

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีความหน่วงเป็นเศษส่วน
โดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม

DESIGN OF FRACTIONAL DELAY ALLPASS FILTER USING GENETIC
ALGORITHM



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2556

KMITL-2013-EN-M-010-214

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน

โดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม

DESIGN OF FRACTIONAL DELAY ALLPASS FILTER USING GENETIC
ALGORITHM



ณัฐวุฒิ หอชัยรัตน์
NATTAWUT HOCHAIRAT

ชื่อ pe

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2556

KMITL-2013-EN-M-010-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DESIGN OF FRACTIONAL DELAY ALLPASS FILTER USING GENETIC
ALGORITHM



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN TELECOMMUNICATIONS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2013
KMITL-2013-EN-M-010-214

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม

Thesis Title Design of Fractional Delay Allpass Filter using Genetic Algorithm

นักศึกษา นายณัฐวุฒิ หอชัยรัตน์



รหัสประจำตัว 54611821

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมโทรคมนาคม

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2013-EN-M-010-214

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.กอบชัย	เดชหาญ	
รศ.ดร.พิพัฒน์	พรหมมี	
รศ.ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	
ผศ.ดร.มนตรี	คำเงิน	
ผศ.ดร.ศรวัฒน์	ชิวปรีชา	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2556 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(ศาสตราจารย์ ดร.สุชัชวีร์ สุวรรณสวัสดิ์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น คณะวิศวกรรมศาสตร์ ยืนยันว่าการคัดลอกหรือการนำข้อมูลไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย และต้องแจ้งวันที่ 18 ธันวาคม พ.ศ. 2556 ให้นำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็น เศษส่วนโดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม
นักศึกษา	นายณัฐวุฒิ หอชัยรัตน์
รหัสประจำตัว	54611821
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมโทรคมนาคม
พ.ศ.	2556
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.ศรวัฒน์ ชิวปรีชา

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการใช้วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) เพื่อออกแบบ
วงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน โดยจะทำการออกแบบโครโมโซมภายใน
กระบวนการทางพันธุกรรม เพื่อหาค่าโครโมโซมที่เหมาะสมในการนำไปใช้แทนค่าสัมประสิทธิ์ของ
วงจรกรองสัญญาณในรูปแบบของส่วนเต็มเต็มสอง และใช้ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทาง
ความถี่ (Frequency Response Error: FRE) เป็นตัวแปรในการนำมาวัดค่าความเหมาะสมของการ
ออกแบบวงจรกรองสัญญาณ ในช่วงกว้างของความถี่ที่ต้องการ ซึ่งผลที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ
วิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนแบบไทราน์นั้นจะมีช่วง
ความถี่ที่กว้างกว่าและยังมีค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ดีกว่าวิธีการออกแบบของ
ไทราน์แบบตัดรูปในช่วงกว้างของความถี่เดียวกัน นอกจากนี้ยังได้ทำการหาสมการพหุนามที่แสดง
ความสัมพันธ์สัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงแต่ละค่า เพื่อให้วงจรกรอง
สัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนสามารถปรับค่าความหน่วงได้อย่างต่อเนื่อง

Thesis	Design of Fractional Delay Allpass Filter Using Genetic Algorithm
Student	Mr. Nattawut Hochairat
Student ID.	54611821
Degree	Master of Engineering
Program	Telecommunications Engineering
Year	2013
Thesis Advisor	Asst.Prof.Dr. Sorawat Chivapreecha

ABSTRACT

This thesis presents a genetic algorithm (GA) for design of fractional delay (FD) allpass filter. Suitable chromosomes are designed to represent the filter coefficients in two's complement format. From the results show that FD allpass filter from GA can give wider bandwidth when compared with the Thiran FD allpass filter. At the same time, frequency response error (FRE) of FD allpass filter from GA is better than FRE of truncated Thiran FD allpass filter at the same bandwidth. Moreover, polynomial equations are used to find coefficient's relation of each delay in order to obtain continuously variable FD allpass filter.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ ผศ.ดร.ศรววัฒน์ ชิวปรีชา อาจารย์ปรึกษา ซึ่งคอยให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะรวมถึงมอบความรู้ในด้านต่างๆที่เป็นประโยชน์ พร้อมความสนับสนุนในการทำงานวิจัย แก่ข้าพเจ้า

ขอขอบคุณผู้สนับสนุนในการทำงานวิจัย ทั้งเพื่อน พี่ น้อง ทุกคนที่ได้เกี่ยวข้องซึ่งได้ชี้แนะ และให้คำปรึกษารวมถึงให้กำลังใจในการทำงานวิจัย

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และ ถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

ณัฐวุฒิ หอชัยรัตน์



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VII
สารบัญรูป	VIII


บทที่ 1	บทนำ	1
	1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
	1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
	1.3 สมมติฐานของการศึกษา	3
	1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย	4
	1.5 ขอบเขตการวิจัย	4
	1.6 ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย	5
บทที่ 2	ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย	6
	2.1 วงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน	6
	2.1.1 วงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน	6
	2.1.2 การออกแบบค่าการหน่วงเป็นเศษส่วนโดยการใช้วงจรกรองสัญญาณผ่านตลอด	8
	2.1.3 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนแบบไทรัน	11
	2.1.4 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนของไทรันแบบตัดรูป	12
	2.2 วิธีการทางพันธุกรรม	14
	2.2.1 การออกแบบโครโมโซมแทนคำตอบ	16
	2.2.2 วิธีการเลือกโครโมโซมพ่อแม่	17
	2.2.3 ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม	22
	2.2.4 ตัวอย่างการทำงานของวิธีการทางพันธุกรรม	25

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3 การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม	31
2.3.1 การหาสมการพหุนามโดยใช้แนวทางการหาค่าความผิดพลาด กำลังสองน้อยที่สุด	31
2.3.2 ตัวอย่างการหาสมการพหุนามด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม	33
บทที่ 3 การออกแบบและสร้างวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็น เศษส่วนโดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม	36
3.1 การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็น เศษส่วน	36
3.2 การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็น เศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรม	37
3.2.1 การเริ่มกระบวนการ	39
3.2.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น	39
3.2.3 การคำนวณหาค่าความเหมาะสม	41
3.2.4 การเลือกโครโมโซมพ่อแม่	41
3.2.5 การครอสโอเวอร์	43
3.2.6 การมิวเทชัน	45
3.2.7 การสิ้นสุดกระบวนการ	46
3.3 การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็น เศษส่วนที่สามารถปรับค่าได้	47
3.3.1 การหาสมการพหุนามแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ ของวงจรรองและค่าความหน่วง	47
3.3.2 โครงสร้างของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วง เป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้	51
บทที่ 4 ผลการทดลองการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วง เป็นเศษส่วน	55
4.1 ผลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของไทรัน และวิธีการของไทรัน แบบตัดรูป	55

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.1.1 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของไทรัน	55
4.1.2 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของไทรันแบบ ตัดรูป	58
4.2 ผลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม	62
4.3 ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่า ความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าความหน่วงได้	70
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	77
5.1 สรุปผล	77
5.2 ข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก	81
ประวัติผู้เขียน	83



สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตัวอย่างการจัดเรียงโครโมโซมตามค่าความเหมาะสมจากมากไปน้อย	16
2.2	ตัวเลขที่สุ่มได้และลำดับของโครโมโซมที่ได้จากการคำนวณ	18
2.3	ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมโดยใช้วิธี Rank Weighting	19
2.4	ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมโดยใช้วิธี Roulette Wheel	20
2.5	รายละเอียดการแข่งขันของโครโมโซมที่ได้จากการสุ่ม	21
2.6	การนำเสนอข้อมูลของยีนที่ใช้ในการแทนค่า	26
2.7	ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโครโมโซม	27
2.8	ลักษณะการเกิดครอสโอเวอร์จากตัวอย่าง	29
2.9	ผลของการครอสโอเวอร์จากตารางที่ 2.8	29
2.10	ลักษณะการเกิดมิวเทชันจากตัวอย่าง	30
2.11	ผลของการมิวเทชันจากตารางที่ 2.10	30
2.12	ข้อมูลที่ใช้ในการหาสมการพหุนามของตัวอย่าง	33
3.1	ตัวอย่างประชากรที่สุ่มได้จากกระบวนการซึ่งจะยกตัวอย่างประชากร 4 ชุด	40
3.2	ตัวอย่างค่าความเหมาะสมที่เกิดขึ้นจากประชากรตัวอย่าง 4 ชุด	41
3.3	ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโครโมโซมจากการออกแบบ	42
3.4	ตัวอย่างการเลือกของโครโมโซมในการออกแบบวงจร	42
3.5	ตัวอย่างการเกิดครอสโอเวอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ	45
3.6	ตัวอย่างการเกิดมิวเทชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ	46
3.7	ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบวงจรองด้วยวิธีการทางพันธุกรรมที่ค่าความหวัง 11 ค่า	47
4.1	ช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ ($0 - \omega_{op}$)	70
4.2	การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ในช่วงความถี่ของวิธีการของไทรินแบบตัดรูปและวิธีการทางพันธุกรรมในตารางที่ 4.1	70

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้าง direct form I ของวงจรกรองผ่านตลอดลำดับที่ N	9
2.2	ค่าผิดพลาดของความหน่วงเฟสที่เกิดขึ้นในวิธีการออกแบบของไทรินโดย $N = 1, 2, 3, \dots, 9$ (เรียงจากด้านบนลงล่างตามรูป) ที่ $d = -0.5$	12
2.3	ค่าผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่เกิดขึ้นในวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป โดย $N = 9, d = -0.5$ ที่ $M = 100, 20, 14$	13
2.4	โครงสร้างการทำงานของวิธีการทางพันธุกรรม	15
2.5	วงล้อรูเลตต์ที่ได้โดยใช้วิธี Rank Weighting จากตารางที่ 2.3	19
2.6	วงล้อรูเลตต์ที่ได้โดยใช้วิธี Roulette Wheel จากตารางที่ 2.4	21
2.7	การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Single-Point Crossover	22
2.8	การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี 2-Point Crossover	23
2.9	การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Multi-Point Crossover	23
2.10	การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Variable to Variable Crossover	24
2.11	การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Uniform Crossover	25
2.12	วงล้อรูเลตต์ของตัวอย่างโดยใช้วิธี Rank Weighting จากตารางที่ 2.7	28
2.13	กราฟความสัมพันธ์ของสมการพหุนามที่ได้จากตัวอย่าง.	35
3.1	กระบวนการในการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม	38
3.2	โครโมโซมของวิธีการทางพันธุกรรมขนาดสิบสองตำแหน่ง	39
3.3	ตัวอย่างการสุ่มของประชากรที่ออกแบบ	40
3.4	ตัวอย่างการเกิดการครอสโอเวอร์แบบ Uniform Crossover ของโครโมโซมลูกตัวที่ 1	44
3.5	ตัวอย่างการเกิดการครอสโอเวอร์แบบ Uniform Crossover ของโครโมโซมลูกตัวที่ 2	44
3.6	แสดงตัวอย่างการเกิดการมิวเทชันของโครโมโซม	46
3.7	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองตัวที่ 1 (a_1) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการพหุนาม	49
3.8	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองตัวที่ 2 (a_2) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการพหุนาม	49

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการพหุนาม	50
3.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 4 (a_4) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการพหุนาม	51
3.11	โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 1 (a_1)	51
3.12	โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 2 (a_2)	52
3.13	โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3)	52
3.14	โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 4 (a_4)	53
3.15	โครงสร้าง direct form I ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดซึ่งใช้ตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ที่ได้จากรูปที่ 3.11 ถึง 3.14	53
4.1	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน	55
4.2	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน	57
4.3	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน	56
4.4	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน	57
4.5	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน	57
4.6	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน	58

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.7	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป	59
4.8	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป	59
4.9	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป	60
4.10	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป	60
4.11	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป	61
4.12	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป	61
4.13	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม	63
4.14	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม	63
4.15	ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.16	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม	64
4.17	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม	65
4.18	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม	65
4.19	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)	66
4.20	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)	67
4.21	การเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)	67
4.22	การเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)	68
4.23	การเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.24	การเปรียบเทียบค่าผลตอบแทนของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)	69
4.25	ผลตอบแทนของการหน่วงเฟสของวงจรกรองผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้ที่ค่า d มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยช่วงความหน่วงแต่ละช่วงต่างกันเท่ากับ 0.1	71
4.26	ผลตอบแทนของการหน่วงเฟสของวงจรกรองผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้ที่ค่า d มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยช่วงความหน่วงแต่ละช่วงต่างกันเท่ากับ 0.05	71
4.27	การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดผลตอบแทนทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 4 เมื่อ $d = -0.45$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรมที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้ (เส้นทึบ)	72
4.28	การเปรียบเทียบค่าผลตอบแทนของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 4 เมื่อ $d = -0.45$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรมที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้ (เส้นทึบ)	73
4.29	ค่าผลตอบแทนของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ที่ออกแบบด้วยวิธีของไทรินซึ่งไม่ถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ (เส้นทึบ) และวิธีการของไทรินซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต (เส้นประ)	74
4.30	ค่าความผิดพลาดของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีของไทรินซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต เปรียบเทียบกับการไม่จำกัดบิต	74

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.31	ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรถอดสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ที่ออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งไม่ถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ (เส้นทึบ) และวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต (เส้นประ)	75
4.32	ค่าความผิดพลาดของการหน่วงเฟสในวงจรถอดสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต เปรียบเทียบกับการไม่จำกัดบิต	75



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันวงจรรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน (Fractional Delay Filter: FD filter) นั้นมีความต้องการเพื่อประยุกต์ใช้ในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณมากขึ้นเช่น การเข้ารหัสและการสังเคราะห์เสียง (Speech Coding) การปรับสัญญาณให้เข้ากันของตัวรับสัญญาณทางด้านดิจิทัล (Synchronization in Digital Receivers) การแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลไปเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Conversion) และอุปกรณ์หักล้างสัญญาณสะท้อน (Echo Cancellation) [1-5] เป็นต้น จากความต้องการในการใช้ค่าความหน่วงที่เป็นเศษส่วนมากขึ้นนั้น ทำให้การออกแบบวงจรรองที่มีคุณสมบัติของค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนถูกพัฒนาและมีความหลากหลายมากขึ้น ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบโดยใช้วงจรรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดและการออกแบบโดยใช้วงจรรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะพิจารณาการออกแบบโดยใช้วงจรรองสัญญาณแบบผ่านตลอด ซึ่งเป็นวงจรรองสัญญาณชนิดหนึ่งในวงจรรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด [5-8] มาใช้ เนื่องจากมีคุณสมบัติของผลตอบสนองทางขนาดคงที่จึงทำให้การออกแบบวงจรรองนั้นสามารถมุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติของผลตอบสนองทางด้านการหน่วงเฟสเพียงอย่างเดียวซึ่งจะทำให้สะดวกในการออกแบบ

สำหรับในช่วงเวลาที่ผ่านมาวิธีในการออกแบบหลายวิธีที่ใช้ในการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนเช่น วิธีการของไทรัน วิธีการของไทรันแบบตัดรูป เป็นต้น สำหรับวิธีการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทรันนั้นจะให้คุณสมบัติของค่าความหน่วงเฟสที่ราบเรียบที่สุด แต่ช่วงของความถี่ที่เกิดการหน่วงนั้นมีช่วงการใช้งานที่แคบ จากนั้นจึงได้มีการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทรันแบบตัดรูป ซึ่งพัฒนามาจากการออกแบบด้วยวิธีการของไทรัน โดยมีจุดประสงค์เพื่อทำให้ช่วงของความถี่ที่เกิดการหน่วงนั้นมีค่าเพิ่มขึ้น แต่ก็ทำให้เกิดข้อเสียเนื่องจากวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูปนั้น เมื่อช่วงของความถี่มีค่าเพิ่มขึ้นค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองความถี่ (Frequency Response Error: FRE) ที่ใช้เป็นตัววัดคุณภาพของวงจรรองสัญญาณก็จะมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย วิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาและออกแบบวงจรรอง

สัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการอื่น โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบ เพื่อให้วงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอมีผลตอบสนองความหน่วงเฟส (Phase Delay Response) ที่สามารถให้ความหน่วงเฟสได้ถูกต้อง โดยวงจรกรองสัญญาณที่นำเสนอได้นำไปเปรียบเทียบกับวงจรกรองสัญญาณที่ออกแบบด้วยวิธีการของไทรินแบบตัดรูป ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) รวมถึงนำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนแบบปรับค่าความหน่วงได้ (Variable Fractional Delay Filter: VFD Filter) จากการสร้างสมการพหุนามที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองกับค่าความหน่วงที่สามารถปรับค่าได้ [9] ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณได้ด้วยการปรับพารามิเตอร์ความหน่วง (Delay Parameter)

วิธีทางพันธุกรรมที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนนั้นมีข้อดีที่แตกต่างจากวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization) โดยจะสามารถแก้ปัญหาของการหาค่าที่เหมาะสมที่ตกอยู่ในช่วงความเหมาะสมที่สุดประจำถิ่น (Local Optimum) เนื่องจากวิธีการทางพันธุกรรมนั้นมีคุณสมบัติในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบวงกว้าง (Global Optimum) ทำให้โอกาสของค่าคำตอบที่ออกมานั้นมีค่าความเหมาะสมเพิ่มมากขึ้น วิธีการทางพันธุกรรมได้ถูกนำมาใช้เพื่อหาค่าที่เหมาะสมอย่างกว้างขวาง [10-15] และวิธีการทางพันธุกรรมยังมีข้อดีในเรื่องที่ไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการควอนไทซ์ในการออกแบบชิ้นเพราะโครโมโซมที่ใช้ในวิธีทางพันธุกรรมนั้นจะถูกเข้ารหัสด้วยรูปแบบเลขฐานสอง ซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเมื่อนำไปสร้างเป็นฮาร์ดแวร์

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาระบบการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของวงจรกรองให้ดีขึ้นเพื่อการนำไปประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้ดี โดยมีวัตถุประสงค์ดังต่อไปนี้

- 1.2.1 ศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอด
- 1.2.2 ศึกษาการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทริน รวมถึงคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณที่ได้จากการออกแบบ

- 1.2.3 ศึกษาการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน ด้วยวิธีการของไทรินแบบตัดรูป รวมถึงคุณสมบัติของวงจรกรองที่ได้จากการออกแบบ
- 1.2.4 ศึกษาและวิเคราะห์การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทริน และไทรินแบบตัดรูป เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับข้อดีข้อเสียที่เกิดขึ้นจากการออกแบบทั้งสองชนิดเพื่อนำไปเป็นเป้าหมายในการหาวิธีที่จะนำมาออกแบบเพื่อพัฒนาคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณต่อไป
- 1.2.5 ศึกษาวิธีการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุกรรม
- 1.2.6 ศึกษาและออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรม
- 1.2.7 ศึกษาวิธีการหาค่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองที่มีค่าความหน่วงแตกต่างกันโดยใช้สมการพหุนามเพื่อทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณที่สามารถปรับค่าได้
- 1.2.8 ศึกษาการใช้งานโปรแกรม MATLAB เพื่อทำการจำลองวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทริน วิธีการของไทรินแบบตัดรูป และวิธีการทางพันธุกรรม เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณที่ได้ทำการออกแบบ
- 1.2.9 สามารถสรุปผลการวิจัยที่ทำให้เกิดคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ได้จากการวิจัย

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

จากการออกแบบของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน โดยการใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธีการทางพันธุกรรม การออกแบบจะมีการกำหนดค่าคุณสมบัติของความหน่วงที่ต้องการในการออกแบบ เพื่อนำมาเป็นต้นแบบในการหาค่าที่เหมาะสมทั้งช่วงของความถี่ที่เกิดค่าความหน่วง และค่าของความหน่วงที่เกิดขึ้น จึงตั้งสมมติฐานว่าการออกแบบวงจรกรองสัญญาณด้วยวิธีการทางพันธุกรรมนั้นจะสามารถทำให้ช่วงความถี่ของการหน่วงที่เกิดขึ้นมีค่าที่มากกว่าวิธีการของไทริน และมีค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่น้อยกว่าวิธีการของไทรินแบบตัดรูป รวมถึงสามารถนำวิธีการหาสมการพหุนามเพื่อสร้างความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์

ของวงจรรองสัญญาณที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรม กับค่าความหน่วงที่กำหนด เพื่อใช้ในการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนแบบปรับค่าความหน่วงได้ และเนื่องจากการออกแบบวงจรรองสัญญาณด้วยวิธีการทางพันธุกรรมจะแทนค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณในรูปแบบของส่วนเติมเต็มสอง จึงมีการกำหนดจำนวนบิตที่จะออกแบบภายในกระบวนการอยู่ก่อนแล้ว ซึ่งทำให้ง่ายต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานเมื่อนำไปสร้างเป็นฮาร์ดแวร์เพราะไม่ทำให้เกิดความผิดพลาดของการควอนไทซ์ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับงานวิจัยนี้จะทำการจำลองออกแบบวงจรรองผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการออกแบบของไทริน วิธีการของไทรินแบบตัดรูป และวิธีการทางพันธุกรรมที่นำเสนอด้วยโปรแกรม MATLAB โดยมีพื้นฐานและทฤษฎีที่ใช้ดังต่อไปนี้

- 1.4.1 ทฤษฎีวงจรรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน
- 1.4.2 ทฤษฎีวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน
- 1.4.3 ทฤษฎีในการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีของไทริน
- 1.4.4 ทฤษฎีในการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีของไทรินแบบตัดรูป
- 1.4.5 ทฤษฎีของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการทางพันธุกรรม
- 1.4.6 ทฤษฎีในการหาสมการพหุนามเพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของวงจรรองและค่าความหน่วงที่สามารถปรับได้
- 1.4.7 หลักการพื้นฐานและโครงสร้างและการใช้งานโปรแกรม MATLAB

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการ 3 วิธีการ ได้แก่ วิธีการของไทริน วิธีการของไทรินแบบตัดรูป และวิธีการทางพันธุกรรม โดยจะทำการใช้ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ รวมถึงช่วงของความถี่ในการหน่วงของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ออกแบบได้จากวิธีการทั้งสาม มาเปรียบเทียบกันโดยอยู่ในเงื่อนไขที่ว่าอันดับของวงจรรองของวิธีการทั้งสามนั้น

จะต้องอยู่ในอันดับเดียวกัน รวมถึงทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วง เป็นเศษส่วนที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้โดยใช้การหารูปแบบของสมการพหุนามเพื่อหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์วงจรกรองที่ค่าความหน่วงแตกต่างกัน โดยการออกแบบจะถูกจำลอง ด้วยโปรแกรม MATLAB

1.6 ขั้นตอนของการดำเนินการวิจัย

- 1.6.1 ทำการกำหนดวัตถุประสงค์ สมมติฐาน และขอบเขตของงานวิจัย
- 1.6.2 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน
- 1.6.3 ค้นคว้าศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน ด้วยวิธีการออกแบบต่างๆ
- 1.6.4 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการหาค่าคำตอบที่เหมาะสมที่สุดด้วยวิธีการทางพันธุกรรม
- 1.6.5 ทำการวิเคราะห์การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทรัน และไทรันแบบตัดรูปเพื่อเข้าใจถึงคุณสมบัติของวงจรกรองที่เกิดขึ้น
- 1.6.6 ศึกษาทฤษฎีพื้นฐานของการหาสมการพหุนามเพื่อทำการหาค่าความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองและค่าความหน่วงที่ปรับค่าได้
- 1.6.7 ศึกษาการจำลองเพื่อออกแบบวงจรกรองสัญญาณด้วยโปรแกรม MATLAB
- 1.6.8 ทำการจำลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้วิธีการทางพันธุกรรมเพื่อเข้าใจถึงคุณสมบัติของวงจรกรองที่ได้จากการออกแบบ
- 1.6.9 ทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ผลที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรม กับวิธีการออกแบบของไทรันและไทรันแบบตัดรูป
- 1.6.10 ทำการนำความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองและค่าความหน่วงที่ปรับได้มาใช้ เพื่อสร้างวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้

บทที่ 2

ความรู้พื้นฐานที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีทางพันธุกรรม จะประยุกต์ใช้ความรู้พื้นฐานและทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนและวิธีการหาคำตอบด้วยหลักการทางพันธุกรรม รวมถึงการหาสมการพหุนามเพื่อนำมาใช้ในหาความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณ

2.1 วงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน [1,3]

วงจรกรองที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนเป็นวงจรกรองที่ใช้สำหรับการกำหนดค่าความหน่วงที่มีค่าอยู่ในระหว่างช่วงของการสุ่มสัญญาณ ซึ่งมีการนำไปใช้ในงานทางด้านการประมวลผลสัญญาณทางดิจิทัลเป็นอย่างมากเช่น การเข้ารหัสสัญญาณเสียง การปรับสัญญาณให้เข้ากันของตัวรับทางด้านดิจิทัลโดยใช้วงจรกรองสัญญาณเพื่อหน่วงสัญญาณให้ได้ค่าของการสุ่มสัญญาณที่เหมาะสม เป็นต้น และสำหรับการออกแบบวงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนนั้นมีด้วยกันหลายวิธี ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดและการออกแบบโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด สำหรับในที่นี้ผู้นำเสนอได้เสนอการออกแบบวงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้วงจรกรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด โดยจะใช้วงจรกรองสัญญาณแบบผ่านตลอด ซึ่งเป็นวงจรกรองชนิดหนึ่งในวงจรกรองสัญญาณแบบผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดมาใช้ และจะมีข้อดีตรงที่วงจรกรองสัญญาณชนิดนี้มีค่าผลการตอบสนองทางขนาดที่คงที่ ทำให้การออกแบบวงจรกรองของเราสามารถมุ่งเน้นไปที่การออกแบบด้านผลการตอบสนองของทางด้านเฟสเพียงอย่างเดียว ทำให้เกิดความสะดวกในการออกแบบเพราะไม่มีความจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงการออกแบบทางด้านผลการตอบสนองทางขนาด

2.1.1 วงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน (Fractional Delay Filter) [3-5]

การหน่วงเวลาในรูปแบบของสัญญาณไม่ต่อเนื่องนั้นสามารถนำเสนอได้ดังสมการ

$$y(n) = x(n - D) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ D เป็นจำนวนเต็มบวกที่แสดงถึงผลรวมของการหน่วงเวลาของสัญญาณที่เกิดขึ้น ซึ่งตามทฤษฎีของการประมวลผลสัญญาณทางดิจิทัลแต่เดิมนั้นค่า D จะถูกกำหนดให้อยู่ในรูปของจำนวนเต็มเท่านั้น แต่ถ้าการหน่วงเวลาต่อเนื่องที่ต้องการออกแบบนั้นไม่ใช่จำนวนเต็ม จะสามารถใช้คาบของการสุ่มสัญญาณของวงจรกรองที่มีค่าการหน่วงเป็นจำนวนเต็มมาทำการประมาณค่าระหว่างช่วงของคาบการสุ่มสัญญาณ ทำให้ค่า D ที่ได้เป็นค่าจากการประมาณค่าผลของการหน่วงเวลาแบบจำนวนเต็มที่ใกล้เคียงกันเท่านั้น และเมื่อทำออกแบบการหน่วงเวลาด้วยวิธีดังกล่าวจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราของการสุ่มสัญญาณขึ้น จึงได้มีการคิดวิธีในการหาคำตอบที่ทำให้การออกแบบการหน่วงเวลาที่ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการสุ่มสัญญาณ โดยใช้ทฤษฎีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณที่มีการพัฒนามากขึ้น ซึ่งจะสามารถลดผลกระทบดังกล่าวได้

จากการแปลง Z โดเมนของสมการที่ (2.1) จะได้ค่าดังนี้

$$H_{id}(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{z^{-D} X(z)}{X(z)} = z^{-D} \quad (2.2)$$

เมื่อ $X(z) = Z\{x(n)\}$ และ $Y(z)$ คือรูปแบบการแปลง Z ของ $x(n)$ และ $y(n)$ ตามลำดับซึ่งฟังก์ชันถ่ายโอนที่แสดงจะหมายถึงฟังก์ชันถ่ายโอนที่มีค่าการตอบสนองในอุดมคติ หรือค่าการตอบสนองที่เราต้องการ และจากสมการที่ (2.2) เมื่อพิจารณาคุณสมบัติของการแปลง Z จะได้ว่า

$$Z\{x(n-D)\} = z^{-D} X(z) \quad (2.3)$$

โดยทั่วไปแล้วแนวทางในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณที่ให้ค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน จะทำการกำหนดค่าวัตถุประสงค์ ที่ต้องการในโดเมนของความถี่ ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ที่อยู่ในโดเมนของความถี่ตามที่ได้กล่าวไปนั้นจากสมการที่ (2.2) เมื่อค่า $z = e^{j\omega}$ จะได้ผลตอบสนองทางความถี่ที่มีค่าดังนี้

$$H_{id}(e^{j\omega}) = e^{-j\omega D} \quad (2.4)$$

เมื่อ $\omega = 2\pi f$ เป็นความถี่นอร์มัลไลซ์เชิงมุม และ T เป็นช่วงเวลาของการสุ่มตัวอย่าง ผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้นั้นก็จะอยู่ในรูปแบบของจำนวนเชิงซ้อนซึ่งสามารถระบุค่าได้ในเชิง

ผลตอบสนองทางด้านขนาด และผลตอบสนองทางด้านเฟสโดยจะมีค่าในอุดมคติ หรือค่าที่ต้องการ ดังนี้

$$|H_{id}(e^{j\omega})| = 1 \quad \text{สำหรับทุกค่า } \omega \quad (2.5)$$

$$\arg\{H_{id}(e^{j\omega})\} = \Theta_{id}(\omega) = -D\omega \quad (2.6)$$

ซึ่งข้อมูลทางด้านเฟสนั้นจะสามารถแสดงโดยค่าการหน่วงกลุ่ม (Group Delay) ซึ่งมีค่าเท่ากับ ค่าติดลบของอนุพันธ์ความถี่

$$\tau_g(\omega) = -\frac{\partial\Theta(\omega)}{\partial\omega} \quad (2.7)$$

หรือในรูปของค่าการหน่วงเฟส (Phase delay) ซึ่ง

$$\tau_p(\omega) = -\frac{\Theta(\omega)}{\omega} \quad (2.8)$$

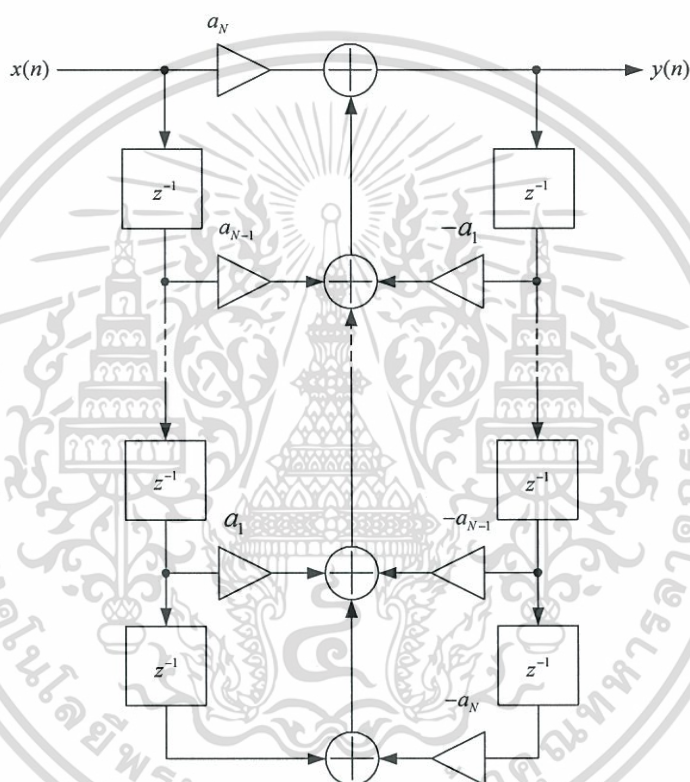
ทั้งค่าการหน่วงกลุ่มและค่าการหน่วงเฟสจะเป็นค่าที่ใช้ในการวัดค่าความหน่วงของระบบ ซึ่งค่าการหน่วงเฟสนั้นจะแสดงถึงค่าการหน่วงของสัญญาณพาหะ ส่วนการหน่วงกลุ่มนั้นจะแสดงถึงการหน่วงของสัญญาณที่รวมทั้งหมด และเมื่อเฟสเป็นเชิงเส้นค่าความหน่วงทั้งสองค่าจะมีผลที่เท่ากัน

2.1.2 การออกแบบค่าการหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้วงจรรองสัญญาณผ่านตลอด (Fractional Delay Approximation Using Allpass Filters) [1,3,5]

วงจรรองสัญญาณผ่านตลอดนั้นเป็นประเภทหนึ่งของวงจรรองสัญญาณแบบอิมพัลส์ไม่จำกัดที่มีค่าผลการตอบสนองทางขนาดที่คงที่ในทุกช่วงความถี่ที่ระบุ ซึ่งหมายความว่าในการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดนั้นเราจะสามารถมุ่งเน้นเพียงการออกแบบผลตอบสนองทางด้านเฟส เช่น ค่าการหน่วงกลุ่ม และค่าการหน่วงเฟสได้อย่างเต็มที่ ซึ่งทำให้ความซับซ้อนในการออกแบบลดลง ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดอันดับที่ N มีรูปแบบดังนี้

$$\begin{aligned}
 H(z) &= \frac{z^{-N}D(z^{-1})}{D(z)} \\
 &= \frac{a_N + a_{N-1}z^{-1} + \dots + a_1z^{-(N-1)} + z^{-N}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_{N-1}z^{-(N-1)} + a_Nz^{-N}}
 \end{aligned} \tag{2.9}$$

ซึ่งค่าพหุนามตัวเศษนั้นจะเป็นค่าส่วนกลับของพหุนามตัวส่วน $D(z)$ และค่าสัมประสิทธิ์ที่ใช้นั้น จะถูกนิยามว่าเป็นค่าจำนวนจริงซึ่งสามารถแสดงโครงสร้างได้จากการนำรูปแบบ direct form I มาใช้ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้าง direct form I ของวงจรกรองผ่านตลอดอันดับที่ N

ค่าผลตอบสองทางเฟสของวงจรกรองผ่านตลอดจะมีค่าดังสมการ

$$\Theta_A(\omega) = \arg\{A(e^{j\omega})\} = -N\omega + 2\Theta_D(\omega) \tag{2.10}$$

เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\Theta_D(\omega) &= \arg \left\{ \frac{1}{D(e^{j\omega})} \right\} = \arctan \left\{ \frac{\sum_{k=0}^N a_k \sin(k\omega)}{\sum_{k=0}^N a_k \cos(k\omega)} \right\} \\ &= \arctan \left\{ \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{s}}{\mathbf{a}^T \mathbf{c}} \right\}\end{aligned}\quad (2.11)$$

เมื่อ \mathbf{c} และ \mathbf{s} แทนค่า cosine เวกเตอร์ และ sine เวกเตอร์ของความถี่เชิงมุมตามอันดับของ
วงจรรอง ส่วนค่า \mathbf{a} แทนเวกเตอร์ของสัมประสิทธิ์ดังนี้

$$\mathbf{c} = [1 \quad \cos(\omega) \quad \dots \quad \cos(N\omega)]^T \quad (2.12)$$

$$\mathbf{s} = [0 \quad \sin(\omega) \quad \dots \quad \sin(N\omega)]^T \quad (2.13)$$

$$\mathbf{a} = [a_0 \quad a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_N]^T \quad (2.14)$$

โดย $a_0 = 1$

ค่าการหน่วงกลุ่มของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอด ($\tau_{g,A}$) จะมีความสัมพันธ์กับสมการที่ (2.10)
และค่าการหน่วงกลุ่มของเทอมส่วน ($\tau_{g,D}$) จากสมการที่ (2.9) ดังสมการ

$$\tau_{g,A}(\omega) = -\frac{d\Theta_A(\omega)}{d\omega} = N - 2\tau_{g,D}(\omega) \quad (2.15)$$

$$\tau_{g,D}(\omega) = -\frac{d\Theta_D(\omega)}{d\omega} = \frac{\mathbf{a}^T \mathbf{G} \Lambda \mathbf{a}}{\mathbf{a}^T \mathbf{G} \mathbf{a}} \quad (2.16)$$

เมื่อ

$$\mathbf{G} = \mathbf{c}\mathbf{c}^T + \mathbf{s}\mathbf{s}^T \quad (2.17)$$

$$\Lambda = \text{diag}[0 \quad 1 \quad \dots \quad N] \quad (2.18)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้นในลักษณะเดียวกันค่าการหน่วงเฟสของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอด ($\tau_{p,A}$) จะมีค่าดังสมการ

$$\tau_{p,A}(\omega) = -\frac{\Theta_A(\omega)}{\omega} = N - 2\tau_{p,D}(\omega) \quad (2.19)$$

2.1.3 การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนแบบไทรัน (Thiran Fractional Delay Allpass Filter) [1,3,5]

ในปี 1971 ไทรันได้นำเสนอรูปแบบเฉพาะสำหรับการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอด โดยมีคุณสมบัติที่มีค่าความหน่วงเฟสเป็นเส้นตรง ซึ่งเป็นวิธีการที่ง่ายต่อการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน โดยรูปแบบเฉพาะที่ไทรันได้นำเสนอคือ

$$a_k = (-1)^k \binom{N}{k} \prod_{n=0}^N \frac{d+n}{d+k+n} \quad (2.20)$$

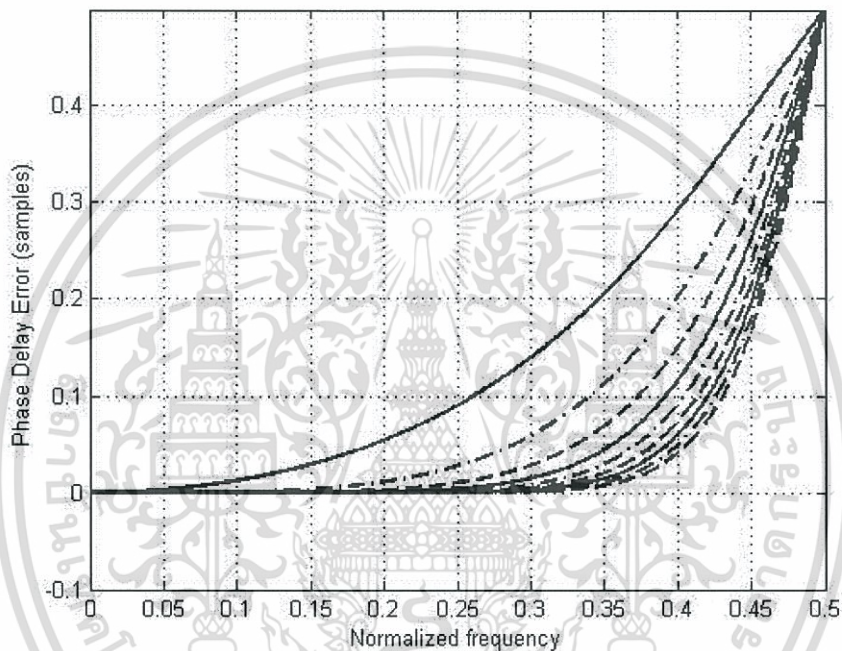
เมื่อค่า d คือค่าความหน่วงในส่วนที่มีค่าเป็นเศษส่วน N คืออันดับของวงจรรองและ $k = 1, 2, 3, \dots, N$ สำหรับการออกแบบด้วยวิธีของไทรันนั้นค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองจะมีค่าดังตัวอย่างเช่น เมื่อ $N=2$ จะได้ $a_1 = -2(D-2)/(D+1)$ และ $a_2 = (D-1)(D-2)/(D+1)(D+2)$ เป็นต้น โดย $D = N+d$ ซึ่งเป็นค่าความหน่วงรวมของวงจรรองสัญญาณที่ออกแบบ

วิธีที่จะใช้วัดคุณภาพของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดวิธีหนึ่งที่น่าสนใจคือการพิจารณาค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งมีสมการในการหาค่าดังนี้

$$E(e^{j\omega}) = e^{-j\omega(N+d)} - H(e^{j\omega}) \quad (2.21)$$

เมื่อ $e^{-j\omega(N+d)}$ คือค่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนตามอุดมคติซึ่งมีค่าความหน่วงเท่ากับ $N+d$ และ $H(e^{j\omega})$ คือผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองที่ได้จากการออกแบบที่วงจรรองผ่านตลอดจากสมการที่ (2.9) ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธีการออกแบบด้วยรูปแบบเฉพาะของไทรันดังสมการที่ (2.20) เพื่อให้หาสัมประสิทธิ์ของวงจรรองซึ่งมีค่าความหน่วงที่ต้องการออกแบบเท่ากับค่า $N+d$

แต่คุณสมบัติที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน ด้วยวิธีการของไทรินั้นผลลัพธ์ที่ได้ คือวงจรกรองสามารถให้ค่าความหน่วงเฟสที่ดีในช่วงของความถี่ที่ไม่กว้างมาก อย่างเช่นในกรณีของวงจรกรองสัญญาณที่มีอันดับต่ำนั้น จากการทดลองจะเห็นได้ว่าการเบี่ยงเบนของความหน่วงที่มากขึ้นในช่วงความถี่ที่สูงขึ้นและถึงแม้มีการออกแบบด้วยอันดับของวงจรกรองที่มากขึ้น ช่วงความถี่ที่มีการหน่วงที่ติกลับไม่ได้เพิ่มขึ้นมากเท่าที่ควร ตามผลค่าความผิดพลาดของความหน่วงเฟสที่แสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ค่าผิดพลาดของความหน่วงเฟสที่เกิดขึ้นในวิธีการออกแบบของไทริน โดย $N = 1, 2, 3, \dots, 9$ (เรียงจากด้านบนลงล่างตามรูป) ที่ $d = -0.5$

2.1.4 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนของไทรินแบบตัดรูป (Truncated Thiran Fractional Delay Allpass Filter) [3]

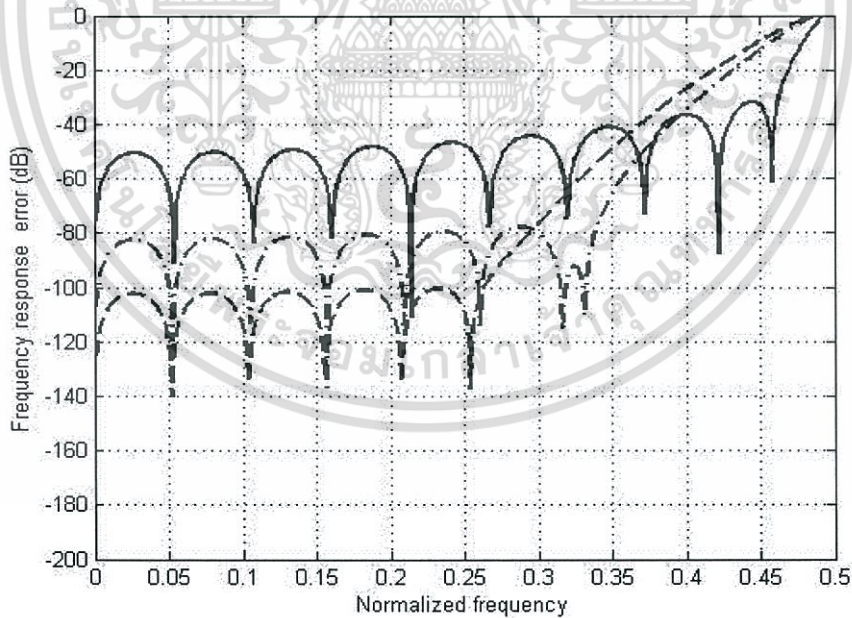
จากคุณสมบัติของวิธีการออกแบบโดยใช้วิธีการของไทรินที่ได้กล่าวไป ต่อมาได้มีการคิดวิธีเพื่อปรับปรุงข้อเสียของวิธีการออกแบบด้วยวิธีของไทรินเรียกว่าวิธีการของไทรินแบบตัดรูป ซึ่งจะใช้คุณสมบัติของการตัดรูปค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้แนวคิดมาจากการที่ค่าของสัมประสิทธิ์ของวิธีการออกแบบของไทรินที่อันดับยิ่งสูงขึ้น ค่าของสัมประสิทธิ์ในตำแหน่งสุดท้ายก็จะไม่ค่อยมีผลกระทบต่อ

คุณสมบัติของวงจรรองมากนัก โดยมีรูปแบบของสมการในการหาสัมประสิทธิ์ที่ปรับปรุงมาจากวิธีของไทรันเดิมดังนี้

$$a_k = (-1)^k \binom{M}{k} \prod_{n=0}^M \frac{d+n}{d+k+n} \quad (2.22)$$

โดยค่า d คือค่าความหน่วงช่วงที่มีค่าเป็นเศษส่วน N คืออันดับของวงจรรองและ $k = 1, 2, 3, \dots, N$ โดยจะมีการกำหนดตัวแปร M ขึ้นมาเพื่อทำการปรับปรุงวงจรรองให้มีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยปกติแล้วค่า M จะมีค่าเท่ากับค่า N ในวิธีการของไทรันแบบปกติ แต่ในวิธีการของไทรันแบบตัดรูปนั้น $M > N$ เสมอ ซึ่งจะเรียก M ว่าตัวแปรอันดับต้นแบบของวงจรรอง เพราะว่าจะมีความสอดคล้องกับอันดับของวงจรรองก่อนที่จะเกิดการตัดรูป

ซึ่งจากการออกแบบโดยใช้วิธีการหาสัมประสิทธิ์ด้วยวิธีการของไทรันแบบตัดรูปที่ได้กล่าวไปนั้น ทำให้วงจรรองที่ได้นั้น มีการปรับปรุงคุณสมบัติในการเพิ่มช่วงความถี่ที่ใช้งานได้จากวงจรรองในอันดับเดียวกันกับวงจรรองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีของไทรันปกติ ซึ่งแสดงผลของการออกแบบในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ค่าผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่เกิดขึ้นในวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูป

โดย $N = 9$, $d = -0.5$ ที่ $M = 100, 20, 14$ (เรียงจากด้านบนลงล่างตามรูป)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากรูปที่ 2.3 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองที่เกิดจากการออกแบบด้วยวิธีของไทรินแบบตัดรูปที่มีค่า $d = -0.5$ และ $N = 9$ และค่า M ที่มีค่าต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบว่ามีคุณสมบัติแตกต่างกันอย่างไร ซึ่งจากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่อค่า M มีค่าเพิ่มขึ้นช่วงความถี่ที่สามารถกำหนดการหน่วงเฟสได้นั้นก็จะเพิ่มขึ้น แต่ยิ่งค่า M มากขึ้นค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ก็ยิ่งมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย

ดังนั้นแนวทางที่จะใช้ในการปรับปรุงวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นพิเศษส่วนให้มีช่วงความถี่ที่ใช้งานได้กว้างกว่าการออกแบบด้วยวิธีการของไทริน และมีค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่น้อยกว่าการออกแบบด้วยวิธีการของไทรินแบบตัดรูป จึงเป็นแนวคิดในงานวิจัยฉบับนี้

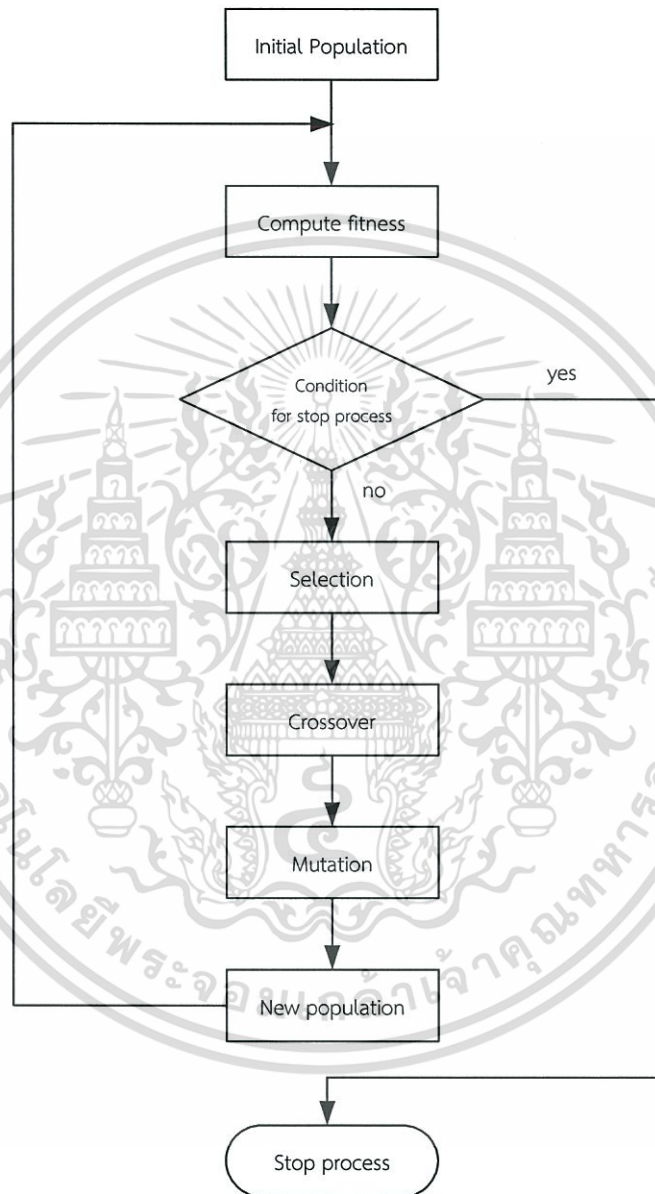
2.2 วิธีการทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm)

สิ่งมีชีวิตในธรรมชาตินั้น ก่อกำเนิดขึ้นมาโดยมีชุดของโครโมโซมที่แตกต่างกันตามแต่ละเผ่าพันธุ์ของสิ่งมีชีวิต โดยโครโมโซม คือ โครงสร้างที่บรรจุสารพันธุกรรมหรือยีนในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต ซึ่งยีนจะมีหน้าที่ในการควบคุม และถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตจากพ่อแม่ไปสู่ลูก เช่น ลักษณะของเส้นผม ลักษณะดวงตา เพศ หมู่เลือด และผิว เป็นต้น

วิธีการทางพันธุกรรมได้นำแนวความคิดเกี่ยวกับพันธุศาสตร์ทางชีววิทยา และวิวัฒนาการทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตมาประยุกต์ใช้ในการหาคำตอบให้ปัญหาโดยนำคำตอบมาสร้างเป็นโครโมโซม ซึ่งแต่ละโครโมโซมจะประกอบไปด้วยยีนหลาย ๆ ยีน ที่แสดงถึงคุณลักษณะของโครโมโซม โดยโครโมโซมที่ดีจะถูกเลือกมาเป็นต้นแบบในการสร้างคำตอบใหม่ ๆ ซึ่งเหมือนกับระบบธรรมชาติที่ทำการคัดกรองสิ่งมีชีวิต มีการแพร่พันธุ์ และมีการถ่ายทอดทางพันธุศาสตร์ให้ประชากรรุ่นถัดไป

วิธีการทางพันธุกรรมมีลักษณะการทำงานโดยทำหน้าที่ค้นหาเซตของคำตอบที่เป็นไปได้ โดยเริ่มจากการสร้างโครโมโซมเริ่มต้นเพื่อเป็นประชากรรุ่นแรกของกระบวนการทางพันธุกรรม ซึ่งวิธีการทางพันธุกรรมจะใช้ฟังก์ชันความเหมาะสม (Fitness Function) ในการประเมินคุณภาพหรือความเหมาะสมของโครโมโซม เพื่อเลือกโครโมโซมที่มีความเหมาะสมมาเป็นโครโมโซมพ่อแม่ (Parents) โครโมโซมพ่อแม่จะถูกนำมาเข้าสู่การดำเนินการทางพันธุกรรม คือการทำครอสโอเวอร์ (Crossover) และมิวเทชัน (Mutation) เพื่อสร้างเป็นโครโมโซมลูกหลาน (Offsprings) โดยจะเริ่มจากการนำโครโมโซมพ่อแม่มาเข้าสู่ตัวดำเนินการครอสโอเวอร์ เพื่อทำการสลับและเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโครโมโซมระหว่างโครโมโซมพ่อแม่ที่ถูกเลือกมาตามความเหมาะสม เพื่อให้เกิดเป็นโครโมโซม

ลูกหลาน และจากนั้นจึงเข้าสู่ตัวดำเนินการมิวเทชัน เพื่อให้เกิดค่าความหลากหลายทางพันธุกรรม เมื่อได้โครโมโซมลูกหลานที่ผ่านตัวดำเนินการทางพันธุกรรมแล้วจึงนำไปเป็นประชากรให้กับกระบวนการทางพันธุกรรมในรุ่นถัดไปดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างการทำงานของวิธีการทางพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่าง การจัดเรียงโครโมโซมค่าความเหมาะสมเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างประชากรต่อไป

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างการจัดเรียงโครโมโซมตามค่าความเหมาะสมจากมากไปน้อย

อันดับ โครโมโซม	โครโมโซม	X	ฟังก์ชันความเหมาะสม	ค่าความ เหมาะสม
1	0111	7	$15(7)-(7)^2$	56
2	1001	9	$15(9)-(9)^2$	54
3	0100	4	$15(4)-(4)^2$	44
4	1100	12	$15(12)-(12)^2$	36
5	1110	14	$15(14)-(14)^2$	14
6	0000	0	$15(0)-(0)^2$	0

ตารางที่ 2.1 จะแสดงรูปแบบการกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสมรวมถึงการแสดงรูปแบบของโครโมโซมภายใต้เงื่อนไขดังนี้ จำนวนประชากร = 6 จำนวนยีน = 4 และฟังก์ชันความเหมาะสมคือ $\max\{f(x) = 15x - x^2\}; x \in [0, 15]$

ดังนั้น ถ้าโครโมโซม คือ 1100 เราจะได้ค่า

$$x = 1100 \text{ มีค่าเท่ากับ } 12$$

เพราะฉะนั้น ค่าความเหมาะสม = 36

จัดเรียงโครโมโซมตามค่าความเหมาะสมจากมากไปน้อยได้ดังตารางที่ 2.1

2.2.1 การออกแบบโครโมโซมแทนคำตอบ

การเข้ารหัสข้อมูลที่นำมาใช้เป็นค่าโครโมโซม ในแบบต่างๆ หรือรูปแบบของข้อมูลที่นำไปใช้ภายในกระบวนการนั้นเป็นอีกตัวแปรสำคัญที่จะทำให้การหาคำตอบที่ดีที่สุดนั้นเป็นไปได้อย่างเหมาะสม เนื่องจากข้อมูลในรูปแบบต่างๆ นั้นก็จะมีข้อจำกัดที่เกิดขึ้นหากนำมาใช้ เช่น ความละเอียดของข้อมูล ความหลากหลายของการหาคำตอบที่จะเกิดขึ้นภายในกระบวนการ เป็นต้น การออกแบบโครโมโซมแทนคำตอบนั้นจึงเป็นขั้นตอนการออกแบบโครโมโซมเพื่อให้สอดคล้องกับการแก้ปัญหาจริงด้วยวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งมีหลายวิธีดังต่อไปนี้

2.2.1.1 การออกแบบโครโมโซมแบบเลขฐานสอง เป็นวิธีที่ใช้การแทนค่าโครโมโซมด้วยค่า 0 หรือ 1 เท่านั้น ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นที่นิยมและมีการใช้งานอย่างกว้างขวาง โดยจากการที่จะต้องแทนค่าของข้อมูลด้วยเลขฐานสองนั้น การกำหนดขนาดของบิตที่ใช้ในการแสดงข้อมูลก็จะเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่สำคัญในการแสดงข้อมูล

2.2.1.2 การออกแบบโครโมโซมแบบใช้ค่าจริง จะเป็นการออกแบบโครโมโซมโดยนำค่าเลขจริงๆหรือใช้อักขระที่เป็นตัวแทนของคำตอบจริงมาใช้ในการแทนค่าโครโมโซมซึ่งมีข้อดีคือ ค่าที่แทนโครโมโซมนั้นจะเป็นค่าจริงซึ่งไม่มีการเปลี่ยนค่ามา เหมือนการใช้แบบเลขฐานสอง แต่ความหลากหลายในการหาคำตอบนั้นก็อาจจะลดลงไป

2.2.2 วิธีการเลือกโครโมโซมพ่อแม่

2.2.2.1 Pairing of Top to Bottom ทำการจัดเรียงโครโมโซมจากโครโมโซมที่ดีที่สุดไปหาโครโมโซมที่แย่ที่สุด และทำการจับคู่โครโมโซมพ่อแม่จากบนลงล่าง เช่นถ้าดูจากตารางที่ 2.1 คู่ของโครโมโซมที่ได้จะมีลักษณะดังนี้

คู่ที่ 1 : โครโมโซมที่ 1 คู่กับ โครโมโซมที่ 2

คู่ที่ 2 : โครโมโซมที่ 3 คู่กับ โครโมโซมที่ 4

คู่ที่ 1 : โครโมโซมที่ 5 คู่กับ โครโมโซมที่ 6

2.2.2.2 Random Pairing ทำการจับคู่โครโมโซมพ่อแม่โดยการสุ่มตัวเลขตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ เพื่อหาอันดับของโครโมโซมโดยใช้สมการ

$$\text{Parent} = \text{Roundup} (N \times \text{Random}) \quad (2.23)$$

โดยที่ N คือ จำนวนประชากร Random คือ ตัวเลขจำนวนจริงในช่วง 0-1 ที่ได้จากการสุ่มค่าและ Roundup คือ ฟังก์ชันที่ใช้ในการปัดเลขจำนวนจริงขึ้นเป็นเลขจำนวนเต็ม โดยจะแสดงตัวอย่างของการสุ่มตัวเลขของวิธี Random pairing ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ตัวเลขที่สุ่มได้และอันดับของโครโมโซมที่ได้จากการคำนวณ

เลขที่สุ่มได้	6 x เลขที่สุ่มได้	อันดับของโครโมโซมที่ได้
0.1535	0.9210	1
0.6781	4.0686	5
0.0872	0.5232	1
0.1936	1.1616	2
0.7201	4.2126	5
0.3933	2.3598	3

จากตารางที่ 2.2 จะได้คู่ของโครโมโซม ดังนี้

- คู่ที่ 1 : โครโมโซมที่ 1 คู่กับ โครโมโซมที่ 5
- คู่ที่ 2 : โครโมโซมที่ 1 คู่กับ โครโมโซมที่ 2
- คู่ที่ 3 : โครโมโซมที่ 5 คู่กับ โครโมโซมที่ 3

2.2.2.3 Weighted Random Pairing การหาค่าความน่าจะเป็นให้กับโครโมโซมโดยค่าความน่าจะเป็นจะขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสมของโครโมโซม โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมาก จะมีความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกสูง ส่วนโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมน้อยจะมีความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกต่ำ โดยจะนำเสนอ 2 เทคนิค ดังนี้

1. Rank Weighting เป็นการหาค่าความน่าจะเป็นจากอันดับของโครโมโซม เมื่อชุดของโครโมโซมต้นแบบถูกเรียงจากโครโมโซมที่ดีที่สุดไปหาโครโมโซมที่แย่ที่สุด ดังนั้นอันดับของโครโมโซมจึงสามารถบอกได้ว่าโครโมโซมนั้น มีความเหมาะสมที่จะเป็นคำตอบมากน้อยแค่ไหนโดยหาค่าความน่าจะเป็นของโครโมโซมจากสมการ

$$P_n = \frac{N - n + 1}{\sum_{n=1}^N n} \quad (2.24)$$

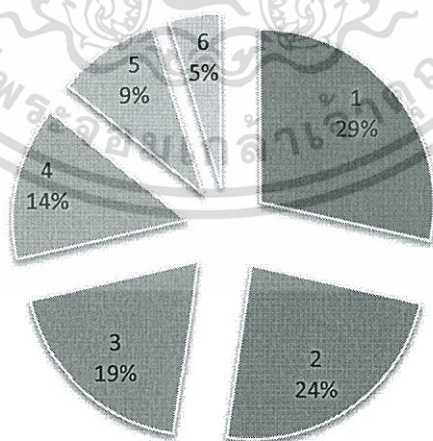
โดยที่ P_n คือ ความน่าจะเป็นของโครโมโซมอันดับที่ n โดย n คือ อันดับของโครโมโซม และ N คือ จำนวนประชากร ซึ่งจะแสดงค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโครโมโซมจากตารางที่ 2.1 โดยใช้วิธี Rank Weighting ดังตารางที่ 2.3

ดังนั้นจากตารางที่ 2.1 ค่า $N = 6$ จะได้ว่า

$$P_n = \frac{6-n+1}{1+2+3+4+5+6} = \frac{7-n}{21} \quad (2.25)$$

ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมโดยใช้วิธี Rank weighting

อันดับโครโมโซม	โครโมโซม	P_n	$\sum_{i=1}^n P_i$
1	0111	$\frac{7-1}{21} = 0.2857$	0.2857
2	1001	$\frac{7-2}{21} = 0.2381$	0.5238
3	0100	$\frac{7-3}{21} = 0.1905$	0.7143
4	1100	$\frac{7-4}{21} = 0.1429$	0.8572
5	1110	$\frac{7-5}{21} = 0.0952$	0.9524
6	0000	$\frac{7-6}{21} = 0.0476$	1.0000



รูปที่ 2.5 วงล้อรูปเลขที่ที่ได้โดยใช้วิธี Rank weighting จากตารางที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้ค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมแล้ว ทำการสุ่มตัวเลขทศนิยมที่มีค่าอยู่ในช่วง 0-1 ตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ แล้วดูว่าเลขที่สุ่มได้แต่ละครั้งตกอยู่ในช่วงของโครโมโซมไหน ก็เลือกโครโมโซมนั้นเพื่อนำมาใช้เป็นโครโมโซมพ่อแม่

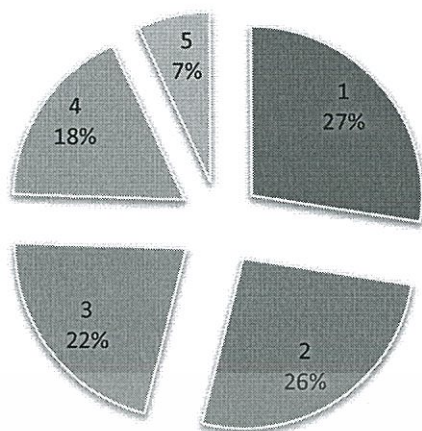
2. Roulette Wheel การหาค่าความน่าจะเป็นโดยการนำค่าความเหมาะสมที่คำนวณได้มาหารออกด้วยผลรวมของค่าความเหมาะสมทั้งหมด

$$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p} \quad (2.26)$$

โดยที่ P_n คือความน่าจะเป็นของโครโมโซมอันดับที่ n ค่า f_n คือ ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมอันดับที่ n ค่า N คือ จำนวนประชากร และ n คือ อันดับของโครโมโซมซึ่งจะแสดงค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโครโมโซมจากตารางที่ 2.1 โดยใช้วิธี Roulette Wheel ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมโดยใช้วิธี Roulette wheel

อันดับโครโมโซม	โครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p}$
1	0111	56	$\frac{56}{204} = 0.27451$
2	1001	54	$\frac{54}{204} = 0.264706$
3	0100	44	$\frac{44}{204} = 0.215686$
4	1100	36	$\frac{36}{204} = 0.176471$
5	1110	14	$\frac{14}{204} = 0.068627$
6	0000	0	$\frac{0}{204} = 0$
ผลรวมของค่าความเหมาะสม		204	1



รูปที่ 2.6 วงล้อรูเลตต์ที่ได้โดยใช้วิธี Roulette wheel จากตารางที่ 2.4

เมื่อได้ค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมแล้ว ทำการสุ่มตัวเลขทศนิยมที่มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0-1 ตามจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ แล้วตรวจสอบว่าเลขที่สุ่มได้แต่ละครั้งตกอยู่ในช่วงของโครโมโซมใด ก็เลือกโครโมโซมนั้นมาเป็นโครโมโซมพ่อแม่

2.2.2.4 Tournament Selection จะนำคู่ของโครโมโซมมาจัดการแข่งขัน โดยในแต่ละการแข่งขันจะมีการสุ่มอันดับของโครโมโซมขึ้นมา 2 ตัว และทำการเปรียบเทียบค่าความเหมาะสมของโครโมโซม โดยโครโมโซมที่มีค่าความเหมาะสมมากที่สุดจะเป็นผู้ชนะ ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของตัวอย่างของวิธี Tournament Selection ของโครโมโซมที่ได้จาก ตารางที่ 2.1 ดังตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 รายละเอียดการแข่งขันของโครโมโซมที่ได้จากการสุ่ม

อันดับการแข่งขัน	อันดับของโครโมโซมที่สุ่มได้	โครโมโซมที่ชนะ
1	2 กับ 1	1
2	5 กับ 5	5
3	6 กับ 3	3
4	4 กับ 5	4
5	1 กับ 1	1
6	4 กับ 5	4

จากนั้นโครโมโซมที่ชนะในแต่ละการแข่งขันจะถูกกำหนดให้ทำการจับคู่โครโมโซมจากบนลงล่าง ดังนั้น จะได้คู่ของโครโมโซมพ่อแม่ตามตารางที่ 2.5 ดังนี้

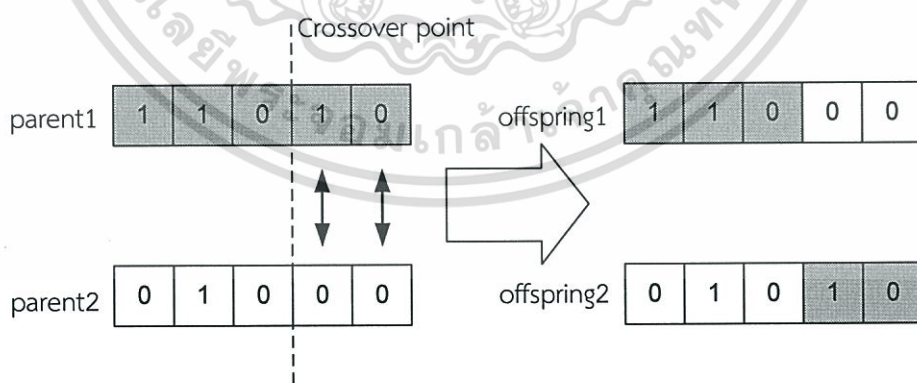
- คู่ที่ 1 : โครโมโซมที่ 1 คู่กับ โครโมโซมที่ 5
 คู่ที่ 2 : โครโมโซมที่ 3 คู่กับ โครโมโซมที่ 4
 คู่ที่ 3 : โครโมโซมที่ 1 คู่กับ โครโมโซมที่ 4

2.2.3 ตัวดำเนินการทางพันธุกรรม (Genetic Operation)

2.2.3.1 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

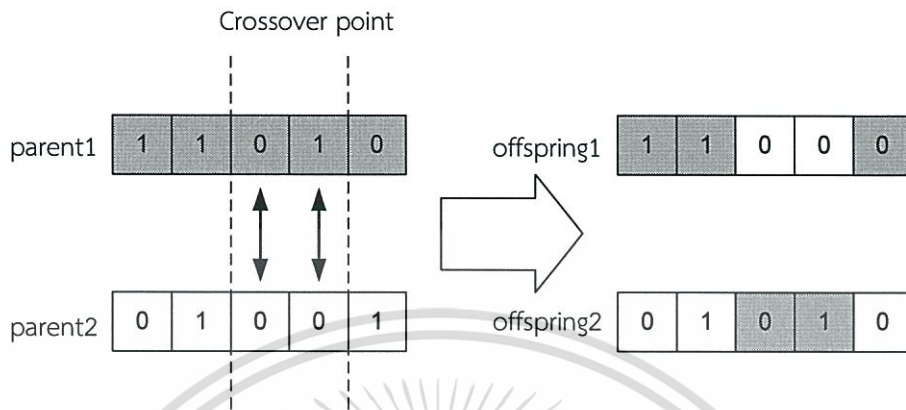
หลังจากที่ได้คู่ของโครโมโซมพ่อแม่แล้ว ก็จะทำการครอสโอเวอร์คุณลักษณะของโครโมโซมพ่อแม่ เพื่อสร้างเป็นโครโมโซมลูก โดยจะมีการกำหนดค่าคงที่เพื่อนำมาเป็นค่าความน่าจะเป็นที่จะทำการครอสโอเวอร์ (P_c) ซึ่งโดยทั่วไปเราจะกำหนด P_c ให้มีค่าสูง ๆ หรือประมาณ 0.9 หลังจากนั้นทำการสุ่มตัวเลขในช่วง 0-1 ซึ่งถ้าค่าที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นที่ตั้งไว้โครโมโซมนั้นจะถูกครอสโอเวอร์ จะกำหนดตำแหน่งที่จะทำการครอสโอเวอร์ โดยการสุ่มเลขจำนวนเต็มที่มีค่าอยู่ในช่วง 1 ถึง $m-1$ (m คือ จำนวนยีนในโครโมโซม) จำนวน n ตัว ตามแต่เทคนิคที่เลือกใช้ ในที่นี้จะกล่าวถึงเทคนิคการครอสโอเวอร์ 5 เทคนิค ดังนี้

1. **Single-Point Crossover** จะทำการสุ่มตำแหน่งยีนที่ทำการครอสโอเวอร์ 1 ตำแหน่ง และสลับค่ายีนที่อยู่หลังตำแหน่งที่สุ่มได้ทุกยีนโดยเมื่อค่าการสุ่มตัวเลขในช่วง 0-1 เพื่อพิจารณาการเกิดครอสโอเวอร์แล้วต่ำกว่าความน่าจะเป็นที่ตั้งไว้ นั้น จะทำการสลับค่าระหว่างโครโมโซมพ่อแม่ในช่วงหลังจากตำแหน่งยีนที่ทำการสุ่ม เพื่อให้เกิดเป็นโครโมโซมลูกที่จะนำไปเข้าสู่กระบวนการทางพันธุกรรมต่อไปดังรูปที่ 2.7



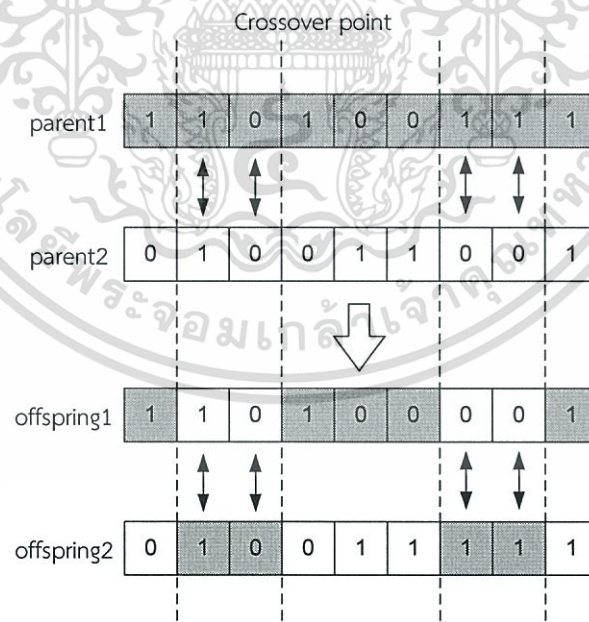
รูปที่ 2.7 การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Single-Point Crossover

2. **2-Point Crossover** จะทำสุ่มตำแหน่งยีนที่จะทำการครอสโอเวอร์ 2 ตำแหน่ง และทำการสลับค่ายีนพ่อแม่ที่อยู่ภายในช่วงตำแหน่งที่สุ่มได้ หรือสลับค่ายีนพ่อแม่ที่อยู่ภายนอกช่วงตำแหน่งที่สุ่มได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี 2-Point Crossover

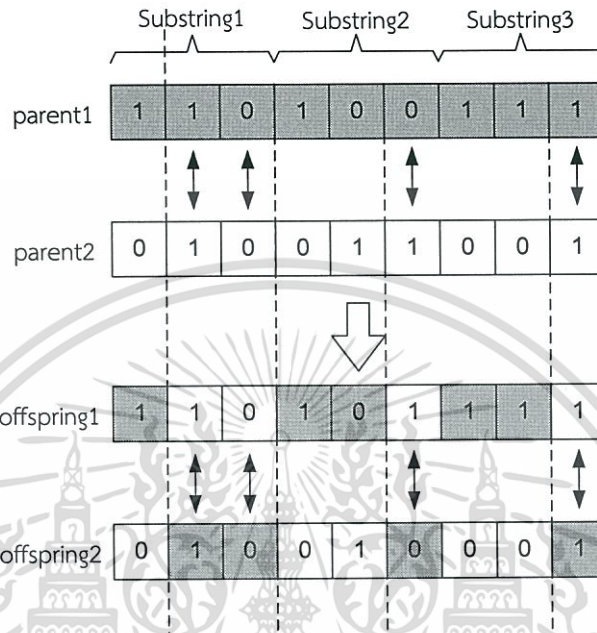
3. **Multi-Point Crossover** จะมีลักษณะการทำงานคล้ายกับ Single-Point Crossover และ 2-Point Crossover โดยทำการสุ่มตำแหน่งที่จะครอสโอเวอร์ และจะทำการครอสโอเวอร์ยีนที่อยู่ระหว่างจุดครอสโอเวอร์แต่ละจุด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Multi-Point Crossover

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

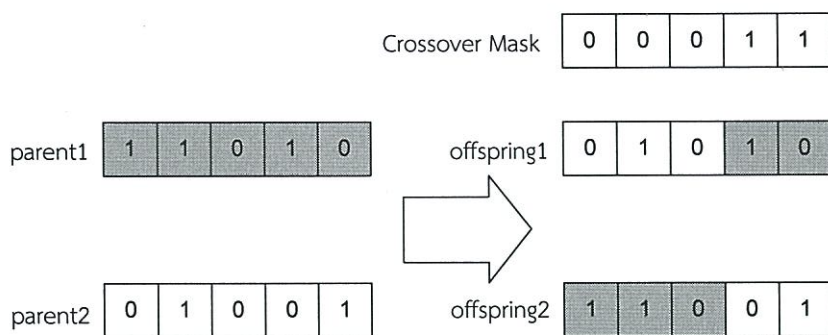
4. Variable to Variable Crossover โดยกลุ่มของข้อมูล ซึ่งแสดงถึงตัวแปรแต่ละตัวจะถูกแบ่งออกเป็นส่วนย่อย (Substring) ในรูปของเลขฐานสอง และจะทำ Single-Point Crossover ให้กับแต่ละ Substring หรือให้กับแต่ละตัวแปร ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Variable to Variable Crossover

4. Uniform Crossover เริ่มต้นด้วยการสร้างหน้ากากของการครอสโอเวอร์ หน้ากากของการครอสโอเวอร์โดยการสุ่มตัวเลข (0,1) ตามจำนวนยีนในโครโมโซม โดยตัวเลขที่อยู่ในแต่ละยีนจะเป็นตัวบอกว่าโครโมโซมลูกจะต้องทำการคัดลอกยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวไหน โดยโครโมโซมลูกตัวที่ 1 และ 2 จะมีขั้นตอนการคัดลอกยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ดังนี้

- โครโมโซมลูกตัวที่ 1 จะดูว่ายีนใน หน้ากากของการครอสโอเวอร์เป็นเลข 1 โครโมโซมลูกจะทำการคัดลอกยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวที่ 1 แต่ถ้ายีนใน หน้ากากของการครอสโอเวอร์เป็นเลข 0 โครโมโซมลูกจะทำการคัดลอกยีนจากโครโมโซมพ่อแม่ตัวที่ 2
- โครโมโซมลูกตัวที่ 2 ทำการสร้าง หน้ากากของการครอสโอเวอร์ขึ้นมาใหม่อีก 1 ชุดแล้วทำกระบวนการเดียวกับโครโมโซมลูกตัวที่ 1 หรือใช้ Crossover mask ร่วมกับโครโมโซมลูกตัวที่ 1 แต่ใช้กฎในลักษณะที่ตรงกันข้ามกับโครโมโซมลูกตัวที่ 1 ดังที่แสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 การครอสโอเวอร์ด้วยวิธี Uniform Crossover

2.2.3.2 มิวเทชัน (Mutation)

เป็นการเพิ่มลักษณะพิเศษให้กับโครโมโซมลูก ซึ่งอาจจะเป็นลักษณะที่ไม่มีในลักษณะพื้นฐานของประชากรเริ่มต้นที่เรากำหนด โดยทั่วไปในแต่ละรอบจะมียีนที่ถูกมิวเทชันเพียง 1-5% การมิวเทชันส่วนใหญ่จะทำให้ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมลดลงแต่จะเป็นการเพิ่มความหลากหลาย และทำให้ประชากรมีความแข็งแรงมากขึ้น เพราะการมิวเทชันเป็นการหันเหเส้นทางการมาบรรจบกันของคำตอบ

ขั้นตอนการมิวเทชันเริ่มต้นด้วยการกำหนดค่าคงที่ซึ่งเป็นค่าความน่าจะเป็นที่แต่ละยีนจะถูกมิวเทชัน (P_M) ซึ่งโดยทั่วไปเราจะกำหนด P_M ให้มีค่าต่ำ ๆ หรือประมาณ 0.01 (มีการมิวเทชัน 1%) หลังจากนั้นแต่ละยีนจะทำการสุ่มค่าตัวเลขระหว่าง 0-1 โดยถ้าค่าที่สุ่มได้มีค่าน้อยกว่าความน่าจะเป็นที่ตั้งไว้ ยีนนั้นจะถูกมิวเทชันให้ทำการสุ่มตัวเลขที่อยู่ในช่วงที่กำหนดไว้มาแทนที่ค่าที่อยู่ในตำแหน่ง

2.2.4 ตัวอย่างการทำงานของวิธีการทางพันธุกรรม

ทำการกำหนดปัญหาที่ต้องการใช้วิธีการทางพันธุกรรมมาใช้เพื่อหาคำตอบดังนี้
ต้องการหาค่า x ที่ทำให้ $f(x)$ มีค่าสูงสุดโดย

$$f(x) = 15x - x^2, \quad x \in [0, 15]$$

ซึ่งมีเงื่อนไขดังนี้

จำนวนประชากร = 4

ค่าความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ = 0.7

ค่าความน่าจะเป็นในการมิวเทชัน = 0.01

โดยการพิจารณาจะทำการพิจารณาเฉพาะกรณี integer case และจำนวนยีนที่ใช้กำหนดให้มี

จำนวน 4 ยีน ในการนำเสนอตั้งตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 การนำเสนอข้อมูลของยีนที่ใช้ในการแทนค่า

รูปแบบเลขฐานสิบ	รูปแบบเลขฐานสอง	รูปแบบเลขฐานสิบ	รูปแบบเลขฐานสอง
x=0	0000	x=8	1000
x=1	0001	x=9	1001
x=2	0010	x=10	1010
x=3	0011	x=11	1011
x=4	0100	x=12	1100
x=5	0101	x=13	1101
x=6	0110	x=14	1110
x=7	0111	x=15	1111

2.2.4.1 การสร้างประชากรเริ่มต้น

เริ่มต้นด้วยการสุ่มประชากรเริ่มต้น มาจำนวน $N = 6$ โดยกำหนดมีคุณสมบัติของจำนวน ยีนตามที่ได้กำหนดไว้ข้างต้น สมมติว่าโครโมโซมที่สุ่มได้มีค่าดังนี้

โครโมโซมที่ 1 มีค่า 1100 มีค่าในเลขฐานสิบเท่ากับ 12

โครโมโซมที่ 2 มีค่า 0100 มีค่าในเลขฐานสิบเท่ากับ 4

โครโมโซมที่ 3 มีค่า 0001 มีค่าในเลขฐานสิบเท่ากับ 1

โครโมโซมที่ 4 มีค่า 1110 มีค่าในเลขฐานสิบเท่ากับ 14

โครโมโซมที่ 5 มีค่า 0111 มีค่าในเลขฐานสิบเท่ากับ 7

โครโมโซมที่ 6 มีค่า 1001 มีค่าในเลขฐานสิบเท่ากับ 9

จากนั้นทำการหาค่าความเหมาะสมของแต่ละโครโมโซมจากฟังก์ชันความเหมาะสมที่กำหนดไว้ และทำการจัดเรียงโครโมโซมตามค่าความเหมาะสมที่ได้จากมากไปน้อยได้ดังนี้

โครโมโซมที่ 1 : $x = 7$ ค่าความเหมาะสม = 56

โครโมโซมที่ 2 : $x = 9$ ค่าความเหมาะสม = 54

โครโมโซมที่ 3 : $x = 4$ ค่าความเหมาะสม = 44

โครโมโซมที่ 4 : $x = 12$ ค่าความเหมาะสม = 36

โครโมโซมที่ 5 : $x = 14$ ค่าความเหมาะสม = 14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครโมโซมที่ 6 : $x = 1$ ค่าความเหมาะสม = 14

2.2.4.2 การเลือกโครโมโซมพ่อแม่

เลือกโครโมโซมพ่อแม่จำนวน 2 โครโมโซม ซึ่งในที่นี้จะใช้วิธี Roulette Wheel เพื่อหาค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซม ดังนั้นจากสมการที่ (2.26) จะได้สมการดังนี้

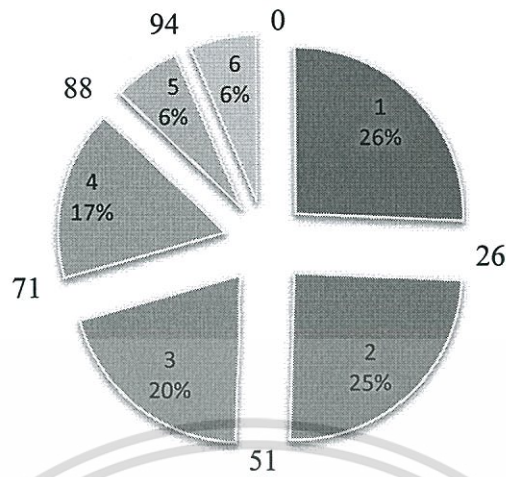
$$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p} = \frac{f_n}{56 + 54 + 44 + 36 + 14 + 14} = \frac{f_n}{218} \quad (2.27)$$

โดย f_n มีค่าเท่ากับ ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมแต่ละโครโมโซมเมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (2.27) จะได้ค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโครโมโซมได้ดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโครโมโซม

อันดับโครโมโซม	โครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p}$
1 (x_1)	0111	56	$\frac{56}{218} = 0.256881$
2 (x_2)	1001	54	$\frac{54}{218} = 0.247706$
3 (x_3)	0100	44	$\frac{44}{218} = 0.201835$
4 (x_4)	1100	36	$\frac{36}{218} = 0.165138$
5 (x_5)	1110	14	$\frac{14}{218} = 0.06422$
6 (x_6)	0001	14	$\frac{14}{218} = 0.06422$
ผลรวมของค่าความเหมาะสม		218	1

จากตารางที่ 2.7 โครโมโซมอันดับที่ 1 และโครโมโซมอันดับที่ 2 จะมีโอกาสที่ดีในการถูกเลือก ในขณะที่ โครโมโซมอันดับที่ 5 และโครโมโซมอันดับที่ 6 มีโอกาสถูกเลือกน้อย ซึ่งจากค่าความน่าจะเป็นที่ได้นั้นทำให้ค่าความเหมาะสมเฉลี่ยถูกปรับปรุงจากรุ่นของกระบวนการทางพันธุกรรมรุ่นหนึ่งไปยังอีกรุ่นหนึ่ง และจากตารางทำให้เกิดวงล้อรูเล็ตดังรูป



รูปที่ 2.12 วงล้อรูเลตต์ที่ได้โดยใช้วิธี Roulette wheel จากตารางที่ 2.7

จากรูปที่ 2.12 โครโมโซมอันดับที่ 1 และ โครโมโซมอันดับที่ 2 จะมีพื้นที่มากที่สุด ในขณะที่ โครโมโซมอันดับที่ 5 และโครโมโซมอันดับที่ 6 ก็จะมีพื้นที่น้อยกว่ามากในวงล้อรูเลตต์

ในการเลือกโครโมโซมพ่อแม่ก็จะทำการสุ่มโดยการหมุนวงล้อ โดยในทางปฏิบัติสามารถทำได้โดยใช้วิธีการสุ่มค่าขึ้นมาระหว่าง $[0, 100]$ จากนั้นค่าโครโมโซมอันดับที่อยู่ในช่วงของเลขที่สุ่มขึ้นมาได้นั้นก็จะเป็นโครโมโซมที่ถูกเลือก

สำหรับในตัวอย่างนี้ก็จะทำการสุ่มตัวเลขมาทั้งหมด 6 ครั้งทำให้ได้โครโมโซมมาทั้งหมด 3 คู่ เพื่อนำมาเข้าสู่อการดำเนินการทางพันธุกรรมต่อไป

สมมติให้โครโมโซมที่ได้คือ

คู่ที่ 1 โครโมโซมอันดับที่ 2 กับ โครโมโซมอันดับที่ 3

คู่ที่ 2 โครโมโซมอันดับที่ 4 กับ โครโมโซมอันดับที่ 1

คู่ที่ 3 โครโมโซมอันดับที่ 3 กับ โครโมโซมอันดับที่ 1

2.2.4.3 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

จะทำการสุ่มค่าการเกิดครอสโอเวอร์ขึ้นโดยสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการเกิดครอสโอเวอร์ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 0.7 ถ้าค่าที่สุ่มมานั้นมีค่าน้อยกว่า 0.7 การครอสโอเวอร์ก็จะเกิดขึ้น แต่ถ้าค่าที่สุ่มมีค่ามากกว่าก็จะทำให้ไม่เกิดการครอสโอเวอร์ขึ้นทำให้

โครโมโซมลูกที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับโครโมโซมพ่อแม่เดิมโดยจากตัวอย่างที่สมมติขึ้นจะเกิดการครอสโอเวอร์ ซึ่งในตัวอย่างจะใช้วิธีการครอสโอเวอร์แบบ Single-point Crossover ทำให้เกิดการครอสโอเวอร์ดังตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ลักษณะการเกิดครอสโอเวอร์จากตัวอย่าง

โครโมโซมพ่อแม่ 1	โครโมโซมพ่อแม่ 2
$x_2=1\ 0\ \ 0\ 1$	$x_3=0\ 1\ \ 0\ 0$
$x_4=1\ \ 1\ 0\ 0$	$x_1=1\ \ 1\ 1\ 1$
$x_3=0\ 1\ 0\ 0$	$x_1=0\ 1\ 1\ 1$

ตารางที่ 2.9 ผลของการครอสโอเวอร์จากตารางที่ 2.8

โครโมโซม	ค่าของโครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p}$
$x'_1=1000$	8	56	0.224
$x'_2=0101$	5	50	0.200
$x'_3=1111$	15	0	0
$x'_4=0100$	4	44	0.176
$x'_5=0100$	4	44	0.176
$x'_6=0111$	7	56	0.224

จากตารางที่ได้นำมาคิดจะได้ว่าผลเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับ 42 ซึ่งมีค่ามากขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยที่เกิดจากประชากรรุ่นแรกซึ่งมีค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมเท่ากับ 36 โดยผลที่ได้นั้นจะแสดงให้เห็นถึงการปรับปรุงคุณภาพที่เกิดจากการครอสโอเวอร์

2.2.4.4 มิวเทชัน (Mutation)

จะทำการสุ่มค่าในการเกิดมิวเทชันขึ้นโดยสุ่มค่าระหว่าง 0 ถึง 1 โดยทำการสุ่มการเกิดมิวเทชันในระดับของยีน ซึ่งหากค่าที่สุ่มได้นั้นมีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการเกิดมิวเทชันซึ่งในตัวอย่างนี้กำหนดไว้ที่ 0.001 ก็จะมีการสลับค่าของยีนตำแหน่งนั้นๆ จากค่า '1' ไปเป็น '0' และค่า '0' ไปเป็น '1' โดยในตัวอย่างนี้จะทำการสมมติให้เกิดการมิวเทชันดังตารางที่ 2.10 และจะได้โครโมโซมที่ผ่านการมิวเทชันดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.10 ลักษณะการเกิดมิวเทชันจากตัวอย่าง

ประชากรก่อนมิวเทชัน	ประชากรหลังมิวเทชัน
$x'_1=1$ 0 0 0	
$x'_2=0$ 1 0 1	
$x'_3=1$ 1 1 1	$x''_3=1$ 0 1 1
$x'_4=0$ 1 0 0	
$x'_5=0$ 1 0 0	$x''_5=0$ 1 1 0
$x'_6=0$ 1 1 1	

ตารางที่ 2.11 ผลของการมิวเทชันจากตารางที่ 2.10

โครโมโซม	ค่าของโครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p}$
$x'_1=1000$	8	56	0.20438
$x'_2=0101$	5	50	0.182482
$x''_3=1011$	14	14	0.051095
$x'_4=0100$	4	44	0.160584
$x''_5=0110$	6	54	0.19708
$x'_6=0111$	7	56	0.20438

จากตารางจะเห็นได้ว่าผลเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมที่ได้นั้นมีค่าเท่ากับ 45.7 ซึ่งผลที่ได้นี้มีค่ามากขึ้นกว่าค่าเฉลี่ยที่เกิดจากประชากรที่ได้จากการครอสโอเวอร์ข้างต้นที่มีค่าเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมเท่ากับ 42

สำหรับการเกิดมิวเทชันนั้นเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นได้ยากและบางครั้งก็ไม่ได้ทำให้ค่าความเหมาะสมของโครโมโซมที่เกิดการมิวเทชันเพิ่มขึ้นเสมอไป แต่มิวเทชันก็มีความจำเป็นหากเมื่อการครอสโอเวอร์เพียงอย่างเดียวไม่สามารถทำให้เกิดความหลากหลายหรือการเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรมที่ดีขึ้นได้

2.2.4.5 การหยุดกระบวนการ

จากที่ได้แสดงตัวอย่างมานั้นเป็นการแสดงการทำงานเพียงแค่อุ่นเดียวของกระบวนการทางพันธุกรรมคือช่วงที่เป็นการเริ่มต้นในการสร้างประชากรและทำการนำประชากรที่ได้มาเข้าสู่

กระบวนการปรับปรุงด้วยวิธีการทางพันธุกรรมเพื่อคัดเลือกเอาลูกหลานที่ได้จากประชากรเริ่มต้นมาเป็นโครโมโซมพ่อแม่ในรุ่นถัดไปของกระบวนการเท่านั้น จากนั้นไปก็จะทำการนำโครโมโซมลูกหลานที่ได้มาในกระบวนการรุ่นที่กล่าวไปนั้นไปใช้เพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่เพื่อใช้ในการสร้างโครโมโซมลูกหลานของรุ่นถัดไป ซึ่งจากนี้ไปวิธีการทางพันธุกรรมจะต้องทำการปรับปรุงผลเฉลี่ยของค่าความเหมาะสมที่ได้จากประชากรแต่ละรุ่นไปอย่างต่อเนื่อง และหลังจากผ่านการปรับปรุงในแต่ละรุ่นของกระบวนการไปหลายรุ่นก็จะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่เข้าใกล้ค่าที่มีความเหมาะสมของปัญหาที่ต้องการแก้ ซึ่งเงื่อนไขของการหยุดกระบวนการนั้นก็มิได้หลายรูปแบบ แต่เงื่อนไขที่นิยมใช้คือการกำหนดจำนวนรอบและตรวจสอบผลลัพธ์ที่ได้ว่าค่าที่เข้าใกล้ค่าที่ต้องการหรือไม่หากยังไม่ได้ค่าที่ต้องการ อาจจะมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการหยุดกระบวนการเช่น เพิ่มรอบในการเกิดกระบวนการขึ้น หรือ อาจจะมีการเพิ่มค่าความน่าจะเป็นในการเกิดการดำเนินการทางพันธุกรรมต่างๆ เป็นต้น

2.3 การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม (Polynomial Curve Fitting)

การปรับเส้นโค้งเชิงพหุนามนั้นเป็นหนึ่งในวิธีการที่ถูกนำมาใช้งานเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลเพื่อทำให้รู้ว่าหากข้อมูลที่เรา มีนั้นมีการเปลี่ยนแปลงค่าไปผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลนั้นจะออกมาเป็นเช่นไร ซึ่งการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนามนั้นจะถูกนำมาใช้เมื่อค่าความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้นั้นมีความซับซ้อนทำให้ไม่สามารถหาใช้คุณสมบัติของฟังก์ชันที่เป็นเส้นตรงมาหาค่าความสัมพันธ์ได้

2.3.1 การหาสมการพหุนามโดยใช้แนวทางการหาค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด

ดังนั้นการประมาณค่าจึงได้ใช้สมการพหุนามในการหาความสัมพันธ์ของข้อมูลโดยสมการพหุนามจะอยู่ในรูปแบบดังสมการ

$$\begin{aligned} f(d) &= q_0 + q_1d + q_2d^2 + q_3d^3 + \dots + q_jd^j \\ &= q_0 + \sum_{k=1}^j q_k d^k \end{aligned} \quad (2.28)$$

โดย j คืออันดับของสมการพหุนามที่นำมาใช้

จากนั้นจะทำการหาค่าความผิดพลาดที่น้อยที่สุดของจุดที่เป็นไปได้ในสมการพหุนามอันดับที่ต้องการโดยใช้วิธีแนวทางการหาค่าความผิดพลาดกำลังสองน้อยที่สุด (Least Squares Approach)

โดยจะใช้ค่าความผิดพลาดระหว่างค่าข้อมูลที่มีอยู่เทียบกับข้อมูลที่จะเกิดขึ้นจากสมการพหุนามมาเป็นข้อกำหนดในการหาสมการพหุนามดังสมการ

$$err = \sum_{i=1}^n (w_i)^2 = (y_1 - f(d_1))^2 + (y_2 - f(d_2))^2 + \dots + (y_i - f(d_i))^2 \quad (2.29)$$

โดย n คือจำนวนของข้อมูลที่เรานำมาใช้ในการหาสมการพหุนาม และจากสมการที่ (2.28) เมื่อนำมาแทนค่าในสมการที่ (2.29) จะได้

$$\begin{aligned} err &= \sum_{i=1}^n (y_i - (q_0 + q_1 d + q_2 d^2 + q_3 d^3 + \dots + q_j d^j))^2 \\ &= \sum_{i=1}^n (y_i - (q_0 + \sum_{k=1}^j q_k d^k))^2 \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยเงื่อนไขที่ทำให้ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคือ

$$\frac{\partial err}{\partial q_k} = 0, k = 0, 1, 2, \dots, j$$

ดังนั้น

$$\begin{aligned} \frac{\partial err}{\partial q_1} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (q_0 + \sum_{k=1}^j q_k d_i^k)) d_i = 0 \\ \frac{\partial err}{\partial q_2} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (q_0 + \sum_{k=1}^j q_k d_i^k)) d_i^2 = 0 \\ &\vdots \\ \frac{\partial err}{\partial q_j} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - (q_0 + \sum_{k=1}^j q_k d_i^k)) d_i^j = 0 \end{aligned} \quad (2.31)$$

เมื่อนำมาจัดรูปจะมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
q_0 + q_1 \sum_{i=1}^n d_i + q_2 \sum_{i=1}^n d_i^2 + \dots + q_j \sum_{i=1}^n d_i^j &= \sum_{i=1}^n y_i \\
q_0 \sum_{i=1}^n d_i + q_1 \sum_{i=1}^n d_i^2 + q_2 \sum_{i=1}^n d_i^3 + \dots + q_j \sum_{i=1}^n d_i^{j+1} &= \sum_{i=1}^n y_i d_i \\
&\vdots \\
q_0 \sum_{i=1}^n d_i^j + q_1 \sum_{i=1}^n d_i^{j+1} + q_2 \sum_{i=1}^n d_i^{j+2} + \dots + q_j \sum_{i=1}^n d_i^{j+j} &= \sum_{i=1}^n y_i d_i^j
\end{aligned}$$

นำสมการที่ได้มาเขียนใหม่ให้อยู่ในรูปของเมตริกซ์จะได้ค่าดังนี้

$$\begin{bmatrix} n & \sum d_i & \sum d_i^2 & \dots & \sum d_i^j \\ \sum d_i & \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \dots & \sum d_i^{j+1} \\ \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \sum d_i^4 & \dots & \sum d_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum d_i^j & \sum d_i^{j+1} & \sum d_i^{j+2} & \dots & \sum d_i^{j+j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (d_i y_i) \\ \sum (d_i^2 y_i) \\ \vdots \\ \sum (d_i^j y_i) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

จากสมการ (2.32) จะได้

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum d_i & \sum d_i^2 & \dots & \sum d_i^j \\ \sum d_i & \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \dots & \sum d_i^{j+1} \\ \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \sum d_i^4 & \dots & \sum d_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum d_i^j & \sum d_i^{j+1} & \sum d_i^{j+2} & \dots & \sum d_i^{j+j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (d_i y_i) \\ \sum (d_i^2 y_i) \\ \vdots \\ \sum (d_i^j y_i) \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (2.33) เราก็จะสามารถหาสมการพหุนามอันดับที่ต้องการออกมาได้

2.3.2 ตัวอย่างการหาสมการพหุนามด้วยการปรับเส้นโค้งเชิงพหุนาม

ต้องการหาสมการพหุนามแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า d และค่า y ของข้อมูลในตารางที่

2.12 โดยใช้สมการพหุนามอันดับที่สอง

ตารางที่ 2.12 ข้อมูลที่ใช้ในการหาสมการพหุนามของตัวอย่าง

i	1	2	3	4	5	6
d	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
y	0	0.25	1.0	2.25	4.0	6.25

เนื่องจากเป็นฟังก์ชันอันดับที่ 2 ดังนั้นจากสมการที่ (2.28) ถึง (2.32) จะได้

$$\begin{bmatrix} n & \sum d_i & \sum d_i^2 \\ \sum d_i & \sum d_i^2 & \sum d_i^3 \\ \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \sum d_i^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum y_i \\ \sum (d_i y_i) \\ \sum (d_i^2 y_i) \end{bmatrix}$$

แทนค่าจะได้

$$n = 6$$

$$\sum d_i = 7.5, \quad \sum y_i = 13.75$$

$$\sum d_i^2 = 13.75, \quad \sum (d_i y_i) = 28.125$$

$$\sum d_i^3 = 28.125, \quad \sum (d_i^2 y_i) = 61.1875$$

$$\sum d_i^4 = 61.1875$$

จะได้

$$\begin{bmatrix} 6 & 7.5 & 13.75 \\ 7.5 & 13.75 & 28.125 \\ 13.75 & 28.125 & 61.1875 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.75 \\ 28.125 \\ 61.1875 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 & 7.5 & 13.75 \\ 7.5 & 13.75 & 28.125 \\ 13.75 & 28.125 & 61.1875 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 13.75 \\ 28.125 \\ 61.1875 \end{bmatrix}$$

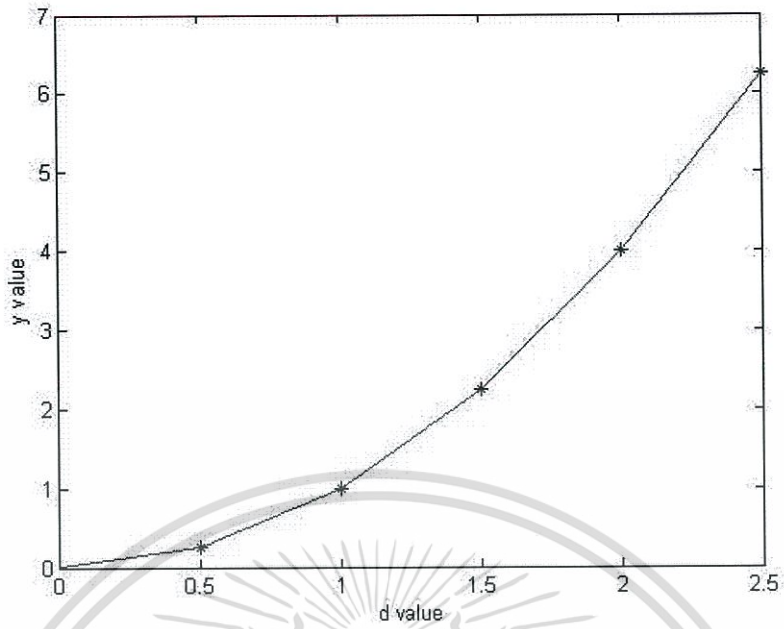
เพราะฉะนั้นค่า

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.0006 \\ 0.0019 \\ 0.9992 \end{bmatrix}$$

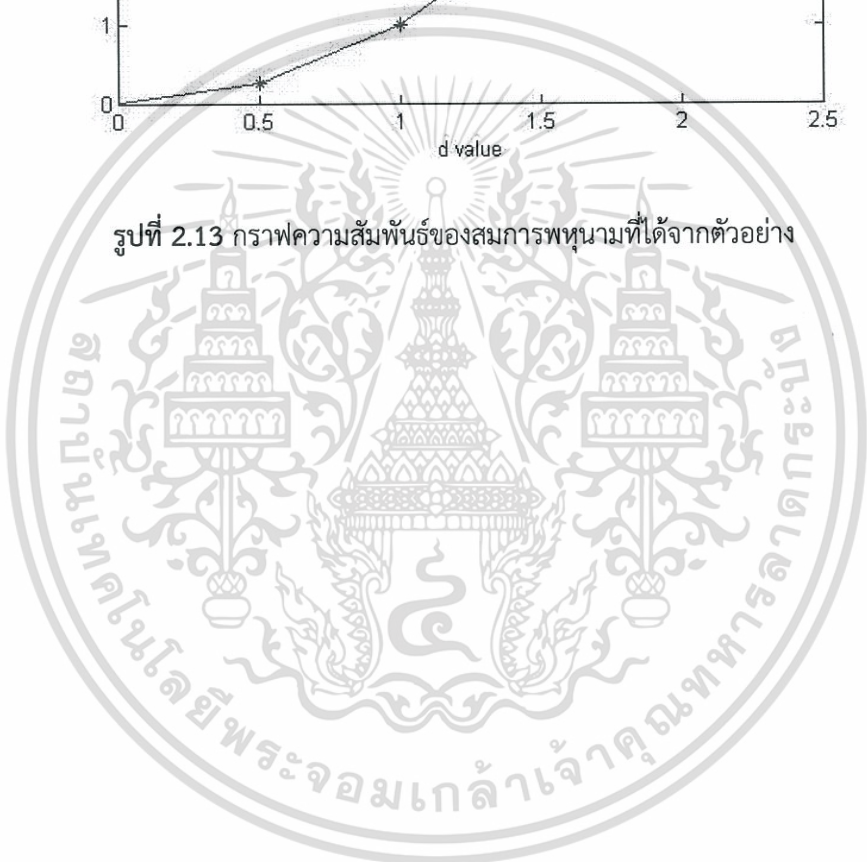
ดังนั้นฟังก์ชันที่ได้คือ $f(d) = -0.0006 + 0.0019d + 0.9992d^2$ จะแสดงเป็นกราฟได้

ดังรูปที่ 2.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ของสมการพหุนามที่ได้จากตัวอย่าง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบและสร้างวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่า ความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม

ในบทนี้จะนำเสนอการออกแบบวงจรรองผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้วิธีการทางพันธุกรรม โดยสัมประสิทธิ์ของวงจรรองจะถูกกำหนดให้เป็นโครโมโซมของกระบวนการทางพันธุกรรม และทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่ต้องการออกแบบเพื่อให้ได้คุณสมบัติค่าความหน่วงเฟสที่ต้องการ

3.1 การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วน

โดยทั่วไปแล้วตามหลักการออกแบบวงจรรองชนิดหน่วงเวลาแบบเศษส่วนนั้น มีความต้องการให้มีผลตอบสนองทางขนาดเป็นหนึ่งคงที่ในทุกๆช่วงความถี่ และผลตอบสนองทางเฟสจะมีความเป็นเชิงเส้นในย่านความถี่ที่สนใจ $0 \leq \omega \leq \omega_{op}$ ซึ่ง ω_{op} คือย่านขอบของความถี่ที่สนใจ

วงจรรองสัญญาณผ่านตลอดนั้นเป็นประเภทหนึ่งของวงจรรองสัญญาณแบบอิมพัลส์ไม่จำกัดที่มีค่าผลการตอบสนองทางขนาดที่คงที่ในทุกช่วงความถี่ โดยกำหนดให้ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดอันดับที่ N มีรูปแบบดังนี้

$$H(z) = z^{-N} \frac{D(z^{-1})}{D(z)} \quad (3.1)$$

เมื่อ $D(z) = 1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + \dots + a_Nz^{-N}$, N คืออันดับของวงจรรองและ a_1, a_2, \dots, a_N คือสัมประสิทธิ์ของวงจรรองผ่านตลอด โดยจากสมการที่ (3.1)

โดยทั่วไปแล้วหลักการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดนั้น จะใช้ค่าความหน่วงเฟสเป็นตัวกำหนดว่าคุณสมบัติที่ได้นั้นเป็นไปตามเงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งค่าความหน่วงเฟสของวงจรรองแบบสัญญาณผ่านตลอดคือ

$$\Theta_A(\omega) = \arg\{A(e^{j\omega})\} = -N\omega + 2\Theta_D(\omega) \quad (3.2)$$

เมื่อ $\Theta_D(\omega)$ มีค่าเท่ากับ

$$\Theta_D(\omega) = \arctan\left(\frac{\sum_{k=0}^N a_k \sin k\omega}{\sum_{k=0}^N a_k \cos k\omega}\right) \quad (3.3)$$

วงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนนั้นจะสามารถออกแบบได้โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสม (a_k) เพื่อนำมาสร้างวงจรรองสัญญาณ

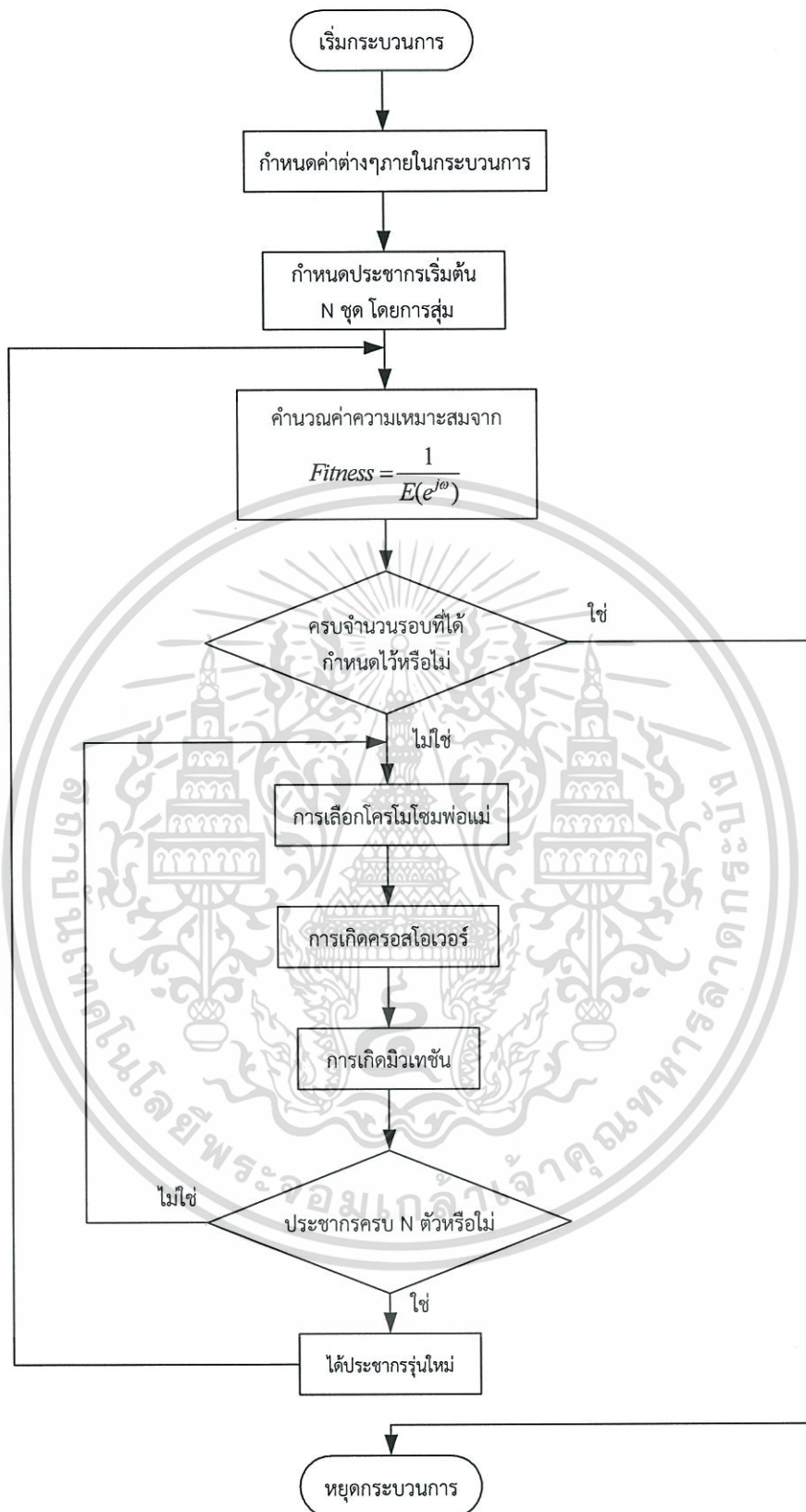
โดยการออกแบบจะพิจารณาคุณภาพของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่ได้จากการออกแบบเทียบกับวงจรรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนในอุดมคติโดยทำการหาค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ตามสมการดังนี้

$$E(e^{j\omega}) = \left| e^{-j\omega(N+d)} - H(e^{j\omega}) \right| \quad (3.4)$$

เมื่อ $e^{-j\omega(N+d)}$ คือค่าผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนตามอุดมคติซึ่งมีค่าความหน่วงเท่ากับ $N+d$ และ $H(e^{j\omega})$ คือผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองที่ได้จากการออกแบบที่นำมาใช้ ซึ่งค่า $E(e^{j\omega})$ คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ซึ่งค่าที่ได้นั้นควรจะมีค่าน้อยเพื่อให้การออกแบบมีความเหมาะสม

3.2 การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรม

การออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรมนั้นจะใช้วิธีการทางพันธุกรรมเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมให้กับฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรรองในสมการที่ (3.1) ดังนั้นค่าโครโมโซมที่วิธีการทางพันธุกรรมนำมาใช้ก็คือ a_1, a_2, \dots, a_N โดยจะมีขั้นตอนในการออกแบบดังรูป



รูปที่ 3.1 กระบวนการในการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1 การเริ่มกระบวนการ

ทำการเริ่มกระบวนการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม โดยจะแสดงการออกแบบวงจรของสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหวังเป็นเศษส่วนอันดับที่ 3-7 ซึ่งจะมีการกำหนดค่าต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบคือ

จำนวนของประชากร = 35, จำนวนตำแหน่งบิตที่ใช้ในการออกแบบโครโมโซม = 12

ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดครอสโอเวอร์ = 0.8, ค่าความน่าจะเป็นในการเกิดมิวเทชัน = 0.01

จำนวนรอบของการดำเนินกระบวนการ = 500 รอบ

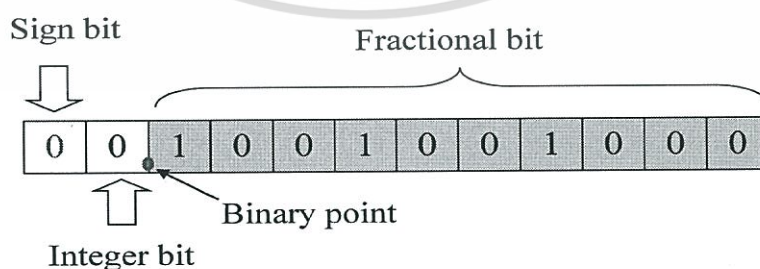
ซึ่งเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้นนี้ได้มาจากการทดลองใช้เงื่อนไขให้มีค่าต่างๆ ที่แตกต่างกันจนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการ โดยหากเพิ่มหรือลดเงื่อนไขข้างต้นนี้ไป ไม่ได้มีผลทำให้ผลของออกแบบดีขึ้นเท่าที่ควร

3.2.2 การสร้างประชากรเริ่มต้น

ประชากรคือชุดของโครโมโซมที่สร้างขึ้น เพื่อที่จะนำไปผ่านกระบวนการคัดเลือก ให้เป็นโครโมโซมพ่อโครโมโซมแม่สำหรับการสร้างประชากรในรุ่นถัดไป

โดยในงานวิทยานิพนธ์นี้จะทำการสร้างประชากรเริ่มต้น โดยเริ่มจากการกำหนดจำนวนของประชากรที่ใช้ในกระบวนการ และทำการสร้างโครโมโซมด้วยวิธีการสุ่มค่า 0 หรือ 1 ในแต่ละตำแหน่งยีนของโครโมโซม และรูปแบบของเลขฐานสองโดยจะกำหนดให้เป็นเลขฐานสองแบบมีเครื่องหมาย และมีเลขทศนิยมโดยมีรายละเอียดดังนี้ กำหนดให้รูปแบบของเลขฐานสองมีขนาดสิบสองตำแหน่ง โดยจะใช้ตำแหน่งแรกแทนข้อมูลที่เป็นเครื่องหมาย และใช้อีกตำแหน่งถัดมาในการแทนข้อมูลที่เป็นจำนวนเต็ม จากนั้นอีกสิบตำแหน่งถัดมาแทนข้อมูลที่เป็นจำนวนเต็ม โดยจะแสดงรายละเอียดดังรูปที่

3.2



รูปที่ 3.2 โครโมโซมของวิธีการทางพันธุกรรมขนาดสิบสองตำแหน่ง

จากรูปที่ 3.2 จะแสดงให้เห็นถึงโครโมโซมที่มีขนาดสิบสองตำแหน่ง โดยตำแหน่งทางซ้ายสุดนั้นเป็นตำแหน่งที่แสดงถึงค่าความเป็น +, - ในเลขฐานสิบ ตำแหน่งถัดมาแสดงข้อมูลที่เป็นจำนวนเต็มและสิบตำแหน่งที่เหลือจะใช้ในการแทนข้อมูลที่เป็นเลขทศนิยม ซึ่งจากข้อมูลในรูปที่ 3.2 หากแปลงกลับไปเป็นเลขฐานสิบจะมีค่า 0.5703

ซึ่งในการออกแบบได้กำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นคือ 35 และมีขนาดเท่ากับ 12 บิต ซึ่งจะใช้การสุ่มเลขที่มีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ของแต่ละบิตขึ้นมาโดยเทียบกับค่า 0.5 หากค่าที่สุ่มมาได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 บิตตำแหน่งนั้นก็จะมีค่าเป็น 1 แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.5 บิตตำแหน่งนั้นก็จะมีค่าเป็น 0 ดังที่แสดงตัวอย่างในรูปที่ 3.3 และตารางที่ 3.1 แสดงตัวอย่างประชากรที่สุ่มได้จากกระบวนการซึ่งจะยกตัวอย่างประชากรมา 4 ชุด

1	0	0	1	← ค่าของโครโมโซม
0.7	0.3	0.2	0.9	← เลขที่สุ่มได้

รูปที่ 3.3 ตัวอย่างการสุ่มของประชากรที่ออกแบบ

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างประชากรที่สุ่มได้จากกระบวนการซึ่งจะยกตัวอย่างประชากร 4 ชุด

ประชากร	สัมประสิทธิ์ตัวที่ 1	สัมประสิทธิ์ตัวที่ 2	สัมประสิทธิ์ตัวที่ 3
ประชากรชุดที่ 1	001001100010	010110000100	000101011110
ประชากรชุดที่ 2	001001110101	010000011101	010111011000
ประชากรชุดที่ 3	011110101010	001110100011	101000111010
ประชากรชุดที่ 4	111111110011	101101111100	011101110001

สังเกตได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรมนี้เกิดจากระบบเลขฐานสองทำให้การนำผลลัพธ์นี้ไปประยุกต์ใช้งานจริงจะไม่มีคามผิดพลาดเพิ่มขึ้นเนื่องจากกระบวนการควอนไทซ์อีก

3.2.3 การคำนวณหาค่าความเหมาะสม

ค่าความเหมาะสมจะเป็นค่าที่ใช้ในการกำหนดว่าโครโมโซมนั้นมีความเหมาะสมที่จะนำไปเป็นคำตอบของการแก้ปัญหาหรือไม่ ซึ่งค่าความเหมาะสมจะคิดได้จากฟังก์ชันความเหมาะสม โดยค่าความเหมาะสมจะมีค่าที่ผกผันกับค่าความผิดพลาดรวมของผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากสมการที่ (3.3) ดังนั้นฟังก์ชันที่ใช้ในการหาค่าความเหมาะสมจะแสดงได้จากสมการดังนี้

$$E(e^{j\omega}) = \text{sum} \{ |e^{-j\omega(N+d)} - H(e^{j\omega})| \}$$

$$\text{Fitness} = \frac{1}{E(e^{j\omega})} \quad (3.5)$$

ตารางที่ 3.2 จะแสดงตัวอย่างค่าความเหมาะสมที่เกิดขึ้นจากประชากรตัวอย่างที่ได้จากตาราง 3.1 เพื่อนำอันดับของความเหมาะสมนั้นมาใช้ประกอบในขั้นตอนของการเลือกประชากรเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่ในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างค่าความเหมาะสมที่เกิดขึ้นจากประชากรตัวอย่าง 4 ชุด

ประชากรชุดที่	ค่าความเหมาะสม
1	0.0021
2	0.0025
3	0.0034
4	0.0023

3.2.4 การเลือกโครโมโซมพ่อแม่

โดยจะใช้วิธีการคัดเลือกแบบ Roulette Wheel Weighting ดังนี้

1. หาค่าความเหมาะสมของประชากรทั้งหมดและจัดเรียงตามค่าความเหมาะสม
2. ทำการหาค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของโครโมโซมจากสมการ

$$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p} \quad (3.6)$$

โดยที่ P_n คือความน่าจะเป็นของประชากรชุดที่ n ค่า f_n คือค่าความเหมาะสมของประชากรอันดับที่ n ค่า N คือจำนวนประชากร และ n คืออันดับของโครโมโซม

3. จากนั้นในการเลือกโครโมโซมพ่อแม่แต่ละครั้งก็จะทำการสุ่มเลขทศนิยมที่มีค่าระหว่าง 0-1 หากว่าเลขทศนิยมที่สุ่มได้นั้นตกอยู่ในช่วงค่าความน่าจะเป็นสะสมของประชากรชุดใดก็จะเลือกโครโมโซมในประชากรชุดนั้นมาเป็นพ่อแม่ให้กับโครโมโซมรุ่นถัดไปดังที่แสดงตัวอย่างขึ้นมาในตารางต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 ค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกของแต่ละโครโมโซมในการออกแบบ

อันดับโครโมโซม	โครโมโซม	ค่าความเหมาะสม	$P_n = \frac{f_n}{\sum_{p=1}^N f_p}$	$\sum_{i=1}^n P_i$
1 (ประชากรชุดที่ 3)	011110101010 001110100011 101000111010	0.0034	$\frac{0.0034}{0.0103} = 0.3328$	0.3328
2 (ประชากรชุดที่ 2)	001001110101 010000011101 010111011000	0.0025	$\frac{0.0025}{0.0103} = 0.2410$	0.5738
3 (ประชากรชุดที่ 4)	111111110011 101101111100 011101110001	0.0023	$\frac{0.0023}{0.0103} = 0.2229$	0.7947
4 (ประชากรชุดที่ 1)	001001100010 010110000100 000101011110	0.0021	$\frac{0.0021}{0.0103} = 0.2034$	1
ผลรวมของค่าความเหมาะสม		0.0103	1	

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างการเลือกของโครโมโซมในการออกแบบวงจร

ค่าที่สุ่มได้	โครโมโซมที่ถูกเลือก
0.56	ประชากรชุดที่ 2
0.12	ประชากรชุดที่ 3
0.89	ประชากรชุดที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

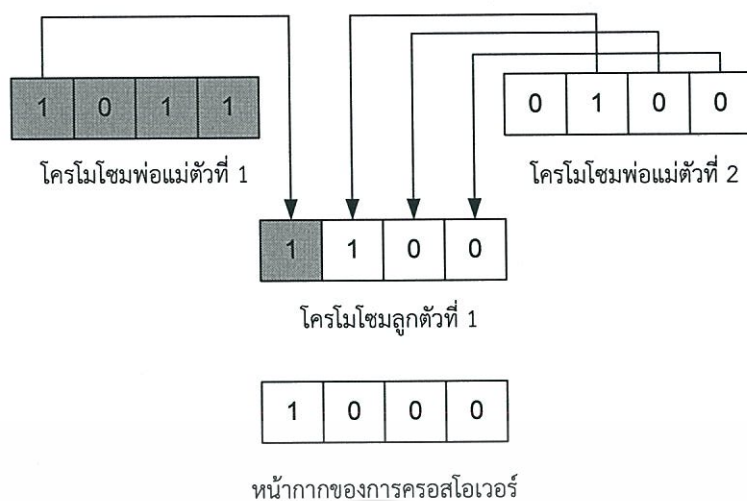
จากตารางที่ 3.3 จะเห็นได้ว่าค่าผลรวมของค่าความน่าจะเป็นในการถูกเลือกนั้นจะมีช่วงของความต่างระหว่างอันดับของโครโมโซมหากค่าที่สุ่มได้จากที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 3 นั้นไปตกอยู่ในช่วงระหว่างของโครโมโซมอันดับใดก็จะทำการเลือกโครโมโซมอันดับนั้นขึ้นมาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อแม่ในกระบวนการครอสโอเวอร์ต่อไปดังที่แสดงในตารางที่ 3.4

โดยการออกแบบภายในวิทยานิพนธ์ ได้ทำการออกแบบโดยกำหนดเงื่อนไขที่ทำให้ไม่มีการเลือกโครโมโซมพ่อแม่และโครโมโซมแม่ที่ใช้ในการสร้างโครโมโซมลูกหลานซ้ำกัน ตัวอย่างเช่น หากโครโมโซมอันดับที่ 1 ถูกเลือกมาเพื่อเป็นโครโมโซมพ่อในการสร้างโครโมโซมลูกหลานอันดับที่ 1 แล้ว โครโมโซมอันดับที่ 1 ก็จะไม่มีโอกาสที่จะถูกเลือกให้มาเป็นโครโมโซมแม่ของการสร้างโครโมโซมลูกหลานอันดับที่ 1

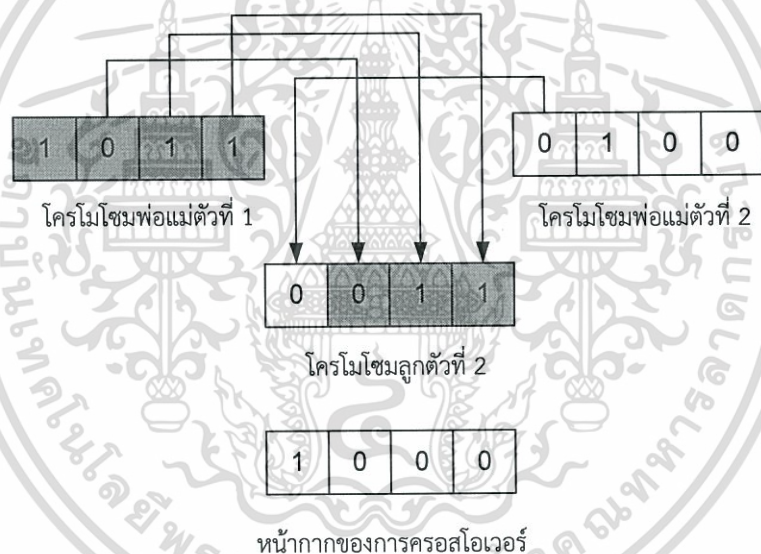
3.2.5 การครอสโอเวอร์

โครโมโซมพ่อแม่ที่ได้มาจากการเลือกที่ผ่านมานำมาเข้าสู่การครอสโอเวอร์ เพื่อให้เกิดประชากรรุ่นใหม่โดยการใช้วิธี Uniform Crossover

1. โดยจะทำการกำหนดค่าที่จะทำให้เกิดการครอสโอเวอร์มีค่าเท่ากับ 0.8
2. หลังจากนั้นก็ทำการสุ่มค่าในการเกิดครอสโอเวอร์โดยมีรูปแบบเป็นเลขทศนิยมที่มีค่าตั้งแต่ 0-1 หากค่าที่ได้มีค่าน้อยกว่า 0.8 ก็จะเกิดการครอสโอเวอร์กันขึ้น แต่หากค่าที่ได้มากกว่า 0.8 ก็จะไม่เกิดการครอสโอเวอร์แต่จะทำการนำโครโมโซมพ่อแม่ที่เลือกมานั้นไปใช้เป็นโครโมโซมลูกหลานแทน
3. หากเกิดการครอสโอเวอร์ขึ้นก็จะทำการสร้างหน้ากากสำหรับการครอสโอเวอร์ขึ้นมาด้วยวิธีการสุ่ม โดยสำหรับโครโมโซมลูกตัวที่ 1 หากค่าที่ตำแหน่งใดของหน้ากากมีค่าเป็น 1 ให้คัดลอกยีนที่ได้จากโครโมโซมพ่อแม่ตัวที่ 1 แต่ถ้าค่าที่ตำแหน่งใดของหน้ากากมีค่าเป็น 0 ให้คัดลอกยีนที่ได้จากโครโมโซมพ่อแม่ตัวที่ 2 ดังรูปที่ 3.4 และสำหรับโครโมโซมลูกตัวที่ 2 จะทำการคัดลอกยีนที่ได้ด้วยวิธีตรงกันข้ามกับวิธีการของโครโมโซมลูกตัวที่ 1 คือ หากค่าที่ตำแหน่งใดของหน้ากากมีค่าเป็น 1 ให้คัดลอกยีนที่ได้จากโครโมโซมพ่อแม่ตัวที่ 2 แต่ถ้าค่าที่ตำแหน่งใดของหน้ากากมีค่าเป็น 0 ให้คัดลอกยีนที่ได้จากโครโมโซมพ่อแม่ตัวที่ 1 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 ตัวอย่างการเกิดการครอสโอเวอร์แบบ Uniform Crossover ของโครโมโซมลูกตัวที่ 1



รูปที่ 3.5 ตัวอย่างการเกิดการครอสโอเวอร์แบบ Uniform Crossover ของโครโมโซมลูกตัวที่ 2

สำหรับการออกแบบจะทำการสุ่มตัวเลขตัวเลขที่มีค่าระหว่าง 0-1 ขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างหน้ากากครอสโอเวอร์ของแต่ละตำแหน่งบิตขึ้น ถ้าค่าที่สุ่มได้นั้นมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.5 หน้ากากครอสโอเวอร์ตำแหน่งนั้นก็จะมามีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้ามีค่าน้อยกว่า 0.5 หน้ากากครอสโอเวอร์ตำแหน่งนั้นก็จะมามีค่าเท่ากับ 0 จากนั้นจึงดำเนินการกระบวนการครอสโอเวอร์ต่อไป ดังที่แสดงในตัวอย่าง

การออกแบบจากตารางที่ 3.5 โดยหน้ากากครอสโอเวอร์ที่ใช้สำหรับค่าแต่ละชุดของโครโมโซมมีค่า 101001010011

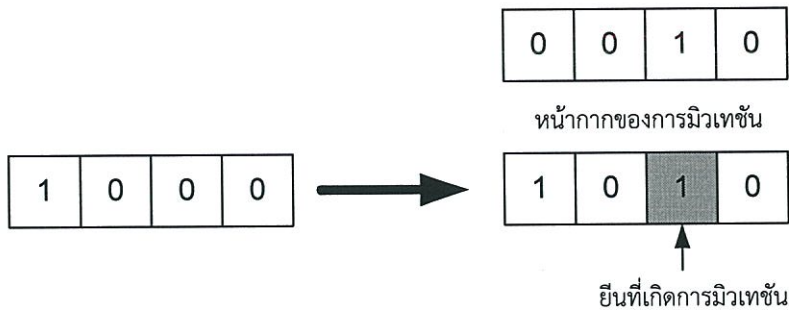
ตารางที่ 3.5 ตัวอย่างการเกิดครอสโอเวอร์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

การครอสโอเวอร์	ประชากรพ่อแม่ 1	ประชากรพ่อแม่ 2	ค่าการเกิดครอสโอเวอร์	ประชากรลูกหลาน 1	ประชากรลูกหลาน 2
1	011110101010	001001110101	0.5	001000100110	011111111001
	001110100011	010000011101		011000001111	000110110001
	101000111010	010111011000		111110011010	000001111000
2	111111110011	001001100010	0.9	111111110011	001001100010
	101101111100	010110000100		101101111100	010110000100
	011101110001	000101011110		011101110001	000101011110

3.2.6 การมิวเทชัน

เป็นการนำโครโมโซมลูกที่ได้มาจากการครอสโอเวอร์มาทำการมิวเทชันเพื่อสร้างความหลากหลายทางพันธุกรรมให้กับกระบวนการซึ่งมีขั้นตอนดังนี้

1. ทำการกำหนดค่าความน่าจะเป็นที่ทำให้เกิดการมิวเทชันซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.01
2. ทำการสุ่มค่าในการเกิดมิวเทชันเป็นเลขทศนิยมที่มีค่าระหว่าง 0-1 ซึ่งหากเลขที่ทำ การสุ่มได้นั้นมีน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการเกิดมิวเทชันให้ทำการสลับค่ายีนจากค่า 0 เป็น 1 หรือ จากค่า 1 เป็น 0 แต่ถ้าเลขที่สุ่มได้นั้นมีค่ามากกว่าค่าความน่าจะเป็นในการเกิดมิวเทชันก็จะไม่เกิดการสลับค่ายีนขึ้น โดยจะใช้ข้อกำหนดที่กล่าวไปใช้ในการสร้างหน้ากากของการมิวเทชัน ถ้าตำแหน่งที่ค่าในการสุ่มมีค่าน้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการเกิดมิวเทชัน ค่าของหน้ากากจะมีค่าเป็น 1 ถ้าไม่ใช่จะมีค่าเป็น 0 ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 3.6 และตารางที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงตัวอย่างการเกิดการมีเวชันของโครโมโซม

ตารางที่ 3.6 ตัวอย่างการเกิดมีเวชันที่เกิดขึ้นในกระบวนการ

ประชากรเริ่มต้น	หน้ากากของการมีเวชัน	ประชากรที่ผ่านการมีเวชัน
001000100110	001000100000	00000000110
011000001111	010000000001	001000001110
111110011010	000000011010	111110000000
011111111001	001000100000	010111011001
000110110001	010000000001	010110110000
000001111000	000000011010	000001100010

3.2.7 การสิ้นสุดกระบวนการ

หลังจากเกิดการมีเวชันแล้วโครโมโซมที่ได้จะถูกนำไปเป็นประชากรของกระบวนการทางพันธุกรรมในรุ่นถัดไป และจะทำการตรวจสอบว่าโครโมโซมที่ได้นั้นว่ามีจำนวนเท่ากับจำนวนของประชากรที่ได้กำหนดไว้หรือไม่ ถ้าไม่ใช่ก็จะทำการเลือกโครโมโซมพ่อแม่ขึ้นมาแล้วนำเข้าสู่การครอสโอเวอร์ และมีการมีเวชันเพื่อทำการสร้างโครโมโซมจนครบจำนวนประชากรที่กำหนดไว้ แล้วจากนั้นก็นำประชากรลูกหลานทั้งหมดที่ได้มาใช้เป็นประชากรในรุ่นถัดไป และจะทำการขั้นตอนทางพันธุกรรมต่อไปจนกระทั่งมีความเหมาะสมที่ได้ตามที่ต้องการหรือตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้จำนวนรอบในการกำหนดเงื่อนไขของการหยุดกระบวนการตามที่ตั้งไว้ในขั้นตอนแรก

3.3 การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่สามารถปรับค่าได้

จะทำการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าความหน่วงได้ โดยใช้สัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณที่มาจากการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมที่ค่าความหน่วงต่างๆ จากนั้นนำสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองมาหาสมการพหุนามที่แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณและค่าความหน่วง เพื่อทำการออกแบบโครงสร้างของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าความหน่วงได้อย่างต่อเนื่อง

3.3.1 การหาสมการพหุนามแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์วงจรกรองและค่าความหน่วง

จะทำการนำค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรมที่แตกต่างกันในแต่ละค่าความหน่วง มาหาสมการพหุนามที่แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ที่ได้กับค่าความหน่วง โดยทำการกำหนดค่าต่างๆ ที่จะใช้ในการออกแบบดังนี้

กำหนดค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ใช้ในการหาสมการพหุนามให้ค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยแต่ละค่าจะมีช่วงต่างกัน 0.1 ซึ่งจะได้ค่าความหน่วง 11 ค่า คือ $[-0.5 -0.4 -0.3 \dots 0.5]$

กำหนดอันดับของวงจรกรองที่ใช้ออกแบบคือวงจรกรองอันดับที่ 4

ค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองของแต่ละค่าความหน่วงจะมีค่าดังตารางที่ 3.7

โดยค่า $a_{1,i}$, $a_{2,i}$, ..., $a_{N,i}$ คือสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรมทั้ง 11 ค่าความหน่วง, N คือ อันดับของวงจรกรอง, i คือ ลำดับของค่าความหน่วงที่ใช้ 11 ค่า

ตารางที่ 3.7 ค่าสัมประสิทธิ์ที่ได้จากการออกแบบวงจรกรองด้วยวิธีการทางพันธุกรรมที่ค่าความหน่วง 11 ค่า

	$a_{1,i}$	$a_{2,i}$	$a_{3,i}$	$a_{4,i}$
$d = -0.5, i = 1$	-0.36631605	0.125222176	-0.02331133	0.000327
$d = -0.4, i = 2$	-0.29845495	0.096053534	-0.01607116	-0.0000576
$d = -0.3, i = 3$	-0.22913898	0.069464966	-0.01001593	-0.00059495
$d = -0.2, i = 4$	-0.15580225	0.044780913	-0.00633005	-0.000931
$d = -0.1, i = 5$	-0.07986484	0.021673678	-0.00230362	-0.00103147

ตารางที่ 3.7 (ต่อ)

$d = 0, i = 6$	0	0	0	0
$d = 0.1, i = 7$	0.091594447	-0.03060619	0.011000188	-0.0026066
$d = 0.2, i = 8$	0.184675539	-0.0553291	0.019190193	-0.00439498
$d = 0.3, i = 9$	0.279327497	-0.07346059	0.024013209	-0.00523914
$d = 0.4, i = 10$	0.376206247	-0.08557145	0.026760232	-0.00599533
$d = 0.5, i = 11$	0.474522697	-0.09040964	0.027004253	-0.00609557

จากนั้นจะทำการหาสมการพหุนามอันดับที่ j ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองและค่าความหน่วงโดยใช้สมการที่ (2.32)

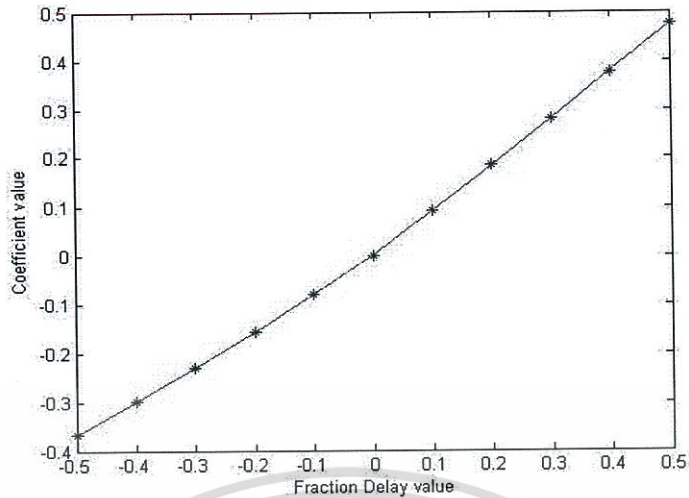
$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n & \sum d_i & \sum d_i^2 & \cdots & \sum d_i^j \\ \sum d_i & \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \cdots & \sum d_i^{j+1} \\ \sum d_i^2 & \sum d_i^3 & \sum d_i^4 & \cdots & \sum d_i^{j+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum d_i^j & \sum d_i^{j+1} & \sum d_i^{j+2} & \cdots & \sum d_i^{j+j} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum a_{N,i} \\ \sum (d_i a_{N,i}) \\ \sum (d_i^2 a_{N,i}) \\ \vdots \\ \sum (d_i^j a_{N,i}) \end{bmatrix}$$

โดยค่า d คือค่าความหน่วงที่ใช้ q คือค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามอันดับที่ j และ $a_{N,i}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรมที่ 11 ค่าความหน่วง

ทำการหาสมการพหุนามอันดับที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 1 (a_1) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการที่ (2.32) จะได้สมการพหุนามคือ

$$a_1 = 0.0046 + 0.8437d + 0.2052d^2 \quad (3.6)$$

โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 1 (a_1) และค่าความหน่วง 11 ค่าได้ดังรูปที่ 3.7

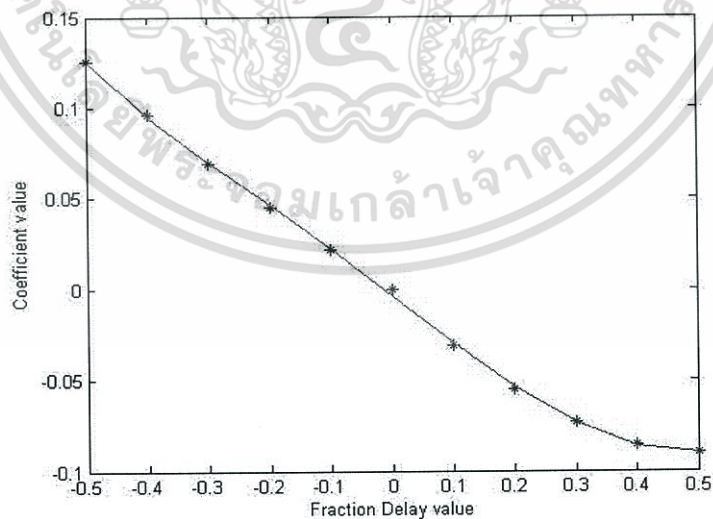


รูปที่ 3.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 1 (a_1) และค่าความหน่วง 11
ค่าจากสมการพหุนาม

ทำการหาสมการพหุนามอันดับที่ 2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 1 (a_1) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการที่ (2.32) จะได้สมการพหุนามคือ

$$a_2 = -0.0035 - 0.2536d - 0.0201d^2 + 0.1553d^3 + 0.4218d^4 \quad (3.7)$$

โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 2 (a_2) และค่าความหน่วง 11 ค่าได้ดังรูปที่ 3.8



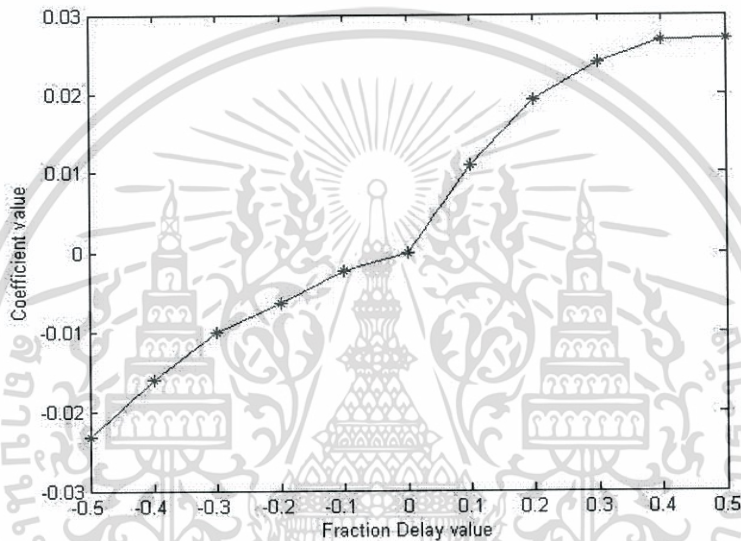
รูปที่ 3.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 2 (a_2) และค่าความหน่วง 11
ค่าจากสมการพหุนาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการหาสมการพหุนาม 2 ช่วง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการ (2.32) จะได้สมการพหุนามคือ

$$\begin{aligned} a_3 &= -0.0217d - 0.7692d^2 - 4.0653d^3 - 9.2119d^4 - 7.2230d^5 & ; -0.5 \geq d \geq 0 \\ a_3 &= -0.0036 + 0.1919d - 0.5480d^2 + 0.9310d^3 - 0.7158d^4 & ; 0 > d \geq 0.5 \end{aligned} \quad (3.8)$$

โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3) และค่าความหน่วง 11 ค่าได้ดังรูปที่ 3.9

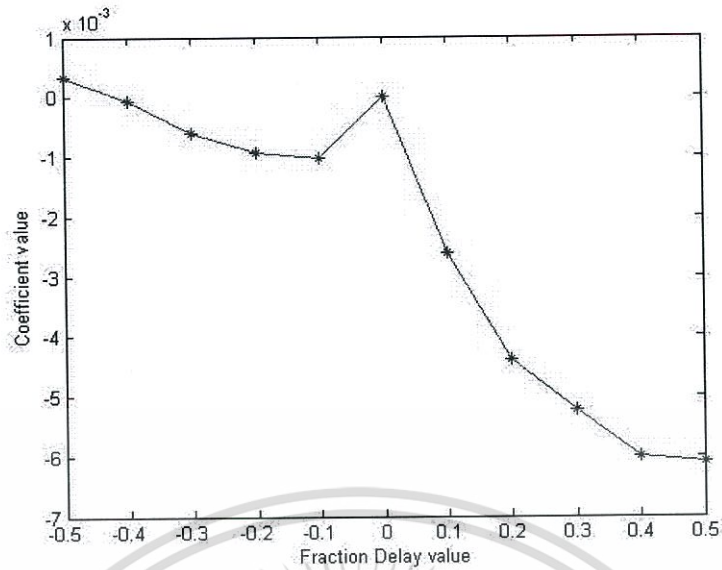


รูปที่ 3.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการพหุนาม

ทำการหาสมการพหุนาม 2 ช่วง ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_4) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการ (2.32) จะได้สมการพหุนามคือ

$$\begin{aligned} a_4 &= 0.0235d + 0.1902d^2 + 0.7096d^3 + 1.3440d^4 + 0.9848d^5 & ; -0.5 \geq d \geq 0 \\ a_4 &= 0.0024 - 0.0774d + 0.3405d^2 - 0.7362d^3 + 0.5935d^4 & ; 0 > d \geq 0.5 \end{aligned} \quad (3.9)$$

โดยแสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 4 (a_4) และค่าความหน่วง 11 ค่าได้ดังรูปที่ 3.10

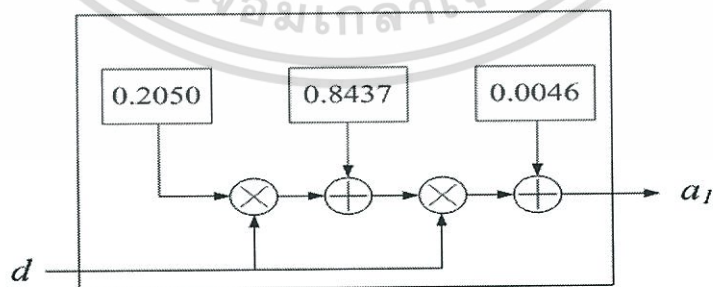


รูปที่ 3.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรถองตัวที่ 4 (a_4) และค่าความหน่วง 11 ค่าจากสมการพหุนาม

3.3.2 โครงสร้างของวงจรถองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้

ทำการออกแบบโครงสร้างโดยใช้โครงสร้าง direct form I ในการออกแบบ และใช้สมการพหุนามที่ได้จากสมการ (3.6-3.9) เพื่อสร้างตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรถองขึ้นมา ซึ่งในตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรถองนั้นจะใช้ค่าความหน่วงเป็นตัวแปรสำหรับการสร้างสัมประสิทธิ์ของวงจรถองที่เหมาะสมสำหรับค่าความหน่วงที่ต้องการ

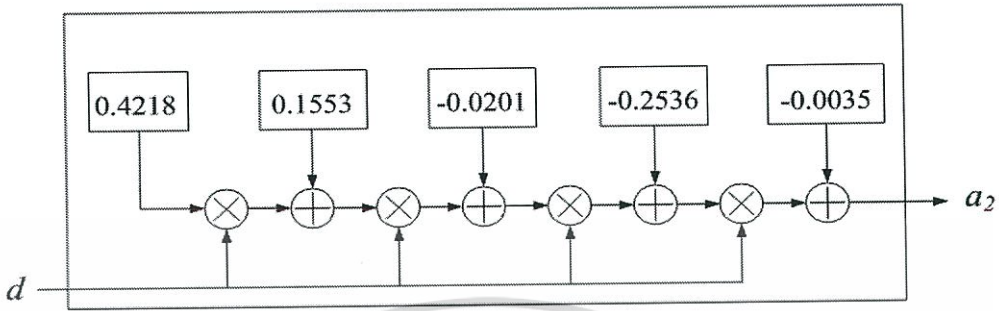
จากสมการที่ 3.6 จะได้โครงสร้างตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรถองตัวที่ 1 (a_1) ได้ดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรถองตัวที่ 1 (a_1)

จากสมการที่ 3.7 จะได้โครงสร้างตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 2 (a_2) ได้ดังรูปที่

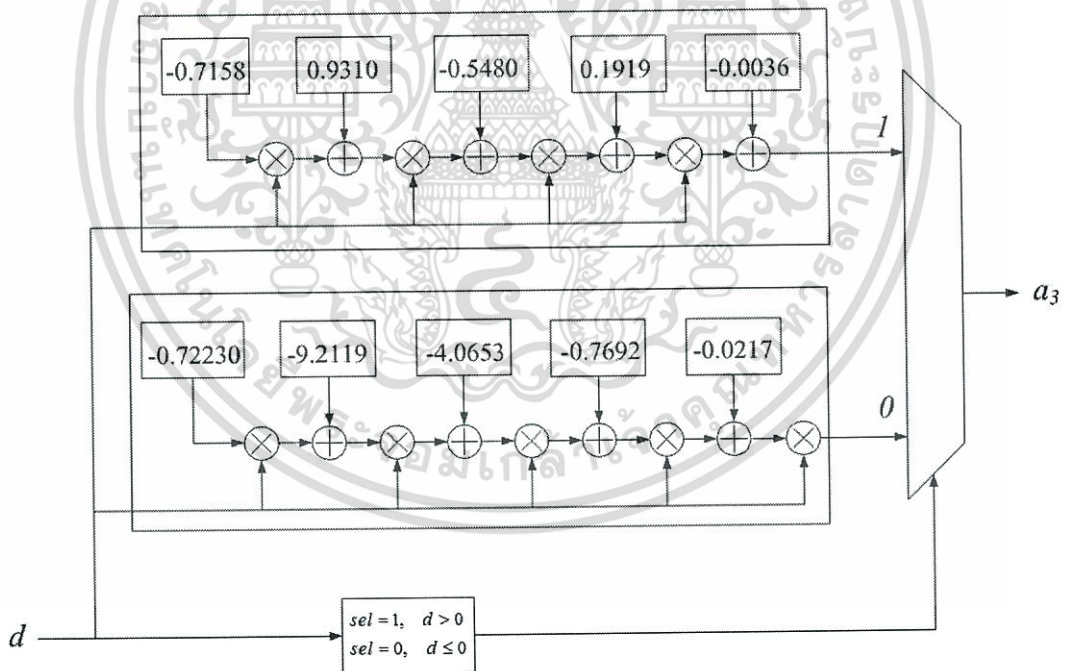
3.12



รูปที่ 3.12 โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 2 (a_2)

จากสมการที่ 3.8 จะได้โครงสร้างตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3) ได้ดังรูปที่

3.13

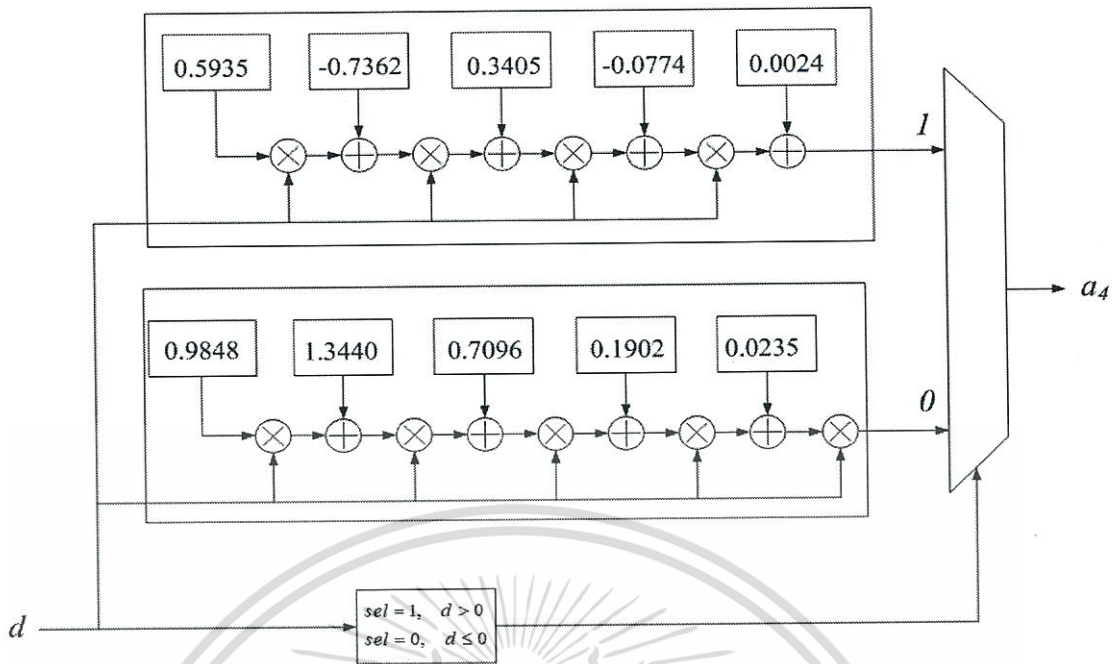


รูปที่ 3.13 โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 3 (a_3)

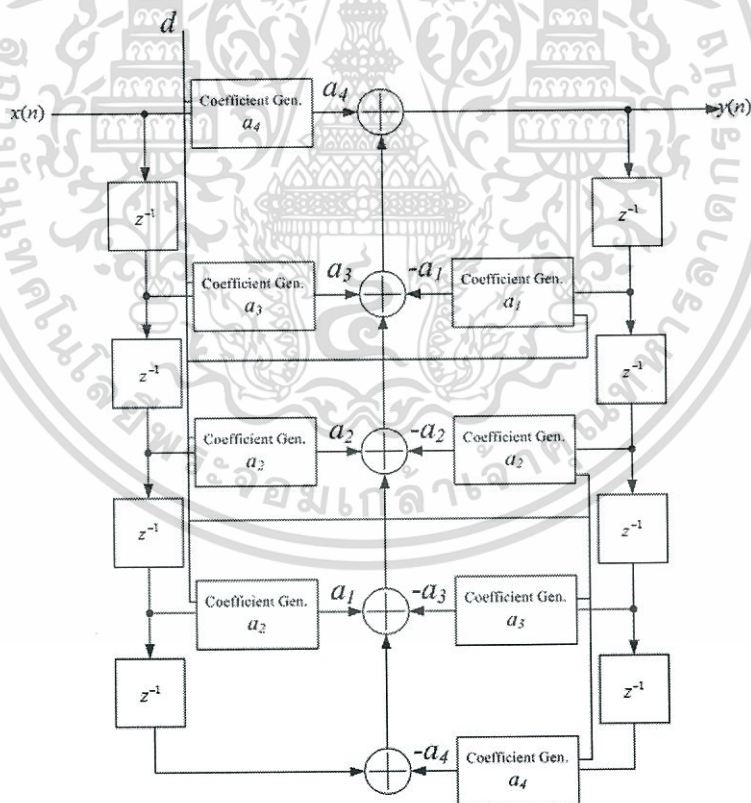
จากสมการที่ 3.9 จะได้โครงสร้างตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 4 (a_4) ได้ดังรูปที่

3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 โครงสร้างของตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองตัวที่ 4 (a_4)



รูปที่ 3.15 โครงสร้าง direct form I ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดซึ่งใช้ตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ที่ได้จากรูปที่ 3.11 ถึง 3.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 3.15 จะแสดงโครงสร้างโครงสร้างของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วง เป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้โดยใช้โครงสร้างแบบ direct form I โดยใช้ตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองตัวที่ 1-4 ที่ได้จากรูปที่ 3.11-3.14

จากรูปที่ 3.11 ถึง 3.14 ซึ่งแสดงถึงตัวกำเนิดสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณในแต่ละค่า ตั้งแต่ a_1 ถึง a_4 และรูปที่ 3.15 ที่แสดงโครงสร้างรวมของวงจรรองจะเห็นได้ว่าค่า d เป็นค่าตัวแปร ที่แยกออกมาและสามารถปรับค่าได้ ทำให้วงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่ออกแบบนั้น สามารถปรับค่าความหน่วงได้อย่างต่อเนื่อง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

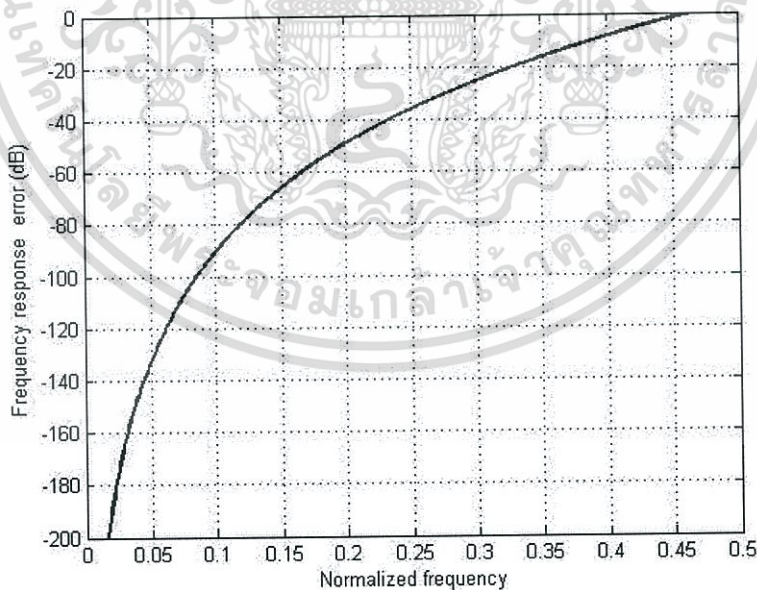
ผลการทดลองการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่า ความหน่วงเป็นเศษส่วน

จะทำการแสดงผลการทดลองจากวิธีการการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยวิธีการทางพันธุกรรมที่ได้นำเสนอไป รวมถึงการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการของไทริน วิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป และการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่สามารถปรับค่าได้จากการทำการทดลองการออกแบบวงจรกรองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยจะนำเสนอผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของไทริน และไทรินแบบตัดรูป

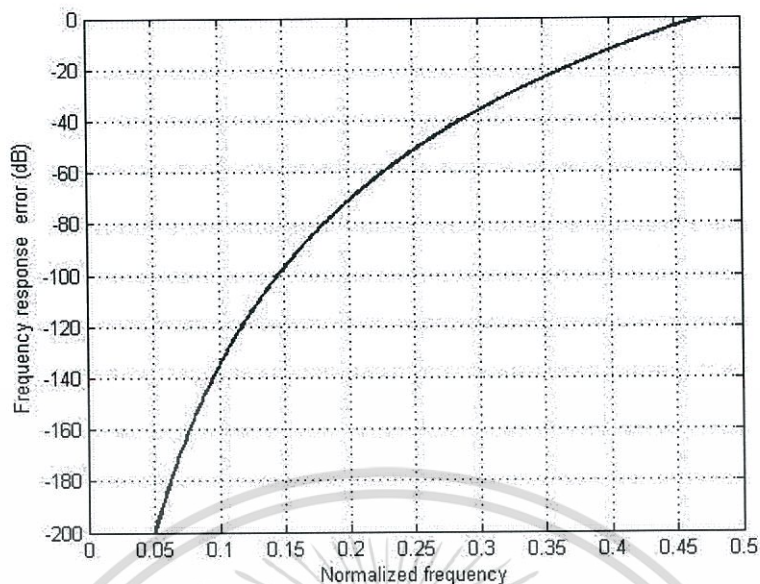
4.1.1 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของไทริน

โดยพิจารณาจากผลจากค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ และค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสซึ่งจะได้ผลดังนี้

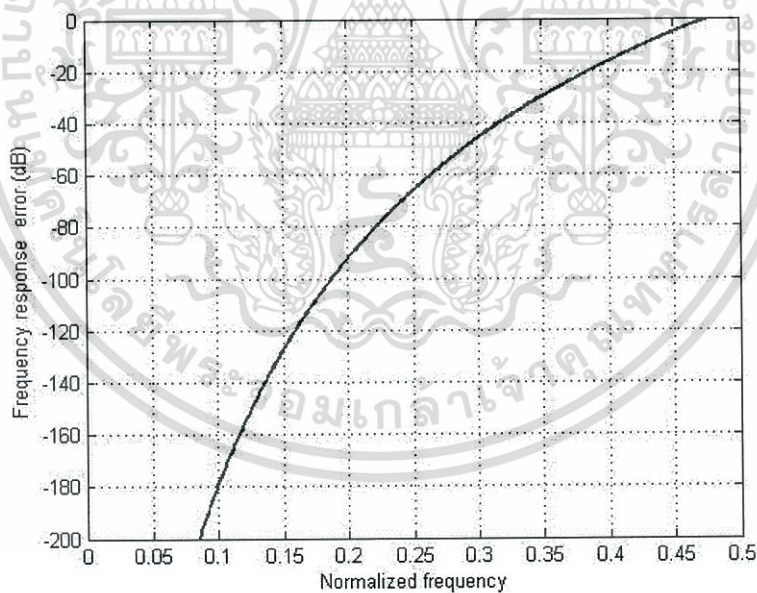


รูปที่ 4.1 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่า

ความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทริน

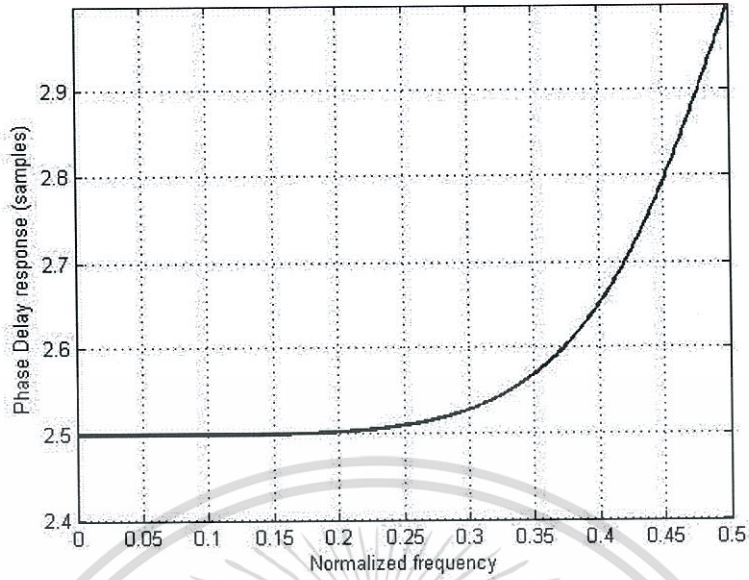


รูปที่ 4.2 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน

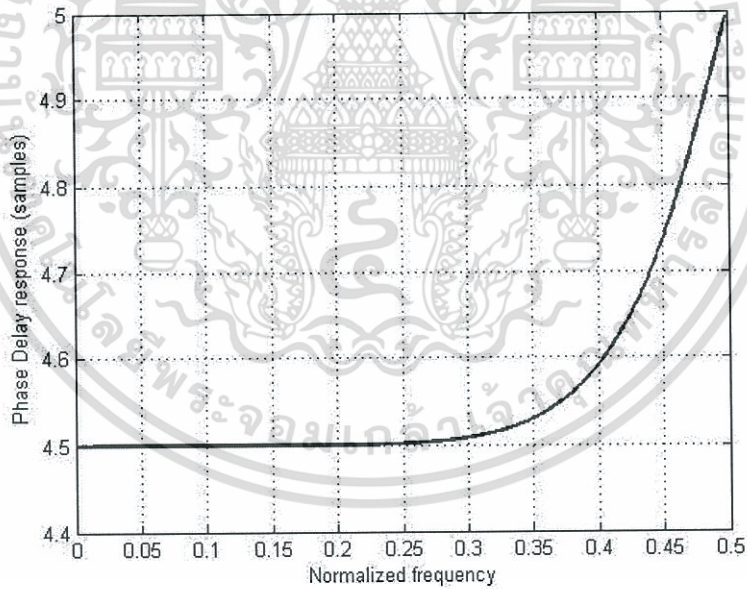


รูปที่ 4.3 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

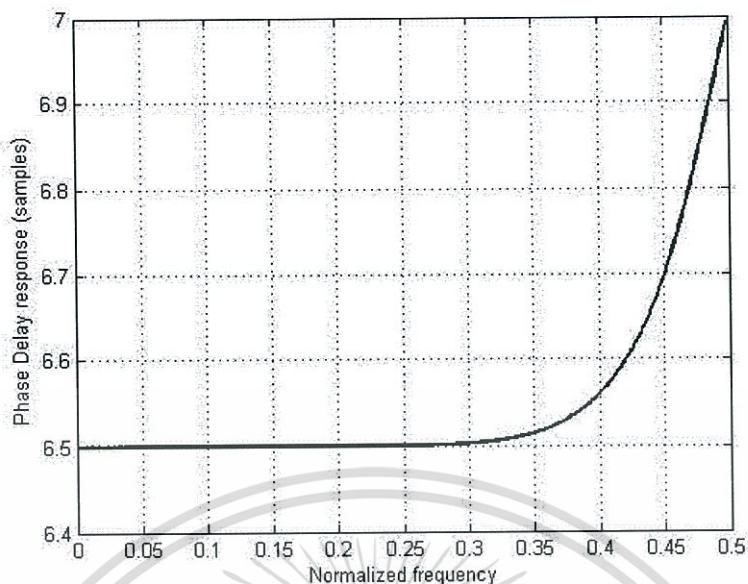


รูปที่ 4.4 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรน์



รูปที่ 4.5 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



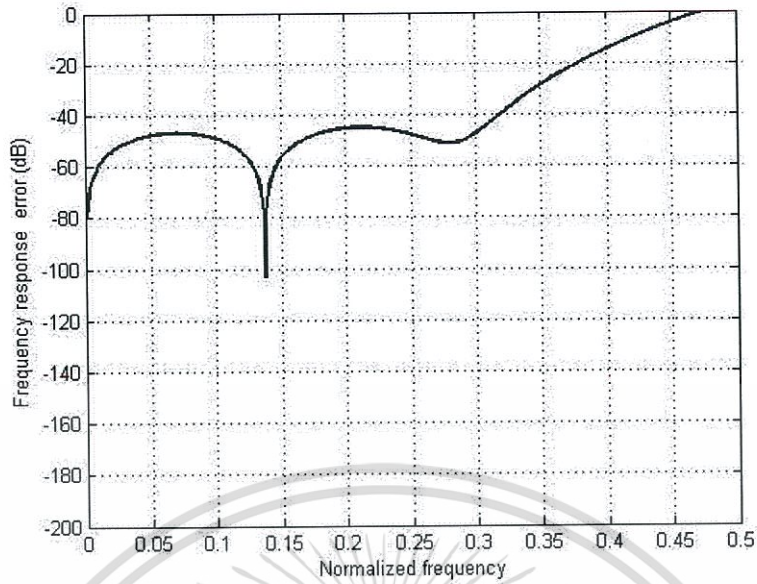
รูปที่ 4.6 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรัน

ผลการทดลองทางด้านค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่จากรูปที่ 4.1-4.3 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนมีค่าที่ต่ำมาก โดยไม่มีความผิดพลาดเลยในช่วงความถี่แรกๆ แต่จะเห็นได้ว่าเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วตามไปด้วย

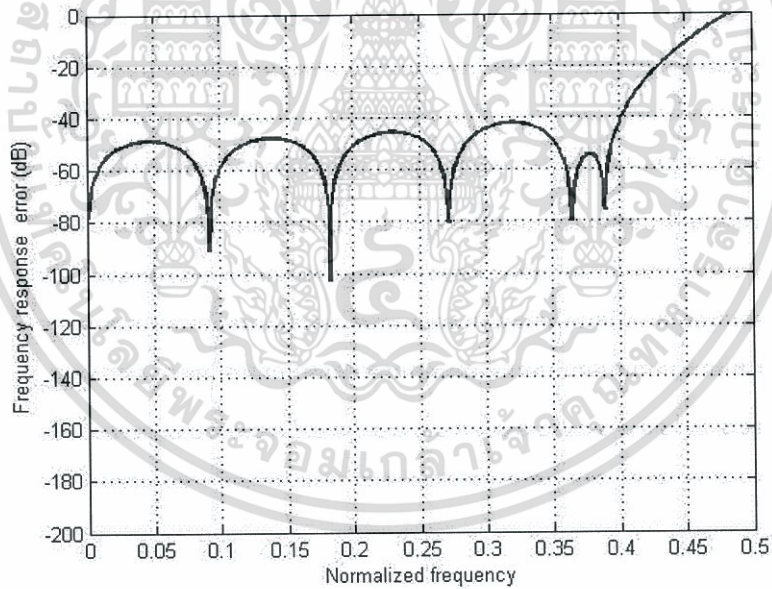
ส่วนผลการทดลองทางด้านค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสจากรูปที่ 4.4-4.6 นั้นก็เป็นไปในทางเดียวกัน โดยค่าผลตอบสนองที่ได้ในในช่วงของความถี่ช่วงแรกนั้นมีค่าความหน่วงที่ราบเรียบซึ่งเหมาะแก่การใช้งานแต่ช่วงของความถี่ที่ใช้งานได้นั้นมีช่วงที่แคบ และเมื่อเพิ่มอันดับของวงจรกรองให้มากขึ้นช่วงของความถี่ที่ใช้งานนั้นก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นไปด้วย

4.1.2 ผลการทดลองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการของไทรันแบบตัดรูป

โดยพิจารณาจากผลจากค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ และค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสซึ่งจะได้ผลดังนี้

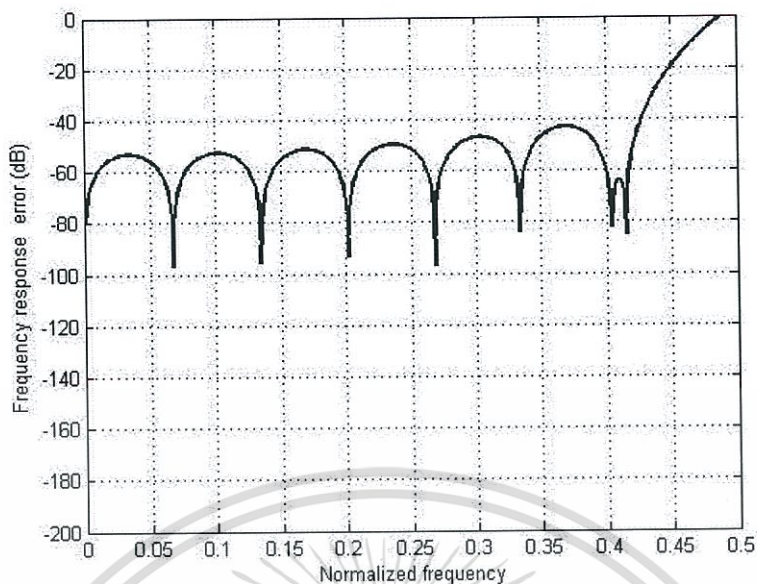


รูปที่ 4.7 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป

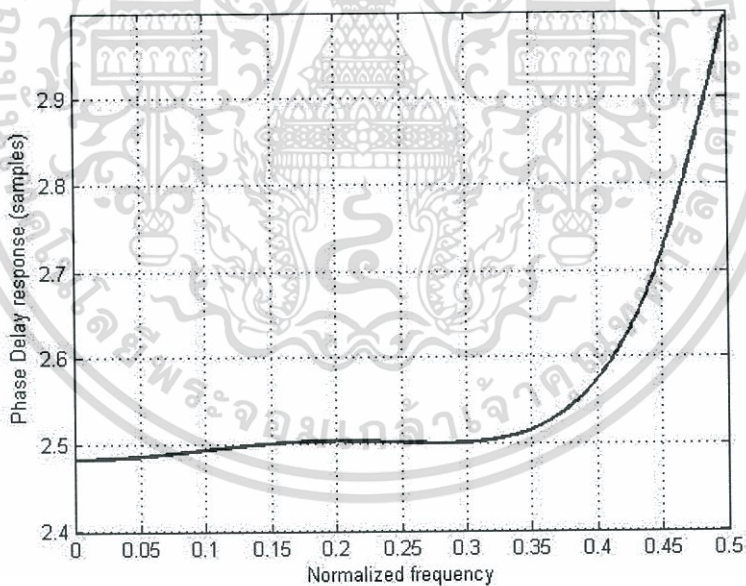


รูปที่ 4.8 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรินแบบตัดรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

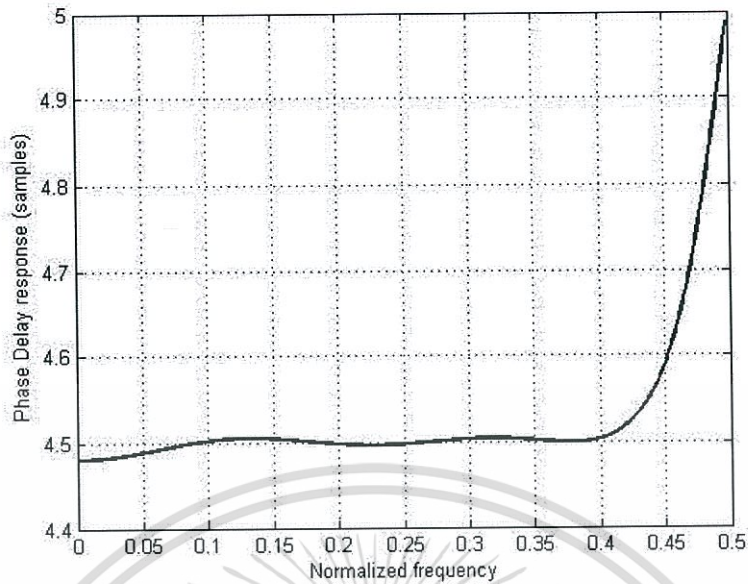


รูปที่ 4.9 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูป

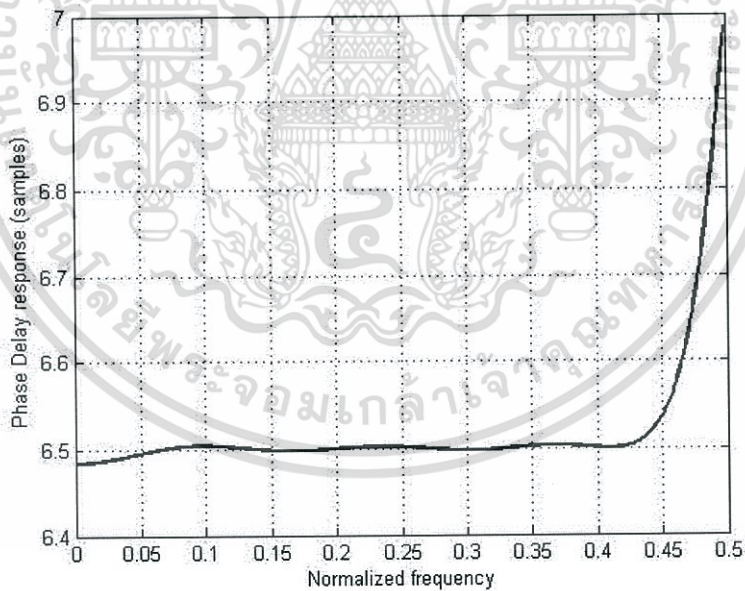


รูปที่ 4.10 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.11 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูป



รูปที่ 4.12 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

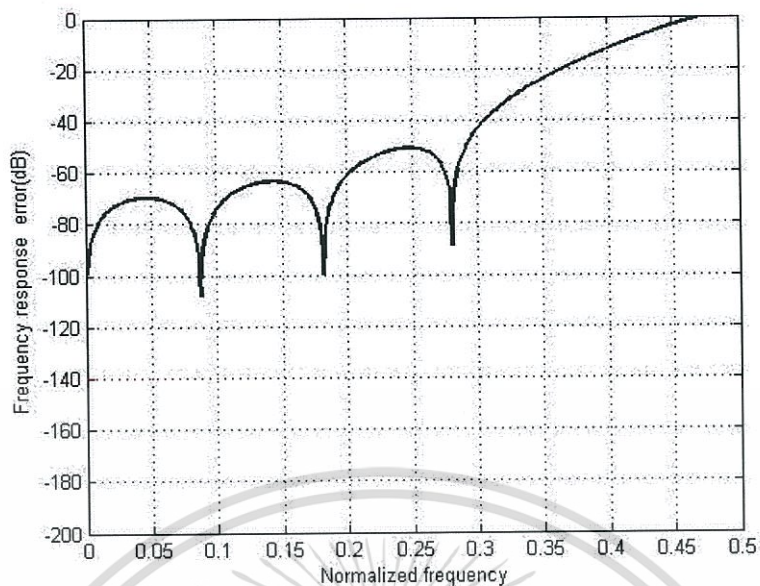
ผลการทดลองทางด้านค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ จากรูปที่ 4.7-4.9 แสดงให้เห็นว่า ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนนั้นที่ได้ นั้น มีค่าของช่วงความถี่ก่อนที่ค่าจะมีการเพิ่มอย่างรวดเร็วที่กว้างขึ้นกว่าวิธีการออกแบบของไทรัน แต่จะเห็นได้ว่าค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองความถี่ที่เกิดขึ้นนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ส่วนผลการทดลองทางด้านค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสจากรูปที่ 4.10-4.12 นั้นก็เป็นไปในทางเดียวกัน โดยค่าผลตอบสนองที่ได้ นั้นมีช่วงของความถี่ที่สามารถใช้งานได้กว้างขึ้นเมื่อเทียบวิธีการออกแบบของไทรัน แต่ค่าความหน่วงที่ได้ นั้นก็มีความผิดพลาดมากขึ้นตามไปด้วย

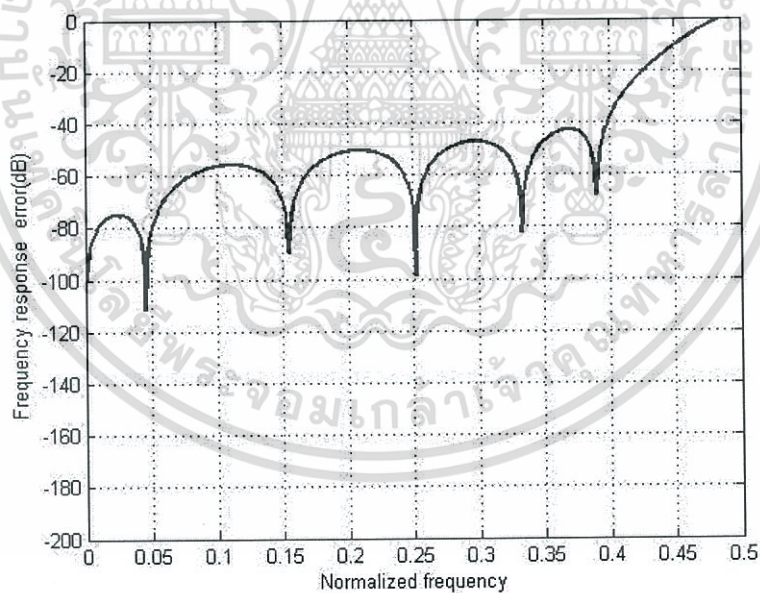
จากผลของค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่และผลการตอบสนองของการหน่วงเฟสที่ออกแบบด้วยวิธีการของไทรันและวิธีการของไทรันแบบตัดรูป ทั้ง 2 วิธีก็จะมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน ดังนั้นแนวทางในการปรับปรุงคุณสมบัติของวงจรกรองสัญญาณซึ่งเราจะใช้ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรมนั้นคือการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนเพื่อให้มีช่วงความถี่ในการใช้งานที่กว้างกว่าวิธีการของไทรัน และมีค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่น้อยกว่าวิธีการของไทรันแบบตัดรูป

4.2 ผลที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม

จากการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรมที่ได้นำเสนอ จะแสดงผลของค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่และผลการตอบสนองของการหน่วงเฟสได้ดังนี้

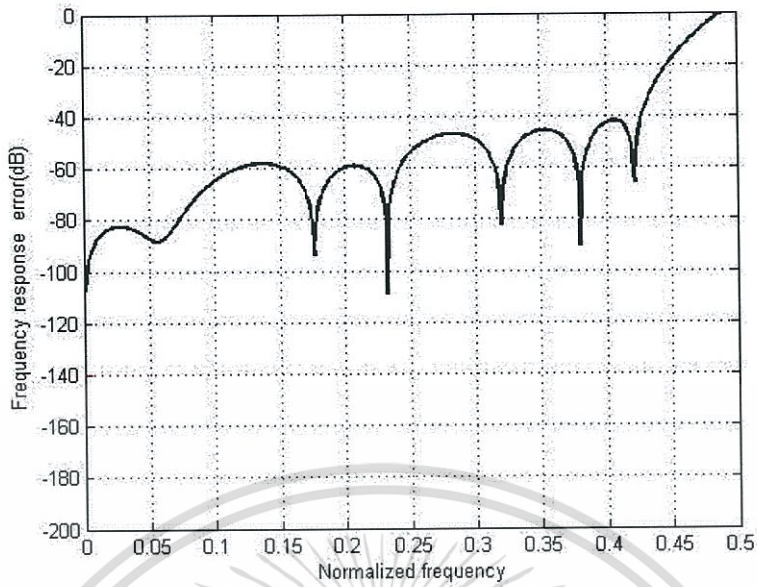


รูปที่ 4.13 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม

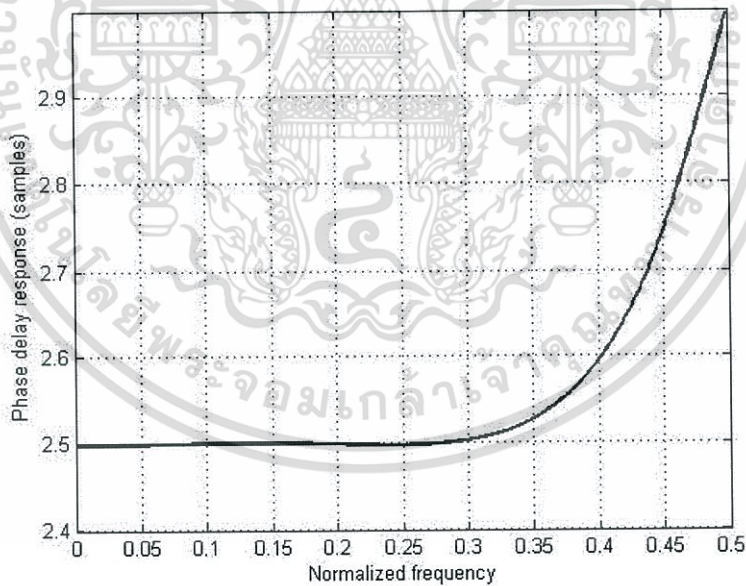


รูปที่ 4.14 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

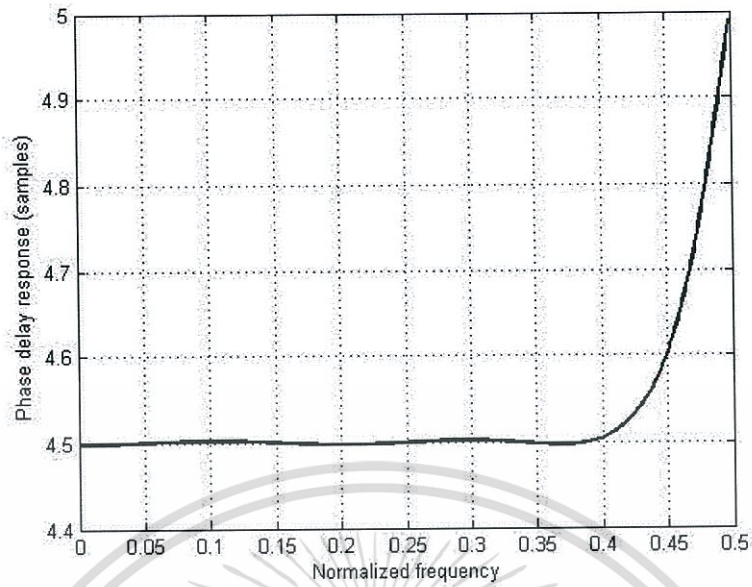


รูปที่ 4.15 ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม

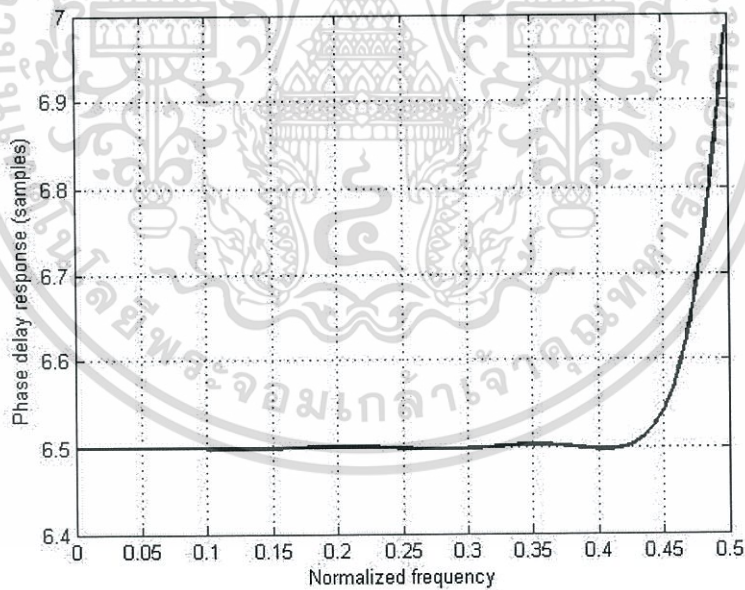


รูปที่ 4.16 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม



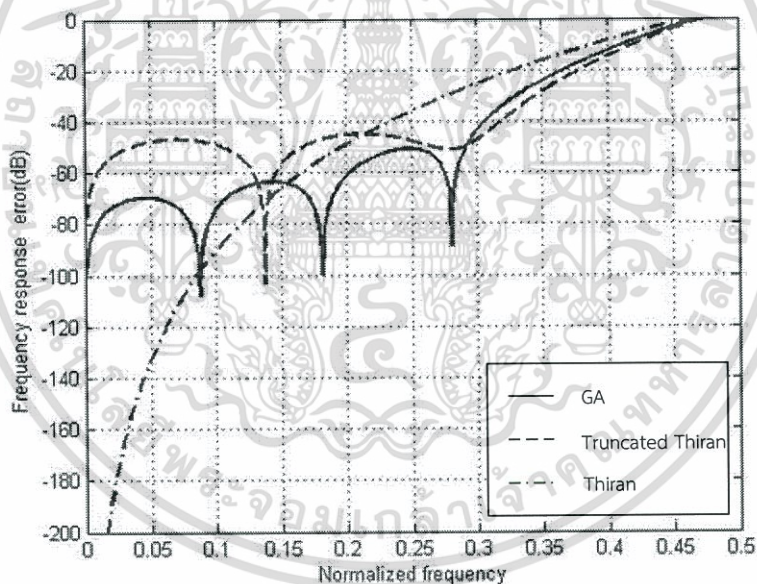
รูปที่ 4.18 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบทางพันธุกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

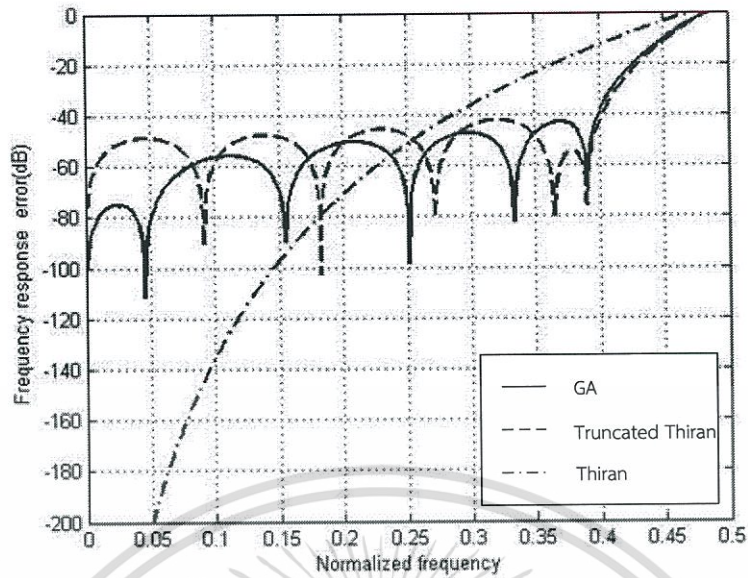
ผลการทดลองทางด้านค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ จากรูปที่ 4.13-4.15 แสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากวิธีการของไทรันแบบตัดรูป

ส่วนผลการทดลองทางด้านค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟส จากรูปที่ 4.16-4.18 จะแสดงว่าค่าความหน่วงเฟสจากการออกแบบวงจรรองด้วยวิธีการทางพันธุกรรมนั้นมีช่วงของความถี่ที่สามารถหน่วงได้กว้างกว่าการออกแบบด้วยวิธีการของไทรัน และหากพิจารณาถึงความผิดพลาดของความหน่วงในช่วงความถี่เดียวกันแล้วก็มีค่าความผิดพลาดที่น้อยกว่าวิธีการออกแบบของไทรันแบบตัดรูปอีกด้วย

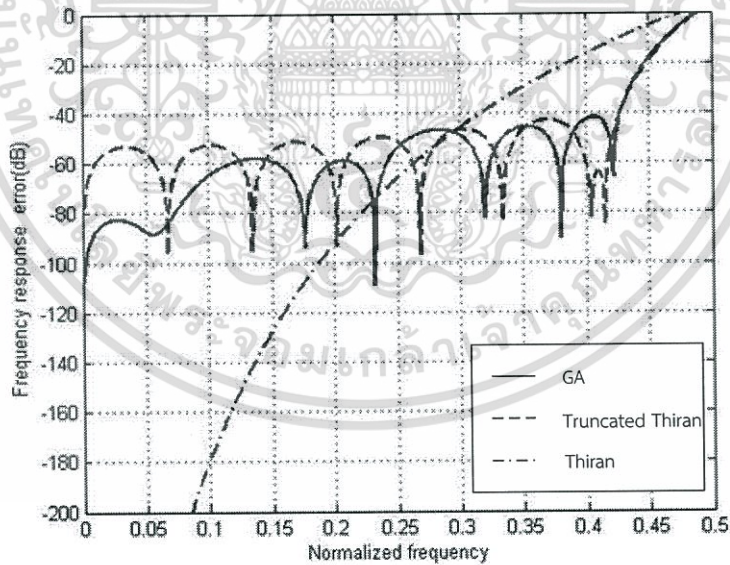
โดยการเปรียบเทียบทางด้านค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่และทางด้านผลตอบสนองของการหน่วงเฟส จะแสดงให้เห็นชัดเจนยิ่งขึ้นในรูปที่ 4.19-4.24 โดยจะแสดงการเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่และเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสจากวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนโดยใช้การออกแบบ 3 วิธี คือ วิธีการของไทรัน วิธีการของไทรันแบบตัดรูป และวิธีการทางพันธุกรรม ดังนี้



รูปที่ 4.19 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทรัน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรันแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)

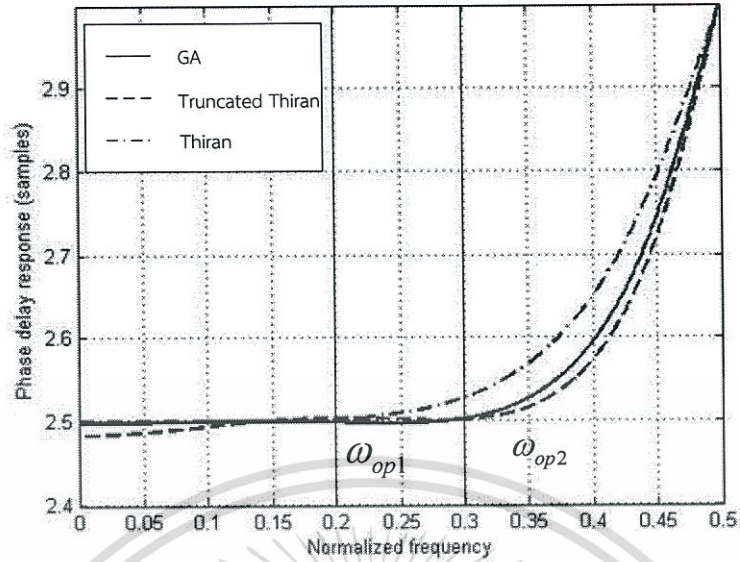


รูปที่ 4.20 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทราน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรานแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)

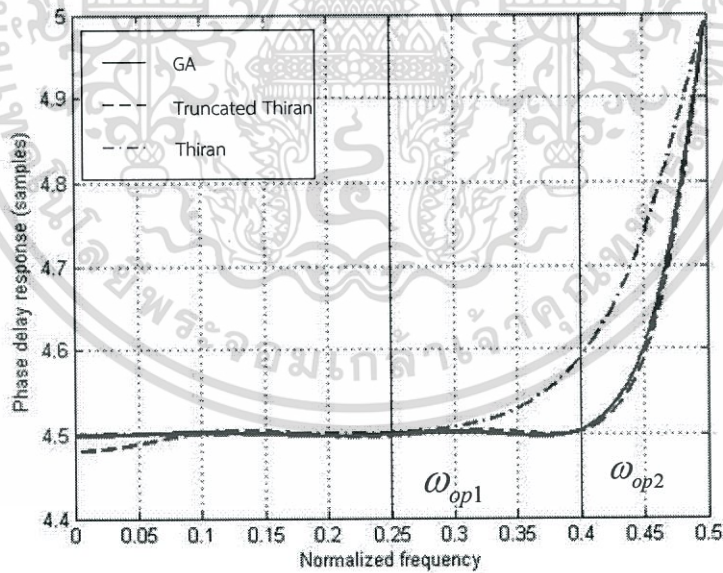


รูปที่ 4.21 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทราน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรานแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

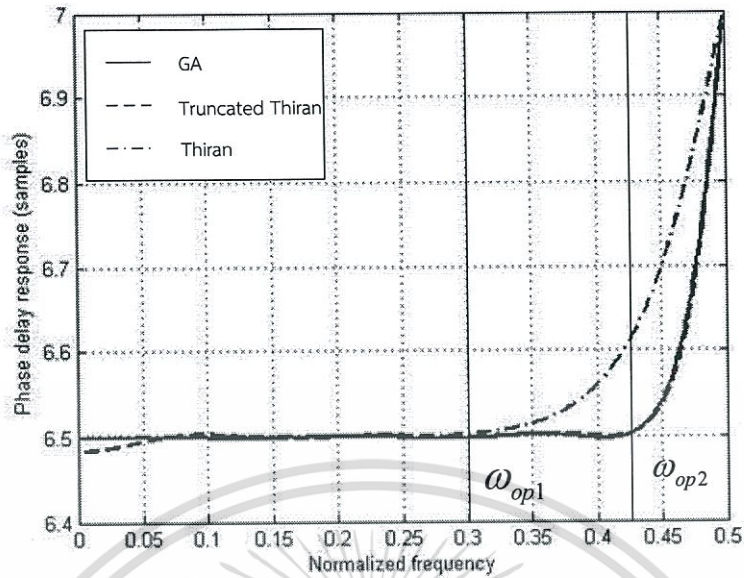


รูปที่ 4.22 การเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทรน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรนแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)



รูปที่ 4.23 การเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทรน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรนแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 การเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 7 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรม (เส้นทึบ)

จากรูปที่ 4.21-4.23 จะแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณที่ออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมนั้นเมื่อเทียบกับวิธีการของไทรินแบบตัดรูปในช่วงของความถี่ที่เท่ากันจะมีค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่น้อยกว่า และเมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.22-4.24 จะเห็นได้ว่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสนั้นที่ออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม และวิธีการของไทรินแบบตัดรูปนั้น มีช่วงความถี่ที่กว้างกว่าการออกแบบด้วยวิธีการของไทริน (แสดงจากเส้นของ ω_{op1} ที่เป็นของวิธีการของไทรินเปรียบเทียบกับ ω_{op2} ที่เป็นของวิธีการทางพันธุกรรมและวิธีการของไทรินแบบตัดรูป ในรูปที่ 4.22-4.24)

จากคุณสมบัติของวงจรกรองที่ใช้ในการประเมินคุณภาพของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ได้กล่าวไปทั้งสองค่า คือค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่และค่าความหน่วงเฟส ที่ได้ทำการทดลองกับวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 3 5 และ 7 จะนำมาสรุปได้ดังตารางที่ 4.1-4.2

ตารางที่ 4.1 ช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ ($0 - \omega_{op}$)

วงจรรอง	วิธีของไทริน	วิธีของไทรินแบบตัดรูป	วิธีการทางพันธุกรรม
อันดับที่ 3	$0-0.2\pi$	$0-0.3\pi$	$0-0.3\pi$
อันดับที่ 5	$0-0.25\pi$	$0-0.4\pi$	$0-0.4\pi$
อันดับที่ 7	$0-0.3\pi$	$0-0.425\pi$	$0-0.425\pi$

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ในช่วงความถี่ของวิธีการของไทรินแบบตัดรูปและวิธีการทางพันธุกรรมในตารางที่ 4.1

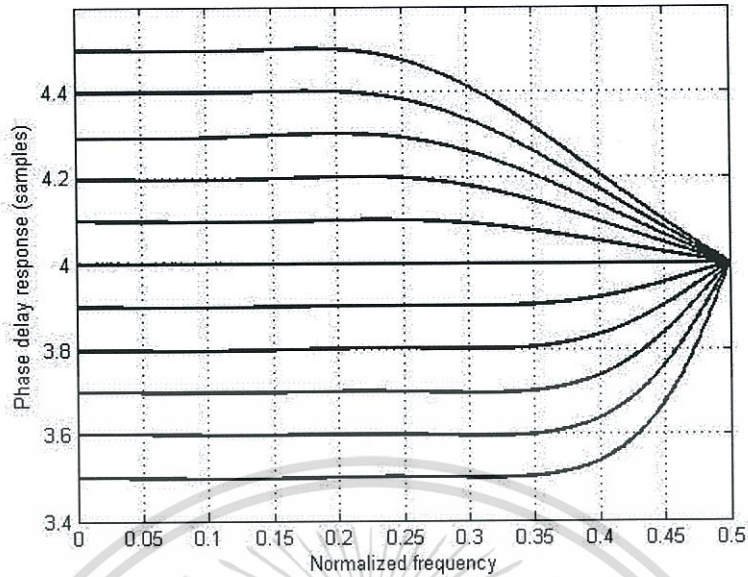
วงจรรอง	วิธีของไทริน	วิธีของไทรินแบบตัดรูป	วิธีการทางพันธุกรรม
อันดับที่ 3	-43.2768dB	-49.2924dB	-60.7237dB
อันดับที่ 5	-33.3400dB	-49.9789dB	-53.8457dB
อันดับที่ 7	-32.6168dB	-52.7233dB	-54.3845dB

ตารางที่ 4.1 จะแสดงให้เห็นถึงช่วงของความถี่ที่สามารถใช้งานค่าความหน่วงเฟสที่ต้องการได้ ซึ่งการออกแบบด้วยวิธีการของไทรินแบบตัดรูป และวิธีการทางพันธุกรรมนั้นมีช่วงของความถี่ที่กว้างกว่าวิธีการของไทริน

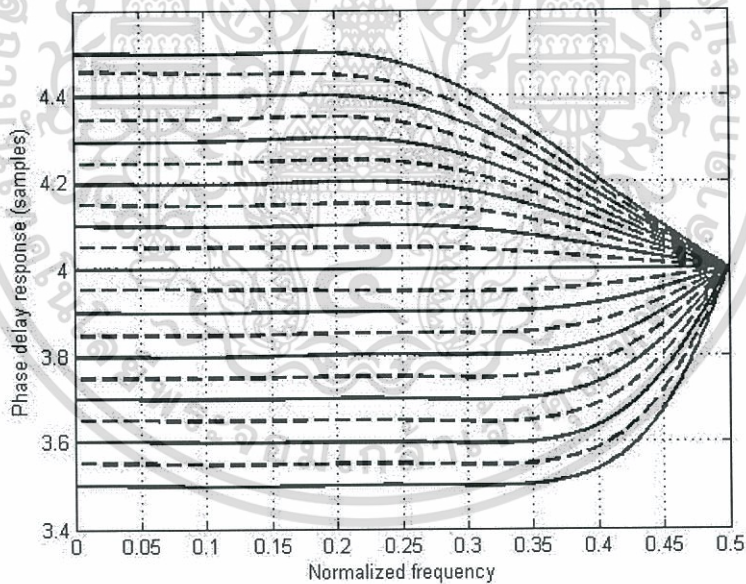
ตารางที่ 4.2 จะแสดงให้เห็นถึงผลเฉลี่ยของค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ในช่วงของความถี่ที่ได้จากตารางที่ 4.1 ของการออกแบบด้วยวิธีการของไทรินแบบตัดรูป และวิธีการทางพันธุกรรมที่มีช่วงของความถี่เท่ากัน การออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมจะให้ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ดีกว่าวิธีการของไทรินแบบตัดรูป

4.3 ผลการทดลองการออกแบบวงจรรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าความหน่วงได้

จะทำการทดลองโดยใช้โครงสร้างที่ได้จากการออกแบบในบทที่ 3 รูปที่ 3.11-3.15 ซึ่งนำสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมที่ค่าความหน่วงตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยแต่ละช่วงของค่าความหน่วงห่างกันช่วงละ 0.1 มาใช้ในการออกแบบโครงสร้าง นำมาปรับค่าความหน่วง (d) และแสดงค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในช่วงความหน่วงต่างๆ ซึ่งจะได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองของการหน่วงเฟสของวงจรกรองผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้ที่ค่า d มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยช่วงความหน่วงแต่ละช่วงต่างกันเท่ากับ 0.1



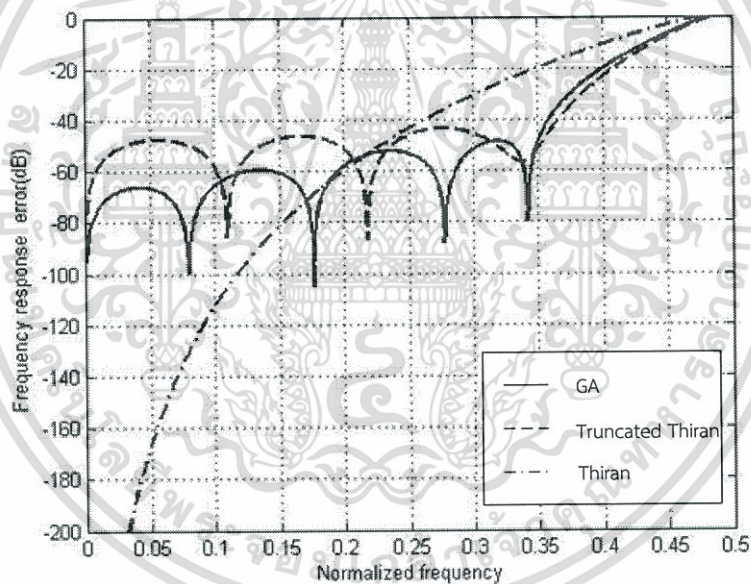
รูปที่ 4.26 ผลตอบสนองของการหน่วงเฟสของวงจรกรองผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้ที่ค่า d มีค่าตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยช่วงความหน่วงแต่ละช่วงต่างกันเท่ากับ 0.05

จากผลตอบสนองของการหน่วงเฟสที่แสดงในรูปที่ 4.25 แสดงให้เห็นถึงการนำวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้มาหาผลตอบสนองของการหน่วงเฟส

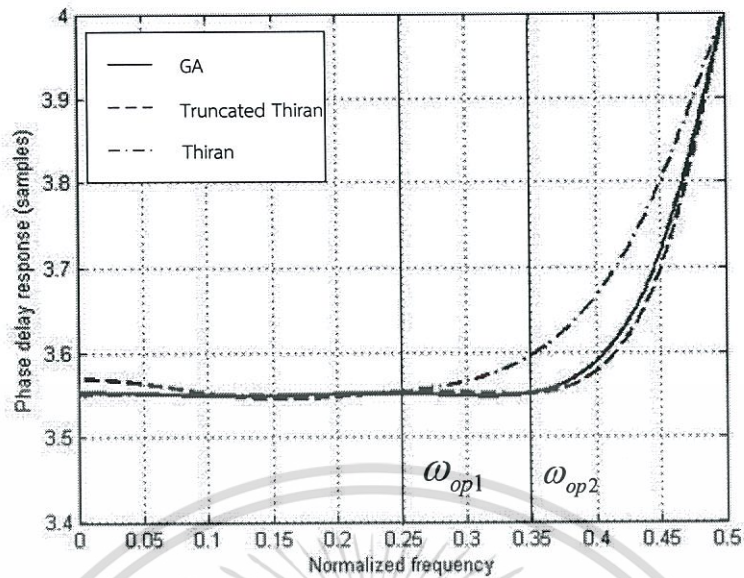
ในช่วงค่าความหน่วงเดียวกับค่าที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้าง คือ ค่าความหน่วง 11 ค่า ตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยมีช่วงของความหน่วงแต่ละค่าเท่ากับ 0.1 ซึ่งยังสามารถให้ผลตอบสนองของการหน่วงเฟสได้ตามค่าความหน่วงที่ต้องการได้

จากนั้นจึงนำวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้มาใช้ในการหาค่าผลตอบสนองของความหน่วงเฟสค่าอื่นๆ โดยในรูปที่ 4.26 จะแสดงค่าผลตอบสนองของความหน่วงเฟส ที่มีค่าความหน่วง 21 ค่า ตั้งแต่ -0.5 ถึง 0.5 โดยมีช่วงของความหน่วงแต่ละค่าเท่ากับ 0.05 ซึ่งมีค่าความหน่วงที่ไม่ได้มีค่าเท่ากับค่าที่ใช้ในการออกแบบรวมอยู่ด้วย (แสดงด้วยเส้นประ) ซึ่งหมายความว่าวงจรกรองสัญญาณที่ออกแบบนั้นสามารถให้ค่าผลตอบสนองของความหน่วงเฟสนอกเหนือจากค่าความหน่วงที่ใช้ในการออกแบบได้

จากนั้นทำการเปรียบเทียบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนแบบปรับค่าได้ที่ออกแบบด้วยวิธีการที่นำเสนอ เปรียบเทียบกับวิธีการของไทรันและวิธีการของไทรันแบบตัดรูป จะได้ผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.27 การเปรียบเทียบค่าความผิดพลาดผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 4 เมื่อ $d = -0.45$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทรัน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรันแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรมที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้ (เส้นทึบ)

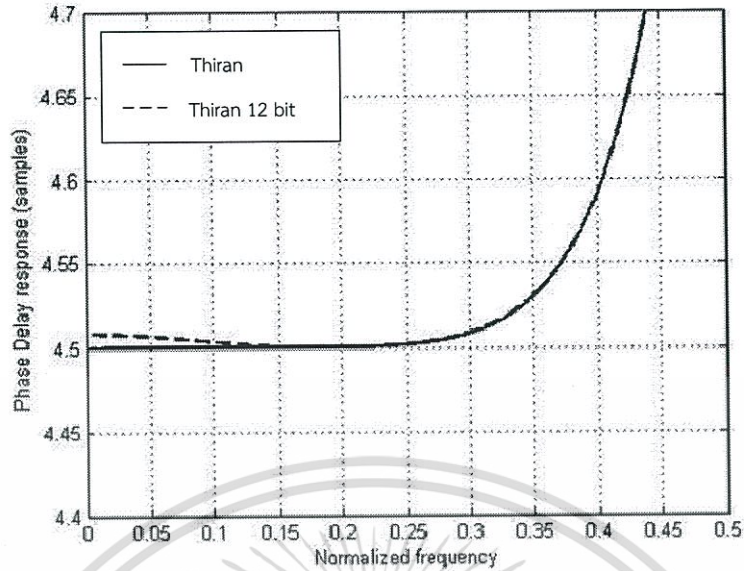


รูปที่ 4.28 การเปรียบเทียบค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 4 เมื่อ $d = -0.45$ ด้วยวิธีการออกแบบ 3 วิธี วิธีการของไทริน (เส้นประมีจุด) วิธีการของไทรินแบบตัดรูป (เส้นประ) วิธีการทางพันธุกรรมที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้ (เส้นทึบ)

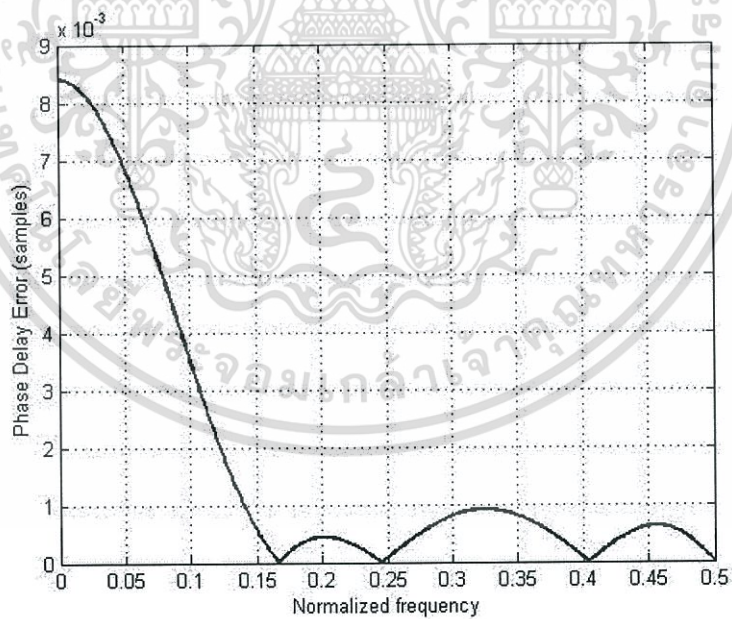
จากรูปที่ 4.27-4.28 จะแสดงให้เห็นถึงค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่และค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟส ที่ได้จากวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ปรับค่าได้ จะสังเกตเห็นว่าแม้ค่าความหน่วงที่มีค่า 0.45 ที่ไม่ได้ใช้ในการออกแบบ ผลลัพธ์ที่ได้จากวิธีการทางพันธุกรรมนั้นก็ยังมีช่วงความถี่ในการหน่วงที่กว้างกว่าการออกแบบด้วยวิธีการของไทริน และมีค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่ที่ดีกว่าวิธีการของไทรินแบบตัดรูปที่มีช่วงความถี่เท่ากัน

ข้อดีอีกอย่างของการนำวิธีการทางพันธุกรรมมาใช้ นั่นก็คือ จะมีความง่ายต่อการนำไปออกแบบบนฮาร์ดแวร์ เนื่องจากการใช้งานรูปแบบข้อมูลของวิธีการทางพันธุกรรมเป็นรูปแบบของเลขฐานสอง ซึ่งสามารถกำหนดจำนวนบิตในการออกแบบได้เลยทำให้ไม่เกิดความผิดพลาดของการควอนไทซ์ ซึ่งต่างจากการออกแบบด้วยวิธีการอื่นซึ่งจะใช้รูปแบบของการออกแบบเป็นเลขฐานสิบเมื่อทำการแปลงสัญญาณจากสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อกก็อาจจะทำให้เกิดค่าความผิดพลาดของการควอนไทซ์ขึ้น โดยจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.29-4.32

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

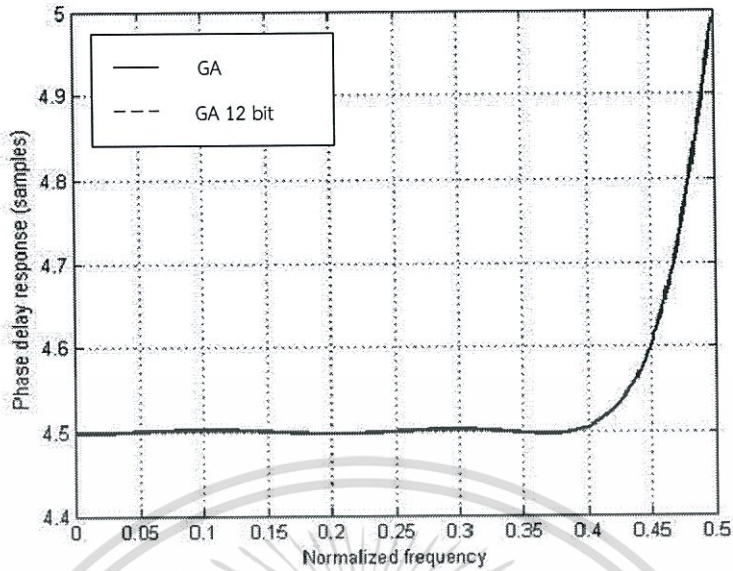


รูปที่ 4.29 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ที่ออกแบบด้วยวิธีของไทรินซึ่งไม่ถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ (เส้นทึบ) และวิธีการของไทรินซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต (เส้นประ)

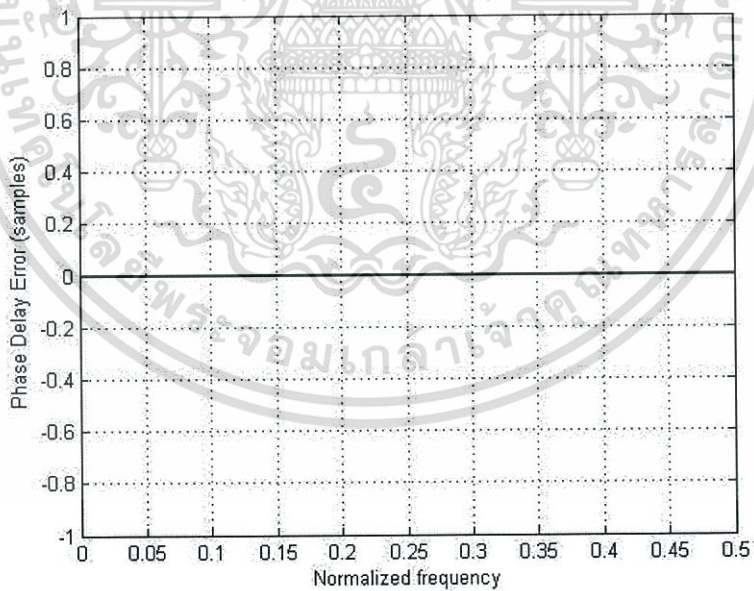


รูปที่ 4.30 ค่าความผิดพลาดของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีของไทรินซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต เปรียบเทียบกับการไม่จำกัดบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.31 ค่าผลตอบสนองของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ที่ออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งไม่ถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ (เส้นทึบ) และวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต (เส้นประ)



รูปที่ 4.32 ค่าความผิดพลาดของการหน่วงเฟสในวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนลำดับที่ 5 เมื่อ $d = -0.5$ ด้วยวิธีการทางพันธุกรรมซึ่งถูกจำกัดบิตของสัมประสิทธิ์ที่ 12 บิต เปรียบเทียบกับการไม่จำกัดบิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าค่าผลตอบสนองของการห้วงเฟสในรูปที่ 4.29 วงจรกรองสัญญาณออกแบบด้วยวิธีการของไทริน มีค่าผลตอบสนองของการห้วงเฟสที่แตกต่างกันระหว่างการออกแบบซึ่งถูกจำกัดบิตกับการออกแบบที่ไม่ถูกจำกัดบิต และรูปที่ 4.30 แสดงถึงค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองของการห้วงเฟสที่เกิดขึ้นจากการออกแบบด้วยวิธีการของไทรินแบบจำกัดบิตและการออกแบบที่ไม่ถูกจำกัดบิต แต่เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.31-4.32 จากการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมจะเห็นว่า ไม่มีความแตกต่างกันของผลตอบสนองของการห้วงเฟสเกิดขึ้น เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการออกแบบที่ถูกจำกัดบิตและไม่จำกัดบิต เนื่องจากสามารถกำหนดรูปแบบของโครโมโซมที่อยู่ในเลขฐานสองให้มีขนาดเท่ากับขนาดที่ใช้ในการออกแบบจริงได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผล

5.1 สรุปผล

วิทยานิพนธ์นี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ใช้การออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรม โดยทำการแทนค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่ต้องการออกแบบให้เป็นค่าโครโมโซมภายในกระบวนการเพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับค่าความหน่วงของวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่ต้องการ โดยใช้ค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่เพื่อเป็นเงื่อนไขที่ใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมภายในกระบวนการทางพันธุกรรม และจากการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้ จะแสดงให้เห็นว่าช่วงของความถี่ที่มีค่าความหน่วงที่ต้องการนั้นเพิ่มมากขึ้นกว่าวงจรถูกออกแบบผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ออกแบบด้วยวิธีการของไทรินที่วงจรถูกออกแบบอันดับเดียวกัน รวมถึงค่าความผิดพลาดของผลตอบสนองทางความถี่นั้นก็มิต่ำกว่าวงจรถูกออกแบบผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนซึ่งออกแบบด้วยวิธีการของไทรินแบบตัดรูปที่ออกแบบมาเพื่อใช้ในวงกว้างของความถี่เท่ากัน อีกทั้งยังทำให้เกิดข้อดีในการออกแบบเพื่อการประยุกต์ใช้ทางด้านฮาร์ดแวร์ เพราะเนื่องจากรูปแบบของโครโมโซมภายในกระบวนการทางพันธุกรรมมีรูปแบบของข้อมูลเป็นเลขฐานสองจึงทำให้สามารถออกแบบค่าที่เหมาะสมโดยกำหนดขนาดของเลขจำนวนบิตที่ต้องการใช้ในการประยุกต์ใช้ด้านฮาร์ดแวร์ ทำให้ไม่เกิดการผิดพลาดของการควอนไทซ์ขึ้นเมื่อนำไปออกแบบ อีกทั้งในวิทยานิพนธ์นี้ยังนำเสนอวิธีการออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่สามารถปรับค่าความหน่วงได้ โดยใช้การหาสมการพหุนามที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณและค่าความหน่วงในช่วงที่ต้องการออกแบบ เพื่อออกแบบโครงสร้างที่จะทำให้สามารถใช้ค่าความหน่วงเป็นตัวแปรในการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงตามที่ต้องการ ทำให้วงจรถูกออกแบบที่ได้นั้นสามารถปรับค่าความหน่วงได้อย่างต่อเนื่อง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบวงจรกรองสัญญาณผ่านตลอดที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนด้วยวิธีการทางพันธุกรรมนั้นยังสามารถพัฒนาต่อโดยใช้วิธีหรือกระบวนการอื่นในการหาค่าตอบหรืออาจจะมีการนำ

คำคำตอบจากระบวนการอื่นมาใช้เพื่อเป็นประชากรเริ่มต้นในกระบวนการออกแบบด้วยวิธีการทางพันธุกรรมเพื่อให้เกิดความเฉพาะเจาะจงของคำตอบมากขึ้น และยังสามารถพัฒนาการใช้กระบวนการทางพันธุกรรมซึ่งมีความยืดหยุ่นในการแก้ปัญหาต่างๆ ไปใช้กับการออกแบบวงจรกรองสัญญาณที่มีค่าความหน่วงเป็นเศษส่วนที่ใช้ชนิดของวงจรกรองอื่นๆได้เช่นกัน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. I. Laakso, V. Valimaki, M. Karjalainen, and U. K. Laine, "Splitting the unit delay: Tools for fractional delay filter design," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 13, no. 1, pp. 30–60, Jan. 1996.
- [2] V. Valimaki, "Simple design of fractional delay allpass filters," *Proceedings of X (tenth) European Signal Processing Conference (EUSIPCO'00)*, vol. 4, pp. 1881-1884, Finland, Sept. 5-8, 2000.
- [3] M. Nagahara and Y. Yamamoto, "Optimal design of fractional delay filters," *IEEE Conference on Decision and Control*, vol. 6, pp. 6539-6544, Dec. 9-12, 2003.
- [4] V. Valimaki and T. I. Laakso, "Fractional delay digital filters," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, vol. 1, pp. 355-359, May. 3-6, 1993.
- [5] J. P. Thiran, "Recursive digital filters with maximally flat group delay," *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, no. 6, pp. 659–664, 1971.
- [6] S. K. Mitra, *Digital signal processing a computer-based approach*, Third edition International Edition, McGraw- Hill, 2006.
- [7] A. Antoniou, *Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters*, McGraw-Hill, 2005.
- [8] M. Lang, "Allpass Filter Design and Applications," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, no. 9, pp 2505-2514, 1998.
- [9] T.-B. Deng, S Chivapreecha and K. Dejhan, "Weighted least-squares design of variable recursive digital filters with guaranteed stability," *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, pp 360-363, Sept. 4-6, 2013.
- [10] M. Oner, "A genetic algorithm for optimization of linear phase FIR filter coefficients," *Proceedings of the Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, vol. 2, pp. 1397-1400, Nov. 1-4, 1998.
- [11] A. Lee, M. Ahmadi, G.A. Jullien, W.C. Miller, and R.S. Lashkari, "Digital filter design using genetic algorithm," *IEEE symposium on Advances in digital filtering and signal processing*, pp. 34-38, 1998.
- [12] K. S. Tang, K. F. Man, S. A. Wong and Q. He, "Genetic Algorithms and their Applications," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 22 - 37, Nov. 1996.

- [13] L. Xue; Z. Rongchun and W. Qing, "Optimizing the design of IIR filter via genetic algorithm," **Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing**, vol.1, pp.476-479, Dec. 14-17, 2003.
- [14] D. Suckley, "Genetic algorithm in the design of FIR filters," **IEE Proceedings G on Circuits, Devices and Systems**, vol.138, no.2, pp.234-238, Apr. 1991.
- [15] M. Haseyama and H. Kitajima, "A filter-coefficient quantization method with genetic algorithm," **IEEE International Symposium on Circuits and Systems**, vol.3, pp.399-402, Jul. 1999.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายณัฐวุฒิ หอชัยรัตน์
 วัน เดือน ปีเกิด 2 กันยายน พ.ศ. 2530
 ที่อยู่ 99/884 หมู่บ้านพิศาลโครงการ 6 ซอย 1 แขวงสามตำ
 เขตบางขุนเทียน กรุงเทพฯ

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2552 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประสบการณ์การทำงานและการวิจัย

พ.ศ.2555 นำเสนอผลงาน “Design of Fractional Delay Allpass Filter Using Genetic Algorithm” ในการประชุม 2012 International Workshop on Smart Info-Media Systems in Asia (SISA 2012)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้