

บทที่ 3

โครงสร้างการทำงานของโปรแกรม

3.1 โปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัย

การออกแบบวงจรกรองอนาล็อกโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมนี้ ใช้โปรแกรมแมตแลป (MATLAB) เวอร์ชัน 5.3 ซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าต่างๆเกี่ยวกับลักษณะของวงจรกรองที่ต้องการ อีกทั้งยังสามารถกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเงินเนติกอัลกอริทึมได้อีกด้วย โดยแบ่งออกเป็น 4 โปรแกรมดังนี้

- โปรแกรมที่ใช้ออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ (galp.m)
- โปรแกรมที่ใช้ออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูง (gahp.m)
- โปรแกรมที่ใช้ออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ (gabp.m)
- โปรแกรมที่ใช้ออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบก้ำจืดแถบ (gaep.m)

3.2 การทำงานของเงินเนติกอัลกอริทึม

ในงานวิจัยนี้จะใช้เงินเนติกอัลกอริทึมตัวโปรแกรมหลักเพื่อออกแบบวงจรกรองอนาล็อกซึ่งเป็นขบวนการทำงานแบบอัตโนมัติ เริ่มต้นด้วยการให้ผู้ใช้งานกำหนดค่าต่างๆเกี่ยวกับความต้องการในการออกแบบวงจรกรองอนาล็อก และกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของเงินเนติกอัลกอริทึม จากนั้นโปรแกรมจะทำการสุ่มชุดคำตอบของประชากรเริ่มต้นแล้วจึงส่งชุดคำตอบเหล่านี้ไปประมวลผลโดยโปรแกรม PSPICE ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร ซึ่งจะได้อุปกรณ์ที่ส่งกลับมาเป็นค่าแรงดันด้านขาออก (เดซิเบล) ณ ความถี่ต่างๆ (เฮิรตซ์) ของแต่ละวงจร จากนั้นจึงนำค่าของแรงดัน ณ ความถี่ต่างๆที่ได้ไปเปรียบเทียบกับความต้องการในการออกแบบวงจรที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้และนำไปหาค่าความเหมาะสม ซึ่งกำหนดให้วงจรใดที่ให้ผลตอบแทนของแรงดัน ณ ความถี่ต่างๆ ตรงกับความต้องการในการออกแบบของวงจรที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้มาก ก็จะมีค่าความเหมาะสมที่ติดมานั่นเอง

เมื่อสุ่มชุดคำตอบของโครโมโซมขึ้นมาเป็นรุ่นพ่อแม่แล้วจึงนำโครโมโซมที่สุ่มขึ้นในรุ่นแรกนี้ไปผ่านกระบวนการมิวเตชันและครอสโอเวอร์ ได้เป็นชุดคำตอบของโครโมโซมรุ่นลูกที่มีลักษณะของยีนส์ในตำแหน่งต่างๆภายในโครโมโซมที่เปลี่ยนแปลงไป ต่อไปจึงนำโครโมโซมรุ่นลูกที่ได้ไปประมวลผลโดยโปรแกรม PSPICE เพื่อหาค่าผลตอบแทนของแรงดัน ณ

ความถี่ต่างๆที่กำหนดและหาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม เพื่อค้นหาโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดจากประชากรในรุ่นพ่อแม่หรือรุ่นลูกเก็บไว้เป็นคำตอบของปัญหา

จากนั้นจึงนำโครโมโซมรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกที่ได้มาผ่านการเลือกแบบหมุนกงล้อ (Roulette Wheel Selection) เพื่อสุ่มเลือกโครโมโซมตามสัดส่วนของค่าความเหมาะสมจำนวนเท่ากับจำนวนประชากรเดิมในรุ่นพ่อแม่ ไปเป็นประชากรรุ่นที่ 2

เมื่อได้ชุดคำตอบของประชากรในรุ่นที่ 2 แล้วจึงวนกลับไปผ่านขั้นตอนการมีเวชันและครอสโอเวอร์ ได้เป็นโครโมโซมในรุ่นลูกแล้วจึงหาโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดต่อไป ซึ่งหากพบโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีกว่าโครโมโซมในรุ่นก่อน ให้เก็บค่าของโครโมโซมใหม่นี้เป็นคำตอบที่ดีที่สุด จากนั้นจึงวนหาคำตอบเช่นนี้เรื่อยไปจนกว่าจะพบวงจรที่ตรงกับความต้องการในการออกแบบที่ผู้ใช้กำหนดไว้มากที่สุด

3.3 การเข้ารหัสโครโมโซม

การออกแบบวงจรกรองอนาล็อกโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ ใช้การเข้ารหัสของโครโมโซมเป็นแบบเลขจำนวนเต็ม โดยมีโครงสร้างการเชื่อมต่อของวงจรเป็นแบบขั้นบันได (Ladder Circuit) ที่มีตัวต้านทานขนาดเท่ากันเชื่อมต่อไว้ในตำแหน่งหัวและท้าย (R-R Terminate) เนื่องจากทำให้ได้อัตราการส่งผ่านกำลัง (Power Delivery) สูงสุด [7]

3.3.1 การเข้ารหัสของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อวงจร

การเข้ารหัสของยีนส์ ณ ตำแหน่งต่างๆของโครโมโซมจะถูกแทนค่าด้วยรหัสของอุปกรณ์ต่างๆ 3 ชนิด ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ซึ่งถูกแทนด้วยรหัสที่เป็นเลขจำนวนเต็มบวก มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง 512 ดังนี้

ก) ตัวต้านทาน แทนด้วยเลขจำนวนเต็มบวกตั้งแต่ 1 ถึง 167 จำนวนทั้งหมด 167 ค่า โดยใช้แทนค่าตัวต้านทานที่มีขายตามท้องตลาดที่มีค่าตั้งแต่ 2.7 โอห์ม (แทนด้วยรหัส 1) จนถึง 22 เมกะโอห์ม (แทนด้วยรหัส 167) ตามลำดับ

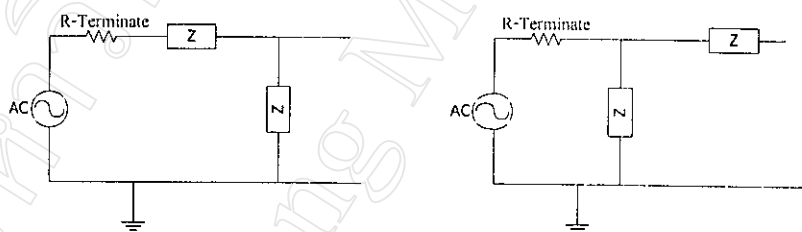
ข) ตัวเก็บประจุ แทนด้วยเลขจำนวนเต็มบวกตั้งแต่ 168 ถึง 323 จำนวนทั้งหมด 156 ค่า โดยใช้แทนค่าตัวเก็บประจุที่มีขายตามท้องตลาดที่มีค่าตั้งแต่ 5 พิโกฟารัด จนถึง 1 มิลลิฟารัด ตามลำดับ

ก) ตัวเหนี่ยวนำ แทนด้วยเลขจำนวนเต็มบวกตั้งแต่ 324 ถึง 700 จำนวนทั้งหมด 377 ค่า โดยใช้แทนค่าตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าตั้งแต่ 0.1 ไมโครเฮนรี จนถึง 10 มิลลิเฮนรีตามลำดับ เนื่องจากตัวเหนี่ยวนำสามารถพันขดลวดเพื่อกำหนดค่าความเหนี่ยวนำได้เอง

3.3.2 การอ้างอิงตำแหน่งต่างๆของยีนส์ภายในโครโมโซม

ยีนส์ในตำแหน่งต่างๆภายในโครโมโซมถูกแสดงด้วยเลขจำนวนเต็มบวก โดยแสดงถึงโครงสร้างการเชื่อมต่อ (Topology) ของอุปกรณ์ต่างๆ ได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ สำหรับการอ้างอิงถึงแต่ละตำแหน่งต่างๆของวงจรจะใช้อ้างอิงตำแหน่งของแถวและตำแหน่งของหลัก

จากตัวอย่างรหัสโครโมโซมในรูปที่ 3.1 รหัสในตำแหน่งแถวที่ 4 หลักที่ 1 (ซึ่งต่อไปจะขอเรียกว่าตำแหน่ง (4,1)) ใช้บอกว่าวงจรแบบขั้นบันไดนี้จะเริ่มต้นการเชื่อมต่อในตำแหน่งด้านบนหรือล่าง ซึ่งหากค่าในตำแหน่ง (4,1) นี้เป็น 0 วงจรจะเริ่มต้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้านบน และหากแทนด้วยค่า 1 จะเริ่มต้นเชื่อมต่ออุปกรณ์จากด้านล่าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1 (a) และ 3.1 (b) ตามลำดับ



(a) เริ่มต้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้านบน (b) เริ่มต้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้านล่าง

รูปที่ 3.1 ตำแหน่งการเริ่มต้นเชื่อมต่ออุปกรณ์ของวงจรแบบขั้นบันได

รหัสในตำแหน่ง (4,2) คือ ค่าของตัวต้านทานที่ปิดหัวและท้าย (R-R Terminate) ที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งการใช้ตัวต้านทานที่มีขนาดเท่ากันปิดหัวและท้ายของวงจรนี้ จะทำให้แรงดันด้านขาออกของวงจรมีค่าสูงที่สุดเป็นครึ่งหนึ่งของแรงดันสูงสุดของแหล่งจ่ายแรงดัน และโดยทั่วไปแล้วมักจะกำหนดให้แหล่งจ่ายแรงดันด้วยขนาดสูงสุดเป็น 1 โวลต์ ดังนั้นแรงดันด้านสูงสุดด้านขาออกของวงจรจึงมีค่าเป็น 0.5 โวลต์ หรือเท่ากับ $20 \log 0.5 \approx -6.026$ เดซิเบล

รหัสในแถวแรกของแต่ละหลักจะแสดงถึงลักษณะการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ ซึ่งมี 6 กรณีดังนี้

รหัส 1 ถึง 167 แสดงถึงการเชื่อมต่อของตัวต้านทานตัวเดียว

รหัส 168 ถึง 323 แสดงถึงการเชื่อมต่อของตัวเก็บประจุตัวเดียว

รหัส 324 ถึง 700 แสดงถึงการเชื่อมต่อของตัวเหนี่ยวนำตัวเดียว

รหัส 0 แสดงถึงการเชื่อมต่อแบบไม่มีอุปกรณ์ตัวใดเชื่อมต่ออยู่ในตำแหน่งนั้น

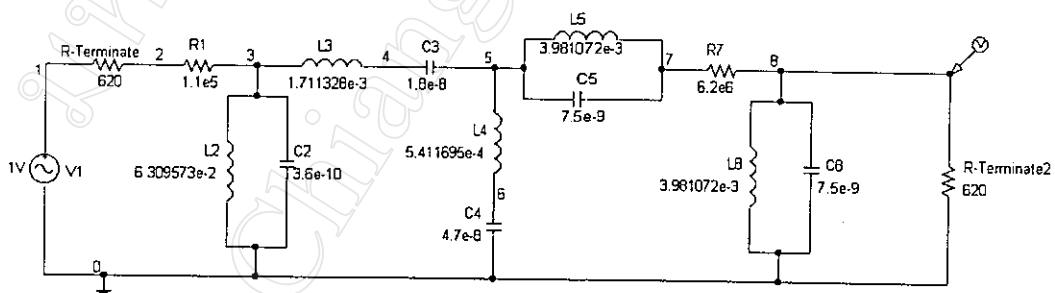
รหัส -1 แสดงถึงการเชื่อมต่อแบบขนานของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

รหัส -2 แสดงถึงการเชื่อมต่อแบบอนุกรมของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ

หากในหลักใดที่รหัสของแถวแรกมีค่าเท่ากับ -1 หรือ -2 ซึ่งแสดงถึงการเชื่อมต่อแบบขนานและอนุกรมตามลำดับ จะต้องมีการกำหนดขนาดของตัวเหนี่ยวนำไว้ในแถวที่ 2 และกำหนดขนาดของตัวเก็บประจุในแถวที่ 3 ของหลักเดียวกันนั้นด้วย ส่วนในตำแหน่งใดนอกเหนือจากนี้ (คือ แถวที่ 4 ของหลักที่สามเป็นต้นไป) จะไม่มีความหมายใดซึ่งจะถูกกำหนดค่าไว้เป็นรหัส 0 ทั้งหมด

รหัสในแต่ละหลักจะสลับการเชื่อมต่ออุปกรณ์บนและล่างตามลำดับ โดยจะเริ่มเชื่อมต่ออุปกรณ์ในตำแหน่งบนหรือล่างก่อน จะขึ้นกับรหัสในตำแหน่ง (4,1) เป็นตัวบ่งชี้ ส่วนรหัส 0 ที่ปรากฏอยู่ในแถวแรกของหลักใด หมายถึง ในตำแหน่งนั้นจะไม่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์อยู่ ทำให้เกิดการเชื่อมต่ออุปกรณ์ด้านบนกับด้านบนติดกัน หรือด้านล่างกับด้านล่างติดกันนั่นเอง

ตัวอย่างการเข้ารหัสของโครโมโซมแสดงดังรูปที่ 3.2 โดยรูปที่ 3.2 (b) คือรหัสของโครโมโซมที่ได้จากการเข้ารหัสของวงจรในรูปที่ 3.2 (a)



(a) ตัวอย่างการเชื่อมต่อของวงจรกรองอนาล็อก

112	-1	-2	-2	-1	0	154	-1
0	476	429	414	440	0	0	440
0	205	249	256	242	0	0	242
0	58	0	0	0	0	0	0

(b) รหัสของโครโมโซม

รูปที่ 3.2 ตัวอย่างการเข้ารหัสของโครโมโซม

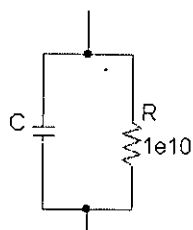
จากรูปที่ 3.2 (a) จะเห็นได้ว่า วงจรเริ่มเชื่อมต่อตัวต้านทานปิดด้านหัวของวงจร (R-Terminate) ต่อจากแหล่งจ่ายแรงดัน จากนั้นจึงเชื่อมต่อตัวต้านทาน R1 ด้านบนต่อจากตัวต้านทานปิดด้านหัวของวงจร และจะสลับไปด้านล่างและด้านบนตามลำดับ โดยจากรูปที่ 3.2 (a) มีรหัส 0 ปรากฏในตำแหน่ง (1,6) ดังนั้นจึงไม่มีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ในตำแหน่งที่ 6 นี้ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อของตัวต้านทาน R7 อยู่ด้านบนต่อกับตัวเหนี่ยวนำ L5 และตัวเก็บประจุ C5 ที่ค่อนข้างนานกันอยู่

3.3.3 การแก้ปัญหาวงจรที่ไม่สามารถประมวลผลโดยโปรแกรม PSPICE

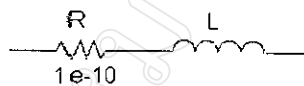
การใช้โปรแกรม PSPICE จำลองการเชื่อมต่องานนั้น อาจเกิดปัญหาไม่สามารถประมวลผลได้ เมื่อมีการเชื่อมต่อตัวตัวเก็บประจุหรือตัวเหนี่ยวนำภายในวงจร เนื่องจากค่าของตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานนั้นเป็นค่าทางอุดมคติ (Ideal) ที่ไม่มีการคิดค่าความต้านทานภายในรวมอยู่ด้วย ซึ่งปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยใช้ตัวต้านทานเข้าไปต่อเชื่อมกับตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุได้ดังนี้

- การเชื่อมต่อตัวเก็บประจุที่ความถี่ต่ำตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เหมือนการเปิดวงจร (Open Circuit) และที่ความถี่สูงตัวเก็บประจุจะทำหน้าที่เหมือนการปิดวงจร (Short Circuit) จึงใช้ตัวต้านทานที่ขนาดสูงมากๆ เช่น 1×10^{10} โอห์มซึ่งเป็นค่าสมมุติขึ้นต่อขนานกับตัวเก็บประจุ
- การเชื่อมต่อตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ต่ำตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เหมือนการปิดวงจร (Short Circuit) และที่ความถี่สูงตัวเหนี่ยวนำจะทำหน้าที่เหมือนการเปิดวงจร (Open Circuit) จึงใช้ตัวต้านทานขนาดต่ำมากๆ เช่น 1×10^{-10} โอห์มซึ่งเป็นค่าสมมุติขึ้นต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

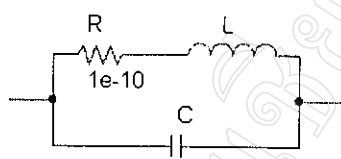
โดยตัวอย่างการเชื่อมต่อตัวต้านทาน เข้ากับตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในรูปแบบต่างๆแสดงได้ดังรูปที่ 3.3 (a) (b) (c) และ (d) ตามลำดับ



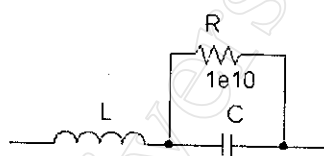
(a) ตัวเก็บประจุ



(b) ตัวเหนี่ยวนำ



(c) ตัวเหนี่ยวนำต่อขนานกับตัวเก็บประจุ



(d) ตัวเหนี่ยวนำต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุ

รูปที่ 3.3 การแก้ไขปัญหาวงจรที่ไม่สามารถประมวลผลโดยโปรแกรม PSPICE

3.4 ฟังก์ชันจุดประสงค์และฟังก์ชันค่าความเหมาะสม

การคำนวณหาฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะอาศัย โปรแกรม PSPICE โดยใช้วิธีถอดรหัสของโครโมโซมแต่ละตัวให้อยู่ในรูปของการเชื่อมต่อวงจรของอุปกรณ์ต่างๆที่มีแหล่งจ่ายแรงดันกระแสสลับขนาด 1 โวลต์ และสามารถเปลี่ยนแปลงความถี่ของการจ่ายแรงดันได้ตามที่โปรแกรมกำหนด (ตัวแปร f_{min} คือความถี่ต่ำสุด และ f_{max} คือความถี่สูงสุด) และวัดแรงดันตกคร่อมระหว่างตัวต้านทานที่ปิดส่วนท้ายของวงจร (R-Terminate) กับ โหนดกราวด์ (Ground) ได้เป็นแรงดันด้านขาออกของวงจร จากนั้นบันทึกรูปแบบการเชื่อมต่อของวงจรลงในไฟล์ “ชื่อไฟล์.cir” ตามลักษณะการเขียนโปรแกรมของ PSPICE เพื่อส่งไปประมวลผลยังโปรแกรม PSPICE และจะได้ผลลัพธ์เป็นค่าของแรงดันด้านขาออกของวงจร (แรงดันคร่อมตัวต้านทานที่ปิดส่วนท้ายของวงจร) ณ ความถี่ต่างๆตั้งแต่ความถี่ต่ำสุด (f_{min}) จนถึงความถี่สูงสุด (f_{max}) ทั้งนี้ ความละเอียดในการพิจารณา ณ ความถี่ต่างๆ จะถูกกำหนดเป็น จำนวนจุดต่อเดเคด (Points per Decade) ซึ่งเป็นค่าที่โปรแกรมกำหนดให้โดยอัตโนมัติ

เมื่อได้ค่าผลตอบแทนของแรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆของแต่ละวงจรแล้ว จึงนำผลลัพธ์ที่ได้ ไปหาค่าความเหมาะสม โดยพิจารณาเปรียบเทียบกับความต้องการในการออกแบบวงจรกรองที่ถูกกำหนดไว้โดยผู้ใช้ สำหรับการพิจารณาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาลอกจะแตกต่างกันตามลักษณะของวงจรกรองซึ่งมี 4 ชนิดได้แก่ วงจรกรองอนาลอกแบบผ่านต่ำ (Low-pass Filter) วงจรกรองอนาลอกแบบผ่านสูง (High-pass Filter) วงจรกรอง

อนาล็อกแบบผ่านแถบ (Band-pass Filter) และวงจรกรองอนาล็อกแบบ กำจัดแถบ (Band-elimination Filter) ตามลำดับ

3.4.1 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ

สำหรับการหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำจะพิจารณาจากค่าความผิดพลาดของแรงดันด้านขาออกของวงจร ณ ความถี่ต่างๆเทียบกับข้อกำหนดในการออกแบบ โดยแบ่งออกเป็น 3 กรณีตามช่วงความถี่ที่พิจารณา คือ ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Pass-band) ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ (Stop-band) และช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงจากช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ไปเป็นช่วงความถี่ที่กำลังมีการเปลี่ยนแปลงระดับของสัญญาณ (Transition-band) ซึ่งมีลักษณะการหาค่าความผิดพลาดที่แตกต่างกันดังนี้

ก. การหาค่าความผิดพลาดของแรงดันด้านขาออกของวงจรในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์จนถึง f_p เฮิรตซ์ โดยกำหนดให้ระดับแรงดันด้านขาออกของวงจรแกว่งได้ไม่เกิน $\pm K_p$ เดซิเบล ปกติแล้วแรงดันด้านขาออกของวงจรในช่วงความถี่นี้ควรมีค่าเท่ากับระดับแรงดันสูงสุด และสำหรับการเชื่อมต่อวงจรแบบที่มีตัวต้านทานปิดหัวและท้ายของวงจร (R-R Terminate) จะมีระดับแรงดันสูงสุดประมาณ -6.026 เดซิเบล ดังนั้นระดับแรงดันที่ยอมรับได้คือ ระดับแรงดันด้านขาออกที่มีค่าอยู่ระหว่าง $-6.026 \pm K_p$ เดซิเบลนั่นเอง ซึ่งระดับแรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆตั้งแต่ 0 ถึง f_p เฮิรตซ์ที่มีขนาดอยู่ระหว่างค่านี้ จะมีค่าความผิดพลาด ณ ความถี่นั้นๆเท่ากับ 0 และหากระดับแรงดันด้านขาออกของวงจรมีขนาดเกินหรือต่ำกว่าค่าในช่วง $-6.026 \pm K_p$ เดซิเบลนี้ จะกำหนดให้มีค่าความผิดพลาดเป็นค่าบวกมากขึ้นตามลำดับ

เพื่อความสะดวกในการคำนวณ ก่อนการหาค่าความผิดพลาดจะมีการปรับระดับของแรงดันขึ้น โดยบวกค่า -6.026 เดซิเบลเข้ากับแรงดันด้านขาออกของทุกๆความถี่ ดังสมการ (3.1)

$$\begin{aligned} v(i) &= V(i) - 20 \log(0.5) \\ &= V(i) + 6.026 \end{aligned} \quad (3.1)$$

เมื่อ $V(i)$ คือ ระดับแรงดันของสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆที่ได้จากโปรแกรม PSPICE

$v(i)$ คือ ระดับแรงดันของสัญญาณ ณ ความถี่ต่างๆที่ปรับค่าแล้ว

i คือ ความถี่แต่ละจุดตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์จนถึงความถี่อนันต์

แต่ทั้งนี้โปรแกรม PSPICE จะไม่สามารถประมวลผลหาค่า ณ ความถี่เท่ากับ 0 เฮิรตซ์ในโหมดเดคเคดได้ ดังนั้นจึงอนุโลมให้คำนวณหาความถี่ ณ จุดต่างๆตั้งแต่ 1 เฮิรตซ์ขึ้นไป และในที่นี้ความถี่อนันต์จะกำหนดเป็นความถี่ที่มีค่าสูงกว่าความถี่ f_s เฮิรตซ์ เช่น $1000 \times f_s$ เฮิรตซ์เป็นต้น

การหาความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ แสดงดังสมการ (3.2)

$$E_{pb}(i) = \begin{cases} 0 & \text{if } |v(i)| \leq K_p \\ |v(i)| - K_p & \text{if } |v(i)| > K_p \end{cases} \quad (3.2)$$

เมื่อ $E_{pb}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

i คือ จุดความถี่ต่างๆในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

K_p คือ อัตราการลดทอนในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ และมีค่าเป็นบวกเสมอ

ข. การหาความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

ในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ ซึ่งคือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ f_s เฮิรตซ์ จนถึง ความถี่อนันต์ ($+\infty$) การกำหนดระดับแรงดันด้านขาออกของวงจรที่ความถี่มากกว่าหรือเท่ากับ f_s จะต้องต่ำกว่า $-K_s$ เดซิเบล และหากแรงดันสูงสุดมีค่าเป็น -6.02 เดซิเบลแล้วจะกำหนดได้ว่าระดับแรงดันด้านขาออกของวงจรจะต้องต่ำกว่า $-6.026 - K_s$ เดซิเบลนั่นเอง ซึ่งระดับแรงดันด้านขาออก ณ จุดความถี่ต่างๆตั้งแต่ f_s ถึงความถี่อนันต์ที่ต่ำกว่าค่านี้ จะถือว่ามีความผิดพลาด ณ ความถี่นั้นๆเท่ากับ 0 และหากระดับแรงดันด้านขาออกของวงจรมีขนาดสูงกว่า $-6.026 - K_s$ เดซิเบล จะกำหนดให้มีค่าความผิดพลาดเป็นค่าบวกมากขึ้นตามลำดับ

เมื่อได้ปรับระดับแรงดันเพื่อให้การหาความผิดพลาดทำได้ง่ายขึ้นตามสมการ (3.1) แล้ว จะสามารถหาความเหมาะสมในช่วงที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ดังแสดงในสมการ (3.3)

$$E_{sb}(i) = \begin{cases} 0 & \text{if } v(i) \leq -K_s \\ v(i) + K_s & \text{if } v(i) > -K_s \end{cases} \quad (3.3)$$

เมื่อ $E_{sb}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

i คือ จุดความถี่ต่างๆในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้

K_s คือ อัตราการลดทอนในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มีค่าเป็นบวกเสมอ

ค. การหาค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ

ช่วงความถี่นี้เป็นช่วงที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณของแรงดันด้านขาออกจากช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ไปเป็นช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ ซึ่งจะไม่มีการหาค่าความผิดพลาดในช่วงนี้ เนื่องจากโดยปกติแล้วระดับแรงดันของสัญญาณด้านขาออกจะมีลักษณะเปลี่ยนแปลงโดยลดจากระดับแรงดันสูงในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ไปเป็นระดับแรงดันต่ำในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้อยู่แล้ว ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่นี้มีค่าเท่ากับ 0 ทั้งหมด ดังสมการ (3.4)

$$E_{tb}(i) = 0 \quad (3.4)$$

เมื่อ $E_{tb}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ

i คือ จุดความถี่ต่างๆในช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ

ง. การหาค่าความผิดพลาดรวมและค่าความเหมาะสมของโครโมโซม

เมื่อหาค่าความผิดพลาด ณ ความถี่ต่างๆแล้วจึงหาผลรวมของค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ทั้งหมดนี้อีกครั้ง ได้เป็นค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซม ดังแสดงในสมการ (3.5)

$$\text{total_error} = \sum_i E_{pb}(i) + \sum_i E_{tb}(i) + \frac{\sum E_{sb}(i)}{K_s}$$

แต่ค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้นจะได้

$$\text{total_error} = \sum_i E_{pb}(i) + \frac{\sum E_{sb}(i)}{K_s} \quad (3.5)$$

เมื่อ total_error คือ ค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซม

i คือ จุดความถี่ต่างๆในช่วงความถี่แต่ละช่วง

จากสมการ (3.5) ในการหาค่าความผิดพลาดรวม มีการนำค่า K_i มาหารค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ เพื่อเป็นกำหนดน้ำหนัก (Weight) ให้กับค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้นี้ โดยลดความสำคัญลงและให้ความสำคัญกับค่าความผิดพลาดในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้มากขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากจะต้องนำค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซมไปใช้ในการหาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมด้วย ดังนั้นหากมีการกำหนดลำดับความสำคัญของค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงความถี่ไม่ดีพอ จะได้ค่าความเหมาะสมที่มีผลทำให้การทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึมไม่สามารถค้นหาคำตอบไปในแนวทางที่ถูกต้องได้ ซึ่งคำตอบที่ได้อาจตกอยู่ในจุดที่ดีที่สุดเฉพาะแห่งเท่านั้น (Local Optimal) ทำให้ไม่สามารถค้นพบคำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริงได้

ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมแสดงดังสมการ (3.6) โดยกำหนดให้ค่าความเหมาะสมที่มีค่ามากคือค่าความเหมาะสมที่ดี และค่าความเหมาะสมที่มีค่าน้อยคือค่าความเหมาะสมที่แย่ตามลำดับ

$$\text{Fitness} = \frac{1}{\text{total_error} + \epsilon} \quad (3.6)$$

เมื่อ Fitness คือ ค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม

ϵ คือ จำนวนจริงบวกที่มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ (2.2204×10^{-16})

ค่า ϵ ใช้เพื่อป้องกันการเกิดค่าความผิดพลาดรวมที่มีค่าเท่ากับ 0 ซึ่งจะทำให้ค่าความเหมาะสมไม่สามารถหาค่าได้

3.4.2 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูง

การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านสูง จะมีช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้และช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ตรงกันข้ามกับการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ โดยแบ่งการหาค่าความผิดพลาดออกเป็น 3 ช่วงความถี่คือ

1. ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้ คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ถึง f_c เฮิรตซ์ ใช้การหาค่าความผิดพลาดตามสมการ (3.3)
2. ช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณ คือ ช่วงความถี่ที่มากกว่า f_c เฮิรตซ์แต่น้อยกว่า f_p เฮิรตซ์ มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0
3. ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้ คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ f_p เฮิรตซ์ถึงความถี่อื่นใด ใช้การหาค่าความผิดพลาดตามสมการ (3.2)
4. การหาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซม ใช้การหาค่าความผิดพลาดตามสมการ (3.5)
5. การหาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ใช้การหาค่าตามสมการ (3.6)

3.4.3 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ

การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ จะแตกต่างจากการหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำเพียงเล็กน้อย นั่นคือ จะมีการแบ่งช่วงความถี่ของการหาค่าความผิดพลาดออกเป็น 5 ช่วง จากทั้งหมด 3 แบบ คือ

1. ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้ คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ถึง f_{s1} เฮิรตซ์ ใช้การหาค่าความผิดพลาดตามสมการ (3.3)
2. ช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณช่วงที่ 1 คือช่วงความถี่ที่มากกว่า f_{s1} เฮิรตซ์แต่น้อยกว่า f_{p1} เฮิรตซ์ มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0
3. ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านได้ คือช่วงความถี่ตั้งแต่ f_{p1} เฮิรตซ์ถึง f_{p2} เฮิรตซ์ ใช้การหาค่าความผิดพลาดตามสมการ (3.2)
4. ช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณช่วงที่ 2 คือช่วงความถี่ที่มากกว่า f_{p2} เฮิรตซ์แต่น้อยกว่า f_{s2} เฮิรตซ์ มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0
5. ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้ คือช่วงความถี่ตั้งแต่ f_{s2} เฮิรตซ์ขึ้นไป ใช้การหาค่าความผิดพลาดตามสมการ (3.3)
6. การหาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซม จะคล้ายกับสมการ (3.5) ที่ใช้หาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านต่ำ แต่แตกต่างกันที่การหาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบมีช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ 2 ช่วง ดังสมการ (3.7)

$$\text{total_error} = \frac{\sum_i E_{sbl}(i)}{K_{s1}} + \sum_i E_{pb}(i) + \frac{\sum_i E_{sbl}(i)}{K_{s1}} \quad (3.7)$$

เมื่อ $E_{sbl}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้

K_{s1} คือ อัตราการลดทอนขั้นต่ำในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้

$E_{sbl}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้

K_{s2} คือ อัตราการลดทอนขั้นต่ำในช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้

จากสมการ (3.7) จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการลดทอนขั้นต่ำ K_{s1} และ K_{s2} ซึ่งไม่จำเป็นที่จะต้องมามีค่าเท่ากันจะถูกนำไปหารค่าความผิดพลาดของแต่ละช่วงความถี่ ทั้งนี้เพื่อเป็นการปรับระดับความสำคัญของค่าความผิดพลาดในแต่ละช่วงความถี่ ที่จะทำให้ได้ค่าความเหมาะสมที่สุดต่อไป

7. การหาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ใช้การหาค่าตามสมการ (3.6)

3.4.4 การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบก้ำจัดแถบ

การหาค่าความเหมาะสมของวงจรกรองอนาล็อกแบบก้ำจัดแถบ จะมีช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้และช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ตรงกันข้ามกับการออกแบบวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ โดยแบ่งช่วงความถี่ออกเป็น 5 ช่วงคือ

1. ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้ คือ ช่วงความถี่ตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ ถึง f_{p1} เฮิรตซ์ ใช้การหาค่าความเหมาะสมตามสมการ (3.2)

2. ช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณช่วงที่ 1 คือช่วงความถี่ที่มากกว่า f_{p1} เฮิรตซ์ แต่น้อยกว่า f_{s1} เฮิรตซ์ มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0

3. ช่วงความถี่ที่ไม่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านได้ คือช่วงความถี่ตั้งแต่ f_{s1} เฮิรตซ์ ถึง f_{s2} เฮิรตซ์ ใช้การหาค่าความเหมาะสมตามสมการ (3.3)

4. ช่วงความถี่ที่กำลังเปลี่ยนแปลงระดับสัญญาณช่วงที่ 2 คือช่วงความถี่ที่มากกว่า f_{s2} เฮิรตซ์ แต่น้อยกว่า f_{p2} เฮิรตซ์ มีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0

5. ช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้ คือช่วงความถี่ตั้งแต่ f_{p2} เฮิรตซ์ ถึงความถี่อนันต์ ใช้การหาค่าความเหมาะสมตามสมการ (3.2)

6. การหาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซม จะคล้ายกับสมการ (3.7) ที่ใช้หาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบ แต่แตกต่างกัน

กันที่การหาค่าความผิดพลาดรวมของแต่ละโครโมโซมของวงจรกรองอนาล็อกแบบผ่านแถบมีช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้ 2 ช่วง และมีช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณผ่านได้เพียง 1 ช่วง ดังสมการ (3.8)

$$\text{total_error} = \sum_i E_{pb1} + \frac{\sum_i E_{sb}}{K_s} + \sum_i E_{pb2} \quad (3.8)$$

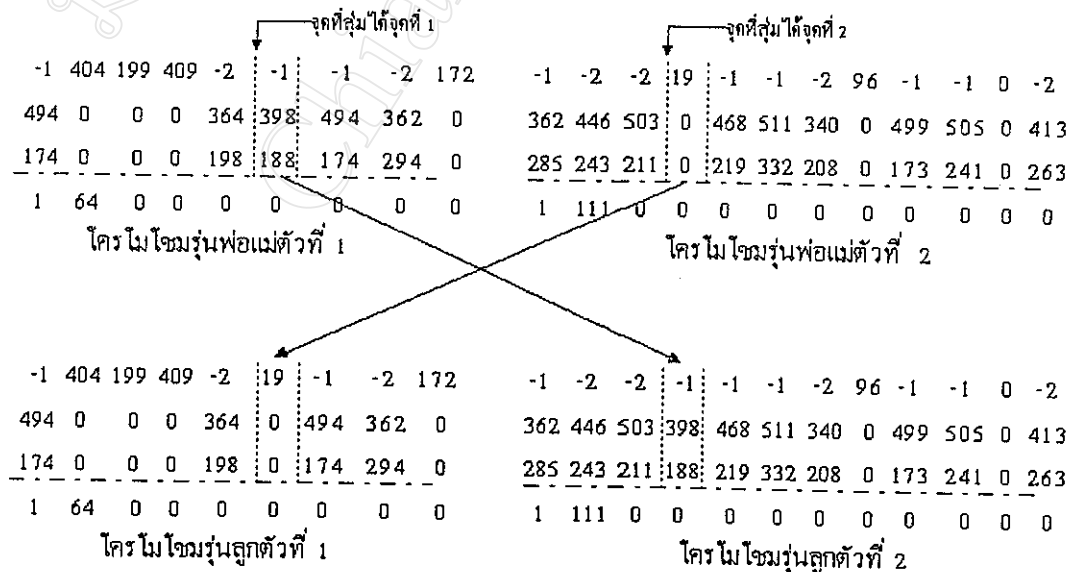
เมื่อ $E_{pb1}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านต่ำได้

$E_{pb2}(i)$ คือ ค่าความผิดพลาดที่แต่ละความถี่ f_i ในช่วงความถี่ที่ยอมให้สัญญาณความถี่ผ่านสูงได้

7. การหาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซม ใช้การหาค่าความเหมาะสมตามสมการ (3.6)

3.5 การครอสโอเวอร์

การครอสโอเวอร์ของโครโมโซมต่างๆที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้การครอสโอเวอร์แบบสองจุด (Two Point Crossover) โดยเริ่มจากสุ่มโครโมโซมจากรุ่นพ่อแม่ 2 ตัว จากนั้นสุ่มจุดที่จะทำการครอสโอเวอร์ของโครโมโซมตัวรุ่นพ่อแม่ตัวที่ 1 และตัวที่ 2 ตามลำดับ โดยตัวอย่างการครอสโอเวอร์แสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการครอสโอเวอร์

การสุ่มจุดที่ใช้ในการครอสโอเวอร์จะต้องสุ่มจุดสองจุดที่อยู่ติดกันเช่นในรูปที่ 3.4 โครโมโซมรุ่นพ่อแม่ตัวที่ 1 ถูกสุ่มจุดที่ทำการครอสโอเวอร์ได้ในตำแหน่งที่ 5 (คือจุดที่อยู่ระหว่างหลักที่ 4 และหลักที่ 5) ดังนั้นยีนส์ในตำแหน่งที่อยู่ระหว่าง 5 และตำแหน่งที่ 6 จะถูกเลือกไปใช้ในการครอสโอเวอร์ ซึ่งก็คือ ยีนส์ในตำแหน่งแถวที่ 1 ถึง 3 ของหลักที่ 5 นั้นเอง (รหัส 19 0 0)

ดังนั้นการสุ่มเลือกตำแหน่งเพื่อใช้ในการครอสโอเวอร์ ณ ตำแหน่งต่างๆจึงเปรียบได้กับการสุ่มตำแหน่งหลักของโครโมโซมตั้งแต่ตำแหน่งหลักที่ 1 ถึงหลักสุดท้ายของโครโมโซมนั้นๆ นั้นเอง และส่วนของโครโมโซมที่จะถูกครอสโอเวอร์นี้จะทำเฉพาะยีนส์ตั้งแต่แถวที่ 1 ถึง 3 ของแต่ละหลัก โดยจะไม่เกี่ยวข้องกับแถวที่ 4 ของโครโมโซม เนื่องจากแถวที่ 4 นั้นมีการเข้ารหัสพิเศษเพื่อบ่งบอกถึงตำแหน่งเริ่มต้นของการเชื่อมต่อวงจรในตำแหน่ง (4,1) และค่าของตัวด้านทานปิดหัวท้ายในตำแหน่ง (4,2)

จากนั้นนำโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ตัวที่ 2 สุ่มจุดที่จะครอสโอเวอร์อีกครั้ง โดยค่าที่สุ่มได้ไม่จำเป็นที่จะต้องเป็นตำแหน่งเดียวกันกับจุดที่สุ่มได้ในโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ตัวที่ 1

ขั้นตอนต่อไปจึงสลับค่าของยีนส์ที่ถูกเลือกของแต่ละโครโมโซมจะได้โครโมโซมรุ่นลูกตัวที่ 1 และโครโมโซมรุ่นลูกตัวที่ 2 ตามลำดับ

การครอสโอเวอร์วิธีนี้มีความหมายต่อการพัฒนาวงจรให้มีรูปแบบตามข้อกำหนดไว้มากขึ้น เนื่องจากในแต่ละหลักของแถวที่ 1 ถึง 3 เป็นส่วนของอุปกรณ์ส่วนต่างๆที่ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน และอุปกรณ์ส่วนต่างๆเหล่านี้ต่างมีผลทำให้ลักษณะของแรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆเปลี่ยนแปลงไป ดังนั้นการครอสโอเวอร์จึงเป็นการสลับยีนส์และโครโมโซมต่างๆเหล่านี้ให้อยู่ในตำแหน่งที่เหมาะสมและเป็นการนำส่วนต่างๆของอุปกรณ์ที่มีผลทำให้ลักษณะของแรงดันด้านขาออก ณ ความถี่ต่างๆตรงตามข้อกำหนดในการออกแบบมากยิ่งขึ้นมารวมตัวอยู่ด้วยกัน กลายเป็นโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีขึ้น

3.6 การมิวเตชัน

การมิวเตชันเป็นอีกขบวนการหนึ่งที่จะต้องทำควบคู่กับการครอสโอเวอร์ เนื่องจากการครอสโอเวอร์เป็นการสลับยีนส์ระหว่างโครโมโซมต่างๆ ดังนั้นเมื่อผ่านการเลือก (Selection) ไปจะทำให้ประชากรเริ่มเข้าสู่จุดหนึ่ง และลักษณะของโครโมโซมต่างๆของประชากรจะเริ่มมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมากขึ้น ดังนั้นเมื่อทำการครอสโอเวอร์โครโมโซมรุ่นลูกที่ได้จึงอาจมีลักษณะที่ไม่เปลี่ยนแปลงไปจากโครโมโซมในรุ่นพ่อแม่ ทำให้ไม่สามารถพัฒนาลักษณะของโครโมโซมให้ดีขึ้นได้ จึงต้องมีการมิวเตชันเข้ามาช่วยในการเปลี่ยนแปลงลักษณะของยีนส์ภายในโครโมโซม

ให้มีความแปลกใหม่มากขึ้น เพราะจะมีโอกาสที่โครโมโซมจะถูกพัฒนาให้มีค่าความเหมาะสมที่ดีขึ้นได้

การมิวเตชันในงานวิจัยนี้ใช้การมิวเตชันแบบจุดเดียว (One Point Mutation) คือ สุ่มเลือกโครโมโซมจากประชากรรุ่นพ่อแม่ จากนั้นสุ่มจุดที่จะทำการมิวเตชันตั้งแต่หลักที่ 1 ถึงหลักที่ $n+1$ เมื่อ n คือ จำนวนหลักสูงสุดของโครโมโซมแต่ละตัว จากนั้นเปลี่ยนค่าของบิต ณ ตำแหน่งหลักที่สุ่มได้ไปเป็นค่าที่สุ่มขึ้นมาใหม่ โดยแสดงได้ดังรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่า การกำหนดให้มีโอกาสเกิดการมิวเตชันในตำแหน่งที่ $n+1$ ซึ่งเป็นตำแหน่งถัดจากตำแหน่งหลักสุดท้ายของโครโมโซมด้วย ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการเพิ่มจำนวนอันดับต่อท้ายโครโมโซมตัวนี้ได้อีกด้วย

	-1	404	199	409	-2	-1	-1	-2	172
โครโมโซมรุ่นพ่อแม่	494	0	0	0	364	398	494	362	0
	174	0	0	0	198	188	174	294	0
	1	64	0	0	0	0	0	0	0
	-1	404	199	409	-2	-2	-1	-2	172
โครโมโซมรุ่นลูก	494	0	0	0	364	403	494	362	0
	174	0	0	0	198	238	174	294	0
	1	64	0	0	0	0	0	0	0

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการมิวเตชัน

จากตัวอย่างในรูปที่ 3.5 จะเห็นว่า เมื่อจุดที่ถูกมิวเตชันเป็นตำแหน่งหลักที่ 5 จะต้องทำการเปลี่ยนค่าทั้งในแถวที่ 1 2 และ 3 ของหลักที่ 5 ด้วย โดยใช้วิธีการสุ่มขึ้นมาใหม่ ซึ่งจากตัวอย่างในตำแหน่งเดิม คือ ตัวเก็บประจุ (รหัส 364) และตัวเหนี่ยวนำ (198) ที่เชื่อมต่อบนอนุกรมถูกแทนที่ด้วยตัวต้านทานเพียง 1 ตัว (รหัส 128) ทั้งนี้การมิวเตชันจะไม่มีผลใดๆต่อยีนส์ตำแหน่งต่างๆในแถวที่ 4 เนื่องจากการกำหนดรหัสพิเศษที่ได้กล่าวมาแล้วในช่วงต้น

3.7 การเลือก

เมื่อได้โครโมโซมรุ่นลูกที่เกิดจากการมิวเตชันและครอสโอเวอร์แล้ว ต่อไปจึงนำโครโมโซมรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกทั้งหมดมาผ่านการเลือก เพื่อกำจัดโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมแย่ออกไป และเก็บโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีไว้ โดยใช้วิธีการเลือกแบบหมุนกงล้อ (Roulette Wheel Selection) ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. กำหนดให้ค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับบวกอนันต์ และค่าความเหมาะสมที่แย่ที่สุดมีค่าเป็น 0
2. หาผลรวมค่าความเหมาะสมของโครโมโซมทุกตัวตามสมการ (3.9)

$$\text{Total_fitness} = \sum_{n=1}^{n=\text{pop_parent}+\text{pop_offspring}} \text{Fitness}(n) \quad (3.9)$$

เมื่อ Total_fitness คือ ผลรวมค่าความเหมาะสมของโครโมโซมรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกทั้งหมด

$\text{Fitness}(n)$ ค่าค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละตัว

pop_parent คือ จำนวนโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ทั้งหมด (คือ จำนวนประชากร)

pop_offspring คือ จำนวนโครโมโซมรุ่นลูกที่เกิดขึ้นจากการครอสโอเวอร์และมิวเตชัน

3. หาค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของแต่ละโครโมโซม ตามสมการ (3.10)

$$p(n) = \frac{\text{Fitness}(n)}{\text{Total_fitness}} \quad (3.10)$$

เมื่อ $p(n)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกของโครโมโซมตัวที่ n

4. หาค่าความน่าจะเป็นสะสมที่จะถูกเลือกของแต่ละโครโมโซม ตามสมการ (3.11)

$$q(n) = \begin{cases} p(n) & \text{if } n=1 \\ p(n) + p(n-1) & \text{if } n \geq 2 \end{cases} \quad (3.11)$$

เมื่อ $q(n)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นสะสมของโครโมโซมแต่ละตัว

n คือ โครโมโซมแต่ละตัว โดยมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง $\text{pop_parent} + \text{pop_offspring}$ ตัว

ดังนั้นจะได้ว่า ถ้า n คือ โครโมโซมตัวสุดท้าย ($n = \text{pop_parent} + \text{pop_offspring}$) แล้ว $q(n)$ จะมีค่าเท่ากับ 1 เสมอ

5. เริ่มทำการสุ่มเลือกโครโมโซมตามสัดส่วนของส่วนกลับค่าความเหมาะสมเป็นจำนวนเท่ากับขนาดของประชากร (pop_size) หรือเท่ากับจำนวนโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ (pop_parent) โดยสุ่มค่า r ขึ้นในช่วง 0 ถึง 1 เป็นจำนวน pop_size ครั้ง หากค่า r ที่สุ่มได้มีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็นสะสมของโครโมโซม $n-1$ และมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าความน่าจะเป็นสะสมของโครโมโซม n จะเลือกโครโมโซมตัวที่ n ไปเป็นประชากรในรุ่นถัดไป โดยโครโมโซมใดที่มีค่าความเหมาะสมมาก จะมีโอกาสถูกเลือกไปเป็นประชากรในรุ่นต่อไปได้สูง

6. เมื่อเลือกโครโมโซมใดมาเป็นโครโมโซมในรุ่นต่อไปแล้ว จะต้องคัดลอกค่าความเหมาะสมของโครโมโซมนั้นไปด้วย เพราะไม่จำเป็นต้องคำนวณหาค่าความเหมาะสมของโครโมโซมเหล่านี้ซ้ำอีก

3.8 เทคนิคการปรับขนาดของอุปกรณ์ภายในวงจร

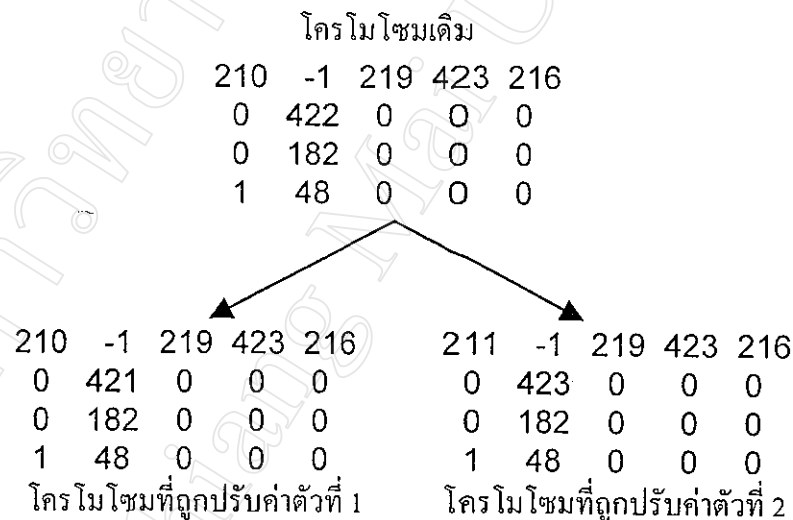
การค้นหาคำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมซึ่งเป็นการค้นหาโดยใช้การวิวัฒนาการลักษณะของโครโมโซมที่หลายๆ โครโมโซมเท่ากับจำนวนประชากร ซึ่งมีข้อดีคือ สามารถหาคำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริงจากคำตอบ ณ จุดต่างๆ ได้ แต่เงินเนติกอัลกอริทึมมีปัญหาในการพัฒนาคำตอบเฉพาะแห่งซึ่งจะทำให้ช้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำเทคนิคการพัฒนาคำตอบเฉพาะแห่ง (Local Optimization) หรือที่เรียกกันว่า การค้นหาแบบปีนเนินเขา (Hill Climbing) แต่ในที่นี้ขอเรียกว่าเป็น การขยับค่า (Sliding) แทนเพื่อให้สอดคล้องกับลักษณะการทำงานของโปรแกรม

วิธีการนี้จะใช้เพื่อปรับขนาดของอุปกรณ์ต่างๆ ภายในวงจรแต่ละโครโมโซม เพื่อหาว่าเมื่อปรับขนาดอุปกรณ์ในตำแหน่งต่างๆ ไปแล้วโครโมโซมที่เปลี่ยนแปลงไปจะมีค่าความเหมาะสมที่ดีขึ้นหรือไม่ สำหรับเทคนิคการปรับค่าของอุปกรณ์นั้น มี 2 รูปแบบคือ การปรับค่าทีละ 1 ค่า และการปรับค่าทีละ 1 ใน 10 ของช่วงระยะห่างระหว่างค่านั้นๆ กับค่าขอบเขตบนและล่างของอุปกรณ์นั้น

3.8.1 การปรับขนาดของอุปกรณ์ครั้งละ 1 ค่า

คือการปรับขนาดของอุปกรณ์ที่แต่ละตำแหน่งโดยขั้นทีละ 1 ค่า เช่น หากมีโครโมโซมของวงจรมีจำนวนอุปกรณ์ที่ใช้ทั้งหมด 6 ตัว รวมกับตัวด้านทานปิดหัวท้ายของวงจรอีก 1 ตัวรวมเป็น 7 ตัว เมื่อนำโครโมโซมนี้มาปรับขนาดของอุปกรณ์จะต้องปรับขนาดของอุปกรณ์ ตำแหน่งต่างๆทุกตำแหน่ง โดยปรับทั้งการเพิ่มขนาดและลดขนาด ซึ่งการปรับค่าครั้งหนึ่งจะต้องนำไปประมวลผลเพื่อหาค่าความเหมาะสมด้วย (โดยตำแหน่งอื่นๆจะยังไม่ถูกปรับค่าใดๆทั้งสิ้น) ดังนั้นในตัวอย่างจากรูปที่ 3.6 ที่มีอุปกรณ์อยู่ในตำแหน่ง (1,1) (2,2) (3,2) (1,3) (1,4) (1,5) และตำแหน่ง (4,2) ของโครโมโซมซึ่งเป็นตัวด้านทานปิดหัวท้ายรวม 7 ตัว จึงต้องมีการประมวลผลเพื่อปรับค่าให้กับอุปกรณ์ในวงจรจำนวนเท่ากับ 14 ครั้ง

การปรับขนาดจะพิจารณาจากขนาดเดิมของอุปกรณ์นั้นๆ เช่น ในตำแหน่ง (2,2) มีรหัสเป็น 422 ซึ่งเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีรหัสตั้งแต่ 324 ถึง 700 รวม 377 ค่า จะถูกเปลี่ยนรหัสเป็น 421 และ 422 ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างการปรับขนาดอุปกรณ์ของวงจรในตำแหน่ง (2,2)

สำหรับการปรับค่านี้นี้ ค่าของรหัสในโครโมโซมจะต้องไม่ถูกปรับค่าจนเกินขอบเขตรหัสชนิดของอุปกรณ์เดิม เช่น หากตัวด้านทานที่มีรหัสเป็น 167 จะถูกปรับค่าเป็น 166 เพียงค่าเดียวเท่านั้น เนื่องจากรหัส 168 จะกลายเป็นรหัสของตัวเก็บประจุนั่นเอง โดยขอบเขตของค่าอุปกรณ์มีดังนี้

- ตัวด้านทาน มีรหัสตั้งแต่ 1 ถึง 167
- ตัวเก็บประจุ มีรหัสตั้งแต่ 168 ถึง 323
- ตัวเหนี่ยวนำ มีรหัสตั้งแต่ 324 ถึง 700

3.8.2 การปรับขนาดของอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดของอุปกรณ์

การปรับขนาดอุปกรณ์โดยการปรับขนาดครั้งละ 1 ค่า จะทำให้เสียเวลาในการทำงานมาก เนื่องจากค่าที่ถูกปรับนั้นละเอียดเกินไป ดังนั้นจึงได้กำหนดวิธีการปรับขนาดให้สามารถทำได้รวดเร็วขึ้น โดยปรับขนาดอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดของอุปกรณ์แสดงดังสมการ (3.10a) และ (3.10b)

$$\text{new_value_code}(1) = \text{fix} \left(\text{value_code} - \frac{\text{valuecode} - \text{lowerbound}}{10} \right) \quad (3.10a)$$

$$\text{new_value_code}(2) = \text{ceil} \left(\text{value_code} + \frac{\text{upperbound} - \text{valuecode}}{10} \right) \quad (3.10b)$$

เมื่อ $\text{new_value_code}(1)$ คือ รหัสใหม่ที่ถูกปรับค่าให้ลดลง

fix คือ การปัดเศษทศนิยมทิ้งไป เช่น $\text{fix}(0.9)$ มีค่าเท่ากับ 0

value_code คือ รหัสเดิมของอุปกรณ์

lowerbound คือ ขอบเขตล่างของค่าอุปกรณ์

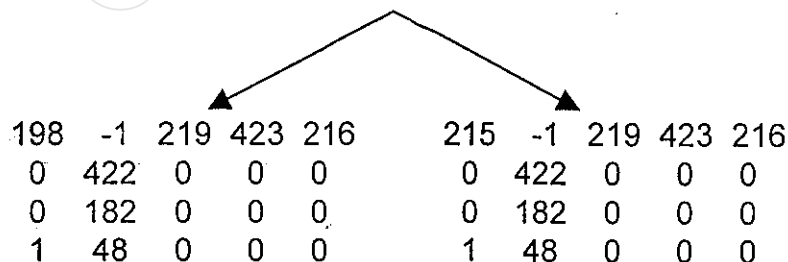
$\text{new_value_code}(2)$ คือ รหัสใหม่ที่ถูกปรับค่าให้เพิ่มขึ้น

ceil คือการปัดเศษทศนิยมขึ้นเป็นเลขจำนวนเต็ม เช่น $\text{ceil}(0.1)$ มีค่าเท่ากับ 1

upperbound คือ ขอบเขตบนของค่าอุปกรณ์

โครโมโซมเดิม

210	-1	219	423	216
0	422	0	0	0
0	182	0	0	0
1	48	0	0	0



โครโมโซมที่ถูกปรับค่าตัวที่ 1

โครโมโซมที่ถูกปรับค่าตัวที่ 2

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างการปรับขนาดอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดของอุปกรณ์

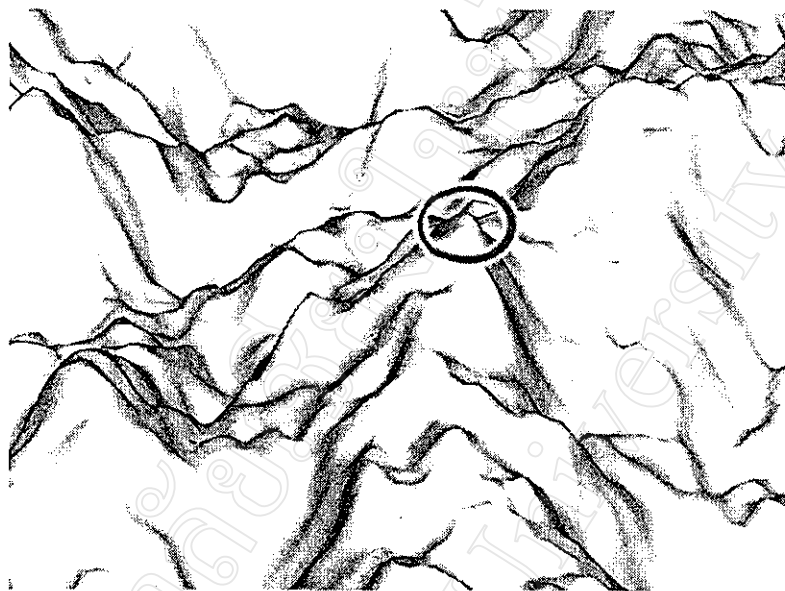
ตัวอย่างการปรับขนาดอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดอุปกรณ์ จากตัวอย่างในรูปที่ 3.7 ถ้ามีการปรับขนาดอุปกรณ์ในตำแหน่ง (1,1) ที่เป็นตัวเก็บประจุรหัส 216 ดังนั้นเมื่อแทนค่าขอบเขตล่างของตัวเก็บประจุ คือ 168 และขอบเขตบนของตัวเก็บประจุ คือ 332 จากสมการ (3.10a) ได้ขนาดอุปกรณ์ใหม่เป็น 211 ดังรูปและจากสมการ (3.10b) ได้ขนาดอุปกรณ์ใหม่เป็น 227 ดังรูปที่ 3.11 (a) และ (b) ตามลำดับ

การปรับขนาดอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดของอุปกรณ์ จะถูกใช้ภายหลังจากที่ผ่านขบวนการครอสโอเวอร์และมิวเทชันได้รุ่นลูก และเมื่อโครโมโซมรุ่นลูก ที่ได้นี้มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าค่าความเหมาะสมเดิม จึงนำขบวนการปรับขนาดอุปกรณ์ครั้งละ 1 ใน 10 ของระยะห่างระหว่างช่วงขนาดอุปกรณ์นี้เข้าช่วย เพื่อปรับขนาดอุปกรณ์ภายในวงจรให้มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดเฉพาะแห่ง โดยเมื่อปรับขนาดจนได้วงจรที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดแล้ว (คือ เมื่อปรับขนาดต่อไป จะได้ค่าความเหมาะสมที่ไม่ดีขึ้นกว่าเดิมอีก) จะป้อนโครโมโซมของวงจรนี้กลับเข้าไปยังประชากรแบบสุ่มเป็นจำนวนร้อยละ 5 ของจำนวนประชากรในรุ่นพ่อแม่

นอกจากนี้ยังใช้การปรับขนาดของอุปกรณ์ครั้งละ 1 ค่าในกรณีที่การทำงานของเจเนติกอัลกอริทึมไม่สามารถพบโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าเดิม เป็นจำนวน 4 รอบการทำงาน จึงให้ใช้การปรับขนาดของอุปกรณ์ครั้งละ 1 ค่านี้เพื่อเป็นการขยับค่าแบบละเอียดให้โครโมโซมถูกพัฒนาได้เป็นโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดเฉพาะแห่งอย่างแท้จริง

อย่างไรก็ตาม ขบวนการปรับขนาดของอุปกรณ์นี้เพียงอย่างเดียว ไม่สามารถใช้ในการหาคำตอบได้เอง เนื่องจากมีข้อเสียตรงที่วิธีการนี้เป็นเพียงการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะในบริเวณใกล้เคียงกับจุดที่ค้นหาเท่านั้น จึงจำเป็นต้องใช้เจเนติกอัลกอริทึมในการค้นหาคำตอบที่หาคำตอบได้ยากและมีพื้นที่ว่างในการค้นหา (Search Space) กว้างมากเป็นขบวนการหลัก

ตัวอย่างของค่าความเหมาะสม ณ จุดต่างๆของพื้นที่ว่างการค้นหาที่กว้างมาก (Very Large Search Space) แสดงดังรูปที่ 3.8 โดยจุดที่วงกลมไว้ (ยอดเขาที่สูงที่สุด) คือ จุดที่มีค่าความเหมาะสมดีสุดอย่างแท้จริง (Global Optimal) จะเห็นว่า หากใช้ขบวนการปรับขนาดของอุปกรณ์ในวงจรหรือการปีนเขา (Local Hill Climbing) เพียงอย่างเดียวแล้ว โอกาสที่คำตอบของปัญหาจะถูกปรับค่าจนไปถึงจุดที่มีค่าความเหมาะสมดีสุดอย่างแท้จริงจึงเป็นไปได้ยากมาก เนื่องจากเมื่อจุดนี้ถูกปรับค่าให้ขึ้นไปถึงยอดเขาเล็กๆซึ่งเป็นจุดที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับจุดข้างเคียง จะทำให้โปรแกรมมองเห็นว่า จุดนี้เป็นจุดที่ดีที่สุดจริงๆ ซึ่งแท้จริงแล้วอาจเป็นเพียงจุดๆหนึ่งที่มีค่าความเหมาะสมดีกว่าจุดรอบๆเท่านั้น แต่ไม่ใช่จุดที่มีค่าความเหมาะสมดีสุดนั่นเอง



รูปที่ 3.8 ตัวอย่างแสดงค่าความเหมาะสม ณ จุดต่างๆของพื้นที่ว่างการค้นหาที่กว้างมาก

แต่เงินเนติกอัลกอริทึมจะเริ่มต้นด้วยการสุ่มคำตอบจำนวนเท่ากับจำนวนประชากร จึงทำให้มีการค้นหาคำตอบในหลายๆตำแหน่งพร้อมกัน ทำให้มีโอกาสที่จะพบคำตอบที่ดีที่สุดอย่างแท้จริงได้ดีกว่า

วิธีในการค้นหาคำตอบโดยใช้เงินเนติกอัลกอริทึมสำหรับปัญหาที่มีพื้นที่ว่างในการค้นหา กว้างมาก อาจกำหนดให้ใช้จำนวนประชากรในแต่ละรุ่นของเงินเนติกอัลกอริทึมจำนวนมากขึ้น เพื่อที่จะทำให้มีโอกาสที่จะพบคำตอบได้มากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเพิ่มจำนวนประชากรนี้จะทำให้ใช้เวลาในการประมวลผลมากขึ้นเช่นกัน

3.9 เทคนิคการเพิ่มจำนวนอันดับให้กับวงจร

เมื่อเงินเนติกอัลกอริทึมเริ่มสุ่มลักษณะของโครโมโซมต่างๆขึ้น จะสุ่มจำนวนอันดับของวงจรในแต่ละโครโมโซมขึ้น จากนั้นจึงสุ่มชนิด (Component Type) ลักษณะการเชื่อมต่อ (Topology) และค่าของอุปกรณ์ (Component Value) ต่างๆขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่า วงจรที่มีจำนวนอันดับมาก จะต้องมีความซับซ้อนของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อนั้นด้วย ดังนั้น โอกาสที่จะชนิด ลักษณะการเชื่อมต่อ หรือค่าของอุปกรณ์ให้ได้วงจรที่มีแรงดันด้านขาออก ตรงกับข้อกำหนดในการออกแบบวงจรกรอง ซึ่งคือวงจรที่มีค่าความเหมาะสมนั้น จะมีโอกาสน้อยกว่าวงจรที่มีจำนวนอันดับต่ำกว่า

ดังนั้นเมื่อเริ่มต้นเงินเนติกอัลกอริทึมอาจพบวงจรที่มีค่าความผิดพลาดต่ำในระดับหนึ่ง เช่น สมมุติว่ามีจำนวนอันดับของวงจรที่ดีที่สุดขณะนี้เท่ากับ 10 เป็นต้น เมื่อเงินเนติกอัลกอริทึมวนทำงาน จะเริ่มมีการแลกเปลี่ยนลักษณะของโครโมโซมต่างๆ จะมีการวิวัฒนาการและทำให้ได้โครโมโซมที่มีค่าความผิดพลาดที่ต่ำลง ซึ่งจำนวนอันดับของวงจรต่างๆจะเริ่มเท่ากัน (อาจเท่ากับ 10 หรือแตกต่างจากนี้เล็กน้อย) และต่อไปค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุดของประชากรจะเริ่มคงที่ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอันดับนั่นเอง

ดังนั้นจึงได้กำหนดให้โปรแกรมเพิ่มจำนวนอันดับ เช่น ถ้าค่าความผิดพลาดที่ต่ำที่สุดในแต่ละรุ่นซ้ำกันเป็นจำนวน 3 รอบ จะต้องเพิ่มจำนวนอันดับให้กับโครโมโซมรุ่นพ่อแม่ทุกตัวในประชากรรุ่นต่อไป ซึ่งการเพิ่มจำนวนอันดับนี้จะใช้วิธีการสุ่มชนิด ลักษณะการเชื่อมต่อ และค่าของอุปกรณ์ขึ้นในตำแหน่งอันดับสุดท้ายต่อจากตำแหน่งหลักสุดท้ายของโครโมโซมนั้นเอง โดยในวงจรกรองแบบผ่านต่ำจะกำหนดให้เพิ่มจำนวนอันดับขึ้นครั้งละ 1 อันดับ และเพิ่มจำนวนอันดับขึ้นครั้งละ 2 อันดับในวงจรกรองแบบผ่านแถบ

โครโมโซมเดิม					โครโมโซมที่ถูกเพิ่มอันดับ					
216	-1	219	423	216	216	-1	219	423	216	-2
0	422	0	0	0	0	422	0	0	0	450
0	182	0	0	0	0	182	0	0	0	234
1	48	0	0	0	1	48	0	0	0	0

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างการเพิ่มอันดับต่อจากตำแหน่งหลักสุดท้ายของโครโมโซม

3.10 เทคนิคการป้องกันการสูญหายของโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุด

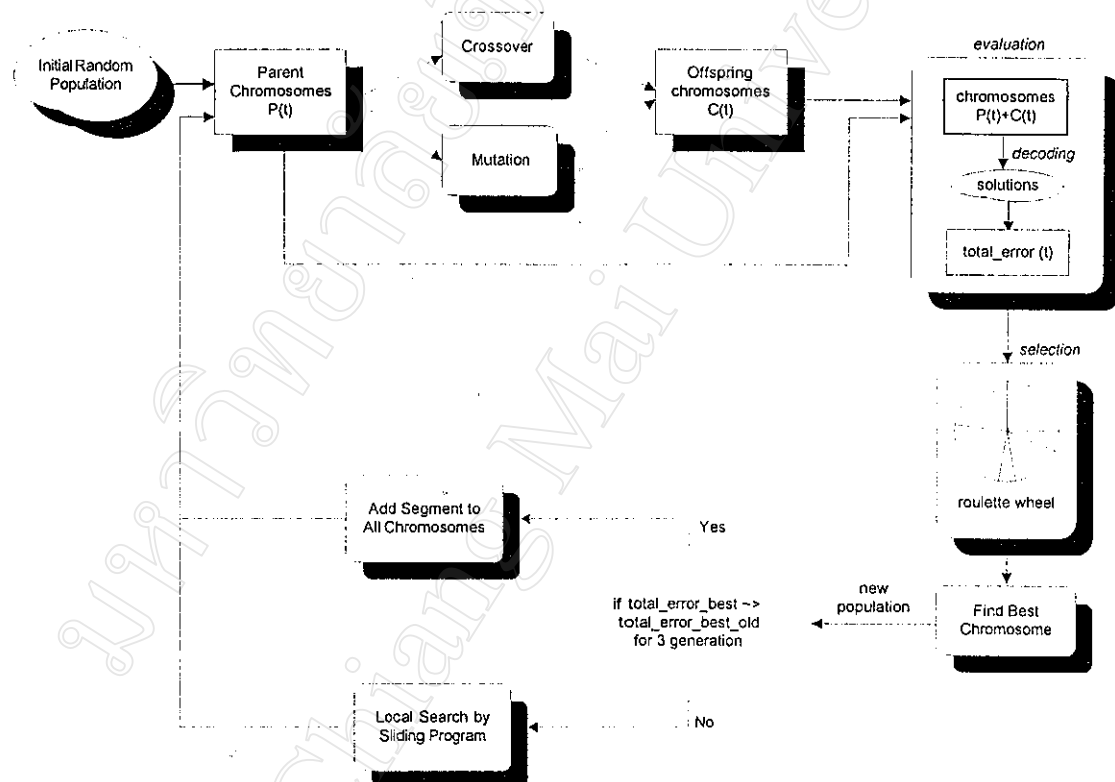
เมื่อเงินเนติกอัลกอริทึมค้นพบโครโมโซมใหม่ที่มีค่าความเหมาะสมดีกว่าเดิม เช่น จากเดิมโครโมโซมที่ดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 3 และค้นพบโครโมโซมตัวใหม่ซึ่งมีค่าความเหมาะสมที่ดีกว่าเป็น 3.1 แต่เมื่อผ่านการเลือกจะพบว่า ถึงแม้โครโมโซมตัวใหม่ที่ค้นพบมีค่าความเหมาะสมดีกว่าโครโมโซมเดิม ซึ่งหมายถึงว่า จะมีโอกาสที่จะถูกคัดเลือกไปเป็นประชากรในรุ่นถัดไปได้มากกว่า แต่ถ้าหากค่าความเหมาะสมของโครโมโซมต่างๆ ไม่แตกต่างกับค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดนี้มากนัก และจำนวนประชากรมีจำนวนมาก จะมีโอกาสที่โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดแต่มีเพียงตัวเดียวนี้ อาจจะไม่ถูกเลือกไปเป็นประชากรในรุ่นถัดไปได้

ดังนั้นเพื่อเป็นการรับประกันว่า โครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดจะไม่สูญหายไป ในระหว่างขบวนการเลือก จึงกำหนดให้มีการป้อนกลับโครโมโซมตัวที่มีค่าความเหมาะสมดีที่สุดนี้กลับเข้าไปในประชากรรุ่นพ่อแม่แบบสุ่มเป็นจำนวนร้อยละ 5 ของจำนวนประชากร โดย

ขบวนการนี้จะถูกใช้งานภายหลังการตรวจเช็คหาค่าความเหมาะสมที่ดีที่สุดจากโครโมโซมรุ่นพ่อแม่และรุ่นลูกที่ได้จากการครอสโอเวอร์และมิวเตชัน โดยจะต้องอยู่ก่อนหน้าขั้นตอนการเลือกเสมอ

3.11 แผนผังการทำงานของโปรแกรม

การทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึมในงานวิจัยนี้ จะมีการใช้เทคนิคต่างๆเข้าช่วยเพื่อให้การค้นหাজีนเนติกอัลกอริทึมสามารถทำได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแผนผังการทำงานของโปรแกรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้แสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แผนผังแสดงการทำงานของเจนเนติกอัลกอริทึมที่ใช้ในงานวิจัย