



**การสร้างและรับสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระของน้ำด้วยวิธีพัลส์เซ็น เอ็ม อาร์**  
**(Water's FID stimulating and receiving by Pulsed NMR method)**

ผู้จัดทำ

นายเกรียงศักดิ์ วิมลไตรรัตน์ 301023

นายอภิศักดิ์ วรพิเชฐ 301350

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร. ไพรัช ชัยพงษ์

ดร. รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์

วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2533

เรื่อง การสร้างและรับสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระของน้ำด้วยวิธีพัลส์เซ็นเอ็มอาร์

(Water's FID stimulating and receiving by Pulsed NMR method )

ผู้จัดทำ

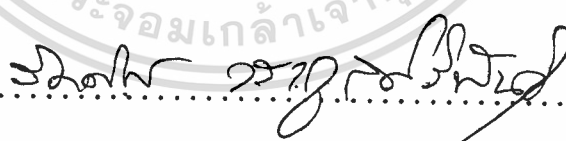
1. นายเกรียงศักดิ์ วัฒนไตรรัตน์ รหัส 30.1023

2. นายอภิศักดิ์ วรพิเชฐ รหัส 30.1350



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( ศ.ดร. ไพรัช ชัยพงษ์ )



.....อาจารย์ที่ปรึกษา

( ดร. รัตติกกร วรากุลศิริพันธุ์ )

# การสร้างและรับสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระของน้ำด้วยวิธีพัลส์เซ็น เอ็ม อาร์

(Water's FID stimulating and receiving by Pulsed NMR method )

นายเกรียงศักดิ์ วัฒนไตรรัตน์ รหัส 30.1023

นายอภิศักดิ์ วรพิเชฐ รหัส 30.1350

อาจารย์ที่ปรึกษา

ศ.ดร. ไพรัช ธีรพงษ์

ดร. รัตติกร วรากุลศิริพันธุ์

## บทคัดย่อ

การกำหนดแม่เหล็กภายในนิวเคลียสของอะตอม (Nuclear Magnetic Resonance) เกิดจากการที่อะตอมได้รับพลังงานซึ่งมีความถี่ตรงกับความถี่กำหนด และทำให้เกิดสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระ (Free Induction Decay) ที่มีลักษณะของสัญญาณขึ้นอยู่กับชนิดของอะตอม ซึ่งมีประโยชน์ในการวินิจฉัยทางการแพทย์ และการวิเคราะห์องค์ประกอบของสารเคมี

โครงการนี้ จะเป็นการทดลองสร้าง เครื่องมือสำหรับสร้างและรับสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระของอะตอมไฮโดรเจน ที่เป็นส่วนประกอบของน้ำ โดยจะให้น้ำมีความถี่กำหนดประมาณ 10.7 เมกะเฮิรซ์

Water's FID stimulating and receiving by Pulsed NMR method

Kriengsak Wimontrairat 30.1023

Apisak Worapishet 30.1350

Prof. Dr. Pairash Tachayapong Advisor

Dr. Rattikorn Warakulsiripan Advisor

Abstract

Free Induction Decay (FID) ,the phenomou of Nuclear Magnetic Resonance (NMR) which depend on atomic type ,is achieved by stimulating atomic nucleons by their resonant RF Energy. The FID is widely used for medical and chemical application.

This project describes an experiment of constructing instruments for Water-Hydrogen's FID stimulating and receiving. The resonant frequency used is about 10.7 MHz.

# สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ปรัชญาการฝึกกำหนดแม่เหล็ก	1
บทที่ 2 โครงสร้างของระบบ	
2.1 ภาคส่ง	5
2.2 ภาครับ	5
บทที่ 3 ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรร	
3.1 วงจรขยายกำลังย่านความถี่สูง	6
3.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรรขยาย	8
3.3 วิธีการแมชชิงอิมพีแดนซ์ทางอินพุทของวงจรรขยายกำลัง	10
3.4 คีชีพีคและการตีคล้บปึงวงจรรขยาย	12
3.5 การออกแบบวงจรรแมชชิงด้วยคอมพิวเตอร์	14
3.6 วงจรรมอดคูเลเตอร์	25
3.7 การส่งเคราะห์ความถี่โดยระบบเฟสล้คคูปล	29
3.8 วงจรรทรวความถี่	35
3.9 วงจรรทรวความถี่สำหรับสัญญาณ เอช เอฟ	37
3.10 วงจรรสร้างความถี่อ้างอิง	38
3.11 วงจรรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน	40
3.12 วงจรรขยายสำหรับภาคส่งและรับ	43
3.13 การไบอัสวงจรรขยายแบบแอคทีฟ	48
3.14 วงจรรแมชชิง	48
3.15 วงจรรสวิทช์รับ-ส่งสัญญาณ	52
3.16 วงจรรรองความถี่ต่ำผ่าน	54
3.17 วงจรรจ่ายกระแสแบบเสถียรภาพสูง	55
3.18 ไซร์คค้อมไบร์เนออร์	56

3.19	วงจรสรางสัญญาณพัลซ์แบบโปรแกรมได้	58
<b>บทที่ 4 การออกแบบวงจร</b>		
4.1	วงจรขยายสัญญาณสำหรับระบบส่งอาร์เอฟพัลซ์	65
4.2	วงจรลดทอนสัญญาณ	66
4.3	การออกแบบวงจรส่งเคราะห์ความถี่	67
4.4	วงจรสรางความถี่อ้างอิง	73
4.5	การออกแบบวงจรขยายกำลังเชิงเส้น	74
4.6	วงจรขยายภาคขับ	79
4.7	วงจรขยายภาครับ	79
4.8	การออกแบบวงจรเพิ่มความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน	80
4.9	การออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ผ่าน	84
4.10	การออกแบบวงจรจ่ายกระแสคงที่	85
4.11	วงจรไฮบริดคอมไบน์เนอร์	86
<b>บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและวิจารณ์</b>		
5.1	ผลการทดลอง	87
5.2	วิจารณ์ผลการทดลอง	107
5.3	ปัญหาที่ประสบ	108
5.4	แนวทางการพัฒนาส่วนที่เหลือของระบบ	108

กิจกรรมประกาศ

หนังสืออ้างอิง

# บทที่ 1

## บทนำ

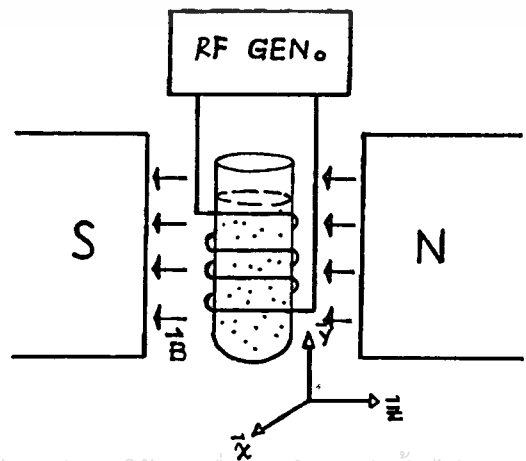
ในช่วงเวลาหลายสิบปีที่ผ่านมา รังสีเอกซ์นับว่าเป็นสิ่งที่มีความสำคัญอย่างมากต่องานด้านรังสีวินิจฉัยโดยช่วยตรวจความผิดปกติของอวัยวะภายในร่างกายของผู้ป่วยจากภาพถ่ายรังสีเอกซ์แบบธรรมดา กระทั่งได้มีการค้นพบเทคนิคใหม่ซึ่งมีชื่อเรียกภายหลังว่า MRI หรือการเกิดภาพกาทอนแม่เหล็ก (Magnetic resonance imaging)

MRI เป็นเทคนิคที่อาศัยคุณสมบัติพิเศษของนิวเคลียสของอะตอมที่เรียกว่า กาทอนแม่เหล็กของนิวเคลียส (Nuclear magnetic resonance) หรือ NMR ซึ่งเทคนิคนี้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ตัวอย่างเช่นใช้หาค่าการจลน์ศาสตร์มวลโมเลกุลของสารประกอบ, การเคลื่อนที่ของโมเลกุล, การสร้างภาพตัดขวางของร่างกายมนุษย์

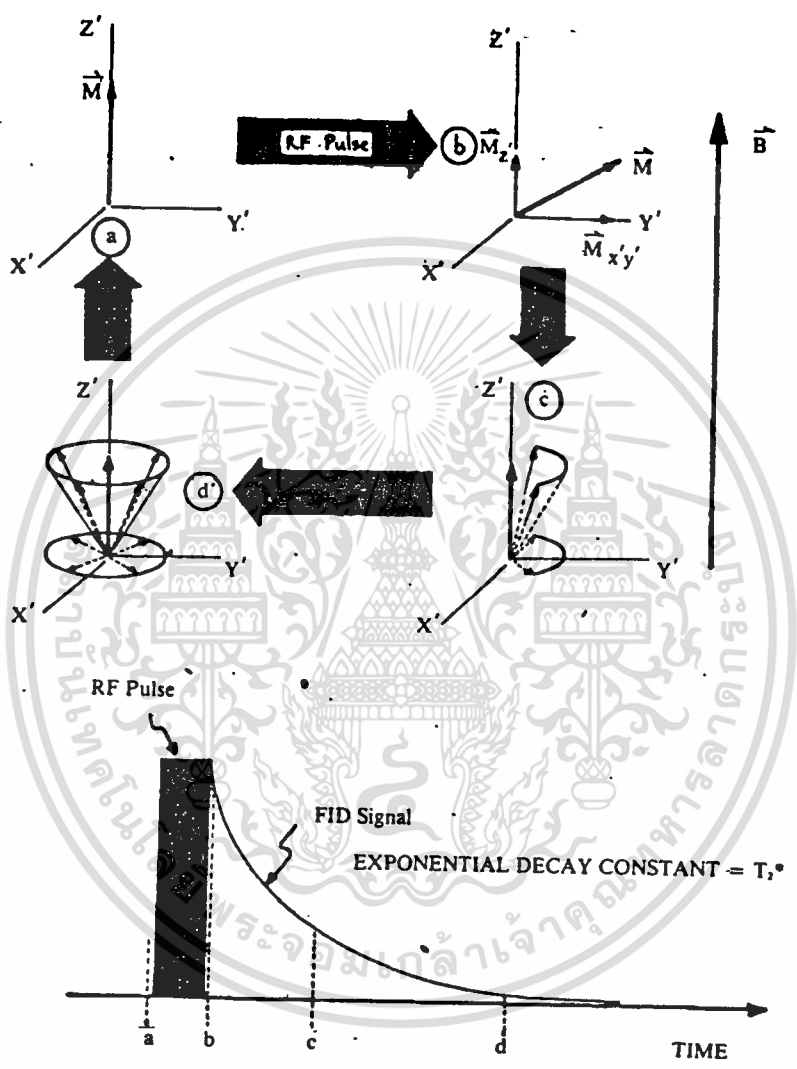
ในโครงการนี้ได้ทำการสร้างเครื่องกำเนิดสัญญาณกระตุ้นนิวเคลียส, เครื่องรับสัญญาณกาทอนแม่เหล็ก, ส่วนควบคุมการส่ง-รับ, ส่วนควบคุมความเข้มสนามแม่เหล็ก โดยยังมีทำการทดลองทั้งระบบ

### 1.1 ปราบปรามการแม่เหล็ก

เป็นปรากฏการณ์ของระบบนิวเคลียสที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่สมมาตรค่าหนึ่งซึ่งแสดงในรูปที่ 1. ถูกคลื่นพลังงานจากถึงแวลลอม โดยพลังงานที่นิวเคลียสสามารถดูดกลืนได้นั้น ต้องมีความถี่ตรงกับความถี่ลาร์มอร์ของนิวเคลียส (ความถี่ลาร์มอร์มีค่าแปรผันตามความเข้มสนามแม่เหล็กสมมาตร (B) ดังสมการ  $w = \gamma \cdot B$  (โดย  $\gamma$  เรียกว่าอัตราส่วนไจโรแมกเนติก เป็นค่าอัตราส่วนของโมเมนต์แม่เหล็กกับโมเมนต์เชิงมุมของนิวเคลียส ที่อยู่ในสนามแม่เหล็กสมมาตร B )



ผลจากการรบกวนคลื่นหลังจากงาน จะทำให้แมกเนโต เซ็นของระบบเบี่ยงเบนจากแนวสมมูลเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมุมของการเบี่ยงเบนแปรผันตามระยะเวลาที่นิวเคลียสนั้นได้รับพลังงาน ( $\theta = \gamma \cdot B \cdot t$ ) และเมื่อนิวเคลียสหยุดได้รับพลังงาน มันจะคืนตัวกลับเข้าสู่สภาวะสมมูลเดิม (แมกเนโต เซ็นของระบบจะชี้ขนาบไปกับสนามแม่เหล็กคงที่ ซึ่งเป็นแนวสมมูลเดิม)



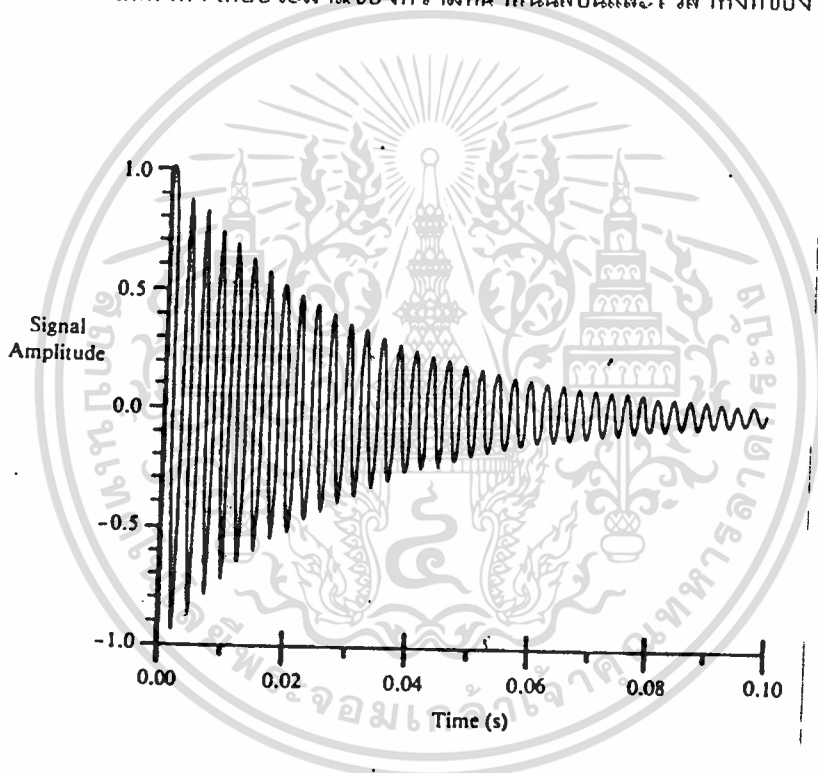
รูปที่ 2 แสดงการเบี่ยงเบนของแมกเนโต เซ็นเมื่อได้รับพลังงานจากภายนอก

ขณะที่แมกเนโต เซ็นเคลื่อนที่กลับสู่สมมูลนั้น จะเกิดการลดลงของฟลักซ์แม่เหล็กบริเวณหน้าตัดของขดลวด ( วนรอบ XY ) แบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าซึ่งเราเรียกว่าการสลายการเหนี่ยวนำอิสระ ( Free induction decay , FID ) ดังแสดงในรูปที่ 3 โดยค่าเวลาคงที่ของการลดลงของสัญญาณจะมีค่าขึ้นอยู่กับชนิดของสารหรือเนื้อเยื่อที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ถูกกระตุ่นโดยสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1  
 ไม่ว่าจะตีพิมพ์สิ่งอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tissue	SD	$T_1$ (ms)	$T_2$ (ms)
Water	100	2700	2700
Skeletal muscle	79	720	55
Cardiac muscle	80	725	60
Liver	71	290	50
Fat	—	360	30
Bone	<12	<100	<10
Spleen	79	570	
Kidney	81	505	50
Gray matter	84	405	105
White matter	70	345	65

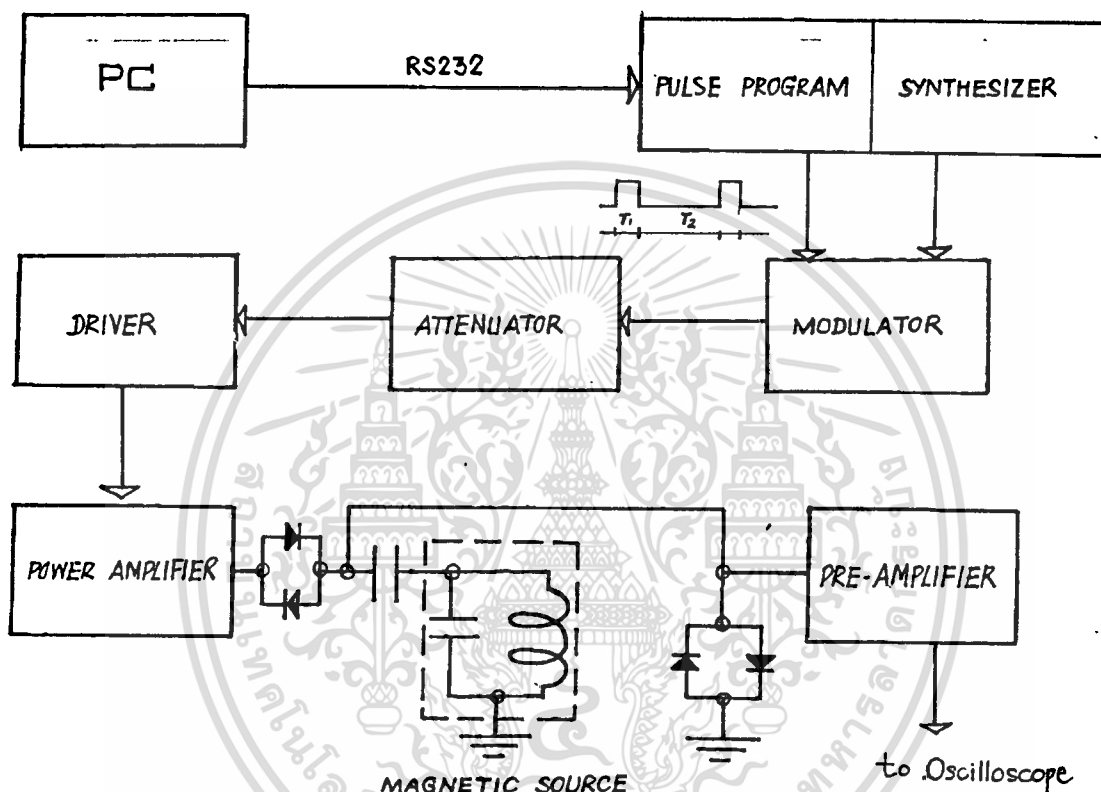
ตารางที่ 1 แสดงค่าโดยประมาณของความหนาแน่นสปินและเวลาคงที่ของเนื้อเยื่อต่างๆ



รูปที่ 3 แสดงสัญญาณ FID เป็นคลื่นรูปไซน์ลดลงอย่างเอกซ์โพเนนเชียล

โครงสร้างของระบบ

โครงสร้างโดยทั่วไปของระบบ สำหรับการสร้างสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระมีบล็อกไดอะแกรมเป็นดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของระบบ

การทำงานเริ่มจากการส่งข้อมูลจากคอมพิวเตอร์ผ่าน RS232C ไปควบคุมความถี่ของส่วนสังเคราะห์ความถี่, ค่าคาบเวลาและคิวตี้ไซเคิลของส่วนสร้างสัญญาณพัลส์แบบไวแรมที่ได้ ( T1 ,T2 ) จากนั้นสัญญาณไซน์จากส่วนสังเคราะห์ความถี่ก็จะถูกมอดด้วยสัญญาณพัลส์ที่ถูกไวแรมค่าความถี่ที่ต้องการ สัญญาณที่ถูกมอดนี้ก็จะนำไปขยายด้วยวงจขยายและวงจขยายกำลังอิกรวม 3 ภาค ก่อนที่จะนำไปจ่ายเป็นพลังงานให้กับอะตอมไฮโดรเจนเพื่อเป็ียงเบนแมกเนโตเซชัน เมื่อหยุดจ่ายพลังงาน สัญญาณเหนี่ยวนำอิสระที่ได้ก็จะถูกขยายด้วยวงจขยายแบบสัญญาณรบกวนค่า 2 ภาค เพื่อนำสัญญาณมาแสดงบนจอออสซิลโลสโคปศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายละเอียดของแต่ละส่วนสามารถอธิบายได้ดังนี้

### 2.1 ภาคส่ง

- ส่วนเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ ( RS232 ) ทำหน้าที่ส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับส่วนสร้างสัญญาณพัลส์ที่โปรแกรมได้กับส่วนส่ง เกราะที่ความถี่
- ส่วนสร้างสัญญาณพัลส์ที่โปรแกรมได้ ทำหน้าที่สร้างสัญญาณรูปเหลี่ยมที่สามารถควบคุมค่าของคาบเวลาและคิวดีซีเทิล โดยความถี่อ้างอิงของวงจรจะนำมาจากส่วนส่ง เกราะที่ความถี่
- ส่วนส่ง เกราะที่ความถี่ ทำหน้าที่สร้างฐานเวลาและสัญญาณของระบบ
- ส่วนผสมสัญญาณ จะทำการมอดูเลตแบบพัลส์ระหว่างสัญญาณไซน์จากส่วนส่ง เกราะที่ความถี่กับสัญญาณพัลส์ที่โปรแกรมได้
- ส่วนวงจรขยายและวงจรขยายกำลังเชิงเส้น ทำหน้าที่ขยายกำลังสัญญาณให้มีความเหมาะสมก่อนจะนำไปจ่ายให้แก่เครื่องไฮดรอลิกของน้ำที่อยู่ในวงจรทางค์เวโรเนนซ์

### 2.2 ภาครับ

- ส่วนแยกสัญญาณภาคส่งและรับ เป็นส่วนสวิทช์เลือกกระหว่างภาคส่งและรับกับวงจรทางค์เวโรเนนซ์ในขณะที่กำลังทำการส่งหรือรับสัญญาณ
- ส่วนวงจรขยายแบบสัญญาณรบกวนต่ำ จะขยายสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระให้เกินได้ช้คนจอออสซิลโลสโคป

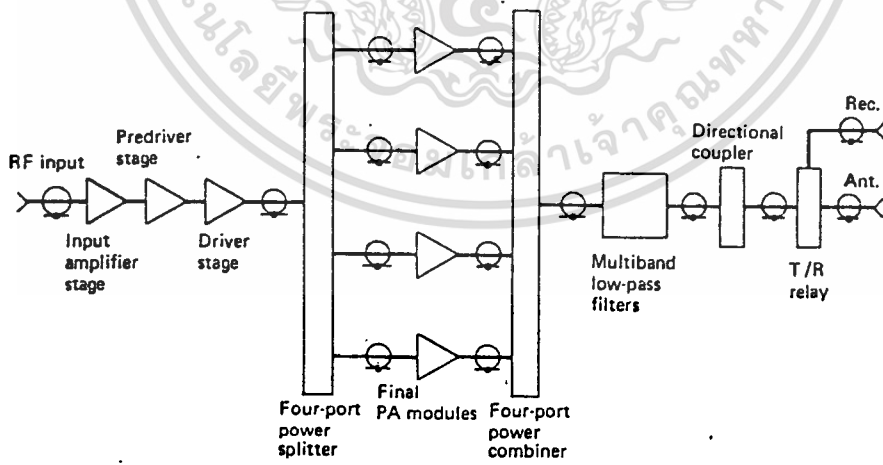
### บทที่ 3

## ทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรร

ในบทนี้จะอธิบายถึงรายละเอียดการทำงานของวงจรรแต่ละส่วนอย่างคร่าวๆ โดยจะแยกอธิบายดังนี้

### 3.1 วงจรรขยายกำลังย่านความถี่สูง

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงวงจรรขยายกำลังเชิงเส้นย่านความถี่สูง แบบใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (solid state HF linear power amplifier) โดยบล็อกไดอะแกรมของวงจรรทั่วไป แสดงได้ดังรูปที่ 1 ซึ่งจะเห็นว่าประกอบด้วยส่วนของวงจรรขยายกำลังหลายชุด, ตัวแบ่งกำลัง (power splitter) และตัวรวมกำลัง (power combiner) ทางอินพุตและเอาต์พุตของวงจรรตามลำดับ แต่เนื่องจากวงจรรขยายกำลังที่ใช้งานในที่นี้ไม่จำเป็นต้องอาศัยตัวรวมและตัวแบ่งกำลัง เพราะต้องการกำลังงานทางเอาต์พุตของวงจรรไม่เกิน 200 วัตต์ ดังนั้นจึงจะกล่าวถึงรายละเอียดของวงจรรขยายกำลังเท่านั้น ไม่กล่าวถึงตัวรวมกำลังและตัวแยกกำลัง [1]



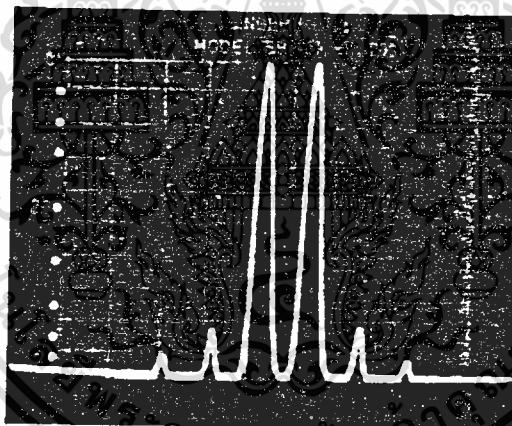
รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรขยายกำลังทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลสำคัญที่แสดงถึงคุณสมบัติของวงจรมอดูเลเตอร์กำลังมีดังนี้

กำลังทางเอาต์พุต จะถูกจำกัดด้วยอัตราส่วนของอุปกรณ์, อุณหภูมิใช้งานของวงจรมอดูเลเตอร์

ความเพี้ยนแบบอินเทอร์มอด บกถึงคุณสมบัติในการเชื่อมโยงข่าวสารข้อมูลทางโทรคมนาคมและการรบกวนต่อช่องสื่อสารข้างเคียงซึ่งสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดความเพี้ยนก็เนื่องมาจากความไม่เป็นเชิงเส้นของตัวอุปกรณ์แอสซิมเมตริก ซึ่งวิธีการวัดค่าความเพี้ยนแบบอินเทอร์มอดที่เป็นมาตรฐานในปัจจุบันจะใช้สัญญาณสองสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน 1 กิโลเฮิร์ตซ์, ขนาดเท่ากันแต่ไม่จำเป็นต้องมีเฟสตรงกันจ่ายเป็นสัญญาณอินพุตและความเพี้ยนของสัญญาณทางเอาต์พุตในโดเมนความถี่ด้วยเครื่องสเปกตรัมอานาล็อกเซอร์ [2] โดยสัญญาณในโดเมนความถี่ที่วัดได้มีลักษณะคล้ายดังรูปที่ 2 จะสังเกตเห็นสเปกตรัมของสัญญาณที่เพิ่มขึ้นมา วงจรมอดูเลเตอร์ที่มีคุณภาพดีควรมีระดับความเพี้ยนอินเทอร์มอดต่ำกว่าระดับของสัญญาณสองความถี่อย่างน้อย 30 dB



รูปที่ 2 สเปกตรัมของสัญญาณทางเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์กำลังเมื่อจ่ายสัญญาณสองความถี่ทางอินพุต

ช่วงความถี่ใช้งานของวงจรมอดูเลเตอร์ คือย่านความถี่ที่วงจรมอดูเลเตอร์สามารถทำงานได้ตามคุณสมบัติต่างๆที่

ต้องการ

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของสภามอดูเลเตอร์ของสัญญาณทางเอาต์พุตของวงจรมอดูเลเตอร์กำลังที่ยอมรับได้จะต้องดำเนินการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กว่าความถี่มูลฐานประมาณ 46 ถึง 80 dB ซึ่งสามารถทำได้ง่ายโดยใช้วงจรขยายคลาสเอ แต่ประสิทธิภาพของวงจรคลาสนี้มีค่าต่ำ จึงนิยมใช้วงจรขยายคลาสเอบี หรือบี ต่อแบบพหุขั้วทำให้สามารถลดระดับฮาร์โมนิกเลขคู่ได้ ส่วนระดับของฮาร์โมนิกเลขคี่ยังมีค่าสูงจึงจำเป็นต้องมีวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านทางค่านเอาท์พุท

**สัญญาณซั่มและสัญญาณรบกวน** ควรจะมีค่าต่ำกว่าค่ากำลังแบบ PEP ( peak envelope power ) ประมาณ 40 ถึง 56 dB

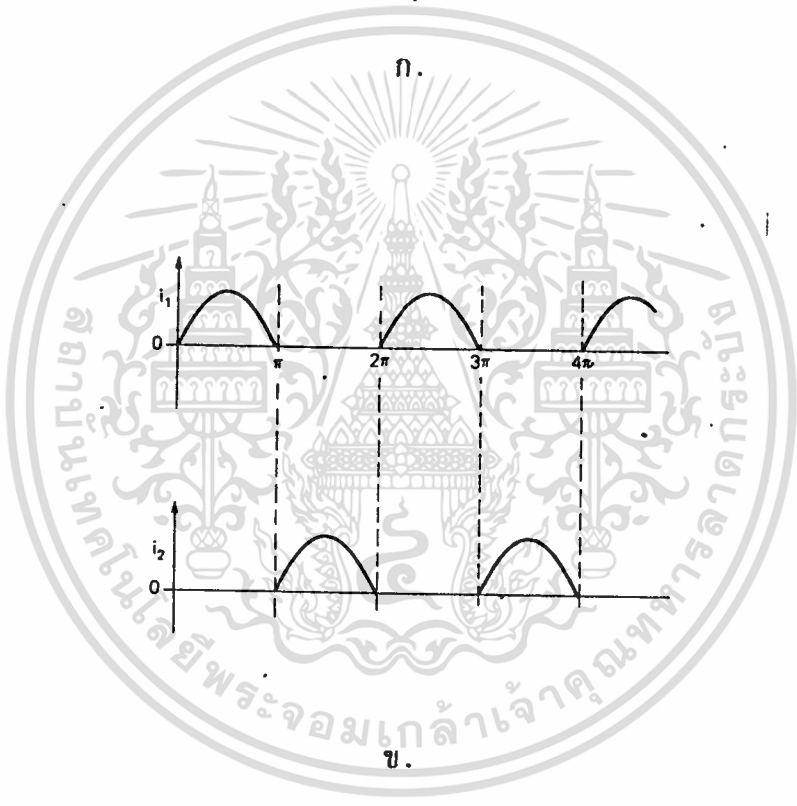
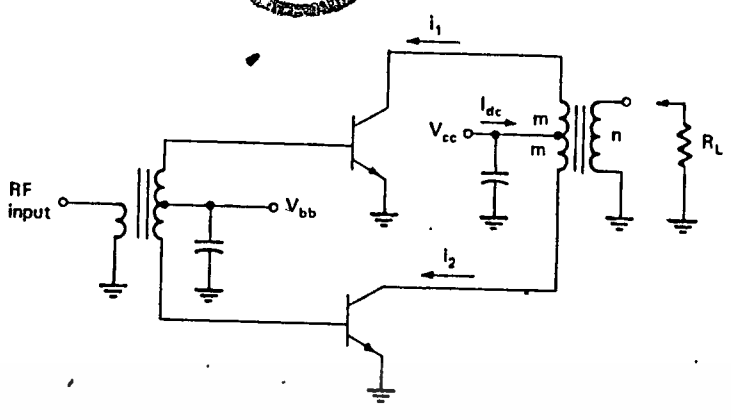
โดยปกติการออกแบบวงจรขยายกำลัง ควรจะเลือกค่าศึกคาคาที่คอลเลคเตอร์ของวงจรให้ มีค่าสูงสุดเท่าที่จะสามารถทำได้ เนื่องจากเหตุผล 3 ประการดังนี้

1. ศักคาคาที่คอลเลคเตอร์ที่มีค่าสูงทำให้ค่าโวลตจิมพีแคนซ์ที่คอลเลคเตอร์/ เครนไม่ต่ำลงมากจนเกินไปทำให้การออกแบบหม้อแปลงช่วงความถี่กว้างที่ทำการแมชไปยังโวลค 50 โอห์มง่ายขึ้น
2. ลดจำนวนของวงจรขยายที่ต้องการใช้ในการดีคองการกำลังเอาท์พุทสูงมาก
3. เนื่องจากผลของความไม่เป็นเชิงเส้นของกระแสคอลเลคเตอร์ (ในขณะที่กระแสคอลเลคเตอร์มีค่าสูงจะทำให้ฮาร์โมนิกเลขคี่ของตัวอุปกรณ์แอกทีฟมีค่าต่ำลง) ดังนั้นสำหรับกรณีที่กำลังของวงจร 2 วงจรมีค่าเท่ากัน วงจรที่มีค่าศึกคาคาที่คอลเลคเตอร์ต่ำกว่า (จำเป็นต้องอาศัยกระแสคอลเลคเตอร์มากกว่า) จะทำให้ค่าความเพี้ยนของวงจรมากกว่าอีกวงจรหนึ่ง

### 3.2 ข้อพิจารณาในการออกแบบวงจรขยาย

โดยทั่วไปแล้วถ้าต้องการให้อัตราขยายกำลังของวงจรมีค่าสูงจำเป็นต้องอาศัยการขยายหลายภาค ซึ่งวงจรขยายในภาคแรกควรจะเป็นเชิงเส้นสูงสุด เพื่อที่จะทำให้ความเพี้ยนอินเตอร์มอดของวงจรมีค่าต่ำ ปกติจะใช้วงจรขยายคลาสเอ และเนื่องจากวงจรภาคขับทำงานที่ระดับกำลังต่ำดังนั้น ประสิทธิภาพของวงจรคลาสนี้จึงไม่ค่อยสำคัญนัก ในรูปที่ 3 ก. แสดงวงจรขยายคลาสเอบีแบบใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวสลับกันทำงาน โดยเราอาจจะใช้ทรานซิสเตอร์ตัวเดียวร่วมกับวงจรจูนแมชอิมพีแดนซ์ทั้งทางด้านอินพุทและเอาท์พุท แต่โดยทั่วไปจะเห็นวงจรคลาสนี้ ในรูปแบบของวงจรพหุขั้วร่วมกับหม้อแปลงช่วงความถี่กว้าง รูปที่ 3 ข. แสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์สองตัวสลับกันนำกระแสให้แก่โหลดคนละครึ่งรอบของสัญญาณไซน์

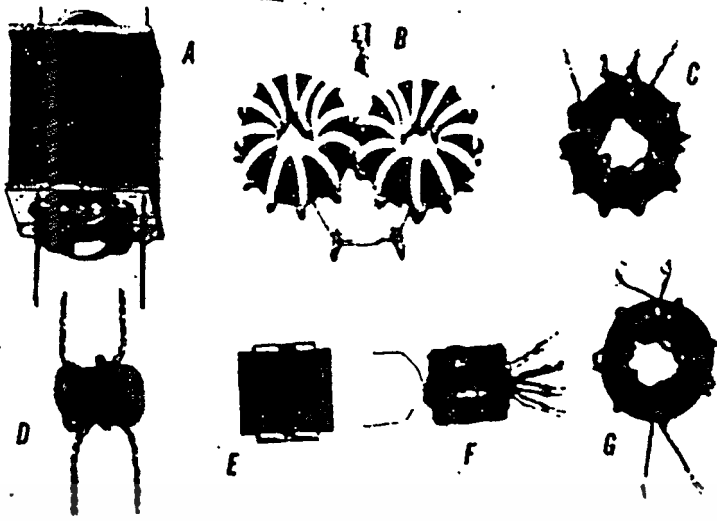
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3 ก., ข. แสดงการทำงานของวงจรแบบคลาสเอบี พุชพูล

เมื่อแปลงช่วงความถี่กว้างที่ใช้ในวงจรขยายกำลังจะแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือแบบธรรมดา ที่อาศัยหลักของสนามแม่เหล็กที่ตัดผ่านขดลวดทั้งสองด้านในการส่งผ่านพลังงานและแบบสายส่ง สัญญาณจะอาศัยคุณสมบัติของสายส่งสัญญาณในการแปลงค่าอิมพีแดนซ์ หรือแปลงแบบธรรมดาไม่มี ข้อจำกัดเกี่ยวกับอัตราส่วนของการแปลงอิมพีแดนซ์ ส่วนหรือแปลงแบบสายส่งสัญญาณจะมีช่วง

ความถี่ทำงานกว้างกว่า ตัวอย่างของหรือแปลงทั้งสองแบบแสดงดังรูปที่ 4 ใ้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับงานเชิงพาณิชย์ของสำนักงานส่งเสริมการค้าในต่างประเทศ ณ นครเชียงใหม่ เลขที่ 028743 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้



รูปที่ 4 ตัวอย่างหม้อแปลงที่ใช้ในวงจรขยายกำลัง

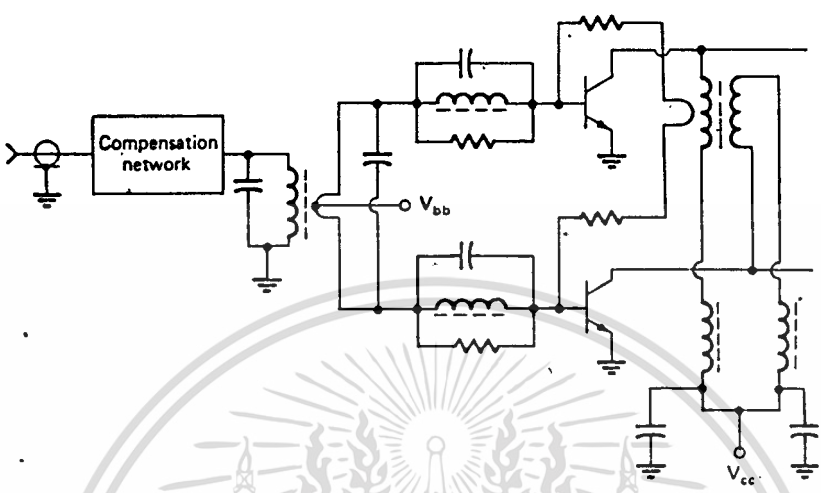
### 3.3 วิธีการแมชชิงอิมพีแดนซ์ทางอินพุทของวงจรมอสเฟตกำลัง

เทคนิคการแมชชิงอิมพีแดนซ์ทางอินพุทของวงจรมอสเฟตกำลังจะต่างจากเทคนิคที่ใช้กับส่วนเกทของเฟตเนื่องจากอินพุทของมอสเฟตจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำกว่าเฟตมาก ข้อได้เปรียบเสียเปรียบระหว่างเฟตกับมอสเฟตกำลังแสดงได้ดังตารางที่ 1 [3]

TABLE A		
	Bipolar	TMOS FET
$Z_{in RS/ XS}(30 \text{ MHz})$ :	0.65 - J0.35 Ohms	2.20 - J2.80 Ohms
$Z_{in RS/ XS}(150 \text{ MHz})$ :	0.40 + J1.50 Ohms	0.65 - J0.35 Ohms
$Z_{OL}$ (Load Impedance):	Almost equal in each case, depending on power level and supply voltage.	
Biasing:	Not required, except for linear operation, high current voltage source necessary.	Some gate bias always required. Low current source, such as resistor divider sufficient.
Ruggedness:	Fails usually under current conditions. Thermal runaway and secondary breakdown possible.	Failure modes: Gate punch through, exceeding of breakdown voltages, over dissipation.
Linearity:	Low order distortion depends on die size and geometry. High order IMD is a function of type and value of ballast resistors.	Low order distortion worse than bipolar for a given die size and geometry. High order IMD better due to lack of ballast resistors.
Advantages:	Wafer processing easier. Low collector-emitter saturation voltage, which makes devices for low voltage operation possible.	Input impedance more constant under varying drive level. Lower high order IMD. Easier to broadband. Devices or die can be paralleled. High voltage devices easy to implement.
Disadvantages:	Low input impedance with high reactive component. Internal matching required to lower Q. Input impedance varies with drive level. Devices or die cannot easily be paralleled.	Larger die required for comparable power level. Nonrecoverable gate breakdown. High drain — source saturation voltage, which makes low voltage, high power devices less feasible.

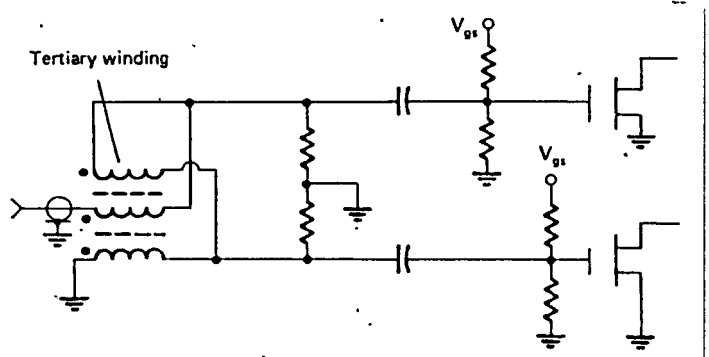
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างวงจรทางภาคอินพุทของวงจรขยายกำลังที่ใช้ไบโพลาร์โดยในการ ออกแบบวงจรจริงนั้นทำได้ยาก เพราะค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรมีค่าต่ำและเปลี่ยนแปลงตาม ขนาดสัญญาณและค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนสัญญาณที่คอลเลคเตอร์ ในต่างประเทศจะใช้ CAD ในการออกแบบ [4]



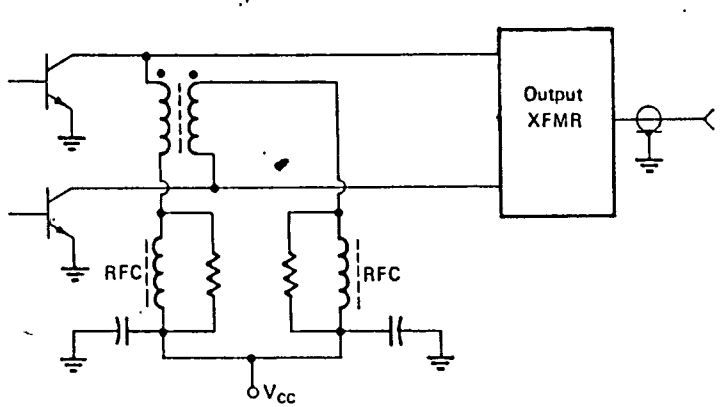
รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างวงจรทางภาคอินพุทของวงจรขยายกำลังที่ใช้ไบโพลาร์

วงจรในรูปที่ 5 ตัวเหนี่ยวนำที่ขนานกับตัวต้านทานและตัวเก็บประจุนั้นเป็นเฟอร์ไรท์ปัท ซึ่งทำหน้าที่เป็นทางผ่านของกระแสไบอัสจากจุดกึ่งกลางของหม้อแปลงอินพุท โดยตัวเหนี่ยวนำนี้ อาจจะไม่ใช้ก็ได้ แต่จะต้องทำการเปลี่ยนวงจรไบอัสจากจุดกึ่งกลางของหม้อแปลงมาผ่านโช๊ค (choke) มิฉะนั้นแล้ว ตัวต้านทานจะไปทำให้คุณภาพของการไบอัสสัญญาณต่ำลงซึ่งมีผลต่อค่า ความเพี้ยนอินเตอร์มอดโดยตรง ส่วนวงจรภาคอินพุทของเพาแอสแสดงได้ดังรูปที่ 6 โดยจะเห็นว่า มีรูปแบบวงจรที่ง่ายกว่าแบบแรกมาก



เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



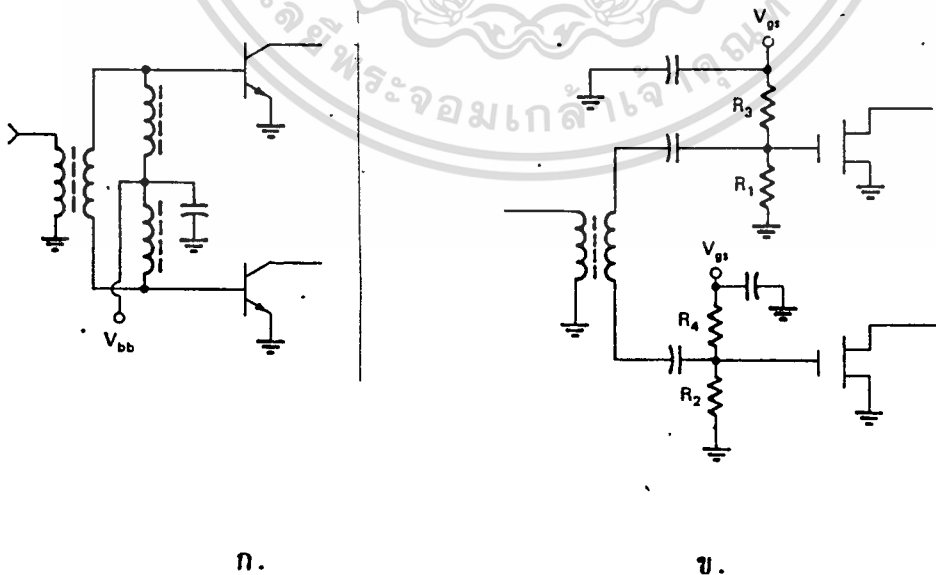


ง.

รูปที่ 7 รูปแบบของวงจรตีตีคและวงจรตีคตีบั้ง ก. ใช้หม้อแปลงแบบมีกึ่งกลาง

ข. แยกใช้ค ค. , ง. ใช้ตัวรวมกำลัง

สำหรับวงจรตีตีคที่ขาเบสของไบโพลาร์และเพชแสดงคังคังรูปที่ 8 โดยจะเห็นว่าคล้ายกับการตีคที่คอลลเลคเตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางจตีตีคที่ขาเบสของไบโพลาร์ ก. และเพช ข. ญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 การออกแบบวงจรแมชชิงด้วยคอมพิวเตอร์

ปัญหาหลักที่นักออกแบบวงจรขยายในย่านความถี่สูงที่จะพบคือ การออกแบบส่วนของวงจรแมชชิง ซึ่งต้องใช้เวลาในการออกแบบเป็นอย่างมาก เพื่อที่จะให้ได้วงจรที่มีคุณสมบัติ (แบนด์วิธ, ฮาร์โมนิก, สัมประสิทธิ์การสะท้อนสัญญาณ ฯลฯ) ตามที่ต้องการ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการรวบรวมเนตเวิร์กที่ใช้ในการแมชชิงวงจรโทรคมนาคมทั่วไป ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในลักษณะของตารางที่แสดงค่ารีแอกแตนซ์ของอุปกรณ์ในเนตเวิร์กที่ค่า  $Q$  และโพลอิมพีแดนซ์ต่างๆ โดยมีข้อกำหนดของตารางเหล่านี้ว่าจะต้องมีพอร์ทหนึ่งของวงจรที่มีการเทอร์มิเนตด้วยค่าอิมพีแดนซ์เท่ากับ  $50 + j0$  โอห์ม แต่ถ้าผู้ออกแบบจำเป็นต้องเทอร์มิเนตทั้ง 2 พอร์ทของวงจรด้วยอิมพีแดนซ์ที่ไม่ใช่  $50 + j0$  โอห์มก็สามารถใช้สมการในตารางที่ 2 ในการหาค่าอุปกรณ์ของเนตเวิร์กแบบต่างๆ

เนตเวิร์กที่ใช้สำหรับการแมชชิงแสดงได้ 4 รูปแบบ โดยจะมีข้อจำกัดบางอย่างสำหรับเนตเวิร์กแต่ละแบบ คือค่าอุปกรณ์ที่กำหนดไว้แล้วจะไม่สามารถสร้างขึ้นได้สำหรับเนตเวิร์กที่เลือกใช้ รูปที่ 9, 10, 11 และ 12 แสดงถึงรูปแบบของเนตเวิร์กที่ใช้โดยตัวต้านทานและตัวเก็บประจุในกรอบสี่เหลี่ยมคือค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ที่ต้องการแมชกับอิมพีแดนซ์  $50 + j0$  โอห์ม ข้อจำกัดของเนตเวิร์กแต่ละแบบสรุปได้ดังนี้

**เนตเวิร์กเอ** ใช้ในกรณีที่ค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ที่ต่อซีรีส์ของอุปกรณ์ที่ต้องการแมชมีค่าต่ำกว่า 50 โอห์ม เท่านั้น

**เนตเวิร์กบี** มีข้อจำกัดคือถ้าค่าส่วนจริงของซีรีส์เคปแดนซ์ที่ต่อขนานของอุปกรณ์ ต่ำกว่า 50 โอห์มจะทำให้ค่าตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุมีค่าสูงและต่ำเกินไปตามลำดับ

**เนตเวิร์กซี** ใช้ในกรณีที่ค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ที่ต่อซีรีส์ของอุปกรณ์หรือค่าส่วนจริงของซีรีส์เคปแดนซ์ที่ต่อขนานของอุปกรณ์มีค่าต่ำกว่า 50 โอห์ม

**เนตเวิร์กดี** สามารถใช้ได้กับค่าส่วนจริงของอิมพีแดนซ์ที่ต่อซีรีส์ของอุปกรณ์ต่ำและสูงกว่า 50 โอห์ม

## APPENDIX I

To convert a parallel resistance and reactance combination to series:

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

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

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

$$X_{L1} = QR_1 + X_{Cout}$$

$$X_{C2} = AR_L$$

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

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

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

To solve network B:

1. Select a Q

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

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

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

To solve network C<sub>1</sub>:

1. Select a Q

$$X_{L1} = X_{Cout}$$

$$X_{C1} = QR_1$$

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

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

To solve network C<sub>2</sub>:

1. Select a Q

2. L<sub>1</sub> is not used in this network

$$X_{C1} = QR_1$$

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

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

To solve network D:

1. Select a Q

$$X_{L1} = (R_1 Q) \cdot X_{Cout}$$

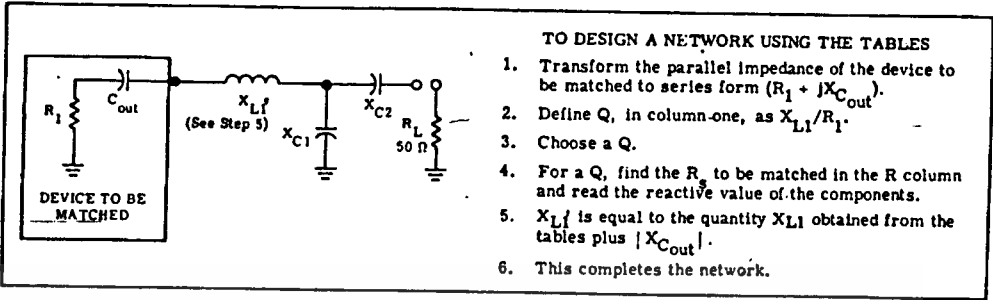
$$X_{L2} = R_L B$$

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

where A = R<sub>1</sub>(1 + Q<sup>2</sup>)

$$B = \sqrt{\left( \frac{A}{R_L} \right) - 1}$$

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 <sub>L1</sub>	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	R <sub>1</sub>
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

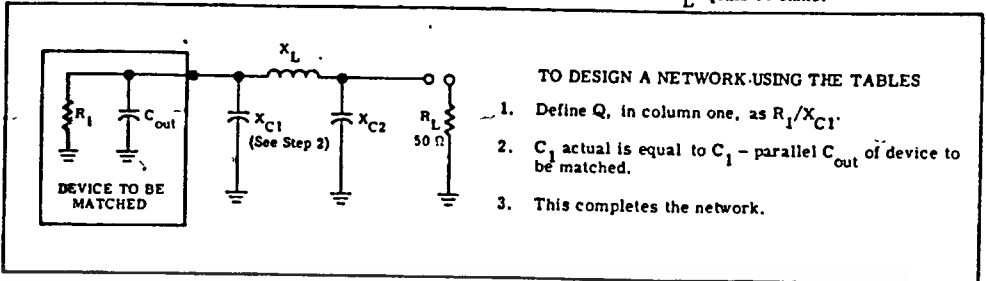
Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	R <sub>1</sub>
7	189	710	255	27
7	196	776	260	28
7	203	849	265	29
7	210	929	269	30
7	224	1117	278	32
7	238	1354	287	34
7	252	1661	296	36
7	266	2071	304	38
7	280	2649	312	40
7	294	3518	320	42
7	308	4971	328	44
7	322	7882	335	46
7	336	16626	343	48
8	8	8.7	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 <sub>L1</sub>	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	R <sub>1</sub>
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NETWORK B**

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



Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L</sub>	R <sub>1</sub>
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	85.6	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	30	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	28.08	75	7	17.86	11.47	28.4	125
2	112.5	150	105	225										

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L</sub>	R <sub>1</sub>
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	54.93	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	242.51	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
8	0.13	0.88	1	1	12	25	10.39	34.79	300	16	343.75	43.25	367.15	5500
8	3.13	4.4	7.45	25	12	33.33	12.08	44.52	400	16	375	46.8	398.49	6000
8	6.25	6.25	12.31	50	12	41.67	13.61	54.05	500	18	16.67	6.86	23.35	300
8	9.38	7.68	16.74	75	12	50	15.02	63.43	600	18	22.22	7.94	29.9	400
8	12.5	8.91	20.94	100	12	58.33	16.35	72.7	700	18	27.78	8.91	36.33	500
8	15.63	10	25	125	12	66.67	17.61	81.87	800	18	33.33	9.79	42.66	600
8	18.75	11	28.95	150	12	75	18.82	90.97	900	18	38.89	10.61	48.92	700
8	21.88	11.93	32.82	175	12	83.33	20	100	1000	18	44.44	11.38	55.13	800
8	25	12.8	36.63	200	12	100	22.27	117.89	1200	18	50	12.11	61.28	900
8	28.13	13.64	40.38	225	12	116.67	24.46	135.6	1400	18	55.56	12.8	67.4	1000
8	31.25	14.43	44.09	250	12	133.33	26.61	153.15	1600	18	66.67	14.12	79.54	1200
8	37.5	15.94	51.4	300	12	150	28.73	170.57	1800	18	77.78	15.35	91.57	1400
8	50	18.73	65.66	400	12	166.67	30.86	187.86	2000	18	88.89	16.52	103.51	1600
8	62.5	21.32	79.58	500	12	183.33	33	205.06	2200	18	100	17.65	115.38	1800
8	75	23.79	93.25	600	12	200	35.17	222.15	2400	18	111.11	18.73	127.2	2000
8	87.5	26.2	106.71	700	12	216.67	37.39	239.16	2600	18	122.22	19.79	138.95	2200
8	100	28.57	120	800	12	233.33	39.66	256.07	2800	18	133.33	20.81	150.66	2400
8	112.5	30.94	133.14	900	12	250	42.01	272.9	3000	18	144.44	21.82	162.33	2600
8	125	33.33	146.15	1000	12	291.67	48.3	314.64	3500	18	155.56	22.81	173.96	2800
8	150	38.25	171.82	1200	12	333.33	55.47	355.9	4000	18	166.67	23.79	185.55	3000
8	175	43.5	197.07	1400	12	375	63.96	396.67	4500	18	194.44	26.2	214.4	3500
8	200	49.24	221.92	1600	12	416.67	74.54	436.92	5000	18	222.22	28.57	243.08	4000
8	225	55.71	246.39	1800	12	458.33	88.64	476.57	5500	18	250	30.94	271.6	4500
8	250	63.25	270.48	2000	12	500	109.54	515.44	6000	18	277.78	33.33	300	5000
8	275	72.37	294.15	2200						18	305.56	35.76	328.27	5500
8	300	84.02	317.36	2400						18	333.33	38.25	356.44	6000
9	8.33	6.83	14.93	75	14	21.43	8.86	29.91	300	20	15	6.16	21.03	300
9	11.11	7.91	18.69	100	14	28.57	10.29	38.3	400	20	20	7.13	26.94	400
9	13.89	8.87	22.32	125	14	35.71	11.56	46.51	500	20	25	8	32.73	500
9	16.67	9.74	25.85	150	14	42.86	12.73	54.6	600	20	30	8.78	38.44	600
9	19.44	10.56	29.31	175	14	50	13.83	62.59	700	20	35	9.51	44.09	700
9	22.22	11.32	32.72	200	14	57.14	14.87	70.51	800	20	40	10.19	49.69	800
9	25	12.05	36.08	225	14	64.29	15.86	78.37	900	20	45	10.84	55.24	900
9	27.78	12.74	39.4	250	14	71.43	16.81	86.17	1000	20	50	11.46	60.76	1000
9	33.33	14.05	45.95	300	14	85.71	18.62	101.63	1200	20	60	12.62	71.71	1200
9	44.44	16.44	59.74	400	14	100	20.35	116.95	1400	20	70	13.7	82.57	1400
9	55.56	18.63	71.24	500	14	114.29	22.02	132.15	1600	20	80	14.72	93.35	1600
9	66.67	20.7	83.53	600	14	128.57	23.64	147.24	1800	20	90	15.7	104.07	1800
9	77.78	22.69	95.64	700	14	142.86	25.24	162.25	2000	20	100	16.64	114.73	2000
9	88.89	24.62	107.62	800	14	157.14	26.81	177.17	2200	20	110	17.55	125.35	2200
9	100	26.52	119.48	900	14	171.43	28.38	192.02	2400	20	120	18.44	135.93	2400
9	111.11	28.4	131.23	1000	14	185.71	29.94	206.81	2600	20	130	19.3	146.47	2600
9	133.33	32.16	154.46	1200	14	200	31.51	221.54	2800	20	140	20.14	156.98	2800
9	155.56	36	177.37	1400	14	214.29	33.09	236.21	3000	20	150	20.97	167.46	3000
9	177.78	40	200	1600	14	250	37.12	272.68	3500	20	175	22.99	193.54	3500
9	200	44.23	222.37	1800	14	285.71	41.34	308.82	4000	20	200	24.96	219.48	4000
9	222.22	48.8	244.5	2000	14	321.43	45.86	344.7	4500	20	225	26.9	245.3	4500
9	244.44	53.8	266.4	2200	14	357.14	50.77	380.33	5000	20	250	28.82	271.01	5000
9	266.67	59.41	288.05	2400	14	392.86	56.22	415.69	5500	20	275	30.74	296.62	5500
					14	428.57	62.42	450.79	6000	20	300	32.67	322.15	6000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**NETWORK C<sub>1</sub>**

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<sub>1</sub>.

**NETWORK C<sub>2</sub>**

**TO DESIGN A NETWORK USING THE TABLES**

1. L<sub>1</sub> 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 to be matched in the R<sub>1</sub> column and read the reactive value of the components.
5.  $X_{L2}'$  is equal to the quantity  $X_{L2}$  obtained from the tables plus  $jX_{Cout}$ .
6. This completes network C<sub>2</sub>.

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

Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L2</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L2</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L2</sub>	R <sub>1</sub>
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	99.97	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	186.92	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	295.02	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

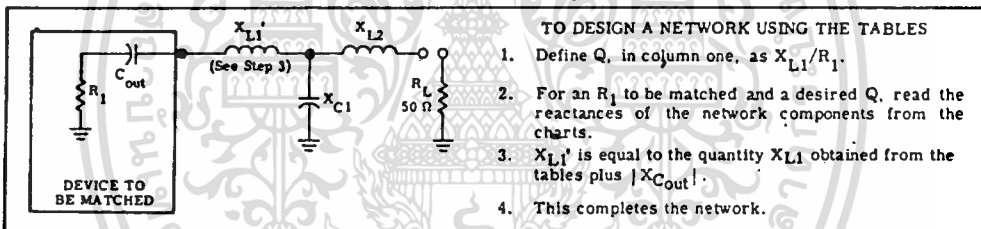
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L2</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L2</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>C1</sub>	X <sub>C2</sub>	X <sub>L2</sub>	R <sub>1</sub>
8	320	100	340	40	9	414	189.56	427.56	46	10	120	28.1	141.35	12
8	336	114.56	354.33	42	9	432	244.95	141.8	48	10	130	29.64	151.93	13
8	352	135.4	368.25	44	9	216	48.04	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	258.96	26	10	160	34.3	183.32	16
9	7.14	16	1	1	9	243	84.17	267.92	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	66.87	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	264.98	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	29.8	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	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

C<sub>1</sub>. Variable matching may also be accomplished by increasing X<sub>L2</sub> and adding an equal amount of X<sub>C</sub> in series in the form of a variable capacitor.



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

Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>
1	26	10	43.33	26	1	175	122.47	101.46	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	41.48	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	49	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	36.62	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	84.43	80	2	50	61.24	38.78	25	2	300	187.08	130.62	150
1	85	77.46	86.68	85	2	52	63.25	39.82	26	2	350	203.1	144.34	175
1	90	80.62	88.9	90	2	54	65.19	40.86	27	2	400	217.84	157.28	200
1	95	83.67	91.07	95	2	56	67.08	41.9	28	2	450	231.94	169.51	225
1	100	86.6	93.21	100	2	58	68.92	42.92	29	2	500	244.95	181.19	250
1	125	100	83.33	125	2	60	70.71	43.93	30	2	550	257.39	192.37	275
1	150	111.8	92.71	150	2	64	74.16	45.93	32	2	600	269.26	203.11	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>
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	8	4	116	148.83	70.67	29	5	750	438.75	283.12	150
3	24	38.73	21.19	9	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	12	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	156	158.11	89.25	55	5	30	72.8	24.16	6	6	174	226.16	101.96	29
3	162	165.83	94.99	60	5	35	81.24	27.47	7	6	180	230.22	104.67	30
3	168	173.21	100.56	65	5	40	88.88	30.69	8	6	192	238.12	110.01	32
3	174	180.28	105.97	70	5	45	95.92	33.82	9	6	204	245.76	115.25	34
3	180	187.08	111.25	75	5	50	102.47	36.88	10	6	216	253.18	120.39	36
3	186	193.65	116.4	80	5	55	108.63	39.87	11	6	228	260.38	125.45	38
3	192	200	121.43	85	5	60	114.46	42.8	12	6	240	267.39	130.42	40
3	198	206.16	126.35	90	5	65	120	45.68	13	6	252	274.23	135.31	42
3	204	212.13	131.17	95	5	70	125.3	48.49	14	6	264	280.89	140.13	44
3	210	217.94	135.89	100	5	75	130.38	51.26	15	6	276	287.4	144.88	46
3	216	224.95	158.25	125	5	80	135.28	53.99	16	6	288	293.77	149.55	48
3	222	269.26	178.89	150	5	85	140	56.67	17	6	300	300	154.17	50
3	228	291.55	198.17	175	5	90	144.57	59.31	18	6	330	315.04	165.44	55
3	234	312.25	216.33	200	5	95	149	61.91	19	6	360	329.39	176.36	60
3	240	331.66	233.57	225	5	100	153.3	64.47	20	6	390	343.15	186.97	65
3	246	350	250	250	5	105	157.48	67	21	6	420	356.37	197.3	70
3	252	367.42	265.74	275	5	110	161.55	69.49	22	6	450	369.12	207.36	75
3	258	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	750	478.28	297.13	125
4	32	65.57	25.6	8	5	145	187.62	86.15	29	6	900	524.4	336.61	150
4	36	71.76	28.15	9	5	150	191.05	88.43	30	6	1050	566.79	373.5	175
4	40	77.46	30.64	10	5	160	197.74	92.91	32	6	1200	606.22	408.29	200
4	44	82.76	33.07	11	5	170	204.21	97.31	34	6	1350	643.23	441.3	225
4	48	87.75	35.45	12	5	180	210.48	101.63	36	6	1500	678.23	472.79	250
4	52	92.47	37.78	13	5	190	216.56	105.88	38	6	1650	711.51	502.96	275
4	56	96.95	40.07	14	5	200	222.49	110.06	40	6	1800	743.3	531.96	300
4	60	101.24	42.32	15	5	210	228.25	114.17	42	7	14	50	12.5	2
4	64	105.36	44.54	16	5	220	233.88	118.21	44	7	21	70.71	17.83	3
4	68	109.32	46.72	17	5	230	239.37	122.2	46	7	28	86.6	22.9	4
4	72	113.14	48.86	18	5	240	244.74	126.13	48	7	35	100	27.78	5
4	76	116.83	50.97	19	5	250	250	130	50	7	42	111.8	32.48	6
4	80	120.42	53.06	20	5	275	262.68	139.46	55	7	49	122.47	37.04	7
4	84	123.9	55.11	21	5	300	274.77	148.64	60	7	56	132.29	41.47	8
4	88	127.28	57.14	22	5	325	286.36	157.54	65	7	63	141.42	45.79	9
4	92	130.58	59.14	23	5	350	297.49	166.21	70	7	70	150	50	10
4	96	133.79	61.12	24	5	375	308.22	174.66	75	7	77	158.11	54.12	11
4	100	136.93	63.07	25	5	400	318.59	182.91	80	7	84	165.83	58.16	12
4	104	140	65	26	5	425	328.63	190.97	85	7	91	173.21	62.12	13
4	108	143	66.91	27	5	450	338.38	198.85	90	7	98	180.28	66	14
					5	475	347.85	206.57	95	7	105	187.08	69.82	15
					5	500	357.07	214.14	100	7	112	193.65	73.58	16

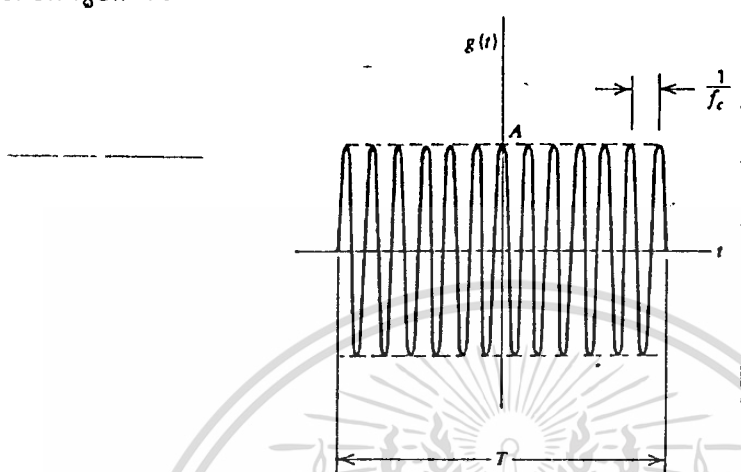
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>	Q	X <sub>L1</sub>	X <sub>L2</sub>	X <sub>C1</sub>	R <sub>1</sub>
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	385	367.42	191.66	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	216.67	65	8	2200	944.06	664.98	275	10	130	251.3	87.38	13
7	490	415.33	228.68	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	251.78	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	510.21	305.28	105	9	63	161.86	46.91	7	10	210	321.79	129.05	21
7	770	522.93	315.47	110	9	72	174.07	52.56	8	10	220	329.55	133.93	22
7	805	535.65	325.56	115	9	81	185.47	58.07	9	10	230	337.12	138.75	23
7	840	548.37	335.55	120	9	90	196.21	63.45	10	10	240	344.53	143.51	24
7	875	561.09	345.44	125	9	99	206.4	68.71	11	10	250	351.78	148.22	25
7	910	573.81	355.41	130	9	108	216.1	73.86	12	10	260	358.89	152.87	26
7	945	586.53	365.38	135	9	117	225.39	78.92	13	10	270	365.86	157.47	27
7	980	599.25	375.35	140	9	126	234.31	83.88	14	10	280	372.69	162.03	28
7	1015	611.97	385.32	145	9	135	242.9	88.76	15	10	290	379.41	166.53	29
7	1050	624.69	395.29	150	9	144	251.2	93.55	16	10	300	386.01	170.99	30
7	1085	637.41	405.26	155	9	153	259.23	98.29	17	10	320	398.87	179.78	32
7	1120	650.13	415.23	160	9	162	267.02	102.93	18	10	340	411.34	188.4	34
7	1155	662.85	425.2	165	9	171	274.59	107.51	19	10	360	423.44	196.87	36
7	1190	675.57	435.17	170	9	180	281.96	112.03	20	10	380	435.2	205.2	38
7	1225	688.29	445.14	175	9	189	289.14	116.49	21	10	400	446.65	213.38	40
7	1260	701.01	455.11	180	9	198	296.14	120.89	22	10	420	457.82	221.44	42
7	1295	713.73	465.08	185	9	207	302.99	125.23	23	10	440	468.72	229.37	44
7	1330	726.45	475.05	190	9	216	309.68	129.53	24	10	460	479.37	237.19	46
7	1365	739.17	485.02	195	9	225	316.23	133.77	25	10	480	489.8	244.9	48
7	1400	751.89	495.0	200	9	234	322.65	137.97	26	10	500	500	252.5	50
7	1435	764.61	504.97	205	9	243	328.94	142.12	27	10	550	524.64	271.07	55
7	1470	777.33	514.94	210	9	252	335.11	146.22	28	10	600	548.18	289.07	60
7	1505	790.05	524.91	215	9	261	341.17	150.28	29	10	650	570.75	306.56	65
7	1540	802.77	534.88	220	9	270	347.13	154.3	30	10	700	592.45	323.58	70
7	1575	815.49	544.85	225	9	288	358.75	162.23	32	10	750	613.39	340.18	75
7	1610	828.21	554.82	230	9	306	370	170	34	10	800	633.64	356.37	80
7	1645	840.93	564.79	235	9	324	380.92	177.63	36	10	850	653.26	372.21	85
7	1680	853.65	574.76	240	9	342	391.54	185.14	38	10	900	672.31	387.7	90
7	1715	866.37	584.73	245	9	360	401.87	192.52	40	10	950	690.83	402.87	95
7	1750	879.09	594.7	250	9	378	411.95	199.78	42	10	1000	708.87	417.74	100
7	1785	891.81	604.67	255	9	396	421.78	206.93	44	10	1250	782.94	488.23	125
7	1820	904.53	614.64	260	9	414	431.39	213.98	46	10	1500	868.91	553.36	150
7	1855	917.25	624.61	265	9	432	440.79	220.93	48	10	1750	938.75	614.25	175
7	1890	930.0	634.58	270	9	450	450	227.78	50	10	2000	1003.74	671.66	200
7	1925	942.72	644.55	275	9	495	472.23	244.52	55	10	2250	1064.78	726.14	225
7	1960	955.44	654.52	280	9	540	493.46	260.74	60	10	2500	1122.5	778.12	250
7	1995	968.16	664.49	285	9	585	513.81	276.51	65	10	2750	1177.39	827.02	275
7	2030	980.88	674.46	290	9	630	533.39	291.85	70	10	3000	1229.64	875.8	300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 วงจรมอดูเลเตอร์

มอดูเลเตอร์ (modulator) เป็นวงจรซึ่งทำหน้าที่ผสมสัญญาณความถี่วิทยุกับสัญญาณพัลส์ที่ถูกบิดแปรตามให้มีลักษณะตามต้องการ เช่น เป็นรูปเหลี่ยม, เกาส์เซียน (gaussian), เรสโคไซน์ (raise cosine) เป็นต้น สำหรับโครงการงานนี้จะใช้สัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยม เพื่อจะได้สัญญาณที่มีลักษณะดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 สัญญาณที่ถูกมอดูเลตโดยพัลส์รูปเหลี่ยมที่ไม่เป็นคาบ

ถ้าให้สัญญาณคลื่นพาห้ (สัญญาณความถี่วิทยุ) เป็น  $\cos(\omega_c t)$  สัญญาณในรูปที่ 13 จะเขียนได้ว่า

$$g(t) = A \cdot \text{rec}(1/T) \cdot \cos(\omega_c t) \quad (1)$$

โดยฟังก์ชันรูปเหลี่ยมนิยามโดย

$$\begin{aligned} \text{rec}(t) &= 1 & , & -1/2 < t < 1/2 \\ &= 0 & , & |t| > 1/2 \end{aligned} \quad (2)$$

ในรูปที่ 14 เราแสดงฟังก์ชันรูปเหลี่ยมเป็น

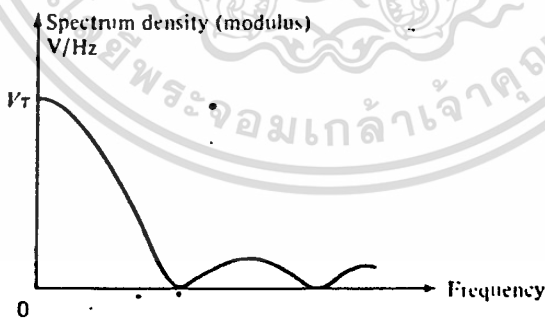
$$g(t) = A \cdot \text{rec}(t/T) \quad (3)$$

เอกสารนี้เป็นเมื่อใช้ยูริเวอร์ทวอนพร้อมกับการ(3) จะได้ว่าท่านนั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 G(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} A' \text{rec}(t/T) \cdot \exp(-j\omega t) dt \\
 &= \int_{-T/2}^{T/2} A' \exp(-j\omega t) dt \\
 &= A'T' \sin(\pi f T) / \pi f T \\
 &= A'T' \text{sinc}(\pi f T) \quad (4)
 \end{aligned}$$

ในรูปที่ 15 แสดงสเปกตรัมของสัญญาณ  $g(t)$  ตามสมการ(4)

รูปที่ 14 สัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมที่ใหม่เป็นคาบ



รูปที่ 15 แอมพลิจูดสเปกตรัมของพัลส์รูปเหลี่ยมที่ใหม่เป็นคาบ

สำหรับของสเปกตรัมสัญญาณที่ถูกมอดูเลตในรูปที่ 13 ทำได้โดยใช้ฟูเรียร์ทรานฟอร์มกับสมการที่ 1 ที่พิจารณาโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับอาจารย์ภาควิชาการศึกษาคอมพิวเตอร์ ภาควิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไปอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

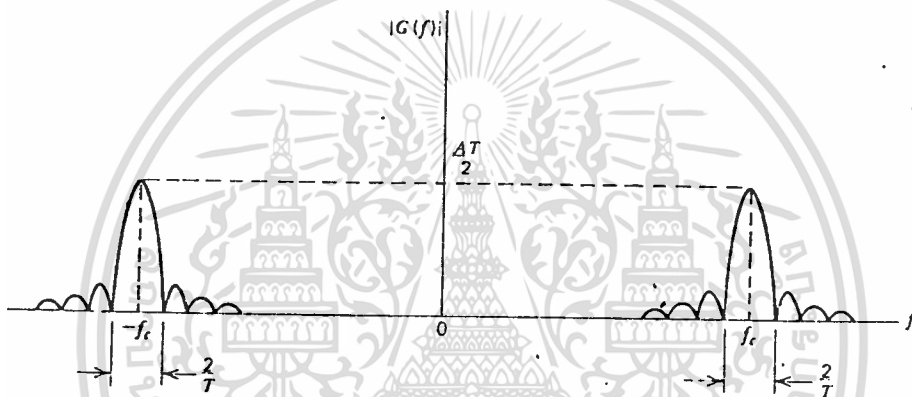
และอาศัยคุณสมบัติการเลื่อนความถี่

$$\exp(jw_c t) \cdot g(t) \rightleftharpoons G(w - w_c)$$

จะได้ฟูเรียร์ทรานฟอร์มของสมการที่ 1 เป็น

$$G(f) = (A \cdot T/2) \cdot [ \text{sinc}[\pi f T - w_c] + \text{sinc}[\pi f T + w_c] ] \quad (5)$$

แอมพลิจูดสเปกตรัมของ(5) แสดงดังรูปที่ 16

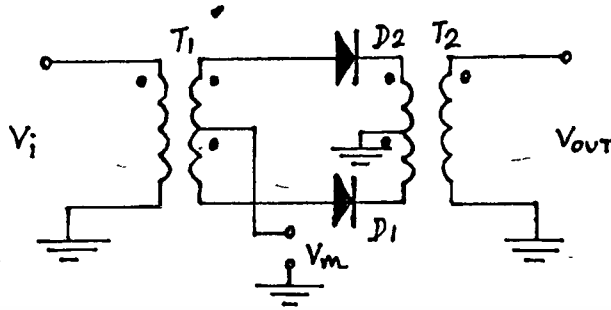


รูปที่ 16 สเปกตรัมของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมที่ไม่เป็นคาบ

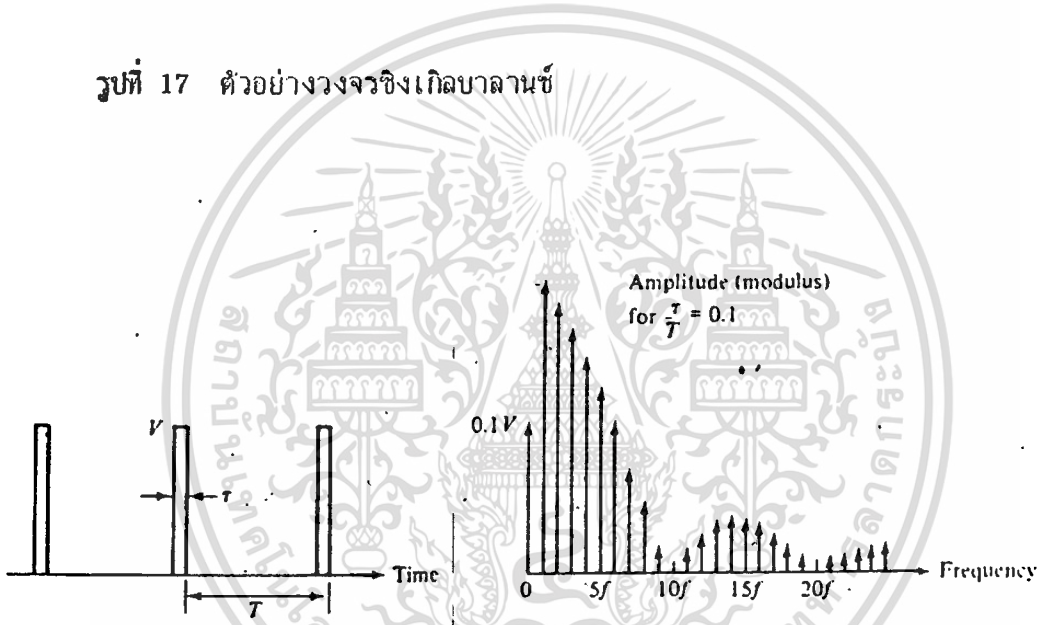
จากรูปที่ 16 จะเห็นว่าสัญญาณที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณพัลส์รูปเหลี่ยมเป็นลักษณะของสัญญาณแบบดับเบิลไซด์แบนด์ซึบเพรสแคเรีย ( double-sideband suppressed carrier ) วงจรที่ใช้สร้างสัญญาณแบบนี้ ( สมการที่ 1 ) จะเป็นลักษณะของวงจรคูณ โดยจะต้องมีคุณสมบัติคือมีความเร็วในการตอบสนองสัญญาณรูปเหลี่ยมพอ , อินพุตทางสัญญาณพัลส์จะต้องรับส่วนประกอบที่เป็นสี่เหลี่ยมได้ จากคุณสมบัติที่กล่าวมาเราสามารถไขมอดูเลเตอร์ที่ประกอบด้วยไดโอดและทราน - พอร์เมอร์ ดังแสดงได้ดังรูปที่ 17 ( ในกรณีที่ต้องการทำให้ได้สัญญาณพัลส์ที่มีเฟสทั้งบวกและลบ ( ต่างกัน 180 องศา ) จะต้องอาศัยวงจรคูณที่ทำงานอย่างน้อยสองควอดรันท์, รูปที่ 19 )

สัญญาณความถี่วิทยุจะป้อนเข้าที่ขดไฟไหมารี T1 และ เอาท์พุทของสัญญาณที่ถูกมอดูเลตจะอยู่ที่ขดเซคคันดารี T2 โดยที่ T1 และ T2 เป็นหม้อแปลงช่วงความถี่กว้าง สัญญาณความถี่วิทยุที่ป้อนจะต้องมีขนาดเล็ก เพื่อที่จะไม่ให้ D1, D2 ทำงานได้เอง ส่วน Vm จะเป็นสัญญาณพัลส์ที่นำ

มามอดูลเลขจะต้องมีขนาดใหญ่มากพอที่จะทำให้ D1, D2 ทำงานเป็นสวิตช์ ถ้าให้อินพุต  $V_m$  เป็นสัญญาณที่มีมอดูลเลขกับสัญญาณความถี่วิทยุเป็นสัญญาณพัลส์ที่เป็นคาบ  $P(t)$  ดังแสดงในรูปที่ 18



รูปที่ 17 ตัวอย่างวงจรซิงเกิลบาลานซ์



รูปที่ 18 สัญญาณพัลส์ที่เป็นคาบและสเปกตรัมของสัญญาณ

สัญญาณในรูปที่ 18 สามารถเขียนในรูปของอนุกรมฟูเรียร์ได้คือ

$$P(t) = Vt/T + (2 \cdot Vt/T) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n \cdot x) \cdot \cos(n \cdot \omega \cdot t) / (n \cdot x) \quad (6)$$

โดยที่  $x = \pi \cdot t/T$

ถ้าให้ T1, T2 มีจำนวนรอบ 1:1 และ D1, D2 ไม่มีความต้านทานขณะนำกระแสก็จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่อาคารเรียนของคณะฯ ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

เอาที่พู่ที่ T2 คือ  $V_o = P(t) \cdot V_i$  (7)

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

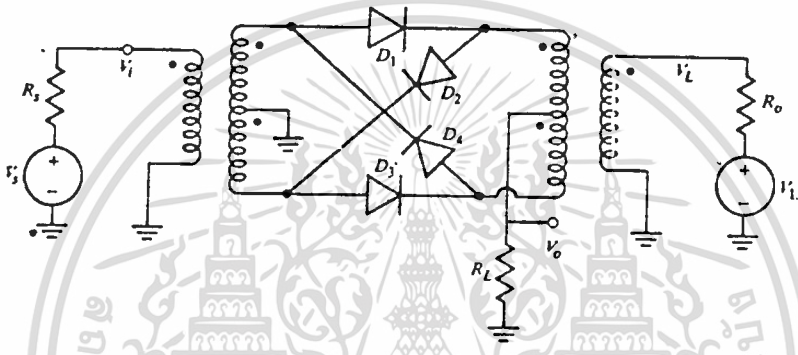
ถ้าให้  $V_i$  ในสมการที่ 7 คือคลื่นพาร์  $V_i = V' \cos(\omega_c \cdot t)$  จะได้สเปกตรัมของ

สัญญาณเอาท์พุทคือ

$$V_o(t) = V_t' \cos(\omega_c \cdot t) / T + (V_t / T) \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \sin(n \cdot x) / (n \cdot x) \cdot [\cos((\omega_c - \omega) \cdot t) + \cos((\omega_c + \omega) \cdot t)]$$

(8)

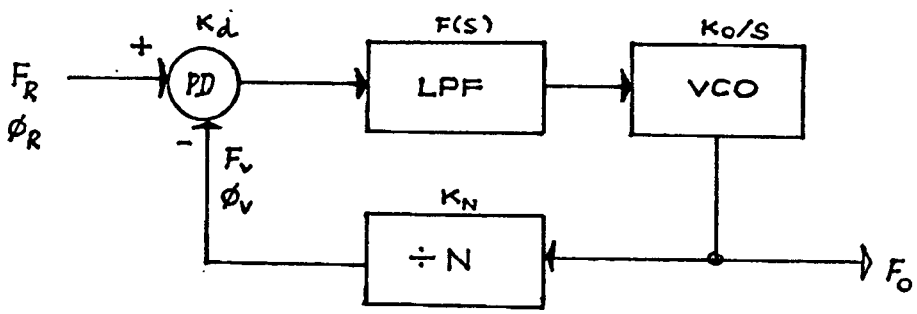
โดยที่  $x = \pi \cdot t / T$



รูปที่ 19 ตัวอย่างวงจรที่ทำงานได้สี่ควอเตอร์

3.7 การสังเคราะห์ความถี่โดยระบบเฟสล็อก

การสังเคราะห์ความถี่โดยระบบเฟสล็อก เป็นวิธีสังเคราะห์ความถี่แบบทางอ้อม (indirect; coherent synthesis) โดยระบบมีลักษณะดังรูปที่ 20

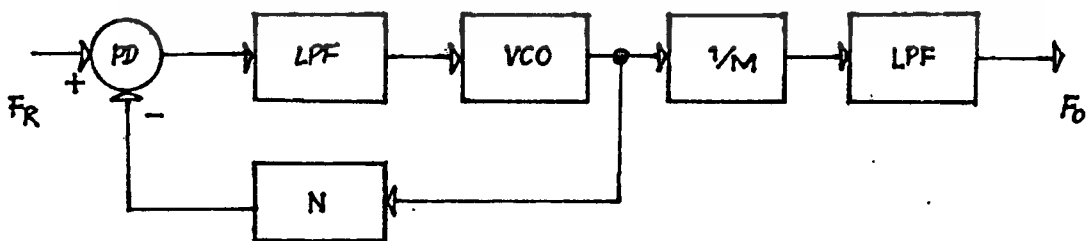


รูปที่ 20 บล็อกไดอะแกรมของระบบสังเคราะห์ความถี่ด้วยเฟสล็อก

ระบบนี้ทำงานโดยการเปรียบเทียบเฟสของความถี่อ้างอิงมาตรฐาน ( $f_R$ ) ซึ่งอาจเป็น วงจรคริสตัลออสซิลเลเตอร์แบบควบคุมอุณหภูมิ ( temperature controlled crystal oscillator, TCXO ) หรือในกรณีที่เป็นอุปกรณ์ที่มีคุณภาพสูงอาจจะใช้ซีเซียม(cesium)หรือ รูบิเดียม(rubidium) กับเฟสของความถี่ที่นำมาบ่อนกลับ( $f_V$ )ซึ่งเป็นความถี่ของวงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยแรงดัน( voltage controlled oscillator, VCO )ที่ถูกหารลงด้วยตัว หารค่า  $N$  ผลต่างของการเปรียบเทียบเฟส( บางระบบอาจทำการเปรียบเทียบความถี่ด้วย ) หลังจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน จะเป็นแรงดันที่มีค่าแปรผันตรงกับค่าความต่างเฟสของ  $f_R$  และ  $f_V$  โดยแรงดันมีทิศทางการควบคุมวงจร VCO ให้ความต่างเฟสของ  $f_R$  และ  $f_V$  มีค่า ค่าสุด ซึ่งจะทำการวงจร VCO หารความถี่  $N$  เท่าของความถี่  $f_R$  ดังนั้นเอาต์พุตของระบบ จะเป็น

$$f_{OUT} = N \cdot f_{REF} \quad (9)$$

วงจรสังเคราะห์ความถี่ซึ่งใช้ในโครงงานนี้จะต้องมีขนาดความถี่ซึ่งเปลี่ยนแปลงเมื่อเปลี่ยน ตัวหาร ค่า หรือมีรีโซลูชันสูง เมื่อพิจารณาสมการที่ 9 จะเห็นว่าสามารถทำได้ง่ายโดยให้  $f_R$  มีค่าต่ำ แต่ในความจริงแล้ววิธีนี้จะทำให้ระบบเฟสล็อกมีปัญหาความถี่สูงมาก การสร้างระบบ สังเคราะห์ความถี่แบบที่มีความละเอียดสูงอย่างง่ายและมีคุณสมบัติดี ทำได้โดยให้วงจร VCO หารความถี่สูงกว่าความถี่ใช้งาน  $M$  เท่า แล้วหารความถี่นั้นลงมาด้วยค่า  $M$  ซึ่งจะทำให้ได้ความกว้างของช่องความถี่เป็น  $f_{REF}/M$  [5]



รูปที่ 21 บล็อกไดอะแกรมของระบบสังเคราะห์ความถี่แบบความละเอียดสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 21 ถ้าให้  $f_R$  มีขนาด 4 กิโลเฮิรซ์ และ  $M$  เท่ากับ 20 เราจะได้ช่องกว้างของความถี่เป็น 200 กิโลเฮิรซ์

สมมติว่าระบบในรูปที่ 20 เป็นแบบเชิงเส้น เราสามารถเขียนทราานเฟอ์ฟังก์ชันของระบบได้เป็น

$$\frac{\phi_V}{\phi_R} = H(s) = \frac{K_o \cdot K_d \cdot F(s)}{s + K_o \cdot K_d \cdot F(s)} \quad (10)$$

$K_n$

ระบบในสมการที่ 10 เป็นแบบที่ 2 [6] และอันดับของระบบจะขึ้นอยู่กับทราานเฟอ์ฟังก์ชันของวงจรวง โดยที่ VCO จะทำหน้าที่เป็นอินทิเกรเตอร์โดยสมบูณ์ [7]

ส่วนประกอบของระบบส่งความถี่

จากรูปที่ 20 ระบบส่งความถี่จะประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐานโดยจะแยกอธิบายดังนี้

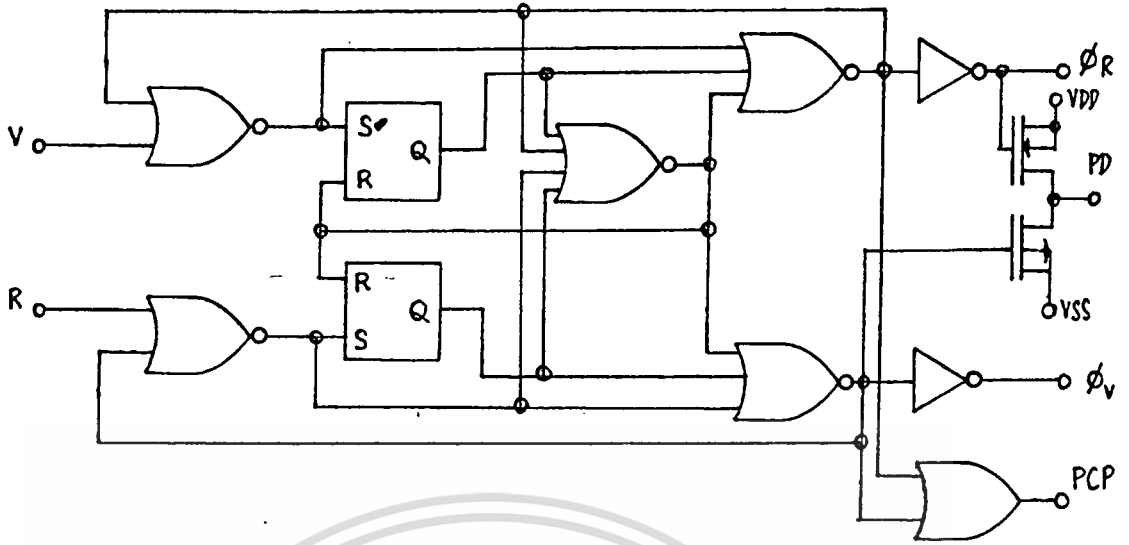
เฟสดีเทกเตอร์

เฟสดีเทกเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็นเฟส-ฟรีควเอนซีดีเทกเตอร์ (แบบที่ 4) [8] โดยวงจรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 22 โดยมีเอาท์พุท 3 แบบคือ แบบดับเบิลเอนด์ ( $\phi_R, \phi_V$ ), ไทวสเตท (PD) และแบบเฟสล็อกเอาท์พุท (PCP) รูปคลื่นของแต่ละขาแสดงได้ดังรูปที่ 23

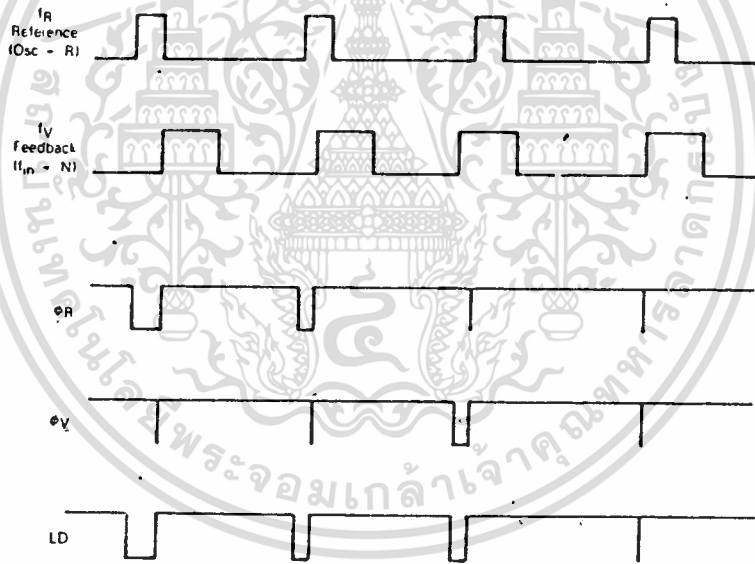
- ดับเบิลเอนด์เอาท์พุท ถ้า  $f_V$  มีความถี่สูงกว่า  $f_R$  หรือเฟสของ  $f_V$  นำหน้า  $f_R$  ขา  $\phi_V$  จะเป็น "0" นานเท่ากับเวลาที่นำหน้าอยู่ และ  $\phi_R$  จะเป็น "1" ตลอด, ถ้า  $f_R$  มีความถี่สูงกว่า  $f_V$  หรือเฟสของ  $f_R$  นำหน้า  $f_V$  ขา  $\phi_R$  จะเป็น "0" นานเท่ากับเวลาที่นำหน้าอยู่ และ  $\phi_R$  จะเป็น "1" ตลอด และถ้าความถี่และเฟสของ  $f_R$  เท่ากับ  $f_V$  ขา  $\phi_R, \phi_V$  จะเป็น "1" ตลอด ยกเว้นช่วงเวลาที่เฟสของทั้งสองสัญญาณเข้าใกล้กัน จะเกิดลักษณะของสไปค์

- ไทวสเตทเอาท์พุท PD ถ้าความถี่  $f_V$  มากกว่า  $f_R$  หรือเฟสของ  $f_V$  นำหน้า  $f_R$  จะให้เอาท์พุทเป็นพัลส์ลบ ( Q2 ในรูป 3 นำกระแส ), ถ้าความถี่  $f_V$  น้อยกว่า  $f_R$  หรือเฟสของ  $f_V$  ล้าหลัง  $f_R$  จะให้เอาท์พุทเป็นพัลส์บวก ( Q1 ในรูป 22 นำกระแส ) และถ้าความถี่  $f_R$  เท่ากับ  $f_V$  และมีเฟสตรงกัน เอาท์พุทจะมีสถานะอิมพีแดนซ์สูง ( Q1, Q2 ไม่นำกระแส )

เอกสารนี้เป็น **เฟสล็อกเอาท์พุท** จะเป็น "0" ทุกครั้งที่เกิดความถี่และเฟสของ  $f_V$  และ  $f_R$  ไม่เท่ากัน  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 22 วงจรเฟสล็อกเกอร์แบบที่ 4 ชนิดทวีคูณความถี่ของฟิลลซ



NOTE. The PD output state is approximately equal to either VDD or VSS when active. When not active, the output is high impedance and the voltage at that pin is determined by the low pass filter capacitor.

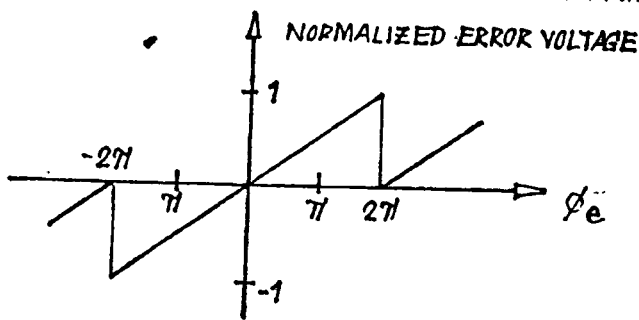
รูปที่ 23 แสดงรูปคลื่นของวงจรเฟส-ฟรีควีนซีตีเทคเตอร์ (เฟสดีเทคเตอร์แบบที่ 4)

เอาท์พุทของวงจรเฟสดีเทคเตอร์จะแปรผันตามความต่างเฟสของอินพุททั้งสองโดย

$$V_d = K_d \cdot (\phi_R - \phi_V) \tag{11}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

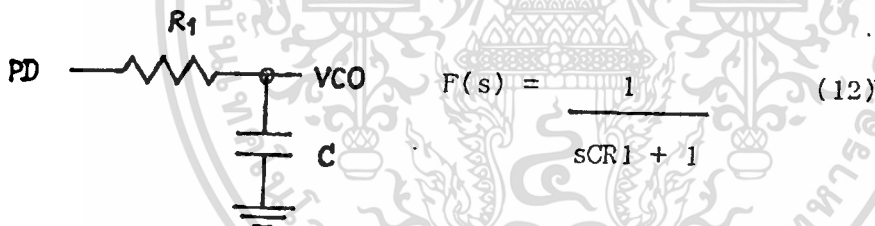
เมื่อ  $K_d$  เป็นเกนแฟคเตอร์ มีหน่วยเป็น วัตต์/เวเดียน โดยจะมีค่าเท่ากับ  $V_{DD}/4T$  เมื่อใช้เอาท์พุท PD และ  $V_{DD}/2T$  เมื่อใช้เอาท์พุทดับเบิลเอนด์ ความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ของ  $f_V$  และ  $f_R$  และ  $V_d$  ซึ่งผ่านวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน แสดงได้ดังรูปที่ 24



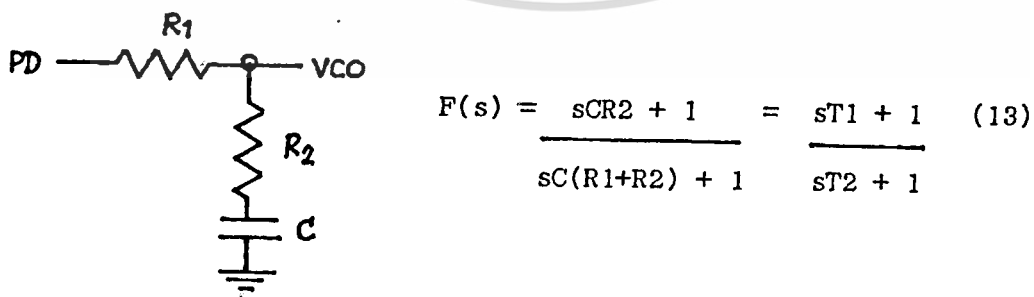
รูปที่ 24 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุทและเอาท์พุทของเฟสดีเทกเตอร์ในรูปที่ 22

**ลูบฟิลเตอร์**

ลูบฟิลเตอร์ในระบบส่งเคราะห์ความถี่จะเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางไดนามิกของระบบ ซึ่งวงจรกรองที่ใช้โดยทั่วไปมีลักษณะดังรูปที่ 25



ก.



ข.

$$H(s) = \frac{K_o \cdot K_d / (N \cdot T_2) (1 + sT_2)}{s^2 + s(T_2 \cdot K_o \cdot K_d / (T_1 \cdot N) + K_o \cdot K_d / (T_1 \cdot N))} \quad (17)$$

ในลักษณะนอมาไลซ์ จะให้ความถี่ธรรมชาติ ( $\omega_n$ ) และแคมป์อิงแฟคเตอร์ ( $\zeta$ ) ดังสมการ

$$\omega_n = [K_o \cdot K_d / (T_1 \cdot N)]^{1/2} \quad (18)$$

$$\zeta = (T_2/2) \cdot [K_o \cdot K_d / (T_1 \cdot N)]^{1/2} \quad (19)$$

โดยในการออกแบบ พารามิเตอร์  $\omega_n$  และ  $\zeta$  จะถูกกำหนดไว้ก่อน ดังนั้นการออกแบบจะเริ่มจากค่า  $T_1$  และ  $T_2$  , จากการแก้สมการ (18), (19) ให้อยู่ในรูปของ  $T_1, T_2$  จะได้

$$T_1 = K_o \cdot K_d / (N \cdot \omega_n)^2 \quad (20)$$

$$T_2 = 2 \cdot \zeta / \omega_n \quad (21)$$

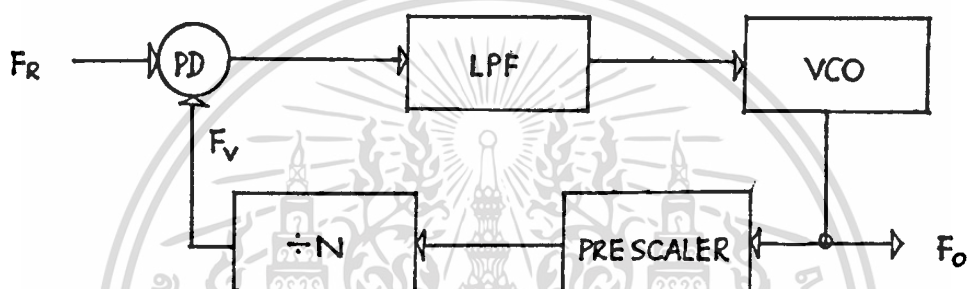
### 3.8 วงจรหารความถี่ [9]

วงจรหารความถี่ในระบบส่งเคราะห์ความถี่จะเป็นตัวกำหนดความถี่ของ VCO (เมื่อลูบอยู่ในสภาวะลอค) วงจรหารที่เป็นแบบซิงโครนัสจะสามารถเปลี่ยนตัวหารได้อย่างอิสระ และส่วนใหญ่จะเป็นวงจรรวมแบบซิมอส ซึ่งมีความถี่ในการทำงานสูงสุดประมาณ 15 เมกกะเฮิรซ์

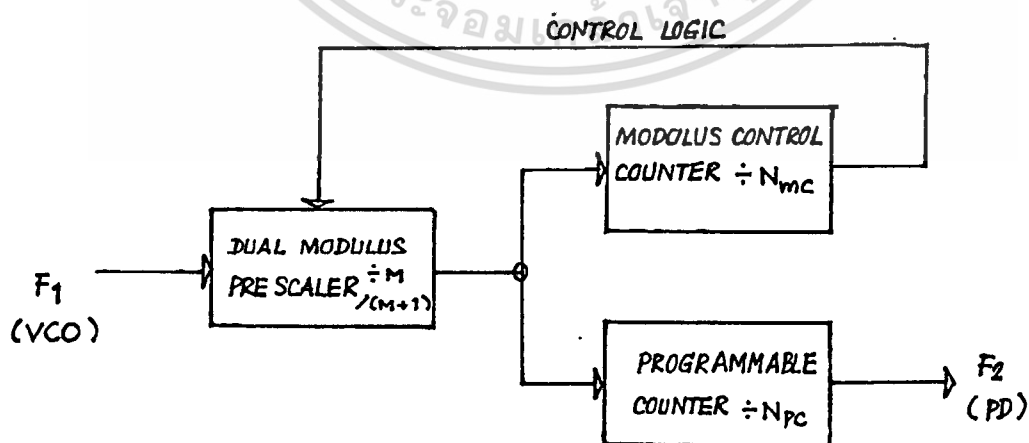
ในโครงงานนี้ VCO จะทำงานที่ความถี่ VHF ประมาณ (175 - 250 MHz) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวงจรหารที่สามารถทำงานที่ความถี่ของ VCO มาทำหน้าที่ปรีสเกล ดังแสดงในรูปที่ 27 ถ้าให้ตัวหารปรีสเกลมีค่าเป็น  $M$  ดังนั้นความถี่ของ VCO จะเป็น

$$f_o = M \cdot f_{REF} \cdot N \quad (22)$$

นี้ทำได้โดยใช้ตัวหารความถี่ปริสเกลแบบมอดูลัส ( dual-modulus ) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2 โดยจะมีตัวหารสองค่าคือ  $M+1$  และ  $M$  ( เช่น  $11/10, 33/32, 65/64$  ) จากรูปที่ 2  $N_{mc}$  และ  $N_{pc}$  จะเป็นตัวหารชนิดนับลง การทำงานของตัวหารชนิดนี้อธิบายได้ดังนี้ เริ่มแรกวงจรจะหารความถี่จาก VCO ( $f_1$ ) ด้วยค่า  $M+1$  และเอาที่พ่วงจะป้อนให้ทั้งตัวหาร  $N_{mc}$  และ  $N_{pc}$  เมื่อ  $N_{mc}$  นับลงถึงศูนย์ก็จะให้สัญญาณควบคุมเปลี่ยนตัวหารปริสเกลเป็น  $M$  จนกระทั่ง  $N_{pc}$  นับลงจนถึงศูนย์ก็จะให้สัญญาณ  $f_2$  หนึ่งพัลซ์ จากนั้นวงจรปริสเกลก็จะรีเซ็ตตัวเองไปหาร  $M+1$  และทำงานซ้ำเหมือนกับการที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 27 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรีเซ็ตความถี่โดยอาศัยการปริสเกล



รูปที่ 28 วิธีการความถี่แบบมอดูลัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้  $T_1$  เป็นเวลาที่อุณหภูมิต่ำในการนับรอบแรก  $(M+1)$  โดยเมื่อครบเวลา  $T_1$  ตัวหารใน  $N_{pc}$  จะลดลงไปเท่ากับ  $N_{mc}$  และตัวหารใน  $N_{pc}$  จะเหลืออยู่เท่ากับ  $N_{pc}-N_{mc}$  จะได้สมการของ  $T_1$  เป็น

$$T_1 = (M+1) \cdot N_{mc} / f_1 \quad (23)$$

ส่วน  $T_2$  เป็นเวลาที่  $N_{pc}$  นับต่อมา (ปรับสเกลเปลี่ยนค่าตัวหารเป็น  $M$ ) จนกระทั่งได้เอาที่พบ  $f_2$  หนึ่งพัลส์ จะได้สมการของ  $T_2$  เป็น

$$T_2 = M \cdot (N_{pc} - N_{mc}) / f_1 \quad (24)$$

และ  $f = 1/T$  ดังนั้น  $f_2 = 1/(T_1+T_2)$

$$= \frac{f_1}{(M+1) \cdot N_{mc} + M \cdot (N_{pc} - N_{mc})}$$

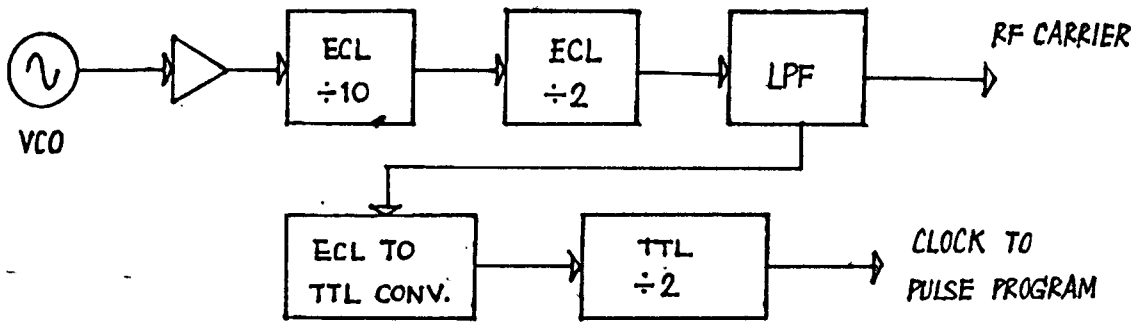
$$= \frac{f_1}{(M \cdot N_{pc} + N_{mc})} \quad (25)$$

ในการพิจารณาสังเคราะห์ความถี่  $f_1 = f_{vco} = (M \cdot N_{pc} + N_{mc}) \cdot f_2$  โดย  $f_2 = f_{REF}$  จะเห็นว่าการเปลี่ยน  $N_{mc}$  และ  $N_{pc}$  จะเท่ากับการเปลี่ยนความถี่ของ VCO ซึ่งความกว้างของแต่ละช่องความถี่เท่ากับ  $f_{REF}$  อุณหภูมิต่ำจะเป็นวงจรรวมชนิด ECL , สำหรับ  $N_{pc}$  และ  $N_{mc}$  อาจเป็นวงจรรวมชนิด TTL หรือ CMOS สำหรับโครงงานนี้ใช้วงจรรวม LSI ชนิด CMOS โดยวงจรรวมภายในประกอบด้วยวงจรมัลติเพล็กซ์ (  $N_{pc}$  ) , วงจรนับควบคุมไมโครสแต็ป (  $N_{mc}$  ) และเฟสดีเทคเตอร์ เบอร์ MC145152-2

### 3.9 วงจรหารความถี่สำหรับสร้างสัญญาณ HF

สัญญาณ HF และฐานเวลาของวงจรพัลส์ไปรแกรมจะถูกสร้างจากความถี่ VHF ของ VCO

เอกสารอ้างอิงที่ 29 ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



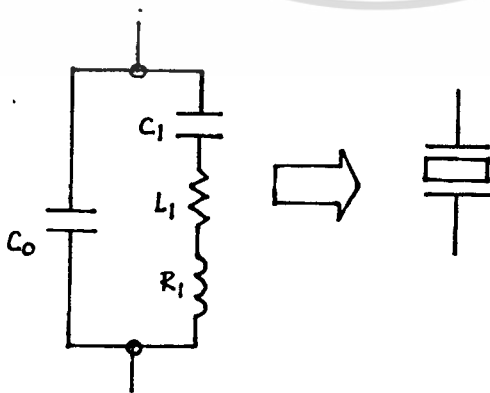
รูปที่ 29 บล็อกไดอะแกรมสำหรับการสร้างคลื่นพาหะและฐานเวลาของวงจรถักชีพไปแวม

วงจรถักชีพประกอบด้วยวงจรรวมชนิด ECL เป็นตัวหารความถี่ถึง 20 เท่า, วงจรเปลี่ยนระดับลอจิกจาก ECL เป็น TTL และวงจรถักชีพสองชนิด TTL เพื่อสร้างสัญญาณนาฬิกาให้กับวงจรถักชีพ

### 3.10 วงจรถักชีพความถี่อ้างอิง [10]

โครงการนี้ใช้สัญญาณอ้างอิง ( $f_{REF}$ ) ความถี่ 4 กิโลเฮิรซ์ โดยสร้างจากวงจรถักชีพความถี่ 10.24 เมกกะเฮิรซ์ที่ควบคุมด้วยผลึกคริสตอล แล้วหารด้วยวงจรถักชีพให้ได้ความถี่ของ  $f_{REF}$

วงจรถักชีพของคริสตอลแควงได้คั่งรูปที่ 30  $L_1, R_1$  และ  $C_1$  แสดงการวิโซแนนซ์แบบอนุกรมซึ่งแทนการสั่นของแวล็ก ส่วนเป็นความจุที่  $C_0$  เกิดจากตัวจับคริสตอล ถ้าคริสตอลถูกตัดแบบเอที และเป็นการทำงานแบบโหมดพื้นฐาน ความถี่ของการสั่น ( วิโซแนนซ์ ) จะประมาณเท่ากับ

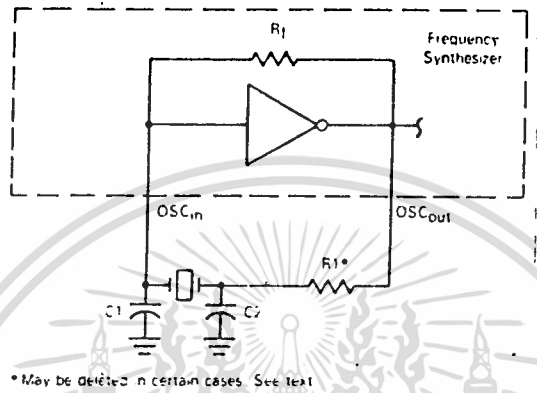


เอกสารนี้เป็นรูปที่ 30 ที่แสดงวงจรถักชีพของคริสตอลเพื่อการศึกษานี้ ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f_0 \text{ (MHz)} = 1675/\text{ความหนาของผลึก} \quad (26)$$

คริสตัลแบบเอทีทำเสถียรภาพอุณหภูมิ ( $f/f_0$ ) ประมาณ  $+20 \text{ ppm}$  ต่ออุณหภูมิช่วง  $-50$  ถึง  $100^\circ\text{C}$  โดยเสถียรภาพจะดีที่สุดในช่วง  $20 - 30^\circ\text{C}$

โครงการนี้ใช้วงจรรีจิสเตอร์เฟรควเอนซ์แสดงในรูปที่ 31 สำหรับการสร้างควมถี่อ้างอิง



รูปที่ 31 วงจรผลิตความถี่แบบรีจิสเตอร์เฟรควเอนซ์ร่วมกับคริสตัล

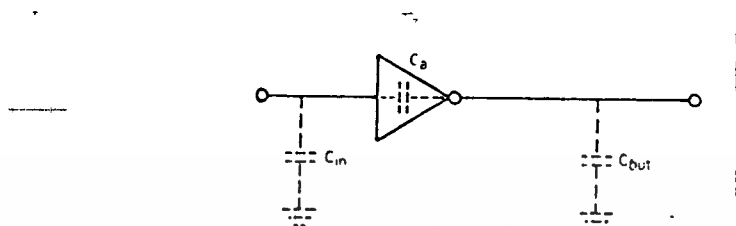
ปกติที่แรงดัน  $V_{DD} +5 \text{ V}$  ,  $C_{in} = 5 \text{ pF}$  ,  $C_{out} = 6 \text{ pF}$  ,  $C_a = 5 \text{ pF}$  ตัวต้านทาน  $R_f$  มีค่าประมาณ  $50 - 20 \text{ เมกกะโอห์ม}$  ส่วน  $R1$  ทำหน้าที่จำกัดแรงดันไบอัสคริสตัล เนื่องจากตัวคริสตัลเองสามารถรับแรงดันคร่อมตัวมันได้จำกัด ( กำหนดโดยผู้ผลิต ) ถ้าแรงดันคร่อมเกินกว่ากำหนด จะทำให้เกิดความเครียดขึ้นภายในตัวคริสตัล อาจจะทำให้ผลึกเสียหายหรือความถี่ที่ได้ขาดเสถียรภาพ ปกติตัวต้านทาน  $R1$  จะมีค่า  $0 - 10 \text{ กิโลโอห์ม}$  และความถี่เอาต์พุตสามารถปรับได้เล็กน้อยโดยการปรับ  $C_1$

วงจรมีการทำงานได้อย่างดี ถ้าทราบค่าโหลดคาปาซิแตนซ์ที่เหมาะสม ซึ่งจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิตปกติสำหรับคริสตัลที่มีความถี่ต่ำกว่า  $8 \text{ เมกกะเฮิรซ์}$  จะมีค่าไม่เกิน  $32 \text{ พิโคฟารัด}$  , ช่วงความถี่  $8 - 15 \text{ เมกกะเฮิรซ์}$  มีค่าประมาณ  $20 \text{ พิโคฟารัด}$  และ  $10 \text{ พิโคฟารัด}$  สำหรับความถี่สูงกว่า  $15 \text{ เมกกะเฮิรซ์}$

เอกสารนี้เป็นจากรูปที่ 31 จะได้สมการของโหลดคาปาซิแตนซ์คือมัน ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C_L = \frac{C_{in} \cdot C_{out} + C_a + C_o + \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}{C_{in} + C_{out}} \quad (27)$$

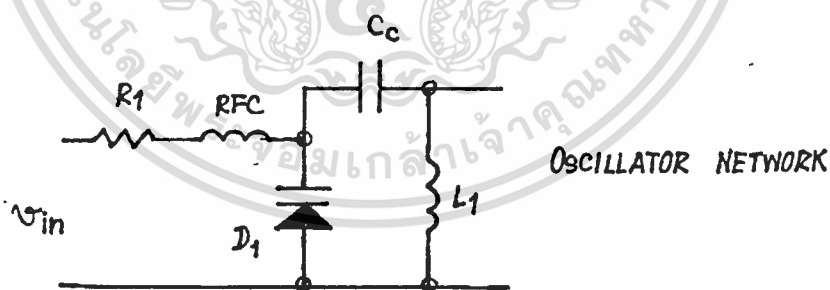
โดยที่  $C_{in} \cdot C_{out}$  และ  $C_L$  คือค่าตัวเก็บประจุของอินเวอร์เตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 32



รูปที่ 32 ความจุแบบพาราซิติคที่อินพุท, เอาท์พุทและอินพุท-เอาท์พุทของอินเวอร์เตอร์

### 3.11 วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน

วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน อาศัยวารีแคปโคไดโอด ( ซึ่งเป็นอุปกรณ์หนึ่งในส่วนเวโรเนออร์ของวงจรผลิตความถี่ ดังแสดงในรูปที่ 33 ) ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันกระแสตรงจากวงจรกรองความถี่ค่าผ่านให้เป็นความถี่ของสัญญาณ



รูปที่ 33 การใช้วารีแคปในวงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดัน

จากรูป  $D_1$  และ  $L_1$  ประกอบกันเป็นวงจรรีโซแนนซ์แบบขนาน  $C_c$  ทำหน้าที่แยกแรงดันไบอัสของ  $D_1$  ออกจากตัว  $L_1$  , ตัวใช้ค ( RFC ) ทำหน้าที่แยกส่วนแรงดันควบคุมซึ่งเป็นเอาท์พุทของวงจรกรองความถี่ค่าผ่านออกจากส่วนเวโรเนออร์ ,  $R_1$  ทำหน้าที่กำหนดกระแสไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้แบบที่การศึกษานี้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้ใช้ในประโยชน์อื่นใด การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อผู้ที่เกี่ยวข้อง

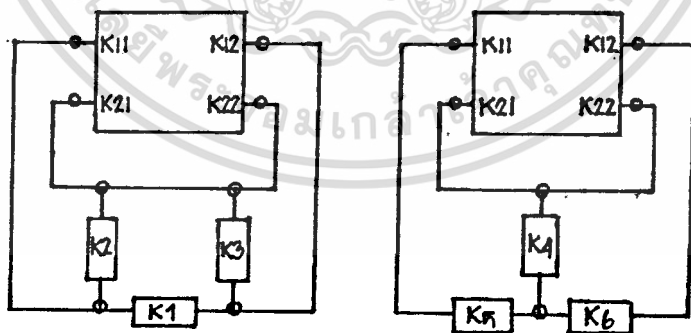
แรงดันนี้จะต้องมีค่าน้อยกว่าแรงดันนำกระแสของไดโอด เพราะว่าวารีแคปทำงานในลักษณะไบอัสกลับ ถ้าแรงดันความถี่สูงควมต่อมไดโอดมีค่ามากกว่าแรงดันนำกระแสของไดโอด ( ประมาณ 0.7 โวลต์ ) จะทำให้เกิดความเสียหายของลักษณะที่เอาท์พุทเนื่องจากปรากฏการณ์เรียงกระแสของ D1 ความจุของวารีแคปกำหนดโดย

$$C = C_0 / (1 + v/\phi)^r \tag{28}$$

โดยที่

- C = ค่าความจุที่แรงดันไบอัสกลับ v
- C<sub>0</sub> = ค่าความจุที่แรงค่าศูนย์
- v = แรงดันไบอัสกลับ
- φ = แรงดันรอยต่อ ( ประมาณ 0.7 โวลท์ )
- r = เลขชี้กำลัง ( ขึ้นอยู่กับชนิดไดโอด สำหรับไดโอดเบอร์ MV2102 มีค่า r = 0.47 )

ส่วนการออกแบบของวงจรผลิตความถี่จะอาศัย Y พารามิเตอร์ [11] ดังรูปที่ 34



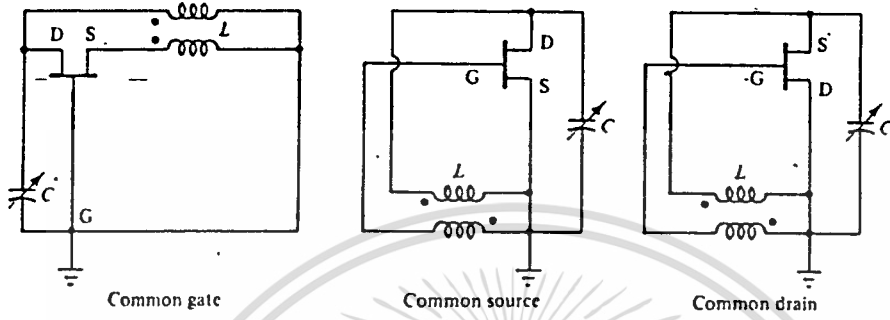
รูปที่ 34 วงจรออสซิลเลเตอร์สองแบบ

จากรูปที่ 34 เมื่อใช้ Y พารามิเตอร์ การออกแบบจะเป็นพายไฟด์เวอร์กโดยที่  $Y_{11}=K_{11}$

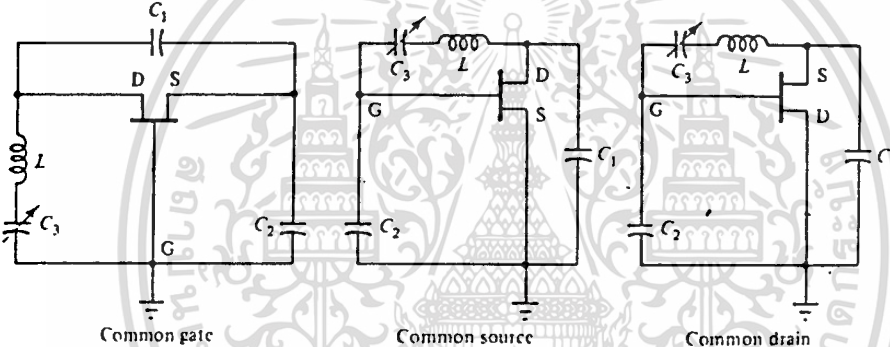
$, K_{12}=Y_{12}, K_{21}=Y_{21}$  และ  $K_{22}=Y_{22}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี หากมีการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมายและต้องแจ้งถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

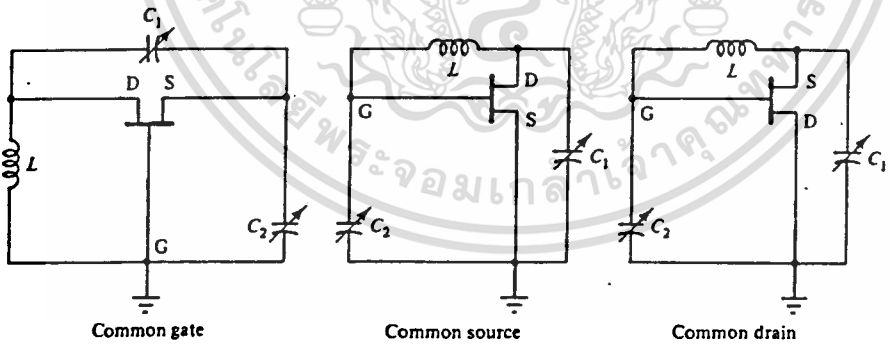
ตัวค้ำทานหนึ่งตัว โดยแบ่งอยู่ในแต่ละส่วนประกอบของการบ่อนกลีบในรูปที่ 34 เพื่อสร้างความค้ำทานแบบลบเพื่อชดเชยความสูญเสียในวงจรเวโซเนเตอร์ พลังงานส่วนหนึ่งในเวโซเนเตอร์จะค้ำปลั่งไปสู่โหลด ส่วนประกอบต่างๆของวงจรในรูปที่ 34 สามารถแสดงได้ในรูปที่ 35 โดยอุปกรณแอกทิฟเป็นไบโตร์กั๊งไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์หรือเพา



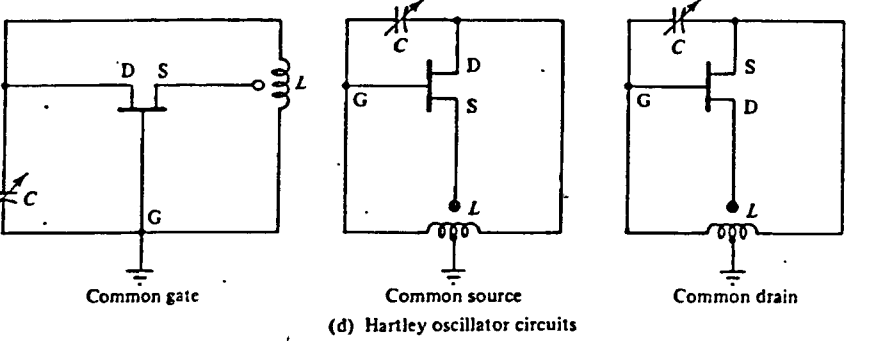
(a) Armstrong oscillator circuits



(b) Clapp oscillator circuits



(c) Colpitts oscillator circuits



(d) Hartley oscillator circuits

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 35 ที่ส่วนประกอบของวงจรออสซิลเลเตอร์ในรูปที่ 34 ถูกนำมาใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.12 วงจรรขยายสัญญาณภาคส่งและรับ

โดยทั่วไปแล้ววงจรรขยายสัญญาณที่ใช้งานในย่านความถี่สูงควรมีคุณสมบัติดังนี้

- อัตราขยายสม่ำเสมอในช่วงความถี่ที่ใช้งาน
- ค่าอินพุทและเอาต์พุทของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (VSWR) ค่า สำหรับโวลต์และซอร์ท (ปกติจะมีค่า 50 โอห์ม) ที่กำหนด
- มีเสถียรภาพตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน โดยไม่ขึ้นกับค่าอิมพีแดนซ์ของซอร์ทและโวลต์
- สัญญาณรบกวนต่ำ

ในการออกแบบวงจรให้มีความสัมพันธ์ตามที่กล่าวมานี้ สำหรับวงจรรขยายสัญญาณช่วงความถี่แคบนั้นทำได้ง่ายโดยอาศัยสมิทชาร์ท [12] ทำการวาดวงกลมของอัตราขยายกำลังคงที่, วงกลมเสถียรภาพและวงจรรวมขนาดสัญญาณรบกวนคงที่ จากนั้นก็ทำการเลือกค่าซอร์ทและโวลต์อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมจากสมิทชาร์ท ตามคุณสมบัติของวงจรรขยายที่ต้องการ แต่สำหรับวงจรรขยายสัญญาณช่วงความถี่กว้างนั้นจะทำได้ยากกว่า เนื่องจากตัวอุปกรณ์แอคทีฟในวงจรนั้นส่วนใหญ่จะมีความสัมพันธ์ต่างๆ เปลี่ยนไปมากเมื่อความถี่เปลี่ยนไป โดยเทคนิคทั่วไปที่ใช้ในการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณช่วงความถี่กว้างก็มี การใช้แมชซิงเนทเวอร์คกับแบนด์วิดท์กว้าง [13] หรือใช้การบ่อนกลับแบบลบ [14] โดยในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคของการบ่อนกลับแบบลบเท่านั้น

#### วงจรรขยายสัญญาณความถี่กว้างโดยอาศัยการบ่อนกลับแบบลบ

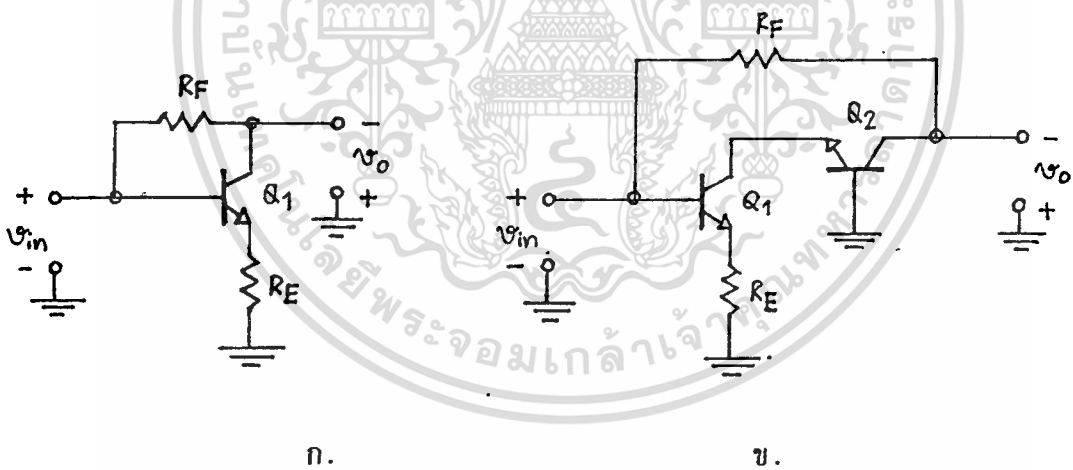
เทคนิคการบ่อนกลับแบบลบ ซึ่งอาศัยการนำสัญญาณที่เอาต์พุทกลับมามีสัญญาณอินพุทนั้นช่วยให้วงจรมีคุณสมบัติขึ้นอยู่กับอุปกรณ์แอคทีฟน้อยลง ซึ่งจะเห็นว่าเหมาะสำหรับการออกแบบที่มีข้อมูลของตัวอุปกรณ์น้อย และมีเครื่องมือวัดที่ไม่ค่อยทันสมัย

การบ่อนกลับในวงจรจริง ทำได้โดยอาศัยตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุตัวเหนี่ยวนำ หรือหม้อแปลง โดยข้อดีของการบ่อนกลับโดยอาศัยหม้อแปลงคือไม่ทำให้สัญญาณรบกวนในวงจรเพิ่มขึ้น [15] จึงเหมาะสมสำหรับวงจรรขยายสัญญาณความถี่กว้างแบบสัญญาณรบกวนต่ำ ซึ่งต่างกับการบ่อนกลับโดยอาศัยอุปกรณ์จำพวกตัวต้านทาน, ตัวเก็บประจุ, ตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มสัญญาณรบกวนมาให้กับวงจร

การโอบกั้นแบบลบ: เพียงอุปได้วยังไม่ถ้ามารวมค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนให้มีค่าต่ำ  
 ใ้ทั้งพอร์ทอินพุทและเอาต์พุทของวงจร ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีการโอบกั้นแบบหลายอุป (2, 3  
 หรือ 4 อุป) แต่โดยทั่วไปแล้วการโอบกั้นแบบสองอุปก็เพียงพอที่จะทำให้งจรขยายมีที่ถ้องการ  
 สำหรับกรณีการโอบกั้นแบบสามอุปนั้นไม่เป็นที่นิยมใช้งานในวงจรจริง เนื่องจากวงจรยังมีค่าสัม  
 ประสิทธิ์ การสะท้อนทั้งพอร์ทอินพุทและเอาต์พุทขึ้นอยู่กับโหลดและซอร์ท ความล่าช้า เช่นเดียวกับ  
 กรณีสองอุป ถ้ามการโอบกั้นแบบสี่อุปทำให้เราสามารถควบคุมค่าสัมประสิทธิ์ การสะท้อนของวง  
 จรขยายได้ โดยไม่ขึ้นกับค่าซอร์ทหรือโหลดที่นำมาต่อ [16]

### วงจรขยายสัญญาณภาคส่ง (ภาคขับ)

วงจรขยายสัญญาณภาคส่ง ต้องการคุณสมบัติเพียง 3 ข้อแรกเท่านั้น คือวงจรไม่จำเป็นต้อง  
 ต้องมีสัญญาณรบกวนต่ำ ๆ เนื่องจากขนาดของสัญญาณที่ต้องการขยายนั้นมีขนาดใหญ่พอสมควรแล้ว  
 ดังนั้นรูปแบบของวงจรจะเป็นแบบใช้ตัวต้านทานในการโอบกั้น ซึ่งมีตัวอย่างวงจรดังรูป 36

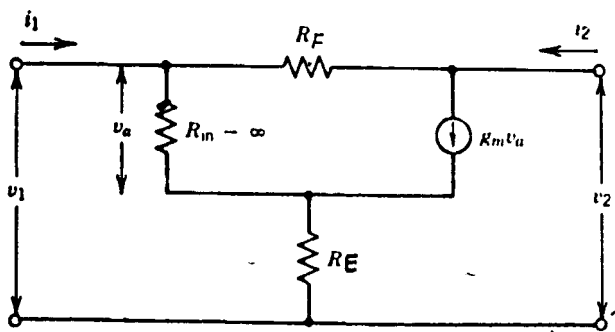


รูปที่ 36 ตัวอย่างวงจรขยายที่ใช้อาศัยตัวต้านทานในการโอบกั้นแบบลบ

จากรูปจะเห็นว่าวงจรทั้งสองอาศัยการโอบกั้นแบบโวลต์-ดิเฟอเรนซ์ ( $R_F$ ) และเคอร์เรนท-  
 ซีรีส์ ( $R_E$ ) โดยรูป(ข) มี  $Q_1$  และ  $Q_2$  เป็นอุปกรณ์แอคทีฟต่อกันแบบคาสโคดซึ่งจะช่วยลดผลของ  
 มิลเลอร์ ใน  $Q_1$  [17] ค่า  $R_F$  และ  $R_E$  เริ่มต้นสามารถคำนวณได้ง่าย ๆ [18] จากโมเดล

ความถี่ต่ำ, สัญญาณขนาดเล็กของตัวอุปกรณ์แอคทีฟ ดังรูปที่ 37

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ขออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 37 โมเดลของอุปกรณ์แอกทีฟที่มีความถี่ค่าและขนาดสัญญาณค่า

โดยอาศัยทฤษฎีเนทเวิร์กจะได้

$$i_1 = G_F' v_1 - G_F' v_2$$

$$i_2 = (g_m' - G_F) v_1 + G_F v_2$$

โดย  $g_m' = \frac{g_m}{1 + g_m R_E}$

จากนั้นทำการเปลี่ยนแอมพลิตูดแอมพลิจูดข้างบนให้เป็น เอส-พารามิเตอร์ แล้วแก้สมการให้  $S_{11}$  และ  $S_{22}$  เท่ากับศูนย์ (เงื่อนไขของการแมชชิงอิมพีแดนซ์) จะได้

$$R_F = \frac{1}{g_m'} - \frac{1}{g_m} \tag{29}$$

$$R_E = g_m' Z_o^2 \tag{30}$$

ซึ่งค่า  $R_F$  และ  $R_E$  นี้จะทำให้  $S_{11}, S_{22}$  ของวงจรที่ความถี่ค่าเท่ากับศูนย์และ

$$S_{12} = \frac{1}{g_m' Z_o + 1} \tag{31}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน  $g_m' Z_o + 1$  เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S_{21} = -(g_m' Z_o - 1) = 1 - R_F/Z_o \quad (32)$$

แต่  $Z_o = \sqrt{\frac{R_E}{g_m}}$  ดังนั้น 
$$S_{21} = 1 - \sqrt{\frac{R_F}{R_E + 1/g_m}} \quad (33)$$

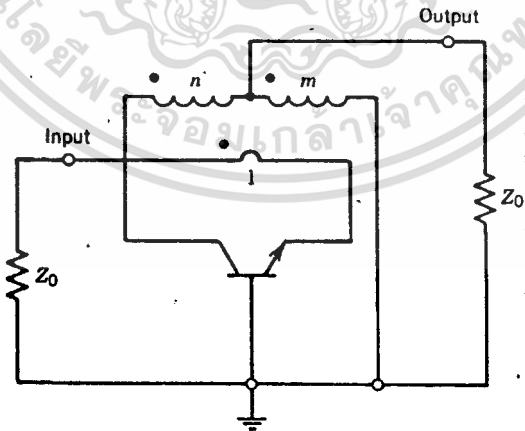
อุปกรณ์แอกทีฟในวงจรที่มีความถี่ต่ำกว่า 3 GHz จะใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ ซึ่งยังมีค่าทรานคอนคักแทนท์สูงอยู่ โดยมีค่าเท่ากับ  $g_m = I_{CQ}/(K \cdot T) = I_E/26(\text{mA})$  ส่วนที่มีความถี่สูงกว่า 3 GHz จะใช้แกลเลียมอาร์เซไนด์เมสเฟต (GaAs MESFET)

รายละเอียดเพิ่มเติมของการออกแบบวงจรในรูปแบบนี้ จะหาได้ในหนังสืออ้างอิงเล่มที่ [19], [20]

วงจรวายสัญญาณภาครับ

คุณสมบัติสำคัญของวงจรวาย เชนสัญญาณภาครับที่มีคุณภาพรับความถี่คั้งนี้รูปแบบการป้อนกลับที่ำใช้กับอาก์ยร้อแปลง เป็นค่าป้อนกลับสัต์ยหะ โดยตัวอย่างที่จะแสดงให้ดูมีรูปแบบคั้งนี้

รูปแบบที่ 1 อาก์ยร้อแปลงแบบออคโต์เป็นส่วนป้อนกลับ

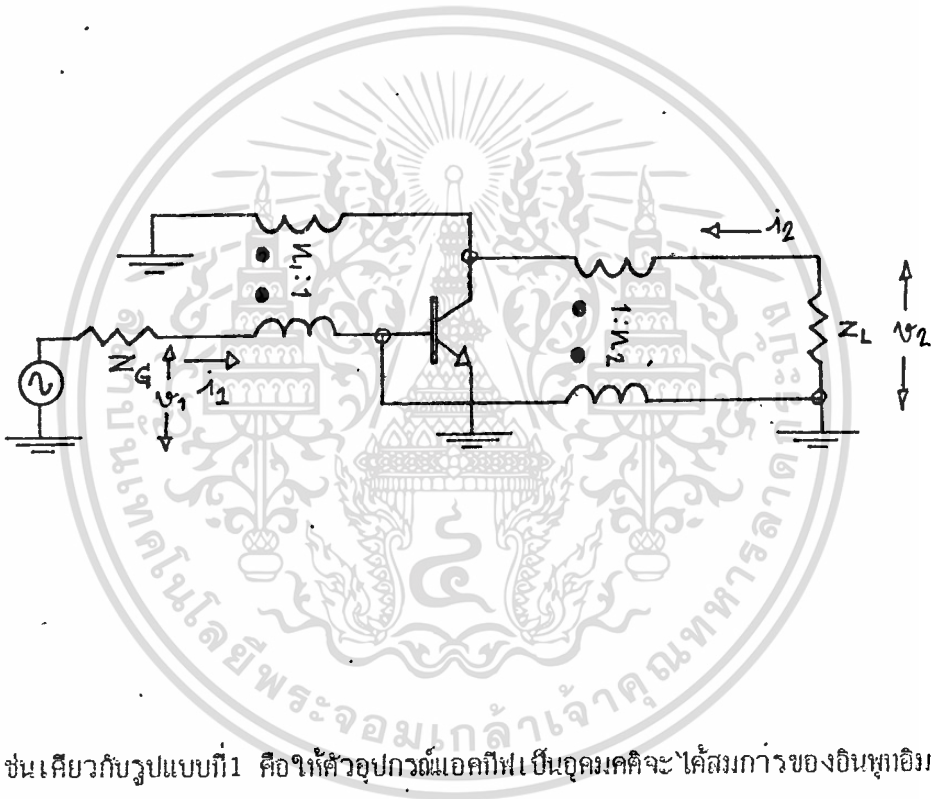


พิจารณาที่ความถี่ค่าและอุปกรณ์แอกทีฟมีคุณสมบัติอุดมคติ คือมีอินพุทอิมพีแดนซ์เท่ากับศูนย์, เอาท์พุทอิมพีแดนซ์เท่ากับอนันต์และอัตราขยายกระแสเท่ากับหนึ่ง (คอมมอนเบส) จะได้เงื่อนไขเอกสสำหรับการแมชชิงหังอินพุทและเอาท์พุทคือ เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{R_G}{R_L} = \frac{n + m + 1}{m^2} \quad (34)$$

สำหรับ  $R_G/R_L = 1$  จะได้ข้อความก่อนของรอบหรือแปลงเป็นไปตามสมการ  $n = m^2 - m - 1$  ซึ่งจะได้ข้อความขยายกำลังเท่ากับ  $m^2$

รูปแบบที่ 2 อาศัยหรือแปลงแบบคอนเวเนชันโดเป็นส่วนเบี่ยงกลับ



เช่นเดียวกับรูปแบบที่ 1 คือให้ตัวอุปกรณ์แอคทีฟเป็นอุดมคติจะได้สมการของอินพุทอิมพีแดนซ์ ,เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ ดังนี้

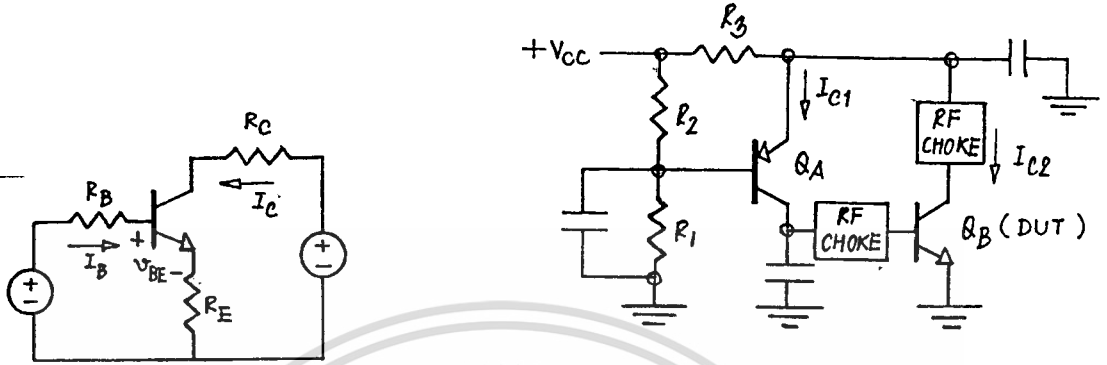
$$Z_i = \frac{n_2}{n_1} \cdot Z_2 \quad , \quad Z_o = \frac{n_1}{n_2} \cdot Z_s \quad (35)$$

จากสมการจะว่าเงื่อนไขของการแมชชิงทั้งทางอินพุทและเอาท์พุทนั้นทำได้โดยทำให้  $n_1 = n_2$  ส่วนอัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่าเท่ากับ  $\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา  $n_1 + n_2$  อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.13 การไบอัสวงจรขยายแบบแอกทิฟ [12]

การไบอัสวงจรขยายด้วยวิธีนี้จะทำให้จุดทำงานของตัวอุปกรณ์แอกทิฟมีค่าคงที่มากกว่าแบบที่ำใช้ตัวต้านทานทั่ว ๆ ไป โดยลักษณะของวงจรไบอัสแบบธรรมดากับแบบแอกทิฟแสดงดังรูป



รูปที่ 38 วงจรไบอัสแบบธรรมดาและแบบแอกทิฟ

การไบอัสแบบธรรมดาใช้  $R_E$  เป็นส่วนของกาบ่อนกดย เพื่อควบคุมค่ากระแสไบอัสที่กึ่งที่ ส่วนการไบอัสแบบแอกทิฟสามารถอธิบายการทำงานของวงจรขยายโดยคร่าว ๆ ที่ถ้าสมมติให้  $I_{C2}$  มีค่าเพิ่มขึ้นจะทำให้ที่คกรวม  $R_C$  เพิ่มขึ้น ดังนั้น  $V_{BE}$  ของ  $Q_1$  จะลดลงเป็นผลทำให้  $I_{C1}$  ลด ซึ่ง  $I_{C1}$  นี้เป็นกระแสเบสของ  $Q_2$  ดังนั้นกระแส  $I_{C2}$  จะลดลงทำให้จุดทำงานของ  $Q_2$  ค่อนข้างคงที่

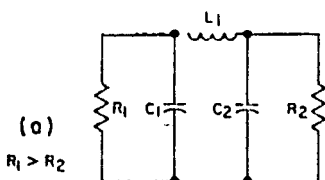
3.14 วงจรแมชชิง

วงจรแมชชิงทำหน้าที่ส่งถ่ายกำลังงานระหว่างวงจรซึ่งมีระดับอิมพีแดนซ์ ( Impedance ) ต่างกัน อุปกรณ์ซึ่งใช้ในวงจรจะเป็นชนิดปราศจากการสูญเสีย (Lossless element) ซึ่งหมายถึงตัวเหนี่ยวนำ ตัวเก็บประจุและหม้อแปลง การตอบสนองความถี่ของวงจรแมชชิงจะเป็นได้ทั้งลักษณะการองความถี่ที่ต่ำผ่าน, การองความถี่สูงผ่านและการองย่านความถี่ผ่าน วงจรแมชชิงซึ่งใช้หม้อแปลงจะให้ผลตอบสนองย่านความถี่กว้างหลายออกเตฟ ( Octave ) หม้อแปลงย่านความถี่

กว้างจะมีลักษณะต่างไปจากหม้อแปลงปกติที่พบกันโดยทั่วไปทั้งรูปแบบโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลามาตรฐานระเบียบค่าได้จาก [21]

วงจรเมซซิ่งระหว่างอิมพีแดนซ์ที่มีขนาดต่างกัน แสดงในรูปที่ 39

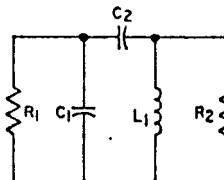


(a)  
 $R_1 > R_2$

$$(1) X_{C1} = \frac{R_1}{Q_L}$$

$$(2) X_{C2} = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}(Q_L^2 + 1)} - 1}$$

$$(3) X_{L1} = \frac{Q_L R_1}{Q_L^2 + 1} \left[ 1 + \frac{R_2}{Q_L X_{C2}} \right]$$

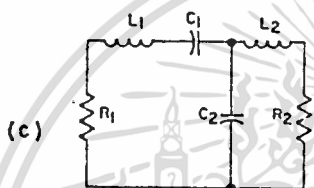


(b)  
 $R_1 < R_2$

$$(1) X_{C1} = \frac{R_1}{Q_L}$$

$$(2) X_{C2} = \frac{Q_L R_1}{(Q_L^2 + 1)} \left[ \frac{R_2}{Q_L X_{L1}} - 1 \right]$$

$$(3) X_{L1} = \frac{R_2}{\sqrt{\frac{R_2}{R_1}(Q_L^2 + 1)} - 1}$$



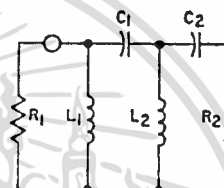
(c)

$$(1) X_{L1} = Q_L R_1$$

$$(2) X_{L2} = \frac{R_2}{Q_L} \left[ \sqrt{\frac{R_1(Q_L^2 + 1)}{R_2}} - 1 \right]$$

$$(3) X_{C1} = \frac{R_1(Q_L^2 + 1)}{Q_L} \left[ 1 - \sqrt{\frac{R_2}{R_1(Q_L^2 + 1)}} \right]$$

$$(4) X_{C2} = \frac{R_1}{Q_L} \sqrt{\frac{R_2(Q_L^2 + 1)}{R_1}}$$



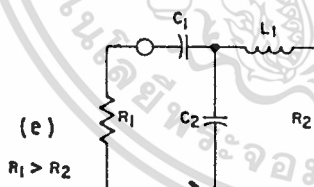
(d)  
 $R_1 > R_2$

$$(1) X_{L1} = \frac{Q_L R_1}{1 + \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}}$$

$$(2) X_{L2} = \frac{Q_L R_2}{1 + \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}}$$

$$(3) X_{C1} = Q_L R_1 \sqrt{\frac{R_2}{R_1}}$$

$$(4) X_{C2} = Q_L R_2$$

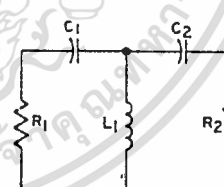


(e)  
 $R_1 > R_2$

$$(1) X_{L1} = Q_L R_2$$

$$(2) X_{C1} = R_1 \sqrt{\frac{R_2(Q_L^2 + 1)}{R_1}} - 1$$

$$(3) X_{C2} = \frac{R_2(Q_L^2 + 1)}{Q_L} \cdot \frac{1}{\left[ 1 - \frac{X_{C1}}{Q_L R_1} \right]}$$



(f)

$$(1) X_{C1} = R_1 \sqrt{\frac{R_2(Q_L^2 + 1)}{R_1}} - 1$$

$$(2) X_{C2} = Q_L R_2$$

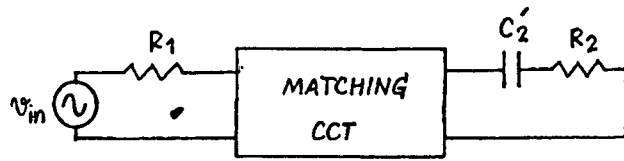
$$(3) X_{L1} = \frac{R_2(Q_L^2 + 1)}{Q_L} \cdot \frac{1}{\left[ 1 + \frac{X_{C1}}{Q_L R_1} \right]}$$

รูปที่ 39 วงจรเมซซิ่งสำหรับแปลงอิมพีแดนซ์

บางครั้งอิมพีแดนซ์ที่ต้องการจะส่งถ่ายกำลังงานไม่อยู่ในลักษณะที่จะใช้วงจรตามรูปได้ เช่น

ในรูปที่ 40  $R_1$  เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ อิมพีแดนซ์ที่ต้องการส่งถ่ายกำลังงาน คือตัวต้านทาน

อนุกรมกับตัวเก็บประจุ  $C_2$  โดยความต้านทาน  $R_1$  มีค่ามากกว่าความต้านทาน  $R_2$  ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 40 ตัวอย่างการใช้อิมพีแดนซ์แมชชิง

ถ้าเราเลือกใช้อิมพีแดนซ์แมชชิงรูปที่ 39(a) จะต้องเปลี่ยนอิมพีแดนซ์  $R_2$  ออกมาพร้อมกับ  $C_2$  ให้อยู่ในรูปขนานโดย



เมื่อเปลี่ยนวงจรในรูปขนานเป็นอนุกรม

$$R_S = \frac{R_P}{1 + (R_P/X_P)^2}$$

$$X_S = \frac{R_S R_P}{X_P} \quad (36)$$

เมื่อเปลี่ยนวงจรในรูปอนุกรมเป็นขนาน

$$R_P = R_S [1 + (X_S/R_S)^2]$$

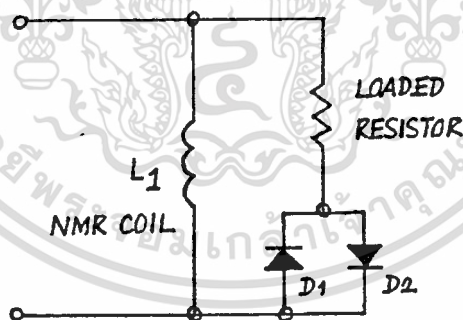
$$X_P = \frac{R_P}{X_S/R_S} \quad (37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากเปลี่ยนเป็นรูปขนานแล้ว เมื่อคำนวณค่าอุปกรณ์ได้แล้ว ค่า  $C_2$  จริงจะเป็นค่า  $C_2$  ซึ่งคำนวณได้จากวงจรรูป 39(a) [ ซึ่ง  $R_2$  เปลี่ยนจากกรุปอนุกรมเป็นรูปขนานแล้ว ] ไปด้วยค่า  $C_2'$  ที่ถูกแปลงจากกรุปอนุกรมให้เป็นรูปขนาน

วงจรมะขังซึ่งจะทำหน้าที่เชื่อมต่อกาหนดอาร์ทิฟิเชียลของวงจรมะขังกำลังภาคสุดท้าย เข้ากับขดลวดเอ็นเอ็มอาร์ ขดลวดเป็นอุปกรณ์ที่ไม่มีภาวะสูญเสียกำลัง ในทางปฏิบัติความต้านทานภายในของขดลวดจะเป็นตัวรับกำลังงานสูญเสีย ขดลวดซึ่งมาจากขดลวดขนาดใหญ่มักจะมีค่าความสูญเสีย ค่า  $Q_L$  (Loaded  $Q$ ) มีค่าสูง ตัวต้านทาน  $R_2$  ในรูป 39(e) แทนความสูญเสียของขดลวด  $L_1$  ในกรณีที่  $L_1$  เป็นขดลวดเอ็นเอ็มอาร์ ค่า  $Q_L$  สูงทำให้วงจรมะขังแบนด์วิดท์ (Band width) แคบ ไม่สามารถส่งสัญญาณอาร์เอฟไฟด์ส์ที่มีแบนด์วิดท์กว้างได้ และยังทำให้การปรับแต่งวงจรมากเกินไป เราสามารถลดค่า  $Q_L$  ของวงจรมะขังได้โดยต่อตัวต้านทานอนุกรมหรือขนานกับขดลวดเอ็นเอ็มอาร์ ( $L_1$ ) การต่อตัวต้านทานอนุกรมกับขดลวดทำให้เกิดผลเสียดทานรับสัญญาณเอพไอดี (กรณีรับ-ส่งใช้ขดลวดชุดเดียวกัน) สัญญาณที่ได้รับจะถูกลดขนาดลงและสัญญาณรบกวนจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวต้านทานที่ต่อเข้าไป เพื่อลดค่า  $Q_L$

การแก้ไขอาร์อาร์ทำได้โดยต่อตัวต้านทานขนานกับขดลวดร่วมกับไดโอด ในรูปที่ 41

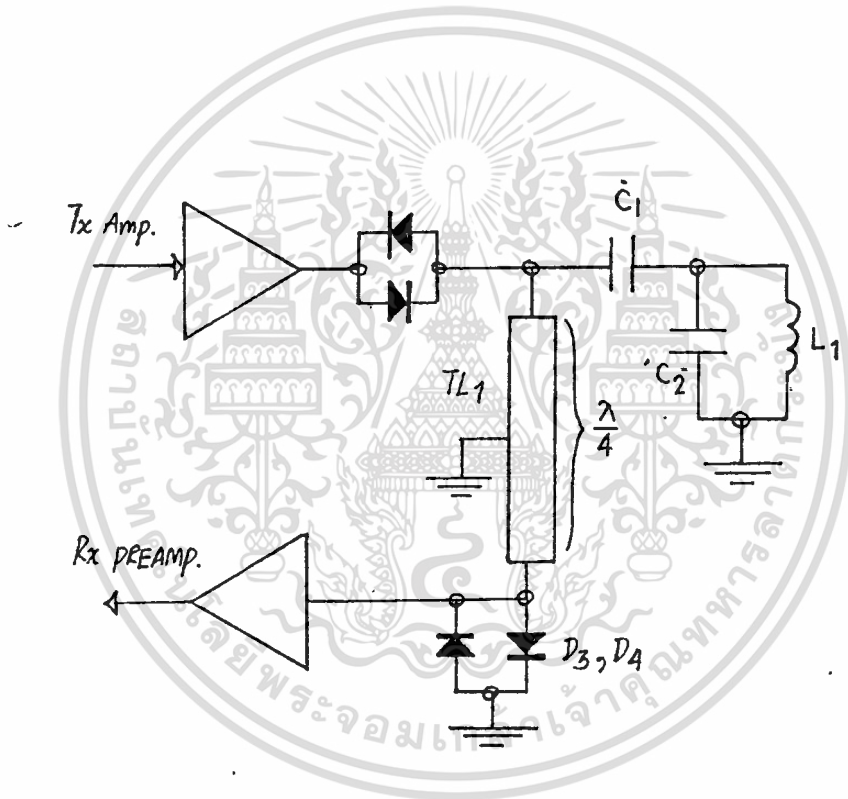


รูปที่ 41 ตัวต้านทานซึ่งต่อเพื่อลดค่า  $Q_L$  ของขดลวด

ขณะส่งสัญญาณอาร์เอฟไฟด์ส์ ไดโอด  $D_1, D_2$  จะนำกระแส และต่อ  $R_2$  ขนานเข้ากับขดลวด  $L_1$  ช่วงที่ทำการรับสัญญาณ  $D_1, D_2$  จะไม่นำกระแส เป็นการปลด  $R_2$  ออกจาก  $L_1$

### 3.15 วงจรสวิตช์รับ/ส่งสัญญาณ

วงจรสวิตช์รับ/ส่งสัญญาณ ทำหน้าที่แยกวงจรภาคส่ง (Transmitter) ออกจากภาครับ ขณะรับสัญญาณ เมื่อเครื่องส่งหยุดส่งอาร์เอฟพัลส์ ขณะที่เครื่องส่งส่งอาร์เอฟพัลส์ไปยังขดลวดเอ็นเอ็มอาร์วงจรสวิตช์รับ/ส่งสัญญาณจะต้องทำหน้าที่แยก (Isolation) ภาคอินพุทของเครื่องรับออกจากสายนำสัญญาณ (Transmission Line) เพื่อป้องกันวงจรขยายภาคแรกไม่ให้เกิดเสียหายเนื่องจากแรงดันสูงของอาร์เอฟพัลส์ วงจรสวิตช์รับ/ส่งสัญญาณ จะต้องมีความเร็วในการทำงานพอที่ป้องกันวงจรภาครับ โดยอาร์เอฟพัลส์ที่เป็นรูปเรกติแองกูลาร์เปลี่ยนแปลงขนาดเป็นวินาที นอกจากนี้วงจรวงจรสวิตช์จะต้องมีคุณสมบัติการลดทอนสัญญาณต่ำ วงจรที่ใช้แสดงในรูปที่ 42



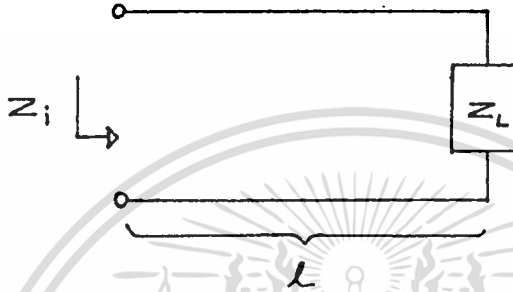
รูปที่ 42 แลวงจรสวิตช์รับ/ส่งสัญญาณ

จากวงจรในรูปที่ 42 ไดโอด  $D_1-D_4$  เป็นสวิตช์ซึ่งไดโอดทำหน้าที่เป็นสวิตช์คัต-ออฟ โดยจะนำกระแสเมื่อมีสัญญาณอาร์เอฟพัลส์จากภาคส่งสัญญาณ  $C_1, C_2$  ทำหน้าที่แมชชิง  $L_1$  ซึ่งเป็นขดลวดเอ็นเอ็มอาร์กับวงจรภาคส่งและรับ  $TL_1$  เป็นสายนำสัญญาณที่มีความยาวเท่ากับหนึ่งส่วนสี่ความยาวคลื่น (ในสายนำสัญญาณ) จากสมการของสายนำสัญญาณ เราสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ที่ปลายสายเมื่อต่อปลายเมื่อต่อปลายอีกด้านหนึ่งกับอิมพีแดนซ์ใดก็ได้

เอกส... ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z_i = Z_0 \cdot \frac{(Z_L \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l)}{(Z_0 \cos \beta l + jZ_L \sin \beta l)} \quad (38)$$

$$= Z_0 \cdot \frac{(Z_L + jZ_0 \tan \beta l)}{(Z_0 + jZ_L \tan \beta l)} \quad (39)$$



รูปที่ 43 ความนำสัญญาณต่อปลายด้วย  $Z_L$

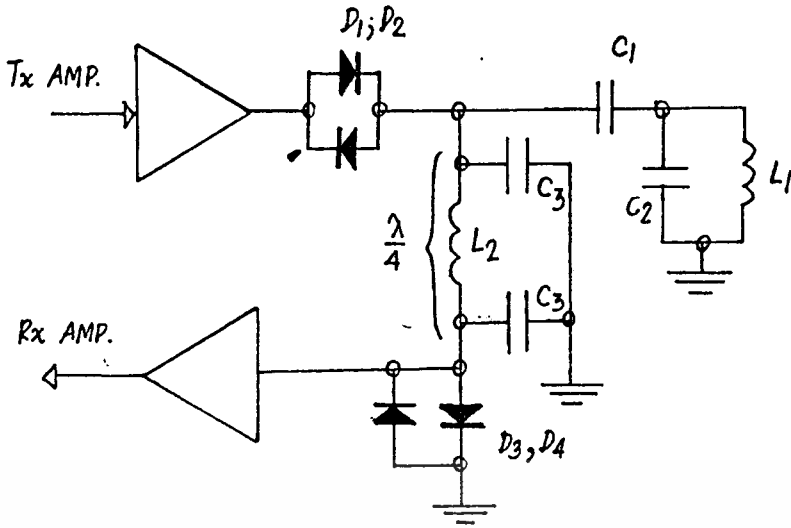
$Z_i$  คือ อิมพีแดนซ์ที่ปลายสายเมื่อถูกต่อปลายด้านหนึ่งด้วย  $Z_L$   $l$  เป็นความยาวนำสัญญาณขนาดของความยาวคลื่น และ  $\beta$  คือ ค่าคงตัวบ่งเฟส (Phase constant) โดยที่  $\beta = 2\pi/\lambda$  ถ้าให้  $l$  ยาวเกินกว่าครึ่งของความยาวคลื่น  $Z_L$  เท่ากับศูนย์ (ลัดวงจร) จะให้

$$\begin{aligned} Z_i &= jZ_0 \tan \beta l \\ &= jZ_0 \tan (2\pi/\lambda \cdot \lambda/4) \\ &= \infty \end{aligned}$$

จะเห็นว่า อิมพีแดนซ์ที่ปลายสายสูงมาก

จากรูปที่ 42 เราได้เห็น  $D_3-D_4$  เสมือนลัดวงจร อินพุทของวงจรขยายสัญญาณภาครับจะถูกป้องกันจากสัญญาณขนาดใหญ่ ขณะเดียวกันสายนำสัญญาณ  $TL_1$  มีอิมพีแดนซ์สูงไม่รับความค่อสัญญาณพัลส์จากเครื่องส่งไปยังขดลวด เมื่อเครื่องส่งเบคส่งอาร์เอฟพัลส์  $D_1-D_4$  จะไม่นำกระแส อินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายสัญญาณภาครับ จะปรากฏเป็นโวลจของสัญญาณ (ที่มีขนาดเล็ก) เทียบกับอัตรา ความยาวคลื่นส่วนลืออาจยาวเกินไปไม่เหมาะสม ก็สามารถใช่วงจรลัมพ์ (Lump

circuit) แทนสายสัญญาณดังรูปที่ 44 เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 44 วงจรสวิตช์รับส่งแบบวงจรลิ่มพี

จากรูปที่ 44 ขดลวด  $L_2$  ตัวเก็บประจุ  $C_1$  ทำหน้าที่เสมือนวงจรสายนำสัญญาณยาวความยาวคลื่นส่วนที่โดย

$$L_2 = Z_0 (27/f_0) \quad (40)$$

$$C_3 = 1/(27f_0Z_0) \quad (41)$$

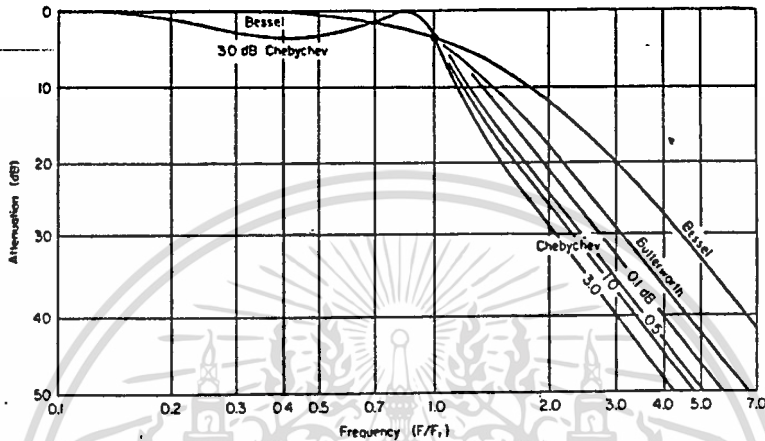
เมื่อ  $Z_0$  เป็นอิมพีแดนซ์ของระบบส่งสัญญาณที่ใช้ (50 โอม) และ  $f_0$  คือ ความถี่ที่ใช้งาน ในการใช้งานจริงทั้งวงจรในรูปที่ 42 และวงจรในรูปที่ 44 คุณสมบัติการทำงานของวงจรจะขึ้นอยู่กับไดโอดที่ใช้งาน โดยเฉพาะความต้านทานของไดโอด  $D_3-D_4$  ขณะนำกระแส รวมทั้งความเร็วในการสวิตช์ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแยกและป้องกันภาครับ การเพิ่มขนาดการแยกอาจทำได้ต่อวงจร ( $TL_1, D_3, D_4$  หรือ  $L_2, C_3, D_3, D_4$ ) ลำดับกัน (Cascade) มากกว่า 1 ชุด วงจรในรูปที่ 44 ขณะ  $D_3, D_4$  หยุดนำกระแสจะมีลักษณะเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ดังนั้นเวลาใช้งานจริงควรจะออกแบบที่ความถี่สูงความถี่ใช้งานจริงเล็กน้อย

### 3.16 วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน

วงจรรองชนิดนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนคลื่นรูปเหลี่ยมจากวงจรหารความถี่ ( ทหาร 20 ) จาก

ความถี่ VHF ของ VCO ให้เป็นความถี่ HF ให้เป็นคลื่นรูปไซน์เพื่อใช้เป็นคลื่นพาริในระบบ โดยการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้จะใช้วงจรความถี่ชดเชยโคออลโพลแบบเชบิเชฟ ( All pole chebychev - filter ) อันดับ 7 แม้ว่าวงจรกรองแบบนี้จะให้คุณสมบัติในการลดทอนสูง แต่ในพาสแบนด์จะปรากฏการกระเพื่อมของผลตอบสนองเชิงขนาด และมีผลตอบสนองทางเฟสไม่เป็นเชิงเส้นมาก แต่ข้อเสียเหล่านี้ไม่มีผลต่อระบบเท่าไรนัก รูปที่ 45 แสดงการลดทอนของวงจรกรองชนิดนี้



รูปที่ 45 การลดทอนของวงจรกรองแบบเชบิเชฟ

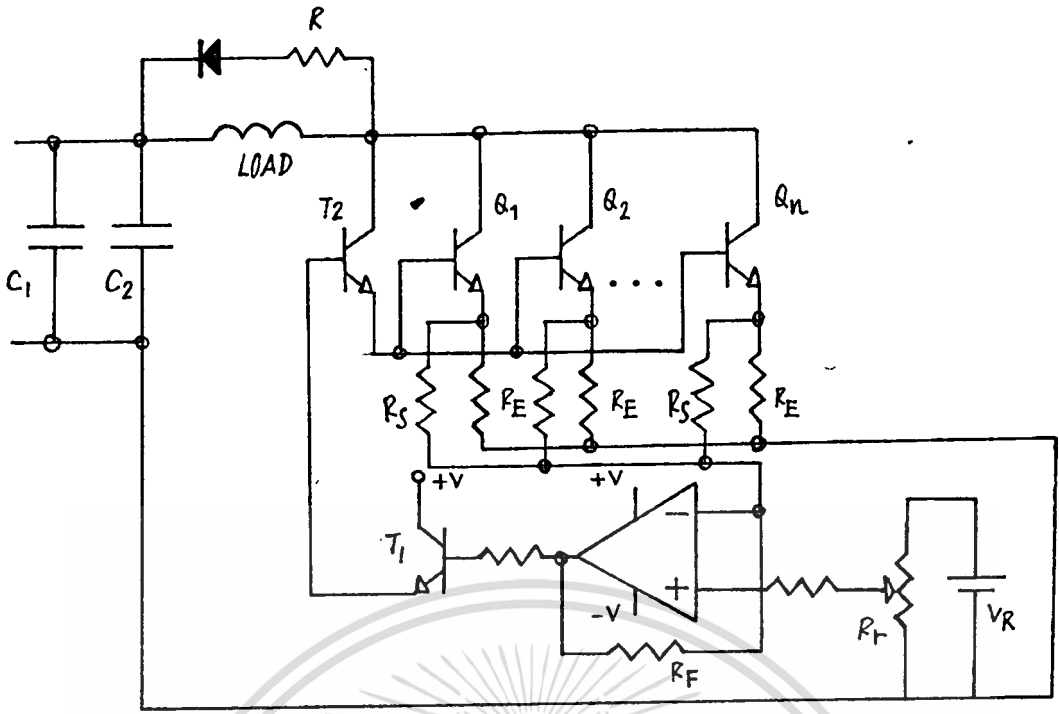
ในการออกแบบวงจรความถี่ต่ำผ่านในปัจจุบันจะใช้ตาราง เมื่อกำหนดความถี่ตัดแล้วก็จะสามารถคำนวณค่าของส่วนประกอบต่างๆในวงจรกรองได้

3.17 วงจรจ่ายกระแสแบบเสถียรภาพสูง

เสถียรภาพของสนามแม่เหล็กคงที่ ที่จ่ายให้นิวเคลียสของน้ำ มีผลโดยตรงต่อคุณภาพของสัญญาณเหนี่ยวนำอิสระ ดังนั้นวงจรจ่ายกระแสสำหรับ เครื่องสร้างสนามแม่เหล็กจึงจำเป็นต้องมีเสถียรภาพสูง โดยวงจรที่ใช้เป็นดังรูปที่ 46

การทำงานของวงจรอธิบายง่าย ๆ คือสมมติว่ากระแสที่ไหลผ่านตัวกำเนิดสนามแม่เหล็กมีค่าเปลี่ยนแปลง ( เพิ่มหรือลดจากที่ตั้งไว้ ) จะทำให้อัตราการไหลของน้ำมาบ่อนกลับในหัวจุกควบคุมมีค่าเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับศักดาอ้างอิงที่ใช้ด้วย  $R_f$  จะเกิดสัญญาณ

เอค ผิดหลักไปควบคุมกระแสเบสของทรานซิสเตอร์ ( T1-2, Q1-4 ) ในทิศทางตรงกันข้ามกับการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 46 วงจรจ่ายกระแสแรงดันที่แบบปรับค่าได้

เปลี่ยนแปลง ( การป้อนกลับแบบลบ ) ทำให้ความวากวิบขาระกับของกระแสได้

เราสามารถจะเพิ่มกระแสที่จ่ายให้วงจรด้วยการเพิ่มจำนวนทรานซิสเตอร์ (Q) ในวงจร ส่วนตัวต้านทานและไดโอดก็ขึ้นานกับขดลวดสร้างสนามแม่เหล็ก มีหน้าที่กันความเสียดายแก่วงจร ตัวเก็บประจุ C1 ( มีค่ามาก ) ทำหน้าที่ลดสัญญาณกระแสเพือม และ C2 ( มีค่าน้อย ) เพื่อลดทรานเซียนท์โวลเตจ

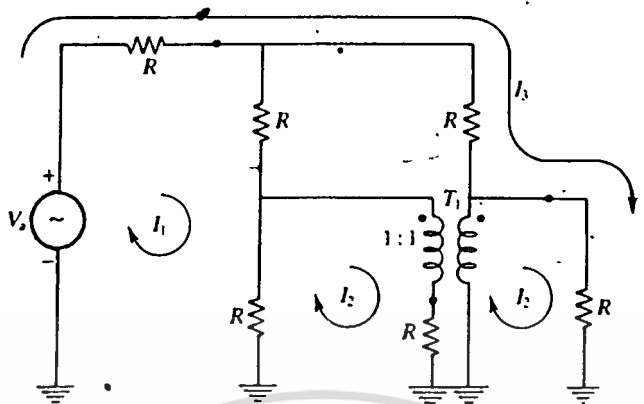
### 3.18 ไฮบริดคอมไบเนอร์ (Hybrid Combiner)

วงจรมันถูกเรียกว่าไฮบริดคอมไบเนอร์เนื่องจากใช้จุดประณธ์สมกันระหว่างตัวต้านทานบริดจ์ (bridge resistors) และหม้อแปลงซึ่งมีอัตราส่วนรอบขดลวด 1:1 ดังแสดงในรูปที่ 47

หม้อแปลง T<sub>1</sub> เป็นหม้อแปลงชนิดย่านความถี่กว้าง ขดลวดพันแบบไบไฟลาร์ (bifilar) บนแกนแบบทอรอยด์ (toroid) ซึ่งมีค่าเพอร์มีอาบิลิตีสูง (high permeability ;  $\mu_r >$

125) จากกระแสสมมติในรูป ใช้กฎของเคอร์ชอฟได้สมการแรงดันของลูปคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้สำหรับศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 47 วงจรใช้วิธีค่าคอมโพเนนต์เนอว์

$$\begin{aligned} 3RI_1 - RI_2 + RI_3 &= V_a & (42) \\ -RI_1 + 3RI_2 + RI_3 &= 0 \\ RI_1 + RI_2 + 3RI_3 &= V_a \end{aligned}$$

แก้สมการ จะได้

$$I_1 = \frac{V_a}{4R}, \quad I_2 = 0, \quad I_3 = \frac{V_a}{4R} \quad (43)$$

กระแส  $I_2$  หมายความว่าแรงดัน  $V_a$  ไม่ไปปรากฏที่พอร์ท B ซึ่งหมายถึงการแยก (isolation) ระหว่างพอร์ท A และพอร์ท B ความต้านทานซึ่งแหล่งจ่าย A มองเห็นคือ

$$\frac{V_a}{I_1 + I_3} = 2R$$

ความต้านทาน  $2R$  จะเป็นความต้านทานเอาต์พุตของแหล่งจ่าย A เท่ากับ  $R$  และความต้านทานที่พอร์ท A เท่ากับ  $R$  ดังนั้น แหล่งจ่าย A จ่ายกำลังที่จ่ายได้ (available) ทั้งหมดค่านี้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พอร์ต A กระแสที่พอร์ต C

$$I_2 + I_3 = 0 + I_3 = \frac{V_a}{4R}$$

แต่กระแสอินพุตที่พอร์ต A คือ

$$I_1 + I_3 = \frac{V_a}{4R}$$

ดังนั้นอัตราส่วนการลดทอนจากพอร์ต A ไปพอร์ต C คือ

$$r = \frac{I_1 + I_3}{I_2 + I_3} = \frac{V_a/2R}{V_a/4R} = 2$$

ซึ่งจะเห็นว่าค่าลดทอนคือ  $20 \cdot \log(2) = 6 \text{ dB}$  ถ้าเราย้ายแหล่งจ่ายจากพอร์ต A ไปพอร์ต B แล้วต่อตัวต้านทาน R ที่พอร์ต A ก็จะพบว่าไม่ปรากฏสัญญาณจากแหล่งจ่ายพอร์ต B ที่พอร์ต A และสัญญาณจากพอร์ต B จะผ่านไปพอร์ต C โดยถูกลดทอนลง 6 dB เช่นกัน ไซบริดคอมไบน์เนอร์สามารถใช้รวมสัญญาณจากพอร์ต A และพอร์ต B ให้ปรากฏที่พอร์ต C โดยแหล่งจ่ายที่พอร์ต A และพอร์ต B จะไม่มีผลรบกวนซึ่งกันและกัน ในทางปฏิบัติอัตราการแยกระหว่างพอร์ต A และ B จะประมาณ 30-40 dB ถ้าเราให้สัญญาณอินพุตที่พอร์ต C และต่อตัวต้านทาน R ที่พอร์ต A และพอร์ต B สัญญาณจากพอร์ต C จะปรากฏที่พอร์ต A และพอร์ต B โดยถูกลดทอนลงพอร์ตละ 6 dB ไซบริดคอมไบน์เนอร์สามารถใช้แบ่งกำลังงาน (power divider) จากพอร์ต C ไป A และ B เท่า ๆ กัน

3.19 วงจรสร้างสัญญาณพัลส์แบบโปรแกรมได้

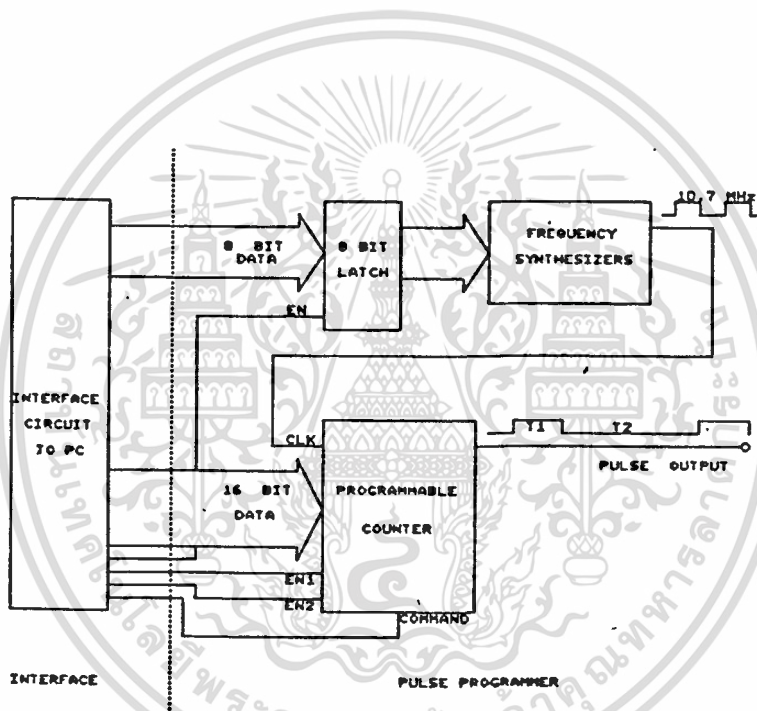
วงจรสร้างสัญญาณพัลส์แบบโปรแกรมได้หรือพัลส์โปรแกรมเมอร์(Pulse programmer)

เป็นส่วนควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์ว่าจะให้พัลส์นั้นมีความกว้างและ-duty cycle (การคำนวณค่า) ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นเท่าไร และสามารถกำหนดได้ว่าจะให้สร้างสัญญาณพัลส์แบบต่อเนื่องหรือสร้างสัญญาณพัลส์เพียงลูกเดียว(Single Pulse)โดยเราสามารถควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์ได้จากโปรแกรมโดยตรง พัลส์ที่ได้จะนำไปมอดูเลต (Modulate) กับสัญญาณความถี่วิทยุ ซึ่งจะส่งเข้าไปในโพรบต่อไป

พัลส์โปรแกรมเมอร์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆ 3 ส่วนคือ

1. วงจรอินเตอร์เฟส (Interface Circuit)
2. วงจรนับแบบโปรแกรมได้ (Programmable Counter)
3. โปรแกรมควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์



รูปที่ 48 แสดงส่วนของวงจรสร้างสัญญาณแบบโปรแกรมได้และวงจรอินเตอร์เฟส

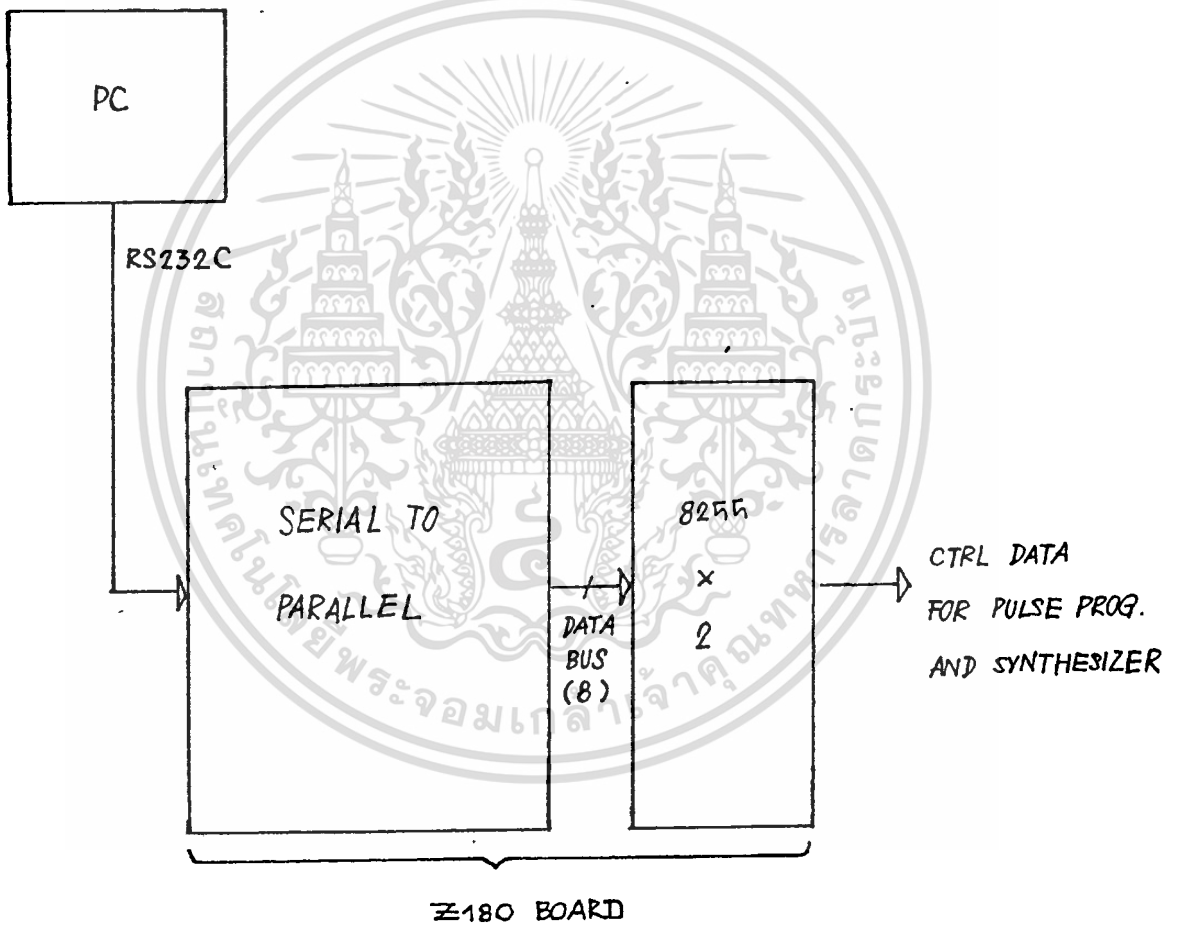
### 1. วงจรอินเตอร์เฟส (Interface Circuit)

วงจรอินเตอร์เฟสที่ใช้ ใช้วิธีการตีโค้ดแอดเดรสโดยใช้สวิทช์เลือกทั้งนี้เพื่อให้งจรที่ออก

เอกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานอื่นๆ ในการอ่านและเขียนข้อมูลลงบนพอร์ทัล I/O ได้เช่นด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากวงจรไอซี 74LS688 ทางหน้าที่ในการเปรียบเทียบค่าบนแอดเดรสบัส(A<sub>0</sub> ถึง A<sub>7</sub>)ว่ามีค่าตรงกับค่าที่เราตั้งไว้ที่สวิทช์เลือกหรือไม่และถ้าหากค่าตรงกันเอาท์พุทของ 74LS688 ที่ขา 19 เป็นลอจิก 0 ทำให้ 74LS138 ถูกอินาเบล 74LS138 จะให้เอาท์พุทตามค่าแอดเดรส A<sub>0</sub> ถึง A<sub>2</sub> ถ้า A<sub>0</sub>,A<sub>1</sub> และ A<sub>2</sub> เป็นลอจิก 0,0 และ 1 ตามลำดับ จะทำให้ 74LS373 แลทช์ข้อมูลบนค่าบัสไว้ และถ้า A<sub>2</sub> เป็นลอจิก 0 จะเป็นการเลือกส่งข้อมูลผ่านทาง RS232

วงจรอินเทอร์เฟซแสดงดังรูปที่ 49

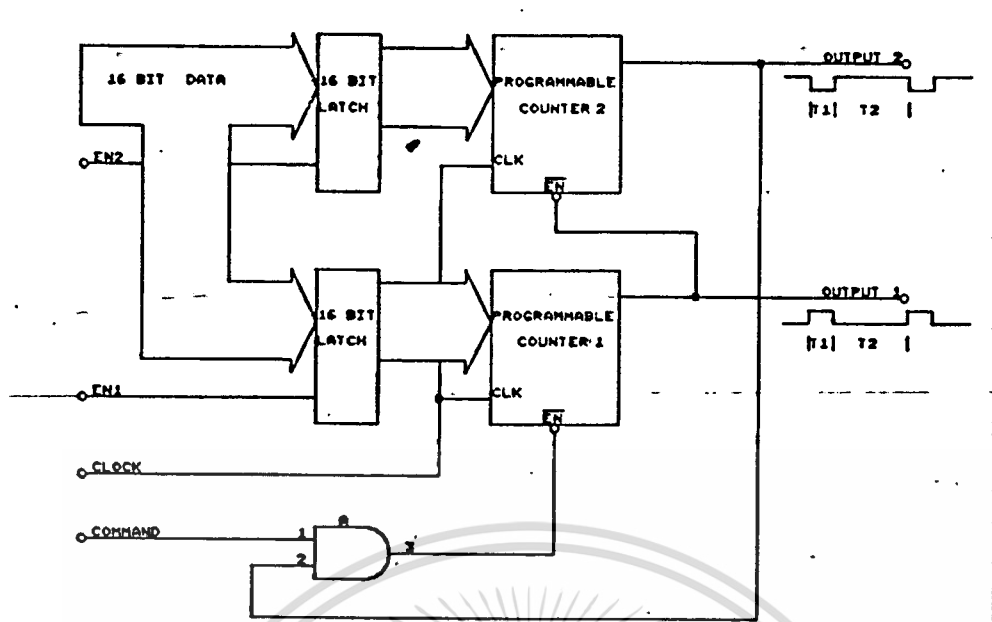


รูปที่ 49 วงจรอินเทอร์เฟซ

2. วงจรนับแบบโปรแกรมได้ (Programmable Counter)

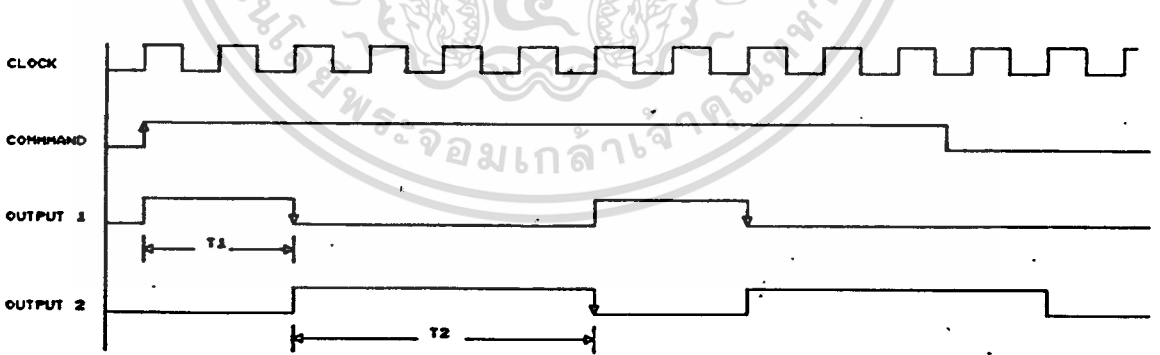
วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ สร้างขึ้นได้จากวงจรมินิโปรแกรมได้ 2 วงจรโดยมีหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 50 หลักการของวงจรสร้างสัญญาณพัลส์แบบโปรแกรมได้

วงจรนับตัวบนจะเป็นตัวกำหนดค่าเวลา  $T_1$  และวงจรนับตัวล่างจะเป็นตัวกำหนดค่าเวลา  $T_2$  ส่วน Command เป็นตัวควบคุมว่าจะให้วงจรสร้างสัญญาณพัลส์ขึ้นหรือไม่และสามารถเขียนผังเวลา (Timing Diagram) ของวงจรถับแบบโปรแกรมได้ ได้ดังรูปที่ 51



รูปที่ 51 แสดงผังเวลาของวงสร้างสัญญาณพัลส์แบบโปรแกรมได้

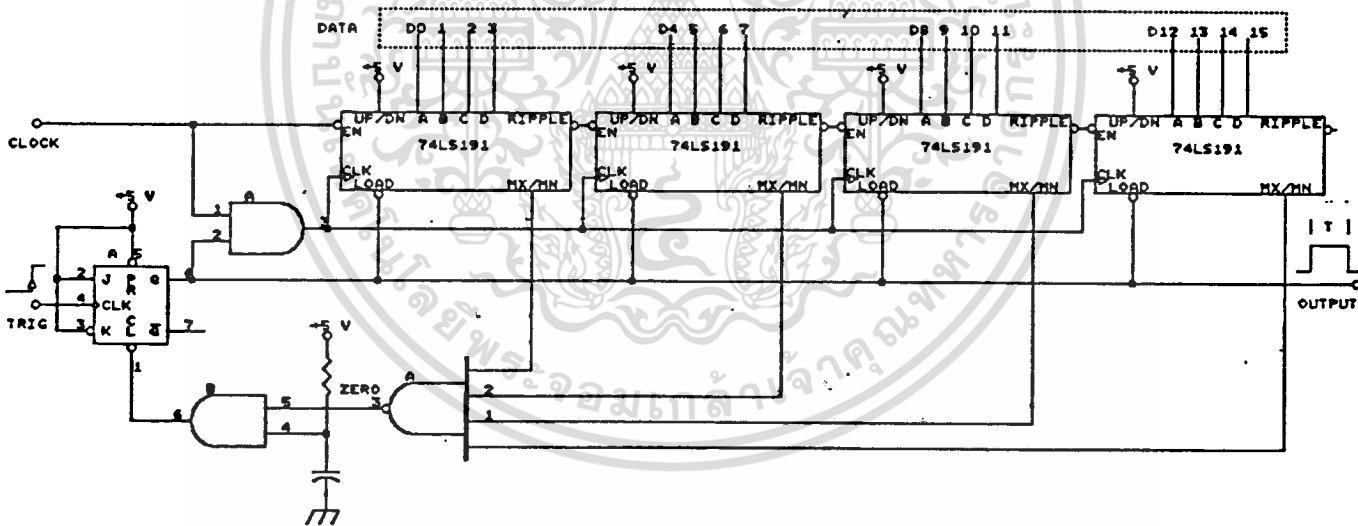
จากผังเวลาจะเห็นว่าค่าเวลา  $T_1$  และ  $T_2$  ขึ้นอยู่กับคาบของสัญญาณ CLOCK และในที่นี้สัญญาณ CLOCK จะมีความถี่เท่ากับสัญญาณวิทยุที่ใช้คือ 5.35 MHz เราจึงสามารถคำนวณ  $T$  และ  $T_2$  ได้จาก

$$T_1 = N_1 / 10.7 \times 10^6 \text{ วินาที}$$

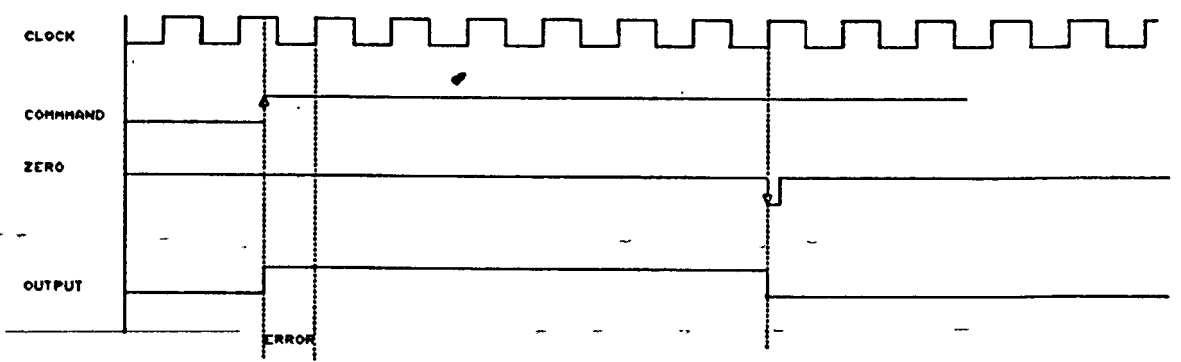
$$T_2 = N_2 / 10.7 \times 10^6 \text{ วินาที}$$

เมื่อ  $N_1$  และ  $N_2$  เป็นจำนวนที่โปรแกรมไว้จำนวนนับตัวที่ 1 และตัวที่ 2 นับ ตามลำดับใน  
 ช่วงเวลา  $T_2$  ซึ่งเป็นช่วงที่เราจะทำการตีทดสอบดูว่านับ เป็นช่วงเวลาริแลคเซชั่น (Relaxa-  
 tion Time) ของโปรตอนซึ่งมีค่ามากพอสมควรจึงใช้ช่วงเวลานับขนาด 16 หลัก (ดังนั้นจึงกำหนด  
 $T_1$  และ  $T_2$  ได้ถึง  $6.1 \times 10^{-3}$  วินาที ซึ่งเพียงพอสำหรับเวลาริแลคเซชั่นของโปรตอน

ในการออกแบบวงจรที่สามารถโปรแกรมจำนวนที่นับได้ (Programmable Counter) ทำ  
 ได้ดังรูปที่ 52



รูปที่ 52 วงจรนับแบบโปรแกรมได้



รูปที่ 53 ผังเวลาของวงจรมับแบบโปรแกรมได้

จากวงจรจะเห็นว่าใช้ไอซี 74LS191 ซึ่งเป็นไอซีวงจรมับแบบโปรแกรมได้ว่าจะให้มับได้สูงสุดเท่าไร และสามารถกำหนดให้เป็นวงจรมับขึ้นหรือมับลงก็ได้ โดยในที่นี้กำหนดให้เป็นวงจรมับลงโดยหลักการการทำงานของวงจรถือเมื่อมีสัญญาณ Command เข้ามาวงจรถือจะเริ่มนับถอยหลัง โดยเริ่มจากค่าที่เรากำหนดไว้ที่  $D_0-D_{15}$  เมื่อนับมาถึง 0000H จะทำให้เอาต์พุตที่ขา .MX/MN ของไอซี 74LS191 เป็นลอจิก 1 ทุกตัวทำให้ได้สัญญาณ ZERO เป็นลอจิก 0 ไปรีเซตฟลิปฟลอป เราจึงได้สัญญาณเอาต์พุตที่มีช่วงเวลาเท่ากับ N เท่าของคาบเวลาของสัญญาณ CLOCK โดย N เป็นจำนวนที่เรากำหนดไว้ที่  $D_0-D_{15}$  เพื่อกำหนดค่าที่ต้องการนับสูงสุดให้วงจรมับ

จากผังเวลาจะเห็นว่าคาบเวลาของสัญญาณเอาต์พุตอาจจะมีค่ามากกว่า N เท่าของคาบเวลาของสัญญาณ CLOCK โดย

$$N/f_{\text{clock}} < T < (n+1)/f_{\text{clock}}$$

เมื่อ T : ช่วงเวลาที่สัญญาณเอาต์พุตเป็นลอจิก 1

$f_{\text{clock}}$  : ความถี่ของสัญญาณ CLOCK

N : จำนวนที่ตั้งไว้ที่  $D_0-D_{15}$

แต่ถ้าหากนำวงจรมับนี้ไปประกอบเป็นวงจรสร้างสัญญาณพัลส์ที่สมบูรณ์ดังรูปที่ 48 แล้วพัลส์ที่ได้จะมีค่าเวลาผิดพลาดเพียงพัลส์แรกเท่านั้น ส่วนพัลส์ถัดๆ ไปจะไม่มีเวลาผิดพลาดนี้เกิดขึ้น

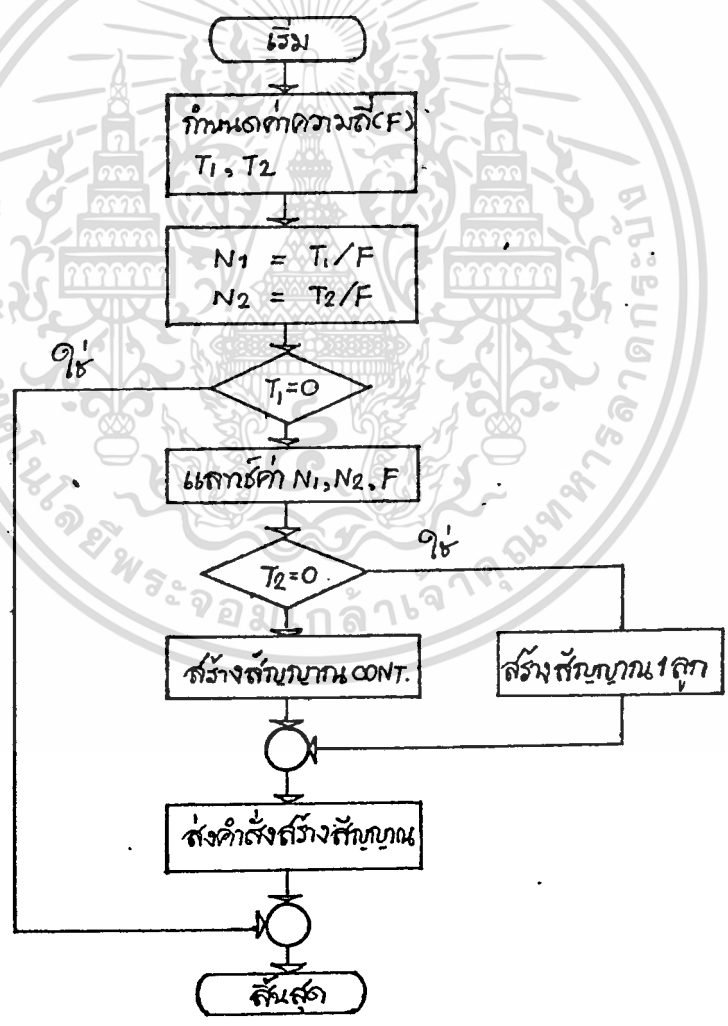
เนื่องมาจากวงจรมับทั้ง 2 ตัว จะทำงานเชิงโคจรกันทำให้ไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นประโยชน์ด้านการคำนวณที่มากกว่าคือ การที่วงจรมับทั้งสองตัวทำงานร่วมกันจะทำให้ไม่มีข้อผิดพลาดเกิดขึ้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3. โปรแกรมควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์

โปรแกรมควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์ทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลและคำสั่งให้กับวงจรนับแบบโปรแกรมได้ โดยผ่านทางวงจรถอนเฟส ข้อมูลที่ส่งไปจะเป็นตัวกำหนดค่าเวลา  $T_1$  และ  $T_2$  ของสัญญาณพัลส์ และคำสั่งที่ส่งไปจะเป็นคำสั่งที่สั่งให้วงจรถอนเฟสเริ่มสร้างหรือหยุดสร้างสัญญาณพัลส์ จากวงจรถอนเฟสแบบโปรแกรมได้ จะเห็นว่าเราต้องส่งสัญญาณไปให้แลตซ์แต่ละตัวทำการแลตซ์ข้อมูลไว้ งานนี้เลือกใช้อิซีแลตซ์เบอร์ 74LS373 ซึ่งจะแลตซ์ข้อมูลเมื่อขงอินเวปเป็นลอจิก 1 ดังนั้นโปรแกรมควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์จึงต้องส่งลอจิก 1 ไปให้กับแลตซ์แต่ละตัวทำการแลตซ์ข้อมูลบนคาต้าบัสไว้ แล้วจึงทำการดีสเอเบิลแลตซ์ตัวนั้นและอีนาเบิลแลตซ์ตัวต่อไป

โปรแกรมควบคุมการสร้างสัญญาณพัลส์ มีลำดับขั้นตอนการทำงานตามโฟลว์ชาร์ตดังนี้

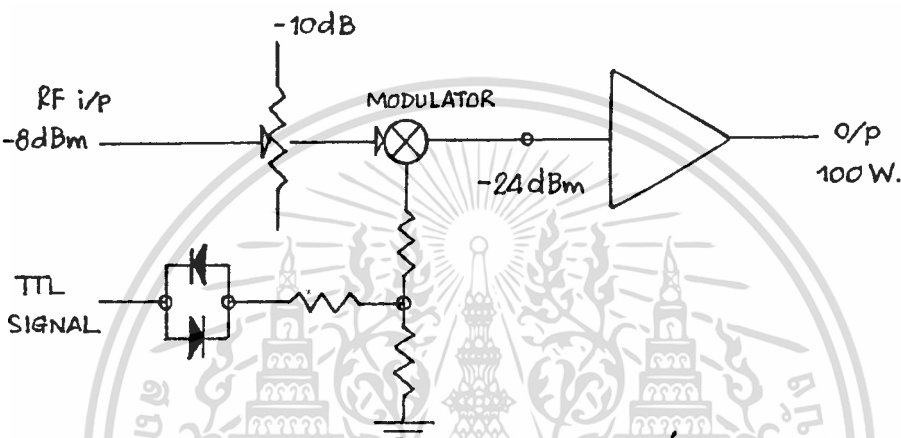


บทที่ 4

การออกแบบวงจร

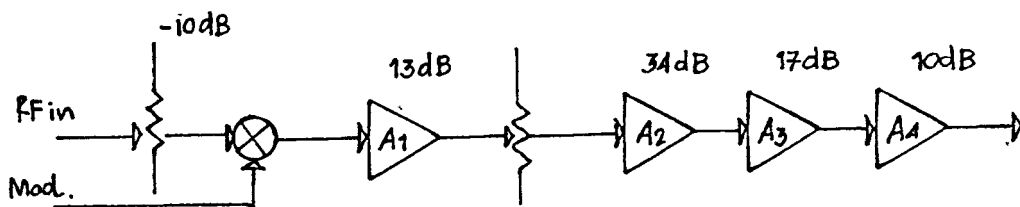
4.1 วงจรขยายสัญญาณสำหรับระบบส่งอาร์เอฟพัลส์

สัญญาณอินพุทของมอดูเลเตอร์ขนาด  $-8 \text{ dBm}$  ผ่านวงจรถอดทอนขนาดสัญญาณลง  $10 \text{ dB}$  จะเป็นอินพุทของมอดูเลเตอร์  $-18 \text{ dBm}$  ถ้าคืบเบิลบาลานซ์มอดูเลเตอร์มีการสูญเสียสัญญาณ  $-6 \text{ dB}$  ดังนั้นเอาท์พุทของวงจรมอดูเลเตอร์จะมีขนาด  $-24 \text{ dBm}$



รูปที่ 1 ระบุคืบเบิลบาลานซ์ของระบบส่งอาร์เอฟพัลส์

วงจรถยายสัญญาณอาร์เอฟพัลส์มีเอาท์พุทขนาด  $100 \text{ วัตต์ (RMS)}$  หมายความว่าวงจรถยายทั้งหมดต้องการอัตราขยายกำลังกว่า  $25 \text{ ล้านเท่า (74 dB)}$  เราจะแบ่งวงจรถยายสัญญาณเป็น  $4$  ส่วน และเพื่อที่จะควบคุมกำลังงานของสัญญาณพัลส์ที่เอาท์พุทของวงจรถยายกำลังภาคสุดท้ายซึ่งจ่ายให้วงจรมะเชิงขั้วของขดลวดเป็นเอ็มอาร์ จึงมีวงจรถอดทอนขนาดสัญญาณแบบปรับได้เป็นระดับ (Step - Attenuator) วางคั่นอยู่ระหว่างภาคของวงจรถยาย โดยจะคั่นอยู่ระหว่างวงจรถยายสัญญาณภาคแรกและภาคที่สอง เพื่อที่ค่าลดทอนขนาดสัญญาณจะไม่ต้องรับกำลังงานสูญเสียมากนัก

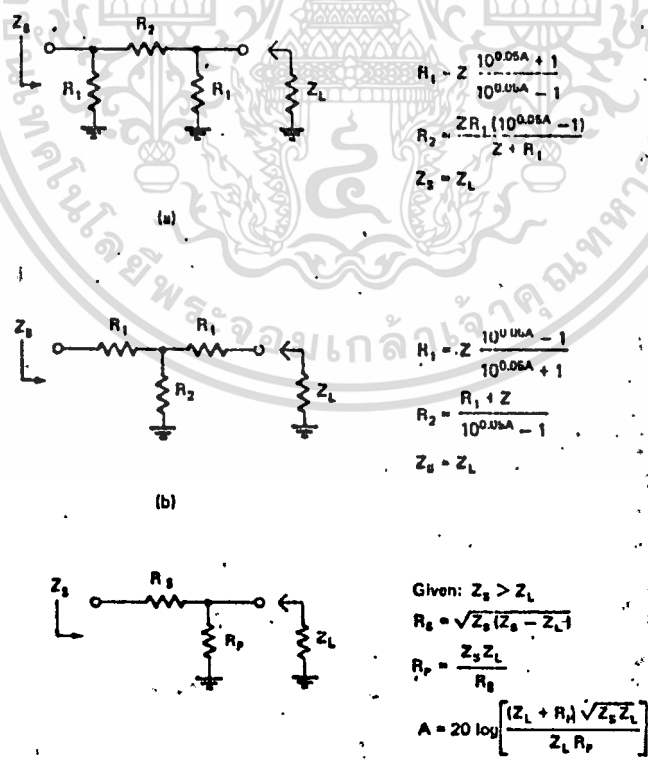


เอกสารนี้เป็น **รูปที่ 2** ที่วงจรถยายสัญญาณและลดทอนสัญญาณเท่านั้น ไม่นับญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2 วงจรขยาย(A<sub>4</sub>)เป็นวงจขยายกำลังภาคสุดท้าย (Power Amplifier), A<sub>3</sub> เป็นวงจขยายขับวงจขยายกำลัง (Driver Amplifier) และ A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub> เป็นวงจขยายสัญญาณย่านความถี่กว้างมีย่านความถี่ประมาณ 200 MHz แต่ระบบจะถูกจำกัดย่านความถี่โดย A<sub>3</sub>, A<sub>4</sub> ซึ่งมีค่า 1.5-30 MHz วงจขยายสัญญาณทั้งหมดเป็นแบบเชิงเส้น(Linear Amplifier) ซึ่ง A<sub>3</sub>,A<sub>4</sub> เป็นวงจขยายกำลัง และ A<sub>1</sub>,A<sub>2</sub> เป็นวงจขยายสัญญาณขนาดเล็ก โจรงงานนี้ใช้ป็นวงจรวมวิทยุสื่อสารรูป

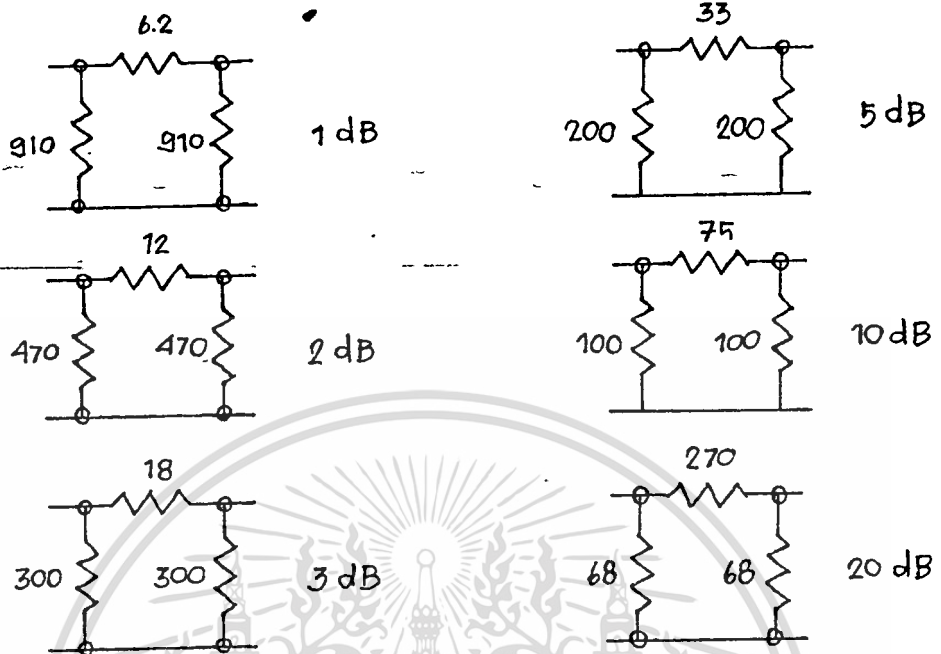
4.2 วงจรลดทอนสัญญาณ

วงจลดทอนสัญญาณในโจรงงานนี้ มีหน้าที่ควบคุมกำลังงานที่เอาต์พุทของวงจขยายกำลังภาคสุดท้าย วงจลดทอนสัญญาณที่ใช้ยู่มี 3 แบบ คือ แบบพาย (Pi), แบบที (Tee) และแบบแอล (L pad)วงจรูปปี่และพายสำหรับโหลดและแหล่งกำเนิดสัญญาณที่มีอิมพีแดนซ์เท่ากัน ส่วนแบบแอลใช้กับแหล่งกำเนิดสัญญาณและโหลดที่มีอิมพีแดนซ์ต่างกัน วงจรงทั้ง 3 แบบแสดงในรูปที่ 3 การเลือกใช้แบบใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในการสร้างและใช้งาน



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3 ที่วงจวลดทอนสัญญาณทั้ง 3 แบบศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการนี้เลือกใช้งานจวบแบบพายรวมกับสวิทช์โยกแบบสองทาง DPDT ( Double Pole Double Throw ) ขนาดการลดทอนที่ใช้งานได้คือ 1,2,3,5,10,20 dB ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรลดทอน

4.3 การออกแบบวงจรสังเคราะห์ความถี่ [9]

คุณสมบัติของระบบสังเคราะห์ความถี่ที่ต้องการ

- ความถี่เอาต์พุตของ VCO คือ 190-240 MHz ซึ่งจะนำความถี่เอาต์พุตหลังจากผ่าน วงจรหารความถี่ (20) คือ 9.5-12 MHz
- ความกว้างของช่วงความถี่ ซึ่งคำนวณในรูปทำให้ VCO เปลี่ยนความถี่ไปเท่ากับความถี่ อ้างอิงคือ 4 KHz และจะเป็น 200 Hz สำหรับความถี่ที่หารลง 20 แล้ว
- เวลาที่ใช้ในการสวิตช์ระหว่างการเปลี่ยนช่วงความถี่ น้อยกว่า 15 ms
- โอเวอร์ชูทน้อยกว่า 20%

จากคุณสมบัติที่ต้องการจะมีขั้นตอนการออกแบบคือ

1.  $f_{ref} = f_{in} = 4 \text{ KHz}$
2.  $N_{max} = \frac{f_{max}}{f_{ref}} = \frac{240 \text{ MHz}}{4 \text{ KHz}} = 60,000$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$N_{\min} = \frac{f_{\min}}{f_{\text{ref}}} = \frac{190 \text{ MHz}}{4 \text{ KHz}} = 47,500$$

ทั้งนี้เมื่อใช้ปริสเกลเลอร์(หาร 64)ค่าทาวสูงสุด ( $N_{\max}$ ) ของวงจรรวมที่ใช้สังเคราะห์ความถี่คือ 938 และค่าทาวน้อยที่สุดของวงจรรวมที่แบบโปรแกรมได้คือ 724

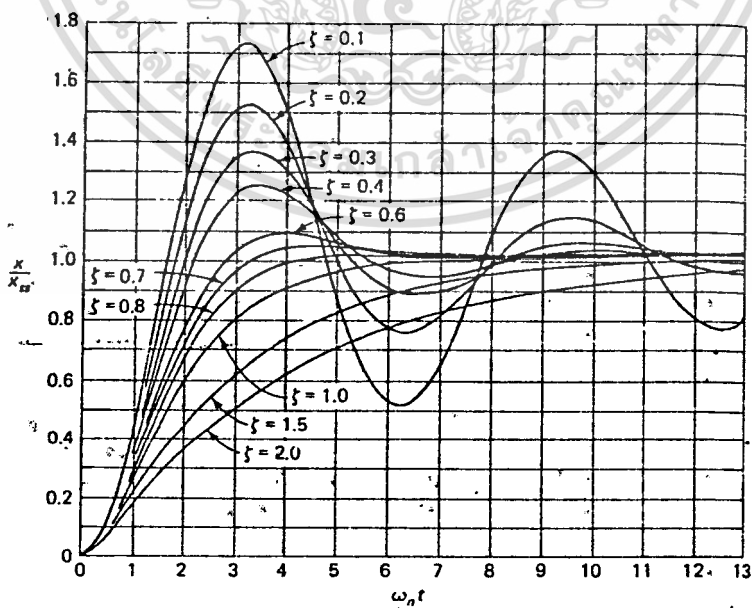
3. ย่านความถี่ซึ่งจูนได้ของวงจรวจร VCO จะต้องเลยย่านความถี่ที่ต้องการเล็กน้อย เพื่อให้เหมาะสมกับคุณสมบัติค่านโอเวอร์ทูนที่ต้องการ ในการนี้ความถี่ของ VCO จะต้องจูนได้กว้างกว่าย่านความถี่ที่ต้องการอย่างน้อย 20% ดังนั้น ย่านความถี่จริงซึ่ง VCO จะต้องทำได้คือ

$$f_o \text{ max} > 240 + 0.2(50) = 250 \text{ MHz}$$

$$f_o \text{ min} < 190 - 0.2(50) = 180 \text{ MHz}$$

วงจรวจร VCO จะต้องทำงานได้จาก 180-250 MHz เพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติตามต้องการ อัตราส่วนความถี่สูงสุดต่อความถี่ต่ำสุด ( 1.4 ) ของ VCO จะต้องสัมพันธ์กับอัตราส่วนการจูน (Tuning Ratio) ของวาริแคปไดโอด ที่ใช้

4. จากรูปที่ 5 ผลตอบสนองอินพุตเปลี่ยนระดับ(Step response)ของระบบอันดับสอง แบบที่ 2 ถ้าแอมป์นิ่งแฟคเตอร์ของระบบน้อยกว่า 0.8 จะทำให้เกิดโอเวอร์ทูนน้อยกว่า 20%



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 5 ผลตอบสนองอินพุตเปลี่ยนระดับของระบบแบบที่ 2 อันดับสอง ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

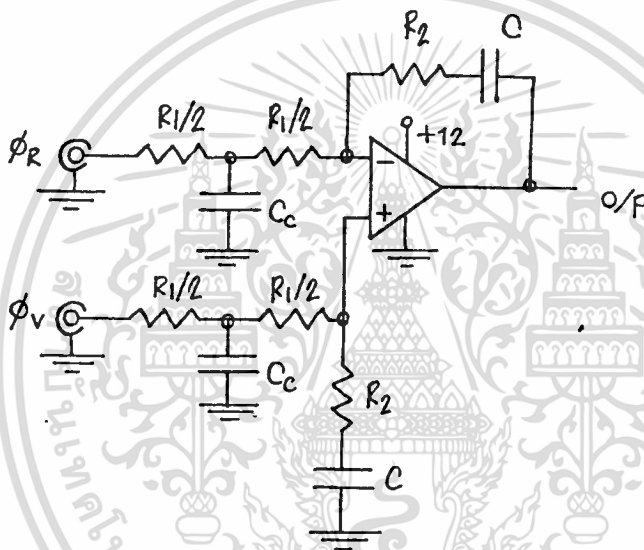
5. จากรูปที่ 5 โอเวอร์ชูทที่ค่า  $\zeta = 0.8$  จากความถี่ธรรมชาติของลูปจะคำนวณจากเวลาซึ่งใช้ในการสืบทอดที่ต้องการโดย

$$W_n = \frac{Wnt}{t}$$

ซึ่ง  $t$  ที่ต้องการคือ 15 ms ดังนั้น

$$W_n t = 4.5 \quad \text{จะได้} \quad W_n = 300 \text{ เรเดียน}$$

6. คำนวณอุปการณของลูปฟิลเตอร์ วงจรลูปฟิลเตอร์เป็นดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 วงจรกรองแบบแอกทิฟ

$$T_1 = R_1 C = \frac{(K_d \cdot K_o)}{(N \max W_n^2)}$$

$$T_2 = R_2 C = 2\zeta_{\min} / W_n$$

โดยเกนเฟคเตอร์  $K_d$  ของ เฟสดีเทคเตอร์ คือ

$$K_d = \frac{V_{DD}}{2\pi} = 1.9$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของ VCO ประมาณ  $29.28 \times 10^6$  เรเดียน/วินาที/โวลต์ ดังนั้น การค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T_1 = R_1 C = \frac{1.9 \times 29.28 \times 10^6}{60000 \times (300)^2} = 0.0103$$

$$T_2 = R_2 C = \frac{2 \times (0.8)}{300} = 0.0053$$

ถ้าให้  $C = 0.39 \mu F$  จะได้  $R_1 = 27 k\Omega$  และ  $R_2 = 15 k\Omega$

เพื่อเพิ่มความสามารถของอุปกรณ์เมื่ออินพุตมีลักษณะเป็นพัลส์ที่แคบมากๆ (ประมาณ 60 nS เมื่อ  $\phi_v = \phi_r$ ) จะแยก  $R_1$  เป็นสองตัวแล้วต่อคาปาซิเตอร์ลงกราวด์ ซึ่งจะช่วยให้คุณสมบัติการลดทอนเชิงเส้นดีขึ้น ความถี่ตัด (Cut off) ของวงจรที่เพิ่มขึ้นมาจะต้องมากกว่า  $\omega_n$  5-10 เท่า และเป็น  $\frac{1}{5} - \frac{1}{10}$  ของความถี่อ้างอิงของออป (  $f_R$  ) เช่นกัน จากรูปที่ จะได้

$$\omega_c = \frac{4}{R_1 C_C}$$

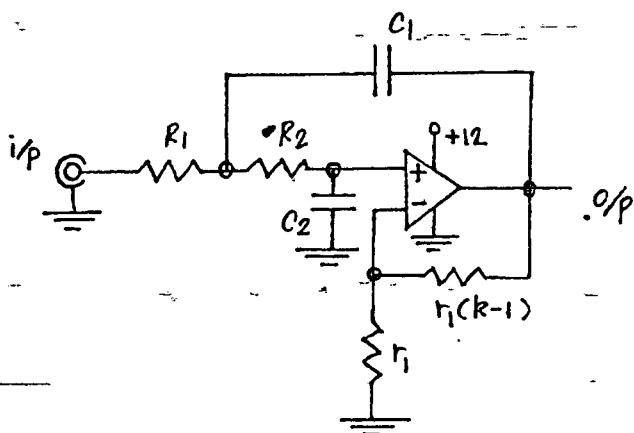
ถ้าให้  $\omega_c = 1500$  จะได้  $C_C = 0.1 \mu F$

7. การลดทอนไซด์แบนด์ที่ไม่ต้องการของ VCO ทำได้โดยเพิ่มวงจรรองความถี่ต่ำผ่านเข้าไปหลังอุปกรณ์ ถ้าเป็นวงจรแบบแอกทิฟ อุปกรณ์แอกทิฟ ที่ใช้ต้องเป็นแบบสมมาตร ขั้วอินพุต อย่างไรก็ดีตามฟิลเตอร์ใดๆ ที่เพิ่มเข้าไปในรูป จะทำให้เกิดการเลื่อนเฟส และเฟสที่ถูกละเลียงจะต้องไม่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ นอกจากนี้ฟิลเตอร์ที่เพิ่มเข้าไปจะทำให้อันดับของระบบมากกว่า 2 ซึ่งไม่สามารถวิเคราะห์การทำงานได้ง่าย

วงจรรองความถี่ต่ำผ่านหลังจากอินทิเกรเตอร์ที่ใช้ในโครงงานนี้เป็น Saraga design มีลักษณะดังรูปที่ 7

ในการออกแบบวงจรด้วยวิธีการของ Saraga [22] สามารถคำนวณค่าต่างๆในสมการดังนี้

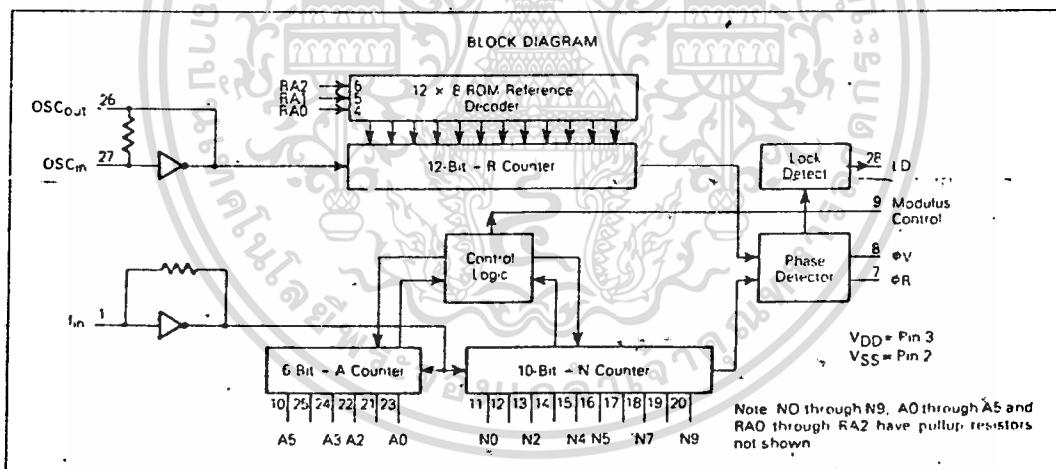
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ © 2013 โดย R1 = 1/(Qp\*wp) , R2 = 1/(Q3\*wp) และ k = 4/3  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านของ Sallen-Key

วงจรถ่ายความถี่ความถี่ในช่วงรวมขนาดใหญ่เบอร์ MC145152P1 มีโครงสร้างภายใน

ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างภายในของ MC145152P1

ตัวหาร A คือ  $N_{mc}$  ในบทที่ 3 โดย A มีขนาด 0-63 , ตัวหาร N คือ  $N_{pc}$  มีขนาด 3-1023 สำหรับวงจรมี 12 บิต R ท้าหน้าที่สร้างควมถี่อ้างอิงให้ PD วงจรมี R มีขนาด

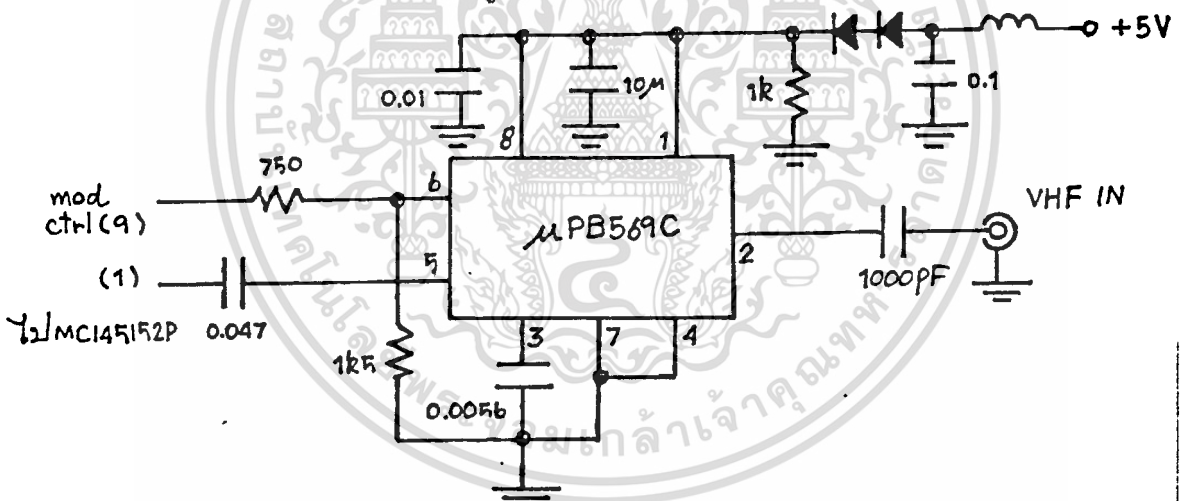
ของตัวหารขึ้นอยู่กับอินพุต RAO-RA2 ดังแสดงในตารางที่ 1 ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Reference Address Code			Total Divide Value
RA2	RA1	RA0	
0	0	0	8
0	0	1	64
0	1	0	128
0	1	1	256
1	0	0	512
1	0	1	1024
1	1	0	1160
1	1	1	2048

ตารางที่ 1

ความถี่ของ VCO = (N x P + A) \* f<sub>R</sub> โดย N และ A เป็นตัวหารภายใน MC145152P P เป็นตัวหารแบบดูอัลโมดูลัส ตัวหาร A สามารถมีค่าได้จาก 0 ถึง P-1 วงจรนี้จะทำงานได้ถูกต้องในลักษณะดูอัลโมดูลัส เนื่องจาก A<sub>max</sub> = 63 จึงใช้ดูอัลโมดูลัสขนาด 64/65 ถ้าใช้ดูอัลโมดูลัสค่าน้อยกว่านี้ จะต้องให้ค่า A<sub>max</sub> = P-1

ในโครงงานนี้ใช้ตัวหารดูอัลโมดูลัส เบอร์ PB 569C หาร 64/65 แรงดันทำงานปกติ 2.9-5.5 Volt วงจรที่ใช้แสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 วงจรหารแบบดูอัลโมดูลัส

ไดโอด IN4148 จะลดแรงดัน +5 Volt ลงเป็น 3.7 Volt โดยตัวต้านทาน 750 และ 1.5 k จะแบ่งแรงดันควบคุมตัวหารจากขา 9 ของ MC 145152 ลงให้เหมาะกับ PB 569C เอาท์พุทของตัวหารที่ขา 2 จะเชื่อมต่อกับ MC145152P คัปคาปาซิเตอร์ 0.047 F เนื่องจากเป็นสัญญาณขนาดเล็ก

การใช้ตัวหารคล้ายแบบดูอัลโมดูลัส มีข้อพิจารณาคือ

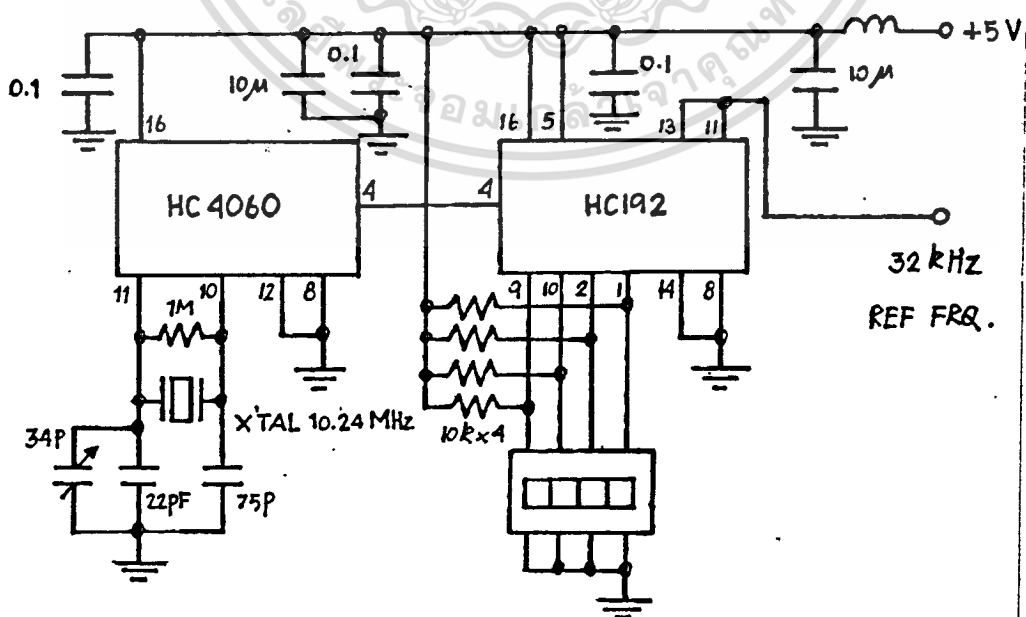
เอกสารนี้เป็นเอกสารความถี่สูงสุดของ VCO หารด้วย P (ตัวหารของดูอัลโมดูลัส) นี้จะต้องไม่เกินความถี่ที่ต่ำกว่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูงสุดที่ตัวหารของวงจรรวมซึ่งทำหน้าที่การความถี่แบบโปรแกรมได้ ทำได้ซึ่งมีค่าประมาณ 15MHz ของ MC145152P

- คาบเวลาของความถี่ของ VCO หัวด้วย P จะต้องมากกว่าผลรวมของเวลาต่อไปนี้
- ก. เวลาหน่วง (Propagation delay) ของตัวปริสเกลดูอัลโมดูสส์
- ข. เวลาตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมการหารของตัวปริสเกลดูอัลโมดูสส์
- ค. เวลาที่ตัวหาร A ( $Nmc$ ) - 1 ใช้เมื่อมีความถี่อินพุทจนกระทั่งให้สัญญาณควบคุมตัวหาร เอาท์พุท (ที่ขา 9)

#### 4.4 วงจรสร้างความถี่อ้างอิง

วงจรสร้างความถี่อ้างอิงประกอบด้วยวงจรผลคูณความถี่ควบคุมด้วยคริสตอลซึ่งสร้างจากวงจรถ่ายอินเวอร์เตอร์เตอร์และวงจรถ่ายความถี่ วงจรรวมที่ใช้คือ 74HC4060 ภายในประกอบด้วยอินเวอร์เตอร์เกทสำหรับผลคูณความถี่ร่วมกับคริสตอลและวงจรถ่ายความถี่แบบไบนารี ความถี่อ้างอิงที่ป้อนเป็น  $f_R$  ของ PD คือ 4KHz คริสตอลใช้ความถี่ 10.24 MHz จึงต้องใช้ตัวหารความถี่หารลง 2560 เท่า โดยตัวหาร 8 อยู่บนวงจรรับ 12 บิต R ของ MC145152P ตัวหาร 64 อยู่ใน 74HC4060 สำหรับตัวหาร 5 จะสร้างจากวงจรรับสิบ (decade counter) เบอร์ 74HC192 คริสตอลควบคุมความถี่ที่ใช้เป็นชนิดโหมดขนาน เอปิก้า (parallel mode AT cut) โหลดคิงคาปาซิเตอร์ 30 PF



เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5 การออกแบบวงจรมายกกำลังเชิงเส้น

คุณสมบัติของวงจรมายกกำลังที่ต้องการมีดังนี้

- อุปกรณ์แอกทิฟ MRF421 (20 วัตต์) และ MRF433 (160 วัตต์)
- แหล่งจ่ายไฟ 12 โวลท์
- ประสิทธิภาพ มากกว่า 35 เปอร์เซ็นต์
- สัมประสิทธิ์การสะท้อนทางค่านินทูล น้อยกว่า -2:1
- เรสพอนส์ต่อสัญญาณสเตป มีโอเวอร์ชูทไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์
- ความเพี้ยนแบบอินเทอร์มอด ไม่เกิน -30 dB (ที่กำลังสูงสุด 20 วัตต์และ 160 วัตต์)

ส่วนคุณสมบัติของวงจรมายกกำลังเกี่ยวกับอัตราขยายกำลังสมำเสมอในช่วงความถี่ที่ใช้งานของวงจรมายกกำลังจะมีความสำคัญในโครงการนี้เท่าใดนัก เนื่องจากการที่จะทำให้อัตราขยายสมำเสมอจำเป็นต้องอาศัยการป้องกันกลับแบบลบ แต่จะทำให้วงจรมายกกำลังมีเรสพอนส์ต่อสัญญาณสเตปช้าซึ่งไม่ใช่ที่ต้องการและถ้าความถี่ของสัญญาณของสัญญาณกลับมีค่ามาก ( อาจเนื่องมาจากเลย์เอาต์ของแผ่นวงจรมายกกำลังไม่ดี ทำให้ในการออกแบบทั่วไปจะกำหนดค่าในการป้องกันกลับมีค่าไม่เกิน 5 dB หรือ ด้วยความตั้งใจของผู้ออกแบบที่ใส่ค่าเกินย่นกว่า เพื่อช่วยให้อัตราขยายของวงจรมายกกำลังสมำเสมอขึ้น ) จะทำให้เรสพอนส์ต่อสัญญาณสเตปมีโอเวอร์ชูทสูง เนื่องจากวงจรมายกกำลังมีเสถียรภาพน้อยลง ( เฟสของสัญญาณที่นำมาป้องกันกลับมีค่าต่างจาก 180 องศาทำให้เฟสมาร์จินของวงจรมายกกำลังลดลง )

วงจรมายกกำลังภาค 20 วัตต์ มีวงจรมายกกำลังรูปที่ 11

จุดสำคัญในการเลือกวงจรมายกกำลังคั่นคือเนื่องจากวงจรมายกกำลังนี้ยังมีกำลังค่อนข้างต่ำ ดังนั้นส่วนของวงจรมายกกำลังกระแสเบส ส่วนคิซิทิคของทั้งทางเบสและคอล เลคเตอร์ยังเป็นแบบจวมดา คือ

- วงจรมายกกำลังกระแสเบส ประกอบด้วยตัวต้านทานและทรานซิสเตอร์และไดโอดเพื่อชดเชยอุณหภูมิ

- คิซิทิคทางคอล เลคเตอร์เป็นแบบที่กระแสของวงจรมายกกำลังไหลผ่านตัวหม้อแปลงด้วย เนื่องจากกระแสที่วงจรมายกกำลังต้องการยังมีค่าต่ำ จึงยังไม่มีผลต่อการทำงานของหม้อแปลง

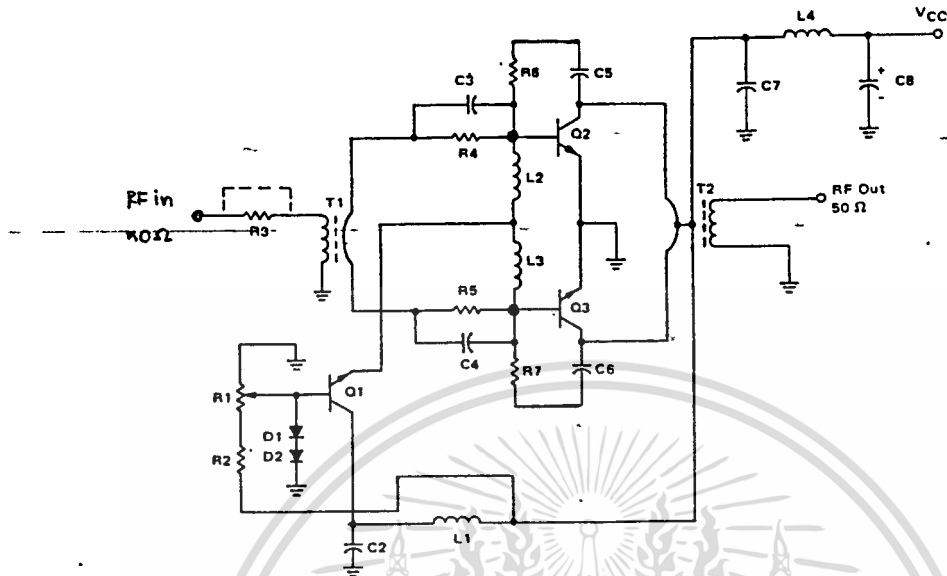
การคำนวณค่าของอุปกรณ์ในวงจรมายกกำลังได้ดังนี้

( ข้อมูลอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์เบอร์ MRF433

$$Z_{in} = 9.1 - 3.5j \quad \text{ที่ความถี่ } 2 \text{ เมกกะเฮิรซ์}$$

$$= 2.5 - 2.1j \quad \text{ที่ความถี่ } 30 \text{ เมกกะเฮิรซ์ } )$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ถูกต้องเท่านั้น ไม่แนะนำให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 11 วงจรขยายกำลังภาค 20 วัตต์

- หม้อแปลง T1 เลือกอัตราส่วนของหม้อแปลงให้มีค่าที่เหมาะสมที่จะทำการชดเชยการเปลี่ยนแปลงของอินพุทอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ได้ง่ายที่สุดดังนี้

- ถ้าเลือกอัตราส่วน 3 ต่อ 1 จะทำให้อิมพีแดนซ์ทางเซคคันดารีเท่ากับ 5.5 โอห์มจะทำการชดเชยอินพุทอิมพีแดนซ์ที่มีความถี่ 30 เมกกะเฮิรซ์ทำได้ง่าย แต่สำหรับที่มีความถี่ 2 เมกกะเฮิรซ์จะทำการชดเชยได้ยาก ดังนั้นจึงควรเลือกใช้อัตราส่วนของหม้อแปลงเป็น 2 ต่อ 1

- ตัวต้านทาน R4, R5 และตัวเก็บประจุ C3, C4 ที่เป็นส่วนชดเชยการเปลี่ยนแปลงของอินพุทอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ จะเลือกค่าจากการทดลองที่ทำให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนทางอินพุทของวงจรมีค่าต่ำตลอดย่านความถี่ที่ใช้งาน ( กำหนดไว้ 2 ถึง 30 เมกกะเฮิรซ์ ) โดยจะเลือกค่าเริ่มต้นจากค่า R4, R5 ที่เหมาะสมกับวงจรที่มีความถี่ 2 เมกกะเฮิรซ์ ( สมมติว่าที่ความถี่นี้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุยังสูงอยู่จึงยังไม่มีผลต่อค่าอิมพีแดนซ์ และการบ่อนกสับไม่มีผลต่ออินพุทอิมพีแดนซ์ของวงจร ) ส่วนค่าเริ่มต้นของ C3, C4 จะเลือกจากค่าที่เรโซเนทกับ R4, R5 ที่ความถี่ประมาณ 15 เมกกะเฮิรซ์ จากนั้นก็ทำการวัดค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวงจรที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการเชิงวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ขอสงวนสิทธิ์ในการคัดลอก

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ต่างๆแล้วทำการเปลี่ยนค่า R และ C จนได้ค่าที่เหมาะสมซึ่งจะเห็นว่าเป็นขบวนการที่ลำบากและกินเวลานาน โดยในต่างประเทศจะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ เช่น TOUCHSTONE, COMPACT ในการออกแบบส่วนชดเชยนี้ ซึ่งขณะที่ผู้เขียนทำโครงการงานนี้อยู่ ยังไม่มีโปรแกรมเหล่านี้ในเมืองไทย

จากวิธีการข้างต้น สามารถคำนวณค่าเริ่มต้นของ R4,R5 ได้เท่ากับ 4 โอห์ม ส่วน C3, C4 มีค่าเท่ากับ 2500 พิโคฟารัด และค่าสุดท้ายจากการทดลองคือ R4,R5 เท่ากับ 5.6 โอห์ม และ C3,C5 เท่ากับ 1800 พิโคฟารัด

- ตัวต้านทานป้อนกลับ R6,R7 ในโครงการนี้เน้นที่จุดสมบัติด้านกาตอบสนองต่อสัญญาณแถบของวงจรถึงทำการเลือกค่า R6,R7 ที่ทำให้มีผลสนองดังกล่าวดีที่สุด โดยสาเหตุที่ยังต้องให้วงจรมีส่วนของการป้อนกลับ ( แบบโวลท์เฟจ-อินท์ ) ก็เนื่องมาจากจะทำให้เสถียรภาพของวงจรมีขึ้น ( ในกรณีที่ทางเดินของสัญญาณป้อนกลับมีค่ารีแอคแตนซ์จากตัวเหนี่ยวนำน้อย ) แต่ในการออกแบบวงจรมายก่าสำหรับงานอื่นนั้น จะเลือกค่า R6,R7 พร้อมไปกับ R4,R5,C3,C4 จนได้ค่าที่ทำให้อัตราขยายของวงจรมีค่าสม่ำเสมอและสัมประสิทธิ์การสะท้อนทางค่านอินพุตมีค่าต่ำ

ในโครงการนี้เลือกค่า R6,R7 ที่เหมาะสมได้เท่ากับ 500 โอห์ม

- ตัวเหนี่ยวนำ L2,L3 เลือกใช้มีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของตัวทรานซิสเตอร์ประมาณ 10 เท่า ที่ความถี่ค่าสุดท้ายใช้งาน ( 2 เมกกะเฮิรซ์ ) ได้ค่าเท่ากับ 10 ไมโครเฮนรี

- ตัวเก็บประจุ C3,C4 เป็นถ่านบิล็อคเกอร์และคิซึระหว่างคอลเลคเตอร์กับเบส เลือกค่า 0.01 พิโคฟารัด

- หม้อแปลง T2 เลือกจากค่าเอาท์พุทอิมพีแดนซ์ของตัวทรานซิสเตอร์ ซึ่งในวงจรมายก่าจะสามารถคำนวณได้ง่ายจากสมการ

$$R_{\text{collector to collector}} = 2 \cdot (V_{cc} - V_{ce(\text{sat})})^2 / P_o$$

$$( P_o = 20 \text{ วัตต์} )$$

ซึ่งจะได้ Rc-c ของวงจรถ้าเท่ากับ 14.4 โอห์ม ดังนั้นจึงได้อัตราส่วนหม้อแปลงเท่ากับ 2 ต่อ 1

- วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ จะเลือกค่า R1 และ R2 ที่ทำให้สามารถปรับค่าคิกคาคว้อมขาเบสและอิมิตเตอร์มีค่าระหว่าง 0.5 ถึง 1 โวลท์ ส่วนทรานซิสเตอร์ Q1 จะต้องสามารถจ่ายกระแสคอลเลคเตอร์ได้อย่างน้อยเท่ากับกระแสเบสสูงสุดที่วงจรมายก่าต้องการ โดยกระแสเบสสูงสุด

คิดตามสมการ ( ให้ประสิทธิภาพของวงจรถ้าเท่ากับ 50 เปอร์เซ็นต์ )

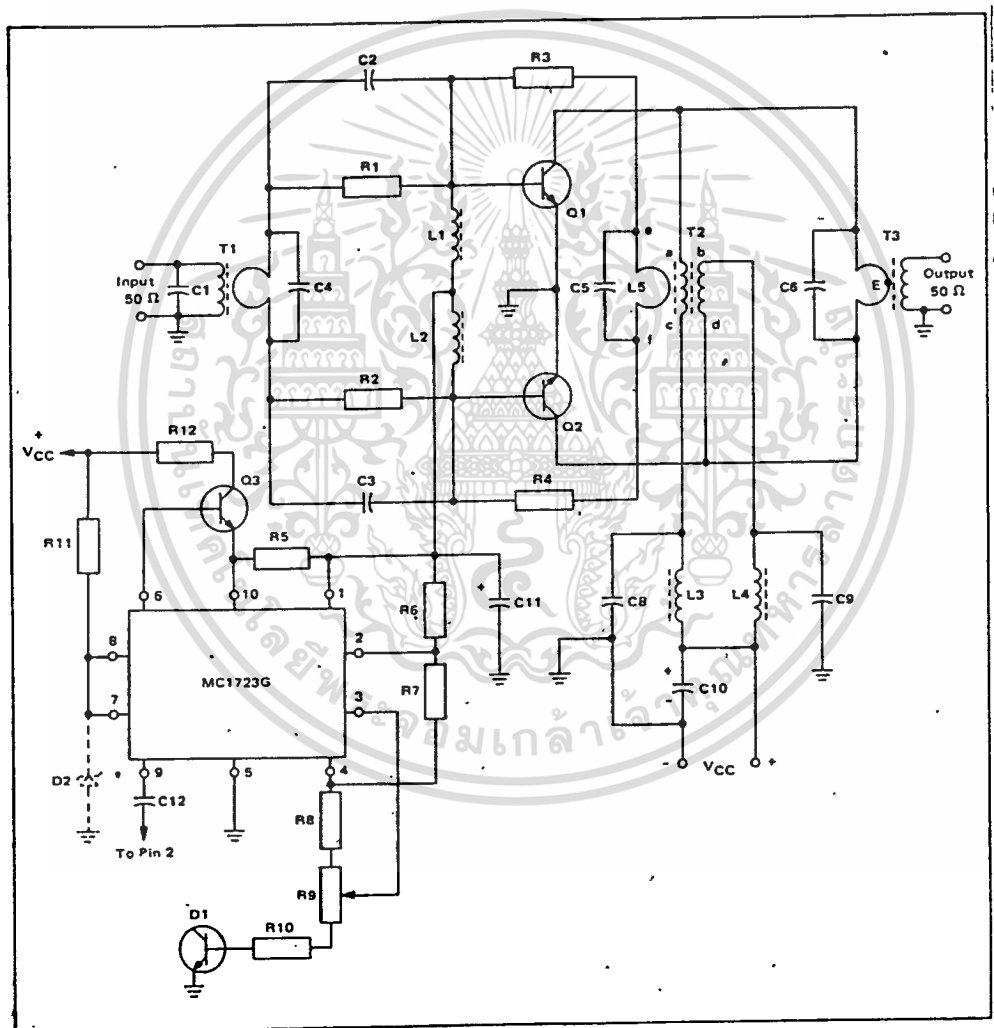
$$I_b(\max) = I_c(\max)/hFE \quad (1)$$

และ  $I_c(\max) = (2 \cdot P_o)/V_{cc} \quad (2)$

คิ่งนั้นกระแสเบสสูงสุดของวงจรถ้ากับ 0.11 แอมป์ (  $hFE$  ของทรานซิสเตอร์ MRF433 = 30 )

จากข้อกำหนดข้างต้นสามารถเลือกค่า R1 ได้ 1 กิโลโอห์ม, R2 1 กิโลโอห์ม และ Q1 เบอร์ MJE3055T ( กระแสคอลเลคเตอร์สูงสุดเท่ากับ 10 แอมป์, ทนกำลังได้ 75 วัตต์ ) ส่วนไดโอด D1, D2 เลือกเบอร์ IN4148 โดยจะคิดไดโอดให้ใกล้เคียงกับทรานซิสเตอร์กำลังมากที่สุด

วงจรรขยายกำลังภาค 160 วัตต์ มีวงจรถังรูปที่ 12



รูปที่ 12 วงจรรขยายกำลังภาค 160 วัตต์

จากรูปจะเห็นว่าในส่วนของการรื้อแปลงอินพุท, การรื้อแปลงเอาต์พุทการชดเชยทางด้านอินพุท

เอกสารทิศทิศทางเบสและส่วนของกาบ้อนกลับ จะเหมือนกับวงจรรขยายภาค 20 วัตต์ ซึ่งสามารถเข้าใจ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบที่กล่าวมาแล้วได้ แต่ในส่วนของวงจรถูกที่แตกต่างกันสามารถอธิบายได้ดังนี้

- วงจรร่วมกระแสเบส จะใช้ไอซีเรกกูเลเตอร์ ซึ่งจะมีข้อดีทางด้านไลน์เรกกูเลชัน, กับการเสถียรของยังไม่ว่ากระแส (low standby current )

- คิวคิกทางคอลเลคเตอร์ เป็นแบบใช้ตัวรวมกำลัง 180 องศา ( บทที่ 3 ) ซึ่งจะให้ประสิทธิภาพที่ดีกว่า

- ตัวเก็บประจุ C1, C4 ทำหน้าที่การแมชชิงทางด้านอินพุทของวงจรถูกขึ้น , C5 ทำหน้าที่ลดการสูญเสียเนื่องมาจากการบ่อนกลับของวงจรถูกความถี่สูง ซึ่งจะทำให้ยึดความยาวสม่ำเสมอขึ้น และ C6 ทำหน้าที่การแมชชิงทางเอาท์พุทที่ขึ้น ส่วนการคำนวณค่าอุปกรณ์ต่างๆแสดงได้ดังนี้

- ค่าของตัวเก็บประจุ C1, C4 และ C5 มาจากการทดลอง

- ส่วนไบอัสกระแสเบส จะคำนวณค่าต่างๆได้ดังนี้

Q3 เป็นส่วนซีร์รีเฟสของวงจรถูก โดยจะต้องสามารถจ่ายกระแสได้อย่างน้อย 0.88 แอมป์ ( สมการที่ 1, 2 ) จึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MJE3055 ( กระแสคอลเลคเตอร์สูงสุด 10 แอมป์และทนกำลังได้ 90 วัตต์ )

R12 เป็นตัวลดการสูญเสียในตัวทรานซิสเตอร์ โดยเลือกค่าให้ค่าที่คอลเลคเตอร์ไม่ต่ำกว่า 2 วัตต์ โดยคิดที่ค่า hFE สูงสุดของทรานซิสเตอร์ จะได้  $R12 = (12-2)/0.59$  ได้ค่า 16.9 โอห์ม เลือกค่า R12 20 โอห์ม

R5 เป็นตัวกำหนดการจ่ายกระแสด้วยสมการ  $0.7/R5$  ดังนั้นถ้ากำหนดกระแสลิมิต 1.35 แอมป์จะได้ R5 เท่ากับ 0.5 โอห์ม

D1 ทำหน้าที่ชดเชยทางอุณหภูมิของตัวทรานซิสเตอร์กำลัง ดังนั้นจึงควรมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับตัวทรานซิสเตอร์กำลังและควรรีดทั้งบนแผ่นระบายความร้อน ให้ใกล้เคียงกับตัวทรานซิสเตอร์กำลังมากที่สุด จึงใช้เบอร์ 2N5190

ส่วนค่า R6, R7, R8, R9, R10. คำนวณโดยใช้สมการใน [23]

หมายเหตุ สาเหตุที่ต้องใช้อุปกรณ์และวงจรถูกที่ยุ่ยากกว่าแบบแรกก็เนื่องมาจากกำลังของวงจรถูกนี้สูงกว่าภาคแรกมาก ผลกระทบต่อวงจรถูกสัญญาณที่สะท้อนกลับทั้งทางด้านอินพุทและเอาท์พุท จึงมีความสำคัญ ( เนื่องจากขนาดกำลังของสัญญาณมีค่าสูง )

ในการออกแบบวงจรถูกที่กล่าวมา ไม่ได้กล่าวรายละเอียดเกี่ยวกับการเลือกขนาดของหม้อ

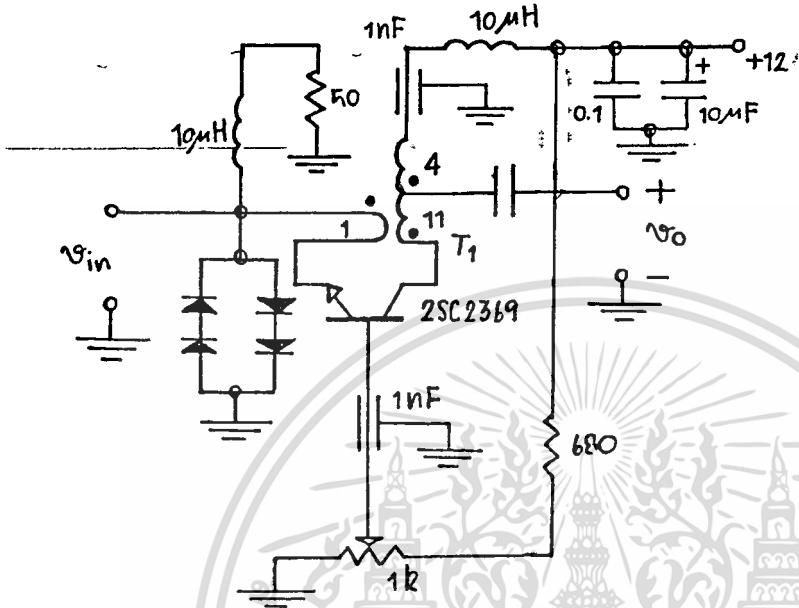
เอกสารแปลงเพอร์เวิร์ท โดยผู้สนใจสามารถหาอ่านได้จาก [1, 24, 25] ปณฺญาตให้เข้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 วงจรขยายภาคขับ ใช้ไอซีย่านความถี่กว้างแบบไฮบริด ของไมโครเวลาเบอร์ MHW 591

โดยใช้เทคนิคการฝึกแบคแบบสองลูป รวมกับวงจรวเบกคาสโคด ดังกล่าวรายละเอียดในบทที่ 3

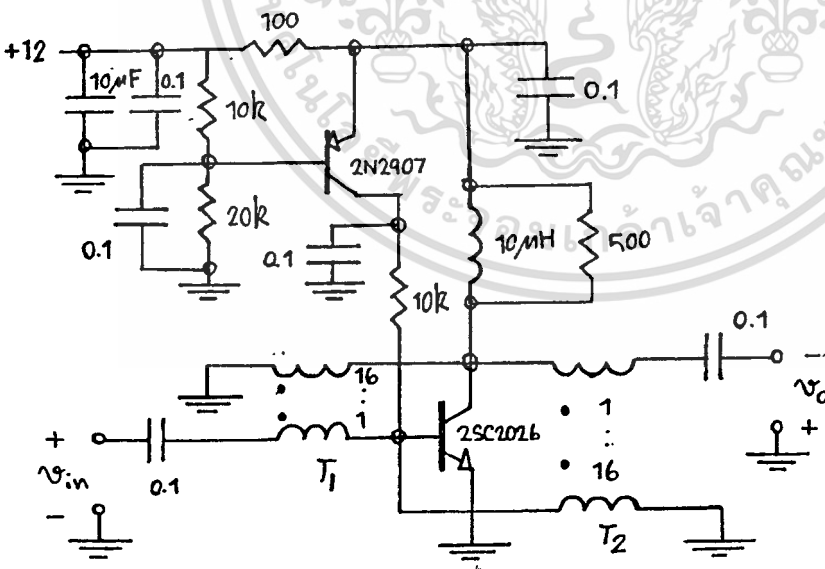
4.7 วงจรขยายภาครับ

ภาคที่ 1 มีวงจรวเบกคาสโคด



$I_c = 5 \text{ mA}$   
 $T_1 : FT50-61$

ภาคที่ 2 มีวงจรรถ่วงรูป



$I_c = 20 \text{ mA}$   
 $T_1, T_2 : FT50-61$

หมายเหตุ การทำงานและการออกแบบวงจรทั้งสองได้กล่าวรายละเอียดแล้วในบทที่ 3

ส่วนการออกแบบส่วนไบอัสของวงจรที่หนึ่งเป็นแบบธรรมคา ส่วนวงจรวเบกคาสโคดที่ฟิไซสแบบที่สองจะ

คำนวณค่าของอุปกรณ์ได้จาก [12]

#### 4.8 การออกแบบวงจรผลิตรวมที่ควบคุมด้วยแรงดัน VCO

วงจรผลิตรวมที่ควบคุมด้วยแรงดัน จะต้องสามารถให้ความถี่เอาต์พุต ในช่วง 180-250 MHz เมื่อแรงดันอินพุตทำงานในช่วง 1-11 โวลต์ อัตราส่วนของความถี่-ค่าสูงสุด จะต้องเท่ากับรากที่สองของอัตราส่วนการจูน (tuning ratio) ของวาริแคป

$$f_{\max} = (TR)^{1/2}$$

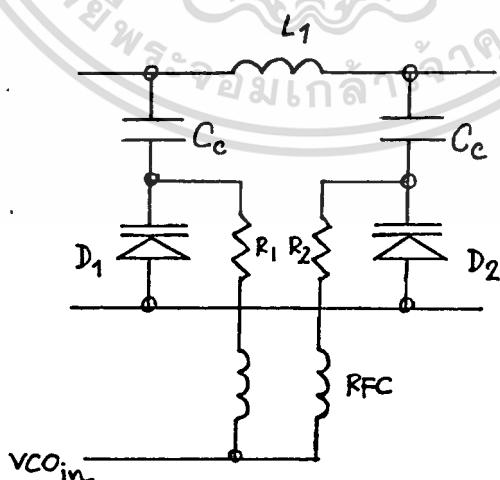
$$f_{\min}$$

$$250 = (TR)^{1/2}$$

$$180$$

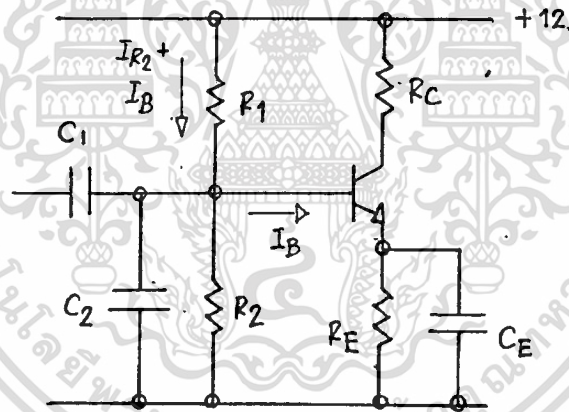
ซึ่งหมายความว่า ค่า TR ของวาริแคปที่จำเป็นต้องไม่น้อยกว่า 1.93 เราจะเลือกใช้วาริแคปเบอร์ MV 2104 (ซึ่งมีความจุที่แรงดันไบอัสกลับ 4 โวลต์ ประมาณ 12 pF ค่า TR ประมาณ 2.9 (อัตราส่วนความจุเมื่อไบอัสด้วยแรงดัน 2 โวลต์ และ 30 โวลต์))

การเลือกอุปกรณ์แอคทีฟเพื่อสร้างความต้านลบ สำหรับขดเคียวความถี่สูงในตัวเรโซเนเตอร์ จะใช้ไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ เนื่องจากมีลักษณะแบนแบบ  $1/f$  ต่ำกว่าฟิลด์เอฟเฟกทรานซิสเตอร์ (FET) ลักษณะของเรโซเนเตอร์ที่ใช้แสดงในรูปแบบ



ให้แรงดันควบคุม VCOin ที่ 4 โวลต์ วงจรจะผลิตความถี่ประมาณ 215 MHz ดังนั้น  $L_1$  จะมีค่า 45.6 nH สำหรับการออกแบบวงจรจะใช้  $L_1$  ค่า 30 nH เนื่องจากผลจากความเหนี่ยวนำแฝง (Stray inductance) และชดเชยค่าคาปาซิแตนซ์ที่เข้าป้อนกลับในวงจร เพื่อสร้างความต้านทานลบ  $C_e$  ในรูปท่อนำที่แยกแรงดันไบอัสไดโอดออกจากวงจร  $R_1$  และ RFC ท่อนำที่ไบอัสและแยกความถี่ออกซิเลชันจากวงจรไบอัสไดโอด (เอาที่พู่ของวงจรรองความถี่ค่าผ่านแบบแอกทิฟ )

วงจรถวานซิสเตอร์เลือกใช่วงจรแบบขนานในรูปที่ 34 บทที่ 3 เครื่องหมายของ  $B_1$  และ  $B_2$  จะต้องมีเครื่องหมายเป็นบวก และ  $B_3$  มีเครื่องหมายเป็นลบ จากนั้นจึงเลือกทรานซิสเตอร์เพื่อให้ได้เงื่อนไขสอดคล้องกับเวอริเนคเตอร์ที่กำหนดไว้ ซึ่งจะใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ MRF 901 วงจรใช้แรงดัน 12 โวลต์ กำหนดค่าให้  $V_{CE} = 5$  โวลต์,  $I_C = 5$  mA และใช้พารามิเตอร์ที่ 200 MHz



รูปที่ 14 วงจรไบอัสทางคิซิชของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์มี  $h_{FE} = 80$  ให้  $I_{R2} = 8 \cdot I_B$ ,  $V_{RE} = 1$  V.,  $I_B = 63$  A ดังนั้น  $R_E$

200

$$R_2 = (1 + V_{BE}) / 8(63 \text{ A}) \approx 3.3K$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่  $R_1$  นั้นใช้ค่า  $(12 - 1.7) / 9(63 \text{ A}) \approx 18K$  ไม่น่าจะถูกต้องให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_c = 6/5mA = 12000$$

ตัวเก็บประจุ  $C_E$  จะทำให้อิมิตเตอร์เสมือนต่อลงกราวด์ที่ความถี่ออสซิลเลชัน  $C_1, C$  เป็นแบบคาปาซิทีฟดีไวเดอร์สำหรับบ่อนกสึบจากเว็ชเวเตอร์ (ใช้ค่า 27 pF) เวลาสามารถประมาณแกนแฟคเตอร์ของ VCO ได้โดย

$$K_o = \frac{\Delta f_o}{\Delta v} = \frac{C_s(\phi - v_s)^{1/2}}{8\pi L^{1/2} [C_T(\phi - v)]^{3/2}}$$

เมื่อ  $C_s$  เป็น ค่าความจุของวาริแคปทีแรงดันไบอัส  $v_s$

$v$  เป็น แรงดันควบคุม VCO

$C_T$  เป็น ความจุรวมทั้งหมดที่มีต่อความถี่ทำงานของวงจร ถ้าไม่คิดคาปาซิเตอร์ที่รอยต่อ BE และ BC ของทรานซิสเตอร์ จะได้

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} + C_s = 27pF \text{ (ที่ } V_{in} = 4V.)$$

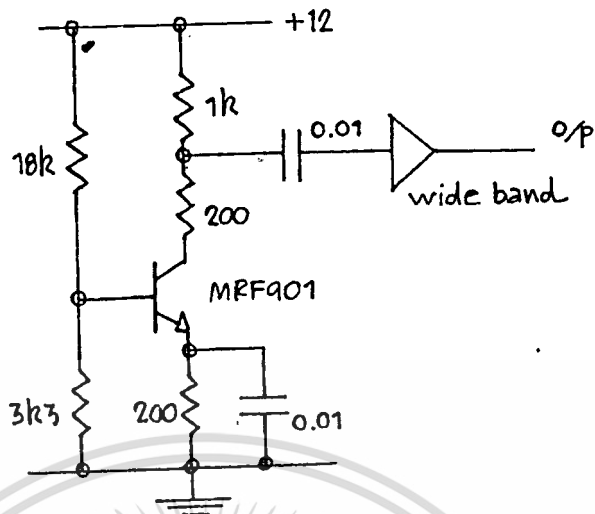
แทนค่าในสมการจะได้

$$K_o = \frac{12 \cdot 10^{-12} \cdot \sqrt{4.7}}{8 \cdot \pi \cdot \sqrt{30 \cdot 10^{-9}} \cdot (25 \cdot 10^{-12} \cdot 4.7)^{3/2}} = 4.69 \text{ MHz/v}$$

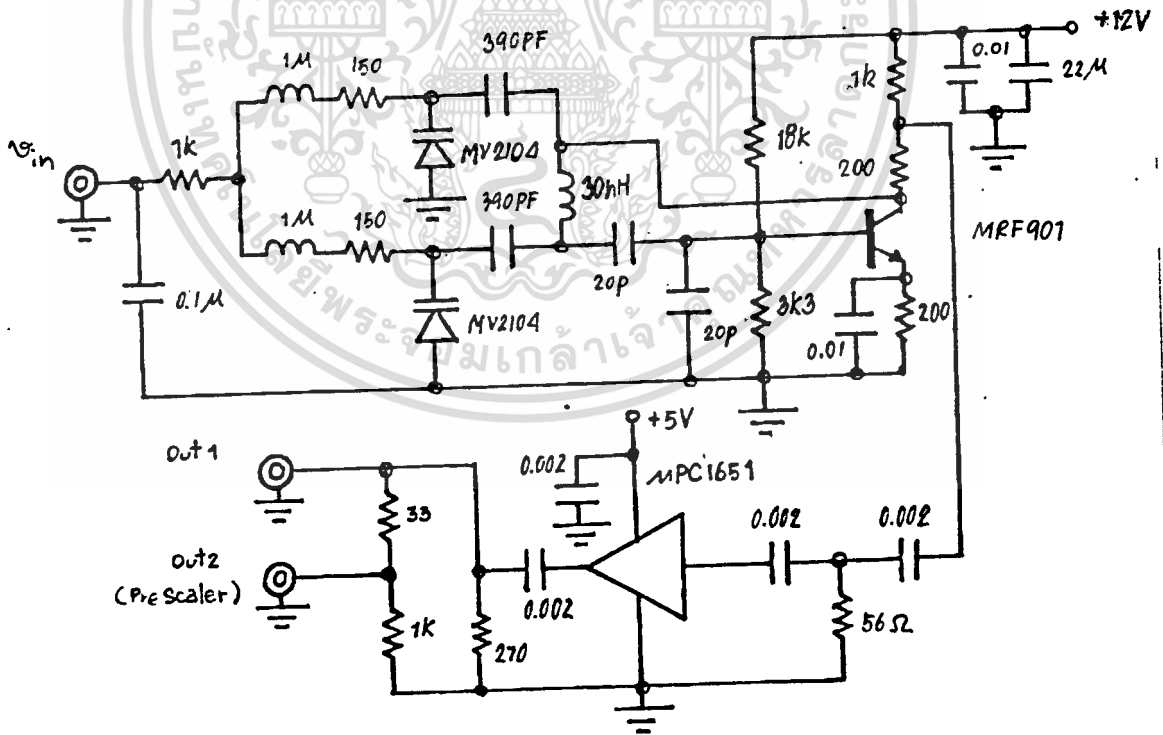
หมายความว่าที่แรงดันควบคุม VCO, 4.0 โวลท์ วงจรผลิตความถี่ควบคุมด้วยแรงดันมีแกนแฟคเตอร์ประมาณ 4.69 MHz/v เอาท์พุทของวงจรมีเอาต์พุตที่ขาเบสและคอลเลคเตอร์ การ

คลัสปลิ่งสัญญาณจากคอลเลคเตอร์มีผลรบกวนต่อวงจรน้อยกว่า และเพื่อมิให้โหลดมีผลต่อวงจรจึงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่นับเป็นเอกสารที่เผยแพร่อย่างเป็นทางการ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการต่อวงจรขยายความถี่กว้างเป็นกันชนดังรูปที่ 15 และวงจรที่สมบูรณ์แสดงจนวนรูปที่ 16



รูปที่ 15 การต่อขั้วเพอร์ให้วงจร



เอกสารนี้เป็นรูปที่ 16 วงจรออสซิลเลเตอร์ที่ควบคุมด้วยแรงดันที่สมบูรณ์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.9 การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

ในการออกแบบจะอาศัยตารางแสดงค่าของส่วนประกอบ (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) ของวงจรกรองที่นอร์มาไลซ์กับค่าชอร์ตและโหลดอิมพีแดนซ์ หนึ่ง โอห์ม ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยขั้นแรกจะต้องกำหนดความถี่คutoff ของวงจรกรอง จากนั้นก็แทนค่าของ  $C_n$  และ  $L_n$  ที่อ่านจากตารางในสมการที่ 3,4 เพื่อคืนนอร์มาไลซ์ค่าในตาราง

จำนวนของตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรขึ้นอยู่กับลำดับของวงจรกรอง

$$C = C_n / (2 \cdot \pi \cdot F_c \cdot R) \quad (3)$$

$$L = R \cdot L_n / (2 \cdot \pi \cdot F_c) \quad (4)$$

โดย  $R$  คือค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดและชอร์ต

$F_c$  ค่าของความถี่ตัด

ORDER	RIPPLE (dB)	$C_1$	$L_2$	$C_3$	$L_4$	$C_5$	$L_6$	$C_7$	$R_{min}$
2	0.1		1.211	1.643					0.738
	0.5		0.982	1.948					0.504
	1.0		0.835	2.219					0.376
	3.0		0.535	3.109					0.172
3	0.1	1.438	1.589	1.438					1.000
	0.5	1.862	1.280	1.862					1.000
	1.0	2.215	1.088	2.215					1.000
	3.0	3.349	0.712	3.349					1.000
4	0.1		0.981	2.225	1.642	1.330			0.738
	0.5		0.920	2.585	1.303	1.824			0.504
	1.0		0.831	2.981	1.121	2.212			0.376
	3.0		0.592	4.349	0.748	3.441			0.172
5	0.1	1.300	1.553	2.238	1.553	1.300			1.000
	0.5	1.800	1.298	2.682	1.298	1.800			1.000
	1.0	2.216	1.132	3.115	1.132	2.216			1.000
	3.0	3.481	0.762	4.538	0.762	3.481			1.000
6	0.1		0.980	2.220	1.550	2.350	1.450	1.350	0.738
	0.5		0.905	2.575	1.367	2.710	1.298	1.794	0.504
	1.0		0.836	3.031	1.190	3.161	1.140	2.224	0.376
	3.0		0.603	4.464	0.793	4.606	0.769	3.505	0.172
7	0.1	1.198	1.444	2.128	1.596	2.128	1.444	1.198	1.000
	0.5	1.737	1.271	2.664	1.357	2.664	1.271	1.737	1.000
	1.0	2.184	1.121	3.118	1.183	3.118	1.121	2.184	1.000
	3.0	3.519	0.772	4.639	0.804	4.639	0.772	3.519	1.000

ตารางที่ 2 ตัวอย่างตารางสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน [26]

ในโครงการนี้ได้ทำการคำนวณวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับเจ็ด แบบเชอเชฟ มิริบเปิล

บริเวณพาสแบนด์ 1 dB และความถี่ตัด 12 MHz ที่ค่าโหลด-ชอร์ต 50 โอห์มได้ดังนี้

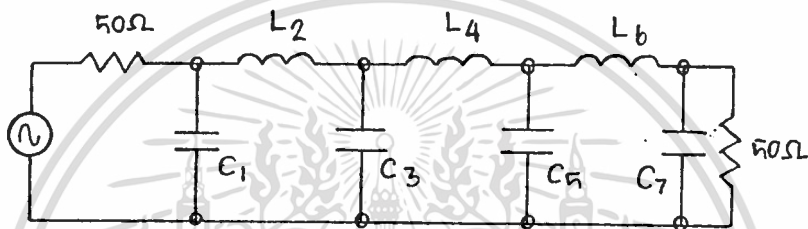
เอกสารนี้เป็นจากตารางที่ 2 สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C1 = C7 = \frac{2.184}{2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot 10^6 \cdot 50} = 579.32 \cdot 10^{-12} \text{ ใช้ค่า } 560 \text{ pF}$$

$$C3 = C5 = \frac{3.118}{2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot 10^6 \cdot 50} = 827.07 \cdot 10^{-12} \text{ ใช้ค่า } 820 \text{ pF}$$

$$L2 = L6 = \frac{50 \cdot 1.121}{2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot 10^6 \cdot 50} = 743.38 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$

$$L4 = \frac{50 \cdot 1.183}{2 \cdot \pi \cdot 12 \cdot 10^6 \cdot 50} = 784.5 \cdot 10^{-9} \text{ H}$$



รูปที่ 17 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่คำนวณ

#### 4.10 การออกแบบวงจรจ่ายกระแสคงที่

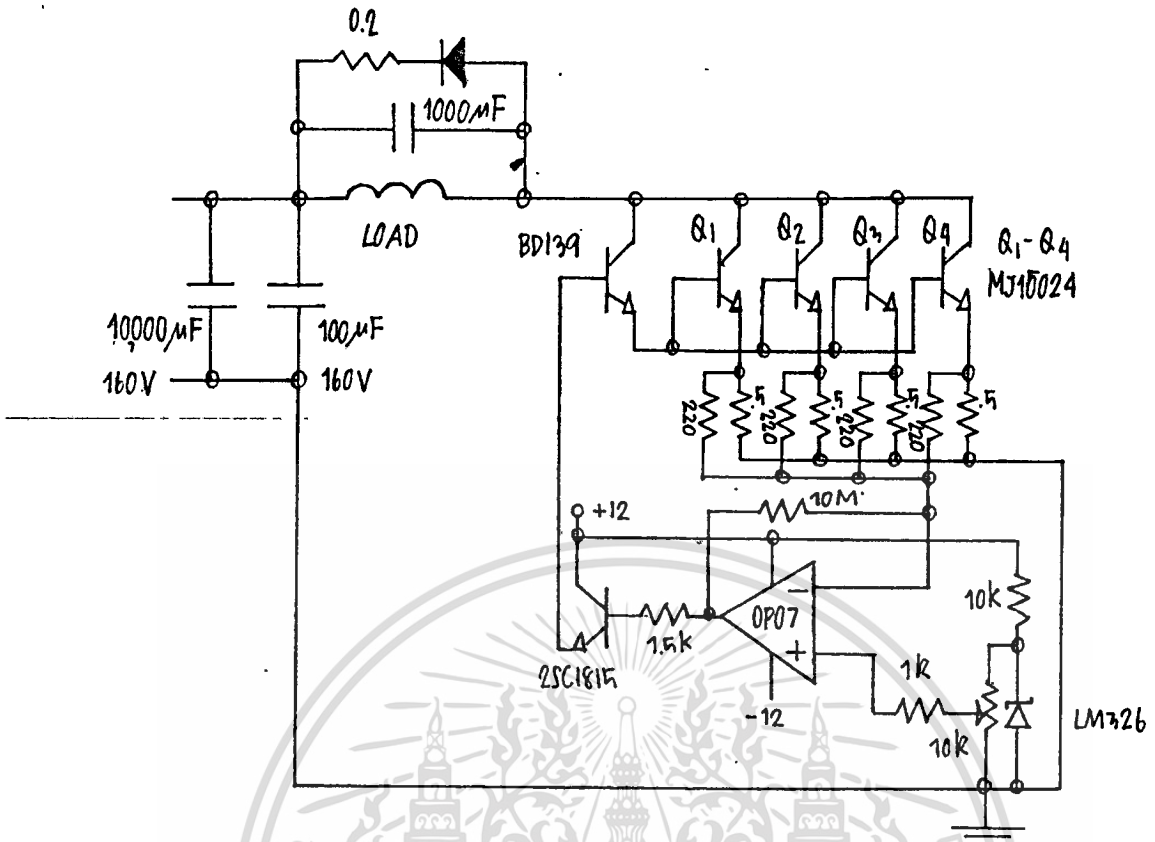
การคำนวณค่าอุปกรณ์ต่างๆในวงจรรูปที่ 18 แสดงได้ดังนี้ ( กำหนดให้ค่าความต้านทานของขดลวดที่เป็นโหลดเท่ากับ 10 โอห์ม และกระแสสูงสุดที่ต้องการเท่ากับ 5 แอมป์ )

-หม้อแปลง, ไดโอด เรกติไฟร์และตัวเก็บประจุสำหรับลดคลื่นรบกวน ใช้สมการเกี่ยวกับการออกแบบการออกแบบแหล่งจ่ายไฟที่มีศักดาเท่ากับ 50 โวลต์และกระแสเท่ากับ 5 แอมป์

-ส่วนทรานซิสเตอร์กำลัง ต้องทนกระแสคอลเลคเตอร์ได้ไม่ต่ำกว่า  $I_{max}/N$  โดยที่  $I_{max}$  คือค่ากระแสสูงสุดที่ต้องจ่ายให้ขดลวดและ  $N$  คือจำนวนทรานซิสเตอร์ในวงจรและทนศักดา  $V_{ce}$  ได้อย่างน้อยเท่ากับ  $V_{ac} \cdot 1.414$  (  $V_{ac}$  คือค่าศักดาแบบ rms ที่ออกจากหม้อแปลง )

-ตัวต้านทานและไดโอดที่คร่อมขดลวด เป็นทางผ่านของกระแสที่เก็บอยู่ในขดลวดขณะหยุดจ่ายไฟให้กับวงจร โดยเลือกให้ตัวต้านทานมีค่าเท่ากับ 0.2 โอห์ม

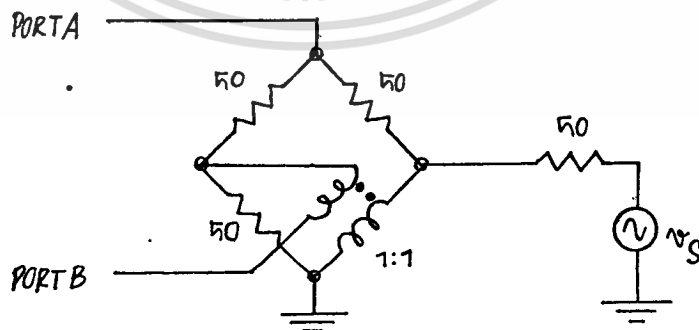
เอกสารนี้เป็นเอกสารในส่วนบุคคลเลือกใช้เบอร์ OP07 และศักดาอ้างอิงใช้ไอซีแบนด์แก๊ป LM336 การคำนวณว่ากรณีใดทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 18 วงจรจ่ายกระแสสำหรับเครื่องสร้างสนามแม่เหล็ก

4.11 วงจรไฮบริดคอมไบน์เนอร์ แสดงได้ดังรูปที่ 19

วงจรในรูปใช้กับค่าโหลดและซอร์ท 50 โอห์ม



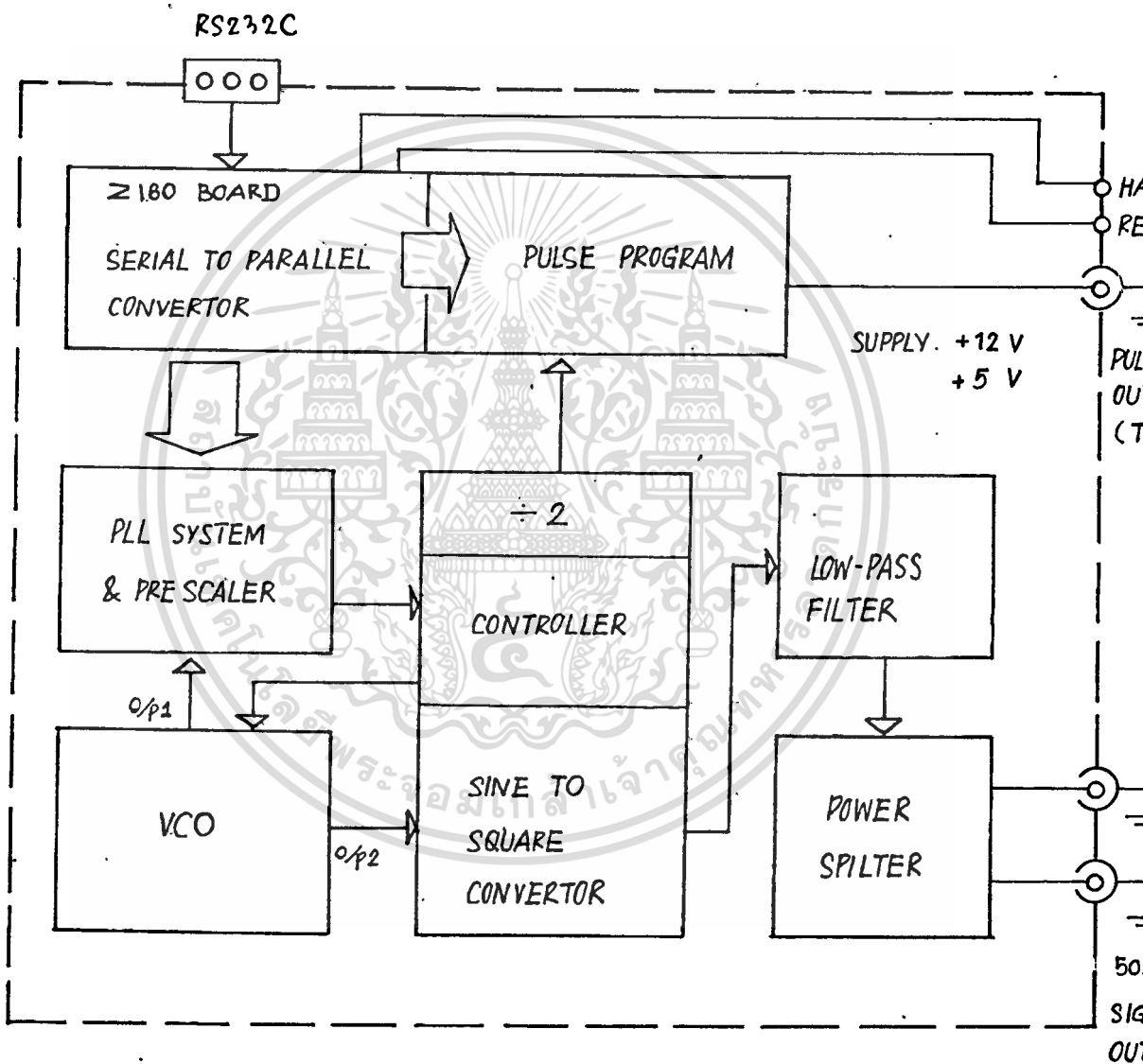
เอกสารนี้เป็น **รูปที่ 19** วงจรไฮบริดคอมไบน์เนอร์ที่นำมาใช้เป็นเพาเวอร์สปลิตเตอร์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและวิจารณ์

5.1 ผลการทดลอง จะแยกเป็นส่วนๆ ดังนี้

- ส่วนสังเคราะห์ความถี่ มีบล็อกไดอะแกรมดังรูปที่ 1



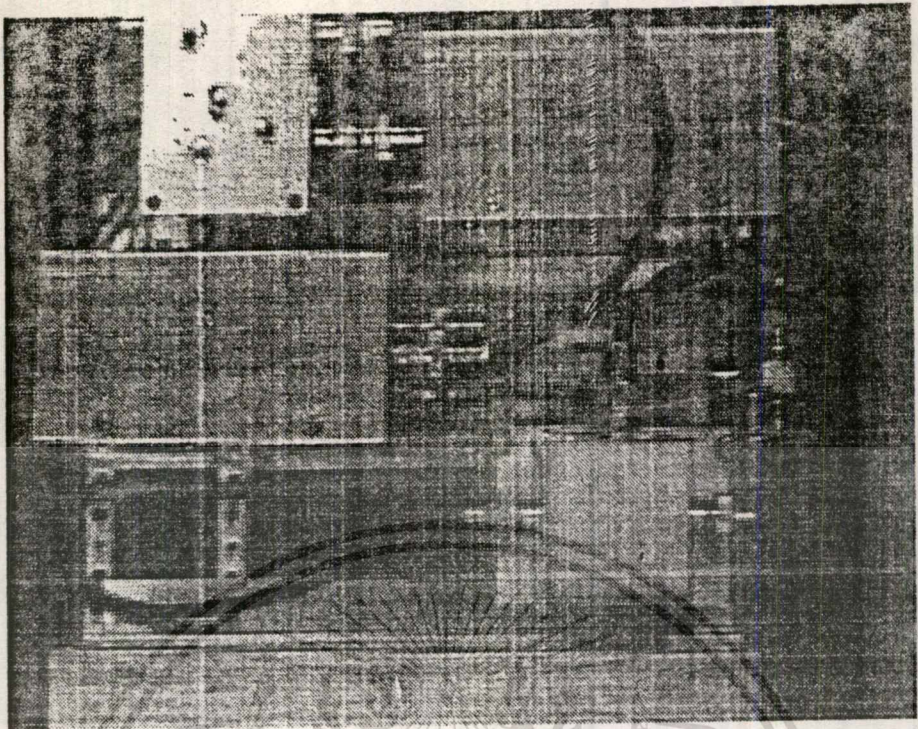
รูปที่ 1 แสดงส่วนประกอบของวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่สร้าง

Schematic ของวงจรในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 2 และภาพถ่ายของส่วนสังเคราะห์ความถี่

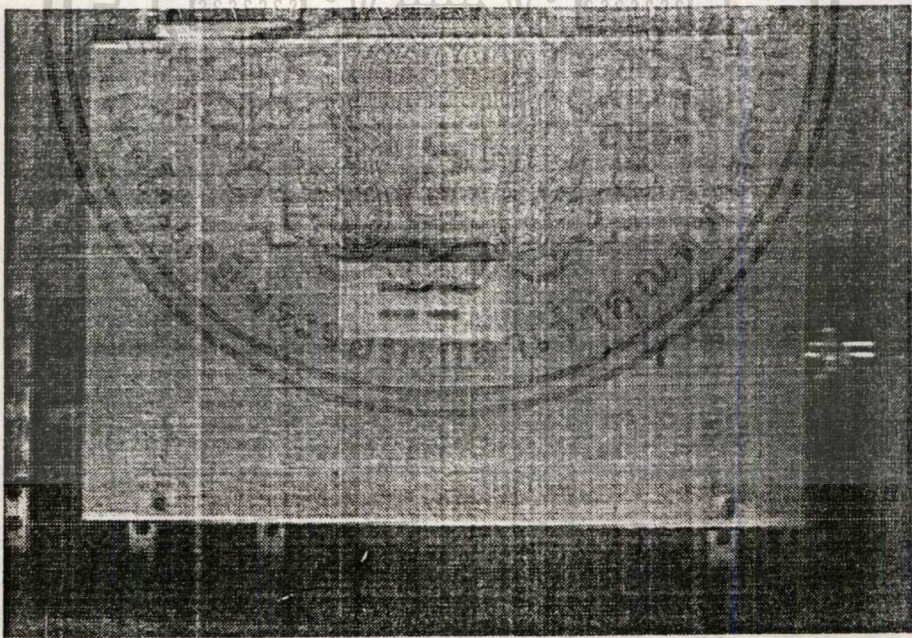
เอกแสดงดังรูปที่ 3 ก.-ง.

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





ค. แสดงส่วนสร้างควมถี่แบบเฟสล็อก



ง. แสดงส่วนอินเตอร์เฟสกับคอมพิวเตอร์,ควบคุมความถี่ของส่วนสร้างควมถี่ และสร้างสัญญาณพัลส์ที่โปรแกรมคิวตี้ไซเคิลและความถี่ได้ ( T1, T2 )

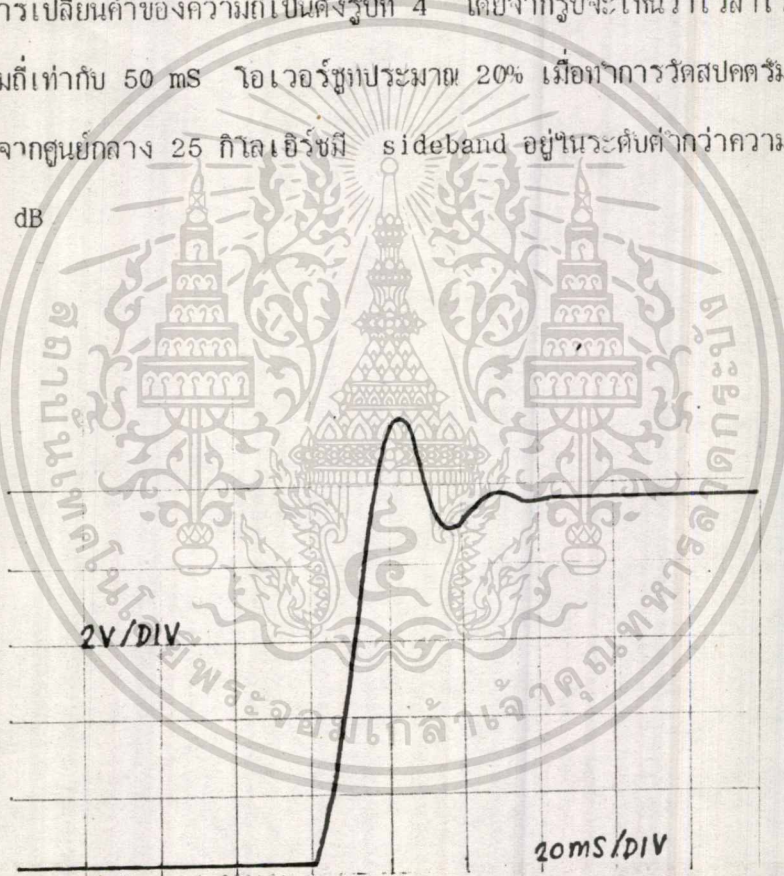
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ผลการทดลองในส่วนสังเคราะห์ความถี่

การควบคุมค่าของความถี่ในส่วนสร้างสัญญาณพาร์และส่วนสร้างสัญญาณพัลซ์จะถูกโปรแกรมด้วยคอมพิวเตอร์ ผ่านสายส่งข้อมูลแบบอนุกรมมาตรฐาน RS-232C , ข้อมูลแบบอนุกรมที่เข้ามายังส่วนสังเคราะห์ความถี่จะถูกเปลี่ยนให้เป็นข้อมูลแบบขนานสองส่วนคือ ข้อมูลสำหรับส่วนสร้างสัญญาณพาร์และข้อมูลสำหรับส่วนสร้างสัญญาณพัลซ์ ด้วยซิงเกิลบอร์ด Z180

#### - ส่วนสร้างสัญญาณพาร์

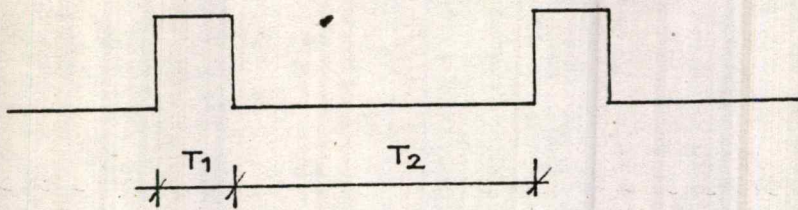
สามารถควบคุมการสร้างความถี่ของสัญญาณพาร์ ( Sinusoid ) ได้ในช่วงประมาณ 9.5 MHz ถึง 12.0 MHz มีความละเอียด ( resolution ) เท่ากับ 200 Hz และผลตอบสนองแบบสเตปของการเปลี่ยนค่าของความถี่เป็นดังรูปที่ 4 โดยจากรูปจะเห็นว่าเวลาเรสพอนส์ของการเปลี่ยนความถี่เท่ากับ 50 ms โอเวอร์ชูประมาณ 20% เมื่อทำการวัดสเปคตรัมของสัญญาณว่าที่ความถี่ห่างจากศูนย์กลาง 25 กิโลเฮิรซ์มี sideband อยู่ในระดับต่ำกว่าความถี่ศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 80 dB



รูปที่ 4 แสดงผลตอบสนองต่อสเตปอินพุทของส่วนสร้างสัญญาณพาร์

- ส่วนสร้างสัญญาณพัลซ์ ( ฐานเวลาของส่วนนี้มาจากส่วนสร้างสัญญาณพาร์ที่ถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณ TTL แล้วหาความถี่ลงครึ่งหนึ่ง )

เอกสารนี้เป็นเอกสารควบคุมความถี่และคิวตี้ไซเคิลของสัญญาณพัลซ์ ( TTL logic ) ได้ตั้งรูปแบบด้านการค้าไม่จำกัดสิทธิ์ในสิ่งอื่น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ถ้าให้ฐานเวลาของส่วนนี้เท่ากับ 5.35 (10.7/2) MHz

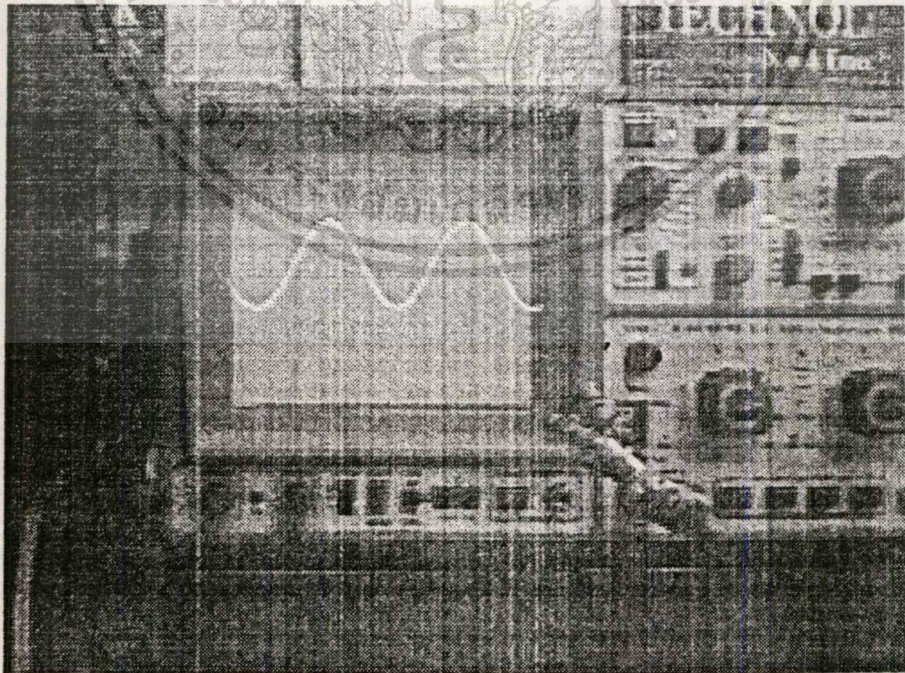
จากรูปเราสามารถควบคุมค่า T1 และ T2 ได้ในช่วงเวลา 0.186 sec ถึง 12.24 msec เปลี่ยนได้สลับละ 0.186 sec โดยการควบคุมค่า T1 และ T2 เป็นอิสระต่อกัน

ในกรณีที่ฐานเวลาของวงจรไม่เท่ากับ 5.35 MHz เราจะสามารถคำนวณหาช่วงเวลา T1 และ T2 ได้ดังนี้

$$T1, T2 = \text{ตัวหาร/ฐานเวลา sec. ถึง (ตัวหาร * 65535)/ฐานเวลา sec.}$$

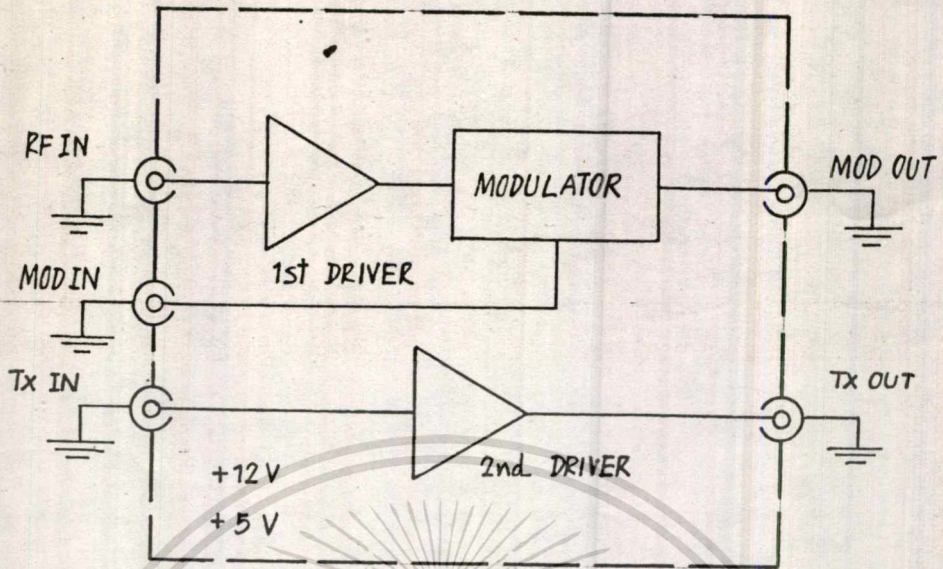
และเปลี่ยนได้สลับละ 1/ฐานเวลา sec.

ภาพที่ 5 แสดงสัญญาณเอาท์พุทของส่วนสร้างสัญญาณพาที่ความถี่ 10.7 MHz



รูปที่ 5 ตัวอย่างสัญญาณเอาท์พุทของส่วนสร้างสัญญาณพาที่ความถี่ 10.7 MHz เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อประโยชน์แก่ผู้อื่น เมื่อผู้เผยแพร่เห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

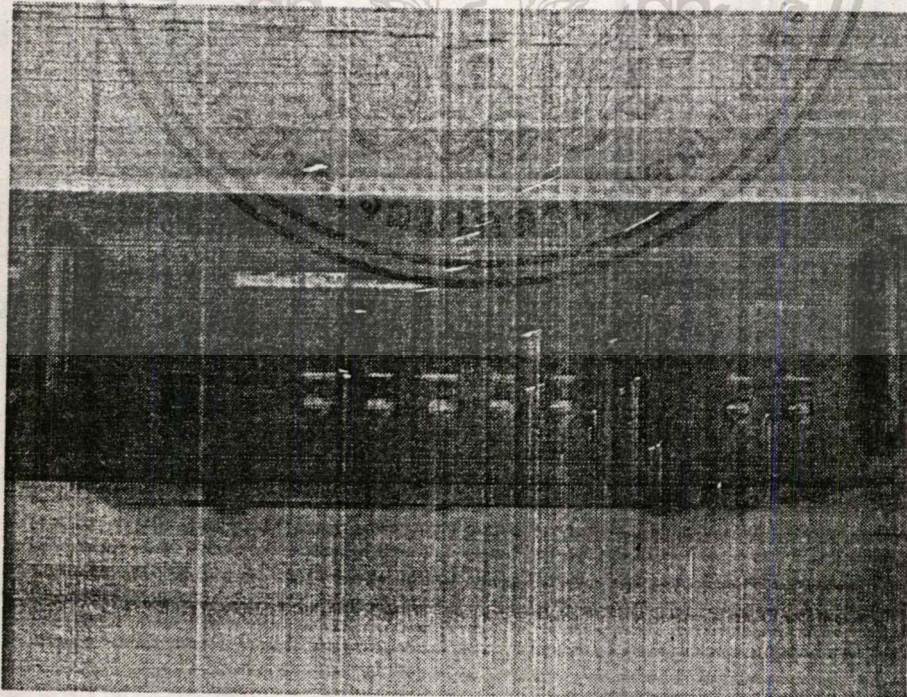
- ส่วนขยายสัญญาณและมอดูเลต มีบล็อกโคอะแกรมดังรูปที่ 6



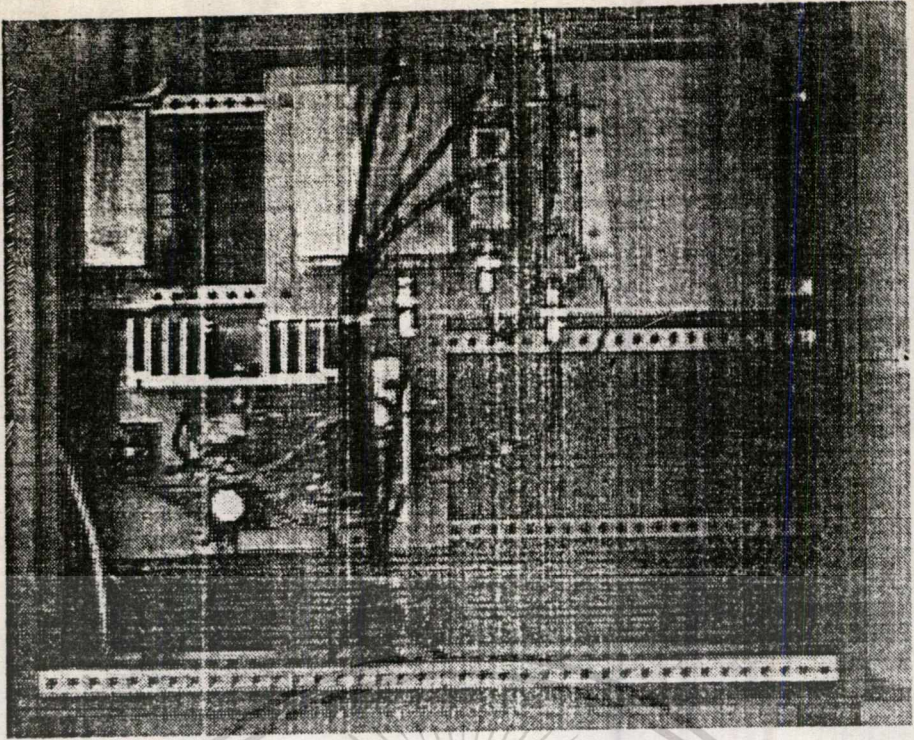
รูปที่ 6 แสดงส่วนประกอบของส่วนขยายสัญญาณและมอดูเลต

Schematic ของวงจรในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 7 และภาพถ่ายของส่วนขยายสัญญาณและ

มอดูเลตแสดงได้ดังรูปที่ 8 ก. ข.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



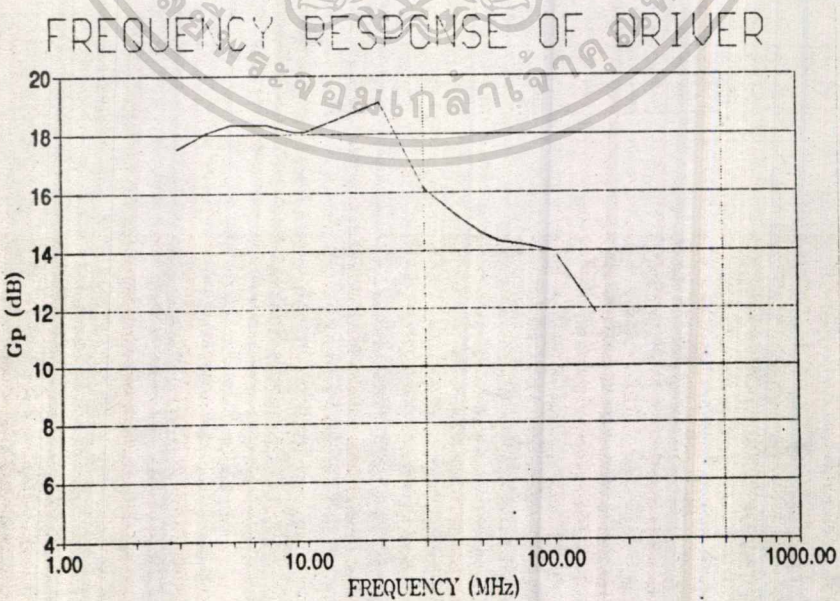
ข. แสดงส่วนประกอบภายในของส่วนขยายกำลังและมอดูเลท

รูปที่ 8 ภาพถ่ายแสดงส่วนขยายสัญญาณและมอดูเลท

ผลการทดลองของส่วนขยายสัญญาณและมอดูเลท

- ส่วนขยายสัญญาณภาคแรก ( ก่อนเข้ามอดูเลเตอร์ ) ทำการวัดอัตราขยายกำลังของ

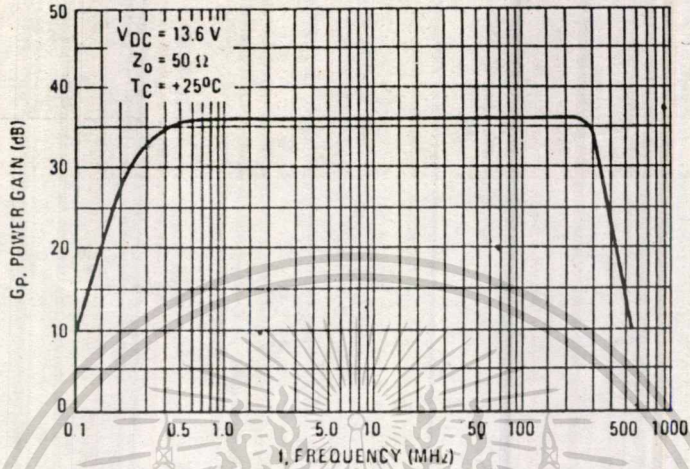
วงจรได้กราฟดังรูปที่ 9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่แสดงอัตราขยายกำลังของวงจรที่มีความถี่ต่างๆ มอนูญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนขยายสัญญาณภาคที่สอง ( หลังมอดูเลเตอร์ ) ทำการวัดอัตราขยายกำลังของ  
วงจรได้กราฟดังรูปที่ 10

FIGURE 1 - POWER GAIN versus FREQUENCY



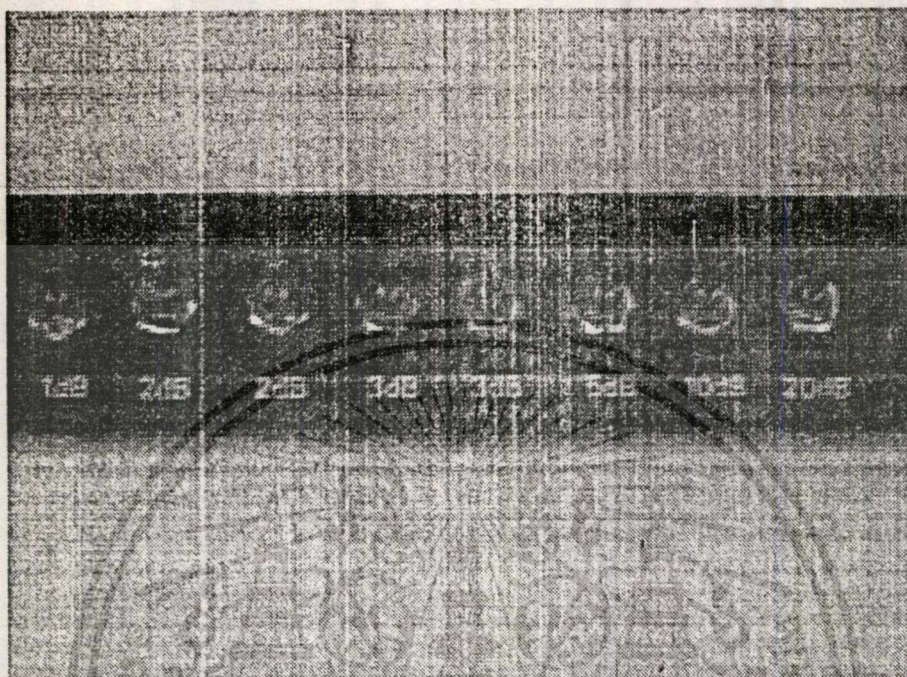
รูปที่ 10 แสดงอัตราขยายกำลังของวงจรที่ความถี่ต่างๆ

- ส่วนมอดูเลเตอร์ มีคุณสมบัติต่างๆดังนี้

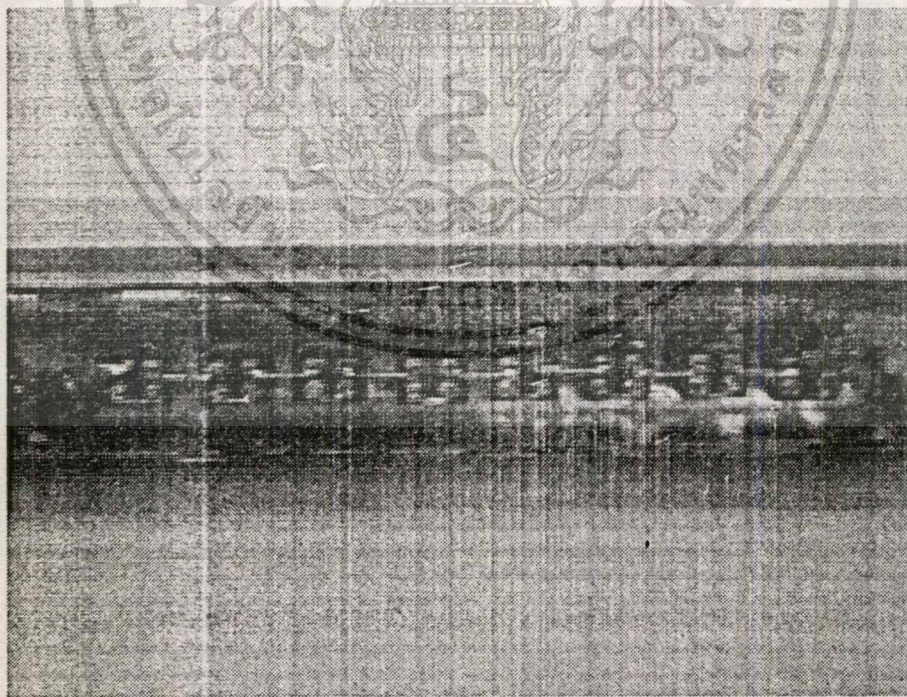
อัตราทนกำลังสูงสุด	50	mW
กระแสฟีด IF (max)	40	mA
ช่วงความถี่ใช้งาน ( ขา LO และ RF )	1 - 500	MHz
ช่วงความถี่ใช้งาน ( ขา IF )	DC - 500	MHz
conversion loss	5.5	dB
LO - RF isolation ( 1 - 10 MHz )	60	dB
( 20 - 250 MHz )	45	dB
( 250 - 200 MHz )	40	dB
LO - IF isolation ( 1 - 10 MHz )	45	dB
( 20 - 250 MHz )	40	dB
( 250 - 200 MHz )	30	dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ส่วนลดทอนสัญญาณ สามารถลดทอนสัญญาณได้ในช่วง 1 ถึง 40 dB มีอินพุทและเอาต์พุทรีซีแตนท์ประมาณ 50 โอห์ม ,Schematic ของวงจรในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 11 และภาพถ่ายของส่วนขยายสัญญาณและวอลตจเลขแสดงได้ดังรูปที่ 12 ก.- ข.



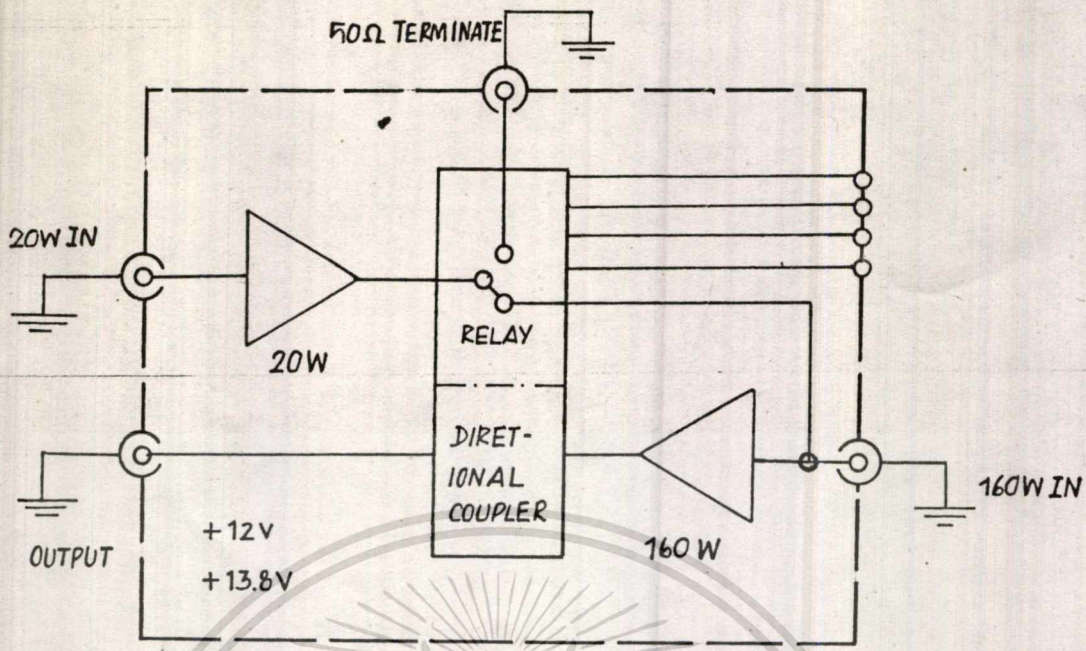
ก. แสดงภาพด้านหน้าของส่วนลดทอนสัญญาณ



ข. แสดงส่วนประกอบภายในของส่วนลดทอนสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นรูปที่ 12 ที่ภาพถ่ายแสดงส่วนลดทอนสัญญาณศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

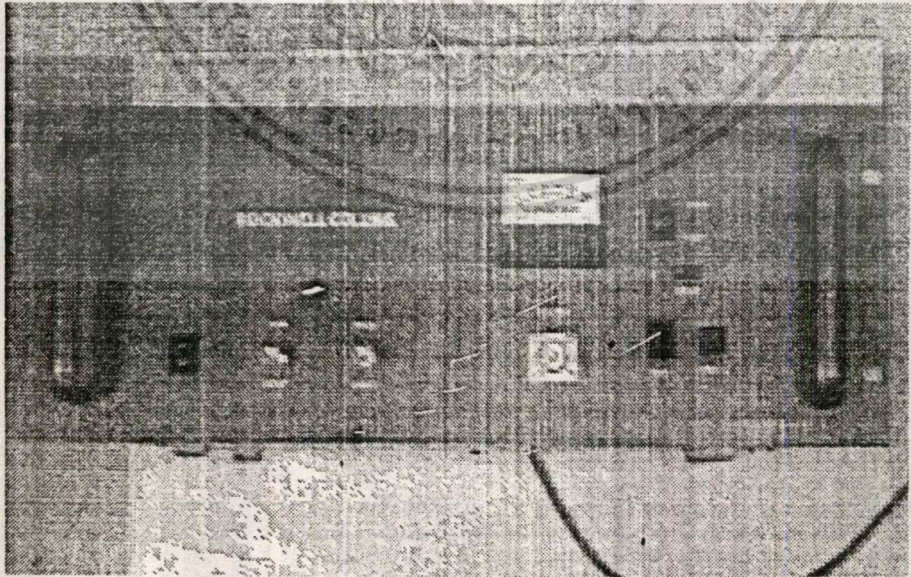
- ส่วนขยายกำลัง 20 วัตต์ และ 160 วัตต์ มีบัสลอคโคอะแกรมดังรูปที่ 13



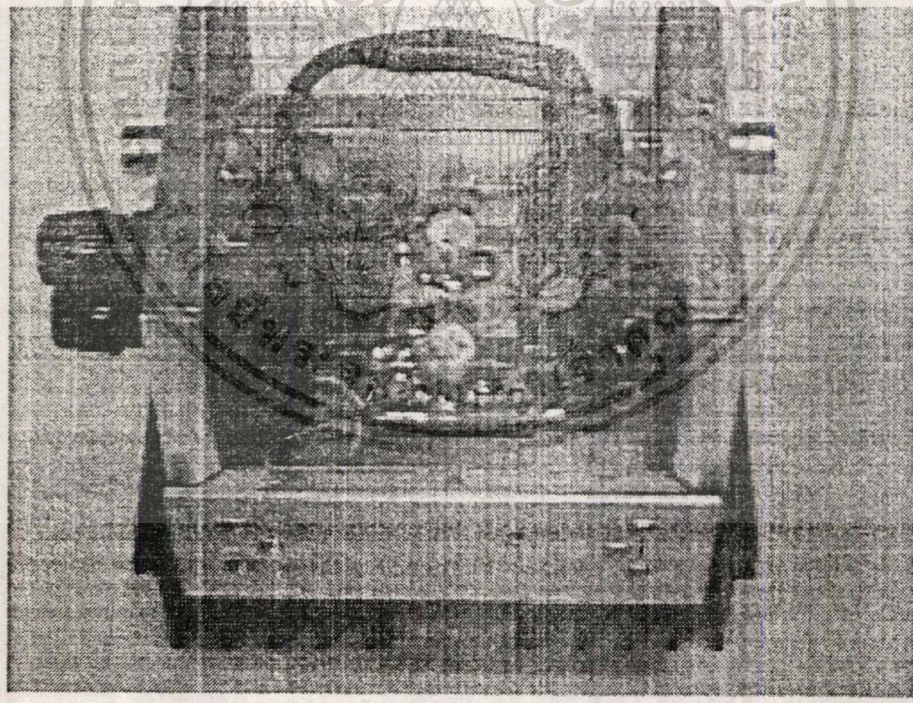
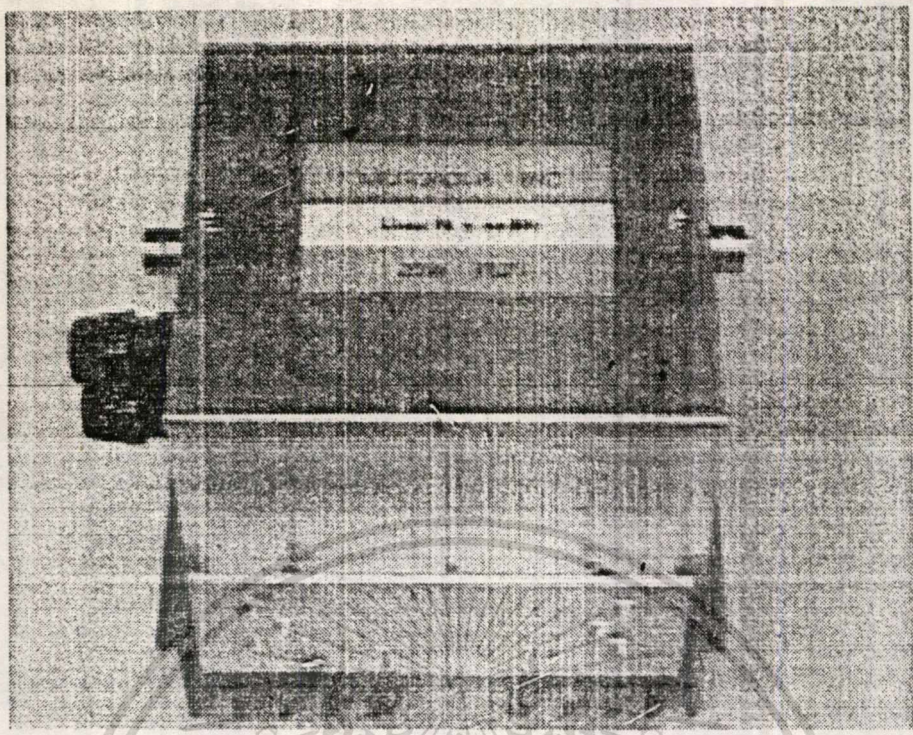
รูปที่ 13 แสดงส่วนประกอบของส่วนขยายกำลัง

Schematic ของวงจรในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 14 และภาพถ่ายของส่วนขยายกำลังแสดง

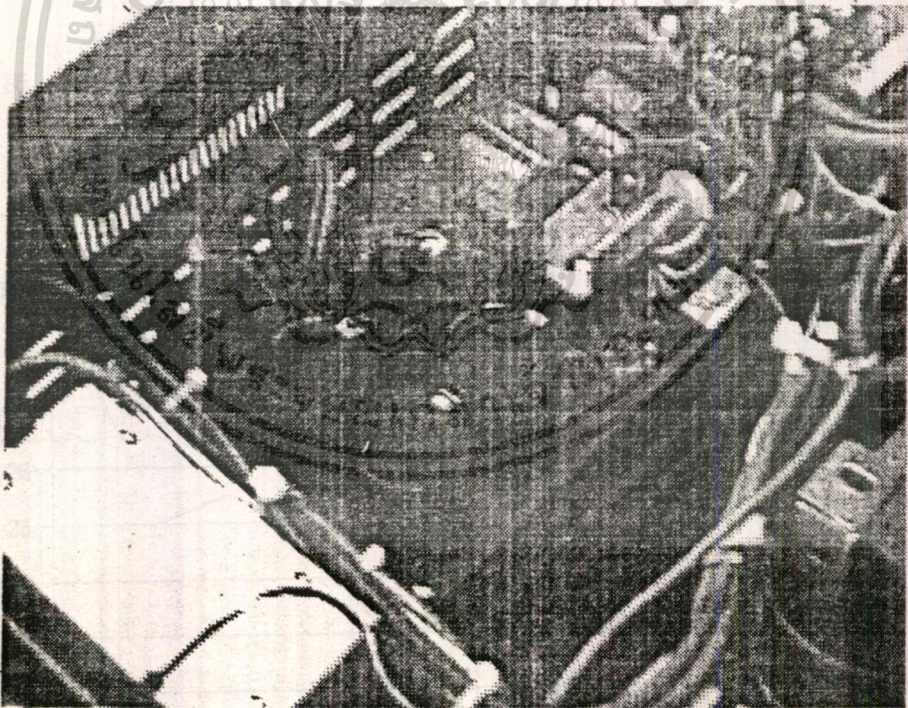
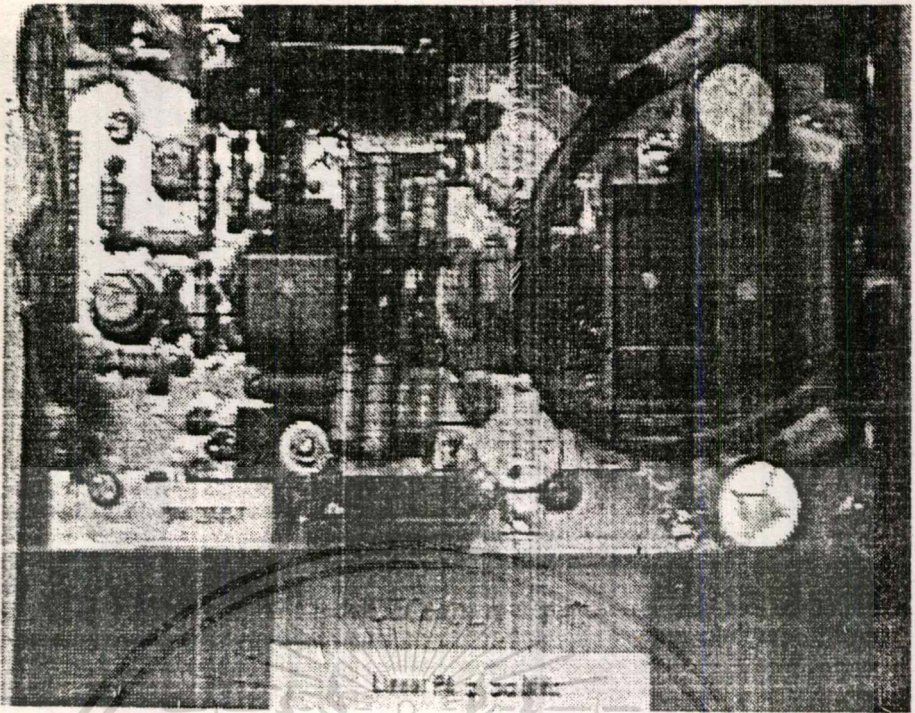
ได้ดังรูปที่ 15 ก. - ง.



เอกสารนี้เก็บ.เอ แสดงภาพด้านหน้าของส่วนขยายกำลัง ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



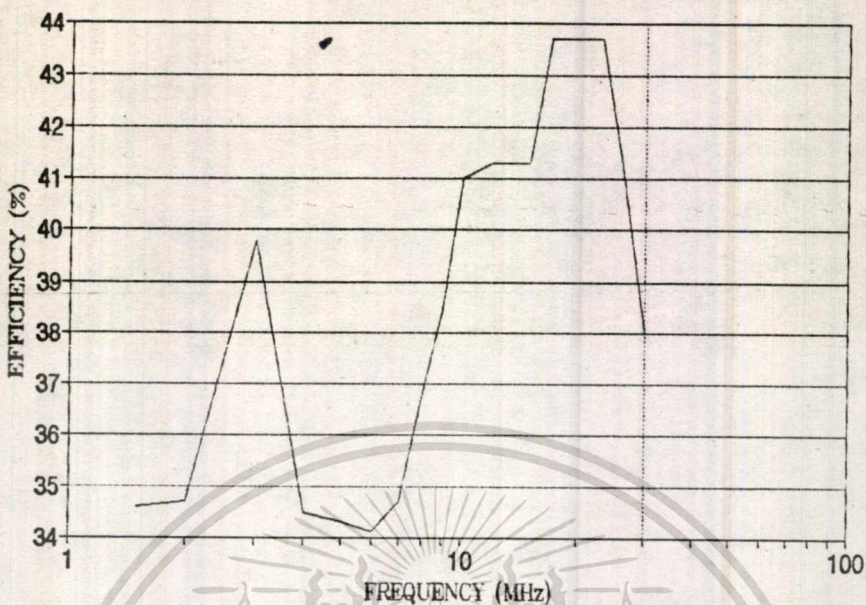
เอกสารนี้เก็บ. แสดงส่วนนางจารย์ย้ายกำลัง 20 ปี วดคั ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**ค. แสดงส่วนวงจรขยายกำลัง 160 วัตต์**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

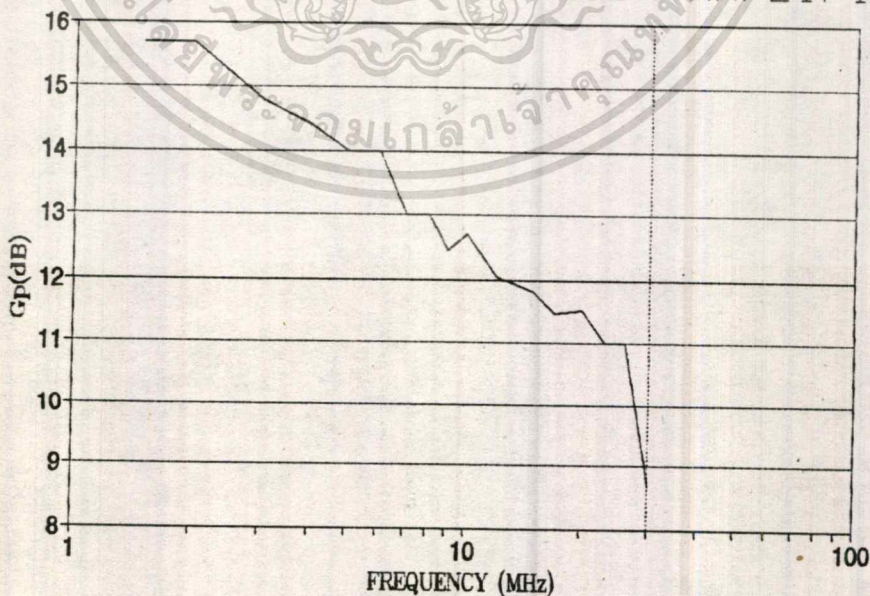
### EFFICIENCY OF 20W AMPLIFIER



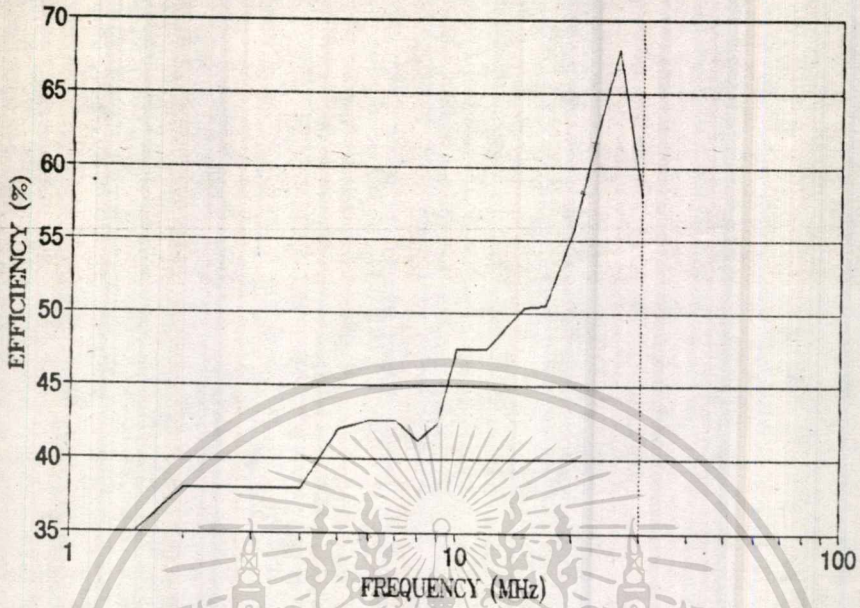
รูปที่ 16 กราฟแสดงคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังภาค 20 วัตต์

- ส่วนขยายกำลังภาคแรก ( 160 วัตต์ ) ทำการวัดอัตราขยายกำลัง, ประสิทธิภาพและอินพุท .VSWR ของวงจรได้กราฟดังรูปที่ 17

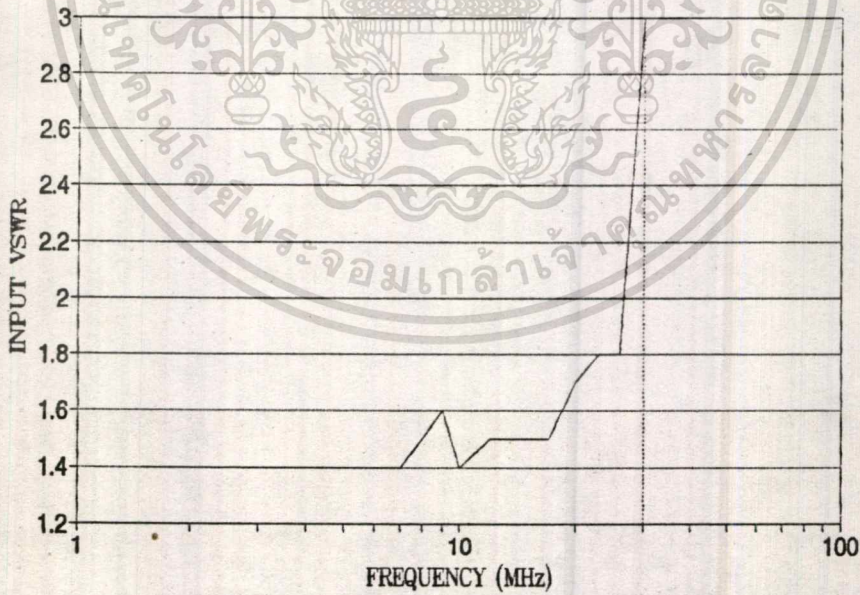
### FREQUENCY RESPONSE OF 160W AMPLIFIER



### EFFICIENCY OF 160W AMPLIFIER



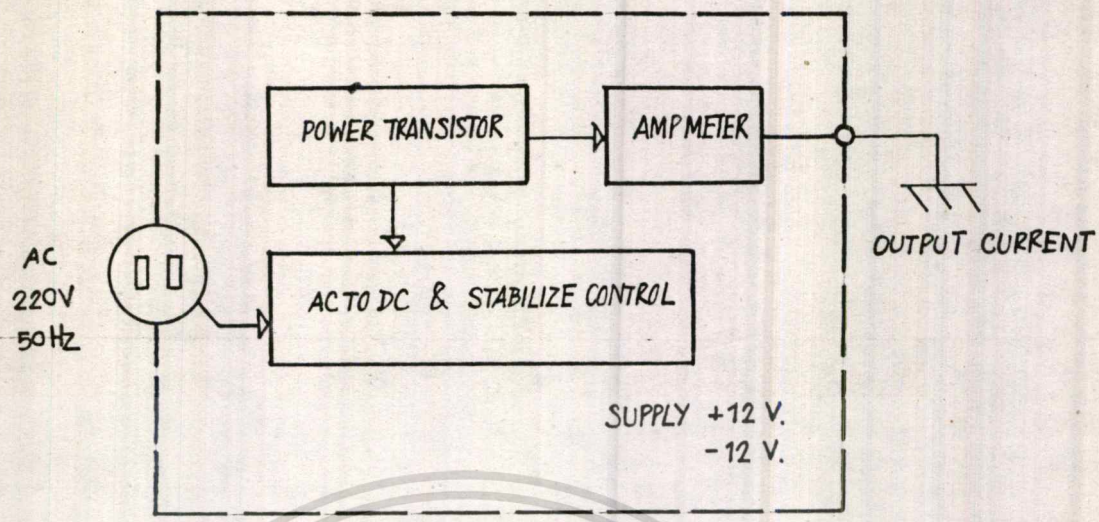
### INPUT VSWR OF 160W AMPLIFIER



รูปที่ 17 ภาพแสดงคุณสมบัติของวงจรขยายกำลังภาค 160 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในวงจำกัดเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าการณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

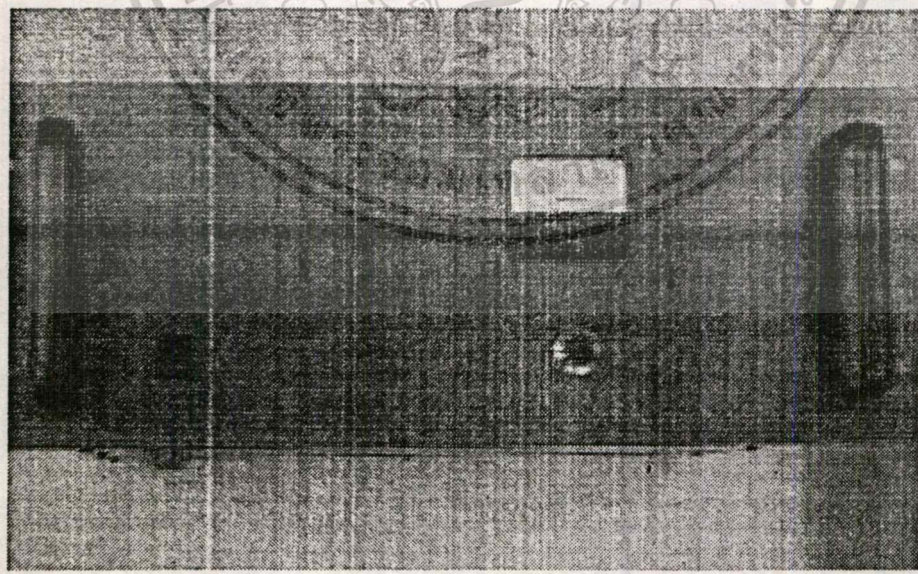
- ส่วนจ่ายกระแสสำหรับเครื่องกำเนิดสนามแม่เหล็ก มีบล็อคไดอะแกรมดังรูปที่ 18



รูปที่ 18 แสดงส่วนประกอบของส่วนจ่ายกระแส

Schematic ของวงจรในส่วนนี้แสดงดังรูปที่ 19 และภาพถ้วยของส่วนจ่ายกระแสแสดงได้

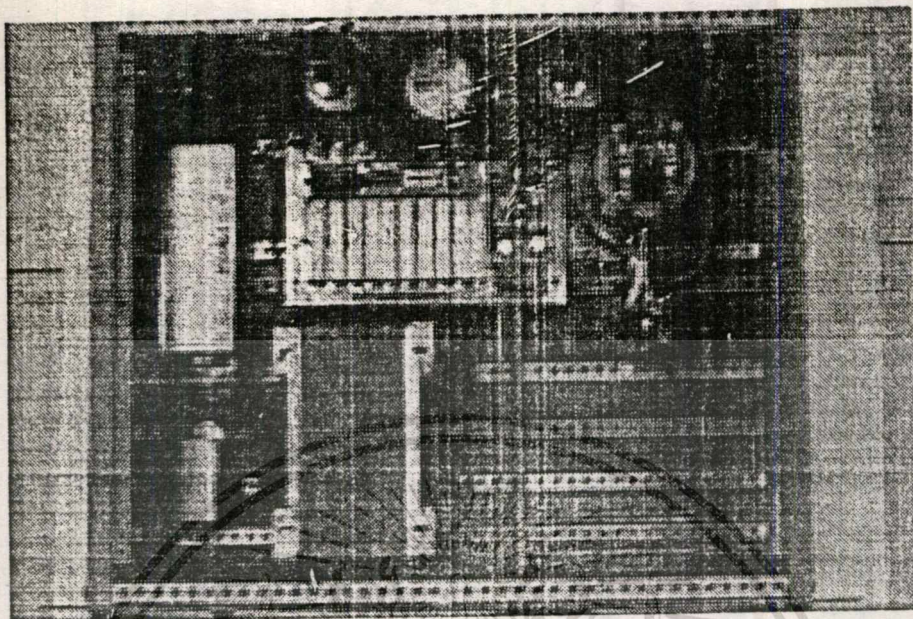
ดังรูปที่ 19 ก.- ค.



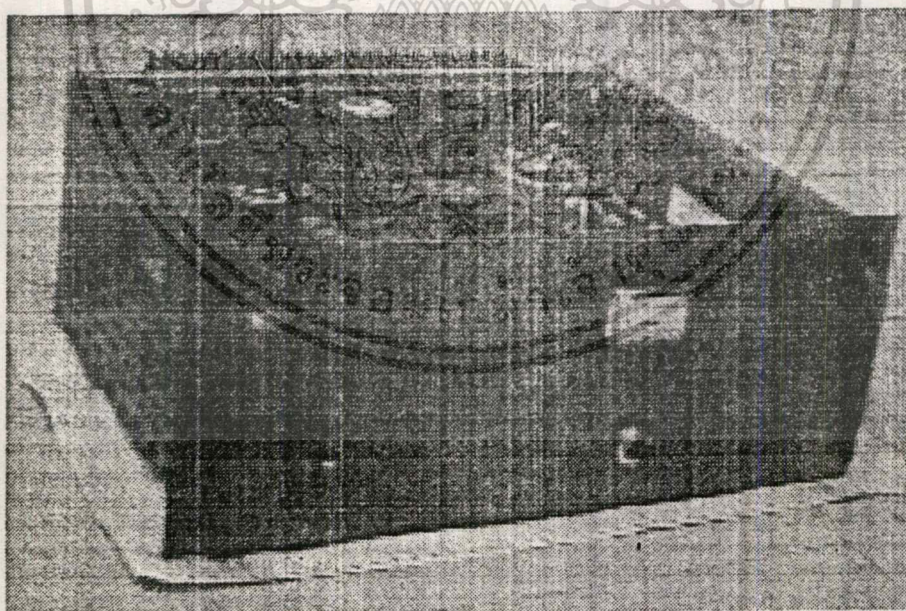
ก. แสดงภาพด้านหน้าของส่วนจ่ายกระแส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ข. แสดงส่วนประกอบภายในของส่วนขยายกระแส



ค. แสดงส่วนวงจรขยายกระแส

เอกสารนี้รูปที่ 19 ภาพแสดงส่วนจ่ายกระแสสำหรับเครื่องกำเนิดแม่เหล็กให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

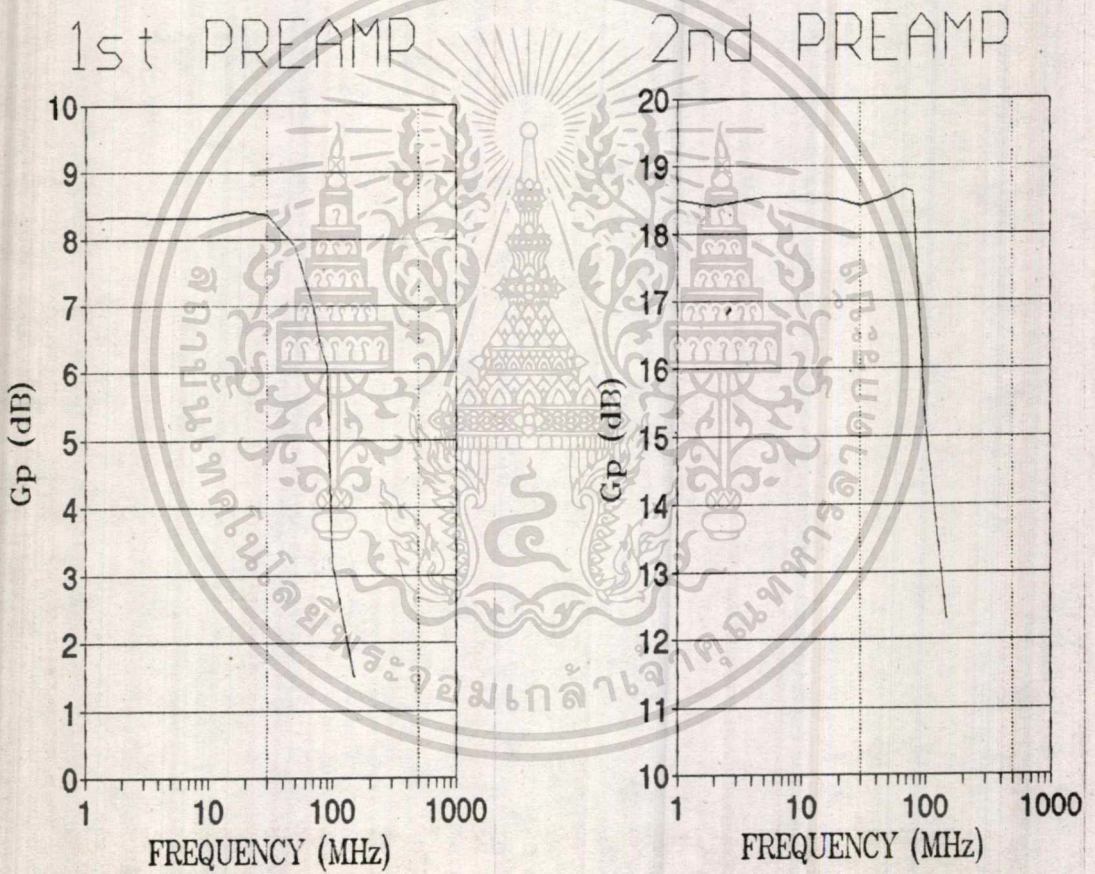
ผลการทดลองส่วนจ่ายกระแส

สามารถจ่ายกระแสให้กับส่วนสร้างสนามแม่เหล็ก โดยสามารถปรับค่าได้จาก 0 แอมป์ถึง  
ประมาณ 5 แอมป์

- วงจรขยายสัญญาณภาครับ

Schematic ของวงจรแสดงได้ดังรูปที่ 20

อัตราขยายกำลังของวงจรขยายทั้งสองแสดงได้ดังรูปที่ 21



ก.

ข.

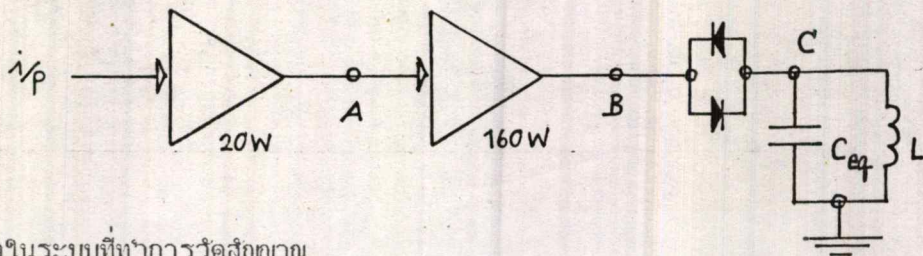
รูปที่ 21 อัตราขยายกำลังของวงจรขยายภาครับสองวงจร

ส่วนพารามิเตอร์ที่สำคัญของวงจรคือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ, อินพุตและเอาต์พุต VSWR ของวงจร

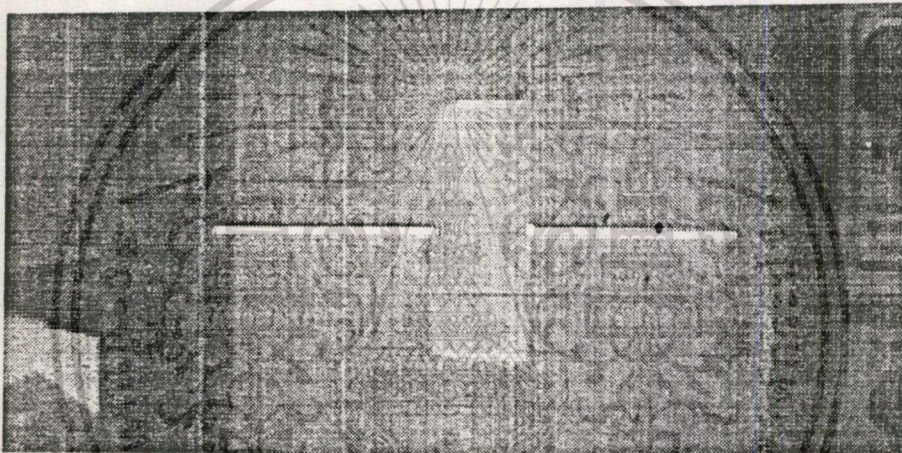
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลองของระบบภาคส่ง

เมื่อทำการทดลองส่งสัญญาณพาหะที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณพัลส์ที่มีความกว้าง ประมาณ 10 ไมโครวินาที สามารถวัดสัญญาณดังกล่าวที่จุดต่างๆในระบบได้ดังรูปที่ 22

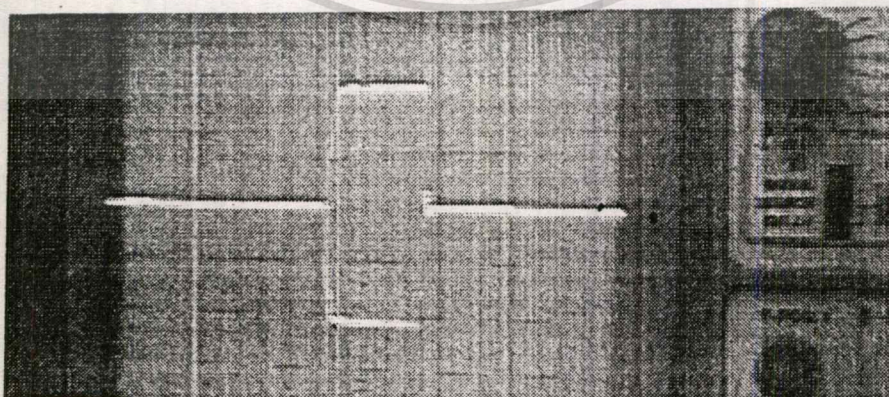


ก. จุดในระบบที่ทำการวัดสัญญาณ



0.2 v / DIV อัตราส่วน 1:100

ข. ลักษณะสัญญาณที่จุด A

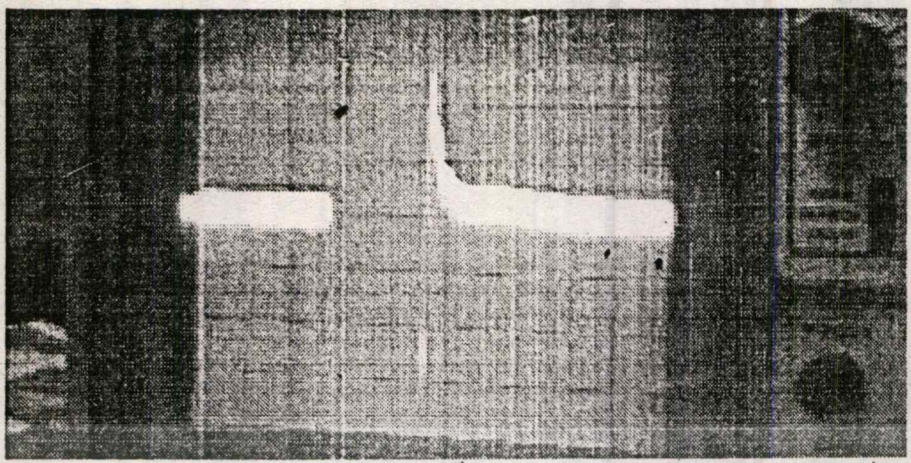


0.5V / DIV อัตราส่วน 1:100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ค. ลักษณะสัญญาณที่จุด B

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แสดง carrier ฟัลทวูที่ 100W 5mV/DIV อัตราส่วน 1:100

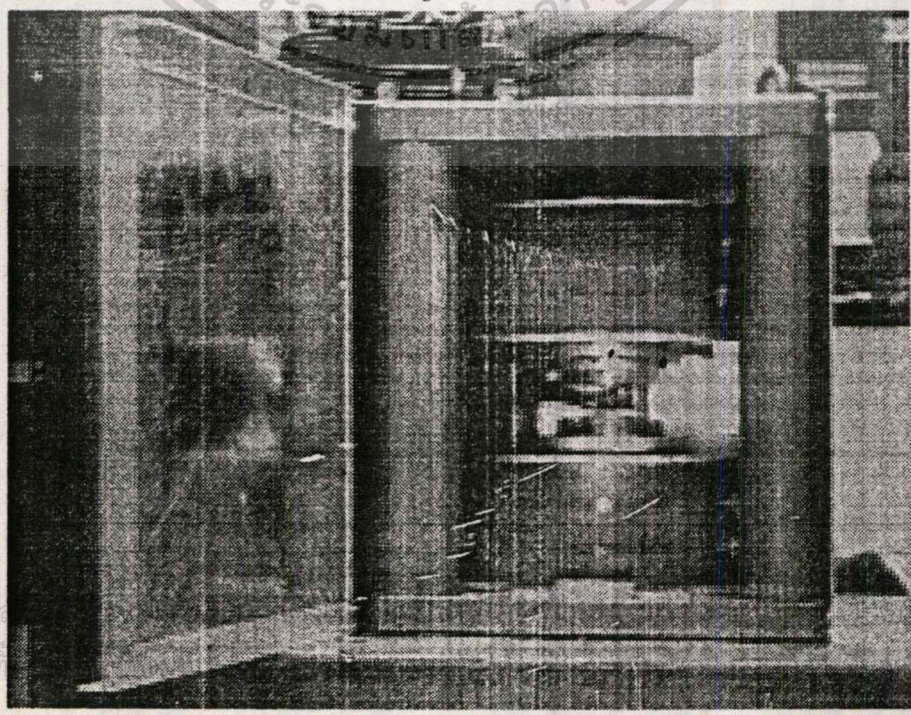
ง. ลักษณะสัญญาณที่เอาท์พุทของวงจรมอดูเลตกำลังภาคสุดท้าย ( จุด C )

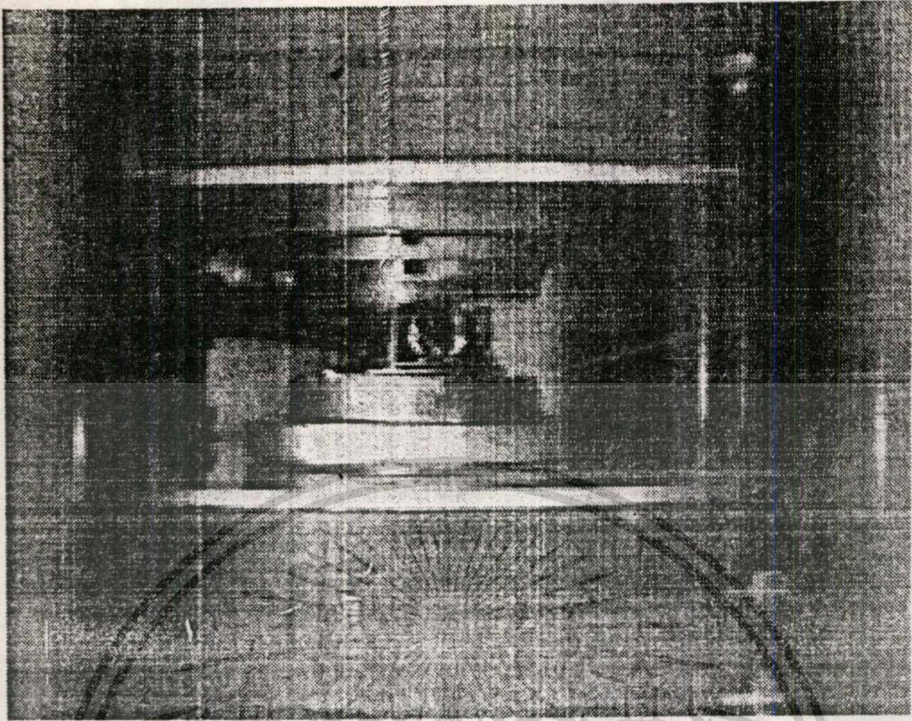
รูปที่ 22 แสดงลักษณะสัญญาณพาห้ที่ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณพัลซ์ซึ่งเป็นสัญญาณทดลองระบบ

จากรูปที่ 22 จะเห็นว่าลักษณะสัญญาณพัลซ์ที่วงจรมอดูเลตรวมทุกภาคแล้วอยู่ในเกณฑ์ที่ดี คือมี rise time และ โอเวอร์ชูตไม่มากเกินไป

- ส่วนสร้างสนามแม่เหล็ก

เป็นส่วนสร้างสนามแม่เหล็กแบบรีซโซที่ฟ สามารถสร้างสนามแม่เหล็กได้ไม่เกิน 0.5 เทสลาและ ความคงที่ของสนามแม่เหล็กที่พอใช้ รูปที่ 23 แสดงลักษณะของส่วนนี้





รูปที่ 23 แสดงส่วนสร้างสนามแม่เหล็กและโพรบ

## 5.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

ผลการทดลองของแต่ละส่วนของระบบเป็นที่น่าพอใจ แต่ยังไม่ได้ทำการทดลองทั้งระบบ เพื่อสร้างและรับสัญญา FID เนื่องจากขณะที่จะทำการทดลองทั้งระบบยังขาดเครื่องมือในการวัดขนาดความเข้มของสนามแม่เหล็กที่มีความแม่นยำสูงซึ่งมีความจำเป็นมากในการทดลอง ดังนั้นโครงการนี้จึงจะเป็นเพียงการสร้างเครื่องมือเพื่อเตรียมสำหรับการสร้างและรับสัญญา FID , อย่างไรก็ตาม เครื่องมือที่สร้างขึ้นนี้อาจจะยังไม่เหมาะสมต่อระบบนี้ หรืออาจจะเกิดปัญหาเมื่อทำการสร้างสัญญา FID ซึ่งคาดว่าปัญหาที่ประสบหลังจากทำการทดลองสร้างสัญญา FID แล้วจะช่วยเป็นแนวทางที่สำคัญในการพัฒนาและปรับปรุงเครื่องมือที่สร้างขึ้นในอนาคต

### 5.3 ปัญหาที่ประสบ

ส่วนใหญ่มักจะเกี่ยวกับการที่เครื่องมือวัดไม่มี, ไข่ม่ม่ามาตรฐานหรือเก่าเกินไป เช่น ออสซิลโลสโคปที่ระดับสัญญาณต่ำๆ จะวัดผิดพลาด, ซิกแนลเจนเนอเรเตอร์มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ไม่เท่ากับ 50 โอห์ม, โพรบไม่เหมาะสมสำหรับย่านความถี่ที่ใช้งาน, VSWR มิเตอร์มีความไวต่ำ ท้าให้วงจรขยายที่มีขนาดกำลังต่ำไม่สามารถวัดค่า สัมประสิทธิ์การสะท้อนทั้งอินพุทและเอาต์พุท, ขาดข้อมูลทางเทคนิคหลายอย่างเกี่ยวกับวงจรที่สร้าง ซึ่งผู้จัดทำก็ได้พยายามหาแต่ไม่พบในประเทศไทย, ขาดเครื่องมือวัดสัญญาณในโดเมนความถี่ ซึ่งเป็นเครื่องมือที่มีบทบาทสำคัญมากในการสร้างและพัฒนางจร, ขาดเครื่องมือวัดความเข้มสนามแม่เหล็กที่แม่นยำ, ตัวเก็บประจุที่ขม่านกับขดลวดของแม่เหล็กจำเป็นต้องมีอัตราทนศักดาสูง เป็นกิโลโวลท์และต้องสามารถปรับค่าได้ด้วย ซึ่งหาได้ยาก และสุดท้ายคือผู้จัดทำยังขาดความรู้และประสบการณ์เกี่ยวกับวงจรที่สร้าง เป็นต้น

### 5.4 แนวทางการพัฒนาส่วนที่เหลือของระบบ

- สร้างระบบส่งที่ยังทำค้างอยู่ให้เรียบร้อย ซึ่งขณะนี้อยู่ในภาคส่งของการสร้างและรับสัญญาณ FID ที่ยังอยู่ในระหว่างทำการทดลองเลือกวงจรอยู่คือ ส่วนแยกภาคส่งและรับ โดยในตอนแรกผู้จัดทำพยายามใช้วงจรที่เป็นแบบ lumped แทนการใช้สายส่งที่มีความยาว  $\lambda/4$  ซึ่งเมื่อทำการทดลองแล้วพบว่าสามารถแยกสัญญาณขณะส่งออกจากภาครับได้เพียง 30 dB เท่านั้น
- หลังจากสร้างระบบของภาคส่งเรียบร้อยควรจะทำทดลองกระตุ้นสัญญาณ FID ด้วยตัวอย่างคือน้ำ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่า เครื่องมือที่สร้างขึ้นในเฟสแรกนั้นยังต้องปรับปรุงคุณสมบัติด้านใดบ้าง และปัญหาสำคัญที่ผู้จัดทำคิดว่าจะประสบคือ การกวาดแหล่งกำเนิดสัญญาณเพื่อหาความถี่ลาร์มอร์ของตัวอย่างซึ่งเป็นงานที่ลำบาก โดยสมมติฐานเมื่อทำการทดลองแล้วยังไม่สามารถรับสัญญาณ FID ได้ อาจเป็นเพราะคุณสมบัติของเครื่องมือของระบบการส่งหรือความถี่ของแหล่งกำเนิดสัญญาณไม่ตรงกับความถี่ลาร์มอร์ที่ตั้งไว้
- สมมติฐานของแหล่งกำเนิดของความผิดพลาดที่ทำให้ไม่สามารถสร้างและรับสัญญาณ FID ของผู้จัดทำในขั้นต้น สรุปดังนี้

1. carrier พัดทวู ที่ปรากฏที่ภาคส่งภาคสุดท้าย
2. ทรานเซียนท์ เรสพอนท์ขณะหยุดจ่ายพลังงานของสัญญาณที่ใช้กระตุ้น
3. loss ของสัญญาณ FID ขณะผ่านส่วนแยกภาครับ-ส่ง
4. สัญญาณรบกวนอื่นเนื่องมาจากสาเหตุมากมาย

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ ศ.ดร. ไพรัช ชัยพงษ์ , ผศ.ดร. รัตติกร วราดุลกิริพันธ์ ที่ให้คำปรึกษาในการทำโครงการจนสำเร็จ และขอขอบคุณ พี่สาวส์ดี บุญยะเวศ , พี่อัครินทร์ คุณกิตติ ที่สมัคคีต์ จันวันและน้องกั๊กดีพงษ์ จันทร์ใบ ซึ่งคอยช่วยเหลือ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหาต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. Granberg, H.: Broadband transformer and power combining technique for RF ,AN-749 ,Motorola RF device databook.
2. Granberg, H.: Measuring the intermodulation distortion of Linear amplifier,EB38 ,Motorola RF device databook.
3. Granberg, H.: POWER MOSFET versus BIPOLAR transistors, AN-860 , Motorola RF device databook.
4. SUPER-COMPACT User Manual , Version 1.8 Communication Consulting Corporation ,Paterson ,NJ,November 1984.
5. J. Smith, Modern Communication circuit ,Mc Graw-Hill , New York ,1986.
6. B.C. Kuo ,Automatic Control System ,Prentice Hall ,1975.
7. F.M. Gardner, Phaselock Techniques : 2nd ed. , Wiley , New York , 1979.
8. R.E. Best ,PHASE-LOCK LOOPS Theory design and applications ,Mc Graw-Hill ,New York ,1984.
9. MECL device data ,Motorola Inc. Pheonix Arizona ,1989.
10. U.L. Rohde , T.T.N Bucher , Communication Receiver principle and design ,Mc Graw-Hill ,NewYork ,1988.
11. S.Y. Liao ,Microwave Circuit Analysis and Amplifier Design ,Prentice Hall ,1987.
12. R.S. Carson ,High Frequency Amplifier ,John Wiley & Son ,New York ,1982.
13. W.K. Chen , Theory and Design of Broadband Matching Network ,Pergamon Press ,1976.
14. R.G.Meyer ,R.Eschenbach and R.Chin ,A Wideband UltraLinear Amplifier from 3 to 300 MHz ,IEEE Vol SC-9 ,Aug 1974.

15. E.H.Nordholt ,Class and Property of Multiloop Negative-Feedback Amplifier ,IEEE Trans. CAS-28(3) ,203-211 March 1981.
16. G.D. Birkhoff ,Dynamic System ,New York American Mathematical Society ,1972.
17. P.R. Gray and R.G. Meyer ,Analysis and Design of Analog Integrated Circuit ,Wiley ,New York ,1977.
18. G.D. Vendelin. Anthony M.Pavio and Ulrich L.Rohde ,Micro-Wave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Technique, ,Wiley ,New York ,1990.
19. T.J. Aprille ,Wideband Match Amplifier Design Using Dual Loop Feedback and Two Common Emitter Stages, IEEE CAS -23 , July 1976.
20. U.S. Patent 3 493 882 .Unit Transistor Amplifier . Feb 3 1970.
21. RCA RF Power Transistor Manual ,RCA Corporation ,1971.
22. G. Daryanani ,Principle of Active Network Synthesis and Design ,Wiley ,New York ,1976.
23. MOTOROLA Linear and Interface ICs ,Motorola Inc. Pheonix Arizona ,1989.
24. Granberg, H.: Two-Stage 1kW Solid-state Linear Amplifier, AN-758 ,Motorola RF device databook.
25. Granberg, H.: Low-distortion 1.6 to 30 MHz SSB Driver Designs ,AN-779 ,Motorola RF device databook.
26. J.K. Hardy ,High Frequency Circuit Design ,Reston ,Viginig ,1979.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้