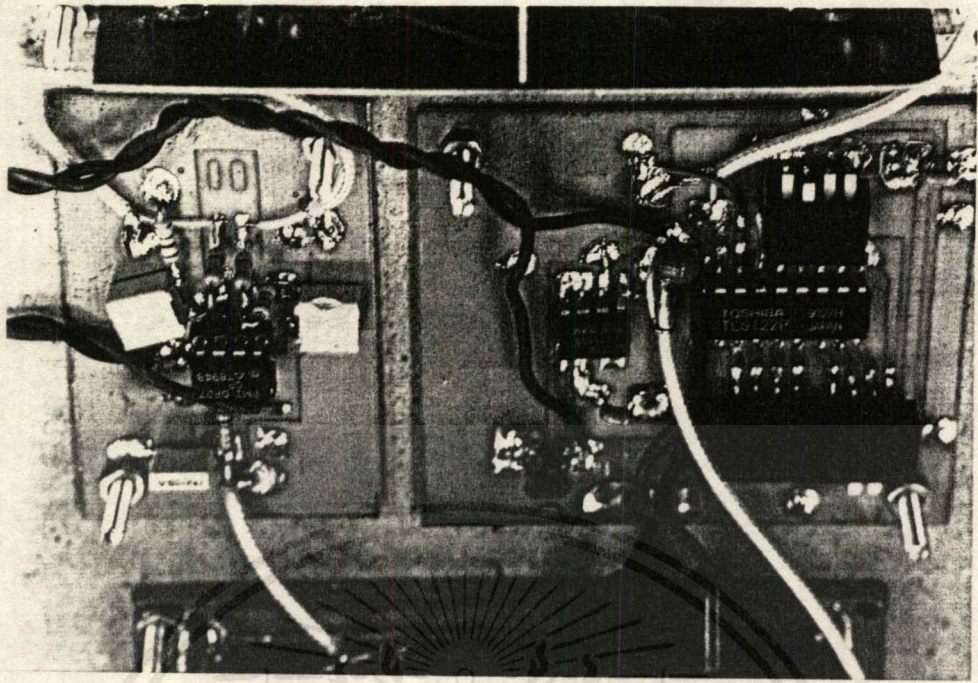
วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยผลึกคริสตอล



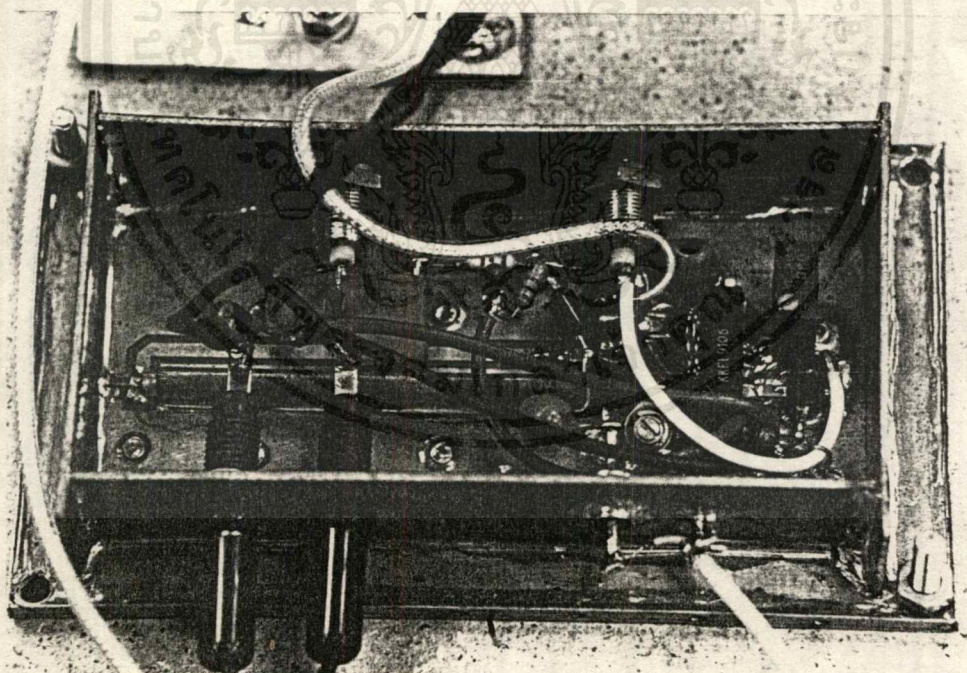
รูปที่ 4.3 ผลการทดลองวัดสัญญาณความถี่ 144 เมกะเฮิรต์



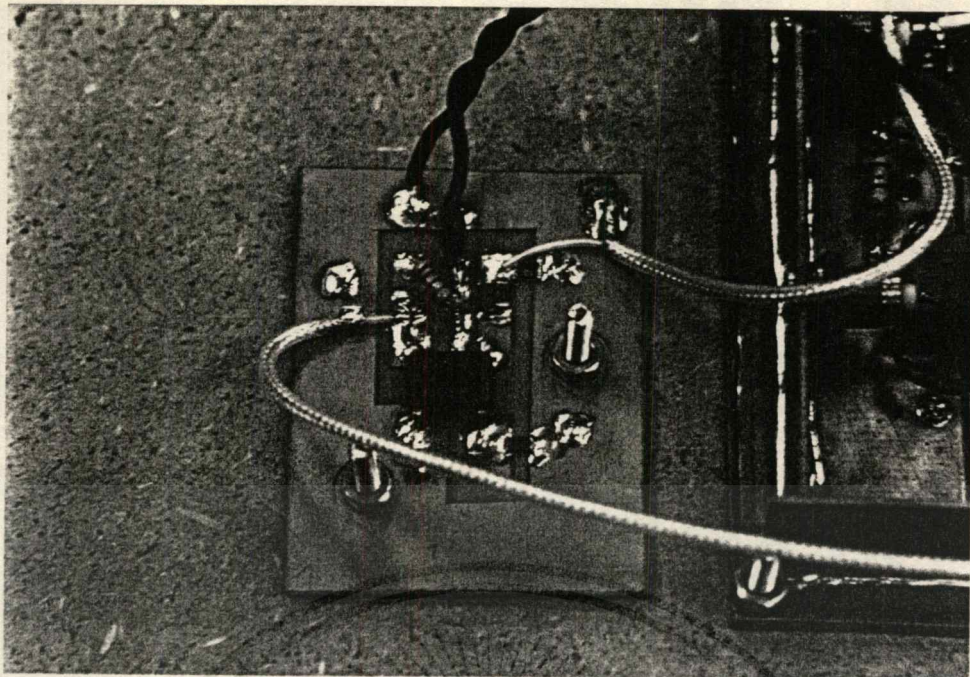
รูปที่ 4.4 แสดงวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยคริสตอลและวงจรเฟสดีเทคเตอร์



รูปที่ 4.5 แสดงวงจรหารความถี่และวงจรรูปฟิลเตอร์

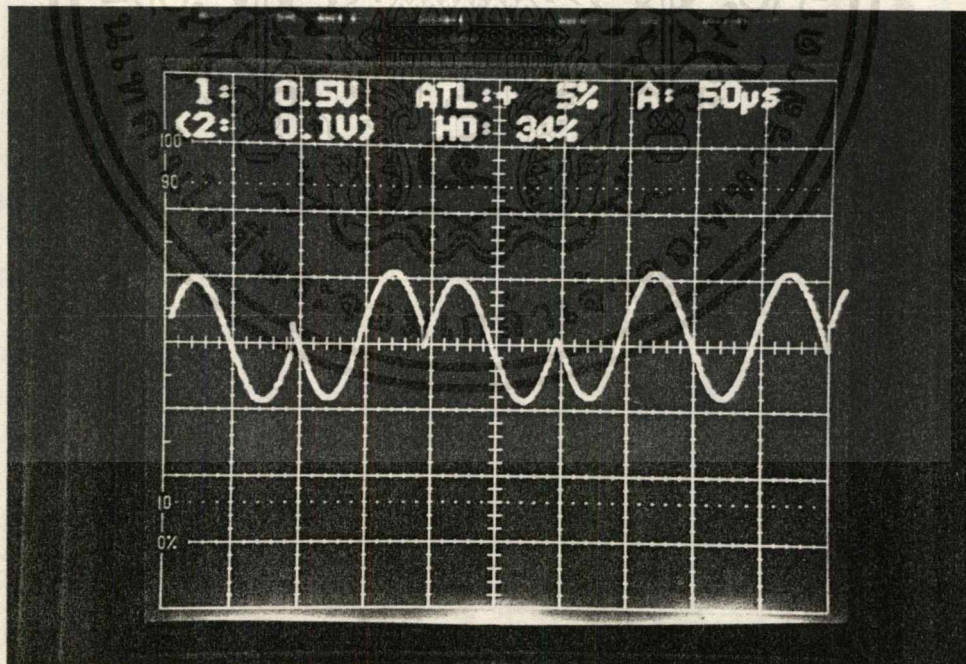


รูปที่ 4.6 แสดงวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน

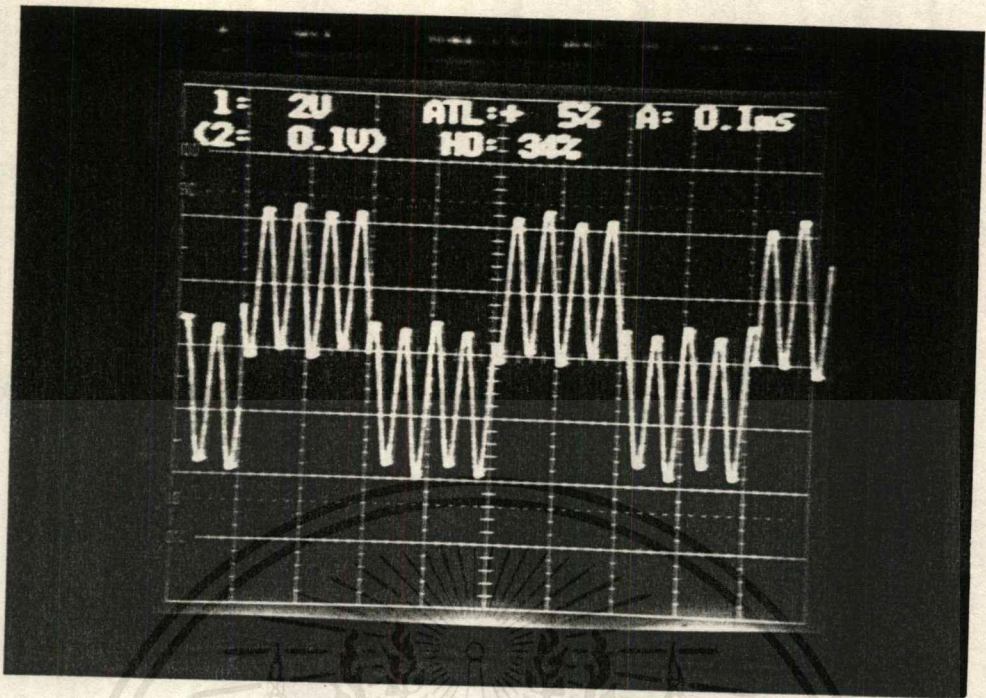


รูปที่ 4.7 แสดงวงจรพรีสเกลเลอร์

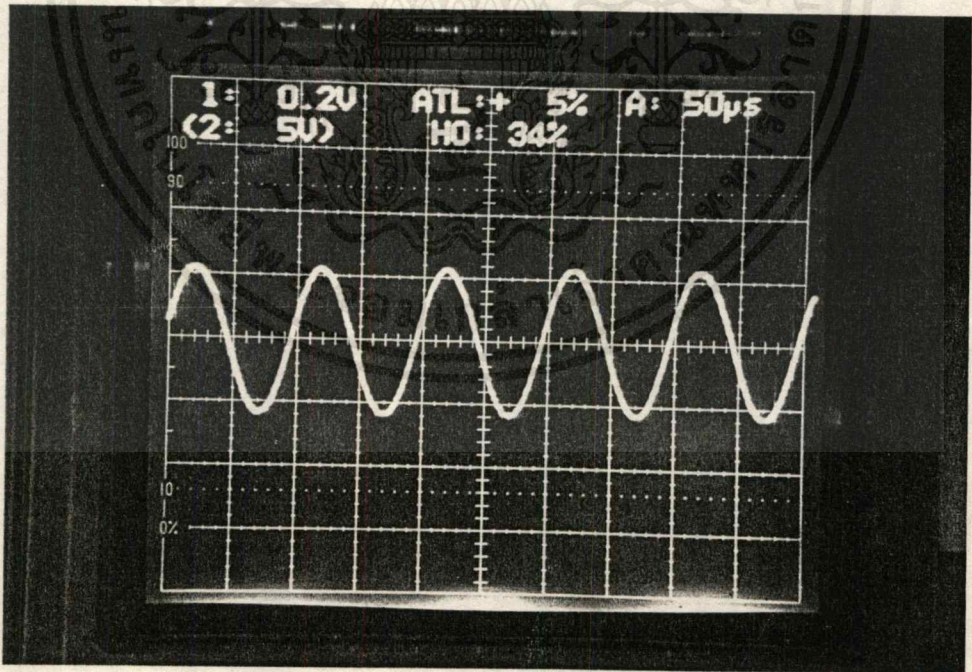
4.1.2 วงจร BPSK มอดูเลเตอร์และดีมอดูเลเตอร์



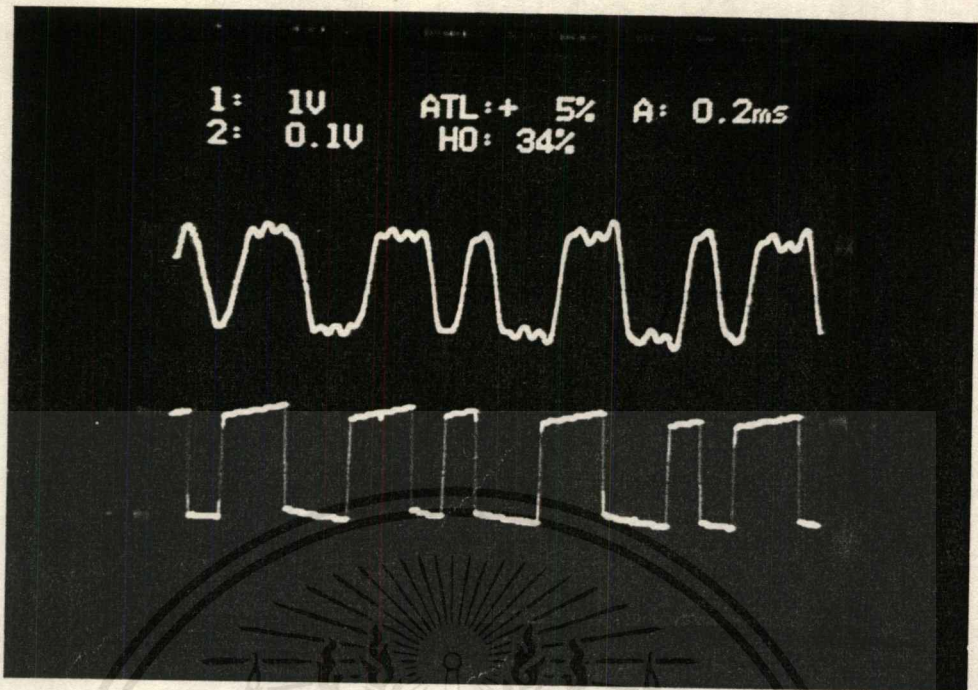
รูปที่ 4.8 ตัวอย่างสัญญาณ BPSK จากวงจรมอดูเลเตอร์



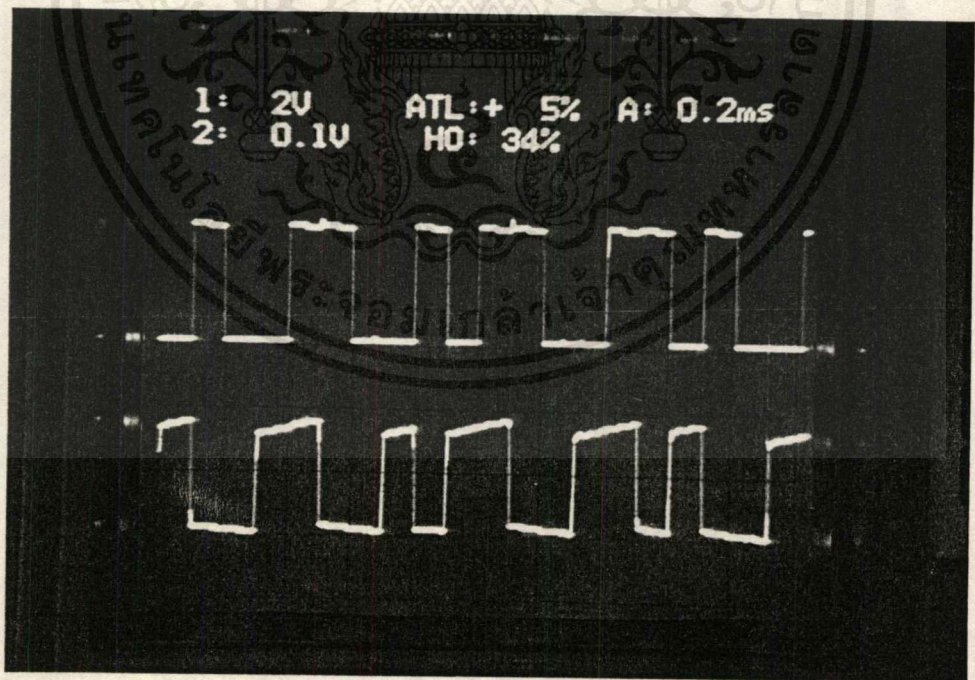
รูปที่ 4.9 สัญญาณที่เอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์



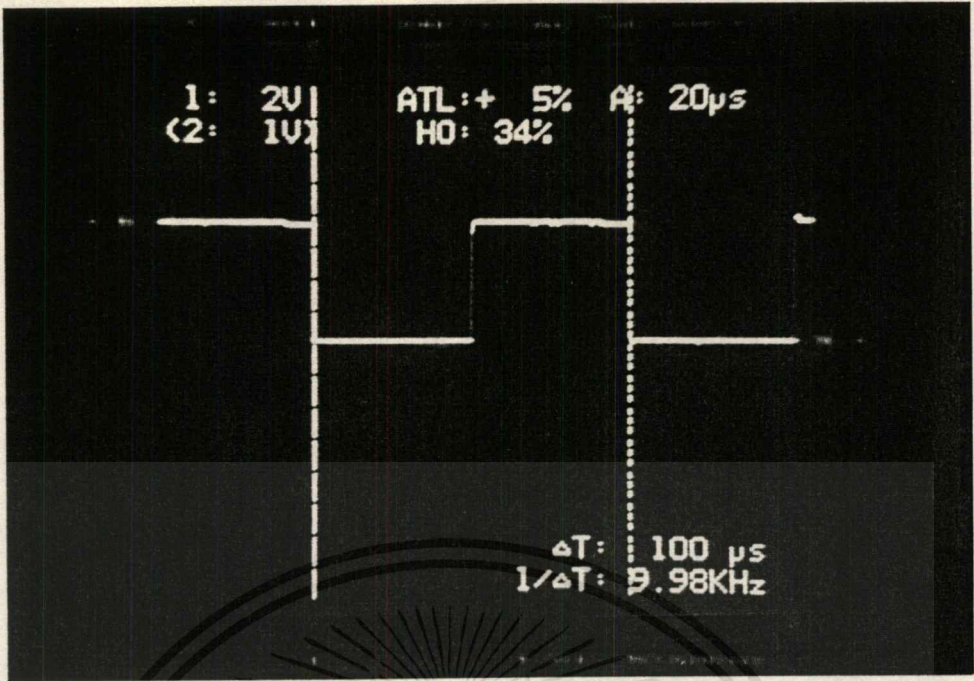
รูปที่ 4.10 สัญญาณแควร์เรียที่รีคัพเวออร์ได้



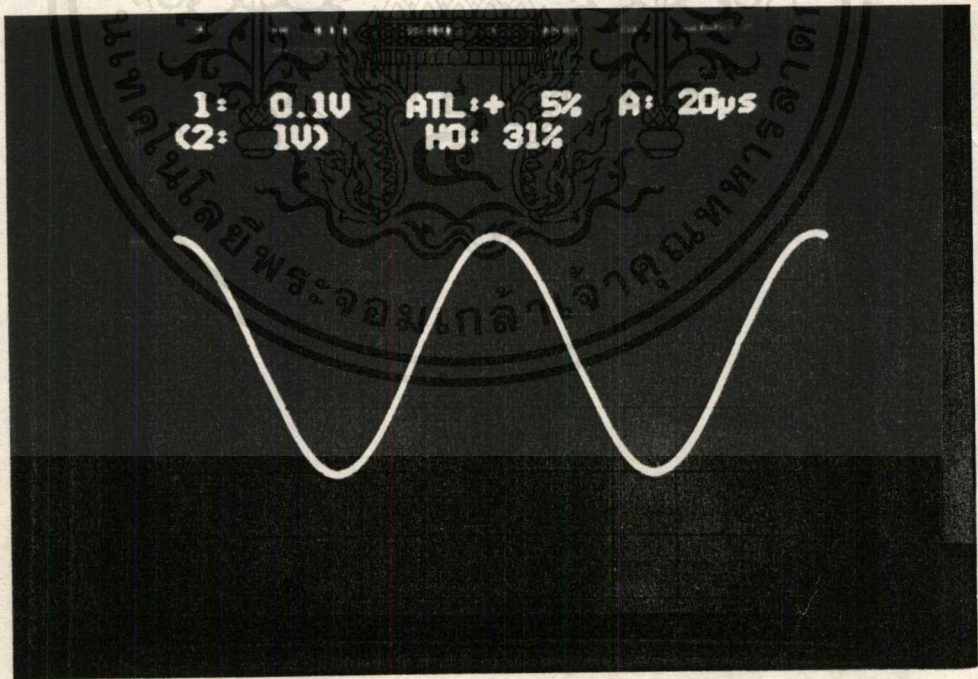
รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบสัญญาณที่ทดลองส่งและทดลองรับ



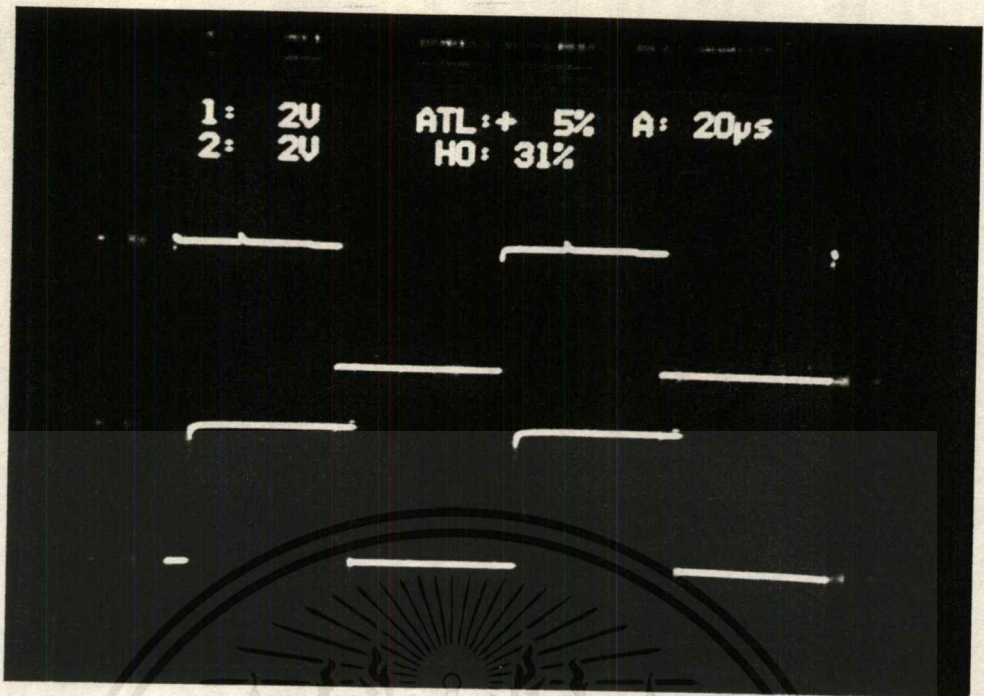
รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบสัญญาณก่อนและหลังเข้ารหัส



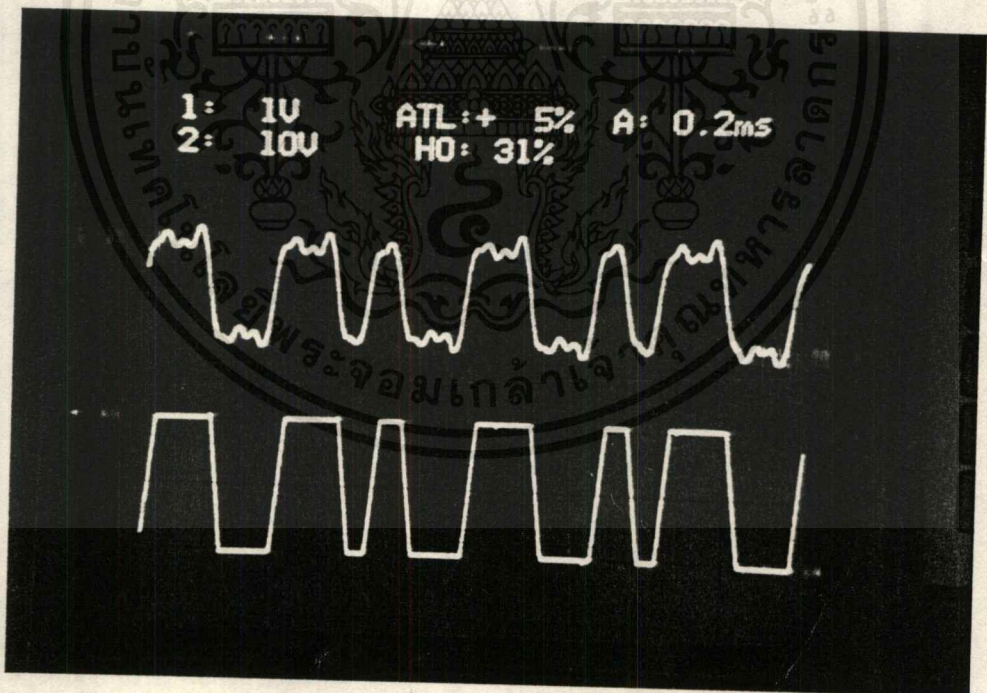
รูปที่ 4.13 แสดงสัญญาณของแควร์เรียทางด้านภาคส่งก่อนเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.14 แสดงสัญญาณของแควร์เรียทางด้านภาคส่งหลังเข้าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



รูปที่ 4.15 รูปสัญญาณนาฬิกาที่รีคัพเวอร์ได้

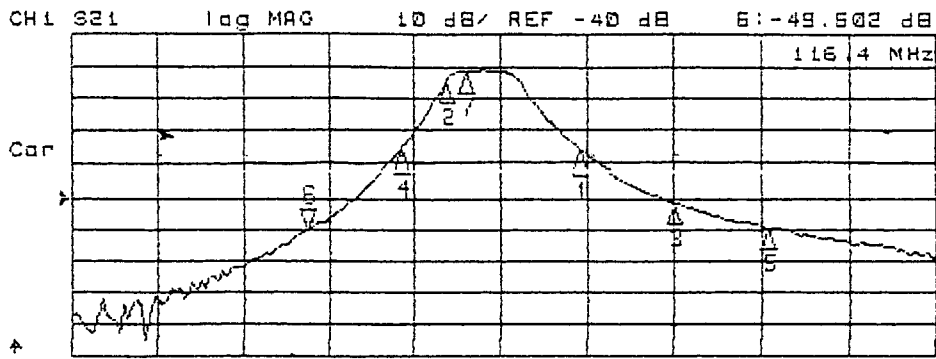


รูปที่ 4.16 รูปสัญญาณที่มอดูเลทแล้วเมื่อผ่านวงจรซีโรครอสซิงดีเทคเตอร์

(Zero Crossing Detector)

4.1.3 วงจรกรองความถี่

- วงจรกรองผ่านแถบความถี่ 144 เมกกะเฮิรต์มีผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 4.17

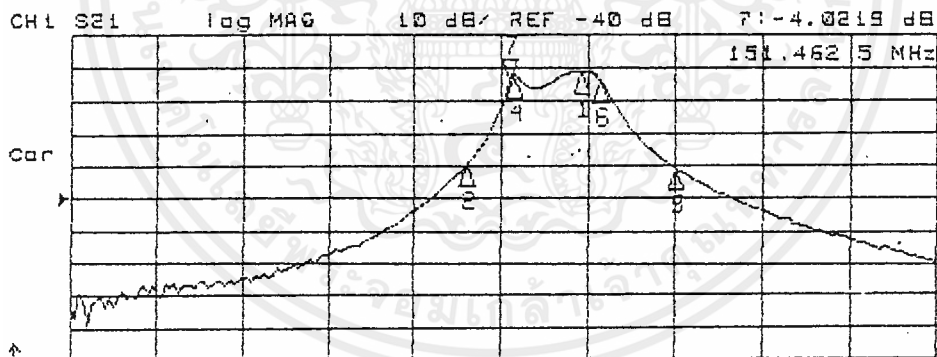


CENTER 150 MHz SPAN 150 MHz
M STIMULUS val

Point	Frequency (MHz)	Magnitude (dB)
1	164	-26.3003
2	140.5875	-4.1076
3	180	-40.957
4	132.7125	-25.680
5	195.9375	-49.298
6	116.4	-49.602
7	144	-1.1557

รูปที่ 4.17 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ 144 เมกกะเฮิรต์

- วงจรกรองผ่านแถบความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์มีผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 4.18

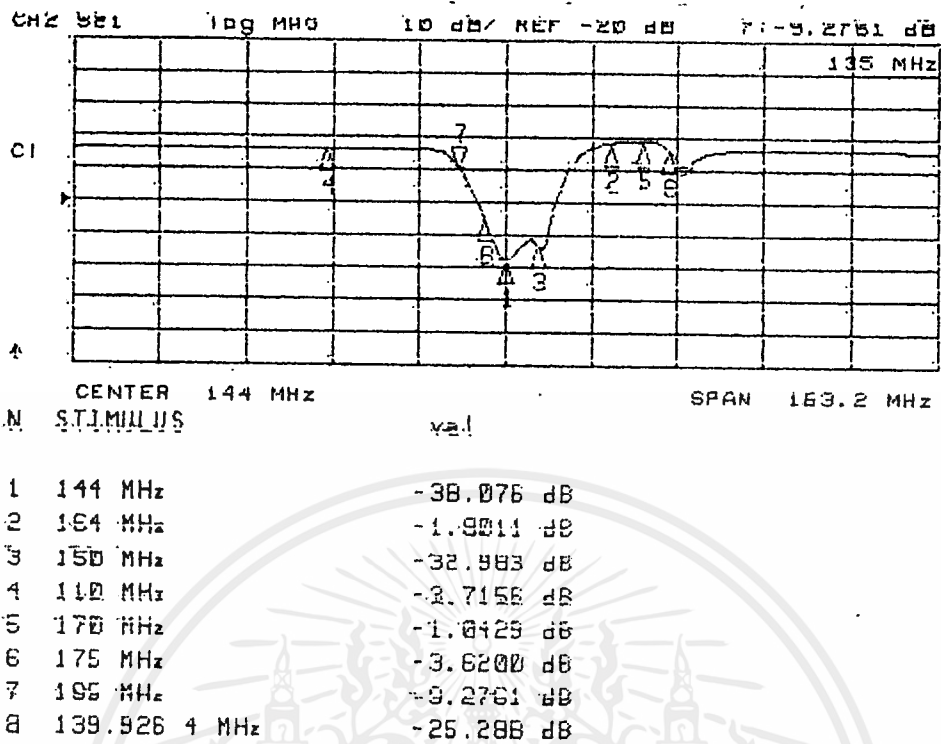


CENTER 150 MHz SPAN 150 MHz
M STIMULUS val

Point	Frequency (MHz)	Magnitude (dB)
1	164	-4.0219
2	144	-29.651
3	180	-30.808
4	152.1375	-2.4072
5	179.8875	-30.664
6	167.2125	-4.0308
7	151.4625	-4.0219

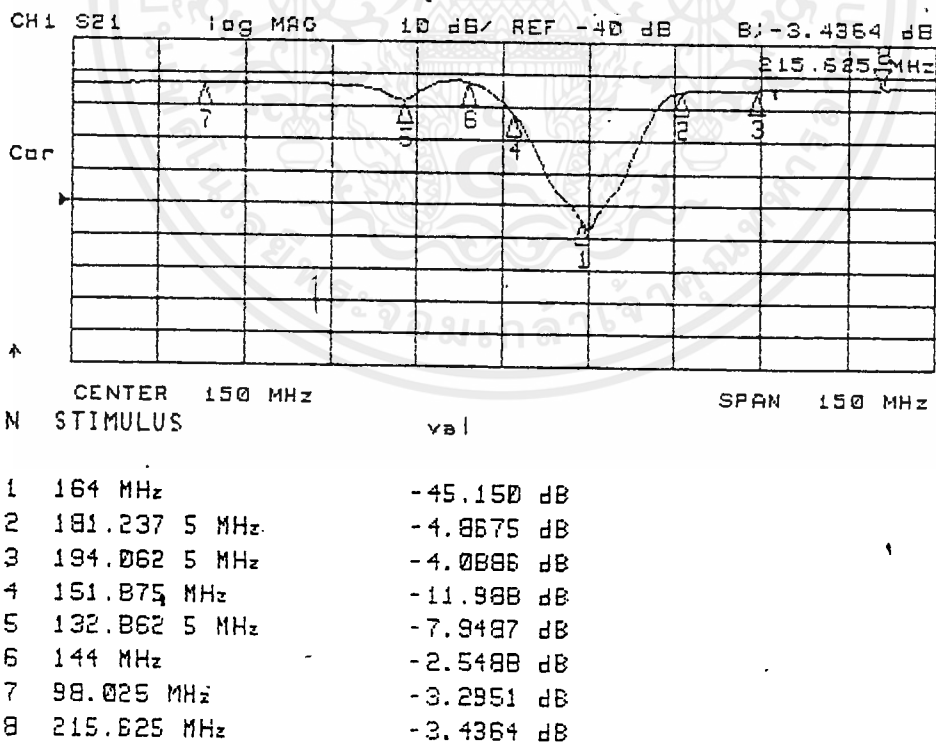
รูปที่ 4.18 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์

- วงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ 144 เมกะเฮิรต์มีผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 4.19



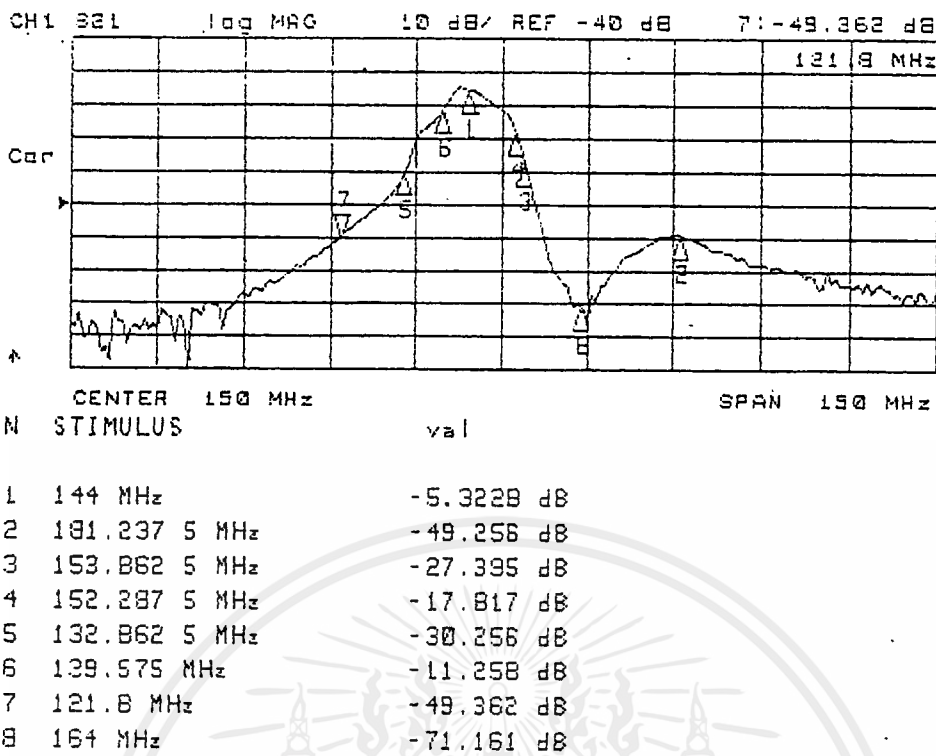
รูปที่ 4.19 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ 144 เมกะเฮิรต์

- วงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ 144 เมกะเฮิรต์มีผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 4.20



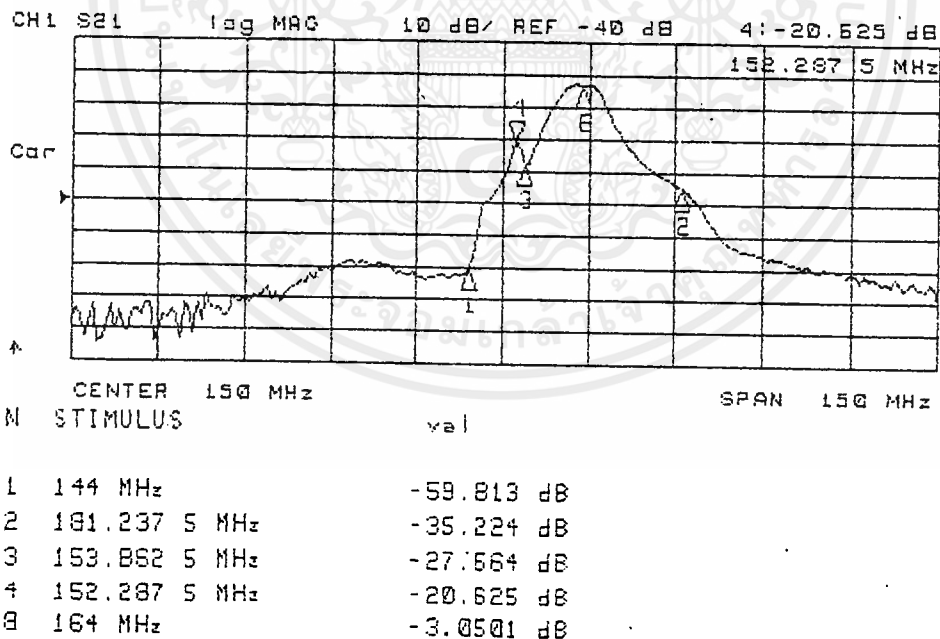
รูปที่ 4.20 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองกำจัดแถบความถี่ที่ 164 เมกะเฮิรต์

- วงจรดูเพลกเซอร์ที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิรต์มีผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 4.21

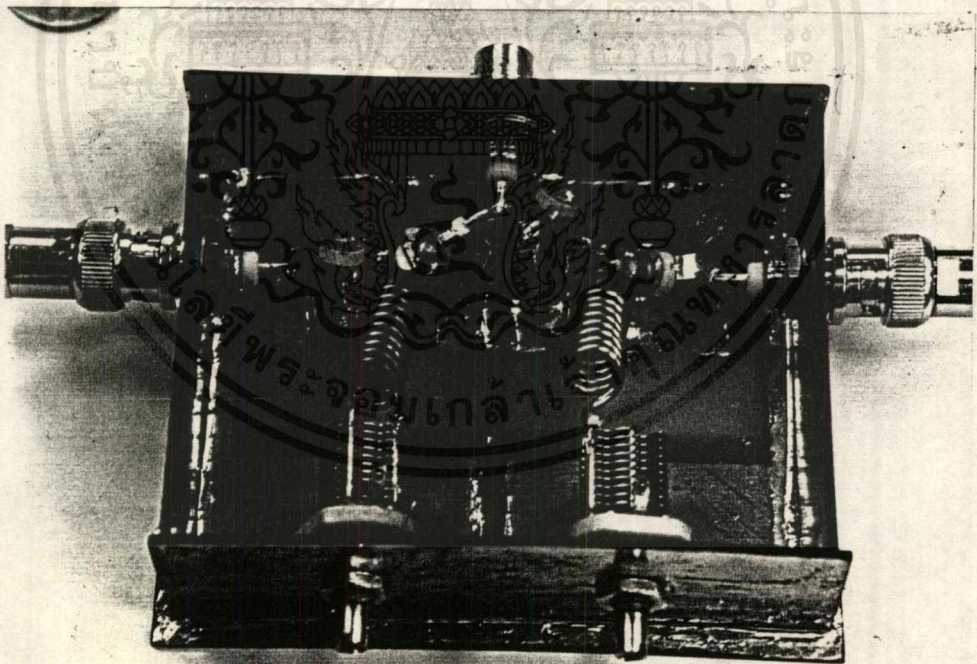
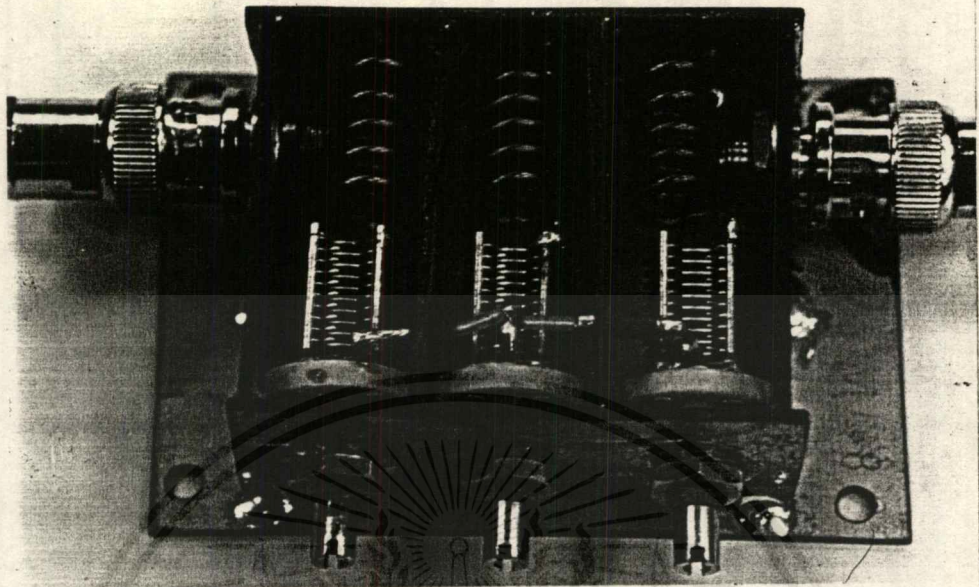


รูปที่ 4.21 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรดูเพลกเซอร์ที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิรต์

- วงจรดูเพลกเซอร์ที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์มีผลตอบสนองความถี่ดังรูปที่ 4.22



รูปที่ 4.22 ผลตอบสนองความถี่ของวงจรดูเพลกเซอร์ที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์

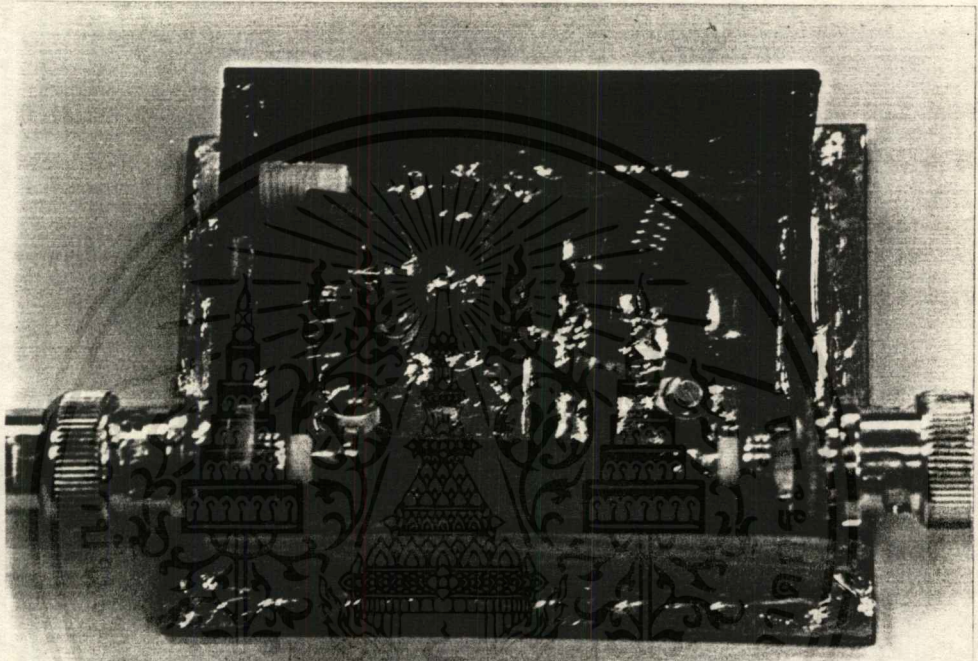


รูปที่ 4.23 แสดงวงจรตุเพลิงเซอร์ที่ได้ออกแบบ

4.1.4 วงจรขยายสัญญาณ

- วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 144 เมกกะเฮิรต์ ทำการทดลอง โดยการป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 144 เมกกะเฮิรต์ขนาด -30dBm ปรากฏว่ามีสัญญาณเอาต์พุตออกมาขนาด -23.86dBm แสดงให้เห็นว่าวงจรขยายมีอัตราขยาย 6.14dB

- วงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์ ทำการทดลอง โดยการป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 164 เมกกะเฮิรต์ขนาด -30dBm ปรากฏว่ามีสัญญาณเอาต์พุตออกมาขนาด -22.93dBm แสดงให้เห็นว่าวงจรขยายมีอัตราขยาย 7.07dB



รูปที่ 4.24 แสดงวงจรขยายสัญญาณที่ได้ออกแบบ

4.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองของแต่ละส่วน นั้นยังไม่เป็นที่น่าพอใจนัก โดยเฉพาะวงจรมอดูเลเตอร์, วงจรดีมอดูเลเตอร์ และวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัลบ การทดลองไม่สามารถทำเป็นระบบได้ เนื่องจากการสร้างวงจรขึ้นทดลองนั้น ได้สร้างขึ้นเพียงชุดเดียว ซึ่งการทดลองสื่อสารข้อมูลแบบฟลูตดูเพล็กซ์ (Full Duplex) นั้น ต้องสร้างวงจรถึง 4 ชุดด้วยกัน อย่างไรก็ตามวงจรต้นแบบที่ออกแบบสร้างขึ้นมานี้ยังไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานจริง เนื่องจากมีขนาดใหญ่และอาจจะเกิดปัญหาเรื่องการซิงโครไนซ์ระบบ และปัญหาของสัญญาณรบกวน

4.3 อุปสรรคของการสร้าง

ปัญหาหลักที่พบขณะที่ผู้จัดทำกำลังทดลองสร้างวงจรต้นแบบ คือ ไม่สามารถหาเครื่องมือที่ย่านความถี่ที่ต้องการได้ครบ และขาดข้อมูลทางเทคนิคที่เกี่ยวข้อง เช่น การออกแบบวงจรเชิงโครโมซิสระบบ เป็นต้น นอกจากนี้ยังไม่สามารถหาอุปกรณ์ที่ใช้ได้ เช่น เซอร์คิวเลเตอร์

4.4 แนวทางการพัฒนาส่วนที่เหลือ

- วงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัลป์ยังมีสัญญาณรบกวนทางเฟส และการเลื่อนตามอุณหภูมิมากอาจจะเกิดปัญหากับระบบโดยรวมได้ ควรแก้ไข

- สร้างชุดเครื่องรับส่งที่เหลือ เนื่องจากการทดลองสื่อสารข้อมูลแบบฟลูตดูเพล็กซ์ (Full Duplex) นั้น ต้องสร้างวงจรถึง 4 ชุดด้วยกัน

- การทดลองรับส่งข้อมูลจริงอาจจะเกิดปัญหา สาเหตุของปัญหาที่ผู้จัดทำคิดว่าน่าจะเกิดในเบื้องต้น คือ

1. ระบบไม่สามารถซิงโครไนซ์กันได้ เนื่องจากสัญญาณรบกวนที่มีอยู่มากในวงจรสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อกคัลป์ และการแกว่งของแครี่เรี่ย (Carrier Jitter) แก้ไขโดยการใช้วงจรรีเฟรชเวอรัรีแบบอื่นๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2

2. การแยก (Isolation) ระหว่างภาคส่งและรับยังไม่สูงพอ แก้ไขโดยใช้วงจรเซอร์คิวเลเตอร์เป็นวงจรดูเพล็กซ์เซอร์แทนการใช้เพียงวงจรรองความถี่ตั้งที่ใช้อยู่ขณะนี้

3. การรบกวนกันระหว่างวงจรความถี่สูงและวงจรดิจิตอล

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่านอาจารย์ ดร. รัตติกอ วรากุลศิริพันธ์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งกรุณาสับสนุน และให้คำแนะนำตลอดจนจัดหาเครื่องมือในการทดลอง จนโครงการนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณวิทยาลัยมหานครที่เอื้อเฟื้อเครื่องเน็ตเวอร์กอนาไลเซออร์ที่ใช้ในการหาผลตอบ สันองความถี่ของวงจรต่างๆ

พร้อมกันนี้ ขอขอบคุณพี่สาววิสต์ บุญยะเวช ที่ให้คำแนะนำด้วยดีตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Floyd M.Gardner, Phaselock Techniques, Wiley, New York, 1979.
- [2] George D.Vendelin, Anthony M.Pavio and Ulrich L.Rohde, Microwave Circuit Design, Wiley, 1990.
- [3] G.R.Basawapatna and R.B.Stancliff, "A Unified Approach to the Design of Wide-Band Microwave Solid-State Oscillators," IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. MTT-27, May 1979.
- [4] T.C.Edwards, Foundations for Microstrip Circuit Design, Wiley, New York, 1981.
- [5] Vadim Manassewitsch, Frequency Synthesizers, Wiley, New York, 1987.
- [6] Ulrich L.Rohde, Digital PLL Frequency Synthesizers, Theory and Design, Prentice-Hall, N.J., 1983.
- [7] MECL Device Data, Motorola Inc., Phoenix Arizona, 1989.
- [8] Robert J.Matthys, Crystal Oscillator Circuits, Wiley, New York, 1983.
- [9] Roland E.Best, Phase-Locked Loop, Theory, Design and Applications, McGraw-Hill, New York, 1984.
- [10] Andrzej B.Przedpelski, "Optimize phase-locked loop to meet your need - or determind why you can't," Electronic Design, September 13, 1978.
- [11] Guillermo Gonzalez, Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design, Prentice-Hall, New Jersey, 1984.
- [12] Roy Hejhall, "RF small signal design using two-port parameters," Motorola Applications Note AN215A.
- [13] H.J.Blinchikoff and A.I.Zverev, "Filtering in the Time and Frequency Domains", Wiley, New York, 1976.

- [14] G.R.Jessop, "VHF/UHF Manual", RSGB, Hertfordshire, 1985.
- [15] R.S.Carson, "High Frequency Amplifiers", Wiley, 1982.
- [16] C.Hutchinson, "The ARRL Handbook of Radio Amature", ARRL, Conecticut, 1984.
- [17] RF Device Data, Motorola Inc., Phoenix Arizona, 1983.
- [18] Small Signal Transister Data, Motorola Inc., Phoenix Arizona, 1983.
- [19] Linear and Interface Integrated Circuit, Motorola Inc., Phoenix Arizona, 1990.
- [20] Telecommunication Device Data, Motorola Inc., Phoenix Arizona, 1989
- [21] G.Dayanani, Principle of Active Network Synthesis and Design, Wiley, New York, 1989.

