

การพัฒนาเครื่องขยายกำลังคลื่นวิทยุแบบโซลิตสเตทขนาด 1 กิโลวัตต์
สำหรับเครื่องเร่องอนุภาคซินโครตรอน

นายสุทธิพงษ์ โกพล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2554

**DEVELOPMENT OF 1 KW SOLID STATE RF POWER
AMPLIFIER FOR SYNCHROTRON ACCELATOR**

Sutthiphong Kophon

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Telecommunication Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2011

การพัฒนาเครื่องขยายกำลังคลื่นวิทยุแบบโซลิตสเตทขนาด 1 กิโลวัตต์
สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผศ. ดร.รังสรรค์ ทองทา)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ปิยาภรณ์ กระจกอคนอก)

กรรมการ

(ผศ. ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(ดร.สัมพันธ์ นีคเกตุ)

กรรมการ

(ศ. ดร.ชูกิจ ทิมปิงานงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

สุทธิพงษ์ โกพล : การพัฒนาเครื่องขยายกำลังคลื่นวิทยุแบบโซลิดสเตตขนาด 1 กิโลวัตต์ สำหรับเครื่องเร่งอนุภาคซินโครตรอน (DEVELOPMENT OF 1 KW SOLID STATE RF POWER AMPLIFIER FOR SYNCHROTRON ACCELATOR) อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล, 109 หน้า.

ในปัจจุบันส่วนของวงกักเก็บอิเล็กตรอนใช้กักเก็บอิเล็กตรอนในรูปแบบวงกลม โดยที่พลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงกักเก็บอิเล็กตรอนนั้นจะอยู่ที่ 1.2 จิกะอิเล็กตรอนโวลต์ และในการเดินทางของ อิเล็กตรอน แต่ละรอบจะสูญเสียพลังงานประมาณ 65.94 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นจึงมีการชดเชยพลังงานที่ อิเล็กตรอนสูญเสียไปในวงกักเก็บอิเล็กตรอน โดยการชดเชยพลังงานที่เสียไปนั้นเราจะใช้ควาวิตีเป็นตัวชดเชยพลังงาน ซึ่งควาวิตีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ ตัวควาวิตีเองจะสร้างสนามไฟฟ้าและจะจับอิเล็กตรอน เพื่อชดเชยพลังงาน ซึ่งตัวควาวิตีเองจะใช้พลังงานที่สูง จากปัจจุบันวงจขยายที่ใช้อยู่เป็นแบบหลอดสูญญากาศ ซึ่งมีอายุการใช้งานที่จำกัด ขนาดใหญ่ ราคาแพง จึงได้มีแนวคิดในการเปลี่ยนไปใช้แบบโซลิดสเตตแทน ซึ่งง่ายต่อการซ่อมบำรุง ปรับเปลี่ยน และราคาไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนาวงจขยายสัญญาณแบบโซลิดสเตตให้มีประสิทธิภาพการใ้ใช้งานที่สูง มีความทนทาน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเกิดขึ้น โดยจะนำเอาวงจขยายแบบโซลิดสเตตมาพัฒนาให้ใช้งานได้นานมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ซึ่งพลังงานในส่วนนี้จะได้อีกจากวงจขยายแบบโซลิดสเตตหลายตัวมารวมกัน ดังนั้นในงานวิจัยจึงได้นำเอาวงจขยายแบบโซลิดสเตตหนึ่งชุดมาพัฒนาให้มีสมรรถนะที่ดีและมีประสิทธิภาพสูง

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

ปีการศึกษา 2554

ลายมือชื่อนักศึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา_____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม_____



SUTTHIPHONG KOPHON : DEVELOPMENT OF 1 KW SOLID STATE
RF POWER AMPLIFIER FOR SYNCHROTRON ACCELATOR. THESIS
ADVISOR : ASST. PROF. PEERAPONG UTHANSUKUL, Ph.D., 109 PP.

CAVITY/VACUUM TUBE/SOLID-STAGE AMPLIFIER/

The storage ring (STR) in Synchrotron Light Research Institute (SLRI) used to store electron requires a high energy of around 1.2 GeV. Also in each lap of electron travelling, the energy loss is about 65.94 GeV. Then, the system in storage ring is design to compensate such a high energy by a cavity tuner. The cavity acquires a high power from vacuum tube amplifier at the operating frequency of 118 MHz. The vacuum tube amplifier has a lot of disadvantages including a limited lifetime, a large size and expensive. Therefore, this thesis proposes the use of solid-state amplifier instead of vacuum tube because it is easy for maintenances or modification and the price is not that expensive. In this thesis, the development of a solid-state amplifier is aimed to a high efficiency and durability for a high power. By integrating many modules of proposed solid-state amplifier, the requirement of STR can be achieved.

School of Telecommunication Engineering Student's signature_____

Academic Year 2011 Advisor's signature_____

Co-Advisor's signature_____



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลงด้วยดี เนื่องจากได้รับความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ทั้งด้านวิชาการ และด้านดำเนินงานวิจัย จากบุคคลและกลุ่มบุคคลต่าง ๆ ได้แก่

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พีระพงษ์ อุฑารสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ ดร.สัมภาส ฉิดเกตุ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ให้โอกาสทางการศึกษา ให้คำแนะนำ ปรึกษาช่วยแก้ปัญหาและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไข วิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภิต ที่ให้คำปรึกษาด้านวิชาการและด้านปฏิบัติ อีกทั้งให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ วงศ์สรรค์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รังสรรค์ ทองทา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชุตินา พรหมมาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาวี หัตถกรรม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.ประโยชน์ คำสวัสดิ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยาภรณ์ กระจงนอก และอาจารย์ ดร.สมศักดิ์ วาณิชอนันต์ชัย อาจารย์ประจำ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้ความรู้ทางวิชาการและให้โอกาสในการศึกษา

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษารวมถึงค่าใช้จ่ายทั้งหมดตลอดการศึกษาในระดับปริญญาโท และขอขอบคุณพี่ ๆ ทุกคนในสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ที่ให้การดูแล ให้คำปรึกษา และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณนายสำราญ สันทาลุนย์ พี่ ๆ เพื่อน ๆ และน้อง ๆ บัณฑิตศึกษาทุกท่าน รวมถึงมิตรสหายทั้งในอดีตและปัจจุบัน ที่ให้คำปรึกษาในด้านปฏิบัติรวมถึงช่วยแก้ไขปัญหในงานวิจัย และให้กำลังใจในการทำงานวิทยานิพนธ์ และขอขอบคุณ คุณปณิฎฐาท์ อาจหาญ ที่ช่วยดูแลในเรื่องเอกสารต่าง ๆ ระหว่างศึกษาจนสำเร็จการศึกษาไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอนทุกท่านที่ประสิทธิ์ประสาทความรู้ด้านต่าง ๆ ทั้งในอดีตและปัจจุบัน และขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา รวมถึงญาติพี่น้องของผู้วิจัยทุกท่านที่ให้การอบรมเลี้ยงดู ให้ความรักความอบอุ่น และให้การสนับสนุนทางการศึกษาอย่างดียิ่งมาโดยตลอด อีกทั้งเป็นกำลังใจที่ยิ่งใหญ่ในยามที่ผู้วิจัยท้อแท้และทุกข์ใจ ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในชีวิต

สุทธิพงษ์ โกพล

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	4
1.3 ข้อยกเว้นเบื้องต้น	4
1.4 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.5 วิธีดำเนินการวิจัย	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
1.7 ทัศนวิสัยวรรณกรรม	6
1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์	8
2 ทฤษฎีวงจรรขยายสัญญาณแบบโซลิตสเตท	9
2.1 กล่าวนำ	9
2.2 วงจรรขยายสัญญาณ	9
2.2.1 วงจรรขยายประเภทต่างๆ	10
2.2.1.1 วงจรรขยายคลาสเอ	10
2.2.1.2 วงจรรขยายคลาสบี	11
2.2.1.3 วงจรรขยายคลาสซี	12

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.4 วงจรขยายคลาสซี.....	13
2.2.2 วงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพช-พุล.....	14
2.2.3 คุณลักษณะวงจขยายสัญญาณ.....	16
2.2.4 เสถียรภาพของวงจขยายสัญญาณ.....	17
2.3 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจขยายสัญญาณ.....	18
2.4 วงจรบาลัน (BALance/UNbalance).....	25
2.5 วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS.....	26
2.6 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณ.....	27
2.6.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณในสุญญากาศ.....	28
2.6.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณผ่านสายโอแอกเซียล.....	29
2.6.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณในไมโครสตริปไลน์.....	31
2.7 การพัฒนาวงจขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพช-พุล.....	32
2.7.1 เทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตี้ (Invert Doherty).....	32
2.7.2 เทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback).....	33
2.8 สรุป.....	34
3 การออกแบบวงจขยายคลื่นวิทยุแบบโซลิตสเตทขนาด 1 กิโลวัตต์.....	35
3.1 กล่าวนำ.....	35
3.2 ประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์ BLF578.....	36
3.3 การออกแบบวงจขยายสัญญาณที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์.....	36
3.3.1 การคำนวณหาค่าอินพุต / เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์.....	37
3.3.1.1 การคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์.....	38
3.3.1.2 การคำนวณหาค่าเอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์.....	38
3.4 การออกแบบวงจรบาลัน.....	39
3.4.1 การออกแบบวงจรอินพุตบาลัน.....	39
3.4.2 การออกแบบวงจรเอาท์พุตบาลัน.....	43
3.5 วงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์.....	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5.1	45
3.5.2	47
3.6	49
3.7	51
3.8	58
3.8.1	58
3.8.2	60
3.9	62
3.9.1	62
3.9.2	63
3.9.3	64
3.10	66
4	67
4.1	67
4.2	68
4.2.1	68
4.2.2	72
4.3	76
5	78
5.1	78
5.2	79
5.3	80
รายการอ้างอิง	81
ภาคผนวก	83
ภาคผนวก ก. บทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์	83
ภาคผนวก ข. รายละเอียดวงจรพิมพ์	104

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก ก. รายละเอียดทางเทคนิคของชุดวงจรขยายสัญญาณความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์	106
ประวัติผู้เขียน	109



สารบัญรูป

1.1	โครงสร้างของชุดวงจรถยายขนาด 30 กิโลวัตต์	2
2.1	ลักษณะทั่วไปวงจรถยายสัญญาณ	10
2.2	กราฟเส้นโหนดของวงจรถยายคลาสเอ	11
2.3	กราฟเส้นโหนดของวงจรถยายคลาสบี	12
2.4	การผิดเพี้ยนของสัญญาณในวงจรถยายคลาสบี	12
2.5	การทำงานเบื้องต้นของวงจรถยายคลาสซี	13
2.6	ส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรถยายชนิดพุช-พูล	15
2.7	โครงสร้างหลักการทำงานของวงจรถยายสัญญาณชนิดพุช – พูล	15
2.8	ลักษณะวงจรถยายสัญญาณ	16
2.9	โครงข่ายแมตซ์ชิงอิมพีแดนซ์	19
2.10	โครงข่ายแมตซ์ชิงอินพุตอิมพีแดนซ์	20
2.11	โครงข่ายแมตซ์ชิงเอาท์พุตอิมพีแดนซ์	20
2.12	โครงสร้างของแผนภูมิสมิท	21
2.13	การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท	22
2.14	ทิศทางการเคลื่อนที่ของการแมตซ์อุปกรณ์บนแผนภูมิสมิท	23
2.15	การอ่านค่าความยาวของส่วนโค้งบนแผนภูมิสมิท	24
2.16	การทำงานของบาลัน	25
2.17	วงจรถบาลันอย่างง่าย	26
2.18	วงจรถไป้อสทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS	27
2.19	วงจรถเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตี้ (Invert Doherty)	33
2.20	วงจรถเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback)	34
3.1	โครงสร้างวงจรถยายสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์	35
3.2	ทรานซิสเตอร์ BLF578 (Datasheet BLF578)	36
3.3	วงจรถอินพุตบาลันที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม smith 3.1	40
3.4	ผลการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตบาลันโดยใช้โปรแกรม smith 3.1	40
3.5	วงจรถอินพุตบาลันที่ออกแบบสมบูรณ์	41

สารบัญรูป (ต่อ)

3.6	วงจรถอดรูปที่สร้างเสร็จสมบูรณ์.....	42
3.7	ผลการทดสอบค่า Log magnitude ของวงจรถอดรูปจากเครื่องวิเคราะห์วงจรถาย.....	42
3.8	ผลการทดสอบ smith chart ของวงจรถอดรูปด้วยเครื่องวิเคราะห์วงจรถาย.....	42
3.9	วงจรถอดรูปที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม smith 3.1.....	43
3.10	ผลการวางแผนภูมิสมิทของวงจรถอดรูปโดยใช้โปรแกรม smith 3.1.....	44
3.11	วงจรถอดรูปที่ออกแบบสมบูรณ์.....	45
3.12	วงจรถอดรูปแมตซ์ซึ่งที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม smith 3.1.....	46
3.13	ผลการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตแมตซ์ซึ่งโดยใช้โปรแกรม smith 3.1.....	46
3.14	วงจรถอดรูปแมตซ์ซึ่งที่ออกแบบสมบูรณ์.....	47
3.15	วงจรถอดรูปแมตซ์ซึ่งที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม smith 3.1.....	48
3.16	ผลการวางแผนภูมิสมิทของวงจรถอดรูปแมตซ์ซึ่งโดยใช้โปรแกรม smith 3.1.....	48
3.17	วงจรถอดรูปแมตซ์ซึ่งที่ออกแบบสมบูรณ์.....	49
3.18	โครงสร้างของวงจรถอดรูปอินพุตทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS.....	50
3.19	วงจรถอดรูปอินพุตที่ออกแบบสมบูรณ์.....	50
3.20	วงจรถอดรูปอินพุตที่ออกแบบสมบูรณ์.....	51
3.21	วงจรถอดรูปสัญญาณที่ออกแบบในโปรแกรม AWR.....	52
3.22	วงจรถอดรูปที่เพิ่มเทคนิคอินพุตโคเฮอร์ซีร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ.....	53
3.23	ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง (S-parameter).....	54
3.24	ผลการจำลองค่าประสิทธิภาพของวงจรถอดรูป.....	54
3.25	ผลการจำลองค่าอัตราขยายของวงจรถอดรูป.....	55
3.26	ผลการจำลองค่า P1 dB ของวงจรถอดรูป.....	55
3.27	บล็อกไดอะแกรมของการวัดวงจรถอดรูปจริง.....	56
3.28	บอร์ดิวงจรถอดรูปจริงที่เพิ่มเทคนิคอินพุตโคเฮอร์ซี ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ.....	56
3.29	ค่าเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรถอดรูปก่อนและหลังเพิ่มเทคนิค.....	57
3.30	ค่าเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของวงจรถอดรูปก่อนและหลังเพิ่มเทคนิค.....	57
3.31	ค่าเปรียบเทียบค่า P 1dB ของวงจรถอดรูปก่อนและหลังเพิ่มเทคนิค.....	57
3.32	วงจรถอดรูปสัญญาณด้านอินพุต.....	59

สารบัญรูป (ต่อ)

3.33	วงจรรขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต.....	60
3.34	วงจรรขยายสัญญาณที่สร้างเสร็จสมบูรณ์.....	61
3.35	ระบบระบายความร้อนด้วยแท่นระบายความร้อน.....	63
3.36	ระบบระบายความร้อนแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ.....	64
3.37	การทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก.....	65
3.38	ลักษณะวงจรการทำงานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริก.....	65
4.1	บล็อกไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบวงจรรขยายชุดเดียว.....	68
4.2	การทดสอบวงจรรขยายชุดเดียว.....	69
4.3	อัตราขยายของวงจรรขยายชุดเดียวที่กำลังงานต่ำ.....	69
4.4	อัตราขยายของวงจรรขยายชุดเดียว.....	70
4.5	ค่าประสิทธิภาพของวงจรรขยายชุดเดียว.....	71
4.6	ค่า P_{1dB} ของวงจรรขยายชุดเดียว.....	71
4.7	ค่าอุณหภูมิของทรานซิสเตอร์.....	71
4.8	วงจรรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพซ-พูล สองชุด.....	72
4.9	บล็อกไดอะแกรมการทดสอบชุดวงจรรขยายสัญญาณ ขนาด 1 กิโลวัตต์.....	73
4.10	การทดสอบชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	73
4.11	อัตราขยายของชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	74
4.12	ค่าประสิทธิภาพของชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	74
4.13	ค่ากำลังงานเอาต์พุตเทียบกับอินพุตของชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	75
4.14	ค่า P_{1dB} ของชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	75
4.15	อุณหภูมิของชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	75
4.16	รูปสัญญาณของชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	76
4.17	ขนาดของแอมพลิจูดของวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์.....	76
ข.1	ลายวงจรรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพซ-พูล ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์.....	105

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	สรุปคุณสมบัติของวงจรขยายแบบต่าง ๆ.....14
3.1	ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ BLF578.....37
3.2	ค่าการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตบาลันที่ได้จาก โปรแกรม smith 3.1.....41
3.3	ค่าการวางแผนภูมิสมิทของเอาต์พุตบาลันที่ได้จาก โปรแกรม smith 3.1.....44
3.4	ค่าการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตแมตซ์ซึ่งที่ได้จาก โปรแกรม smith 3.1.....47
3.5	ค่าการวางแผนภูมิสมิทของเอาต์พุตแมตซ์ซึ่งที่ได้จาก โปรแกรม smith 3.1.....49
3.6	รายการอุปกรณ์ของวงจรขยายสัญญาณด้านอินพุต.....59
3.7	รายการอุปกรณ์ของวงจรขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต.....61
ค.1	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขับกำลังสัญญาณ.....107
ค.2	ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขยายสัญญาณ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ ชุดเดี่ยว.....107
ค.3	ข้อมูลทางเทคนิคของชุดวงจรขยายสัญญาณ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์.....108

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

A	=	amplitude
K	=	stability factor
S-parameter	=	scattering parameter
S_{11}	=	input reflection coefficient
S_{12}	=	reverse transmission coefficient
S_{21}	=	forward transmission coefficient
S_{22}	=	output reflection coefficient
Γ	=	reflection coefficient
Γ_{in}	=	input reflection coefficient
Γ_{out}	=	output reflection coefficient
Δ	=	delta factor
Z_{in}	=	input impedance
Z_{out}	=	output impedance
Z_S	=	source impedance
Z_L	=	load impedance
ϵ_r	=	relative permittivity
ϵ_0	=	permittivity of free space
μ_0	=	permeability of free space
f	=	frequency
ω	=	angular frequency
λ	=	wavelength
λ_0	=	wavelength of electromagnetic wave in free space
w	=	width of the microstrip line
IEEE	=	the Institute of Electrical and Electronics Engineers
MMIC	=	monolithic microwave integrated circuit
PCB	=	printed circuit board

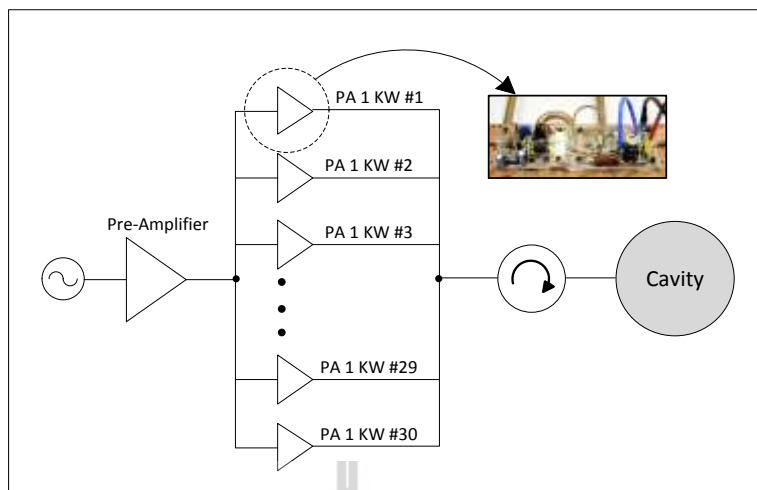
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันส่วนของวงที่ใช้กักเก็บอิเล็กตรอนในรูปแบบวงกลม (Storage ring) โดยพลังงานของอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงกักเก็บนั้นจะอยู่ที่ 1.2 จิกะอิเล็กตรอนโวลต์ และในการเดินทางของอิเล็กตรอนแต่ละรอบจะสูญเสียพลังงานประมาณ 65.94 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นจึงมีการชดเชยพลังงานที่อิเล็กตรอนสูญเสียไปในวงกักเก็บ โดยการชดเชยพลังงานที่เสียไปนั้นเราจะใช้คาวิตี (Cavity) เป็นตัวชดเชยพลังงาน ซึ่งคาวิตีเมื่อถูกกระตุ้นด้วยความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งตัวคาวิตีเองจะสร้างสนามไฟฟ้า และจะขับอิเล็กตรอนเพื่อชดเชยพลังงาน โดยที่ตัวคาวิตีเองจะใช้พลังงานประมาณ 30 กิโลวัตต์ จากปัจจุบันวงจรรขยายที่ใช้อยู่เป็นแบบหลอดสูญญากาศ ซึ่งมีอายุการใช้งานที่จำกัด ขนาดใหญ่ ราคาแพง จึงมีแนวคิดในการเปลี่ยนไปใช้วงจรรขยายแบบโซลิดสเตท (Solid state amplifier) แทนซึ่งง่ายต่อการซ่อมบำรุง ปรับเปลี่ยน และราคาไม่สูงมากนัก ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะพัฒนา วงจรรขยายแบบโซลิดสเตทให้มีประสิทธิภาพการใช้งานที่สูง มีความทนทาน ดังนั้นงานวิจัยชิ้นนี้จึงเกิดขึ้น โดยจะนำเอาวงจรรขยายแบบโซลิดสเตทมาพัฒนาให้ใช้งานได้ยาวนานและมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง

เนื่องจากความต้องการพลังงานที่สูงของคาวิตี ซึ่งพลังงานได้นั้นจะมาจากวงจรรขยายหลายตัวมารวมกัน ซึ่งเราได้นำเอาวงจรรขยายหนึ่งชุดขนาด 1 กิโลวัตต์ นำมาออกแบบให้มีประสิทธิภาพสูง มีความทนทาน เหมาะแก่การใช้สำหรับคาวิตีซึ่งวงจรรขยายที่นำมาออกแบบนั้นจะเป็นชนิด พูซ – พูล คลาสเอบี เพราะมีประสิทธิภาพสูง ในรูปที่ 1.1 จะแสดงโครงสร้างของชุดวงจรรขยายที่ใช้งานกับคาวิตีและตำแหน่งของวงจรรขยายที่นำมาออกแบบ



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของชุดวงจรรขยายที่ใช้งานกับคาวิตี

วงจรรขยายแบบโซลิดสเตตนั้นมีอยู่หลายคลาส เช่น คลาสเอ คลาสบี คลาสเอบี และคลาสซี เป็นต้น ซึ่งความต้องการของวงจรรขยายที่ใช้งานกับคาวิตีนั้น เราต้องการวงจรรขยายที่มีประสิทธิภาพสูง ความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ จากคุณสมบัติข้างต้น วงจรรขยายคลาสซีเป็นวงจรรขยายที่มีประสิทธิภาพสูงสุด แต่ความผิดเพี้ยนของสัญญาณสูง ส่วนคลาสบีมีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงแต่ความผิดเพี้ยนของสัญญาณค่อนข้างสูง เนื่องจากปัญหาของการครอสโอเวอร์ของสัญญาณ (Crossover distortion) และคลาสเอบีเป็นวงจรรขยายที่มีความสมบูรณ์ของสัญญาณมากที่สุด แต่ประสิทธิภาพของวงจรรขยายต่ำ ดังนั้นเราจึงเลือกใช้คลาสเอบี ซึ่งเป็นวงจรรขยายที่มีประสิทธิภาพค่อนข้างสูงและมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ

วงจรรขยายกำลังคลาสเอบีเป็นการรวมกันของวงจรรขยายกำลังคลาสเอกับคลาสบี ในส่วนของประสิทธิภาพและความเป็นเชิงเส้น โดยพื้นฐานของทรานซิสเตอร์จะใช้การไบอัสที่บริเวณจุดวิกฤต(Q-point) โดยคลาสเอจะไบอัสที่บริเวณจุดตัด (Cut-off) ซึ่งเมื่อทรานซิสเตอร์ทำการขยายสัญญาณครึ่งรอบสัญญาณจะคล้ายกับการทำงานของคลาสบี และถ้าขยายสัญญาณสัญญาณเต็มรอบสัญญาณก็จะเป็นคลาสเอดังนั้นเราจึงใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันจำนวน 2 ตัวในการขยายสัญญาณ โดยแบ่งกันขยายตัวละครึ่งคาบสัญญาณ โดยตัวแรกขยายซีกบวก ตัวที่สองขยายซีกลบ แล้วนำสัญญาณที่ได้จากทั้งสองตัวมารวมกัน ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า วงจรรขยายสัญญาณชนิดpush-pull การใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวแบ่งกันขยายสัญญาณตัวละครึ่งคาบสัญญาณนั้น ทำให้ได้อัตราการขยายสูงและมีประสิทธิภาพสูงด้วย โดยส่วนประกอบของวงจรรขยายชนิดpush-pull จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ 1. วงจรบาลัน 2. วงจรแมตซ์ซิง 3. วงจรไบอัส โดยบาลันจะอยู่ในส่วนของอินพุตและ

เอาที่พูดของสัญญาณ หน้าทีของบาลันคือแยกสัญญาณอินพุตที่เข้ามาให้เป็นสองสัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีความต่างเฟสกัน 180° และรวมสัญญาณที่ฝั่งเอาที่พูด จากวงจรบาลันที่มีหน้าทีแยกสัญญาณและรวมสัญญาณของวงจรขยายชนิดพุช-พูล ถ้าวงจรบาลันสามารถแยกสัญญาณเป็นสองสัญญาณและต่างกัน 180° ได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรวมสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์แล้วจะทำให้วงจรขยายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนถัดมาคือส่วนของวงจรแมตซ์ซิง ซึ่งวงจรแมตซ์ซิงจะมีอยู่ทั้งในส่วนอินพุตและเอาที่พูดของทรานซิสเตอร์ หน้าทีของวงจรแมตซ์ซิงคือทำหน้าที่แมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรบาลันกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งในส่วนอินพุตทำหน้าที่แมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ระหว่างเอาที่พูดของบาลันกับอินพุตของทรานซิสเตอร์ และในส่วนของเอาที่พูดทำหน้าที่แมตซ์ซิงระหว่างเอาที่พูดของทรานซิสเตอร์กับอินพุตของบาลัน วงจรแมตซ์ซิงเป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพและค่าอัตราขยายของวงจรขยาย เพราะถ้าหากการแมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายไม่ดี จะทำให้เกิดการสูญเสียภายในของวงจรขยายและจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรขยายต่ำ ซึ่งพลังงานที่สูญเสียภายในที่เกิดจากการแมตซ์ซิงที่ไม่ดีนี้จะเปลี่ยนเป็นความร้อน ทำให้อายุการใช้งานที่สั้นลงและพังได้ ส่วนสุดท้ายก็คือวงจรไบอัส ทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับทรานซิสเตอร์

การเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังสามารถทำได้ในส่วนของวงจรบาลัน วงจรไบอัสและวงจรแมตซ์ซิง โดยในส่วนของวงจรบาลันนั้นสามารถทำการพัฒนาให้แยกสัญญาณและรวมสัญญาณให้ดีขึ้น จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังได้ ถ้าหากวงจรบาลันอินพุตสามารถแยกสัญญาณได้ต่างกัน 180° จะทำให้สัญญาณที่อินพุตของทรานซิสเตอร์กลับเฟสกันพอดี และสัญญาณที่ขยายออกมาก็จะสามารถรวมกันได้โดยไม่หักล้างกัน ปัญหาการเลื่อนของเฟสสัญญาณก็จะลดลงที่วงจรบาลันเอาที่พูดซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณ หากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรวมสัญญาณของส่วนนี้ให้มีค่าการสูญเสียที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณหรือค่าสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ลดลงจะทำให้ประสิทธิภาพสัญญาณเอาที่พูดสูงขึ้นด้วย และในส่วนของการพัฒนาวงจรแมตซ์ซิงสามารถทำได้โดยออกแบบวงจรแมตซ์ซิงให้มีค่าสูญเสียย้อนกลับให้มีค่าน้อยมากๆ นอกจากนี้เรายังสามารถทำได้โดยการเพิ่มเทคนิคเข้าไป ซึ่งเป็นเทคนิคที่เมื่อเข้าไปในส่วน of วงจรแมตซ์ซิงแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังได้ ซึ่งจากการสำรวจปริทัศน์วรรณกรรมพบว่ามีสองเทคนิคที่น่าสนใจและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังได้อีกทั้งช่วยให้งานของวงจรขยายกำลังมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น โดยสองเทคนิคที่น่าเสนอนั้นคือ Invert Doherty และการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) โดย Invert Doherty จะช่วยในการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลังให้สูงขึ้นแต่ทำให้อายุการใช้งานมีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเราจึงได้นำเทคนิคการป้อนกลับแบบลบมาช่วยเพิ่มความเป็นเชิงเส้น

ให้กับวงจรขยายกำลัง เมื่อนำเอาสองเทคนิคนี้มารวมกันจะทำให้เราได้วงจรขยายกำลังที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีความเป็นเชิงเส้น

ในหนึ่งโมดูลของวงจรขยายกำลังขนาด 1 กิโลวัตต์ นั้นจะประกอบไปด้วยวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) ชุดวัดสัญญาณขาออก ชุดวัดสัญญาณสูญเสียย้อนกลับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ของบริษัท NXP ซึ่งทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ใช้ในการขยายกำลังเพราะมีความแข็งแรง ทนความร้อนที่สูงได้และมีประสิทธิภาพสูง ทรานซิสเตอร์นี้เป็นผลิตภัณฑ์ของ NXP semiconductor สามารถทำงานที่ย่านความถี่ 10 – 500 เมกะเฮิร์ตซ์ ที่แหล่งจ่ายไฟ 50 โวลต์ จากการทดสอบทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 225 เมกะเฮิร์ตซ์ สามารถให้พลังงานแก่โหลดสูงสุด 1200 วัตต์ อัตราการขยาย 24 dBm และประสิทธิภาพ 71% อุปกรณ์นี้มีความไวต่อไฟฟ้าสถิต สามารถทนความร้อนได้ถึง 150° ด้วยเหตุผลข้างต้นเราจึงเลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ในการออกแบบสร้างวงจรขยาย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 สามารถสร้างวงจรขยายแบบโซลิดสเตทความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์ได้
- 1.2.2 สามารถนำต้นแบบของวงจรขยายแบบโซลิดสเตทความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์มาทดสอบใช้งานจริงกับโหลดจำลอง (dummy load) ได้

1.3 ข้อตกลงเบื้องต้น

- 1.3.1 ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองแบบวงจรขยาย
- 1.3.2 สร้างและทดสอบวัดผลวงจรขยายให้ได้พลังงาน 1 กิโลวัตต์

1.4 ขอบเขตการวิจัย

- 1.4.1 จำลองวงจรขยายกำลังโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผล
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์
- 1.4.3 ทดสอบวัดผลวงจรขยายกำลังและวิเคราะห์ผล

1.5 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.1 แนวทางการดำเนินงาน
 - 1) สืบหาปริทัศน์วรรณกรรม และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์

- 2) ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับวงจรรขยายกำลังและเทคนิคในการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยาย
- 3) จำลองวงจรรขยายกำลังโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการจำลองผลเพื่อนำมาสร้างจริง
- 4) สร้างวงจรรขยายต้นแบบขนาด 1 กิโลวัตต์ ตามที่ได้ออกแบบ
- 5) สร้างระบบวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์เพื่อให้มีสมรรถภาพที่ดีที่สุดเหมาะสมต่อการใช้งาน
- 6) ทดสอบระบบวงจรรขยายต้นแบบและวิเคราะห์ผล

1.5.2 ระเบียบวิธีวิจัยเป็นงานวิจัยประยุกต์ ซึ่งดำเนินการตามกรอบงานดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) ทำการศึกษาแนวทางการประยุกต์จากข้อมูลของการเพิ่มประสิทธิภาพวงจรรขยายที่ได้จากการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจปรัทัศน์วรรณกรรมและทำการจำลองผลเพื่อศึกษาแนวทางของการเพิ่มประสิทธิภาพ แนวโน้มการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยายเมื่อทำการพัฒนาในส่วนต่างๆ
- 3) นำผลของการจำลองมาสร้างวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์

1.5.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยคลื่นวิทยุ (RF lab) อาคารสิรินธรวิซโซทัย สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) 111 ถนนมหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง จ.นครราชสีมา 30000

1.5.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) เครื่องวิเคราะห์วงจรรข่าย (Network Analyzer)
- 3) โปรแกรม Microwave Office
- 4) โปรแกรม App CAD
- 5) โปรแกรม Circuit CAM
- 6) เครื่องวัดสัญญาณ (Spectrum Analyzer)
- 7) เครื่องสร้างสัญญาณ RF (RF Generator)

- 8) เครื่องมือวัดพลังงานของสัญญาณ (Power Meter)
- 9) เครื่องมือวัดพลังงานของสัญญาณ (Watt meter)
- 10) เครื่องแบ่งสัญญาณเพื่อวัดพลังงานของสัญญาณจริง (Directional Coupler)
- 11) เครื่องมือป้องกันสัญญาณย้อนกลับ (Circulator)
- 12) เครื่องมือวัดรูปสัญญาณ (Scope)
- 13) โหลดจำลอง (Dummy Load)
- 14) เครื่องวัดแรงดันและกระแส (Digital multi meter)

1.5.4 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการจำลองผลด้วยโปรแกรม Microwave Office เพื่อดูแนวโน้มและแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยาย
- 2) เก็บผลการทดสอบที่ได้จากการทดสอบวงจรขยายจริงเพื่อนำมาวิเคราะห์

1.5.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลที่ได้จากการวัดวงจรขยายนำไปวิเคราะห์และสรุปผลการวิจัยในรูปแบบของกราฟเพื่อแสดงค่าสมรรถนะของวงจรขยาย

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.6.1 ได้วงจรขยายสัญญาณแบบโซลิตสแตตตันแบบ ขนาด 1 กิโลวัตต์
- 1.6.2 สามารถนำวงจรขยายต้นแบบไปทดสอบการใช้งานจริงกับโหลดจำลองได้

1.7 ปรัชญ์นัวรรณกรรม

เพื่อให้ทราบถึงแนวทางและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผลการดำเนินการวิจัย ตลอดจนปัญหาและข้อเสนอแนะต่าง ๆ เพื่อนำไปสู่วัตถุประสงค์หลักที่ได้ตั้งไว้ โดยได้มีการศึกษาผลงานวิจัยที่ผ่านมาและอาศัยฐานข้อมูลที่มีอยู่ ซึ่งฐานข้อมูลที่ใช้ในการสืบค้นงานวิจัยนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับกันอย่างกว้างขวาง เช่น ฐานข้อมูล IEEE นอกจากนี้ยังได้มีการสืบค้นงานวิจัยจากแหล่งอื่น ๆ เช่น จากเครือข่ายอินเทอร์เน็ต จากห้องสมุดของมหาวิทยาลัยต่าง ๆ โดยจากผลการสืบค้นที่ได้นั้นจะใช้เป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป สำหรับเนื้อหาในส่วนนี้จะได้กล่าวถึงปรัชญ์นัวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ซึ่งในงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรขยาย

แบบโซลิตสเตทนั้นจะอยู่ในรูปแบบของการพัฒนาวงจรรขยายคลาสเอบี ชนิดพุก-พุด โดยการเพิ่มเทคนิคเข้าไปในวงจรรขยายในส่วนของวงจรมัดซ์ซิง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวงจรมัดซ์ซิงโซลิตสเตทที่ใช้งานกับซินโครตรอน ซึ่งเป็นการพัฒนาจากการใช้วงจรรขยายสัญญาณแบบหลอดสุญญากาศเป็นแบบโซลิตสเตท จากเดิมใช้วงจรรขยายแบบหลอดสุญญากาศที่อายุการใช้งานที่จำกัดค่าใช้จ่ายสูงและใช้แหล่งจ่ายไฟพลังงานสูง มาเป็นวงจรรขยายแบบโซลิตสเตท โดยมีข้อดีคือขนาดเล็กสามารถแก้ไข ซ่อมบำรุงได้ง่าย ราคาไม่สูงมาก และในชุดของวงจรรขยายแบบโซลิตสเตทจะมีวงจรมัดซ์ซิงที่ต่ำผ่านในการกรองสัญญาณฮาร์โมนิกก่อนที่จะป้อนสัญญาณเข้าไปขับคาวิตี โดยคาวิตีจะใช้พลังงานประมาณ 30 กิโลวัตต์ (P. Marchand, T. Ruan, F. Ribeiro, and R. Lopes, 2007) นอกจากนั้นยังมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนาวงจรรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุก-พุด ซึ่งมีหลายงานวิจัยเสนอแนวคิดที่จะเพิ่มเทคนิคต่างๆ เข้าไปในวงจรรขยายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยาย เช่นงานวิจัยที่เสนอการใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบคาเทเชียน (Khalid K. Mohammed and Rund B. Mohammed, 2010) งานวิจัยนี้ได้เสนอวิธีการเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบคาเทเชียนเพื่อเพิ่มค่าอัตราขยายและทำให้วงจรมีความกว้างแถบความถี่ที่กว้างขึ้น อีกทั้งยังช่วยให้ค่าของฮาร์โมนิกข้างเคียงนั้นลดต่ำลงอีกด้วย นอกจากการเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบคาเทเชียนแล้วยังมีเทคนิคอื่นอีก เช่น การใช้เทคนิค Invert Doherty (Gunhyun Ahn et al, 2007) เพื่อลดการสูญเสียภายในวงจรรขยายสัญญาณและเพิ่มค่าประสิทธิภาพของวงจรรขยาย โดยเทคนิคนี้เหมาะสำหรับวงจรรขยายชนิดพุก-พุด เนื่องจากเทคนิคจะมีการเพิ่ม Offset line เข้าไปในวงจรรขยายเพื่อช่วยในการปรับเฟสของสัญญาณการที่จะรวมกันเป็นสัญญาณเอาท์พุทและเทคนิคนี้ยังสามารถเพิ่มค่าลดสัญญาณฮาร์โมนิก ข้างเคียงให้ต่ำลงได้อีกด้วย นี่เป็นเพียงส่วนหนึ่งที่ได้ศึกษาปริทัศน์วรรณกรรมและยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาค้นคว้าเพื่อนำเอาเทคนิคและวิธีการต่างๆเหล่านั้นมาพัฒนาสร้างวงจรรขยายสัญญาณต้นแบบต่อไป

1.8 รายละเอียดในวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประกอบด้วย 5 บท และ ภาคผนวก

บทที่ 1 กล่าวถึง บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา วัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้น ขอบเขตของการวิจัย วิธีดำเนินการวิจัย ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และรายละเอียดในวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีวงจรรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุก-พุด วงจรรแยกสัญญาณและรวมสัญญาณ วงจรมัดซ์ซิงแบบโคแอกเซียลทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Coaxial transformer matching)

การไปอัสวจรทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS และเทคนิคการพัฒนางจรขยายสัญญาณ
คลาสเอบีชนิดพุช-พูล

บทที่ 3 กล่าวถึงการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ในส่วนของวงจร
แยกสัญญาณ รวมสัญญาณ วงจรแมตซ์ซิง วงจรไปอัส

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและการวัดทดลองคุณสมบัติต่าง ๆ ของวงจรขยายสัญญาณ

บทที่ 5 กล่าวถึงสรุปผลการวัดการทดลองและคุณสมบัติของวงจรขยายสัญญาณแบบ
โซลิตสเตทโดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการสรุปผลการวิจัยของวงจรในบทต่าง ๆ ทั้งหมด ปัญหาที่
เกิดขึ้นข้อเสนอแนะแนวทางในการแก้ไขปัญหาและแนวทางการพัฒนาในอนาคต



บทที่ 2

ทฤษฎีวงจรมายสัญญาณแบบโซลิตสเตท

2.1 กล่าวนำ

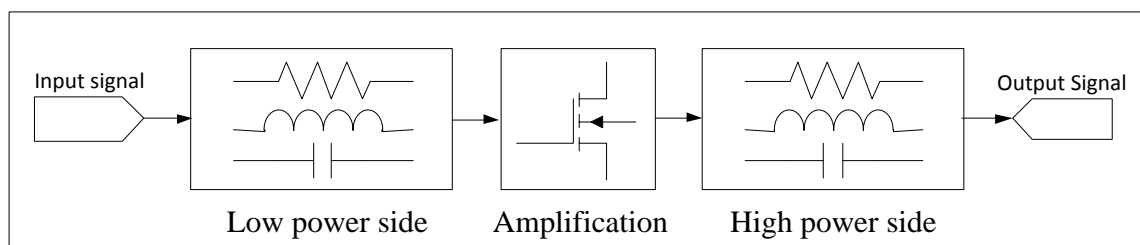
วงจรมายสัญญาณที่นำมาออกแบบนั้นเป็นวงจรมายสัญญาณแบบโซลิตสเตทคลาสเอบี ชนิดพุก-พุล ซึ่งจะทำงานโดยใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวชนิดเดียวกันแบ่งกันขยายตัวละครึ่งคาบ ทำให้วงจรมายสัญญาณมีประสิทธิภาพสูง และวงจรมายสัญญาณแบบโซลิตสเตท ชนิดพุก-พุลนั้นประกอบไปด้วยส่วนประกอบต่างๆที่สำคัญ ทั้งส่วนของวงจรมายสัญญาณที่ใช้แยกสัญญาณและรวมสัญญาณ ส่วนของวงจรมายสัญญาณ และส่วนของวงจรมายสัญญาณ ซึ่งส่วนต่างๆ เหล่านี้จำเป็นต้องมีการศึกษาถึงทฤษฎีของหลักการการทำงานของวงจรมายสัญญาณ เพื่อนำมาออกแบบและสร้างวงจรมายสัญญาณให้มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยเนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่สำคัญของวงจรมายสัญญาณแบบโซลิตสเตท ซึ่งจะประกอบไปด้วย ทฤษฎีของวงจรมายสัญญาณ วงจรมายสัญญาณ วงจรมายสัญญาณ และทฤษฎีของเทคนิคที่เพิ่มเข้าไปในวงจรมายสัญญาณ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น เทคนิค Invert Doherty และเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ ซึ่งทฤษฎีต่างๆเหล่านี้เป็นทฤษฎีสำคัญที่เกี่ยวข้องในการออกแบบสร้างวงจรมายสัญญาณแบบโซลิตสเตทเพื่อให้ได้วงจรมายสัญญาณที่มีประสิทธิภาพสูง

2.2 วงจรมายสัญญาณ

วงจรมายสัญญาณทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ต้องการ โดยภาคอินพุตจะมีขนาดสัญญาณขนาดเล็กเมื่อผ่านวงจรมายสัญญาณขนาดของสัญญาณเอาต์พุตจะมีขนาดใหญ่ และทางภาคเอาต์พุตของวงจรมายสัญญาณนี้จะมีโวลต์และวัตต์สูง เพื่อที่จะนำไปขับอุปกรณ์ โดยสิ่งที่สำคัญในการออกแบบวงจรมายสัญญาณจะต้องคำนึงถึงประสิทธิภาพของวงจรมายสัญญาณและกำลังวัตต์สูงสุดที่ภาควงจรมายสัญญาณ

ลักษณะโดยทั่วไปของวงจรมายสัญญาณที่ออกแบบเป็นลักษณะแบ่งเป็นภาคส่วนจะประกอบด้วยภาคอินพุตของวงจรมายสัญญาณ ภาคขยายสัญญาณและภาคเอาต์พุตของวงจรมายสัญญาณ ซึ่งในภาคขยายกำลังจะต้องมีการออกแบบวงจรมายสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อการทำงานของวงจรมายสัญญาณ และการออกแบบ โครงข่ายแมตซ์ซิงทั้งภาคอินพุตและเอาต์พุตโดยลักษณะของวงจรมายสัญญาณประกอบด้วย ค่าความต้านทาน (R) ตัวเก็บประจุ (C) และตัว

เหนี่ยวนำ (L) ซึ่งในรูปที่ 2.1 เป็นบล็อกไดอะแกรมลักษณะโดยทั่วไปของวงจรรขยายสัญญาณ โดยด้านอินพุตเป็นวงจรกำลังงานต่ำและด้านเอาต์พุตเป็นส่วนขยายกำลังสูง



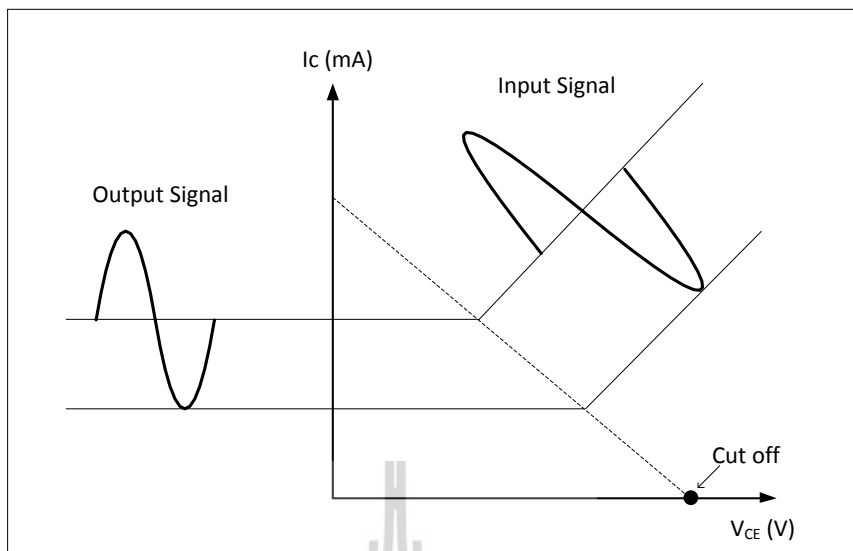
รูปที่ 2.1 ลักษณะทั่วไปวงจรรขยายสัญญาณ

2.2.1 วงจรรขยายประเภทต่าง ๆ

วงจรรขยายสัญญาณสามารถแบ่งประเภทได้เป็น 4 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ วงจรรขยายคลาสเอ วงจรรขยายคลาสบี วงจรรขยายคลาสเอบี และวงจรรขยายคลาสซี ซึ่งแต่ละวงจรรจะมีกระบวนการทำงานที่แตกต่างกันออกไป อีกทั้งยังมีค่าประสิทธิภาพและคุณภาพของสัญญาณเอาต์พุตที่ต่างกัน

2.2.1.1 วงจรรขยายคลาสเอ

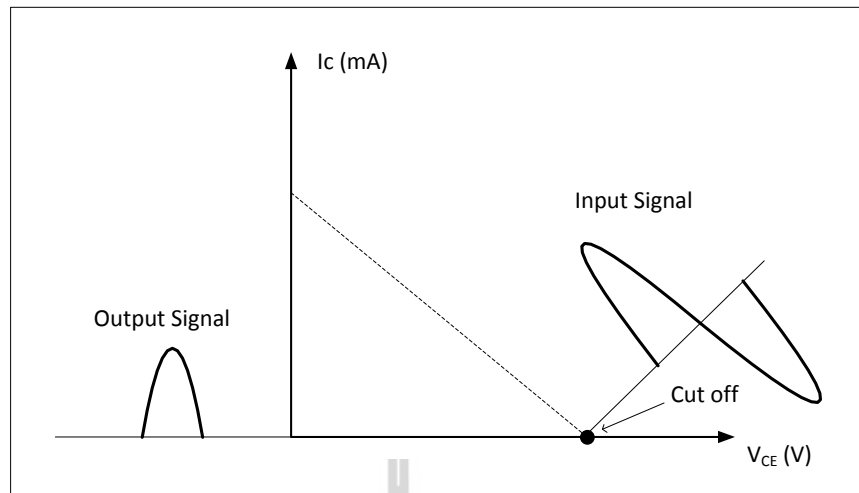
วงจรรขยายคลาสเอ เป็นวงจรรขยายที่มีจุดการทำงานอยู่ในช่วงที่เรียกว่า แอคทีฟ คือช่วงการทำงานของทรานซิสเตอร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear) วงจรรขยายคลาสเอจะมีกระแสไหลผ่านทรานซิสเตอร์ตลอดเวลาเพื่อให้จุดของการทำงานมีช่วงของสัญญาณเอาต์พุตไม่ต่ำกว่าจุดตัด (Cut-off) เพราะวงจรรขยายคลาสเอจะขยายสัญญาณทั้งซีกบวกและซีกลบของสัญญาณที่ป้อนเข้ามาทางอินพุต นั่นหมายถึงจุดทำงานอยู่ตรงกลางเส้นโหลดไลน์หรือจุดต่ำสุดของสัญญาณซีกลบอยู่สูงกว่าระดับของจุดตัดดังแสดงในรูปที่ 2.2 แต่วงจรรขยายคลาสเอจะมีอัตราขยายสัญญาณไม่สูงมากนักและมีประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 50% เพราะจุดประสงค์คลาสเอคือจะต้องขยายสัญญาณโดยไม่ผิดเพี้ยน ส่วนใหญ่เราจะนิยมใช้ในวงจรรขยายคลาสเอในวงจรรขยายทั่วไปที่ไม่ต้องการอัตราขยายสูงมากนัก เช่น เครื่องขยายเสียง ภาคขยายความถี่วิทยุทั้งวิทยุและโทรทัศน์ ภาคขยาย IF ภาคขยายวีดีโอเอาต์พุตและภาควงจรรขับวงจรรขยาย (Pre-Amplifier) เป็นต้น



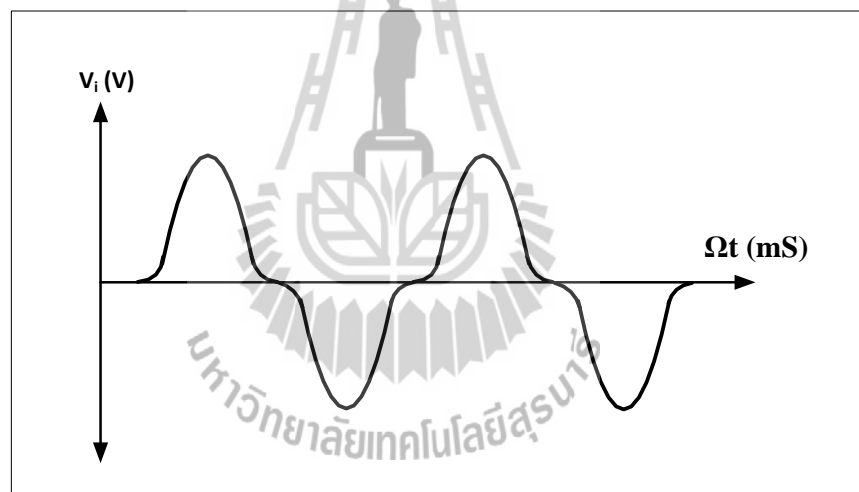
รูปที่ 2.2 กราฟแสดงเส้นโหลดของวงจรรขยายคลาสเอ

2.2.1.2 วงจรรขยายคลาสบี

วงจรรขยายคลาสบี เป็นวงจรรขยายที่ตั้งจุดทำงานไว้ที่ตำแหน่งของจุดตัดของทรานซิสเตอร์พอดิ นั่นคือทรานซิสเตอร์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณมีไบแอสเป็น 0 โวลต์ ทำให้วงจรรขยายคลาสบีสามารถขยายสัญญาณได้เพียงซีกเดียวดังแสดงในรูปที่ 2.3 ดังนั้นหากไม่มีสัญญาณเข้ามาทางอินพุตทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณก็จะไม่ทำงาน หากต้องการให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณทำงานก็เพียงป้อนสัญญาณมาที่อินพุตเท่านั้น แต่ทรานซิสเตอร์จะทำงานนั้นขึ้นอยู่กับแรงดันที่ตกคร่อมที่จุดอินพุต (V_{BE} หรือแรงดันตกคร่อมขาเบสและอิมิตเตอร์) ต้องเกิน 0.6 โวลต์จึงจะเริ่มทำงานได้ จึงเกิดรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์ขึ้น หรือที่เราเรียกว่าการครอสโอเวอร์ (Crossover distortion) ดังแสดงในรูป 2.4 โดยในการออกแบบวงจรรขยายคลาสนั้นจะใช้เป็นแบบ พุช-พูล นั้นใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันสองตัวช่วยกันขยายตัวละครึ่งคาบ การใช้ทรานซิสเตอร์ช่วยกันขยายตัวละครึ่งคาบนั้นทำให้วงจรรขยายคลาสนี้ ชนิดพุช-พูลมีประสิทธิภาพสูงถึง 78% มีอัตราขยายที่ดี การใช้งานของวงจรรขยายคลาสนี้ ชนิดพุช-พูลนั้นจะไม่นิยมนำไปทำชุดขยายเสียงเนื่องจากมีความผิดเพี้ยนสูง แต่จะนิยมนำไปเครื่องขยายสัญญาณพัลส์มากกว่า



รูปที่ 2.3 กราฟแสดงเส้น โหลดของวงจรขยายคลาสบี



รูปที่ 2.4 การผิดเพี้ยนของสัญญาณในวงจรขยายคลาสบี

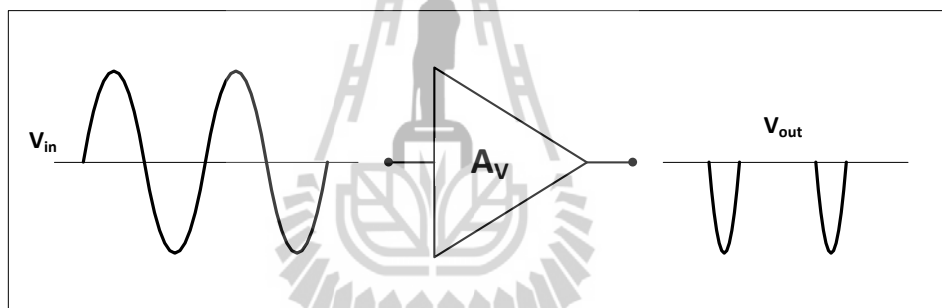
2.2.1.3 วงจรขยายคลาสเอบี

วงจรขยายคลาสเอบีเป็นวงจรขยายสัญญาณที่แก้ไขมาจากวงจรขยายคลาสบี เพื่อแก้ไขรอยต่อที่ไม่สมบูรณ์ โดยการตั้งจุดการทำงานไว้สูงกว่าจุดตัดของทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเล็กน้อย นั่นคือการเพิ่มแรงดันไบอัสเล็กน้อยให้ทรานซิสเตอร์ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณเสียงนำกระแสเล็กน้อย เพื่อชดเชยแรงดันที่หายไปประมาณ 0.6 โวลต์ ประสิทธิภาพของวงจรจะอยู่ระหว่างคลาสเอกับคลาสบี เมื่อนำไปใช้งานโดยต่อวงจรขยายในรูปแบบวงจรพุช-

พูล หรือวงจรถอมพลิเมินตารี สัญญาณที่ออกมาจึงจะสมบูรณ์ขึ้น วงจรขยายคลาสเอบีสามารถ ออกแบบในวงจรถยายสัญญาณกำลังงานสูงได้โดยสัญญาณมีความเพี้ยนน้อย มีอัตราขยายสูง วงจรขยายคลาสเอบีนิยมใช้ในงานวงจรถยายกำลังสูงที่ต้องการความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำ เช่น การขยายสัญญาณเสียง

2.2.1.4 วงจรถยายคลาสซี

วงจรถยายคลาสซีเป็นวงจรที่ให้ประสิทธิภาพสูง แต่ความผิดเพี้ยนมีสูง มาก ใช้สำหรับวงจรถยายในย่านความถี่วิทยุ เพราะสามารถใช้วงจรถวนเพื่อชดเชยความผิดเพี้ยนที่ ได้จากการจัดไบอัสคลาสซี โดยจะตั้งไบอัสให้เลยจุดตัดออกไป หรือเรียกว่าตั้งไบอัสเลยเส้น โหลด ไลน์ออกไป ทำให้ทรานซิสเตอร์ขยายสัญญาณได้เพียงบางส่วนเท่านั้น การทำงานเบื้องต้นของ วงจรถยายคลาสซีแสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การทำงานเบื้องต้นของวงจรถยายคลาสซี

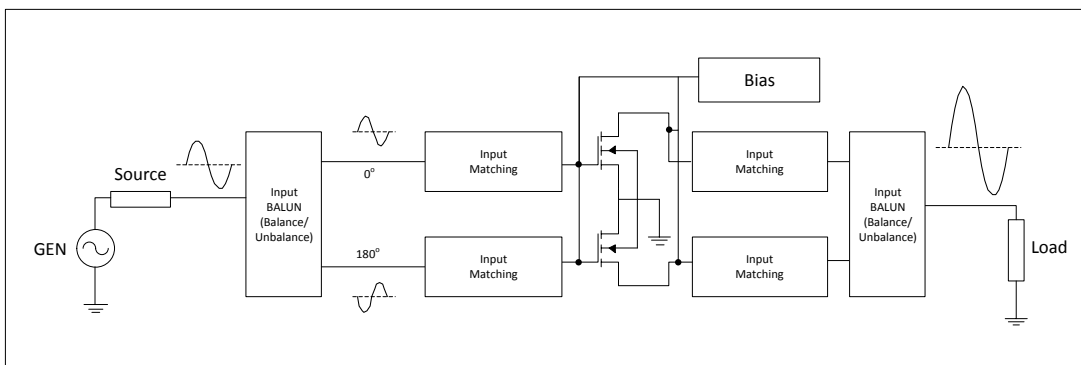
จากคุณสมบัติของวงจรถยายคลาสต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้น เราสามารถสรุปเพื่อหา วงจรถยายที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบสร้างวงจรถยายที่ใช้งานกับควาวิตี ดังแสดงในตารางที่ 2.1 จากข้อมูลในตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าวงจรถยายคลาสเอบีเหมาะสำหรับการออกแบบสร้าง วงจรถยายเพื่อใช้กับควาวิตี เนื่องจากวงจรถยายคลาสเอบีมีความผิดเพี้ยนของสัญญาณต่ำค่า ประสิทธิภาพค่อนข้างสูง โดยการออกแบบวงจรถยายคลาสเอบี จะเป็นวงจรถยายเอบี ชนิดพusch-พูล เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่สูง

ตารางที่ 2.1 สรุปคุณสมบัติของวงจรถายแบบต่าง ๆ

	คลาสเอ	คลาสบี	คลาสเอบี	คลาสซี
ประสิทธิภาพ	50%	78%	ระหว่างคลาสเอ กับคลาสบี	100%
มุมการนำกระแส	180°	180°	ระหว่างคลาสเอ กับคลาสบี	~ 90%
ความเพี้ยน	ต่ำ	สูง	ปานกลาง	สูงมาก
ไบอัส	ฟอร์เวิร์ด (กึ่งกลางของเส้น โหลด)	ศูนย์ (ที่จุดตัด)	ฟอร์เวิร์ด (ใกล้จุดตัด)	รีเวิร์ส (เหนือจุดตัด)
การนำไปใช้	เครื่องขยายเสียง ขนาดกลาง	ภาคจ่ายกำลังสูง ทั่วไปที่ไม่ใช้งาน ในความถี่เสียง	ภาคจ่ายกำลังสูง ในวงจรความถี่ วิทยุและเครื่อง เสียง	งานความถี่วิทยุ

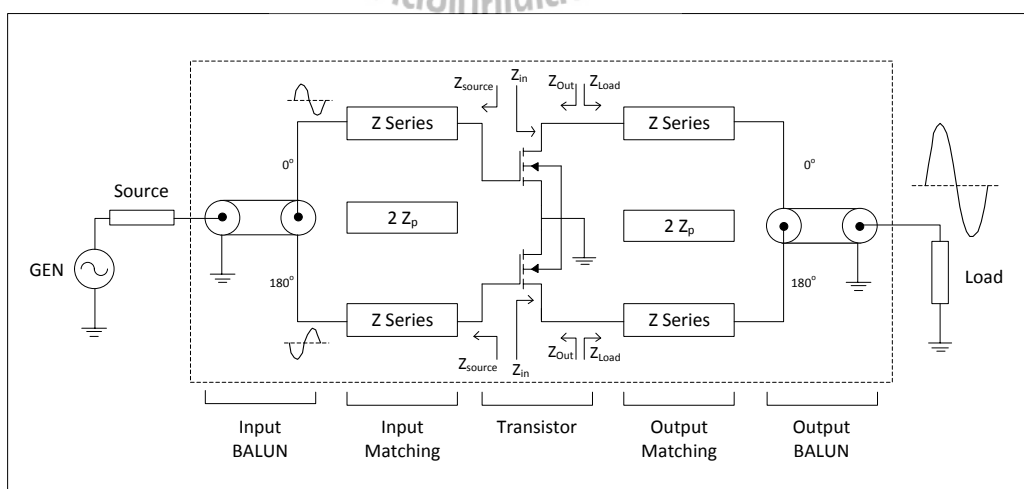
2.2.2 วงจรถายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดpush-pull

วงจรถายกำลังคลาสเอบีเป็นการรวมกันของวงจรถายกำลังคลาสเอกับคลาสบี ในส่วนของประสิทธิภาพและความเป็นเชิงเส้น โดยพื้นฐานของทรานซิสเตอร์จะใช้การไบอัสที่ บริเวณใกล้จุดวิกฤต โดยคลาสเอบีจะไบอัสที่บริเวณใกล้จุดตัด ซึ่งเมื่อทรานซิสเตอร์ทำการขยาย สัญญาณครึ่งรอบสัญญาณจะคล้ายกับการทำงานของคลาสบี และถ้าขยายสัญญาณสัญญาณเต็มรอบ สัญญาณก็จะเป็นคลาสเอดังนั้นเราจึงใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันจำนวน 2 ตัวในการขยาย สัญญาณ โดยแบ่งกันขยายแต่ละ ครึ่งคาบสัญญาณโดยตัวแรกขยายซีกบวก ตัวที่สองขยายซีกลบ แล้วย่านาสัญญาณที่ได้จากทั้งสองตัวมารวมกัน ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า วงจรถายสัญญาณชนิดpush-pull โดย ส่วนประกอบของวงจรถายสัญญาณชนิดpush-pull จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ 1. วงจรบาลัน 2. วงจรแมตซ์ซิง 3. วงจรไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบที่สำคัญของวงจรขยายชนิดพุช-พูล

จากหลักการการทำงานของวงจรขยายสัญญาณแบบพุช-พูล นิยมใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันสองตัวแบ่งกันขยายสัญญาณตัวละครึ่งคาบทำให้ได้อัตราการขยายกำลังสูงขึ้น โดยใช้บาลัน (BALAN: BALance / UNbalance) เป็นอุปกรณ์ในการแบ่งสัญญาณอินพุตเป็นสองส่วนที่มีเฟสของสัญญาณอินพุตต่างกัน 180° พร้อมทั้งแปลงอิมพีแดนซ์ที่ไม่สมดุล (Unbalance) 50 โอห์ม เป็นแบบสมดุล (Balance) 25 โอห์มสองสัญญาณ หลังจากนั้นอินพุตเมตซ์ซึ่งเน็ตเวิร์คทำหน้าที่แมตซ์สัญญาณ Balance 25 โอห์ม กับ อินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ การแมตซ์สัญญาณระหว่างทรานซิสเตอร์ไปยังโหลดก็อาศัยหลักการนี้เช่นเดียวกัน โครงสร้างของวงจรขยายที่จะกล่าวต่อไป ซึ่งโครงสร้างของหลักการการทำงานของวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูลนั้นสามารถแสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างหลักการการทำงานของวงจรขยายสัญญาณชนิดพุช-พูล

2.2.3 คุณลักษณะวงจรรขยายสัญญาณ

ส่วนสำคัญของคุณลักษณะของวงจรรขยายสัญญาณคือประสิทธิภาพของวงจรรขยาย ความเป็นเชิงเส้น ความสามารถในการขยายสัญญาณ และอัตราขยายของวงจรรขยายสัญญาณ วงจรรขยายสัญญาณจะมีลักษณะที่เป็นเชิงเส้นถ้าสัญญาณอินพุตและกำลังขยายสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะสัญญาณที่เป็นไปในทางเดียวกันซึ่งจะมีลักษณะการแปรผันตรงตามสมการที่ 2.1

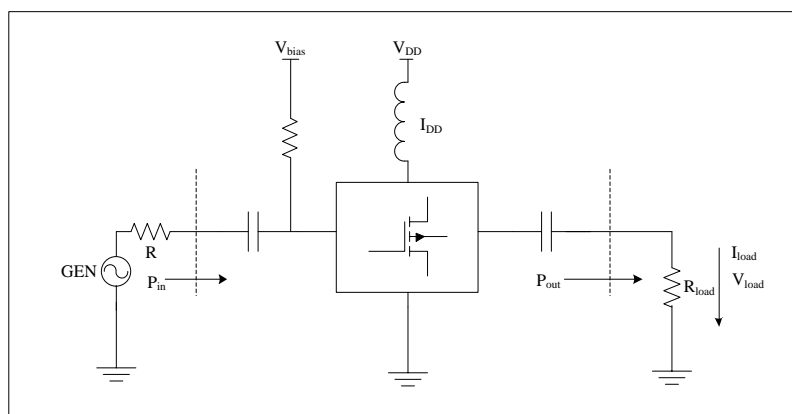
$$V_o(t) = AV_i(t) \quad (2.1)$$

เมื่อ $V_o(t)$ คือ สัญญาณเอาต์พุต

$V_i(t)$ คือ สัญญาณอินพุต

A คือ อัตราขยายคงที่

โดยทั่วไปวงจรรขยายสัญญาณจะมีลักษณะ 2 รูปแบบคือวงจรรขยายที่เป็นเชิงเส้น (Linear amplifier) และไม่เป็นเชิงเส้น (Non-linear amplifier) ส่วนใหญ่จะเป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้น สำหรับวงจรในรูปที่ 2.8 เป็นลักษณะรูปแบบทั่วไปของวงจรรขยายสัญญาณ ซึ่งอัตราขยายสัญญาณที่ได้จากวงจรรขยายนั้นสามารถหาได้จากสมการที่ 2.2 ส่วนที่เห็นได้ชัดเจนจากการขยายสัญญาณ โดย P_{in} เป็นกำลังสัญญาณที่พอร์ตอินพุตของวงจรและ P_{out} เป็นกำลังสัญญาณที่เอาต์พุตหรือฝั่งโหลด ซึ่งจะมีค่าความต้านทานโหลด R_{load} โดยที่ P_{out} สามารถพิจารณาจากรูปที่ 2.8 และสามารถคำนวณหาค่าได้จากส่วนประกอบพื้นฐานจากโหลดกระแส I_{load} และ โหลดแรงดัน V_{load} ดังแสดงในสมการที่ 2.3



รูปที่ 2.8 ลักษณะวงจรรขยายสัญญาณ

$$Gain = 10\log\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) \quad \text{dB} \quad (2.2)$$

$$P_{load} = V_{load} I_{load} \quad (2.3)$$

การจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงให้กับวงจรรขยายสัญญาณได้จากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (power supply) ซึ่งจะแบ่งเป็น 2 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนของฝั่งอินพุตของทรานซิสเตอร์หรือที่เรียกว่าการจ่ายไฟไบอัส (V_{bias}) และอีกส่วนคือส่วนของพลังงานของวงจรรขยายซึ่งจะอยู่ในส่วนของฝั่งเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ (V_{DD}) ซึ่งกำลังของไฟกระแสตรงทั้งหมดที่จ่ายให้วงจรรขยายสามารถหาได้จากสมการที่ 2.4

$$P_{load} = (V_{bias} I_{bias}) + (V_{DD} I_{DD}) \quad (2.4)$$

การออกแบบวงจรรขยายสัญญาณคือการออกแบบเพื่อต้องการได้ประสิทธิภาพ (Efficiency) ที่ดีที่สุดโดยได้จากการเปรียบเทียบระหว่างกำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรและค่าของกำลังเอาต์พุตของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงซึ่งสามารถหาค่าประสิทธิภาพของวงจรรขยายสัญญาณเป็นค่าในรูปของเปอร์เซ็นต์ได้จากสมการที่ 2.5

$$efficiency = \frac{P_{out}}{P_{dc}} \times 100\% \quad (2.5)$$

2.2.4 เสถียรภาพของวงจรรขยายสัญญาณ

เสถียรภาพของวงจรรขยายสัญญาณเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องพิจารณาในการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณโดยสามารถพิจารณาได้จากพารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameter) ซึ่งการตรวจสอบเสถียรภาพของวงจรรขยายสัญญาณจะพิจารณาจากค่า K (stability factor) ดังสมการที่ 2.6 โดยค่าเสถียรภาพของวงจรรขยาย (Δ) มีค่าดังสมการที่ 2.7

$$K = \frac{(1 + |\Delta|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2)}{(2 \times |S_{21}| \times |S_{12}|)} \quad (2.6)$$

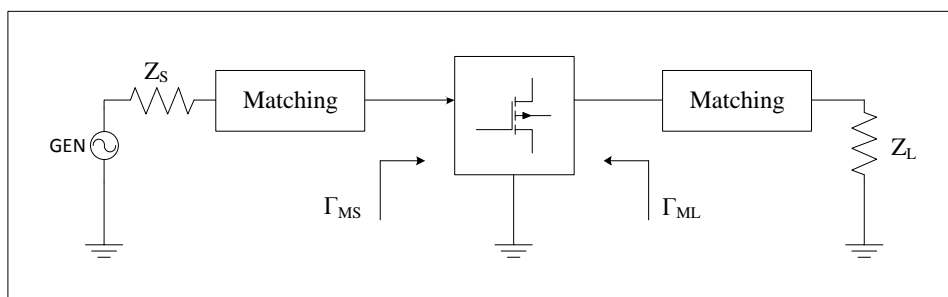
$$\Delta = S_{11}S_{22} - S_{21}S_{12} \quad (2.7)$$

ในการตรวจสอบเสถียรภาพวงจรรขยายสัญญาณจะพิจารณาค่า K จากสมการที่ 2.6 ซึ่งถ้าค่า $K > 1$ จะเป็นไปตามเงื่อนไขในการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณ แต่ถ้าค่า $K < 1$ จะทำให้ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขของการออกแบบวงจรรขยาย โดยจะทำให้วงจรที่ออกแบบมีการออสซิลเลตตัวเองขึ้น ซึ่งต้องใช้วิธีแก้ด้วยการออกแบบวงจรรขยายป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) เพื่อป้องกันการ ออสซิลเลตหรือใช้วิธีอื่น ๆ ในการป้องกัน

2.3 การแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรรขยายสัญญาณ

โดยทั่วไปวงจรรกำเนิดสัญญาณความถี่ (Generator) จะอยู่ส่วนหน้าของวงจรรขยายสัญญาณหรืออยู่ในส่วนอินพุตของระบบ โดยปกติแล้วจะถูกออกแบบมาสำหรับระบบอิมพีแดนซ์แบบ 50 โอห์ม คุณสมบัติของวงจรรกำเนิดความถี่อาจเปลี่ยนแปลงได้เมื่อค่าอินพุตหรือเอาต์พุตอิมพีแดนซ์มีค่าต่างออกไป ดังนั้นการแมตซ์อิมพีแดนซ์จึงเป็นสิ่งสำคัญ ดังนั้นจะต้องมีค่าอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมในช่วงความถี่ที่ต้องการ เช่นอิมพีแดนซ์วงจรรขยายสัญญาณทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตจะต้องแมตซ์เข้ากับอิมพีแดนซ์ของระบบเพื่อให้มีการส่งผ่านกำลังงานสูงสุด

วงจรรขยายสัญญาณจะมีกำลังงาน อัตราขยาย และประสิทธิภาพที่สูงได้ ต้องประกอบไปด้วยปัจจัยหลายอย่างทั้งโครงสร้างของวงจรและการออกแบบวงจรที่มีเสถียรภาพสิ่งสำคัญของการออกแบบวงจรรขยายสัญญาณคือการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทั้งทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรรขยายสัญญาณ (ชาญชัย ทองโสภณ, 2549) ทั้งนี้ก็เพื่อส่งผ่านกำลังงานในวงจรให้ได้มากที่สุด โดยลักษณะรูปแบบของโครงข่ายแมตซ์อิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุต ซึ่งจะมีคู่มแมตซ์คือ Z_S และ Γ_S และการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทางด้านเอาต์พุตซึ่งมีคู่มแมตซ์คือ Z_L และ Γ_L โดย Γ_S และ Γ_L จะใช้ใช้พารามิเตอร์การกระจัดกระจาย (S-parameter) ของมอสเฟตในการวิเคราะห์และออกแบบเพื่อรู้ค่าที่จำเป็นต้องใช้สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยสามารถเรียกค่าเหล่านี้ว่า Γ_{MS} และ Γ_{ML} ซึ่งทำให้ได้ค่าสำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ทางด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจร โดยสามารถใช้สมการในการคำนวณหาพารามิเตอร์ดังสมการ 2.8 และ 2.9 เพื่อทราบค่าพารามิเตอร์ Γ_{MS} และ Γ_{ML} ในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจร โดย Γ_{MS} เป็นค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านอินพุตของมอสเฟตสามารถหาได้จากสมการที่ 2.8 และ Γ_{ML} เป็นค่าของสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านเอาต์พุตของมอสเฟตสามารถหาได้จากสมการที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงข่ายแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์

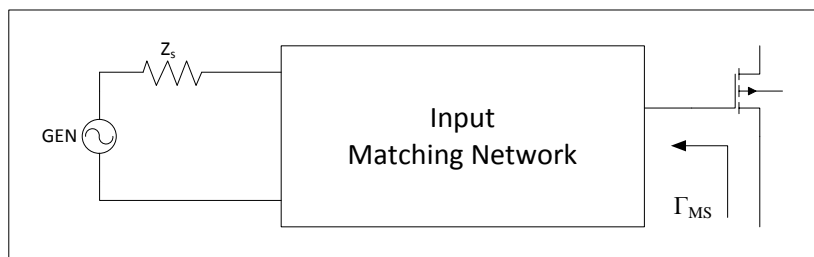
$$\Gamma_{MS} = \frac{B_1 \pm \sqrt{B_1^2 - 4|C_1|^2}}{2C_1} \quad (2.8)$$

โดยที่ $B_1 = 1 + |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2 - |\Delta|^2$ และ $C_1 = S_{11} - \Delta S_{22}^*$

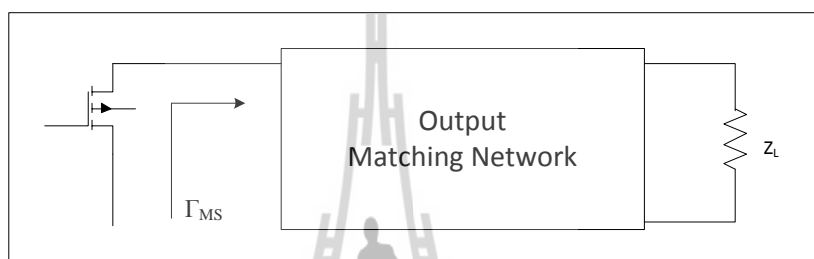
$$\Gamma_{ML} = \frac{B_2 \pm \sqrt{B_2^2 - 4|C_2|^2}}{2C_2} \quad (2.9)$$

โดยที่ $B_2 = 1 + |S_{22}|^2 - |S_{11}|^2 - |\Delta|^2$ และ $C_2 = S_{22} - \Delta S_{11}^*$

การแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ซึ่งจะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ทางด้านเข้าคู่การแมตซ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านอินพุตของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.10 และอิมพีแดนซ์ทางด้านออกซึ่งจะเป็นคู่ของการแมตซ์กับสัมประสิทธิ์การสะท้อนจากแหล่งจ่ายทางด้านเอาต์พุตของมอสเฟตแสดงดังรูปที่ 2.11 โดยการออกแบบวงจรแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์สามารถแมตซ์อิมพีแดนซ์ได้จากแผนภูมิสมิท (smith chart) โดยลักษณะรูปแบบของแผนภูมิสมิทได้จากการแปลงค่าโดยแผนภูมิก่า $Z = r + jx$ ลงในระนาบของ $\Gamma \angle \theta = u + jv$ โดยใช้สมการที่ 2.10 และ 2.11



รูปที่ 2.10 โครงข่ายแมตซ์ซิ่งอินพุตอิมพีแดนซ์



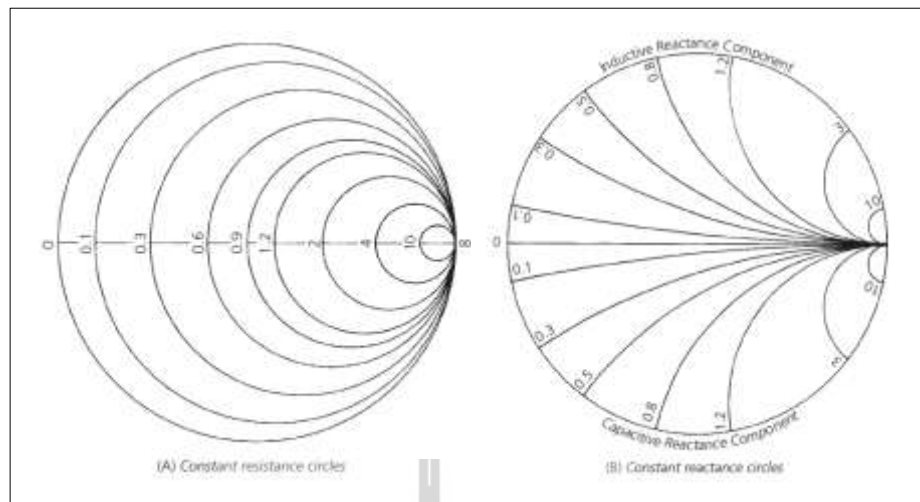
รูปที่ 2.11 โครงข่ายแมตซ์ซิ่งเอาต์พุตอิมพีแดนซ์

$$\Gamma = \frac{z - z_0}{z + z_0} \quad (2.10)$$

โดย $z = \frac{Z}{Z_0}$ คือค่านอร์มอลไลซ์ของอิมพีแดนซ์

$$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0} \quad (2.11)$$

ซึ่งจะทำให้ได้ชุดวงกลม ค่าตัวต้านทานคงที่กับวงกลมค่ารีแอ็กแตนซ์คงที่ ดังรูปที่ 2.12 บนระนาบ $u - v$ เมื่อนำวงกลมทั้งสองชุดมารวมกันจะเป็นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 โครงสร้างของแผนภูมิสมิท (RF circuit design 2nd Edition)

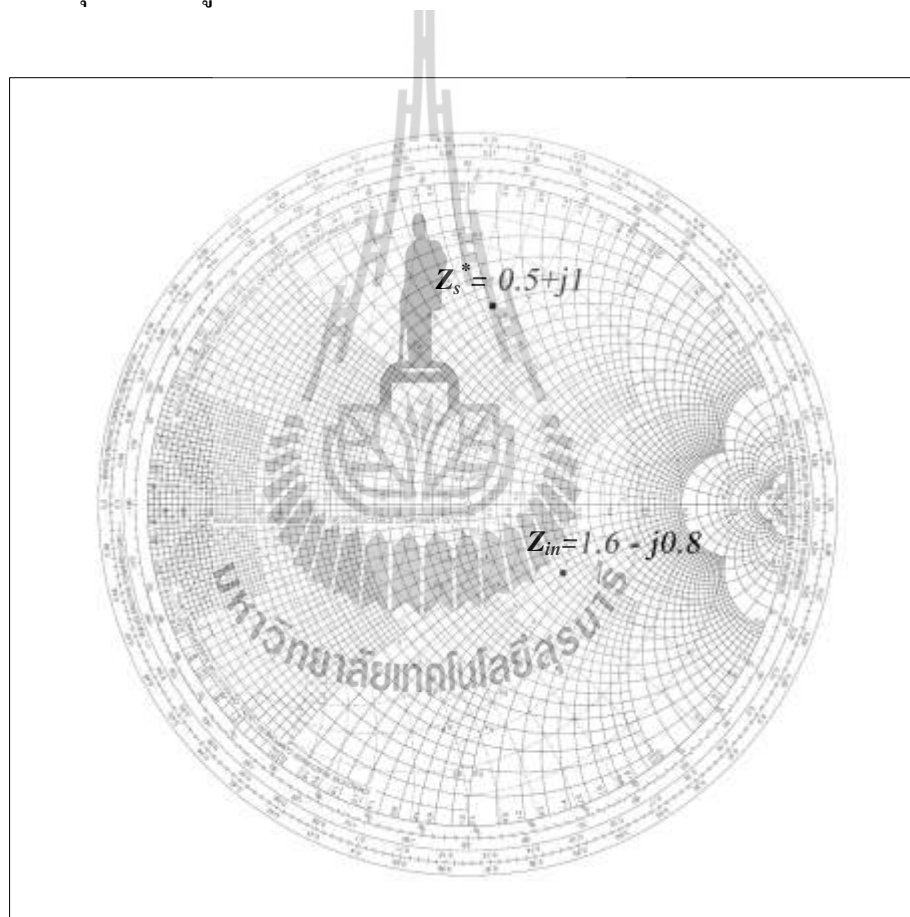
เนื่องจากขนาด u และ v ของ Γ ไม่ค่อยได้ใช้ ดังนั้นรูปแบบภาพจึงมีสเกลเป็นโพลาไร โดยมุมของ Γ อยู่บนสเกลตามเส้นรอบวงของรูปแบบภาพ ทั้งที่เป็นองศาและเศษส่วนของความยาวคลื่นและขนาดของ Γ หาได้จากสเกลได้รูปแบบภาพ ทำให้แผนภูมิสมิทมีประโยชน์มากในการแก้ปัญหาของสายส่งและการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี และง่ายต่อการออกแบบและการทำงาน

การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท ในแต่ละจุดบนแผนภูมิสมิทจะแสดงค่าของอิมพีแดนซ์ ซึ่งจะอยู่ในรูปของสมการ $Z = R + jX$ นั่นคือสามารถกำหนดจุดค่า Z ลงบนจุดที่เป็นจุดตัดระหว่างวงกลม R กับวงกลม X ได้เลยดังสมการกำหนดจุดต่าง ๆ โดยการแมตซ์อิมพีแดนซ์แผนภูมิสมิทเมื่อได้ค่าอิมพีแดนซ์ที่จะแมตซ์บนแผนภูมิสมิทแล้วสามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของอิมพีแดนซ์ โดยการใช้แผนภูมิสมิทดังนั้นจึงสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการแมตซ์ได้เป็นอย่างดีเมื่อทราบค่าของโหลดอิมพีแดนซ์และอิมพีแดนซ์ที่ต้องการ นอกจากนี้ยังสามารถแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรโดยใช้โครงข่ายแบบ 2 องค์ประกอบบนแผนภูมิสมิท ซึ่งการแมตซ์อิมพีแดนซ์บนแผนภูมิสมิทมีขั้นตอนดังนี้

1. สำหรับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ที่ได้คู่แมตซ์แล้วและถ้าค่าที่ได้อยู่ในรูปจำนวนเชิงซ้อนอิมพีแดนซ์ที่ต้องการเมื่อมองจากแหล่งจ่ายนั้นคือ การคอนจูเกตจำนวนเชิงซ้อนของด้านแหล่งจ่าย ตัวอย่างเช่น เมื่ออิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายเท่ากับ $Z_s = 25 - j50$ โอห์มและอิมพีแดนซ์ฝั่งโหลดเท่ากับ $Z_{in} = 75 - j40$ โอห์ม เมื่อมองจากแหล่งจ่ายทำให้ได้คู่แมตซ์เป็น $Z_s^* = 25 + j50$ กับ $Z_{in} = 80 - j40$

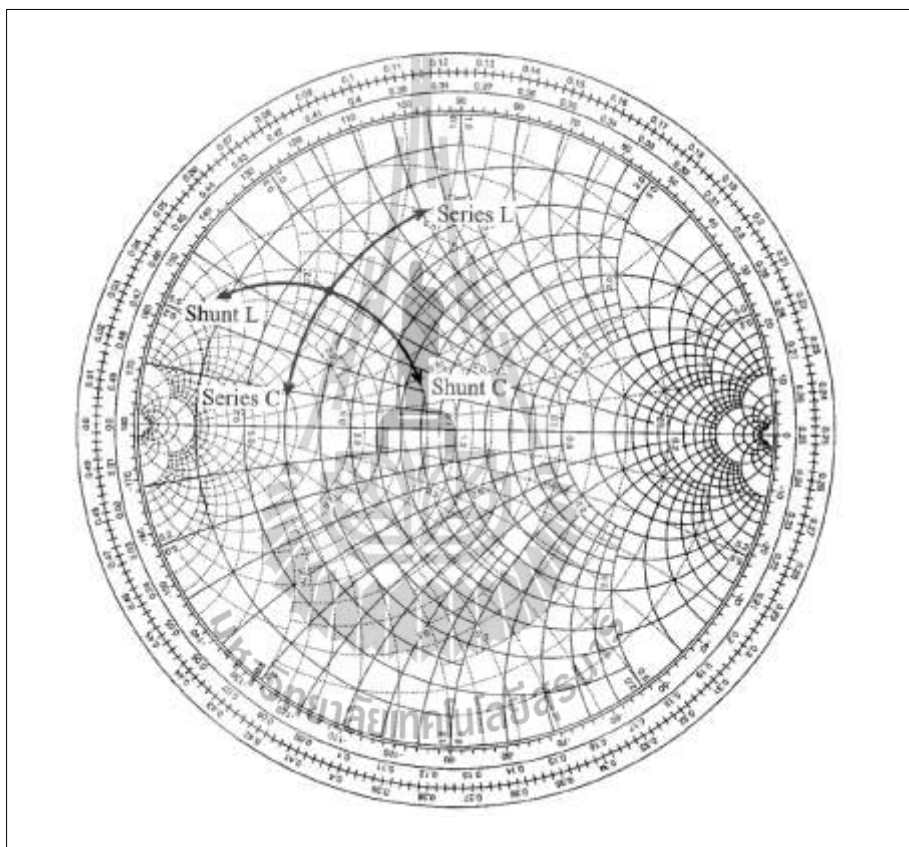
2. ถ้าค่าที่ต้องการแมตซ์มีค่าใหญ่เกินไปจะต้องทำการนอร์มอลไลซ์ด้วยค่าใดค่าหนึ่ง เพื่อให้ค่าเล็กลงทำให้ง่ายต่อการแมตซ์อิมพีแดนซ์และง่ายต่อการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท ซึ่งการกำหนดจุดลงบนแผนภูมิสมิทสามารถทำได้โดย จากค่าในข้อที่ 1 ทำการนอร์มอลไลซ์ด้วย 50 ทำให้ได้อิมพีแดนซ์ด้านแหล่งจ่ายเท่ากับ $Z_s^* = 0.5 + j1$ โอห์ม และอิมพีแดนซ์ด้านโหลดเท่ากับ $Z_{in} = 1.6 - j0.8$ เป็นคู่การแมตซ์อิมพีแดนซ์

3. หลังจากได้คู่การแมตซ์อิมพีแดนซ์แล้วสามารถกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิทเพื่อทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์แสดงดังรูปที่ 2.13 แสดงการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิทซึ่งนำค่าจากข้อที่ 2 มาใช้ในการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท



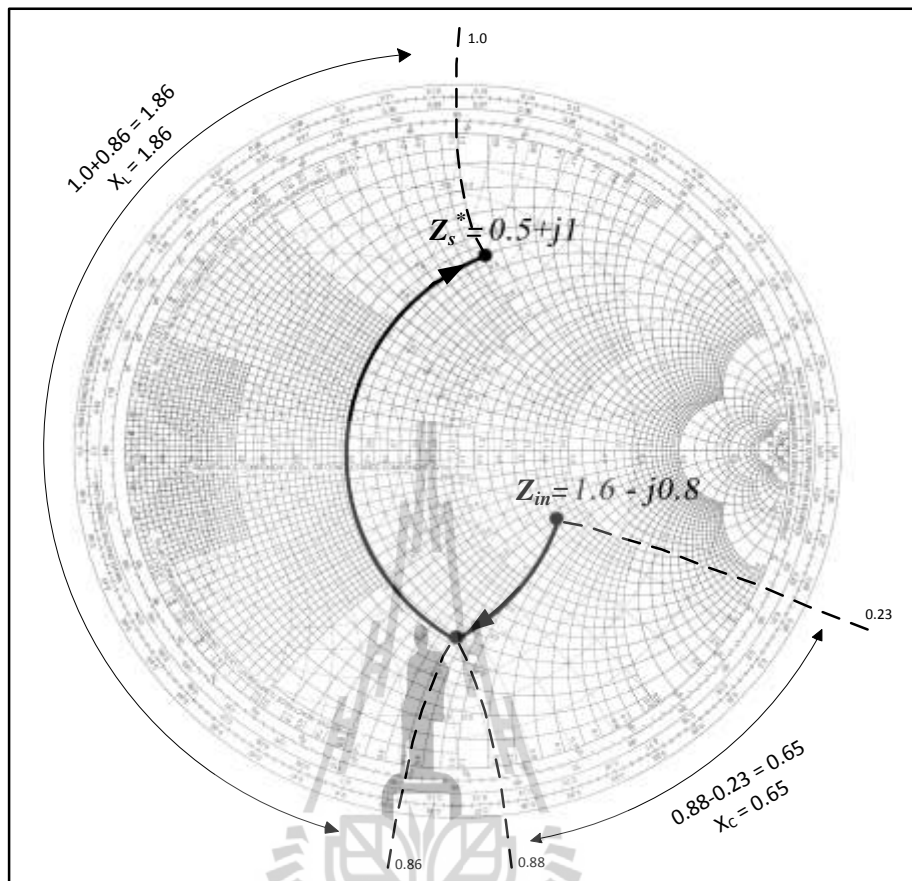
รูปที่ 2.13 การกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิท (Wikipedia.org)

4. หลังจากการกำหนดจุดบนแผนภูมิสมิทแล้วสามารถหาค่าองค์ประกอบต่าง ๆ จากจุดที่ต้องการแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อจำกัดค่าของพารามิเตอร์โดยลักษณะของพารามิเตอร์ที่ได้จากการวน ดังจะแสดงดังรูปที่ 2.14 โดยการวนในทิศทวนเข็มนาฬิกาตามเส้นแนวของเส้น Resistance เป็นการจำกัดค่า C อนุกรม การวนในทิศตามเข็มนาฬิกาตามเส้น Admittance เป็นการจำกัดค่า C ขนาน การวนในทิศทวนเข็มนาฬิกาตามเส้นแนวของเส้น Resistance เป็นการจำกัดค่า L อนุกรม และการวนในทิศทวนเข็มนาฬิกาตามเส้น Admittance เป็นการจำกัดค่า L ขนาน



รูปที่ 2.14 ทิศทางการเคลื่อนที่ของการแมตซ์อุปกรณ์บนแผนภูมิสมิท
(Ludwig bretchko, RF circuit design theory and applications)

5. เมื่อหาค่าองค์ประกอบได้แล้ว เราสามารถอ่านค่าที่ขององค์ประกอบจากการวนแผนภาพสมิทดังแสดงในรูปที่ 2.15 และสามารถนำค่ามาคำนวณตามสมการที่ 2.12 และ 2.13 นำเอาค่าที่ได้ไปแทนค่าที่ได้ลงในสมการที่ 2.14 และ 2.15 เพื่อที่จะหาค่าองค์ประกอบที่ทำการแมตซ์อิมพีแดนซ์ในรูปของค่าตัวเก็บประจุ (C) และตัวเหนี่ยวนำ (L)



รูปที่ 2.15 การอ่านค่าความยาวของส่วนโค้งบนแผนภูมิสมิท

$$X_c = \left[\frac{1}{+jc} \right] \quad (\text{Normalize}) \quad (2.12)$$

$$X_L = [+jL] \quad (\text{Normalize}) \quad (2.13)$$

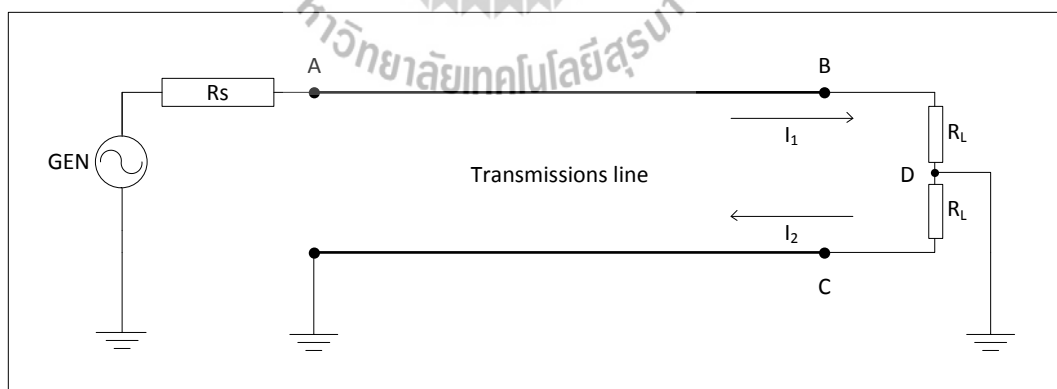
$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (2.14)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c} \quad (2.15)$$

2.4 วงจรบาลัน (BALance/UNbalance)

วงจรบาลันในวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดpush-พุท จะอยู่ในส่วนของอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ โดยวงจรบาลันนั้นมีหน้าที่แยกสัญญาณและรวมสัญญาณ ในส่วนการแยกสัญญาณนั้น จะใช้วงจรอินพุตบาลันในการแยกสัญญาณอินพุตที่เข้ามาให้เป็นสองสัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีความต่างเฟสกัน 180° และการรวมสัญญาณที่ฝั่งเอาต์พุตจะใช้วงจรเอาต์พุตบาลัน จากวงจรบาลันที่มีหน้าที่แยกสัญญาณและรวมสัญญาณของวงจรขยายชนิดpush-พุท ถ้าวงจรบาลันสามารถแยกสัญญาณเป็นสองสัญญาณและต่างกัน 180° ได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรวมสัญญาณ ได้อย่างสมบูรณ์แล้วจะทำให้วงจรขยายมีประสิทธิภาพมากขึ้น

หลักการทํางานของวงจรบาลันสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในสายส่งโคแอกเซียล (coaxial cable) ดังรูปที่ 2.16 จากรูปเราจะพิจารณาที่ปลายสายส่ง จุด B และ จุด C ที่เวลาหนึ่ง กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ โหลด R_L จุด B และกระแสที่ไหลออกจากโหลด จุด C จะมีปริมาณเท่ากัน แต่ทิศทางกระแสของกระแสเมื่อเทียบกับกราวด์ ที่จุด D จะพบว่าทิศทางตรงกันข้าม หรือกล่าวได้ว่าเฟสของกระแสมีความแตกต่างกัน 180° ซึ่งคุณสมบัติข้อนี้เป็นสิ่งที่เราต้องการเป็นประการแรกในการออกแบบสร้างบาลัน และประการที่สองที่อาจจะคำนึงในการสร้างบาลันคือความยาวของสายส่งหรือความยาวของบาลัน ที่จะมีผลต่อเฟสของกระแส ถ้าความยาวของสายส่งจากจุด A ถึงจุด B เท่ากับ $\lambda/4$ เฟสของกระแสที่จุด A กับจุด B จะต่างกัน 90°



รูปที่ 2.16 การทํางานของบาลัน

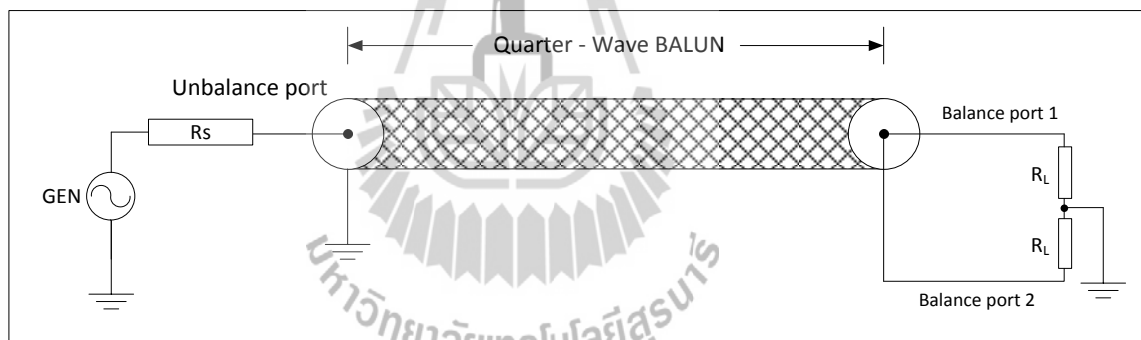
ในการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งโดยใช้ความยาวของสายส่ง เมื่อโหลดมีอิมพีแดนซ์ต่างจากอิมพีแดนซ์เฉพาะของสายส่งสามารถหาได้โดยสมการ

$$Z_{in}(d) = Z_0 \left[\frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta d)}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta d)} \right] \quad (2.16)$$

เมื่อ $\beta = \frac{2\pi}{\lambda}$

d = ความยาวของสายส่ง

โดยส่วนใหญ่แล้วค่าความยาวที่นิยมใช้โดยทั่วไปได้แก่ 0.25λ และ 0.5λ เป็นต้น เพราะที่ความเหล่านี้อิมพีแดนซ์มีเฉพาะค่าจริง $(Z_{in} = (R + jX)[\Omega] = (R + j0)[\Omega] = R[\Omega])$ วงจรบาลันอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.17

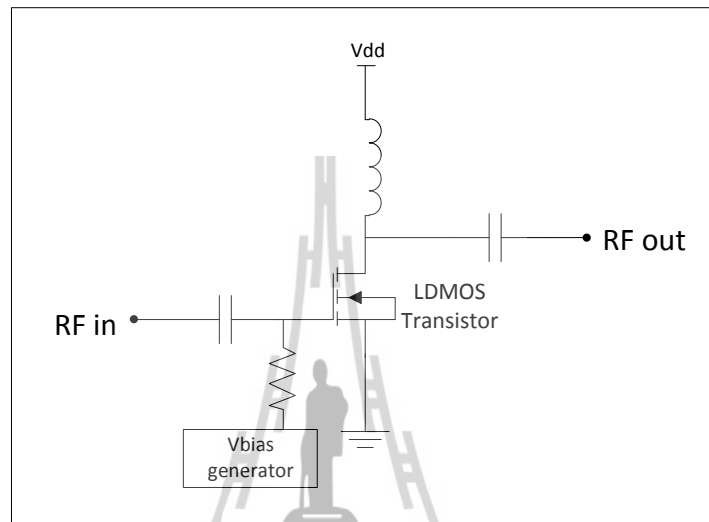


รูปที่ 2.17 แสดงวงจรบาลันอย่างง่าย

2.5 วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS

การไบอัสทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายสัญญาณเป็นการจ่ายไฟให้กับทรานซิสเตอร์ ซึ่งในการออกแบบวงจรไบอัสในวงจรขยายสัญญาณก็จะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับทรานซิสเตอร์แต่ละชนิด โดยในงานวิจัยนี้เราได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์ของบริษัท NXP เบอร์ BLF578 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS ซึ่งทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะนิยมใช้การไบอัสชนิดคงค่าแรง (Fixed bias) นั้นหมายถึงการคงค่าแรงดันที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์ให้คงที่ โดยส่วนใหญ่การคงค่าแรงดันที่ขาเกตนั้นจะใช้วงจรปรับค่าแรงดัน (Voltage regulator) ในการคงค่าแรงดันเพราะค่าแรงดันที่

ขาเกตจะมีค่าที่น้อยประมาณ 1-2 โวลต์ ซึ่งจะต่างกับที่ขาเดรนที่จะมีค่าแรงดันประมาณ 40 โวลต์ บางการออกแบบก็จะใช้แหล่งจ่ายในการไบอัส 2 แหล่งจ่ายเพื่อให้ง่ายต่อการปรับค่าไบอัสที่ขาเกต เนื่องจากการไบอัสที่ขาเกตนั้นมีผลอย่างมากต่ออัตราขยายและค่าประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์ วงจรไบอัสของทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แสดงวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS

2.6 ทฤษฎีการเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณ

คลื่นสัญญาณความถี่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าประกอบด้วยคลื่นไฟฟ้าและคลื่นแม่เหล็ก แสดงดังสมการที่ 2.17 และ 2.18 ซึ่งองค์ประกอบทั้งสองจะตั้งฉากกันและจะตั้งฉากกับทิศทางการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ในกรณีนี้คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามแกน z

$$E_x = E_{0y} \cos(\omega t - \beta z) \quad (2.17)$$

$$H_y = H_{0y} \cos(\omega t - \beta z) \quad (2.18)$$

โดยที่ E_{0y} คือสนามไฟฟ้ามีหน่วยเป็น V/m และ H_{0y} คือสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น A/m ในทางเทคนิค แล้วจะเรียกอัตราส่วนระหว่างสนามไฟฟ้ากับสนามแม่เหล็กนี้ว่า Intrinsic impedance แสดงดังสมการที่ 2.19

$$\begin{aligned}
 \frac{E_x}{H_y} &= Z_0 \\
 &= \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \\
 &= \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}}
 \end{aligned} \tag{2.19}$$

เมื่อค่า μ คือ ค่าความสามารถในการส่งผ่าน (permeability)

μ_0 คือ ค่าความสามารถในการส่งผ่านในสุญญากาศ (permeability of free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$

ϵ คือ ค่าความซึมซับของสัญญาณ (permittivity)

ϵ_0 คือ ค่าความซึมซับของสัญญาณในสุญญากาศ (permittivity of free space) ซึ่งมีค่าเท่ากับ $8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีความเร็วในการเคลื่อนที่แสดงดังสมการที่ 2.20

$$\begin{aligned}
 v_p &= \frac{\omega}{\beta} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

2.6.1 การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณในสุญญากาศ

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือคลื่นสัญญาณความถี่มีคุณสมบัติบางประการที่น่าสนใจ เช่น ความเร็วในการเคลื่อนที่ และความยาวคลื่นเป็นต้น ความเร็วในการเคลื่อนที่ของคลื่นวิทยุในสุญญากาศ สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.21

$$\begin{aligned}
 v_p &= \frac{\omega}{\beta} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0\epsilon_r\mu_0\mu_r}} \quad ; \mu_r = 1, \epsilon_r = 1 \\
 &= 2.99792 \times 10^8 \quad \text{m/s}
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

และคลื่นสัญญาณความถี่นี้มีความยาวคลื่นแสดงดังสมการที่ 2.22

$$\lambda = \frac{v_p}{f} \tag{2.22}$$

ในสุญญากาศสามารถหา Intrinsic impedance ได้ด้วยสมการที่ 2.23

$$\begin{aligned}
 Z_0 &= \sqrt{\frac{\mu_0\mu_r}{\epsilon_0\epsilon_r}} \quad ; \mu_r = 1, \epsilon_r = 1 \\
 &= \sqrt{\frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.85 \times 10^{-12}}} \\
 &= 376.8 \quad \Omega
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

เมื่อคลื่นสัญญาณเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางอื่นจะทำให้คลื่นสัญญาณเคลื่อนที่ช้าลงแต่ความถี่ยังคงเท่าเดิมและส่งผลทำให้ความยาวคลื่นลดลงด้วย

2.6.2 การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณผ่านสายโคแอกเซียล

เมื่อคลื่นวิทยุเคลื่อนที่ผ่านสายโคแอกเซียลความเร็วของคลื่นจะลดลง โดยค่า Relative dielectric constant (ϵ_r) ที่เป็นส่วนหนึ่งของสายโคแอกเซียลมีผลต่อการเดินทางของคลื่นสัญญาณในสายโคแอกเซียล ดังแสดงในสมการที่ 2.24

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2.24)$$

คุณสมบัติที่สำคัญของสายโคแอกเซียล คือ มีการค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะ (Characteristic line impedance) แสดงดังสมการที่ 2.25 ค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะนี้จะมีค่าคงที่ตลอดทุกความยาวสาย และสายโคแอกเซียลยังทำหน้าที่คล้ายตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุเมื่อมีคลื่นสัญญาณเคลื่อนที่ผ่าน ซึ่งเราจะสามารถคำนวณหาค่าความเหนี่ยวนำและค่าการเก็บประจุนี้ได้ จากสมการที่ 2.26 และ 2.27 จากคุณสมบัติข้างต้นเราสามารถนำเอาสายโคแอกเซียลไปใช้ในการออกแบบวงจรขยายได้

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{L'}{C'}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \mu_r}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \Omega \end{aligned} \quad (2.25)$$

เมื่อ a คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางในของสายโคแอกเซียล
 b คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางนอกของสายโคแอกเซียล

$$L = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad \text{H/m} \quad (2.26)$$

$$C = \frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad \text{F/m} \quad (2.27)$$

เมื่อ μ_0 คือค่าคงที่สัมประสิทธิ์การส่งผ่านในอากาศ มีค่าเท่ากับ $4\pi \times 10^{-7}$
 ϵ_0 คือค่าคงที่ของฉนวนไฟฟ้าในอากาศ มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-12}

โดยปรกติแล้วค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของสายโคแอกเซียลจะมีค่าประมาณ 1 ดังนั้นจึงเราสามารถจัดสมการ 2.26 และ 2.27 ให้คำนวณง่ายขึ้นโดยจะได้ดังสมการที่ 2.28 และ 2.29

$$L = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{2\pi} \ln\left(\frac{b}{a}\right) \quad H/m$$

$$L = 2 \times 10^{-7} \frac{\log(b/a)}{\log(e)} \quad H/m$$

$$L = 4.60517 \times 10^{-7} \times \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad H/m$$

$$L = 4.60517 \times \log\left(\frac{b}{a}\right) \quad nH/m \quad (2.28)$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r (8.854 \times 10^{-12})}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \quad F/m$$

$$C = \frac{5.56313 \times 10^{-12} \times \epsilon_r}{\frac{\log(b/a)}{\log(e)}} \quad F/m$$

$$C = \frac{24.1604 \times 10^{-12} \times \epsilon_r}{\log\left(\frac{b}{a}\right)} \quad F/m$$

$$C = \frac{24.1604 \times \epsilon_r}{\log\left(\frac{b}{a}\right)} \quad pF/m \quad (2.29)$$

2.6.3 การเคลื่อนที่ของคลื่นสัญญาณในไมโครสตริปไลน์

การเคลื่อนที่ของคลื่นความถี่วิทยุในไมโครสตริปไลน์ คล้ายกับการเคลื่อนที่ของคลื่นความถี่วิทยุ ข้อดีของ ไมโครสตริป คือ สามารถกำหนดค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะได้ ทำให้ยืดหยุ่นต่อการนำไปใช้ ค่าอิมพีแดนซ์เฉพาะของไมโครสตริปสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.28)

$$Z_0 = \frac{Z_f}{\sqrt{e_{eff}} \left(1.393 + \frac{w}{h} + \frac{2}{3} \ln\left(\frac{w}{h} + 1.444\right) \right)} \quad (2.28)$$

$$e_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2} \quad (2.29)$$

และความในการเคลื่อนที่ของคลื่นความถี่วิทยุในไมโครสตริป สามารถแสดงได้ดังสมการที่ 2.30

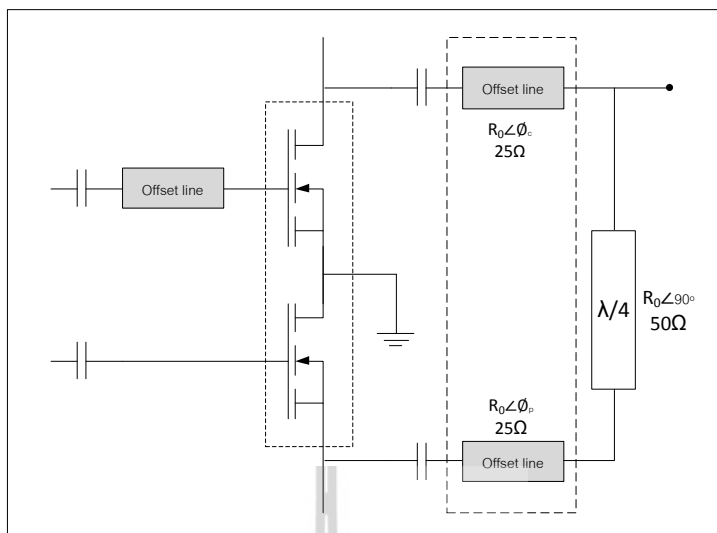
$$v_p = \frac{c}{e_{eff}} \quad (2.30)$$

2.7 การพัฒนาวงจรรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพวช-พวล

2.7.1 เทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตี (Invert Doherty)

เทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตี (Invert Doherty) เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยายกำลัง โดยเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีนั้นจะเหมาะสำหรับวงจรรขยายกำลังที่ใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวในการขยายกำลัง เช่น วงจรรขยายกำลังแบบพวช-พวล โดยเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีจะช่วยในการปรับเฟสของสัญญาณทั้งก่อนที่เข้าทรานซิสเตอร์และก่อนที่จะรวมสัญญาณฝั่งเอาต์พุต การปรับเฟสของสัญญาณนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยายรวมถึงลดการสูญเสียที่เกิดจากการเลื่อนเฟสของสัญญาณบริเวณของการรวมสัญญาณฝั่งเอาต์พุต ซึ่งเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีจะใช้ไมโครสตริปที่มีความยาว $\lambda/4$ ในส่วนของวงจรรไบอัส และในส่วนความยาวในส่วนของการปรับเฟสนั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และความกว้างขึ้นอยู่กับขนาดของอิมพีแดนซ์ในส่วนที่เพิ่มเข้าไป วงจรของเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีตามทฤษฎีนั้นจะแสดงดังรูปที่ 2.19

ในงานวิจัยนี้ได้คิดที่จะนำเอาเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีเข้ามาช่วยในการเรียงเฟสของสัญญาณในส่วนสัญญาณก่อนเข้าทรานซิสเตอร์และก่อนที่จะทำการรวมสัญญาณฝั่งเอาต์พุต แต่เนื่องจากการเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีเป็นการเพิ่มเข้าไปในส่วนของวงจรรแมตซ์ซิงของวงจรรขยายกำลัง ทำให้เทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีมีผลอย่างมากต่อส่วนวงจรรแมตซ์ซิงและความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรรขยายกำลัง ดังนั้นเราจึงต้องคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของเทคนิคอินเวิร์ตโดเฮอร์ตีให้ใกล้เคียงกับวงจรรแมตซ์ซิงมากที่สุด โดยในส่วนของวงจรรแมตซ์ซิงฝั่งเอาต์พุตจะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของวงจรรแมตซ์ซิงและอินพุตของวงจรรบาลัน ซึ่งขนาดของอิมพีแดนซ์บริเวณนั้นจะมีค่า 25Ω ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการไม่แมตซ์ซิงของวงจรรได้ และในส่วนของปัญหาที่เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรรขยายกำลังนั้นเราได้เลือกใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) เข้ามาช่วยให้วงจรรขยายมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น



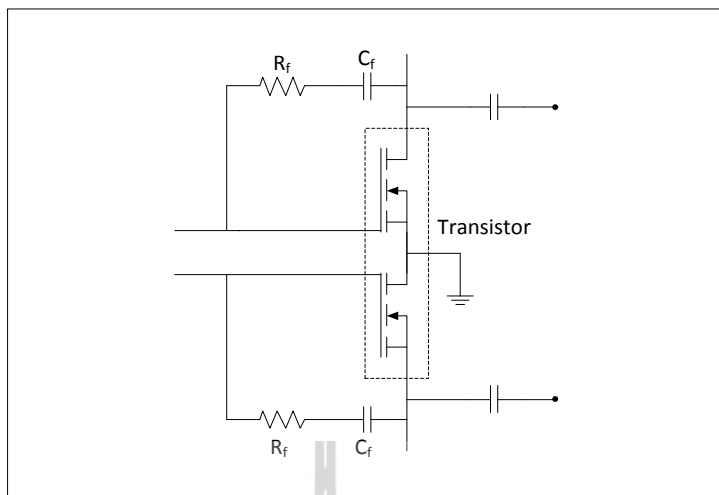
รูปที่ 2.19 วงจรเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้ (Invert Doherty)

2.7.2 เทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback)

การป้อนกลับแบบลบเป็นเทคนิคที่นำเอาสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเดรน ป้อนกลับมายังอินพุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเกต ทำให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณอินพุต เรียกว่า การป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ คาปาซิเตอร์ (C) และตัวต้านทาน (R) ใช้ในการป้อนกลับสัญญาณ โดยการป้อนกลับแบบลบจะช่วยให้การปรับค่า อัตราการขยายของวงจรขยายกำลัง ให้มีความราบเรียบและช่วยให้วงจรขยายมีแบนวิดท์ที่กว้างขึ้น โดยวงจรเทคนิคการป้อนกลับแบบลบสามารถแสดงดังรูปที่ 2.20

การเพิ่มวงจรการป้อนกลับแบบลบเข้าไปในวงจรขยายกำลัง ช่วยให้วงจรขยายกำลังมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ประสิทธิภาพดีขึ้น แต่เทคนิคนี้เป็นการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเดรนป้อนกลับมายังอินพุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเกตทำให้ในส่วนของวงจรแมตซ์ซิ่งด้านอินพุตถูกรบกวน ทำให้อาจเกิดการไม่แมตซ์ซิ่งของส่วนนี้ได้ แต่ผลกระทบจากการป้อนกลับของสัญญาณอาจจะเกิดไม่มากนักดังจะแสดงในส่วนของการจำลองผล

การที่เรานำเอาเทคนิคการป้อนกลับแบบลบมาทำให้วงจรขยายกำลังมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ดังนั้นเมื่อนำเอาเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายได้ แต่ขาดความเป็นเชิงเส้นมารวมกันกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบที่สามารถเพิ่มความเป็นเชิงเส้นของวงจรขยายได้ เมื่อนำเอาสองเทคนิคนี้มารวมเราก็จะได้วงจรขยายที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น



รูปที่ 2.20 วงจรเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback)

2.8 สรุป

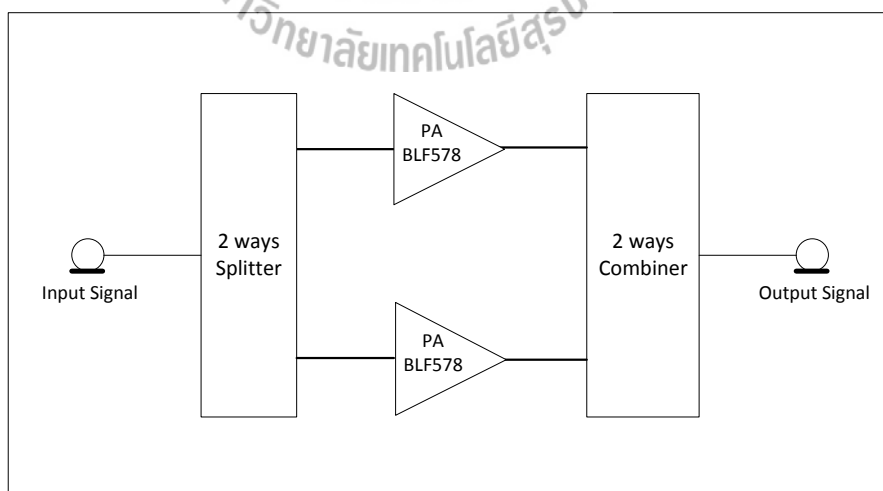
ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล นั้น เราต้องเข้าใจถึงทฤษฎีและหลักการการทำงานของวงจรขยาย ส่วนประกอบต่าง ๆ ของวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งหมดในการออกแบบสร้างและพัฒนางจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ซึ่งจะประกอบไปด้วยหลักการงานโดยทั่วไปของวงจรขยายสัญญาณชนิดพุช-พูล คุณลักษณะของวงจรขยายสัญญาณซึ่งจะกล่าวถึงความสำคัญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณ ค่าเสถียรภาพของวงจร การคำนวณค่าอัตราขยาย การคำนวณค่าประสิทธิภาพของวงจร วิธีการแมตซ์อิมพีแดนซ์ของวงจรขยาย การออกแบบวงจรแยกสัญญาณและรวมสัญญาณหรือที่เรียกว่า วงจรบาลัน การไป้อัศจรรย์ชนิด LDMOS และสุดท้ายกล่าวถึงการพัฒนาจจรขยายคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล โดยใช้เทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ตี (Invert Doherty) ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบทำให้ได้วงจขยายสัญญาณที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากการลดการสูญเสียภายใน (Insertion loss) ของวงจรขยายทำให้ได้ค่าประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อเราทราบถึงทฤษฎีที่สำคัญในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณแล้วเราก็สามารถนำทฤษฎีเหล่านี้ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณเพื่อใช้งานจริงต่อไป

บทที่ 3

การออกแบบวงจรขยายคลื่นวิทยุแบบโซลิตสเตทขนาด 1 กิโลวัตต์

3.1 กล่าวนำ

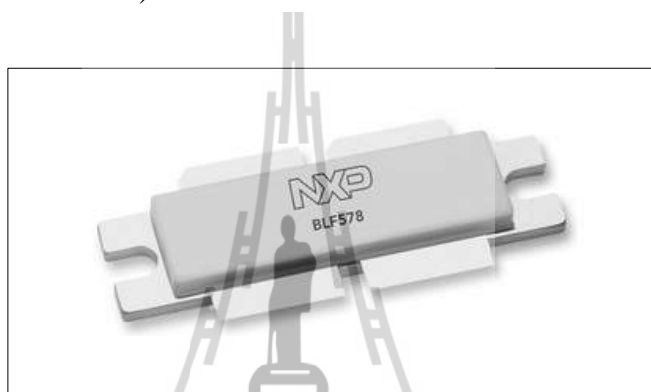
งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการวงจขยายกำลังขนาด 1 กิโลวัตต์ ที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยงานวิจัยได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ของบริษัท NXP semiconductor โดยวงจขยายที่เรานำมาออกแบบนั้นจะถูกนำไปทดสอบใช้งานกับโหลดจำลอง ก่อนที่จะนำไปใช้งานจริงกับดาวเทียม ดังนั้นการออกแบบจะอิงการใช้งานจริงของวงจขยายเป็นหลักซึ่งจะถูกใช้งานที่ประมาณ 60% ของกำลังขยายที่สามารถขยายได้ ทั้งนี้เพื่อยืดระยะเวลาการใช้งานของวงจขยายให้นาน จากคุณสมบัติของทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 นั้นสามารถให้กำลังงานประมาณ 1000 วัตต์ และเมื่อนำมาใช้งานที่ประมาณ 60% ของกำลังงานปรกติ เราจะต้องใช้วงจขยาย BLF578 จำนวน 2 บอร์ด แล้วนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มารวมกันเพื่อได้กำลังงาน 1000 วัตต์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 สำหรับการออกแบบวงจขยายสัญญาณนั้นจะเริ่มจากการคำนวณค่าต่างๆ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้วนำค่าที่ได้มาสร้างตามที่ได้คำนวณไว้ ซึ่งรายละเอียดการออกแบบนั้นจะแสดงในบทนี้



รูปที่ 3.1 โครงสร้างวงจขยายสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์

3.2 ประสิทธิภาพของทรานซิสเตอร์ BLF578

สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ใช้ในการขยายกำลังเพราะมีความแข็งแรง ทนความร้อนที่สูงได้และมีประสิทธิภาพสูงเพราะเป็นทรานซิสเตอร์ที่ใช้งานแบบชนิดพหุ-พูด ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 นี้เป็นผลิตภัณฑ์ของ NXP semiconductor สามารถทำงานที่ย่านความถี่ 10 – 500 MHz ที่แหล่งจ่ายไฟ 50Vdc จากการทดสอบทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 225 MHz สามารถให้พลังงานแก่โหลดสูงสุด 1200W มีอัตราขยายประมาณ 24dBm และมีประสิทธิภาพ 71% อุปกรณ์นี้มีความไวต่อไฟฟ้าสถิตย์ก็ทั้งยังสามารถทนความร้อนได้ถึง 150° (BLF578 product data sheet)



รูปที่ 3.2 ทรานซิสเตอร์ BLF578 (Datasheet BLF578)

3.3 การออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์ เราจะใช้ทรานซิสเตอร์ BLF578 ในการขยายสัญญาณ ซึ่งเราได้กำหนดแรงดันไบอัสที่ขาเดรนเท่ากับ 40 โวลต์ และแรงดันไบอัสที่ขาเกตประมาณ 1.2-1.5 โวลต์ การออกแบบวงจรมันนั้นเราจะออกแบบเป็นคลาส เอบี ชนิดพหุ-พูด โดยเราได้เลือกใช้วงจรบาลันในการแยกสัญญาณและรวมสัญญาณ และใช้การแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์แบบทรานฟอร์มเมอร์แมตซ์ซิ่ง ค่าอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายนั้นมีค่าเท่ากับ 50 โอห์ม โดยการออกแบบวงจรขยายเราได้เลือกใช้แผ่นวงจรชนิด RF35 ของ Taconic ซึ่งทำจากเทฟลอน สามารถรองรับพลังงานได้สูงถึง 1500 วัตต์ ซึ่งจะมีความหนา 0.76 มิลลิเมตร ความหนาของทองแดง 0.035 มิลลิเมตร มีค่าการนำสัญญาณ (ϵ_r) เท่ากับ 3.5 ในการออกแบบวงจรขยายในงานวิจัยจะเลือกใช้อุปกรณ์ในการสร้างวงจรขยายที่มีคุณภาพ สามารถรองรับพลังงานได้สูง ทนกระแสได้สูง เพื่อให้ได้วงจรที่มีประสิทธิภาพและการใช้งานที่นาน

3.3.1 การคำนวณหาค่าอินพุต / เอาท์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์

การคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่เราจำเป็นต้องคำนวณหาคือค่าอิมพีแดนซ์ฝั่งอินพุตและเอาท์พุต เนื่องจากค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์จะเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของสัญญาณอินพุตที่เข้ามา ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องรู้ค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ที่เราออกแบบ โดยในงานวิจัยนี้ออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ จากตารางที่ 3.1 เราสามารถคำนวณหาค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยใช้สมการหาค่าเฉลี่ยดังแสดงในสมการที่ 3.1 ซึ่งเราจะนำค่าที่คำนวณได้นี้ไปใช้ในการออกแบบวงจรแมตซ์ซิ่งทั้งด้านอินพุตและเอาท์พุตต่อไป

$$\frac{f_{\max} - f_{\min}}{[\text{Re}], [\text{Im}]_{\max} - [\text{Re}], [\text{Im}]_{\min}} = \frac{f_{\max} - f_x}{[\text{Re}], [\text{Im}]_{\max} - [\text{Re}], [\text{Im}]_x} \quad (3.1)$$

เมื่อ	f_{\max}	คือ ค่าความถี่ที่อยู่ในช่วงที่สูงกว่าค่า f_x
	f_{\min}	คือ ค่าความถี่ที่อยู่ในช่วงที่ต่ำกว่าค่า f_x
	$[\text{Re}], [\text{Im}]_{\max}$	คือ ค่าจำนวนจริงหรือค่าจำนวนจินตภาพของ f_{\max}
	$[\text{Re}], [\text{Im}]_{\min}$	คือ ค่าจำนวนจริงหรือค่าจำนวนจินตภาพของ f_{\min}
	f_x	คือ ค่าความถี่ที่เราต้องการ
	$[\text{Re}], [\text{Im}]_x$	คือ ค่าจำนวนจริงหรือค่าจำนวนจินตภาพของ f_x

ตารางที่ 3.1 ตารางค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ BLF578 (AN1800-BLF578 application note)

Frequency (MHz)	Input		Output	
	Z_i		Z_o	
25	1.176	-j13.262	1.697	-j0.060
50	1.176	-j6.617	1.688	-j0.120
75	1.176	-j4.395	1.674	-j0.178
100	1.176	-j3.280	1.654	-j0.234
125	1.176	-j2.607	1.630	-j0.288
150	1.176	-j2.155	1.600	-j0.338
175	1.177	-j1.830	1.567	-j0.385
200	1.177	-j1.583	1.531	-j0.427
225	1.177	-j1.390	1.491	-j0.466
250	1.178	-j1.233	1.449	-j0.500
275	1.178	-j1.103	1.406	-j0.531

3.3.1.1 การคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์

ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์คือค่าอิมพีแดนซ์ของขาเกตนั้นก็คือขาที่ 3 กับขาที่ 4 ของทรานซิสเตอร์ ซึ่งวิธีการคำนวณนั้นจะอ้างอิงข้อมูลของทรานซิสเตอร์ดังตารางในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าความถี่ที่เราออกแบบ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์นั้นอยู่ระหว่างค่าความถี่ 100 – 125 เมกกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นเราจะใช้ข้อมูลของทั้งสองความถี่นี้หาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยการคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์นั้นเราจะใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณ

จากตารางในรูปที่ 3.2 เราจะได้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 100 เมกกะเฮิร์ตซ์เท่ากับ $Z_{in} = 1.176-j3.280$ โอห์มและที่ความถี่ 125 เมกกะเฮิร์ตซ์มีค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $Z_{in} = 1.176-j2.607$ โอห์ม นำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยสมการ 3.1 จะได้

$$\frac{125-100}{(1.176-j2.607)-(1.176-j3.280)} = \frac{125-118}{(1.176-j2.607)-[Re],[Im]_x}$$

จะได้ค่า

$$-j37.1471 = \frac{7}{(1.176-j2.607)-[Re],[Im]_x}$$

$$[Re],[Im]_x = 1.176-j2.79544 \text{ } \Omega$$

จากการคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์เราจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์เท่ากับ $Z_{in} = 1.176-j2.79544$ โอห์ม

3.3.1.2 การคำนวณหาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์

ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่เราจะคำนวณหา นั่นก็คือค่าอิมพีแดนซ์ที่ขาเดรน ขาหมายเลข 3 และ 4 ของทรานซิสเตอร์ ในการคำนวณค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์จะมีวิธีคล้ายกับการคำนวณหาค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ นั่นก็คืออ้างอิงข้อมูลจากตารางในรูปที่ 3.2 แล้วใช้สมการที่ 3.1 ในการคำนวณ

จากตารางในรูปที่ 3.2 เราจะได้ค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 100 เมกกะเฮิร์ตซ์เท่ากับ $Z_o = 1.654-j0.234$ โอห์มและที่ความถี่ 125 เมกกะเฮิร์ตซ์มีค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เท่ากับ $Z_o = 1.630-j0.288$ โอห์ม นำค่าที่ได้มาคำนวณด้วยสมการ 3.1 จะได้

$$\frac{125-100}{(1.630-j0.288)-(1.654-j0.234)} = \frac{125-118}{(1.630-j0.288)-[\text{Re}],[\text{Im}]_x}$$

$$\text{จะได้ค่า} \quad -171.8213 + j386.5979 = \frac{7}{(1.630-j0.288)-[\text{Re}],[\text{Im}]_x}$$

$$[\text{Re}],[\text{Im}]_x = 1.63672 - j0.27288 \ \Omega$$

จากการคำนวณหาค่าเอาต์พุตอิมพีแดนซ์เราจะได้อิมพีแดนซ์ของทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์เท่ากับ $Z_o = 1.63672 - j0.27288$ โอห์ม

3.4 การออกแบบวงจรบาลัน (BALance/UNbalance)

วงจรบาลันในวงจรขยายสัญญาณชนิดพหุ-พุล จะอยู่ในส่วนอินพุตและเอาต์พุตของวงจร ในส่วนของอินพุตจะมีหน้าที่แยกสัญญาณอินพุตที่เข้ามาให้เป็น 2 สัญญาณซึ่งแต่ละสัญญาณมีเฟสต่างกัน 180° และในส่วนของเอาต์พุตวงจรบาลันมีหน้าที่รวมสัญญาณ

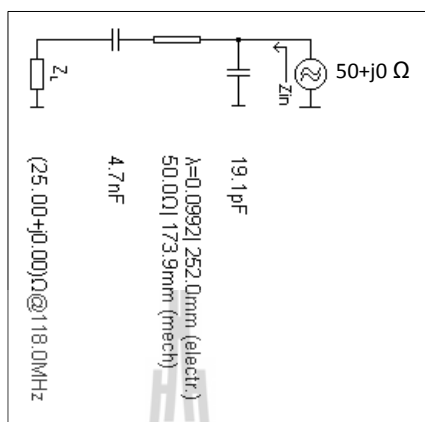
ในการออกแบบวงจรบาลันในวงจรขยายสัญญาณ ชนิดพหุ-พุล จะออกแบบสร้างจากสายโคแอกเซียลที่มีอิมพีแดนซ์ 50 โอห์ม เมื่อแยกสัญญาณออกเป็นสองสัญญาณจะได้อิมพีแดนซ์ที่ฝั่งเอาต์พุตของวงจรบาลันเป็น 25 โอห์ม ซึ่งจะหมายถึงค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของอินพุตแมตซ์ซึ่งเน็ตเวิร์คแต่ละซีกมีค่าเป็น 25 โอห์ม เมื่อรวมกันแล้วจะเป็น 50 โอห์ม ซึ่งจะแมตซ์กับบาลันที่มีอิมพีแดนซ์เฉพาะเท่ากับ 50 โอห์ม ทุกความยาวสาย

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้สาย RG316/U ในการออกแบบวงจรบาลันด้านอินพุตและใช้สาย RG142B/U ในการออกแบบวงจรบาลันด้านเอาต์พุต โดยสายทั้งสองเบอร์นี้มีอิมพีแดนซ์ของสาย 50 โอห์ม

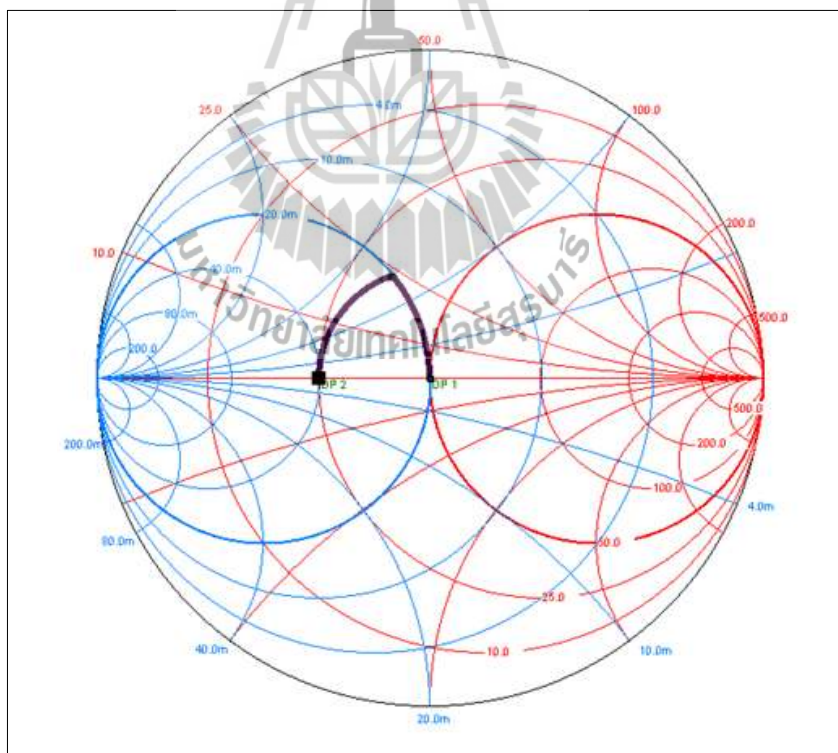
3.4.1 การออกแบบวงจรอินพุตบาลัน

วงจรอินพุตบาลันมีหน้าที่แยกสัญญาณอินพุตออกเป็นสองสัญญาณ โดยที่ตำแหน่งของอินพุตของวงจรอินพุตบาลันนั้นจะมีอิมพีแดนซ์เท่ากับ 50 โอห์มและอิมพีแดนซ์เอาต์พุตของวงจรอินพุตบาลันคือ 25 โอห์ม โดยจะทำการออกแบบวงจรอินพุตบาลันด้วยแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่าง 50 โอห์มฝั่งอินพุตกับ 25 โอห์มฝั่งเอาต์พุตของวงจรบาลัน การออกแบบวงจรอินพุตบาลันเราจะเลือกใช้สาย RG316/U ขนาด 50 โอห์มในการออกแบบ โดยวิธีการออกแบบจะเริ่มจากการใช้แผนภาพสมิทในการคำนวณหาค่า C และความยาวของสายโคแอกเซียลในวงจร และเพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบเราได้เลือกใช้โปรแกรม Smith 3.1 (fritz.dellsperger.net)

มาช่วยในการคำนวณแผนภาพสมิท และจากโปรแกรม Smith 3.1 จะได้ผลการออกแบบแสดงดังรูปที่ 3.3, 3.4 และตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.3 วงจรอินพุตบาลันที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม smith 3.1

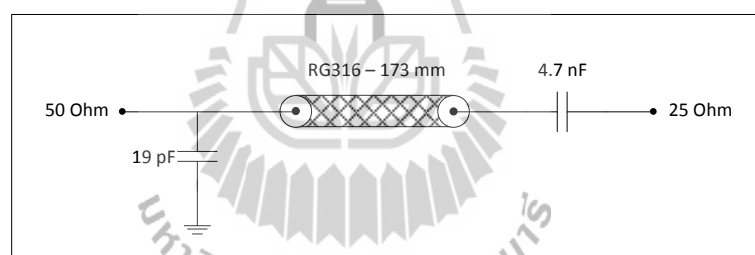


รูปที่ 3.4 ผลการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตบาลันโดยใช้โปรแกรม smith 3.1

ตารางที่ 3.2 ค่าการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตบาลันที่ได้จากโปรแกรม smith 3.1

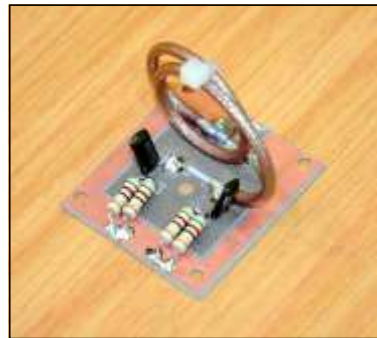
Data point	Z (Ω)	Q	Frequency (MHz)
DP 1	50.000 + j0.000	0.000	118.0
DP 2	25.000 + j0.000	0.000	118.0
TP 3	25.000 - j0.287	0.011	118.0
TP 4	33.337 + j23.577	0.707	118.0
TP 5	50.012 - j0.049	0.001	118.0

จากการออกแบบด้วยโปรแกรม smith 3.1 ทำให้ทราบค่าของความยาวของสายส่งในทางไฟฟ้า (Electrical length) เท่ากับ 252 มิลลิเมตร ค่าความยาวของสายส่งในทางกายภาพ (Physical length) เท่ากับ 173.9 มิลลิเมตร และจากคุณสมบัติของสาย RG316 ที่มีขนาดของตัวนำใน 0.54 มิลลิเมตร และขนาดของตัวนำนอก 1.55 มิลลิเมตรและมีฉนวนของสายเป็นแบบ Polytetrafluoroethylene (PTFE) ทำให้มีค่า ϵ_r เท่ากับ 2.1 ดังนั้นเราจึงต้องใช้สาย RG316 ยาว 173.9 มิลลิเมตรในการสร้างวงจรอินพุตบาลัน จากนั้นเราก็จะได้วงจรอินพุตบาลันดังแสดงในรูปที่ 3.5 ซึ่งจากรูปเราจะใช้ตัวเก็บประจุ 4.7 นาโนฟารัดสำหรับป้องกันไฟกระชาก

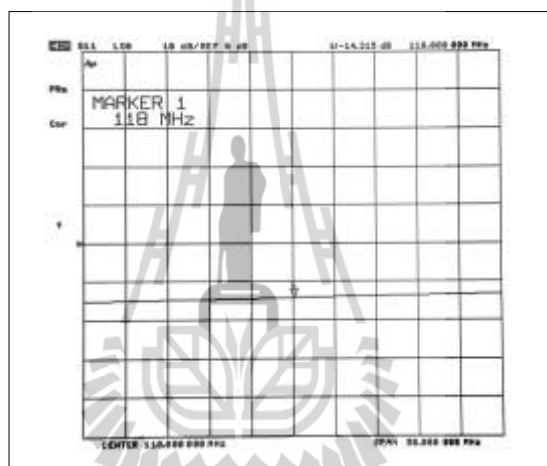


รูปที่ 3.5 วงจรอินพุตบาลันที่ออกแบบสมบูรณ์

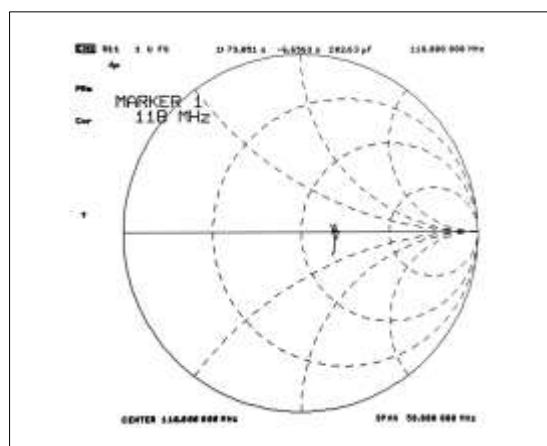
เมื่อเราได้วงจรอินพุตบาลันที่สมบูรณ์แล้ว เราก็จะนำวงจรอินพุตบาลันที่ออกแบบสมบูรณ์มาทดสอบ เพื่อให้ทราบถึงความสามารถในการใช้งานของวงจรอินพุตบาลันที่มีส่วนประกอบของสายโคแอกเซียลเป็นส่วนประกอบหลัก จากวงจรอินพุตบาลันที่ออกแบบสมบูรณ์เราก็นำมาสร้างวงจรจริง ซึ่งจะได้วงจรอินพุตบาลันตามรูปที่ 3.6 โดยโหนดของบาลันจะใช้เป็นตัวต้านทานขนาด 25 โอห์ม จากนั้นเราก็จะนำวงจรที่สร้างไปวัดด้วยเครื่องวิเคราะห์วงจร ซึ่งจะได้ค่าการสูญเสียภายในวงจร -14.1 dB คิดเป็นค่าการสูญเสียประมาณ 3.89% ซึ่งจะแสดงผลการทดสอบวงจรดังรูปที่ 3.7 และ 3.8



รูปที่ 3.6 วงจรอินพุตบาลันที่สร้างเสร็จสมบูรณ์



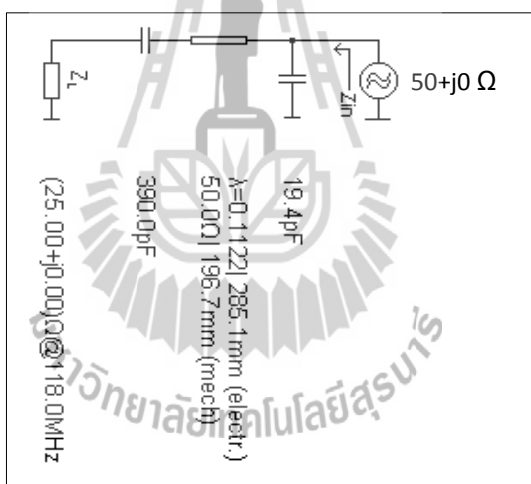
รูปที่ 3.7 ผลการทดสอบค่า Log magnitude ของวงจรอินพุตบาลันจากเครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย



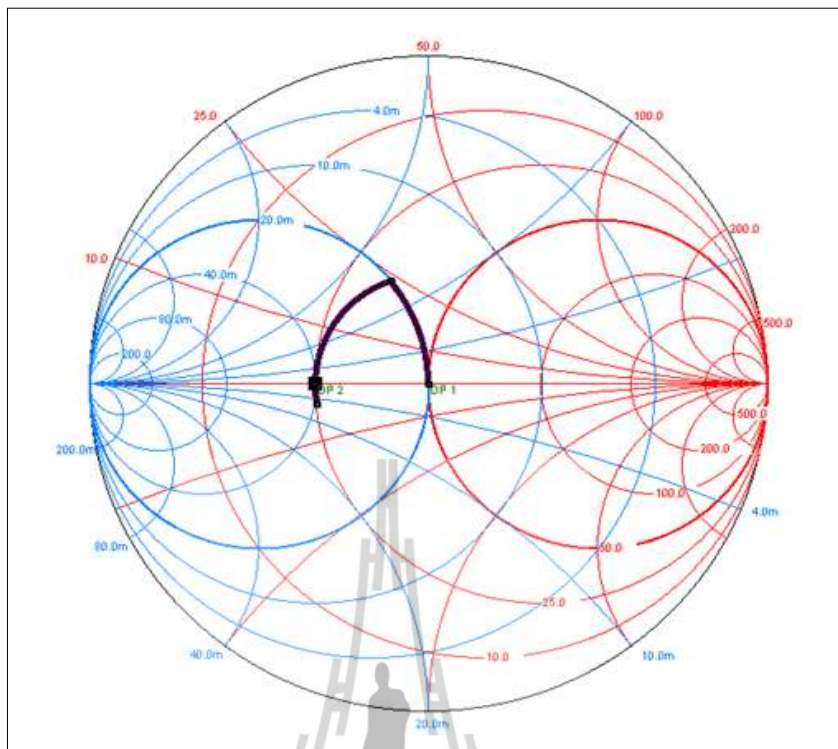
รูปที่ 3.8 ผลการทดสอบ smith chart ของวงจรอินพุตบาลันด้วยเครื่องวิเคราะห์วงจรข่าย

3.4.2 การออกแบบวงจรเอาต์พุตบาลัน

วงจรเอาต์พุตบาลันจะมีหน้าที่รวมสัญญาณในส่วนเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณชนิดpush-pull โดยในการออกแบบนั้นจะคล้ายกับการออกแบบวงจรอินพุตบาลัน ซึ่งจะทำให้การแมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่าง 25 โอห์มกับ 50 โอห์ม ซึ่งการออกแบบเราจะใช้โปรแกรม smith ช่วยในการออกแบบ ซึ่งส่วนประกอบหลักของวงจรเอาต์พุตบาลันนั้นจะใช้สายโคแอกเซียล RG142B/U เป็นส่วนประกอบหลัก ซึ่งสาย RG142B/U จะมีคุณสมบัติคือสามารถใช้งานได้ที่พลังงานสูงสุด 1500 วัตต์ มีขนาดของตัวนำใน 0.95 มิลลิเมตร และขนาดของตัวนำนอก 3.6 มิลลิเมตร โดยใช้ PTFE เป็นฉนวนของสายทำให้มีค่า ϵ_r เท่ากับ 2.1 และค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 50 โอห์ม สามารถทนอุณหภูมิได้สูงสุด 165 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิต่ำสุด -65 องศาเซลเซียส จากนั้นเราก็จะนำข้อมูลข้างต้น ไปออกแบบด้วยโปรแกรม smith 3.1 ซึ่งจะได้ผลการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.9, 3.10 และตารางที่ 3.3



รูปที่ 3.9 วงจรเอาต์พุตบาลันที่คำนวณโดยใช้โปรแกรม smith 3.1

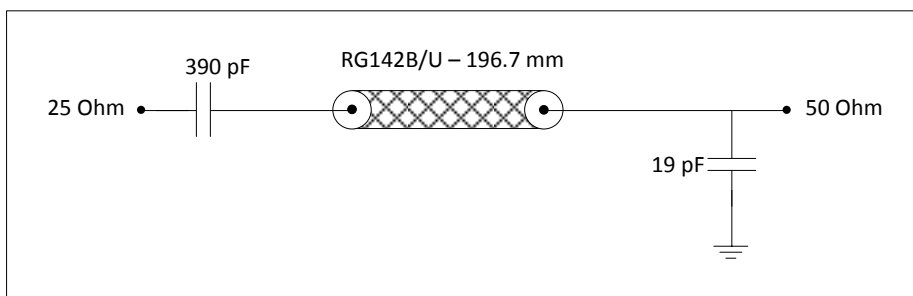


รูปที่ 3.10 ผลการรวนแผนภูมิสมิทของเอาท์พุทบาลัน โดยใช้โปรแกรม smith 3.1

ตารางที่ 3.3 แสดงค่าการรวนแผนภูมิสมิทของเอาท์พุทบาลันที่ได้จากโปรแกรม smith 3.1

Data point	Z (Ω)	Q	Frequency (MHz)
DP 1	25.000 + j0.000	0.000	118.0
DP 2	50.000 + j0.000	0.000	118.0
TP 3	25.000 - j3.458	0.138	118.0
TP 4	33.098 + j23.613	0.713	118.0
TP 5	49.943 - j0.246	0.005	118.0

จากการออกแบบวงจรเอาท์พุทบาลันด้วยโปรแกรม smith 3.1 ทำให้ได้ค่าความยาวของสายโคแอกเซียลในทางไฟฟ้าเท่ากับ 285.1 มิลลิเมตรและได้ค่าความยาวทางกายภาพ 196.7 มิลลิเมตร ดังนั้นเราจึงต้องใช้สาย RG142 ยาว 196.7 มิลลิเมตรในการสร้างวงจรเอาท์พุทบาลัน จากนั้นเราก็จะได้วงจรเอาท์พุทบาลันที่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.11 ซึ่งจากรูปเราจะใช้ตัวเก็บประจุ 390 พิโกฟารัดสำหรับป้องกันไฟกระแสดตรง



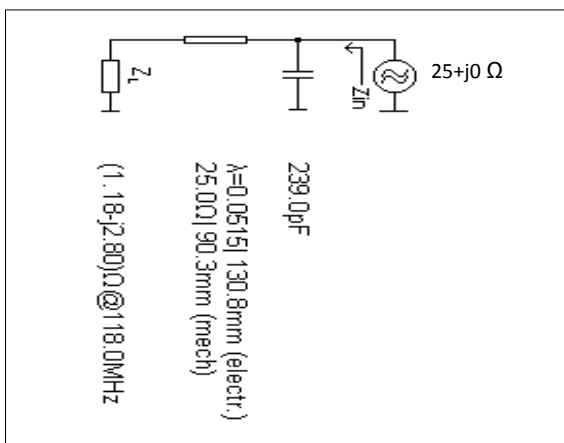
รูปที่ 3.11 วงจรเอาต์พุตบาลันที่ออกแบบสมบูรณ์

3.5 วงจรแมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์

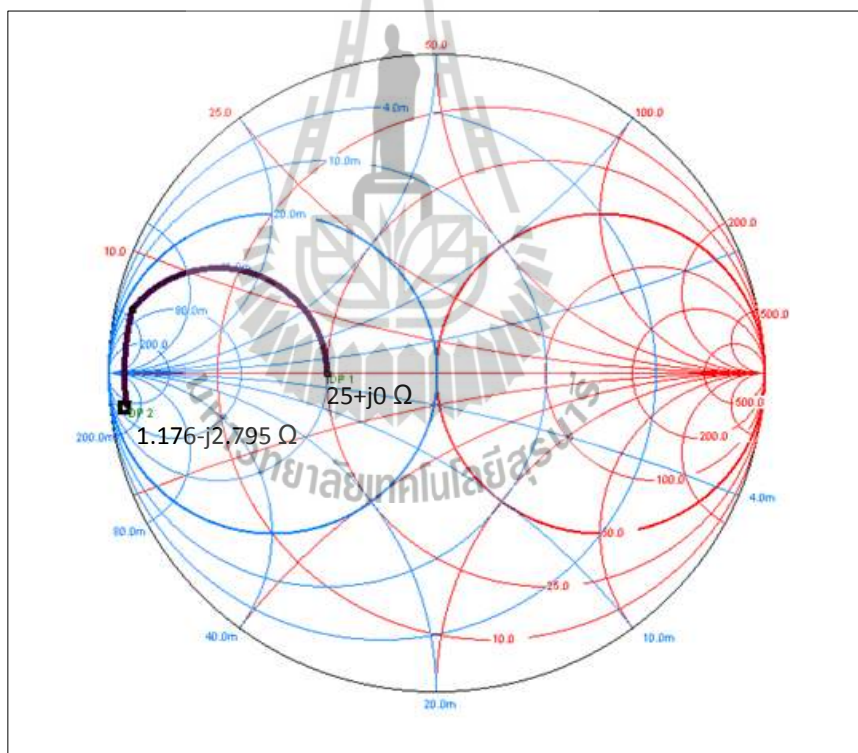
วงจรแมตซ์ซิงเป็นวงจรทำสำคัญวงจรมีอยู่ในส่วนอินพุตและเอาต์พุตของวงจรขยายสัญญาณ ในวงจรขยายสัญญาณแบบพหุ-พูล นั้นวงจรแมตซ์ซิงจะทำหน้าที่แมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรบาลันกับทรานซิสเตอร์ ถ้าหากวงจรแมตซ์ซิงออกแบบไม่ดีแล้ว อาจจะทำให้เกิดการสูญเสียภายใน (Insertion loss) เกิดขึ้นและอาจจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของวงจรขยายลดลง ดังนั้นเราจึงต้องคำนวณและออกแบบวงจรแมตซ์ซิงให้ดี เนื่องจากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณในงานวิจัยนี้เป็นแบบคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูล นั้นหมายถึงในส่วนของภาคอินพุตของวงจรขยายจะมีวงจรแมตซ์ซิงสองวงจรซึ่งเป็นวงจรเดียวกัน และในส่วนของภาคเอาต์พุตก็เช่นเดียวกัน ดังนั้นเราจะทำการออกแบบเพียงด้านละวงจร แล้วจะนำมารวมกันอีกครั้งหนึ่งในวงจรสุดท้าย

3.5.1 วงจรแมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ด้านอินพุต

วงจรแมตซ์ซิงอิมพีแดนซ์ด้านอินพุตจะทำหน้าที่แมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรอินพุตบาลันกับอินพุตของทรานซิสเตอร์ นั่นคือค่า $25+j0$ โอห์ม กับ $1.76-j2.79544$ โอห์ม โดยเราจะใช้โปรแกรม smith 3.1 ช่วยในการแมตซ์อิมพีแดนซ์ ซึ่งในการออกแบบสร้างวงจรอินพุตแมตซ์ซิงนั้นเราจะใช้สายโคแอกเซียล Habour 27478 เป็นส่วนประกอบหลักในการสร้างวงจร ซึ่งสาย Habour 27478 เป็นสายที่มีอิมพีแดนซ์ 25 โอห์มมีขนาดของตัวนำในเท่ากับ 0.021 นิ้ว หรือประมาณ 0.533 มิลลิเมตร และขนาดของตัวนำนอกเท่ากับ 0.057 นิ้ว หรือประมาณ 1.4478 มิลลิเมตร โดยฉนวนของสายจะเป็น PTFE ทำให้มีค่า ϵ_r เท่ากับ 2.1 จากนั้นเราก็จะนำข้อมูลข้างต้นไปออกแบบด้วยโปรแกรม smith 3.1 ซึ่งจะได้ผลการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.12, 3.13 และตารางที่ 3.4



รูปที่ 3.12 วงจรอินพุตแมตซ์ซึ่งที่ออกแบบ โดยใช้โปรแกรม smith 3.1

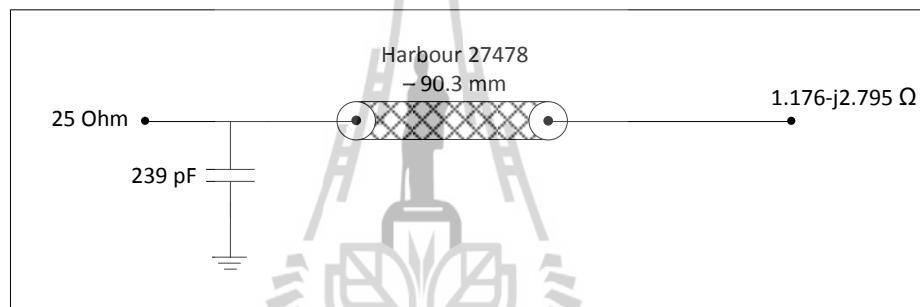


รูปที่ 3.13 ผลการวนแผนภูมิสมิทของอินพุตแมตซ์ซึ่ง โดยใช้โปรแกรม smith 3.1

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าการวางแผนภูมิสมิทของอินพุตแมตซ์ซึ่งที่ได้จากโปรแกรม smith 3.1

Data point	Z (Ω)	Q	Frequency (MHz)
DP 1	25.00 + j0.000	0.000	118.0
DP 2	1.176 - j2.795	2.377	118.0
TP 3	1.215 + j5.368	4.418	118.0
TP 4	24.932 - j0.000	0.000	118.0

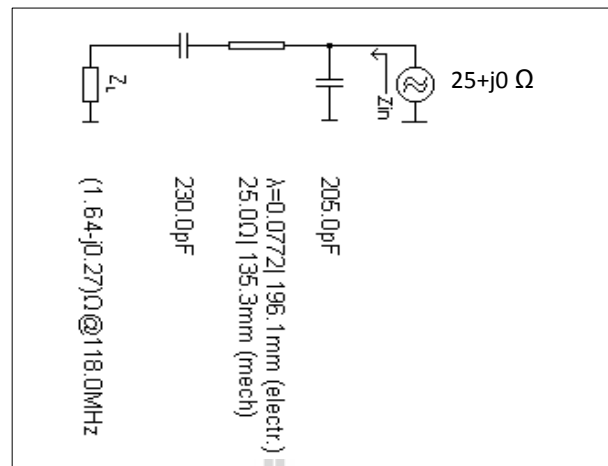
จากการออกแบบวงจรอินพุตแมตซ์ซึ่งด้วยโปรแกรม smith 3.1 ทำให้ได้ค่าความยาวของสายโคแอกเซียลในทางไฟฟ้าเท่ากับ 130.8 มิลลิเมตรและได้ค่าความยาวทางกายภาพ 90.3 มิลลิเมตร ดังนั้นเราจึงต้องใช้สาย RG142 ยาว 90.3 มิลลิเมตรในการสร้างวงจรอินพุตแมตซ์ซึ่งจากนั้นเราก็จะได้วงจรอินพุตแมตซ์ซึ่งที่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.14



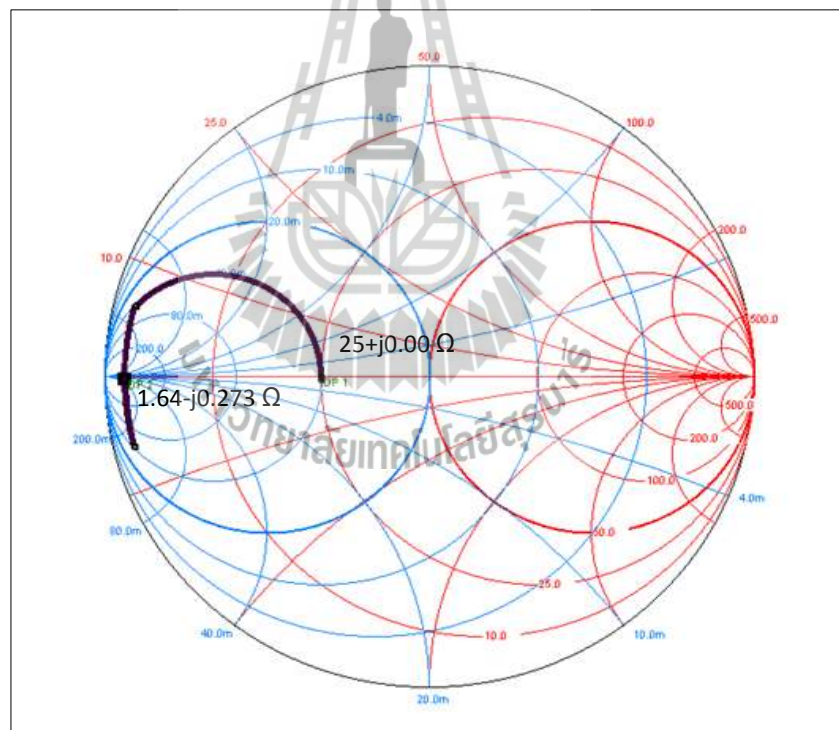
รูปที่ 3.14 วงจรอินพุตแมตซ์ซึ่งที่ออกแบบสมบูรณ์

3.5.2 วงจรแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุต

วงจรแมตซ์ซึ่งอิมพีแดนซ์ด้านเอาต์พุตจะอยู่ในส่วนเอาต์พุตของวงจรขยาย ซึ่งจะมีหน้าที่แมตซ์อิมพีแดนซ์ระหว่างด้านเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ (ขาแคเรน) กับอินพุตของวงจรเอาต์พุตบาลัน นั่นคือระหว่างค่าของ $1.63672 - j0.27288$ โอห์ม กับ $25 + j0$ โอห์ม โดยเราจะใช้โปรแกรม smith 3.1 ช่วยในการคำนวณค่าการแมตซ์อิมพีแดนซ์ โดยในการออกแบบสร้างวงจรอินพุตแมตซ์ซึ่งนั้นเราจะใช้สาย Semi rigid 141-25 เป็นส่วนประกอบหลักในการออกแบบวงจรเอาต์พุตแมตซ์ซึ่ง ซึ่งสาย Semi rigid 141-25 จะมีขนาดของตัวนำในเท่ากับ 1.63 มิลลิเมตร และขนาดของตัวนำนอกเท่ากับ 3.58 มิลลิเมตร โดยฉนวนของสายจะเป็น PTFE ทำให้มีค่า ϵ_r เท่ากับ 2.1 มีค่าอิมพีแดนซ์ของสาย 25 โอห์ม สามารถใช้งานที่พลังงานสูงสุด 471 วัตต์ทนความร้อนได้สูงถึง 175 องศาเซลเซียส จากนั้นเราก็จะนำข้อมูลข้างต้นไปออกแบบด้วยโปรแกรม smith 3.1 ซึ่งจะได้ผลการออกแบบดังแสดงในรูปที่ 3.15, 3.16 และตารางที่ 3.5



รูปที่ 3.15 วงจรเอาต์พุตแมตซ์ซิงที่ออกแบบโดยใช้โปรแกรม smith 3.1

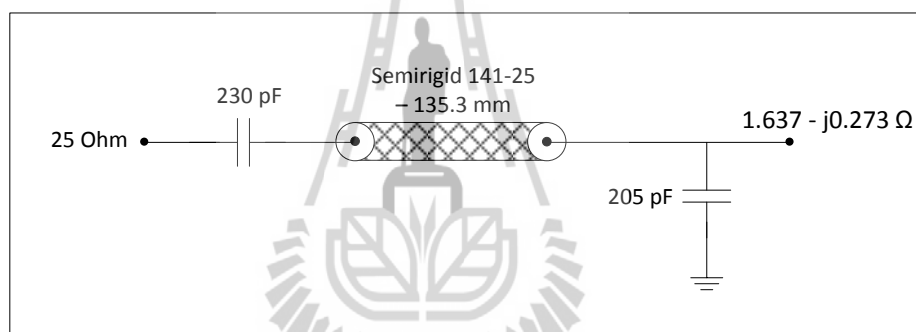


รูปที่ 3.16 ผลการวางแผนภูมิสมิทของเอาต์พุตแมตซ์ซิงโดยใช้โปรแกรม smith 3.1

ตารางที่ 3.5 ค่าการวางแผนภูมิสมิทของเอาต์พุตแมตซ์ซิงที่ได้จากโปรแกรม smith 3.1

Data point	Z (Ω)	Q	Frequency (MHz)
DP 1	25.000 + j0.000	0.000	118.0
DP 2	1.637 - j0.273	0.167	118.0
TP 3	1.637 - j6.137	3.747	118.0
TP 4	1.637 + j6.133	2.159	118.0
TP 5	24.614 + j0.140	0.006	118.0

จากการออกแบบวงจรเอาต์พุตแมตซ์ซิงด้วยโปรแกรม smith 3.1 ทำให้ได้ค่าความยาวของสาย Semi rigid ในทางไฟฟ้าเท่ากับ 196.1 มิลลิเมตรและได้ค่าความยาวทางกายภาพ 135.3 มิลลิเมตร ดังนั้นเราจึงต้องใช้สาย Semi rigid 141-25 ยาว 135.3 มิลลิเมตรในการสร้างวงจรเอาต์พุตแมตซ์ซิง จากนั้นเราก็จะได้วงจรเอาต์พุตแมตซ์ซิงที่สมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.17

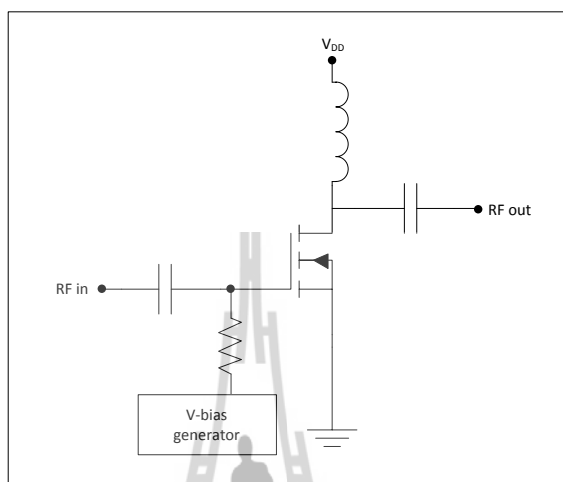


รูปที่ 3.17 วงจรเอาต์พุตแมตซ์ซิงที่ออกแบบสมบูรณ์

3.6 วงจรไบอัสทรานซิสเตอร์

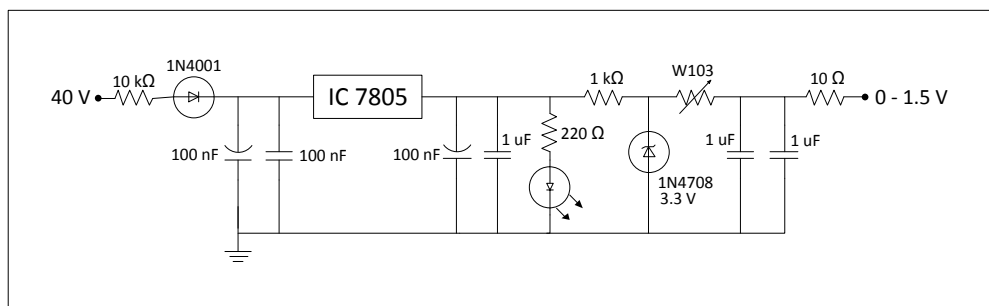
การไบอัสวงจรขยายหมายถึงการจ่ายไฟในกับวงจร ในงานวิจัยได้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS โดยทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS นั้นจะถูกออกแบบมาเพื่อการใช้งานที่สัญญาณความถี่สูงและแรงดันสูง การไบอัสของทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS จะทำการไบอัสสองส่วน คือไบอัสที่ขาเกตและไบอัสที่ขาเดรน การไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิดนี้จะไบอัสเพื่อรักษาระดับของ I_{DQ} ไม่ให้เปลี่ยนแปลงมาก โดยการที่จะรักษาระดับของ I_{DQ} นั้นจะทำได้โดยการรักษาระดับแรงดันที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์ให้คงที่ โดยในการออกแบบนั้นจะใช้วงจรรักษาระดับแรงดัน (Voltage regulator) ในการคงค่าแรงดันที่ขาเกต ซึ่งจะอยู่ที่ประมาณ 1.2-1.5 โวลต์ นั่นคือค่าการไบอัสที่ขาเกต ส่วนที่ขาเดรนนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 40 โวลต์ โดยวงจรไบอัสที่ขาเดรนก็จะมีตัวเหนี่ยวนำค่ามาก ๆ หรือที่เรียกกันว่า Choke เอาไว้กั้นสัญญาณ

สลัปเข้ามาจนสัญญาณกระแสตรงและยังมีตัวเก็บประจุต่อกราวด์เพื่อปรับสัญญาณไฟเลี้ยงกระแสตรงให้เรียบ โดยโครงสร้างวงจรไบอัสของทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS นั้นจะแสดงในรูปแบบที่ 3.18



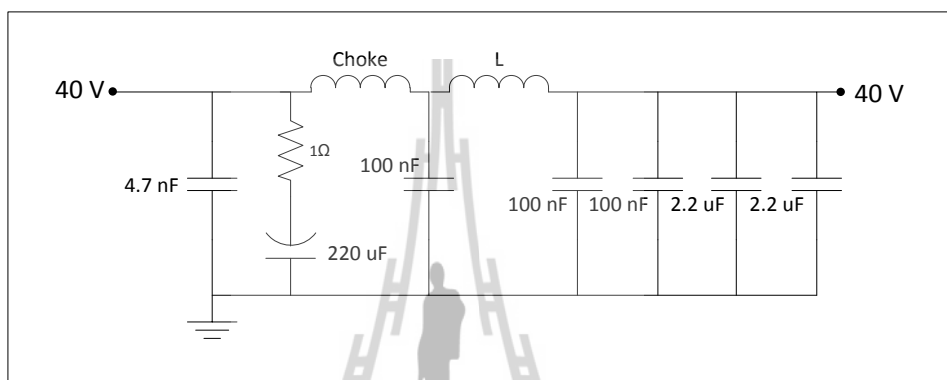
รูปที่ 3.18 โครงสร้างของวงจรไบอัสทรานซิสเตอร์ชนิด LDMOS

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ IC7805 ในการออกแบบวงจรรักษาระดับแรงดันที่ขาเกตร่วมกับวงจรรักษาระดับแรงดันอย่างง่ายที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ 1N4708 กับตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 1000 โอห์ม (W103) โดยอินพุตของวงจรรวมนี้จะแบ่งแรงดันมาจากขาเตรน 40 โวลต์ แล้วใช้ตัวต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม ต่ออนุกรมเพื่อลดระดับแรงดันและกระแส โดยวงจรไบอัสที่ขาเกตของทรานซิสเตอร์ที่ได้ออกแบบนี้จะแสดงในรูปแบบที่ 3.16 โดยเมื่อป้อนระดับแรงดันที่ประมาณ 1.25 โวลต์ระดับกระแส I_{DQ} จะอยู่ที่ประมาณ 60 มิลลิแอมป์



รูปที่ 3.19 วงจรไบอัสที่ขาเกตที่ออกแบบสมบูรณ์

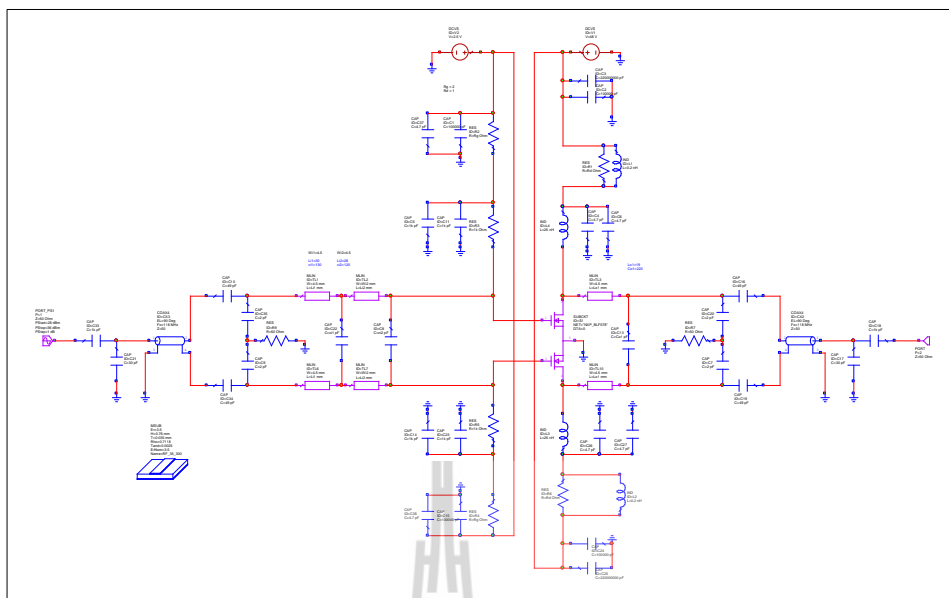
ในการออกแบบวงจรไบอัสที่ขาเดรนนั้นจะมีระดับแรงดัน 40 โวลต์ โดยเราจะใช้ตัวเหนี่ยวนำที่มีค่ามาก ๆ มาต่ออนุกรมเพื่อป้องกันไฟกระแสลับมากกว่าไฟกระแสตรง และยังใช้ตัวเก็บประจุต่อคร่อมกับกราวด์เพื่อปรับให้ไฟกระแสตรงเรียบมากขึ้น วงจรไบอัสที่ขาเดรนนั้นต้องการอุปกรณ์ที่สามารถทนความร้อนและกระแสที่สูงได้ โดยที่กระแสที่ไหลผ่านนั้นจะอยู่ที่ประมาณ 0-20 แอมป์ ขึ้นกับระดับสัญญาณอินพุตของวงจรถยาย วงจรไบอัสที่ขาเดรนของทรานซิสเตอร์ที่ได้ออกแบบนั้นจะแสดงในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.20 วงจรไบอัสที่ขาเดรนที่ออกแบบสมบูรณ์

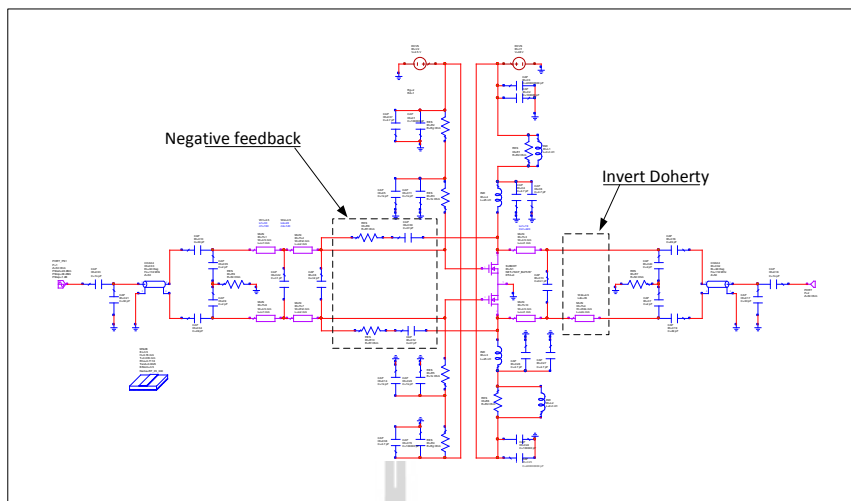
3.7 การจำลองผล

การลองผลของงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โปรแกรม Microwave Office (AWR) ในการจำลองผล ซึ่งการจำลองผลนี้เป็นเพียงเพื่อดูแนวโน้มของวงจรที่ได้ออกแบบ และเพื่อการปรับปรุงวงจรถยายสัญญาณให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น โดยอาจจะมีการเพิ่มเทคนิคเข้าไปในวงจรถยายวงจรถยายที่ได้ออกแบบด้วยโปรแกรม AWR นั้นจะแสดงในรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 วงจรขยายสัญญาณที่ออกแบบใน โปรแกรม AWR

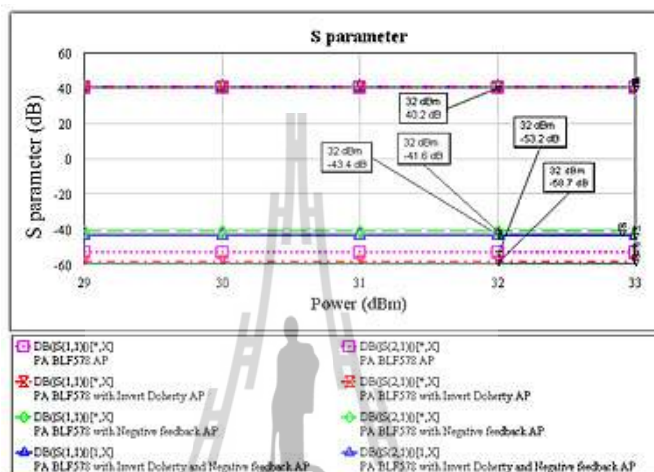
ในการจำลองผลของวงจขยายที่ได้เพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ติ ซึ่งเทคนิคนี้จะทำหน้าที่ปรับเฟสภายในวงจขยายเพื่อให้มีการสูญเสียภายในลดลง ทำให้วงจขยายมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเทคนิคนี้จะเพิ่มเข้าไปในวงจรในส่วนของก่อนเข้าทรานซิสเตอร์ และในส่วนของก่อนที่จะรวมสัญญาณในฝั่งเอาต์พุต จากการจำลองผลข้างต้นจะเห็นได้ว่าการเลื่อนของเฟสในส่วนก่อนที่จะเข้าทรานซิสเตอร์มีการเลื่อนน้อยมาก ดังนั้นเราจึงเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ติเข้าไปเฉพาะในส่วนของเอาต์พุต ในการเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ติเข้าไปในวงจรถนั้นจะเป็นการเพิ่มเข้าไปในส่วนของวงจเอาต์พุตแมตซ์ซิง ซึ่งจะส่งผลให้วงจขยายขาดความเป็นเชิงเส้น ดังนั้นเพื่อลดความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจขยายเราจึงจะนำเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) เพิ่มเข้ามาในวงจขยาย โดยเทคนิคการป้อนกลับแบบลบจะช่วยให้วงจขยายมีอัตราขยายที่สูงขึ้นแบนด์วิธกว้างขึ้น วงจขยายที่เพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ติร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบแสดงในรูปที่ 3.22



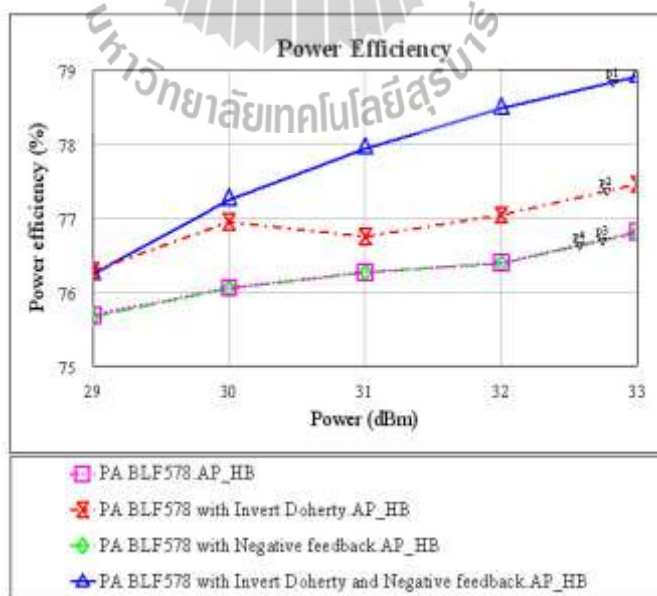
รูปที่ 3.22 วงจรขยายที่เพิ่มเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ

ในการจำลองผลเราจะใช้พลังงานอินพุตประมาณ 0 – 2 W หรือ ประมาณ 29 – 33 dBm เมื่อเรารู้ค่า S-parameter ซึ่งเป็นค่าที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (S21) จากวงจรขยายแบบปรกติเมื่อเพิ่มเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้เข้าไป ทำให้ค่า S11 ลดลง นั้นหมายถึงค่าพลังงานสูญเสียย้อนกลับในวงจรขยายลดลง และจากวงจรปรกติเมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปกลายเป็นการไปกวมนวงจรแมตซ์ซึ่งฝั่งอินพุตทำให้ค่า S11 สูงขึ้นจากปรกติ และเมื่อนำทั้ง 2 เทคนิคมารวมกันทำให้ S11 ต่ำกว่าวงจรปรกติแต่ไม่ดีเท่าเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้แบบปรกติดังแสดงในรูปที่ 3.23 จากผลการจำลองค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายแสดงในรูปที่ 3.24 เห็นได้จากวงจรปรกติเมื่อเพิ่มอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้เข้าไปเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายแต่จะเห็นได้ว่าวงจรถดความเป็นเชิงเส้น และจากวงจรปรกติเมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวงจรปรกติ เมื่อเรานำเอาเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้มารวมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มความเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 3.24 การจำลองผลค่าอัตราขยายของวงจร เมื่อเพิ่มเทคนิคอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้เข้าไปพบว่าอัตราขยายเพิ่มขึ้นแต่ขาดความเป็นเชิงเส้น เมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปในวงจรปรกติพบว่าใกล้เคียงค่าปรกติ และเมื่อนำเอาทั้ง 2 เทคนิคมารวมกันทำให้ได้อัตราขยายที่มีความเป็นเชิงเส้นขึ้นอัตราขยายลดลงเล็กน้อยจากอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้ปรกติดังแสดงในรูปที่ 3.25 ค่า P_{1dB} คือค่าที่แสดงพลังงานที่เอาท์พุตเทียบกับพลังงานอินพุต จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่มอินเวอร์ต โดเฮอร์ตี้ทำให้ขาดความเป็นเชิงเส้น เมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปทำให้วงจรขยายมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น และค่า P_{1dB} ของวงจรขยายที่เพิ่มทั้ง 2

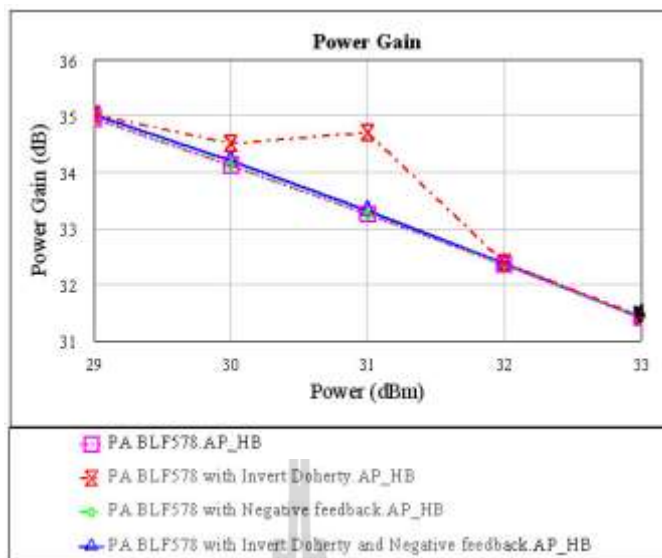
เทคนิคเข้าไป ทำให้ได้พลังงานที่เอาต์พุตสูงขึ้นและมีความเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 3.26 และจากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มเทคนิคอินเวอร์ตโคเฮอร์รี ทำให้วงจรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแต่ขาดความเป็นเชิงเส้น เมื่อเรานำเอาเทคนิคการป้อนกลับแบบลบที่มีคุณสมบัติช่วยให้วงจรมีความเป็นเชิงเส้นและเพิ่มแบนด์วิธของวงจรมารวมกับเทคนิคอินเวอร์ตโคเฮอร์รีทำให้วงจรมีประสิทธิภาพที่รวมเอาทั้ง 2 เทคนิคเข้าด้วยกันมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและมีความเป็นเชิงเส้น



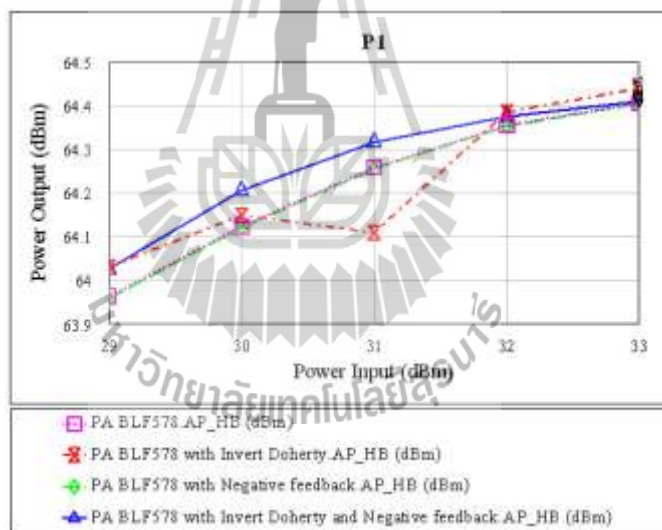
รูปที่ 3.23 ผลการจำลองค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิง (S-parameter)



รูปที่ 3.24 ผลการจำลองค่าประสิทธิภาพของวงจรมาย



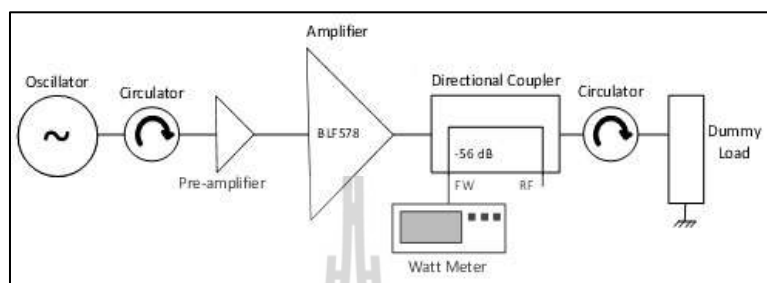
รูปที่ 3.25 ผลการจำลองค่าอัตราขยายของวงจรถยาย



รูปที่ 3.26 ผลการจำลองค่า P_1 dB ของวงจรถยาย

จากการจำลองผลเราจะนำเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ตีละเทคนิคการป้อนกลับแบบลบมาทดสอบกับวงจรถยายจริงเพื่อดูแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของวงจรถยายก่อนเพิ่มและหลังเพิ่มเทคนิคทั้งสองเข้าไปในวงจรถยาย จากรูปที่ 3.27 จะแสดงบล็อกไดอะแกรมการวัดวงจรถยายที่ทำการเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ตีร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปในวงจรถ โดยวงจรถที่นำมาทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 3.28 จากการทดสอบวงจรถจริงจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพของ

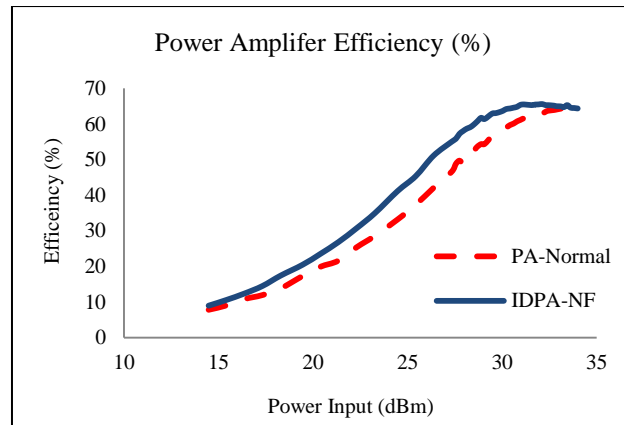
วงจรรขยายและค่าอัตราขยายของวงจรมันเพิ่มขึ้นดังแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30 และเมื่อเทียบค่าอินพุตและเอาต์พุตของวงจรรขยายในหน่วย dBm หรือที่เรียกว่าค่า P_{1dB} จะเห็นได้ว่า วงจรรขยายที่เพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ซีร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบทำให้วงจรรขยายที่ค่าเอาต์พุตของสัญญาณเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.31



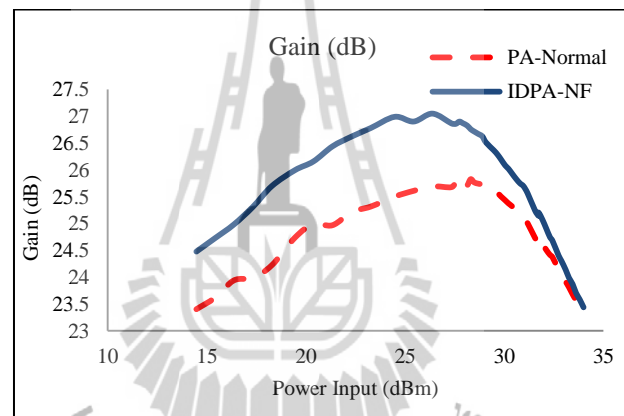
รูปที่ 3.27 บล็อกไดอะแกรมของการวัดวงจรรขยายจริง



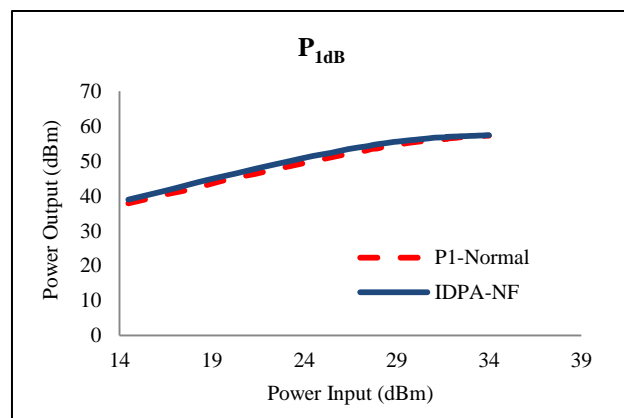
รูปที่ 3.28 บอร์ดวงจรรขยายจริงที่เพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ซีร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ



รูปที่ 3.29 ค่าเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายก่อนและหลังเพิ่มเทคนิค



รูปที่ 3.30 ค่าเปรียบเทียบค่าอัตราขยายของวงจรขยายก่อนและหลังเพิ่มเทคนิค



รูปที่ 3.31 ค่าเปรียบเทียบค่า P_{1dB} ของวงจรขยายก่อนและหลังเพิ่มเทคนิค

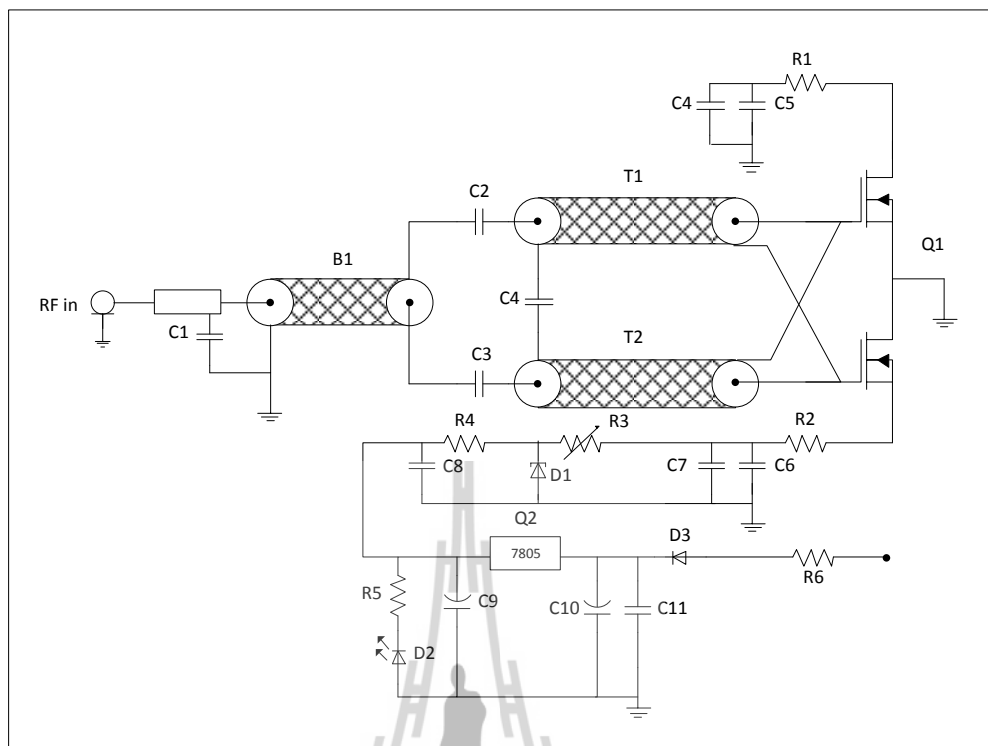
จากการจำลองผลและการทดสอบกับวงจรขยายจริง พบว่าการเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ดี ร่วมกับการป้องกันแบบลบสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายคลาสเอบี ชนิดพุก-พุลได้ โดยเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ดีสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายได้ แต่ทำให้วงจรมีความ เป็นเชิงเส้น และเมื่อเพิ่มเทคนิคการป้องกันแบบลบเข้าไป ทำให้วงจรมีความเป็นเชิง เส้นมากขึ้น ดังนั้นการใช้สองเทคนิคจะสามารถทำให้วงจรมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อัตราการ ขยายดีขึ้น และค่าอัตราส่วนระหว่างสัญญาณอินพุตและเอาต์พุตก็สูงขึ้นด้วย ซึ่งการพัฒนา วงจรขยายชนิดพุก-พุล โดยการใช้สองเทคนิคนี้ร่วมกันนั้นจะเป็นความใหม่ในทางวิชาการซึ่งมา จากการจำลองผลและการทดสอบจากวงจรจริง แต่ในทางปฏิบัติจริงนั้นเป็นไปได้ยากที่จะสามารถ สร้างวงจรต้นแบบที่ใช้ทั้งสองเทคนิคนี้ เนื่องจากในแต่ละวงจรมีการเคลื่อน ของเฟสสัญญาณมากน้อยต่างกัน การคำนวณค่าความยาวของเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ดีจึงทำได้ยาก เพราะการเคลื่อนของเฟสในส่วนที่เราต้องการจะปรับแก้กันอยู่ระหว่างวงจรเอาต์พุตแมตชิ่งกับ เอาต์พุตบาลัน ดังนั้นการเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ดีร่วมกับเทคนิคการป้องกันแบบลบจึงไม่ สามารถทำได้ในวงจรต้นแบบที่มาจากกรคำนวณ

3.8 การสร้างวงจรมีสัญญาณความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์

ในการสร้างวงจรมีสัญญาณความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์ จะนำเอาวงจรที่ได้ออกแบบจาก วงจรข้างต้นมาประกอบเข้าด้วยกันเป็นวงจรมีสัญญาณ โดยการสร้างวงจรมีสัญญาณนั้นจะแบ่ง ออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนของอินพุตและส่วนของเอาต์พุต การสร้างวงจรมีสัญญาณนี้จะใช้ ทรานซิสเตอร์ BLF578 โดยจะไปอัสที่ขาเดรน 40 โวลต์ ระบายความร้อนด้วยแผ่นทองแดงหนา 10 มิลลิเมตรต่อเข้าสู่อุณหภูมิห้อง 27 องศาเซลเซียส

3.8.1 การสร้างวงจรมีสัญญาณด้านอินพุต

วงจรมีสัญญาณด้านอินพุต จะประกอบด้วยวงจรอินพุตบาลัน วงจรแมตชิ่งซิง อินพุต และวงจรไบอัสเกต ในวงจรแมตชิ่งซิงอินพุตของวงจรมีสัญญาณชนิดพุก-พุล นั้นจะมีอยู่สองวงจร คือแมตชิ่งซิงอินพุตของด้านซีกบวกและซีกลบ โดยในแต่ละวงจรจะมีตัวเก็บประจุที่ต่อลงกราวด์อยู่ ดังนั้นเราจะนำตัวเก็บประจุเหล่านั้นมารวมกัน จะได้ค่าตัวเก็บประจุของวงจรแมตชิ่งซิงอินพุต ใหม่เป็น $239+239 = 478$ พิโกฟารัด วงจรมีสัญญาณด้านอินพุตที่รวมวงจรที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดง ในรูปที่ 3.32 และรายการอุปกรณ์ของวงจรมีสัญญาณด้านอินพุตจะแสดงในตารางที่ 3.6



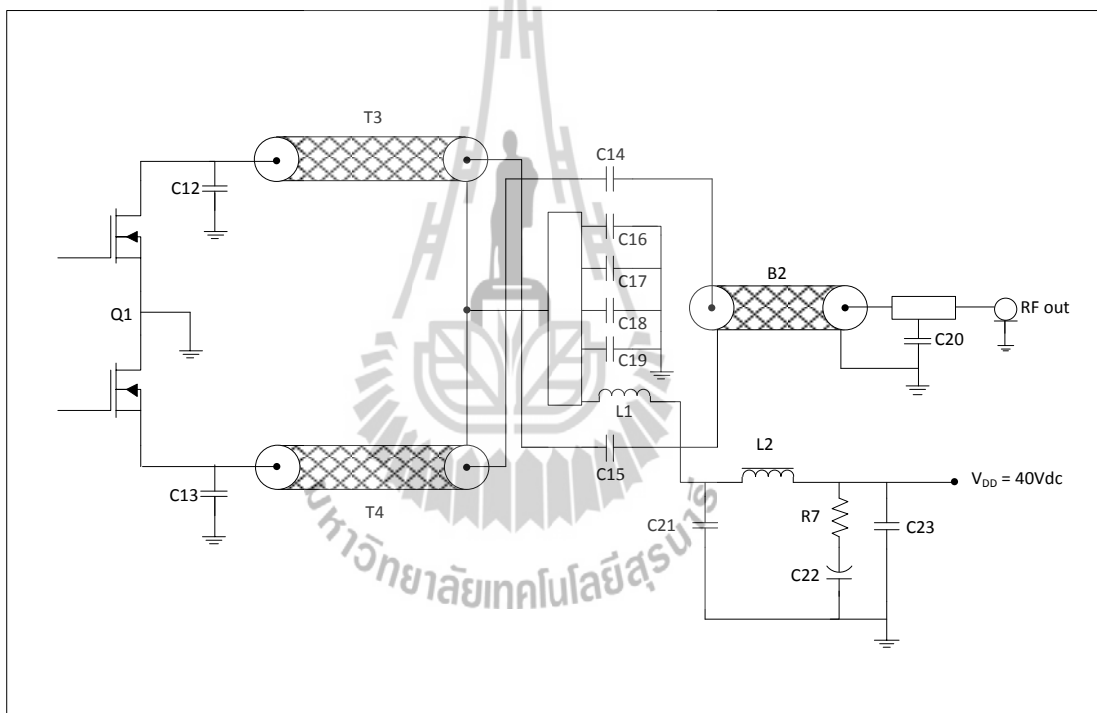
รูปที่ 3.32 วงจรขยายสัญญาณด้านอินพุต

ตารางที่ 3.6 แสดงรายการอุปกรณ์ของวงจรขยายสัญญาณด้านอินพุต

อุปกรณ์	รายละเอียด
C1	19 pF
B1	RG316, 17.3 cm
C2, C3	4.7 nF
C4	478 pF
T1, T2	Harbour 27478, 9.03 cm
Q1	NXP-BLF578
C4, C5, C6, C7, C8	1 μ F
R1, R2	10 Ω
R3	Variable W103
D1	Zener diode 1N4708, 3.3V
R4	1 k Ω
R5	220 Ω
D2	Diode LED
Q2	7805
C9, C10	100 μ F, 50V
C11	100 nF
D3	1N4001
R6	10 k Ω

3.8.2 การสร้างวงจรขยายด้านเอาต์พุต

วงจรขยายสัญญาณด้านเอาต์พุตจะประกอบด้วยวงจรแมตซ์ชิงเอาต์พุต วงจรเอาต์พุตบาลัน และวงจรไบอัสขาตรง การรวมกันของวงจรเอาต์พุตแมตซ์ชิงและวงจรเอาต์พุตบาลันนั้น จะมีตัวเก็บประจุที่ต่ออนุกรมกันอยู่และอยู่ในตำแหน่งเดียวกัน นั่นคือตัวเก็บประจุขนาด 390 พิโกฟารัดของวงจรเอาต์พุตบาลัน และตัวเก็บประจุ 230 พิโกฟารัดของวงจรเอาต์พุตแมตซ์ชิง ดังนั้นเราจะทำการรวมให้เป็นตัวเก็บประจุตัวเดียว เราจะได้ค่าตัวเก็บประจุใหม่เป็น 145 พิโกฟารัด ($x = \frac{230 \times 290}{230 + 390} pF$) วงจรขยายด้านเอาต์พุตที่รวมวงจรที่กล่าวมาข้างต้นจะแสดงในรูปที่ 3.33 และรายการอุปกรณ์ของวงจรด้านเอาต์พุตจะแสดงในตารางที่ 3.7



รูปที่ 3.33 วงจรขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต

ตารางที่ 3.7 แสดงรายการอุปกรณ์ของวงจรขยายสัญญาณด้านเอาต์พุต

อุปกรณ์	รายละเอียด
C12, C13	205 pF
T3, T4	Semi rigid 141-25, 13.5 cm
C14, C15	145 pF
C16, C17	2.2 μ F
C18, C19, C21	100 nF
B2	RG142B/U, 19.6 cm
C20	19 pF
L1	AWG 12 – 10Turn \varnothing 10mm
L2	AWG 12 Through ferrite
R7	1 Ω
C22	Electrolyte 220 μ F, 63V
C23	4.7 nF

ในการสร้างวงจรขยายสัญญาณจริงนั้นค่าต่าง ๆ ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นอาจจะมีการเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากค่าตัวเก็บ ค่าตัวต้านทาน รวมถึงค่าตัวเหนี่ยวนำ ที่นำมาสร้างวงจรมานั้นล้วนมีค่าคลาดเคลื่อนทั้งสิ้น ซึ่งอาจจะทำให้ความสามารถและค่าประสิทธิภาพของวงจรมีค่าแตกต่างกันออกไป ดังนั้นเราความที่จะเลือกอุปกรณ์ที่ใช้ให้มีคุณภาพ เพื่อที่จะให้ ความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้นน้อยที่สุด วงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพวง-พูล ที่ได้ออกแบบและสร้างเสร็จสมบูรณ์แสดงในรูปที่ 3.34



รูปที่ 3.34 วงจรขยายสัญญาณที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

3.9 ระบบระบายความร้อน

ระบบระบายความร้อนจำเป็นอย่างมากในการออกแบบสร้างวงจรรขยาย เนื่องจากขณะที่ทรานซิสเตอร์กำลังทำงานอยู่นั้น ตัวทรานซิสเตอร์เองจะคลายพลังงานออกมาในรูปแบบของความร้อน นอกจากนี้ยังมีความร้อนที่เกิดจากการสูญเสียภายในวงจรรขยายเอง จากข้อมูลของทรานซิสเตอร์ BLF578 ทรานซิสเตอร์จะคลายความร้อน 0.3 องศาเซลเซียสต่อ 1 วัตต์ (AN10800, 2009 NXP application note) ดังนั้นถ้าทดสอบวงจรรขยายที่อุณหภูมิห้อง 30 องศาเซลเซียส แต่ความร้อนสูงสุดที่ทรานซิสเตอร์สามารถทนได้คือ 150 องศาเซลเซียส ทรานซิสเตอร์จะสามารถขยายกำลังงานได้ประมาณ 31 วัตต์ คำนวณโดยคิดความร้อนสะสมที่เกิดขึ้นในตัวทรานซิสเตอร์ ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องมีระบบระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์และทั้งวงจรรขยาย โดยระบบระบายความร้อนให้กับวงจรรขยายนั้นมีหลายประเภทเช่น พัดลม แทนระบายความร้อน (Heat sink) ระบบหล่อเย็นด้วยน้ำ และระบบเทอร์โมอิเล็กทริก เป็นต้น ซึ่งการระบายความร้อนในแต่ละระบบก็มีความสามารถในการระบายความร้อนได้ต่างกัน

3.9.1 ระบบระบายความร้อนแบบแทนระบายความร้อน (Heat sink)

ระบบระบายความร้อนชนิดนี้นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากไม่ต้องยุ่งยากในการเตรียมอุปกรณ์ เนื่องจากวัสดุที่ใช้ก็จะมีแค่เฉพาะแทนระบายความร้อนอย่างเดียว ซึ่งความสามารถในการระบายความร้อนนั้นจะขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการผลิตแทนระบายความร้อน และขนาดของแทนระบายความร้อนหากมีขนาดใหญ่ก็จะสามารถระบายความร้อนได้ดี วัสดุที่ใช้ในการผลิตแทนระบายความร้อนจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ อะลูมิเนียมกับทองแดง โดยส่วนใหญ่นิยมใช้อะลูมิเนียมมากกว่าทองแดง เพราะอะลูมิเนียมมีราคาถูกกว่าและความสามารถในการถ่ายความร้อนออกจากตัวมันเองทำได้เร็วกว่าทองแดง การเพิ่มความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุไปสู่แทนระบายความร้อนนั้น เราจะใช้ซิลิโคนเป็นตัวเชื่อมระหว่างวัสดุกับแทนระบายความร้อน ถ้าหากว่าวัสดุที่ต้องการระบายความร้อนมีความร้อนสูงมาก ๆ เราควรที่จะวางวัสดุลงแผ่นบนทองแดงก่อนเพื่อให้การถ่ายเทความร้อนของวัสดุทำได้เร็วขึ้น และเราก็ใช้แทนระบายความร้อน ระบายความร้อนให้กับแผ่นทองแดง หลังจากนั้นก็จะใช้พัดลมช่วยในการระบายความร้อนให้กับแทนระบายความร้อนอีกที ข้อดีของการระบายความร้อนด้วยวิธีนี้คือ สามารถทำได้ง่ายไม่ยุ่งยาก วัสดุที่ใช้ราคาไม่สูงมากนัก แต่มีข้อเสียคือหากเราต้องการระบายความร้อนจากวัสดุที่มีความร้อนสูง เราต้องเพิ่มขนาดของแทนระบายความร้อนให้ใหญ่ขึ้นและวางวัสดุบนแผ่นทองแดงก่อน เพื่อให้การระบายความร้อนของวัสดุทำได้เร็วขึ้น รูปของระบบระบายความร้อนด้วยแทนระบายความร้อนจะแสดงดังรูปที่ 3.35



รูปที่ 3.35 ระบบระบายความร้อนด้วยแท่นระบายความร้อน

(<http://image.made-in-china.com/aluminium-heatsink.jpg>)

3.9.2 ระบบระบายความร้อนแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

ระบบระบายความร้อนแบบหล่อเย็นด้วยน้ำสามารถถ่ายเทความร้อนให้วัสดุได้ดี เนื่องจากจะใช้น้ำเป็นตัวระบายความร้อนให้กับแผ่นระบายความร้อน โดยจะให้น้ำไหลผ่านแผ่นระบายความร้อนตามรูที่เราได้เจาะไว้ ซึ่งเราสามารถควบคุมอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนได้ โดยการควบคุมอุณหภูมิของน้ำที่ไหลผ่านและความเร็วของน้ำที่ไหลผ่าน ซึ่งความสามารถในการถ่ายเทความร้อนจากวัสดุมาสู่แท่นหล่อเย็นด้วยน้ำจะขึ้นอยู่กับตัวกลาง ซึ่งส่วนใหญ่จะใช้เป็นแผ่นทองแดงเนื่องจากมีความสามารถในการนำความร้อนได้ดี หรือบางที่อาจจะออกแบบแผ่นระบายความร้อนด้วยวัสดุที่เป็นทองแดง ข้อดีของการระบายความร้อนวิธีนี้คือ เราสามารถควบคุมอุณหภูมิของแผ่นระบายความร้อนได้ สามารถระบายความร้อนออกจากตัวมันเองได้เร็ว ข้อเสียคือยุ่งยากในการติดตั้งอุปกรณ์เพราะต้องมีปั้มน้ำ ระบบทำความเย็นให้น้ำ อีกทั้งราคาค่อนข้างสูง ระบบระบายความร้อนแบบหล่อเย็นด้วยน้ำจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.36

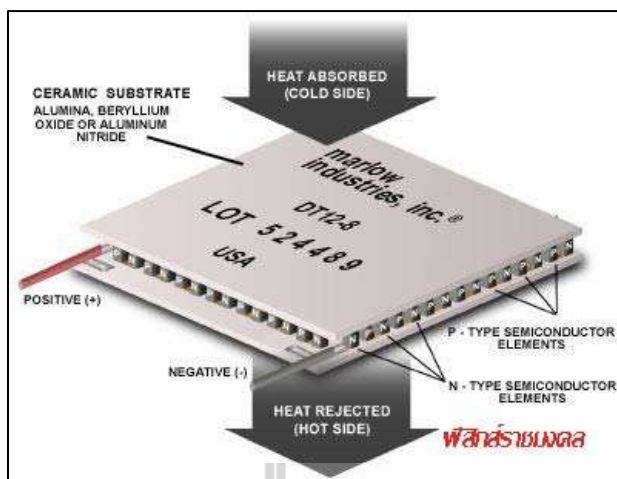


รูปที่ 3.36 ระบบระบายความร้อนแบบหล่อเย็นด้วยน้ำ

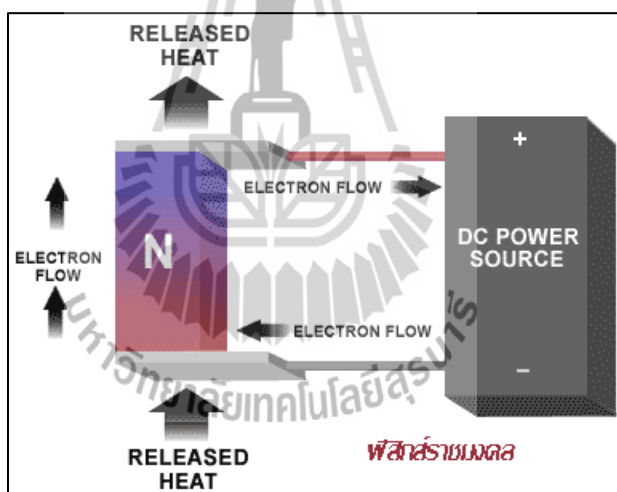
(<http://www.highspeedpc.com/Merchant2>)

3.9.3 ระบบระบายความร้อนแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทริก

ระบบระบายความร้อนแบบระบบเทอร์โมอิเล็กทริกจะเป็นระบบที่เร่งการถ่ายเทความร้อนจะวัสดุไปยังแผ่นระบายความร้อน โดยจะมีหลักการทำงานโดย อาศัยปรากฏการณ์ Peltier ที่ว่าเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำ 2 ชนิด จุดเชื่อมหนึ่งจะเย็น อีกจุดหนึ่งจะร้อน ตัวทำความเย็นแบบนี้ได้รับการดัดแปลงและพัฒนาเป็นรูปแบบอื่นอีกมากมาย ดังเช่น การใช้สารกึ่งตัวนำ โดยสารกึ่งตัวนำสองชนิดคือ สารกึ่งตัวนำชนิด P และสารกึ่งตัวนำชนิด N ประกอบอยู่บนแผ่นเซรามิก ขณะที่ผ่านกระแสไฟฟ้าจาก N ไป P อุณหภูมิที่จุดต่อจะลดลง และทำหน้าที่ดูดความร้อนจากบริเวณรอบ ๆ ความร้อนจะถูกพาไปโดยอิเล็กตรอน และปล่อยที่ด้านตรงข้าม ประสิทธิภาพการดูดความร้อนขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแสไฟฟ้า และจำนวนชั้นของ N และ P ดังรูปที่ 3.37 และ 3.38 (คณะฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล)



รูปที่ 3.37 การทำความเย็นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric cooler)
(คณะฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล)



รูปที่ 3.38 ลักษณะวงจรการทำงานของระบบเทอร์โมอิเล็กทริก
(คณะฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล)

ถึงแม้ว่าระบบระบายความร้อนแบบเทอร์โมอิเล็กทริกจะสามารถช่วยระบายความร้อนให้กับทรานซิสเตอร์ได้ แต่เนื่องด้วยขนาดของแผ่นระบายความร้อนที่มีขนาดเล็กและความยากในการติดตั้งอุปกรณ์ ทำให้วิธีการระบายความร้อนวิธีนี้เป็นทางเลือกหนึ่งในการเลือกใช้ระบายความร้อนให้กับวงจรขยาย แต่ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้วิธีระบายความร้อนด้วยแผ่นทองแดงร่วมกับการระบายความร้อนด้วยน้ำ ซึ่งจะสามารถระบายความร้อนได้ดีและง่ายในการติดตั้ง

3.10 สรุป

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูลนั้นจะประกอบไปด้วยวงจรที่สำคัญ 3 วงจรคือวงจรบาลัน วงจรแมตซ์ซิง และวงจรไบอัส โดยในบทนี้ได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบวงจรถูกกล่าวและลักษณะการทำงานของแต่ละวงจร ซึ่งแต่ละวงจรมีผลกระทบอย่างยิ่งต่อวงจรขยายสัญญาณ หากวงจรใดวงจรหนึ่งออกแบบสร้างไม่ดีแล้ว ก็จะทำให้วงจรขยายทั้งวงจรเสียหายได้ ซึ่งการออกแบบวงจรขยายนั่นเราได้ใช้โปรแกรม smith 3.1 เข้ามาช่วยในการคำนวณแผนภาพสมิท เพื่อให้ง่ายและถูกต้องมากขึ้น

ในบทนี้นอกจากจะได้กล่าวถึงวิธีการออกแบบวงจรขยายคลาสเอบีชนิดพหุ-พูล อีกทั้งยังเสนอวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายชนิดพหุ-พูล โดยในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ซีร์ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ ซึ่งจะทำให้วงจรขยายมีประสิทธิภาพสูงขึ้น เพราะเทคนิคเหล่านี้ช่วยลดการสูญเสียภายในโดยการปรับเฟสของสัญญาณ ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงให้เห็นในส่วนของการจำลอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าทั้งสองเทคนิคนี้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้จริง จากการทดสอบจากการจำลองผลและการวัดผลจริง ซึ่งทั้งสองเทคนิคนี้อาจจะไม่เหมาะกับการเพิ่มเป็นส่วนหนึ่งของวงจรต้นแบบ เนื่องจากการเลื่อนของเฟสในวงจรขยายแต่ละวงจรแตกต่างกัน

เมื่อทำการออกแบบวงจรขยายต้นแบบเสร็จแล้ว เราก็สามารถสร้างวงจรขยายต้นแบบได้ และจะได้วงจรขยายต้นแบบเพื่อนำไปทดสอบค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายต่อไป

บทที่ 4

การวัดและผลการทดลอง

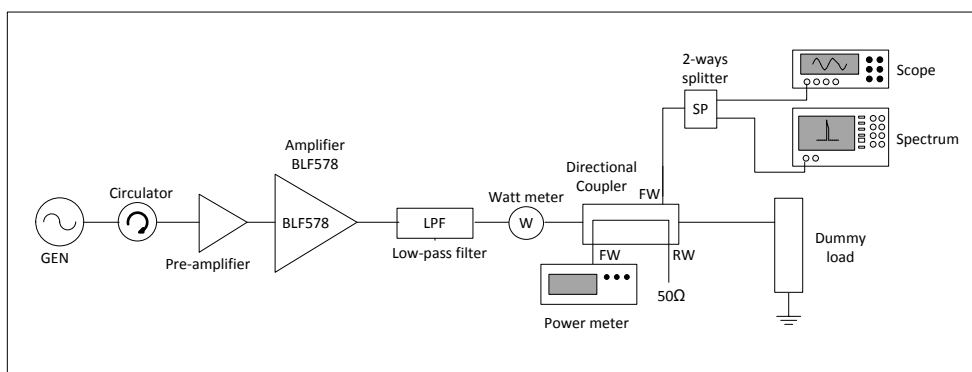
4.1 กล่าวนำ

จากการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ในบทที่ผ่านมาโดยการใช้ ทฤษฎีของแต่ละวงจรในการวิเคราะห์และออกแบบ สำหรับในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการทดสอบ และผลการทดสอบของวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ ที่ได้ ออกแบบมา เพื่อที่จะยืนยันการออกแบบและวิเคราะห์ผลการทดสอบ โดยการทดสอบวงจรขยาย สัญญาณนั้น จะทำการทดสอบวงจรขยายสองชุด โดยในชุดแรกจะทำการทดสอบวงจรขยายที่ ออกแบบ 1 บอร์ด และในชุดที่สองจะทำการทดสอบชุดวงจรขยายที่ทำการรวมกำลังภาคเอาต์พุต ของวงจรขยาย 2 บอร์ด ในการทดสอบวงจรขยายเราจะทำการทดสอบค่าประสิทธิภาพของ วงจรขยาย ค่าอัตราขยาย ค่าสัญญาณเอาต์พุต โดยเราจะใช้เครื่องวิเคราะห์สเปกตรัม ในการวัด ระดับของสัญญาณเอาต์พุตและฮาร์โมนิกของวงจรขยาย ใช้พาวเวอร์มิเตอร์ในการวัดค่าสัญญาณ เอาต์พุต ใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (Generator) เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์รวม กับวงจรขยายขนาด 30 วัตต์ ที่ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณอินพุตก่อนเข้าวงจรขยายสัญญาณที่ ออกแบบ (Pre-amplifier) โดยระดับสัญญาณอินพุตที่ต้องการของวงจรขยายที่ออกแบบนั้นจะอยู่ ที่ประมาณ 0-5 วัตต์ แหล่งจ่ายไฟของวงจรขยายใช้สวิตซ์ขนาด 40 โวลต์ 20 แอมแปร์ และเราจะ ใช้โหลดจำลองเพื่อเป็นโหลดอุปกรณ์ในการทดสอบวงจรขยาย ในการวัดอุณหภูมิขณะทดสอบ วงจรขยาย เราใช้กล้องอินฟาเรดในการวัดอุณหภูมิ เพื่อควบคุมอุณหภูมิไม่ให้สูงจนเกินไปและลด การสูญเสียที่จะเกิดขึ้นกับวงจรขยาย โดยเราจะควบคุมอุณหภูมิทรานซิสเตอร์ไม่ให้เกิน 90 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิที่อุปกรณ์อื่น ๆ ไม่ให้เกิน 150 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเราจะนำผล การทดสอบชุดวงจรขยายที่ได้ มาวิเคราะห์และสรุปผลเพื่อสรุปหาแนวทางการพัฒนาวงจรขยาย ต่อไป

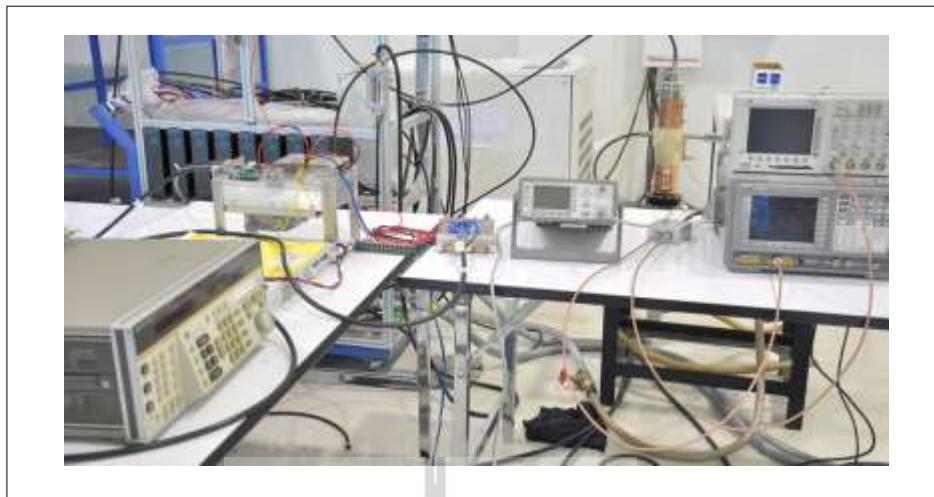
4.2 การวัดและผลการทดลองวงจรรขยาย ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์

4.2.1 การทดสอบวงจรรขยายคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูล ชุดเดียว

ในการทดสอบวงจรรขยายคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูล 1 วงจรนั้น เราจะใช้สัญญาณอินพุตที่จากชุดขับกำลังวงจรรขยายที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยสัญญาณอินพุตที่ต้องการอยู่ระหว่าง 0-4 วัตต์ แรงดันไบอัสที่จ่ายให้กับวงจรรขยายที่ทดสอบนั้นอยู่ที่ 40 โวลต์ ในการทดสอบวงจรรขยายสัญญาณชุดเดียว นี้เราจะทำการวัดค่าสัญญาณอินพุต สัญญาณเอาต์พุต กำลังสัญญาณอินพุต กำลังสัญญาณเอาต์พุตของวงจร เพื่อนำไปคำนวณหาค่าประสิทธิภาพและอัตราขยายของวงจรที่นำมาทดสอบ ในรูปที่ 4.1 แสดงบล็อกไดอะแกรมการทดสอบวงจรรขยายสัญญาณชุดเดียว โดยจะใช้ไครเรชันนอลคัปเปิล (Directional Coupler) ในการแยกแ่บสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรขยายออกมาเพื่อวัดระดับของสัญญาณโดยคัปเปิลที่ใช้จะมีค่าลดทอนอยู่ที่ -56 dB และในรูปที่ 4.2 จะแสดงรูปการทดสอบวงจรรขยายชุดเดียว โดยลักษณะการทดสอบจะเป็นดังนี้ เราจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณป้อนสัญญาณความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ ให้กับชุดวงจรรขับกำลังสัญญาณอินพุต จากนั้นเอาต์พุตที่ได้จากวงจรรขับกำลังสัญญาณจะเป็นอินพุตให้กับวงจรรขยายสัญญาณที่นำมาทดสอบโดยสัญญาณเอาต์พุตจะป้อนให้กับโพลดจำลองซึ่งการวัดค่าของสัญญาณเอาต์พุตจะใช้คัปเปิลแ่บสัญญาณออก โดยสัญญาณที่ถูกแ่บออกมาจะมีสองสัญญาณ สัญญาณแรกจะส่งไปยังเครื่องพาวเวอร์มิเตอร์เพื่อวัดสัญญาณเอาต์พุตของวงจรรขยาย อีกหนึ่งสัญญาณที่แ่บออกมาจะถูกแบ่งเป็นสองสัญญาณด้วยตัวแยกสัญญาณเพื่อส่งไปยังเครื่องวิเคราะห์สเปกตรัมและเครื่องวัดรูปสัญญาณ เพื่อให้ได้สัญญาณเอาต์พุตที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ เราจะเพิ่มวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน (Low-pass filter) เพื่อกรองสัญญาณฮาร์โมนิกออกให้เหลือแค่สัญญาณเอาต์พุตที่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์อย่างเดียว

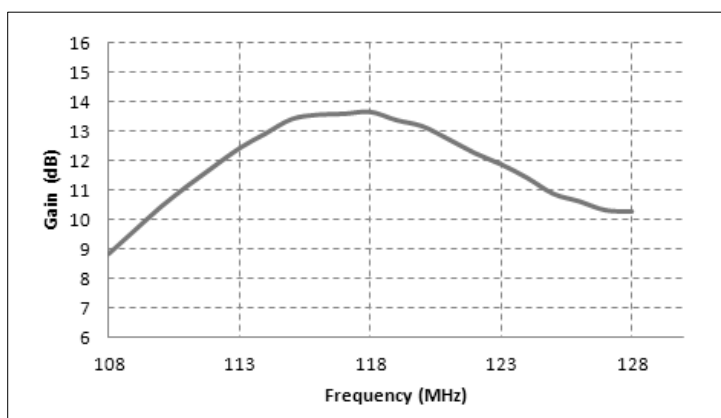


รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของการติดตั้งอุปกรณ์ในการทดสอบวงจรรขยายชุดเดียว



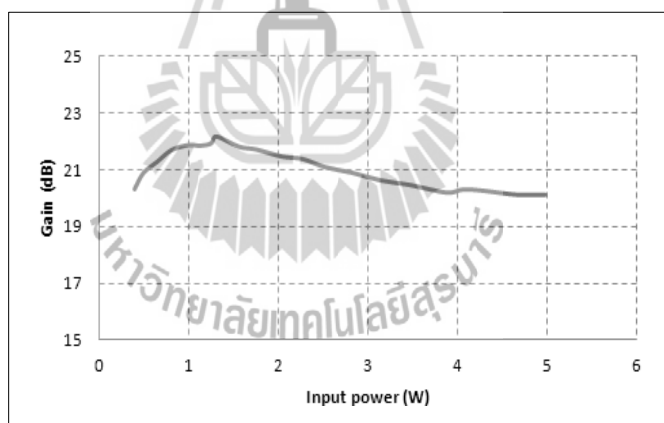
รูปที่ 4.2 การทดสอบวงจรขยายชุดเดียว

ในขั้นตอนแรกในการทดสอบวงจรขยายชุดเดียวเราจะทำการทดสอบวงจรขยายที่กำลังวัตต์ต่ำเพื่อทำการทดสอบย่านความถี่ของวงจรขยายที่ทำการขยายสัญญาณได้ดี โดยเราจะป้อนสัญญาณอินพุตให้วงจรขยายประมาณ 30 มิลลิวัตต์ แล้วทำการเปลี่ยนความถี่ไปเรื่อย ๆ เพื่อหาความถี่ที่วงจรขยายทำงานได้ดีที่สุด จากรูปที่ 4.3 จะแสดงค่าอัตราขยายของวงจรขยายที่ออกแบบเทียบกับความถี่ตั้งแต่ 108 – 128 เมกกะเฮิรตซ์ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ความถี่ที่เราต้องการคือความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์อยู่ในย่านที่มีอัตราขยายที่สูง อยู่ที่ประมาณ 13.67 dB ที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์ ดังนั้นจากการทดสอบที่วัตต์ต่ำสามารถแสดงให้เห็นว่าวงจรขยายที่ออกแบบนี้สามารถใช้งานได้ดีในย่านความถี่ 118 เมกกะเฮิรตซ์

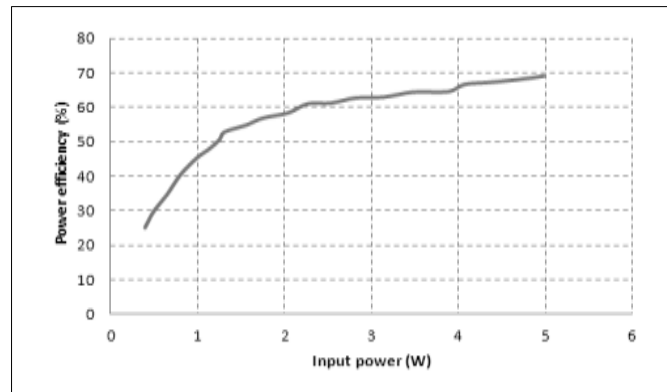


รูปที่ 4.3 อัตราขยายของวงจรขยายชุดเดียวที่กำลังงานต่ำ

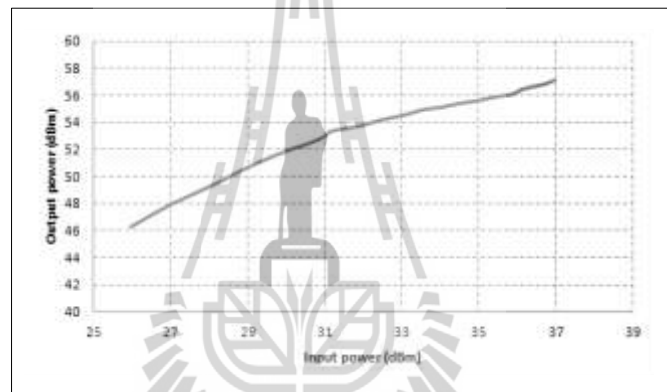
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจรขยายเพื่อใช้งานที่ความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นเราจึงได้ทำการทดสอบวงจรขยายที่ความถี่ 118 เมกะเฮิร์ตซ์ เทียบกับสัญญาณอินพุตที่เข้ามาในวงจรขยาย โดยเราจะทำการทดสอบวงจรขยายแล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่าประสิทธิภาพค่าอัตราขยาย ดังรูปที่ 4.4 จะแสดงอัตราขยายของวงจรขยายที่ได้ออกแบบเทียบกับสัญญาณอินพุต ซึ่งจะเห็นได้ว่าวงจรขยายมีค่าอัตราขยายเฉลี่ยประมาณ 21.07 dB และในรูปที่ 4.5 แสดงค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายชุดเดียว ซึ่งจะมีค่าประสิทธิภาพสูงสุดที่ 69% และค่า P_{1dB} ที่เป็นค่าแสดงถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตเทียบกับสัญญาณเอาต์พุตในหน่วยของ dBm นั้นจะแสดงในรูปที่ 4.6 ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าอินพุตเพิ่มขึ้นค่าสัญญาณเอาต์พุตจะยังสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก ในรูปที่ 4.7 จะแสดงค่าอุณหภูมิทั้งหมดของวงจรขยาย ซึ่งในช่วงแรกทรานซิสเตอร์จะมีอุณหภูมิสูงที่สุดและจะมีอุณหภูมิต่ำที่ประมาณ 75 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิของตัวเก็บประจุในส่วนของเอาต์พุตแมตซ์ซึ่งจะมีอุณหภูมิต่ำที่สุดในวงจรขยาย โดยมีอุณหภูมิสูงถึง 145 องศาเซลเซียสในขณะที่มีกำลังเอาต์พุต 524 วัตต์ ซึ่งตัวเก็บประจุในส่วนนี้สามารถทนความร้อนได้สูงสุด 150 องศาเซลเซียส



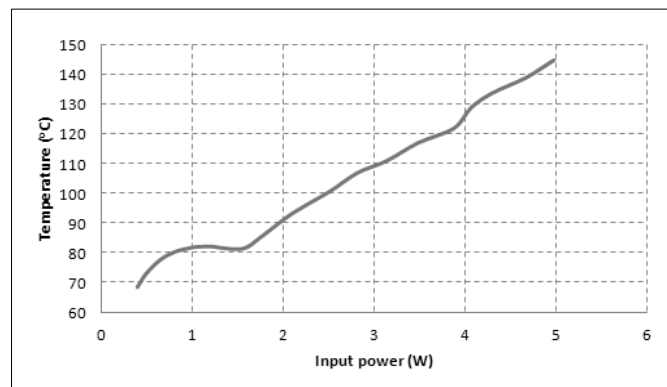
รูปที่ 4.4 อัตราขยายของวงจรขยายชุดเดียว



รูปที่ 4.5 ค่าประสิทธิภาพของวงจรขยายชุดเดียว



รูปที่ 4.6 ค่า P_{1dB} ของวงจรขยายชุดเดียว



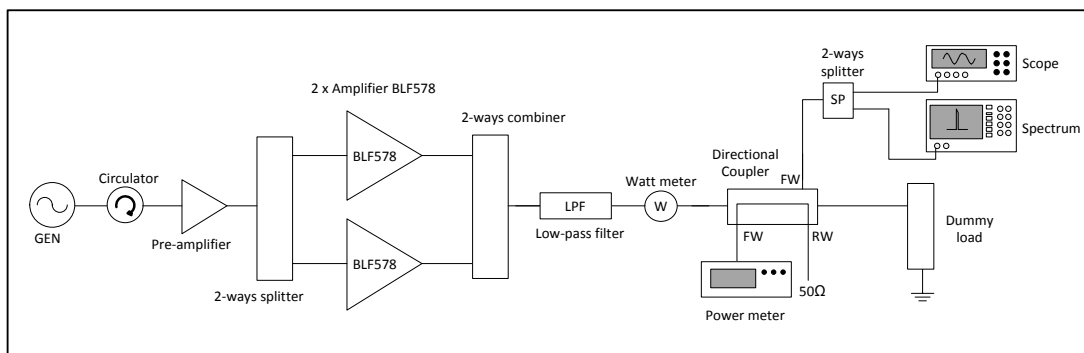
รูปที่ 4.7 ค่าอุณหภูมิของวงจรขยายชุดเดียว

4.2.2 การทดสอบวงจรมหาสัญญาณคลาสิก ชนิดพหุ-พูล ขนาด 1 กิโลวัตต์

จากการทดสอบวงจรมหาสัญญาณเดี่ยวสามารถให้กำลังงาน 524 วัตต์ ที่กระแสสูงสุด 18 แอมป์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการกำลังของสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์ ดังนั้นเราจะเลือกใช้วงจรมหาสัญญาณ 2 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยจะนำเอาสัญญาณเอาต์พุตของแต่ละวงจรมารวมกันโดยใช้วงจรมหาสัญญาณชนิด 2 ทาง (2-ways combiner) เพื่อให้ได้สัญญาณความถี่ 118 เมกะเฮิรตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์ในการทดสอบชุดวงจรมหาสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์ เราจะใช้วงจรมหาสัญญาณแบบสามทาง (2-ways splitter) ในแยกสัญญาณจากชุดขับวงจรมหาสัญญาณเป็นสามสัญญาณ แล้วป้อนเป็นสัญญาณอินพุตให้กับวงจรมหาสัญญาณแต่ละวงจร โดยในการวัดค่าต่าง ๆ จะเหมือนกันกับการวัดวงจรมหาสัญญาณเดี่ยว ดังแสดงในรูปที่ 4.9 ซึ่งจะแสดงบล็อกไดอะแกรมการทดสอบชุดวงจรมหาสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์ และการทำสอบชุดวงจรมหาสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์จะแสดงในรูปที่ 4.10 ซึ่งเราจะทำการทดสอบชุดวงจรมหาสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์แล้วนำผลที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราการขยาย ค่าประสิทธิภาพ และค่า P_{1dB} ต่อไป



รูปที่ 4.8 วงจรมหาสัญญาณคลาสิก ชนิดพหุ-พูล สองชุด



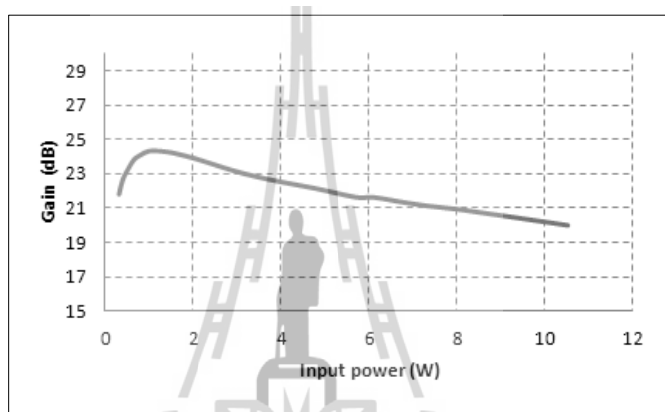
รูปที่ 4.9 บล็อกไดอะแกรมการทดสอบชุดวงจรถายสัญญาณ ขนาด 1 กิโลวัตต์



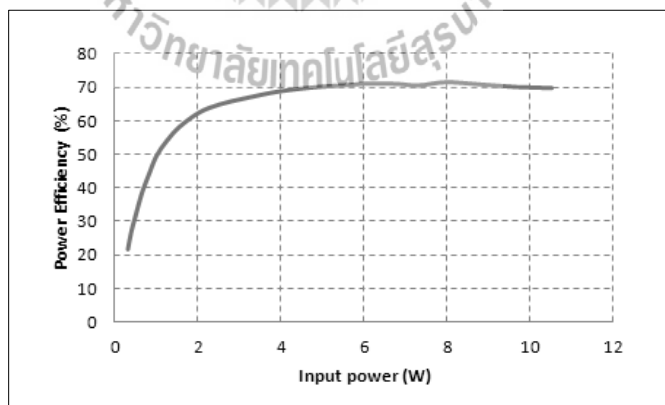
รูปที่ 4.10 การทดสอบชุดวงจรถายขนาด 1 กิโลวัตต์

ในการทดสอบชุดวงจรถายขนาด 1 กิโลวัตต์จะทำการทดสอบที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ โดยผลที่ได้จะนำมาคำนวณเทียบกับค่ากำลังงานอินพุตของชุดวงจรถายเพื่อหาค่า อัตราขยาย ค่าประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบชุดวงจรถายพบว่า ชุดวงจรถายขนาด 1 กิโลวัตต์ ให้อัตราขยายเฉลี่ยอยู่ที่ 22.43 dB ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ค่าประสิทธิภาพของชุดวงจรถายสูงสุด 71% ดังแสดงในรูปที่ 4.12 และในรูปที่ 4.13 จะแสดงค่ากำลังงานเอาต์พุตเทียบกับกำลังงาน อินพุต ซึ่งจะพบว่าที่ กำลังงานอินพุตประมาณ 8.7 วัตต์ สามารถให้กำลังงานเอาต์พุต 1000 วัตต์ ในรูปที่ 4.14 จะแสดงค่า P_{1dB} ที่เป็นค่าแสดงถึงความสัมพันธ์ของสัญญาณอินพุตเทียบกับ

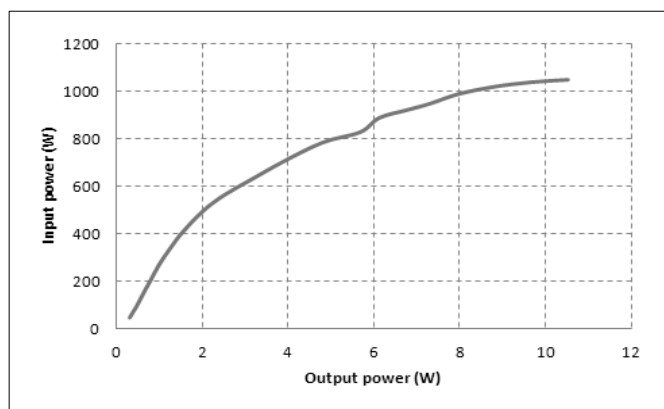
สัญญาณเอาต์พุตในหน่วยของ dBm ซึ่งมีแนวโน้มว่าค่าอินพุตเพิ่มขึ้นค่าสัญญาณเอาต์พุตจะยังสามารถเพิ่มขึ้นได้อีก จากรูปที่ 4.15 จะแสดงค่าอุณหภูมิของชุดวงจรถวาย พบว่าอุณหภูมิของชุดวงจรถวายในช่วงแรกจะร้อนที่ตัวทรานซิสเตอร์ ประมาณ 70 องศาเซลเซียส และเมื่อกำลังงานเอาต์พุตสูงขึ้น ตัวเก็บประจุที่ฝั่งเอาต์พุตแมตซ์ซึ่งจะร้อน โดยมีความร้อนสูงถึง 110 องศาเซลเซียส จากรูปที่ 4.16 จะแสดงรูปสัญญาณเอาต์พุตของชุดวงจรถวายขนาด 1 กิโลวัตต์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาต์พุตของชุดวงจรถวายมีความผิดเพี้ยนน้อย และขนาดของแอมพลิจูดของสัญญาณเอาต์พุตจะแสดงในรูปที่ 4.17 จะเห็นได้ว่าฮาร์โมนิกของวงจรถายมีน้อยมาก



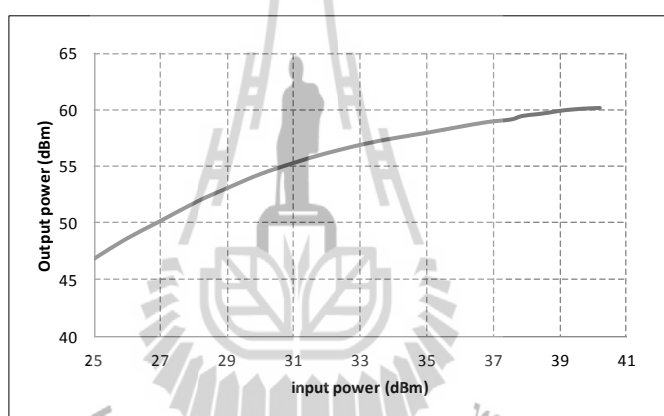
รูปที่ 4.11 อัตราขยายของชุดวงจรถายขนาด 1 กิโลวัตต์



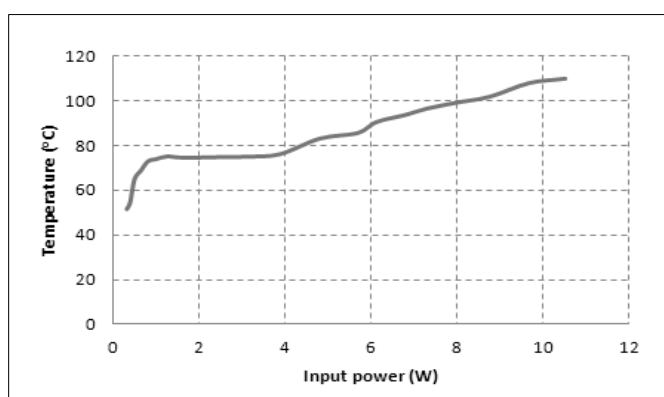
รูปที่ 4.12 ค่าประสิทธิภาพของชุดวงจรถายขนาด 1 กิโลวัตต์



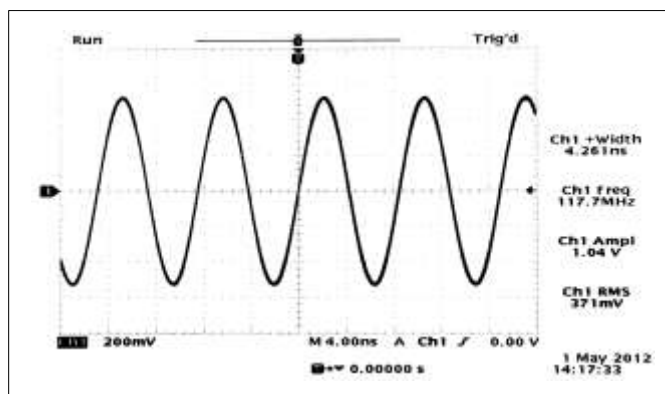
รูปที่ 4.13 ค่ากำลังงานเอาต์พุตเทียบกับอินพุตของชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์



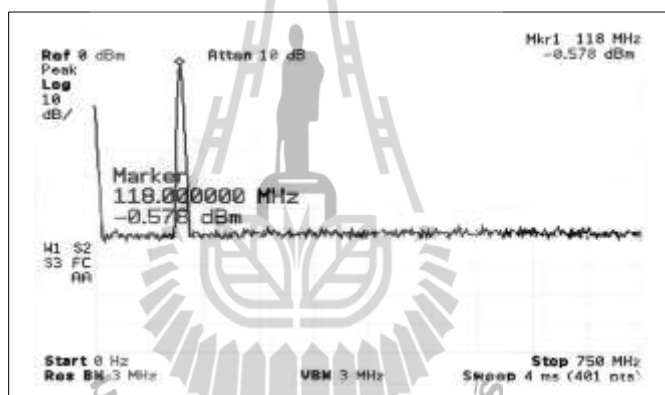
รูปที่ 4.14 ค่า P_{1dB} ของชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.15 อุณหภูมิของชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.16 รูปสัญญาณของชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์



รูปที่ 4.17 ขนาดของแอมพลิจูดของวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์

4.3 สรุป

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการทดสอบวงจรขยายที่ได้ออกแบบสร้าง โดยจะเริ่มจากการวัดวงจรขยายด้วยวัตต์ต่ำเพื่อทดสอบย่านในการทำงานของวงจรขยายที่ออกแบบ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบวงจรขยายที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ พบว่าเมื่อทำการทดสอบที่กำลังเอาต์พุตต่ำวงจรขยายสามารถใช้งานได้ดีที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นเราได้ทำการทดสอบวงจรขยายที่กำลังงานเอาต์พุตสูง แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดคุณสมบัติของอุปกรณ์ภายในวงจรขยาย จึงทำให้สามารถทดสอบวงจรขยายได้สูงสุดที่ 150 วัตต์ จากผลการทดสอบได้กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต 524 วัตต์ จากการทดสอบวงจรขยายที่ได้ออกแบบมาพบว่า วงจรขยายมีค่าอัตราขยายเฉลี่ย 21.07 dB ค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 69 % อุณหภูมิของทรานซิสเตอร์เฉลี่ยอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส พลังงาน

สูงสุดที่แรงดันไบอัส 40 โวลต์ ใช้กระแส 18 แอมป์จะอยู่ที่ 524 วัตต์ สัญญาณอินพุต 5 วัตต์ และจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่ต้องการกำลังของสัญญาณเอาต์พุตขนาด 1 กิโลวัตต์ ดังนั้นเราจึงได้ใช้วงจรขยายจำนวน 2 ชุด แล้วนำสัญญาณเอาต์พุตที่ได้มารวมกันให้ได้สัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยจะใช้วงจรแยกสัญญาณแยกสัญญาณอินพุตเป็นสองสัญญาณเพื่อเป็นสัญญาณอินพุตของแต่ละบอร์ด แล้วใช้วงจรรวมสัญญาณแบบสองทางในการรวมสัญญาณของทั้งสองวงจรเพื่อให้ได้กำลังงานของสัญญาณอินพุต 1 กิโลวัตต์ ซึ่งจากการทดสอบชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์พบว่า ชุดวงจรขยายมีอัตราขยายเฉลี่ยอยู่ที่ 22.43 dB มีค่าประสิทธิภาพสูงสุดอยู่ที่ 71 % อุณหภูมิของทรานซิสเตอร์สูงสุดอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส โดยขณะที่ชุดวงจรขยายให้กำลังงาน 1 กิโลวัตต์ใช้กระแส 35.69 แอมป์ แรงดันไบอัส 40 โวลต์ สัญญาณอินพุตประมาณ 8.7 วัตต์ รูปของสัญญาณเอาต์พุตก็มีการบิดเบี้ยวเล็กน้อย และสัญญาณฮาร์โมนิกก็เกิดขึ้นน้อยมาก จากผลการทดสอบชุดวงจรขยายข้างต้นพบว่า เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือสามารถสร้างวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์ได้



บทที่ 5

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปเนื้อหาของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ ทดสอบวงจรขยายคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูล ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ เพื่อใช้งานกับควิตีในวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ของซินโครตรอน โดยการวิจัยจะเริ่มจากศึกษาเนื้อหาและความสำคัญของปัญหา เริ่มจากวัตถุประสงค์ของการวิจัย ข้อตกลงเบื้องต้นและขอบเขตของการวิจัย โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยคือออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ขนาด 1 กิโลวัตต์ จากนั้นศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูล แล้วออกแบบวงจรและสร้างวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพหุ-พูล ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ จากการศึกษาทฤษฎีและปรัทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่าเราสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายโดยการเพิ่มเทคนิคเข้าไปในวงจรขยายสัญญาณ โดยเทคนิคที่งานวิจัยนี้นำมาเพิ่มคือเทคนิคการป้อนกลับแบบลบและเทคนิคอินเวิร์ต โดเฮอร์ตี้ ซึ่งทั้งสองเทคนิคจะช่วยให้วงจรขยายมีการสูญเสียภายในลดลงและทำให้มีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ซึ่งจะเห็นได้จากการจำลองผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณด้วยโปรแกรม AWR ทั้งสองเทคนิคนี้อาจจะไม่เหมาะกับการเพิ่มเป็นส่วนหนึ่งของวงจรต้นแบบ เนื่องจากการเลื่อนของเฟสในวงจรขยายแต่ละวงจรแตกต่างกัน จึงไม่เหมาะที่จะนำทั้งสองเทคนิคนี้มาเพิ่มในวงจรขยายสัญญาณต้นแบบ ดังนั้นการเพิ่มเทคนิคอินเวิร์ต โดเฮอร์ตี้ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบจึงเป็นเพียงความใหม่ทางวิชาการที่เสนอขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้

ในการออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบีชนิดพหุ-พูล เราได้เลือกใช้วงจรบาลันในการแยกสัญญาณและรวมสัญญาณ ใช้วงจรแมตซ์ซึ่งชนิดทรานฟอร์มเมอร์แมตซ์ซึ่ง ออกแบบโดยใช้แผนภาพสมิท ซึ่งเราจะใช้โปรแกรม smith 3.1 ในการคำนวณแผนภาพสมิท

ในการทดสอบวงจรขยายสัญญาณที่ออกแบบ เราใช้แหล่งจ่ายไฟให้กับวงจรขยายขนาด 40 โวลต์ กระแสสูงสุด 25 แอมป์ ซึ่งจากผลการทดสอบวงจรขยายที่ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ สัญญาณอินพุตขนาด 5 วัตต์ วงจรขยายกินกระแสประมาณ 18 แอมป์ ให้กำลังงานของสัญญาณเอาต์พุต 524 วัตต์ คิดเป็นอัตราขยาย 21 dB และจากผลการทดสอบวงจรขยายที่ออกแบบเมื่อเทียบกับกำลังอินพุต 0-5 วัตต์ พบว่าวงจรขยายที่ออกแบบให้อัตราการขยายเฉลี่ยอยู่ที่ 21.07 dB ให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุด 69 % อุณหภูมิของทรานซิสเตอร์สูงสุดอยู่ที่ 75 องศาเซลเซียส และจากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยต้องการกำลังของสัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์ ดังนั้นเราจึงต้องใช้

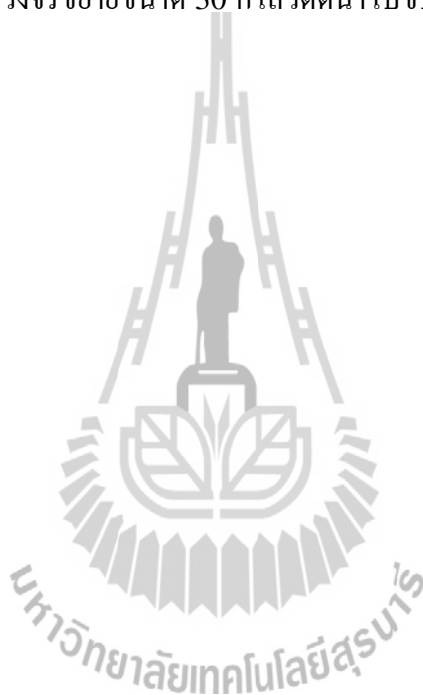
วงจรขยายสองชุดแต่นำสัญญาณที่ได้มารวมกันให้ได้สัญญาณขนาด 1 กิโลวัตต์ โดยเราจะใช้ตัวแยกสัญญาณ ในการแยกสัญญาณเป็นสองสัญญาณเพื่อเป็นสัญญาณอินพุตให้แก่ละชุดวงจรขยาย แล้วใช้วงจรรวมสัญญาณในการรวมสัญญาณเพื่อให้ได้ขนาด 1 กิโลวัตต์ จากการทดสอบชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์พบว่า ชุดวงจรขยายให้อัตราขยายเฉลี่ย 22.43 dB มีค่าประสิทธิภาพสูงสุด 71% โดยในขณะที่วงจรขยายให้กำลังงานที่ 1 กิโลวัตต์นั้น ชุดวงจรขยายมีแรงดันไบอัส 40 โวลต์ ใช้กระแส 35.69 แอมป์ โดยมีสัญญาณอินพุต 10.5 วัตต์ อุณหภูมิของชุดวงจรขยายขณะทดสอบนั้นอยู่ที่ประมาณ 110 องศาที่ ตัวเก็บประจุฝั่งเอาต์พุตแมตซ์ซิ่ง

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรขยายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ในงานวิจัยนี้ เป็นวงจรขยายสัญญาณกำลังสูง ซึ่งพลังงานที่สูงนี้มาพร้อมกับอุณหภูมิที่สูง ดังนั้นปัญหาเรื่องความร้อนในวงจรขยายจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ เราจึงควรเลือกใช้อุปกรณ์ในการสร้างวงจรขยายที่สามารถทนความร้อนได้สูงและควรใช้ระบบในการระบายความร้อนที่ดี เนื่องจากวงจรที่ออกแบบใช้งานขนาด 1 กิโลวัตต์หนึ่งชุดได้มากจากวงจรขยายสัญญาณจำนวน 2 วงจร ดังนั้นการแยกสัญญาณอินพุตของวงจรและรวมสัญญาณเอาต์พุตจึงเป็นเรื่องที่สำคัญ โดยเฉพาะในส่วนของกรรวมสัญญาณ ซึ่งเป็นการรวมสัญญาณของวงจรขยาย 2 ชุด ซึ่งเป็นเรื่องยากมากที่จะทำให้เฟสของสัญญาณทั้งสองวงจรเท่ากัน การไม่เท่ากันของเฟสของสัญญาณในส่วนนี้จะทำให้เกิดการสูญเสียภายในวงจรรวมสัญญาณเอาต์พุต ซึ่งกำลังงานที่สูญเสียในส่วนนี้จะกลายเป็นความร้อน ซึ่งตัวต้านทานในส่วนของวงจรรวมสัญญาณจะร้อนมาก ดังนั้นเราจึงควรเลือกใช้ตัวต้านทานที่มีวัตต์สูง ๆ ทนความร้อนได้ดี เพราะถ้าหากตัวต้านทานส่วนนี้เกิดพังหรือเสียหายจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนของวงจรรวมสัญญาณสูงและอาจจะทำให้วงจรขยายเกิดความเสียหายได้ เพื่อให้ได้ชุดวงจรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์ที่มีสมรรถนะในการทำงานที่สูงเราควรมีระบบป้องกันการเสียหายของวงจรขยายสัญญาณ เช่น ระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิ ระบบวัดและควบคุมการจ่ายไฟให้กับวงจรขยาย ระบบวัดค่าสัญญาณเอาต์พุตและสัญญาณสะท้อนกลับจากโหลดของวงจรขยาย ควบคุมไม่ให้สูงจนเกินไปและระบบระบายความร้อนให้กับวงจรขยายที่มีคุณภาพ อย่างไรก็ตามอุปสรรคที่เลือกใช้สำหรับการออกแบบวงจรขยายควรมีคุณภาพที่ดี

5.3 แนวทางการพัฒนาวงจรรขยายคลื่นวิทยุแบบโซลิตสเตทขนาด 1 กิโลวัตต์

แนวทางการพัฒนาต่อไปของวงจรรขยายคลื่นวิทยุแบบโซลิตสเตทขนาด 1 กิโลวัตต์ คือ ออกแบบระบบป้องกันวงจรรขยายเพื่อที่จะป้องกันไม่ให้วงจรรขยายเกิดความเสียหาย เช่นระบบระบายความร้อน ระบบป้องกันการจ่ายไฟเกิน ระบบป้องกันสัญญาณสะท้อนกลับ อีกทั้งเรายังสามารถเพิ่มความสามารถในการขยายสัญญาณของชุดวงจรได้โดยเลือกใช้ทรานซิสเตอร์ที่อัตราขยายที่สูงขึ้นและทนกระแสสูงได้สูงขึ้น นั่นคือค่าสมรรถนะของวงจรรขยายก็จะสูงขึ้นตามไปด้วย เราสามารถนำชุดวงจรรขยายขนาด 1 กิโลวัตต์หลายชุดนำไปรวมกันเพื่อให้ได้ชุดวงจรรขยายที่มีกำลังสูงมากขึ้นกว่าเดิมได้อีกด้วย เช่น ชุดวงจรรขยายขนาด 30 กิโลวัตต์นำไปขับควิตซ์ของวงกักเก็บอิเล็กทรอนิกส์ในซินโครตรอน เป็นต้น



รายการอ้างอิง

- Dr. Khalid K Mohammed, Rund B. Mohammed. (2010). **Linearization of Power Amplifier Class AB Using Cartesian Feedback**. International Multi-Conference on Systems 7th, Signals and Devices.
- Steve C. Cripps. (2002). **Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design**. Boston London, Artech House Microwave Library.
- Liao, S.Y. (1987). **Microwave circuit analysis and amplifier design**. Prentice Hall.
- ชาญชัย ทองโสภิต. (2549). การออกแบบวงจรคลื่นความถี่วิทยุ. เอกสารประกอบการสอน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- Grebennikov, A. (2004). **RF and Microwave Power Amplifier Design**. New York: McGraw-Hill.
- Kenington, Peter B. (2000). **High-Linearity RF Amplifier Design**. Boston, MA: Artech House.
- Ludwig, R. Bretchko, P. (2000). **RF Circuit Design Theory and Application**. New Jersey: Prentice-Hall.
- S.J.McCarthy. **Push-pull circuit and wideband transformer**. SEME LAB PLC, Application note, UK.
- Gunhyun Ahn, Min-su Kim, Hyun-chul Park, Sung-chan Jung, Ju-ho Van, Hanjin Cho, Sungwook Kwon, Jong-hyuk Jeong, Kyung-hoon Lim, Jae Young Kim, Sung Chan Song, Cheon-seok Park and Youngoo Yang. (JUNE 2007). **Design of a High-Efficiency and High-Power Inverted Doherty Amplifier**. IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL.55, NO.6, P.1105-1111.
- P. Marchand, T. Ruan, F. Ribeiro, and R. Lopes, (2007). **High power 352 MHz solid state amplifiers developed at the Synchrotron SOLEIL**. PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 10, 112001.
- AN10858, Application note. Rev. 02. (26 March 2010). **174 MHz to 230 MHz DVB-T power amplifier with the BLF578**.

AN10800, Application note. Rev. 01, (13 October 2009). **Using the BLF578 in the 88 MHz to 108 MHz FM band.**

Data sheet. Rev. 02. (4 February 2010). **BLF578 Power LDMOS transistor.**

Motorola AN1034. (1993). **Three Balun Designs for Push-Pull Amplifiers.**

<http://www.qsl.net/Va3iul>. **RF Power Amplifier.**





ภาคผนวก ก

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- Kopol S., Cheedket S., Uthansakul M. and Uthansakul P. (2011). Development of Push-Pull Amplifier Class AB by Combining Invert Doherty and Negative Feedback Techniques. **Burapha University National Conference 2011**, Chonburi, Thailand
- Sutthiphong Kophon, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul and Sampart Cheedket. (2011). Efficiency Improvement of Power Amplifier Class AB Push-Pull using Invert Doherty Combined with Negative Feedback. **The 2011 International Conference on Communication Engineering and Networks (ICCEN 2011)**, Hong Kong.
- Sutthiphong Kophon, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul and Sampart Cheedket. (2011). Performance Enhancement of Power Amplifier Class AB Push-Pull Using Component Balun and Invert Doherty Combined with Negative Feedback. **International Journal of Modeling and Optimization**, Vol. 1, No. 5.



การพัฒนาวงจรมายก้าลังกลาส AB ชนิดพุช – พูล โดยใช้วงจรถอมโพเนนต์บ่าลันและ
เทคนิค Invert Doherty ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ

Improve Performance of Power Amplifier class AB push-pull using component
Balun and Invert Doherty combine with Negative feedback

ศุภธิพงษ์ โกพล¹, พีระพงษ์ อุจารสกุล², มนต์ทิพย์ภา อุจารสกุล³ และ สัมภาส นีเดเกตุ²
¹สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ประเทศไทย 30000
²สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) 111 ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง นครราชสีมา ประเทศไทย 30000
E-mail: m5340545@g.sut.ac.th , ufhansakul@sut.ac.th , mtp@sut.ac.th and sampart@sri.or.th

บทคัดย่อ

ระบบภายใน Storage ring ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนจะมีระบบชดเชยพลังงานให้กับ อิเล็กตรอน โดยจะมี Cavity ที่ทำหน้าที่ชดเชยพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่เสียไปในแต่ละรอบ โดย Cavity จะใช้พลังงานประมาณ 30 - 35 KW ที่ความถี่ 118 MHz โดยพลังงานที่ใช้ ได้มาจากวงจรมายก้าลังกลาสหลายตัวนำมารวมกัน โดยวงจรมายก้าลังกลาสนั้นต้องมีประสิทธิภาพสูงและมีเสถียรภาพในการทำงาน ซึ่งวงจรมายก้าลังกลาสนั้นนำมาออกแบบจะเป็นแบบพุช – พูล คลาส AB เพราะมีประสิทธิภาพสูง วงจรมายก้าลังกลาสแบบพุช – พูล นั้นจะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 3 ส่วนคือ วงจรบาลัน, วงจรแมตชิ่ง, วงจรไบอัส DC ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพในบทความนี้จะทำการปรับปรุงในส่วนของวงจรบาลันและวงจรแมตชิ่ง โดยเลือกใช้วงจรบาลันแบบคอมโพเนนต์บ่าลันและเพิ่มเทคนิคเข้าไปในส่วนของวงจรแมตชิ่ง โดยเทคนิคที่ใช้ก็คือเทคนิค Doherty และการป้อนกลับแบบลบ ซึ่งการพัฒนาในแต่ละส่วนของวงจรมายก้าลังกลาสจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและทำให้วงจรมายก้าลังกลาสมีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

คำสำคัญ: วงจรมายก้าลังกลาส, วงจรบาลัน, วงจรแมตชิ่ง, เทคนิค Doherty, การป้อนกลับแบบลบ

Abstract

The system of storage ring in Synchrotron Light Research Institute (SLRI) is designed to compensate electron energy in storage ring using a cavity tuner. The cavity acquires a power from vacuum tube amplifier around 30-35 KW at the operating frequency of 118 MHz. To maintain such a high power, the system requires Power Amplifier (PA) having a high efficiency by solid state technology. This amplifier is a class AB Push-pull type which has three important parts including Balun, matching circuit and DC bias. In this paper, we present improve performance of PA in part of Balun and Matching network. We using lumped element instead of microstrip matching for coaxial balun in part of Balun circuit. And improve matching circuit by add technique for increase performance. The technique is Invert Doherty combine with Negative feedback. Development in each parts of the PA is able to increase power efficiency and performance is better.

Keyword: Power Amplifier, Balun, Matching circuit, Invert Doherty, Negative feedback

บทนำ

วงจรรขยายกำลังคลาส AB เป็นการรวมกันของวงจรรขยายกำลังคลาส A กับคลาส B ในส่วนของประสิทธิภาพและความเป็นเชิงเส้น โดยพื้นฐานของทรานซิสเตอร์จะใช้การไบอัสที่บริเวณจุด Q-point [1] โดยคลาส A จะไบอัสที่บริเวณจุด Cut-off ซึ่งเมื่อทรานซิสเตอร์ทำการขยายสัญญาณครั้งรอบสัญญาณจะคล้ายกับการทำงานของคลาส B และถ้าขยายสัญญาณสัญญาณเต็มรอบสัญญาณก็จะเป็นคลาส A ดังนั้นเราจึงใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกันจำนวน 2 ตัวในการขยายสัญญาณ โดยแบ่งกันขยายตัวละครึ่งคาบสัญญาณ ตัวแรกขยายซีกบวก ตัวที่สองขยายซีกลบแล้วนำสัญญาณที่ได้จากทั้งสองตัวมารวมกัน ซึ่งวิธีนี้เรียกว่า วงจรรขยายสัญญาณแบบ พุช-พูล [2] การที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวแบ่งกันขยายสัญญาณตัวละครึ่งคาบสัญญาณนั้น ทำให้ได้อัตราการขยายสูงและมีประสิทธิภาพสูงด้วย โดยส่วนประกอบของวงจรรขยายสัญญาณแบบพุช-พูล จะประกอบด้วย 3 ส่วนที่สำคัญคือ วงจรบาลัน, วงจรแมตซ์ซิ่ง, วงจรไบอัส โดยบาลันจะอยู่ในส่วนของอินพุตและเอาต์พุตของสัญญาณ หน้าที่ของบาลันคือแยกสัญญาณอินพุตที่เข้ามาให้เป็นสองสัญญาณ ซึ่งแต่ละสัญญาณมีความต่างเฟสกัน 180° และรวมสัญญาณที่ฝั่งเอาต์พุต [3] จากวงจรบาลันที่มีหน้าที่แยกสัญญาณและรวมสัญญาณของวงจรรขยายแบบพุช-พูล ถ้าวงจรบาลันสามารถแยกสัญญาณเป็นสองสัญญาณและต่างกัน 180° ได้อย่างสมบูรณ์และสามารถรวมสัญญาณได้อย่างสมบูรณ์แล้วจะทำให้วงจรรขยายมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนถัดมาคือส่วนของวงจรมแมตซ์ซิ่ง ซึ่งวงจรมแมตซ์ซิ่งจะมีส่วนอินพุตและเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ หน้าที่ของวงจรมแมตซ์ซิ่งคือทำหน้าที่แมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรมบาลันกับทรานซิสเตอร์ ซึ่งในส่วนอินพุตทำหน้าที่แมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ระหว่างเอาต์พุตของบาลันกับอินพุตของทรานซิสเตอร์และในส่วนองเอาต์พุตทำหน้าที่แมตซ์ซิ่งระหว่างเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์กับอินพุตของบาลัน วงจรมแมตซ์ซิ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากส่วนหนึ่งที่มีผลกระทบต่อค่าประสิทธิภาพและค่าอัตรการขยายของวงจรรขยาย เพราะถ้าหากการแมตซ์ซิ่งอิมพีแดนซ์ของวงจรรขยายไม่ดี จะทำให้เกิดการสูญเสียภายในของวงจรรขยายและจะทำให้ประสิทธิภาพของวงจรรขยายต่ำ ซึ่งพลังงานที่สูญเสียภายในที่เกิดจากการแมตซ์ซิ่งที่ไม่ดีนี้จะเปลี่ยนเป็นความร้อน ทำให้วงจรรขยายมีอายุการใช้งานที่สั้นลงและพังได้ [4] ส่วนสุดท้ายก็คือวงจรมไบอัสทำหน้าที่จ่ายพลังงานให้กับทรานซิสเตอร์

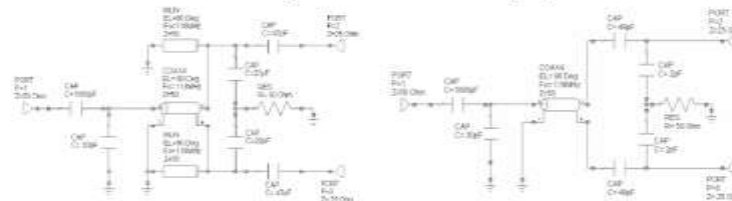
การเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยายกำลังสามารถทำได้ในส่วนของวงจรมบาลันและวงจรมแมตซ์ซิ่ง โดยในส่วนของวงจรมบาลันนั้นสามารถทำการพัฒนาให้แยกสัญญาณและรวมสัญญาณให้ดีขึ้นจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยายกำลังได้ ถ้าหากวงจรมบาลันอินพุตสามารถแยกสัญญาณได้ต่างกัน 180° จะทำให้สัญญาณที่อินพุตของทรานซิสเตอร์กลับเฟสกันพอดีและสัญญาณที่ขยายออกมาก็จะสามารถรวมกันได้โดยไม่หักล้างกัน ปัญหาการเลื่อนของเฟสสัญญาณก็จะลดลง ที่วงจรมบาลันเอาต์พุตซึ่งทำหน้าที่รวมสัญญาณ หากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการรวมสัญญาณของส่วนนี้ให้มีค่าการสูญเสียที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณหรือค่าสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ลดลงจะทำให้



รูปที่ 1 การคำนวณงานของวงจรถวลัน

โดยทั่วไปแล้ววงจรถวลันชนิด Transmission line transformer จะมีวงจรถวลันรูปที่ 1 ซึ่งการแยกสัญญาณของบาสันสามารถอธิบายได้โดยพิจารณาการเคลื่อนที่ของกระแสไฟฟ้าในสายส่ง ในที่นี้ใช้สายส่งแบบโคแอกเชียล จากรูปที่ 1 เมื่อเราพิจารณาที่ปลายสายส่ง จุด B และ C ที่เวลาค่าหนึ่ง กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่โหนด R_L ที่จุด B และกระแสที่ไหลออกจากโหนดที่จุด C จะมีปริมาณเท่ากัน แต่ทิศทางการไหลของกระแสเมื่อเทียบกับลวดนำที่จุด D พบว่าจะมีทิศของกระแสตรงข้ามกัน หรือจะกล่าวได้ว่าเฟสของกระแสมีความต่างกัน 180° โคจรถวลันจะมีความยาวสายที่นิยมใช้กันเท่ากับ $\lambda/2$ หรือ $\lambda/4$ แต่ในการออกแบบวงจรถวลันกำลัง ไม่ว่านี่ถึงถึงความยาวสายเพราะเราจะใช้ส่วนประกอบอื่นช่วยในการแมตซิ่งของวงจร [5]

ในการออกแบบวงจรถวลันที่ใช้สำหรับวงจรถวลันกำลัง คลาส AB แบบพุช-พูล โดยทั่วไปแล้วจะใช้ โมโคสตรูปรวมกับคาปาซิเตอร์ เพื่อช่วยในการแมตซิ่งระหว่างสายโคแอกเชียลกับโหนดของบาสัน นั่นก็คือ 25Ω ดังแสดงในรูปที่ 2ก. จากนั้นเรามาทำการพัฒนาการแมตซิ่งของวงจรถวลันจากเดิมที่ใช้โมโคสตรูปเปลี่ยนเป็นคาปาซิเตอร์ซึ่งช่วยให้เราสามารถปรับค่า C ที่เหมาะสมได้ดังแสดงในรูปที่ 2ข. เมื่อเราทำการเปรียบเทียบวงจรถวลันใหม่กับวงจรถวลันทั่วไปได้ผลตามรูปที่ 3ก. ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่า S11 ของวงจรถวลันใหม่มีค่าต่ำกว่าวงจรถวลันทั่วไปถึง 15dB ในรูปที่ 3ข. เป็นการแสดงค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านซึ่งทั้งสองวงจรมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งข้อดีของวงจรถวลันใหม่นั้นคือการออกแบบและการสร้างที่ไม่ยุ่งยาก ง่ายกว่า หากเราต้องการใช้งานที่ย่านความถี่อื่นก็สามารถทำได้โดยปรับค่า C การพัฒนาวงจรถวลันช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรถวลันกำลังได้ เนื่องจากการสูญเสียที่เกิดขึ้นในวงจรถวลันลดลง การทนต่อพลังงานสูงๆ ของวงจรถวลัน นั้นขึ้นอยู่กับอุปกรณ์ที่เลือกใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 2 วงจรถวลันโดยทั่วไปที่ใช้โมโคสตรูปและวงจรถวลันที่ใช้คาปาซิเตอร์

ประสิทธิภาพสัญญาณเอาต์พุตสูงขึ้นด้วย และในส่วนของกาพัฒนาวงจรมอดซึ่งสามารถทำได้โดย ออกแบบวงจรมอดซึ่งให้ค่าสูญเสียย้อนกลับให้นี้น้อยมากๆ นอกจากนี้เรายังสามารถทำได้โดยการ เพิ่มเทคนิคเข้าไป ซึ่งเป็นเทคนิคที่เมื่อเข้าไปในส่วนขอวงจรมอดซึ่งแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของ วงจรขยายกำลังได้ ในบทความนี้ได้เสนอ 2 เทคนิคที่น่าสนใจและสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของ วงจรขยายกำลังได้อีกทั้งช่วยให้การทำงานของวงจรมอดมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น โดย 2 เทคนิคที่น่าสนใจนั้นคือ Invert Doherty และ Negative feedback โดย Invert Doherty จะช่วยใน การเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรมอดให้สูงขึ้นแต่ทำให้วงจรมอดมีความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นเราจึงได้นำเทคนิค Negative feedback มาช่วยเพิ่มความเป็นเชิงเส้นให้กับวงจรมอดกำลัง เมื่อ เติมนำเอา 2 เทคนิคนี้มารวมกันจะทำให้เราได้วงจรมอดกำลังที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีความเป็น เชิงเส้น

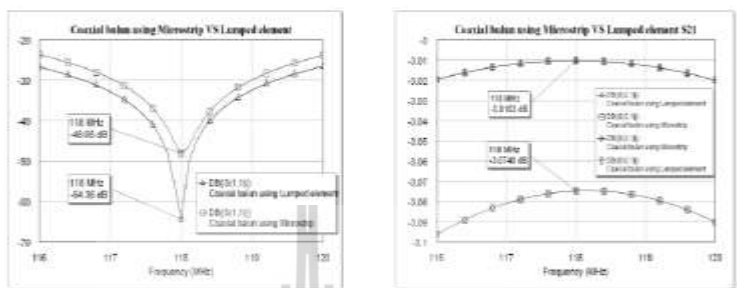
วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและทรมองถึงแนวโน้มของการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรมอดสัญญาณคลาส AB ชนิดทูล - ทูล เมื่อเรทำการพัฒนาในส่วนนี้ของวงจรมอด รวมถึงเพื่อให้ทราบหลักการและวิธีการ เพิ่มประสิทธิภาพของวงจรมอดในส่วนต่างๆ ผลกระทบที่เกิดขึ้นและการนำไปใช้ปัญหาเมื่อเรทำการ เพิ่มเทคนิคเข้าไปในส่วนต่างๆ ของวงจรมอด

ทฤษฎีและหลักการ

บาสัน

บาสันในวงจรมอดกำลังคลาส AB แบบทูล-ทูล มีหน้าที่แยกสัญญาณและรวมสัญญาณ ใน การแยกสัญญาณ วงจรมอดจะประกอบด้วยทูลสัญญาณอินพุตเป็นสองสัญญาณและเฟสต่างกัน 180° และในส่วนของเอาต์พุตทำหน้าที่รวมสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ ซึ่งปัจจุบันวงจรมอดที่ ใช้กันโดยทั่วไปก็จะมี Convention coil transformer, Transmission line transformer, Microstrip structures (Wilkinson Divider; Line and Ring Hybrids) ในการเลือกใช้งานของ วงจรมอดนั้นจะขึ้นอยู่กับย่านความถี่ที่ใช้งานและพลังงานที่ใช้ โดยส่วนใหญ่ถ้าใช้งานในย่านความถี่ ไม่เกิน 1 GHz ควรเลือกใช้วงจรมอดชนิด Transmission line transformer หรือ Convention coil transformer หากใช้งานที่ย่านความถี่สูง พลังงานสูง ควรเลือกใช้ Microstrip structures ซึ่งใน งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบวงจรมอดกำลังใช้งานที่ย่าน ความถี่ 118MHz จึงเลือกใช้วงจรมอดชนิด Transmission line transformer [4]

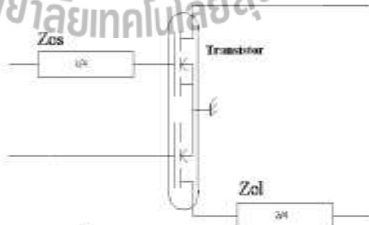


(ก) (ข)

รูปที่ 3 ค่าสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) และค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านภายในวงจรบาลูน ระหว่างวงจรบาลูนที่ใช้ไมโครสตริบและใช้คาปาซิเตอร์

Invert Doherty Power Amplifier (IDPA)

IDPA เป็นเทคนิคที่ใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายกำลัง โดย IDPA เหมาะสำหรับ วงจรขยายกำลังที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวในการขยายกำลัง เช่น วงจรขยายกำลังแบบทูลู-ทูลู โดย Invert Doherty จะช่วยในการปรับเฟสของสัญญาณทั้งก่อนที่เข้าทรานซิสเตอร์และก่อนที่จะรวมสัญญาณที่ ึ่งเอาต์พุต การปรับเฟสของสัญญาณนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายรวมถึงลดการสูญเสียที่เกิด จากการเลื่อนเฟสของสัญญาณบริเวณของการรวมสัญญาณที่เอาต์พุต ซึ่ง Invert Doherty ใช้ไมโครสตริบที่มีความยาว $\lambda/4$ ส่วนของวงจร Bias ส่วนความยาวในส่วนของการปรับเฟสขึ้นอยู่กับความเหมาะสม และความกว้างขึ้นอยู่กับขนาดของอิมพีแดนซ์ในส่วนที่เพิ่มเข้าไป [6] วงจร Invert Doherty ตามทฤษฎีแสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 วงจรเทคนิค Invert Doherty

ในบทความนี้ได้แนะนำเทคนิค IDPA เข้ามาช่วยในการเรียงเฟสของสัญญาณในส่วนสัญญาณ ก่อนเข้าทรานซิสเตอร์และก่อนที่จะทำการรวมสัญญาณที่เอาต์พุต แต่เนื่องจากความยาวของ Invert Doherty ที่อื่นทุกมีขนาดสั้นมากซึ่งอาจเกิดจากปัญหาการเลื่อนเฟสของส่วนนี้ไม่มีมากนัก เราจึง คิด Invert Doherty ในส่วนนี้ออกไป ดังนั้นจึงมีเพียงที่เอาต์พุต เนื่องจากการเพิ่ม Invert Doherty

เข้าไปในวงจรขยายกำลังซึ่งจะเพิ่มเข้าไปในส่วนของวงจรแมคซิ่ง ทำให้เทคนิค Invert Doherty มีผลอย่างมากต่อส่วนวงจรแมคซิ่งและความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยายกำลัง ดังนั้นเราจึงต้องคำนวณค่าอิมพีแดนซ์ของ Invert Doherty ให้ใกล้เคียงกับวงจรแมคซิ่งที่สุด โดยในส่วนของ Invert Doherty ฟังก์ชันจะอยู่ระหว่างเอาต์พุตของวงจรแมคซิ่งและอินพุตของวงจรถวลิน ซึ่งขนาดของอิมพีแดนซ์บริเวณนั้นจะมีค่า 25Ω ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการไม่แมคซิ่งของวงจรได้ ในส่วนของปัญหาที่เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรขยายกำลังนั้นเราใช้เทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) เข้ามาช่วยให้วงจรขยายมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น

การป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback)

การป้อนกลับแบบลบเป็นเทคนิคที่นำเอาสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเดรน ป้อนกลับมายังอินพุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเบส ทำให้เกิดการหักล้างกันของสัญญาณอินพุต เรียกว่า การป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback) ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ คาปาซิเตอร์ (C) และ ตัวต้านทาน (R) ใช้ในการป้อนกลับสัญญาณ โดยการป้อนกลับแบบลบจะช่วยให้การปรับค่าอัตรการขยายของวงจรขยายกำลังให้มีความราบเรียบและช่วยให้วงจรขยายมีแบนวิดท์กว้างขึ้น [7]

การเพิ่มวงจรถวลินป้อนกลับแบบลบเข้าไปในวงจรขยายกำลัง ช่วยให้วงจรขยายกำลังมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ประสิทธิภาพดีขึ้น แต่เทคนิคนี้เป็นการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเดรนป้อนกลับมายังอินพุตของทรานซิสเตอร์ที่ขาเบสทำให้ในส่วนของวงจรแมคซิ่งด้านอินพุตถูกรบกวน ทำให้อาจเกิดการไม่แมคซิ่งของส่วนนี้ได้ แต่ผลกระทบจากการป้อนกลับของสัญญาณอาจจะเกิดไม่มากนักก็จะแสดงในส่วนของงานจำลองผล



รูปที่ 5 วงจรเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ (Negative feedback)

การที่เรานำเอาเทคนิคการป้อนกลับแบบลบมาทำให้วงจรขยายกำลังมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น ดังนั้นเมื่อเรานำเอาเทคนิค Invert Doherty ที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรขยายได้ แต่ขาดความเป็นเชิงเส้นมารวมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบที่สามารถเพิ่มความเป็นเชิงเส้นของวงจรขยายได้ เมื่อเรานำเอา 2 เทคนิคนี้มารวมเราก็จะได้วงจรขยายที่มีประสิทธิภาพสูงและมีความเป็นเชิงเส้น

สมรรถนะของวงจรถายกำลัง (Power amplifier performance)

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการออกแบบสร้างวงจรถายกำลังที่ใช้งานในย่านความถี่ 118MHz ซึ่งจะใช้งานในการให้พลังงานแก่ Cavity ซึ่งใช้ใน Storage ring ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน ในการออกแบบวงจรถายที่เราใช้นั้นจะเป็นคลาส AB แบบพุช-พูล ส่วนประกอบของวงจรถายแบบพุช - พูล จะประกอบด้วย วงจรบาลัน วงจรแมตซ์ซิ่ง และวงจรไบอัส นี้คือ 3 วงจรหลักที่สำคัญมากในการออกแบบวงจรถายแบบพุช - พูล ซึ่งหน้าที่ของแต่ละส่วนล้วนมีผลต่อการทำงาน ประสิทธิภาพ รวมถึงเสถียรภาพในการทำงานของวงจรถายกำลัง ในการออกแบบวงจรถายกำลังคลาส AB แบบพุช - พูล ที่เหมาะต่อการใช้งานที่สถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนนั้น เราจะคำนึงถึงค่าประสิทธิภาพและค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ของวงจรถายเป็นหลัก ถ้าค่าสูญเสียย้อนกลับมีค่าสูงนั้นหมายถึงมีความเสี่ยงที่ทำให้วงจรถายจะพังได้และทำให้วงจรถายขาดเสถียรภาพในการทำงาน แต่โดยทั่วไปในการออกแบบจะคำนึงถึงค่าของ Harmonic ที่เกิดขึ้น แต่เราไม่คำนึงถึงในส่วนนี้เนื่องจากในตัวของ Cavity เองจะมี Low-pass คอยกรองสัญญาณอยู่แล้ว [8]

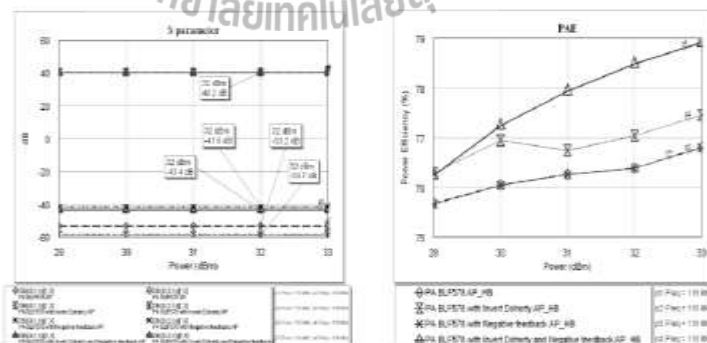
สำหรับงานวิจัยนี้เลือกใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ BLF578 ใ้ในการขยายกำลังเพราะมีความแข็งแรง ทนความร้อนที่สูงได้และมีประสิทธิภาพสูง [9][10] ทรานซิสเตอร์นี้เป็นผลิตภัณฑ์ของ NXP semiconductor สามารถทำงานที่ความถี่ 10 – 500 MHz ที่แหล่งจ่ายไฟ 50Vdc จากการทดสอบทรานซิสเตอร์ที่ความถี่ 225MHz สามารถให้พลังงานแก่โหลดสูงสุด 1200W อัตราการขยาย 24dBm และประสิทธิภาพ 71% [11] อุปกรณ์นี้มีควมไวคือให้กำลังได้ สามารถทนความร้อนได้ถึง 150° อย่างไรก็ตามระบบภายในวงก็เก็บอิมพีแดนซ์ของสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอนทำงานที่ความถี่ 118 MHz ดังนั้นในการออกแบบจึงต้องออกแบบให้ที่ความถี่ 118 MHz มีสมรรถนะสูงสุด

การจำลองผล

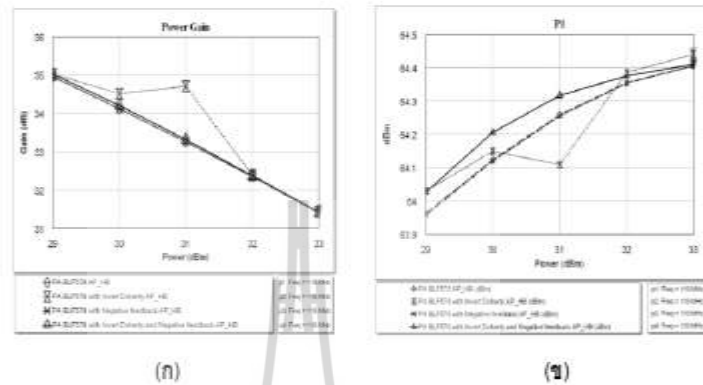
จากการทดสอบจำลองผลของวงจรถายกำลังคลาส AB แบบพุช - พูล ด้วยโปรแกรม Microwave Office (AWR) เราจะดูแนวโน้มของการพัฒนาจรถายกำลังในส่วนวงจรบาลันและการเพิ่มเทคนิคเข้าไปในส่วนวงจรแมตซ์ซิ่ง จากส่วนของวงจรบาลันจะเห็นได้ว่าเมื่อเลือกใช้วงจรบาลันที่ใช้คาปาซิเตอร์ที่ปรับค่าได้แทนแบบไมโครสตริปที่ขาดการปรับค่า จะเห็นได้ว่าวงจรถายบาลันที่ใช้คาปาซิเตอร์ที่ปรับค่าได้ดีกว่า ดังนั้นในการออกแบบจึงเลือกใช้บาลันชนิดที่ใช้คาปาซิเตอร์ ดังนั้นเราจึงใช้วงจรถายกำลังที่ใช้วงจรบาลันชนิดใช้คาปาซิเตอร์เป็นวงจรต้นแบบในการออกแบบ เมื่อเราเพิ่มเทคนิคของ Invert Doherty และการป้อนกลับเข้าไปในวงจร

ในการจำลองผลเราจะใช้พลังงานอินพุตประมาณ 0 – 2 W หรือ ประมาณ 29 – 33 dBm เมื่อเราดูค่า S-parameter ซึ่งเป็นค่าที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน (S11) และค่าสัมประสิทธิ์การ

ส่งผ่าน (S21) จากวงจรถ่ายแบบปรกติเมื่อเพิ่มเทคนิค Doherty เข้าไป ทำให้ค่า S11 ลดลง นั้นหมายถึงค่าพลังงานสูญเสียย้อนกลับในวงจรถ่ายลดลง และจากวงจรถักเมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปคล้ายเป็นการไปกวนวงจรแมตซ์ซึ่งทั้งหมดทำให้ค่า S11 สูงขึ้นจากปรกติ และเมื่อนำทั้ง 2 เทคนิคมารวมกันทำให้ S11 ต่ำกว่าวงจรถักแต่ไม่ดีเท่า Doherty แบบปรกติดังแสดงในรูปที่ 6ก. จากผลการจำลองค่าประสิทธิภาพของวงจรถ่ายแสดงในรูปที่ 6ก เห็นได้ว่าจากวงจรถักเมื่อเพิ่ม Doherty เข้าไปเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรถ่ายแต่จะเห็นได้ว่าวงจรถักความเป็นเชิงเส้น และจากวงจรถักเมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปจะเห็นได้ว่าค่าประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวงจรถัก เมื่อเรานำเอาเทคนิค Doherty มารวมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มความเป็นเชิงเส้นดังรูป 6ข. ค่าอัตราขยายของวงจรถักเมื่อเพิ่มเทคนิค Doherty เข้าไปพบว่าที่อัตราขยายเพิ่มขึ้นแต่ขาดความเป็นเชิงเส้น เมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปในวงจรถักพบว่าใกล้เคียงค่าปรกติ และเมื่อนำเอาทั้ง 2 เทคนิคมารวมกันได้คือการขยายที่มีความเป็นเชิงเส้นขึ้นอัตราขยายลดลงเล็กน้อยจาก Doherty ปรกติ ดังแสดงในรูปที่ 7ก ค่า P1dB คือค่าที่แสดงพลังงานที่เอาท์พุทเทียบกับพลังงานอินพุท จะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม Doherty ทำให้ขาดความเป็นเชิงเส้น เมื่อเพิ่มเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปทำให้วงจรถ่ายมีความเป็นเชิงเส้นมากขึ้น และค่า P1dB ของวงจรถ่ายที่เพิ่มทั้ง 2 เทคนิคเข้าไปทำให้ได้พลังงานที่เอาท์พุทสูงขึ้นและมีความเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 7ข. และจากผลการจำลองจะเห็นได้ว่าการเพิ่มเทคนิค Invert Doherty ทำให้วงจรถ่ายมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นแต่ขาดความเป็นเชิงเส้น เมื่อเรานำเอาเทคนิคการป้อนกลับแบบลบที่มีคุณสมบัติช่วยให่วงจรถ่ายมีความเป็นเชิงเส้นและเพิ่มแบนวิดของวงจรถ่ายมารวมกับเทคนิค Invert Doherty ทำให้วงจรถ่ายที่รวมเอาทั้ง 2 เทคนิคเข้าด้วยกันมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นและมีความเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 6. ผลของการจำลองค่า S-parameter และค่า Power Efficiency ของวงจรถ่าย



รูปที่ 7. ผลของการจำลองค่า Power Gain และค่า PA1dB ของวงจรรขยาย

อภิปรายผล

จากผลการจำลองด้วยโปรแกรม Microwave Office (AWR) พบได้ว่าจากรวงจรรขยายกำลังคลาส AB แบบทูล - ทูล เมื่อทำการเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการปรับปรุงและพัฒนาในส่วนของวงจรรขยาย โดยเลือกใช้วงจรรขยายที่ใช้คาปาซิเตอร์ปรับค่าได้ ทำให้ได้วงจรรขยายที่มีค่าการสูญเสียย้อนกลับ (Return Loss) ที่น้อยลง นั้นหมายถึงการปรับปรุงวงจรรขยายทำให้ประสิทธิภาพของวงจรรขยายเพิ่มขึ้น และเมื่อเรานำวงจรรขยายที่ใช้คาปาซิเตอร์ปรับค่าได้นี้มาพัฒนาในส่วนของวงจรรขยาย โดยการใช้เทคนิค Invert Doherty เพื่อทำให้วงจรรขยายมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น เมื่อเราเพิ่ม invert Doherty เข้าไปในวงจรรขยายสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของวงจรรขยายได้แต่ทำให้วงจรรขยายมีความเป็นเชิงเส้น ดังนั้นเราจึงนำเทคนิคการป้อนกลับแบบลบที่สามารถเพิ่มความเป็นเชิงเส้นให้วงจรรขยายทำงานร่วมกับเทคนิค Invert Doherty ที่ขาดความเป็นเชิงเส้น และจากผลการจำลองทำให้เราทราบว่าพบว่าการป้อนกลับแบบลบช่วยแก้ปัญหาความไม่เป็นเชิงเส้นของวงจรรขยายแบบ Invert Doherty ผลของการจำลองทำให้เราทราบว่า การเพิ่มเทคนิค Invert Doherty ร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบเข้าไปในวงจรรขยายกำลังสามารถทำวงจรรขยายมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น อัตราการขยายสูงขึ้น และทำให้มีวงจรรขยายเป็นเชิงเส้น นั้นหมายความว่า การใช้ทั้งสองเทคนิคนี้ร่วมกันสามารถทำให้วงจรรขยายกำลังมีสมรรถนะดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ได้รับการสนับสนุนทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา จากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน
(องค์การมหาชน)

บรรณานุกรม

- [1] Dr. Khalid K Mohammed, Rund B. Mohammed , "Linearization of Power Amplifier Class AB Using Cartesian Feedback." International Multi-Conference on Systems 7th, Signals and Devices, 2010.
- [2] "Three Balun Designs for Push-Pull Amplifiers", Motorola AN1034, 1993.
- [3] Steve C. Cripps. (2002) "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design", Boston London, Artech House Microwave Library.
- [4] <http://www.qsl.net/Va3iul> "RF Power Amplifier".
- [5] S.J.McCarthy "Push-pull circuit and windband transformer" SEME LAB PLC, Application note, UK.
- [6] Gunhyun Ahn, Min-su Kim, Hyun-chul Park, Sung-chan Jung, Ju-ho Van, Hanjin Cho, Sung-wook Kwon, Jong-hyuk Jeong, Kyung-hoon Lim, Jae Young Kim, Sung Chan Song, Cheon-seok Park and Youngoo Yang. (JUNE 2007) "Design of a High-Efficiency and High-Power Inverted Doherty Amplifier" IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL.55, NO.6, P.1105-1111.
- [7] Liao, S.Y. (1987) "Microwave circuit analysis and amplifier design" Prentice Hall.
- [8] P. Marchand, T. Ruan, F. Ribeiro, and R. Lopes, (2007) "High power 352 MHz solid state amplifiers developed at the Synchrotron SOLEIL" PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 10, 112001.
- [9] "174 MHz to 230 MHz DVB-T power amplifier with the BLF578" AN10858, Application note Rev. 02, 26 March 2010.
- [10] "Using the BLF578 in the 88 MHz to 108 MHz FM band" AN10800, Application note, Rev. 01, 13 October 2009.
- [11] "BLF578 Power LDMOS transistor" data sheet, Rev. 02, 4 February 2010.

Efficiency Improvement of Power Amplifier Class AB Push-Pull using Invert Doherty Combined with Negative Feedback

Sutthiphong Kophon
School of Telecommunication
Engineering,
Suranaree University of
Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
m5340545@g.sut.ac.th

Peerapong Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of
Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
uthansakul@sut.ac.th

Monthippa Uthansakul
School of Telecommunication
Engineering
Suranaree University of
Technology
Nakhon Ratchasima, Thailand
mtp@sut.ac.th

Sampart Cheedket
Synchrotron Light Research
Institute
111 Suranaree district, Muang
Nakhon Ratchasima, Thailand
sampart@slri.or.th

Abstract — The System of storage ring in Synchrotron Light Research Institute (SLRI) is designed to compensate electron energy in storage ring using a cavity tuner. The cavity acquires a power from vacuum tube amplifier around 30-35 KW at the operating frequency of 118 MHz. To maintain such a high power, the system requires Power Amplifier (PA) having a high efficiency by solid state technology. This amplifier is a class AB push-pull type which has three important parts including Balun, matching circuit and DC bias. In this paper, we use Invert Doherty combined with Negative feedback to improve the PA performance. Invert Doherty technique can improve the efficiency of PA but the circuit is non-linear so it causes non-linear performance. Hence, in this paper, the authors add a negative feedback in cooperative with invert Doherty for increasing linearity and power efficiency of PA. The measured performance of Invert Doherty power amplifier combined with negative feedback (IDPA-NF) is presented and it is compared to the conventional PA with the same matching circuit. The results show that the proposed technique can improve the efficiency of class-AB amplifier.

Keywords — Power amplifier; Invert Doherty; Negative feedback; Class AB push-pull amplifier

I. INTRODUCTION

The Class AB amplifier is a compromise between Class-A and Class-B in terms of efficiency and linearity. Typically the transistor is biasing to a quiescent point, which is somewhere in the region between the cutoff point and the Class A bias point. In this case, the transistor will be ON for more than half a cycle (like class B), but less than a full cycle (like class A) of the input signal [1]. Conduction angle in Class-AB is between 180° and 360° and efficiency is between 50% and 75%. The principle of PA push-pull is to use two identical transistors and each transistor amplifier works on a half periods. That process makes the high gain and efficiency. There are three important parts of PA push-pull including with balun circuit (BALance / UNbalance circuit), DC bias, and Matching circuit. Balun circuit separate an input signal into two signals and two signals has phase different 180° . It will be input signal of two transistors and has phase different 180° . Therefore, one transistor is a positive amplifier side and other is a negative amplifier side. Then two signals are combined to one output balun circuit [2]. Next part is a DC Bias. DC bias is a source power of PA. In this paper, we use DC bias 48Vdc at drain source and

2.5Vdc at gate source. The last part is a matching circuit. Matching circuit is a circuit for matching impedance between balun and transistor. The matching network is very important to PA because, if PA has a mismatch between transistor and balun then the power efficiency and gain are poor [3].

Improving the performance of PA can be performed in part of Balun and Matching circuit. If we design two parts properly, then the power amplifier efficiency (PAE) and gain of PA can be improved. In this paper, the authors combine two interesting techniques which can increase PAE performance. Two techniques are invert Doherty and negative feedback. The Doherty amplifier is a technique for improving the PAE. However, the drawback of using invert Doherty is the non-linear performance. In order to improve the linearity, the combining of negative feedback is proposed to solve the problem of non-linearity. This is very important to the project of SLRI because the non-linearity can cause the unexpected signal spurring in the cavity tuner. Hence, the authors focus on both efficiency improvement and linearity control.

II. INVERSE DOHERTY POWER AMPLIFIER (IDPA)

Invert Doherty Power Amplifier is a technique for improving the PAE. In a Doherty amplifier, the output powers of two amplifiers operating at a proper phase alignment and bias level are combined using a quarter-wave transmission line without the use of any additional components [4]. The classical Doherty amplifier configuration is illustrated in Fig.1.

In general, the IDPA is used for aligning signals before sending them into transistor and before combining output signals. However, for the part of input transistor, the length is very short. Then, in this paper, the PA has ID only on output side. The calculated transmission line for ID technique is approximate at 25 ohm. The result of PA when adding ID technique will cause the power efficiency more non-linear. This is because ID technique provides the best performance based on transmission line matching in which its response is non-linear function to output signal. In this paper, the authors propose the combining of negative feedback technique with ID technique to solve the non-linear problem.

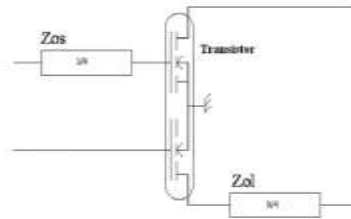


Figure 1. Schematic diagram of the classical Doherty amplifier.

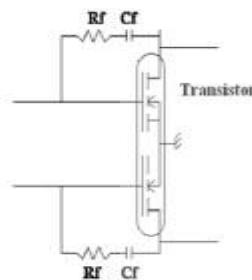


Figure 2. Schematic diagram of Negative feedback amplifier.

III. NEGATIVE FEEDBACK (NF)

Negative Feedback is a technique to feedback signal from output of transistor (Drain) to input of transistor (Gate). That feedback process will perform a subtraction between input signals with feedback signal. In this paper, the authors choose the component circuits such as capacitors and resistors to perform the feedback signal. The negative feedback technique can greatly improve the PA performance including with a non-linear distortion, log-gain stability and band pass width [5].

Although the PA performance is more linear when using a negative feedback but its drawback is on the matching input. The matching unit of feedback technique degrades S11 performance but in a little. Hence, it is a perfect choice for applying feedback technique with IDPA in order to solve a linearity problem. Then, the proposed technique offers the higher efficiency as well as a good linear performance.

IV. POWER AMPLIFIER PERFORMANCE

The selected PA type in this paper is aimed to practically implement for the project of SLRI at 118MHz. It is used for cavity driving in storage ring of SLRI. The authors design power amplifier in Class AB push - pull type. For this type, there are three important parts including Balun circuit, matching circuit and DC bias. The design of each part will affect to operation, efficiency and stability of PA. The first key factors on designing PA for a task of SLRI are power efficiency and return loss. If the value of return loss is too high, it means that the risk of generator breakdown is very high. In this paper, the design of PA neglects a harmonic problem because the cavity has a reliable low-pass filter [6].

For SLRI project, the transistor chip BLF578 is selected for purpose of power amplifier because it provides an

excellent ruggedness, a good thermal stability and high power efficiency [7][8]. This device is a product of NXP semiconductor. It can operate in a frequency band of 10 - 500 MHz with a supply voltage of 50 V. For typical use at 225 MHz, the load power is 1200W and power Gain is 24dB with 71% power efficiency [9]. This device is sensitive to Electro Static Discharge (ESD) and a storage temperature is limited to 150°C. However, the low level system of SLRI project operates at 118 MHz. Therefore, the designs in this paper focus on this frequency operation and try it best to fit the highest performance at 118 MHz.

V. SIMULATION

The simulations of PA class AB push-pull are performed via Microwave office (AWR). The input power of 0.8-2 watt (29-33 dBm) is set. Figure 3 presents S-parameters of the best fit design at 118 MHz. As seen in this figure, the invert Doherty technique can decrease the value of S11 which it means that the reflected power also decreases. Consider a negative feedback technique; the S11 performance is slightly increased. It means that the feedback slightly destroys a PA matching. Also in this figure, the proposed technique that combines invert Doherty and negative feedback can improve the S11 performance.

In figure 4, the PAE performance of PA is presented. For a normal PA, it has PEA 76.3% at input 30 dBm. When applying an invert Doherty, the PAE increases to 76.75%. However, the effects of IDPA cause the non-linear results of PAE performance. After taking a negative feedback to PA, there is no change to PAE performance. For the case of IDPA combined with negative feedback, the PAE performance is obviously improved to 78% as shown in figure 4.

The power gain of PA is also tested and shown in figure 5. It is noticed that the power gain of PA when an invert Doherty technique is used can increase gain but the non-linear problem is a tradeoff. As expected, the use of IDPA combined with negative feedback increases the power gain along with linear property.

Figure 6 shows the performance of power input comparing with power output (P_{1dB}) in a dBm scale. The results confirm the same trends as described in figure 4 and figure 5.

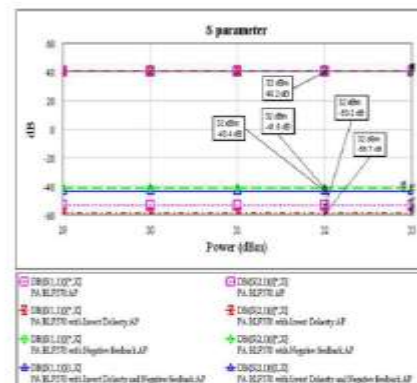


Figure 3. Simulation of PA in S-parameter.

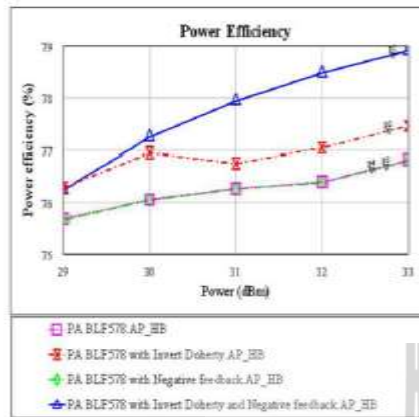


Figure 4. Simulation of PA in power efficiency

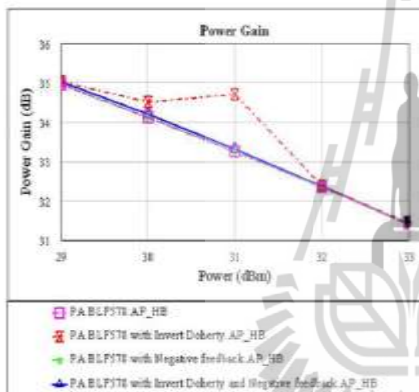


Figure 5. Simulation of PA in power gain

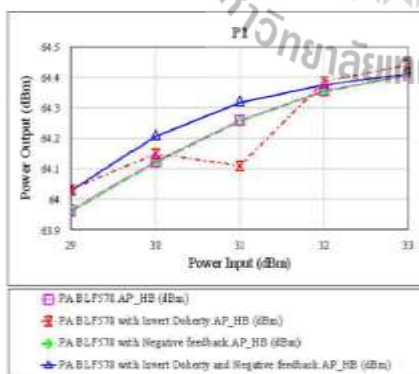


Figure 6. Simulation of PA in P_{1dB}

VI. MEASUREMENT

For measurements, the block diagram of power efficiency measurement is shown in figure 7 and the real equipment setup is shown in figure 8. The real prototype of IDPA combined with a negative feedback is shown in figure 9. In our measurement, the directional coupler is used to tap a small output signal and then it is measured by power meter. The limitation of tested output power is around 800W because the circulator has a power limit at 800W.

The measured results of power efficiency are shown in figure 10. It is obviously seen that the trends of measurement are the same as simulation. However, the measured values are less than the ones in simulation because the unexpected loss occurred within the real prototype.

In figure 11, the measured results of power gain are presented. It is interesting to observe that the trends are different from simulation. In measurements, the proposed technique can improve power gain with a significant.

The results of P_{1dB} are also measured and shown in figure 12. The results confirm that the proposed technique can improve the system performance in both simulations and measurements.

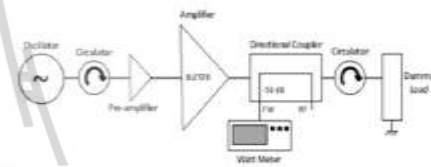


Figure 7. Block diagram of power efficiency measurement



Figure 8. Measurement setup

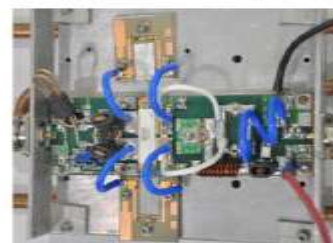


Figure 9. The prototype of IDPA combined with a negative feedback

VII. CONCLUSION

PA class AB push-pull can increase performance by adding invert Doherty technique but the non-linear property is its drawback. Thus, this paper proposes the negative feedback to combine with invert Doherty power amplifier to fix the drawback. Three system performances including with power efficiency, power gain and power input/output ratio are investigated. Both simulation and measurement results confirm that the proposed technique can improve performance of PA class AB push-pull.

ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the financial support from Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Nakhon Ratchasima, Thailand.

REFERENCES

- [1] Dr. Khalid K Mohammed, Ruid B. Mohammed, "Linearization of Power Amplifier Class AB Using Cartesian Feedback," International Multi-Conference on Systems 7th, Signals and Devices, 2010.
- [2] "Three Balun Designs for Push-Pull Amplifiers", Motorola AN1034, 1993.
- [3] Steve C. Cripps. (2002) "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design", Boston London, Artech House Microwave Library.
- [4] Gunhyun Ahn, Min-si Kim, Hyun-chul Park, Sung-dan Jung, Jo-ho Van, Hanjin Cho, Sung-wook Kwon, Jong-hyuk Jeong, Kyung-hoon Lim, Jae Young Kim, Sung Chan Song, Cheon-seok Park and Youngoo Yang. (JUNE 2007) "Design of a High-Efficiency and High-Power Inverted Doherty Amplifier" IEEE TRANSACTIONS ON MICROWAVE THEORY AND TECHNIQUES, VOL.55, NO.6, P.1103-1111.
- [5] Liao, S.Y. (1987) "Microwave circuit analysis and amplifier design" Prentice Hall.
- [6] P. Marchand, T. Ruan, F. Ribeiro, and R. Lopes. (2007) "High power 352 MHz solid state amplifiers developed at the Synchrotron SOLEIL" PHYSICAL REVIEW SPECIAL TOPICS - ACCELERATORS AND BEAMS 10, 112001.
- [7] "174 MHz to 230 MHz DVB-T power amplifier with the BLF578" AN10858, Application note Rev.02, 26 March 2010.
- [8] "Using the BLF578 in the 88 MHz to 108 MHz FM band" AN10800, Application note, Rev. 01, 13 October 2009.
- [9] "BLF578 Power LDMOS transistor" Data sheet, Rev. 02, 4 February 2010.

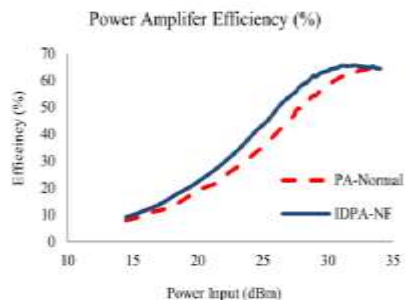


Figure 10. Measurement of PA in power efficiency

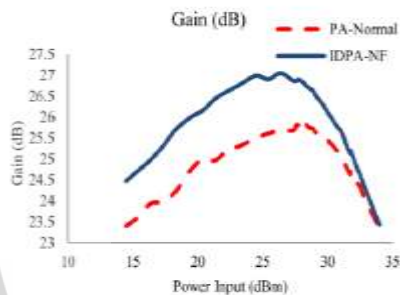


Figure 11. Measurement of PA in power gain.

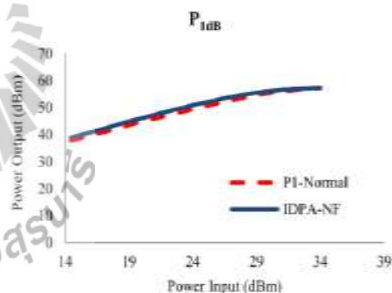


Figure 12. Measurement of PA in P1dB

Performance Enhancement of Power Amplifier Class AB Push-Pull Using Component Balun and Invert Doherty Combined with Negative Feedback

Sutthiphong Kophon, Peerapong Uthansakul, Monthippa Uthansakul, and Sampart Cheedket

Abstract—The System of storage ring in Synchrotron Light Research Institute (SLRI) is designed to compensate electron energy in storage ring using a cavity tuner. The cavity acquires a power from vacuum tube amplifier around 30-35 KW at the operating frequency of 118 MHz. To maintain such a high power, the system requires Power Amplifier (PA) having a high efficiency by solid state technology. This amplifier is a class AB push-pull type which has three important parts including Balun, matching circuit and DC bias. In this paper, we use Invert Doherty combined with Negative feedback to improve the PA performance. Invert Doherty technique can improve the efficiency of PA but the circuit is non-linear so it causes non-linear performance. Hence, in this paper, the authors propose a negative feedback in conjunction with invert Doherty for increasing linearity and power efficiency of PA. Also the use of lumped element instead of microstrip line in balun circuit is proposed to obtain the best efficiency. The performance measurement of Invert Doherty power amplifier combined with negative feedback (IDPA-NF) is presented and it is compared to the conventional PA with the same matching circuit. The results show that the proposed system can significantly improve the efficiency of class-AB amplifier.

Index Terms—Power amplifier, balun, Invert doherty, negative feedback, class AB push-pull amplifier

I. INTRODUCTION

The Class AB amplifier is a compromise between Class-A and Class-B in terms of efficiency and linearity. Typically the transistor is biasing to a quiescent point, which is somewhere in the region between the cutoff point and the Class A bias point. In this case, the transistor will be ON for more than half a cycle (like class B), but less than a full cycle (like class A) of the input signal [1]. Conduction angle in Class-AB is between 180° and 360° and efficiency is between 50% and 75%. The principle of PA push-pull is to use two identical transistors and each transistor amplifier works on a half periods. This process makes system both high gain and high efficiency.

In general, there are three important parts of PA push-pull including with Balun circuit (BALance / UNbalance circuit), DC bias, and Matching circuit. The Balun circuit separate one

input signal into two output signals with 180° phase difference. Also the circuit can work as a reversible operation to combine two signals into one [2]. There are two necessary Balun circuits for push-pull PA type for input and output sides. Normally, the input side has 50Ω impedance. It means that the input Balun has to be matched with 50Ω and both outputs are 25Ω [3]. As a result, the input signal of two identical transistors has the same equal impedance with 180° phase difference. Consequently, both transistors are able to perfectly amplify their half period. One transistor is in a positive amplifier side and the other is in a negative amplifier side [4]-[5]. Then, at the output side, the other Balun circuit combines two output signals from transistors. It is obvious that the performance of power amplifier will be degraded if both sides of Balun circuit are not perfectly matched. Next part is a DC Bias. DC bias is a source power of PA. In this paper, we use DC bias 48Vdc at drain source and 2.5Vdc at gate source. The last important part is a matching circuit. Matching circuit is a circuit for matching impedance between balun and transistor. The matching network is very important to PA because, if PA has a mismatch between transistor and balun then the power efficiency and gain are poor [3].

Improving the performance of PA can be performed in part of Balun and Matching circuit. If we design two parts properly, then the power amplifier efficiency (PAE) and gain of PA can be enhanced. In this paper, the authors present the concept of using lumped elements such as capacitors instead of microstrip line for Balun matching and two interesting techniques for increase PAE performance. Two techniques are invert Doherty and negative feedback. The Doherty amplifier is a technique for improving the PAE. However, the drawback of using invert Doherty is the non-linear performance. In order to improve the linearity, the combining of negative feedback is proposed to solve the problem of non-linearity. This is very important to the project of SLRI because the non-linearity can cause the unexpected signal spurring in the cavity tuner. Hence, the authors focus on both efficiency improvement and linearity control



Fig. 1. Balun operation

Manuscript received November 27, 2011; revised December 18, 2011. This work was supported by Synchrotron Light Research Institute (SLRI), Nakhon Ratchasima, Thailand.

Sutthiphong Kophon, Peerapong Uthansakul and Monthippa Uthansakul are with the School of Telecommunication Engineering, Suramaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. (e-mail: m5340545@sut.ac.th, uthansakul@sut.ac.th, mtp@sut.ac.th).

Sampart Cheedket is with the Accelerator Technology Division, Synchrotron Light Research Institute, Nakhon Ratchasima, 30000, Thailand. (e-mail: sampart@slri.or.th).

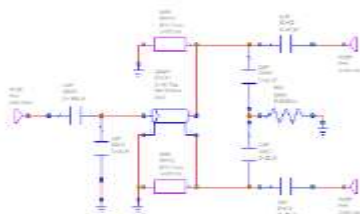


Fig. 2. Balun design with microstrip line

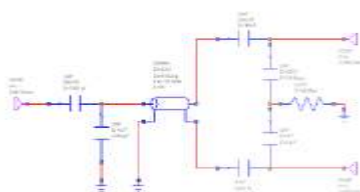


Fig. 3. Balun design with lumped element

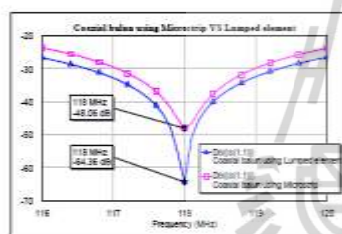


Fig. 4. Return loss of coaxial balun using microstrip and lumped element

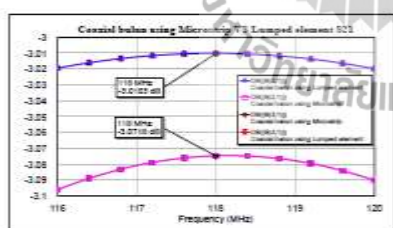


Fig. 5. Transition coefficient of coaxial balun using microstrip and lumped element

II. BALUN PERFORMANCE

There are two Balun circuits required for a push-pull PA type. When the input signal is separated into two output signals with 180° phase difference, the operating circuit is called as input Balun. In turn, the combination of two output signals from transistors is called as output Balun. Both Balun circuits can be similarly designed. In general, the Balun designs are classified into 3 types. There are conventional coil transformer, transmission line transformer and microstrip

structures (Wilkinson Divider ; Line and Hybrid Ring) [4]. The usability depends on frequency and power. In case of frequency less than 1GHz, it should be either transmission line or conventional coil transformers. On the other hand, the microstrip structure is used for frequency more than 1 GHz. In this paper, the operating frequency is 118 MHz with 1KW power so the choice of transmission line transformer is appropriated.

The theoretical circuit of transmission line transformer is shown in fig. 1. The operation of separated signals of Balun circuit is explained by considering a movement of current in transmission line (coaxial). In fig. 1, the current flows into load R_L at point B and it flows out from load at point C with equal quantity but the opposite direction in comparing with ground at point D. If we consider signals at point B and C, the phases of signals at point B and C are different by 180° . Generally, the length of transmission line (coaxial) is $\lambda/4$ or $\lambda/2$.

In general, the matching design of Balun circuit for class AB push-pull PA type use a microstrip line and shunt capacitor between coaxial line of Balun with shown in figure 2. This circuit can optimize a return loss by adding or reducing either width or length of microstrip line. With many drawbacks mentioned in the introduction, the paper present the use of lumped element instead of microstrip line. The new circuit using adjustable capacitor is shown in figure 3. It can be obviously seen that the new circuit is less complexity and easy to be implemented. Fig. 4 shows a comparison of return loss, $S(1,1)$, between using microstrip line and lump elements. The results in this figure show that Balun with lumped element has return loss 16.3dB better than microstrip line at 118 MHz.

III. INVERSE DOHERTY POWER AMPLIFIER (IDPA)

Invert Doherty Power Amplifier is a technique for improving the PAE. In a Doherty amplifier, the output powers of two amplifiers operating at a proper phase alignment and bias level are combined using a quarter-wave transmission line without the use of any additional components [6]. The classical Doherty amplifier configuration is illustrated in Fig. 6.

In general, the IDPA is used for aligning signals before sending them into transistor and before combining output signals. However, for the part of input transistor, the length is very short. Then, in this paper, the PA has ID only on output side. The calculated transmission line for ID technique is approximate at 25 ohm. The result of PA when adding ID technique will cause the power efficiency more non-linear. This is because ID technique provides the best performance based on transmission line matching in which its response is non-linear function to output signal. In this paper, the authors propose the combining of negative feedback technique with ID technique to solve the non-linear problem.

IV. NEGATIVE FEEDBACK (NF)

Negative Feedback is a technique to feedback signal from output of transistor (Drain) to input of transistor (Gate). That

feedback process will perform a subtraction between input signals with feedback signal. In this paper, the authors choose the component circuits such as capacitors and resistors to perform the feedback signal. The negative feedback technique can greatly improve the PA performance including with a non-linear distortion, log-gain stability and band pass width [7].

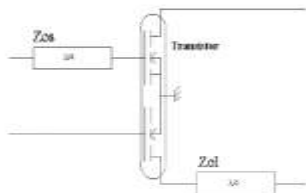


Fig. 6. Schematic diagram of the classical Doherty amplifier.

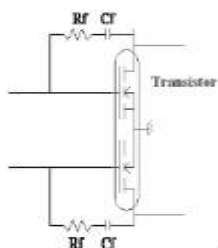


Fig. 7. Schematic diagram of Negative feedback amplifier.

Although the PA performance is more linear when using a negative feedback but its drawback is on the matching input. The matching unit of feedback technique degrades S11 performance but in a little. Hence, it is a perfect choice for applying feedback technique with IDPA in order to solve a linearity problem. Then, the proposed technique offers the higher efficiency as well as a good linear performance.

V. POWER AMPLIFIER PERFORMANCE

The selected PA type in this paper is aimed to practically implement for the project of SLRI at 118MHz. It is used for cavity driving in storage ring of SLRI. The authors design power amplifier in Class AB push - pull type. For this type, there are three important parts including Balun circuit, matching circuit and DC bias. The design of each part will affect to operation, efficiency and stability of PA. The first key factors on designing PA for a task of SLRI are power efficiency and return loss. If the value of return loss is too high, it means that the risk of generator breakdown is very high. In this paper, the design of PA neglects a harmonic problem because the cavity has a reliable low-pass filter [8].

For SLRI project, the transistor chip BLF578 is selected for purpose of power amplifier because it provides an excellent ruggedness, a good thermal stability and high power efficiency [9]. This device is a product of NXP semiconductor. It can operate in a frequency band of 10 - 500 MHz with a supply voltage of 50 V. For typical use at 225 MHz, the load power is 1200W and power Gain is 24dB with 71% power efficiency [10], [11]. This device is sensitive to Electro Static Discharge (ESD) and a storage temperature is limited to

150°C. However, the low level system of SLRI project operates at 118 MHz. Therefore, the designs in this paper focus on this frequency operation and try it best to fit the highest performance at 118 MHz.

VI. SIMULATION

The simulations of PA class AB push-pull are performed via Microwave office (AWR). The input power of 0.8-2 watt (29-33 dBm) is set.

The results of return loss S(1,1), are shown in Fig. 8. The return loss of PA using Balun with lumped element is 14 dB better than microstrip line. To consider the power efficiency of PA, the results are shown in Fig. 9. The efficiency of PA is 79% and 76% at typical 36 dBm when using lumped element and microstrip line, respectively. The power gain are also measured and shown in Figure 10, respectively. However, there is no significant difference in power gain.

Fig. 11 presents S-parameters of the best fit design at 118 MHz. As seen in this figure, the invert Doherty technique can decrease the value of S11 which it means that the reflected power also decreases. Consider a negative feedback technique, the S11 performance is slightly increased. It means that the feedback slightly destroys a PA matching. Also in this figure, the proposed technique that combines invert Doherty and negative feedback can improve the S11 performance. In fig 12, the PAE performance of PA is presented. For a normal PA, it has PEA 76.3% at input 30 dBm. When applying an invert Doherty, the PAE increases to 76.75%. However, the effects of IDPA cause the non-linear results of PAE performance. After taking a negative feedback to PA, there is no change to PAE performance. For the case of IDPA combined with negative feedback, the PAE performance is obviously improved to 78% as shown in fig. 12.

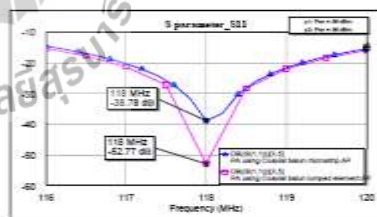


Fig. 8. Return Loss of PA using Balun with lumped element and PA using Balun with microstrip line

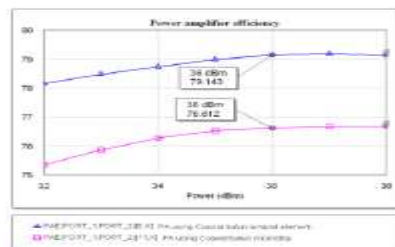


Fig. 9. Power amplifier efficiency of PA using Balun with lumped element and PA using Balun with microstrip line

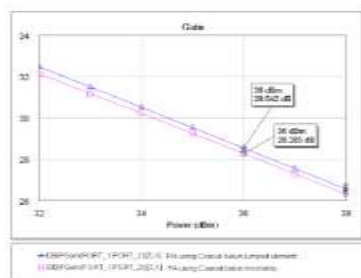


Fig. 10. Power amplifier Gain of PA using Balun with lumped element and PA using Balun with microstrip line



Fig. 16. Measurement setup

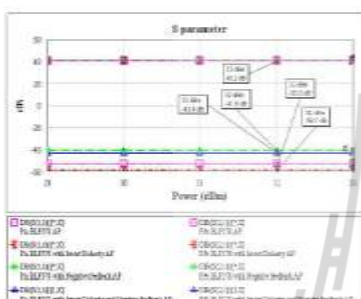


Fig. 11. Simulation of PA in S-parameter

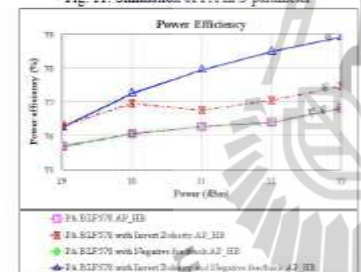


Fig. 13. Simulation of PA in power gain.

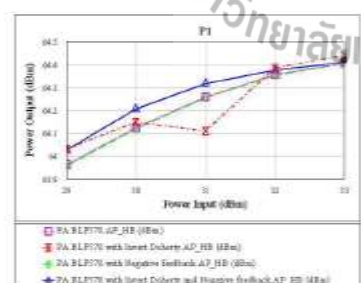


Fig. 14. Simulation of PA in P_{1dB}

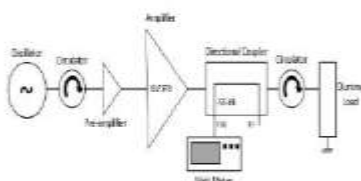


Fig. 15. Block diagram of power efficiency measurement



Fig. 17. The prototype of IDPA combined with a negative feedback.

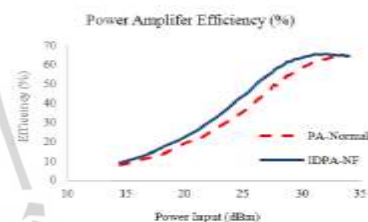


Fig. 18. Measurement of PA in power efficiency

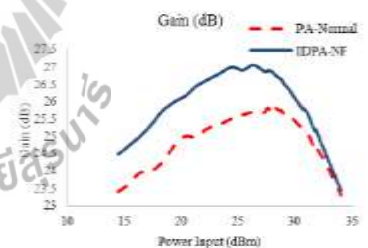


Fig. 19. Measurement of PA in power gain

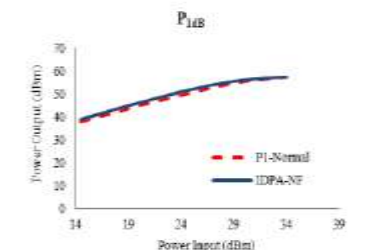


Fig. 20. Measurement of PA in P_{1dB}

The power gain of PA is also tested and shown in fig. 13. It is noticed that the power gain of PA when an invert Doherty technique is used can increase gain but the non-linear problem

is a tradeoff. As expected, the use of IDPA combined with negative feedback increases the power gain along with linear property.

Fig. 14 shows the performance of power input comparing with power output (P_{1dB}) in a dBm scale. The results confirm the same trends as described in fig. 12 and fig. 13.

VII. MEASUREMENT

For measurements, the block diagram of power efficiency measurement is shown in figure 15 and the real equipment setup is shown in figure 16. The real prototype of IDPA combined with a negative feedback is shown in figure 17. In our measurement, the directional coupler is used to tap a small output signal and then it is measured by power meter. The limitation of tested output power is around 800W because the circulator has a power limit at 800W.

The measured results of power efficiency are shown in figure 18. It is obviously seen that the trends of measurement are the same as simulation. However, the measured values are less than the ones in simulation because the unexpected loss occurred within the real prototype.

In figure 19, the measured results of power gain are presented. It is interesting to observe that the trends are different from simulation. In measurements, the proposed technique can improve power gain with a significant.

The results of P1dB are also measured and shown in figure 20. The results confirm that the proposed technique can improve the system performance in both simulations and measurements.

VIII. CONCLUSION

This paper presents the concept of using lumped element instead of microstrip line for better matching impedance of Balun circuit which is a main part of push-pull PA type. The performance of PA class AB push-pull can be enhanced by improving balun circuit and adding invert Doherty technique but the non-linear property is its drawback. Thus, this paper proposes the negative feedback to combine with invert Doherty power amplifier to fix the drawback. Three system performances including with power efficiency, power gain and power input/output ratio are investigated. Both simulation and measurement results confirm that the proposed system can improve performance of PA class AB push-pull.

REFERENCES

- [1] K. K. Mohammed and R. B. Mohammed, "Linearization of Power Amplifier Class AB Using Cartesian Feedback," *International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, 2010.
- [2] "Three Balun Designs for Push-Pull Amplifiers," Motorola AN1034, 1993.
- [3] S. C. Cripps, "Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design," Boston London, Artech House Microwave Library, 2002.
- [4] "RF Power Amplifier" available at: <http://www.qsl.net/Va3im/>.
- [5] S. J. McCarthy "Push-pull circuit and windband transformer" SEME LAB PLC, Application note, UK.
- [6] G. Ahn, M.-S. Kim, H.-C. Park, S.-C. Jung, J.-H. Van, H. Cho, S.-W. Kwon, J.-H. Jeong, K.-H. Lim, J. Y. Kim, S. C. Song, C.-S. Park, and Y. Yang, "Design of a High-Efficiency and High-Power Inverted Doherty Amplifier," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.55, no.6, pp.1105-1111, June 2007.
- [7] S. Y. Liao, "Microwave circuit analysis and amplifier design" Prentice Hall, 1987.
- [8] P. Marchand, T. Ruan, F. Ribeiro, and R. Lopes "High power 352 MHz solid state amplifiers developed at the Synchrotron SOLEIL," *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* 10, 112001 (2007).
- [9] "Using the BLF578 in the 88 MHz to 108 MHz FM band" AN10800, Application note, Rev. 01, 13 October 2009.
- [10] "BLF578 Power LDMOS transistor" data sheet, Rev. 02, 4 February 2010.
- [11] "174 MHz to 230 MHz DVB-T power amplifier with the BLF578"



Surthiphong Kophon was born in Nakhorn Phanom, Thailand. In 2010 he has obtained B.Eng. degree in Telecommunication Engineering, Suranaree University of Technology, and is currently working toward the Master degree at Suranaree University of Technology, Nakhorn Rachasima, Thailand. His current research interests include highly linear and efficient RF PA design.



Peerapong Uthansakul (M09) received B.Eng. and M.Eng. degrees from Chulalongkorn University, Thailand in 1996 and 1998, respectively. In 1998-2000, he worked as Telecommunication Engineer with Telephone Organization of Thailand (TOT) and then he has joined Suranaree University of Technology since 2000. During 2003-2007, he studied PhD at University of Queensland, Australia, in the area of wireless communications especially MIMO technology. He currently works as Assistant Professor School of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. He wrote 1 book entitled Adaptive MIMO Systems: Explorations for Indoor Wireless Communications (also available on amazon.com) and he has published more than 60 refereed journal and conference papers. His current research interests include MIMO, OFDM, WDMAX, Diversity and Wireless Mesh Network. Dr. Uthansakul received 2005 Best Student Presentation Prize winner at the 9th Australian Symposium on Antennas, Sydney, 16-17 February 2005, Australia and 2004 Young Scientist Travel Grant winner at the 2004 International Symposium on Antenna and Propagation, 17-21 August 2004, Japan.



Monthippa Uthansakul received B.Eng. degree from Suranaree University of Technology, Thailand, in 1997 and M.Eng. degrees from Chulalongkorn University, Thailand in 1999. She has joined Suranaree University of Technology since 1999. During 2003-2007, she studied PhD at University of Queensland, Australia, in the area of smart antenna especially wideband beam forming. She currently works as Assistant Professor in school of Telecommunication Engineering, Faculty of Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand. She wrote 1 book chapter entitled Wideband smart antenna avoiding tapped-delay lines and filters in Handbook on Advancements in Smart Antenna Technologies for Wireless Networks, Idea Group Publishing, USA, 2008 and she has published more than 50 refereed journal and conference papers. Her current research interests include antenna array processing, compact switched-beam antenna and body communications. Dr. Uthansakul received Young Scientist Contest 2nd Prize at 16th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications, Krakow, Poland, 22-24 May 2006.

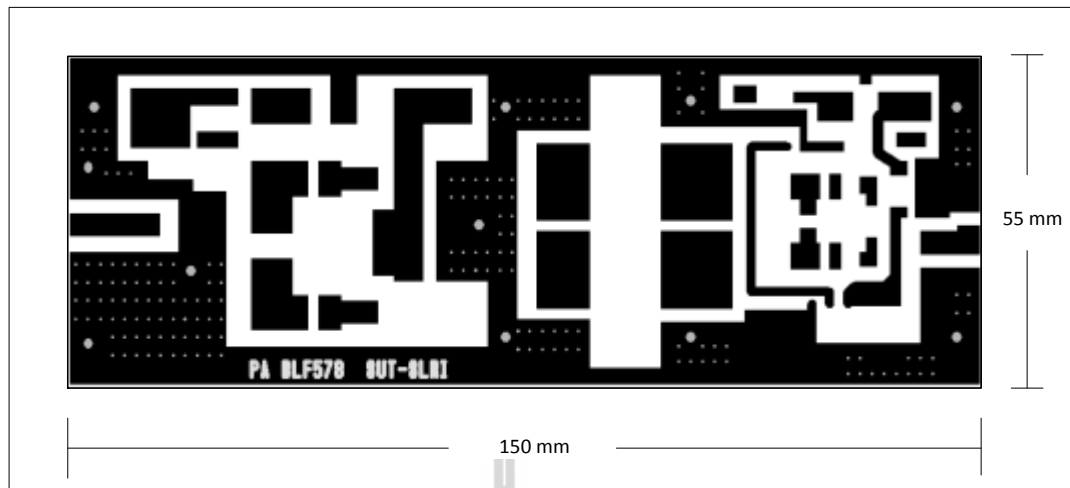


Sampart Chedket received PhD in Physics degrees from Suranaree University of Technology, Thailand in 2003. He currently works as Accelerator Physicist in Accelerator Technology Division, Synchrotron Light Research Institute, Thailand. His current research interests include RF application for particle acceleration, i.e. Solid State High Power Amplifier, RF Cavity and Low Level RF control system (LLRF).



ภาคผนวก ข

รายละเอียดวงจรมพิมพ์



รูปที่ ข.1 ลายวงจรถายสัญญาณคลาสเอบี ชนิดพุช-พูล ความถี่ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์





ภาคผนวก ค

รายละเอียดทางเทคนิคของชุดวงจรมายสัญญาณความถี่
118 เมกกะเฮิรตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรขับกำลังสัญญาณ

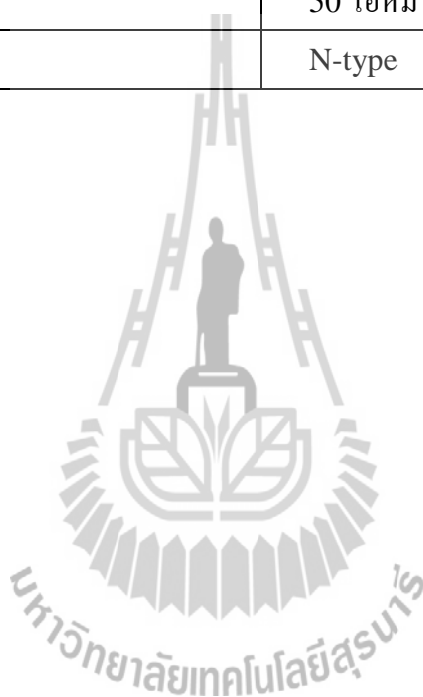
ความถี่	118 เมกกะเฮิร์ตซ์
แรงดันไบอัสวงจร	24 โวลต์
สัญญาณอินพุตสูงสุด	1 วัตต์
สัญญาณเอาต์พุตสูงสุด	30 วัตต์
อัตราขยายเฉลี่ย	13 dB
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	50%
อิมพีแดนซ์	50 โอห์ม
ขั้วต่อเชื่อม	N-type

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลทางเทคนิคของวงจรรขยายสัญญาณ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ ชุดเดียว

ความถี่	118 เมกกะเฮิร์ตซ์
แรงดันไบอัสวงจร	40 โวลต์
สัญญาณอินพุตสูงสุด	5 วัตต์
สัญญาณเอาต์พุตสูงสุด	524 วัตต์
อัตราขยายเฉลี่ย	21 dB
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	69%
อิมพีแดนซ์	50 โอห์ม
ขั้วต่อเชื่อม	N-type

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลทางเทคนิคของชุดวงจรขยายสัญญาณ 118 เมกกะเฮิร์ตซ์ ขนาด 1 กิโลวัตต์

ความถี่	118 เมกกะเฮิร์ตซ์
แรงดันไบอัสวงจร	40 โวลต์
สัญญาณอินพุตสูงสุด	11 วัตต์
สัญญาณเอาต์พุตสูงสุด	1050 วัตต์
อัตราขยายเฉลี่ย	22.43 dB
ประสิทธิภาพเฉลี่ย	71 %
อิมพีแดนซ์	50 โอห์ม
ขั้วต่อเชื่อม	N-type



ประวัติผู้เขียน

นายสุทธิพงษ์ โกพล เกิดเมื่อวันที่ 8 เมษายน 2531 ที่อำเภอปลาปาก จังหวัดนครพนม ปัจจุบันอาศัยอยู่บ้านเลขที่ 34 หมู่ที่ 8 หมู่บ้านหนองบัว ตำบลปลาปาก อำเภอปลาปาก จังหวัดนครพนม สำเร็จการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลนครพนม สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาที่โรงเรียนปิยะมหาราชาลัย จังหวัดนครพนม ในปีการศึกษา 2548 แล้วเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาตรีที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา ในสำนักวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีเมื่อวันที่ 28 ธันวาคม 2552 และได้ศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาจากสถาบันวิจัยแสงซินโครตรอน (องค์การมหาชน) ในขณะที่ศึกษาในระดับปริญญาโท ได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในปี 2554 ในระดับชาติ 1 ฉบับในการประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยบูรพา ครั้งที่ 1 ในหัวข้อ “การพัฒนาวงจรขยายกำลังคลาสเอบีชนิดpush – pull โดยใช้วงจรคอมโพเนนต์บาลูนและเทคนิคอินเวิร์ตโคเฮอร์ตีร่วมกับเทคนิคการป้อนกลับแบบลบ” ณ จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย และในปีเดียวกันได้มีผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์ในระดับนานาชาติ 1 ฉบับ คือ ในงานประชุมวิชาการ The 2011 International Conference on Communication Engineering and Networks (ICCEN 2011) ในหัวข้อ “Efficiency Improvement of Power Amplifier Class AB Push-Pull using Invert Doherty Combined with Negative Feedback” ระหว่างวันที่ 25-27 พฤศจิกายน 2554, Hong Kong. และได้รับการตีพิมพ์วารสารทางวิชาการระดับนานาชาติที่ International Journal of Modeling and Optimization, Vol. 1, No.5 ในหัวข้อ “Performance Enhancement of Power Amplifier Class AB Push-Pull Using Component Balun and Invert Doherty Combined with Negative Feedback” ฉบับเดือนธันวาคม 2554