

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การจำลองการทำงานวงจรกรองความถี่กลางสำหรับบลูทูธและไวร์เลสแลน
SIMULATION OF INTEGRATED IF FILTER FOR BLUETOOTH
AND WIRELESS LAN



เลขหมู่.....**73165**
เลขทะเบียน.....
วัน,เดือน,ปี. - 6 ก.ค. 2550

b. 11786267
i.

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการทำงานวงจรกรองความถี่กลางสำหรับบลูทูธและไวร์เลสแลน
SIMULATION OF INTEGRATED IF FILTER FOR BLUETOOTH
AND WIRELESS LAN



ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การจำลองการทำงานวงจรกรองความถี่กลางสำหรับบูลทูธและไวร์เลสแลน

ผู้จัดทำ

1. นายชยกฤต เรืองรังษี
2. นางสาวชนภรณ์ บุญชม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การจำลองการทำงานวงจรรองความถี่กลางสำหรับบลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย

ชยกฤต เรืองรังษี

ธนภรณ์ บุญชม

ศ.ดร.วัลลภ สุระกำพลธร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

บทคัดย่อ

โปรเจกต์นี้ได้ศึกษาเกี่ยวกับวงจรรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงที่สามารถปรับค่าได้ สำหรับโครงสร้างเครื่องรับวิทยุยุคใหม่ที่ประมวลผลสัญญาณในแบบเชิงเลขตั้งแต่ช่วงความถี่กลาง ซึ่งได้ทำการออกแบบให้ครอบคลุมมาตรฐานการสื่อสารไร้สายสองมาตรฐาน คือ บลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย เนื่องจากทั้งสองมาตรฐานนี้ทำงานอยู่บนช่วงความถี่เดียวกัน การรวมวงจรภาครับของทั้งสองมาตรฐานเข้าด้วยกันโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม จะช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้มาก แต่เนื่องจากช่องสัญญาณของทั้งสองมาตรฐานแตกต่างกันมาก (บลูทูธ: 1 เมกะเฮิรตซ์, เครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย: 11 เมกะเฮิรตซ์) จึงนับเป็นสิ่งที่ท้าทายในการออกแบบเช่นกัน

หลักการพื้นฐานที่ใช้สำหรับวงจรรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง คือ การนำวงจรรองความถี่สูงผ่านมาอนุกรมกับวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน โดยปรับอุปกรณ์บางชิ้นในส่วนของวงจรรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อเปลี่ยนความกว้างช่องสัญญาณให้เหมาะสมกับมาตรฐานทั้งสอง และผลจากการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรมพีเอสไปซ์ ได้แสดงให้เห็นว่าสอดคล้องเป็นไปตามทฤษฎี

**SIMULATION OF INTEGRATED IF FILTER FOR BLUETOOTH
AND WIRELESS LAN**

Chayakrit Raungrangsi

Thanaporn BoonChom

Prof.Dr.Wanlop Surakumpontorn Adviser

Academic Year 2005

Abstract

This project studies about the adjustable band-pass IF filter for digital-IF structure receiver, which can handle two modern wireless communication standards, that are Bluetooth and Wireless LAN. Since these two standards are laid on the same frequency band, integrating them together with no-cost is an economical interest. Furthermore, their extreme difference on channel bandwidth i.e. Bluetooth is 1 MHz and Wireless LAN is 11 MHz, is also challenging for implementing them in the same circuit.

The topology of filter is based on the series of a high-pass filter and a low-pass filter. By adjusting a few components in low-pass filter, we will obtain a tunable band-pass filter that can handle Bluetooth & Wireless LAN standards. Simulation results under Pspice circuit simulation show the performance well agree with the theory

สารบัญ

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 เทคโนโลยีไร้สาย	
2.1 บลูทูธ	2
2.1.1 การเปลี่ยนความถี่	2
2.1.2 การทำงานของบลูทูธ	3
2.1.3 ประโยชน์ของบลูทูธ	4
2.1.4 บลูทูธในอนาคต	5
2.2 เครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย	6
2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE802.11	6
2.2.2 วิวัฒนาการของมาตรฐาน IEEE802.11	7
บทที่ 3 สถาปัตยกรรมเครื่องรับ	
3.1 โครงสร้างของเครื่องรับ	10
3.1.1 วงจรขยายสัญญาณ สัญญาณรบกวนต่ำ	10
3.1.2 วงจรสังเคราะห์ความถี่	10
3.1.3 วงจรมิกเซอร์	10
3.1.4 วงจรกรองความถี่กลางผ่าน	11
3.1.5 วงจรกรองความถี่กลางผ่าน	11
3.2 เครื่องรับแบบซูเปอร์เฮตเทอร์โรไดน์	11
3.3 เครื่องรับแบบโฮโมไดน์	12
3.4 เครื่องรับแบบประมวลผลสัญญาณในแบบเชิงเลข ตั้งแต่ช่วงความถี่กลาง	12
บทที่ 4 วงจรกรองความถี่	
4.1 วงจรกรองความถี่หรือวงจรฟิลเตอร์	13
4.2 สมการการประมาณค่า	15
4.2.1 Butterworth filter	17
4.2.2 Chebyshev filter	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3	Elliptic filter	20
4.3	การออกแบบวงจรกรองแบบแอกทีฟ	22
4.3.1	ไบควอด	22
4.3.2	การแปลงเนตเวิร์คพาสซีฟแอลซีแอดเดอ์	22
4.3.3	การแทนค่าอุปกรณ์	22
4.3.4	การแทนค่าด้วยบล็อกไดอะแกรม	23
4.4	การแปลงวงจรพาสซีฟ LC ให้เป็นแอกทีฟ	23
4.4.1	Gyrator Technique	23
-	การออกแบบวงจร Gyrator สามารถทำได้โดยวิธีของ Riordan	24
-	การสร้างค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัว	25
4.4.2	GIC (General Impedance Converter)	26
4.4.3	Bruton's FDNR Technique	27
บทที่ 5	ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	
5.1	ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	30
5.2	ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสในอุดมคติ	30
5.3	โครงสร้างของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	31
5.4	การป้อนกลับ	32
5.4.1	วงจรมายป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสที่ใช้ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	32
5.4.2	วงจรมายป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	33
5.4.3	วงจรมายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	34
5.4.4	วงจรมายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	35
5.4.5	ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันวงจรเปิด	36
5.4.6	วงจรเปิดออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	37
5.5	การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสกับออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	38
5.5.1	ข้อดีของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	38
5.5.2	ข้อดีของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	38
5.5.3	เสถียรภาพของวงจรที่ใช้ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6 การออกแบบวงจรรองความถี่	
6.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรรองความถี่	41
6.2 ข้อกำหนดของมาตรฐานบลูทูธ	42
6.3 ข้อกำหนดของมาตรฐานไวร์เลสแลน	42
6.4 ขั้นตอนในการออกแบบวงจรพาสซีฟแบบกรองความถี่สูง	43
6.5 ขั้นตอนในการออกแบบวงจรพาสซีฟแบบกรองความถี่ต่ำ	43
6.6 ขั้นตอนการแปลงวงจรกรองแบบพาสซีฟเป็นแอกทีฟ	45

บทที่ 7 การจำลองการทำงาน	
7.1 ผลการจำลองการทำงาน	49
7.2 รูป	56
บทที่ 8 บทสรุป	
8.1 บทสรุปและวิจารณ์	57



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
บทที่ 2 เทคโนโลยีไร้สาย	
รูปที่ 2.1 การใช้บลูทูธติดต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์	4
รูปที่ 2.2 ชุดหูฟัง บลูทูธ	6
บทที่ 3 สถาปัตยกรรมของเครื่องรับ	
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานอย่างง่ายของวงจรเครื่องรับ	10
บทที่ 4 วงจรกรองความถี่	
รูปที่ 4.1 การตอบสนองความถี่ของวงจรฟิลเตอร์ชนิดต่าง ๆ	14
รูปที่ 4.2 การลดทอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	15
รูปที่ 4.3 การลดทอนของวงจรกรองความถี่สูง	16
รูปที่ 4.4 การลดทอนของวงจรกรองผ่านเฉพาะช่วง	16
รูปที่ 4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเตอร์เวิร์ทอันดับ 4	18
รูปที่ 4.6 แสดงการกระเพื่อมของช่วงความถี่ผ่านของเชบีเชฟ	19
รูปที่ 4.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเอลลิปติกอันดับ 2	21
รูปที่ 4.8 Gyator	23
รูปที่ 4.9 Riordan gyator	24
รูปที่ 4.10 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน	25
รูปที่ 4.11 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนแบบแอกทีฟ	26
รูปที่ 4.12 GIC อิมพีแดนซ์เมื่อมองเข้าไปที่พอร์ต 1	26
รูปที่ 4.13 เนตเวิร์กฟังก์ชันเริ่มต้น	27
รูปที่ 4.14 เนตเวิร์กฟังก์ชันที่ถูกสเกลด้วยค่า α	28
รูปที่ 4.15 รูปการแปลงแบบ FDNR	28
รูปที่ 4.16 รูปสัญลักษณ์ของ FDNR	29
รูปที่ 4.17 วงจร FDNR (Grounded)	29
บทที่ 5 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	
รูปที่ 5.1 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสในอุดมคติ	31
รูปที่ 5.2 แบบจำลองของออปแอมป์ป้อนกลับโดยกระแส	31
รูปที่ 5.3 วงจรขยายป้อนกลับไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์ แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.4	วงจรถยายป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์ แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	33
รูปที่ 5.5	วงจรถยายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์ แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส	34
รูปที่ 5.6	วงจรถยายป้อนกลับกลับเฟสแบบออปแอมป์ แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	35
รูปที่ 5.7	ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันวงจรถวาย	36
รูปที่ 5.8	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์กับอัตราขยาย ของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน	37
รูปที่ 5.9	ออปแอมป์ป้อนกลับโดยใช้กระแสวงจรถวาย	37
รูปที่ 5.10	เสถียรภาพของระบบ	38
รูปที่ 5.11	วงจรถยายป้อนกลับโดยใช้กระแส	39
บทที่ 6	การออกแบบวงจรถวายความถี่	
รูปที่ 6.1	ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ	41
รูปที่ 6.2	วงจรถวายความถี่สูงผ่าน	43
รูปที่ 6.3	วงจรถวายความถี่ต่ำผ่าน	44
รูปที่ 6.4	วงจรถวายความถี่ผ่านเฉพาะช่วง	44
รูปที่ 6.5	วงจรถวายความถี่สูงผ่านแบบแอกทีฟ	45
รูปที่ 6.6	วงจรถวายความถี่ต่ำผ่านแบบแอกทีฟ	46
รูปที่ 6.7	วงจรถยายแบบกลับเฟส	46
รูปที่ 6.8	วงจรถยายความถี่ต่าง	47
รูปที่ 6.9	วงจรถวายความถี่ต่ำผ่านแบบไบควอด	47
รูปที่ 6.10	วงจรถวายความถี่สูงผ่านโดยใช้วงจรถยายความถี่ต่าง ร่วมกับวงจรถวายความถี่ต่ำผ่าน	47
รูปที่ 6.11	กราฟแสดงการทำงานของวงจรถวายความถี่สูงผ่าน โดยประยุกต์ใช้วงจรถยายความถี่ต่างและวงจรถวายความถี่ต่ำผ่าน	48
บทที่ 7	การจำลองการทำงาน	
รูปที่ 7.1	ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรถวายความถี่ผ่านเฉพาะช่วง ตามมาตรฐานบลูทูธ โดยการใช้ออปแอมป์แบบอุมคคิ	49
รูปที่ 7.2	ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรถวายความถี่ผ่านเฉพาะช่วง ตามมาตรฐานบลูทูธ โดยการใช้ออปแอมป์ AD844	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.3	ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานบลูทูธ โดยการใช้อปแอมป์ MAX4226	50
รูปที่ 7.4	ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย โดยการใช้อปแอมป์แบบอุมคคิ	51
รูปที่ 7.5	ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สายโดยการใช้อปแอมป์ AD844	52
รูปที่ 7.6	ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สายโดยการใช้อปแอมป์ MAX4226	52
รูปที่ 7.7	วงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้วงจรขยายความต่างร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	53
รูปที่ 7.8	กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยประยุกต์ใช้วงจรขยายความต่างและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	53
รูปที่ 7.9	กราฟแสดงการตอบสนองความถี่โดยที่อัตราขยายของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเท่ากับ 1	54
รูปที่ 7.10	กราฟแสดงการตอบสนองความถี่โดยที่อัตราขยายของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเท่ากับ 0.8	54
รูปที่ 7.11	ทดสอบความเพี้ยนในช่วงความถี่ผ่าน โดยให้อินพุทด้วยสัญญาณความถี่ 5 เมกกะเฮิรตซ์และ 5.5 เมกกะเฮิรตซ์	55
รูปที่ 7.12	กราฟแสดงจุดตัดอันดับที่ 3 (IP3)	55

บทที่ 1

บทนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีการสื่อสารแบบไร้สายได้เข้ามามีบทบาท และเข้ามาแทนที่การสื่อสารที่ต้องอาศัยสายเคเบิลเป็นหลัก ดังนั้นอุปกรณ์สื่อสารทางอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถถือเคลื่อนที่ได้ (Portable) ไม่ว่าจะเป็นโทรศัพท์เคลื่อนที่หรือคอมพิวเตอร์ ตลอดจนระบบเครือข่าย ล้วนแล้วแต่เป็นพัฒนาการของเทคโนโลยีสมัยใหม่ซึ่งเน้นที่ความสะดวกสบาย เทคโนโลยีบลูทูธ (Bluetooth) และเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย (Wireless LAN, WLAN) ได้เกิดขึ้นเพื่อต้องการที่จะหลีกเลี่ยงการใช้สายเคเบิล เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ให้น้อยที่สุด

เนื่องจากบลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย มีการทำงานบนช่วงความถี่เดียวกัน แต่แตกต่างกันในส่วนความกว้างของช่องสัญญาณ (Channel) และการเข้ารหัสสัญญาณ (Modulation) จึงมีความเป็นไปได้ที่จะรวมเทคโนโลยีทั้งสองเข้าไว้ด้วยกันโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นหรืออาจเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ซึ่งจะเกิดประโยชน์มากในการผลิตเพื่อการค้า

สำหรับวงจรในภาครับ (Receiver) ยุคใหม่จะประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายส่วน หนึ่งในนั้นคือ วงจรกรองสัญญาณช่วงความถี่กลาง (IF Filter) ซึ่งทำหน้าที่ลดทอนสัญญาณที่ไม่ต้องการ ก่อนที่ส่งต่อไปยังวงจรแปลงสัญญาณอุปมานเป็นสัญญาณเชิงเลข (A/D Converter) เพื่อลดความซับซ้อนและกำลังงานที่ต้องสูญเสียในส่วนของวงจรแปลงสัญญาณ ส่งผลให้ระบบรวมมีขนาดเล็กและกินกำลังงานต่ำ โดยโครงงานนี้ได้ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง (Band Pass Filter) ที่สามารถปรับความกว้างของแบนด์วิดท์ได้ จากการนำเอาวงจรกรองความถี่สูงผ่าน (High Pass Filter) และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) มาต่อкасцепกัน โดยปรับแบนด์วิดท์ได้จากการเปลี่ยนค่าอุปกรณ์ในส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเพื่อเลื่อนช่วงความถี่คัทออฟ (Cut Off Frequency) ออกไป

ในโครงงานนี้ได้มุ่งเน้นการพัฒนาเทคนิคสำหรับเทคโนโลยีวงจรรวม (Integrated Circuit) ซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี แต่เนื่องจากมูลค่าในการผลิตวงจรรวมต้นแบบจริงนั้นสูงมาก จึงจำเป็นต้องเลือกเทคนิคที่สามารถสร้างวงจรต้นแบบบนแผ่นลายวงจรพิมพ์ (Print Circuit Board: PCB) โดยมุ่งเน้นไปที่การหลีกเลี่ยงการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductor) และใช้จำนวนอุปกรณ์ในวงจรให้น้อยที่สุด ในขั้นตอนการทำงานนั้นได้ออกแบบค่าคุณลักษณะต่างๆ ตามมาตรฐานของบลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย เช่น ค่าแบนด์วิดท์ ค่าการลดทอนต่างๆ (Attenuation) แล้วทำการหาสมการประมาณค่าของฟังก์ชันถ่ายโอน ของทั้งสองมาตรฐานโดยใช้การประมาณค่าแบบเอลลิปติก (Elliptic) จากนั้นจึงออกแบบวงจรกรองต้นแบบพาสซีฟแอคทีฟแลดเดอร์ (Passive LC Ladder Circuit) แล้วจึงแปลงเป็นวงจรกรองแบบแอคทีฟ (Active Filter Circuit) โดยใช้เทคนิคจีไอซี (GIC: General Impedance Converter) และเฟดตีเอ็นอาร์ (FDNR: Frequency-Dependent Negative Resistor) เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้ขดลวดเหนี่ยวนำ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เทคโนโลยีไร้สาย

เทคโนโลยีไร้สายได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อหลีกเลี่ยงการใช้สายเคเบิลในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เช่น โทรศัพท์เคลื่อนที่กับชุดหูฟัง โทรศัพท์เคลื่อนที่กับคอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์กับระบบเครือข่าย เป็นต้น เทคโนโลยีการเชื่อมต่อไร้สายที่ได้รับการพัฒนาและยอมรับกันทั่วโลกในปัจจุบัน คือ บลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย

2.1 เทคโนโลยีบลูทูธ IEEE 802.15

บลูทูธได้ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้กับอุปกรณ์ไร้สายขนาดเล็ก และใช้ในระยะทางไม่ไกลมากนักคือประมาณ 10 เมตร เนื่องจากใช้พลังงานจากแบตเตอรี่จึงต้องออกแบบให้ใช้พลังงานต่ำ บลูทูธตามมาตรฐาน IEEE 802.15 ใช้ย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่ที่สามารถใช้งานได้ทั่วโลกโดยไม่ต้องขออนุญาต ซึ่งได้แบ่งเพื่อใช้กับงานด้านอุตสาหกรรมวิทยาศาสตร์และการแพทย์ (Industrial scientific and medical band: ISM Band) ถึงแม้ว่ามีผู้ใช้งานในย่านความถี่เดียวกันนี้เป็นจำนวนมาก แต่เทคโนโลยีบลูทูธ มีคุณสมบัติเด่นในด้านการทนต่อสัญญาณรบกวน แต่ละช่องสัญญาณของบลูทูธ จะมีขนาด 1 เมกกะเฮิร์ตซ์ การเข้ารหัสสัญญาณของ บลูทูธ ใช้การเข้ารหัสสัญญาณดิจิทัลแบบเกาส์ (Gaussian frequency shift keying : GFSK) ด้วยอัตราเร็ว 1 เมกกะบิตต่อวินาที และเมื่อทำการส่งแพ็คเกจแล้วทั้งอุปกรณ์รับและส่งจะทำการเปลี่ยนความถี่ที่ใช้งานใหม่ให้ตรงกันใหม่อีกครั้ง หรือการเปลี่ยนจากช่องสัญญาณหนึ่งไปยังอีกช่องสัญญาณหนึ่ง ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่าการเข้ารหัสสัญญาณสเปกตรัมแผ่แบบเปลี่ยนความถี่ (Frequency hopping spread spectrum : FHSS) ด้วยวิธีการนี้จะทำให้อุปกรณ์บลูทูธ เมื่อมีการส่งแพ็คเกจใหม่บลูทูธก็จะทำการส่งแพ็คเกจไปที่ช่องสัญญาณอื่น ซึ่งความน่าจะเป็นที่จะมีการรบกวนอยู่ที่ระดับต่ำและทำให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นน้อยลง ในแต่ละช่องเวลา (Time slot) ของ บลูทูธ ใช้เวลา 625 ไมโครวินาที และในแต่ละแพ็คเกจจะทำการเปลี่ยนความถี่ (Hopping) 1 ครั้ง

2.1.1 การเปลี่ยนความถี่

เนื่องจากแถบความถี่ ISM มีการเปิดกว้างให้ใช้ได้ทั่วไปทำให้มีสัญญาณแทรกแซงรบกวนเกิดขึ้นได้มากมาย ซึ่งมาจากหลายสาเหตุ เช่น โทรศัพท์ไร้สาย เตาอบไมโครเวฟ เป็นต้น สัญญาณแทรกแซงนี้สามารถถูกหลีกเลี่ยงได้ด้วยวิธีการแบบอะแดปทีฟ (Adaptive) ซึ่งจะค้นหาบริเวณของ ความถี่ที่ไม่มีการใช้งาน หรือจะใช้วิธีการของการแผ่สเปกตรัม ช่วยในการจัดสัญญาณแทรกแซง ในสหรัฐอเมริกา ได้มีการกำหนดว่า คลื่นวิทยุที่ใช้งานย่านความถี่ ISM 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ จะต้องใช้เทคนิค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นตามการดำเนินงานใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การแผ่สเปกตรัม ถ้าหากว่าระดับกำลังส่งสัญญาณมีค่าเกินกว่า 0dB เทคโนโลยีการส่งคลื่นวิทยุของ บลูทูธ นั้น จะใช้การแผ่สเปกตรัมแบบการเปลี่ยนความถี่ เพราะว่าเทคนิคนี้เหมาะสมที่จะใช้กับการส่งคลื่นวิทยุที่มีกำลังส่งต่ำราคาถูก การเปลี่ยนความถี่จะแบ่งความถี่ออกเป็นหลายช่องความถี่ขนาดเล็ก ซึ่งในระหว่างที่มีการเชื่อมโยงสัญญาณเกิดขึ้น อุปกรณ์รับส่งคลื่นวิทยุก็จะมีการเปลี่ยนช่องความถี่ใช้งานในลักษณะที่ไม่แน่นอน ที่เรียกว่า การจุ่มเทียม (Pseudo-random) ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงสัญญาณรบกวนที่เข้ามาแทรกแซงได้ แต่ในบางโอกาสเมื่อไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ การแก้ไขบิตที่ผิดพลาดของสัญญาณ ก็จะช่วยให้การรับสัญญาณดีขึ้น

2.1.2 การทำงานของ บลูทูธ

บลูทูธ จะใช้สัญญาณวิทยุความถี่สูง 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ แต่จำนวนช่องสัญญาณจะแตกต่างกันไปตามแต่ละประเทศ อย่างในแถบยุโรปและอเมริกาจะใช้ช่วง 2.400 ถึง 2.4835 กิกะเฮิร์ตซ์ แบ่งออกเป็น 79 ช่องสัญญาณและจะใช้ช่องสัญญาณที่แบ่งนี้ เพื่อส่งข้อมูลสลับช่องไปมา 1,600 ครั้งต่อ 1 วินาที ส่วนที่ญี่ปุ่นจะใช้ความถี่ 2.4465 ถึง 2.4835 กิกะเฮิร์ตซ์ แบ่งออกเป็น 23 ช่อง (ดังตารางที่ 2.1) ระยะการทำงานของ บลูทูธ จะอยู่ที่ 5-10 เมตร โดยมีระบบป้องกันโดยใช้การเข้ารหัสก่อนการเชื่อมต่อ และป้องกันการดักสัญญาณระหว่างสื่อสาร โดยระบบจะสลับช่องสัญญาณไปมา จะมีความสามารถในการเลือกเปลี่ยนความถี่ที่ใช้ในการติดต่อเองอัตโนมัติ โดยที่ไม่จำเป็นต้องเรียงตามหมายเลขช่อง ทำให้การดักฟังหรือลักลอบขโมยข้อมูลทำได้ยากขึ้น

ตารางที่ 2.1 ย่านความถี่ไอเอสเอ็ม

พื้นที่	ย่านความถี่ ISM	ช่องรับสัญญาณ
ฝรั่งเศส ประเทศอื่นๆ	2.4465-2.4835 กิกะเฮิร์ตซ์	23
(ญี่ปุ่น สหรัฐอเมริกา และยุโรป)	2.4000-2.4835 กิกะเฮิร์ตซ์	79

โดยหลักของ บลูทูธ จะถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็ก เนื่องจากใช้การขนส่งข้อมูลในจำนวนที่ไม่มาก อย่างเช่น ไฟล์ภาพ, เสียง, แอปพลิเคชันต่างๆ และสามารถเคลื่อนย้ายได้ง่ายขอให้อยู่ในระยะที่กำหนดไว้เท่านั้น (ประมาณ 5-10 เมตร) นอกจากนี้ยังใช้พลังงานต่ำและสามารถใช้งานได้นาน โดยไม่ต้องนำไปชาร์จไฟบ่อยๆ ด้วย

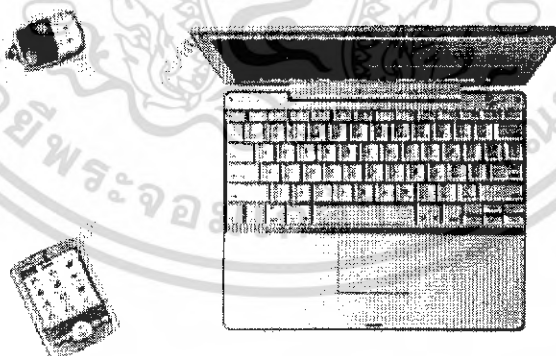
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนความสามารถการส่งถ่ายข้อมูลของ บลูทูธ จะอยู่ที่ 1 เมกะบิตต่อวินาทีซึ่งคงจะไม่มีปัญหาอะไรมากนักกับขนาดของไฟล์ที่ใช้กันบนโทรศัพท์เคลื่อนที่ หรือ การใช้งานแบบทั่วไป แต่ถ้าเป็นข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ก็อาจจะช้าเกินไป โดยเฉพาะถ้าถูกนำไปเปรียบเทียบกับเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สายแล้ว ความสามารถของบลูทูธจะด้อยกว่าค่อนข้างมาก อีกทั้งในส่วนของเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ก็ยังมีระยะการรับ-ส่งที่ไกลกว่ามาก แต่ข้อได้เปรียบของ บลูทูธ จะอยู่ที่ขนาดที่เล็กกว่า การติดตั้งทำได้ง่าย ราคาถูกและที่สำคัญการใช้พลังงานก็น้อยกว่ามากคือ อยู่ที่ประมาณ 0.1 วัตต์ เนื่องจากบลูทูธ ใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็กซึ่งใช้พลังงานจากแบตเตอรี่

2.1.3 ประโยชน์ของ บลูทูธ

คอมพิวเตอร์ กับ โทรศัพท์เคลื่อนที่

หากเราต้องเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับอุปกรณ์ต่างๆ ไม่ว่าจะเป็น พรีนเตอร์ คีย์บอร์ด เม้าท์ หรือ ลำโพง การเชื่อมต่อในปัจจุบัน ส่วนใหญ่จะใช้สายเคเบิลเป็นตัวเชื่อมต่อทั้งหมด (Serial และ USB) ซึ่งอาจจะไม่สะดวกทั้งในด้านการใช้สอย เคลื่อนย้าย และความเรียบร้อยต่างๆ แต่หากเครื่อง PC มีอุปกรณ์บลูทูธก็จะสามารถติดต่อเข้าหากัน ได้โดยใช้คลื่นแทนการใช้สายไฟเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ทั้งหมด ทั้งการส่งไฟล์ภาพ, เสียง, ข้อมูล อีกทั้งระบบเชื่อมต่อผ่าน CSD และ GPRS บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ ก็สามารถทำได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้สาย ซึ่งจะช่วยลดความยุ่งยาก อีกทั้งยังเพิ่มความสะดวกสบายในการทำงานมากขึ้นด้วย



รูปที่ 2.1 การใช้บลูทูธติดต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

แต่ข้อจำกัดการใช้งานก็มีเช่นกัน การเชื่อมต่ออุปกรณ์พกพาต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก หรือ พ็อกเก็ตพีซี เข้ากับอินเทอร์เน็ต จะสามารถใช้งานได้เพียง 1 อุปกรณ์ ต่อ 1 ซีนเท่านั้น ซึ่งบางครั้ง อาจจะต้องสลับการใช้งานกันบ่อยๆ (สำหรับผู้ที่ใช้อุปกรณ์ไร้สายส่วนใหญ่) แต่ก็ถือว่าให้ความสะดวกมากกว่าการใช้สายเคเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โทรศัพท์เคลื่อนที่ กับ ชุดหูฟัง

ชุดหูฟัง (Smalltalk) เป็นอุปกรณ์โทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ผู้ใช้เกือบทุกคนต้องมี ซึ่งราคาในปัจจุบันนี้มีตั้งแต่ 30-300 บาท ในด้านการใช้งานบนเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ หากเป็นชุดหูฟังแบบมีสายข้อจำกัดจะอยู่ที่ เราไม่สามารถเคลื่อนตัวไปไหนได้ไกลกว่าที่สายจะยาวถึง แล้วก็ต้องคอยระวังสายไม่ให้ไปเกี่ยวกับสิ่งของต่างๆ ซึ่งบางครั้งอาจจะทำให้สายหลุดออกจากเครื่องด้วย แต่เมื่อนำ บลูทูธ มาแทนที่การใช้งาน ก็จะเพิ่มความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้มือทั้งสองข้างทำงานอย่างอื่นไปพร้อมๆ กันด้วย ทั้งในเวลาขับรถ (ซึ่งในขณะนี้ก็มีกฎหมายออกมาเกี่ยวกับการใช้โทรศัพท์เคลื่อนที่ในเวลาขับรถออกมาแล้ว) ขณะออกกำลังกาย หรือ ขณะปฏิบัติกิจต่างๆ ก็สามารถทำกิจกรรมได้อย่างสะดวก

จากประโยชน์ต่างๆ จะเห็นได้ว่าเทคโนโลยีบลูทูธสามารถนำมาใช้ให้เข้ากับชีวิตประจำวันได้เป็นอย่างดี และยังเพิ่มความความสะดวกสบายในการใช้งานกับอุปกรณ์ต่างๆ และนอกเหนือจากที่กล่าวไป บลูทูธ ยังถูกพัฒนามาใช้งานกับอุปกรณ์อื่นๆ อีกด้วย ทั้งหูฟังสเตอริโอ เครื่องเล่นซีดี รีโมทวิทยุ แม้กระทั่งในรถยนต์เป็นรีโมทเปิด-ปิดประตู หรือระบบรักษาความปลอดภัยแบบไม่ต้องใช้กุญแจ ทำให้เราไม่ต้องไขกุญแจอีกต่อไป เพียงแค่อยู่ในระยะการทำงาน ประตูก็จะเปิดล็อคให้ทันที ส่วนเวลาลงรถก็สามารถเดินออกจากรถได้เลย เมื่อการเชื่อมต่อระหว่างตัวรถกับกุญแจขาดจากกัน ก็จะล็อคให้เองอัตโนมัติ (รถบางรุ่นเริ่มมีใช้กันแล้วเช่น Mercedes-Benz SLR)

2.1.4 บลูทูธ ในอนาคต

ปัจจุบัน การแทนที่สายเคเบิลด้วย บลูทูธ อาจยังมีปัญหาอยู่บ้าง เช่น ในด้านของราคาที่สูงกว่าแบบใช้สายเคเบิลอยู่พอสมควร ดังนั้นหากอุปกรณ์ที่ใช้เทคโนโลยี บลูทูธ เหล่านี้ สามารถลดระดับราคา ลง เทคโนโลยี บลูทูธ ก็น่าจะถูกนำมาใช้แทนที่การติดต่อสื่อสารแบบที่ใช้สายได้อย่างแพร่หลายอย่างแน่นอน



รูปที่ 2.2 ชูคหูฟัง บลูทูธ

ในอนาคตอันใกล้ บลูทูธจะกลายเป็นระบบไร้สายมาตรฐานบนเครื่องโทรศัพท์เคลื่อนที่ คอมพิวเตอร์ พีดีเอ โน้ตบุ๊ก รวมไปถึงเครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆ และจะทำให้ตลาดการสื่อสารเปลี่ยนรูปแบบใหม่ มีการค้นคว้าวิจัยเพิ่มมากขึ้นในการพัฒนาสินค้า-บริการ รวมถึงการติดต่อสื่อสารที่สามารถทำได้ ความสะดวกและรวดเร็วขึ้น

2.2 เครื่องข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย

ปัจจุบันเทคโนโลยีเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เนื่องจากประโยชน์ของเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย มีอยู่มากมายโดยเฉพาะอย่างยิ่ง สามารถสร้างความสะดวกสบาย ความสะดวก ในการใช้งานและติดตั้งเครือข่าย ทำให้การเชื่อมต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในบ้านหรือสำนักงานเข้าด้วยกัน หรือต่อเข้ากับเครือข่ายไม่จำเป็นจะต้องใช้สายให้ยุ่งยาก และเกะกะอีกต่อไป อุปกรณ์คอมพิวเตอร์ทั้งแบบตั้งโต๊ะและพกพาสามารถเชื่อมต่อถึงกันหรือเชื่อมต่อเข้ากับเครือข่ายจากตำแหน่งต่างๆ อยู่ในรัศมีของสัญญาณได้อย่างอิสระ

2.2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE802.11 ซึ่งได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ.2540 โดย IEEE (The Institute of Electronics and Electrical Engineers) และเป็นเทคโนโลยีสำหรับเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมากที่สุด คือข้อกำหนด (Specification) สำหรับอุปกรณ์เครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ในส่วนของกายภาพ Physical (PHY) Layer และ Media Access Control (MAC) Layer โดยในส่วนของกายภาพ มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้อุปกรณ์มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1, 2, 5.5, 11 และ 54 เมกะบิตต่อวินาที โดยมีสื่อ 3 ประเภทให้เลือกใช้ได้แก่ คลื่นวิทยุที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่สาธารณะ 2.4 และ 5 กิกะเฮิร์ตซ์, และ อินฟราเรด (1 และ 2 เมกะบิตต่อวินาที เท่านั้น) สำหรับในส่วนของ MAC Layer มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้กำหนดให้มีกลไกการทำงานที่เรียกว่า CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance) ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับหลักการ CSMA/CD (Collision Detection) ของมาตรฐาน IEEE 802.3 Ethernet ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไปในเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบใช้สายนำสัญญาณ นอกจากนี้ในมาตรฐาน IEEE802.11 ยังกำหนดให้มีทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN โดยกลไกการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) และการตรวจสอบผู้ใช้ (Authentication) ที่มีชื่อเรียกว่า WEP (Wired Equivalent Privacy) ด้วย

2.2.2 วิวัฒนาการของมาตรฐาน IEEE 802.11

มาตรฐาน IEEE 802.11 ได้รับการตีพิมพ์ครั้งแรกในปี พ.ศ. 2540 ซึ่งอุปกรณ์ตามมาตรฐานดังกล่าวจะมีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็ว 1 และ 2 เมกะบิตต่อวินาที ด้วยสื่ออินฟราเรด (Infrared) หรือคลื่นวิทยุที่ความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ และมีกลไก WEP ซึ่งเป็นทางเลือกสำหรับสร้างความปลอดภัยให้กับเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากมาตรฐาน IEEE 802.11 เวอร์ชันแรกเริ่มมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำและไม่มีการรองรับหลักการ Quality of Service (QoS) ซึ่งเป็นที่ต้องการของตลาด อีกทั้งกลไกรักษาความปลอดภัยที่ใช้ยังมีช่องโหว่อยู่มาก IEEE จึงได้แบ่งมาตรฐานการทำงานขึ้นมาหลายชุดด้วยกัน เพื่อทำการปรับปรุงเพิ่มเติมมาตรฐานให้มีศักยภาพสูงขึ้น โดยมาตรฐานการทำงานกลุ่มที่มีผลงานที่น่าสนใจและเป็นที่รู้จักกันดีได้แก่ IEEE 802.11a, IEEE 802.11b, IEEE 802.11e, IEEE 802.11g, และ IEEE 802.11i

IEEE 802.11a

มาตรฐาน IEEE 802.11a ได้ตีพิมพ์มาตรฐานเพิ่มเติมนี้เมื่อปี พ.ศ. 2542 มาตรฐาน IEEE 802.11a ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 เมกะบิตต่อวินาที แต่จะใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นย่านความถี่สาธารณะสำหรับใช้งานในประเทศสหรัฐอเมริกาที่มีสัญญาณรบกวนจากอุปกรณ์อื่นน้อยกว่าในย่านความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ อย่างไรก็ตามข้อเสียหนึ่งของมาตรฐาน IEEE 802.11a ที่ใช้คลื่นวิทยุที่ความถี่ 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ก็คือในบางประเทศย่านความถี่ดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้งานได้อย่างสาธารณะ ตัวอย่างเช่น ประเทศไทยไม่อนุญาตให้มีการใช้งานอุปกรณ์ IEEE 802.11a เนื่องจากความถี่ย่าน 5 กิกะเฮิร์ตซ์ ได้ถูกจัดสรรสำหรับกิจการอื่นอยู่ก่อนแล้ว นอกจากนี้ข้อเสียอีกอย่างหนึ่งของอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ก็คือรัศมีของสัญญาณมีขนาดค่อนข้างสั้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ประมาณ 30 เมตร ซึ่งสั้นกว่ารัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ที่มีขนาดประมาณ 100 เมตร สำหรับการใช้งานภายในอาคาร) อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN ยังมีราคาสูงกว่า IEEE 802.11b WLAN ด้วย ดังนั้นอุปกรณ์ IEEE 802.11a WLAN จึงได้รับความนิยมน้อยกว่า IEEE 802.11b WLAN มาก

IEEE 802.11b

มาตรฐาน IEEE 802.11b ได้ประกาศมาตรฐานเพิ่มเติมเมื่อปี พ.ศ. 2542 ซึ่งเป็นที่รู้จักกันดีและใช้งานกันอย่างแพร่หลายมากที่สุด มาตรฐาน IEEE 802.11b ใช้เทคโนโลยีที่เรียกว่า CCK (Complimentary Code Keying) ผสมกับ DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) เพื่อปรับปรุงความสามารถของอุปกรณ์ให้รับส่งข้อมูลได้ด้วยความเร็วสูงสุดที่ 11 เมกะบิตต่อวินาที ผ่านคลื่นวิทยุความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ส่วนใหญ่แล้วอุปกรณ์เครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันจะเป็นอุปกรณ์ตามมาตรฐาน IEEE 802.11b นี้และใช้เครื่องหมายการค้าที่รู้จักกันในนาม Wi-Fi ซึ่งเครื่องหมายการค้าดังกล่าวถูกกำหนดขึ้นโดยสมาคม WECA (Wireless Ethernet Compatibility Alliance) โดยอุปกรณ์ที่ได้รับเครื่องหมายการค้าดังกล่าวได้ผ่านการตรวจสอบแล้วว่าเป็นไปตามมาตรฐาน IEEE 802.11b และสามารถนำไปใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ยี่ห้ออื่นๆที่ได้รับเครื่องหมาย Wi-Fi ได้

IEEE 802.11g

มาตรฐาน IEEE 802.11g ได้ใช้นาเทคโนโลยี OFDM มาประยุกต์ใช้ในช่องสัญญาณวิทยุความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN มีความสามารถในการรับส่งข้อมูลด้วยความเร็วสูงสุดที่ 54 เมกะบิตต่อวินาที ส่วนรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะอยู่ระหว่างรัศมีสัญญาณของอุปกรณ์ IEEE 802.11a และ IEEE 802.11b เนื่องจากความถี่ 2.4 กิกะเฮิร์ตซ์ เป็นย่านความถี่สาธารณะสากล อีกทั้งอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN สามารถทำงานร่วมกับอุปกรณ์ IEEE 802.11b WLAN ได้ (backward-compatible) ดังนั้นจึงมีแนวโน้มสูงกว่าอุปกรณ์ IEEE 802.11g WLAN จะได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายหากมีราคาไม่แพงจนเกินไปและน่าจะมาแทนที่ IEEE 802.11b ในที่สุด

IEEE 802.11e

มาตรฐานนี้ได้รับมอบหมายให้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 เพื่อให้สามารถรองรับการใช้งานหลักการ QoS สำหรับการใช้งานเกี่ยวกับมัลติมีเดีย (Multimedia) เนื่องจาก IEEE 802.11e เป็นการปรับปรุง MAC Layer ดังนั้นมาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

IEEE 802.11i

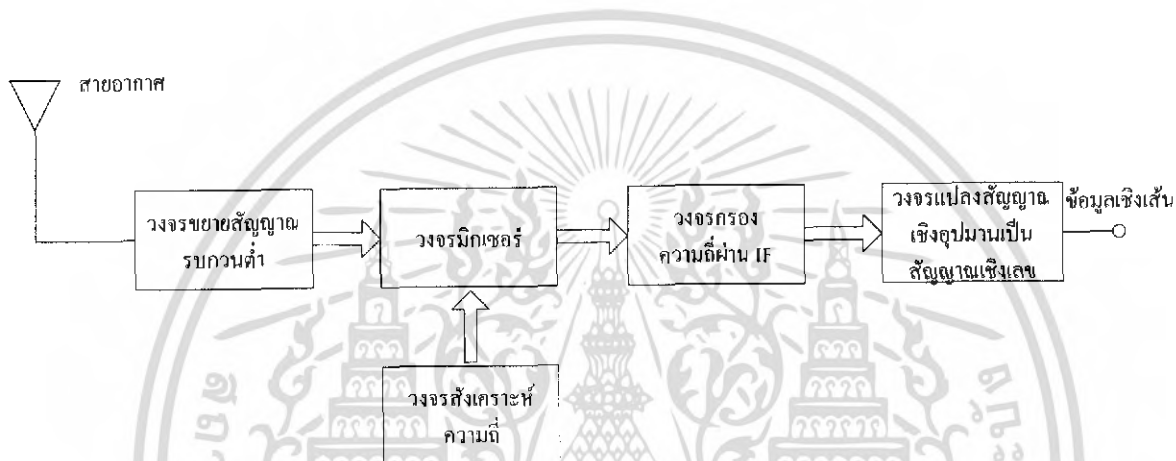
มาตรฐานนี้ได้ปรับปรุง MAC Layer ของ IEEE 802.11 ในด้านความปลอดภัย เนื่องจากเครือข่าย IEEE 802.11 WLAN มีช่องโหว่อยู่มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) ด้วย key ที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลง คณะทำงานชุด IEEE 802.11i จะนำเอาเทคนิคขั้นสูงมาใช้ในการเข้ารหัสข้อมูลด้วย key ที่มีการเปลี่ยนค่าอยู่เสมอและการตรวจสอบผู้ใช้ที่มีความปลอดภัยสูง มาตรฐานเพิ่มเติมนี้จึงสามารถนำไปใช้กับอุปกรณ์ IEEE 802.11 WLAN ทุกเวอร์ชันได้

บทที่ 3

สถาปัตยกรรมของเครื่องรับ

3.1 โครงสร้างของเครื่องรับ

ในการทำงานของเครื่องรับจะมีหลายขั้นตอนตั้งแต่ สายอากาศรับสัญญาณเข้าจนได้ข้อมูลที่ต้องการออกมาซึ่งในแต่ละขั้นตอนก็จะมีการทำงานที่แตกต่างกันออกไป โดยจะมีลำดับการทำงานดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการทำงานอย่างง่ายของวงจรเครื่องรับ

3.1.1 วงจรขยายสัญญาณ สัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise Amplifier)

ในการทำงานของวงจรส่วนจะเป็นการขยายสัญญาณที่ได้รับมาให้สัญญาณที่ต้องการให้มีขนาดใหญ่ขึ้นและกำจัดสัญญาณรบกวนออกไป เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีความถูกต้องสูงขึ้น

3.1.2 วงจรสังเคราะห์ความถี่

วงจรสังเคราะห์ความถี่ (Local Oscillator) เป็นวงจรที่สามารถปรับความถี่ได้ สร้างจากวีซีโอ (Voltage Control Oscillator: VCO) โดยอาศัยการปรับแรงดันเพื่อที่จะควบคุมให้ได้สัญญาณความถี่ที่ต้องการ และความถี่ที่ถูกสร้างโดยวงจรสังเคราะห์นี้จะถูกส่งไปเข้าวงจรมิกเซอร์เพื่อคูณกับสัญญาณที่ได้รับอีกที

3.1.3 วงจรมิกเซอร์

วงจรมิกเซอร์ (Mixer) เป็นวงจรที่สำคัญที่ใช้ทำหน้าที่ในการแปลงความถี่ของสัญญาณความถี่วิทยุที่มีความถี่สูงให้มีความถี่ลดลงเป็นความถี่กลางซึ่งเรียกว่าการแปลงความถี่ลง (down conversion) ซึ่งใช้ในระบบเครื่องรับหรือใช้ในการแปลงสัญญาณความถี่ต่ำ ให้เป็นสัญญาณความถี่สูงหรือการแปลง
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความถี่ขึ้น ซึ่งใช้ในระบบเครื่องส่ง การทำงานของวงจรมิกเซอร์สัญญาณข้อมูลกับสัญญาณความถี่สังเคราะห์ จะถูกผสมสัญญาณแบบไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งทำงานคล้ายกับวงจรมอดูเลเตอร์ เพียงแต่สัญญาณเอาต์พุตของวงจรมิกเซอร์ที่ได้ จะเป็นความถี่ผลต่างระหว่างความถี่ข้อมูลและความถี่สังเคราะห์ วงจรมิกเซอร์จะมีทั้งแบบแอกทิฟและแบบพาสซีฟ แบบแอกทิฟ จะมีข้อดีที่สามารถขยายสัญญาณไปในตัวด้วย แต่วงจรมิกเซอร์แบบพาสซีฟที่ สัญญาณเอาต์พุตจริงที่ได้จากวงจรมิกเซอร์จะเป็นความถี่แบบครอสโปรดัก ซึ่งจะมีค่าความสูญเสียสุทธิต่อสัญญาณหรือที่เรียกว่าความสูญเสียแปลงผัน (conversion loss) เพราะเกิดการเปลี่ยนแปลงความถี่ ในขณะที่เดียวกันแอมพลิจูดของสัญญาณความถี่กลางก็จะต่ำกว่าสัญญาณความถี่วิทยุ

3.1.4 วงจรกรองความถี่กลางผ่าน (IF Filter)

ในการสื่อสารเราจะทำการแบ่งช่วงสัญญาณออกเป็นช่องๆ เพื่อให้สามารถใช้งานพร้อมกันได้ ดังนั้นในการรับสัญญาณเราจึงต้องกรองเฉพาะช่องสัญญาณที่ต้องการไว้ ละกำจัดช่องสัญญาณข้างเคียงออกไป วงจรกรองความถี่กลางผ่าน (IF Filter) จะทำหน้าที่ในการเลือกช่องสัญญาณที่เราต้องการ โดยวงจรกรองความถี่กลางผ่านที่ดีจะต้องสามารถให้ข้อมูลในช่องสัญญาณที่เราต้องการผ่านไปทั้งหมด และกำจัดข้อมูลข้างเคียงได้หมด ถ้าวงจรกรองไม่มีประสิทธิภาพดีพอจะทำให้ภาคถัดไปไม่สามารถแปลงข้อมูลที่ได้รับ ไปได้ส่งผลให้เครื่องไม่สามารถทำงานได้

3.1.5 วงจรแปลงสัญญาณเชิงอุปมานเป็นสัญญาณเชิงเลข

วงจรแปลงสัญญาณเชิงอุปมานเป็นสัญญาณเชิงเลข (Analog to Digital converter) จะทำหน้าที่ในการแปลงข้อมูลซึ่งเป็นสัญญาณเชิงอุปมาน (Analog) ให้เป็นสัญญาณเชิงเลขใช้ในการทำงานต่อไป (Digital) จะมีอยู่ในเครื่องรับแบบดิจิทัล

3.2 เครื่องรับแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์

หลักการของซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ (Super Heterodyne) คือการนำสัญญาณข้อมูลมาคูณ กับสัญญาณที่ถูกสร้างขึ้นจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ (local oscillator) ผลลัพธ์ที่ได้นี้ทำให้เกิดช่วงความถี่ใหม่ เป็นผลต่างระหว่างความถี่พาหะและความถี่จากวงจรสังเคราะห์ความถี่ เรียกว่าความถี่กลาง (Intermediate Frequency: IF) จากหลักการนี้เราสามารถที่จะปรับความถี่ของเอาต์พุตได้โดยการ เปลี่ยนค่าความถี่ที่สร้างขึ้นจากวงจรสังเคราะห์ความถี่ที่จะนำมาคูณกับสัญญาณข้อมูล ทำให้ความถี่เอาต์พุตเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงแบนด์วิดท์ที่ต้องการ

3.3 เครื่องรับแบบโฮโมไดน์

หลักการของเครื่องรับแบบโฮโมไดน์ (Homodyne) คือการนำสัญญาณที่ได้รับมาทำการแปลงลงสู่ย่านความถี่พื้นฐาน (Base band) ตั้งแต่การแปลงครั้งแรกเลย เราจึงเรียกรูปแบบนี้ว่า โฮโมไดน์, การแปลงผันตรง (Direct Conversion) หรือการแปลงความถี่กลางให้เป็นศูนย์ (Zero-IF) ซึ่งจะใช้วงจรสังเคราะห์ความถี่ที่ผลิตความถี่เท่ากับความถี่ของคลื่นพาห้ ทำให้ในส่วนของวงจรกรองความถี่กลางจะใช้เป็นเพียงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านวงจรเดียว

จากโครงสร้างของโฮโมไดน์จะเห็นได้ว่าเป็นโครงสร้างที่ง่ายแต่ไม่ค่อยได้รับความนิยม เนื่องจากจะมีผลของแรงดันคงที่เข้ามาทับสัญญาณที่เราต้องการเนื่องจากความถี่กลาง(IF)อยู่ที่ศูนย์

3.4 เครื่องรับแบบประมวลผลสัญญาณในแบบเชิงเลขตั้งแต่ช่วงความถี่กลาง

เครื่องรับแบบประมวลผลสัญญาณในแบบเชิงเลขตั้งแต่ช่วงความถี่กลาง (Digital IF Filter) สัญญาณอินพุตถูกแปลงเป็นความถี่กลางโดยการรวมสัญญาณแบบดิจิทัล แล้วจึงนำสัญญาณมาเข้าวงจรแปลงสัญญาณเชิงอนุภาคเป็นสัญญาณเชิงเลข ข้อดีของการใช้เครื่องรับแบบประมวลผลสัญญาณในแบบเชิงเลข นั้นคือสามารถลดคสเปกของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงลงได้

บทที่ 4 วงจรกรองความถี่

4.1 วงจรกรองความถี่

วงจรกรองความถี่คือ วงจรที่ใช้สำหรับกรองสัญญาณให้ความถี่เฉพาะที่ต้องการให้ผ่านออกมาได้เท่านั้น ส่วนความถี่อื่นๆ ที่ไม่ต้องการให้ผ่านจะถูกลดทอน (Attenuate) จนหมดไป วงจรฟิลเตอร์ที่ใช้งานกันมีอยู่ 2 ลักษณะคือ แบบที่เป็นวงจรพาสซีฟ (Passive) และแบบแอคทีฟ (Active) วงจรในแบบที่เป็นพาสซีฟนั้น จะใช้เพียงอุปกรณ์ประเภทความต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น แต่ในวงจรประเภทแอคทีฟจะรวมถึงทรานซิสเตอร์ และออปแอมป์ด้วย

แบ่งตามผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ จะสามารถแบ่งออกเป็น 4 ชนิดด้วยกัน คือ แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass) แบบกรองความถี่สูงผ่าน (high-pass) แบบกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง (band-pass) และแบบกรองความถี่ไม่ผ่านเฉพาะช่วง (band-eliminate หรือ band-reject หรือ notch) ในรูปที่ 4.1 เป็นกราฟระหว่างแรงดันเอาต์พุตเปรียบเทียบกับความถี่ แสดงถึงช่วงตอบสนองทางความถี่ของวงจรฟิลเตอร์ทั้ง 4 แบบ

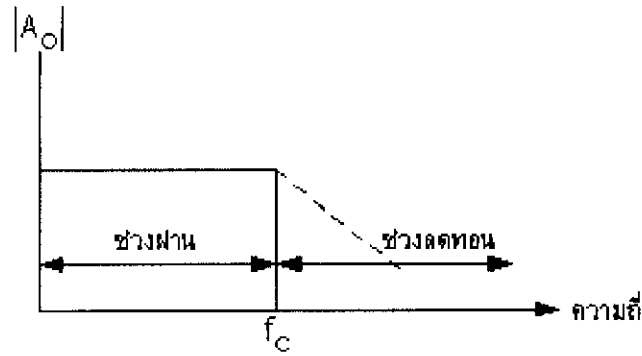
วงจรกรองแบบความถี่ต่ำจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ในช่วงตั้งแต่สัญญาณที่เป็นแรงดัน DC ไปจนถึง ความถี่คัตออฟ (cut-off frequency) แทนด้วยเครื่องหมาย f_c ความถี่คัตออฟคือความถี่ ณ ขณะที่อัตราขยายแรงดันของวงจรมีค่าลดลงเป็น 0.707 (-3 เดซิเบล) เท่าของอัตราขยายปกติบางครั้งอาจเรียกความถี่นี้ว่า ความถี่มุม (corner frequency) ถ้ามีความถี่ที่สูงเกิน f_c ผ่านวงจรจะลดทอนขนาดความถี่นั้นจนมีค่าน้อยมากๆ จากในรูปเส้นทึบแสดงถึงผลในทางอุดมคติ ส่วนเส้นประแสดงถึงผลของวงจรในทางความเป็นจริง ในช่วงที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เราเรียกว่า ช่วงผ่าน (pass band) และช่วงที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเรียกว่า ช่วงลดทอน(stop band) แสดงได้ในรูปที่ 4.1(ก)

วงจรกรองความถี่สูงผ่านจะทำการลดทอนสัญญาณในช่วงที่มีความถี่ต่ำ และยอมให้ผ่านได้เฉพาะสัญญาณในช่วงความถี่ที่สูงกว่าความถี่คัตออฟ f_c โดยในช่วงความถี่สูง ๆ นั้นจะมีอัตราขยายคงที่ แสดงในรูปที่ 4.1(ข)

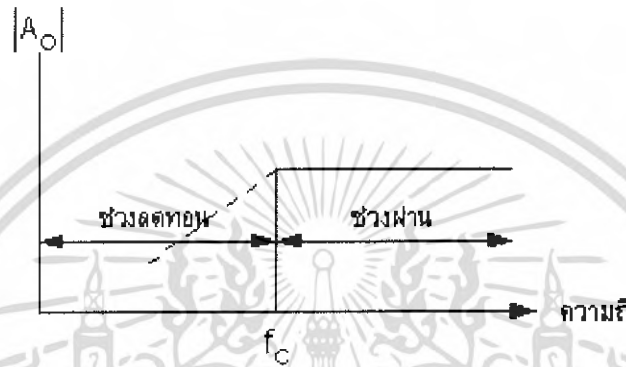
วงจรแบบที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เฉพาะช่วงจะยอมให้ความถี่ผ่านได้ ในบางช่วงเท่านั้นความถี่ที่นอกเหนือจากนั้นจะถูกลดทอนไป ดังแสดงในรูปที่ 4.1(ค)

วงจรแบบที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านเฉพาะช่วง วงจรแบบนี้มีความหมายในทิศทางตรงข้ามกับวงจรแบบที่ยอมให้ความถี่ผ่านได้เฉพาะช่วงคือ จำกัดไม่ให้สัญญาณผ่านได้ในบางช่วงของความถี่ ดังที่แสดงในรูปที่ 4.1(ง) เส้นกราฟที่แสดงทั้งหมดนั้น เส้นประแสดงถึงผลในทางความเป็นจริง ส่วนเส้นทึบแสดงถึงผลในทางอุดมคติ

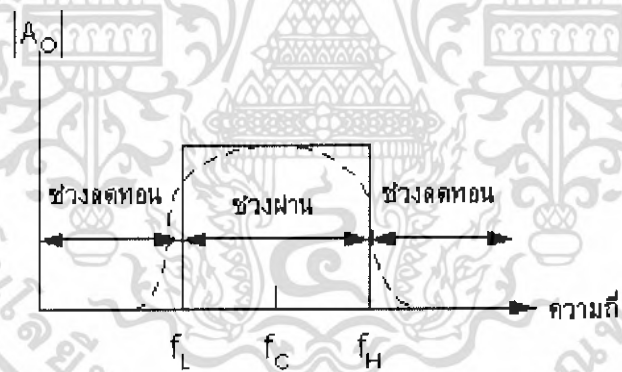
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



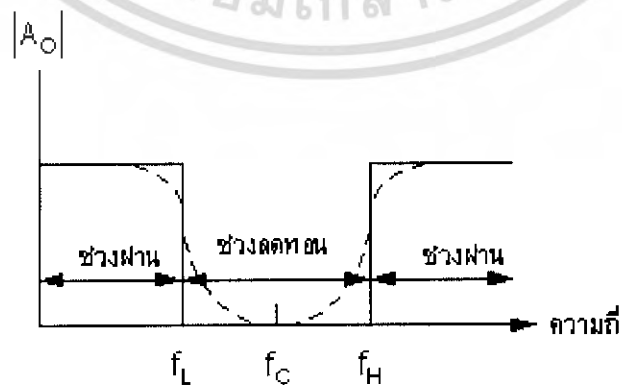
(ก) แบบกรองความถี่ต่ำผ่าน



(ข) แบบกรองความถี่สูงผ่าน



(ค) แบบกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง



(ง) แบบกรองความถี่ไม่ผ่านเฉพาะช่วง

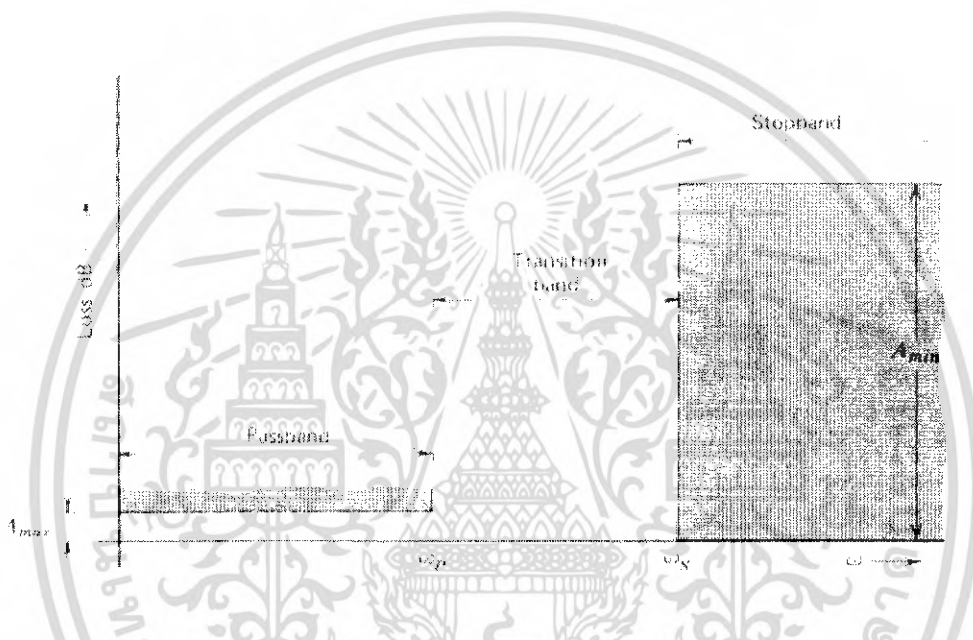
รูปที่ 4.1 การตอบสนองความถี่ของวงจรฟิลเตอร์ชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 สมการการประมาณค่า

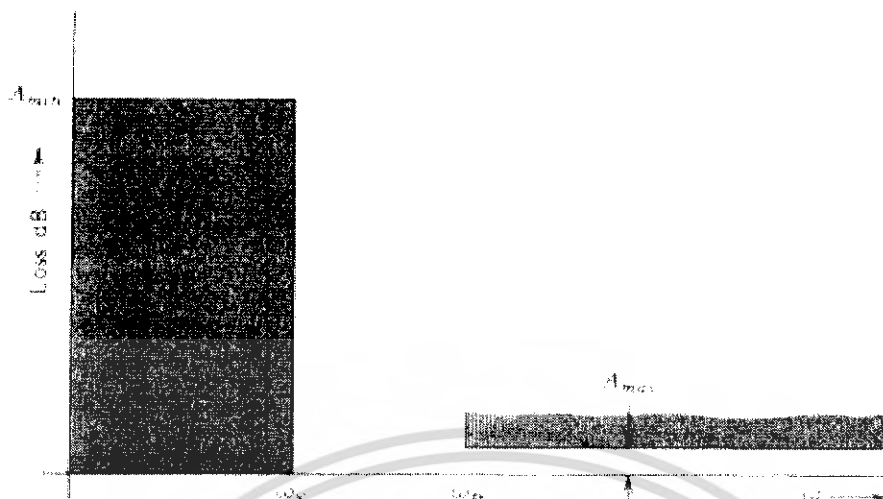
ในความเป็นจริงเราไม่สามารถสร้างวงจรกรองความถี่ในอุดมคติได้ จึงต้องใช้การประมาณค่า ในการสร้างวงจรกรองความถี่ให้ได้ตามคุณสมบัติที่ต้องการ

ขั้นตอนการประมาณค่าใช้พื้นฐานของ Bode plots และค่าการลดทอนในการหาอันดับ ซึ่งใน ที่นี้จะกล่าวถึงการประมาณค่าของแบบบัตเตอร์เวิร์ท เชบีเชฟและเอลลิปติก



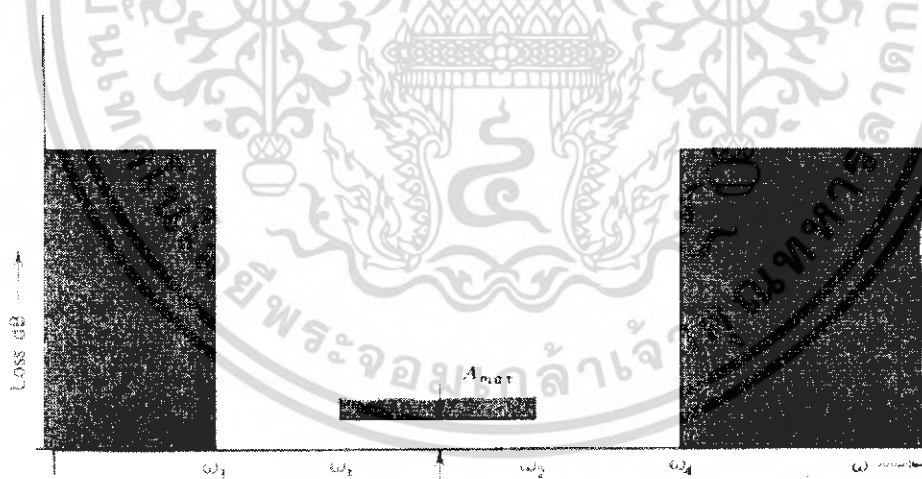
รูปที่ 4.2 การลดทอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากรูปที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่าในวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ช่วงความถี่ผ่านคือช่วงสัญญาณความถี่ต่ำผ่าน สัญญาณจะถูกลดทอนค่าได้สูงสุดไม่เกินค่าค่าหนึ่ง คือ A_{max} และในช่วงความถี่สูงสัญญาณจะลดทอนได้ต่ำสุดค่าหนึ่งคือ A_{min}



รูปที่4.3 การลดทอนของวงจรกรองความถี่สูง

จากรูปที่4.3 แสดงให้เห็นในวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ช่วงความถี่ผ่านคือช่วงสัญญาณความถี่สูงผ่าน สัญญาณจะถูกลดทอนค่าได้สูงสุดไม่เกินค่าค่าหนึ่ง คือ A_{min} และในช่วงความถี่หยุดคือช่วงสัญญาณต่ำ สัญญาณจะถูกลดทอนค่าได้ต่ำสุดคือค่า A_{min}



รูปที่4.4 การลดทอนของวงจรกรองผ่านเฉพาะช่วง

จากรูปที่4.4 แสดงให้เห็นในวงจรกรองความถี่แบบผ่านเฉพาะช่วง ช่วงความถี่ผ่าน สัญญาณจะถูกลดทอนค่าได้สูงสุดไม่เกินค่าค่าหนึ่ง คือ A_{min} และช่วงความถี่หยุดค่าสัญญาณจะถูกลดทอนมีค่าต่ำสุดค่าหนึ่งคือ A_{min}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 Buterworth filter

การประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ทนั้นได้รับความนิยมมากเนื่องจาก ให้ผลการตอบสนองทางความถี่ที่เรียบ ไม่เกิดการกระเพื่อมขึ้นเลย

รูปแบบทั่วไปของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่แบบบัตเตอร์เวิร์ทจะไม่มีค่าซีโร ดังสมการ

$$T(s) = \frac{z(s)}{p(s)} = \frac{k}{(s-p(1))(s-p(2))\dots(s-p(n))} \quad (4.1)$$

เมื่อ k เป็นค่าคงที่

และ $p(1), p(2), \dots, p(n)$ เป็นโพลที่ 1, โพลที่ 2, ... โพลที่ n

ฟังก์ชันการสูญเสียของการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวิร์ท (loss function) แสดงดังสมการที่ (2)

$$|H(\omega)| = \sqrt{1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}} \quad (4.2)$$

เมื่อ ε คือค่าคงที่, n เป็นอันดับของโพลโนเมียล, ω_p เป็นขอบความถี่ช่วงความถี่ผ่าน (pass band edge frequency)

พิจารณาที่ความถี่ต่ำใกล้ไฟตรง $\varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n} \ll 1$ ดังนั้น

$$\left[1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}\right]^{1/2} = 1 + \frac{1}{2}\varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n} - \frac{1}{8}\varepsilon^4 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{4n} + \frac{1}{16}\varepsilon^6 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{6n} + \dots \quad (4.3)$$

จากสมการ (2) จะเห็นว่าพจน์ที่กำลังสูงจะมีค่าน้อยมาก เพราะฉะนั้นจะได้

$$\left[1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n}\right]^{1/2} \approx 1 + \frac{1}{2}\varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p}\right)^{2n} \quad (4.4)$$

การสูญเสียในหน่วย dB (loss in dB) มีค่าเท่ากับ

$$A(\omega) = 10 \log_{10} \left[1 + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{2n} \right] \quad \text{dB} \quad (4.5)$$

ที่ $\omega = \omega_p$ จะได้

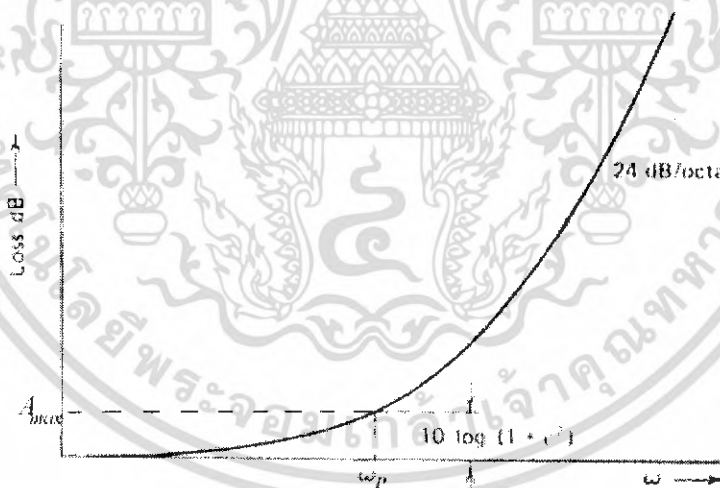
$$A(\omega) = 10 \log_{10} |1 + \varepsilon^2| \quad \text{dB} \quad (4.6)$$

แก้สมการหาค่า ε จะได้

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0.1 A_{\max}} - 1} \quad (4.7)$$

เมื่อ A_{\max} คือ ค่าการลดทอนมากที่สุดของช่วงความถี่ผ่านในวงจรกรองความถี่แบบบัตเทอร์เวิร์ธ

การประมาณค่าแบบบัตเทอร์เวิร์ธ จะไม่เกิดการกระเพื่อมทั้งที่ช่วงความถี่ผ่านและช่วงความถี่หยุดดังรูป



รูปที่ 4.5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบบัตเทอร์เวิร์ธอันดับ 4

4.2.2 Chebyshev filter

เนื่องจากการประมาณค่าของบัตเทอร์เวิร์ธนั้นถึงแม้ว่าจะให้ผลการตอบสนองทางความถี่ที่เรียบไม่เกิดการกระเพื่อมขึ้นเลย แต่เนื่องจากระยะห่างระหว่าง ω_p ถึง ω หรือช่วงทรานซิสชัน นั้นยังมีค่ามากเกินไป จึงเกิดการประมาณค่าแบบเชบิเชฟขึ้นมา เพื่อที่จะลดระยะช่วงทรานซิสชันลง ทำให้วงจรเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรองความถี่เข้าใกล้ความเป็นอุดมคติยิ่งขึ้น แต่ผลจากการลดช่วงทรานซิสชันลงทำให้ได้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ไม่เรียบ เกิดการกระเพื่อมขึ้น

ฟังก์ชันการสูญเสียของการประมาณค่าแบบเชบีเชฟเป็นไปตามสมการ

$$|H(j\Omega)| = \sqrt{1 + \varepsilon^2 C_n(\Omega)} \quad (4.8)$$

เมื่อ C_n คือ

$$C_n = \cos(n \cos^{-1} \Omega) \quad |\Omega| \leq 1 \quad (4.9ก)$$

$$C_n = \cosh(n \cos^{-1} \Omega) \quad |\Omega| > 1 \quad (4.9ข)$$

โดยที่ Ω คือความถี่บรรทัดฐาน (Normalize frequency)

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_p} \quad (4.10)$$

เมื่อ $C_n(1) = 1$ จะได้ การสูญเสียช่วงความถี่ผ่านดังสมการ

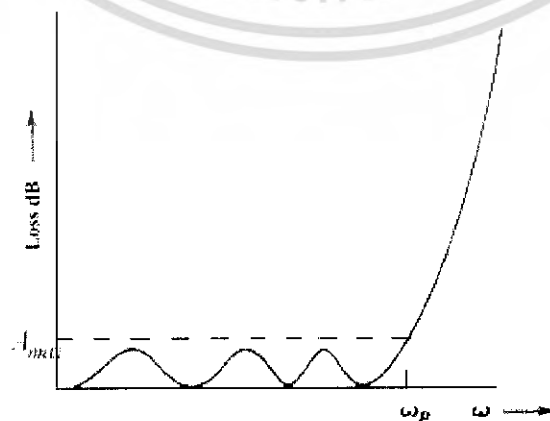
$$A_{\max}(\omega) = 10 \log_{10} |1 + \varepsilon^2| \text{ dB} \quad (4.11)$$

ขนาดของริบเบิลในช่วงความถี่ผ่าน A_{\max} จะเป็นตัวกำหนดตัวแปร ε ดังสมการที่ (9)

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0.1 A_{\max}} - 1} \quad (4.12)$$

เมื่อ A_{\max} คือ ค่าการลดทอนมากที่สุดของช่วงความถี่ผ่านในวงจรกรองความถี่แบบเชบีเชฟ

การประมาณค่าแบบเชบีเชฟ จะเกิดการกระเพื่อมที่ช่วงความถี่ผ่านดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แสดงการกระเพื่อมของช่วงความถี่ผ่านของเชบีเชฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 Elliptic Filter

วงจรกรองความถี่แบบนี้ให้ผลตอบสนองที่มีความชันมากที่สุด มากกว่าแบบบัตเตอร์เวิร์ทและเชบีเชฟที่อันดับเท่ากัน แต่จะเกิดการกระเพื่อมขึ้นทั้งช่วงความถี่ผ่านและความถี่หยุด การสูญเสียของวงจรกรองความถี่ต่ำแบบเอลลิปติกแสดงดังรูป

ขนาดฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านที่มีการประมาณค่าแบบเอลลิปติก

$$\text{หรือ } |T(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 R_n^2(\omega)}} \quad (4.13)$$

$$|T(j\omega)|^2 = \frac{Q(j\omega)Q(-j\omega)}{Q(j\omega)Q(-j\omega) + \varepsilon^2 P(j\omega)P(-j\omega)} \quad (4.14)$$

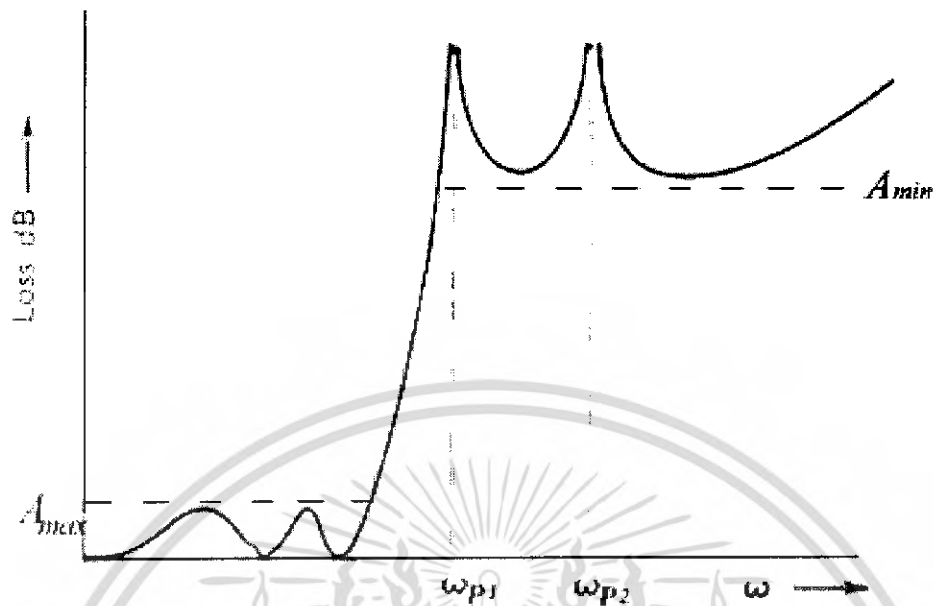
$$\text{เมื่อ } R_n(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \text{ หรือ } |R_n(j\omega)|^2 = \frac{P(j\omega)P(-j\omega)}{Q(j\omega)Q(-j\omega)} = R_n^2\omega$$

จะเห็นว่าโพลของ R_n จะเป็นซีโรของ $|H(j\omega)|$ จะได้สมการการสูญเสียเป็น

$$A(\omega) = 10 \log_{10} |1 + \varepsilon^2 R_n^2(\omega)| \quad \text{dB} \quad (4.15)$$

ถ้าให้ $R_n(1) = 1$ จะได้การลดทอนสูงสุดในช่วงความถี่ผ่านดังสมการ

$$A(1) = A_{\max} = 10 \log_{10} |1 + \varepsilon^2| \quad \text{dB} \quad (4.16)$$



รูปที่ 4.7 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบเอลลิปติกอันดับ 2

ตารางที่ 4.1 ตารางการเปรียบเทียบคุณสมบัติของการประมาณค่า

แบบ	คุณสมบัติ
Butterworth	ให้ผลตอบสนองแบนเรียบ. ไม่มีการกระเพื่อมทั้งช่วงความถี่ผ่านและความถี่หยุด.
Chebyshev	มีการกระเพื่อมที่ช่วงความถี่ผ่าน ให้ความชันมากกว่าบัตเตอร์เวิร์ทที่อันดับเท่ากัน มีการกระเพื่อมทั้งในช่วงความถี่ผ่านและความถี่หยุด
Elliptic	ให้ความชันมากกว่าบัตเตอร์เวิร์ทและเชบิเชฟที่อันดับเท่ากัน ไม่มีการกระเพื่อมทั้งในช่วงความถี่ผ่านและความถี่หยุด
Ideal	ไม่มีช่วงทรานซิสชัน(ความถี่หยุดและความถี่ผ่านมีค่าเท่ากัน)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบแอกทีฟ

การออกแบบวงจรกรองความถี่นั้นมีด้วยกันหลายวิธี ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึง การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบไบควอด (Biquad) และแบบการแปลงเนตเวิร์กพาสซีฟ แอลซีแอสเคเตอร์ (Passive LC adder)

4.3.1 ไบควอด

คือการสร้างวงจรกรองความถี่อันดับ 2 จากออปแอม ตัวเก็บประจุ และตัวต้านทาน ถ้าต้องการสร้างวงจรกรองความถี่ให้มีอันดับที่สูงขึ้น ก็สามารถทำได้โดยการนำวงจรกรองความถี่แบบไบควอดมาต่ออนุกรมกัน ข้อดีของการสร้างวงจรกรองความถี่ด้วยวิธีนี้คือ ทำการสร้างได้ง่ายไม่ยุ่งยาก แต่ข้อเสียก็คือความไวของระบบรวมจะสูง

4.3.2 การแปลงเนตเวิร์กพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์

คือการสร้างวงจรกรองความถี่ที่ประกอบไปด้วยอุปกรณ์พาสซีฟทั้งหมด คือตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ข้อดีของการออกแบบวงจรกรองความถี่แบบนี้ก็คือ วงจรกรองความถี่แบบแอลซีแอสเคเตอร์มีความไวต่ำ (Low sensitivity) เมื่อเทียบกับอุปกรณ์ต่างๆที่มีค่าผิดพลาดอยู่ในตัวอยู่แล้ว จะทำให้ไม่มีผลต่อฟังก์ชันถ่ายโอน และเนื่องจากวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์นี้จะมีตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ และมีตัวต้านทานด้านต่ออยู่เป็นโหลดของวงจร ไม่เกิดการสูญเสียพลังงาน ซึ่งในโครงการนี้ได้อาศัยข้อดีของวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ ในการสร้างวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟ

แต่เนื่องจากเวลานำวงจรกรองความถี่ไปใช้งานจริง เราจะใช้ในวงจรที่เป็นแอกทีฟ และเนื่องจากข้อด้อยอีกประการหนึ่งของวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ คือตัวเหนี่ยวนำนั้นหาซื้อได้ยากมีขนาดใหญ่ ทำให้ยุ่งยากในการนำไปผลิตลงในไอซี การสร้างวงจรจึงพยายามหลีกเลี่ยงไม่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ

4.3.3 การแทนค่าอุปกรณ์

วิธีนี้ใช้การแทนค่าตัวเหนี่ยวนำด้วยอุปกรณ์แอกทีฟที่ประกอบไปด้วยออปแอม ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยที่อุปกรณ์พาสซีฟตัวอื่นยังคงเหมือนเดิมไม่เปลี่ยนแปลง วิธีนี้เป็นที่นิยมกันมาก เนื่องจากสามารถลดค่าความไวที่ต่ำของวงจรกรองพาสซีฟต้นแบบ อีกทั้งเทคนิคพื้นฐานที่นิยมนำมาสร้างเป็นตัวเหนี่ยวนำได้แก่ เทคนิคการใช้ไจเรเตอร์ (Gyrator) GIC FDNR ซึ่งได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในโครงการนี้ได้ใช้เทคนิค GIC และ FDNR ในการแทนค่าตัวเหนี่ยวนำที่ซึ่งจะกล่าวโดยละเอียดในบทถัด

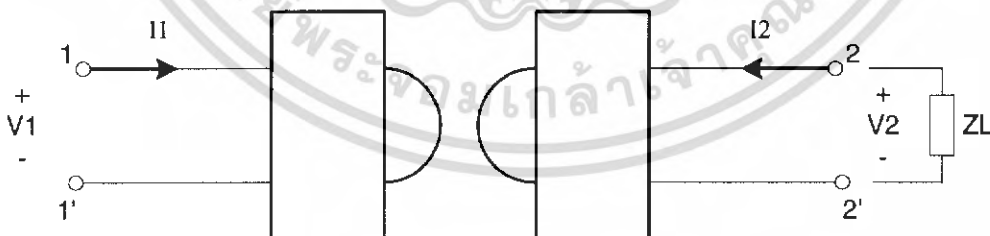
4.3.4 การแทนค่าด้วยบล็อกไดอะแกรม

เป็นวิธีสร้างวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ โดยทำการจำลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน แล้วทำการแทนที่ด้วยบล็อกไดอะแกรม ที่ยังคงค่าฟังก์ชันถ่ายโอนเดิมของวงจรต้นแบบพาสซีฟแอลซีไว้ จากนั้นจึงทำการสังเคราะห์วงจรแอคทีฟที่ให้ความสัมพันธ์ตรงตามบล็อกไดอะแกรมของวงจรต้นแบบ ก็จะได้วงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟที่ให้คุณสมบัติตรงตามวงจรกรองพาสซีฟต้นแบบ ซึ่งข้อดีของการสร้างวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟด้วยวิธีนี้คือ ให้คุณสมบัติความไวต่อวงจรมีความเป็นระบบระเบียบ (Systematic) สูง อุปกรณ์ทุกตัวมีการเลือกการทำงานอย่างเท่าเทียม จึงทำให้ระบบที่ได้เสถียรภาพมากกว่า แต่ข้อเสียก็คือการออกแบบวงจรกรองความถี่ด้วยวิธีนี้ค่อนข้างจะยุ่งยาก เพราะในการแปลงจะต้องคำนึงถึงระบบทั้งหมด ไม่ใช่แค่แทนค่าตัวเหนี่ยวนำเพียงตัวเดียวเหมือนวิธีการแทนค่าอุปกรณ์

4.4 การแปลงวงจรพาสซีฟ LC ให้เป็น แอคทีฟ

4.4.1 การแทน L โดยใช้ Gyrator

เมื่อ k คือค่าความต้านgyrator

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -k \\ k & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$


รูปที่ 4.8 Gyrator

ถ้าgyrator ถูกต่อด้วยโหลด Z_L ที่พอร์ต 22' จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_2 = -I_2 Z_L \quad (4.18)$$

แทนสมการใน (4.17) ได้

$$Z_m = \frac{V_1}{I_1} = \frac{K^2}{Z_L} \quad (4.19)$$

ซึ่งในสมการ (4.19) แสดงให้เห็นว่า อิมพีแดนซ์เมื่อมองเข้าไปที่พอร์ต 11' เป็นส่วนกลับของค่าอิมพีแดนซ์ที่ต่อที่พอร์ต 22' และถ้ามีโหลดเป็นตัวเก็บประจุ หรือ $Z_L = sC$ จะได้

$$Z_m = k^2 sC = sL_{eq} \quad (4.20)$$

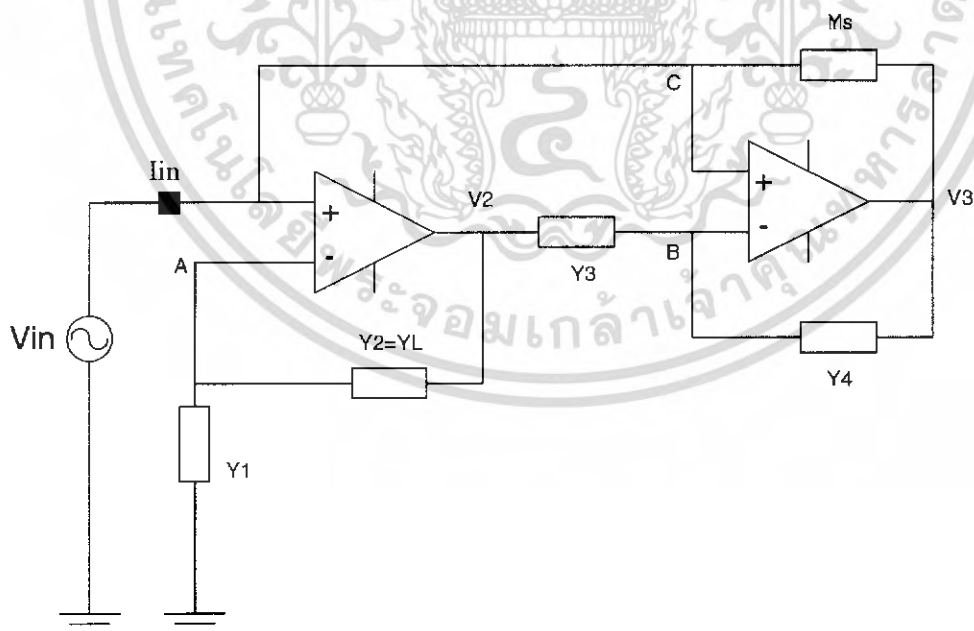
$$L_{eq} = k^2 C \quad (4.21)$$

เพราะฉะนั้นอิมพีแดนซ์ที่มองเข้าไปที่พอร์ต 11' มีคุณสมบัติเป็นอิมพีแดนซ์ของ L

- การออกแบบวงจร Gyrator สามารถทำได้โดยวิธีของ Riordan

โหนด A:

$$(Y_1 + Y_2)V_{IN} - Y_2V_2 = 0 \quad (4.22)$$



รูปที่ 4.9 Riordan gyrator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โหนด B:

$$(Y_3 + Y_4)V_{IN} - Y_3V_2 - Y_4V_3 = 0 \quad (4.23)$$

โหนด C:

$$Y_5V_{IN} - Y_5V_3 = I_{IN} \quad (4.24)$$

แก้สมการออกมาจะได้

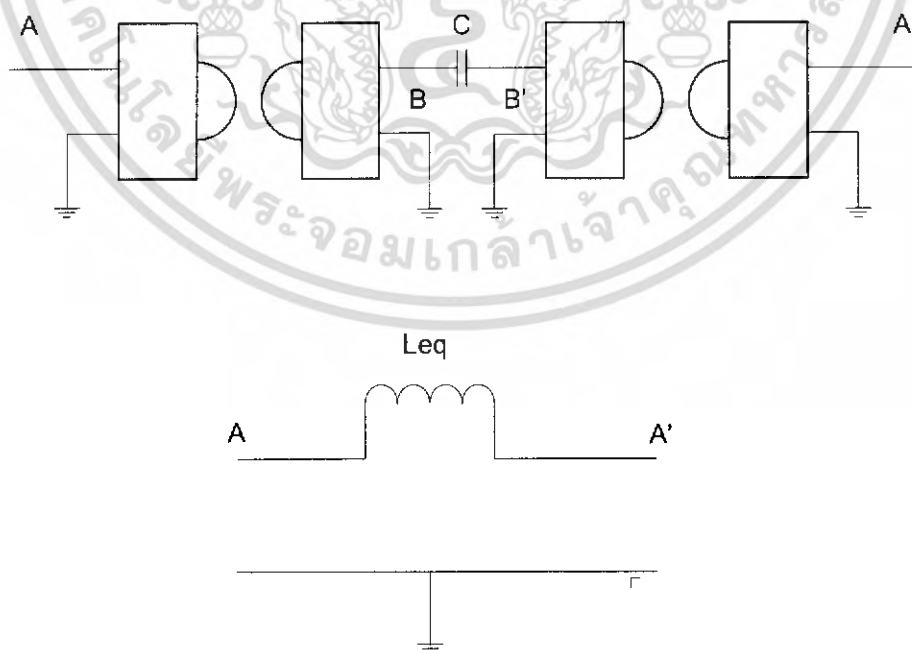
$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{Y_2Y_4}{Y_1Y_3Y_5} = \frac{Z_1Z_3Z_5}{Z_2Z_4} \quad (4.25)$$

ถ้าหากเลือก Z_2 เป็นโหนดของระบบ และแทนด้วยตัวเก็บประจุอิมพีแดนซ์ ตัวอื่นแทนด้วยความต้านทาน R จะได้ อินพุต อิมพีแดนซ์เป็น $Z_{IN} = SR^2C$ ซึ่งก็คือค่า อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ $L_{eq} = R^2C$

เพราะฉะนั้นเป็น RC inductor แบบ grounded หรือพอร์ตหนึ่งของเน็ตเวิร์คฟังก์ชันต้องต่อลงกราวด์เสมอ

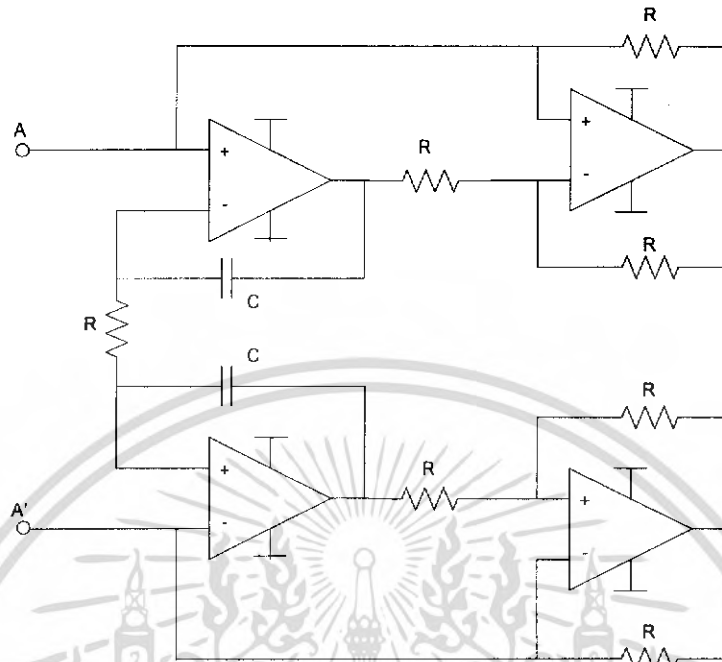
- การสร้างค่าความเหนี่ยวนำแบบลอยตัว

ตัวเหนี่ยวนำแบบลอยตัว สามารถสร้างได้โดยใช้ Gyrator 2 ตัวดังรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

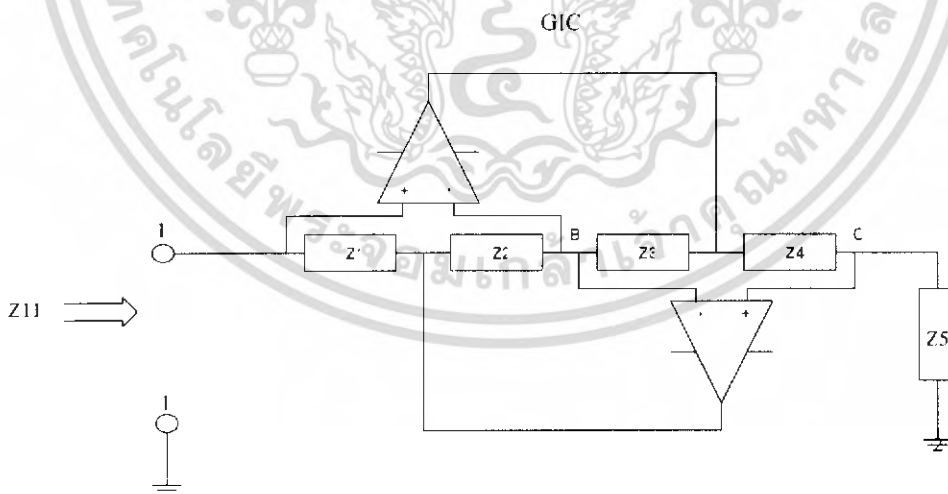
หรือสามารถเขียนเป็นวงจรแบบแอกทีฟด้วยวิธีของ Riordan ได้ดังรูป



รูปที่ 4.11 วงจรตัวเหนี่ยวนำเสมือนแบบแอกทีฟ

4.4.2 GIC (General Impedance Converter) Technique

เทคนิค GIC ใช้หลักการของ Gyrator มาประยุกต์ โดยที่มีอิมพีแดนซ์ต่ออยู่หน้าตัวดังรูป



รูปที่ 4.12 GIC อิมพีแดนซ์เมื่อมองเข้าไปที่พอร์ต 1

จากรูปที่ 4.11 เมื่อมองเข้าไปที่พอร์ต 1 จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน $Z_{11} = \frac{Z_1 Z_3}{Z_2 Z_4} Z_5$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(4.26)

และเมื่อให้ค่า Z_4 เป็นตัวเก็บประจุจะทำให้วงจรเกิดตัวเหนี่ยวนำเสมือนขึ้นมา $Z_4 = \frac{1}{sC_4}$ จะได้

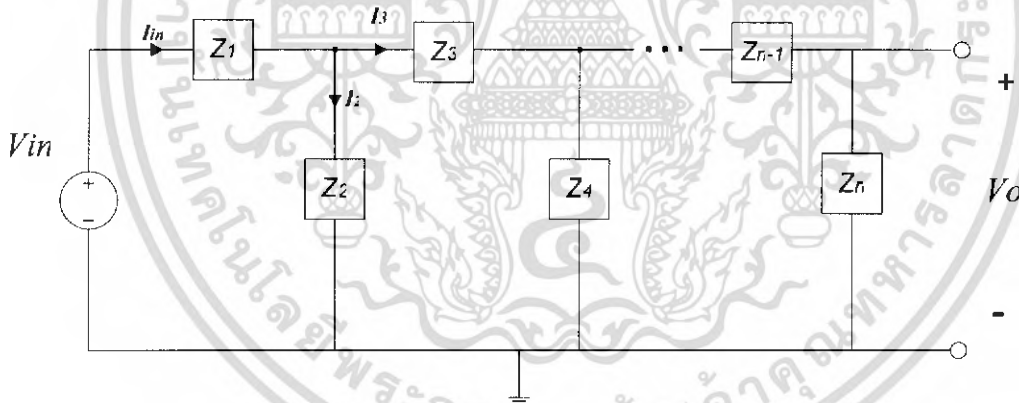
$$Z_{in} = sL_0 = s \left(\frac{C_4 R_1 R_3}{R_2} \right) R_5 \tag{4.27}$$

ถ้า $R_1 = R_2 = R_3 = R_5 = R$ และ $C_4 = C$ ดังนั้น

$$L_{eq} = C_4 R^2 \tag{4.28}$$

4.4.3 Bruton's FDNR Technique

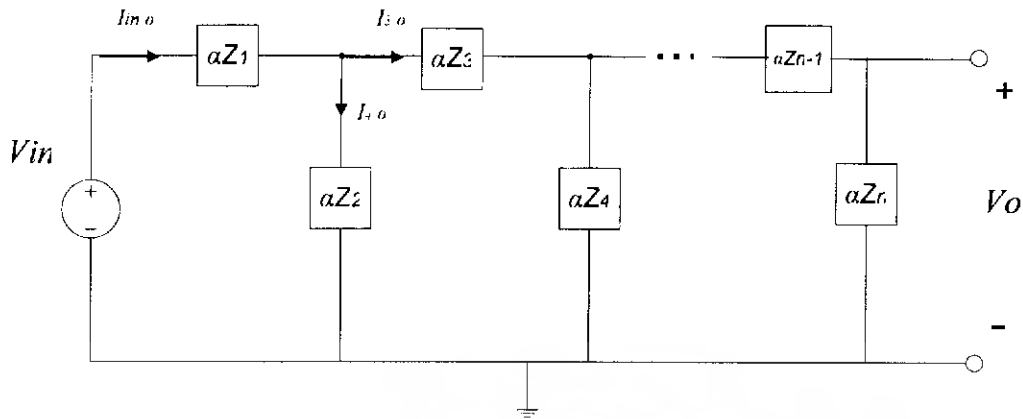
ใช้หลักการในทำนองเดียวกับเทคนิค GIC เพียงแต่เทคนิคFDNRนี้จะทำการแปลงค่าของอิมพีแดนซ์แต่ละตัวก่อน การแปลงค่าอิมพีแดนซ์โดยการสเกลอิมพีแดนซ์ (Impedance Scaling) ดังรูปที่3.10และรูปที่4.12



รูปที่4.13 เนตเวิร์กฟังก์ชันเริ่มต้น

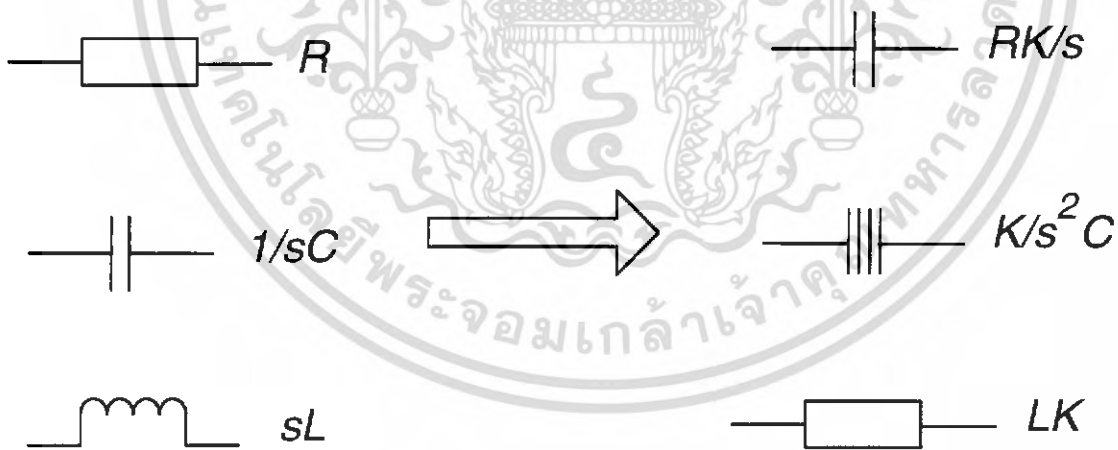
จากรูปที่ 4.12 $Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}}$ เพราะฉะนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนเป็น $H = \frac{V_0}{V_{IN}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 เนตเวิร์กฟังก์ชันที่ถูกสเกลด้วยค่า α

จากรูปที่ 4.13 จะได้ แรงดันที่ตกคร่อม Z_1 มีค่าเป็น $\alpha Z_1 \left(\frac{I_{IN}}{\alpha} \right) = I_{IN} Z_1$ ซึ่งจะเห็นว่า มีค่าเท่าเดิม เหมือน เนตเวิร์กฟังก์ชันโอนเริ่มต้น ในทำนองเดียวกันแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ตัวอื่นๆ ก็จะมีค่าเท่ากับแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ตัวนั้นๆ ในเน็ตเวิร์กฟังก์ชันโอนเริ่มต้นด้วย เพราะฉะนั้นจะกล่าวได้ว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของเน็ตเวิร์กที่ถูกการสเกลอิมพีแดนซ์จะมีค่าเท่าเดิม ไม่เปลี่ยนแปลง เช่นเดียวกันถ้าทำการสเกลอิมพีแดนซ์ด้วยค่า K/s ก็จะไม่ทำให้ค่าฟังก์ชันโอนเปลี่ยนไป ผลจากการสเกลดังกล่าว แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.15 รูปการแปลงแบบ FDNR

ทำให้ค่า R เปลี่ยนเป็นค่า C ค่า L เปลี่ยนเป็นค่า R ส่วนค่า C เปลี่ยนเป็นอุปกรณ์ใหม่ซึ่งมีค่า

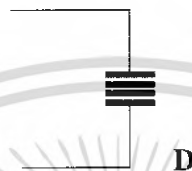
อิมพีแดนซ์ เท่ากับ $Z(s) = \frac{1}{s^2 D}$

โดยที่ $D = C/K$ และในแกนความถี่ แทน s ด้วย $j\omega$ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

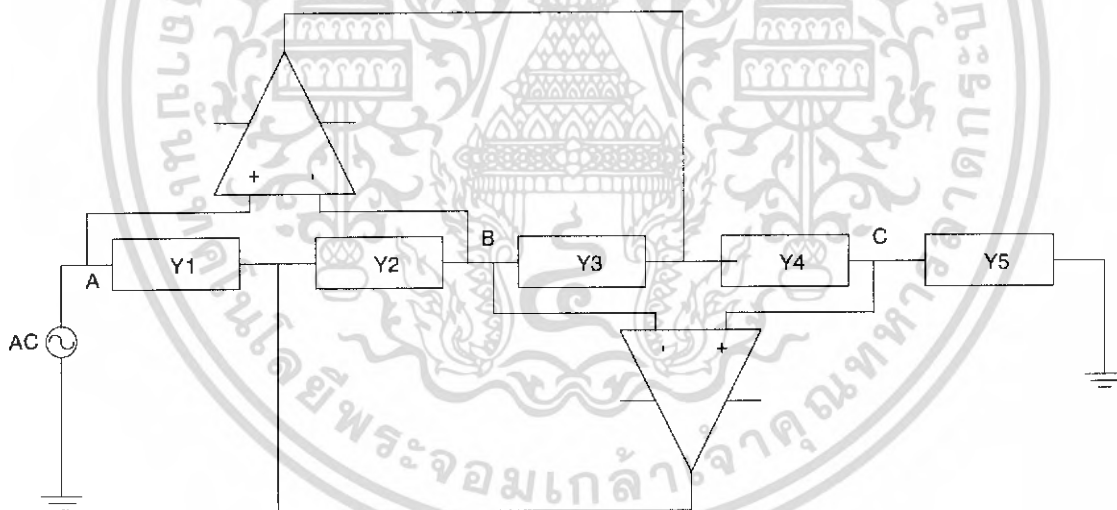
$$Z(j\omega) = \frac{1}{s^2 D} = -\frac{1}{\omega^2 D} \quad (4.29)$$

จะเห็นได้ว่าค่าอิมพีแดนซ์ของอุปกรณ์ แปรตามความถี่และมีค่าเป็นลบ เรียกว่า FDNR ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนด้วยตัว D และเขียนรูปแทนได้ดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.16 รูปสัญลักษณ์ของ FDNR

สามารถออกแบบ network function แบบ 2-port ให้มีคุณสมบัติเป็น FDNR ได้หลายแบบ เช่น ตัวอย่างเป็นวงจรของ Bruton



รูปที่ 4.17 วงจร FDNR (Grounded)

ในทำนองเดียวกันกับ GIC จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$Z_{IN} = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{Y_2 Y_4}{Y_1 Y_3 Y_5} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4} \quad (4.30)$$

ถ้าเลือกใช้ $Z_1 = Z_3 = 1/sC_D$ และ $Z_2 = Z_4 = Z_5 = R_D$ เพราะฉะนั้นจะได้

$$Z_{in} = 1/s^2 R_D C_D^2 = 1/s^2 D \quad \text{โดยที่} \quad D = R_D C_D^2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

โดยทั่วไปแล้วจะรู้จักการทำงานและการใช้งานออปแอมป์ ซึ่งเป็นแบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน ซึ่งออปแอมป์แบบนี้จะมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับออปแอมป์ในอุดมคติมาก แต่ในปัจจุบันนั้นมีความต้องการออปแอมป์ที่สามารถตอบสนองความถี่ได้สูง จึงได้มีการพัฒนาออปแอมป์แบบป้อนกลับด้วยกระแสขึ้นมาซึ่งมีข้อดีคือ สามารถตอบสนองความถี่ได้สูงกว่า

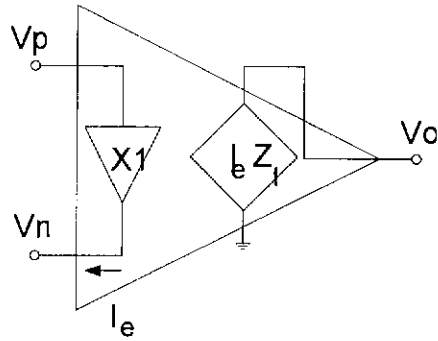
5.1 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส (Current Feedback Op-Amp: CFA)

ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสนั้นถูกออกแบบมา โดยอาศัยการทำงานในโหมดกระแส (Current mode operation) โดยมีกระแสไหลเข้าที่ขาอินพุตทั้งสองข้างได้ โดยที่มีบัฟเฟอร์เป็นอินพุตอิมพีแดนซ์อยู่ภายใน และได้เอาท์พุตเป็นแรงดัน โดยป้อนกระแสกลับเข้าที่อินพุตเพื่อควบคุมแรงดันเอาต์พุตที่ออกมา จากหลักการและคุณสมบัติที่กล่าวมาออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสจึงเป็นทางเลือกใหม่ของการนำออปแอมป์ไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพในการทำงานดีขึ้น สามารถใช้งานได้หลายประเภท เช่น วงจรเปลี่ยนกระแสให้เป็นแรงดัน (Current to voltage converters), HDTV amplifiers, อุปกรณ์สื่อสารความเร็วสูง และยังสามารถทดแทนวงจรที่ใช้อุปกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ทำให้วงจรมีขนาดเล็กเหมาะสมกับการใช้งาน

คุณสมบัติเด่นของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส เมื่อเปรียบเทียบกับออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน (Voltage Feedback Op-Amp: VFA) คือในเรื่องของ ความเร็วของการทำงาน รวมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงความต่างศักย์ต่อหน่วยเวลา (Slew rate) และตั้งอัตราขยายได้โดยที่แบนด์วิดท์ไม่เปลี่ยน

5.2 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสในอุดมคติ

ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสจะมีอินพุตอิมพีแดนซ์ภายในต่ำมาก ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์มีอัตราขยายเป็น 1 แสดงดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสในอุดมคติ

เมื่อ V_p คือแรงดันที่ขาไม่กลับเฟส

เมื่อ V_n คือแรงดันที่ขากลับเฟส

ให้ $V_c = V_p - V_n$ เป็นค่าผิดพลาดของแรงดัน

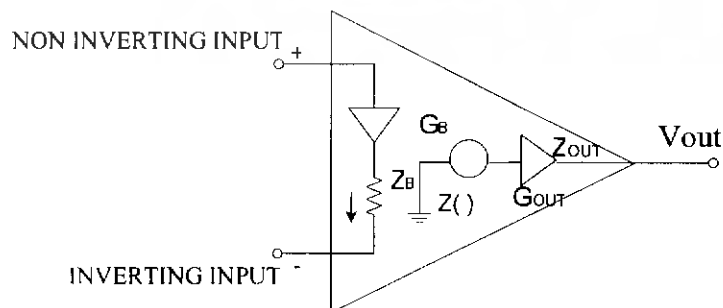
เมื่อ I_e เป็นค่าผิดพลาดของกระแส และ Z_i เป็นค่าอัตราขยายทรานซิมพีแดนซ์ที่วงจรเปิด (Open loop transimpedance gain) จะได้ว่า

$$V_n = I_e Z_i \quad (5.1)$$

จะเห็นได้ว่าแรงดันเอาต์พุตจะมีค่าขึ้นอยู่กับกระแสอินพุตและค่าอัตราขยายทรานซิมพีแดนซ์

5.3 โครงสร้างของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

โครงสร้างของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสแสดงได้ดังรูป 5.2 ขาอินพุตไม่กลับเฟสของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสจะต่อเข้ากับอินพุตของอินพุทบัฟเฟอร์ ดังนั้นจึงมีค่าอิมพีแดนซ์ที่สูงมาก ส่วนขาอินพุตกลับเฟสจะต่ออินพุตของเอาต์พุทบัฟเฟอร์ ดังนั้นจึงมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำมาก



รูปที่ 5.2 แบบจำลองของCFA

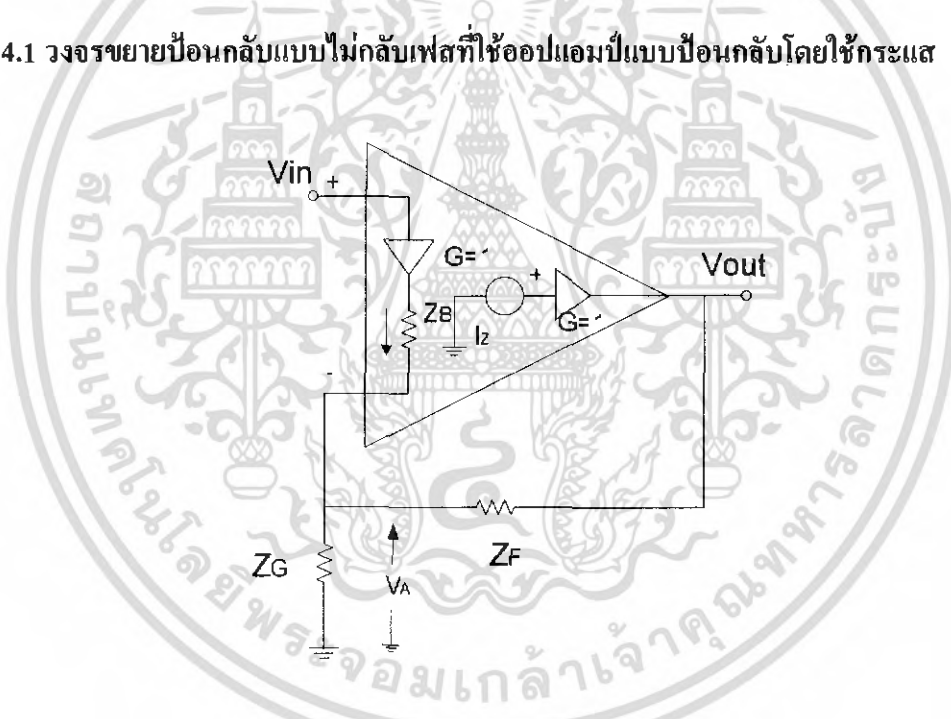
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอาต์พุตของบัฟเฟอร์ทำให้เอาต์พุตอิมพีแดนซ์ของออปแอมป์มีค่าต่ำ Z เป็นค่าอัตราขยาย ทราบซ์อิมพีแดนซ์ ซึ่งเทียบได้กับค่าอัตราขยายแรงดันของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันซึ่งโดยปกติแล้วจะมีค่าสูงมาก ซึ่งในการนำไปใช้จริงจะใช้เป็นวงจรปิด แล้วทำการป้อนกลับเพื่อลดความผิดพลาดของวงจร

5.4 การป้อนกลับ

เนื่องจากการนำออปแอมป์ไปใช้งานจริง จะไม่ใช่ในลักษณะของวงจรเปิด แต่จะนิยมใช้เป็นลักษณะของวงจรปิดมากกว่า และเพื่อลดค่าความผิดพลาดในวงจร โดยทั่วไปแล้วจะคุ้นเคยกับการป้อนกลับซึ่งใช้แรงดัน เนื่องจากออปแอมป์ที่ใช้กันอยู่นั้นจะเป็นแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน แต่สำหรับออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส นั้นจะเป็นการป้อนกลับโดยใช้กระแส

5.4.1 วงจรขยายป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสที่ใช้ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส



รูปที่ 5.3 วงจรขยายป้อนกลับไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

พิจารณาที่อินพุทขาลบจะได้

$$V_{out} = IZ \quad (5.2)$$

$$I = \left(\frac{V_A}{Z_G} \right) - \left(\frac{V_{OUT} - V_A}{Z_F} \right) \quad (5.3)$$

พิจารณาที่อินพุท

$$V_A = V_{IN} - IZ_B \quad (5.4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะได้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{Z \left(1 + \frac{Z_F}{Z_G} \right)}{1 + \frac{Z_F \left(1 + \frac{Z_B}{Z_F \parallel Z_G} \right)}{Z}} \quad (5.5)$$

เมื่อให้ค่า เอพท์พอยท์อิมพีแดนซ์ Z_B มีค่าน้อยกว่า $Z_F \parallel Z_G$ มากๆ

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{Z \left(1 + \frac{Z_F}{Z_G} \right)}{1 + \frac{Z}{Z_F}} = \frac{1 + \frac{Z_F}{Z_G}}{1 + \frac{Z}{Z_F}} \quad (5.6)$$

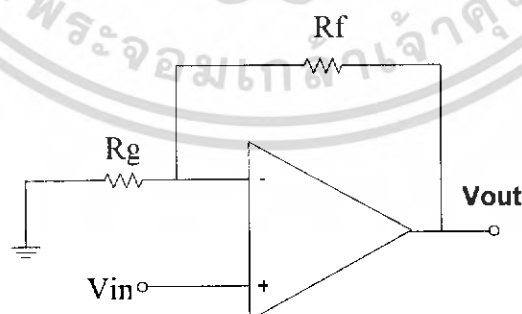
หากค่าอัตราขยายทรานซิสเตอร์อิมพีแดนซ์ Z มีค่าสูงกว่า Z_F มากๆ จะได้อัตราขยายวงจรปิดของวงจรรขยายไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสคงสมการ (5.6)

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \approx 1 + \frac{Z_F}{Z_G} \quad (5.7)$$

5.4.2 วงจรรขยายป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

จากรูปเป็นการนำออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันมาต่อเป็นวงจรร้อนไม่กลับแบบกลับ

เฟส



รูปที่ 5.4 วงจรรขยายป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

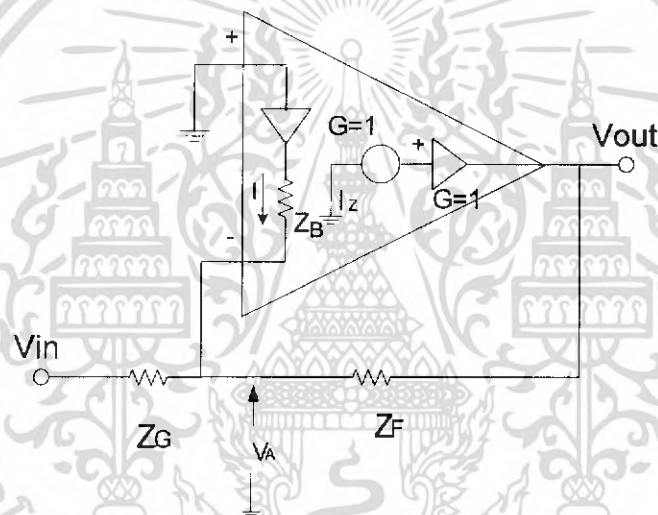
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปจะได้อัตราขยายของวงจรปิดของการป้อนกลับแบบไม่กลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันเป็น

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_g + R_f}{R_f} = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (5.8)$$

จะพบว่าการป้อนกลับแบบไม่กลับของทั้งออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันและออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสนั้นให้อัตราขยายที่คล้ายกัน

5.4.3 วงจรขยายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส



รูปที่ 5.5 วงจรขยายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

พิจารณากระแสที่อินพุตได้ตั้งสมการ(5.7)

$$I + \frac{V_{IN} - V_A}{Z_G} = \frac{V_A - V_{OUT}}{Z_F} \quad (5.9)$$

$$I Z_B = -V_A \quad (5.10)$$

$$I Z = V_{OUT} \quad (5.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{\frac{Z}{Z_G \left(1 + \frac{Z_B}{Z_F \parallel Z_G} \right)}}{1 + \frac{Z}{Z_F \left(1 + \frac{Z_B}{Z_F \parallel Z_G} \right)}} \quad (5.12)$$

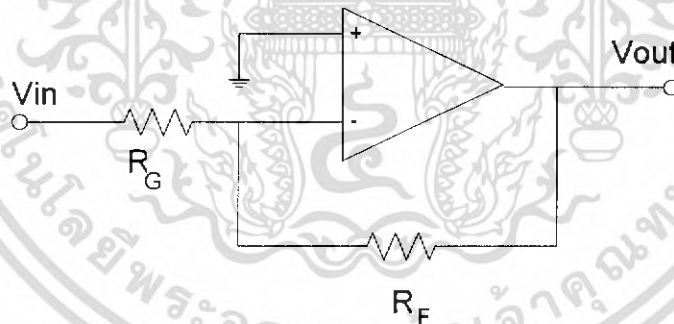
เมื่อ Z_B มีค่าเป็นศูนย์จะได้

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{\frac{1}{Z_G}}{\frac{1}{Z} + \frac{1}{Z_F}} \quad (5.13)$$

เมื่อ Z มีค่ามากสมการ (5.11) จะได้เป็นสมการ (5.12) ซึ่งเป็นอัตราขยายวงจรป้อนกลับเฟสของCFA

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = -\frac{Z_F}{Z_G} \quad (5.14)$$

5.4.4 วงจรขยายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน



รูปที่ 5.6 วงจรขยายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับ โดยใช้แรงดัน

จากรูปที่ 5.6 จะได้อัตราขยายของวงจรป้อนกลับแบบกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับ โดยใช้แรงดันเป็น

$$\frac{V_O}{V_{IN}} = -\frac{R_f}{R_g} \quad (5.15)$$

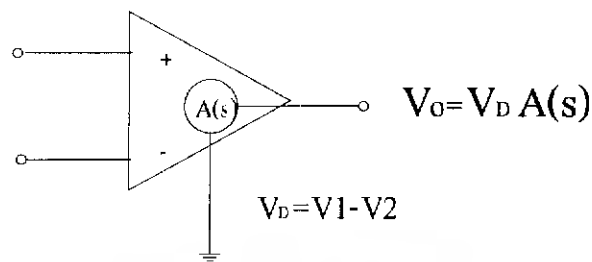
จะเห็นว่าวงจรขยายป้อนกลับเฟสแบบออปแอมป์แบบป้อนกลับ โดยใช้แรงดันและออปแอมป์แบบ

ป้อนกลับ โดยใช้กระแสทำให้อัตราขยายที่คล้ายกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4.5 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันวงจรเปิด



รูปที่ 5.7 ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันวงจรเปิด

พิจารณาเป็นแบบอุดมคติ

เกนคircuit วิเคราะห์ของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

พิจารณาออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันในอุดมคติแบบไม่กลับเฟสจะได้
เมื่อ A เป็นอัตราขยายวงจรเปิด

$$\frac{V_{in} - V_D}{R_g} = \frac{V_o - (V_{in} - V_D)}{R_f} \quad (5.16)$$

$$V_D = \frac{V_o}{A(s)} \quad (5.17)$$

$$R_f \left(V_{in} - \frac{V_o}{A(s)} \right) = R_g \left(V_o - V_{in} + \frac{V_o}{A(s)} \right) \quad (5.18)$$

$$R_f V_{in} - \frac{R_f V_o}{A(s)} = V_o \left(R_g + \frac{R_g + R_f}{A(s)} \right) \quad (5.19)$$

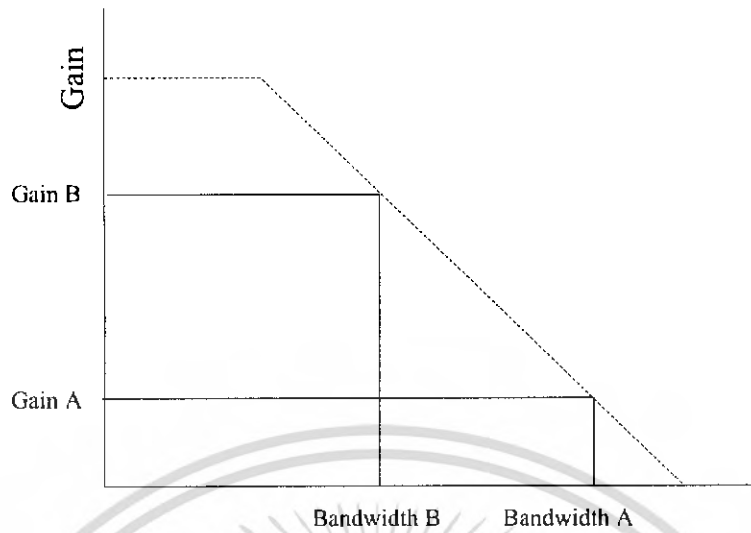
เมื่อค่า G เป็นค่าอัตราขยายวงจรปิดของวงจรแบบกลับเฟส จะได้ จากรูปที่ 5.4 $G = \frac{R_g + R_f}{R_g}$

$$V_o = V_{in} \left(\frac{G}{1 + \frac{G}{A(s)}} \right) \quad (5.20)$$

จากสมการจะเห็นได้ว่าเมื่อค่าอัตราขยายมีค่ามากขึ้น ค่าแบนด์วิธจะลดลง ซึ่งถือเป็นข้อจำกัดหนึ่งของ

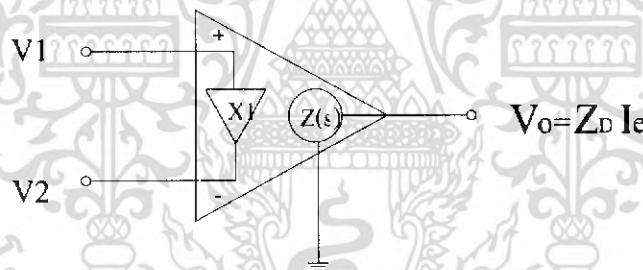
ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิทกับอัตราขยายของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

5.4.6 วงจรเปิดออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส



รูปที่ 5.9 CFA วงจรเปิด

$$I_e = \frac{V_{in} - V_o}{R_f} + \frac{V_{in}}{R_g} \tag{5.21}$$

$$V_o = Z(s) I_e \tag{5.22}$$

$$\frac{V_o}{Z(s)} = \frac{V_{in} - V_o}{R_f} + \frac{V_{in}}{R_g} \tag{5.23}$$

$$\frac{V_o}{Z(s)} = \frac{\frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_g}}{\frac{1}{Z(s)} + \frac{1}{R_f}} \tag{5.24}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{Z(s) R_g R_f}{Z(s) + R_f} \tag{5.25}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ $Z(s)$ เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_o = V_{in} \frac{G}{1 + \frac{R_f}{Z(s)}} \quad (5.26)$$

จะเห็นว่าค่าแบนด์วิธไม่ขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยาย แต่จะขึ้นอยู่กับค่า R_f ซึ่งเป็นค่าต้านทานป้อนกลับ ด้วยเหตุนี้ในการทำงานในวงจรที่เกี่ยวข้องกับความถี่สูง จึงนิยมใช้ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสแทนออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

5.5 การเปรียบเทียบข้อดี-ข้อเสียของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสกับออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

5.5.1 ข้อดีของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

มีค่าสlew rate ที่มากกว่าออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดันเกิดการผิดพลาดของสัญญาณน้อยกว่า ความเสถียรภาพของวงจรขึ้นอยู่กับค่า ตัวต้านทานป้อนกลับ

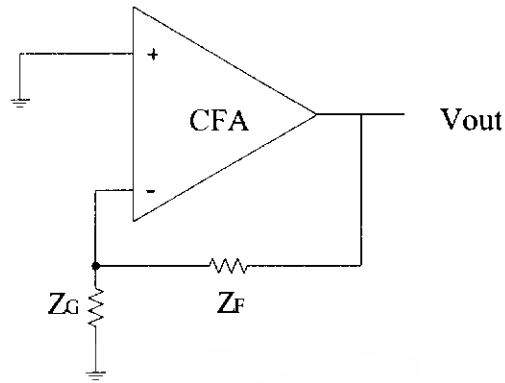
ค่าอัตราขยายไม่มีผลกับค่าแบนด์วิธ ค่าอัตราขยายจะมีผลขึ้นอยู่กับค่าตัวต้านทานป้อนกลับซึ่งทำให้ตอบสนองทางความถี่ได้สูง

5.5.2 ข้อดีของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน

เกิดสัญญาณรบกวนน้อยกว่า ค่าตัวต้านทานป้อนกลับไม่มีผลต่อเสถียรภาพของวงจรข้อเสียออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้แรงดัน ค่าแบนด์วิธจะถูกกำหนดด้วยค่าอัตราขยาย ถ้าค่าอัตราขยายมีค่ามากขึ้นจะทำให้ได้ค่าแบนด์วิธที่ลดลง

5.5.3 เสถียรภาพของวงจรที่ใช้ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

ทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของวงจรที่ใช้ออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส โดยใช้รูปข้างล่าง ความเสถียรภาพจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราขยายวงรอบ (Loop gain)

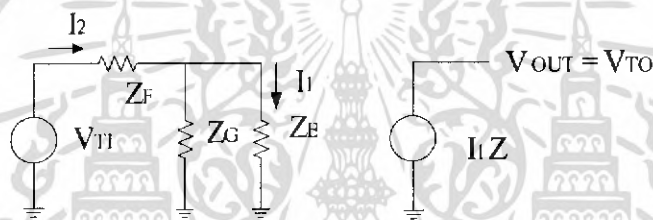


รูปที่ 5.10 เสถียรภาพของระบบ

ทำการทดสอบเสถียรภาพ

โดยการใส่แหล่งจ่ายเข้าไปที่เอาต์พุตในรูปที่ 5.10 จะได้วงจรดัง รูปที่

5.11



รูปที่ 5.11 วงจรเสมือนของออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแส

จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (5.27) และใช้กฎของเคอร์ชอฟจะได้สมการที่ (5.28) และ (5.29)

$$V_{TO} = I_1 Z \tag{5.27}$$

$$V_{TI} = I_2 (Z_F + Z_G \parallel Z_B) \tag{5.28}$$

$$I_2 (Z_G \parallel Z_B) = I_1 Z_B \tag{5.29}$$

รวมสมการ (5.28) และ (5.29) ได้เป็นสมการ (5.30)

$$V_{TI} = I_1 (Z_F + Z_G \parallel Z_B) \left(1 + \frac{Z_B}{Z_G} \right) = I_1 Z_F \left(1 + \frac{Z_B}{Z_F \parallel Z_G} \right) \tag{5.30}$$

เอาสมการ (5.27) ด้วยสมการ (5.30) จะได้สมการ (5.31) เป็นอัตราขยายวงรอบ

$$A\beta = \frac{V_{TI}}{V_{TO}} = \frac{Z}{\left(Z_F \left(1 + \frac{Z}{Z_F \parallel Z_G} \right) \right)} \tag{5.31}$$

ถ้า Z มีค่าสูงมากๆ จะประมาณได้ว่า

$$A\beta = \frac{Z}{Z_F} \tag{5.32}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการอัตราขยายวงรอบสมการ (5.31)

$$A\beta = \frac{V_{\pi}}{V_{TO}} = \frac{Z}{\left(Z_F \left(1 + \frac{Z}{Z_F \parallel Z_G} \right) \right)} \quad (5.33)$$

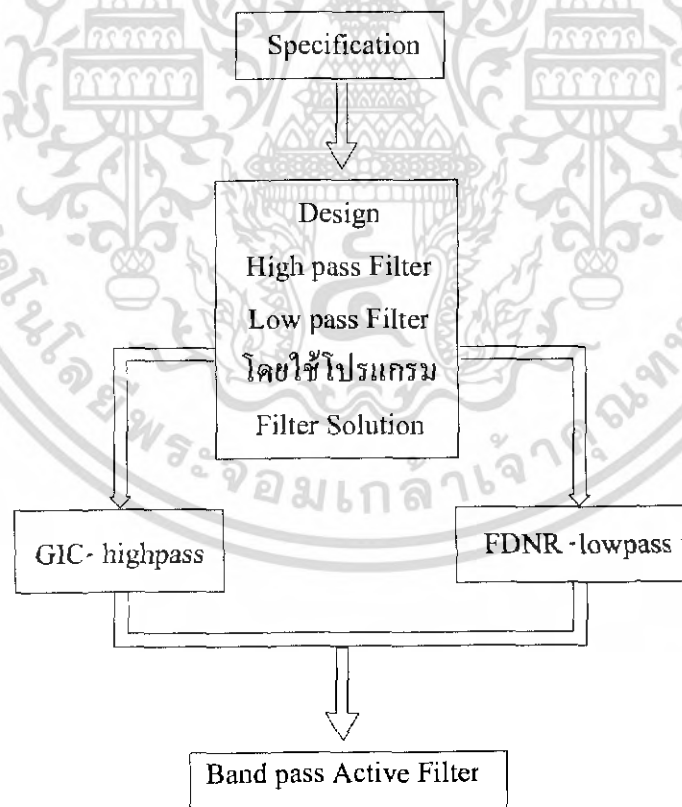
จากสมการจะเห็นว่าค่าอินพุทของเอาต์พุตบัฟเฟอร์ Z_B และค่าทรานซ์อิมพีแดนซ์ Z เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อเสถียรภาพของระบบ แต่เนื่องจากค่าอินพุทของเอาต์พุตบัฟเฟอร์ และค่าทรานซ์อิมพีแดนซ์เป็นปัจจัยภายใน ซึ่งผู้ออกแบบไม่สามารถทำการกำหนดเองได้เนื่องจากค่านี้จะถูกกำหนดมาจากผู้ผลิต แต่การออกแบบจึงต้องควบคุมเลือกค่า Z_F ซึ่งถือเป็นปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อเสถียรภาพของระบบ ซึ่งโดยปกติแล้วค่า R_F ที่เหมาะสมที่สุดจะบอกมาให้ในคาต้าลิกซ์ของบริษัทผู้ผลิตไอซี และในการนำออปแอมป์แบบป้อนกลับโดยใช้กระแสไปใช้งานจริงจะไม่ทำการต่อตัวเก็บประจุไว้ที่ขากลับเฟสของออปแอมป์ในการป้อนกลับ เนื่องจากจะทำให้เกิดการออสซิลเลชันได้

บทที่ 6

การออกแบบวงจรกรองความถี่

ในขั้นตอนของการออกแบบวงจรกรองความถี่ ต้องเริ่มจากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ที่สอดคล้องกับข้อกำหนดทางความถี่ก่อน อันได้แก่ อันดับของวงจรกรอง (Filter Order) ความถี่ตัด (Cut off Frequency) หรือในรายละเอียด เช่น ความถี่ที่ขอบแถบผ่าน (Pass band Edge Frequency) ความถี่ที่ขอบแถบหยุด (Stop band Edge Frequency) เป็นต้น โดยใช้การประมาณค่าด้วยพหุนามต้นแบบชนิด บัทเทอร์เวิร์ท เชบีเชฟ หรือ เอลลิปติก จำนวนหาสัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนออกมาเมื่อได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรต้นแบบแล้ว นำมาสร้างเป็นวงจรพาสซีฟ แอลซี โดยปกติในการสร้างวงจรใช้งานนั้นมักพยายามหลีกเลี่ยงไม่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ เนื่องจากค่อนข้างหายาก ราคาแพง และมีขนาดใหญ่ไม่สะดวกแก่การใช้งาน รวมไปถึงการนำไปสร้างลงบนไอซี ซึ่งตัวเหนี่ยวนำสร้างลงบนไอซีได้ยาก และถึงแม้จะสร้างได้ก็จะมีขนาดใหญ่ การออกแบบจึงต้องหลีกเลี่ยงที่จะไม่ใช้ตัวเหนี่ยวนำ จึงได้มีการแปลงวงจรพาสซีฟ LC เป็นวงจรแอคทีฟที่ประกอบไปด้วย ออปแอมป์และตัวเก็บประจุ

6.1 ขั้นตอนการออกแบบวงจรกรองความถี่



รูป 6.1 ขั้นตอนการดำเนินงานของโครงการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในที่นี้ใช้การออกแบบวงจรกรองความถี่แบบผ่านเฉพาะบางช่วง โดยการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านมาต่ออนุกรมกัน เพื่อลดขนาดกำลังงานลง เนื่องจากถ้าออกแบบเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะบางช่วงเลย จะทำให้ค่าองค์ประกอบคุณภาพ (Quality factor) สูง ทำให้กินกำลังงานสูงไปด้วย และในการนำไปใช้งานจริงบลูทูธมักใช้กับอุปกรณ์ขนาดเล็ก ใช้กำลังงานจากแบตเตอรี่ขนาดเล็ก

ในโครงการนี้ได้ออกแบบวงจรกรองความถี่แบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ เนื่องจากข้อดีของโครงสร้างแบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ จะมีความไวต่ำ จึงใช้โปรแกรม Filter Solution ออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่าน และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน หลังจากนั้นทำการแปลงวงจรให้เป็นแบบแอคทีฟ โดยการใช้เทคนิคจีไอซี ในการแปลงวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟให้เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบแอคทีฟ ส่วนวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟใช้เทคนิคเอฟดีเอ็นอาร์ในการแปลงให้เป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟ

6.2 ข้อกำหนดของมาตรฐาน บลูทูธ

มาตรฐานของ บลูทูธ มีความถี่กลางอยู่ที่ 2 เมกกะเฮิรตซ์ ตารางที่ 6.1 แสดงข้อกำหนดรายละเอียดของบลูทูธ

Parameters	Specification
Pass band Ripple	< 1 dB
Stop band Attenuation	58 dB
Center Frequency	2 MHz
3 dB Bandwidth	1 MHz

อ้างอิงจาก Bluetooth Specification Book 22, Feb 2001

6.3 ข้อกำหนดของมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย

ตารางที่ 6.2 แสดงข้อกำหนดมาตรฐานของ เครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย (IEEE802.11b)

Parameters	Specification
Pass band Ripple	< 1 dB
Stop band Attenuation	50 dB
Center Frequency	6.5 MHz
3 dB Bandwidth	11 MHz

อ้างอิงมาจาก Cisco Systems, Inc., 170 West Tasman Drive, San Jose, CA 95134-1706 USA WLANs

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.4 ขั้นตอนในการออกแบบวงจรพาสซีฟแบบกรองความถี่สูง

จากตารางที่ 6.1 และ 6.2 จึงได้กำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่สูงผ่านไว้ดังนี้

- จุดคัทออฟต่ำที่ 1.5 เมกกะเฮิร์ตซ์
- การกระเพื่อมของช่วง 1 ดีบี
- การลดทอนในช่วงหยุด 58 ดีบี

จากนั้นจึงใช้โปรแกรม Filter Solution ในการออกแบบวงจรพาสซีฟแอคทีฟ ให้ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐานบลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ซึ่งจากการออกแบบของโปรแกรม Filter Solution และการประมาณค่าแบบเอลลิปติก อันดับ 5 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนและวงจรถูกดังนี้

$$T_{HP}(s) = \frac{S^5 + 0.472S^3 + (4.686)10^{-2}S}{S^5 + 4.4148S^4 + 6.467S^3 + 10.94S^2 + 5.81S + 6.244} \quad (6.1)$$



รูป 6.2 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน

6.5 ขั้นตอนในการออกแบบวงจรพาสซีฟกรองความถี่ต่ำผ่าน

จากตารางที่ 6.1 และ 6.2 จึงได้กำหนดคุณสมบัติของวงจรกรองความถี่สูงผ่านไว้ดังนี้

- จุดคัทออฟสูงที่ 11.5 เมกกะเฮิร์ตซ์
- การกระเพื่อมของช่วง 1 ดีบี
- การลดทอนในช่วงหยุด 50 ดีบี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

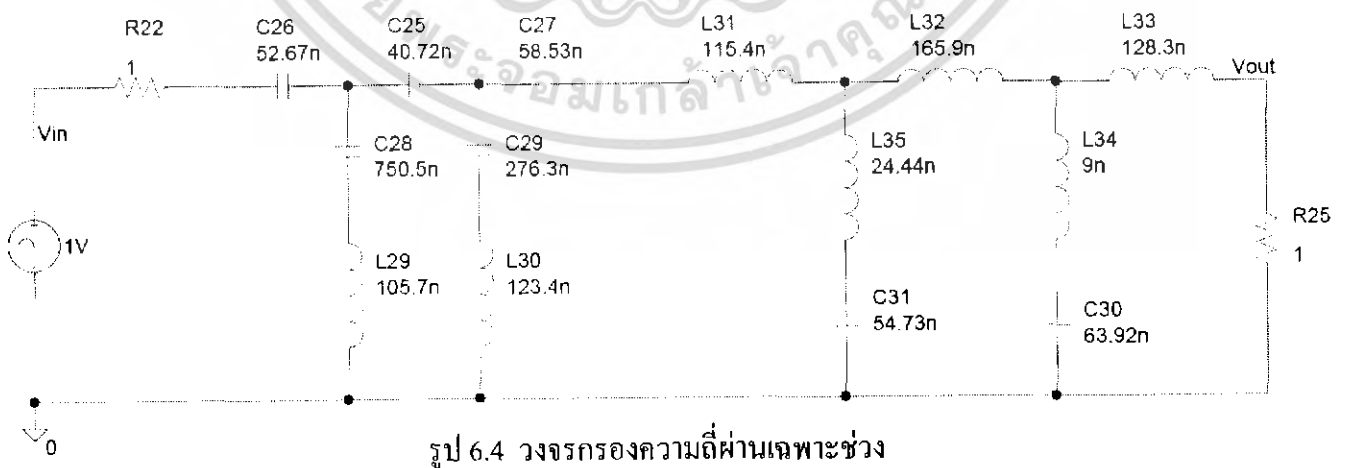
จากนั้นจึงใช้โปรแกรม Filter Solution ในการออกแบบวงจรพาสซีฟแอลซี ให้ได้ตามข้อกำหนดของมาตรฐานบลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์แบบไร้สาย ซึ่งจากการออกแบบของโปรแกรม Filter Solution และใช้วงจรกรองแบบเอลลิปติก อันดับ 5 และมีฟังก์ชันถ่ายโอนและวงจรดังนี้

$$T_{LP}(s) = \frac{(7.505)10^{-3}S^4 + (7.56)10^{-2}S^2 + 0.1602}{S^5 + 0.9305S^4 + 1.752S^3 + 1.036S^2 + 0.6644S + 0.1602} \quad (6.2)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



เมื่อนำวงจรกรองความถี่สูงมาต่ออนุกรมกับวงจรกรองความถี่สูงจะได้เป็นวงจรกรองความถี่เฉพาะช่วงดังรูป



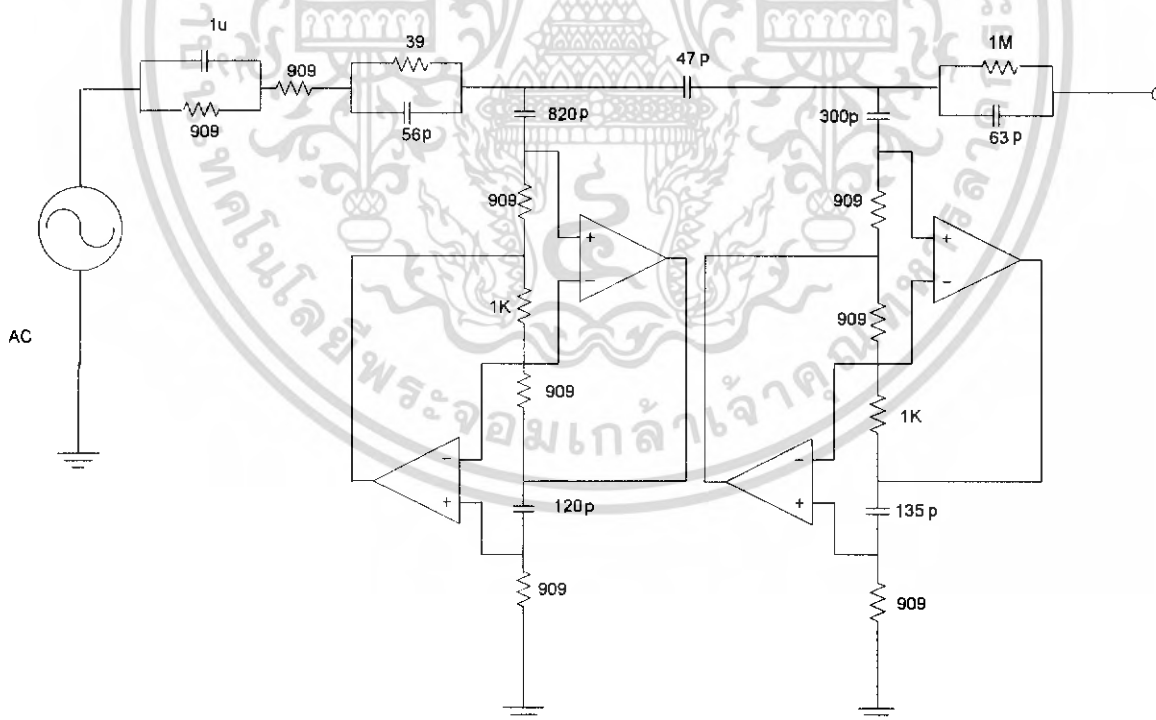
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.6 ขั้นตอนการแปลงวงจรกรองแบบพาสซีฟเป็นแอคทีฟ

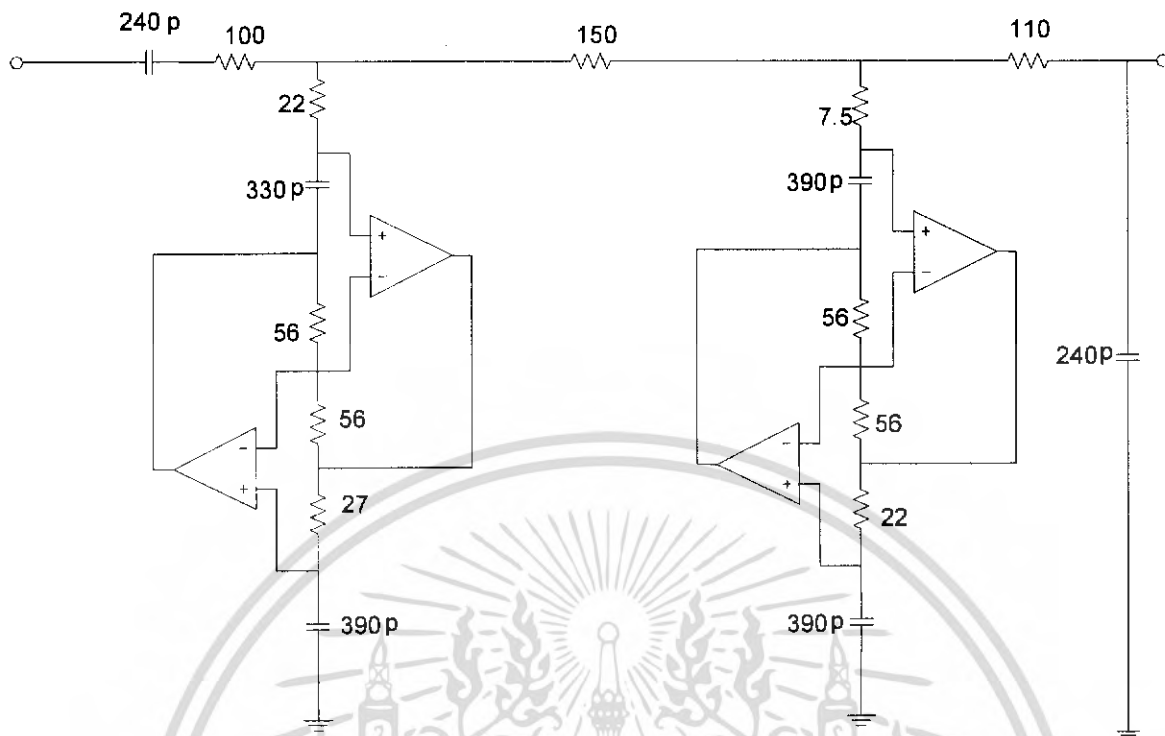
ในส่วนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ ได้ใช้เทคนิคจีโอซีและในส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟแอสเคเตอร์ใช้เทคนิคเอฟดีเนออร์ (ได้กล่าวไว้อย่างละเอียดในบทที่ 5) ในการแปลงให้เป็นวงจรกรองความถี่แบบแอคทีฟ และนำวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบแอคทีฟและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟมาต่ออนุกรมกันได้เป็น วงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงดังรูปที่ 5.5

ใช้เทคนิคจีโอซีในการแปลงวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ เนื่องจากในวงจรต้นแบบมีตัวเหนี่ยวนำที่ต่อลงเพียง 2 ตัว การใช้เทคนิคจีโอซีจึงเหมาะสมเพราะว่าทำได้ไม่ยุ่งยากและใช้อุปกรณ์ไม่มาก

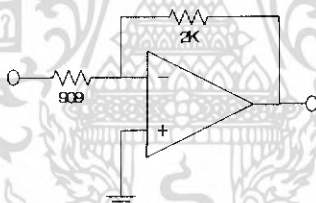
ใช้เทคนิคเอฟดีเนออร์ในการแปลงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เนื่องจากจากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบพาสซีฟแอลซีแอสเคเตอร์ จะมีตัวเหนี่ยวนำอยู่ในวงจรทั้งหมด 4 ตัว โดยที่ต่อลงกราวด์อยู่สอง 2 และไม่ได้ต่อกราวด์อยู่อีก 2 ตัว ตัวเหนี่ยวนำที่ไม่ได้ต่อลงกราวด์ 1 ตัว ถ้าใช้เทคนิคจีโอซีในการแปลงจะต้องในใช้อุปกรณ์ 4 ตัว เพื่อหลีกเลี่ยงตัวเหนี่ยวนำที่ไม่ได้ต่อลงกราวด์ จึงถ้าใช้การแปลงแบบเอฟดีเนออร์แทน ทำให้สามารถลดจำนวนอุปกรณ์และอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ลงได้



รูปที่ 6.5 วงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบแอคทีฟ



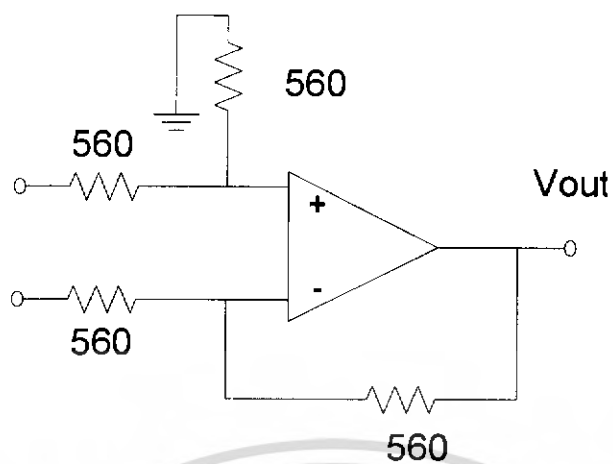
รูปที่ 6.6 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบแอคทีฟ



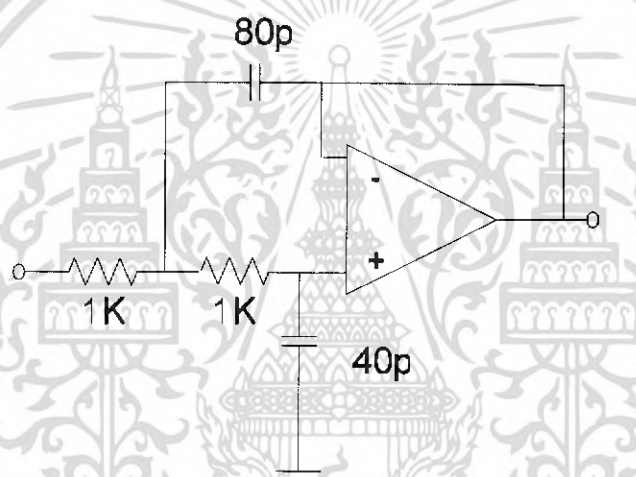
รูปที่ 6.7 วงจรขยายแบบกลับเฟส

จากรูปที่ 6.5 ต้องนำมาต่อкаскас (Cascade) กับรูปที่ 6.6 โดยจะใช้วงจรขยายแบบกลับเฟสซึ่งมีอัตราขยายเท่ากับ 2 (รูปที่ 6.7) ขึ้นอยู่เพื่อลดความต่างของอิมพีแดนซ์ของทั้งสองวงจร และเพื่อทำให้อัตราขยายรวมของระบบเป็น 0.5

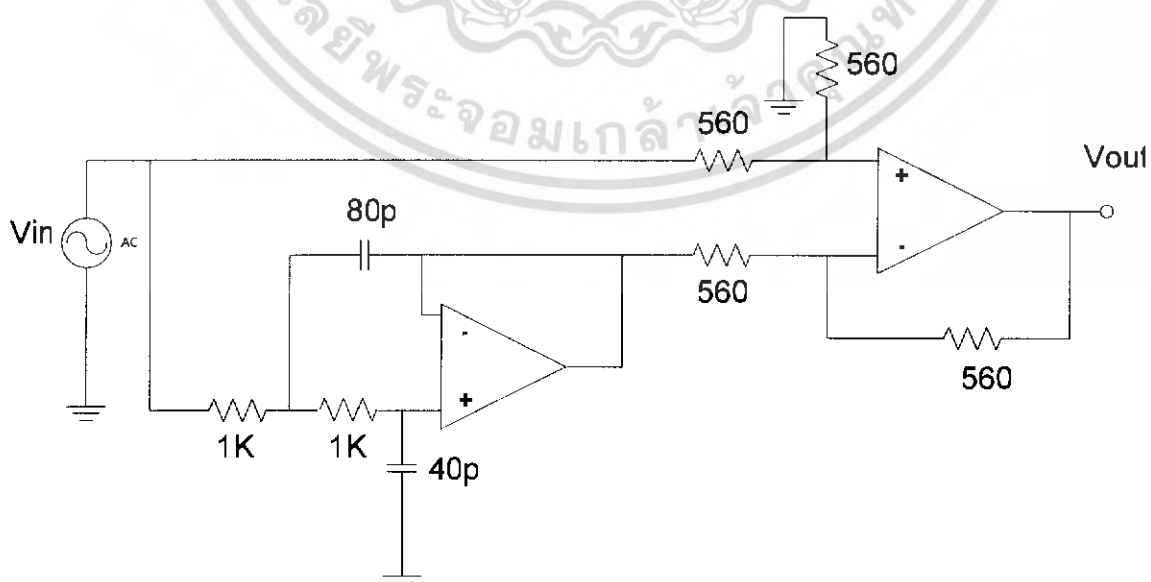
เนื่องจากเทคนิคจีไอซีมีการใช้อุปกรณ์หลายตัว และน่าจะเป็นสาเหตุให้เกิดการออสซิลเลต จึงทำการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านใหม่ โดยประยุกต์วงจรขยายความต่าง (รูปที่ 6.8) ร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบไบควอดซึ่งออกแบบให้มีความถี่คutoff ที่ 1.5 เมกกะเฮิร์ตซ์ (รูปที่ 6.9) ได้ดังรูปที่ 6.10



รูปที่ 6.8 วงจรขยายความต่าง

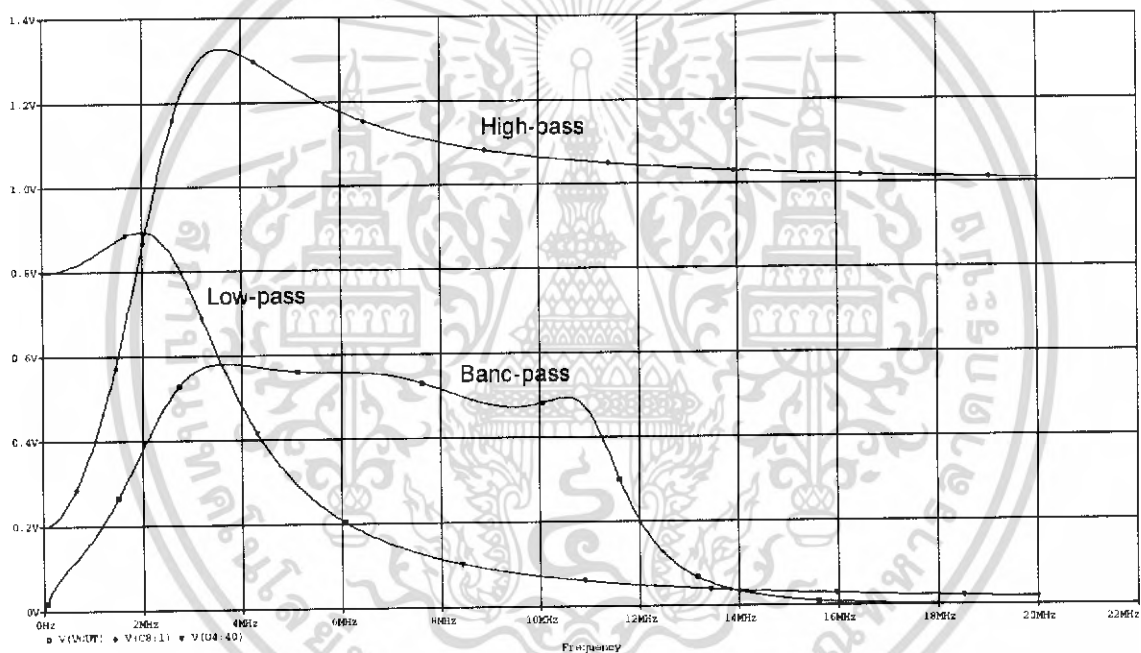


รูปที่ 6.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบไบควอด



รูปที่ 6.10 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้วงจรถ่ายความต่างร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้ณาไปเผยแพร่บนงานวิชาการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวงจรกรองความถี่สูงผ่านแบบนี้จะอาศัย การเปรียบเทียบแรงดันของขาอินพุททั้งสองขาของ วงจรขยายความต่าง โดยขนาดของแรงดันที่เอาต์พุทของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านนั้น ในช่วงที่ความถี่ ต่ำๆ (ต่ำกว่าความถี่คัทออฟของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน) จะมีขนาดเท่ากับ V_{in} และจะลดลงเรื่อยๆ ตามความถี่ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ในช่วงความถี่ต่ำแรงดันที่ขาอินพุทกลับเฟสของวงจรขยายความต่างมีขนาด เท่ากับ V_{in} ดังนั้นแรงดันที่เอาต์พุทของวงจรขยายความต่างจึงมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อความถี่สูงกว่า ความถี่คัทออฟมากๆ ขนาดแรงดันที่ขาอินพุทกลับเฟสจะเป็นศูนย์ ทำให้ขนาดแรงดันที่เอาต์พุทของ วงจรขยายความต่างมีขนาดเท่ากับ V_{in} ซึ่งเป็นลักษณะการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดย แสดงให้เห็น ดังรูปที่ 6.11



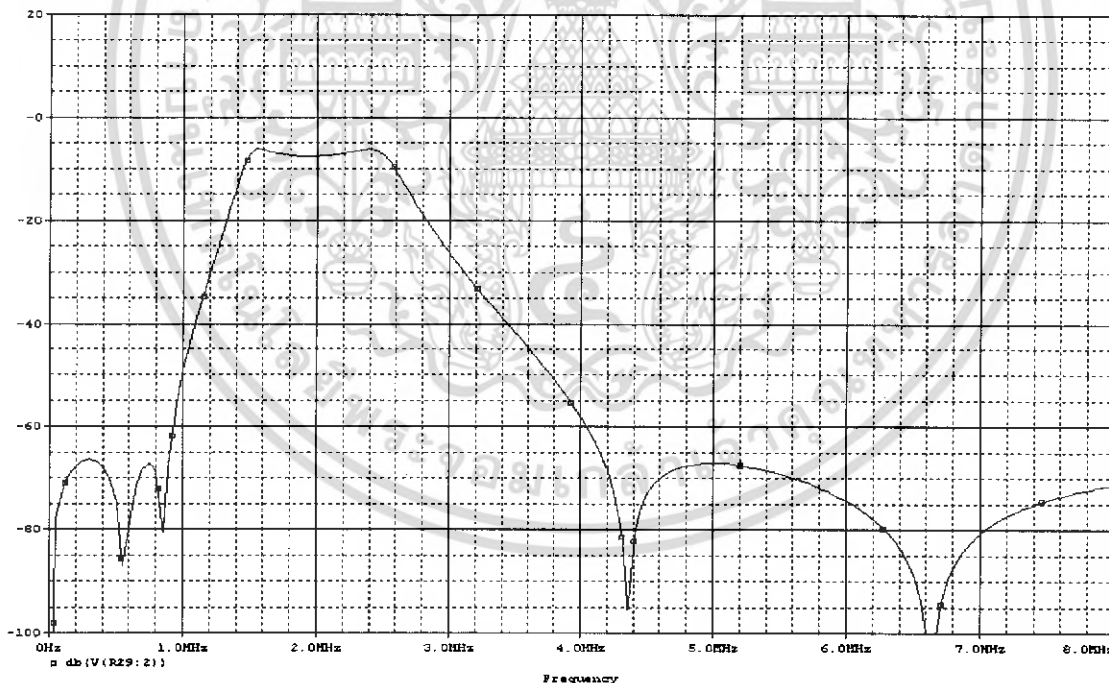
รูปที่ 6.11 กราฟแสดงการทำงานของวงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยประยุกต์ใช้ วงจรขยายความต่างและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

บทที่ 7

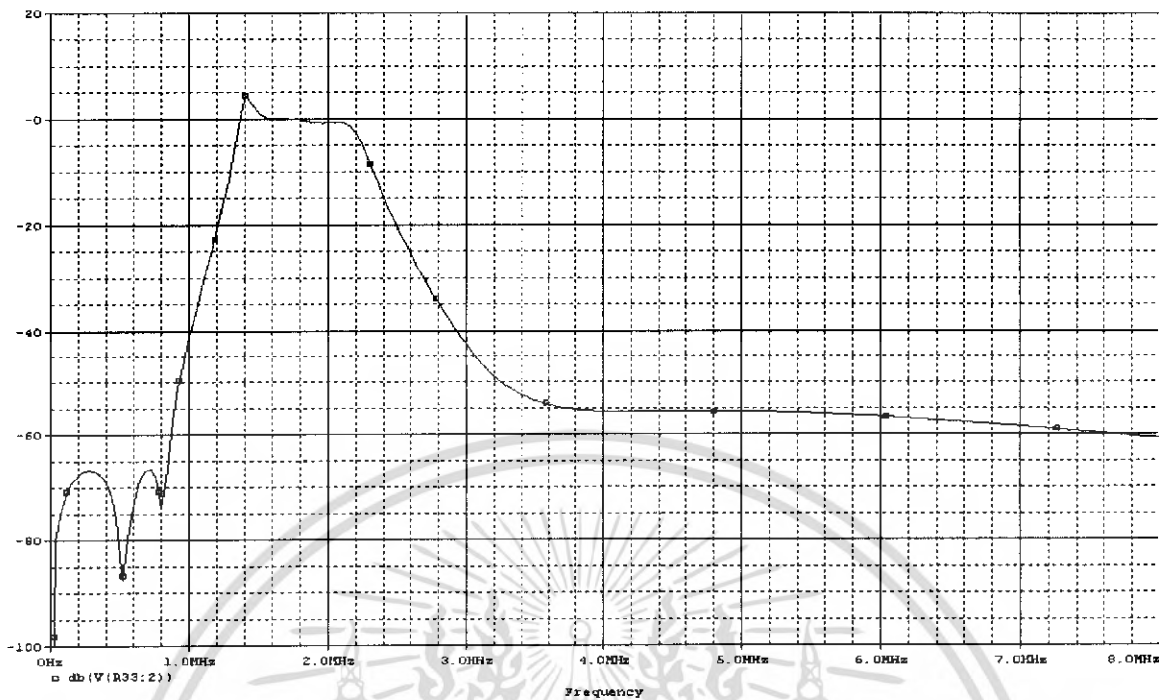
การจำลองการทำงานและวงจร

7.1 ผลการทดลอง

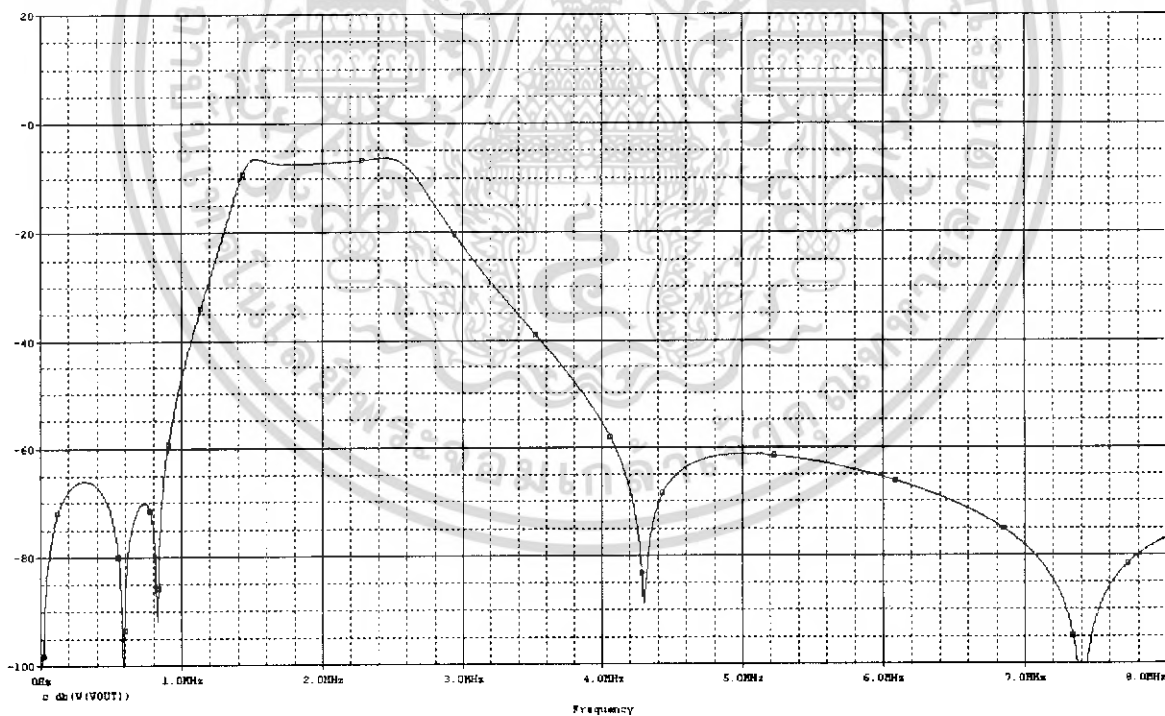
นำวงจรในรูปที่ 6.5, 6.6 และ 6.7 มาต่อกันแบบคาสเคดเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง และทำการทดสอบการตอบสนองความถี่ของวงจร ที่ใช้ออปแอมป์แตกต่างกัน โดยใช้ออปแอมป์แบบอุดมคติเพื่อพิสูจน์ทฤษฎี ออปแอมป์ AD844 มีเกนแบนด์วิดท์ 60 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งสามารถหาได้ง่าย และออปแอมป์ MAX4226 มีเกนแบนด์วิดท์ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ เพื่อพิสูจน์ข้อสันนิษฐานตามหลักการ ออกแบบวงจรอินทิเกรต ที่ต้องการออปแอมป์ที่มีเกนแบนด์วิดท์มากกว่าการใช้งานประมาณ 100 เท่า และเมื่อนำมาใช้เป็นวงจรกรองความถี่แล้ว ก็ควรจะต้องใช้ออปแอมป์ที่มีคุณสมบัตินี้เหมือนจึงจะทำให้ การตอบสนองความถี่ออกมานั้นใกล้เคียงกับการใช้ออปแอมป์แบบอุดมคติ จากนั้นจึงทำการจำลองการทำงาน ของออปแอมป์ทั้งสาม เพื่อดูการตอบสนองความถี่โดยใช้โปรแกรมออร์แคด พี-สไปซ์ ได้ผลดัง รูปที่ 7.1, 7.2 และ 7.3 ตามลำดับ



รูปที่ 7.1 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานบลูทูธ โดยการใช้ออปแอมป์แบบอุดมคติ



รูปที่ 7.2 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานบลูทูธ
โดยการใช้โอปแอมป์ AD844

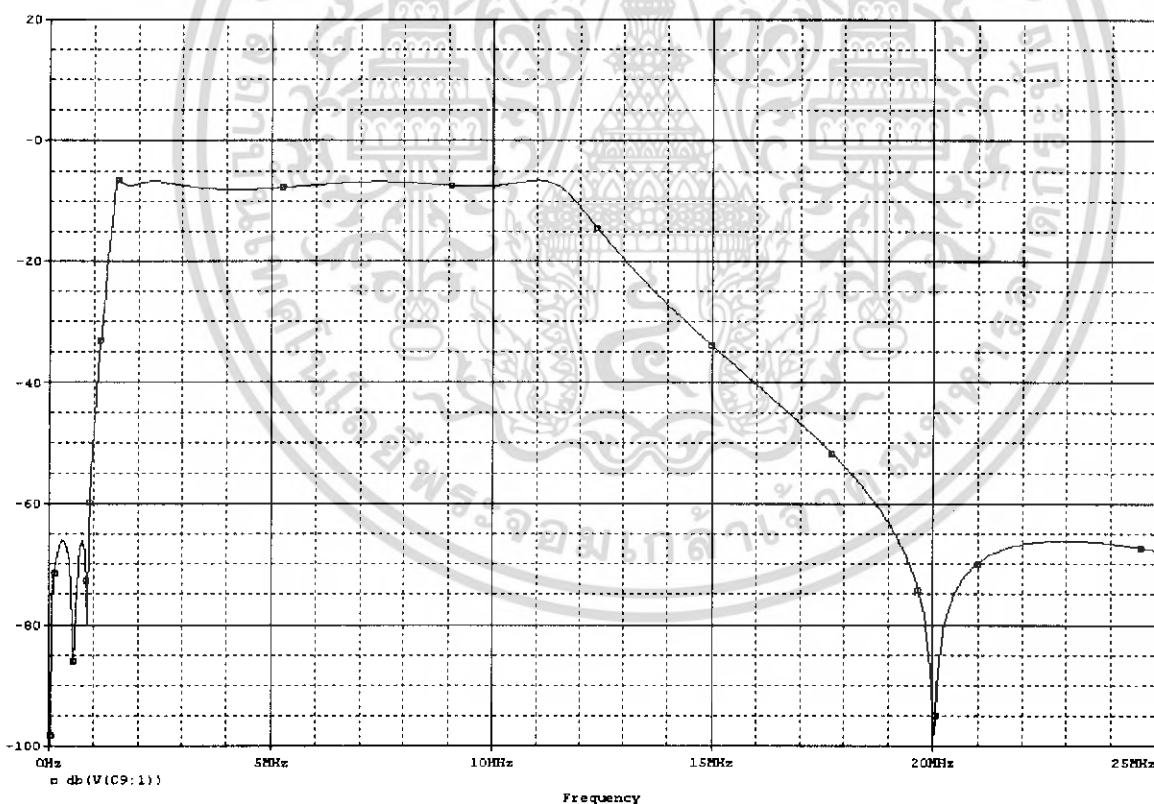


รูปที่ 7.3 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานบลูทูธ
โดยการใช้โอปแอมป์ MAX4226

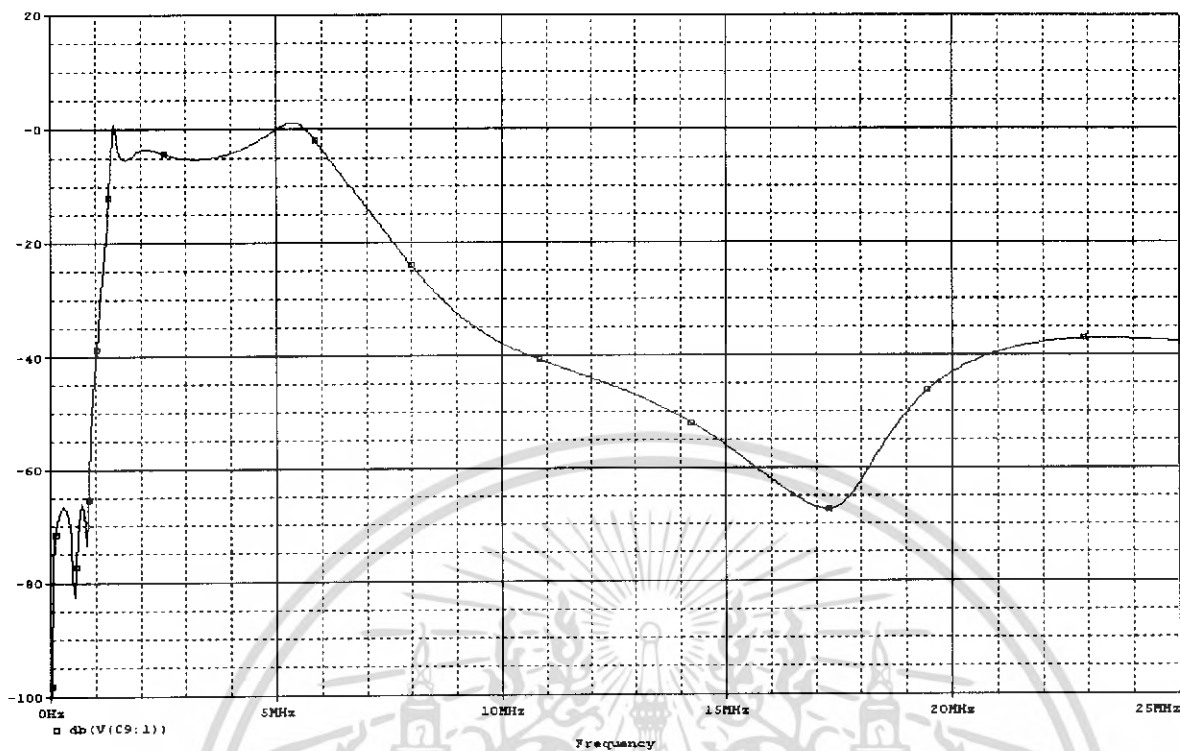
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.1 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณตามมาตรฐานบลูทูธ โดยใช้โอปแอมป์แบบอูคมคติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสามรูปแล้วจะเห็นได้ว่าการตอบสนองความถี่ของวงจรที่ใช้โอปแอมป์ AD844 ในรูปที่ 7.2 ซึ่งมีเกนแบนด์วิดท์ 60 เมกกะเฮิร์ตซ์ จะมีโอเวอร์ชูตในส่วนของจุดคัทออฟต่ำ แต่ก็ยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ ในขณะที่เมื่อใช้โอปแอมป์ MAX4226 ในรูปที่ 7.3 ซึ่งมีแบนด์วิดท์ 1 กิกะเฮิร์ตซ์ แล้วผลการตอบสนองความถี่ของวงจรจะได้ลักษณะใกล้เคียงกับรูปที่ 7.1 มาก

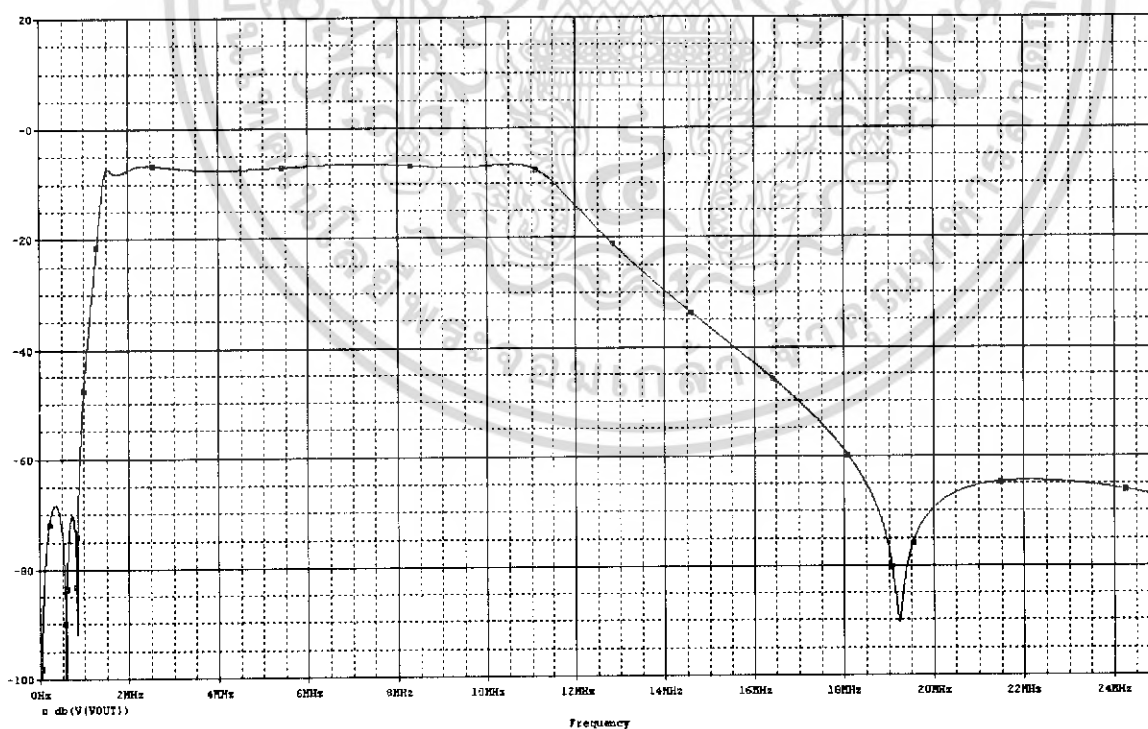
รูปที่ 7.4 แสดงให้เห็นถึงผลการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองสัญญาณตามมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย โดยใช้โอปแอมป์แบบอูคมคติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกันทั้งสามรูปแล้วจะเห็นได้ว่าการตอบสนองความถี่ของวงจรที่ใช้โอปแอมป์ AD844 ดังแสดงในรูปที่ 7.5 จะมีโอเวอร์ชูตในส่วนของจุดคัทออฟต่ำเช่นเดียวกับระบบบลูทูธ และจุดคัทออฟสูงก็มีค่าต่ำกว่าที่ได้ออกแบบไว้มาก แต่เมื่อใช้โอปแอมป์ MAX4226 ในรูปที่ 7.6 แล้วการตอบสนองความถี่ของวงจรจะได้ลักษณะใกล้เคียงกับรูปที่ 7.4 มาก มีการกระเพื่อมในช่วงความถี่ผ่านน้อยและมีจุดคัทออฟสูงตรงกับที่ออกแบบไว้



รูปที่ 7.4 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐานเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย โดยการใช้ออปแอมป์แบบอูคมคติ



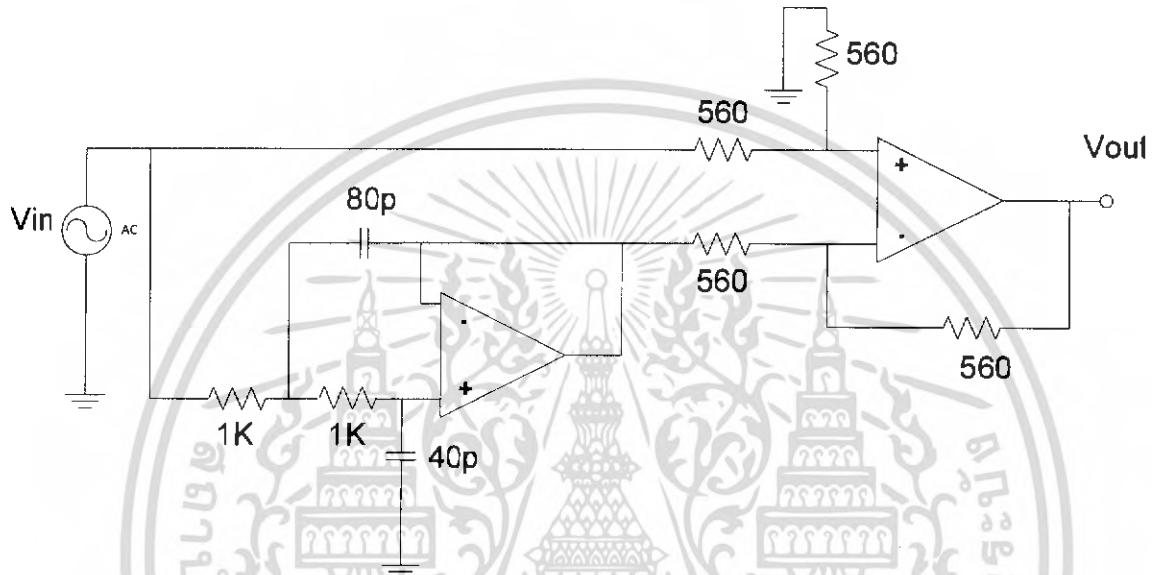
รูปที่ 7.5 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐาน
เครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย โดยการใช้โอปแอมป์ AD844



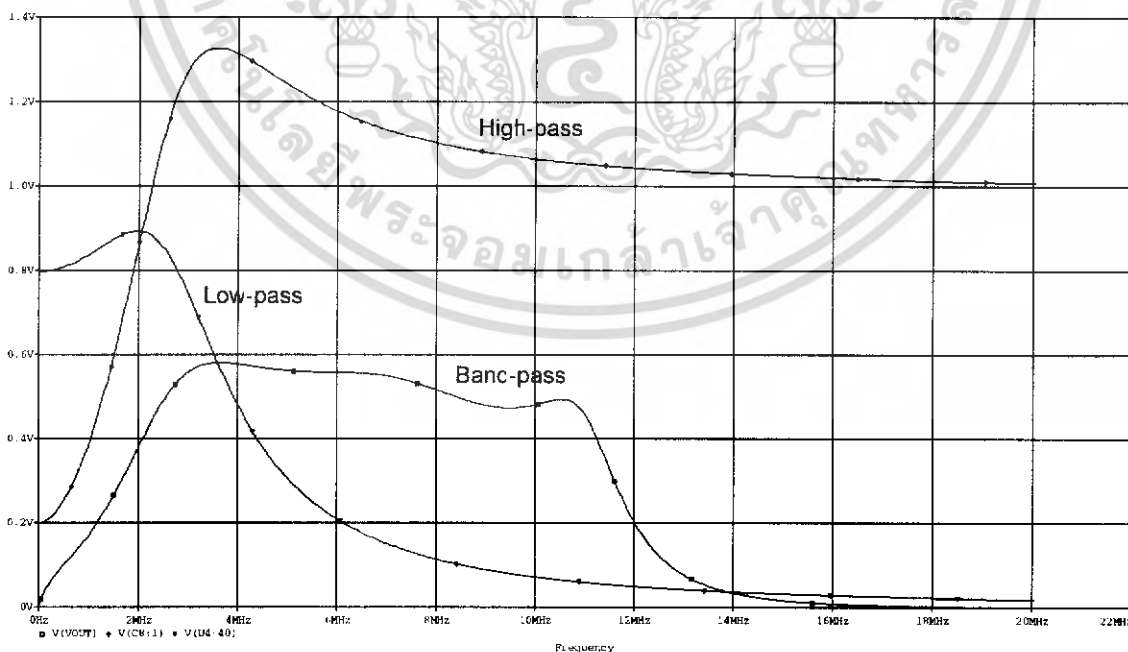
รูปที่ 7.6 ผลการตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงตามมาตรฐาน
เครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย โดยการใช้โอปแอมป์ MAX4226

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามเมื่อทำการทดสอบแบบทรานเซียนแล้ว วงจรข้างต้นพบว่าจะเกิดการออสซิลเลชันขึ้นเมื่ออินพุตมีขนาดมากกว่า 0.2 โวลต์ และเมื่อทำการแยกวงจรออกเป็นส่วนของความถี่สูงผ่านและส่วนของความถี่ต่ำผ่านพบว่าส่วนของความถี่สูงผ่านเป็นส่วนที่เกิดปัญหา ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของออปแอมป์ที่นำมาใช้ทำให้เฟสเปลี่ยนแปลงไปไม่ตรงกับการออกแบบ ดังนั้นจึงได้ทำการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านขึ้นใหม่ โดยการนำเอาวงจรขยายความต่างและวงจรกรองความถี่ต่ำมาประยุกต์ให้เป็นวงจรกรองความถี่สูงผ่าน ตามที่กล่าวไว้ในบทที่ 6 ซึ่งจะได้วงจรดังรูปที่ 7.7



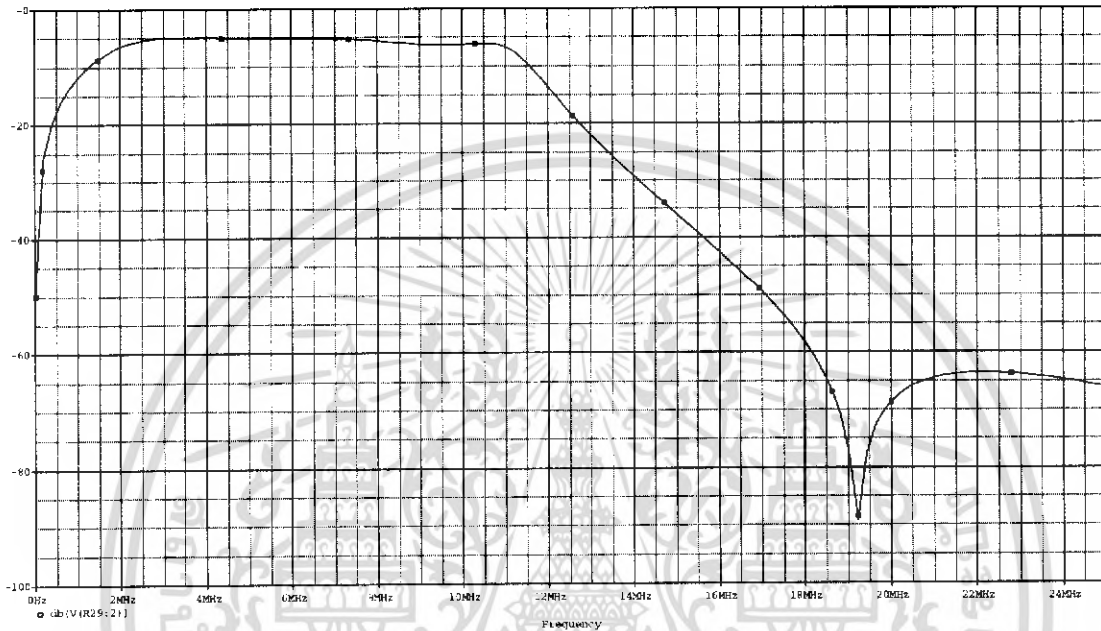
รูปที่ 7.7 วงจรกรองความถี่สูงผ่าน โดยใช้วงจรขยายความต่างร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน



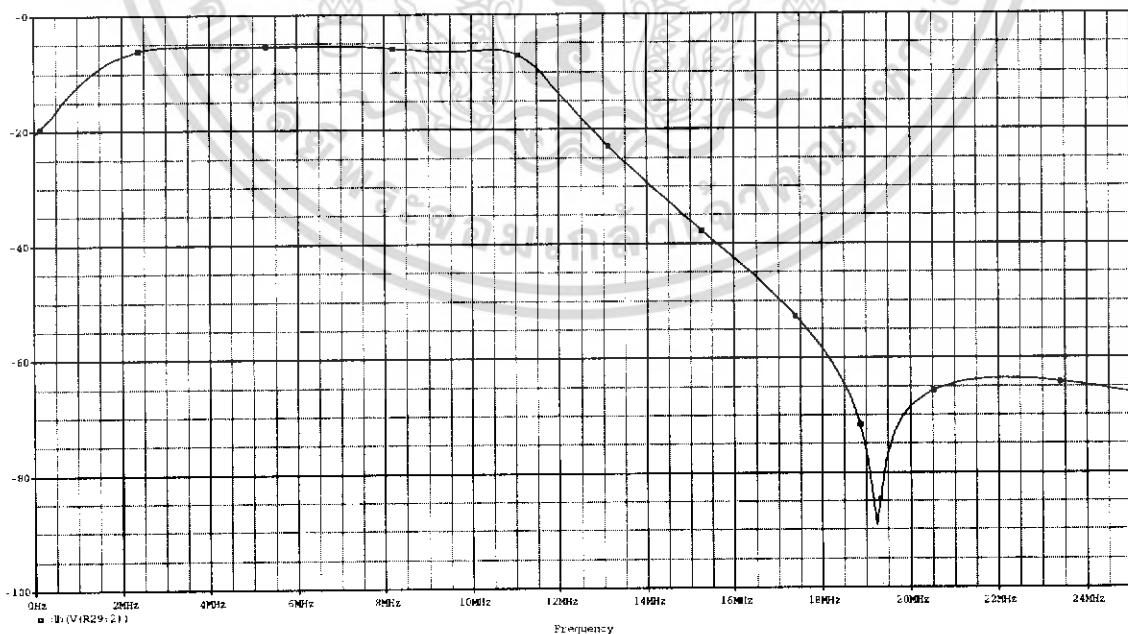
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่ของวงจรกรองความถี่สูงผ่านโดยประยุกต์ใช้

วงจรขยายความต่างและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 7.7 เมื่อเปรียบเทียบกับวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่ใช้เทคนิคจีโอซี (รูปที่ 6.5) จะเห็นว่ามีการใช้อุปกรณ์น้อยกว่าและรูปที่ 7.8 แสดงให้เห็นว่าในช่วงความถี่คัทออฟต่ำจะมีโอเวอร์ชูตค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นผลมาจากเฟสที่เปลี่ยนไปของวงจรกรองความถี่สูงผ่านด้วยเหตุนี้จึงได้ทดลองลดขนาดของสัญญาณที่ได้จากวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยลดอัตราขยายของวงจรลงจาก 1 เป็น 0.8 ดังรูป 7.9 และ 7.10 ตามลำดับ



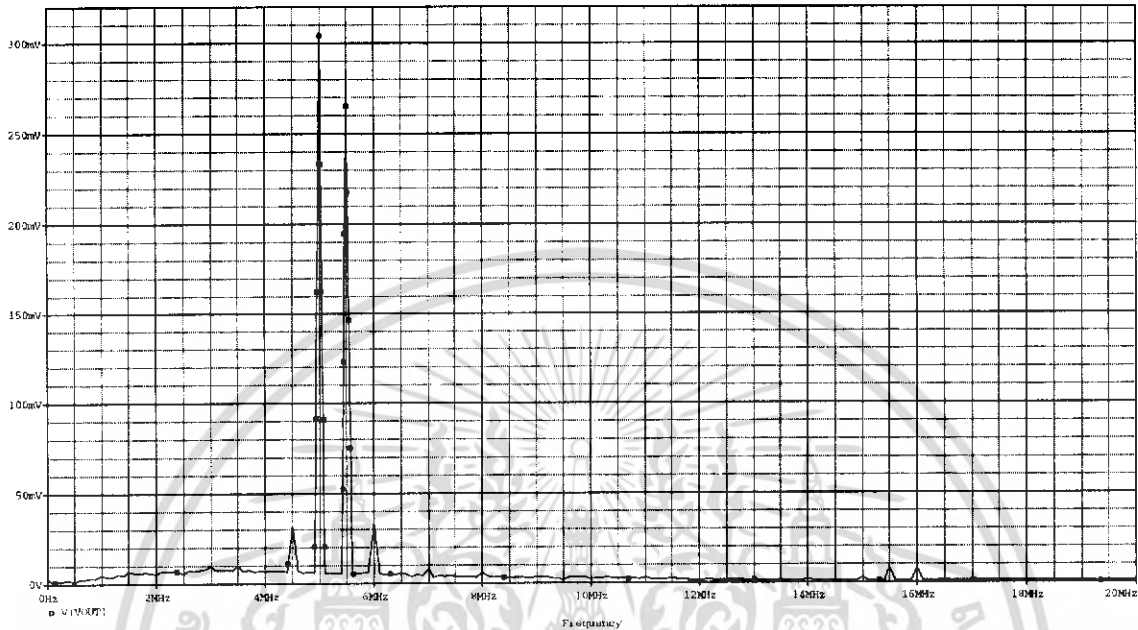
รูปที่ 7.9 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่โดยที่อัตราขยายของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเท่ากับ 1



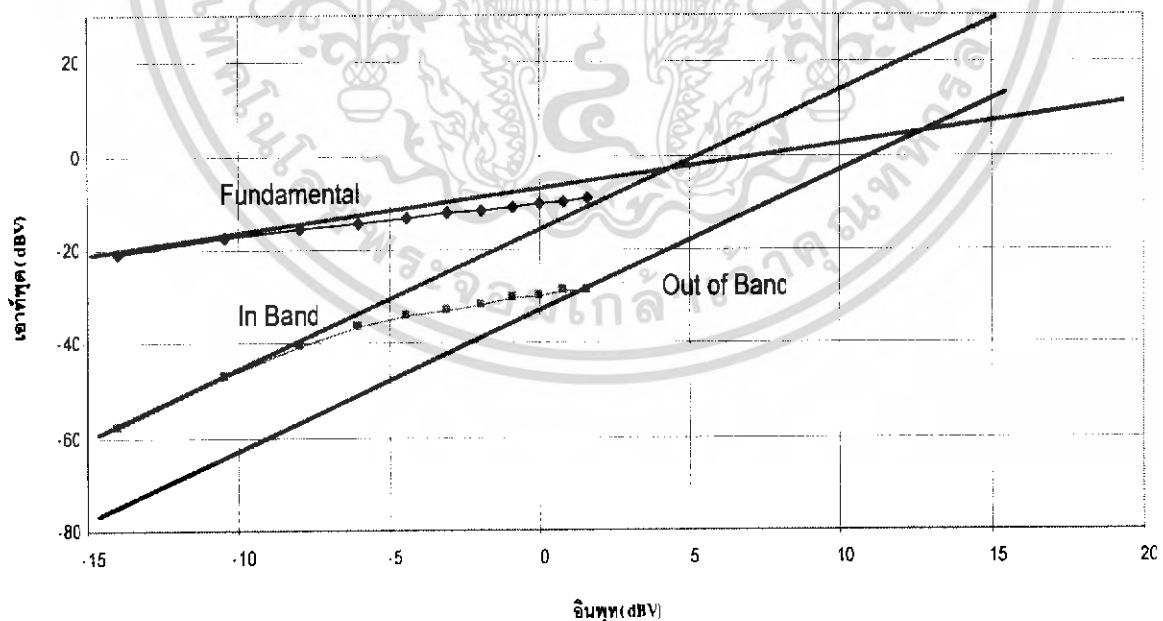
รูปที่ 7.10 กราฟแสดงการตอบสนองความถี่โดยที่อัตราขยายของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านเท่ากับ 0.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูป 7.9 และ 7.10 เมื่อลดอัตราขยายลงแล้วทำให้โอเวอร์ชูตที่เกิดขึ้นลดลงไปเพียง 0.2 dB เท่านั้นและมีผลให้ความชันในช่วงความถี่สูงผ่านลดลง ซึ่งทำให้ไม่ได้ตามมาตรฐานดั่งนั้นอัตราขยายเท่ากับ 1 จึงเหมาะสมมากที่สุด



รูปที่ 7.11 ทดสอบความเพี้ยนในช่วงความถี่ผ่าน โดยให้อินพุตด้วย สัญญาณความถี่ 5 เมกกะเฮิรตซ์และ 5.5 เมกกะเฮิรตซ์



รูปที่ 7.12 กราฟแสดงจุดตัดอันดับที่ 3 (IP3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.11 แสดงถึงการป้อนสัญญาณผสมระหว่างความถี่ 5 เมกะเฮิร์ตซ์และ 5.5 เมกะเฮิร์ตซ์ที่มีขนาด 1 โวลต์ เพื่อทดสอบหาความเพี้ยนอินเตอร์มอดูเลชันอันดับที่สามที่ความถี่ 4.5 เมกะเฮิร์ตซ์และ 6 เมกะเฮิร์ตซ์ จากนั้นทำการเปลี่ยนขนาดของอินพุตและนำข้อมูลที่ได้มาพลอตกราฟดังรูปที่ 7.12 เพื่อแสดงให้เห็นจุดตัดอันดับที่ 3 ของความถี่ในช่วงผ่านที่ 4 dBV และความถี่นอกช่วงผ่านที่ 13 dBV ซึ่งใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Asad A. Abidi [3] ซึ่งมีการนำไปใช้งานจริง

7.2 สรุป

ผลการตอบสนองความถี่จากรูปที่ 7.5 และ 7.6 ได้พิสูจน์ข้อสันนิษฐานที่ว่าในการออกแบบวงจรกรองความถี่ควรใช้อุปกรณ์ที่มีเกนแบนด์วิดท์สูงกว่าความถี่ที่ใช้งานประมาณ 100 เท่า เช่นเดียวกับวงจรอินทิเกรต หลังจากนั้นได้ทำการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรโดยใช้การจำลองการทำงานแบบทรานเซียน พบว่าวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่ใช้เทคนิคจิไอซีมีการออสซิลเลต ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจาก ค่าอุปกรณ์แฝงที่มีอยู่ในตัวอุปกรณ์ที่เลือกใช้ โดยเฉพาะความไม่สมบูรณ์ของออปแอมป์ที่ทำให้เฟสเปลี่ยนแปลงไปไม่ตรงกับกรอกแบบ ดังนั้นจึงได้ทำการเปลี่ยนมาใช้เทคนิคการออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านที่ประยุกต์ใช้วงจรขยายความต่างและวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งได้ออกแบบโดยใช้หลักการของการเปรียบเทียบขนาดของแรงดัน ทำให้วงจรที่ใช้มีความเรียบง่ายและใช้อุปกรณ์น้อย จึงมีความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรต้นแบบได้สำเร็จสูงกว่า ซึ่งจากการทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ของวงจรแล้ว สามารถทำได้ตรงตามมาตรฐานของทั้งสองระบบ จากการทดสอบเพื่อแสดงองค์ประกอบความเพี้ยนที่เกิดจากความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ โดยได้ทำการเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Asad A. Abidi พบว่าความเป็นเชิงเส้นของระบบมีค่าใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงประมาณได้ว่าความเป็นเชิงเส้นของวงจรมีสูงเพียงพอกับการใช้งาน

บทที่ 8

บทสรุป

บทสรุปและวิจารณ์

โครงการนี้ได้นำเสนอวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วง ที่สามารถปรับความกว้างของแบนด์วิดท์ได้ เพื่อให้สามารถทำงานครอบคลุมมาตรฐานการสื่อสารไร้สายสองมาตรฐาน คือ บลูทูธและเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย เนื่องจากทั้งสองมาตรฐานนี้ทำงานอยู่บนช่วงความถี่เดียวกัน การรวมวงจรรักษาของทั้งสองมาตรฐานเข้าด้วยกันโดยไม่เสียค่าใช้จ่ายเพิ่ม จะช่วยลดต้นทุนการผลิตลงได้มาก แต่เนื่องจากความกว้างของสัญญาณของทั้งสองมาตรฐานแตกต่างกันมาก จึงมีความท้าทายในการออกแบบวงจรเพื่อให้รองรับกับทั้งสองระบบ จากที่ผ่านมามีผู้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านไว้หลายวิธี โครงการนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการทดแทนอุปกรณ์จีไอซีและเอฟดีเอ็นอาร์ ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ผ่านเฉพาะช่วงแบบแอกทีฟ จากผลการทดลองส่วนของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านซึ่งใช้เทคนิคเอฟดีเอ็นอาร์สามารถทำงานได้ดีมาก ตรงตามที่ยกแบบไว้ทุกประการ มีความถี่คัทออฟและความสามารถในการลดทอนตรงกับที่ยกแบบไว้ ในส่วนของวงจรกรองความถี่สูงผ่านนั้น การใช้เทคนิคจีไอซี มีข้อดีในการใช้อุปกรณ์น้อยกว่าเทคนิคการทดแทนอุปกรณ์แบบอื่น แต่ในการทดสอบวงจรกลับเกิดการออสซิลเลชัน ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลมาจากเฟสที่เปลี่ยนไปเนื่องจากความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์ ทำให้วงจรไม่สามารถทำงานได้ จึงได้ออกแบบวงจรกรองความถี่สูงผ่านขึ้นใหม่ โดยการประยุกต์ใช้วงจรมายความต่างร่วมกับวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านแบบไบควอด ซึ่งอาศัยการเปรียบเทียบขนาดของแรงดันที่ขาอินพุทของวงจรมายความต่าง ทำให้สามารถลดจำนวนอุปกรณ์ลงได้อีก แต่ก็มีข้อด้อยที่แลกเปลี่ยนกันมากคือมีโอเวอร์ชูตขึ้นที่ความถี่คัทออฟ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านสามารถใช้ได้เพียงอันดับ 2 เพราะเมื่อใช้วงจรที่มีอันดับสูงกว่านี้ จะมีการเลื่อนเฟสเข้ามาเกี่ยวข้องมากขึ้น ทำให้โอเวอร์ชูตสูงชันมากกว่านี้หรืออาจจะทำให้ผลการตอบสนองความถี่ของวงจรไม่เป็นไปตามที่ยกแบบไว้ ซึ่งจากข้อจำกัดดังกล่าวเป็นผลให้ความชันที่ในช่วงกรองความถี่สูงผ่านไม่สูงมาก แต่เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐานที่กำหนดมาแล้วก็เพียงพอกับการใช้งาน และจากการทดสอบความเป็นเชิงเส้นของระบบ ซึ่งใช้ผลงานวิจัยของ Asad A. Abidi เป็นข้อมูลอ้างอิงแล้ว แสดงให้เห็นว่าวงจรที่ได้ออกแบบมานั้นมีความเป็นเชิงเส้นที่อยู่ในระดับมาตรฐานที่ยอมรับได้