



วงจรเลือกรับความถี่คลื่นวิทยุและวงจรขยายกำลัง
ภาคส่งวิทยุรับ-ส่ง แบบมือถือ สำหรับวิทยุสมัครเล่น

TWO-METER PREAMPLIFIER AND RF POWER AMPLIFIER FOR HANDITALKIES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาเทคนิคอุตสาหกรรม
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2534

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

009601

หัวข้อปริญญานิพนธ์

วางจรรยาบรรณวิชาชีพ และวางจรรยาบรรณกำลัง
ภาคส่งวิทยุรับ-ส่ง แบบมือถือ สำหรับวิทยุสมัครเล่น

โดย

สุทธิรักษ์ สิริสุทธิ
วุฒิกุล เลิศวิจิตรกาล

ภาควิชา

เทคนิคอุตสาหกรรม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ กฤดากร กล่อมการ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้นำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รศ.ดร.สมเกียรติ ศกเดชะ)

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

(ผศ.ดร.กนก เจริญพงศ์เวช)

(ดร.ไพศาล นาคพิพัฒน์)

(อ.ประดิษฐ์ วัชรพิบูลย์)

(อ.สมภพ แก้วมีชัย)

(อ.ไพศาล สิทธิโยภาสกุล)

(อ.กฤดากร กล่อมการ)

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับงานวิชาการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แจ้งใช้ประโยชน์ด้านการค้า
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Report

**TWO-METER PREAMPLIFIER AND RF
POWER AMPLIFIER**

BY

Suthiruk Sirisuth

Vutigorn Lertvijittagarn

Advisor

Kridakorn Klomkarn

Accepted by The Faculty of Engineering, King Mongkut's
Institute of Technology Ladkrabang in Partial Fulfillment of
the Requirement for The Bachelor's Degree.

----- Dean of Faculty of Engineering
(Asso.Prof.Dr.Somkeart Suphadej)

Project Report Committee

(Asst.Prof.Dr.Kanog Jenjirapongvej) (Dr.Paisan Nakpipatana)

(Mr.Pradit Vacharapiboon) (Mr.Sompop Kawmeechai)

(Mr.Paisan Sithiyopasakul)

(Mr.Kridakorn Klomkarn)

Copyright of the Faculty of Engineering, KMITL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญาโท

วงจรถูกเลือกความถี่คลื่นวิทยุและวงจรถูกขยายกำลังภาคส่ง วิทยุรับส่งแบบมือถือสำหรับนักวิทยุสมัครเล่น

โดย

สุทธิรักษ์ ลีริสุทธิ์

วุฒิกุล เลิศวิจิตรกาล

อาจารย์ กฤดากร กลุ่มมการ

2534

ที่ปรึกษาปริญญาโท
ปีการศึกษา

บทคัดย่อ

ช่องความถี่ VHF 144-146 MHz. ซึ่งเป็นย่านวิทยุสมัครเล่น กำลังได้รับความนิยมอย่างสูงของนักวิทยุสมัครเล่นอยู่ในขณะนี้ จะเห็นว่ามีการใช้ช่องความถี่ย่านนี้เต็มตลอดเวลา ทำให้เกิดคลื่นรบกวนกันจนไม่สามารถรับสัญญาณได้ชัดเจน

ปริญญาโทฉบับนี้เป็นรายงานการสร้างวงจร Preamplifier ภาครับโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลด Intermodulation และเพิ่ม Sensitivity ในการรับคลื่น และ วงจร RF Power Amplifier ภาคส่ง เพื่อขยายกำลังทางด้านส่งให้มีรัศมีการรับ-ส่งกว้างไกลขึ้น

หวังว่านักวิทยุสมัครเล่นทั้งหลายที่สนใจ จะลองนำวงจรเหล่านี้ไปทดลองสร้างใช้งานดูบ้าง

Project Report

Two-Meter Preamplifier and RF
Power Amplifier for Handitalkies

By

Suthiruk Sirisuth
Vutigorn Lertvijittagarn

Project Report Advisor

Mr.Kridakorn Klomkarn

Academic Year

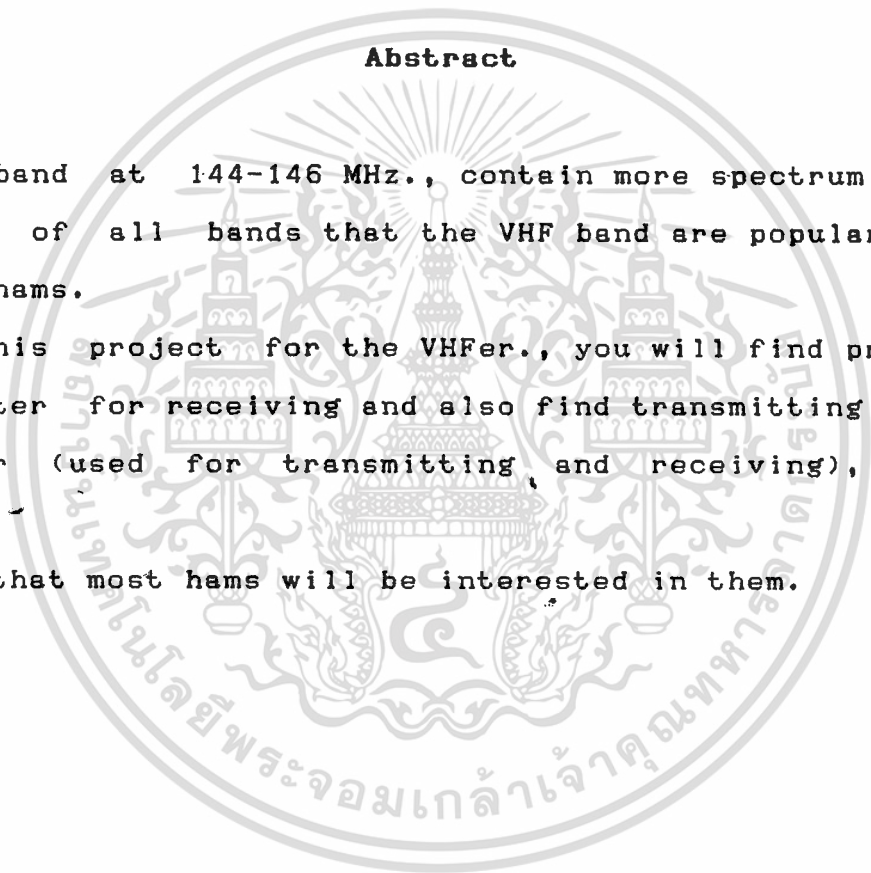
1991

Abstract

The band at 144-146 MHz., contain more spectrum space than the total of all bands that the VHF band are popular favorites with many hams.

In this project for the VHFer., you will find preamplifier and converter for receiving and also find transmitting converter, transverter (used for transmitting and receiving), RF power amplifier.

Hope that most hams will be interested in them.



กิตติกรรมประกาศ

ผู้จัดทำโครงงานขอขอบคุณ อาจารย์กฤตากร กล่อมการ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้ให้การสนับสนุน แนะนำ แก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ จนทำให้โครงงานนี้สำเร็จตามกำหนด คุณสมศักดิ์ ภู่วรรณเจริญชัย กรรมการและเลขานุการชมรมวิทยุสมัครเล่น การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เอื้อเฟื้อหนังสือตำรา ผู้ควบคุมห้องปฏิบัติการโทรคมนาคม ฝ่ายระบบสื่อสาร การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย เอื้อเฟื้อสถานที่ทำการทดลองและอุปกรณ์ทดสอบ ตลอดจนคณะกรรมการสอบปริญญาบัตรทุกท่าน มา ณ ที่นี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ฉ
กิตติกรรมประกาศ	ช
สารบัญภาพ	ฅ
สารบัญแผนภูมิ	ญ
สารบัญตาราง	ณ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความมุ่งหมายของปริญญาโท	1
1.2 จุดมุ่งหมายของปริญญาโท	1
1.3 การดำเนินงานโดยสรุป	1
2. ทฤษฎีการออกแบบวางจร	
2.1 วงจรภาค Preamplifier	3
2.2 วงจรภาค RF Power Amplifier	3
2.3 วงจรกรองความถี่	16
3. โครงการงาน	
3.1 Preamplifier 144.5 MHz	25
3.2 RF Power Amplifier 10 Watt	34
4. การทดสอบคุณสมบัติวิทยุรับ-ส่ง ย่าน VHF	44
5. อันตรายจากวิทยุรับ-ส่ง และการป้องกัน	
5.1 อันตรายจากคลื่นวิทยุ	67
5.2 อันตรายจากสารพิษใน RF Power Transistor	76
เอกสารอ้างอิง	80
ภาคผนวก ก. สัญณลักษณะต่าง ๆ ที่ใช้ในวงจร	81
ภาคผนวก ข. ความหมายของศัพท์ ที่ใช้ในเครื่องรับ-ส่งวิทยุ	83
ภาคผนวก ค. Semiconductor Technical Data	87

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

หน้า

1.	รูปที่ 2.1.1	วงจรตัวอย่างของภาครับของวิทยุมือถือที่ใช้ทรานซิสเตอร์ธรรมดา	3
2.	รูปที่ 2.2.1	แสดงกระแสเอาต์พุตของการทำงานของวงจรขยายในคลาสต่าง ๆ	4
3.	รูปที่ 2.2.2	แสดงความสัมพันธ์ของกระแส I_c และแรงดัน V_{ce}	4
4.	รูปที่ 2.2.3	(a) แสดงทรานซิสเตอร์ต่อแบบคอมมอนอิมิตเตอร์	5
		(b) แทนทรานซิสเตอร์ด้วย R และ X	6
5.	รูปที่ 2.2.4	วงจรพื้นฐานของอิมพีแดนซ์แมตชิง	7
6.	รูปที่ 2.2.5	แสดงวงจรแมตชิงในการปรับอิมพีแดนซ์แบบ (a) (b) (c) (d)	7
7.	รูปที่ 2.2.6	วงจรขยายคลาสซี 1 สเตจ	9
8.	รูปที่ 2.2.7	แสดงรูปสัญญาณอินพุตที่ป้อนเข้าวงจรขยาย	9
9.	รูปที่ 2.3.1	วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน พร้อมแผนภูมิการตอบสนองความถี่ (สำหรับวงจรรองอ้างอิงการออกแบบ)	18
10.	รูปที่ 2.3.2	แสดงรายละเอียดวงจรที่สมบูรณ์และลักษณะการตอบสนองความถี่	20
11.	รูปที่ 2.3.3	วงจรรองแถบความถี่ที่ได้พร้อมค่าอุปกรณ์	22
12.	รูปที่ 2.3.4	วงจรรองความถี่แบบพาส	23
13.	รูปที่ 3.1.1	วงจร Preamplifier 144.5 MHz	26
14.	รูปที่ 3.1.2	แสดงการพันขดลวด L_2	27
15.	รูปที่ 3.1.3	แสดงด้านลายวงจรพิมพ์ขนาดเท่าของจริง	28
16.	รูปที่ 3.1.4	แสดงการประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์	28
17.	รูปที่ 3.1.5	แสดงการต่อ FB101 เข้าขา D ของ Q_1 C_3 C_4 ต่อที่ขา G_2 และ S ตามลำดับ	28
18.	รูปที่ 3.1.6	แสดงการต่อเครื่องมือเพื่อทดสอบการทำงานของวงจร	30
19.	รูปที่ 3.1.7	ภาพถ่ายอุปกรณ์ต้นแบบ Preamplifier และ RF Power Amplifier	31
20.	รูปที่ 3.1.8	ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณอินพุตของภาครับวิทยุมือถือให้นำไปใช้ประโยชน์ด้าน	31

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้ง Preamplifier และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญแผนภูมิ		หน้า
1. แผนภูมิที่	2.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ทำงานกับอัตราส่วนของกระแสคอลเล็กเตอร์สูงสุดต่อกระแสคอลเล็กเตอร์เฉลี่ย	12
2. แผนภูมิที่	2.3.1 แสดงรูปร่างของผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน	21
3. แผนภูมิที่	2.3.2 รูปร่างการตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านที่ได้จากการคำนวณ	22
4. แผนภูมิที่	3.1.1 แสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน	25
5. แผนภูมิที่	3.1.2 การตอบสนองความถี่ผ่านย่านต่าง ๆ ของ Preamplifier (ต้นแบบ)	33
6. แผนภูมิที่	3.2.1 แสดงการตอบสนองความถี่ผ่านย่านต่าง ๆ ของ RF Power Amplifier (ต้นแบบ)	42
7. แผนภูมิที่	4.1 แสดงการตอบสนองความถี่ 6 dB/Octave De-Emphasis	54
8. แผนภูมิที่	4.2 แสดงการตอบสนองความถี่เสียงที่ 6 dB/Octave Pre-Emphasis	65
9. แผนภูมิที่	5.1.1 แสดงระดับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลอดภัย	74

สารบัญตาราง		หน้า
1. ตารางที่ 2.3.1	ตารางสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ต่ำรีปเบิ้ล 1 dB	17
2. ตารางที่ 2.3.2	ตารางหาค่า LC ของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ธ	23
3. ตารางที่ 3.1.1	แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ทุกตัวในวงจร	29
4. ตารางที่ 3.2.1	แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ทุกตัวในวงจร	36
5. ตารางที่ 4.1	ตารางการทดสอบ Audio Response ภาคเครื่องรับ	53
6. ตารางที่ 4.2	ตัวอย่างของการทดสอบการตอบสนองความถี่เสียงภาคเครื่องส่ง	65
7. ตารางที่ 5.1.1	คลื่นวิทยุย่านต่าง ๆ แบ่งตามความถี่และคุณสมบัติเฉพาะ	68
8. ตารางที่ 5.1.2	แสดงคุณสมบัติทางฟิลิกส์ของพลังงานโพตอนของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	69
9. ตารางที่ 5.1.3	ผลเชิงเปรียบเทียบจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	70

๘ / ๘

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

21.	รูปที่ 3.1.9	ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของ Preamplifier	32
22.	รูปที่ 3.2.1	วงจรรขยายกำลัง 144 MHz 15 วัตต์	35
23.	รูปที่ 3.2.2	แสดงการพินขดลวด	
24.	รูปที่ 3.2.3	แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ด้านลายพิมพ์ทองแดง ขนาดเท่าของจริง	37
25.	รูปที่ 3.2.4	แสดงการประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์	38
26.	รูปที่ 3.2.5	แสดงวงจรแมตซ์ระหว่างเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่งกับอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์สเตจแรก	39
27.	รูปที่ 3.2.6	แสดงวงจรแมตซ์ระหว่างวงจรรขยายสเตจแรกกับสเตจที่สอง	40
28.	รูปที่ 3.2.7	แสดงวงจรแมตซ์ระหว่างเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์สเตจที่สองกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ	40
29.	รูปที่ 3.2.8	แสดงการต่อเครื่องมือเพื่อทดสอบการทำงานของวงจร	41
30.	รูปที่ 3.2.9	ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณอินพุตของ RF Power Amplifier	
31.	รูปที่ 3.2.10	ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของ RF Power Amplifier	43
32.	รูปที่ 3.2.11	ภาพถ่ายของ Power Supply	43
33.	รูปที่ 4.1	การต่อเครื่องมือสำหรับการวัดความไวที่ 12 dB SINAD	47
34.	รูปที่ 4.2	การต่อเครื่องมือสำหรับการวัดความไวที่ 20 dB Quieting	48
		ความไวสูงสุดของวงจรสแควลซ์	
		ความไวต่ำสุดของวงจรสแควลซ์	
35.	รูปที่ 4.3	การวัดการกำจัดสัญญาณแปลกปลอม	50
36.	รูปที่ 4.4	การวัดการกำจัดความถี่เงา	51
37.	รูปที่ 4.5	การวัดกำลังขยายสัญญาณเสียงและความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงภาครับ	52

38.	รูปที่ 4.6	การวัดการตอบสนองความถี่สัญญาณเสียง	54
39.	รูปที่ 4.7	การวัด Usable BW และ Acceptable Radio Frequency Displacement	56
40.	รูปที่ 4.8	การวัดความสามารถในการแยกคลื่นที่ต้องการรับ	57
41.	รูปที่ 4.9	การวัดสัญญาณฮัมและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ	59
42.	รูปที่ 4.11	การวัดกำลังส่งออกอากาศโดยใช้โวลต์มิเตอร์	61
43.	รูปที่ 4.12	การวัดกำลังส่งออกอากาศโดยใช้วัตต์มิเตอร์	61
44.	รูปที่ 4.13	การวัดค่าสทิวริอัสและฮาร์มอนิก	62
45.	รูปที่ 4.14	การวัดเสถียรภาพทางความถี่	63
46.	รูปที่ 4.15	การวัดการเบี่ยงเบนความถี่	63
47.	รูปที่ 4.16	การวัดฮัมและสัญญาณฮัมและสัญญาณรบกวน	64
48.	รูปที่ 4.17	การวัดผลการตอบสนองความถี่เสียง	66
49.	รูปที่ 5.1.1	การวัดการผิดเพี้ยนของเสียงในภาคส่ง แสดงขอบเขตของการแพร่กระจายคลื่นรอบ ๆ สายอากาศ	73
50.	รูปที่ 5.2.1	โครงสร้างของ RF Power Transistor	76

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความมุ่งหมายของปฏิญานิพนธ์

ปัจจุบันนี้ ในประเทศไทยมีการใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่งกันมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง นักวิทยุสมัครเล่น ที่ได้รับอนุญาตให้มีและใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่งอย่างถูกต้องตามกฎหมาย หลังจากที่กรมไปรษณีย์โทรเลขได้ประกาศใช้นโยบายให้เป็นนักวิทยุสมัครเล่นขั้นต้น โดยการสมัครเข้ารับการอบรมและสอบภายในหลักสูตร และเปิดสอบทั่วไปเป็นรุ่น ๆ ทั่วประเทศ จำนวนนักวิทยุสมัครเล่น และผู้ใช้วิทยุจึงเพิ่มมากขึ้นเรื่อย ๆ

ปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้ มุ่งหวังที่จะให้นักวิทยุสมัครเล่นทั้งหลายตระหนักถึงการใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่ง การใช้ช่องความถี่ย่านวิทยุสมัครเล่น โดยเอื้อประโยชน์ต่อสังคมอย่างจริงจัง คำนึงถึงความปลอดภัยของผู้ใช้และผู้ใกล้ชิด เนื่องจากการแผ่กระจายของคลื่นวิทยุ เป็นลำดับแรก ศึกษาถึงอันตรายต่าง ๆ ที่แผงมากับคลื่นวิทยุ วิธีการปฏิบัติที่ถูกต้องในขณะส่งออก (Transmitted)

1.2 จุดประสงค์ของปฏิญานิพนธ์

โครงการที่จัดทำขึ้น มีจุดประสงค์ที่จะใช้เพื่อการทดลองค้นคว้าเท่านั้น ก่อนที่จะสร้างอุปกรณ์ต้นแบบ ได้ทำการศึกษาทฤษฎีการทำงานของวงจร คุณสมบัติเฉพาะของ Electronic Device เพื่อการเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงาน วิธีการประกอบอุปกรณ์ที่ถูกต้องตามหลักการ

โดยเฉพาะโครงการนี้เกี่ยวข้องกับความถี่วิทยุ (Radio Frequency) โดยตรง วงจรกรองความถี่ (Filter Circuit) จึงเป็นตัวหลักสำคัญ ได้ทำการศึกษาการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่าง ๆ แล้วนำมาเอาแบบที่เหมาะสมที่สุดไปใช้งาน

1.3 การดำเนินงานโดยสรุป

โครงการนี้เป็นการจัดทำอุปกรณ์วิทยุคมนาคม สำหรับวิทยุรับ-ส่งแบบมือถือ ย่านวิทยุสมัครเล่น แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ

1.3.1 ส่วนที่ 1 วงจรเลือกรับคลื่นความถี่ 144.5 MHz (Two-Meter Preamplifier) จัดทำแล้วเสร็จและทดสอบใช้งานได้ผลดี ผ่านการสอบในภาคการศึกษาที่ 1/2534

1.3.2 ส่วนที่ 2 วงจรขยายกำลังภาคส่ง (Two-Meter 10 Watt Power) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Amplifier) จัดทำแล้วเสร็จและทดสอบใช้งานได้ผลดี ผ่านการสอบในภาคการศึกษาที่ 2/2534

การดำเนินการจัดทำวิทยานิพนธ์ (Thesis) ได้จัดทำฉบับสมบูรณ์แล้วเสร็จ ในภาคการศึกษาที่ 2/2534



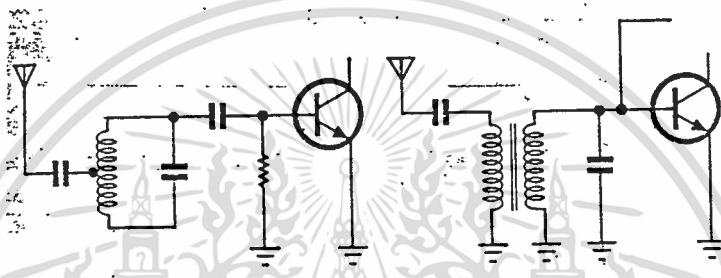
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีการออกแบบวงจร

2.1 วงจรภาค Preamplifier

ภาครับของวิทยุมือถือส่วนใหญ่ และเครื่องติดรถยนต์บางรุ่น (Mobile) จะใช้ทรานซิสเตอร์ธรรมดา ซึ่งสัญญาณรบกวน (Noise) จะสูง ทำให้บางครั้งสัญญาณรบกวนจะดังกลบสัญญาณที่เข้ามา ทำให้รับไม่ได้



รูปที่ 2.1.1 วงจรตัวอย่างของภาครับของวิทยุมือถือที่ใช้ทรานซิสเตอร์ธรรมดา

อีกประการหนึ่ง การออกแบบเครื่องรับวิทยุมือถือส่วนใหญ่ออกแบบให้ใช้ได้ในช่วงความถี่กว้าง ตั้งแต่ 144-1670 MHz ทั้งนี้เพราะผู้ผลิตมุ่งจะให้ใช้ในย่านที่ไม่ใช่ย่านวิทยุสมัครเล่นได้ด้วย

ปัญหาที่นักวิทยุสมัครเล่นทั้งหลายมักจะประสบ คือเครื่องรับวิทยุความถี่ 144 MHz คือภาครับไม่ไว หรือรับความถี่ที่ไม่ต้องการเป็น Intermodulation เข้ามา

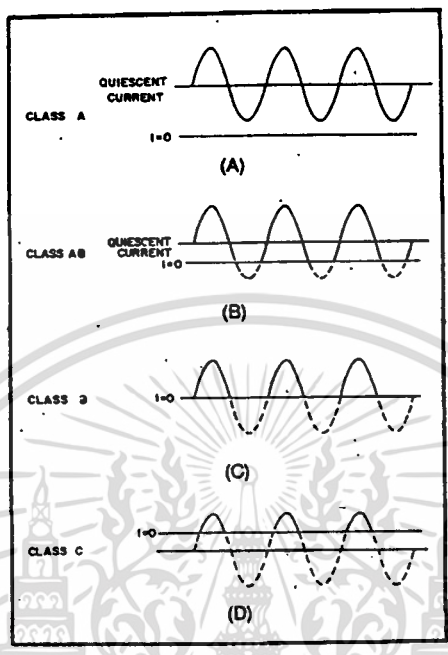
แนวทางในการแก้ไขก็คือ การสร้างวงจรเลือกรับความถี่ (Preamplifier) โดยใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดที่มีสัญญาณรบกวนต่ำ และเพิ่มวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ที่เอาต์พุตของ Preamplifier เพื่อให้มีความสามารถเลือกความถี่ที่ต้องการรับได้

2.2 วงจรภาค RF Power Amplifier

การออกแบบวงจรขยายกำลัง สำหรับวิทยุสมัครเล่น 144-146 MHz เพื่อประโยชน์ในการเพิ่มกำลังส่งของของวิทยุมือถือ ซึ่งตามปกติทั่วไปจะมีกำลังส่งขนาด 5 วัตต์ โดยการยึดหลักวงจรขยายพื้นฐานแบบต่าง ๆ

เอกสารวงจรขยายกำลังภาค RF โดยทั่วไป มี 4 แบบ คือ คลาสเอ คลาสบี คลาสบี และคลาสซี แต่ละแบบก็ต่างมีข้อดีข้อเสีย และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

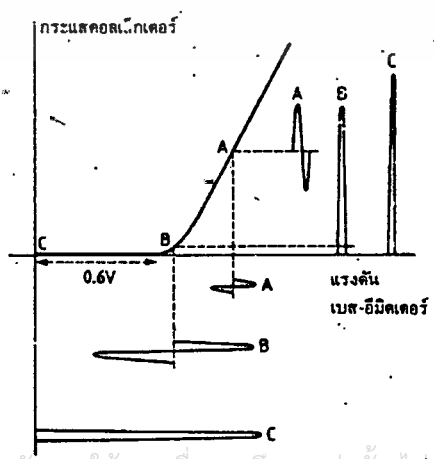
รูปที่ 2.2.1 เป็นการแสดงกระแสเอาต์พุตของวงจรรขยาย ซึ่งเกิดจากการทำงานในคลาสต่าง ๆ



รูปที่ 2.2.1 แสดงกระแสเอาต์พุตของการทำงานของวงจรรขยายในคลาสต่าง ๆ

ความสัมพันธ์ของกระแสคอลเล็กเตอร์ (I_c) กับแรงดันเบส-อิมิตเตอร์ (V_{BE}) เมื่อ V_{BE} มีค่าประมาณ 0.6 โวลต์ กระแส I_c ยังคงมีค่าน้อย แต่เมื่อค่าของ V_{BE} เพิ่มสูงขึ้นกว่า 0.6 โวลต์ ซึ่งเป็นจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ กระแส I_c จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว วงจรรขยายกำลังนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของการไบอัส เมื่อไม่มีสัญญาณอินพุต

รูปที่ 2.2.2 เป็นการแสดงคุณสมบัติของวงจรรขยาย โดยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของ I_c และ V_{BE}



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่รูปที่ 2.2.2 นี้แสดงความสัมพันธ์ของกระแส I_c และแรงดัน V_{BE} ของครั้งที่มีการนำไปใช้

ในคลาสเอ แรงดัน V_{BE} จะถูกกำหนดไว้สูงกว่า 0.6 โวลต์ ซึ่งเป็นจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ จึงทำให้กระแส I_C ไหลอยู่ค่าหนึ่งตลอดเวลา เมื่อมีสัญญาณอินพุตเข้ามา ก็จะทำให้ I_C มีการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณอินพุต วงจรขยายคลาสเอนี้เป็นวงจรพื้นฐานที่สุด ใช้ได้ทุกความถี่ ตั้งแต่ย่านความถี่เสียง ไปจนถึงย่านความถี่วิทยุ

• วงจรขยายคลาสเอ เป็นวงจรขยายที่มีความเพี้ยนน้อยมาก แต่เนื่องจากต้องมีกระแส I_C ไหลตลอดเวลา จึงทำให้เกิดความสูญเสียในรูปของความร้อนสะสมในตัวทรานซิสเตอร์อยู่มาก ดังนั้น คลาสเอจึงเหมาะกับวงจขยายสัญญาณกำลังต่ำ ๆ

ถ้าทำการลดแรงดัน V_{BE} ลงมา จนกระทั่งให้มีกระแส I_C ไหลเพียงเล็กน้อย ก็จะได้วงจขยายคลาสบี. ซึ่งทรานซิสเตอร์ถูกไบอัสไว้ที่จุดคัทออฟเล็กน้อย สัญญาณถูกขยายเฉพาะซีกบวกของรูปคลื่นอินพุต หรือ I_C ไหลได้เพียง 180° และคัทออฟ 180° นั่นคือจะสูญเสียความเป็นเชิงเส้น (Linearity) แต่ประสิทธิภาพจะสูงขึ้นอย่างมาก

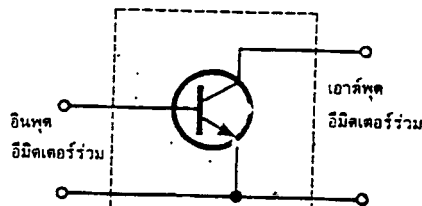
ปัญหาในเรื่องความไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linearity) ของคลาสบีแก้ไขได้โดยการใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ขยายสัญญาณตัวละครึ่งคลื่น (Half Cycle) การทำงานในลักษณะนี้ เรียกว่า Class B Push Pull Operation ส่วนใหญ่จะใช้ในวงจขยายที่ใช้หลอดรูนแก้ว ๆ

วงจขยายคลาสซี จะแตกต่างจากคลาสบี คือทรานซิสเตอร์จะถูกไบอัสให้อยู่ต่ำกว่าจุดคัทออฟ นั่นคือ V_{BE} มีค่าประมาณ 0 โวลต์ เมื่อมีอินพุตเข้ามาค่าสูงกว่า 0.6 โวลต์ (Volt) จึงจะทำให้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณได้ วงจขยายคลาสซีเหมาะที่จะนำไปใช้กับวงจขยายกำลังของเครื่องส่งกำลังสูง ๆ เพราะมีประสิทธิภาพสูงที่สุด สูงกว่า 80 % และจัดไบอัสได้ง่าย แต่ก็มี การสูญเสียความเป็นเชิงเส้นอยู่มาก

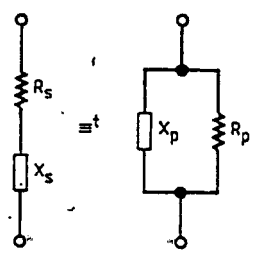
ในที่นี้จะไม่กล่าวถึงวงจขยายคลาสเอบี เพราะว่าวงจขยายแบบนี้ นิยมใช้ในวงจขยายกำลังส่งย่าน Single Side Band (SSB)

การพิจารณาทรานซิสเตอร์ความถี่สูง

ทรานซิสเตอร์ที่ถูกออกแบบมาใช้ในวงจขยายคอมมอนอิมิตเตอร์ การพิจารณาค่าของอินพุตอิมพีแดนซ์ และเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ จะพิจารณาได้ดังรูปที่ 2.2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.2.3 (a) แสดงทรานซิสเตอร์ต่อแบบคอมมอนอิมิตเตอร์ที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2.3 (b) แทนทรานซิสเตอร์ด้วย R และ X

จากรูปที่ 2.2.3 R_s ต่ออนุกรมอยู่กับ X_s ซึ่งค่าของ X_s ถ้าอยู่ในรูปของ Inductive Reactance จะเป็นบวก (Lead 90 องศา) และถ้าอยู่ในรูปของ Capacitive Reactance จะเป็นลบ (Lag 90 องศา) ค่ารีแอกแตนซ์จะมีหน่วยเป็นโอห์ม

เมื่อเราต้องการพิจารณาค่าของอินพุตและเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ จะพิจารณาได้ โดยการนำตัวต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ต่อขนานกัน R_o X_o

สูตรการคำนวณหาค่า Resistance และ Reactance เมื่อต่ออนุกรมและขนานจะเป็น ดังนี้

$$R_o = (R_s X_p^2) / (R_s^2 + X_s^2)$$

$$X_o = (R_s^2 X_s) / (R_s^2 + X_s^2)$$

$$R_s = (R_o^2 + X_o^2) / R_o$$

$$X_s = (R_o^2 + X_o^2) / X_o$$

โดยปกติจะเป็นความสัมพันธ์ของค่าอิมพีแดนซ์ในรูปจำนวนเชิงซ้อน (j) ค่า (j) = -1 หมายถึงแรงดันและกระแสต่างเฟสกัน 90 องศา ค่าความต้านทานจะเป็นค่าจริง (Real Part) ค่า Reactance เป็นค่าจินตภาพ (Imaginary Part)

เช่น ค่าอิมพีแดนซ์ 4-j2 หมายความว่า ค่าความต้านทานคือ 4 โอห์ม ค่า Capacitive Reactance (XC) 2 โอห์ม หรือค่าอิมพีแดนซ์ 4+j2 หมายความว่า ค่าความต้านทาน 4 โอห์ม ค่า Inductive Reactance (XL) คือ 2 โอห์ม

$$\text{ในการคำนวณหาค่า } X_C = \frac{1}{2\pi FC}$$

$$X_L = 2\pi FL$$

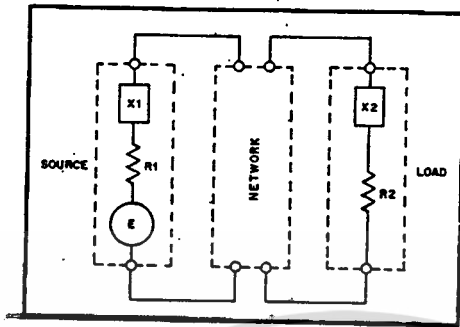
การแมตชิ่ง (Impedance Matching)

ในการส่งผ่านสัญญาณระหว่างวงจรในภาคขยาย RF ปัญหาที่เกิดขึ้นเกี่ยวกับความไม่เหมาะสมหรือ "ไม่แมตซ์" กันระหว่างอิมพีแดนซ์ที่เครื่องรับ-ส่งวิทยุกับอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ในวงจร หรือระหว่างอินพุตเอาต์พุตของแต่ละสเตจ หรือระหว่างเอาต์พุต

เอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำไปใช้เชิงพาณิชย์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

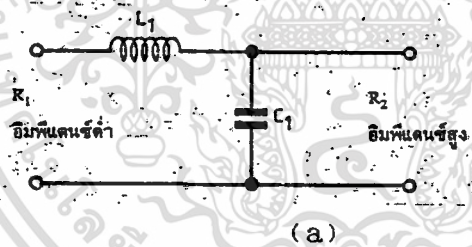
ของทรานซิสเตอร์กับสายอากาศ มีแนวทางการแก้ไขคือ การใส่วงจรแมตชิง เพื่อช่วยในการจัดอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม



รูปที่ 2.2.4 วงจรพื้นฐานของอิมพีแดนซ์แมตชิง

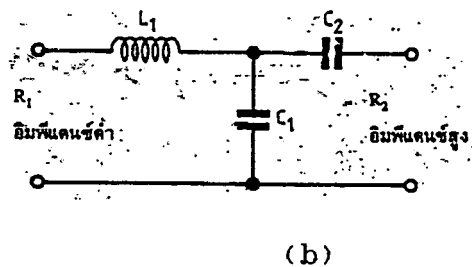
จากรูปที่ 2.2.4 แสดงวงจรพื้นฐานของอิมพีแดนซ์แมตชิง R_1, X_1 เป็นความต้านทานภายในของแหล่งกำเนิดพลังงาน (Power Source Generator) R_2, X_2 คือความต้านทาน Load

การคำนวณหาค่าต่างๆ ในวงจรแมตชิงสำหรับใช้ปรับอิมพีแดนซ์ สามารถหาได้จากสูตร ดังนี้



$$XL_1 = \frac{QR_1}{XC_1} = \frac{R_2^2 + XL_2^2}{XL_1}$$

$$R_2 = R_1(1+Q^2)$$

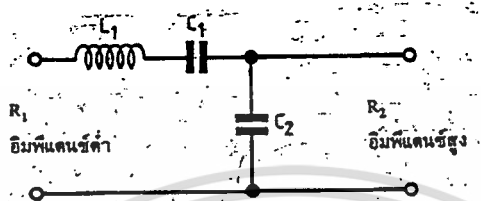


$$B = R_1(1+Q^2)$$

$$A = \sqrt{\frac{B}{R_2} - 1}$$

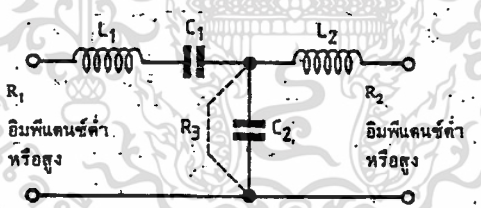
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 XL_1 &= QR_1 \\
 XC_2 &= AR_2 \\
 XC_1 &= \frac{B}{Q-A}
 \end{aligned}$$



(c)

$$\begin{aligned}
 XC_1 &= QR_1 \\
 XL_1 &= \frac{XC_1 + R_1 R_2}{XC_2} \\
 XC_2 &= \frac{R}{\sqrt{(R_2 - R_1)}}
 \end{aligned}$$



(d)

$$\begin{aligned}
 R_3 &= R_1 (1 - Q_2^2) \\
 XC_a &= \frac{R_3}{\sqrt{(R_3 - R_1)}} \\
 XL_2 &= Q_2 R_2 \cdot XC_1 = Q_1 R_1 \\
 XC_b &= \frac{R_2^2 + XL_2^2}{XL_2}, \quad C_2 = C_a + C_b \\
 XL_1 &= XC_1 + \frac{R_1 R_3}{XC_a}
 \end{aligned}$$

รูปที่ 2.2.5 แสดงวงจรแมตริงในการปรับอิมพีแดนซ์แบบ (a) (b) (c) (d) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในเอกสารเพื่อใช้ในหน่วยงานที่เห็นสมควรเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ซ้ำโดยไม่ขออนุญาต การค้า พร้อมสูตรการคำนวณค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ต่อผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หากนำวงจรขยายคลาสบีมาแทนที่วงจรขยายคลาสซีในรูปที่ 2.2.6 ทรานซิสเตอร์ จะทำงานตลอดซีกบวกของสัญญาณ ทำให้ต้องการกำลังอินพุตเพียง 0.5 วัตต์ก็เพียงพอ

ในการคำนวณหาค่าพื้นที่แรเงา ซึ่งแทนกำลังของสัญญาณในรูป 2.2.7 ต้องอาศัย การอินทิเกรต และหลักการของตรีโกณมิติเข้าช่วย ขั้นแรกต้องทำการคำนวณหามุมที่ ปกคลุมพื้นที่แรเงานั้น (θ) หน่วยเป็นเรเดียน โดยสัญญาณอินพุตเป็นไซน์ ค่าแรงดันที่ มุมใด ๆ แทนด้วย y สามารถหาได้จากสมการ

$$y = a \sin \theta \dots\dots (1)$$

โดย a เป็นแรงดันสูงสุด, θ เป็นมุมจากจุดที่ค่า y = 0 จนถึงจุดที่เกิดแรงดันเป็น บวก ได้ค่า y = 0.6 และ a = 1.33 ดังนั้น

$$\sin \theta = 0.6/1.33 \dots\dots (2)$$

และได้ค่า θ = 0.43 เรเดียน หรือ 27 องศา

ที่มุม π/2 หรือ 90 องศา รูปสัญญาณจะมีความสมมาตรกัน ทรานซิสเตอร์จะทำ งานตั้งแต่ค่ามุมเท่ากับ 27 ถึง 153 องศา ดังนั้น ทรานซิสเตอร์จะมีมุมในการทำงานอยู่ 126 องศา ซึ่งมากกว่า 1 ใน 3 ของรูปสัญญาณทั้งหมด ถ้าเปลี่ยนเป็นหน่วยของ เรเดียนจะได้ค่า π - 0.47 = 2.67 เรเดียน นั่นคือจะได้ค่า θ₁ = 0.47 เรเดียน หรือ 27 องศา และ θ₂ = 2.67 เรเดียน หรือ 153 องศา ตามลำดับ

ถ้าให้ค่า "V" เป็นแรงดันที่ทำให้ทรานซิสเตอร์เริ่มทำงาน หากเป็นไบโพลาร์ ทรานซิสเตอร์ก็คือแรงดัน V_{BE} มีค่า 0.66 โวลต์ แต่ถ้าหากเป็นมอสเฟตก็คือ ค่า V_{GS} ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง V_{GS} ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 2 ถึง 6 โวลต์ ดังนั้น จะสามารถหาค่า บริเวณมุมที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน จากสมการ

$$\sin \theta = \frac{V_{BE}}{V_m} \text{ (หรือ) } \frac{V_{GS}}{V_m} \dots\dots (3)$$

โดยที่ V_m เป็นค่าแรงดันอินพุตสูงสุดที่ป้อนเข้ามายังทรานซิสเตอร์

กำลังอินพุตของรูปสัญญาณตลอดครึ่งลูกคลื่นมีค่า 0.5 วัตต์ ซึ่งสามารถคำนวณได้ จากสมการ

$$P_{in} = k \int \sin \theta d\theta \dots\dots (4)$$

จากรูปที่ 2.2.7 จัดขอบเขตการอินทิเกรตและฟังก์ชันใหม่ได้

$$P_{in} = k \int_{\theta_2}^{\theta_1} (\sin \theta - V) d\theta \dots\dots (5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์และเจ้าหน้าที่ของภาควิชา ไม่สมควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่าจะโดยวิธีใด ๆ ทั้งสิ้น การนำเอกสารนี้ให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในคลาสบีค่าของ $V = 0$ โวลต์ ทรานซิสเตอร์จะพร้อมทำงาน ส่วนในคลาสซี V ต้องมีค่า 0.6 โวลต์ สำหรับไบโพลาร์ทรานซิสเตอร์ และเท่ากับ 4 โวลต์ สำหรับมอสเฟตทำให้สามารถคำนวณค่า k ได้

ยกตัวอย่าง ในคลาสบี ให้กำลังอินพุตเท่ากับ 0.5 วัตต์ , $\theta_1 = 0$ เรเดียน, $\theta_2 =$ เรเดียน และ $V = 0$ โวลต์ โดยสมการ (6) จะได้

$$0.5 = k[2 \cos\theta - 0(\pi-0)]$$

จะได้ค่า $k = 0.25$

นำค่า $k = 0.25$ ค่า θ_1 และ θ_2 จากการคำนวณในสมการ (2) มาแทนในสมการ (6) และแทนค่า $V = 0.6$ (คลาสซี) สามารถหาค่ากำลังที่นำไปใช้ได้ ดังนี้

$$\text{กำลังที่นำไปใช้} = 0.25 [1.783 - 0.6(2.07 - 0.47)] = 0.115 \text{ วัตต์}$$

จะเห็นว่าได้กำลังอินพุต 1 วัตต์ ที่ป้อนเข้ามาสามารถนำไปใช้งานได้น้อยกว่า 12 % ของกำลังทั้งหมด (คลาสซี)

อีกประการหนึ่งคือ ที่ระดับกำลังต่ำ ๆ แรงดันอินพุตที่โหลด 1.77 โวลท์ จะไม่มีทางมากกว่า 0.6 โวลต์ ทรานซิสเตอร์จึงไม่มีโอกาสได้ขยายสัญญาณ

หากเพิ่มกำลังอินพุตให้มากขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้ประสิทธิภาพของวงจรคลาสซี เมื่อเทียบระหว่างกำลังเอาต์พุตต่ออินพุตจะดีขึ้น หรือถ้าใช้ทรานซิสเตอร์ที่มีอินพุตอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ก็ช่วยทำให้การนำกำลังของสัญญาณอินพุตไปใช้ได้สูงขึ้น กำลังเอาต์พุตก็จะสูงขึ้นเช่นกัน

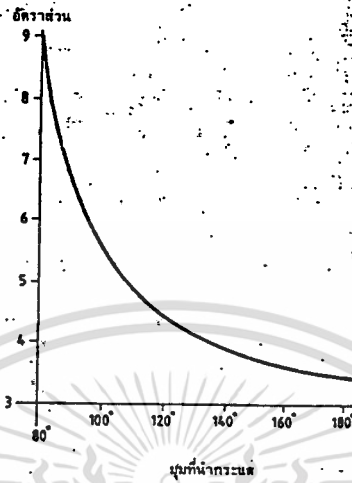
โหลดของทรานซิสเตอร์

ความต้านทานโหลดทางเอาต์พุตในที่นี้หมายถึง ค่าความต้านทานที่ด้านคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งไม่ได้มาจากการคำนวณที่ $R = V^2/W$ เนื่องจากกำลังที่โหลดได้รับคือ กำลังที่เกิดขึ้นในขณะที่ทรานซิสเตอร์ทำงานในช่วงมุม 126 องศาของแต่ละรูปคลื่น ในแผนภูมิที่ 2.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของกระแสคอลเล็กเตอร์เฉลี่ยที่ค่ามุมใด ๆ ที่ทรานซิสเตอร์ทำงาน

เมื่อรู้กำลังเอาต์พุตเฉลี่ยก็สามารถคำนวณหากระแสเอาต์พุตเฉลี่ยได้ และก็จะสามารถหาค่ากระแสคอลเล็กเตอร์สูงสุดจากกฎของโอห์มก็สามารถหาค่าความต้านทาน ที่นำมาใช้เป็นโหลดได้ โดยแรงดันตกคร่อมโหลดจะมีค่าประมาณเท่ากับไฟเลี้ยง ลบด้วยแรงดันตกคร่อมรอยต่อคอลเล็กเตอร์-อิมิตเตอร์ ซึ่งมีค่าประมาณ 1 โวลต์

ยกตัวอย่างกำหนดค่ากำลังงานเอาต์พุตเฉลี่ยเป็น 3 วัตต์ แรงดันไฟเลี้ยงเท่ากับ 13.8 โวลต์ จะได้กระแสเฉลี่ย 0.234 แอมป์ ($I = P/V$) มุมทำงานคือ 126 องศา จากแผนภูมิที่ 2.2.1 อัตราส่วนกระแสคอลเล็กเตอร์เท่ากับ 4.5 ที่มีค่า

กระแสสูงสุดได้เท่ากับ $0.234 \times 4.5 = 1.05$ แอมป์ ด้วยเหตุนี้ เอาต์พุตของวงจร
แมตซ์จึงต้องมีค่าความต้านทาน $12.8/1.05 = 12$ โอห์ม เพื่อต่อเข้ากับทรานซิสเตอร์



แผนภูมิที่ 2.2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่ทำงานกับอัตราส่วนของกระแส
คอลเล็กเตอร์สูงสุด ต่อกระแสคอลเล็กเตอร์เฉลี่ย

แรงดันไฟเลี้ยงจะถูกส่งมายังทรานซิสเตอร์ โดยการผ่านขดลวดอีกตัวในวงจรคอล
เล็กเตอร์ (ตามรูปที่ 2.2.6) นั่นก็คือมีโหลดเพิ่มขึ้นมาอีกส่วน ปกติที่ย่านความถี่ทำงานค่า
ของตัวเหนี่ยวนำ จะถูกออกแบบให้มีค่ามีรีแอกแตนซ์อยู่ระหว่าง 10-20 เท่า ของค่า
ความต้านทานโหลด แต่ที่ความถี่ต่ำกว่านั้น ค่าของรีแอกแตนซ์จะมีค่าน้อยมาก วิธีนี้จะช่วย
ให้ทรานซิสเตอร์มีเสถียรภาพการทำงานดีขึ้น

โดยการใช้สมการในรูปที่ 2.2.5 จะช่วยให้สามารถเลือกค่าตัวเก็บประจุและตัว
เหนี่ยวนำ เพื่อนำไปสร้างวงจรในรูปที่ 2.2.6 ได้

จากทฤษฎีการออกแบบนี้ อ้างอิงกับคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N6080 และ
2N6081

ความสำคัญของค่า SWR

นักวิทยุสมัครเล่นมักจะต้องการวัดกำลังส่งของเครื่องส่งวิทยุ และวัดค่า SWR
ของระบบสายอากาศอยู่บ่อย ๆ การวัดค่ากำลังส่งมักจะทำเมื่อกำลังตรวจสอบ หรือปรับ
แต่งเครื่อง เพื่อให้แน่ใจว่าเครื่องส่งจะสามารถให้กำลังส่งออกมาได้ตามที่ควรจะเป็น ซึ่ง
กรณีนี้มักจะต่อดัมมีโหลด 50 โอห์มมาแทนสายอากาศ เพื่อให้โหลดมีค่าเป็น 50 โอห์มจริง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทฤษฎีตัวแปรเสมือนใช้ได้กับวงจรที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรง ตลอดจนเสถียรภาพ

แต่การปรับแต่งให้เครื่องส่งถ่ายกำลังส่งออกมาสูงสุดเท่านั้นยังไม่เพียงพอ เราต้องการให้แน่ใจด้วยว่ากำลังส่งเหล่านี้ จะถูกแผ่คลื่นออกจากตัวสายอากาศได้เต็มที่ด้วย นั่นคือจะต้องแน่ใจว่าระบบสายอากาศมีอิมพีแดนซ์แมตช์กับระบบของเครื่องส่งและสายนำสัญญาณซึ่งถูกออกแบบมาให้เป็นระบบ 50 โอห์ม ดังนั้น ระบบสายอากาศจะต้องมีอิมพีแดนซ์เป็น 50 โอห์ม และจะต้องเรโซแนนซ์ที่ความถี่ของเครื่องส่ง จึงจะทำให้สายอากาศเหมือนกับเป็นตัวต้านทานตัวหนึ่ง ซึ่งสามารถรับพลังงานคลื่นวิทยุทั้งหมด ที่ส่งผ่านมาจากสายนำสัญญาณได้ ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบสายอากาศไม่แมตช์กับสายนำสัญญาณ ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นเนื่องจากสายอากาศไม่เรโซแนนซ์ที่ความถี่นั้น หรือเนื่องจากสายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ต่างจาก 50 โอห์ม พลังงานคลื่นวิทยุส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับมา และจะสะท้อนกลับมาเล็กน้อยเพียงใด ขึ้นกับระดับของการไม่แมตช์กันนี้ ดังนั้นสายอากาศจึงรับพลังงานคลื่นวิทยุได้ไม่หมด นอกจากนี้ ถ้าสายนำสัญญาณมีการสูญเสียมาก และคลื่นสะท้อนกลับมีค่ามาก สายอากาศก็จะยังได้รับพลังงานคลื่นวิทยุน้อยลงไปอีก เพราะแทนที่คลื่นสะท้อนจะวิ่งกลับมาถึงเครื่องส่งแล้ว สะท้อนกลับไปหาสายอากาศได้เต็มที่อีก ก็ต้องถูกลดทอนด้วยการสูญเสียในสายนำสัญญาณ อีกประการหนึ่ง หากสายอากาศมีอิมพีแดนซ์ต่างจาก 50 โอห์มมาก ๆ อาจทำให้ภาคเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุเสียหายได้ คลื่นที่ส่งเข้าไปและสะท้อนกลับมานี้แหละ ที่ทำให้เกิดคลื่นนิ่ง (Standing Wave) ปรากฏขึ้นบนสายนำสัญญาณ ถ้าเราสามารถวัดว่ากำลังไฟฟ้าคลื่นที่ป้อนเข้าไป (Forward Power หรือ Pf) และกำลังไฟฟ้าของคลื่นที่สะท้อนกลับ (Reflected Power หรือ Pr) มีค่าเท่าไร ก็สามารถคำนวณหาค่าอัตราส่วน ที่เรียกว่า SWR (Standing Wave Ratio หรืออัตราส่วนของคลื่นนิ่ง) ได้จากสมการ

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{I_{max}}{I_{min}} \quad \text{หรือ}$$

$$= \frac{R_L}{Z_0} \quad \text{เมื่อ } R_L > Z_0$$

$$= \frac{Z_0}{R_L} \quad \text{เมื่อ } Z_0 > R_L$$

$$= \frac{1 - \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}{1 + \sqrt{\frac{P_r}{P_f}}}$$

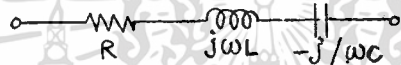
หากไม่มีคลื่นสะท้อนกลับมาเลย ค่า SWR จะมีค่าเท่ากับ 1 (หรือที่นิยมเขียนว่า 1:1) ซึ่งหมายความว่าสายอากาศแมตช์พอดีกับสายนำสัญญาณ และสายอากาศจะทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด ทั้งสิ้น SWR จะมีค่าเป็นอนันต์ ($\infty : 1$) เมื่อคลื่นสะท้อนกลับมาทั้งหมด ซึ่งจะ

เกิดขึ้นเมื่อโหลดมีค่าเป็นศูนย์หรืออนันต์

แต่ในทางปฏิบัติ การจะทำให้สายอากาศมีค่า SWR เป็น 1:1 นั้นค่อนข้างยาก สิ่งที่ทำได้อาจพยายามปรับแต่งสายอากาศให้มี SWR ใกล้เคียงกับ 1:1 มากที่สุด ถ้าได้ขนาด 1.1:1. หรือน้อยกว่า 1.2:1 ก็นับว่าน่าพอใจ แต่ไม่ควรเกินกว่า 2:1 ตลอดช่วงความถี่ใช้งาน ยิ่ง SWR มากกว่า 2:1 ประสิทธิภาพของการส่งผ่านคลื่นวิทยุไปให้สายอากาศก็จะยิ่งแย่มากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ถ้าใช้สายนำสัญญาณยาว ๆ และไม่ควรใช้งานเครื่องส่งวิทยุกับสายอากาศที่มีค่า SWR สูงกว่า 3:1 เพื่อป้องกันมิให้ภาคเอาต์พุตของเครื่องส่งวิทยุเสียหายได้

การเรโซแนนซ์ความถี่

เรโซแนนซ์แบบอนุกรม



$$\bar{Z} = R + j\omega L - j/\omega C$$

$$= R + j(XL - XC)$$

ในสภาวะเรโซแนนซ์

$$XL = XC$$

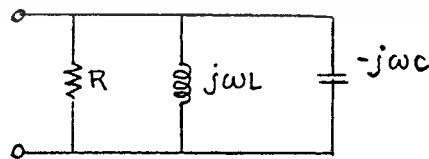
จะได้ $\bar{Z} = R + j0 = R$

ความถี่เรโซแนนซ์

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Hz}$$

ที่เรโซแนนซ์ Z จะมีค่าต่ำสุด กระแสจะมีค่าสูงสุด

เรโซแนนซ์แบบขนาน



$$Y = \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + \frac{1}{-j\omega C}$$

$$= \frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์ใช้เท่านั้น
 ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาวะเรโซแนนซ์

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

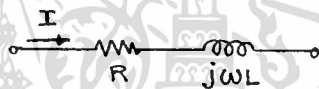
จะได้ $Y = \frac{1}{R} + j0 = \frac{1}{R}$

$$Y = \frac{1}{Z}$$

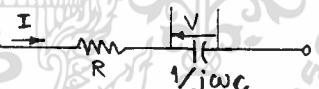
$$Z = R$$

ที่เรโซแนนซ์ Y จะมีค่าต่ำสุด กระแสจะมีค่าสูงสุด ค่า Q (Quality Factor)

วงจร RL อนุกรม $Q = \frac{2\pi fL}{R} = \frac{\omega L}{R}$

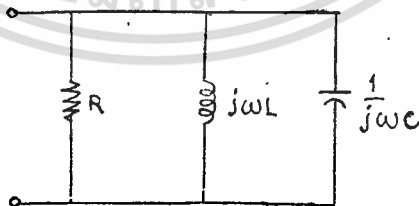


วงจร RC อนุกรม $Q = \frac{1}{\omega CR}$



ในสภาวะเรโซแนนซ์ $Q_0 = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR}$

วงจร RLC ต่อขนาน

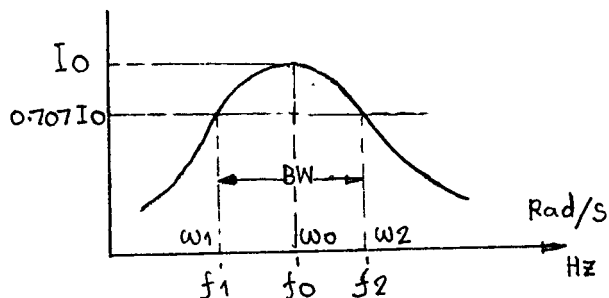


จะสะสมพลังงานคงที่ที่สภาวะเรโซแนนซ์ เมื่อกระแสของอินดักแตนซ์มีค่าสูงสุดแรงดันต้นตกคร่อม C จะเป็นศูนย์

$$Q_0 = \frac{R}{\omega_0 L} = \omega_0 CR$$

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{\omega_2 - \omega_1} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} = \frac{f_0}{BW}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา $\omega_2 - \omega_1$ ไม่นอญญาต์ $f_2 - f_1$ ้ประโยชน์ด้ BW การค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัด ω_0 น้อ ω_0 และ $\sqrt{\omega_1 \omega_2}$ และองเอกสาร f_0 ุ่กคร้ f_0 ้ที่มีการ $\sqrt{f_1 f_2}$



2.3 วงจรกรองความถี่

ในทางวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และการสื่อสาร มีความจำเป็นต้องใช้วงจรกรองความถี่แบบต่าง ๆ ได้แก่

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter)

วงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter)

วงจรตัดแถบความถี่ (Band Stop Filter)

พื้นฐานวงจรกรองความถี่เหล่านี้ ก็คือเน็ตเวิร์กทางไฟฟ้า ซึ่งจะยอมให้สัญญาณที่มีความถี่อยู่ในย่านที่กำหนดผ่านไปได้ แต่จะกั้นสัญญาณที่มีความถี่อื่นไม่ให้ออกไป โดยเน็ตเวิร์กประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์พื้นฐาน ได้แก่ ตัวต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L) ต่อกันเป็นวงจรแบบที (T) แบบพาย (Π) และแบบแอล (L)

ทฤษฎีที่นำมาใช้ในการคำนวณออกแบบวงจรกรองความถี่ เรียกว่าทฤษฎีของตัวแปรเสมือน (Image Parameter Theory) ปัจจุบันได้มีการพัฒนาทฤษฎีใหม่ ๆ ขึ้นมา เพื่อต้องการความเที่ยงตรงสูง และคุณสมบัติที่แน่นอนขึ้น ซึ่งใช้เทคนิคของการสังเคราะห์ความถี่ และใช้คอมพิวเตอร์เข้ามาช่วย กับการใช้คณิตศาสตร์เบื้องต้น

เทคโนโลยีเกี่ยวกับวงจรกรองความถี่ที่ทันสมัยอีกอย่างหนึ่ง คือ วงจรกรองความถี่แบบคลื่นเสียงผิวหน้า (Surface Acoustic Wave Filter-SAW) วงจรกรองความถี่แบบนี้ให้ผลตอบสนองความถี่เป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่คม และมีค่าหน่วงเวลากลุ่มที่คงที่ ซึ่งโดยปกติแล้ว ในวงจรทั่วไปต้องเลือกเอาคุณสมบัติเด่นได้อย่างใดอย่างหนึ่ง แต่วงจรกรองแบบคลื่นเสียงผิวหน้านี้สามารถทำได้พร้อมกัน จะมีข้อเสียก็คือ มีค่าสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss) สูง ประมาณ 20 ถึง 30 dB ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการต้านการสะท้อน (Transmission Reflective Mode) ลดลง และในงานบางลักษณะจำเป็นต้องมีการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่

ทฤษฎีเน็ตเวิร์กสมัยใหม่ให้ความแม่นยำเที่ยงตรง และเสถียรภาพทางความถี่ดีกว่าทฤษฎีตัวแปรเสมือน ออกแบบให้ได้คุณสมบัติตามต้องการได้ง่าย โดยตารางที่ได้จากการคำนวณของคอมพิวเตอร์ กับการใช้คณิตศาสตร์เบื้องต้น เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ ทฤษฎีตัวแปรเสมือนใช้ได้กับวงจรที่ไม่ต้องการความเที่ยงตรง ตลอดจนเสถียรภาพ

ทางความถี่มากขึ้น แต่ในระบบสื่อสารสมัยใหม่ที่พัฒนาต่อ ๆ มา มีความซับซ้อนขึ้น จำเป็นต้องใช้ความเที่ยงตรงและเสถียรภาพที่ดี การออกแบบวงจรกรองจิ้งจิวพัฒนาการมาเป็นทฤษฎีเน็ตเวิร์กสมัยใหม่ (Modern Network Theory)

หลักการที่นำมาใช้กับทฤษฎีเน็ตเวิร์กคือ การสังเคราะห์วงจรหรือออกแบบสร้างวงจรกรองขึ้นมา จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับคุณสมบัติทางความถี่ เรียกว่า ฟังก์ชันการส่งผ่านแรงดัน ซึ่งเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้อัตราส่วนของโพลีโนเมียล หรือทฤษฎีการประมาณค่า (Approximation Theory) หมายความว่า เน็ตเวิร์กใด ๆ สามารถเขียนเป็นสมการโพลีโนเมียล ที่มีสัมประสิทธิ์เป็นค่าของอุปกรณ์ในเน็ตเวิร์ก

ทฤษฎีนี้สามารถออกแบบวงจร ที่มีคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ทางอุดมคติ (Ideal Response) เป็นรูปสี่เหลี่ยมขั้นได้ดังแผนภูมิที่ 2.3.1

วิธีการหาตัวประกอบของโพลีโนเมียล หาได้จากตารางที่สร้างขึ้นมาจากการคำนวณด้วยดิจิตอลคอมพิวเตอร์ ตารางเหล่านี้นำมาใช้คำนวณ เพื่อออกแบบวงจรกรองความถี่แบบต่าง ๆ ได้ง่าย

การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท (Butter Worth) เชบีเชฟ (Chebyshev) และเอลลิปติกฟังก์ชัน (Elliptic Function) จากค่าต่าง ๆ ในตาราง

W_s	A_s	C_1	C_2	L_2	W_2	C_3	C_4	L_4	W_4	C_5
1.145	35	1.783	0.174	0.827	1.597	1.978	1.487	0.488	1.174	1.276
1.217	40	1.861	0.372	0.873	1.755	2.142	1.107	0.578	1.250	1.427
1.245	45	1.923	0.293	0.947	1.898	2.296	0.848	0.684	1.313	1.553
1.407	50	1.933	0.223	0.963	2.158	2.392	0.626	0.750	1.459	1.635
1.528	55	1.976	0.178	0.986	2.387	2.519	0.487	0.811	1.591	1.732
1.674	60	2.007	0.141	1.003	2.660	2.620	0.380	0.862	1.747	1.807

ตารางที่ 2.3.1 ตารางสำหรับการออกแบบวงจรกรองความถี่ที่ค่ารีปเปิ้ล (Ripple) 1 dB

ตารางนี้อ้างอิงกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านและสูงผ่านแบบเทียบหนึ่ง (Normalized) หมายถึงค่าต่าง ๆ เป็นค่าที่ทำให้เน็ตเวิร์กมีอิมพีแดนซ์ 1 โอห์ม ที่ความถี่เชิงมุม ω_s เป็น 1 เกรเดียนเอกส ทั้งนี้เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณศึก แล้วใช้ตัวคูณเพื่อเลื่อนค่าไปยังจุดที่ต้องการ วิธีการนี้เรียกว่า การปรับขนาดอิมพีแดนซ์และความถี่อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

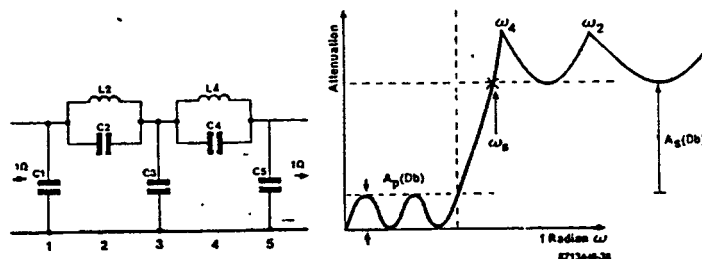
ตัวเลขในตาราง นอกจากใช้ออกแบบแล้ว ยังใช้ในการแปลงเน็ตเวอร์กจากวงจรกรองชนิดหนึ่ง ไปยังอีกชนิดหนึ่ง เช่น วงจรกรองต่ำผ่าน ไปเป็นวงจรกรองสูงผ่านหรือแถบความถี่ผ่าน และสามารถปรับเลื่อนอิมพีแดนซ์หรือความถี่ ไปยังจุดที่ต้องการได้โดยง่าย ซึ่งจะได้ค่าของอุปกรณ์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามตาราง และตามคุณสมบัติที่ต้องการ

ในที่นี้ จะใช้ตารางของวงจรกรองแบบเอลลิปติกฟังก์ชันเป็นตัวอย่าง เพราะว่าให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด แสดงในตารางที่ 2.3.1 แต่ละบรรทัดเป็นข้อมูลที่ระดับการลดทอนค่าหนึ่งในช่วงหยุดความถี่ (ปกติจะต่างกันขึ้นละ 5 dB สำหรับเน็ตเวอร์กเล็ก ๆ) และเฉพาะค่ารีปเปิ้ลค่าหนึ่ง ๆ ในช่วงความถี่ผ่าน (หน่วยเป็น dB) ค่าอุปกรณ์ในคอลัมน์เป็นค่าที่อิมพีแดนซ์ของเน็ตเวอร์กเป็น 1 โอห์ม และค่าความถี่ 1 เรเดียน

ความหมายของอักษรกำกับแต่ละคอลัมน์

- ω_s = ความถี่เริ่มต้นที่ขนาดการลดทอนที่กำหนด
- A_s = ค่าการลดทอนที่กำหนดในช่วงหยุดความถี่
- C1-C5 = ค่าความจุของตัวเก็บประจุ หน่วยเป็นฟารัด
- L2, L4 = ค่าความเหนี่ยวนำของขดลวด หน่วยเป็นเฮนรี
- ω_2, ω_4 = ความถี่เชิงมุมที่จุดซึ่งการลดทอนเป็นอนันต์

จะสังเกตเห็นว่าค่าของ L และ C มีขนาดโตมาก ทั้งนี้เพราะว่าวงจรอ้างอิงที่อิมพีแดนซ์ 1 โอห์ม และความถี่ 1 เรเดียน ซึ่งต้องมีการปรับขนาด โดยการใช้อยู่ที่ช่วงความถี่ผ่านในที่นี้ พิจารณาจากรีปเปิ้ล ไม่ใช่จุด - 3 dB



รูปที่ 2.3.1 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน พร้อมแผนภูมิการตอบสนองความถี่ การคำนวณค่าอุปกรณ์ต่างๆ (สำหรับเป็นวงจรอ้างอิงการออกแบบ) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จาก 3 บรรทัดสุดท้ายในตารางที่ 2.3.1 ถ้าจุดเริ่มต้นความถี่ผ่าน กำหนดให้เป็น 2.2 kHz (ที่ -1 dB) การลดทอนที่ค่าต่าง ๆ จะอยู่ที่ความถี่ ดังนี้

$$50 \text{ dB} : 1.407 \times 2.2 = 3.0954 \text{ kHz}$$

$$55 \text{ dB} : 1.525 \times 2.2 = 3.3616 \text{ kHz}$$

$$60 \text{ dB} : 1.674 \times 2.2 = 2.6823 \text{ kHz}$$

หรือถ้ากำหนดจุดเริ่มต้นความถี่ผ่านเป็น 2.7 kHz ความถี่ที่ค่าลดทอนต่าง ๆ จะเป็น

$$50 \text{ dB} : 1.407 \times 2.2 = 3.7989 \text{ kHz}$$

$$55 \text{ dB} : 1.528 \times 2.2 = 4.1256 \text{ kHz}$$

$$60 \text{ dB} : 1.674 \times 2.7 = 4.5198 \text{ kHz}$$

เมื่อพิจารณาอิมพีแดนซ์ของวงจร จะพบว่าถ้าต้องการอิมพีแดนซ์สูงขึ้น ค่าความจุของตัวเก็บประจุจะน้อยลง ในขณะที่ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดจะสูงขึ้น ตัวเก็บประจุค่าต่ำสามารถใช้ชนิดค่าผิดพลาด 1 % เช่นชนิดซิลเวอร์ไมก้าได้ ส่วนขดลวดค่าสูง หลีกเลียงได้ โดยการใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ประเภท IC OP-Amp.

สมมติเลือกใช้บรรทัดสุดท้าย ในตารางที่ 2.3.1 โดยกำหนดอิมพีแดนซ์ของวงจรเท่ากับ 1 k โอห์ม มีความถี่ผ่านเริ่มต้นที่ 2.3 kHz ค่าเหนี่ยวนำของขดลวดทั้งสอง หาได้โดยใช้ตัวคูณ L ซึ่งหาได้จาก

$$L = \frac{(\text{ค่า } L \text{ จากตาราง}) \cdot (\text{ค่า } Z \text{ ที่ต้องการ})}{2\pi (\text{ความถี่เริ่มต้น})}$$

ฉะนั้น ตัวคูณ L' 2 และ L' 4 คำนวณได้ ดังนี้

$$L' 2 = \frac{10^3 \times 1.003}{2\pi \times 2.3 \times 10^3} = 0.069405 \text{ H}$$

$$= 69.405 \text{ mH}$$

$$L' 4 = \frac{10^3 \times 0.862}{2\pi \times 2.3 \times 10^3} = 0.059648 \text{ H}$$

$$= 59.648 \text{ mH}$$

ส่วนตัวคูณค่าความจุ C' หาได้จาก

$$C' = \frac{(\text{ค่า } C \text{ จากตาราง})}{2\pi (\text{ความถี่เริ่มต้น}) (\text{ค่า } Z \text{ ที่ต้องการ})}$$

$$C' 1 = \frac{2.007}{10^3 \times 2\pi \times 2.3 \times 10^3}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิจัยเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่สู่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้แจ้งแก่บุคคลอื่นใดที่มิใช่เจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C'2 = \frac{0.141}{10^3 \times 2\pi \times 2.3 \times 10^3}$$

$$= 9.75688 \text{ nF}$$

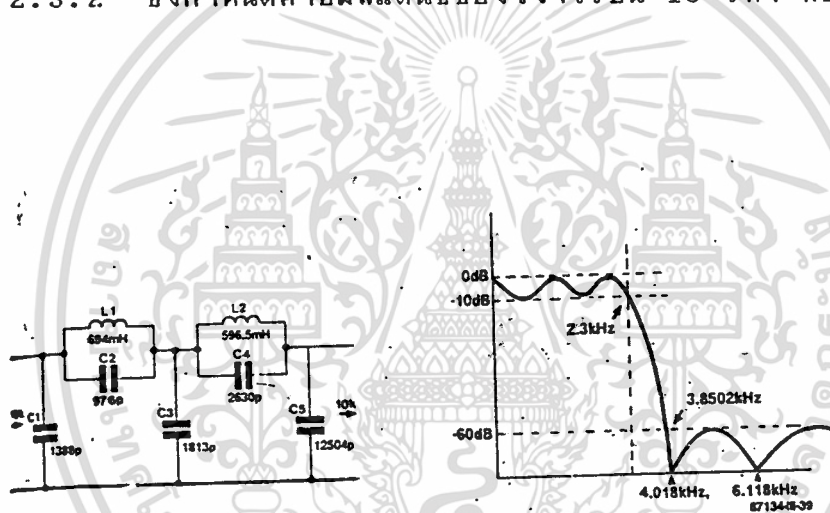
โดยวิธีเดียวกันก็จะได้

$$C'3 = 181.2982 \text{ nF}$$

$$C'4 = 26.295 \text{ nF}$$

$$C'5 = 125.040 \text{ nF}$$

ในทางปฏิบัติ การเลือกกำหนดอิมพีแดนซ์ของวงจร จะทำให้ค่าของขดลวด และตัวเก็บประจุเปลี่ยนแปลง โดยที่การลดทอนหรือคุณสมบัติทางความถี่ ยังคงมีรูปร่างคงเดิม แสดงในรูปที่ 2.3.2 ซึ่งกำหนดค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรเป็น 10 เท้า คือ 10 k โอห์ม



รูปที่ 2.3.2 แสดงรายละเอียดวงจรที่สมบูรณ์และลักษณะการตอบสนองความถี่

การคำนวณออกแบบวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน

ถ้าต้องการวงจรกรองแถบความถี่ที่มีลักษณะการตอบสนองดังแผนภูมิที่ 2.3.1 โดยมี f_1 f_2 เป็นขอบเขตความถี่ผ่านที่จุด -1 dB และ f_3 f_4 คือความถี่ที่การลดทอนเริ่มต้นเท่ากับ A_s (เทียบได้กับ ω_s ในรูปที่ 2.3.1) ส่วน f_0 เป็นความถี่กลางของแถบความถี่ผ่าน โดยที่ $f^2_0 = f_1 f_2 = f_3 f_4$ และ $\Delta 1/\Delta 2 = \omega_s$

ในการออกแบบนั้น ก่อนอื่นจะต้องเลือกค่า f_0 ขึ้นมาแล้วหา f_3 f_4 จาก ω_s ในตารางตรงค่าการลดทอน A_s ที่ต้องการ จากสูตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta 2 = f_4 - f_3 \quad \text{ส่วน } \Delta 1 \text{ ได้จากสูตร}$$

$$\Delta 1 / \Delta 2 = \omega_s$$

สำหรับ f_2 นั้น จากความสัมพันธ์

$$\Delta 1 = f_2 - f_1 \quad \text{จะได้}$$

$$\Delta 1 = f_2 - (f^2 / f_2) \quad \text{หรือ}$$

$$\Delta 1 f_2 = f^2 - f_2^2$$

ซึ่งเป็นสมการกำลังสอง มี f_2 เป็นตัวแปรสามารถหารากบวกได้จากสูตร

$$f_2 = \frac{(\Delta 1 + \sqrt{\Delta 1^2 + 4f^2})}{2} \dots \dots \dots (1)$$

เมื่อได้ f_2 แล้ว ก็สามารถหา f_1 ได้ จาก

$$\Delta 1 = f_2 - f_1$$

การหาค่า ω_s ในตารางเมื่อกำหนด f_0 และ $\Delta 1$ ก็หาได้จาก

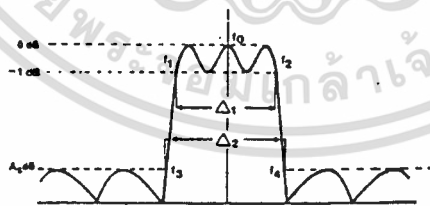
$$\Delta 2 = f_4 - f_3 = \omega_s f_0 - f_0 / \omega_s$$

แต่ $\Delta 2 / \Delta 1 = \omega_s$

ดังนั้น $\Delta 1 / \omega_s = \omega_s f_0 - f_0 / \omega_s$

$$(f_0 - \Delta 1) \omega_s = f_0 / \omega_s \quad \text{หรือ}$$

$$\omega_s = \sqrt{f_0 / (f_0 - \Delta 1)} \dots \dots \dots (2)$$



แผนภูมิที่ 2.3.1 แสดงรูปร่างของผลตอบสนองความถี่ของวงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน

การหาค่า ω_s ในตารางที่จะใช้ในการออกแบบวงจรกรอง

สมมติกำหนดให้ $f_0 = 850 \text{ Hz}$ $BW_{\Delta 1} = 300 \text{ Hz}$ จากสมการ (2)

$$\begin{aligned} \text{จะได้ } \omega_s &= \sqrt{850 / (850 - 300)} \\ &= 1.243 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์อันควรใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านกลการค้า
ค่า ω_s ในตารางที่ใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้มากที่สุด คือ 1.245 (ตารางที่ 3)
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่จุดนี้การลดทอนในย่านตัดความถี่มีค่า 45 dB โดยดูจากบรรทัดเดียวกันและสมการที่ (1) จะได้

$$f_2 = \frac{(300 + \sqrt{300^2 + 4 \times 350^2})}{2}$$

$$= 1013$$

และ

$$f_1 = 1013 - 300 = 713 \text{ Hz}$$

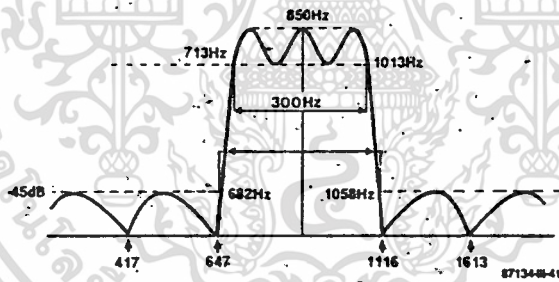
$$f_4 = \omega_{sfo} = 1.245 \times 850$$

$$= 1058 \text{ Hz}$$

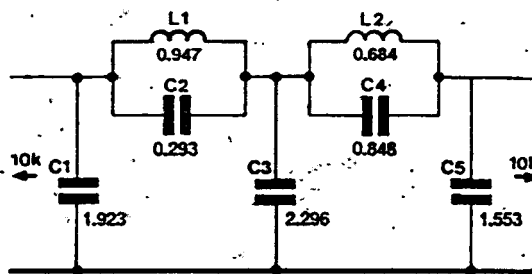
$$f_3 = f_o / \omega_s = 850 / 1.245$$

$$= 682 \text{ Hz}$$

จากค่าที่คำนวณได้ ก็จะได้รูปร่างการตอบสนองความถี่ของวงจรกรอง และค่าของอุปกรณ์ตามรูปที่ 2.3.3 และแผนภูมิที่ 2.3.2

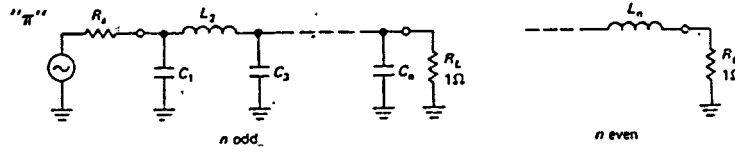


แผนภูมิที่ 2.3.2 รูปร่างการตอบสนองความถี่แบบแถบความถี่ผ่านที่ได้จากการคำนวณ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 2.3.3 วงจรกรองแถบความถี่ที่ได้พร้อมกับอุปกรณ์

การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท



รูปที่ 2.3.4 วงจรกรองความถี่แบบพาย

การหาค่าของขดลวดเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุในวงจรกรอง หาได้จากตารางที่ 2.3.2 ซึ่งใช้ได้ในการออกแบบวงจรกรองทั้งชนิดต่ำผ่าน สูงผ่าน แถบความถี่ผ่าน และก้ำจัดความถี่ (Band Reject)

TABLE H1. "BUTTERWORTH LOW-PASS FILTERS" ($R_L = 1\Omega$)

n	R_s $1/n$	C_1 L_1	L_2 C_2	C_3 L_3	L_4 C_4	C_5 L_5	L_6 C_6	C_7 L_7	L_8 C_8
$n=2$	1	1.4142	1.4142						
$n=3$	1	1.4142	0.7071						
$n=3$	∞	1.0	2.0	1.0					
$n=3$	∞	1.5	1.3333	0.5					
$n=4$	1	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654				
$n=4$	∞	1.5307	1.5772	1.0824	0.3827				
$n=5$	1	0.6180	1.6180	2.0	1.6180	0.6180			
$n=5$	∞	1.5451	1.6944	1.3820	0.8944	0.3090			
$n=6$	1	0.5176	1.4142	1.9319	1.9319	1.4142	0.5176		
$n=6$	∞	1.5529	1.7593	1.5529	1.2016	0.7579	0.2588		
$n=7$	1	0.4450	1.2470	1.8019	2.0	1.8019	1.2470	0.4450	
$n=7$	∞	1.5576	1.7988	1.6588	1.3972	1.0550	0.6560	0.2225	
$n=8$	1	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.6629	1.1111	0.3902
$n=8$	∞	1.5607	1.8246	1.7287	1.5283	1.2588	0.9371	0.5776	0.1951

*Values of L, C , for 1Ω load resistance and cutoff frequency ($-3dB$) of 1 rad/s. See text for scaling rules.

ตารางที่ 2.3.2 ตารางหาค่า L C ของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ท

ตารางนี้ให้ค่าเป็นค่าเทียบหนึ่ง (Normalize) ค่าจริงต้องใช้สูตรการเปลี่ยนสเกล (scale)

การออกแบบวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

สูตรที่ใช้

$$L_n (\text{จริง}) = \frac{R_L L_n (\text{ตาราง})}{\omega}$$

$$C_n (\text{จริง}) = \frac{C_n (\text{ตาราง})}{\omega R_L}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน ωR_L การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่โดยที่ใดๆ R_L ล้วน อีกทั้งห้ามขีดตัดความถี่ด้านทางอินพุตค่าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- R_L = ความต้านทานโหลด
- ω = $2\pi f$ เมื่อ f คือความถี่ตัด (-3 dB)
- n = ลำดับ (Order) ของวงจรกรอง

ถ้าลำดับที่ n สูง หมายถึงมีความชันของการตอบสนองสูง โดยมีค่าความชันลำดับละ -3 dB/Octave

วงจรนี้ สมมติเลือก $n = 4$ จากตารางจะได้ค่าเทียบหนึ่งของอุปกรณ์คือ

- $C1$ = 0.7654
- $L2$ = 1.8478
- $C3$ = 1.8478
- $L4$ = 0.7654
- $R_s = R_L$ = 50 โอห์ม
- ความถี่ตัด = 150 MHz
- ใช้สูตรเลื่อนสเกลจะได้ค่าจริงออกมา ดังนี้
- $C1$ = 15 pF
- $L2$ = 0.092 μ H
- $C3$ = 37 pF
- $L4$ = 0.038 μ H



บทที่ 3

3.1 วงจรเลือกความถี่คลื่นวิทยุ (Preamplifier) 144.5 MHz.

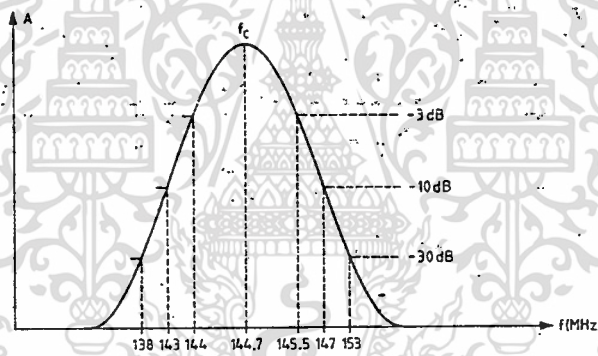
วัตถุประสงค์

1. เพื่อลด Intermodulation และเพิ่ม Sensitivity ในการรับคลื่นความถี่ 144.0-145.5 MHz.

2. เพื่อให้มี Selectivity ดี ในการรับสัญญาณได้ชัดเจนตามต้องการ

จุดมุ่งหมายของการออกแบบวงจร

1. ให้ผลตอบสนองความถี่แคบ เฉพาะย่านวิทยุสมัครเล่น แสดงในแผนภูมิที่ 3.1.1 เนื่องจากเครื่องวิทยุมือถือส่วนใหญ่ ผู้ผลิตจะออกแบบให้ใช้ได้ในช่วงความถี่กว้าง ๆ เพราะจะได้ใช้ในช่วงที่ไม่ใช่ย่านวิทยุสมัครเล่นได้ด้วย



แผนภูมิที่ 3.1.1 แสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรกรอง แบบแถบความถี่ผ่าน ที่ความถี่ต่าง ๆ

2. ใช้ GaAs MOSFET ซึ่งมีสัญญาณรบกวนต่ำประมาณ 0.8-1.2 dB ที่ความถี่ใกล้เคียง 145 MHz.

3. มีกำลังขยายประมาณ 20 dB (dBW = 10 เท่า)

4. VSWR ไม่เกิน 1.1 เมื่อต่อกับวิทยุมือถือ สามารถรับกำลังด้านส่งได้อย่างน้อย 15 วัตต์ ใช้รีเลย์ชนิดโคแอกเซียล

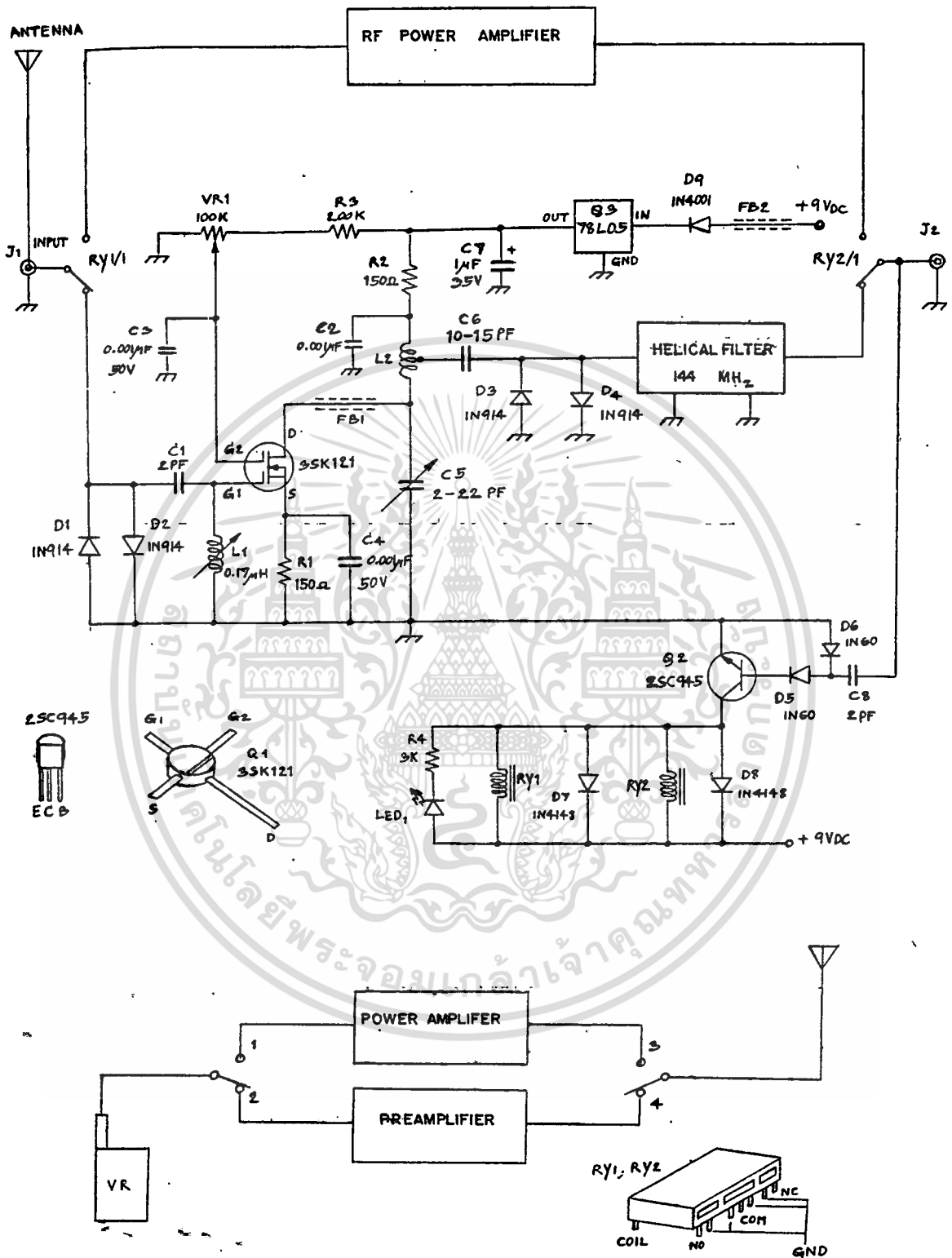
5. วงจรกรองแบบแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ในวงจรนี้ใช้ Helical Filter ซึ่งมีคุณสมบัติในการป้องกัน Intermodulation ความถี่ข้างเคียงได้ดี

6. ต่อกับวิทยุมือถือ โดยใช้ Coaxial Jack แบบ BNC และ By Pass เมื่อต้องการส่งออก (Transmitted)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รวมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

7. ใช้ Battery ขนาด 9 โวลต์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่ลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.1 วงจร Preamplifier 144.5 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของวงจร

เมื่อมีสัญญาณเข้าทางอินพุต จะมีระดับสัญญาณประมาณ 0.01 mV L_1 C_1 เป็นตัวปรับให้สัญญาณที่เข้ามาแรงที่สุด ไปเข้าที่ขา G_1 ของ 3SK121 MOSFET VR_1 เป็นตัวปรับ Bias ให้กับ G_2 เพื่อช่วยเพิ่ม Gain ของวงจรให้มากขึ้น เมื่อ Q_1 ทำงานที่ขา D จะมีแรงดันประมาณ 3 โวลต์

L_2 C_2 เป็นตัวปรับความถี่ที่เอาต์พุตให้สัมพันธ์ (Match) กับทางอินพุต Helical Filter ทำหน้าที่เป็น Band Pass Filter

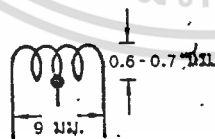
ภาค Control Relay RY1/1 RY2/1 จะควบคุมโดย Q_2 เมื่อมีสัญญาณส่งออก มา Q_2 จะนำกระแส (Conduct) ทำให้รีเลย์ทั้งสองทำงานตัดภาค Preamplifier ออกจากระบบ และส่งสัญญาณผ่านออกไปเลย

ภาค Power Supply ของวงจรจะใช้ประมาณ 5.1 โวลต์ โดยให้ Q_3 เป็นตัวกำหนดแรงดันเอาต์พุต ส่วนอินพุตของ Q_3 ได้จาก Battery ขนาด 9 โวลต์

อุปกรณ์สำคัญของวงจร

ในการประกอบอุปกรณ์ลงบนวงจร จะต้องระมัดระวังอุปกรณ์บางตัว และปฏิบัติให้ถูกวิธี มิฉะนั้นแล้วอาจมีผลทำให้วงจรไม่ทำงานได้

1. การพันขดลวด L_2 รูปที่ 3.1.2 ใช้ลวดอบน้ำยาเบอร์ 20 AWG พันรอบคอกลว่ำนขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มม. จำนวน 4 รอบ แล้วแก้ปตรงกลาง



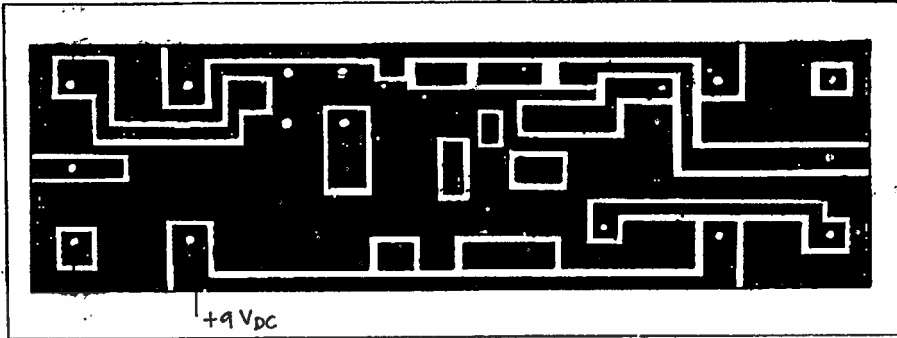
รูปที่ 3.1.2 แสดงการพันขดลวด L_2

2. แผ่นวงจรพิมพ์ที่ใช้ เป็นแบบอ็อกซี่ 2 หน้า ออกแบบด้านหนึ่งเป็นลายวงจร อีกด้านหนึ่งเป็นกราวด์เพลน (Ground Plane) แสดงในรูปที่ 3.1.3

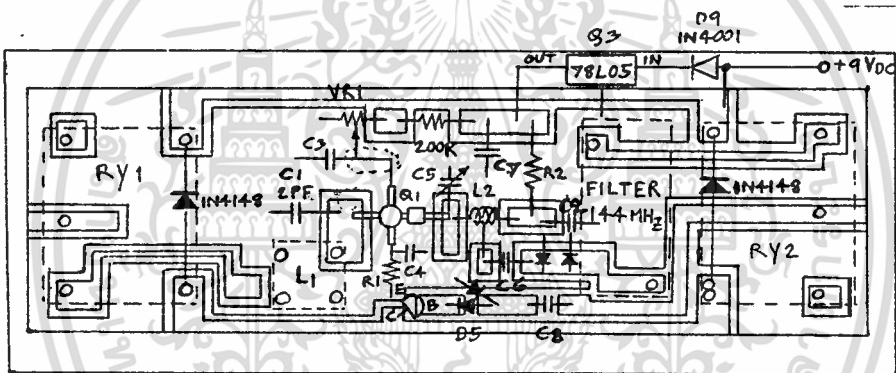
3. ประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์ ด้านกราวด์เพลน แต่มีอุปกรณ์บางตัวลงบนด้านลายวงจรพิมพ์ แสดงในรูป 3.1.4

4. Q_1 ควรใส่เป็นตัวสุดท้าย พร้อมเฟอร์ไรต์บีด FB101 เพื่อไม่ให้ Q_1 ร้อนจัด ไม่วางกรณี่ใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้กดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

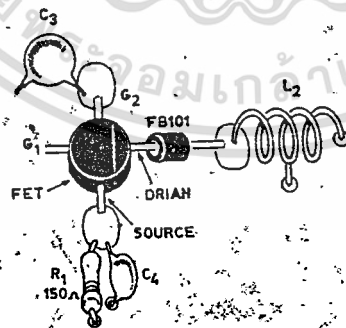
จัดมาก ขณะประกอบ แสดงในรูป 3.1.5



รูปที่ 3.1.3 แสดงด้านลายวงจรมิพิมพ์ ขนาดเท่าของจริง



รูปที่ 3.1.4 แสดงการประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรมิพิมพ์



รูปที่ 3.1.5 แสดงการต่อ FB101 เข้าขา D ของ Q₁ C₃, C₄ ต่อที่ขา G₂ และ S ตามลำดับ

5. C₃ C₄ เป็น By Pass ความถี่สูง สำคัญมากเพราะว่า จะทำให้ไม่อสซิลเลต เวลาประกอบให้ใช้หัวแร้งจี้ให้แผ่นวงจรมิพิมพ์ร้อนก่อน สายจิ้มควรรใช้สายโคแอกเซียลชนิดเทฟลอน เพราะจะไม่ละลายเวลาบัดกรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในภาค Preamplifier

อุปกรณ์	ค่า/เบอร์	ชนิด
C ₁	2pF	Ceramic
C ₂ , C ₃	0.001 μ F, 50 V	Microwave Condenser
C ₄	0.001 μ F	Ceramic
C ₅	2-22 pF	Variable Condenser
C ₆	10-15 pF	Ceramic
C ₇	1 μ F 35 V.	Tantalum
D ₁ - D ₄	1N914	Diode
D ₅ - D ₆	1N60	HF Shocking Diode
D ₇ - D ₈	1N4148	Silicon
D ₉	1N4001	Silicon
RY ₁ , RY ₂	152P	Coaxial Relay
L ₁	0.17 μ H	Variable Inductor
L ₂	20 AWG	-----
R ₁ , R ₂	150 Ohm 1/4 W	Carbon Film
R ₃ , R ₄	200K, 3K 1/4 W	Carbon Film
VR ₁	100 K	Variable Resistor
Q ₁	3SK121 MRF 966	GaAs Dual Gate MOSFET
Q ₂	2SC945	NPN
Q ₃	78L05	IC Regulated
FB ₁ , FB ₂	FB101	Ferrite Bead
J ₁ , J ₂	BNC	Coaxial Plug and Receptacle
LED	--	Red
Battery	9 V.	Heavy Duty
On-Off Switch	--	--

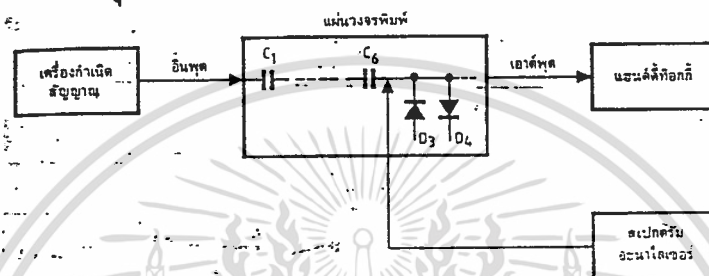
ตารางที่ 3.1.1 แสดงรายละเอียดของอุปกรณ์ทุกตัวในวงจร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการทำงานของวงจร

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. Signal Generator (Hewlett-Packard)
2. Spectrum Analyzer (Anritsu MS 6108)
3. Frequency Counter
4. Attenuator ขนาด 30 dBm
5. วิทยุมือถือ (Kenwood 27 E)



รูปที่ 3.1.6 แสดงการต่อเครื่องมือ เพื่อทดสอบการทำงานของวงจร

การปรับแต่งเครื่องมือทดสอบ

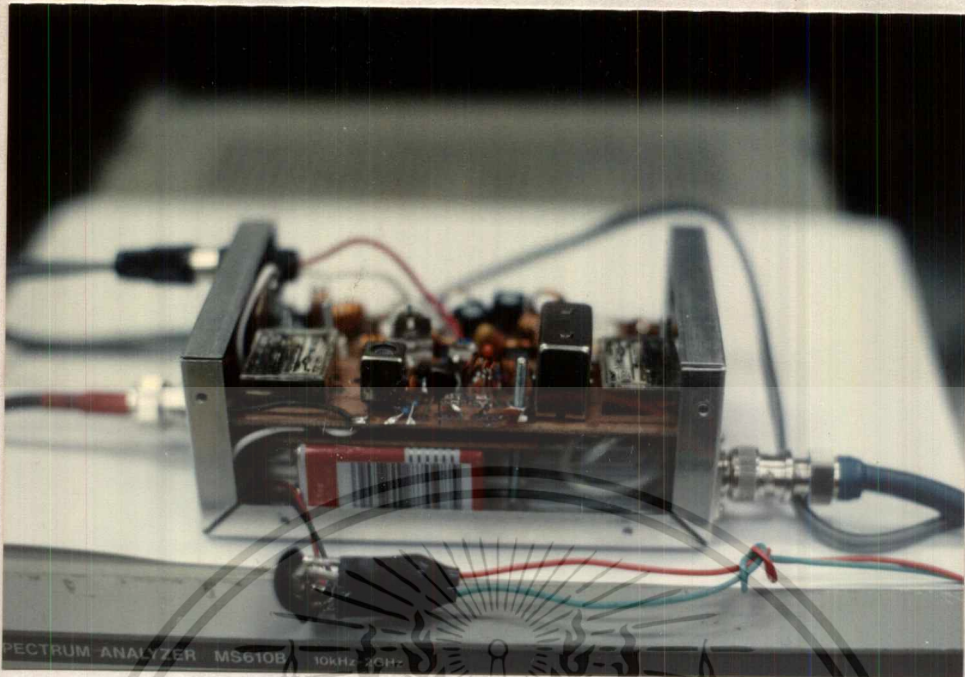
Signal Generator ตั้งที่ Range -30 dBm 0.01 V.

Spectrum Analyzer ตั้ง Center Frequency (F_c) ที่ 144 MHz. Scale 10 dB/DIV

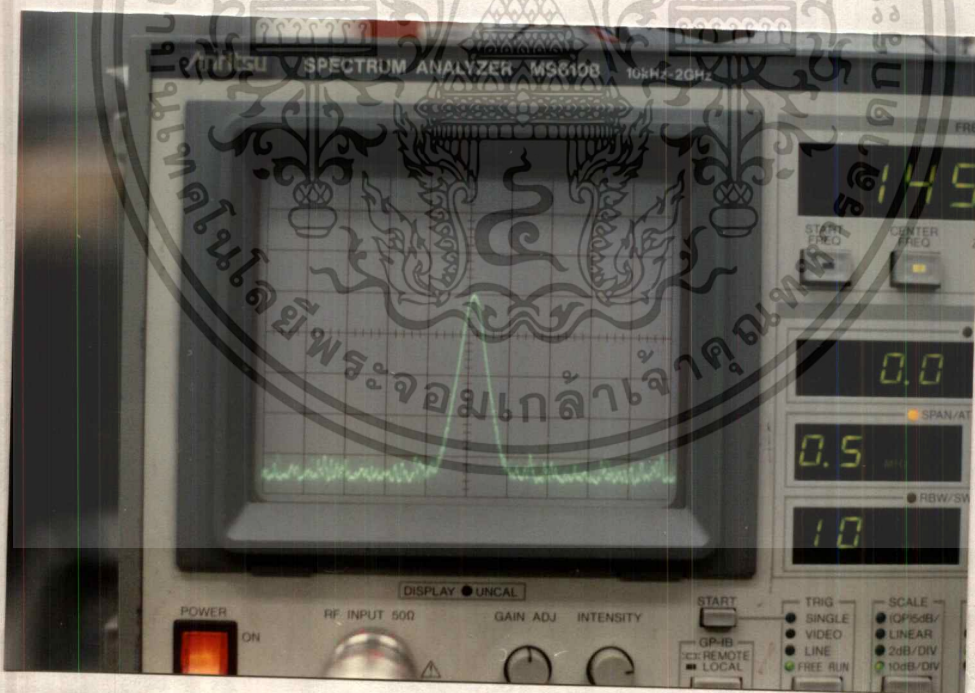
วิธีการทดสอบ

1. บ้อนสัญญาณอินพุตจาก Signal Generator ที่ -30 dBm 0.01 V ปรับ C_2 ไว้ตรงกลาง
2. Spectrum analyzer จับระหว่าง C_2 กับ D_3 D_4 ก่อนเข้า Filter
3. ปรับ L_1 ให้ได้สัญญาณเอาต์พุตแรงที่สุด เมื่อ Q_1 ทำงานจะมีแรงดันปรากฏที่ขา Drain (D) ประมาณ 3 โวลต์
4. ปรับ C_2 จนได้สัญญาณแรงขึ้นอีก แล้วปรับ VR_1 จนสัญญาณรบกวนต่ำสุด อัตราการขยายจะปรากฏที่ Spectrum Analyzer
5. ย้าย Spectrum Analyzer มาจับที่เอาต์พุต จะได้อัตราการขยายเท่ากับ 18 dB
6. ต่อเอาต์พุตกับวิทยุมือถือ กด Transmit RY1/1 RY2/1 ทำงาน LED ติด ที่ Q_2 จะมีแรงดันเข้ามาประมาณ 1 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

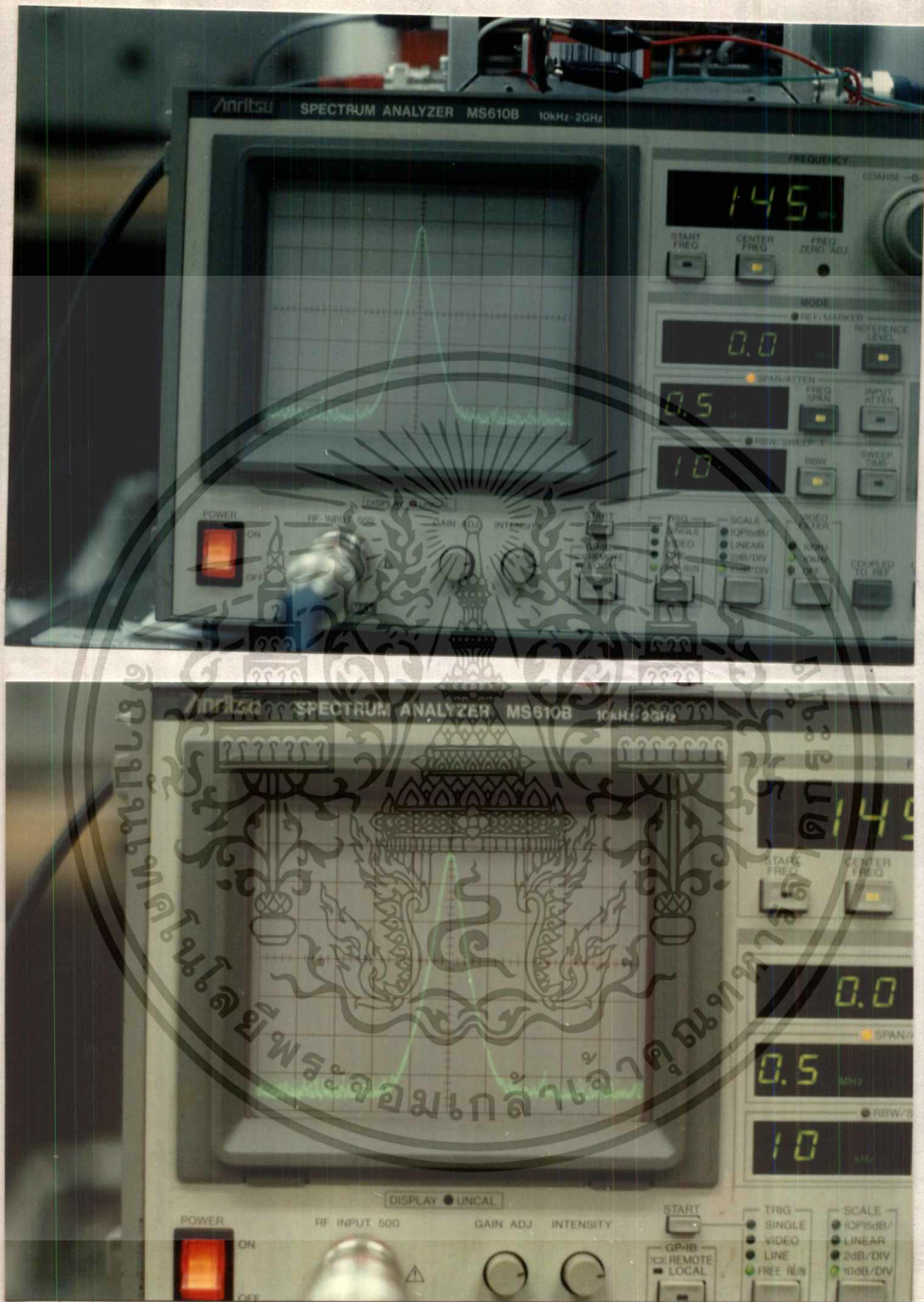


รูปที่ 3.1.7 ภาพถ่ายอุปกรณ์ต้นแบบทั้งชุดของ Preamplifier และ RF Power Amplifier ในกล่องเดียวกัน



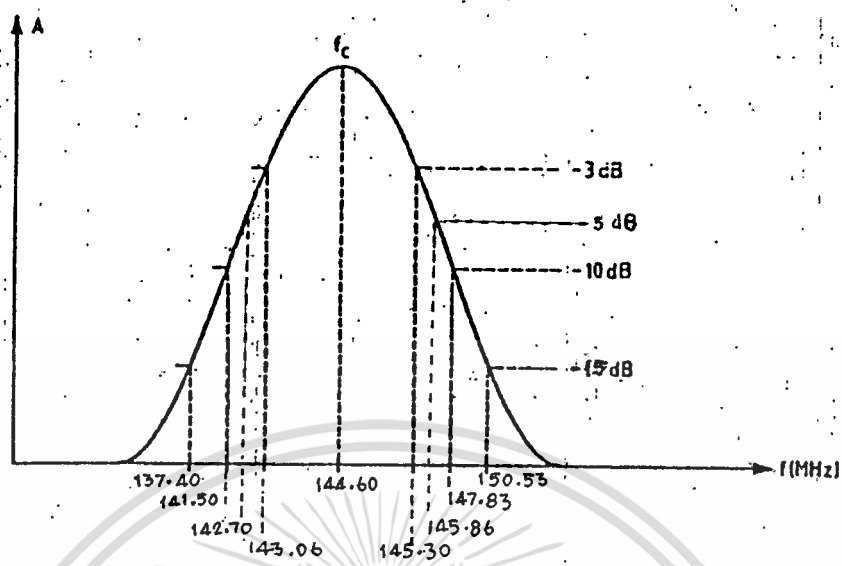
รูปที่ 3.1.8 ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณอินพุตของ Preamplifier ที่ -30 dBm 0.01 V ใช้ Attenuator 30 dB 10 dB/DIV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1.9 ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของ Preamplifier
ได้สัญญาณเพิ่มขึ้นเป็น $30 - 12 = 18 \text{ dBm}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แผนภูมิที่ 3.1.2 แสดงการตอบสนองความถี่ต่าง ๆ ของ Preamplifier ตัวนี้ โดยอ่านจาก Frequency Counter

การเปรียบเทียบ dBm เป็น Power

(-3 dB down) (Half Power Point)

30 dBm	1 W
27 dBm	500 mW
24 dBm	250 mW
21 dBm	125 mW
18 dBm	62.5 mW

dBm ลดลงทุก ๆ 3 dB Power ลดลงครึ่งหนึ่ง

จากสูตร
$$dBm = 10 \log \frac{P_o}{P_i}$$

จากการเปรียบเทียบ 30 dBm = 1 W,
$$= 10 \log \frac{1000 \text{ mW}}{1 \text{ mW}}$$

จากผลการทดลอง Preamplifier ต้นแบบ ได้กำลังขยาย 18 dBm

แทนค่าในสูตรจะได้
$$dBm = 10 \log \frac{62.5 \text{ mW}}{1 \text{ mW}} = 17.95$$

กำลังขยาย =
$$= 10 \log 17.95$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลจากการทดสอบ

1. ได้อัตราการขยายเท่ากับ 18 dB
2. การตอบสนองความถี่ 144-145 MHz. ไม่ลดทอน
3. การตอบสนองความถี่ย่านต่าง ๆ เป็นดังนี้
 ความถี่ตั้งแต่ 143.06 MHz. ขึ้นไป และ 145.3 MHz. ลงมา = -3 dB
 ความถี่ตั้งแต่ 142.7 MHz. ขึ้นไป และ 145.86 MHz. ลงมา = -5 dB
 ความถี่ตั้งแต่ 141.5 MHz. ขึ้นไป และ 147.83 MHz. ลงมา = -10 dB
 ความถี่ตั้งแต่ 137.4 MHz. ขึ้นไป และ 150.53 MHz. ลงมา = -15 dB
4. VSWR เท่ากับ 1.1 : 1
5. ทนกำลังได้ 12 วัตต์
6. ใช้กระแสไฟเมื่ออยู่ในสภาวะรับ 10 mA เมื่ออยู่ในสภาวะส่ง 100 mA
7. เมื่อกด Transmit หลอดไฟ LED จะติด แสดงว่าส่งออกอากาศได้

3.2 วงจรขยายกำลัง (RF Power Amplifier)

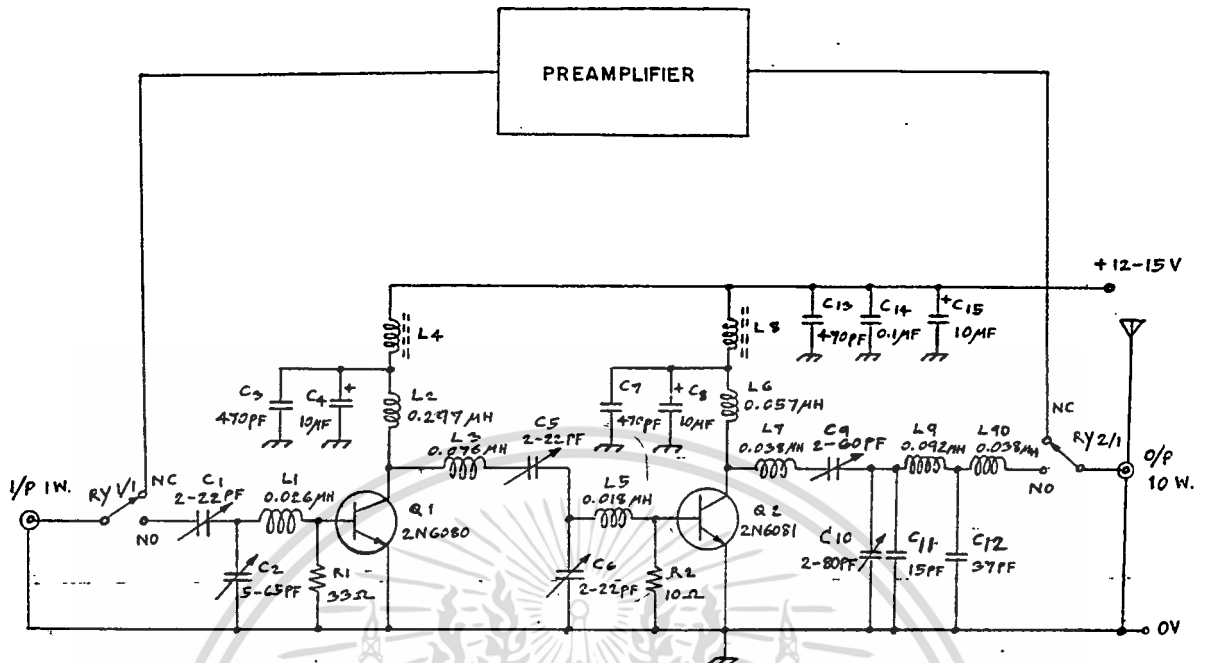
วัตถุประสงค์

1. เพื่อขยายกำลังในการส่งคลื่นวิทยุ ให้มีรัศมีกว้างไกลขึ้น
2. ศึกษาวงจรขยายพื้นฐานคลาสต่าง ๆ เพื่อนำเอาแบบที่เหมาะสมไปใช้ในการออกแบบวงจร

จุดมุ่งหมายของการออกแบบวงจร

1. วงจรขยายคลาสซี ทำการขยาย 2 ส.เตจ
2. ใช้ RF Power Transistor เบอร์ 2N6080 และ 2N6081 ซึ่งทนกำลังขับได้ 15 วัตต์
3. มีวงจรแมตซิ่ง เพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของแต่ละส.เตจ
4. ให้รับอินพุต 1 วัตต์ ที่ 50 โอห์ม ความถี่ 144 MHz. และให้เอาต์พุตสูงสุด 15 วัตต์ ที่ 50 โอห์ม
5. วงจรกรองความถี่เอาต์พุต เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) แบบพาย (π) เพื่อลดฮาร์โมนิกต่าง ๆ ที่เกิดการทำงานในคลาสซี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.1 วงจรขยายกำลัง 144 MHz. 15 วัตต์

การทำงานของวงจร

เมื่อมีสัญญาณเอาต์พุตจากวิทยุมือถือ เข้ามาทางอินพุตของวงจรขยาย โดยจะผ่าน มาทางชุดรีเลย์ความถี่สูง RY1/1 เข้าทางวงจรขยายสเตจแรก (Q_1)

วงจรแมตซ์ทางด้านอินพุต เป็นแบบ Double Tune เพื่อปรับอิมพีแดนซ์ทางด้านอิน พุตของ Q_1 ให้แมตซ์กับของเครื่องรับ-ส่งวิทยุ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับ $50 + j0$ โอห์ม สมมติว่า สัญญาณอินพุตเข้ามา 1 วัตต์ วงจรขยายสเตจแรก โดย Q_1 นี้ จะขยายสัญญาณขึ้นไปเป็น ประมาณ 3.5 วัตต์ จากนั้น สัญญาณที่ผ่านการขยายสเตจแรก จะถูกส่งไปเข้าวงจรขยาย สเตจที่สอง (Q_2) ระหว่าง Q_1 กับ Q_2 จะคั่นด้วยวงจรแมตซ์ซึ่ง เพื่อปรับเอาต์พุต อิมพีแดนซ์ของ Q_1 ให้แมตซ์กับอินพุตอิมพีแดนซ์ของ Q_2 โดยที่ Q_2 จะทำการขยาย สัญญาณให้แรงขึ้นไปอีก เป็นประมาณ 15 วัตต์ ส่งออกไปทางสายอากาศ โดยผ่านชุดรีเลย์ RY2/1

ที่เอาต์พุตของ Q_2 จะมีวงจรแมตซ์แบบ Double Tune เช่นกัน เพื่อปรับให้ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของภาควิทยุ Q_2 แมตซ์กับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

ในทางปฏิบัติ กำลังอินพุตที่เข้ามา 1 วัตต์ จะมีการสูญเสียไปบ้าง เนื่องจากการเชื่อม ต่อวงจร และที่หน้าสัมผัสรีเลย์

วงจรขยายกำลังเป็นแบบคลาสซี 2 สเตจ ทรานซิสเตอร์ถูกไบอัสให้อยู่ต่ำกว่าจุด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปตีพิมพ์หรือแจกจ่าย การค้า คัทออฟ คือ V_{BE} มีค่าประมาณ 0 โวลต์ เมื่อมีอินพุตเข้ามาค่าสูงกว่า 0.6 โวลต์ จะ ผนวกรวมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการอุปกรณ์ที่ใช้ในวงจร RF Power Amplifier

		ตัวต้านทาน			
R1	33 โอห์ม	1/4 วัตต์	R2	10 โอห์ม	1/2 วัตต์
ตัวเก็บประจุ					
C1, C5, C6	2-22 pF				ทริมเมอร์ชนิดเซรามิก
C2	5-65 pF				ทริมเมอร์ชนิดเซรามิก
C3, C7, C13	470 pF 50 V				เซรามิก
C4, C8, C15	10 μ F 25 V				แทนทาลัม
C9	2-60 pF				ทริมเมอร์ชนิดเซรามิก
C10	2-80 pF				ทริมเมอร์ชนิดเซรามิก
C11	15 pF 50 V				เซรามิก
C12	37 pF 50 V				เซรามิก
C14	0.1 μ F 50 V				เซรามิก
ตัวเหนี่ยวนำ					
L1	0.026 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 20 SWG	พันบนแกน ϕ 1/4 นิ้ว	2 รอบ	
L2	0.297 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 20 SWG	พันบนแกน ϕ 3/8 นิ้ว	4 1/2 รอบ	
L3	0.078 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 20 SWG	พันบนแกน ϕ 3/8 นิ้ว	3 รอบ	
L4, L8	ส่วนของ Supply De-coupling ใช้ลวดทองแดงเบอร์ 22 SWG				
		พันลวดเพื่อไรต์บิต	ขนาด 4 มม.	1 รอบ	
L5	0.018 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 20 SWG	พันบนแกน ϕ 1/4 นิ้ว	1 1/2 รอบ	
L6	0.057 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 20 SWG	พันบนแกน ϕ 3/8 นิ้ว	2 1/2 รอบ	
L7	0.038 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 18 SWG	พันบนแกน ϕ 1/4 นิ้ว	3 รอบ	
L9	0.092 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 18 SWG	พันบนแกน ϕ 1/4 นิ้ว	4 1/2 รอบ	
L10	0.038 μ H	ใช้ลวดเบอร์ 18 SWG	พันบนแกน ϕ 1/4 นิ้ว	3 รอบ	
สารกึ่งตัวนำ					
Q1	2N6080				
Q2	2N6061				

ทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงานสามารถขยายสัญญาณได้ วงจรขยายคลาสซี เป็นวงจรที่สามารถจัดไบอัสได้ง่าย

วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่เอาต์พุตของ Q_2 จะทำหน้าที่ลดความถี่ฮาร์มอนิกต่าง ๆ และมีผลทำให้กำลังเอาต์พุตลดลงไปบ้าง

อุปกรณ์สำคัญของวงจร

1. การพันขดลวดให้ได้ค่าที่ต้องการ ขดลวดที่ใช้ในวงจร ถึงแม้ว่าจะทราบค่าความเหนี่ยวนำแล้วก็ตาม แต่จะหาค่าที่เหมาะสมมาใช้เหมือนอุปกรณ์อื่นได้ไม่่ง่ายนัก จึงจำเป็นต้องพันขดลวดเหล่านี้ใช้งานขึ้นเอง โดยมีสูตรการคำนวณ ดังนี้

$$L (\mu H) = \frac{a^2 n^2}{9a+10l}$$

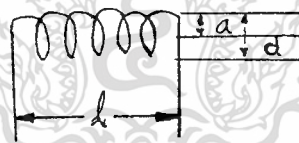
a = รัศมีของแกน หน่วยเป็นนิ้ว

n = จำนวนรอบของการพันขดลวด

l = ความยาวของขดลวด หน่วยเป็นนิ้ว

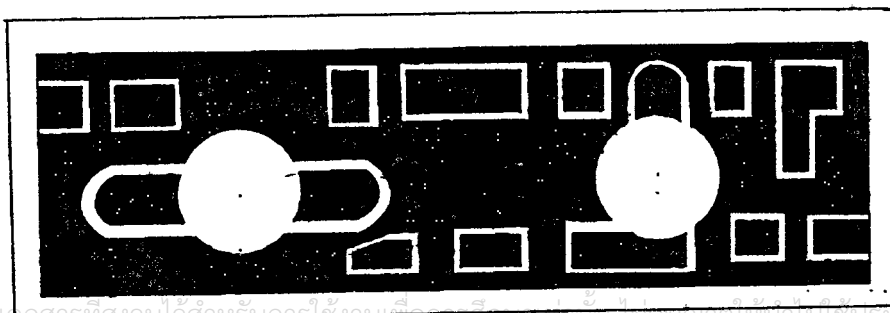
หรือ $L (\mu H) = \frac{d^2 n^2}{18d+40l}$

$$n = \frac{\sqrt{L (18d+40l)}}{d}$$

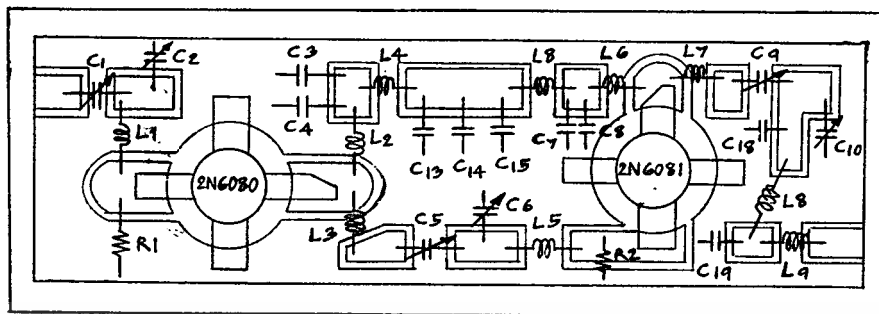


รูปที่ 3.2.2 แสดงการพันขดลวด

2. แผ่นวงจรพิมพ์สำหรับวงจรความถี่สูง จำเป็นต้องมีลายทองแดงที่สั้นที่สุด และลงกราวนด์ครอบคลุมพื้นที่มากที่สุด (High Frequency Ground)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับบุคคลใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ารูปที่ 3.2.3 อีก แสดงแผ่นวงจรพิมพ์ด้านลายพิมพ์ทองแดงขนาดเท่าของจริงนำไปใช้



รูปที่ 3.2.4 แสดงการประกอบอุปกรณ์ลงบนแผ่นวงจรพิมพ์

3. ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรเป็นทรานซิสเตอร์ขยายกำลังความถี่สูง เมื่อขณะใช้งานจะเกิดความร้อนสูง ในกระบวนการผลิตจึงใช้สารเบอร์ลิเลียมออกไซด์เคลือบ ฝุ่นของสารนี้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้น จึงควรระวังในการหยิบใช้งาน

ในการประกอบ จะต้องเจาะรูที่แผ่นวงจรพิมพ์เป็นวงกลม ให้หัวของทรานซิสเตอร์โผล่ลอดจากด้านล่างขึ้นมาได้ ขาของทรานซิสเตอร์จะแนบกับลายทองแดงด้านล่าง สามารถบัดกรีได้พอดี แกนยาวให้ยึดกับแผ่นระบายความร้อน

4. การคำนวณค่าอุปกรณ์ของวงจรแมตซิ่ง จากวงจรรูปที่ 3.2.1 จะใช้วงจรแมตซิ่งเชื่อมต่อ 3 ช่วง

ช่วงแรกเป็นการเชื่อมต่อระหว่างเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่ง ที่มีค่า $50 + j0$ โอห์ม กับอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ ในวงจรสเตจแรก ที่มีค่า $3.18 - j3.40$ โอห์ม สูตรที่ใช้

$$B = R_2 (1 + Q^2)$$

$$A = \sqrt{\frac{(B) - 1}{R_1}}$$

$$XL_1 = QR_2$$

$$XC_2 = \frac{B}{Q - A}$$

$$XC_1 = AR_1$$

ในวงจรเลือกใช้ค่า $L = 0.026 \mu\text{H}$, $R_1 = 50$ โอห์ม (เครื่องส่ง) $R_2 = 3.18$ โอห์ม

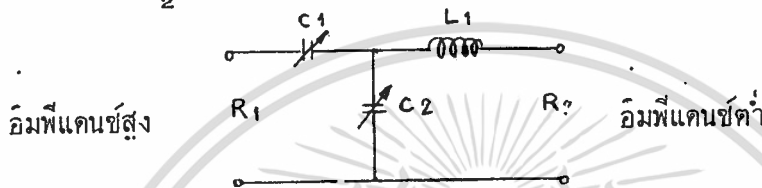
$$Q = \frac{XL_1}{R_2} = \frac{2\pi f L_1}{R_2} = \frac{6.28 \times 144 \times 10^6 \times 0.026 \times 10^{-6}}{3.18} = 7.39$$

$$B = R_2 (1 + Q^2) = 3.18 [1 + (7.39)^2] = 177.2$$

$$A = \sqrt{\frac{(B) - 1}{R_1}} = \sqrt{\frac{(177.2) - 1}{50}} = 1.59$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ จึงขอมิให้คัดแบบสิ่งนี้ให้ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 XC_1 &= AR_1 &= 1.59 \times 50 &= 79.5 \\
 C_1 &= \frac{1}{2\pi f XC_1} &= \frac{1}{2\pi \times 144 \times 79.5} &= 1.39 \times 10^{-11} \text{ F} &= 13.9 \text{ pF} \\
 XC_2 &= \frac{B}{Q-A} &= \frac{177.2}{7.39-1.59} &= 30.55 \\
 C_2 &= \frac{1}{2\pi f XC_2} &= \frac{1}{2\pi \times 144 \times 30.55} &= 3.6 \times 10^{-11} \text{ F} &= 36 \text{ pF}
 \end{aligned}$$



รูปที่ 3.2.5 แสดงวงจรแมตชิ่งระหว่างเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของเครื่องส่ง กับอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์สเตจแรก

ช่วงที่สองเป็นการเชื่อมต่อระหว่างสเตจแรกกับสเตจที่สองของวงจรขยายกำลัง

สูตรที่ใช้

$$\begin{aligned}
 R_3 &= R_1 (1 - Q_2^2) \\
 XC_a &= R_3 \sqrt{\frac{R_1}{R_3 - R_1}} \\
 XL_2 &= Q_2 R_2 \\
 XC_1 &= Q_1 R_1 \\
 XC_b &= \frac{R_2^2 + XL_2^2}{XL_2} \\
 C_2 &= C_a + C_b \\
 XL_1 &= XDC_1 + \frac{R_1 R_3}{XC_a}
 \end{aligned}$$

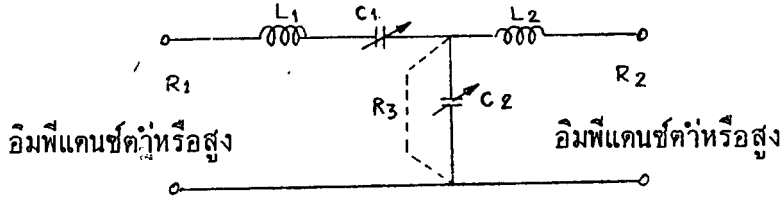
ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรสเตจแรกเบอร์ 2N6080 ซึ่งมีอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 3.18-j3.40 และมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 10.42-j5.96 โอห์มที่ 144 MHz

ทรานซิสเตอร์ที่ใช้ในวงจรสเตจที่สองเบอร์ 2N6081 มีอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 1.77 +j0.60 โอห์ม และมีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ 4.11-j2.02 โอห์ม ที่ 144 MHz

วิธีการคำนวณเช่นเดียวกับช่วงแรก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับควรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ค่า $L_1 = 0.076 \mu\text{H}$
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 $L_2 = 0.018 \mu\text{H}$

ได้ค่า $C_1 =$ อยู่ระหว่าง 2-22 pF
 $C_2 =$ อยู่ระหว่าง 2-22 pF



รูปที่ 3.2.6 แสดงวงจรแมตซ์ชิงระหว่างวงจรขยายสเตจแรกกับสเตจที่สอง

ช่วงที่สามเป็นการแมตซ์ชิงเชื่อมต่อระหว่างวงจรขยายสเตจที่สอง ซึ่งมีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ที่ 144 MHz $4.10 - j2.02$ โอห์ม กับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศซึ่งมีค่า $50 + j0$ โอห์ม

สูตรที่ใช้

$$XC_1 = QR_1$$

$$XL_1 = \frac{XC_1 + R_1 R_2}{XC_2}$$

$$XC_2 = R_2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}}$$

เลือกใช้

$$C_1 = 50 \text{ pF}$$

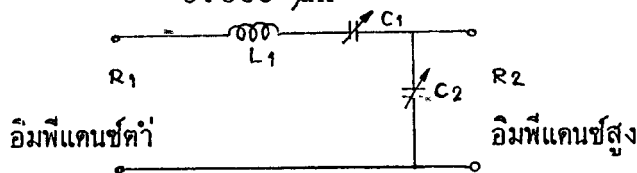
$$XC_1 = QR_1 = \frac{1}{2\pi f C_1} = 22.1$$

$$XC_2 = R_2 \sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}} = \frac{50}{\sqrt{50 - 4.10}} = 14.9$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f XC_2} = \frac{1}{6.28 \times 144 \times 10^6 \times 14.9} = 74.2 \text{ pF}$$

$$XL_1 = \frac{XC_1 + R_1 R_2}{XC_2} = \frac{22.1 + 50 \times 4.10}{14.9} = 35.8$$

$$L_1 = \frac{XL_1}{2\pi f} = \frac{35.8}{6.28 \times 144 \times 10^6} = 0.039 \times 10^{-6}$$



รูปที่ 3.2.7 แสดงวงจรแมตซ์ชิงระหว่างเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์สเตจที่สองกับอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ
 เอกสารประกอบวิทยุสมัครเล่นฉบับที่ 10 ภาควิทยุสมัครเล่น เมื่อมีผู้ได้เห็นว่าประโยชน์ในการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีสิ่งที่ดีที่ช่วยในเรื่องนี้ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการทำงานของวงจร

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ

1. Signal Generator (Hewlett Packard)
2. Spectrum Analyzer (Anritsu MS6108)
3. Frequency Counter
4. Attenuator ขนาด 30 dBm
5. DC Power Supply ขนาด 12-15 โวลต์ 5 แอมป์



รูปที่ 3.2.8 แสดงการต่อเครื่องมือเพื่อทดสอบการทำงานของวงจร

การปรับแต่งเครื่องมือทดสอบ

Spectrum Analyzer ตั้ง Center Frequency 144.67 MHz

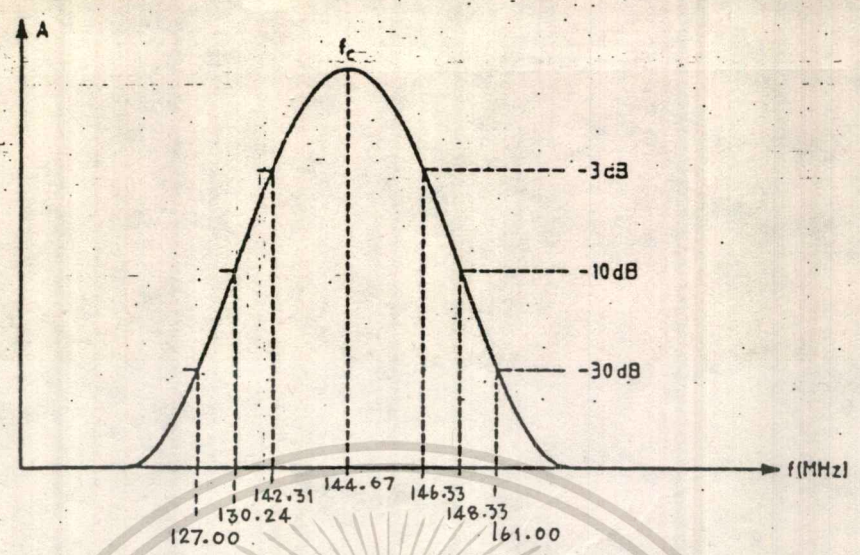
Scale 10 dB/DIV

Signal Generator ตั้งที่ Range +20 dBm 3 V.

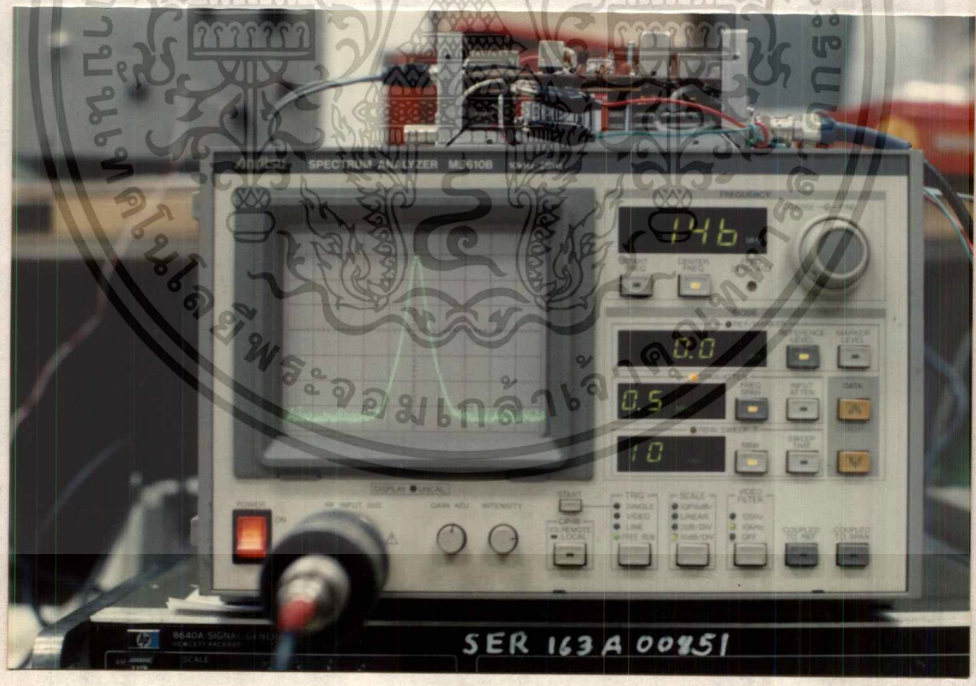
ผลจากการทดสอบ

1. ได้อัตราการขยายเพิ่มขึ้น 8 dB
2. การตอบสนองความถี่ที่ 144-145 MHz ไม่ลดทอน
3. การตอบสนองความถี่ย่านต่าง ๆ เป็นดังนี้
 ความถี่ตั้งแต่ 142.31 MHz ขึ้นไปและ 146.33 MHz ลงมา = -3 dB
 ความถี่ตั้งแต่ 130.24 MHz ขึ้นไปและ 148.23 MHz ลงมา = -10 dB
 ความถี่ตั้งแต่ 127.00 MHz ขึ้นไปและ 161.00 MHz ลงมา = -30 dB
4. ให้กำลังขับที่เอาต์พุตได้ 15 วัตต์ ที่ 50 โอห์ม ขณะส่ง Low ที่อินพุต 1 วัตต์ (ไม่ผ่าน Low Pass Filter)
5. เมื่ออยู่ในสภาวะส่ง (Power Amp. ทำงาน) ใช้กระแสไฟ 1-2 A.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายงานวิจัยและพัฒนาของคณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โทร. 02-214-9434-5

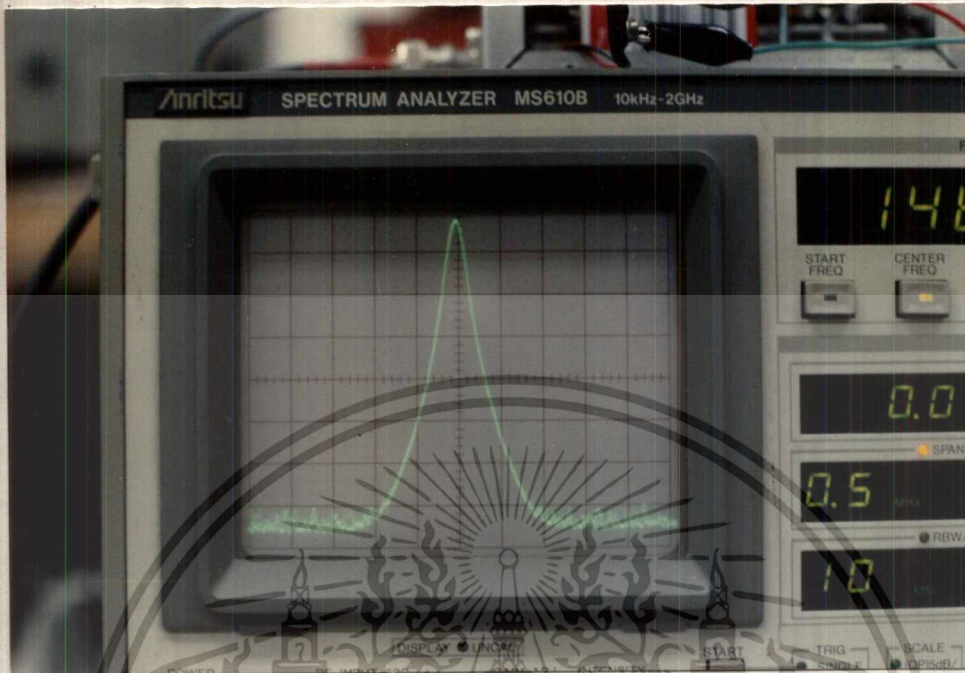


แผนภูมิที่ 3.2.1 แสดงการตอบสนองความถี่ย่านต่าง ๆ ของ RF Power Amplifier ตัวนี้ โดยอ่านจาก Frequency Counter



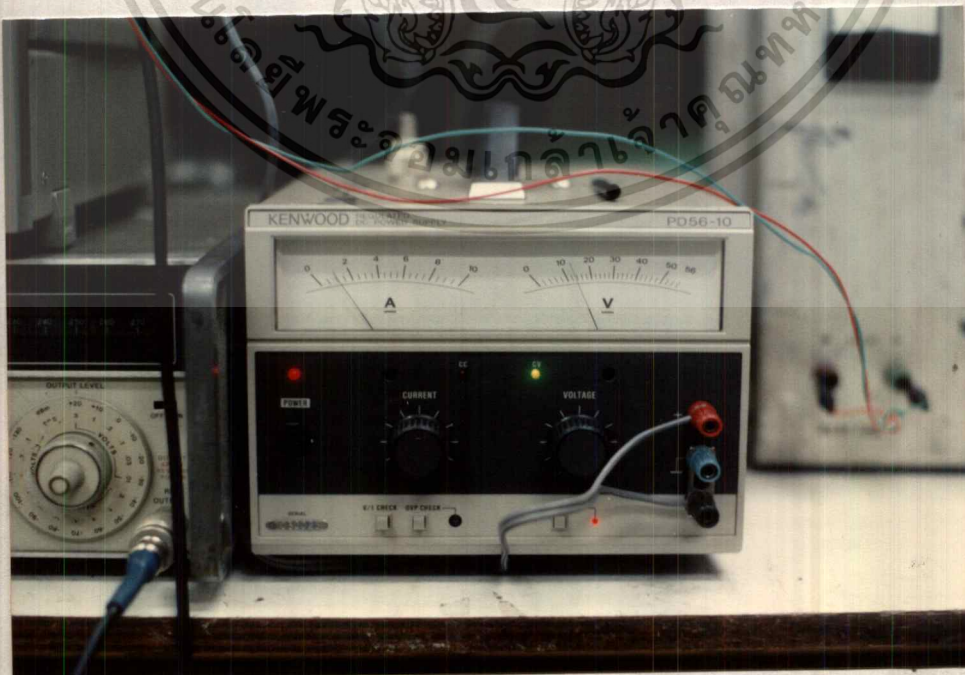
รูปที่ 3.2.9 ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณอินพุตของ RF Power Amplifier ที่ +20 dBm 3 V. ใช้ Attenuator ขนาด 30 dB/DIV

เอกสารจากรูปจะเห็นว่ารูปสัญญาณถูก Attenu. ไป 10 dB เนื่องจากถูกขวางด้วย Attenuator ขนาด 30 dB ก็ทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2.10 ภาพถ่ายขนาดของสัญญาณเอาต์พุตของ RF Power Amplifier

จากรูปแสดงให้เห็นถึงสัญญาณเอาต์พุตของ RFPA ที่ Atten. ไป -2 dB จะได้ขนาดของสัญญาณเพิ่มขึ้น $= 30 - 20 - 2 = 8$ dBm



รูปที่ 3.2.11 ภาพถ่าย Power Supply ขณะที่ใช้กับ RF Power Amplifier ทำเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ทำงานไว้สำหรับเรียนการใช้เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงแก้ไขงาน จะใช้กระแสไฟประมาณ 1.2 A. เอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบคุณสมบัติวิทยุรับ-ส่ง ย่าน VHF

การวัดคุณลักษณะของวิทยุรับ-ส่ง ย่าน VHF ที่จะกล่าวในบทนี้ เป็นการวัดโดยใช้เครื่องวัดและเครื่องทดสอบเฉพาะงาน วัดได้ทั้งชนิดวิทยุมือถือ ติดรถยนต์ และชนิดประจำที่ โดยยึดหลักจากประสบการณ์จริง เพื่อให้สามารถนำไปใช้ปฏิบัติได้ง่าย

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับ-ส่งวิทยุ ที่ตีพิมพ์ไว้ในคู่มือหรือแคตตาล็อกจากผู้ขายนั้น คือสิ่งที่เรามักใช้ในการพิจารณาเลือกซื้อ เพื่อให้เหมาะสมกับงานที่จะนำไปใช้ เช่น ต้องการกำลังส่งสูง ๆ เพื่อส่งสัญญาณไปให้ไกลที่สุด ต้องการเครื่องรับที่มีความไวในการรับสูง เพื่อรับสัญญาณจากที่ไกล ๆ หรือสัญญาณเบา ๆ ได้ หรืออาจต้องการเครื่องส่งที่มีกำลังต่ำ เนื่องจากใช้เฉพาะบริเวณจำกัดเท่านั้น หรืออาจต้องการเครื่องรับที่มีความไวต่ำ เนื่องจากบริเวณนั้นมีเครื่องส่งอยู่หนาแน่น ซึ่งจะทำให้เกิดการรบกวนจากช่องความถี่ข้างอื่น เป็นต้น

เครื่องมือวัดและเครื่องทดสอบที่จำเป็นและเหมาะสม

เครื่องมือวัดทุกชนิด จะมีค่าผิดพลาดของตัวเองเสมอ อาจมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับผู้ผลิตและราคา ชนิดที่มีความผิดพลาดน้อยและคุณภาพดี ราคาจะสูงตามไปด้วย ฉะนั้น การเลือกเครื่องมือที่เหมาะสม เป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดสำหรับงานทดสอบ เครื่องมือที่เหมาะสมสำหรับงานวัดและทดสอบต่าง ๆ ควรมีความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

1. มิเตอร์วัดกำลังส่ง (Power Meter) เครื่องวัดกำลังส่งออกอากาศ ควรใช้ชนิดที่มีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 5\%$ สามารถเลือกระดับกำลังส่งได้ยิ่งมากยิ่งดี และเป็นชนิดที่ไม่ไวต่อสัญญาณรบกวนจากภายนอก ทดสอบได้โดยใช้วิทยุรับ-ส่งชนิดมือถือ และใช้เสาอากาศยาง เข้าไปทำการส่ง (กดคีย์) โดยให้เสาอากาศยางแนบตามจุดต่าง ๆ โดยเฉพาะบริเวณหน้าปัทม์มิเตอร์ ถ้าหากว่าตัวเข็มของมิเตอร์มีการเคลื่อนที่ ไปจากตำแหน่งเดิม แสดงว่ามีเตอร์ตัวนี้ใช้การไม่ได้ ไม่ควรนำมาวัด

2. เครื่องวัดความถี่ (Frequency Meter) เครื่องวัดความถี่ของสัญญาณต่าง ควรเลือกชนิดที่มีความไวอินพุตสูง และสามารถทนแรงดันได้สูง ความผิดพลาดต้องต่ำกว่าของวิทยุรับ-ส่ง ไม่น้อยกว่า 5 เท่า เช่น วิทยุรับ-ส่งที่มีเสถียรภาพทางความถี่ $\pm 0.0005\%$ ต้องเลือกเครื่องวัดความถี่ ชนิดที่มีความเที่ยงตรง $\pm 0.001\%$ หรือชนิดเครื่องวัดที่มีเสถียรภาพทางความถี่ได้ไม่เกิน $\pm 1 \text{ ppm}$ (part per million) หรือต่ำกว่า

3. เครื่องวัดระดับของสัญญาณ (Spectrum Analyzer) เครื่องวัดระดับของสัญญาณที่ความถี่ต่าง ๆ จากเครื่องส่ง โดยทั่วไปแล้วเครื่องมือนี้ สามารถวัดคุณลักษณะได้หลายอย่าง คือ

- 1. ความถี่ของสัญญาณจากเครื่องส่งหรือเครื่องผลิตสัญญาณต่าง ๆ
- 2. กำลังส่งออกจากเครื่องรับ-ส่ง หรือจากเครื่องผลิตสัญญาณ
- 3. ความเบี่ยงเบนของความถี่
- 4. ความเข้มของสัญญาณจากสายอากาศ (Field Strength)
- 5. ฮาร์มอนิกและสปีวรีอัสต่าง ๆ (สัญญาณที่ไม่ต้องการจากเครื่องส่ง)

ภาพที่จอของสเปกตรัมอะนาไลเซอร์ แนวตั้งเป็นระดับของสัญญาณ แนวนอนเป็นแกนความถี่ ซึ่งเป็นการแสดงรายละเอียดในโดเมนความถี่ (Frequency Domen) แตกต่างจากออสซิลโลสโคป ซึ่งแนวตั้งเป็นระดับของสัญญาณ แนวนอนเป็นแกนของเวลา (Time Domen)

4. เครื่องวัดความเบี่ยงเบนของความถี่ (Deviation Meter) เครื่องวัดความเบี่ยงเบนของความถี่ ซึ่งมีการทำงานแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

- 1. แบบจูนด้วยมือ (Manual Tune) จะต้องปรับจูนความถี่ให้ต่างกับเครื่องส่งก่อนทำการวัด มีทั้งชนิดบอกค่าด้วยเข็ม และชนิดบอกค่าจากจอ
- 2. แบบจูนอัตโนมัติ (Automatic Tune) ไม่ต้องปรับจูน สามารถรับสัญญาณแล้วอ่านค่าของความเบี่ยงเบนได้เลย โดยเครื่องชนิดนี้ จะทำหน้าที่จูนหาความถี่ด้วยตัวมันเอง

5. เครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ (Signal Generator) เครื่องผลิตสัญญาณความถี่สูงตั้งแต่ 1 MHz - 500 MHz มีการผสมคลื่นแบบ FM ภายในตัวด้วยความถี่ของสัญญาณเสียง 1000 Hz หรือ 400 Hz รวมอยู่ด้วย มีเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม และมีค่า VSWR ไม่เกิน 1,2 มีความเที่ยงตรงทางแรงดันไม่เกิน 2 dB มีค่าของ Signal Sideband 1 Hz Bandwidth Phase Noise ต่ำกว่า -135 dB เมื่อเทียบกับสัญญาณคลื่นพาห์ ที่ความถี่คลื่นพาห์ต่างออกไป 25 kz มีค่าเสถียรภาพทางความถี่ไม่เกิน 1 ppm. มีค่าผิดพลาดทางความเบี่ยงเบนไม่เกิน 5 %

6. เครื่องมือต่อพ่วงสัญญาณ (Signal Combiner) เครื่องมือต่อพ่วงสัญญาณจากแหล่งผลิตสัญญาณ ตั้งแต่ 2 แหล่ง และ 3 แหล่ง มีค่า Isolation ระหว่างสองทางเข้าไม่ต่ำกว่า 30 dB เครื่องมือต่อพ่วงสัญญาณนี้มีอยู่หลายชนิดซึ่งจะนำมาใช้ได้ เช่น ตัว

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งสัญญาณ (Power Dividers) Directional Coupler ทั้งหมดนี้จะต้องมีเอาต์พุต และอินพุตอิมพีแดนซ์ เท่ากับ 50 โอห์ม

7. เครื่องมือวัดระดับสัญญาณเสียง และวัดความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง (Audio Voltmeter/Distortion Analyzer) ส่วนมากจะเป็นเครื่องวัดที่ใช้งานสองหน้าที่ใน เครื่องเดียวกัน มีค่าความไว 1 V (FSD) หรือต่ำกว่า มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ ไม่ต่ำกว่า 50 กิโลโอห์ม มีความผิดพลาดไม่เกิน 1 dB และมีค่าความผิดพลาดในการวัดแรงดัน ไม่เกิน 3 %

8. โหลดมาตรฐาน (Standard Audio Output Load) อาจเป็นลำโพงที่ใช้ งานจริง หรือความต้านทานที่มีค่าเท่าลำโพงใช้งานจริง ซึ่งจะต้องทนกำลังของสัญญาณ เสียงได้หรือสูงกว่า เช่น ถ้าต้องการวัดเครื่องรับที่มีกำลังขยายทางสัญญาณเสียง 5 วัตต์ จะต้องใช้ตัวต้านทานที่สามารถรับกำลังได้ไม่ต่ำกว่า 5 วัตต์ เป็นอย่างน้อย

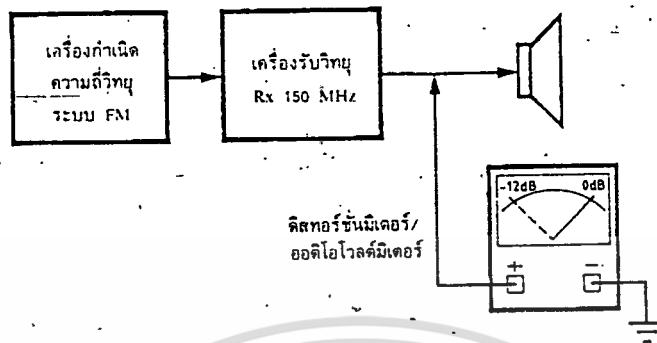
9. ดัมมี่โหลด (Standard RF Load, Dummy Load) เป็นตัวต้านทาน ใช้ทำหน้าที่ แทนเสาอากาศที่ลบบรรณแบบ (Perfect Matched Antenna) ต้องเป็นชนิดมีการป้องกันการ รบกวนของคลื่นได้ดี มีความต้านทานเท่ากับเอาต์พุตของเครื่องส่ง คือ 50 โอห์ม มีค่า VSWR ไม่เกิน 1.1 และสามารถทนกำลังส่งของเครื่องส่งได้ เช่น เครื่องส่งขนาด 45 วัตต์ จะต้องใช้ดัมมี่โหลดขนาด 50 วัตต์ เป็นอย่างน้อย เป็นต้น

10. ตัวตัดสัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการ (Band-Rejection Filter) เป็นตัวตัด สัญญาณความถี่ที่ไม่ต้องการออกจากเครื่องส่ง โดยปรับค่าความถี่ที่ต้องการตัด ซึ่งปรับได้ตั้ง แต่ 100 MHz ถึง 500 MHz โดยปกติแล้ว จะแยกออกเป็นแต่ละย่าน ๆ ไป เช่น จาก 125 MHz ถึง 250 MHz และจาก 250 MHz ถึง 500 MHz ถ้าหากไม่มีแบนด์รีเจ็กชันฟิล เตอร์ จะใช้แบนด์พาสฟิลเตอร์แทนก็ได้ มีผลเช่นเดียวกัน แต่ทั้งสองชนิดนี้จะต้องทนต่อกำ ลังส่งของเครื่องส่งได้ มีค่าความชันของความถี่ (Form Factor) 30 dB/3 dB ไม่น้อย กว่า 2.2

11. สายและขั้วต่อต่าง ๆ สายส่งสัญญาณ (Coaxial Cable) ที่ใช้ในการต่อ เชื่อมสัญญาณ ระหว่างจุดต่าง ๆ ควรใช้ชนิดคุณภาพสูง และให้สั้นที่สุด โดยทั่วไปไม่ควรเกิน 0.5 เมตร ขั้วต่อเป็นชนิดที่เชื่อถือได้ มีค่า VSWR ไม่เกิน 1.3

การวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของภาครับ

1. การวัดความไวที่ 12 dB SINAD (12 dB SINAD Sensitivity) รูปที่ 4.1 เป็นการต่อเครื่องมือที่จะทำการวัด ซึ่งในที่นี้ ความถี่ของคลื่นพาห้เป็นความถี่สมมติขึ้น เพื่อ สะดวกแก่การเข้าใจ ไม่ใช่ความถี่ที่ถูกกำหนดตายตัว ความถี่ที่จะทดสอบจริงนั้น ขึ้นอยู่กับ เครื่องรับ-ส่ง แต่ละเครื่อง ที่นำมาวัดทดสอบ ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 การต่อเครื่องมือสำหรับการวัดความไวที่ 12 dB SINAD

ขั้นตอนในการวัดเป็นดังนี้ คือ

1. ปรับความแรงเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดความถี่ ให้ได้ 1 mV_{rms} มอดูเลตกับความถี่เสียง 1 kHz ในระบบ FM ที่มีค่าความเบี่ยงเบน 3 kHz
2. ปรับปุ่มโวลุ่มของเครื่องรับให้ได้ความดังตามค่าสูงสุด ที่เครื่องกำหนดไว้ โดยอ่านจากออกติโอโวลต์มิเตอร์
3. ลดความแรงของเครื่องกำเนิดความถี่ลงไว้ให้เหลือประมาณ 0.3 μ V นอกนั้นอยู่ตำแหน่งเดิม และปรับออกติโอโวลต์มิเตอร์ให้อ่านได้ 0 dB ในตำแหน่งของ Set Level จากนั้นเปลี่ยนมาในตำแหน่งดิสทอร์ชัน ปรับบาลานซ์ต่าง ๆ จนกระทั่งอ่านค่าได้ต่ำสุดถ้ามิเตอร์ลดลงมากกว่า -12 dB แล้วเปลี่ยนปรับมาตำแหน่ง Set Level อีกครั้ง ถ้าไม่อยู่ที่ 0 dB ให้ปรับมิเตอร์ใหม่ จนได้ 0 dB แล้วกลับไปตำแหน่งดิสทอร์ชันอีก ปรับระดับเอาต์พุตเครื่องกำเนิดความถี่อีก ทำเช่นนี้กลับไปกลับมา 2-3 ครั้ง จนกระทั่งได้ค่าระดับแรงดันเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิด ที่ทำให้มิเตอร์อ่านผลแตกต่างได้ -12 dB SINAD

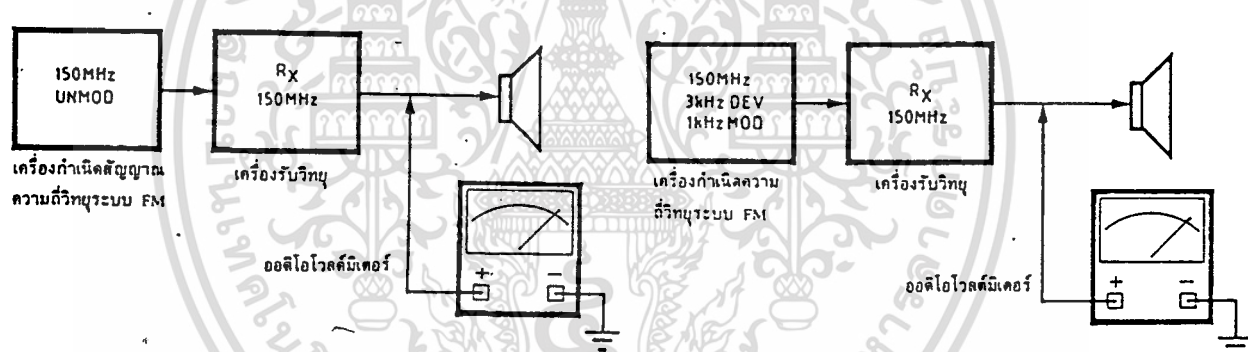
ในปัจจุบัน มีผู้ผลิตออกติโอโวลต์มิเตอร์/ดิสทอร์ชันมิเตอร์ สำหรับงานนี้โดยเฉพาะ ซึ่งสะดวกมากเพียงแต่ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดความถี่ จนกระทั่งอ่านจากมิเตอร์ได้ -12 dB โดยไม่ต้องกลับไปกลับมา

การปรับโวลุ่มในข้อ 2 มักจะพบปัญหาบ่อยครั้งในภาคปฏิบัติ เพราะอาจเกิดความผิดเพี้ยน จากภาคขยายสัญญาณเสียงเอง เนื่องจากการออกแบบที่ไม่ดีพอ ฉะนั้น อาจหลีกเลี่ยงได้ โดยการลดความดังลงมาที่ 2/3 ของกำลังขยายเสียงสูงสุด ตามที่บ่งไว้ในคุณสมบัติเฉพาะของเครื่องรับ-ส่งวิทยุที่จะทำการทดสอบ

2. การวัดความไวที่ 20 dB Quieting (20 dB Quieting Sensitivity)

การวัดความไวแบบนี้ นิยมใช้สำหรับการปรับแต่งความไว ของภาครับวิทยุหลังผ่านการซ่อม เพื่อให้มีความไวสูงสุด รูปที่ 4.2 เป็นรูปแสดงการต่อเครื่องมือ ขั้นตอนในการวัดมี ดังนี้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุให้ได้ $1\text{ mV}_{\text{r.m.s}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1kHz ที่ค่าความเบี่ยงเบน 3kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับวิทยุไว้ที่ตำแหน่ง 25 เปอร์เซ็นต์ ของความดังสูงสุด ตามที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยการวัดด้วยออดิโอโวลต์มิเตอร์
3. ปลดสัญญาณของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ออกจากเครื่องรับวิทยุ แล้วปรับโวลุ่ม ให้ออดิโอโวลต์มิเตอร์ อ่านค่าได้ที่จุด 0 dB
4. ต่อสัญญาณจากเอาต์พุตเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ซึ่งตั้งไว้ในตำแหน่ง CW (Continuous Wave) เข้ากับเครื่องรับวิทยุ แล้วปรับแรงดันเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ จนกระทั่งออดิโอโวลต์มิเตอร์อ่านได้ -20 dB



รูปที่ 4.2 การต่อเครื่องมือสำหรับการวัดความไวที่ 20 dB Quieting การวัดค่าความไวสูงสุดของวงจรสquelch การวัดค่าความไวต่ำสุดของวงจรสquelch

3. การวัดค่าความไวสูงสุดของวงจรสquelch (Threshold Squelch Sensitivity)

ต่อเครื่องมือดังรูปที่ 4.2 ปรับความถี่ให้ตรงกับเครื่องรับ แล้วทำการวัดตามขั้นตอน ดังนี้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดความถี่ไว้ที่ $1\text{ mV}_{\text{r.m.s}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1kHz ที่ความเบี่ยงเบน 3kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับวิทยุไว้ที่ ความดังสูงสุด ตามที่เครื่องกำหนดไว้ โดยการวัดด้วยออดิโอโวลต์มิเตอร์
3. ปลดสัญญาณของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของสำนักงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่แบบสงวนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ปรับสควเอลซ์ของเครื่องรับวิทยุ จนกระทั่งสัญญาณเสียงเงียบหรือสัญญาณที่อ่านจากออดิโอโวลต์มิเตอร์ ลดลงมากกว่า 40 dB

5. ต่อสัญญาณจากเอาต์พุตเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ มายังเครื่องรับวิทยุตามเดิม แล้วค่อย ๆ เพิ่มแรงดันเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ จากต่ำสุดจนถึงแรงดันที่ทำให้เครื่องรับวิทยุรับสัญญาณเสียงได้ตลอดไม่ขาดหาย และค่าที่อ่านได้จากออดิโอโวลต์มิเตอร์ จะต้องไม่ต่ำกว่า 10 dB ที่จุดความดังสูงสุด

ค่าแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ ในขณะนั้น คือค่าของความไวสูงสุดของวงจรสควเอลซ์

4. การวัดค่าความไวต่ำสุดของวงจรสควเอลซ์ (Tight Squelch Sensitivity) ต่อเครื่องมือดังรูปที่ 4.2 ปรับความถี่ให้ตรงกับเครื่องรับ แล้วทำการวัดตามขั้นตอน ดังนี้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุไว้ที่ 1 mV_{rms} ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz มีความเบี่ยงเบน 3 kHz

2. ปรับไวลุ่มของเครื่องรับวิทยุ ไว้ที่ความดังสูงสุด ตามที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยการวัดด้วยออดิโอโวลต์มิเตอร์

3. ปลดสัญญาณของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุ ออกจากเครื่องรับวิทยุ

4. ปรับสควเอลซ์ของเครื่องรับวิทยุในทิศทางตามเข็มนาฬิกาจนสุด ซึ่งสัญญาณเสียงจะเงียบสนิท

5. ลดแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณวิทยุ ไปที่จุดต่ำสุด แล้วต่อสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณวิทยุ เข้ากับเครื่องรับวิทยุ

6. ค่อย ๆ เพิ่มแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ จนกระทั่งถึงจุดที่ทำให้เครื่องรับวิทยุ รับสัญญาณเสียงได้ตลอดไม่ขาดหาย ขณะเดียวกันค่าที่อ่านได้จากออดิโอโวลต์มิเตอร์ จะต้องไม่ต่ำกว่า 10 dB จากจุดความดังสูงสุด

5. การวัดการกำจัดสัญญาณแปลกปลอม (Spurious Rejection) คือการวัดความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน ที่ความถี่ต่าง ๆ ยกเว้นความถี่ $F_c + 2$ (IF) รูปที่ 4.3 เป็นการต่อเครื่องมือที่จะทำการวัด

ขั้นตอนการวัดเป็นดังนี้

1. ต่อเครื่องมือทดสอบตามรูป ยกเว้นยังไม่ต้องต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณวิทยุชุดที่ 2

2. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 1 จนกระทั่ง SINAD

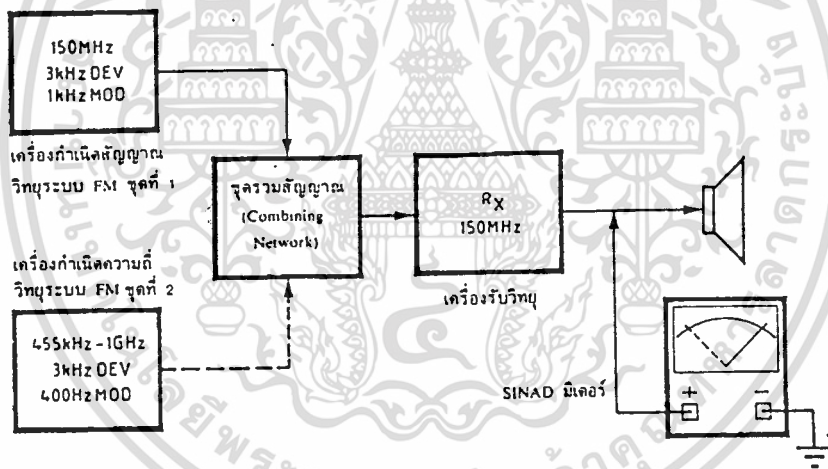
มิเตอร์อ่านได้ 12 dB (ดูการวัดความไวที่ 12 dB SINAD) สมมติค่าแรงดันมีค่าเท่ากับ -115 dB

3. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 1 อีก 3 dB คือ $(-115 \text{ dB}) + (3 \text{ dB}) = -112 \text{ dB}$

4. ต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 2 เข้ากับชุดรวมสัญญาณ แล้วปรับแรงดันเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 2 ให้สูงสุด

5. เปลี่ยนความถี่เอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 2 เริ่มจากต่ำสุด ไปจนกระทั่งความถี่สูงสุด เพื่อหาจุดที่สัญญาณรบกวนมากที่สุด โดยสังเกตจาก SINAD มิเตอร์ เมื่อพบแล้วให้ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 2 จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD อีกครั้งหนึ่ง โดยสังเกตจาก SINAD มิเตอร์

ค่าแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณชุดที่ 2 ขณะนี้สมมติว่าอ่านได้ -50 dB ดังนั้น ค่า Spurious Rejection จะมีค่าเท่ากับ $(-50 \text{ dB}) - (-115 \text{ dB}) = 65 \text{ dB}$



รูปที่ 4.3 การวัดการกำจัดสัญญาณแปลกปลอม

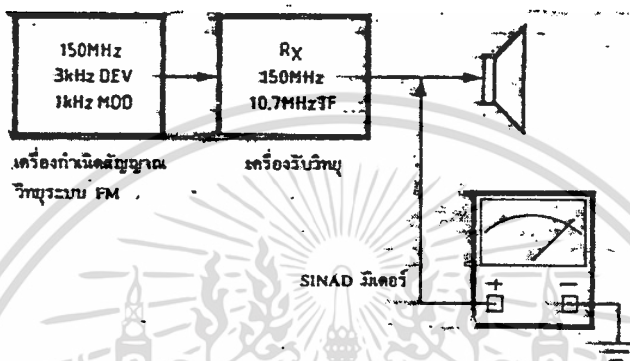
6. การวัดการกำจัดความถี่เงา (Image Rejection) ความถี่เงา (Image Frequency) คือความถี่คลื่นพาร์ (F_c) ที่ถูกบวกเข้าหรือลบออกด้วย 2 เท่าของความถี่ IF เช่น ถ้าเครื่องรับมีความถี่ IF 10.7 MHz ความถี่เครื่องรับ 150.00 MHz ความถี่เงาจะมีค่า $= 150 \pm 2 (10.7) = 171.40 , 128.60 \text{ MHz}$

ในเครื่องรับวิทยุโดยทั่วไป มี IF สองความถี่ คือ มีการแปลงความถี่คลื่นพาร์สองครั้ง เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการกำจัดสัญญาณรบกวน โดยจะลดแบนด์วิดธ์ของภาครับส่งภาคแรก เรียกว่า First IF ความถี่ที่นิยมใช้คือ 10.7 MHz และ 21.4 MHz ถัดมาเรียก Second IF ความถี่ที่นิยมใช้กันก็คือ 455 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ส่วนตัวในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่เงาที่มีผลต่อสัญญาณรบกวน คือความถี่ที่เป็นผลจาก IF ภาคแรก เนื่องจากความถี่นี้เกิดจากการผสมคลื่นระหว่างคลื่นพาห์ กับคลื่นจากภาคออสซิลเลเตอร์ ฉะนั้นการคำนวณความถี่เงา จึงคำนวณได้จากความถี่คลื่นพาห์ และความถี่ของ IF ภาคแรก

รูปที่ 4.4 เป็นการต่อเครื่องมือที่จะทำการวัด การกำจัดความถี่เงา โดยมีขั้นตอนการวัด ดังนี้



รูปที่ 4.4 การวัดการกำจัดความถี่เงา

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ไว้ที่ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ความเบี่ยงเบน 3 kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับวิทยุ ไว้ที่ความดังสูงสุด ตามที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยการวัดด้วย SINAD มิเตอร์
3. ลดแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ จนถึงค่าแรงดันที่ทำให้อ่านค่าจาก SINAD มิเตอร์ได้ 12 dB SINAD สมมติที่จุดนี้มีค่าแรงดันเท่ากับ -115 dB
4. เปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดความถี่วิทยุให้เพิ่มขึ้นจากเดิมอีก 2 เท่าของความถี่ IF ตัวอย่างเช่น $150.00 \text{ MHz} + 2(10.7) \text{ MHz} = 171.40 \text{ MHz}$
5. เพิ่มแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดความถี่ จนกระทั่งอ่านค่าจาก SINAD มิเตอร์ได้ 12 dB SINAD แรงดันเท่ากับ -50 dB
6. ค่าของ Image Rejection จากการวัดครั้งนี้มีค่าเท่ากับ

$$(-50 \text{ dB}) - (-115 \text{ dB}) = 65 \text{ dB}$$
7. เปลี่ยนความถี่จากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ให้ลดลงจากครั้งแรก 2 เท่าของความถี่ IF ตัวอย่างเช่น $150.00 \text{ MHz} - 2(10.7) \text{ MHz} = 128.60 \text{ MHz}$
8. เพิ่มแรงดันเอาต์พุต จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ จนอ่านค่าจาก SINAD มิเตอร์ได้ 12 dB SINAD มีค่าแรงดันเท่ากับ -50 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

9. ค่าของ Image Rejection จากการวัดครั้งนี้มีค่าเท่ากับ

$$(-55 \text{ dB}) - (-115 \text{ dB}) = 60 \text{ dB}$$

ค่า Image Rejection ที่วัดได้ทั้งสองค่า ให้ถือค่าน้อยเป็นหลัก คือ 60 dB

7. การวัดกำลังขยายสัญญาณเสียง และความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงภาครับ (Audio Power Output and Distortion)

ต่อเครื่องมือที่จะทำการวัดตามรูปที่ 4.5 ตั้งความถี่ให้ตรงกับที่ใช้ ขั้นตอนการวัดเป็น ดังนี้

1. ต่อโหลดที่มีความต้านทานตามข้อกำหนดของเครื่องรับวิทยุ แทนที่ลำโพงในตัวเครื่องรับวิทยุ

2. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ไว้ที่ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ความเบี่ยงเบน 3 kHz

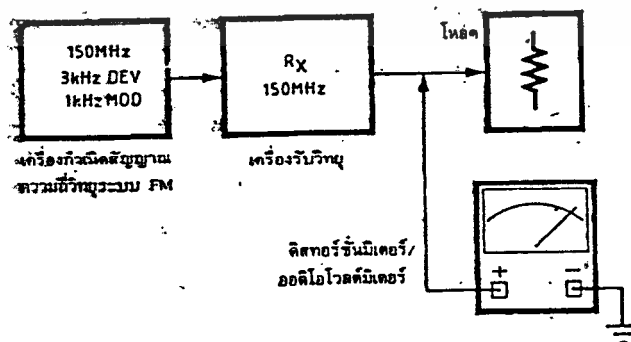
3. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับวิทยุ จนกระทั่งได้ความดังสูงสุด ตามข้อกำหนดของเครื่องรับวิทยุ โดยอ่านด้วยคิสทอร์ชันมิเตอร์/ออดิโอโวลต์มิเตอร์ เช่น เครื่องรับวิทยุมีกำลังขยายภาคสัญญาณเสียง 5 วัตต์ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่า 8 โอห์ม

$$\begin{aligned} \text{จาก } V &= \sqrt{PR} \\ \text{จะได้ } V &= \sqrt{5 \times 8} \\ &= 6.32 \text{ V} \end{aligned}$$

โดย $V =$ กำลังขยาย $R =$ เอาต์พุตอิมพีแดนซ์

นั่นคือค่าที่อ่านจากคิสทอร์ชันมิเตอร์/ออดิโอโวลต์มิเตอร์ จะต้องได้ไม่ต่ำกว่า 6.32 V

4. ที่จุดความดังสูงสุด (6.32 V) จะต้องวัดค่าความเพี้ยนจากคิสทอร์ชันมิเตอร์/ออดิโอโวลต์มิเตอร์ ได้ไม่เกินข้อกำหนดของเครื่องรับวิทยุ นั้น ๆ



รูปที่ 4.5 การวัดกำลังขยายสัญญาณเสียง และความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงภาครับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปยังเว็บไซต์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังขอสงวนสิทธิ์ในเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. การวัดการตอบสนองความถี่สัญญาณเสียง (Audio Response)

การส่งสัญญาณเสียงโดยอาศัยคลื่นพาห์ในระบบ FM บางครั้งจะมีสัญญาณรบกวนเกิดขึ้น โดยเฉพาะสัญญาณเสียงช่วงความถี่สูง ดังนั้น จึงต้องมีวงจรขยายทำหน้าที่ยกระดับสัญญาณในช่วงนี้ ให้สูงขึ้นเพื่อชดเชยกับสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น เรียกว่าวงจรปริเอมฟาซิส (Pre-emphasis)

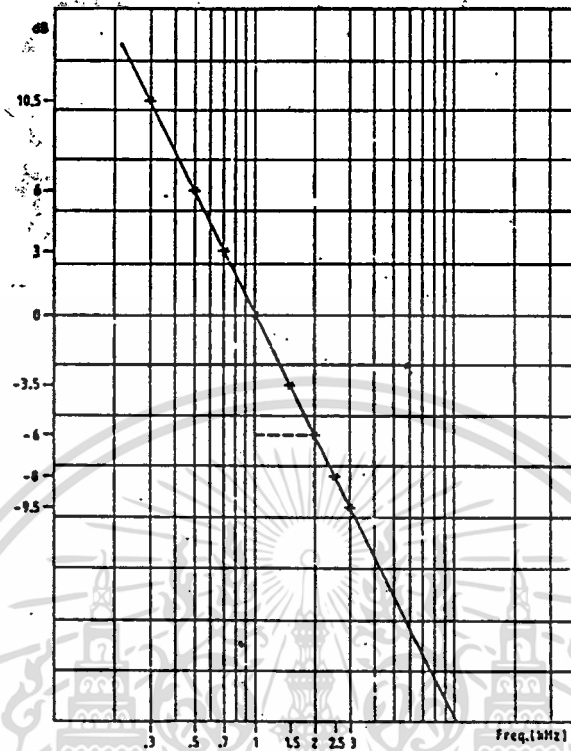
ในขณะเดียวกัน เครื่องรับก็ต้องมีวงจรชดเชยความถี่ ในทางกลับกัน คือ ยกระดับสัญญาณในช่วงความถี่ต่ำขึ้น และลดระดับสัญญาณในช่วงความถี่สูงลง เพื่อให้ระดับสัญญาณเสียงที่รับได้นั้นกลับสู่สภาพเดิม เรียกว่าวงจรดีเอมฟาซิส (De-emphasis)

การทดสอบผลตอบสนองของเครื่องรับในช่วงความถี่เสียง จึงเป็นการวัดเปรียบเทียบกับข้อกำหนดทางทฤษฎี คือวงจรดีเอมฟาซิส ในทางทฤษฎีนั้นมีความชัน 6 dB/octave (20 dB decade)

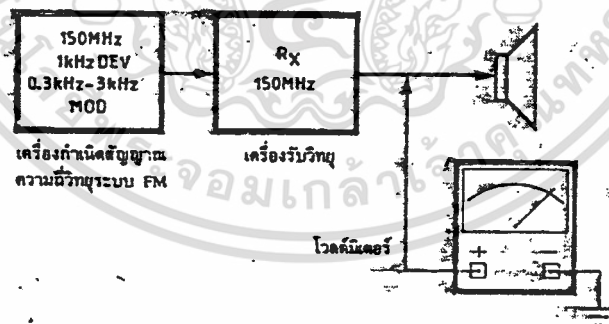
ความหมายของความชัน 6 dB/octave คือระดับแรงดันของสัญญาณจะลดลงมา 1/2 เท่า ทุก ๆ ครั้งที่ความถี่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ตัวอย่างเช่น ที่ความถี่ 300 Hz วัดระดับของสัญญาณเสียงได้ 1 V ดังนั้น ที่ความถี่ 600 Hz ระดับของสัญญาณ จะต้องเป็น 0.5 V และมีความถี่ 1200 Hz ระดับของสัญญาณจะต้องเป็น 0.25 V แต่ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าต่าง ๆ ที่วัดได้จะต่างจากค่าทางทฤษฎีบ้างเล็กน้อย ดังนั้น ความหมายและตัวเลขที่แสดงไว้ในคู่มือของเครื่องรับวิทยุ ในส่วนที่เกี่ยวกับการตอบสนองความถี่เสียง จึงใช้แสดงความเบี่ยงเบนจากค่ากำหนด หรือค่าผิดพลาดของระดับสัญญาณเสียง เมื่อเทียบกับตารางที่ 4.1 ของ 6 dB/octave

ความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากในตาราง 4.1 ดูจากกราฟดีเอมฟาซิส 6 dB/octave มาตรฐานที่แสดงไว้ในแผนภูมิที่ 4.1

1 ความถี่ (kHz)	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	2.5	3
2 6 dB/octave (dB)	-10.5	-6	-3	0	3.5	6	8	9.5
3 ค่าที่วัดได้	-9.5	-4.8	-2	1.2	4.9	7	9.4	7.7
4 ทำให้เป็น 0 dB ที่ 1 kHz	-10.7	-5	-3.2	0	3.7	5.8	8.2	6.5
5 ความเบี่ยงเบน (dB)	0.2	1.0	-0.2	0	0.2	0.2	0.2	-3.0



แผนภูมิที่ 4.1 แสดงการตอบสนองความถี่ 6 dB/octave De-emphasis



รูปที่ 4.6 การวัดการตอบสนองความถี่สัญญาณเสียง

ขั้นตอนในการวัดมี ดังนี้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณไว้ที่ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ความเบี่ยงเบน 3 kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับวิทยุเท่าไว้ที่ระดับความดังใช้ปร 50 หนึ่งเปอร์เซ็นต์ของความดังสูงสุดตามที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยวัดด้วยโวลต์มิเตอร์

3. ปรับความเบี่ยงเบน จากเครื่องกำเนิดสัญญาณความถี่วิทยุ ให้ลดลงเหลือ 20 เปอร์เซ็นต์ ของ 5 kHz คือที่ 1 kHz แทน

4. วัดระดับของสัญญาณเสียง 1 kHz ด้วยโวลต์มิเตอร์ แล้วบันทึกไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งวัดได้ 1.2 dB

5. เปลี่ยนความถี่ของสัญญาณที่นำมามอดูเลต จาก 1 kHz เป็น 0.7 kHz (ตามตารางที่ 4.1) วัดระดับสัญญาณด้วยโวลต์มิเตอร์ ได้ -2 dB ทำนองเดียวกัน วัดระดับของสัญญาณมอดูเลต ที่ความถี่อื่น ๆ แล้วบันทึกลงในตารางดังกล่าว

6. ทำให้เป็น 0 dB ที่ 1 kHz โดยนำค่าที่วัดได้ที่จุด 1 kHz คือ 1.3 dB ไปลบกับค่าที่วัดได้ทุกความถี่ ก็จะได้ค่าตามตารางในบรรทัดที่ 4

7. ค่าความเบี่ยงเบนในบรรทัดที่ 5 คำนวณได้โดยนำค่าในบรรทัดที่ 4 มาลบด้วยค่าในบรรทัดที่ 2 จะเห็นว่ามีความเบี่ยงเบนสูงสุด + 1 และ -3 dB เมื่อเทียบกับกราฟของ 6 dB/octave

9. การวัดมอดูเลชัน แอคเซปแตนซ์ (Modulation Acceptance) มอดูเลชันแอคเซปแตนซ์ เป็นค่าที่บอกให้ทราบถึงความสามารถของเครื่องรับว่าจะสามารถรับสัญญาณ ที่มีความเบี่ยงเบนสูง ๆ ได้ดีมาน้อยเพียงไร

ปัจจุบันการทดสอบวิธีนี้ ไม่นิยมทำกัน เนื่องจากตัวเลขที่ได้มาจากการทดสอบ ไม่ได้ชี้ให้เห็นถึงความสามารถของภาครับมากนัก วิธีที่ได้ผลดีมากกว่า เรียกว่า Usable Bandwidth คือค่าของช่วงกว้างความถี่คลื่นพาห์ ที่ผิดไปจากความถี่กลาง โดยถือจุดที่ระดับสัญญาณคลื่นพาห์เพิ่มขึ้น 3 dB (สองเท่าของสัญญาณเดิมเมื่อวัดเป็นแรงดันไฟฟ้า) เทียบจากจุดที่วัด 12 dB SINAD

อีกวิธีหนึ่งคือ ความถี่คลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ (Acceptable Radio Frequency Displacement)

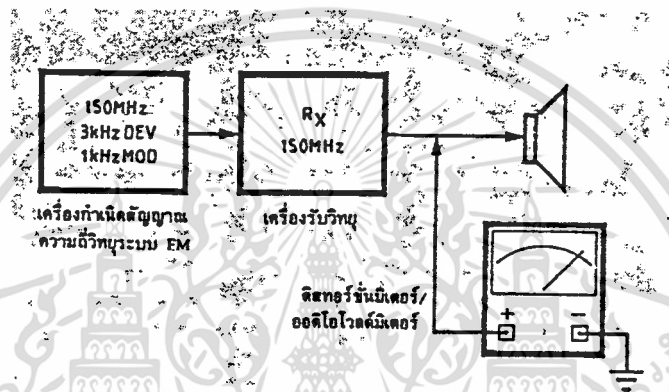
ในบทนี้ จึงขอแสดงวิธีการวัด 2 วิธีหลัง คือ Usable Bandwidth และความถี่คลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้

Usable Bandwidth รูปที่ 4.7 การต่อเครื่องมือที่จะทำการวัดและขั้นตอนในการวัดเป็น ดังนี้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ให้ได้ 1 mV_{rms} ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วย 1 kHz ที่ค่าความเบี่ยงเบน 3 kHz

2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับให้ได้ความดัง 10 เปอร์เซ็นต์ของความดังสูงสุด โดยอ่านด้วยดิสทอร์ชันมิเตอร์/ออดิโอโวลต์มิเตอร์

3. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยเริ่มจากค่าต่ำสุด จนกระทั่งอ่านค่าได้ 12 dB SINAD สมมติได้ค่า 149.997 MHz
4. จากนั้นเพิ่มแรงดันเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ขึ้นเป็น 2 เท่า คือ บวกอีก 6 dB
5. ปรับความถี่คลื่นพาห์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณมาทางลบ จนกระทั่งอ่านค่าได้ 12 dB SINAD อีกครั้งหนึ่ง สมมติได้ที่ความถี่ 150.004 MHz
ค่าของ Usable Bandwidth คือ ผลต่างของความถี่ทั้ง 2 ค่าที่ได้
 $150.004 - 149.997 = 0.007 = 7 \text{ kHz}$



รูปที่ 4.7 การวัด Usable Bandwidth และ Acceptable Radio Frequency Displacement

ค่าคลาดเคลื่อนความถี่ที่ยอมรับได้ รูปที่ 4.7 เป็นการต่อเครื่องมือที่จะทำการวัด โดยมีขั้นตอนการวัด ดังนี้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ให้ได้ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ค่าความเบี่ยงเบน 3 kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับให้ได้ความดัง 10 เปอร์เซ็นต์ของความดังสูงสุดที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยอ่านด้วยดิสทอร์ชันมิเตอร์/ออสซิลโลสโคป
3. ปรับแรงดันเอาต์พุต จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ โดยเริ่มจากค่าต่ำสุด จนกระทั่งอ่านค่าจากมิเตอร์ได้ 12 dB SINAD
4. จากนั้นเพิ่มแรงดันเอาต์พุต จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ ขึ้นเป็น 2 เท่า คือ บวกอีก 6 dB
5. ปรับความถี่คลื่นพาห์ จากเครื่องกำเนิดสัญญาณมาทางลบ จนกระทั่งได้ค่าจากมิเตอร์ -12 dB SINAD อีกครั้ง สมมติอ่านได้ค่าความถี่ 149.997 MHz
6. ปรับความถี่คลื่นพาห์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณไปทางบวก จนกระทั่งอ่านค่าจากมิเตอร์ได้ 12 dB SINAD อีกครั้งหนึ่ง สมมติอ่านได้ค่าความถี่ 150.004 MHz

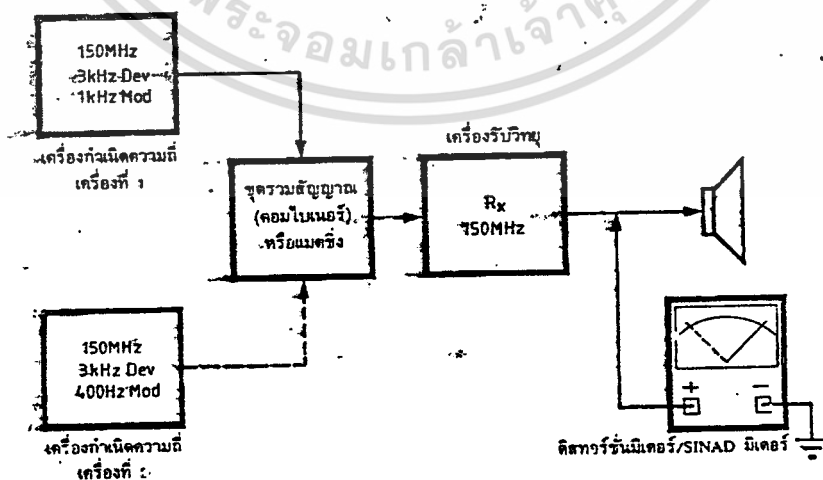
7. ผลต่างของความถี่ที่ได้ครั้งแรกกับความถี่กลาง 150.000 MHz คือ
 $150.000 - 149.997 = 0.003 = 3 \text{ kHz}$

8. ผลต่างของความถี่ที่ได้ครั้งหลังกับความถี่กลาง 150.000 MHz คือ
 $150.004 - 150.000 = 0.004 = 4 \text{ kHz}$

จากผลที่ได้ จะยึดค่าน้อยเป็นหลัก ซึ่งค่านี้น้อยกว่าคือ 3 kHz ดังนั้น ค่าคลาดเคลื่อนความถี่ที่ยอมรับได้ คือ 3 kHz

10. การวัดความสามารถแยกคลื่นที่ต้องการรับ (Selectivity) เป็นการทดสอบความสามารถของภาคเครื่องรับ ในการแยกสัญญาณความถี่ที่ต้องการรับ ออกจากสัญญาณความถี่ข้างเคียง ซึ่งถ้าหากว่าคลื่นข้างเคียงที่เราไม่ต้องการมีความเข้มของสัญญาณสูงมาก ๆ เมื่อเทียบกับสัญญาณคลื่นพาห้ที่เราต้องการรับ จะทำให้สัญญาณที่เราต้องการรับนั้น เกิดการเพี้ยนของสัญญาณขึ้น และอาจจะมากถึงขนาด ไม่สามารถรับสัญญาณที่ต้องการได้เลย เนื่องจากภาคขยายความถี่วิทยุในเครื่องรับ จะขยายคลื่นพาห้ที่แปลกปลอมนี้ จนเครื่องรับไม่สามารถแยกสัญญาณที่ต้องการ ออกจากสัญญาณที่เข้ามารบกวน ซึ่งเหมือนกับความไวของเครื่องรับลดลงอย่างมาก เรียกอาการนี้ว่า Desensitization

ต่อเครื่องมือดังรูป 4.8 โดยต่อเครื่องกำเนิดสัญญาณแล้วเปิดให้ทำงานเฉพาะเครื่องที่ 1 ก่อน แล้วทำตามขั้นตอนดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 4.8 การวัดความสามารถในการแยกคลื่นที่ต้องการรับ
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ก็ตาม ห้ามทำผิดแบบลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ปรับแรงดันเอาต์พุตจากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้ได้ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM ที่ความถี่คลื่นพาห์ 150.000 MHz มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ค่าความเบี่ยงเบน 3 kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับ ให้ได้ความดัง 10 เปอร์เซ็นต์ ของความดังสูงสุดที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยอ่านจากมิเตอร์
3. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณให้ต่ำลง จากเดิมที่ตั้งไว้จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD
4. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 1 เพิ่มขึ้นอีก 3 dB แล้วอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตนี้ไว้ สมมติค่าที่อ่านได้ -107 dB
5. เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 ตั้งความถี่คลื่นพาห์เป็น 150.025 MHz ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 400 Hz ที่ค่าความเบี่ยงเบน 3 kHz
6. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 ให้สูงขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD อีกครั้ง
7. อ่านค่าแรงดันเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 สมมติได้ค่า -30 dB
8. เปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 เป็น 149.975 MHz แล้ว ปรับแรงดันเอาต์พุต จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD อีกครั้ง
9. อ่านค่าแรงดันเอาต์พุต ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 นี้ อีกครั้ง สมมติว่าได้ -35 dB
10. ค่าของ Selectivity ครั้งแรก คือ ค่าแรงดันเอาต์พุตจากข้อ 7 ลบด้วยค่าที่อ่านได้จากข้อ 4 คือ $-30 - (-107) = 77 \text{ dB}$
11. ค่าของ Selectivity ครั้งที่ 2 คือ ค่าเอาต์พุตจากข้อ 9 ลบด้วยค่าที่อ่านได้จากข้อ 4 คือ $-35 - (-107) = 72 \text{ dB}$
12. เปรียบเทียบค่าที่คำนวณจาก ข้อ 10 และ 11 แล้วให้ถือค่าที่น้อยกว่าเป็นหลัก นั่นคือค่า Selectivity ที่ได้ เท่ากับ 72 dB

11. การวัดสัญญาณฮัมและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ (Hum and Noise) สัญญาณที่ไม่ต้องการจากภาครับวิทยุ คือ สัญญาณ Hum ที่เกิดจากไฟฟ้ากระแสสลับที่ป้อนให้ภาคจ่ายไฟของตัวเครื่อง และบางส่วนอาจเกิดจากการทำตัวเป็นไมโครโฟน (Microphonic) ของวงจรขยายเสียง

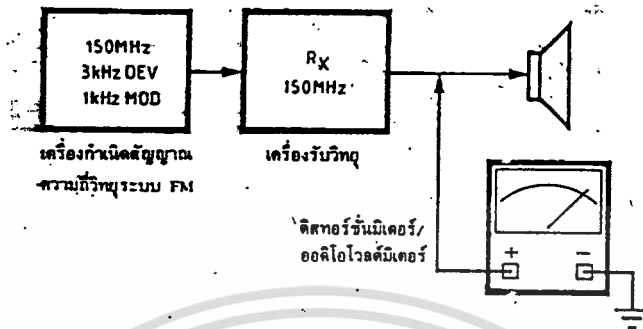
สัญญาณรบกวนอีกชนิดหนึ่ง คือ สัญญาณที่เกิดจากวงจรและส่วนประกอบของวงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอกการค

สัญญาณต่างๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 เป็นการต่อเครื่องมือที่จะทำการวัด โดยมีขั้นตอนในการวัด ดังนี้



รูปที่ 4.9 การวัดสัญญาณแอมและสัญญาณรบกวนอื่น ๆ

1. ปรับแรงดันเอาต์พุต จากเครื่องกำเนิดสัญญาณให้ได้ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ค่าความเบี่ยงเบน 3 kHz
2. ตั้งปุ่มสเกลของเครื่องรับวิทยุในตำแหน่งเปิด (มีเสียงซ่า)
3. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับ ให้ได้ความดังสูงสุดตามที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยอ่านด้วยมิเตอร์ บันทึกค่าไว้เป็น dB
4. เปลี่ยนสัญญาณจากเครื่องกำเนิดสัญญาณ เป็น CW คือ ไม่มีการมอดูเลตความถี่เสียง เหลือเพียงคลื่นพาห์อย่างเดียว แล้วอ่านค่าสัญญาณด้วยมิเตอร์ บันทึกค่าเป็น dB ค่าแอมและนอยส์คือค่าที่บันทึกไว้ ในขณะที่มีการมอดูเลตสัญญาณ 1 kHz ลบด้วยค่าที่บันทึกไว้ในขณะเป็นสัญญาณ CW

12. การวัดการสอดแทรก (Intermodulation) เป็นการทดสอบขีดความสามารถของวงจรในภาคเครื่องรับ ขณะที่มัลติสัญญาณแปลกปลอม โดยมีความถี่ต่างไปจากความถี่คลื่นพาห์ที่ต้องการรับ และเกิดกระบวนการผสมสัญญาณคลื่นพาห์แปลกปลอมนี้ ทำให้เกิดสัญญาณคลื่นพาห์ขึ้นใหม่ ซึ่งเครื่องรับสามารถรับได้พอดี แต่เป็นสัญญาณที่เครื่องรับไม่ต้องการ

ต่อเครื่องมือดังรูป 4.10 ทำการวัดตามขั้นตอน ดังนี้

1. เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 1 ปรับแรงดันเอาต์พุตให้ได้ $1 \text{ mV}_{\text{rms}}$ ในตำแหน่ง FM ที่ความถี่คลื่นพาห์ 150.000 MHz มอดูเลตด้วยความถี่ 1 kHz ที่ค่าความความถี่เบี่ยงเบน 3 kHz
2. ปรับโวลุ่มของเครื่องรับ ให้ได้ความดัง 10 เปอร์เซ็นต์ ของความดังสูงสุด ที่เครื่องรับกำหนดไว้ โดยอ่านจากมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้
เผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ ให้ลดลงจากเดิมที่ตั้งไว้ จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD
4. ปรับแรงดันเอาต์พุตของเครื่องกำเนิดสัญญาณ เพิ่มขึ้นอีก 3 dB แล้วอ่านค่าแรงดันเอาต์พุตนี้ไว้ สมมติค่าที่อ่านได้ -107 dB
5. เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 ตั้งความถี่คลื่นพาห์เป็น 150.025 MHz และไม่มีการผสมสัญญาณใด ๆ
6. เปิดเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 3 ตั้งความถี่คลื่นพาห์เป็น 150.050 MHz และไม่มีการผสมสัญญาณใด ๆ
7. ค่อย ๆ เพิ่มสัญญาณเอาต์พุต จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 และ 3 ไปพร้อม ๆ กัน โดยรักษาระดับแรงดันทั้งสองนี้ให้เท่ากันตลอดเวลา จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD อีกครั้งหนึ่ง แล้วอ่านค่าไว้ สมมติเท่ากับ -40 dB
8. เปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 เป็น 149.075 MHz
9. เปลี่ยนความถี่ของเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 3 เป็น 149.050 MHz
10. เพิ่มแรงดันเอาต์พุต จากเครื่องกำเนิดสัญญาณเครื่องที่ 2 และ 3 ไปพร้อม ๆ กันโดยรักษาระดับแรงดันทั้งสองนี้ให้เท่ากันตลอด จนกระทั่งได้ 12 dB SINAD อีกครั้งหนึ่ง แล้วอ่านค่าไว้ สมมติได้เท่ากับ -45 dB
11. ค่า Intermodulation ครั้งแรก คือค่าแรงดันเอาต์พุตจากข้อ 7 ลบด้วยค่าแรงดันที่อ่านได้จากข้อ 4 คือ $-40 - (-107)$ เท่ากับ 67 dB
12. Intermodulation คือ ค่าแรงดันเอาต์พุต จากข้อ 10 ลบด้วยค่าแรงดันเอาต์พุตจากข้อ 4 คือ $-45 - (-107)$ เท่ากับ 62 dB
13. เปรียบเทียบค่าที่คำนวณได้ จากข้อ 11 และ 12 ให้ถือค่าน้อยกว่าเป็นหลัก คือค่า Intermodulation เท่ากับ 62 dB

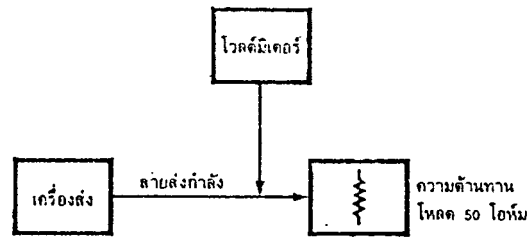
การวัดคุณสมบัติต่าง ๆ ของภาคส่ง

1. การวัดกำลังส่งออกอากาศ (RF Power) กำลังส่งออกจะสูงสุดต่อเมื่ออิมพีแดนซ์ของสายอากาศหรือตัวความต้านทานโหลด มีค่าเท่ากับเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ ของภาคเครื่องส่งที่ความถี่ที่กำหนด

การวัดกำลังส่งออกอากาศที่สะดวก และง่ายในทางปฏิบัติ มี 2 วิธี คือ วัดโดยใช้โวลต์มิเตอร์ชนิดความถี่สูง (ไม่ต่ำกว่าย่านความถี่ที่จะทำการวัด) ประกอบกับตัวต้านทานโหลด อีกวิธีหนึ่งคือใช้วัตต์มิเตอร์ที่สร้างขึ้นมา โดยเฉพาะที่ความถี่นั้น ๆ สามารถอ่านค่ากำลังส่งโดยตรงได้จากวัตต์มิเตอร์

แม้ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดกำลังส่งโดยใช้โวลต์มิเตอร์ ต่อเครื่องมือดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 การวัดกำลังส่งออกอากาศโดยใช้โวลต์มิเตอร์

จากรูปสายส่งกำลัง จะต้องเลือกชนิดที่มีค่าความสูญเสีย น้อย และมีความยาวน้อยที่สุด (น้อยกว่า 1 เมตร) สายส่งกำลังที่นิยมใช้คือ RG85 หรือ RG8 ซึ่งมี Characteristic Impedance เท่ากับ 50 โอห์ม โดยปกติแล้ว ในขณะที่ทำการวัด ไม่ควรมอดูเลตสัญญาณเสียง คือเป็นคลื่นพาห์อย่างเดียว แล้วอ่านค่าที่วัดได้จากโวลต์มิเตอร์ สมมติได้ 20 โวลต์ จะได้กำลังส่งออกอากาศตามสูตร ดังนี้

$$\text{กำลังส่งออกอากาศ} = \frac{V^2}{R} = \frac{(20)^2}{50} = 8 \text{ วัตต์}$$

การวัดกำลังส่งโดยใช้วัตต์มิเตอร์ สายส่งกำลังควรใช้สั้นที่สุด มี Characteristic Impedance 50 โอห์ม ถ้าใช้ยาวต่อตรงได้จะดีที่สุด การอ่านค่าโดยตรงจากวัตต์มิเตอร์ แสดงการต่อเครื่องมือ ดังรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 การวัดกำลังส่งออกอากาศโดยใช้วัตต์มิเตอร์

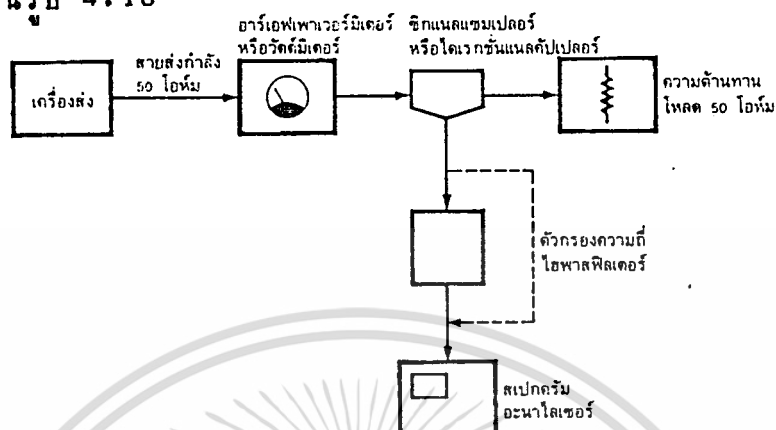
2. การวัดสปีริวส์และฮาร์โมนิก (Spurious and Harmonic) สปีริวส์ คือ คลื่นสัญญาณที่มีความถี่ต่างไปจากความถี่คลื่นพาห์ เป็นคลื่นที่ยังหลงเหลือหลังจากผ่านวงจรกรองความถี่ต่าง ๆ แล้ว ซึ่งโดยมากมักจะเกิดจากวงจรจูนความถี่จากภาคต้น ๆ ของภาคเครื่องส่ง และสามารถผ่านวงจรขยายภาคสุดท้ายออกไปยังเสาอากาศได้

ฮาร์โมนิก คือ คลื่นสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่คลื่นพาห์ เกิดจากภาคขยายกำลังภาคสุดท้าย ซึ่งเป็นภาคขยายสัญญาณคลาสซี จะทำให้เกิดสัญญาณที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่คลื่นพาห์ และหลงเหลือจากผ่านวงจรกรองความถี่ภาคสุดท้ายก่อนที่จะส่งต่อไปยังเสาอากาศ คลื่นสัญญาณรบกวนดังกล่าว ที่มีผลมากที่สุดคือ ที่ความถี่เป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สองเท่าของความถี่คลื่นพาห์ (Second Harmonic)

การวัดที่นิยมใช้และสะดวกที่สุด คือ วัดโดยใช้สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ การต่อเครื่องมือดังแสดงในรูป 4.13



รูปที่ 4.13 การวัดค่าสปีริอัลและอาร์มอนิก โดยใช้สเปกตรัมอะนาไลเซอร์

ขั้นตอนการวัดเป็นดังนี้

1. ต่อสัญญาณจากซิกแนลแชนเนลเพลอร์เข้าสู่สเปกตรัม อะนาไลเซอร์โดยไม่ผ่านตัวกรองความถี่ วัดกำลังจากวัตต์มิเตอร์ ให้ได้ตามข้อกำหนดของภาคเครื่องส่ง
2. วัดสัญญาณคลื่นพาห์ จากสเปกตรัม อะนาไลเซอร์ได้ -10 dB
3. จากนั้น ต่อตัวกรองความถี่ก่อนเข้าสู่สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ตามรูป
4. วัดกำลังส่งจากวัตต์มิเตอร์ ทำการปรับกำลังส่งให้เท่ากับค่าที่วัดได้จาก

ข้อ 1

5. วัดสัญญาณคลื่นความถี่อื่น ๆ โดยเริ่มจากความถี่คลื่นพาห์ แล้วกวาดหาสัญญาณความถี่แปลกปลอมต่าง ๆ ไปจนถึงความถี่ 1000 MHz หรือสูงกว่านั้น บันทึกระดับของความถี่ของสัญญาณแปลกปลอมทุก ๆ ตัว ที่สามารถวัดได้ จากสเปกตรัม อะนาไลเซอร์ เช่น สมมติว่าได้ระดับของสัญญาณที่ความถี่ 2 เท่าของคลื่นพาห์ เท่ากับ -90 dB และระดับของสัญญาณความถี่อื่น ที่ไม่ใช่ความถี่ของอาร์มอนิก เท่ากับ -100 dB

ค่าอาร์มอนิก = ผลการวัดในข้อ 2 ลบด้วยค่าสูญเสียของตัวกรองความถี่
ในที่นี้สมมติค่า 2 dB ลบด้วยผลการวัดในข้อ 5
= $-10 - (2) - (-90) = 78$ dB

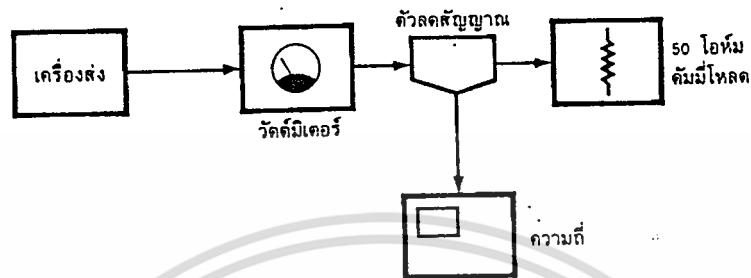
= -78 dB เมื่อเทียบกับสัญญาณความถี่คลื่นพาห์

ค่าสปีริอัล = ผลการวัดในข้อ 2 ลบด้วยค่าสูญเสียของตัวกรองความถี่
ลบด้วยผลการวัดในข้อ 5

= $-10 - (2) - (-100) = 88$ dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานานาชาติ ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

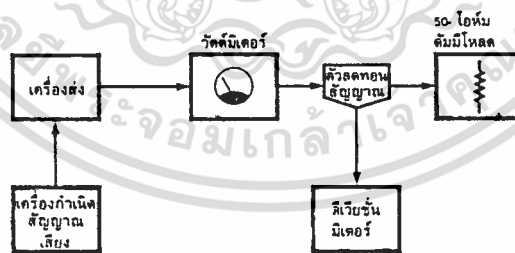
3. การวัดเสถียรภาพทางความถี่ (Frequency Stability) เครื่องส่งที่มีประสิทธิภาพ จะต้องมีเสถียรภาพทางความถี่สูง คือ การเปลี่ยนแปลงความถี่ของคลื่นพาห์ เนื่องจากอุณหภูมิไม่เกิน $\pm 0.005\%$ หรือ ไม่เกิน $\pm 750\text{ Hz}$ ต่อความถี่คลื่นพาห์ 150 MHz การวัดเสถียรภาพทางความถี่ แสดงการต่อเครื่องมือ ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 การวัดเสถียรภาพทางความถี่

วัดความถี่ในขณะส่งที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันโดยนำเครื่องเข้าตู้ควบคุมอุณหภูมิตั้งแต่ -30 C ถึง $+60\text{ C}$ ความถี่คลื่นพาห์จะต้องเปลี่ยนแปลงไม่เกิน $\pm 0.0001\%$ (หรือ $\pm 1\text{ ppm}$)

4. การวัดการเบี่ยงเบนทางความถี่ (Modulation Deviation) เป็นการวัดความเบี่ยงเบนของความถี่ เทียบกับความถี่ของคลื่นพาห์ ในการมอดูเลตแบบ FM ค่าความเบี่ยงเบนสูงสุด โดยปกติแล้ว จะตั้งไว้ที่ 4.5 kHz ต่อเครื่องมือวัดดังรูปที่ 4.15 และมีขั้นตอนการวัด ดังนี้

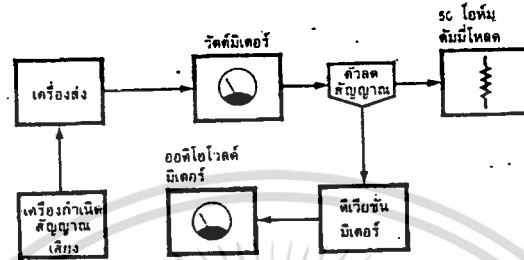


รูปที่ 4.15 การวัดการเบี่ยงเบนความถี่

1. ปรับจุกปรับการเบี่ยงเบนความถี่ (Deviation Control) ในภาคเครื่องส่งตามข้อกำหนดสูงสุดของเครื่อง สมมติ 5 kHz
2. ปรับระดับของสัญญาณจากเครื่องกำเนิดความถี่เสียงจนกระทั่งอ่านค่าความเบี่ยงเบนจากมิเตอร์ได้ 60% ของ $5\text{ kHz} = 3\text{ kHz}$ การเบี่ยงเบน
3. เพิ่มระดับของสัญญาณเสียงอีก 20 dB
4. ค่าความเบี่ยงเบนที่อ่านได้จากมิเตอร์ จะต้องไม่เกิน 5 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. การวัดฮัมและสัญญาณรบกวน (FM Hum and Noise) เป็นการวัดสัญญาณฮัมและสัญญาณรบกวน ที่เกิดขึ้นจากเครื่องส่ง ในขณะที่ยังไม่มีกรรมอดุลสัญญาณ หรือ หมายถึงเสียงฮัมหรือเสียงรบกวนต่าง ๆ ที่มากับเครื่องส่ง ในขณะที่ยังไม่มีกรรมอดุลสัญญาณ รูปที่ 4.16 เป็นการต่อเครื่องมือ สำหรับการวัดสัญญาณฮัม และสัญญาณรบกวน โดยมีขั้นตอนการวัดดังนี้ คือ



รูปที่ 4.16 การวัดฮัมและสัญญาณรบกวน

1. ปรับสัญญาณจากเครื่องกำเนิดความถี่เสียง จนกระทั่งอ่านค่าเบี่ยงเบนได้ 3 kHz
2. อ่านค่าระดับสัญญาณจากออกโวลต์มิเตอร์ สมมติได้ +10 dB
3. ปลดสัญญาณความถี่เสียงออก แล้วอ่านค่าระดับสัญญาณ จากออกโวลต์มิเตอร์ สมมติได้ -30 dB
4. ค่าฮัมและสัญญาณรบกวนในระบบ FM จะเท่ากับผลจากข้อ 2 ลบด้วยผลจากข้อ 3

$$= 10 - (-30) = 40 \text{ dB}$$

6. การวัดการตอบสนองความถี่เสียง (Audio Response) เป็นการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของระดับสัญญาณเสียงที่ความถี่ต่าง ๆ ตั้งแต่ 300 Hz ถึง 3000 Hz จากระดับของ 6 dB/octave ของวงจรปริเอมฟ้าซิสในภาคเครื่องส่ง ความชัน (Slope) 6 dB/octave หรือ 20 dB/octave นั้นหมายถึงระดับของสัญญาณเสียงจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ที่ความถี่เพิ่มขึ้น 2 เท่า ตัวอย่าง เช่น ที่ความถี่ 300 Hz วัดระดับสัญญาณเสียงได้ 1 โวลต์ ดังนั้น ที่ความถี่ 600 Hz ระดับของสัญญาณเสียงจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 โวลต์ และที่ความถี่ 1200 Hz ระดับของสัญญาณเสียงจะเพิ่มขึ้นเป็น 4 โวลต์ เป็นต้น

ในทางปฏิบัติแล้ว ค่าที่ได้จะแตกต่างกัน และผลต่างจากที่วัดได้ก็คือ ค่าของผลการตอบสนองความถี่ (Audio Response)

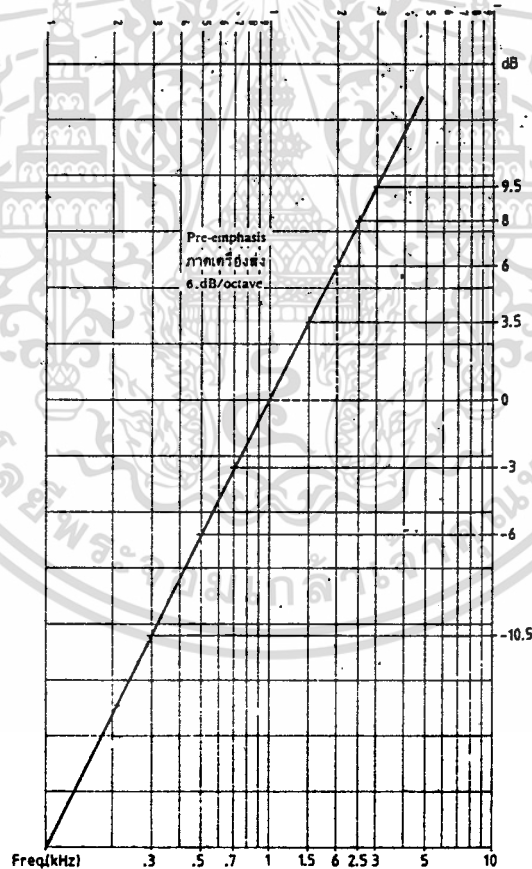
ตารางที่ 4.2 เป็นตัวอย่างตารางการทดสอบการตอบสนองความถี่เสียงของภาคเครื่องส่ง ความถี่อื่น ๆ นอกเหนือจากตารางนี้ได้จากกราฟของ 6 dB/octave ปริเอมฟ้าซิสมาตรฐานดังแผนภูมิที่ 4.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

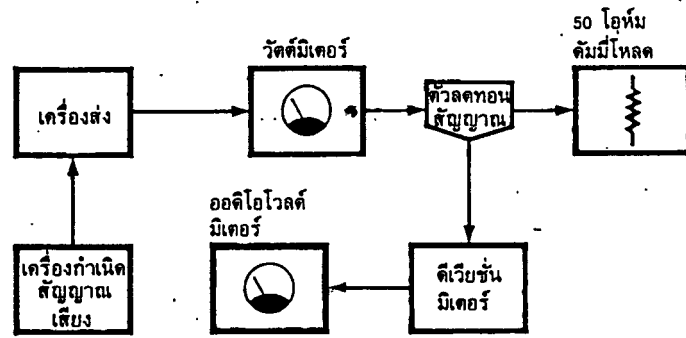
1. ความถี่ (kHz)	0.3	0.5	0.7	1	1.5	2	2.5	3
2. 6 dB/octave (dB)	-10.5	-6	-3	0	3.5	6	8	9.5
3. ค่าที่วัดได้	-8.5	-4.8	-2.2	1.0	4.3	6.6	8.3	7.5
4. ทำให้เป็น 0 ที่ 1 kHz	-9.5	-5.8	-3.2	0	3.3	5.6	7.3	6.5
5. ความเบี่ยงเบน	1	0.2	-0.2	0	-0.2	-0.4	-0.7	-3

ตารางที่ 4.2 ตารางตัวอย่างของการทดสอบการตอบสนองความถี่เสียงภาคเครื่องส่ง



แผนภูมิที่ 4.2 แสดงการตอบสนองความถี่เสียงที่ 6 dB/octave ปริเอมฟาสซิส

เอกสารนี้เป็นการวัดการตอบสนองความถี่เสียง ต่อเครื่องมือดังรูปที่ 4.17 โดยมีขั้นตอนการจัดตั้งนี้ การณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 การวัดผลการตอบสนองความถี่เสียง
การวัดการผิดเพี้ยนของเสียงในภาคส่ง

1. ตั้งความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่เสียง ไว้ที่ 3000 Hz
 2. ปรับระดับของสัญญาณเสียงจนกระทั่งอ่านค่าความเบี่ยงเบนได้ 1.5 kHz
 3. วัดระดับความดังของสัญญาณเสียง จากออกติโวลต์มิเตอร์ได้ 7.5 dB
 4. ปรับความถี่เสียงไปไว้ที่ 2.5 kHz
 5. วัดความดังของสัญญาณเสียง จากออกติโวลต์มิเตอร์ได้ 8.3 dB
 6. ปรับความถี่เสียง ตามตารางช่องถัดไป คือ 2 kHz, 1.5 kHz, 1 kHz
- ตามตาราง แล้วบันทึกค่าลงในช่องหมายเลข 2
7. ทำเป็น 0 dB ที่ความถี่ 1 kHz ดังปรากฏในตารางช่องหมายเลข 4 โดยลบ 1 ออกจากตารางช่องที่ 3 ทุก ๆ ความถี่
 8. ความเบี่ยงเบนในช่องหมายเลข 5 จะคำนวณได้โดยนำตัวเลขในช่องที่ 4 ลบด้วยค่าตัวเลขในช่องที่ 2 จะเห็นว่าค่าความเบี่ยงเบนสูงสุดคือ +1 และ -3 dB เมื่อเทียบกับกราฟของ 6 dB/octave

7. การวัดความผิดเพี้ยนความถี่เสียง (Audio Distortion) ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียงจากเครื่องส่ง จะเกิดจากวงจรมอดูเลเตอร์ ค่าความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นไม่ควรจะเกิน 5 % ที่จุดความเบี่ยงเบนสูงสุด ตามข้อกำหนดของเครื่องส่ง

ต่อเครื่องมือดังรูปที่ 4.17 แล้วทำการวัดตามขั้นตอน ดังนี้

1. ปรับการเบี่ยงเบนความถี่ของภาคส่งให้สูงสุด ตามข้อกำหนดของเครื่อง
2. ปรับความถี่จากเครื่องกำเนิดความถี่ไว้ที่ 1 kHz และปรับระดับความแรงสัญญาณเสียง จนกระทั่งได้ความเบี่ยงเบน 5 kHz
3. วัดค่าความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง จากคิสทอร์ชันมิเตอร์ คือค่าผิดเพี้ยนความถี่เสียงของภาคส่ง

บทที่ 5

อันตรายจากวิทยุรับ-ส่ง และการป้องกัน

5.1 อันตรายจากคลื่นวิทยุ

จากที่ได้เคยรับรู้กันมานานแล้วว่า คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) เอ็กซ์เรย์ (X-Ray) แกมมาเรย์ (Gamma Ray) ไมโครเวฟ (Microwave) มีอันตรายต่อมนุษย์ เคยมีรายงานว่าทำให้เกิดอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน และผู้ป่วยที่ใส่เครื่องกระตุ้นหัวใจ (Cardiac Pacemaker) และว่าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านคลื่นวิทยุ ค่อนข้างจะปลอดภัยกว่า จนกระทั่งในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา ได้มีผลการศึกษา จากผู้เชี่ยวชาญสาขาชีววิทยาทางการแพทย์ (Biomedical Expert) ได้ผลสรุปว่า คลื่นวิทยุสามารถทำให้เกิดอันตรายแก่มนุษย์ได้ แม้กระทั่งย่านความถี่ต่ำ ๆ ซึ่งหมายรวมไปถึงความถี่ของ A.C. Line ด้วย

ผู้ที่ใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่ง ควรจะทราบว่า คลื่นวิทยุที่ออกมาจากเครื่องส่งนั้นมีอันตราย ถ้าไม่ได้ศึกษาหรือไม่มีความรู้เกี่ยวกับเรื่องอันตรายของคลื่นวิทยุมาก่อน อาจทำให้ผู้ใช้และผู้ใกล้ชิดได้รับอันตรายได้

คลื่นวิทยุคืออะไร

คลื่นวิทยุ (Radio Waves) เป็นรูปหนึ่งของการกระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electro magnetic Radiation) คุณสมบัติพื้นฐานของมันได้แก่ ความถี่ (Frequency) ความแรงสนาม (Field Strength) การนำขั้ว (polarization) และทิศทางการเดินทาง (Direction of Travel)

คลื่นวิทยุ แตกต่างจากคลื่นความร้อน (Heat Waves) คลื่นแสง (Light Waves) เอ็กซ์เรย์ คอสมิคเรย์ (Cosmic Rays) ก็ตรงที่ความถี่หรือความยาวคลื่น (Wave Length) ความเร็วของคลื่นวิทยุขึ้นอยู่กับตัวกลาง (Medium) ที่มันเดินทางผ่าน ยกตัวอย่างเช่น ในช่องว่างอิสระ (Free Space) จะมีความเร็วประมาณ 186,000 ไมล์ ต่อวินาที หรือ 300,000,000 เมตรต่อวินาที ซึ่งเท่ากับความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ ซึ่งโดยทั่วไป ถือว่าเป็นค่าคงที่ แต่ความจริงแล้วความเร็วจะเปลี่ยนไป ถ้าหากว่าคลื่น ๆ หนึ่ง เดินทางผ่านตัวกลางหนึ่ง ไปสู่ตัวกลางตัวอื่น การเปลี่ยนแปลงความเร็วจะมีบทบาทสำคัญในการแพร่กระจายคลื่นวิทยุ (Radio Waves Propagation)

ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่สำคัญระหว่างความเร็วคลื่น (Wave Velocity) ความถี่ และความยาวคลื่น แสดงได้ด้วยสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

ในที่นี้
 λ = ความยาวคลื่น มีหน่วยเป็น เมตร
 v = ความเร็วแสงในช่องว่างอิสระ = 3×10^8 เมตรต่อวินาที
 f = ความถี่เป็น Hz (ย่อมาจาก Hertz)

จากความหมายง่าย ๆ ของสมการ จะเห็นได้ว่า คลื่นความถี่ต่ำ (Low Frequency Wave) จะมีความยาวคลื่น "ยาว" ในขณะที่ความถี่สูง (High Frequency Wave) จะมีความยาวคลื่น "สั้น"

ย่านความถี่ของคลื่นวิทยุ นับตั้งแต่ 10 kHz จนถึง 3,000 MHz โดยแบ่งออกเป็นช่วง ๆ ตามความถี่และคุณสมบัติเฉพาะ ดังแสดงในตารางที่ 5.1.1 ตารางที่ 5.1.2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์และพลังงานโพตอน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ความถี่ต่ำมาก	Very Low Freq. (VLF)	10-30 kHz
ความถี่ต่ำ	Low Freq. (LF)	30-300 kHz
ความถี่ปานกลาง	Medium Freq. (MF)	300-3000 kHz
ความถี่สูง	High Freq. (HF)	3-30 MHz
ความถี่สูงมาก	Very High Freq. (VHF)	30-300 MHz
ความถี่สูงยิ่ง	Ultra High Freq. (UHF)	300-3000 MHz
ความถี่สูงพิเศษ	Super High Freq. (SHF)	3-30 GHz
ความถี่สูงพิเศษยิ่ง	Extra High Freq. (EHF)	30-300 GHz
ความถี่สูง (ยังไม่มีชื่อ)	-----	300-3000 GHz

ตารางที่ 5.1.1 คลื่นวิทยุย่านต่าง ๆ แบ่งตามความถี่และคุณสมบัติเฉพาะ

อันตรายที่เกิดจากคลื่นวิทยุ มี 2 ประเภท คือ

1. อันตรายที่รู้สึกได้ทันที ได้แก่ ความร้อน ไฟฟ้าดูด ไฟไหม้ บวดศีรษะและความเครียด

2. อันตรายที่เกิดขึ้นโดยไม่รู้ตัว ได้แก่ การรบกวนระบบการทำงานของร่างกายส่วนที่ไม่มีประสาทบอกความรู้สึก อาจเป็นการรบกวนให้เกิดความผิดปกติขึ้นอย่างช้า ๆ กว่าที่เรารู้ตัวก็เป็นมากแล้ว เช่น เลนส์แก้วตาขุ่นมัว หรือต้อกระจก (Cataract) ประสาทตาถูกทำลาย (Retinal Damage) รบกวนการทำงานของเซลล์ต่าง ๆ ของมนุษย์ เช่น มะเร็งเม็ดโลหิตขาว (Leukemia) มะเร็งผิวหนัง รังสีไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชนิดของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	ความถี่ (Hz)	ความยาวคลื่น (ซม)	พลังโฟตอน (eV)
คลื่นวิทยุและคลื่นเอิร์ตเซียน	10^4	3×10^5	4.1×10^{-6}
	ถึง 3×10^{12}	ถึง 0.1	ถึง 1.2×10^{-2}
อินฟราเรด	3×10^{12}	0.1	1.2×10^{-2}
	ถึง 4.3×10^{14}	ถึง 7×10^{-5}	ถึง 1.8
แสงดงธรรมดา	4.3×10^{14}	7000 \AA	1.8
	ถึง 7.5×10^{14}	ถึง 4000 \AA	ถึง 3.1
แสงอัลตราไวโอเลต	7.5×10^{14}	4000 \AA	3.1
	ถึง 3.1×10^{16}	ถึง 100 \AA	ถึง 124
เอ็กซ์เรย์และแกมมาเรย์	3.0×10^{16}	100 \AA	124
	ถึง 3.0×10^{18}	ถึง 10^{-4} \AA	ถึง 124 M
เอ็กซ์เรย์และแกมมาเรย์ (ใช้ทางการแพทย์)	3.0×10^{18}	1 \AA	12.4 k
	ถึง 3.0×10^{21}	ถึง 10^{-8} \AA	ถึง 12.4 M

eV = อิเล็กตรอนโวลต์ หมายถึงงานซึ่งกระทำเมื่ออิเล็กตรอนถูกเร่ง
โดยความต่างศักย์ 1 โวลต์

1eV = 1.601×10^{-19} เวิร์ก

\AA = อังสตรอม $1 \text{ \AA} = 10^{-10}$ ซม. * $7 \times 10^{-5} = 7000 \text{ \AA}$

ตารางที่ 5.1.2 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพลังโฟตอน ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือพลังงาน	ผลที่ปรากฏเชิงเปรียบเทียบ
1. หลอดไฟฟ้ามี่ไส้ขนาด 5 วัตต์ วางไว้ที่ตำแหน่งหน้าผากเหนือตา (เปรียบเทียบกับการใช้วิทยุมือถือ)	เกิดความร้อนบริเวณหน้าผางสว่างรบกวนตา
2. วิทยุเปิดเสียงดัง 5 วัตต์ วางไว้ใกล้ ๆ ตัว (เปรียบเทียบกับพลังงานที่ออกมาเป็นเสียง)	เสียงดังรบกวน ไม่สบายหู
3. เครื่องกายภาพบำบัดแบบ Ultra sound ขนาด 20 วัตต์ (3MHz)	ความร้อนบริเวณสัมผัสและส่วนที่ลึกลงไป
4. เครื่องจี้เนื้อสำหรับผ่าตัดขนาด 5 วัตต์ (RF Energy 400 kHz)	ผิวหนังแยกออกเหมือนการใช้มีดผ่า
5. เครื่องกายภาพบำบัดชนิดคลื่นสั้น (RF Frequency MHz)	ความร้อนบริเวณสัมผัสและส่วนที่ลึกลงไป CPU ของวิทยุมือถือ O2N เสีย (เกิดขึ้น 2 ครั้ง)
6. พุดวิทยุมือถือ 144 MHz ขนาด 5 วัตต์ นาน 10 นาที	ร้อนบริเวณหน้าผากศีรษะตามัว
7. การแผ่กระจายคลื่นไมโครเวฟ	อัตราการเต้นของหัวใจอ่อนลงตามัว เลนส์ตาขุ่น ประสาทตาถูกทำลาย
8. เตารอบไมโครเวฟ	น้ำเดือดใน 1 นาที (น้ำ 1 ลิตร)
9. แสงแดด	ผิวหนังร้อน ทาบฏิกิริยากับเกลือเงิน (Silver Nitrate) ที่ใช้ในการถ่ายภาพ
10. แสงอัลตราไวโอเล็ต	ทำลายประสาทตา ทำให้เชื้อโรคตาย ลบหน่วยความจำ EPROM
11. X-Ray	ทะลุทะลวงเนื้อเยื่อไปทาบฏิกิริยากับเกลือเงินได้ (ใช้ในการถ่ายภาพเอ็กซเรย์ ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครโมโซม)

ตารางที่ 5.1.3 ผลเชิงเปรียบเทียบจากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมอง (Brain Tumor) เป็นต้น

พลังงานจากคลื่นวิทยุ จะมีผลต่อร่างกายมนุษย์อย่างไร ก่อให้เกิดผลเสียมากน้อยเพียงไร ขึ้นอยู่กับความแรงของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่จุดสัมผัส (หมายถึงขนาดพลังงานของคลื่นแพร่กระจายออกมาจากดินกำเนิด และระยะห่างจากดินกำเนิด) ความถี่หรือความยาวคลื่นของคลื่นวิทยุ และอวัยวะส่วนที่ได้รับพลังงาน (ซึ่งแต่ละอวัยวะอาจมีผลไม่เหมือนกัน)

ปัญหาที่ผู้ใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่ง ที่เป็นนักวิทยุสมัครเล่นประสบ คือการใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่ง ย่านความถี่ 144-146 MHz ขนาดกำลังส่ง 5 หรือ 10 วัตต์ ลักษณะการใช้งานครั้งละนาน ๆ และไม่อาจวัดขนาดพลังงานคลื่นที่แพร่กระจายออกมาว่ามีผลต่อร่างกายมากน้อยเพียงไร ลองเปรียบเทียบกับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าย่านต่าง ๆ กับการรบกวนที่ปรากฏเป็นเชิงเปรียบเทียบ ดังตารางที่ 5.1.3

จากตัวอย่าง ในตารางที่ยกมาเทียบเคียง ทำให้พอคาดคะเนได้ว่า พลังงานจากคลื่นวิทยุที่ออกมา นั้น น่าจะมีอันตรายต่อร่างกาย ดังนั้น ควรพยายามหลีกเลี่ยงการใช้ที่ไม่จำเป็น

มาตรฐานความปลอดภัย (Safe Exposure Standards)

มีรายงานมาตรฐานเกี่ยวกับความปลอดภัย จากพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งมนุษย์สามารถรับได้โดยไม่เกิดอันตรายของ American National Standard Institute (ANSI) ว่าคลื่นวิทยุย่านความถี่ VHF และ UHF มีผลต่อร่างกายมากกว่าย่านอื่น ๆ ที่ความเข้มของพลังงานเท่ากัน

ที่มีรายงานเช่นนี้ ก็เพราะว่า ความยาวของร่างกายมนุษย์ (ความสูง) มีความเกี่ยวข้องกับความถี่วิทยุ ในการที่จะรับพลังงานจากคลื่นวิทยุความถี่เดียวกัน ความยาวที่สามารถรับคลื่นได้ดีที่สุด คือความยาวเท่ากับ 0.4 ของคลื่นวิทยุนั้น (ความสูงของมนุษย์เสมือนกับความยาวของสายอากาศ ในเรื่องของการเรโซแนนซ์)

ตัวอย่างการคำนวณความสูงของมนุษย์ ที่สามารถรับคลื่นวิทยุได้ดีที่สุดในย่านวิทยุสมัครเล่น 144-146 MHz

$$L = 0.4$$

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{144 \times 10^6} \quad \text{และ} \quad \frac{3 \times 10^8}{146 \times 10^6}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้งานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$L = 0.4 (2.083) \text{ และ } 0.4 (2.055)$$

$$= 0.8332 \quad \text{และ } 0.8220 \text{ ม.}$$

$$= 83.32 \quad \text{และ } 82.20 \text{ ซม.}$$

จะเห็นได้ว่าความสูง 82.20 - 83.32 ซม. สามารถรับคลื่นย่านความถี่นี้ได้ดีที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับความสูงของเด็ก ดังนั้น จึงควรที่จะห้ามเด็ก ๆ ไม่ให้อยู่ใกล้ ๆ เครื่องรับ-ส่งวิทยุ สายอากาศ หรือสายนาฬิกา

อีกตัวอย่างหนึ่ง สมมติว่าตัวเรามีความสูง 165 ซม. อยากทราบว่า จะสามารถรับคลื่นได้ดีที่สุดที่ความถี่ใด

$$L = 0.4 \lambda$$

จะได้ $\lambda = \frac{L}{0.4} = \frac{1.65}{0.4} = 4.125 \text{ ม.}$

จาก $= \frac{v}{f}$

แทนค่าจะได้

$$4.125 = \frac{3 \times 10^8}{f}$$

$$f = \frac{3 \times 10^8}{4.125} = 72 \times 10^6 \text{ Hz}$$

ความสูง 165 ซม. จะสามารถรับคลื่นวิทยุได้ดีที่สุดที่ความถี่ 72 MHz และนอกจากนี้ยังมีสูตรคำนวณประมาณการของความเข้มพลังงาน (Estimating Power Density) และตัวอย่างการคำนวณ เพื่อให้ให้นักวิทยุสมัครเล่นได้ใช้ประโยชน์ในการคำนวณหาความเข้มของพลังงาน จากคลื่นวิทยุที่แพร่กระจายจากสายอากาศติดตั้งภายนอก

$$P = \frac{PG}{4\pi R^2} \text{ -----(1)}$$

เมื่อ P = ความเข้มของพลังงาน ณ จุดที่มีระยะห่าง R จากสายอากาศ (หน่วยเป็น W/m² ถ้า P มีหน่วยเป็นวัตต์ และ R เป็นเมตร)

R = ระยะห่างจากจุดกำหนดรับพลังงาน และจุดปลายสายอากาศ (เมตร)

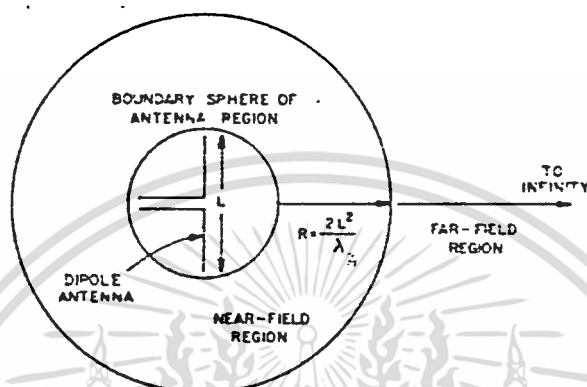
P = กำลังส่งป้อนเข้าสายอากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของสมาคมวิทยุสมัครเล่นแห่งประเทศไทย ซึ่งเท่ากับ 10๘๒/1๐ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การคำนวณหาระยะห่างจากสายอากาศถึงจุดที่ Power Density จะแผ่กระจายไปถึงนั้น หาได้จากสูตร

$$R_{min} = \frac{2L^2}{\lambda} \quad \text{-----(2)}$$

L = ความยาวของสายอากาศ (เมตร)



รูปที่ 5.1.1 แสดงขอบเขตของการแผ่กระจายคลื่นรอบ ๆ สายอากาศ ตัวอย่างการคำนวณหา Power Density สมมติว่าเรามีความถี่วิทยุขนาด 14 MHz ใช้สายอากาศแบบ 3-element Yagi มี Gain 6dBd (d = เทียบกับ Dipole) กำลังส่งป้อนเข้าไปเท่ากับ 500 วัตต์ และเราไปยืนอยู่ใกล้สายอากาศ เป็นระยะทาง 15 เมตร คำนวณว่า เรายืนอยู่ในระยะที่มี Power Density ที่เป็นอันตรายหรือไม่

จากโจทย์ $G = 6 \text{ dB}$ แปลงเป็นเท่า จะได้

$$G = 10^{6/10} = 10^{0.6} = 3.981 \approx 4$$

ระยะห่างจากสายอากาศถึงจุดที่ Power Density แผ่กระจายไปถึง

$$R_{min} = \frac{2L^2}{\lambda}$$

L = ความยาวของสายอากาศ ในที่นี้ใช้ความยาวมาตรฐานที่ยาวที่สุด 35 ฟุต แปลงเป็นเมตร

$$L = 35 \times 0.3048 = 10.7 \text{ ม.}$$

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{14 \times 10^6} = 21.42 \text{ ม.}$$

$$R_{min} = \frac{2 \times (10.7 \text{ ม.})^2}{21.42 \text{ ม.}} = 228.98 \text{ ม.}^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปภายนอกโดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

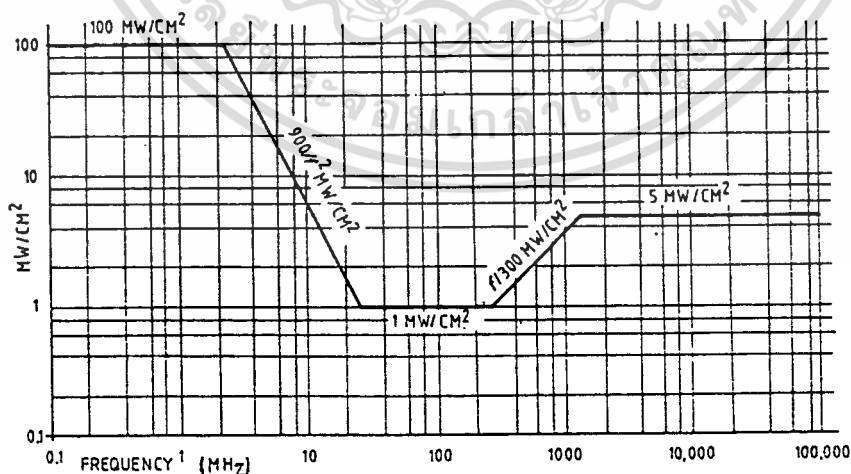
$$\begin{aligned}
 &= 10.69 \quad 11 \text{ เมตร} \\
 p &= \frac{500 \text{ วัตต์} \times 4}{4 (15 \text{ ม})^2} = \frac{2000 \text{ วัตต์}}{2827.4 \text{ ม.}^2} \\
 &= 0.707 \text{ วัตต์/ม.}^2
 \end{aligned}$$

แปลงหน่วยให้เป็น มิลลิวัตต์/ม.² ตาม Radio Frequency Protection Guide (RFPG) Standard จะได้

$$\begin{aligned}
 &= \frac{0.707 \text{ วัตต์}}{\text{ม.}^2} \times \frac{1000 \text{ มิลลิวัตต์}}{1 \text{ วัตต์}} \times \frac{1 \text{ ม.}^2}{1000 \text{ ซม.}^2} \\
 &= 0.070 \text{ มิลลิวัตต์/ซม.}^2
 \end{aligned}$$

จากการคำนวณ จะเห็นว่า เรายืนอยู่ห่าง 15 เมตร ซึ่งไกลกว่าระยะ Minimum Distance (Rmin) แสดงว่าจุดที่เราอยู่นั้นปลอดภัย และ Power Density จากจุดที่เราอยู่น้อย = 0.070 มิลลิวัตต์/ซม.² ก็ต่ำกว่าขนาดพลังงานที่มนุษย์สามารถรับได้โดยไม่เกิดอันตราย

แผนภูมิที่ 5.1.1 แสดงระดับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลอดภัยของ ANSI จะเห็นว่า Maximum Power Density ที่ 14 MHz. ประมาณ 6.4 mw/cm² ช่อง 30-300 MHz. ประมาณ 1 mw/cm² ช่อง 1500 MHz. และสูงกวานั้น ประมาณ 5 mw/cm² และที่ต่ำสุด 3 MHz. ประมาณ 100 mw/cm²



แผนภูมิที่ 5.1.1 แสดงระดับพลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปลอดภัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อแนะนำในการป้องกันอันตรายจากคลื่นวิทยุ สำหรับนักวิทยุสมัครเล่น

ได้มีผู้ทำการศึกษาการดูดซับพลังงานของอวัยวะต่าง ๆ ในผู้ที่ใช้เครื่องวิทยุมือถือ กำลังส่ง 1 วัตต์ ที่ใช้เสาอากาศต่างชนิดกัน (การทดลองนี้ ใช้เครื่องเซลลูลาร์ 800 MHz.) ผลปรากฏว่า หากใช้เสาอากาศชนิด 1/2 จุดที่รับพลังงานมากที่สุด ที่เรียกว่าจุด Hot Spot จะอยู่ในตำแหน่งของดวงตา และหากใช้เสาอากาศชนิด 5/8 จุดนี้จะอยู่ที่สมองและหน้าผาก

ดังนั้น หลักของการใช้วิทยุรับ-ส่ง ให้เกิดอันตรายน้อยที่สุดนั้น นักวิทยุสมัครเล่นควรจะศึกษาจากหนังสือมาตรฐาน ที่มีผู้เขียนไว้หลายเล่ม ในที่นี้จะขอแนะนำหลักการป้องกันพื้นฐาน คือ

1. หลีกเลี่ยงจากการได้รับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า คลื่นวิทยุโดยไม่จำเป็น โดยไม่เข้าไปใกล้อุปกรณ์ที่มีการแพร่กระจายคลื่นวิทยุออกมา ได้แก่ สายอากาศ สายนำสัญญาณ เครื่องส่งวิทยุ เครื่องขยายกำลังส่ง และแหล่งจ่ายไฟ เป็นต้น

2. หลีกเลี่ยงการเข้าไปใกล้สายอากาศ ไม่ว่าจะ เป็นสายอากาศของสถานีส่งวิทยุกระจายเสียง สถานีส่งวิทยุกำลังสูง สายอากาศที่ติดตั้งตามอาคาร สายอากาศติดตั้งที่รถยนต์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสายอากาศที่มีอัตราการขยายสูง ๆ เพราะสายอากาศเป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่โดยตรงในการปล่อยคลื่นวิทยุออกมาในอากาศ พลังงานเกือบทั้งหมดที่ออกมาจากเครื่องส่งวิทยุ จะออกมาที่จุดนี้

3. ในกรณีที่ไม่ได้เป็นผู้ใช้เครื่องวิทยุรับ-ส่ง การเข้าไปใกล้สายอากาศรถยนต์ สายอากาศประจำที่ โดยไม่ทราบว่าจะขณะนั้นมีการส่งออกอากาศ อาจทำให้เกิดอันตรายได้ ไม่ควรยืนชิดสายอากาศรถยนต์ในระยะ 60 ซม. ในกรณีคลื่นย่าน HF และ VHF ห้ามอยู่ใกล้สายอากาศน้อยกว่า 10-15 ฟุต สายอากาศแบบ Vertical Monopole ที่มีการส่งออกอากาศแบบติดต่อกัน ด้วยกำลังส่งสูงย่าน VHF และ SHF การมองเข้าไปที่ปลายสายอากาศทิศทางหรือท่อนำสัญญาณ (Waveguide) ในทิศทางที่คลื่นออกมา จะเป็นอันตรายได้

4. ในกรณีที่เป็นผู้ใช้เครื่องเอง ควรจะใช้เครื่องส่งให้น้อยที่สุดเท่าที่จำเป็น และหากจะใช้ควรใช้กำลังส่งน้อยที่สุด ที่จะติดต่อกันได้ แต่ครั้งที่กดคีย์ (Key) ออกอากาศ ควรกดเป็นช่วงสั้น ๆ ตรงกับหลักสากลของนักวิทยุสมัครเล่นที่ว่า พังมาก ๆ พุดน้อย ๆ พุดสั้น ๆ วัตต์ต่ำ ๆ การที่ส่งออกอากาศช่วงสั้น ๆ กำลังส่งน้อย ๆ นอกจากจะเป็นประโยชน์ต่อตนเอง ในการที่จะได้รับคลื่นวิทยุน้อยแล้วยังเป็นประโยชน์ต่อผู้อื่นอีกด้วย กล่าวคือ ทำให้ช่องความถี่ว่างให้ผู้อื่นได้ใช้ประโยชน์อีกด้วย โดยเฉพาะกรณีฉุกเฉิน

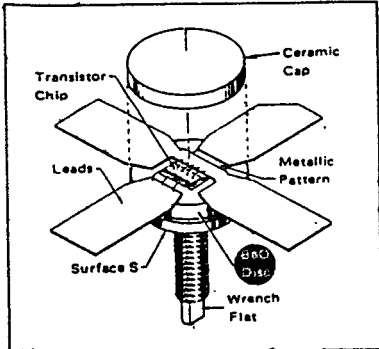
5. ในกรณีที่ไม่จำเป็นต้องใช้เครื่องมือถือ เสาขายาง หรือเสาชัก นอกจากจะไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พยายามให้กำลังส่งออกให้น้อยที่สุดแล้ว ควรพูดเป็นช่วงสั้น ๆ เวลาพูดควรถือเครื่องให้ห่างจากศีรษะมากพอสมควร อย่างน้อย 1-2 นิ้ว การถือเครื่องนั้น แนะนำให้ถือในแนวตั้ง หรือเอียงออกไปด้านหน้า 45 องศา โดยให้ส่วนเสาอากาศห่างศีรษะมากที่สุด การใช้สายอากาศที่มีอัตราการขยายสูง ๆ ห้ามใช้สายอากาศไปยังผู้คน

6. การเชื่อมต่อสายอากาศชนิดต่าง ๆ กับสายนำสัญญาณ ควรศึกษาการต่อให้ดี เพราะโดยปกติแล้ว สายนำสัญญาณไม่ควรที่จะมีการแพร่กระจายคลื่นออกมาตัวเครื่องส่งวิทยุเอง ก็อาจจะมีการมีคลื่นวิทยุรั่วออกมาภายนอก โดยเฉพาะในขณะที่เปิดฝาเครื่องไว้เพื่อซ่อม ทดลอง ปรับแต่ง ซึ่งจะต้องระวังและป้องกันให้ดี ในกรณีที่มีการใช้ Power Amplifier ต้องระวังมากขึ้น เพราะจะมีคลื่นวิทยุออกมามาก หากซัดไม่ดีพอ และที่ร้ายที่สุด ท่านอาจได้รับสารพิษ ที่ใช้เป็นส่วนประกอบในตัว RF Power Transistor ได้

5.2 อันตรายจากสารพิษใน RF Power Transistor

RF Power Transistor เป็นอุปกรณ์สำคัญอย่างหนึ่งของเครื่องกำเนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เพราะเป็นตัวส่งกำลังทั้งหมดของพลังงานไฟฟ้า เป็นคลื่นวิทยุออกอากาศ นักวิทยุที่ทำการซ่อมปรับแต่งเครื่องส่งวิทยุ นอกจากจะต้องระวังอันตรายจากสนามแม่เหล็กไฟฟ้ากำลังสูงมากในขณะทำงาน ยังต้องระวังการถอดเปลี่ยนอุปกรณ์ตัวนี้ด้วย เพราะในตัว Power Transistor จำเป็นต้องใช้สารที่มีความสามารถนำความร้อนได้ดี และเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดีด้วย เพื่อให้ทรานซิสเตอร์นั้นไม่ร้อน จนไม่สามารถทำงานได้ หรือเสื่อมสภาพไป สารที่มีคุณสมบัติเช่นนี้คือสารประกอบของเบริลเลียม (Beryllium) ที่เรียกว่าเบริลเลียมออกไซด์ (Beryllium Oxide) ซึ่งเมื่อนำมาใช้งานพบว่าสารนี้เป็นสารพิษร้ายแรงต่อร่างกาย หากไม่รู้จักวิธีการระวังป้องกัน



รูปที่ 5.2.1 โครงสร้างของ RF Power Transistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของสารเบอริลเลียม

เบอริลเลียม จัดอยู่ในกลุ่มของสารโลหะหนัก (Hard Gray-white Metal) มี Atomic No.4 Atomic Weight 9.012 สัญลักษณ์ธาตุคือ Be ไม่ติดไฟ ไม่ติดแก๊ส เอ็กซ์เรย์ ความถ่วงจำเพาะ 1.85 จุดหลอมเหลว 1280°C จุดเดือดที่ 2500°C ทนทานต่อการถูกออกซิไดซ์ที่อุณหภูมิปกติ คุณสมบัติทางเคมีคล้ายกับอลูมิเนียม สมัยก่อนเรียกกันว่า Glucinum สามารถละลายได้ในกรดต่าง ๆ ฝุ่นของสารนี้เป็นพิษต่อร่างกาย เมื่อหายใจเข้าไปหรือเมื่อสัมผัสกับร่างกาย ผลที่เกิดกับปอดจะเกิดขึ้นทันที หรือค่อย ๆ เกิดขึ้นภายใน 3 เดือนถึง 15 ปี ภายหลังจากการได้รับสารนี้ แม้เพียงช่วงสั้น ๆ และความเข้มข้นต่ำ มีโอกาสหายเป็นปกติได้น้อย และไม่แน่นอน โอกาสหายพบได้เพียง 25 % ในรายงานของ Second Annual Report on Carcinogens (NTP 81-43 Dec.1981 PP 58-60) พบว่าเบอริลเลียมทำให้เกิดมะเร็ง การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม มีผลต่อเด็กในครรภ์มารดา

มนุษย์พบสารนี้ครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1797 โดยการแยกสารออกมาจากอลูมิเนียมที่เรียกกันว่า Beryl ($3\text{BeO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$) Wohler สามารถแยกสารนี้เป็นโลหะได้ ในปี ค.ศ.1828 และในปี ค.ศ. 1897 Lebeau สามารถทำโลหะผสม Beryllium Copper ได้สำเร็จและนำมาใช้ประโยชน์ ในทางอุตสาหกรรมได้ เพราะมีลักษณะดีกว่าโลหะอื่น ๆ หลายอย่าง แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่ราคาแพง และเป็นพิษ ส่วนใหญ่นำมาใช้ในการทำ Alloy ของทองแดง (Copper Alloy) หรืออลูมิเนียม (Aluminium Alloy) Beryllium Copper มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าที่ดีเยี่ยม มี High Strength and Hardness ใช้ทำสวิตช์ไฟฟ้า สปริงของนาฬิกา ลื่น Cam Bush ใช้ในการสร้างนิวตรอนในเครื่องมือปฏิบัติการปรมาณู โดยทำหน้าที่เป็น Neutron Moderator (สารลดความเร็วของนิวตรอน) ใช้ทำเป็นส่วนประกอบของหลอดเอ็กซ์เรย์ และใช้ในกิจการ Aerospace

เบอริลเลียมออกไซด์ สมัยก่อนเรียกว่า Glucinium Oxide หรือ Beo หรือ Beryllia เป็นผงสีขาว เบา มีพิษ สามารถละลายได้ในกรดหรือด่าง ไม่ละลายในน้ำ ความถ่วงจำเพาะ 3.016 จุดหลอมเหลว 2570°C น้ำหนักโมเลกุล 25.01 พบมากในแถบอเมริกาใต้ เช่น ประเทศบราซิล อาร์เจนตินา และทวีปแอฟริกาใต้ ใช้เตรียมสารประกอบเบอริลเลียมตัวอื่น ๆ ใช้ทำสารเรืองแสงในจอภาพ มีคุณสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าที่ดี ทนความร้อนได้สูงมาก และเป็นตัวนำความร้อนที่ดี มีข้อเสีย คือ มีพิษร้ายแรงต่อมนุษย์ แต่ก็จำเป็นต้องใช้สารนี้เป็นส่วนประกอบของ RF Power Transistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบต่อร่างกายจากการได้รับสาร เบอริลเลียม

สารประกอบของ เบอริลเลียม มีคุณสมบัติระคายเคืองผิวหนัง เยื่อช่องปาก ผนังหลอดลม และปอด หากเข้าไปถึงปอดได้ จะทำให้ปอดอักเสบขึ้นอย่างรวดเร็ว (ทางการแพทย์ ใช้คำว่า Acute หรือเฉียบพลัน) ทำให้ถุงลมปอดบวม หนาตัวขึ้น มากกว่าปกติ มีน้ำซึมออกมาอยู่ในถุงลม ทำให้ก๊าซออกซิเจนจากลมหายใจผ่านเข้าไปในร่างกายได้น้อย ร่างกายจะขาดออกซิเจน และในทางกลับกันก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่สะสมอยู่ในร่างกาย ถูกขับออกมาทางลมหายใจน้อยกว่าปกติ ทำให้เกิดการคั่งของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในร่างกาย และหากมีน้ำซึมมามากจนเต็มถุงลม อากาศจากภายนอกจะไม่สามารถเข้าไปถึงถุงลม เพื่อแลกเปลี่ยนก๊าซทั้งสองนี้ได้

ผู้ที่ได้รับสารนี้เข้าไปอาจไม่รู้ตัว หรือไม่รู้สึกผิดปกติ ถ้าได้รับเข้าไปเป็นส่วนน้อย หากรับเข้าไปบ่อย ๆ เป็นระยะยาวแล้ว จะทำให้ปอดเสื่อมหน้าที่ไป ทำให้เกิดอาการเหนื่อยง่าย หอบ หายใจเร็ว เจ็บหน้าอก หายใจไม่ออก เพราะหลอดลมเกร็งตัว มีไข้ อาจมีอาการตัวเขียว ไอ มีเลือดออกมากับเสมหะ มีน้ำมูก เสมหะมาก หากรับเข้าไปมาก ๆ อาจเกิดภาวะหัวใจวายได้ ในรายที่รับเข้าไปสะสมทีละเล็กละน้อย จะพบว่ามีอาการพอมลง น้ำหนักลด หอบ เหนื่อย ซึ่งอาการจะปรากฏใน 3 ถึง 11 ปี ภายหลังจากที่รับสารนี้เข้าไป อาการจะทรุดลงไปเรื่อย ๆ จนระยะสุดท้ายหายใจไม่ทัน และเกิดอาการหัวใจวายในที่สุด

การสัมผัสกับฝุ่นสารพิษเบอริลเลียมที่ผิวหนัง ทำให้เกิดการระคายเคือง เกิดการอักเสบของผิวหนังอย่างรวดเร็ว มีลักษณะคล้ายไฟไหม้ หรือเป็นผื่นตามตัว ถ้าสารนี้ถูกแผล แผลจะหายยาก กลายเป็นแผลลึก เรื้อรัง อาจถึงกับต้องตัดอวัยวะส่วนที่เกิดแผลออก หากฝุ่นสารเข้าตา จะทำให้เกิดเยื่อตาอักเสบ เป็นแผลที่ตา การมองเห็นจะด้อยลง

ทางการแพทย์เมื่อมีผู้ได้รับสารนี้เข้าไป และเกิดอาการทันที ให้รีบไปพบแพทย์ โดยเร็ว

การระวังป้องกัน สำหรับผู้ที่ต้องทำงานเกี่ยวข้องกับสารประเภทนี้ พยายามที่จะไม่รับเอาฝุ่นละออง หรือควันที่มีสารเข้าไปในร่างกาย

สรุปแล้ว เบอริลเลียม และสารประกอบของ เบอริลเลียม เป็นสารที่มีพิษร้ายต่อมนุษย์ เมื่อจำเป็นจะต้องใช้สารนี้เป็นส่วนประกอบของ RF Power Transistor เพราะมีคุณสมบัติที่ดีเยี่ยมในการเป็นฉนวนไฟฟ้า และทนความร้อนสูงมาก ช่างวิทยุ นักวิทยุ หรือผู้ที่เกี่ยวข้องกับอุปกรณ์เครื่องส่งวิทยุจะต้องระมัดระวังการที่จะทำให้เกิดฝุ่นละออง หรือควันของสารประเภทนี้ เพราะหากสูดหายใจเข้าไป หรือสัมผัสผิวหนัง การเย็บต่อต่าง ๆ ของร่างกาย จะทำให้เกิดปัญหาต่อผู้ที่ได้รับ ถึงแม้ว่าสารประเภทนี้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะมีปริมาณไม่มาก ก็ไม่ควรประมาท ควรระมัดระวังในการทำงาน จากหนังสือ VHF- UHF Manual ของสมาคมนักวิทยุสมัครเล่นอังกฤษ กล่าวว่า Beryllium Oxide เป็น Fired Ceramic ขณะจับถือเพื่อการใช้งานตามปกติ ค่อนข้างจะปลอดภัย ฝุ่นของมันเป็นอันตราย และหนังสือ Condensate Chemical Dictionary หน้าที่ 149-150 กล่าวว่า สารเบอริลเลียมเป็น Metal Powder ในการขนย้ายจะต้องติดป้าย เขียนกำกับว่า เป็นสารพิษ Class B.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

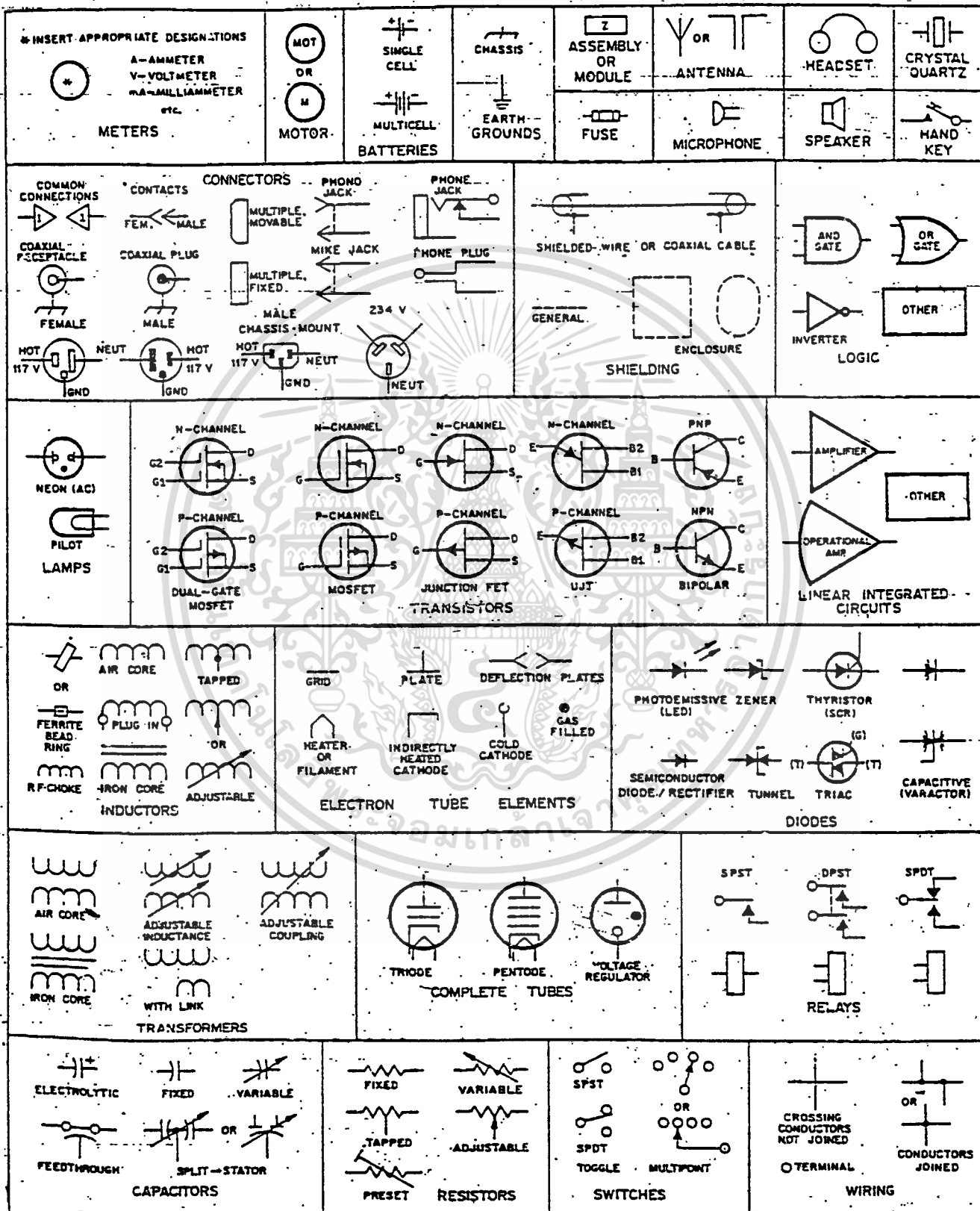
เอกสารอ้างอิง

- [1] Kirk A. Kleinschmidt, NTOZ "The ARRL Handbook for The Radio Amateur" Newington, CT 06111: American Radio Relay League, 1990
- [2] Rudolf F. Graf, "The Encyclopedia of Electronic Circuits" Blue Ridge Summit, PA 17214: TAB Books Inc., 1985
- [3] ชัชวาล โชติวารินทร์ "การออกแบบวงจรของควมถี่" เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์, ฉบับที่ 84-86, 2531
- [4] มิตติ พิณนิมิตร "การวัดคุณสมบัติวิทยุรับ-ส่ง" เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 106-110, 2534
- [5] อาณัติ พงษ์สุทธิรักษ์, วัชระ มนูญพร "ปรี่แอมป์วิทยุมือถือ 144 MHz" ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล "ออกแบบและสร้างบูสเตอร์แอมป์ 144 MHz 15 วัตต์" เซมิคอนดักเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ ฉบับที่ 99, 2533: ฉบับที่ 109-110, 2534



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Schematic Symbols Used in Circuit Diagrams



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความหมายของศัพท์ที่ใช้ในเครื่องรับ/ส่งวิทยุ

Simplex	:ระบบการรับ/ส่ง ผลัดกันพูด ผลัดกันฟัง
Duplex	:ระบบการรับ/ส่ง ที่พูดโต้ตอบกันได้ในเวลาเดียวกัน
Modulation	:ลักษณะการประทับคลื่นเสียงไปกับความถี่วิทยุ เช่น FM หรือ AM
Frequency Band	:ย่านความถี่การใช้งาน เช่น จาก 132 MHz ถึง 174 MHz
Channel	:ช่องความถี่ที่ใช้ในการรับ/ส่ง
Channel Spacing	:ระยะห่างทางความถี่แคบสุดของแต่ละช่อง (คือไม่น้อยกว่านี้) เช่น 25 kHz, 30 kHz
Frequency Spread (or Bandwidth)	:ระยะห่างความถี่กว้างสุด ระหว่างช่องแรกถึงช่องสุดท้าย ที่เครื่องยังทำงานได้ เช่น ถ้ามีค่า 20 MHz หมายความว่าเครื่องสามารถรับ/ส่ง อาจจะตั้งแต่ 150 MHz ถึง 170 MHz หรือจาก 140 MHz ถึง 160 MHz
Frequency Stability	:การเปลี่ยนแปลงของความถี่ที่เกิดจากสภาวะแวดล้อม หรือเงื่อนไขต่าง ๆ
Impedance	:ความต้านทานทางโพลล์ของวงจร
RF Power Output	:กำลังส่งออกอากาศ
AF Power Output	:กำลังขยายทางความถี่เสียงของภาครับ
Duty Cycle	:ช่วงการทำงาน เช่น แบบต่อเนื่องสามารถใช้งานได้ตลอด 24 ชั่วโมง หรือทำงานเป็นช่วง ๆ
Audio Distortion	:ความผิดเพี้ยนของสัญญาณเสียง
Spurious	:สัญญาณที่มีความถี่แตกต่างไปจากความถี่รับหรือส่ง ซึ่งเป็นสัญญาณที่ไม่ต้องการ
Audio Response	:ความราบเรียบของสัญญาณเสียงในแต่ละความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษานั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Deviation	: ความเบี่ยงเบนความถี่ของภาคส่ง ในการ ปรับคลื่นแบบ FM
Sensitivity	: ความไวภาครับ ค่าความไวนี้ จะกำหนดได้ 2 อย่าง คือ - ความไวที่ 12 dB SINAD - ความไวที่ 20 dB Quieting ความไวที่ 12 dB SINAD = Log Signal + Noise + Distortion เป็นการวัดความไวที่จุดเทียบกัน ระหว่างมี สัญญาณ กับ ไม่มีสัญญาณ ซึ่งผลที่ได้จะมีความ หมายมากกว่าการวัดที่ 20 dB Quieting เนื่องจากวิธีหลังนี้ เป็นการวัดโดยไม่ใช่ สัญญาณเสียงที่ผสมมา กับ คลื่นพาห์ (Car- rier Wave) คือวัดโดยการบ่อนสัญญาณ ความถี่คลื่นพาห์มา โดด ๆ เท่านั้น
Squelch Sensitivity	: มี 2 ค่า คือ ค่าความไวที่จุด Squelch เริ่มปิด คือ ไม่มีเสียงซ่า (Threshold Squelch) และ ความไวที่จุด Squelch ปิดสูงสุด (Tight Squelch)
Hum and Noise	: สัญญาณรบกวนความถี่เสียงที่ไม่ต้องการจะ ปรากฏ ทั้งในภาครับและภาคส่ง
Selectivity	: ความสามารถของการแยกคลื่นความถี่ที่ต้อง การ ออกจากสัญญาณความถี่อื่น ๆ
Intermodulation	: สัญญาณที่เกิดจากการผสมคลื่นที่เกิดขึ้นเองใน วงจรขยายสัญญาณต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้อง การให้เกิดขึ้น
Image Rejection	: ความสามารถของเครื่อง ในการตัดสัญญาณ ความถี่ที่เป็นผลต่างและผลบวกของความถี่ คลื่นพาห์ กับ 2 เท่าของความถี่ IF
Modulation Acceptance	: ความสามารถของเครื่องรับ ที่จะรับสัญญาณ ที่มีความถี่เบี่ยงเบนสูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

VSWR

: ย่อมาจาก Voltage Standing Wave Ratio (อัตราส่วนระหว่างแรงดันสูงสุดและแรงดันต่ำสุด เมื่อวัดไปตามสายส่งกำลัง นั่นคือ $VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}}$ แต่ในทางปฏิบัติ

$$V_{min}$$

โดยเฉพาะย่านความถี่ตั้งแต่ HF ถึง VHF วิธีการวัดดังกล่าวนี้ทำได้ยาก และไม่สะดวก จึงนิยมวัดจากกำลังที่ปรากฏทั้ง 2 ทิศทาง คือ วัดกำลังส่งออกไปยังเสาอากาศ (P_i) และกำลังส่งซึ่งเกิดการสะท้อนกลับ (P_r) ซึ่งเกิดจากความไม่ Match กันของเสาอากาศ กับภาคขยายกำลัง

$$VSWR = 1$$

P_i = Incident Power : กำลังในทิศ
ทางไปข้างหน้า

P_r = Reflected Power : กำลังในทิศ
ทางสะท้อนกลับ

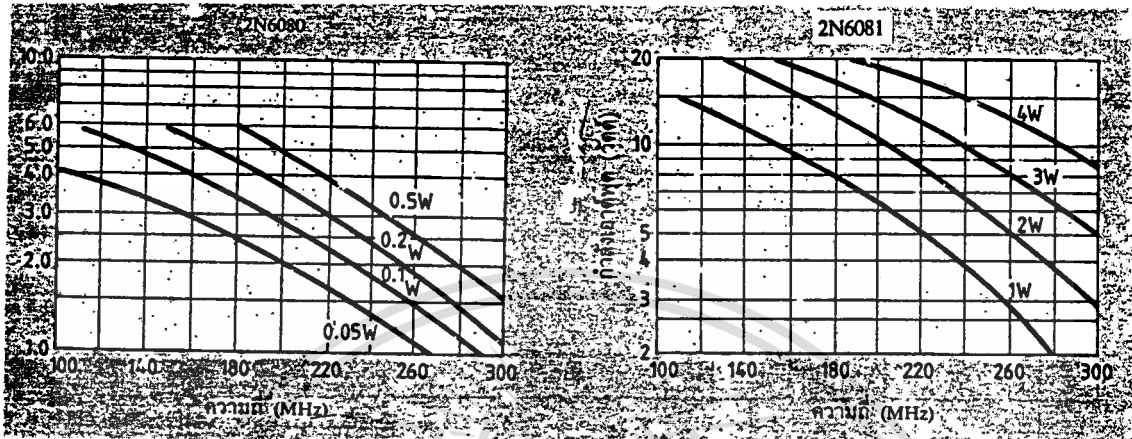


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2N 6068 A ... 2N 6147

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18		
K	Typ	Hersteller	Mo	PN	Fe	Al	U _{max} [V]	U _{max} [mA]	P _{tot} [mW]	f _f [mA]	U _S [V]	f _f [mA]	f ₅₀ [μA]	F [dB]	C [pF]	f _B [MHz]	t [ms]	Bemerkung	
R	2N 6068 A	Mo	S	PN	25	D													
R	2N 6068 B	Mo	S	PN	25	D													
	bis																		
R	2N 6075	Mo	S	PN	25	D													
R	2N 6075 A	Mo	S	PN	25	D													
R	2N 6075 B	Mo	S	PN	25	D													
T	2N 6076	GE	S	P	54	A	25	100	360	100...500	10	<0,25	10	<0,1	<13	200		kpl.2N 5172	
T	2N 6077	RC	S	N	15	A	275	10A	45W*	12...70	1,2A	<1,0	3A	<5m*	<150	>1	<750*	7)	
T	2N 6078	RC	S	N	15	A	250	10A	45W*	12...70	1,2A	<3,0	5A	<50*	<150	>1	<750*	7)	
T	2N 6079	RC	S	N	15	A	350	10A	45W*	12...50	1,2A	<3,0	4A	<500*	<150	>1	<750*	7)	
T	2N 6080	Mo	S	N	283	A	18	(1A)	12W*	>5	250		<250	[>12]	<20			37,42:4W)	
T	2N 6081	Mo	S	N	283	A	18	(2,5A)	31W*	>5	500		<500	[>6,3]	<85			37,42:15W)	
T	2N 6082	Mo	S	N	283	A	18	(4A)	65W*	>5	1A		<1m	[>6,2]	<130			37,42:25W)	
T	2N 6083	Mo	S	N	283	A	18	(4A)	65W*	>5	1A		<1m	[>5,7]	<130			37,42:30W)	
T	2N 6084	Mo	S	N	283	A	18	(6A)	80W*	>5	1A		<2,5m	[>4,5]	<200			37,42:40W)	
T	2N 6085	TS	S	N	42	A	45	30	800	>60	10μ		<10n		<3	>60		14:10mV,17:>0,7,24)	
T	2N 6086	TS	S	N	42	A	45	30	800	>150	10μ		<10n		<3	>60		14:10mV,17:>0,7,24)	
T	2N 6087	TS	S	N	42	A	45	30	800	>60	10μ		<10n		<3	>60		14:3mV,17:>0,9,24)	
T	2N 6088	TS	S	N	42	A	45	30	800	>150	10μ		<10n		<3	>60		14:3mV,17:>0,8,24)	
T	2N 6089	TS	S	N	42	A	45	30	800	>60	10μ		<10n		<3	>60		14:5mV,17:>0,8,24)	
T	2N 6090	TS	S	N	42	A	45	30	800	>150	10μ		<10n		<3	>60		14:5mV,17:>0,8,24)	
T	2N 6091	TS	S	N	42	A	60	30	600	>60	10μ		<2n		<3	>60		14:3mV,17:>0,9,24)	
T	2N 6092	TS	S	N	42	A	60	30	600	>150	10μ		<2n		<3	>60		14:3mV,17:>0,9,24)	
T	2N 6093	RC	S	N	269	A	35	30A	83W*	>20	5A		<30m	[>13]	<250	>100		42:75W 51)	
T	2N 6094	Mo	S	N	258	A	18	(1A)	8W*	>5	250		<250	[>12]	<20			37,42:4W)	
T	2N 6095	Mo	S	N	258	A	18	(2,5A)	20W*	>15	500		<500	[>6,3]	<120			37,42:15W)	
T	2N 6096	Mo	S	N	258	A	18	(4A)	40W*	>15	500		<1m	[>5,7]	<190			37,42:30W)	
T	2N 6097	Mo	S	N	258	A	18	(6A)	60W*	>15	500		<2,5m	[>4,5]	<400			37,42:40W)	
T	2N 6098	AC,RC	S	N	30	A	60	10A	75W*	20...80	4A	<2,5	10A	<2m*				4)	
T	2N 6099	AC,RC	S	N	29	A	60	10A	75W*	20...80	4A	<2,5	10A	<2m*				4)	
T	2N 6100	AC,RC	S	N	30	A	70	10A	75W*	20...80	5A	<2,5	10A	<2m*				4)	
T	2N 6101	AC,RC	S	N	29	A	70	10A	75W*	20...80	5A	<2,5	10A	<2m*				4)	
T	2N 6102	AC,RC	S	N	36	A	40	16A	75W*	15...60	8A	<2,5	16A	<2m*				4)	
T	2N 6103	AC,RC	S	N	29	A	40	16A	75W*	15...60	8A	<2,5	16A	<2m*				4)	
T	2N 6104	RC	S	N	271	A	30	4,5A	36W*	10...200	500		<10m	[>5]	<35			31,37,42:30W)	
T	2N 6105	RC	S	N	270	A	30	4,5A	36W*	10...200	500		<10m	[>5]	<35			31,37,42:30W)	
T	2N 6106	RC	S	P	30	A	70	(7A)	40W*	30...150	2A	<1,0	2A	<100*		>10		4),kpl.2N 6293	
T	2N 6107	RC	S	P	29	A	70	(7A)	40W*	30...150	2A	<1,0	2A	<100*		>10		4),kpl.2N 6292	
T	2N 6108	RC	S	P	30	A	50	(7A)	40W*	30...150	2,5A	<1,0	2,5A	<100*		>10		4),kpl.2N 6291	
T	2N 6109	RC	S	P	29	A	50	(7A)	40W*	30...150	2,5A	<1,0	2,5A	<100*		>10		4),kpl.2N 6290	
T	2N 6110	RC	S	P	30	A	30	(7A)	40W*	30...150	3A	<1,0	3A	<100*		>10		4),kpl.2N 6289	
T	2N 6111	RC	S	P	29	A	30	(7A)	40W*	30...150	3A	<1,0	3A	<100*		>10		4),kpl.2N 6288	
T	2N 6112	UI	S	N	245	A	30		360	>185	2		<10n		<10	>160			
U	2N 6114	Mo	S	PN	6	K													
U	2N 6115	Mo	S	PN	6	K													
U	2N 6116	Mo	S	PN	6	I													
U	2N 6117	Mo	S	PN	6	I													
U	2N 6118	Mo	S	PN	6	I													
T	2N 6121	Fd	S	N	29	A	45	(4A)	40W*	25...100	1,5A	<0,6	1,5A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6124	
T	2N 6122	Fd	S	N	29	A	60	(4A)	40W*	25...100	1,5A	<0,6	1,5A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6125	
T	2N 6123	Fd	S	N	29	A	80	(4A)	40W*	30...80	1,5A	<0,6	1,5A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6126	
T	2N 6124	Fd	S	P	29	A	45	(4A)	40W*	25...100	1,5A	<0,6	1,5A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6121	
T	2N 6125	Fd	S	P	29	A	60	(4A)	40W*	25...100	1,5A	<0,6	1,5A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6122	
T	2N 6126	Fd	S	P	29	A	80	(4A)	40W*	20...80	1,5A	<0,6	1,5A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6123	
T	2N 6127	Tx	S	P	5	B	80	20A	(67W)	30...120	5A	<2,2	10A	<1m		<500	>40		kpl.2N 6128
T	2N 6128	Tx	S	N	5	B	80	20A	(67W)	30...120	5A	<2,2	10A	<1m		<275	>50		kpl.2N 6127
T	2N 6129	Fd	S	N	29	A	40	(7A)	50W*	20...100	2,5A	<1,4	7A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6132	
T	2N 6130	Fd	S	N	29	A	60	(7A)	50W*	20...100	2,5A	<1,4	7A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6133	
T	2N 6131	Fd	S	N	29	A	80	(7A)	50W*	20...100	2,5A	<1,8	7A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6134	
T	2N 6132	Fd	S	P	29	A	40	(7A)	50W*	20...100	2,5A	<1,4	7A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6129	
T	2N 6133	Fd	S	P	29	A	60	(7A)	50W*	20...100	2,5A	<1,4	7A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6130	
T	2N 6134	Fd	S	P	29	A	80	(7A)	50W*	20...100	2,5A	<1,8	7A	<100		>2,5		4),kpl.2N 6131	
T	2N 6136	Mo	S	N	283	A	18	(6A)	60W*	>20	1A		<20m	[>4]	<70			37,42:25W)	
R	2N 6139	Mo	S	PN	264	A													
	bis																		
R	2N 6141	Mo	S	PN	264	A													
R	2N 6142	Mo	S	PN	265	A													
	bis																		
R	2N 6144	Mo	S	PN	265	A													
R	2N 6145	Mo	S	PN	261	B													
	bis																		
R	2N 6147	Mo	S	PN	261	B													

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Frequency MHz	Z_{in} ohms	Z_{out} ohms	Frequency MHz	Z_{in} ohms	Z_{out} ohms
130	3.18-j4.30	9.50-j7.00	130	1.64 + j0.15	3.90-j2.45
140	3.18-j3.70	10.11-j6.32	140	1.73 + j0.44	4.03-j2.16
150	3.18-j3.10	10.70-j5.60	150	1.80 + j0.76	4.18-j1.88
160	3.17-j2.50	11.30-j4.85	160	1.92 + j1.00	4.32-j1.60
170	3.17-j1.96	11.94-j4.13	170	2.02 + j1.31	4.45-j1.30
180	3.17-j1.35	12.50-j3.50	180	2.12 + j1.62	4.60-j1.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

The RF Line N-Channel Dual-Gate GaAs Field-Effect Transistor

... depletion mode dual-gate MES FET designed for high frequency amplifier and mixer applications.

- Excellent Receiver Front End
- Low Noise Figure — $NF = 1.2$ dB, 1 GHz (Typ)
- High Power Gain — $G_p = 17$ dB, 1 GHz (Typ)
- Low Reverse Transfer Capacitance — $C_{rss} = 40$ fF (Typ)
- High Transconductance — $g_m = 20$ mS (Typ)
- Fully Characterized
- Gold Metallization

MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MRFC966	MRF966	Unit
Drain-Source Voltage	V_{DS}	10	10	Vdc
Gate-Source Voltage — Reverse	V_{G1S} V_{G2S}	-8 -8	-8 -8	Vdc
Gate-Source Voltage — Forward	V_{G1S} V_{G2S}	+1 +1	+1 +1	Vdc
Drain Current — Continuous	I_D	30	80	mAdc
Total Power Dissipation ($T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C)	P_D	350 $T_J = 125^\circ\text{C Max}$	350 3.5	mW mW/°C
Storage Channel Temperature Range	T_{stg}	-65 to +125	-65 to +125	°C
Junction Temperature Range	T_J	-65 to +125	-65 to +125	°C

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
----------------	--------	-----	-----	-----	------

OFF CHARACTERISTICS

Drain-Source Breakdown Voltage ($V_{G1S} = V_{G2S} = -4.5$ Vdc, $I_D = 100$ μA)	$V_{(BR)DSX}$	10	—	—	Vdc
Gate 1-to-Source Cutoff Voltage ($V_{DS} = 5$ Vdc, $V_{G2S} = 0$, $I_D = 500$ μA)	$V_{G1S(off)}$	-2	—	-4.5	Vdc
Gate 2-to-Source Cutoff Voltage ($V_{DS} = 5$ Vdc, $V_{G1S} = 0$, $I_D = 500$ μA)	$V_{G2S(off)}$	-2	—	-4.5	Vdc
Gate 1 Leakage Current ($V_{G1S} = -5$ Vdc, $V_{G2S} = V_{DS} = 0$)	I_{G1SS}	—	—	10	μAdc
Gate 2 Leakage Current ($V_{G2S} = -5$ Vdc, $V_{G1S} = V_{DS} = 0$)	I_{G2SS}	—	—	10	μAdc

ON CHARACTERISTICS

Zero-Gate Voltage Drain Current ($V_{DS} = 5$ Vdc, $V_{G1S} = V_{G2S} = 0$)	I_{DSS}	30	50	80	mAdc
--	-----------	----	----	----	------

SMALL-SIGNAL CHARACTERISTICS

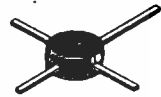
Transconductance ($V_{DS} = 5$ Vdc, $V_{G2S} = 0$, $I_D = 10$ mA, $f = 1$ kHz)	g_m	18	20	—	mS
Input Capacitance ($V_{DS} = 5$ Vdc, $V_{G2S} = 0$, $I_D = 10$ mA, $f = 1$ MHz)	C_{iss}	—	1.5	—	pF
Reverse Transfer Capacitance ($V_{DS} = 5$ Vdc, $V_{G2S} = 0$, $I_D = 10$ mA, $f = 1$ MHz)	C_{rss}	—	0.04	—	pF

Handling and Packaging — MES devices are susceptible to damage from electrostatic charge. Reasonable precautions in handling and packaging MES devices should be observed.

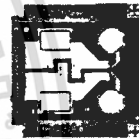
(continued)

**MRF966
MRFC966**

**N-CHANNEL
DUAL-GATE
GaAs FIELD-EFFECT
TRANSISTOR**



MRF966
CASE 317-01, STYLE 1



CHIP
MRFC966

MRF966, MRFC966

ELECTRICAL CHARACTERISTICS — continued ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
FUNCTIONAL CHARACTERISTICS					
Noise Figure(1) ($V_{DS} = 5\text{ Vdc}$, $V_{GS2} = 0$, $I_{DS} = 10\text{ mA}$, $f = 1\text{ GHz}$)	NF	—	1.2	1.5	dB
Common Source Power Gain(1) ($V_{DS} = 5\text{ Vdc}$, $V_{GS2} = 0$, $I_{DS} = 10\text{ mA}$, $f = 1\text{ GHz}$)	G_{ps}	15	17	—	dB
Intermodulation Distortion ($V_{DS} = 5\text{ Vdc}$, $I_{DS} = 10\text{ mA}$, $f_1 = 995\text{ MHz}$, $f_2 = 1001\text{ MHz}$, $V_{G2} = 0$, $P_{in} = -40\text{ dBm}$)	IMD_3	—	-65	—	dB
Linear Power Point(2) ($V_{DS} = 5\text{ Vdc}$, $I_{DS} = 10\text{ mA}$, $f_1 = 995\text{ MHz}$, $f_2 = 1001\text{ MHz}$, $V_{G2} = 0$)	P_L	—	+1	—	dBm
Output Power at 1 dB Compression Point ($V_{DS} = 5\text{ Vdc}$, $I_{DS} = 10\text{ mA}$, $f = 1\text{ GHz}$)	P_{out}	—	10	—	dBm

NOTES:

1. Data taken using a 50 Ω test fixture, Microlab SF31N slug tuners, HP11590B bias networks and the HP8970A or Eaton 2075 noise figure meter.
Note: $V_{GS2} = 0$. Refer to Figure 11.
2. The linear power point is the output power level at which either the signal $2f_1 \approx f_2$ or $2f_2 \approx f_1$ are 30 dB below f_1 or f_2 .

TYPICAL CHARACTERISTICS

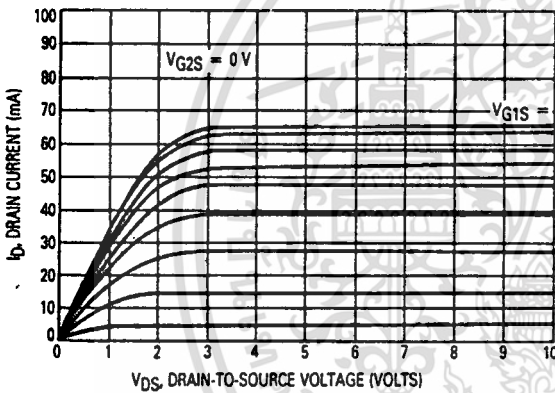


Figure 1. Drain Current versus Drain-To-Source Voltage

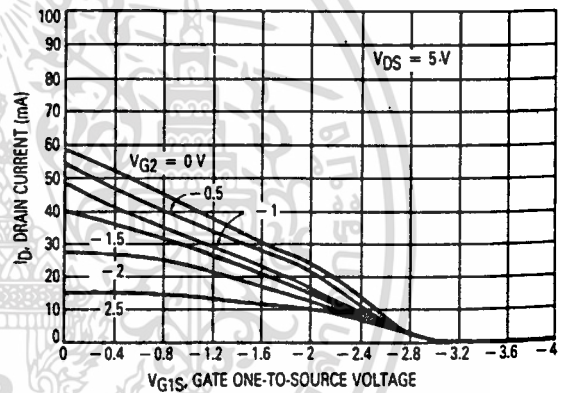


Figure 2. Drain Current versus Gate One-To-Source Voltage

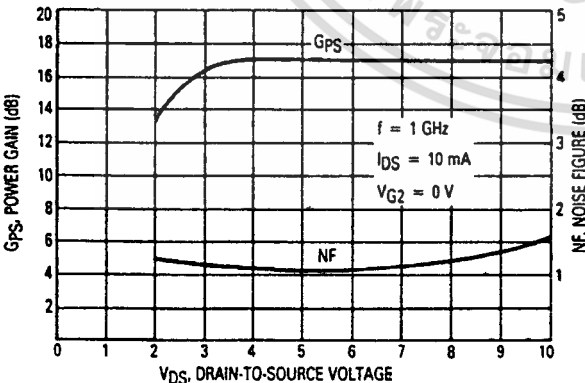


Figure 3. Power Gain and Noise Figure versus Drain-To-Source Voltage

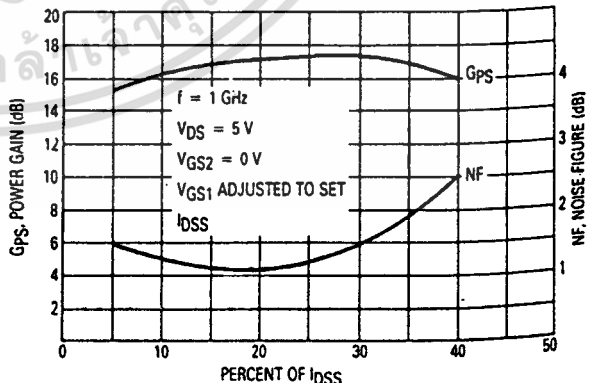


Figure 4. Power Gain and Noise Figure versus Percent of I_{DS}

MRF966, MRFC966

TYPICAL CHARACTERISTICS

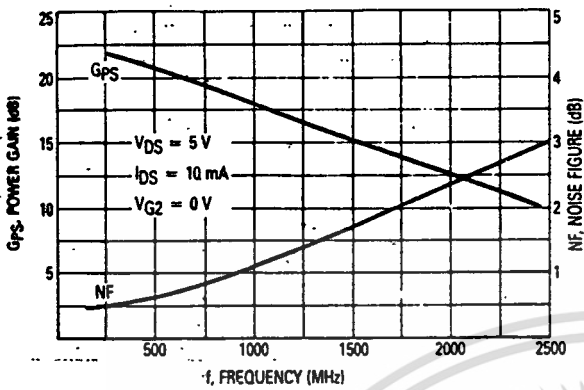


Figure 5. Power Gain and Noise Figure versus Frequency

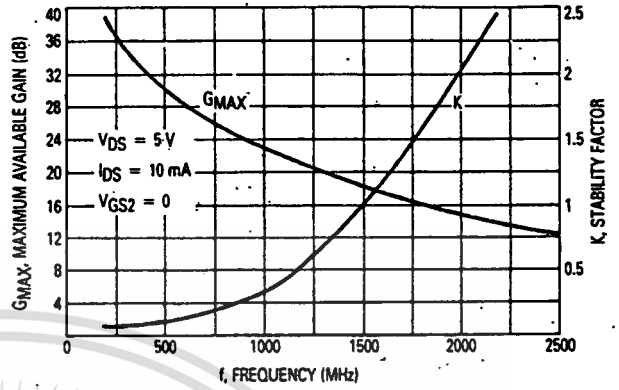


Figure 6. Maximum Available Gain and Stability Factor versus Frequency

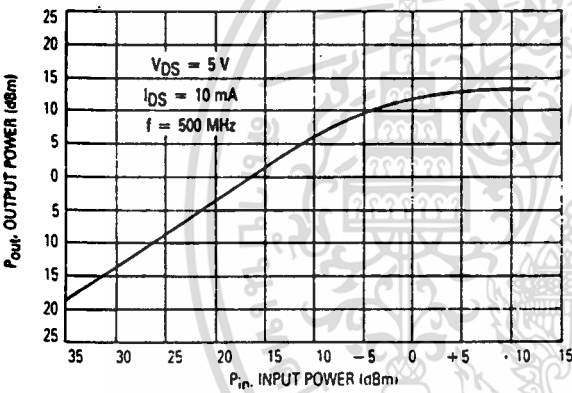


Figure 7. Output Power versus Input Power @ 500 MHz

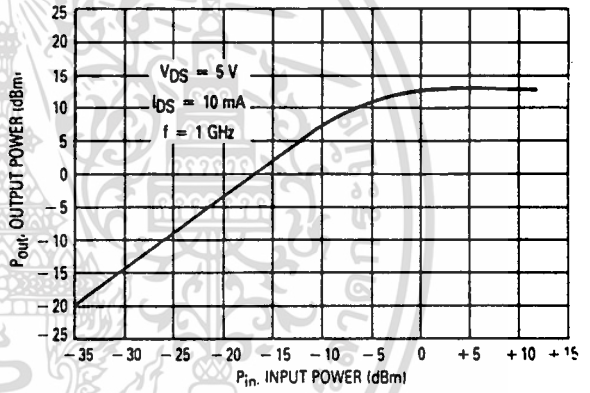


Figure 8. Output Power versus Input Power @ 1 GHz

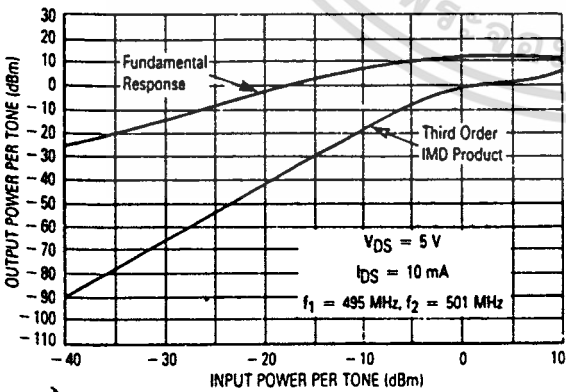


Figure 9. Third Order Intermodulation Distortion @ 500 MHz

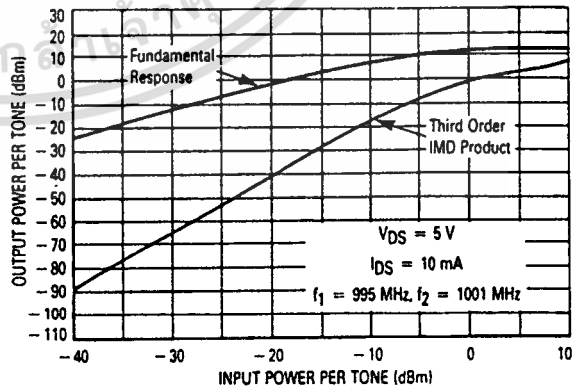


Figure 10. Third Order Intermodulation Distortion @ 1 GHz

MRF966, MRFC966

COMMON SOURCE S-PARAMETERS

V _{DS} (Volts)	I _{DS} (mA)	f (MHz)	S ₁₁		S ₂₁		S ₁₂		S ₂₂		
			S ₁₁	∠φ	S ₂₁	∠φ	S ₁₂	∠φ	S ₂₂	∠φ	
3	5	200	0.997	-5.7	1.251	172.1	0.003	88.3	0.944	-6.4	
		500	0.983	-14.3	1.23	161.2	0.007	84.6	0.931	-16	
		1000	0.941	-28.3	1.201	142.4	0.013	78.5	0.9	-32.2	
		1500	0.866	-42.3	1.133	122	0.016	70.4	0.836	-49.6	
		2000	0.762	-55.4	1.011	101.1	0.018	56.2	0.744	-67.5	
		2500	0.642	-66.4	0.819	77.4	0.015	25.5	0.608	-87.5	
	10	200	200	0.995	-6.2	1.60	172.0	0.002	84.1	0.93	-6.3
			500	0.981	-15.1	1.58	161.3	0.007	82.5	0.92	-15.8
			1000	0.928	-29.9	1.55	142.9	0.013	81.5	0.90	-31.8
			1500	0.838	-44.4	1.46	122.3	0.016	74.7	0.84	-49.4
			2000	0.716	-57.7	1.31	101.2	0.018	60.1	0.76	-68.4
			2500	0.584	-67.5	1.06	77.4	0.015	26.7	0.63	-89.8
		15	200	0.996	-6.3	1.83	172.0	0.002	76.4	0.93	-6.3
			500	0.979	-15.7	1.80	161.2	0.006	91.5	0.92	-15.6
			1000	0.921	-30.9	1.76	142.3	0.012	82.3	0.90	-31.6
			1500	0.820	-45.9	1.66	121.7	0.016	76.1	0.85	-49.1
			2000	0.689	-58.7	1.48	100.6	0.016	64.1	0.77	-68.2
			2500	0.552	-67.4	1.20	76.7	0.013	28.9	0.65	-90.3
		20	200	0.995	-6.5	1.97	171.9	0.003	85.7	0.92	-6.2
			500	0.977	-16.2	1.93	160.7	0.007	89.0	0.91	-15.3
			1000	0.910	-32.0	1.89	141.7	0.011	84.0	0.89	-31.0
			1500	0.804	-47.1	1.79	120.9	0.016	78.3	0.85	-48.4
			2000	0.669	-59.7	1.59	99.6	0.017	66.2	0.78	-67.4
			2500	0.531	-67.7	1.29	75.8	0.012	32.7	0.66	-89.2
5	5	200	0.997	-5.8	1.27	172.8	0.002	102.6	0.97	-3.8	
		500	0.983	-14.3	1.26	162.6	0.004	82.3	0.97	-9.4	
		1000	0.939	-28.4	1.24	146.0	0.006	93.4	0.96	-18.8	
		1500	0.866	-42.6	1.21	128.4	0.008	102.6	0.95	-28.3	
		2000	0.765	-53	1.14	111.6	0.007	137.7	0.93	-37.6	
		2500	0.642	-68.4	1.05	93.1	0.012	-179.0	0.92	-47.0	
	10	200	0.966	-6.0	1.61	172.8	0.002	88.1	0.97	-3.8	
		500	0.982	-15.1	1.59	162.8	0.004	85.8	0.97	-9.4	
		1000	0.928	-29.9	1.57	146.1	0.006	94.6	0.96	-18.6	
		1500	0.841	-44.6	1.53	128.7	0.006	110.4	0.94	-28.0	
		2000	0.724	-58.3	1.42	111.6	0.008	152.6	0.93	-37.0	
		2500	0.589	-69.4	1.30	93.3	0.014	179.1	0.92	-46.3	
	15	200	0.997	-6.2	1.82	172.6	0.001	103.2	0.97	-3.7	
		500	0.979	-15.6	1.80	162.5	0.003	85.3	0.96	-9.3	
		1000	0.920	-30.8	1.77	145.6	0.005	92.4	0.95	-18.4	
		1500	0.824	-45.8	1.72	127.9	0.007	116.3	0.94	-27.3	
		2000	0.699	-59.2	1.59	110.8	0.008	154.1	0.93	-36.3	
		2500	0.560	-69.6	1.44	92.6	0.017	176.2	0.92	-45.4	
	20	200	0.995	-6.5	1.96	172.4	0.002	85.9	0.97	-3.7	
		500	0.977	-16.1	1.93	162.1	0.004	80.9	0.96	-9.1	
		1000	0.913	-31.7	1.90	144.9	0.005	92.1	0.95	-17.9	
		1500	0.810	-47.0	1.83	126.9	0.007	121.4	0.94	-26.9	
		2000	0.679	-60.4	1.69	109.7	0.009	153.4	0.93	-35.6	
		2500	0.538	-70.0	1.53	91.4	0.017	176.0	0.93	-44.6	

MRF966, MRFC966

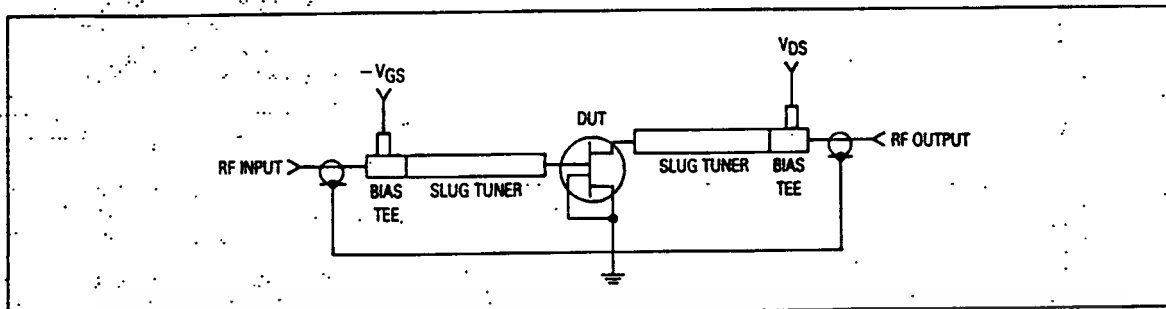
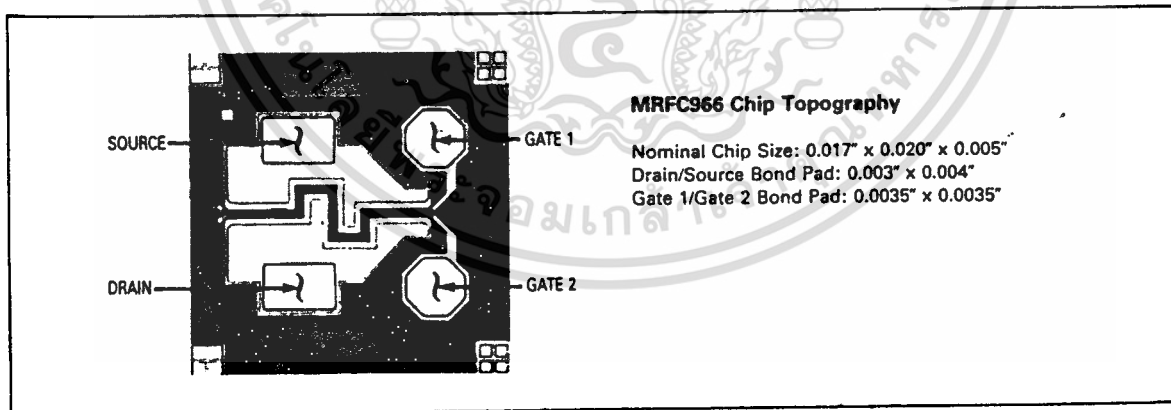


Figure 11. 1 GHz Test Circuit Schematic

TYPICAL CHARACTERISTICS

f (MHz)	GNF (dB)	NF (dB)	$\Gamma_{MS} NF_{opt}$	$\Gamma_{ML} NF_{opt}$
450	20	0.6	0.82 /21°	0.80 /11°
1000	17	1.2	0.74 /21°	0.77 /12°

Figure 12. Source and Load Impedance for Optimum Noise Figure





Voltage Regulators

LM78LXX series three terminal positive regulators

general description

The LM78LXX series of three terminal positive regulators is available with several fixed output voltages making them useful in a wide range of applications. When used as a zener diode/resistor combination replacement, the LM78LXX usually results in an effective output impedance improvement of two orders of magnitude, and lower quiescent current. These regulators can provide local on card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. The voltages available allow the LM78LXX to be used in logic systems, instrumentation, HiFi, and other solid state electronic equipment. Although designed primarily as fixed voltage regulators these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

The LM78LXX is available in the metal three lead TO-5 (H) and the plastic TO-92 (Z). With adequate heat sinking the regulator can deliver 100 mA output current. Current limiting is included to limit the peak output current to a safe value. Safe area protection for the output transistor is provided to limit internal power dissipation. If internal power dissipation becomes

too high for the heat sinking provided, the thermal shutdown circuit takes over preventing the IC from overheating.

features

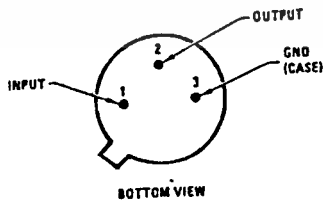
- Output voltage tolerances of $\pm 5\%$ (LM78LXXAC) and $\pm 10\%$ (LM78LXXC) over the temperature range
- Output current of 100 mA
- Internal thermal overload protection
- No external components required
- Output transistor safe area protection
- Internal short circuit current limit
- Available in plastic TO-92 and metal TO-39 low profile packages

voltage range

LM78L05	5V	LM78L15	15V
LM78L08	8V	LM78L18	18V
LM78L12	12V	LM78L24	24V

connection diagrams

TO-5 (H)

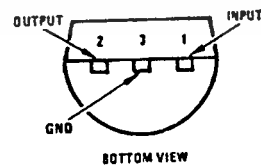


Order Numbers:

LM78L05ACH	LM78L05CH
LM78L08ACH	LM78L08CH
LM78L12ACH	LM78L12CH
LM78L15ACH	LM78L15CH
LM78L18ACH	LM78L18CH
LM78L24ACH	LM78L24CH

See Package 9

TO-92 (Z)



Order Numbers:

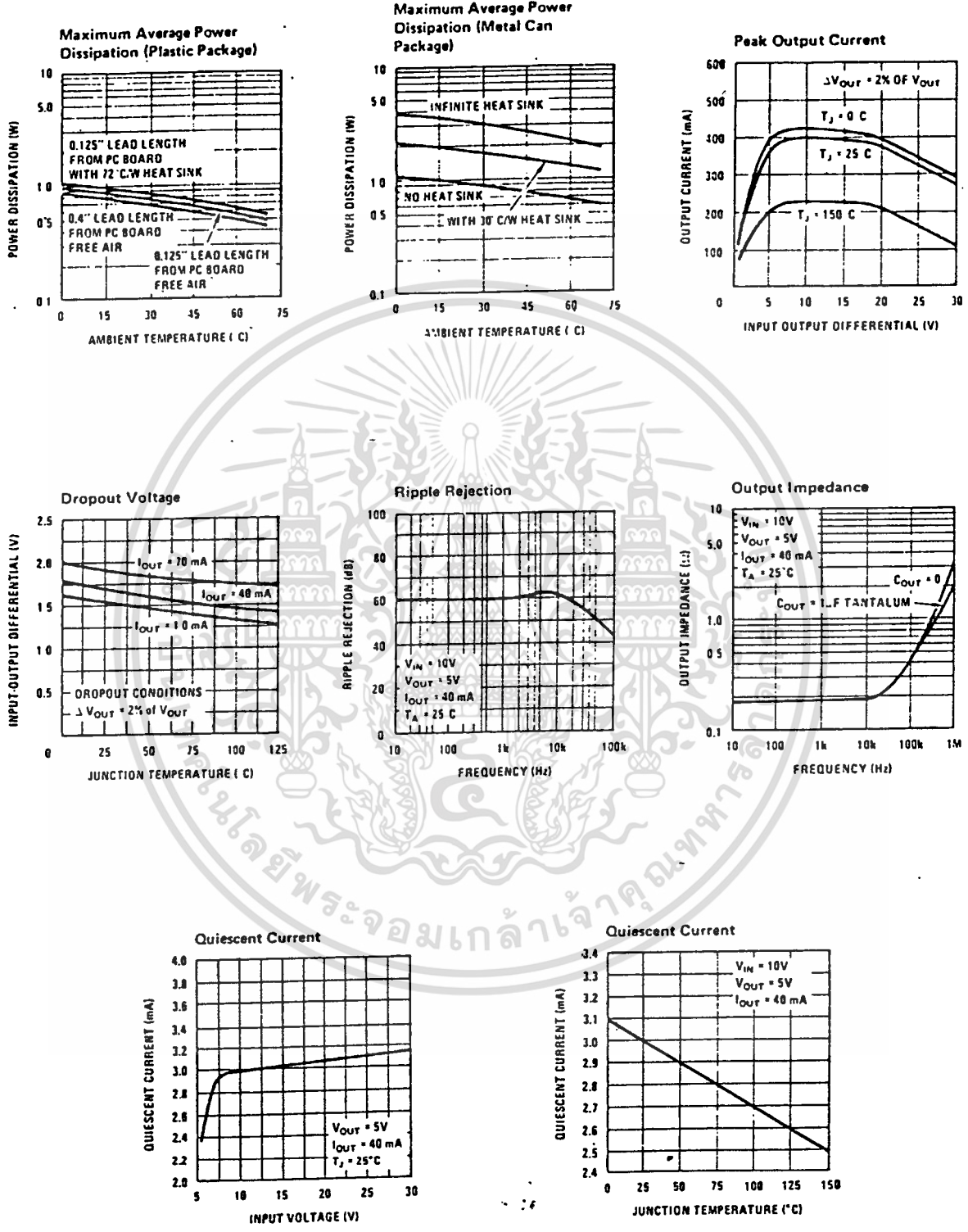
LM78L05ACZ	LM78L05CZ
LM78L08ACZ	LM78L08CZ
LM78L12ACZ	LM78L12CZ
LM78L15ACZ	LM78L15CZ
LM78L18ACZ	LM78L18CZ
LM78L24ACZ	LM78L24CZ

See Package 38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตด้วยประการใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

typical performance characteristics

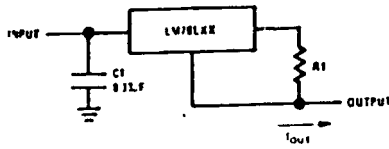
3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามเผยแพร่เนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

typical applications (con't)

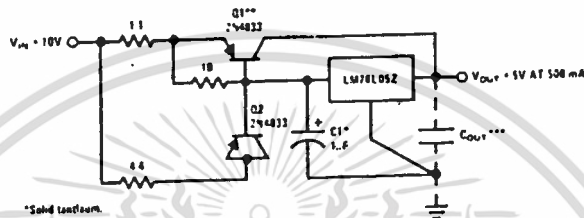
5



$$I_{out} = (V_{reg} / R1) + I_q$$

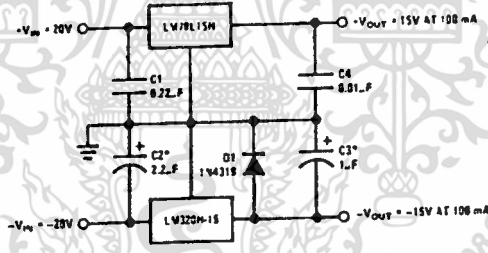
$I_q = 1.5 \text{ mA}$ - A zero load and load charges

Current Regulator

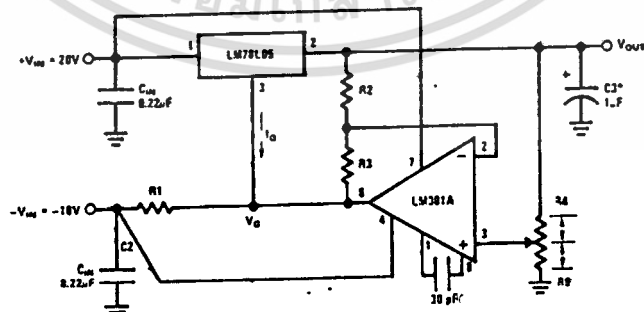


*Solid tantalum.
 **Heat sink Q1
 ***Optional: Improves ripple rejection and transient response.
 Load Regulation 0.5% @ $I_L = 250 \text{ mA}$ during $t_{ON} = 50 \text{ ms}$.

5V, 500 mA Regulator with Short Circuit Protection



±15V, 100 mA Dual Power Supply



*Solid tantalum.
 $V_{out} = V_Q + 5V, R1 = (-V_{in} / I_Q) + (R2/R3)$
 $V_{out} = 5V (R2/R4) + (R2/R3) + (R4/R5)$
 A 0.5V output will correspond to: $(R2/R4) = 0.1, (R3/R4) = 0.9$

Variable Output Regulator 0.5V - 18V

เอกสารนี้เป็นเอกสารทสงวนวสหาหรับการใชงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. SILICON NPN - LOW POWER TRANSISTORS

IN ORDER OF (1) MAX COLLECTOR DISSIPATION
(2) fab & (3) TYPE No.

LINE No.	TYPE No.	MAX. COLL. DISS. @ 25°C (W)	fab	OPERATE IN FREE AIR W/C (Hz)	MAMP	ABS. MAX. RATINGS @ 25°C				MAX. I _c @ MAX V _{cb} (A)	TYPICAL h _{FE} PARAMETERS			COMMON EMITTER			Cob (F)	STRUCTURE	DWG No. s/a TO2000 Ser.	L E A D E
						V _{cb} (V)	V _{ce} (V)	V _{be} (V)	I _c (A)		V _{cb} (V)	I _e (A)	h _{FE}	h _{FE} (mhos)	h _{FE} (Ω)	h _{FE} (X.0001)				
1	6003	250m	150MΔ			25	25	4.0	500m	5.00	50mΩ	30 Δ						10108	A	
2	K917	250m	150MΔ			20	20	5.0	50m	5.00	1.0mΩ	29 Δ						1092	A	
3	NPC089	250m	150MΔ	2.5m	ΔS	50	40	5.0	100m	8.00	1.0mΩ	40 Δ						1082	A	
4	NPC089-98	250m	150MΔ	2.5m	ΔS	50	40	5.0	100m	8.00	1.0mΩ	40 Δ						1046	A	
5	MRF528	250m	175MΔ	2.5m	ΔS	25	14	3.5	1m	7.50	20mΩ	40 Δ						1018	A	
6	2N957	250m	200MΔ	2.0m	ΔJ	40	20	5.0	100m	5.00	100mΩ	43 Δ						1018	A	
7	2N30521	250m	200MΔ	1.8m	ΔS	35	15	5.0	200m	2.00	10mΩ	25 Δ						1089	B	
8	2N3825	250m	200MΔ	2.5m	ΔS	30	15	4.0	100m	100m	2.0mΩ	20 Δ						1092	B	
9	25C123	250m	200MΔ	1.7m	ΔJ	40	25	1.0	25m	100m	1.0m	140						1039	B	
10	25C135A1	250m	200MΔ	2.0m	ΔJ	20	12	5.0	400m	1.00	10mΩ	80 Δ						1018	A	
11	25C7141	250m	200MΔ	2.5m	ΔJ	70	40	5.0	200m	1.00	10mΩ	80 Δ						1092	B	
12	25C815	250m	200MΔ	2.5m	ΔJ	60	45	5.0	200m	1.00	50mΩ	60 Δ						1822b	B	
13	25C9441	250m	200MΔ	2.5m	ΔJ	60	40	8.0	100m	100m	2.0mΩ	70 Δ						1092	B	
14	25C963	250m	200MΔ	1.8m	ΔJ	35	25	4.0	50m	6.00	1.0mΩ	100			50			R213	A	
15	25C2009	250m	200MΔ		ΔJ	35	35	3.0	100m	200m	3.00	100mΩ						199f	A	
16	BF195C	250m	200MΔ			30	20	5.0	30m	100m	1.00	10mΩ						XXXXX	C	
17	BF195D	250m	200MΔ			30	20	5.0	30m	100m	1.00	10mΩ						XXXXX	C	
18	25C2519	250m	230MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	30m	100m	1.00	500 Ω						B37	D	
19	25C2647	250m	230MΔ	2.3m	ΔJ	30	20	5.0	30m	100m	1.00	60 Δ						1018	B	
20	25C105	250m	250MΔ	1.7m	ΔJ	30	30	5.0	80m	1.00	10mΩ	90 Δ						1018	B	
21	25C323	250m	250MΔ	1.7m	ΔJ	40	20	5.0	100m	50m	1.00	10mΩ						1092	B	
22	25C6191	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	30	25	5.0	200m	1.00	80mΩ	110 Δ						1092	B	
23	25C620	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	50	30	5.0	200m	1.00	80mΩ	90 Δ						1092	B	
24	25C773	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	50	30	5.0	200m	1.00	80mΩ	35 Δ						1092	B	
25	25C838	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	50	25	5.0	50m	100m	3.00	500mΩ						1822b	B	
26	25C839	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	50	25	5.0	50m	100m	3.00	500mΩ						1822b	B	
27	25C923	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	50	35	5.0	50m	100m	3.00	500mΩ						1822b	B	
28	25C9445F	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	60	40	8.0	100m	100m	100m	180 Δ						1092	B	
29	25C945	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	60	50	5.0	100m	6.00	1.0mΩ	200 *			18u	8.0k	8.0	1092	B	
30	25C945L	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	60	50	5.0	100m	6.00	1.0mΩ	200 *			18u	8.0k	8.0	1092	B	
31	25C2378	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	70	70	5.0	100m	100m	6.00	100mΩ						1092	B	
32	25C2561	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	30m	100m	1.00	220 Ω						1092	B	
33	25D1012	250m	250MΔ		ΔJ	20	15	5.0	70	1.00	50mΩ	400 *						1092	B	
34	8101	250m	250MΔ			70	50	8.0	500m	100m	150mΩ	40 Δ						10108	A	
35	8102	250m	250MΔ			60	45	8.0	500m	100m	150mΩ	100 Δ						10108	A	
36	BC122	250m	250MΔ	1.0m	ΔJ	30	20	5.0	75m	100m	50mΩ	150 Δ						X151	D	
37	BC123	250m	250MΔ	1.0m	ΔJ	45	30	5.0	75m	100m	50mΩ	150 Δ						10108	A	
38	BC413	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	45	30	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
39	BC414	250m	250MΔ	2.5m	ΔJ	50	45	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
40	K918	250m	250MΔ			12		5.0	50m	5.00	1.0mΩ	250 Δ						1092	A	
41	KT379A	250m	250MΔ		ΔA	30	10	5.0	30m	0.50	1.0mΩ	125 Δ						1092	A	
42	KT379G	250m	250MΔ		ΔA	60	10	5.0	30m	0.50	1.0mΩ	125 Δ						1092	A	
43	SO2221I	250m	250MΔ		ΔJ	30	10	0.8	30m	150m	150mΩ	40 Δ						10236	A	
44	SO2221AI	250m	250MΔ		ΔJ	40	10	0.8	30m	150m	150mΩ	40 Δ						10236	A	
45	SO2221RI	250m	250MΔ		ΔJ	30	10	0.8	30m	150m	150mΩ	40 Δ						10236	A	
46	SO2222I	250m	250MΔ		ΔJ	40	10	0.8	30m	150m	150mΩ	100 Δ						10236	A	
47	SO2222RI	250m	250MΔ		ΔJ	40	10	0.8	30m	150m	150mΩ	100 Δ						10236	A	
48	BF194A	250m	280MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	30m	100m	1.0mΩ	200 Δ						XXXXX	C	
49	BF194B	250m	280MΔ	2.0m	ΔS	30	20	5.0	30m	100m	1.0mΩ	100 Δ						R203c	C	
50	BF594	250m	280MΔ	2.0m	ΔS	35	25	5.0	30m	100m	1.0mΩ	85 Δ						R203c	C	
51	BF595	250m	280MΔ	2.0m	ΔS	35	25	5.0	30m	100m	1.0mΩ	35 Δ						R203c	C	
52	25C4001	250m	300MΔ	1.7m	ΔJ	30	18	5.0	100m	50mΩ	10mΩ	30 Δ						1092	B	
53	25C1359	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	50	45	8.0	100m	100m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
54	BC407	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	50	45	6.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
55	BC407A	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	50	45	6.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
56	BC408	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	50	45	6.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
57	BC408A	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	50	45	6.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
58	BC408B	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
59	BC408C	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
60	BC408D	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
61	BC409	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
62	BC409B	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
63	BC409C	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						10108	A	
64	KT379B	250m	300MΔ		ΔA	25	10	5.0	30m	0.50	1.0mΩ	100 Δ						1092	A	
65	KT379V	250m	300MΔ		ΔA	10	10	5.0	30m	0.50	1.0mΩ	100 Δ						1092	A	
66	SE5025	250m	300MΔ	2.5m	ΔJ	30	30	3.0	30m	0.50	100mΩ	35 Δ						R97e	A	
67	SO2222AI	250m	300MΔ		ΔJ	40	10	0.8	30m	150m	150mΩ	100 Δ						10236	A	
68	TIS64	250m	300MΔ	2.0m	ΔJ	30	12	3.0	30m	100m	5.00	2.0mΩ						R203	A	
69	SC107	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	50	45	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
70	SC107A	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	50	45	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
71	SC107B	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	50	45	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
72	SC108	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
73	SC108A	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
74	SC108B	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
75	SC108C	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
76	SC109	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
77	SC109B	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
78	SC109C	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	30	20	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	B	
79	SC147	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	50	45	5.0	100m	150m	5.00	2.0mΩ						X149	A	
80	SC147A	250m	330MΔ	2.0m	ΔJ	50	45	5.0	100m	150m	5.00									

GERMANIUM & SELENIUM DIODES - Germanium

IN ORDER OF: (1) IO MAX (2) VRRM (3) SURGE CURRENT & (4) TYPE NUMBER

LINE No.	TYPE NUMBER	IO RATED MAX (A)	VRRM (V)	IFSM 1/2 CYCLE (A)	VF MAX (V)	IF TEST (A)	OUTLINE DRAWING (SEE DRAWING INDEX)	LINE No.	TYPE NUMBER	IO RATED MAX (A)	VRRM (V)	IFSM 1/2 CYCLE (A)	VF MAX (V)	IF TEST (A)	OUTLINE DRAWING (SEE DRAWING INDEX)
DIODE, GERMANIUM															
111	1N97A						DO-7	111	1N97A						A1sh
112	1N99A						DO-7	112	1N99A						A1sh
113	OA1182						DO-7	113	OA1182						DO-7
114	T7G						DO-7	114	T7G						DO-7
115	1N290						DO-7	115	1N290						DO-7
116	1N291						DO-7	116	1N291						DO-7
117	1N270						DO-7	117	1N270						DO-7
118	1N453						DO-7	118	1N453						DO-7
119	DR317						DO-7	119	DR317						DO-7
120	DR336						DO-7	120	DR336						DO-7
121	DR337						DO-7	121	DR337						DO-7
122	1N42						DO-7	122	1N42						DO-7
123	2AA117						DO-7	123	2AA117						DO-7
124	2AA118						DO-7	124	2AA118						DO-7
125	1N102						DO-7	125	1N102						DO-7
126	1N175						DO-7	126	1N175						DO-7
127	1N567						DO-7	127	1N567						DO-7
128	T17G						DO-7	128	T17G						DO-7
129	1N277						DO-7	129	1N277						DO-7
130	1N62						DO-7	130	1N62						DO-7
131	OA1161						DO-7	131	OA1161						DO-7
132	DR292						DO-7	132	DR292						DO-7
133	DR316						DO-7	133	DR316						DO-7
134	1N55						DO-7	134	1N55						DO-7
135	16P1(2)						DO-7	135	16P1(2)						DO-7
136	DR311						DO-7	136	DR311						DO-7
137	DR315						DO-7	137	DR315						DO-7
138	1N566						DO-7	138	1N566						DO-7
139	1N4785						DO-7	139	1N4785						DO-7
140	1N83						DO-7	140	1N83						DO-7
141	AA113						DO-7	141	AA113						A1ce
142	OA90						DO-7	142	OA90						DO-7
143	1N36						DO-7	143	1N36						A1sh
144	1S426						DO-7	144	1S426						A1dr
145	GD107A						DO-7	145	GD107A						A352
146	SFD107						DO-7	146	SFD107						DO-7
147	GD72E3						DO-7	147	GD72E3						F65
148	GD72E4						DO-7	148	GD72E4						F65
149	GD72E5						DO-7	149	GD72E5						F65
150	GD73E3						DO-7	150	GD73E3						F65
151	GD73E4						DO-7	151	GD73E4						F65
152	GD73E5						DO-7	152	GD73E5						F65
153	1N74						DO-7	153	1N74						M4
154	1N35						DO-7	154	1N35						DO-7
155	1T23						DO-7	155	1T23						A1sc
156	1T23G						DO-7	156	1T23G						None
157	DR464						DO-7	157	DR464						DO-7
158	AA116(1)						DO-7	158	AA116(1)						DO-7
159	F519						DO-7	159	F519						DO-7
160	1N616						A1sh	160	1N616						A1sh
161	1N282A						DO-7	161	1N282A						DO-7
162	1N128A						DO-7	162	1N128A						DO-7
163	1N128						DO-7	163	1N128						A1bz
164	1N60						DO-7	164	1N60						DO-7
165	1N51						DO-7	165	1N51						DO-7
166	1N636						DO-7	166	1N636						DO-7
167	1N81A						DO-7	167	1N81A						A9k
168	1N96						DO-7	168	1N96						A1bz
169	1N118						DO-7	169	1N118						A1bz
170	1S451						DO-7	170	1S451						DO-7
171	1N3160						DO-7	171	1N3160						A1cw
172	1N90						DO-7	172	1N90						A1bz
173	1N95						DO-7	173	1N95						A1bz
174	1N116						DO-7	174	1N116						A1bz
175	1N117						DO-7	175	1N117						A1sh
176	1N126						DO-7	176	1N126						DO-7
177	1S32						DO-7	177	1S32						DO-7
178	1S34						DO-7	178	1S34						A1bz
179	1N126A						DO-7	179	1N126A						A1bz
180	1N98						DO-35	180	1N98						A1bz
181	1N100						DO-7	181	1N100						A1bz
182	1N67A						A1bz	182	1N67A						A1bz
183	1N89						A1bz	183	1N89						A1sh
184	1N97						A1bz	184	1N97						A1bz
185	1N99						A1sh	185	1N99						A1bz
186	1N198						DO-7	186	1N198						DO-7
187	1N198A						DO-7	187	1N198A						DO-7
188	1N68A						A1sh	188	1N68A						DO-7
189	1N127						DO-7	189	1N127						DO-7
190	SFD108						DO-7	190	SFD108						DO-7
191	1S448						None	191	1S448						DO-7
192	1N70						F65	192	1N70						A1bz
193	1S33						F65	193	1S33						DO-7
194	1N127A						A9k	194	1N127A						A9k
195	1N70A						A9k	195	1N70A						A1sh
196	1N47						A1by	196	1N47						DO-7
197	1N55B						A1by	197	1N55B						DO-7
198	T21G						DO-7	198	T21G						DO-7
199	OA99						A1sh	199	OA99						A1wt
200	OA79						A1sh	200	OA79						A1qi
201	1N295A						DO-7	201	1N295A						DO-7
202	1N295						DO-7	202	1N295						DO-7
203	2AA119						A1	203	2AA119						DO-7
204	AA119						DO-7	204	AA119						A1sh
205	1N45						DO-7	205	1N45						A1sh
206	1N297A						DO-7	206	1N297A						DO-7
207	1N297						DO-7	207	1N297						DO-7
208	1N67						DO-7	208	1N67						DO-7
209	1N68						DO-7	209	1N68						DO-7
210	1N44						A1sh	210	1N44						A1sh
211	D9B						DO-7	211	D9B						A344p
212	T27G						DO-7	212	T27G						DO-7
213	T21(1)						DO-7	213	T21(1)						A344p
214	D9D						DO-7	214	D9D						A344p
215	D9G						DO-7	215	D9G						

5. SI GENERAL-PURPOSE RECTIFIERS - $I_o \geq 1A$ (Cont'd)

IN ORDER OF: (1) I_o MAX (2) VRRM (3) SURGE CURRENT & (4) TYPE NUMBER

LINE No.	TYPE NUMBER	I _o RATED MAX (A)	VRRM (V)	IFSM 1/2 CYCLE (A)	VF MAX (V)	OUTLINE DRAWING (SEE DRAWING INDEX)		LINE No.	TYPE NUMBER	I _o RATED MAX (A)	VRRM (V)	IFSM 1/2 CYCLE (A)	VF MAX (V)	IF TEST (A)	OUTLINE DRAWING (SEE DRAWING INDEX)
						IF TEST (A)	IF TEST (A)								
1	A114F	1.0	50	3.5	1.1	1.0	A94g	111	M101(2)	1.0	100	50	.95	50	M1153
2	A14F(1)	1.0	50	4.0	1.0	1.0	A94g	112	M101R	1.0	100	50	.95	50	M1153
3	1N2256	1.0	50	20	.60	1.0	DO-4	113	MR100(1)	1.0	100	50	1.0	1.0	A10c
4	1N2267	1.0	50	20	.60	1.0	DO-4	114	RL102	1.0	100	50	1.1	1.0	A395
5	1N3246	1.0	50	20	1.1	1.0	A1cs	115	RL102G	1.0	100	50	1.1	1.0	A395
6	1N2268	1.0	50	25	2.0	2.0	DO-4	116*	SGR100	1.0	100	50	1.0	1.0	DO-29
7	1N1034	1.0	50	30	1.5	1.0	S65a	117	SRS110	1.0	100	50	1.2	1.0	A340
8	1N1040	1.0	50	30	1.5	1.0	S66b	118	1S1885	1.0	100	60	1.2	1.5	A11w
9	1N1046	1.0	50	30	1.5	1.0	S68b	119	100R1B	1.0	100	60	2.0	1.0	None
10*	1N4001F	1.0	50	30	1.1	1.0	DO-41	120	A100(1)	1.0	100	60	1.0	1.0	A1bc
11*	1N4001GP	1.0	50	30	1.1	1.0	DO-41	121	B5B1	1.0	100	60	.50	1.0	A1rx
12*	1N6478	1.0	50	30	1.0	1.0	F137	122	35B5	1.0	100	60	.50	1.0	A1rx
13*	1SR35-50	1.0	50	30	1.1	1.0	DO-41	123	B5B9	1.0	100	60	.50	1.0	A1rx
14*	1SR124-50	1.0	50	30	1.3	1.0	DO-41	124	DFH10B	1.0	100	60	1.2	2.0	A387
15	BA5A5	1.0	50	30	1.3	1.0	A1rx	125	ER12-01	1.0	100	90	1.1	2.0	u10b
16*	BYM10-50	1.0	50	30	1.1	1.0	F137	126*	GPP1B	1.0	100	60	2.0	1.0	None
17*	ER181	1.0	50	30	1.1	1.0	DO-27	127	K5B5	1.0	100	60	2.0	1.0	DO-27
18	GER4001	1.0	50	30	1.1	1.0	A249b	128*	NS1001(1)	1.0	100	60	1.1	2.0	A21b
19*	GL41A	1.0	50	30	1.1	1.0	F137	129	S1801-01	1.0	100	60	1.1	1.0	DO-27
20*	GP10A	1.0	50	30	1.1	1.0	DO-41	130*	E1	1.0	100	200	1.3	1.0	DO-4
21	RM4001G	1.0	50	30	1.3	2.0	F149	131	E1B3	1.0	100	58	1.55	1.0	M746a
22	SM4001	1.0	50	30	1.3	2.0	F149	132*	SKE1701	1.0	150	30	1.5	1.0	S65a
23*	1N2858A	1.0	50	40	1.2	1.0	DO-1	133	1N1036	1.0	150	30	1.5	1.0	S66b
24	OSSM1	1.0	50	40	1.5	1.0	A3ab	134	1N1042	1.0	150	30	1.5	1.0	S68b
25	S1-050	1.0	50	40	1.0	1.0	u5b	135	1N1048	1.0	150	30	1.1	1.0	DO-41
26	OSF10A	1.0	50	45	1.0	1.0	A13be	136*	1N4001A	1.0	150	30	1.1	1.0	DO-41
27*	1N4001G	1.0	50	50	1.1	1.0	DO-41	137*	1N4002	1.0	150	30	1.1	1.0	DO-41
28*	10D05	1.0	50	50	1.0	1.0	DO-39	138*	1N4002A	1.0	150	30	1.1	1.0	F150
29*	BYW27-50	1.0	50	50	1.0	1.0	DO-41	139*	RLR4001	1.0	150	40	1.5	5.0	A283a
30*	DO1000	1.0	50	50	1.2	3.0	DO-15	140	BY125(1)	1.0	150	50	1.3	2.0	A1bg
31	DO2520	1.0	50	50	1.0	1.0	M101B	141	BY135	1.0	150	50	1.0	1.0	DO-15
32	DO2520A	1.0	50	50	1.0	1.0	M101B	142*	DA1002	1.0	200	1.4	.60	1.0	DO-4
33*	ER401	1.0	50	50	1.0	1.0	DO-41	143	1N1552	1.0	200	300m	1.0	1.0	S496
34*	FR101G	1.0	50	50	1.3	1.0	DO-41	144	O302	1.0	200	1.0	1.0	1.0	DO-41
35*	HER101	1.0	50	50	1.0	1.0	DO-41	145*	GPP10D	1.0	200	1.0	1.0	1.0	S477
36	KBPS005	1.0	50	50	1.1	1.0	A41B	146	KD202E	1.0	200	1.0	1.0	1.0	DO-29
37*	M100A	1.0	50	50	1.1	1.0	DO-41	147*	SGR200A	1.0	200	1.1	1.0	1.0	M1400
38	RL101	1.0	50	50	1.1	1.0	A395	148*	SM1N4003	1.0	200	2.0	2.0	2.0	DO-4
39	RL101G	1.0	50	50	1.1	1.0	A395	149*	TM24	1.0	200	3.5	4.0	1.0	A94g
40	SRS105	1.0	50	50	1.2	1.0	A340	150	A114B	1.0	200	10	1.1	1.0	A94g
41	B5A1	1.0	50	60	.50	1.0	A1rx	151	A14B	1.0	200	20	1.0	1.0	A1ds
42	B5A5	1.0	50	60	.50	1.0	A1rx	152	1N3866	1.0	200	20	1.1	1.0	A1cs
43	B5A9	1.0	50	60	.50	1.0	A1rx	153	1N3248	1.0	200	20	1.0	1.0	M1008a
44*	GPP1A	1.0	50	60	2.0	1.0	u10b	154	E100S2	1.0	200	20	2.5	2.0	A333i
45	K5A5	1.0	50	60	2.0	1.0	None	155*	PF22	1.0	200	20	1.0	4.0	A60
46*	NS1000(1)	1.0	50	60	1.2	1.0	DO-27	156	UT234	1.0	200	21	1.2	1.0	M1008a
47	E1A43	1.0	50	200	1.3	1.0	DO-4	157*	10J2(2)	1.0	200	21	1.2	1.0	M1008a
48*	DA1000(1)	1.0	60	50	1.0	1.0	DO-15	158*	10J4	1.0	200	21	1.2	2.0	DO-4
49*	1N4001	1.0	75	30	1.1	1.0	DO-41	159	1N2027	1.0	200	25	1.2	1.0	A313e
50	PLC0.8	1.0	80	20	1.1	1.0	A1bg	160*	1N4245(1)	1.0	200	25	1.2	1.0	DO-41
51	1N253	1.0	95	4.0	1.5	1.0	S11a	161*	1N4245GP	1.0	200	25	1.2	1.0	DO-41
52	1N338	1.0	100	2.0	1.0	1.0	DO-4	162	10D281	1.0	200	30	1.2	1.5	A109e
53	1N347	1.0	100	2.0	1.0	1.0	DO-4	163	1N1037	1.0	200	30	1.5	1.0	S65a
54	1N1551	1.0	100	1.4	.60	1.0	DO-4	164	1N1043	1.0	200	30	1.5	1.0	S66b
55*	GPP10B	1.0	100	1.0	1.0	1.0	DO-41	165	1N1049	1.0	200	30	1.5	1.0	S68b
56	KD202G	1.0	100	1.0	1.0	1.0	S477	166	1N3189	1.0	200	30	1.0	.75	A31a
57*	SM1N4002	1.0	100	1.1	1.0	1.0	M1400	167*	1N3611GP	1.0	200	30	1.0	1.0	DO-41
58	A114A	1.0	100	3.5	1.1	1.0	A94g	168	1N3757	1.0	200	30	1.0	1.5	A1cm
59	1N3247	1.0	100	20	1.1	1.0	A1cs	169*	1N4003F	1.0	200	30	1.1	1.0	DO-41
60	E10D51	1.0	100	20	1.0	1.0	M1008a	170*	1N4003GP	1.0	200	30	1.1	1.0	DO-41
61	PLQ1	1.0	100	20	1.1	1.0	A1bg	171*	1N5056	1.0	200	30	1.4	1.0	DO-29
62	UT236	1.0	100	20	1.0	1.0	A60	172*	1N6480	1.0	200	30	1.0	1.0	F137
63*	10J1	1.0	100	21	1.3	1.0	M1008a	173*	1SR35-200	1.0	200	30	1.1	1.0	DO-41
64	1B261	1.0	100	30	1.2	1.5	A109e	174*	1SR35-200A	1.0	200	30	1.3	1.0	DO-41
65	1N1035	1.0	100	30	1.5	1.0	S65a	175*	1SR124-200	1.0	200	30	1.3	1.0	DO-41
66	1N1041	1.0	100	30	1.5	1.0	S66b	176*	1SR124-200A	1.0	200	30	1.3	1.0	DO-41
67	1N1047	1.0	100	30	1.5	1.0	S68b	177	BA5CS	1.0	200	30	1.1	1.0	A1rx
68*	1N4002F	1.0	100	30	1.1	1.0	DO-41	178*	BYM10-200	1.0	200	30	1.1	1.0	F137
69*	1N4002GP	1.0	100	30	1.1	1.0	DO-41	179*	ER183	1.0	200	30	1.1	1.0	DO-27
70*	1N5055	1.0	100	30	1.4	1.0	DO-29	180	GER4003	1.0	200	30	1.15	1.0	A249f
71*	1N6479	1.0	100	30	1.0	1.0	F137	181	GFD10C	1.0	200	30	1.1	1.0	F137
72*	1SR35-100	1.0	100	30	1.1	1.0	DO-41	182*	GL41D	1.0	200	30	1.1	1.0	DO-41
73*	1SR35-100A	1.0	100	30	1.1	1.0	DO-41	183*	GP105	1.0	200	30	1.1	1.0	A249f
74*	1SR124-100	1.0	100	30	1.3	1.0	DO-41	184	GSR10C	1.0	200	30	1.1	1.0	F150
75*	1SR124-100A	1.0	100	30	1.3	1.0	DO-41	185*	RLR4003G	1.0	200	30	1.1	1.0	F149
76	BA5B5	1.0	100	30	1.3	1.0	A1rx	186	RM4003G	1.0	200	30	1.3	2.0	F149
77*	BYM10-100	1.0	100	30	1.1	1.0	F137	187	SM4003	1.0	200	30	1.3	2.0	DO-13
78*	ER182	1.0	100	30	1.1	1.0	DO-27	188*	1N5005	1.0	200	35	1.3	1.0	None
79	GER4002	1.0	100	30	1.1	1.0	A249f	189	1S2270(1)	1.0	200	35	1.2	1.0	DO-1
80	GFD10B	1.0	100	30	1.15	1.0	A249f	190*	1N2860A	1.0	200	40	1.2	1.0	A398
81*	GL41B	1.0	100	30	1.1	1.0	F137	191*	1SR140	1.0	200	40	1.1	1.0	A3ah
82*	GP10B	1.0	100	30	1.1	1.0	DO-41	192	2SM1	1.0	200	40	1.5	1.0	DO-41
83	GSB10B	1.0	100	30	1.1	1.0	A249f	193*	10DL2	1.0	200	40	1.4	2.0	A398
84*	RLR4002	1.0	100	30	1.1	1.0	F150	194*	ERA15-02	1.0	200	40	1.1	1.0	A398
85	RM4002G	1.0	100	30	1.3	2.0	F149	195	F114B	1.0	200	40	1.15	1.0	A249a
86	SM4002	1.0	100	30	1.3	2.0	F149	196	1S2392	1.0	200	45	1.0	1.0	A249a
87*	1N5004	1.0	100	35	1.3	1.0	DO-13	197	11E2	1.0	200	45	1.0	1.0	A12ay
88*	1N2859A	1.0	100	40	1.2	1.0	DO-1	198	DSP10C	1.0	200	45	1.0	1.0	A1abe
89	1SM1	1.0	100	40	1										

4. HIGH-SPEED DIODES - Fast Recovery/Switching (Cont'd)

IN ORDER OF: (1) to RATED MAX
(2) VRRM (3) IT MAX (4) TYPE NUMBER

LINE No.	TYPE NUMBER	Io RATED MAX (A)	VRRM (V)	IT MAX (g)	IF TEST (A)	OPER TEMP MAX (C)	MAT	OUTLINE DRAWING (SEE DRAWING INDEX)	LINE No.	TYPE NUMBER	Io RATED MAX (A)	VRRM (V)	IT MAX (g)	IF TEST (A)	OPER TEMP MAX (C)	MAT	OUTLINE DRAWING (SEE DRAWING INDEX)
1	FDH900	200m	45	4.0n	10m	175J	Si	DO-35	111	RLS4149	200m	100	4.0n	10m	200J	Si	F138
2	SA42	200m	50	2.0n			Si	A69e	112	RLS4446	200m	100	4.0n	10m	200J	Si	F138
3	SA1/52	200m	50	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	113	RLS4447	200m	100	4.0n	10m	200J	Si	F138
4	SA2/52	200m	50	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	114	RLS4448	200m	100	4.0n	10m	200J	Si	F138
5	SA3/52	200m	50	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	115	RLS4449	200m	100	4.0n	10m	200J	Si	F138
6	SA1/52	200m	50	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	116	SG5270	200m	100	4.0n	10m	175A	Si	DO-7
7	SB2/52	200m	50	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	117	SG9200	200m	100	4.0n	30m	175S	Si	TO-236
8	SB3/52	200m	50	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	118	BAS19	200m	100	50n	30m	150A	Si	A13c
9	B2D3600F	200m	50	4.0n	10m	175S	Si	TO-18	119	1N844	200m	100	500n	5.0m	175A	Si	DO-35
10	B2D3600T	200m	50	4.0n	10m	175S	Si	DO-35	120	1N658	200m	120	300n	5.0m	175A	Si	DO-7
11	BAY74	200m	50	4.0n	200m	175J	Si	u34	121	1N658	200m	120	300n	5.0m	175A	Si	DO-7
12	BD3600	200m	50	4.0n	10m	175S	Si	DO-35	122	1N892	200m	120	300n	5.0m	175A	Si	A50p
13	BD3600F	200m	50	4.0n	10m	175S	Si	TO-86	123	1N800	200m	120	500n	5.0m	200A	Si	DO-35
14	BD3600T	200m	50	4.0n	10m	175S	Si	TO-18	124	SG9240	200m	150	4.0n	30m	175	Si	TO-236
15	LL4150	200m	50	4.0n	10m	200J	Si	F135	125	BAS20	200m	150	50n	30m	175	Si	DO-35
16	SG5250	200m	50	4.0n	10m	175A	Si	DO-7	126	BKC444	200m	150	50n	30m	200J	Si	A134c
17	MT700	200m	50	5.0n	10m	175A	Si	A60e	127	BAX16	200m	150	70n	30m	175	Si	TO-236
18	MT702	200m	50	5.0n	10m	175A	Si	A60e	128	BAS21	200m	200	50n	30m	150J	Si	SO-143
19	MT703(1)	200m	50	5.0n	10m	175A	Si	A60e	129	BAV23(A)	200m	200	50n	30m	200J	Si	DO-35
20	IT7601	200m	50	6.0n	10m	200J	Si	DO-35	130	BKC400	200m	200	50n	30m	200J	Si	A134c
21	MT707(1)	200m	50	6.0n	10m	175A	Si	A60e	131	BAX17	200m	200	50n	30m	175S	Si	DO-35
22	SG9600	200m	50	6.0n	200m	175S	Si	A11	132	ISS144	200m	200	400n	10m	175S	Si	DO-34
23	MBAY74L	200m	50	15n	10m		Si	M1370	133	ISS147	200m	200	500n	30m	150A	Si	A13z
24	MM070	200m	50	15n	10m	135J	Si	M1370a	134	1N845	200m	240	300n	175		Si	DO-7
25	MT709(1)	200m	50	15n	10m	175A	Si	A265	135	1N893	200m	250	75n	20m	175S	Si	DO-34
26	MT711(1)	200m	50	50n	10m	175A	Si	A60e	136	ISS244	200m	250	75n	20m	175S	Si	DO-35
27	85P1	200m	50	250n	10m	85S	Ge	A60e	137	ISS245	200m	250	75n	20m	175S	Si	F138
28	1SS93	200m	55	2.0n	10m	175S	Si	DO-35	138	DO-7	200m	250	400n	10m	175S	Si	DO-35
29	1SS137	200m	55	2.0n	10m	175S	Si	DO-34	139	ISS143	200m	250	400n	10m	175J	Si	DO-34
30	1SS93	200m	55	2.0n	10m	175S	Si	DO-35	140	ISS146	200m	250	400n	10m	175J	Si	DO-35
31	RLS93	200m	65	2.0n	10m	175S	Si	F138	141	ISS142	200m	300	500n	10m	175S	Si	DO-34
32	MT705	200m	60	4.0n	10m	175A	Si	A60e	142	ISS145	200m	300	500n	10m	175S	Si	A13z
33	1N891	200m	60	300n	10m	175	Si	DO-7	143	20L154	200m	1.5k	800n	10m	140J	Si	A13z
34	1N796	200m	60	500n	5.0m	200A	Si	A60p	144	20L18A	200m	1.8k	800n	10m	140J	Si	A13z
35	MM06050	200m	70	1.5n	10m	135J	Si	A445	145	MU2	200m	2.0k	200n	100m	125J	Si	A13z
36	MM06100	200m	70	1.5n	10m	135J	Si	M4455	146	ERB26-20	200m	2.0k	400n	100m	125A	Si	A13z
37	MM06150	200m	70	1.5n	10m	135J	Si	M4455	147	MU3	200m	3.0k	200n	20m		Si	A13z
38	MM0700v	200m	70	1.5n	10m	135J	Si	M4455	148	BAR223-40	200m	4.0k	200n	20m		Si	A69s
39	FMMD6100	200m	70	5.0n	10m	175	Si	TO-236	149	BR598-40	200m	4.0k	200n	20m		Si	A69s
40	FMMD7000	200m	70	5.0n	10m	175	Si	TO-92	150	MU4	200m	4.0k	200n	100m	125A	Si	A13z
41	MSD6102	200m	70	100n	10m	25A	Si	DO-35	151	BAR223-45	200m	4.5k	200n	20m		Si	A69s
42	1N3064	200m	75	2.0n	10m	200S	Si	DO-35	152	BR598-45	200m	4.5k	200n	100m	125A	Si	A69s
43	1N3604	200m	75	2.0n	10m	200S	Si	DO-35	153	MU5	200m	5.0k	200n	100m	125A	Si	A69s
44	1N3606	200m	75	2.0n	10m	200S	Si	DO-35	154	MU6	200m	6.0k	200n	100m	125J	Si	A69s
45	1N4151	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	DO-35	155	MU8	200m	8.0k	200n	100m	125J	Si	A69s
46	1N4153	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	DO-35	156	USR80A	200m	8.0k	500n	10m	150	Si	A69s
47	1N4454	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	DO-35	157	H707	200m	9.0k	175n	2.0m	125J	Si	A69s
48	1N4532	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	DO-34	158	MU10(1)	200m	10k	200n	100m	125A	Si	A69s
49	1N4534	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	DO-34	159	USR100A	200m	10k	500n	10m	150	Si	A69s
50	1SS94	200m	75	2.0n	10m	200A	Si	A60p	160	EV12R	200m	12k	1.5u	100m	25C	Si	None
51	1SS92	200m	75	2.0n	10m	175S	Si	DO-35	161	EV120(1)	200m	20k	200n	100m		Si	A69s
52	1SS138	200m	75	2.0n	10m	175S	Si	DO-34	162	USR60A	220m	6.0k	500n	10m	150	Si	A69s
53	RLS92	200m	75	2.0n	10m	175S	Si	F138	163	USR70A	220m	7.0k	500n	10m	150	Si	A69s
54	RLS4151	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	F138	164	1S951(1)	225m	70	25n	200m	150S	Si	A69s
55	RLS4153	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	F138	165	BAY72	225m	125	50n	30m	175J	Si	DO-35
56	RLS4454	200m	75	2.0n	10m	200J	Si	F138	166	BAV17	250m	25	50n	30m	175J	Si	DO-35
57	7A1/52	200m	75	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	167	1N920	250m	36	300n	500m	175J	Si	DO-7
58	7A2/52	200m	75	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	168	1N690	250m	36	800n	500m	175J	Si	DO-35
59	7A5/52	200m	75	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	169	1N4450	250m	40	4.0n	10m	200J	Si	F138
60	7B1/52	200m	75	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	170	RLS4450	250m	40	4.0n	10m	200J	Si	DO-35
61	7B2/52	200m	75	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	171	1N3600	250m	50	4.0n	10m	150A	Si	DO-35
62	7B5/52	200m	75	3.0n	100m	175A	Si	TO-46	172	1N4150	250m	50	4.0n	10m	200J	Si	F138
63	BKC600	200m	75	4.0n	400m	DO-35	Si	DO-35	173	RLS4150	250m	50	4.0n	10m	175J	Si	F138
64	FD600	200m	75	4.0n	200m	150A	Si	DO-7	174	BAV100	250m	50	50n	30m	200A	Si	DO-7
65	SG5260	200m	75	4.0n	10m	175A	Si	DO-7	175	ZS150	250m	50	250n	600m	200A	Si	DO-7
66	FD666	200m	75	5.0n	10m	150A	Si	A1c	176	ZS152	250m	50	250n	600m	200A	Si	DO-7
67	FDH600	200m	75	6.0n	200m	175J	Si	A1ap	177	ZS154	250m	50	250n	600m	200A	Si	DO-35
68	B2D4148	200m	75	10n	10m	175	Si	u34	178	BAV18	250m	60	80n	30m	175J	Si	DO-35
69	B2D4148F	200m	75	10n	10m	175	Si	TO-86	179	ISS248H	250m	65	80n	500m	175J	Si	DO-35
70	B2D4148T	200m	75	10n	10m	175	Si	TO-18	180	ISS2135	250m	70	7.0n	10m	175J	Si	DO-35
71	BD4148	200m	75	10n	10m	175	Si	u34	181	1N921	250m	70	800n	500m	175J	Si	DO-7
72	BD4148F	200m	75	10n	10m	175	Si	TO-86	182	1N691	250m	70	800n	500m	175J	Si	DO-7
73	BD4148T	200m	75	10n	10m	175	Si	TO-18	183	SG5200	250m	75	4.0n	10m	175A	Si	DO-7
74	MBAS16	200m	75	15n	10m		Si	M1370	184	1S2095A	250m	75	6.0n	200m	175J	Si	DO-35
75	MBAS16L	200m	75	15n	10m		Si	M1370a	185	1N4606	250m	85	4.0n	10m	200J	Si	DO-35
76	MBAS16T	200m	75	15n	10m		Si	M1370	186	RLS4608	250m	85	4.0n	10m	200J	Si	F138
77	1N5413	200m	80	2.0n	10m	175A	Si	DO-35	187	BAS16	250m	85	6.0n	10m	150J	Si	TO-236
78	1N5282	200m	80	4.0n	10m	150A	Si	DO-35	188	SG5000	250m	100	4.0n	10m	175A	Si	DO-7
79	1S2072	200m	80	6.0n	10m	175J											