บทที่ 4
การทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกและผลการวิจัย

4.1 เครื่องคอมพิวเตอร์และโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบวงจรกรองอนาลอกโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ ใช้โปรแกรมแมตแลป (MATLAB) เวอร์ชั่น 5.3 บนระบบปฏิบัติการไมโครซอฟท์วินโดวส์มิลเลนเนียม (Microsoft Windows Millennium) โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้มีรายละเอียดดังนี้

- หน่วยประมวลผลกลาง (CPU) AMD Athlon Thunderbird ความเร็ว 950 เมกะเฮิรตซ์
- เมนบอร์ด (Mainboard) MSI K7T Pro2-a ความเร็ว 200 เมกะเฮิรตซ์
- หน่วยความจำหลัก (SDRAM) Hitachi ขนาด 256 เมกะไบต์ ความเร็ว 133 เมกะเฮิรตซ์
- หน่วยเก็บข้อมูลหลัก (Harddisk) Seagate ขนาด 20 จิกะไบต์ ความเร็วรอบ 5,200 รอบต่อนาที

4.2 ทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำ

4.2.1 ทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำขั้นพื้นฐาน

ข้อกำหนดที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำแสดงดังตารางที่ 4.1

ตาราง 4.1 ข้อกำหนดในการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำ

f_p (เฮิรตซ์)	f_s (เฮิรตซ์)	K_p (เดซิเบล)	K_s (เดซิเบล)
1,500	3,000	1	35

โดยช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Passband) คือ ความถี่ตั้งแต่ 0 ถึง f_p เฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Stopband) คือ ความถี่ตั้งแต่ f_s เฮิรตซ์ขึ้นไป โดยในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้กำหนดอัตราการลดทอนของสัญญาณไม่เกิน K_p เดซิเบล และในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้กำหนดอัตราการลดทอนจะต้องมากกว่าหรือเท่ากับ K_s เดซิเบล

การกำหนดค่าพารามิเตอร์ก่อนการทดสอบ

ในการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 การกำหนดค่าพารามิเตอร์ของตัวแปรต่างๆที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม

pop_size	p_m	p_c	PercentRLC (เปอร์เซ็นต์)	PercentSub (เปอร์เซ็นต์)	PercentShort (เปอร์เซ็นต์)	segment_max
250	0.2	0.8	85	10	5	3

f_{min} (เฮิรตซ์)	f_{max} (เฮิรตซ์)	n_dec (จุดต่อเดเคด)
1	3×10^6	100

จากตาราง 4.2 ตัวแปร pop_size คือจำนวนประชากรที่ใช้ในการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึม ซึ่งจะมีค่าคงที่เสมอ

p_m คือ โอกาสที่โครโมโซมจะถูกเลือกมาทำการมิวเตชัน เช่น ถ้า p_m มีค่าเท่ากับ 0.2 จะมีโอกาสโครโมโซมจะถูกเลือกมาทำการมิวเตชันเท่ากับ 20 เปอร์เซ็นต์ของประชากรทั้งหมด

p_c คือ โอกาสที่โครโมโซมจะถูกเลือกมาทำการครอสโอเวอร์ ทั้งนี้ค่าของ $_{pm}$ และ p_c จะไม่เกี่ยวข้องกัน โดยค่าของ p_m บวก p_c ไม่จำเป็นต้องเท่ากับ 1.0 เนื่องจากในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้การทำงานของมิวเตชันและครอสโอเวอร์เป็นอิสระต่อกันนั่นเอง

PercentRLC คือ โอกาสที่จะสร้างอุปกรณ์ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ หรือตัวเก็บประจุเพียงตัวเดียว

PercentSub คือ โอกาสที่จะสร้างอุปกรณ์ที่เป็นตัวเหนี่ยวนำขนานกับตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับตัวเก็บประจุ (Sub Component)

PercentShort คือ โอกาสที่จะสร้างการเชื่อมต่อแบบไม่มีอุปกรณ์ตัวใดเชื่อมต่ออยู่ในตำแหน่งนั้น (Short Segment) ซึ่งค่าของ Percent_RLC บวก Percent_Sub บวก Percent_Short จะต้องมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์เสมอ ทั้งนี้เนื่องจากการสุ่มเลือกชนิดของอุปกรณ์จะต้องได้เป็นอุปกรณ์ชนิดใดชนิดหนึ่งจากสามรูปแบบนี้

segment_max คือ จำนวนอันดับเริ่มต้นสูงสุดที่เป็นไปได้ของวงจร ซึ่งจำนวนอันดับสูงสุดนี้ สามารถเปลี่ยนแปลงได้ในภายหลัง เมื่อโปรแกรมไม่สามารถหาค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าเดิมได้ครบ 3 รอบ จะกำหนดให้มีการเพิ่มจำนวนอันดับของวงจรเพื่อให้โปรแกรมสามารถหาโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีกว่าเดิมได้อีก

f_{min} คือ ความถี่ต่ำสุดที่พิจารณาในการออกแบบวงจรกรองอนาลอก

f_{max} คือ ความถี่สูงสุดที่พิจารณาในการออกแบบวงจรกรองอนาลอก

n_dec คือ จำนวนจุดที่ใช้ในการพิจารณาต่อเดเคด เช่น ถ้า n_dec เท่ากับ 100 จุดต่อเดเคด จะมีการพิจารณาในช่วงความถี่ 1 ถึง 10 เฮิรตซ์ จำนวน 100 จุด และในช่วงความถี่ 10 ถึง 100 เฮิรตซ์ 100 จุดตามลำดับ

ผลการทดสอบ

จากการทดสอบโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำ ตามข้อกำหนดในตาราง 4.1 ได้ผลดังแสดงในตาราง 4.3

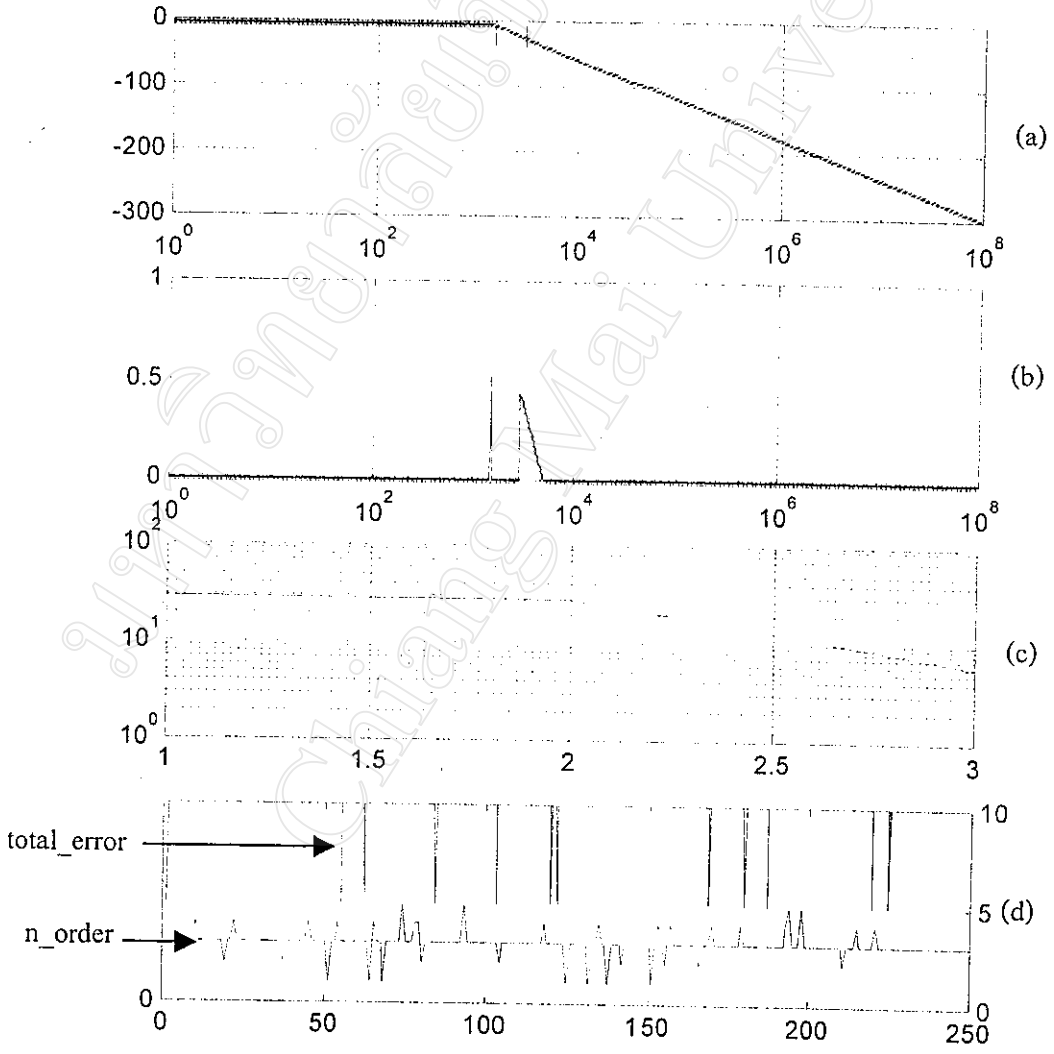
ตารางที่ 4.3 ผลการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA 1st	25	10 min 47.13 sec	8	8
GA 2nd	3	1 min 41.30 sec	4	5
GA 3rd	12	5 min 46.25 sec	5	5
Butterworth	-	-	10	10

จากตารางที่ 4.3 จะเห็นว่า เมื่อทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำแล้ว เจนเนติกอัลกอริทึมจะสามารถออกแบบวงจรตามข้อกำหนดในตารางที่ 4.1 ได้ โดยจากการออกแบบทั้ง 3 ครั้ง ได้วงจรที่แตกต่างกัน แต่ทั้ง 3 วงจรล้วนเป็นวงจรที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดเท่ากับศูนย์ทั้งหมด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ในการออกแบบ โดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมในครั้งที่สองได้จำนวนอันดับที่โปรแกรมสังเคราะห์ได้ต่ำสุดเท่ากับ 4 และใช้จำนวนอุปกรณ์เท่ากับ 5 ตัว

ทั้งนี้จำนวนอันดับที่โปรแกรมสังเคราะห์ได้กับจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ไม่จำเป็นต้องมีค่าเท่ากัน โดยหากมีตัวเหนี่ยวนำที่ต่อขนานกับตัวเก็บประจุ หรือตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุจะนับเป็นจำนวนอันดับเท่ากับ 1 และจะมีจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้เท่ากับ 2 ตัวนั่นเอง

รูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงการทำงานของโปรแกรมการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม โดยรูปที่ 4.1 (a) แสดงค่าของแรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆ ของวงจรกรองอนาลอก เมื่อกำหนดให้แรงดันของแหล่งจ่ายมีขนาดสูงสุด 1 โวลต์ ในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Passband) จะมีระดับแรงดันสูงสุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ $20\log(0.5)$ หรือประมาณ –6.02 เดซิเบล และแรงดันด้านขาออกในช่วงความถี่นี้ จะมีระดับการแกว่งไม่เกิน $\pm K_p$ เดซิเบล และในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Stopband) ระดับของแรงดันด้านขาออกจะต้องมีค่าต่ำกว่า $-6.02-K_s$ เดซิเบลนั่นเอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงการทำงานของโปรแกรมการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม

รูปที่ 4.1 (b) แสดงค่าความผิดพลาด ณ จุดความถี่ต่างๆของวงจรที่ออกแบบได้ โดยจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า กราฟจะมีลักษณะเพิ่มขึ้นสองจุด บริเวณจุด f_p และ จุด f_s ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันด้านขาออกในความถี่ช่วงนี้ ยังมีค่าไม่ตรงกับข้อกำหนดในการออกแบบวงจรนั่นเอง ทั้งนี้วงจรที่ออกแบบได้จะตรงกับข้อกำหนดในการออกแบบ เมื่อค่าความผิดพลาดรวมของวงจรนั้นๆ มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งหาได้จากผลรวมของค่าความผิดพลาด ณ ความถี่ต่างๆตั้งแต่ f_{min} ถึง f_{max} นั่นเอง

รูปที่ 4.1 (c) แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความผิดพลาดรวมของโครโมโซมตัวที่ดีที่สุดที่พบในแต่ละรุ่น ซึ่งจะมีค่าลดลงเรื่อยๆจนมีค่าเท่ากับศูนย์ในที่สุด

รูปที่ 4.1 (d) แสดงค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซมในประชากรทั้งหมด (total_error) โดยยังแสดงจำนวนอันดับของแต่ละโครโมโซม (n_order) ไว้อีกด้วย

โดยลักษณะโครโมโซมที่ดีที่สุดของวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้ในครั้งที่ 1 2 และ 3 แสดงดังรูปที่ 4.2(a) (b) และ (c) ตามลำดับ

308	598	308	598	202	553	303	581
0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0
1	2	0	0	0	0	0	0

(a) การทดสอบครั้งที่ 1

-2	598	308	584
531	0	0	0
305	0	0	0
1	1	0	0

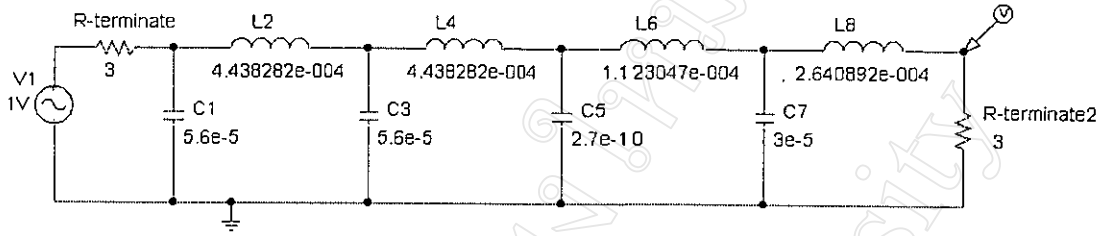
(b) การทดสอบครั้งที่ 2

692	285	692	288	667
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
0	27	0	0	0

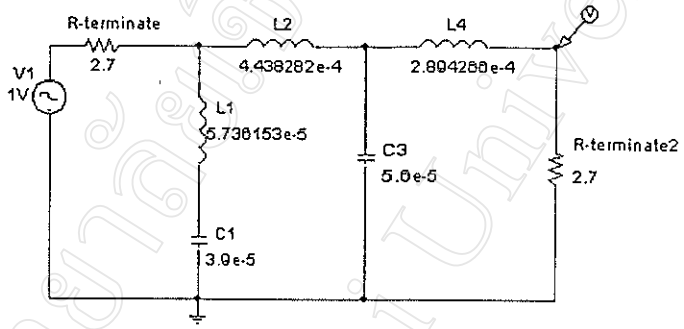
(c) การทดสอบครั้งที่ 3

รูปที่ 4.2 ลักษณะโครโมโซมของคำตอบที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้

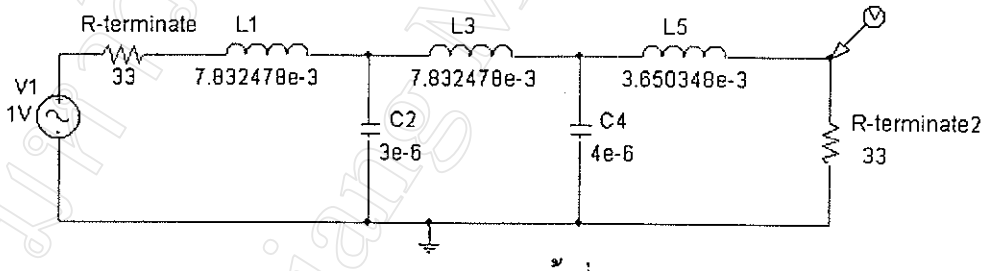
จากรูปที่ 4.2 (a) (b) และ (c) สามารถถอดรหัสออกเป็นการเชื่อมต่อของวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำได้ดังรูปที่ 4.3 (a) (b) และ (c) ตามลำดับ



(a) การทดสอบครั้งที่ 1



(b) การทดสอบครั้งที่ 2



(c) การทดสอบครั้งที่ 3

รูปที่ 4.3 ลักษณะการเชื่อมต่อของวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ได้จากการถอดรหัสของโครโมโซมในรูปที่ 4.2

จากรูปที่ 4.3 (a) จะเห็นว่า มีการเริ่มเชื่อมต่อตัวต้านทานปิดด้านหัวของวงจร (R-terminate) จากแหล่งจ่ายแรงดัน (V1) จากนั้นจึงต่อตัวเก็บประจุ (C1) ด้านล่าง และตัวเหนี่ยวนำด้านบน (L2) สลับกันไปจนถึงตัวเหนี่ยวนำตัวสุดท้าย (L8) แล้วจึงต่อตัวต้านทานปิดด้านท้ายของวงจร (R-terminate2) ซึ่งมีค่าเท่ากับตัวต้านทานปิดหัวของวงจร คือ 3 โอห์มลงกราวน์ ดังจะเห็นได้ว่าการเชื่อมต่อวงจรนี้มีลักษณะเหมือนกับการเชื่อมต่อแบบขั้นบันไดนั่นเอง

เช่นเดียวกันกับรูปที่ 4.3 (c) ซึ่งมีลักษณะการเชื่อมต่อคล้ายกับการเชื่อมต่อวงจรในรูปที่ 4.2 (a) โดยจะมีความแตกต่างกันที่จะเริ่มเชื่อมต่อจากตัวเหนี่ยวนำด้านบน (L1) ก่อน จากนั้นจึงสลับเป็นตัวเก็บประจุด้านล่างไปตามลำดับ ซึ่งรหัสของยีนส์ภายในตำแหน่ง (4,1) ของโครโมโซมในรูปที่ 4.1 (a) และ (c) จะเป็นตัวกำหนดว่าจะให้วงจรเริ่มเชื่อมต่อจากด้านบนหรือล่างก่อนนั่นเอง

ในรูปที่ 4.3 (b) จะสังเกตเห็นได้ว่า มีการเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำ (L1) อนุกรมกับตัวเก็บประจุ (C1) ซึ่งทำให้เกิดจุดขั้ว (Pole) ขึ้น โดยจุดขั้วนี้จะเป็นส่วนที่ช่วยให้แรงดันด้านขาออกของ วงจรในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Stop-band) จะถูกลดทอนได้เร็วขึ้น จึงมีผลทำให้วงจรที่ออกแบบได้โดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมในครั้งที่ 2 นี้มีจำนวนอันดับที่ต่ำ และใช้จำนวนอุปกรณ์ที่น้อยกว่าการออกแบบในครั้งอื่น โดยการเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำและตัวอนุกรมที่ทำให้เกิดการสั่นพ้อง (Resonance) เป็นแบบขั้ว (Pole) หรือแบบศูนย์ (Zero) นั้น จุดความถี่สั่นพ้องจะสามารถคำนวณได้ดังสมการ (4.1)

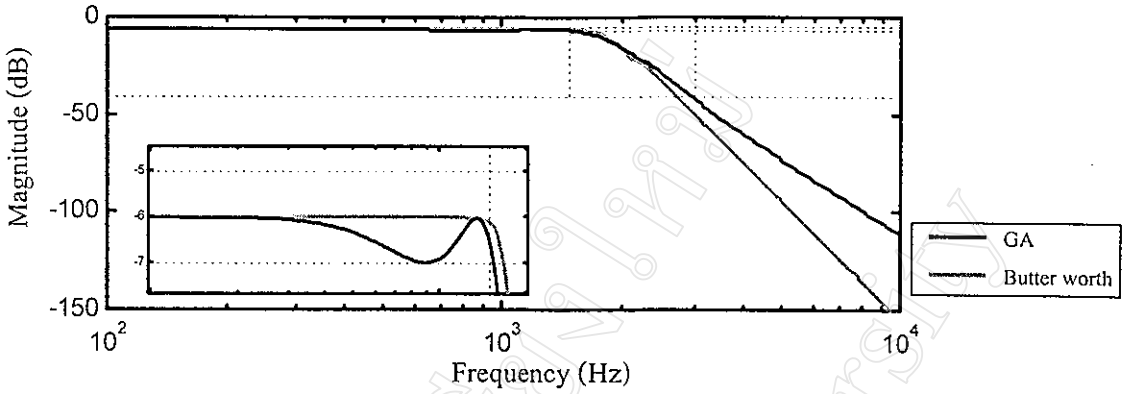
$$f_{resonance} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{4.1}$$

เมื่อ $f_{resonance}$ คือ จุดความถี่สั่นพ้อง

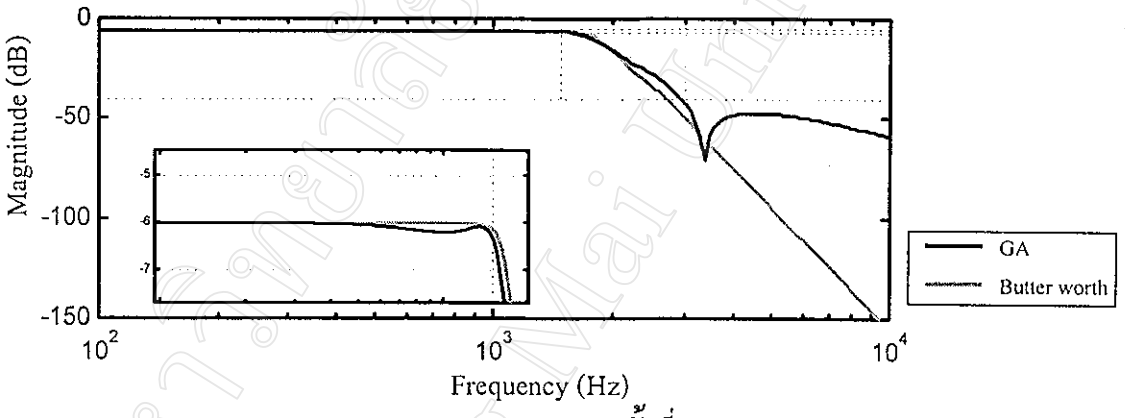
L คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็นเฮนรี

C คือ ค่าของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็นฟารัด

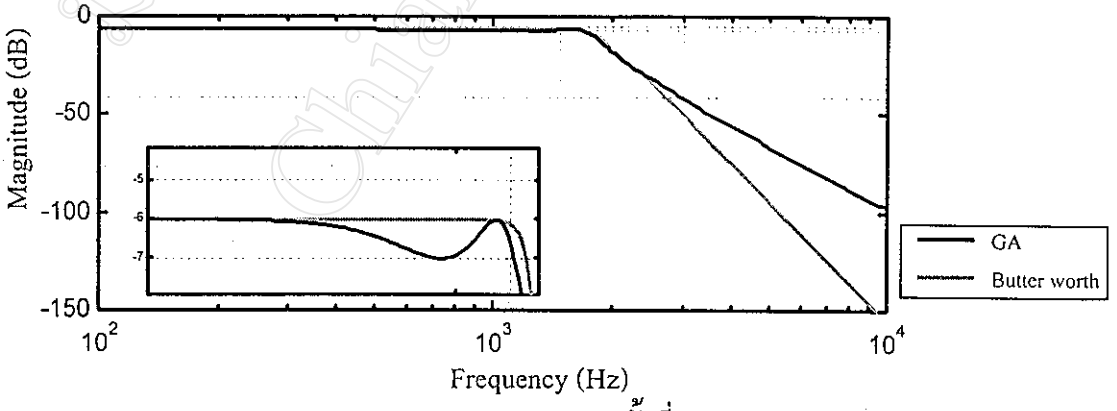
นอกจากนี้ยังได้นำข้อกำหนดในการออกแบบเดียวกันนี้ไปออกแบบวงจร โดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต (Butterworth Approximation) ซึ่งสามารถออกแบบได้วงจรที่มีจำนวนอันดับเท่ากับ 7 แต่เมื่อนำมาหาค่าความผิดพลาดแล้ว พบว่า เกิดความผิดพลาดที่ความถี่ f_p ซึ่งแรงดันด้านขาออกของวงจรตกลงต่ำกว่า $-K_p$ เดซิเบล ดังนั้นจึงแก้ไขโดยการกำหนดให้ค่าความถี่ f_p เพิ่มขึ้นเป็น 1,800 เฮิรตซ์ f_s ใช้ค่าเดิมคือ 3,000 เฮิรตซ์ จึงสามารถหาค่าความผิดพลาดรวมได้เท่ากับ 0 โดยใช้จำนวนอันดับเท่ากับ 10 โดยลักษณะแรงดันด้านขาออกของวงจรที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบครั้งที่ 1 2 และ 3 เปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ตแสดงดังรูปที่ 4.4 (a) (b) และ (c) ตามลำดับ



(a) การทดสอบครั้งที่ 1



(b) การทดสอบครั้งที่ 2



(c) การทดสอบครั้งที่ 3

รูปที่ 4.4 แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆของวงจรที่ออกแบบโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม

4.2.2 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

การทดสอบต่อจากนี้ไปจะเป็นการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกในด้านต่างๆ ซึ่งจะกำหนดให้การเปลี่ยนแปลงข้อกำหนดเพียงบางค่าเท่านั้น โดยข้อกำหนดอื่นๆและค่าพารามิเตอร์ของเจนเนติกอัลกอริทึมจะใช้ค่าเดิมทั้งหมดตามตารางที่ 4.1 และ 4.2 ตามลำดับ

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณ (K_p) ต่ำ คือ มีค่าเท่ากับ 0.05 เดซิเบล

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.5

4.2.3 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันมีค่าอยู่ระหว่างจุด f_p คือ 1,500 เฮิรตซ์ และจุด f_s คือ 1,600 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ แสดงดังตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.6

4.2.4 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลอดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_s) มีค่าเท่ากับ 200 เดซิเบล และกำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_p) มีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.6 และรูปที่ 4.7

4.2.5 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_p คือ 1.5 เมกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_s คือ 3 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8

4.2.6 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_p คือ 150 เมกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_s คือ 300 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.9

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	20	9 min 58.41 sec	6	8
Butterworth	-	-	12	12

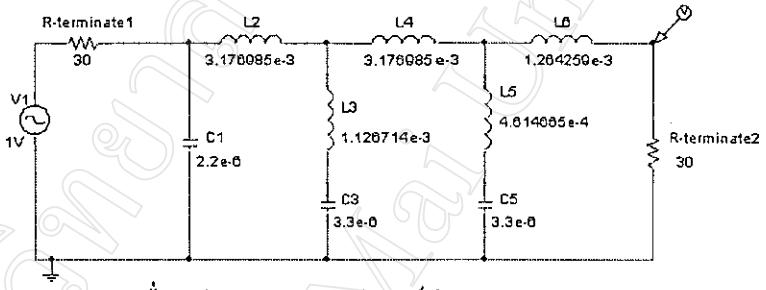
283 692 -2 692 -2 660

0 0 656 0 625 0

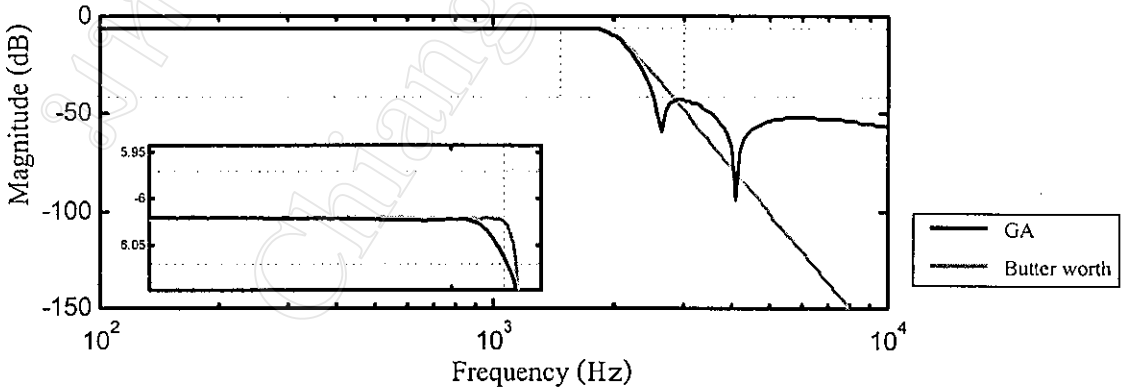
0 0 286 0 286 0

1 26 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

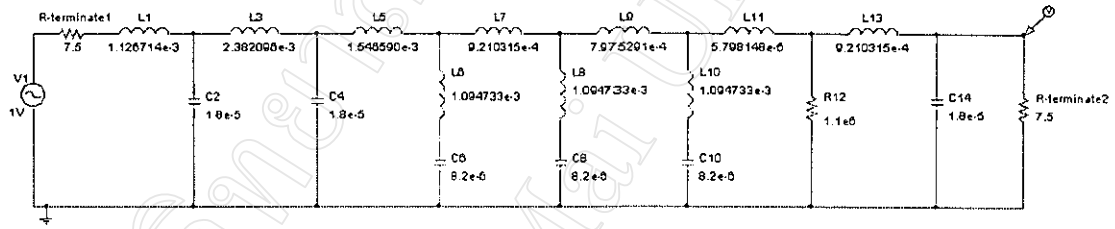
รูปที่ 4.5 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

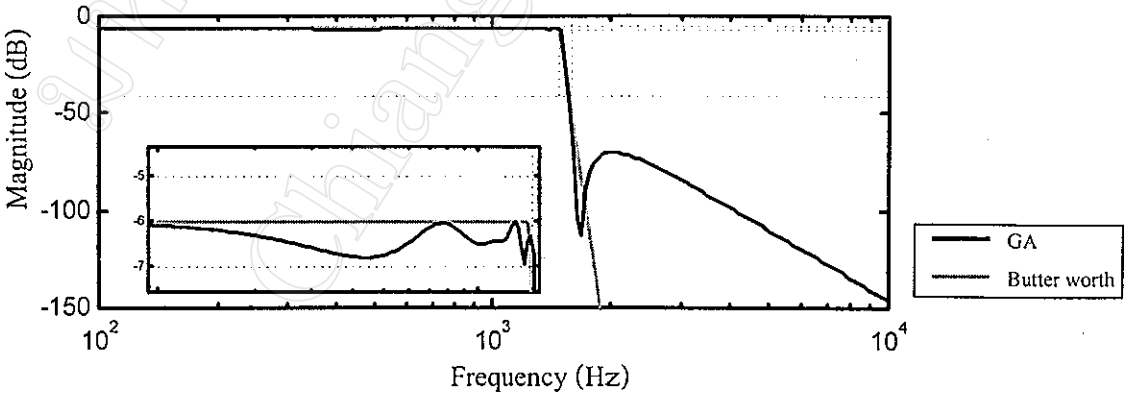
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	84	41 min 6.20 sec	14	17
Butterworth	-	-	73	73

656	298	682	298	667	-2	649	-2	644	-2	473	136	649	298
0	0	0	0	0	655	0	655	0	655	0	0	0	0
0	0	0	0	0	295	0	295	0	295	0	0	0	0
0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

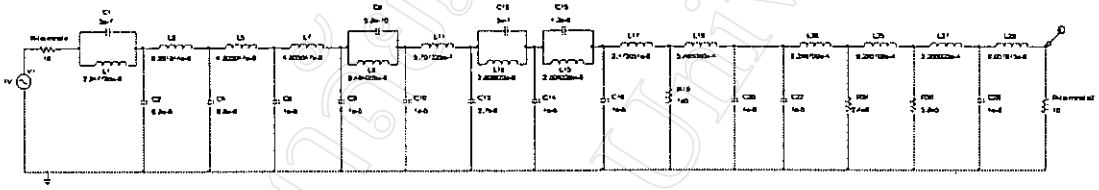
รูปที่ 4.6 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

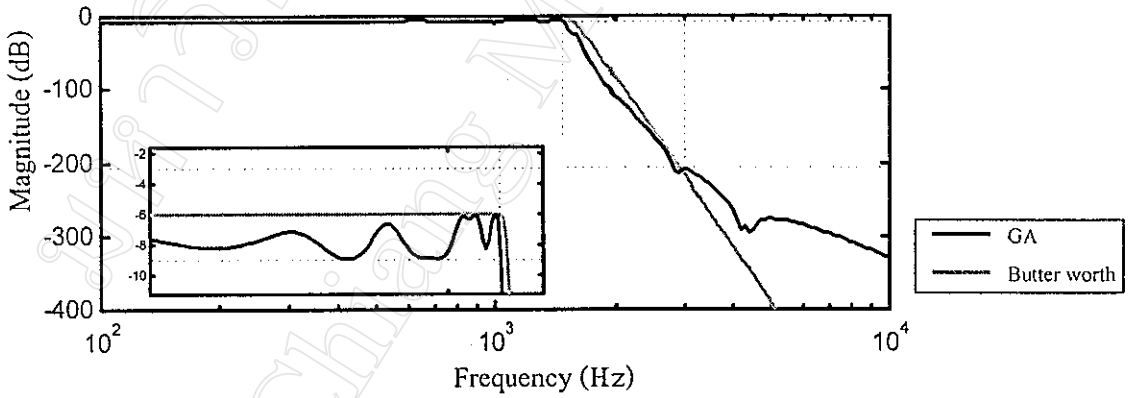
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	175	1 hr 53 min 51.52 sec	28	32
Butterworth	-	-	40	40

-1 293 688 293 676 296 676 296 -1 296 380 284 -1 296 -1 296 650 111 605 288 0 296 622 144 622 129 576 288 435
660 0 0 0 0 0 0 0 665 0 0 0 656 0 656 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
274 0 0 0 0 0 0 0 211 0 0 0 274 0 279 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 15 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

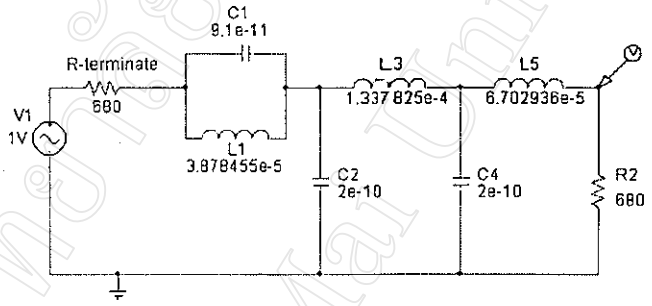
รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์

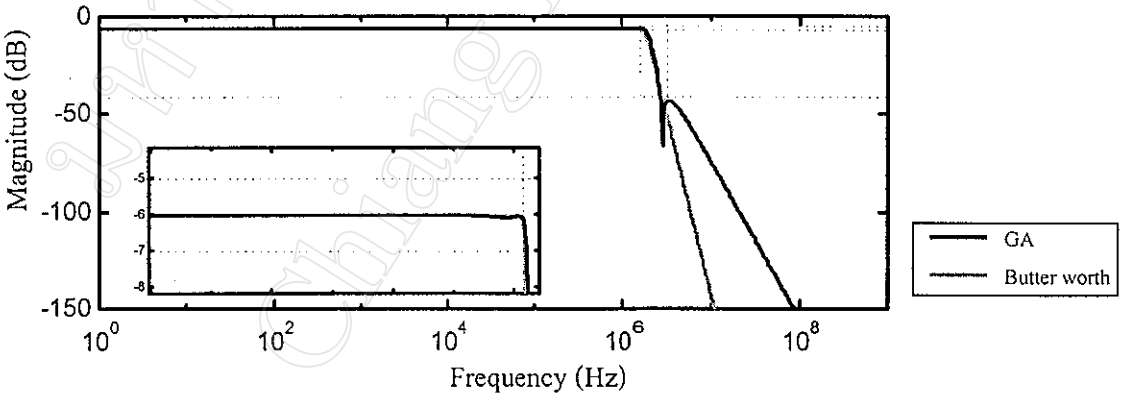
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	12	7 min 1.99 sec	5	6
Butterworth	-	-	9	9

$$\begin{matrix} -1 & 198 & 582 & 198 & 558 \\ 539 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 190 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 59 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำที่ช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	12	7 min 14.68 sec	5	6
Butterworth	-	-	9	9

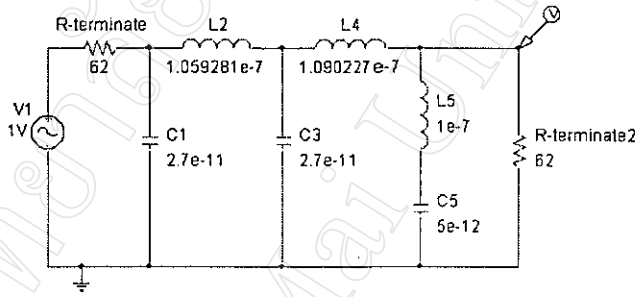
176 334 176 335 -2

0 0 0 0 333

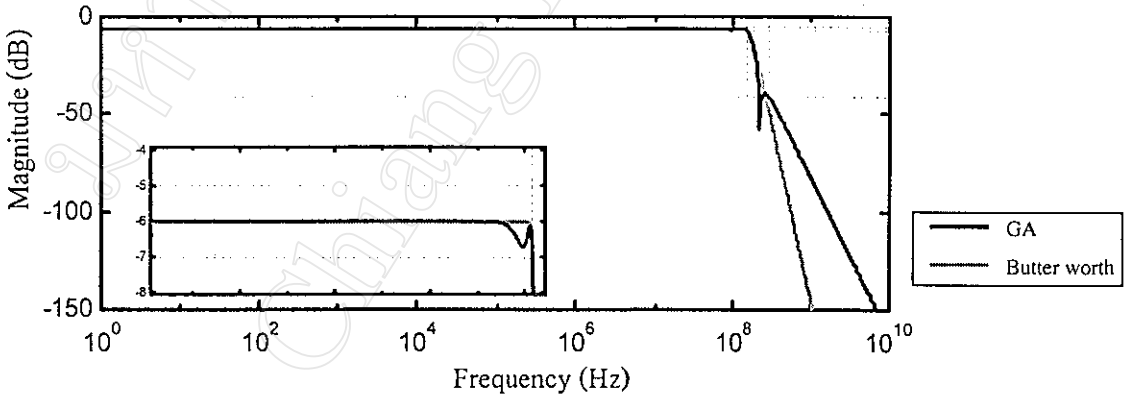
0 0 0 0 168

1 34 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.9 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำ
ที่ช่วงความถี่ 100 เมกะเฮิรตซ์

4.3 การทดสอบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูง

4.3.1 ทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐาน

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_s คือ 10,000 เฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่จุด f_p คือ 20,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 4.9 และรูปที่ 4.10

4.3.2 การทดสอบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_p) มีค่าเท่ากับ 0.05 เดซิเบล

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.11

4.3.3 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันมีค่าอยู่ระหว่างจุด f_s คือ 10,000 เฮิรตซ์ และจุด f_p คือ 11,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบแสดงดังตารางที่ 4.11 และรูปที่ 4.12

4.3.4 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_s) มีค่าเท่ากับ 200 เดซิเบล และกำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.12 และรูปที่ 4.13

4.3.5 การทดสอบบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_s คือ 1 เมกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_p คือ 2 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

4.3.6 การทดสอบบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_s คือ 10 เมกะเฮิรตซ์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_p คือ 20 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.14 และรูปที่ 4.15

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Chiang Mai University

ตารางที่ 4.9 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐาน

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	9	3 min 46.4 sec	4	6
Butterworth	-	-	11	22

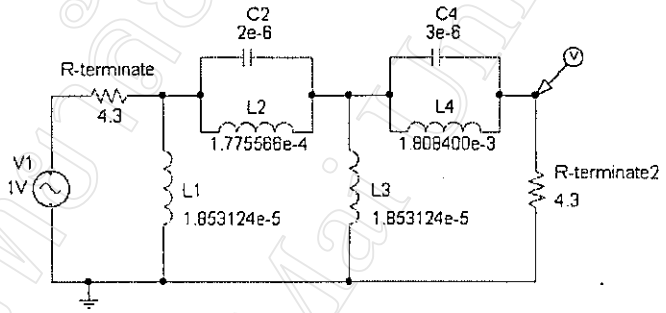
494 -1 494 -1

0 568 0 644

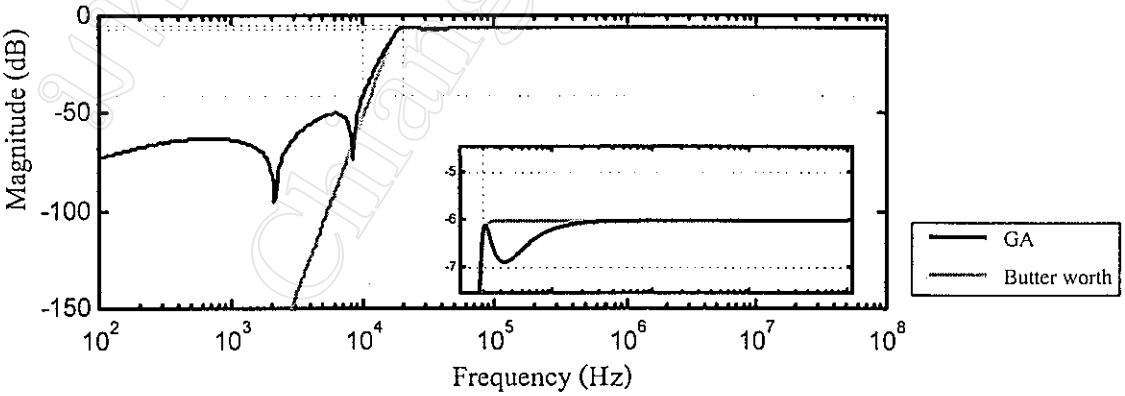
0 282 0 285

1 6 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงขั้นพื้นฐาน

ตารางที่ 4.10 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	27	13 min 24.99 sec	7	14
Butterworth	-	-	14	14

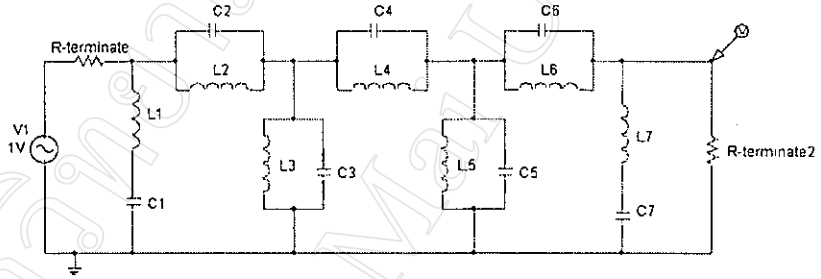
-2 -1 -1 -1 -1 -1 -2

559 591 516 591 516 591 559

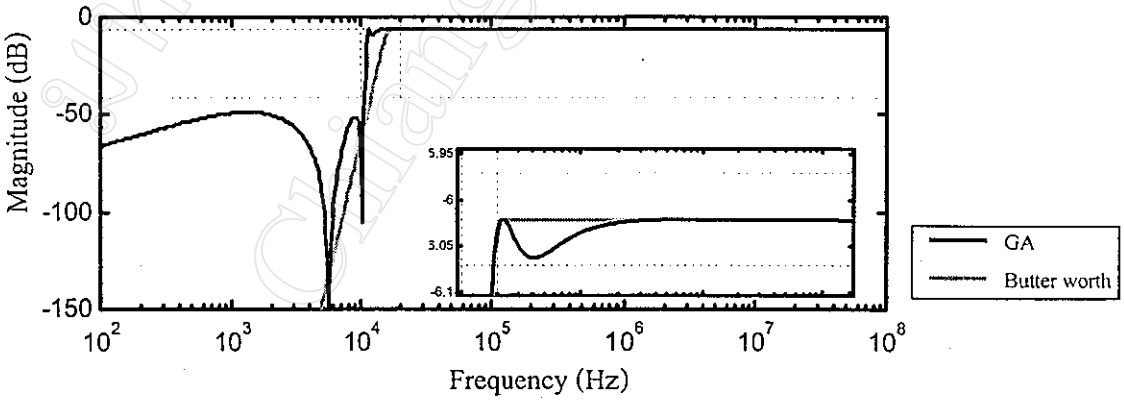
281 283 182 283 180 283 281

1 5 0 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

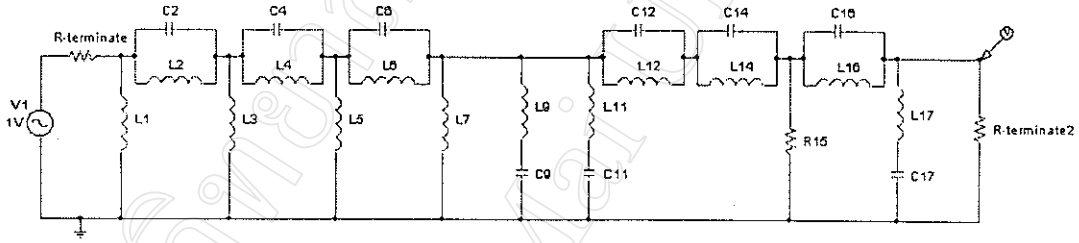
รูปที่ 4.11 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.11 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

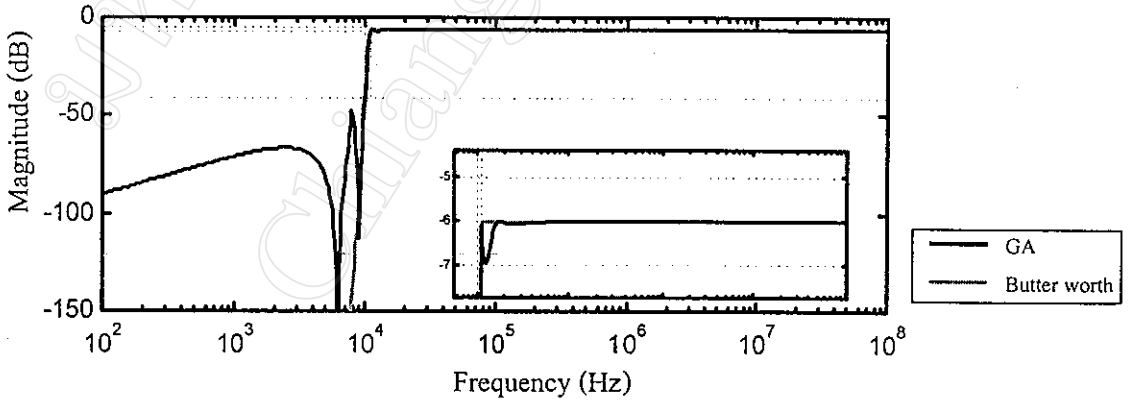
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	108	6 min 47.25 sec	14	23
Butterworth	-	-	50	50

558	-1	534	-1	534	-1	558	0	-2	0	-2	-1	0	-1	115	-1	-2	
0	598	0	598	0	598	0	0	608	0	608	430	0	430	0	528	608	
0	280	0	280	0	280	0	0	274	0	274	312	0	312	0	292	274	
1	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

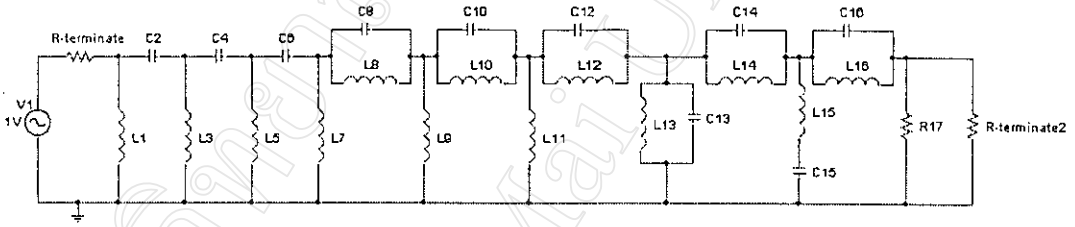
รูปที่ 4.12 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

ตารางที่ 4.12 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้อัตรา
การลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

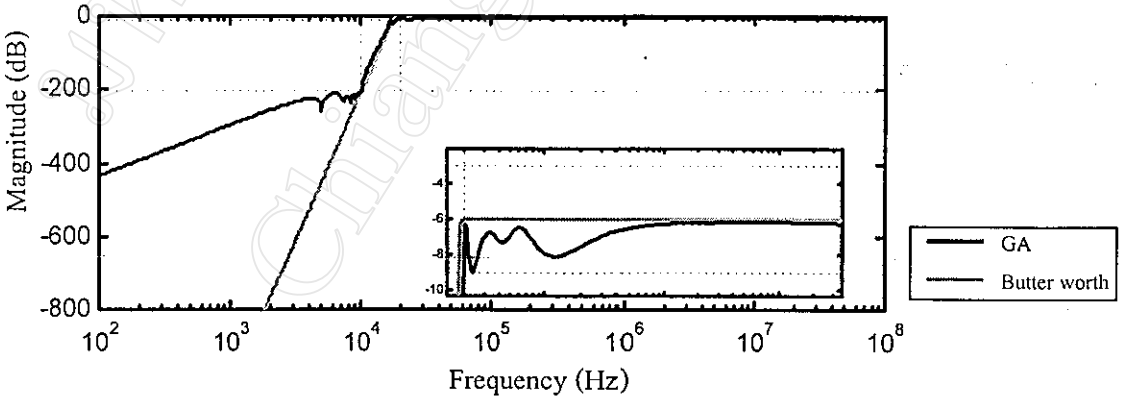
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	83	51 min 48.13 sec	17	24
Butterworth	-	-	40	40

459	288	459	288	459	288	459	-1	459	-1	474	-1	-1	-1	-2	-1	35
0	0	0	0	0	0	0	589	0	564	0	556	487	540	522	467	0
0	0	0	0	0	0	0	285	0	285	0	285	208	288	292	303	0
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบ
เทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.13 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่กำหนดให้
อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.13 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	10	5 min 28.95 sec	5	6
Butterworth	-	-	9	9

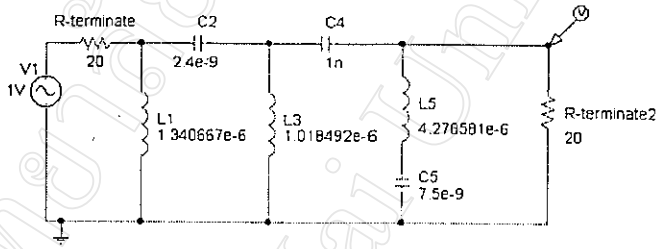
408 226 399 226 -2

0 0 0 0 446

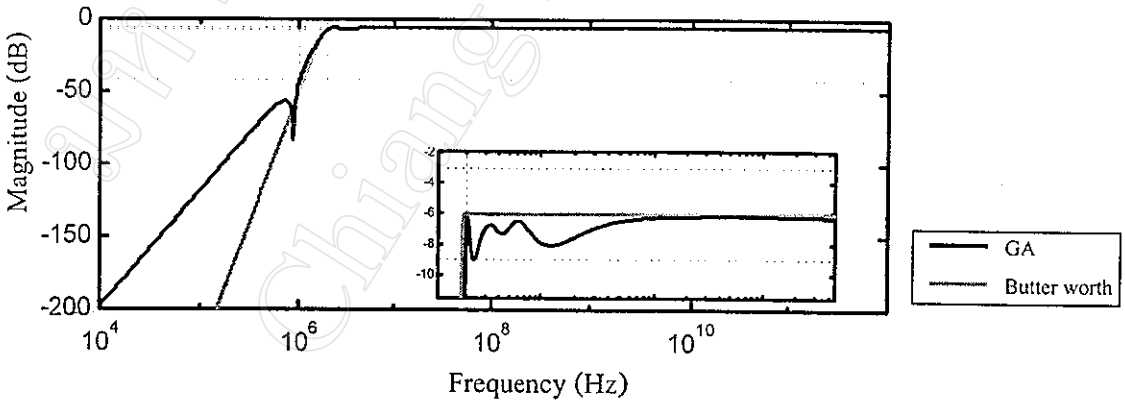
0 0 0 0 242

1 22 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.14 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 1 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.14 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูงที่ช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิรตซ์

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	15	5 min 59.6 sec	5	5
Butterworth	-	-	9	9

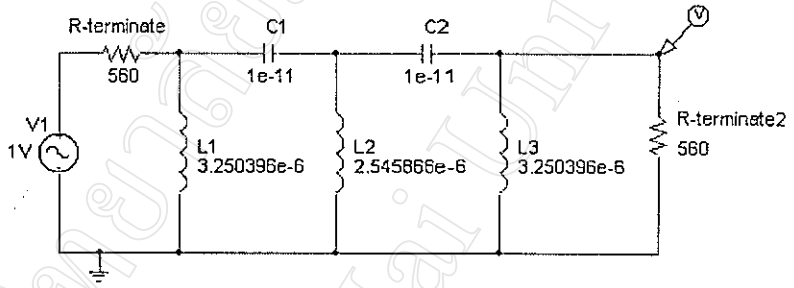
437 169 429 169 437

0 0 0 0 0

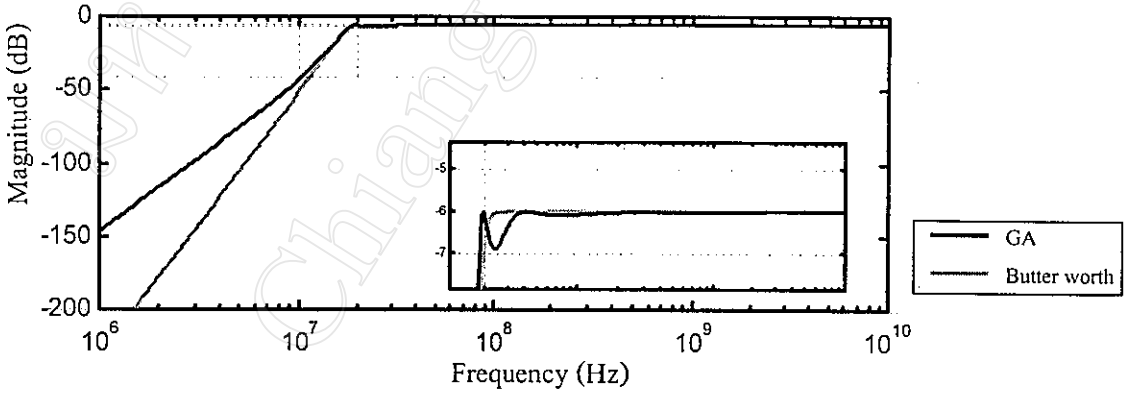
0 0 0 0 0

1 57 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.15 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูง ที่ช่วงความถี่ 10 เมกะเฮิรตซ์

4.4 การทดสอบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบ

4.4.1 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐาน

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{s1} คือ 10,000 เฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{s2} คือ 90,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{p1} คือ 15,000 เฮิรตซ์ จนถึง f_{p2} คือ 60,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

4.4.2 การทดสอบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าเท่ากับ 0.05 เดซิเบล

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.17

4.4.3 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{s1} คือ 10,000 เฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{s2} คือ 66,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{p1} คือ 11,000 เฮิรตซ์ จนถึง f_{p2} คือ 60,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบแสดงดังตารางที่ 4.17 และรูปที่ 4.18

4.4.4 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_s) มีค่าเท่ากับ 200 เดซิเบล และอัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_p) มีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล

จากการทดสอบพบว่า เมื่อใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 250 ตัว วงจรที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้มีจำนวนอุปกรณ์เท่ากับ 50 ซึ่งสูงกว่าจำนวนอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยใช้วิธี

การประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต (ใช้จำนวนอุปกรณ์ 48 ตัว) ดังนั้นจึงเพิ่มจำนวนประชากรขึ้นเป็น 1,000 ตัว จึงสามารถค้นพบวงจรที่ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยกว่าได้ในที่สุด

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดดังตารางที่ 4.18 และรูปที่ 4.19

4.4.5 การทดสอบบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์จนถึงจุด f_{s1} คือ 1 เมกะเฮิรตซ์ และตั้งแต่จุด f_{s2} คือ 9 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่จุด f_{p1} คือ 1.5 เมกะเฮิรตซ์จนถึงจุด f_{p2} คือ 6 เมกะเฮิรตซ์

จากการทดสอบพบว่า เมื่อใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 250 ตัว วงจรที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้มีจำนวนอุปกรณ์เท่ากับ 24 ซึ่งสูงกว่าจำนวนอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต (ใช้จำนวนอุปกรณ์ 22 ตัว) ดังนั้นจึงเพิ่มจำนวนประชากรขึ้นเป็น 1,000 ตัว จึงสามารถค้นพบวงจรที่ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยกว่าได้ในที่สุด

ผลการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.19 และรูปที่ 4.20

4.4.6 การทดสอบบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์จนถึงจุด f_{s1} คือ 10 เมกะเฮิรตซ์ และตั้งแต่จุด f_{s2} คือ 90 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่จุด f_{p1} คือ 15 เมกะเฮิรตซ์จนถึงจุด f_{p2} คือ 60 เมกะเฮิรตซ์

จากการทดสอบพบว่า เมื่อใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 250 ตัว วงจรที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้มีจำนวนอันดับเท่ากับ 26 ซึ่งสูงกว่าจำนวนอันดับที่ออกแบบโดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต (อันดับ 22) ดังนั้นจึงเพิ่มจำนวนประชากรขึ้นเป็น 1,000 ตัว จึงสามารถค้นพบวงจรที่มีจำนวนอันดับต่ำกว่าได้ในที่สุด

ผลการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.21

4.4.7 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์จนถึงจุด f_{s1} คือ 10,000 เฮิรตซ์ และตั้งแต่จุด f_{s2} คือ 70,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่จุด f_{p1} คือ 15,000 เฮิรตซ์จนถึงจุด f_{p2} คือ 60,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากันแสดงดังตารางที่ 4.21 และรูปที่ 4.22

4.4.8 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้ (K_{s1}) มีค่าเท่ากับ 35 เดซิเบล และอัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้ความถี่ผ่านสูงได้ (K_{s2}) มีค่าเท่ากับ 70 เดซิเบล

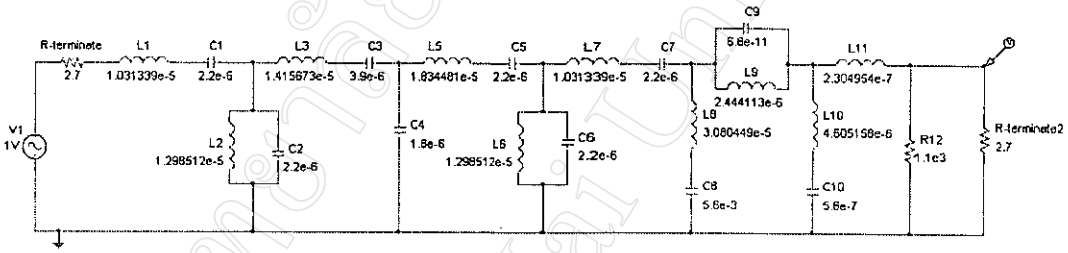
ผลการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากันแสดงดังตารางที่ 4.22 และรูปที่ 4.23

ตารางที่ 4.15 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐาน

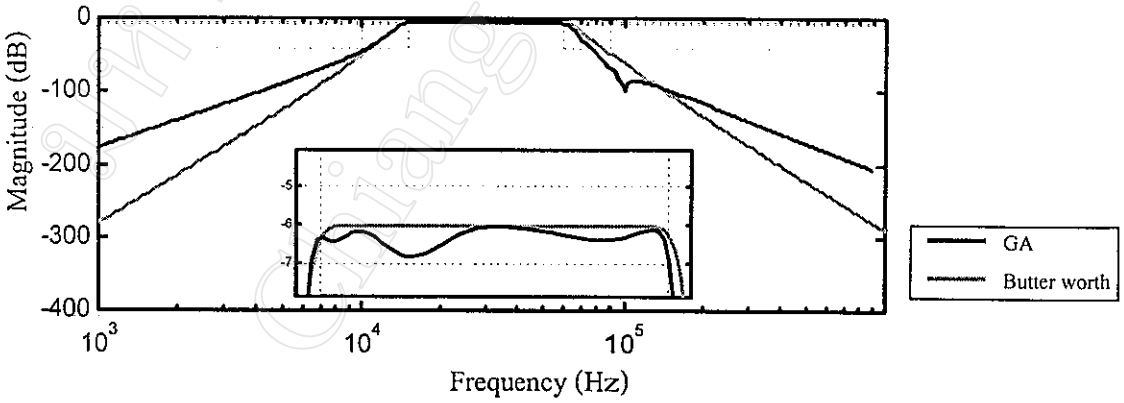
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	37	14 min 43.2 sec	12	21
Butterworth	-	-	11	22

-2	-1	-2	281	-2	-1	-2	-2	-1	-2	361	64
493	501	504	0	513	501	493	531	443	465	0	0
283	283	287	0	283	283	283	330	187	275	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

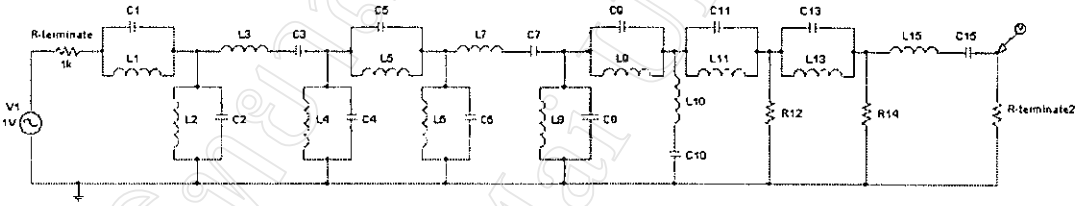
รูปที่ 4.16 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบขั้นพื้นฐาน

ตารางที่ 4.16 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

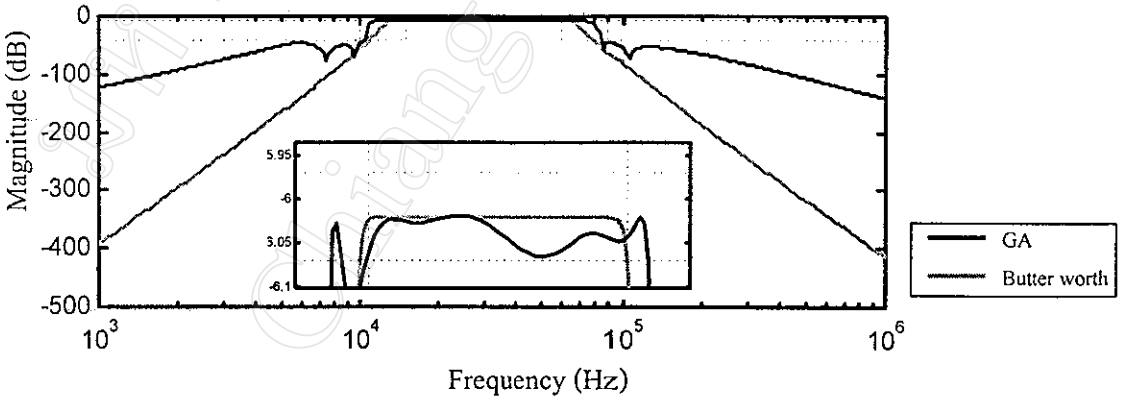
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	62	33 min 20.33 sec	15	28
Butterworth	-	-	16	32

-1	-1	-2	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-2	-1	167	-1	160	-2
596	694	642	682	611	673	634	668	675	697	627	0	627	0	554
238	244	250	244	237	244	249	229	259	257	267	0	267	0	311
0	52	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.17 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	246	2 hr 50 min 25.27 sec	34	67
Butterworth	-	-	36	72

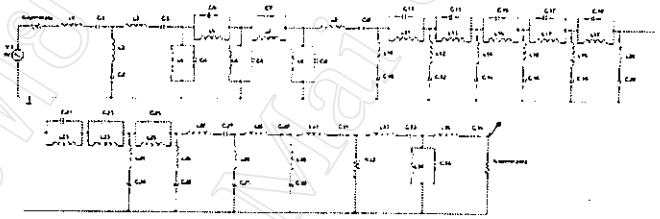
หลักที่ 1 ถึง 17

-2	-2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1
539	575	487	578	527	590	526	582	486	547	522	592	522	684	501	619	523
274	286	274	269	261	269	247	256	282	258	294	248	294	254	296	270	292
0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

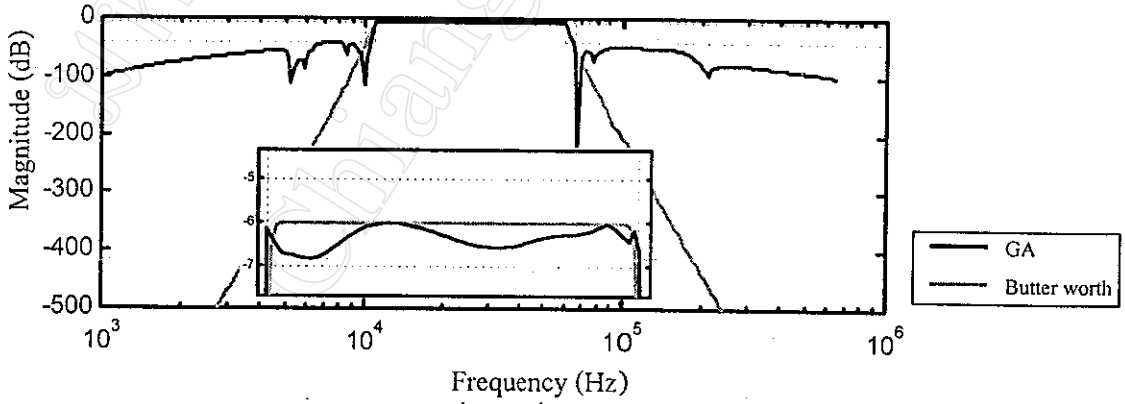
หลักที่ 18 ถึง 35

-2	-1	-2	-1	0	-1	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	139	-2	-1	-2
592	523	619	531	0	531	592	467	421	442	684	470	592	325	0	324	632	424
248	292	270	297	0	297	248	276	191	299	264	293	248	322	0	312	249	295
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

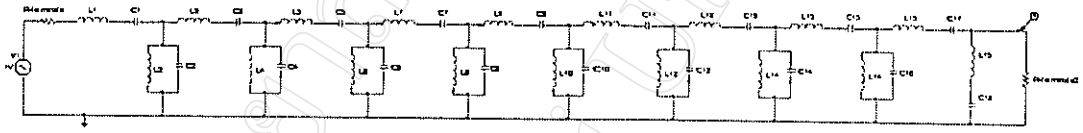
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

ตารางที่ 4.18 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

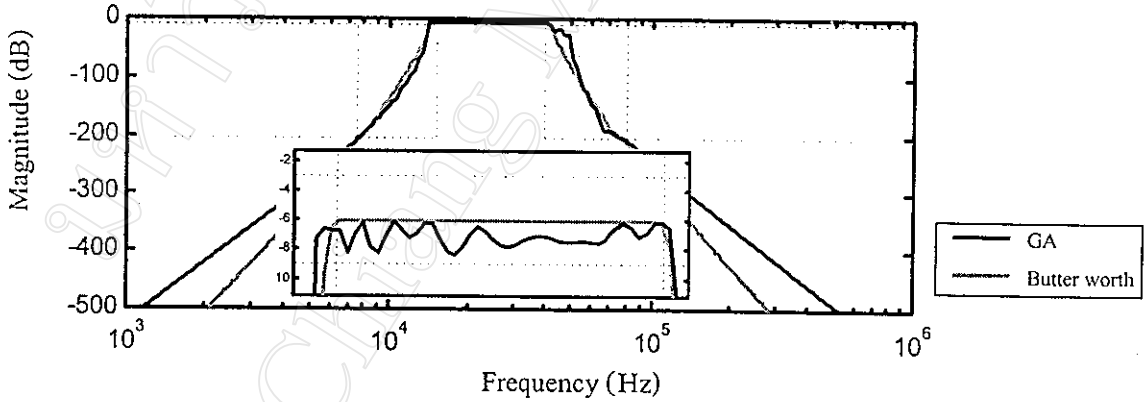
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	46	1 hour 56 min 53.32 sec	18	36
Butterworth	-	-	24	48

-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-2
700	682	700	676	700	676	700	676	700	670	700	670	700	679	700	682	688	653
231	242	231	242	231	242	231	242	231	247	231	247	231	242	231	242	249	226
0	64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

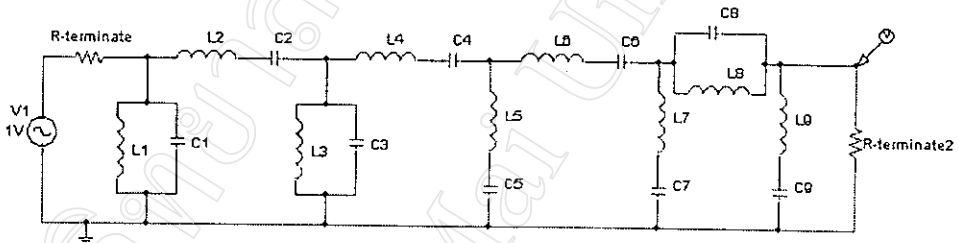
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.19 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์

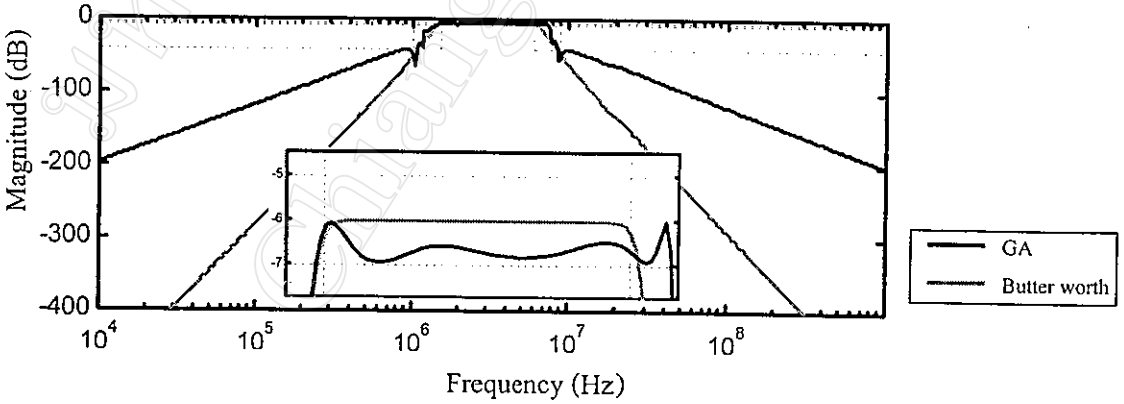
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	31	2 hour 18 min 21.11 sec	9	18
Butterworth	-	-	11	22

-1	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-1	-2
405	391	405	391	384	349	467	344	414
227	227	227	227	210	261	229	262	201
1	22	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.20 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.20 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	19	56 min 2.38 sec	8	16
Butterworth	-	-	11	22

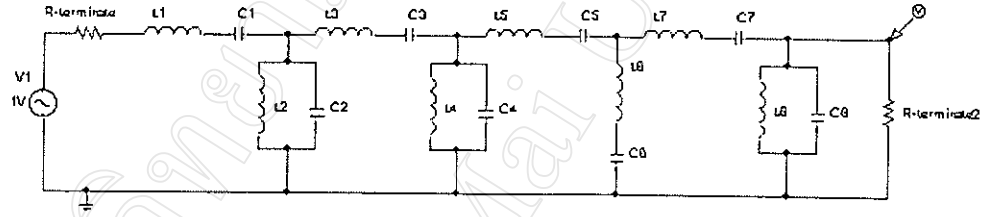
-2 -1 -2 -1 -2 -2 -2 -1

353 362 359 354 325 334 332 362

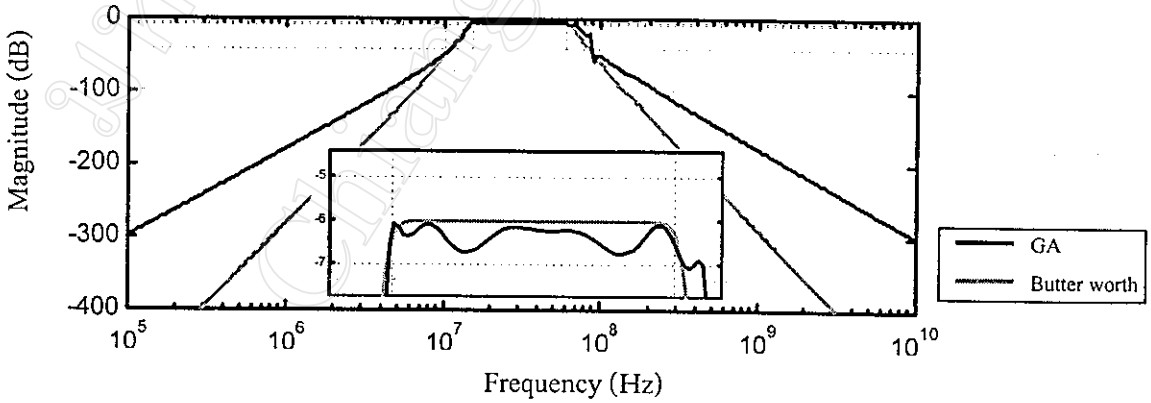
190 189 188 189 196 174 203 189

0 33 0 0 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

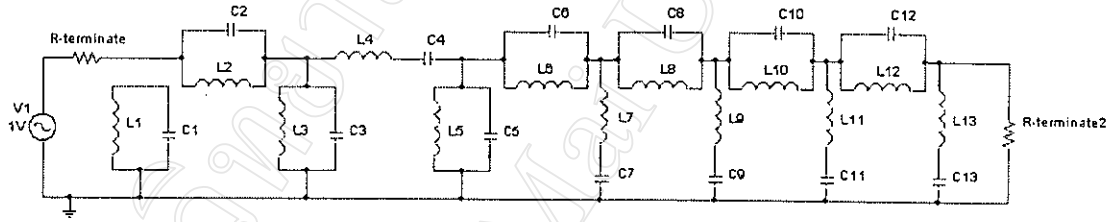
รูปที่ 4.21 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.21 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

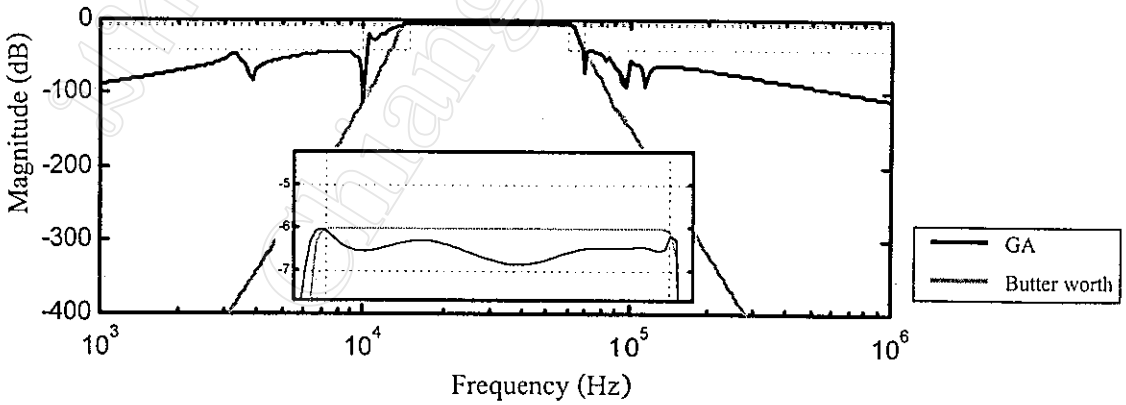
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	52	20 min 42.80 sec	13	26
Butterworth	-	-	26	52

-1	-1	-1	-2	-1	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2
526	514	614	530	533	527	587	527	608	527	523	472	523
273	258	273	274	274	290	291	290	239	290	259	275	259
1	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

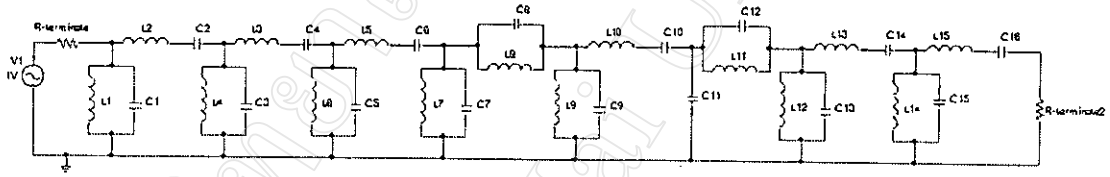
รูปที่ 4.22 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.22 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

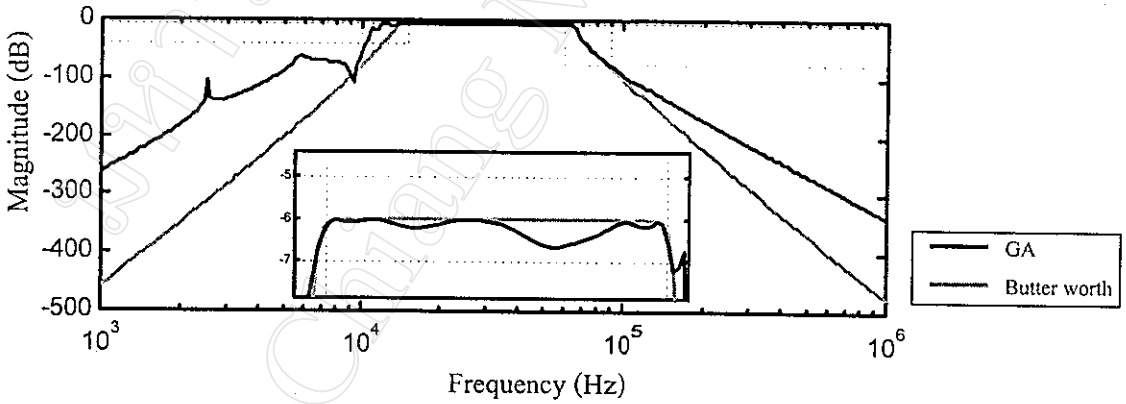
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	78	32 min 56.65 sec	16	31
Butterworth	-	-	18	36

-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	-2	272	-1	-1	-2	-1	-2
513	496	604	496	501	496	501	532	514	496	0	532	513	496	543	421
278	283	279	287	280	283	280	290	272	287	0	290	278	287	276	295
1	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.23 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบผ่านแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

4.5 การทดสอบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบ

4.5.1 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบขั้นพื้นฐาน

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{p1} คือ 10,000 เฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{p2} คือ 90,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{s1} คือ 15,000 เฮิรตซ์ จนถึง f_{s2} คือ 60,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบขั้นพื้นฐานแสดงดังตารางที่ 4.23 และรูปที่ 4.24

4.5.2 การทดสอบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้ (K_{p1}) และอัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้ (K_{p2}) มีค่า 0.05 เดซิเบลเท่ากันทั้งสองด้าน

จากการทดสอบพบว่า เมื่อใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 250 ตัว วงจรที่เจนเนติกอัลกอริทึมออกแบบได้มีจำนวนอุปกรณ์เท่ากับ 53 ซึ่งสูงกว่าจำนวนอุปกรณ์ที่ออกแบบโดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต (ใช้จำนวนอุปกรณ์ 38 ตัว) ดังนั้นจึงเพิ่มจำนวนประชากรขึ้นเป็น 1,000 ตัว จึงสามารถค้นพบวงจรที่ใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยกว่าได้ในที่สุด

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงดังตารางที่ 4.24 และรูปที่ 4.25

4.5.3 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบ

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{p1} คือ 10,000 เฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{p2} คือ 66,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{s1} คือ 11,000 เฮิรตซ์ จนถึง f_{s2} คือ 60,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแคบแสดงดังตารางที่ 4.25 และรูปที่ 4.26

4.5.4 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (K_s) มีค่าเท่ากับ 200 เดซิเบล และอัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ต่ำและผ่านสูงได้ (K_{p1} และ K_{p2}) มีค่า 3 เดซิเบลเท่ากันทั้งสองด้าน

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้แสดงตารางที่ 4.26 และรูปที่ 4.27

4.5.5 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{p1} คือ 1 เมกะเฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{p2} คือ 9 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{s1} คือ 1.5 เมกะเฮิรตซ์ จนถึง f_{s2} คือ 6 เมกะเฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.27 และรูปที่ 4.28

4.5.6 การทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{p1} คือ 10 เมกะเฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{p2} คือ 90 เมกะเฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{s1} คือ 15 เมกะเฮิรตซ์ จนถึง f_{s2} คือ 60 เมกะเฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์แสดงดังตารางที่ 4.28 และรูปที่ 4.29

4.5.7 การทดสอบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

กำหนดให้ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ จนถึงจุด f_{p1} คือ 10,000 เฮิรตซ์ และตั้งแต่ f_{p2} คือ 70,000 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์ และช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าตั้งแต่ f_{s1} คือ 15,000 เฮิรตซ์ จนถึง f_{s2} คือ 60,000 เฮิรตซ์

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากันแสดงดังตารางที่ 4.29 และรูปที่ 4.30

4.5.8 การทดสอบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้ (K_{p1}) มีค่าเท่ากับ 0.05 เดซิเบล และอัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้ (K_{p2}) มีค่าเท่ากับ 3 เดซิเบล

ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากันแสดงดังตารางที่ 4.30 และรูปที่ 4.31

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University

ตารางที่ 4.23 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบขั้นพื้นฐาน

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	30	10 min 13.73 sec	7	14
Butterworth	-	-	12	24

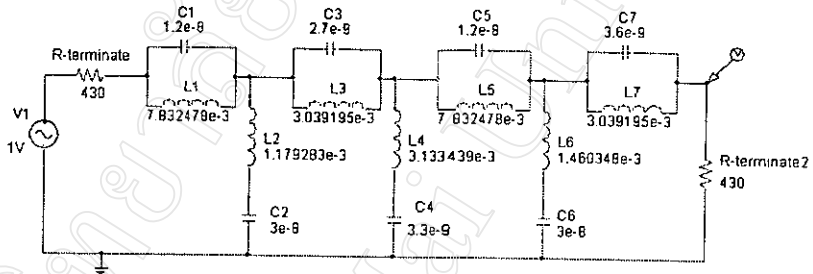
-1 -2 -1 -2 -1 -2 -1

692 630 661 662 692 637 661

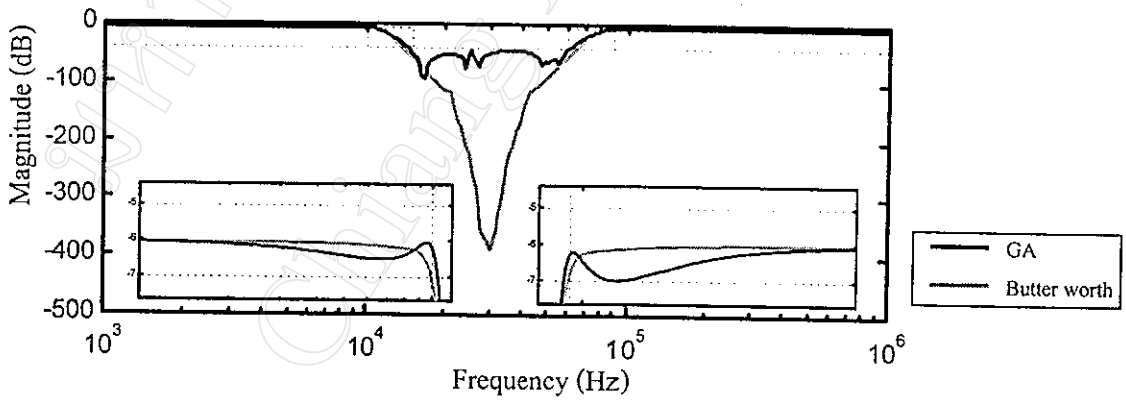
247 252 228 230 247 252 231

0 54 0 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

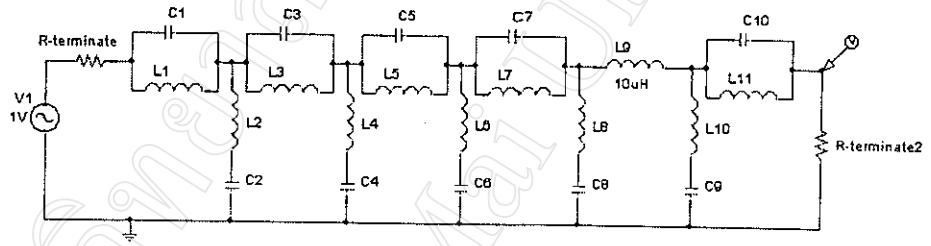
รูปที่ 4.24 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบขั้นพื้นฐาน

ตารางที่ 4.24 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

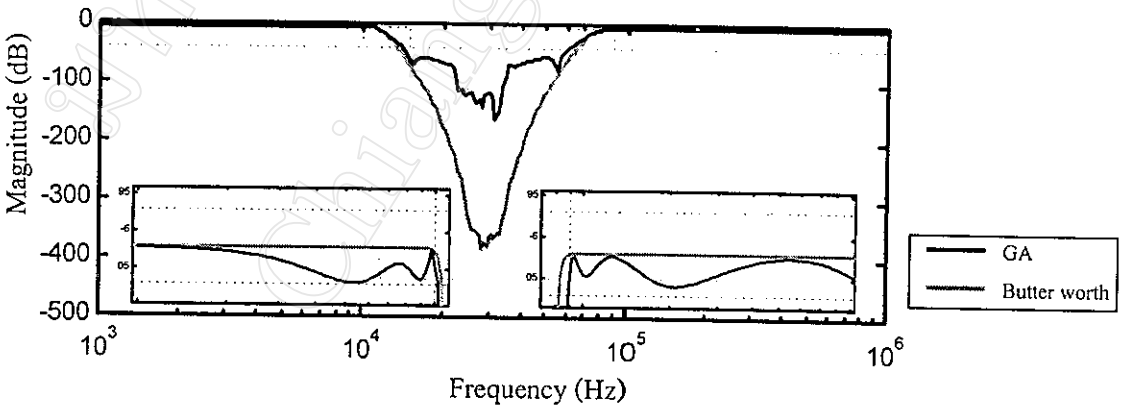
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	49	2 hr 36 min 47.04 sec	11	21
Butterworth	-	-	19	38

-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	468	-2	-1
655	587	676	597	657	627	619	659	0	683	453
246	262	236	262	255	253	246	244	0	244	306
0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

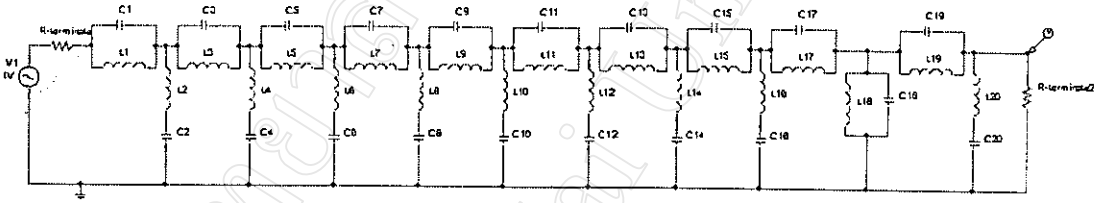
รูปที่ 4.25 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้การกระเพื่อมของระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.25 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแถบ

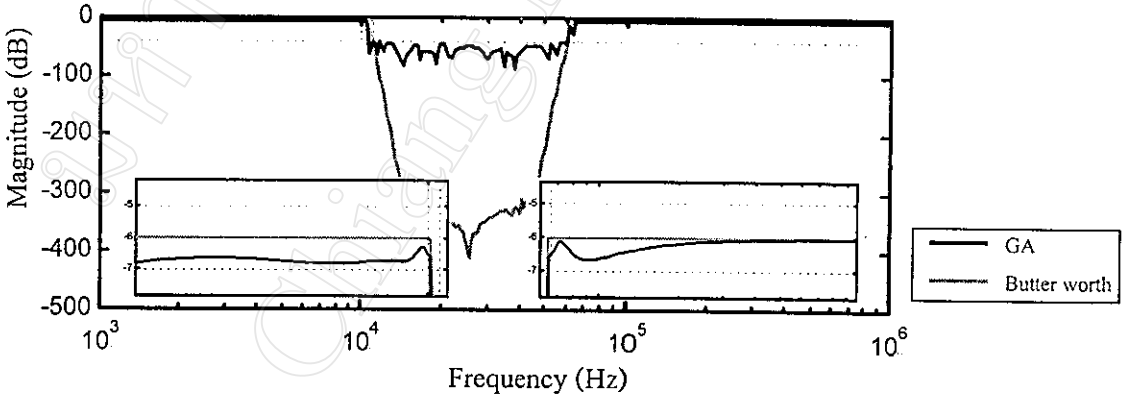
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	79	45 min 49.51 sec	20	40
Butterworth	-	-	69	138

-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-1	-1	-2
548	469	511	492	532	518	406	536	492	492	417	622	494	600	442	600	397	618	442	551
275	286	275	275	283	281	291	281	296	275	289	242	290	273	307	273	300	236	307	259
0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

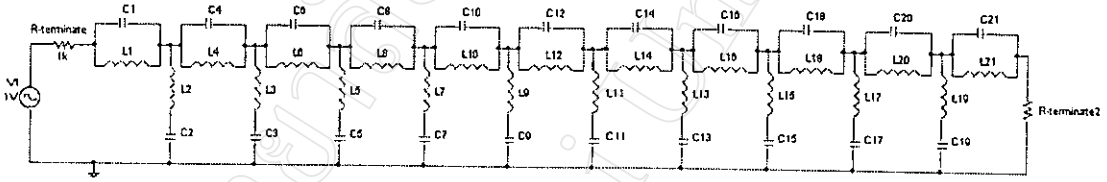
รูปที่ 4.26 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันแถบ

ตารางที่ 4.26 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้
อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

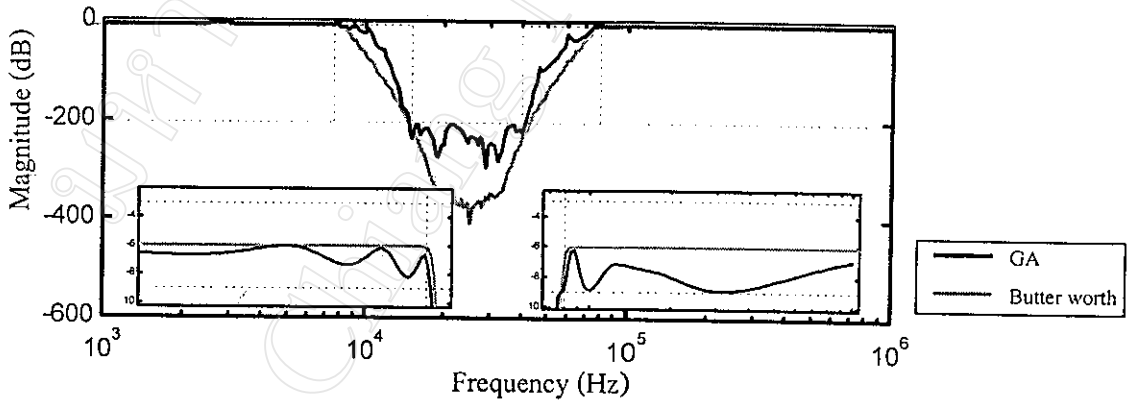
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	121	1 hr 3 min 24.91 sec	21	42
Butterworth	-	-	25	50

-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1
685	620	692	620	692	620	684	603	692	597	566	620	692	684	423	662	666	652	611	662	566
232	261	225	261	232	261	232	261	232	261	261	251	244	249	302	236	251	257	266	236	261
0	46	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.27 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้
อัตราการลดทอนของสัญญาณสูงในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ตารางที่ 4.27 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	33	15 min 47.36 sec	8	16
Butterworth	-	-	12	24

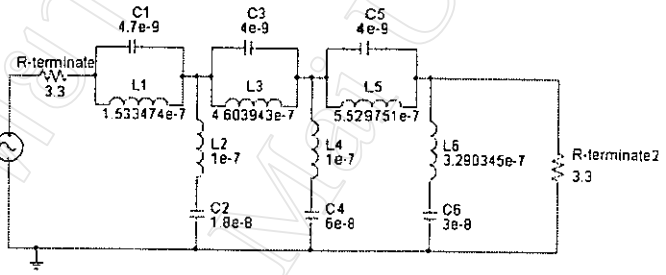
-1 -2 -1 -2 -1 -2 -1 -2

337 324 373 324 379 362 330 362

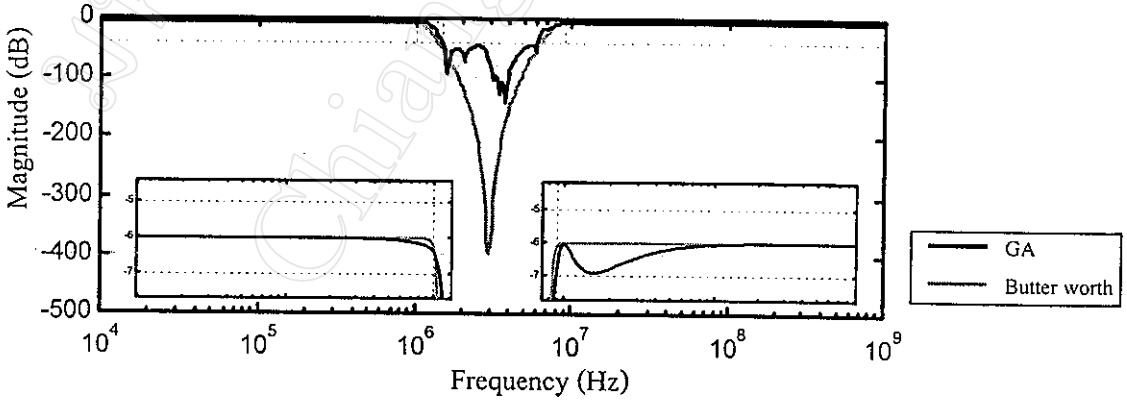
235 249 233 259 233 252 261 243

0 3 0 0 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.28 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 1 ถึง 9 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.28 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์

Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	23	10 min 40.65 sec	7	14
Butterworth	-	-	12	24

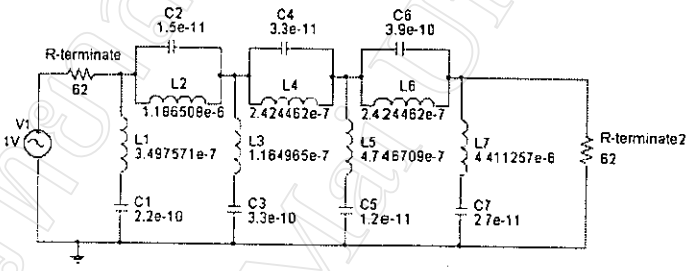
-2 -1 -2 -1 -2 -1 -2

364 404 328 352 374 352 447

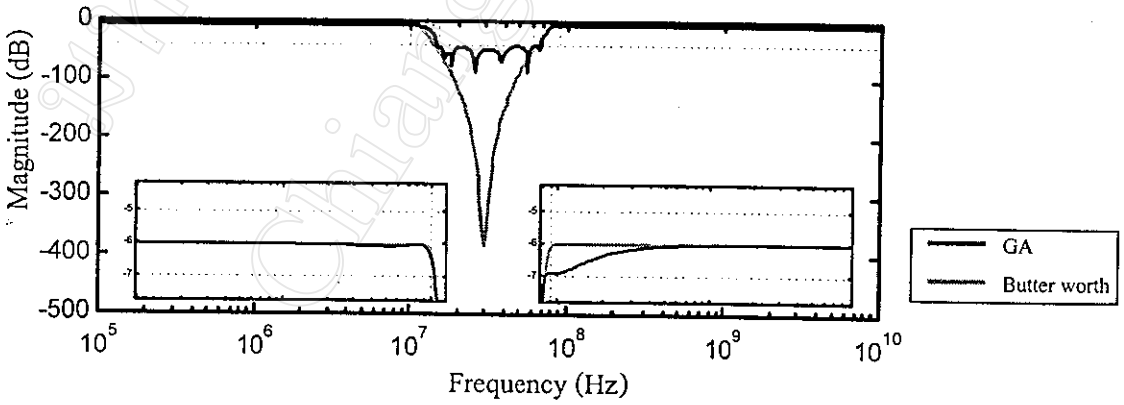
199 171 204 178 170 206 176

1 34 0 0 0 0 0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

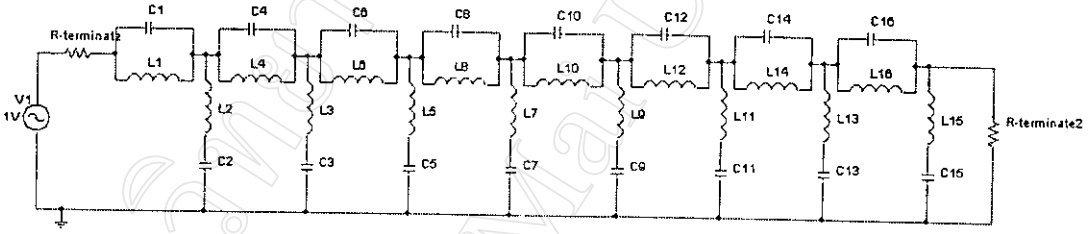
รูปที่ 4.29 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่ช่วงความถี่ 10 ถึง 90 เมกะเฮิรตซ์

ตารางที่ 4.29 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

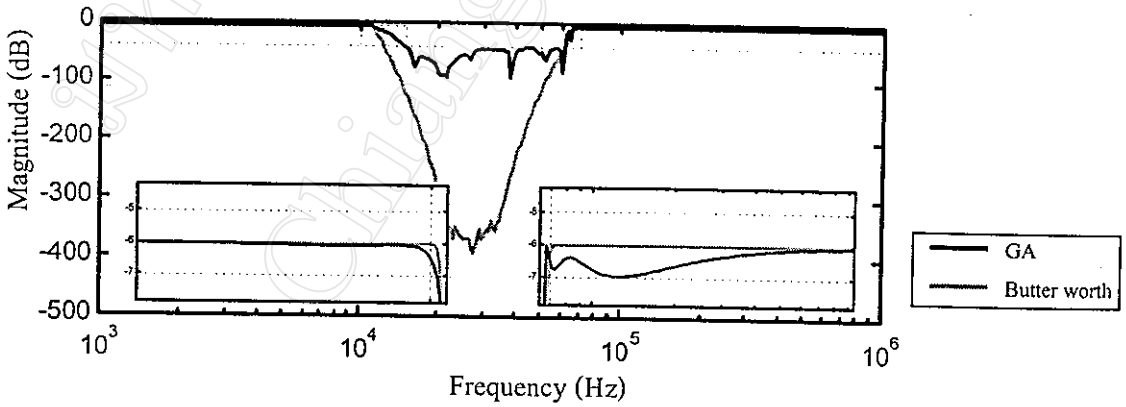
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	68	28 min 52.08 sec	16	32
Butterworth	-	-	27	54

-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2
545	535	570	517	545	560	405	560	476	560	475	622	405	584	351	666
266	280	271	280	266	260	290	257	278	257	277	254	293	258	305	225
0	14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว



(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

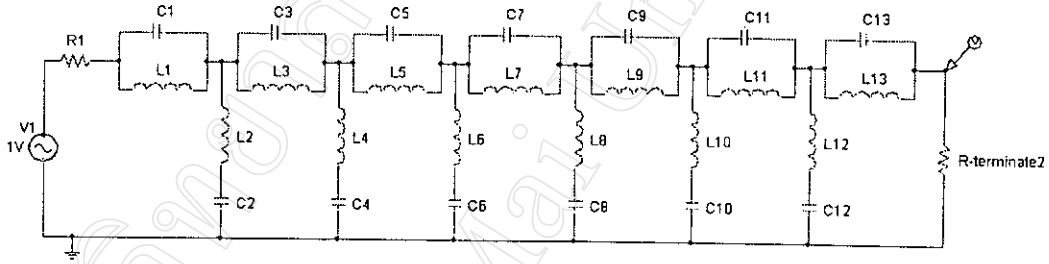
รูปที่ 4.30 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้ระยะช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับแรงดันทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

ตารางที่ 4.30 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

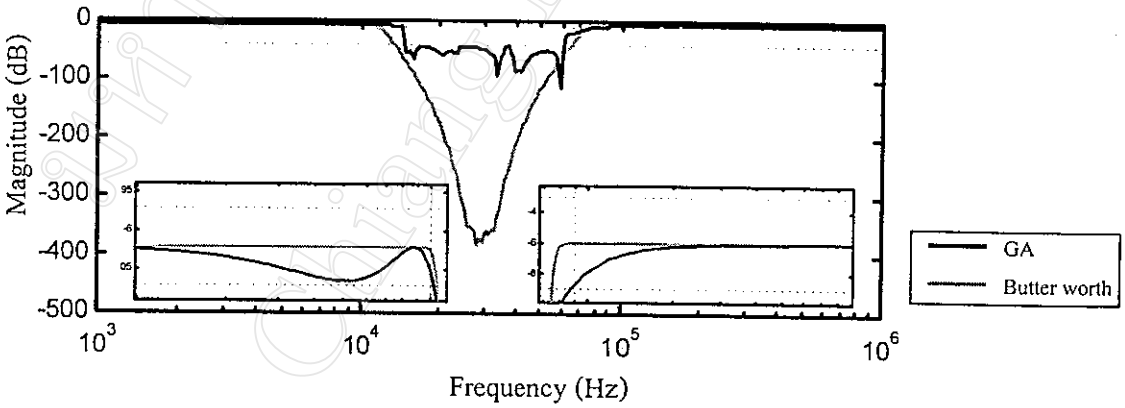
Method	Epoch	Total time	n_order	n_component
GA	67	29 min 59.03 sec	13	26
Butterworth	-	-	19	38

-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1
511	441	510	575	458	503	463	573	458	503	458	530	463
280	292	273	274	296	270	283	275	296	270	296	281	283
0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) ลักษณะโครโมโซมของวงจรที่ออกแบบได้



(b) ลักษณะการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆภายหลังจากการถอดรหัสแล้ว

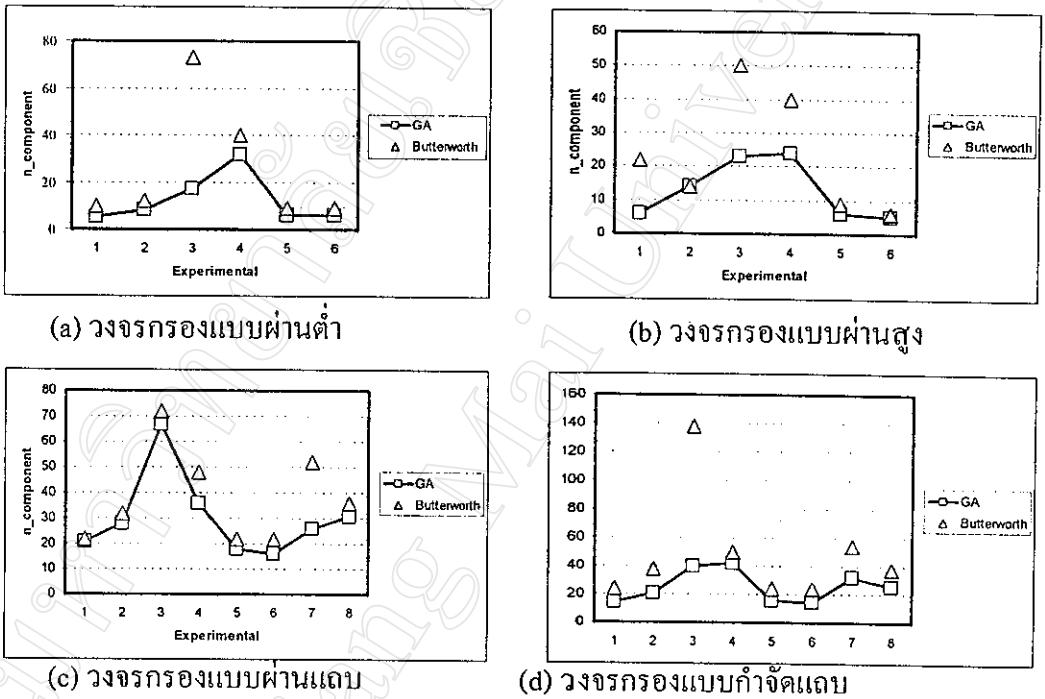


(c) แรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ออกแบบโดยใช้วิธีเจนเนติกอัลกอริทึมเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ต

รูปที่ 4.31 ผลการทดสอบออกแบบวงจรกรองอนาลอกแบบกำจัดแถบที่กำหนดให้อัตราการลดทอนของสัญญาณในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ทั้งสองด้านไม่เท่ากัน

4.6 วิเคราะห์ผลการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอก

จากการทดสอบการออกแบบวงจรกรองอนาลอกพบว่า เจนเนติกอัลกอริทึมสามารถออกแบบวงจรได้ตรงตามข้อกำหนดในการออกแบบและใช้จำนวนอุปกรณ์น้อยกว่าการออกแบบโดยวิธีการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ตทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 4.32 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบลักษณะแรงดันด้านขาออกของ วงจร ณ ความถี่ต่างระหว่าง 2 วิธีนี้ ถึงแม้วิธีบัตเตอร์เวอร์ตจะมีลักษณะแรงดันที่ราบเรียบมากกว่าเจนเนติกอัลกอริทึม แต่ทั้งสองวิธีนี้ล้วนแต่มีลักษณะแรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆที่ตรงกับข้อกำหนดในการออกแบบทุกประการ

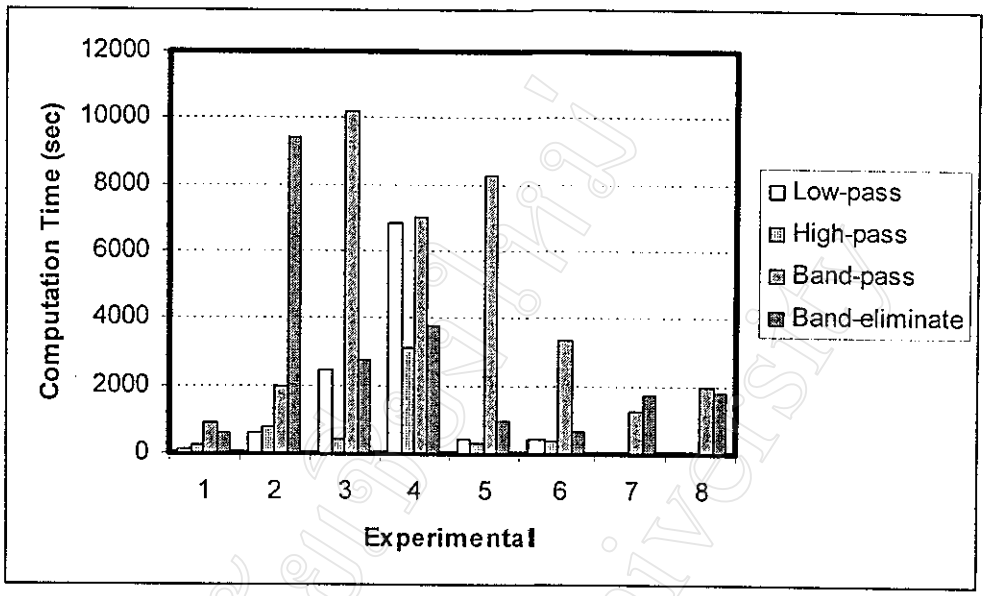


(a) วงจรกรองแบบผ่านต่ำ (b) วงจรกรองแบบผ่านสูง

(c) วงจรกรองแบบผ่านแถบ (d) วงจรกรองแบบกำจัดแถบ

รูปที่ 4.32 กราฟแสดงการเปรียบเทียบจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองที่ได้จากวิธีใช้เจนเนติกอัลกอริทึมและการประมาณค่าแบบบัตเตอร์เวอร์ตของวงจรกรองชนิดต่างๆ

จากการทดสอบออกแบบวงจรในด้านต่างๆพบว่า การออกแบบโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึมจะใช้เวลาในการคำนวณแตกต่างกันไป ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความยากง่ายของข้อกำหนดในการออกแบบเป็นหลัก โดยกราฟแสดงระยะเวลาที่ใช้ในการประมวลผลของแต่ละการทดสอบแสดงได้ดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 กราฟแสดงระยะเวลาการคำนวณที่ใช้ในการออกแบบโดยวิธีเจนเนติกอัลกอริทึม

ข้อกำหนดในการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเจนเนติกอัลกอริทึม ล้วนแต่มีผลต่อโอกาสที่จะค้นพบคำตอบที่ตรงกับความต้องการและเวลาในการประมวลผลของเจนเนติกอัลกอริทึม โดยแสดงดังตารางที่ 4.31

สำหรับค่าพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึมได้แก่ p_m (อัตราการมิวเตชัน) p_c (อัตราการครอสโอเวอร์) และ pop_size (จำนวนประชากร) โดยจากการทดสอบพบว่า ในรุ่นแรกโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ที่ถูกสุ่มขึ้น จะมีจำนวนอันดับแตกต่างกันตั้งแต่อันดับ 1 จนถึงอันดับสูงสุดที่กำหนดไว้ (segment_max) ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะมีค่าความผิดพลาดเมื่อเปรียบเทียบกับข้อกำหนดแตกต่างกันไป จากนั้นจึงนำโครโมโซมรุ่นพ่อแม่นี้ มาผ่านการมิวเตชันและครอสโอเวอร์ และนำมาผ่านการเลือกได้เป็นประชากรรุ่นที่ 2 ซึ่งจะได้โครโมโซมรุ่นพ่อแม่ที่มีค่าความผิดพลาดค่าหนึ่ง เมื่อสังเกตลักษณะของแรงดันจะเริ่มเป็นไปตามข้อกำหนดที่กำหนดไว้ โดยโครโมโซมเหล่านี้ มักจะมีจำนวนอันดับที่ต่ำ เนื่องจากการสุ่มหาโครโมโซมแต่ละตัวนั้น หากโครโมโซมเป็นวงจรที่มีจำนวนอันดับมาก ย่อมจะต้องสุ่มตำแหน่งและค่าของอุปกรณ์มาก ดังนั้นจึงทำให้โอกาสที่ลักษณะแรงดันด้านขาออกของวงจรตรงกับข้อกำหนดในการออกแบบได้ยากมากกว่าโครโมโซมที่มีจำนวนอันดับน้อยๆ

ตารางที่ 4.31 ข้อกำหนดในการออกแบบและค่าพารามิเตอร์ที่มีผลต่อเวลาในการประมวลผลโดยใช้เจนเนติกอัลกอริทึม

ข้อกำหนดในการออกแบบ และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ	ผลกระทบต่อการทำงาน ของเจนเนติกอัลกอริทึม
อัตราส่วนความถี่ (f_s/f_p)	ยิ่งมีค่ามากยิ่งค้นหาคำตอบได้ง่าย
K_p	ยิ่งมีค่ามากยิ่งค้นหาคำตอบได้ง่าย
K_s	ยิ่งมีค่ามากยิ่งค้นหาคำตอบได้ยาก
n_dec (จำนวนที่พิจารณาจุดต่อเดเคด)	ยิ่งมีค่ามากยิ่งใช้เวลาในการประมวลผลมาก
อัตราส่วนความถี่ (f_{min}/f_{max})	ยิ่งมีค่ามากยิ่งใช้เวลาในการประมวลผลมาก
pop_size	ยิ่งมีค่ามากยิ่งใช้เวลาในการประมวลผลมาก
p_m	ยิ่งมีค่ามากยิ่งใช้เวลาในการประมวลผลมาก
p_c	ยิ่งมีค่ามากยิ่งใช้เวลาในการประมวลผลมาก
PercentRLC (โอกาสการเลือกอุปกรณ์ตัวเดียว)	ควรกำหนดให้มีค่ามากในการออกแบบวงจรกรอง low-pass และ high-pass เพื่อทำให้ค้นหาคำตอบได้ง่าย
PercentSub (โอกาสการเลือกอุปกรณ์ย่อย)	ควรกำหนดให้มีค่ามากในการออกแบบวงจรกรอง band-pass และ band-eliminate เพื่อทำให้ค้นหาคำตอบได้ง่าย
PercentShort (โอกาสการเลือกปิด/เปิดวงจร)	ควรกำหนดให้มีค่าน้อยมาก เพื่อให้มีโอกาสในการเกิดปิด/เปิดวงจรในบางตำแหน่ง ทำให้เกิดวงจรในลักษณะแปลกใหม่ได้ในบางครั้ง
segment_max	ยิ่งมีค่ามากยิ่งใช้เวลาในการประมวลผลมาก

ดังนั้นเมื่อโครโมโซมต่างๆในประชากรรุ่น 2 มีจำนวนอันดับน้อย การค้นหาคำตอบส่วนใหญ่จึงต้องเน้นไปที่การเพิ่มจำนวนอันดับของวงจรให้กับโครโมโซม ซึ่งจะทำโดยอาศัยขบวนการมิวเตชัน โดยจากการทดสอบพบว่า หากกำหนดอัตราการมิวเตชันให้ค่าเพิ่มขึ้น (0.8) จะทำให้มีโอกาสเพิ่มจำนวนอันดับให้กับโครโมโซมได้ เพราะการมิวเตชันในงานวิจัยนี้ นอกจากจะทำการมิวเตชันตั้งแต่ตำแหน่งหลักที่ 1 ถึงหลักสุดท้ายที่ n แล้ว ยังมีการมิวเตชันตำแหน่งหลักที่ n+1 ซึ่งเป็นตำแหน่งถัดจากตำแหน่งหลักสุดท้ายของโครโมโซมได้อีกด้วย

สำหรับการครอสโอเวอร์ จะเห็นได้ว่าเมื่อโครโมโซมของประชากรมีจำนวนอันดับต่ำในรุ่นแรกๆ ดังนั้นการครอสโอเวอร์ที่เกิดขึ้นจึงทำให้เกิดการครอสโอเวอร์ในตำแหน่งเดิม ซึ่งจะไม่ช่วยให้การทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึมเร็วขึ้นมากนัก แต่การครอสโอเวอร์นี้จะมีประโยชน์เมื่อค่าและชนิดของอุปกรณ์ภายในโครโมโซมมีความหลากหลายมาก หรือก็คือมีจำนวนอันดับมากขึ้น ซึ่งการครอสโอเวอร์จะช่วยสลับค่าและตำแหน่งในการเชื่อมต่อของอุปกรณ์แต่ละตัวได้ จึงทำให้โครโมโซมถูกพัฒนาให้มีค่าความผิดพลาดที่ต่ำลงได้

นอกจากนี้จำนวนประชากรที่ใช้ในการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึม ก็มีผลต่อเวลาในการประมวลผลของโปรแกรมโดยตรงเนื่องจาก หากกำหนดให้ใช้จำนวนประชากรจำนวนมากเกินไป จะทำให้การประมวลผลหาค่าต่างๆในแต่ละรุ่นทั้งหมดใช้เวลานานมากขึ้น แต่หากกำหนดจำนวนประชากรน้อยเกินไป ก็จะทำให้ไม่เจนเนติกอัลกอริทึมไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้ ซึ่งจากการทดสอบในงานวิจัยนี้พบว่า จำนวนประชากรเท่ากับ 250 ตัว เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะทำให้ค้นหาคำตอบที่ตรงกับข้อกำหนดได้ ทั้งหมดและไม่ใช้เวลาในการประมวลผลนานเกินไป แต่หากการทดสอบใดที่มีข้อกำหนดในการออกแบบยากมาก เมื่อใช้จำนวนประชากรเท่ากับ 250 ตัวแล้วยังไม่สามารถค้นหาคำตอบที่ตรงกับข้อกำหนดในการออกแบบได้ หรืออาจค้นหาคำตอบได้แต่วงจรที่ออกแบบได้มีจำนวนอันดับสูงกว่าวิธีการประมาณแบบบัตเตอร์เวอร์ จึงปรับจำนวน ประชากรเพิ่มขึ้นเป็น 1,000 ตัว ซึ่งการเพิ่มจำนวนประชากรนี้จะเป็นการเพิ่มความหลากหลายของประชากรให้มีความสามารถในการค้นหาคำตอบในพื้นที่การค้นหาที่กว้างมากขึ้นได้ ดังนั้นโอกาสที่จะพบคำตอบที่ดีที่สุดจริงๆจึงมีสูงมากขึ้น แต่หากใช้จำนวนประชากรจำนวนมาก กับการออกแบบที่มีข้อกำหนดง่าย ก็สามารถทำได้เช่นกัน เพียงแต่จะใช้ระยะเวลาในการประมวลผลแต่ละรอบการทำงานนานขึ้นนั่นเอง