



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

เรื่อง การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างแบบไมโครสตริป โดยใช้ขั้นตอนวิธี
เชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

โดย นายสุภชัย ชมภูนุช

ได้รับอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(อาจารย์ ดร.มงคล หวังสถิตย์วงศ์)

21 พฤษภาคม 2550

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ณชด ไชยรัตน์)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ เวช วิเวก)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย นพนาถิพงษ์)

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม
แบบหลายจุดประสงค์

นายศุภชัย ชมบุญช

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ชื่อ : นายสุภชัย ชมภูษ
ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์
สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า
: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ : รองศาสตราจารย์ ดร.ฉชล ไชยรัตนะ
รองศาสตราจารย์เวช วิเวก
ปีการศึกษา : 2549

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้แสดงการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์เปรียบเทียบกับกรออกแบบโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ความถี่ที่ใช้งานคือ 2.45 GHz ISM Band ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในเครือข่ายท้องถิ่นไร้สาย โดยให้มีความกว้างของแบนด์วิดท์ 2.4GHz - 2.5GHz โดยวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากคุณสมบัติเด่นหลายประการคือ น้ำหนักเบา ขนาดเล็ก ไม่ต้านลม คัดโค้งให้ติดตั้งบนพื้นผิวรูปโค้งได้ ผลิตเป็นจำนวนมากได้ง่าย และสร้างร่วมกับวงจรรวมไมโครเวฟได้ ในการออกแบบนี้ได้กำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ 2 จุดประสงค์ โดยฟังก์ชันจุดประสงค์แรกกำหนดให้เป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก และฟังก์ชันจุดประสงค์ที่สองคือกำหนดให้เป็นค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ และตัวแปรตัดสินใจ คือความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ จากผลการออกแบบที่ได้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์นั้นได้ค่าที่ดีกว่าการออกแบบโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

(วิทยานิพนธ์มีจำนวนทั้งสิ้น 52 หน้า)

คำสำคัญ : การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม วงจรกรอง

ณเด 765555

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

Name : Mr. Supachai Chompoonuch
Thesis Title : Design of Microstrip Bandpass Filter Using a Multi-objective
Major Field : Electrical Engineering
King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok
Thesis Advisors : Associate Professor Dr.Nachol Chaiyaratana
Associate Professor Vech Vivek
Academic Year : 2006

Abstract

This thesis presents a methodology for micro-strip broadband filter design using genetic algorithms. The use of a co-operative co-evolutionary multi-objective genetic algorithm and a multi-objective genetic algorithm is proposed. The interested frequency is 2.45 GHz, which is fallen into the ISM band. This frequency is suitable for use in a wireless LAN network with bandwidth 2.4-2.5 GHz. This work is motivated by the fact that microstrip broadband filters possess many excellent properties including light weight, small size, low wind-resistance, conformability to planar and non-planar surfaces, ease in manufacturing and suitability for microwave circuit integration. During the design process, two objectives are considered: insertion loss and return loss. The decision variables in this case are the width and the length of the transmission line. The results indicate that the performance of the co-operative co-evolutionary multi-objective genetic algorithm is higher than that of the multi-objective genetic algorithm.

(Total 52 pages)

Keywords : Multi-objective Optimization, Genetic Algorithm, Filter

Nachol Chaiyaratana

Advisor

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ ดร.ฉชล ไชยรัตนะ และ รองศาสตราจารย์ เวช วิเวก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ ข้อคิดเห็น และแนวทางแก้ไขต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์นี้มาโดยตลอด และสุดท้ายขอขอบคุณพี่ ๆ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัจฉริยะที่ให้กำลังใจและ คอยช่วยเหลือสิ่งต่าง ๆ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และพี่ ๆ น้อง ๆ ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือ สนับสนุนในด้านต่าง ๆ และให้กำลังใจเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

ศุภชัย ชมภูนุช

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	๗
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญตาราง	๑๑
สารบัญภาพ	๑๒
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	4
2.1 บทนำ	4
2.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม	4
2.3 การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	17
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	24
3.1 บทนำ	24
3.2 สายนำสัญญาณไมโครสตริป	24
3.3 สายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่	26
3.4 ตัวแปลงผกผันอิมพีแดนซ์และตัวแปลงผกผันแอดมิตแตนซ์	31
3.5 วงจรกรองแบบเส้นคู่	32
3.6 ผลตอบสนองเซบีเชฟ	39
บทที่ 4 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้สายไมโครสตริปเส้นคู่และผล การออกแบบ	45
4.1 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบไมโครสตริปเส้นคู่	45
4.2 ผลการจำลอง	46
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	50
บรรณานุกรม	51
ประวัติผู้วิจัย	52

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2-1 ความหมายของคำศัพท์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	5
4-1 ผลที่ได้จากการออกแบบ โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์	46
4-2 ผลที่ได้จากการออกแบบ โดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์	46
4-3 ค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ทำการปรับแต่งด้วยโปรแกรม IE3D	48

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
2-1	กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย	6
2-2	การเข้ารหัสฐานสอง	7
2-3	การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต	9
2-4	การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเฟ้นสุ่ม	10
2-5	การครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด และ การครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด	11
2-6	การครอสโอเวอร์แบบเอกรูป	11
2-7	การกลายพันธุ์โดยกลับค่าบิต	12
2-8	การปรับมาตรการความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นแรก	14
2-9	การปรับมาตรการความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นหลัง	14
2-10	รหัสเทียมสำหรับการหาค่าและสำหรับการปรับมาตรการความแข็งแรง	15
2-11	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม	16
2-12	การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการสุ่ม	17
2-13	การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการเลือกจากสมาชิกที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์	17
2-14	ข้อแตกต่างระหว่างการจัดลำดับที่ตามข้อเสนอ โดย Fonseca and Fleming (1995) และ Goldberg (1989)	19
2-15	แสดงการกำหนดค่าความแข็งแรงโดยใช้การประมาณค่าในช่วงซึ่งใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น	21
2-16	ลูกบาศก์กินในสามมิติและขอบพาราด็อกซ์	22
2-17	แสดงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์	23
3-1	ลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	24
3-2	รูปแบบการแพร่กระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	25
3-3	ภาพตัดขวางของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่	26
3-4	ลักษณะสนามคล้ายรูปแบบ TEM ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ (ก) โหมดคู่ (ข) โหมดคี่	27
3-5	ตัวแปลงผกผันอิมพีแดนซ์และตัวแปลงผกผันแอดมิตแตนซ์	31
3-6	ส่วนของสายคู่ขนานประกอบด้วยทางเข้าออกแรงดันและทิศทางกระแส	32
3-7	ส่วนของสายคู่ขนานประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแส โหมดคู่และโหมดคี่	33

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
3-8	ส่วนของวงจรสองทางเข้าออกแบบเส้นคู่ที่มีผลตอบสนองแบบผ่านแถบ	36
3-9	วงจรสมมูลของสายนำสัญญาณเส้นคู่ 1 ชุดเมื่อเทียบกับภาพที่ 3-8	37
3-10	ผลตอบสนองผ่านต่ำเซบีเซฟ	39
3-11	โครงสร้างวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำแบบวงจรข่าบบันไดสำหรับวงจรกรอง โพลทุกตัว (ก) เริ่มต้นด้วยตัวเก็บประจุขนาน (ข) เริ่มต้นด้วยตัวเหนี่ยวนำอนุกรม	41
3-12	การแปลงค่าขององค์ประกอบพื้นฐานจากวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำไปเป็นวงจร กรองความถี่ผ่านแถบ	43
4-1	แสดงลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่จำลองที่ได้จากการนำ ค่าที่ได้จากออกแบบไปสร้างในโปรแกรม IE3D	47
4-2	แสดงผล S_{11}, S_{21} ที่ได้จากโปรแกรม IE3D เมื่อออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แบบหลายจุดประสงค์	47
4-3	แสดงผล S_{11}, S_{21} ที่ได้จากโปรแกรม IE3D เมื่อออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม แบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์	48
4-4	แสดงผล S_{11}, S_{21} ที่ได้จากโปรแกรม IE3D เมื่อทำการปรับค่าความกว้างและความยาว ของสายนำสัญญาณไมโครสตริป	49

บทที่ 1

บทนำ

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ (Co-operative Co-evolutionary Multi-objective Genetic Algorithms, CCMOGA) เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกัน (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm, CCGA) ซึ่งผลของการทำงานร่วมกันนี้ทำให้ผลของคำตอบมีประสิทธิภาพสูงกว่าขั้นตอนวิธีที่มีอยู่เดิม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ (Co-operative Co-evolutionary Multi-objective Genetic Algorithms, CCMOGA) นั้นมีพื้นฐานมาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) ซึ่งได้กลายเป็นเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดที่ได้รับความนิยม และถูกนำไปใช้ในหลากหลายสาขาวิชา โดยเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่เพิ่มขึ้นมาแทนเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดวิธีอื่นๆ ไป ทั้งนี้เพราะเทคนิคที่ใช้มีความแน่นอนในการหาคำตอบ สามารถนำไปใช้กับปัญหาที่มีพื้นที่การหาคำตอบขนาดใหญ่ หรือปัญหาที่มีความซับซ้อนมาก ตลอดจนปัญหาที่ไม่สามารถสร้างรูปแบบขึ้นมาเป็นสมการคณิตศาสตร์ ได้อย่างมีประสิทธิภาพด้วยเหตุนี้ทำให้มีงานวิจัยมากมายที่ทำการศึกษาเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม อันได้แก่ ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎี การใช้งานเชิงประยุกต์ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อใช้ร่วมในการแก้ปัญหาต่าง ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการนำเสนอขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ มาออกแบบสายอากาศไมโครสตริปสี่เหลี่ยมที่มีการโพลาไรซ์แบบวงกลม มาเปรียบเทียบกับกรอกแบบ โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์แบบดั้งเดิม เพื่อสนับสนุนให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์นั้นให้ผลที่ดีกว่า

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีหลักการพื้นฐานมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติของ Charles Darwin ซึ่งกล่าวไว้ว่า ผู้ที่แข็งแกร่งกว่าย่อมมีโอกาสอยู่รอดต่อไปมากกว่า และสามารถถ่ายทอดคุณลักษณะที่ดีไปยังสมาชิกรุ่นอายุ (Generation) ถัดไป จากหลักการดังกล่าว ทำให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีการพัฒนาคำตอบให้ดีขึ้นเมื่อรุ่นของการคำนวณผ่านไป ทั้งนี้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าความแข็งแรงที่ได้จากฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective

Function) เป็นตัวกำหนดทิศทางการหาคำตอบ ต่างกับวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุดทั่วไปที่อาศัยความ
 ชั้นในการหาคำตอบอย่างวิธีการทางแคลคูลัส (Calculus-based Method) ซึ่งใช้ความชันเป็น
 ตัวกำหนดทิศทางการหาคำตอบ ทำให้วิธีนี้ใช้ได้กับเพียงปัญหาที่คำตอบหาได้จากหลักการกำหนด
 (Deterministic Problem) ไม่สามารถใช้ได้กับปัญหาที่คำตอบได้จากการสุ่ม (Stochastic Problem)
 นอกจากนี้การใช้ความชันเป็นตัวกำหนดทิศทางการหาคำตอบ ยังส่งผลให้คำตอบที่ได้รับ ไม่ใช่
 คำตอบที่แท้จริงของปัญหา หรือเป็นเพียงแค่คำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimal Solution)
 ในขณะที่คำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีโอกาสมากกว่าที่จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด
 (Global Optimal Solution) เนื่องจากการหาคำตอบของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นจะทำการหา
 คำตอบหลายจุดไปพร้อมกัน หรือที่เรียกว่าการค้นหาแบบขนาน (Parallel Search)

การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เริ่มต้นจากการสร้างกลุ่มคำตอบขึ้นมา
 เป็นกลุ่มประชากรเริ่มต้น (Initial Population) โดยการสุ่มสมาชิกที่มีลักษณะเป็นโครโมโซม
 (Chromosome) หรือสายรหัสของยีน (Gene) ขึ้นมาแทนคำตอบของปัญหาในรูปแบบที่เหมาะสม
 จากนั้น คำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness Value) ของสมาชิกในกลุ่มประชากรแต่ละตัวโดยใช้
 ข้อมูลจากค่าจุดประสงค์ (Objective Value) ที่ได้จากการนำตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)
 ภายหลังจากการถอดรหัส (Decode) โครโมโซมหรือสายรหัสของคำตอบ เข้าไปแทนในฟังก์ชัน
 จุดประสงค์ ค่าความแข็งแรงที่ได้นี้จะถูกใช้เป็นตัวกำหนดโอกาสสำหรับผ่านการคัดเลือกใน
 กระบวนการคัดเลือกพันธุ์ (Selection) หลังจากที่ได้สมาชิกของกลุ่มประชากรที่ผ่านกระบวนการ
 คัดเลือกแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือ ทำการเปลี่ยนแปลงลักษณะยีนส์ในแต่ละตำแหน่งของสมาชิก
 เหล่านี้ด้วยตัวดำเนินการสลับสายพันธุ์ (Crossover Operator) และตัวดำเนินการกลายพันธุ์
 (Mutation Operator) สมาชิกของกลุ่มประชากรที่ได้ก็จะเป็นกลุ่มประชากรในรุ่นอายุถัดไป
 กระบวนการตั้งแต่การหาค่าความแข็งแรงจะถูกกระทำซ้ำเช่นนี้ไปเรื่อยๆ เพื่อให้คำตอบที่ได้มีการ
 พัฒนางนกลายเป็นคำตอบที่ดีที่สุด

แม้ว่าคำตอบที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีโอกาสที่จะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด แต่ในบาง
 กรณีถ้าสมาชิกของกลุ่มประชากรมีโครงสร้างที่ลักษณะเหมือนกันมากเกินไป อาจก่อให้เกิด
 เหตุการณ์ที่เรียกว่าการลู่สู่คำตอบก่อนที่ควรจะเป็น (Premature Convergence) ส่งผลให้คำตอบที่
 หาได้ลู่เข้าสู่ค่า ๆ หนึ่งซึ่งส่วนใหญ่ค่านั้นจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุดเฉพาะที่ ดังนั้นการป้องกันการลู่สู่
 คำตอบก่อนที่ควรจะเป็นคือการทำให้สมาชิกของกลุ่มประชากรมีความแตกต่างกัน นั่นคือ ต้องรักษา
 ความหลากหลายของโครงสร้างในกลุ่มประชากร (Mauldin, 1984)

Maneeratana et al. (2004) ได้ทำการศึกษาโดยการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีการ
 ควบคุมความแตกต่างไปใช้กับปัญหาที่มีสองจุดประสงค์แล้วทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพใน

การหาคำตอบระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหลายจุดประสงค์แบบดั้งเดิม (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA) กับ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ (Co-operative Co-evolutionary Multi-objective Genetic Algorithms, CCMOGA) ซึ่งขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ เกิดจากการทำงานร่วมกันระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ และ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกัน (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm, CCGA) ซึ่งผลของการทำงานร่วมกันนี้ทำให้ผลของคำตอบมีประสิทธิภาพสูงกว่าขั้นตอนวิธีที่มีอยู่เดิม

วิทยานิพนธ์นี้จึงได้นำเอาเทคนิคขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ มาออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้สายไมโครสตริปคู่ขนาน และ เพื่อเป็นการสนับสนุนว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่า เราจึงออกแบบเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์แบบดั้งเดิม

บทที่ 2 ของวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์และตัวดำเนินการต่างๆที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม รวมไปถึงทฤษฎีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกัน ต่อมาในบทที่ 3 จะเป็นทฤษฎีในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่กว้างโดยใช้สายไมโครสตริปคู่ขนาน จากนั้นในบทที่ 4 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปคู่ขนานและผลการออกแบบ และสำหรับในบทสุดท้าย คือ บทที่ 5 เป็นการสรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

บทที่ 2

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

2.1 บทนำ

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นขั้นตอนวิธีที่ใช้ในการหาคำตอบที่ดีที่สุดของฟังก์ชัน ถูกคิดค้นขึ้นมาครั้งแรกโดย Holland (1975) โดยมีรากฐานมาจากกลไกการวิวัฒนาการในธรรมชาติ คือ ผู้ที่แข็งแรงกว่ามีแนวโน้มที่จะอยู่รอด และถ่ายทอดคุณสมบัติที่ดีให้รุ่นต่อไป ขณะที่ผู้อ่อนแกว่ามีแนวโน้มที่จะตายไป ด้วยเหตุนี้ตัวดำเนินการหลักของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจึงประกอบด้วย การคัดเลือกพันธุ์ (Selection) เพื่อเลือกเฟ้นสมาชิกที่มีความแข็งแรงจากกลุ่มประชากร การสลับสายพันธุ์ (Crossover) เพื่อสร้างสมาชิกใหม่ที่มีความแข็งแรงจากการรวมกันของสมาชิกที่มีลักษณะดี และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อรักษาความหลากหลายในกลุ่มประชากร

บทนี้จะกล่าวถึงความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกัน เช่น การเข้ารหัส การกำหนดฟังก์ชันค่าความแข็งแรง และตัวดำเนินการต่างๆที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และ ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

2.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm, CCGA)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม (Co-operative Co-evolutionary Genetic Algorithm, CCGA) มีหลักการเบื้องต้นมาจากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ซึ่งเป็นเทคนิคการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Technique) อีกเทคนิคหนึ่ง โดยจะกล่าวถึงแนวคิด คุณสมบัติ ขั้นตอนการทำงาน และตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรม (Genetic Operator) ต่างๆ ซึ่งได้แก่ การเข้ารหัส (Encoding) การคำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness Evaluation) การคัดเลือก (Selection) การครอสโอเวอร์ (Crossover) การกลายพันธุ์ (Mutation) กลยุทธ์คัดแยกส่วนที่ดีที่สุด (Elitist Strategy) และการปรับขนาดความแข็งแรง (Fitness Scaling) ตามลำดับ

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมพัฒนาขึ้นโดย Holland (1975) เป็นกระบวนการหาคำตอบที่ใช้แนวความคิดของ ชาร์ลส์ ดาร์วิน (Charles Darwin) คือ สิ่งมีชีวิตใดที่แข็งแรงกว่าย่อมมีโอกาสอยู่

รอดได้มากกว่า หมายความว่า สิ่งมีชีวิตที่แข็งแรงกว่ามีโอกาสดำรงรอดพันธุกรรมไปให้ลูกหลานได้มากกว่า โดยที่ขั้นตอนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น จะอิงมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการ (Theory of Evolution)

ข้อแตกต่างระหว่างขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมาตรฐาน มี 4 กรณีคือ

กรณีที่ 1 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการค้นหาคำตอบในพื้นที่การค้นหา (Search Space) ของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหาโดยที่ตัวแปรตัดสินใจนี้จะถูกเข้ารหัสเป็นสายรหัส

กรณีที่ 2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการหาคำตอบจากหลาย ๆ จุดในพื้นที่ที่เป็นไปได้ในการหาคำตอบไปพร้อม ๆ กันนั้น ซึ่งจะทำให้โอกาสที่คำตอบที่หาพบเป็นค่าเหมาะที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) นั้นลดลง

กรณีที่ 3 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้ข้อมูลที่เป็นผลที่เกิดจากค่าจุดประสงค์ (Objective Value) ในการกำหนดทิศทางในการหาคำตอบในพื้นที่การค้นหา ในขณะที่เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะที่สุดแบบมาตรฐานนั้นมักจะใช้ข้อมูลที่ได้มาจากอนุพันธ์ (Derivative) ของฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective Function) ในการกำหนดทิศทางของการหาคำตอบ

กรณีที่ 4 ในกระบวนการหาคำตอบของเทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบมาตรฐาน จะใช้กฎการส่งผ่านเชิงกำหนด (Deterministic Transmission Rule) ส่วนขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้กฎการส่งผ่านเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Transmission Rule) ในกระบวนการหาคำตอบ

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นมีรากฐานมาจากทฤษฎีวิวัฒนาการ ดังนั้นคำศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะเป็นคำศัพท์ทางชีววิทยา โดยจะสามารถแปลความหมายได้ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 2-1

ตารางที่ 2-1 ความหมายของคำศัพท์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

คำศัพท์ในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	ความหมาย
โครโมโซม (Chromosome)	สายรหัส
ยีน (Gene)	รหัส หรือ อักษร
อัลลีล (Allele)	ค่าของรหัส
โลคัส (Locus)	ตำแหน่งของรหัสบนสายรหัส
จีโนไทป์ (Genotype)	ลักษณะสายรหัส
ฟีโนไทป์ (Phenotype)	สิ่งที่ได้จากการถอดรหัสลักษณะสายรหัส

การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นการหาคำตอบแบบขนาน (Parallel Search) คำตอบที่ได้ในรุ่น (Generation) หนึ่ง จะผ่านการแปลง (Transformation) เพื่อทำให้เกิดคำตอบที่ดีขึ้นในรุ่นถัดไป กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่ายสามารถแสดงดังภาพที่ 2-1

```

/*Genetic Algorithm*/
initialise a set of random individuals;

for (i=0;i< Max generation; i++){
    decision variable = decode(individual);
    fitness = fitness function(decision variable);
    selected individual = selection(individual, fitness);
    crossover individual = crossover(selected individual, pc);
    mutation individual = mutation(crossover individual, pm);
    individual = mutate individual;
}

```

ภาพที่ 2-1 กระบวนการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่าย

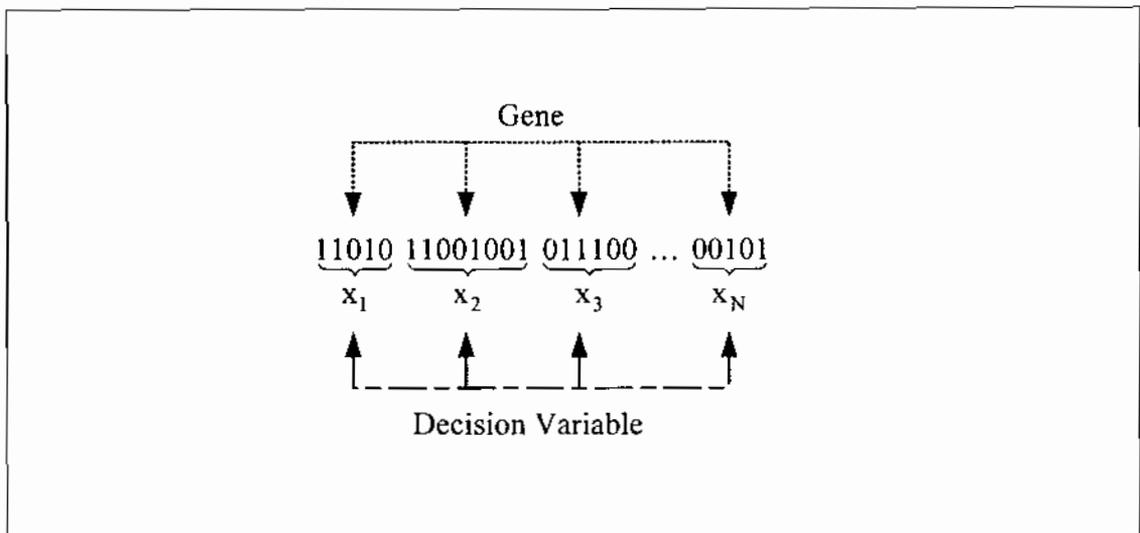
จากภาพที่ 2-1 ขั้นตอนวิธีเริ่มจากการสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population) นำประชากรเริ่มต้น ไปคำนวณค่าความแข็งแรง แล้วคัดเลือกประชากรที่แข็งแรง ไปทำการครอส โอเวอร์และการกลายพันธุ์ จบหนึ่งกระบวนการนี้เรียกว่า 1 รุ่น ในแต่ละลำดับขั้นตอนสามารถอธิบายเป็นหัวข้อได้ดังต่อไปนี้

2.2.1 การสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Population)

การสร้างประชากรเริ่มต้น เกิดจากสายรหัส (Chromosome) ของอักษรที่มาจากการสุ่ม ซึ่งรูปแบบที่ง่ายสุดในการเข้ารหัสคือเลขฐานสอง ดังนั้นอักษรที่ได้จากการสุ่มคือเลข 0 และ 1 การกำหนดจำนวนประชากรขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของผู้เขียน โปรแกรมเอง การกำหนดจำนวนประชากรเริ่มต้นมากจะทำให้โอกาสในการพบคำตอบมาก แต่ก็ทำให้การคำนวณในแต่ละรุ่นช้าลง เพราะจำนวนประชากรในรุ่นมีมาก

2.2.2 การเข้ารหัส (Encoding)

การเข้ารหัส เป็นการนำสายรหัสมาแปลงค่าหรือจำนวนเป็นตัวแปรตัดสินใจ รูปแบบของสายรหัสมีหลายแบบเช่น สายรหัสฐานสอง (Binary Chromosome) สายรหัสจัดอันดับ (Sequence Chromosome) และสายรหัสจำนวนเต็ม (Integer Chromosome) เป็นต้น ซึ่งรูปแบบของสายรหัสขึ้นอยู่กับตัวปัญหา ในที่นี้จะยกตัวอย่างวิธีการเข้ารหัสที่ง่ายที่สุดคือ รหัสฐานสอง (Binary Coded) ผลที่ได้จากการเข้ารหัสวิธีนี้คือ สายรหัสจะประกอบขึ้นจากกลุ่มของยีน (Gene) หลายกลุ่ม โดยที่แต่ละกลุ่มของยีนจะแทนค่าตัวแปรตัดสินใจ 1 ตัว และแต่ละยีนจะมีอัลลิลเป็น 0 หรือ 1



ภาพที่ 2-2 การเข้ารหัสฐานสอง

จากภาพที่ 2-2 คำตอบของปัญหาคือสายรหัสหรือโครโมโซม 1101011001001011100 ... 00101 กลุ่มของยีนคือ 11010, 11001001, 011100, ..., 00101 และตัวแปรตัดสินใจคือ $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ ถ้าในปัญหานี้ความยาวของสายรหัสมีค่า L ดังนั้นจำนวนแบบที่เป็นไปได้ของสายรหัสคือ 2^L แบบ โดยเริ่มจาก 00000000000000000000 ... 00000 ไปจนถึง 11111111111111111111 ... 11111

2.2.3 การคำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness Evaluation)

ค่าความแข็งแรงของสมาชิกแต่ละตัวในประชากร มีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าจุดประสงค์ที่เกิดจากการแทนค่าโดยสมาชิกของประชากรนั้นๆ ค่าความแข็งแรงเกิดจากการคำนวณฟังก์ชันจุดประสงค์ของตัวแปรตัดสินใจที่ได้จากการถอดรหัส โดยฟังก์ชันจุดประสงค์ของปัญหาการหาค่าสูงสุด (Maximization Problem) เหมาะที่สุดคือฟังก์ชันกำไร และปัญหาการหาค่าต่ำสุด (Minimization Problem) คือฟังก์ชันค่าใช้จ่าย ดังนั้นค่าความแข็งแรงของปัญหาการหาค่าสูงสุดคือ

$$f_i = Z_i \quad (2-1)$$

และค่าความแข็งแรงของปัญหาการหาค่าต่ำสุดคือ

$$f_i = C_{\max} - J_i \quad (2-2)$$

โดยที่ f_i คือ ค่าความแข็งแรงของประชากรตัวที่ i

Z_i คือ ค่าจุดประสงค์ซึ่งเป็นผลจากฟังก์ชันค่าไรของประชากรตัวที่ i

J_i คือ ค่าจุดประสงค์ซึ่งเป็นผลจากฟังก์ชันค่าใช้จ่ายของประชากรตัวที่ i

C_{\max} คือ ค่าบวกค่าหนึ่งซึ่งมีค่ามากกว่าค่าจุดประสงค์ที่มากที่สุดที่เป็นไปได้ หาได้โดยอาศัย

ข้อมูลของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่สนใจเป็นหลัก

2.2.4 การคัดเลือก (Selection)

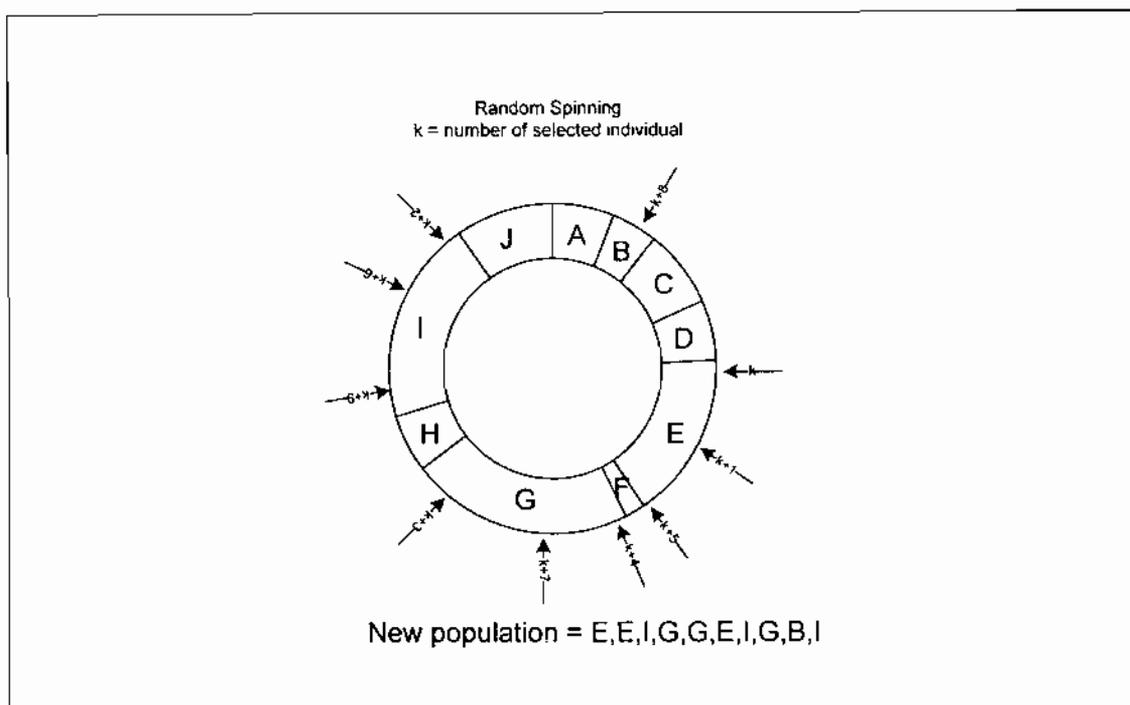
เป็นตัวดำเนินการที่มีความสำคัญมากในการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ทำหน้าที่คัดเลือกประชากรภายในกลุ่มจากค่าความแข็งแรง ประชากรรุ่นใหม่จะถูกสร้างขึ้นโดยการแพร่พันธุ์ (Reproduction) จากประชากรที่แข็งแรงในรุ่นปัจจุบัน โดยใช้ค่าความแข็งแรงเป็นตัวกำหนดอัตราการแพร่พันธุ์ อัตราส่วนระหว่างค่าความแข็งแรงของประชากรแต่ละตัวกับผลรวมของค่าความแข็งแรงจากประชากรทุกตัวในรุ่นปัจจุบันจะเป็นตัวกำหนดสัดส่วน ของจำนวนประชากรนั้นๆ ในประชากรรุ่นใหม่ กล่าวคือประชากรในรุ่นปัจจุบันที่มีค่าความแข็งแรงมากมีโอกาสแพร่พันธุ์ไปในประชากรรุ่นใหม่สูง ในขณะที่ประชากรที่มีค่าความแข็งแรงน้อยจะมีโอกาสแพร่พันธุ์ไปในประชากรรุ่นใหม่ต่ำ ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในการคัดเลือกนี้มีอยู่หลายเทคนิคด้วยกัน ในที่นี้เทคนิคที่จะกล่าวถึงคือ การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Selection) และการคัดเลือกโดยการชักตัวอย่างทุกตัวแบบสุ่ม (Stochastic Universal Sampling Selection)

2.2.4.1 การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต (Roulette Wheel Selection)

เป็นวิธีการเลือกที่เลียนแบบการเล่นวงล้อรูเล็ต โดยที่ความกว้างแต่ละช่องของวงล้อรูเล็ตถูกกำหนดด้วยค่าความแข็งแรงของประชากรแต่ละตัว องศาความกว้างแปรผันตรงกับค่าความแข็งแรงของประชากรตัวนั้นๆ ทำการกำหนดตัวชี้ตำแหน่ง (Fixed Point) แล้วหมุนวงล้อรูเล็ตแบบสุ่ม เมื่อวงล้อหยุดหมุน ประชากรตัวที่ตกอยู่ในตำแหน่งของตัวชี้ จะถูกเลือกและส่งผ่านเป็นประชากรรุ่นถัดไป

สังเกตได้ว่า ถ้าขั้นตอนในการหมุนวงล้อรูเล็ตนั้นเป็นกระบวนการแบบสุ่มที่แท้จริงแล้ว การสุ่มเป็นจำนวนอนันต์ (Infinite Number) ครั้ง จะได้ประชากรที่ถูกเลือกมีจำนวนใกล้เคียงกับ

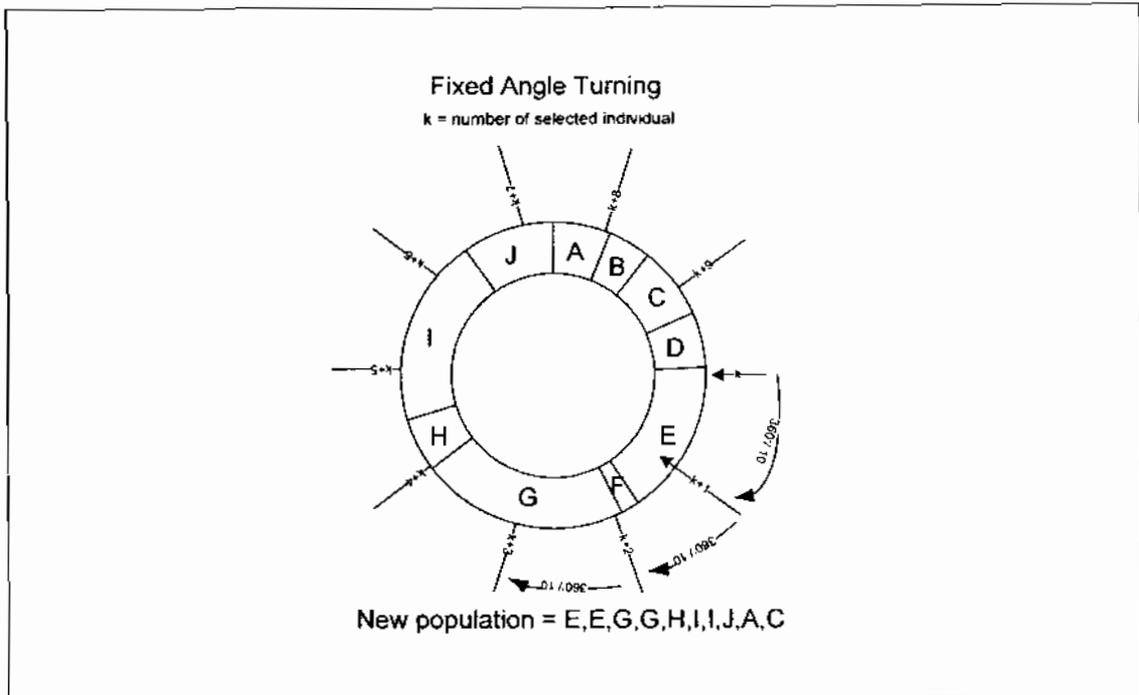
สัดส่วนเป้าหมาย อย่างไรก็ตามก็ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งของการหมุนวงล้อรูเล็ตถูกกำหนดโดยจำนวนของประชากรซึ่งไม่เป็นจำนวนอนันต์ ทำให้สัดส่วนของประชากรในรุ่นถัดไปจะแตกต่างจากสัดส่วนที่ตั้งเป้าหมายเอาไว้ ปัญหานี้จะสามารถแก้ได้บางส่วนโดยใช้การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเพื่อนสุ่ม แสดงลักษณะการเลือกได้ดังภาพที่ 2-3



ภาพที่ 2-3 การคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต

2.2.4.2 การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเพื่อนสุ่ม (Stochastic Universal Sampling Selection)

จะมีการสร้างวงล้อรูเล็ตที่มีความสัมพันธ์ตามค่าความแข็งแรงของประชากรเหมือนกัน แต่ต่างกันที่การหมุนวงล้อรูเล็ต เริ่มต้นที่การสุ่มจุดชี้ตำแหน่งจุดแรก ต่อจากนั้นหมุนวงล้อเป็นมุม $360^\circ/n$ โดยที่ n คือจำนวนประชากร วงล้อจะหมุนด้วยมุมที่คงที่จนครบตามจำนวนประชากร 1 รุ่น จากหลักการนี้จำนวนของสมาชิกที่ถูกเลือกจะใกล้เคียงกับสัดส่วนที่ต้องการ ซึ่งจะช่วยลดความลำเอียงในการคัดเลือกได้ เนื่องจากโอกาสที่ประชากรจะถูกเลือกซ้ำกันหลายๆ ครั้งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อประชากรตัวนั้นๆ มีค่าความแข็งแรงสูงมากๆ ลักษณะการเลือกแสดงได้ดังภาพที่ 2-4



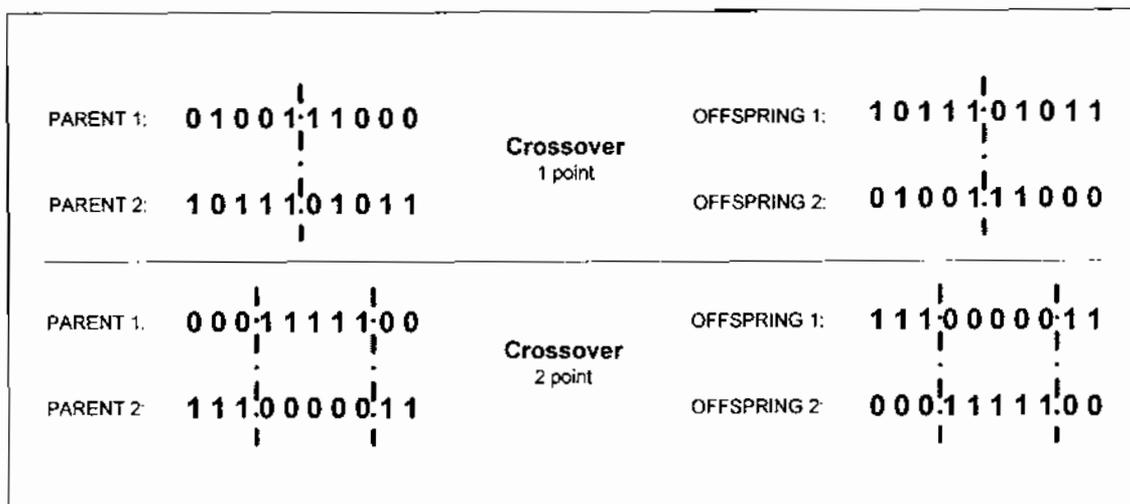
ภาพที่ 2-4 การคัดเลือกโดยชักตัวอย่างทุกตัวแบบเฟ้นสุ่ม

2.2.5 การครอสโอเวอร์ (Crossover)

การครอสโอเวอร์ทำหน้าที่ถ่ายทอดลักษณะของประชากรจากรุ่นหนึ่งไปยังอีกรุ่นหนึ่ง โดยมีการสับเปลี่ยนโครงสร้างทางพันธุกรรมจากประชากรที่ถูกคัดเลือกมา โดยการสุ่มเลือกสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ (Parent Individual) มาจำนวน 2 ตัว ส่งผ่านไปยังสมาชิกของประชากรรุ่นลูก (Offspring Individual) ซึ่งจะมีจำนวน 2 ตัวเช่นกัน โอกาสที่จะมีการครอสโอเวอร์เกิดขึ้นจะถูกกำหนดโดยความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์ (Crossover Probability) โดยปกติความน่าจะเป็นในการครอสโอเวอร์มีค่าอยู่ระหว่าง 0.7 - 0.9 ซึ่งหมายความว่าถ้าไม่มีการครอสโอเวอร์เกิดขึ้นแล้ว สมาชิกของประชากรรุ่นลูกก็จะเหมือนกับสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ทุกประการ เทคนิคการครอสโอเวอร์ที่จะกล่าวถึงในที่นี้ ได้แก่ การครอสโอเวอร์แบบ N จุด (N -Point Crossover) และการครอสโอเวอร์แบบเอกรูป (Uniform Crossover)

2.2.5.1 การครอสโอเวอร์แบบ N จุด (N -Point Crossover)

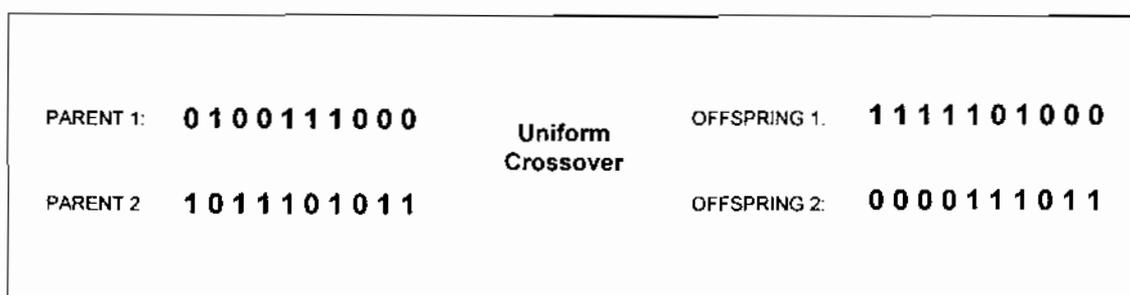
เทคนิคนี้เป็นการแลกเปลี่ยนยีนระหว่างสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่เพื่อให้เกิดการสร้างสมาชิกของประชากรรุ่นลูกนั้นจะเกิดขึ้น ณ ข้างใดข้างหนึ่งของตำแหน่งการครอสโอเวอร์ (Crossover Site) หรือเกิดขึ้นระหว่างตำแหน่งการครอสโอเวอร์ 2 ตำแหน่งบนโครโมโซม ค่า N จะเป็นส่วนที่กำหนดจำนวนของตำแหน่งการครอสโอเวอร์โดยที่ $N \geq 1$ ดังภาพที่ 2-5



ภาพที่ 2-5 การครอสโอเวอร์แบบ 1 จุด และ การครอสโอเวอร์แบบ 2 จุด

2.2.5.2 การครอสโอเวอร์แบบเอกรูป (Uniform Crossover)

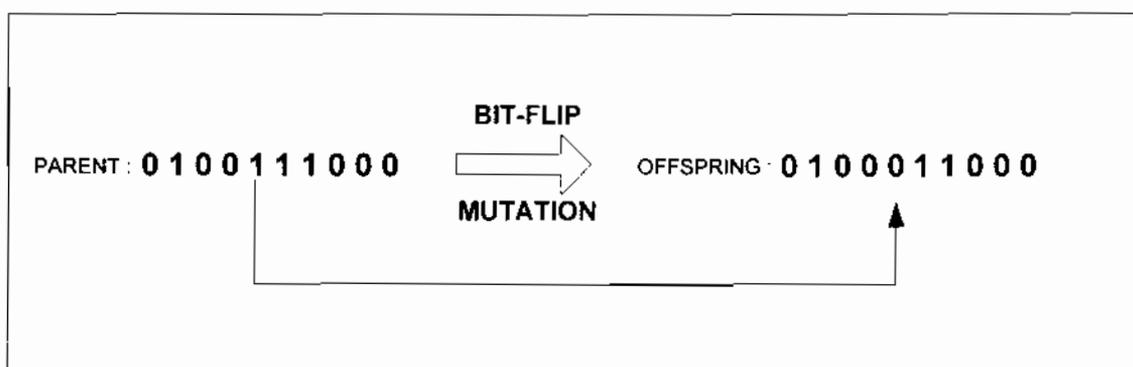
เป็นการแลกเปลี่ยนยีนที่แต่ละ โลกซ์ของ โครโมโซมในประชากรรุ่นลูก 1 ตัว จะถูกเลือกอย่างสุ่มจากคู่ยีนที่มาจากสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ทั้งสองตัว ดังนั้น โอกาสที่ยีนจะถูกเลือกจากสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ตัวหนึ่งจะเท่ากับ โอกาสที่ยีนจะถูกเลือกจากสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่อีกตัวหนึ่ง ซึ่งหลังจากที่ยีนสำหรับสมาชิกของประชากรรุ่นลูกที่สนใจได้ถูกกำหนดแล้ว ยีนจากคู่ยีนที่ไม่ได้ถูกเลือกก็จะถูกส่งผ่านไปยังสมาชิกของประชากรรุ่นลูกอีกตัวที่เหลือ ดังภาพที่ 2-6



ภาพที่ 2-6 การครอสโอเวอร์แบบเอกรูป

2.2.6 การกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์เป็นกระบวนการที่ใช้ในการสร้างประชากรใหม่จากประชากรที่มีอยู่เดิม ซึ่งจะส่งผลให้สมาชิกของประชากรรุ่นใหม่หรือรุ่นลูกที่เกิดขึ้นมีลักษณะที่ดีกว่าสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ปัจจุบัน โดยค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์จะอยู่ระหว่าง 0 ถึง 0.1 การกลายพันธุ์เป็นวิธีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอินพุตเพียงเล็กน้อยในโครโมโซมของสมาชิกของประชากร การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวทำให้เกิดการค้นหาคำตอบ ซึ่งอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับคำตอบซึ่งแทนโดยสมาชิกของประชากรตัวเดิมในพื้นที่การค้นหา ในกรณีที่โครโมโซมฐานสองถูกใช้ในการแทนค่าผลเฉลย การกลายพันธุ์จะสามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าบิตจาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0 การกลายพันธุ์ในลักษณะนี้เรียกว่า การกลายพันธุ์โดยกลับค่าบิต (Bit-Flip Mutation) ดังภาพที่ 2-7



ภาพที่ 2-7 การกลายพันธุ์โดยกลับค่าบิต

ขั้นตอนวิธีวิธีเชิงพันธุกรรมอย่างง่ายก็มีขั้นตอนหลักๆดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แต่ในบางส่วนของขั้นตอนมีกระบวนการคิดที่ทำให้การค้นหาของคำตอบเป็นเพียงการค้นหาคำตอบแบบเฉพาะที่ (Local Solution) ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบในแต่ละส่วนของขั้นตอนจึงนำเอาการปรับมาตรฐานความแข็งแรง (Fitness Scaling) มาช่วยในขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังจะอธิบายต่อไป

2.2.7 การปรับมาตรฐานความแข็งแรง (Fitness Scaling)

ในบางครั้งค่าความแข็งแรงของประชากรอาจมีค่าที่ต่ำ หรือสูงเกินกว่าที่ควรจะเป็นเช่น การทำงานในรุ่นแรกๆ อาจมีสมาชิกของประชากรซึ่งมีค่าความแข็งแรงสูงกว่าตัวอื่นๆ มาก เป็นผลทำให้ถูกคัดเลือกไปยังรุ่นถัดไปเป็นจำนวนมาก ซึ่งนั่นก็หมายความว่าในรุ่นถัดไปของการทำงานจะมีสมาชิกของประชากรหลายตัวที่มีโครงสร้างคล้ายคลึง กับสมาชิกของประชากรในรุ่นก่อนหน้าทำให้

ค่าความแข็งแรงสูงที่ถูกคัดเลือกมา ซึ่งอาจก่อให้เกิดการลู่เข้าสู่ค่าตอบก่อนที่ควรจะเป็น (Premature Convergence) ทำให้คำตอบที่หาได้นั้นอาจเป็นค่าเหมาะที่สุดแบบเฉพาะที่

ในการปรับมาตรการความแข็งแรงสามารถใช้รูปแบบของสมการเชิงเส้น (Linear Equation) ตามสมการที่ (2-3) และโดยปกติค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อน และหลังการปรับมาตรการความแข็งแรง นั้นควรกำหนดให้มีค่าเท่าเดิม เพื่อให้แน่ใจว่าสมาชิกของประชากรตัวที่มีค่าความแข็งแรงใกล้เคียงกับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยในรุ่น จึงมีโอกาที่จะถูกคัดเลือกเป็นสมาชิกของประชากรรุ่นพ่อแม่ในรุ่นถัดไป และสมาชิกของประชากรตัวที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดหลังจากมีการปรับมาตรการความแข็งแรงแล้วนั้น โดยจะมีความสัมพันธ์กับค่าความแข็งแรงเฉลี่ยก่อนปรับมาตรการความแข็งแรง ดังนี้ $f'_{\max} = C_{\text{mult}} \cdot f_{\text{avg}}$ โดยที่ C_{mult} เป็นอัตราการถูกเลือกที่ต้องการสำหรับสมาชิกของประชากรที่แข็งแรงที่สุด สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีจำนวนสมาชิกของประชากรในช่วง 50-100 ค่าของ C_{mult} ที่เหมาะสมคือ 1.2-2.0 โดยการปรับมาตรการความเหมาะสมนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ช่วง

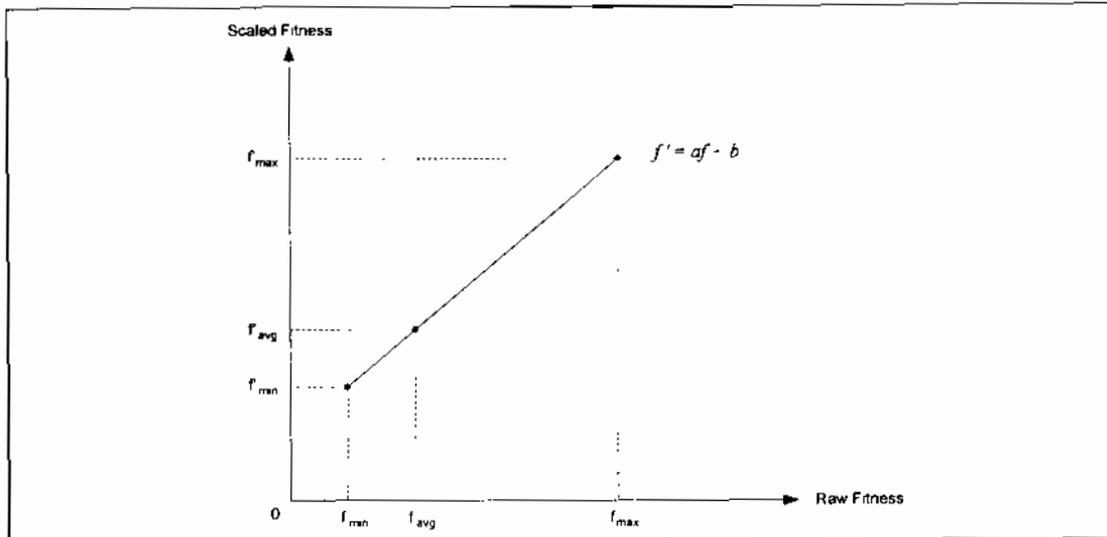
การหาค่าตอบในรุ่นแรกๆ ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น อาจมีประชากรบางตัวที่มีค่าความแข็งแรงสูงๆ ทำให้เกิดความลำเอียงอย่างมากในการคัดเลือก และอาจทำให้เกิดการลู่เข้าสู่ค่าตอบก่อนที่ควรจะเป็น ดังนั้นการทำงานของ การปรับมาตรการความแข็งแรงในรุ่นแรกๆ จะมีการปรับมาตรการความแข็งแรงลักษณะตามภาพที่ 2-8 ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่า หลังจากมีการปรับมาตรการความแข็งแรงแล้ว ทำให้ผลต่างระหว่างค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุด และค่าความแข็งแรงที่ต่ำที่สุดนั้นลดลง ดังนั้นกล่าวได้ว่าการปรับมาตรการความแข็งแรงในรุ่นแรกๆ นั้นจะช่วยลดความลำเอียงในการคัดเลือกสมาชิกของประชากร และป้องกันการลู่เข้าสู่ค่าตอบก่อนที่ควรจะเป็น

$$f' = af + b \quad (2-3)$$

โดยที่ f' คือ ค่าความแข็งแรงหลังปรับมาตรการความแข็งแรง

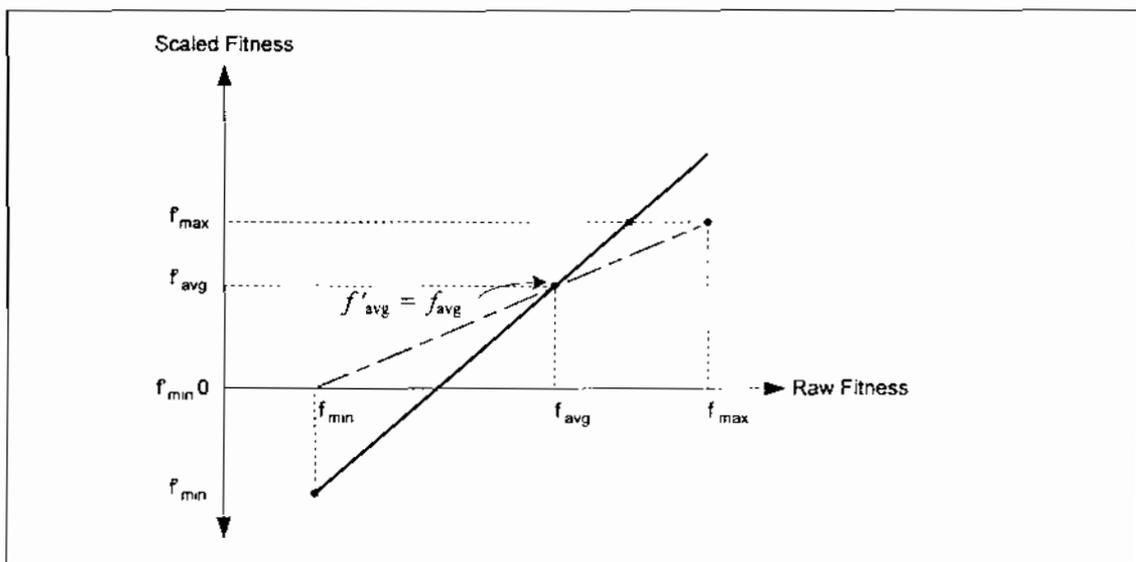
f คือ ค่าความแข็งแรงก่อนปรับมาตรการความแข็งแรง

a และ b คือ ค่าคงที่ โดยที่ค่าของ a และ b สามารถหาได้จากภาพที่ 2-9



ภาพที่ 2-8 การปรับมาตรการความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นแรกๆ

การหาคำตอบในรุ่นหลังๆ สมาชิกของประชากรส่วนใหญ่จะมีค่าความแข็งแรงสูงใกล้เคียงกัน อาจทำให้แนวทางในการหาคำตอบไม่มีความแน่นอน (Random Walk) การปรับมาตรการความแข็งแรงในรุ่นหลังจะทำให้ค่าความแข็งแรงของสมาชิกของประชากรที่มีค่าน้อยที่สุดเป็น 0 ซึ่งจะไม่มีโอกาสในการถูกคัดเลือกเลย และเพิ่มความแตกต่างของค่าความแข็งแรงสมาชิกของประชากร จากภาพที่ 2-9 การปรับมาตรการค่าความแข็งแรงในช่วงหลังจะทำการเลื่อนกราฟเชิงเส้นของค่าความแข็งแรงขึ้น จนกระทั่งค่าความแข็งแรงของสมาชิกของประชากรตัวที่มีค่าต่ำสุดกลายเป็น 0



ภาพที่ 2-9 การปรับมาตรการความแข็งแรงแบบเชิงเส้นในรุ่นหลัง

การคำนวณค่าสัมประสิทธิ์ a และ b สำหรับการปรับมาตราเชิงเส้น (Linear Scaling) ที่กล่าวมาทั้งหมดสามารถสรุปเป็นรหัสเทียม ได้ดังภาพที่ 2-10

```

/* Linear Scaling */

If (f_min > (C_mult * f_avg - f_max) / (C_mult - 1.0)) {
    delta = f_max - f_avg;
    a = (C_mult - 1.0) * f_avg / delta;
    b = (f_avg * (f_max - C_mult * f_avg) / delta;
} else {
    delta = f_avg - f_min;
    a = f_avg / delta;
    b = -f_min * f_avg / delta;
}

```

ภาพที่ 2-10 รหัสเทียมสำหรับการหาค่า a และ b สำหรับการปรับมาตราความแข็งแรง

สำหรับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมถูกพัฒนาขึ้น โดย Potter และ De Jong (1994) เป็นการสำรวจพื้นที่การค้นหาโดยการใช้ประชากรให้เป็นประโยชน์ ซึ่งประกอบด้วยสมาชิกของสปีชีส์หรือสมาชิกของประชากร (Subpopulation) สมาชิกจากสปีชีส์เดียวกันจะเป็นตัวแทนของตัวแปรตัดสินใจ 1 ตัวแปรหรือตัวแปรตัดสินใจจาก 1 ส่วนของปัญหา สมาชิกที่มาจากสปีชีส์ที่ต่างกันจะเป็นตัวแทนของตัวแปรตัดสินใจคนละตัวแปร ดังนั้นในการหาค่าความแข็งแรงของสมาชิก 1 ตัวทำได้โดยการดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจ เพื่อให้เกิดคำตอบที่มีตัวแปรตัดสินใจครบตามลักษณะปัญหา ในการดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมนั้นอาจมาจากการสุ่มภายในสปีชีส์ ดังภาพที่ 2-12 หรือการเลือกจากสมาชิกที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์ก็ได้ ดังภาพที่ 2-13 และในส่วนอื่นๆกระบวนการทำงานจะใช้หลักการเดียวกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดังภาพที่ 2-11

```

/* Cooperative Coevolutionary Algorithm */

gen = 0;
for (each species){
    pops(gen) = randomly initialised population
    evaluate fitness of each individual in pops(gen);
}
termination condition = false;
while (termination condition == false){
    gen = gen+1;
    for (each species){
        select pops(gen) from pops(gen-1) based on fitness;
        apply genetic operator to pops(gen);
        evaluate fitness of each individual in pops(gen);
    }
    If ( gen == maximum number of generations || the solution has
converged) {
        termination condition = true;
    }
}

```

ภาพที่ 2-11 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วม

Individual 1	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
Individual 2	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆
Individual 3	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆
Individual 4	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	X ₄₅	X ₄₆
Individual 5	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	X ₅₅	X ₅₆

$f_{33} = f(x_{21}, x_{42}, x_{33}, x_{24}, x_{55}, x_{36})$

ภาพที่ 2-12 การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการสุ่ม

Individual 1	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆
Individual 2	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆
Individual 3	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆
Individual 4	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	X ₄₅	X ₄₆
Individual 5	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	X ₅₅	X ₅₆

$f_{11} = f(x_{11}, x_{12}, x_{43}, x_{24}, x_{35}, x_{56})$

ภาพที่ 2-13 การดึงสมาชิกจากสปีชีส์อื่นมารวมกับสมาชิกตัวที่สนใจโดยการเลือกจากสมาชิกที่มีค่าความแข็งแรงสูงสุดในสปีชีส์

2.3 การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์โดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

การหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์นั้นคือความพยายามในการหาค่าฟังก์ชันจุดประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดจากหลายฟังก์ชันพร้อมกัน โดยที่ฟังก์ชันเหล่านี้มีลักษณะการให้ค่าที่ขัดแย้งกัน โดยอาศัยหลักการคิดค่าความแข็งแรงเป็นเกณฑ์ในการแบ่ง

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA) จะใช้การจัดลำดับที่แบบพารेटอ (Pareto Ranking Approach) ในการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าจุดประสงค์และค่าความแข็งแรงนอกเหนือจากการใช้ตัวดำเนินการเชิงพันธุกรรมพื้นฐานแล้ว สิ่งที่ต้องทำการพิจารณาเป็นพิเศษในกรณีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ได้แก่ การจัดลำดับที่ (Ranking) การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment) การแบ่งค่าความแข็งแรง (Fitness Sharing) และการจำกัดการผสมพันธุ์ (Mating Restriction)

2.3.1 การจัดลำดับที่แบบพารेटอ (Pareto Ranking Approach)

ในกรณีของการจัดลำดับที่แบบพารेटอ เป้าหมายของการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดก็คือ การหาเซตของผลเฉลยซึ่งมีค่าจุดประสงค์ที่เหมาะสมที่สุดแบบพารेटอ (Pareto Optimal) ผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดแบบพารेटอนั้นจะมีลักษณะเป็นผลเฉลยที่ไม่ถูกข่ม (Non-dominated Solution) สำหรับกรณีปัญหาการหาค่าต่ำที่สุด ผลเฉลย x จะข่ม (Dominate) ผลเฉลย y หรือ $x < p y$ ก็ต่อเมื่อเงื่อนไขต่อไปนี้เป็นจริง

$$(x < p y) \leftrightarrow (\forall, i)(x_i \leq y_i) \wedge (\exists, i)(x_i < y_i), i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2-4)$$

โดยที่ x และ y เป็นเวกเตอร์ค่าจุดประสงค์ โดยอาศัยการระบุว่าผลเฉลยซึ่งแทนโดยสมาชิกของประชากรในรุ่นหนึ่งมีลักษณะเป็นผลเฉลยที่ไม่ถูกข่มหรือไม่ สมาชิกของประชากรก็จะสามารถถูกจัดลำดับที่ (Ranking) ได้ ซึ่งนำไปสู่ความสามารถในการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับสมาชิกของประชากร ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมชนิดหนึ่งซึ่งอาศัยหลักการนี้คือขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

2.3.2 การจัดลำดับที่ (Ranking)

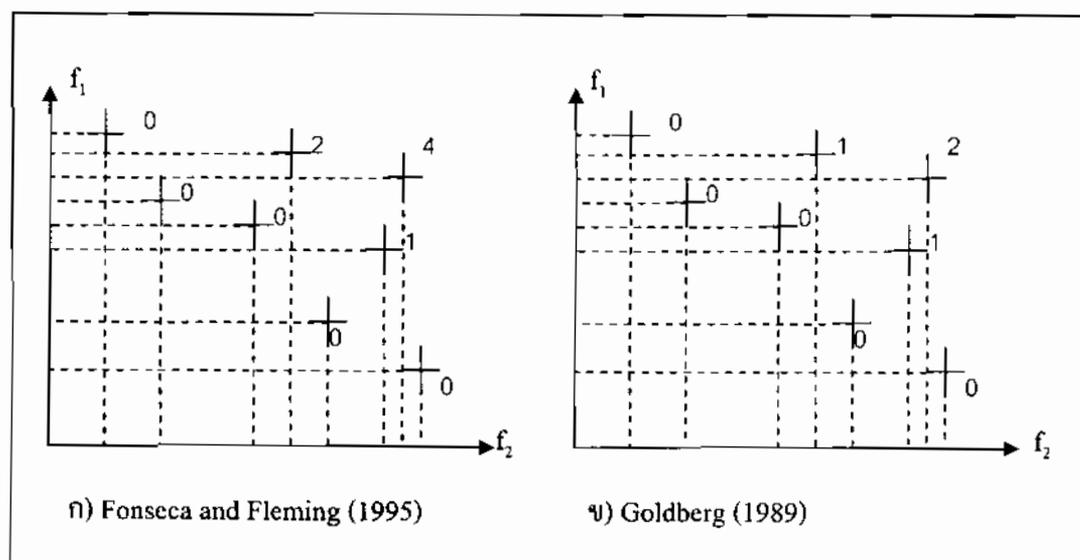
การจัดลำดับที่จะอาศัยการพิจารณาว่าสมาชิกของประชากรในแต่ละรุ่นมีการข่มกันหรือไม่ ลำดับที่ของสมาชิกจะสามารถถูกกำหนดได้ Fonseca and Fleming (1995) ได้เสนอว่าลำดับที่ของสมาชิกตัวที่สนใจจะเท่ากับจำนวนของสมาชิกในประชากรที่สามารถข่มมันได้หรือ

$$\text{Rank}(x, t) = p_i^{(t)} \quad (2-5)$$

โดยที่ x_i คือสมาชิก i ของประชากร t คือลำดับรุ่น และ $p_i^{(t)}$ คือจำนวนของสมาชิกในรุ่นที่ t ที่สามารถข่มสมาชิก x_i ได้ สมาชิกของประชากรที่ไม่ถูกข่ม (Non-dominated Individual) จึงมีลำดับที่เป็นศูนย์ซึ่งเป็นลำดับที่สูงที่สุด เมื่อทำการระบุลำดับที่ได้แล้วการกำหนดค่าความแข็งแรงให้กับ

สมาชิกก็สามารถทำได้โดยการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยเริ่มจากสมาชิกตัวที่แข็งแรงที่สุดไปสู่สมาชิกตัวที่แย่มากที่สุด

นอกจากการจัดลำดับที่ตามรูปแบบที่กล่าวข้างต้น Goldberg (1989) ได้เสนออีกวิธีการหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ในการจัดลำดับที่ได้ โดยให้เริ่มจากการกำหนดให้ลำดับที่ของสมาชิกของประชากรที่ไม่ถูกข่มมีค่าเป็นศูนย์ จากนั้นให้ดึงสมาชิกเหล่านี้ออกจากประชากรจากนั้นให้หาสมาชิกของประชากรที่ไม่ถูกข่มจากประชากรในส่วนที่เหลือ สมาชิกของประชากรที่ไม่ถูกข่มกลุ่มใหม่นี้จะมีค่าลำดับที่เป็น 1 กระบวนการดึงสมาชิกออกจากประชากรและหาสมาชิกของประชากรที่ไม่ถูกข่มจะถูกทำซ้ำจนกระทั่งสมาชิกทุกตัวในประชากรได้รับการกำหนดลำดับที่ ภาพที่ 2-14 แสดงข้อแตกต่างระหว่างการหาลำดับที่ของสมาชิกตามที่เสนอโดย Fonseca and Fleming (1995) และ Goldberg (1989) สำหรับกรณีปัญหาการหาค่าต่ำสุดแบบสองจุดประสงค์



ภาพที่ 2-14 ข้อแตกต่างระหว่างการจัดลำดับที่ตามที่เสนอโดย Fonseca and Fleming (1995) และ Goldberg (1989)

นอกจากการใช้สมการที่ (2-4) ในการระบุลักษณะการถูกข่มของสมาชิกโดยตัวอื่น Fonseca and Fleming (1995) ได้เสนอวิธีการนำการทำได้ตามเป้าหมาย (Goal Attainment) มาใช้ร่วมกับการระบุลักษณะการถูกข่มของสมาชิก โดยเป้าหมายจะระบุขอบเขตของค่าจุดประสงค์ที่ต้องการตามลักษณะของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์ที่สนใจ การปรับการระบุลักษณะการถูกข่มดังกล่าวสามารถอธิบายได้ดังนี้

สมมติให้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดเป็นปัญหาการหาค่าต่ำสุด พิจารณาเวกเตอร์จุดประสงค์ (Objective Vector) ขนาด q มิติ 2 เวกเตอร์ คือ $y_a = (y_{a,1}, y_{a,2}, y_{a,3}, \dots, y_{a,q})^T$ และ $y_b = (y_{b,1}, y_{b,2}, y_{b,3}, \dots, y_{b,q})^T$ และเวกเตอร์เป้าหมาย (Gold Vector) $g = (g_1, g_2, g_3, \dots, g_q)^T$ ถ้าส่วนประกอบจำนวน $q-k$ ส่วนของเวกเตอร์ y_a เป็นไปตามเป้าหมาย ส่วนประกอบของ y_a จะสามารถเขียนในรูปของสมการที่ 2-6

$$\exists k = 1, \dots, q-1 : \forall i = 1, \dots, k, \forall j = k+1, \dots, q, (y_{a,i} > g_i) \wedge (y_{a,j} \leq g_j) \quad (2-6)$$

ซึ่งสมมติให้ส่วนประกอบของเวกเตอร์จุดประสงค์สามารถเรียงสับเปลี่ยนได้ตามสมการที่ (2-6) จะสามารถกล่าวได้ว่าเวกเตอร์ y_a ช่มเวกเตอร์ y_b ถ้าหนึ่งเงื่อนไขนี้เป็นจริง

$$\left. \left((y_{a,(1..k)} < p y_{b,(1..k)}) \vee \left((y_{a,(1..k)} = y_{b,(1..k)}) \wedge \left[(y_{a,(k+1..q)} < p y_{b,(k+1..q)}) \vee \sim (y_{b,(k+1..q)} \leq g_{(k+1..q)}) \right] \right) \right\} \text{สำหรับ } 0 < k < q$$

$$y_a < p y_b \quad \text{สำหรับ } k=q$$

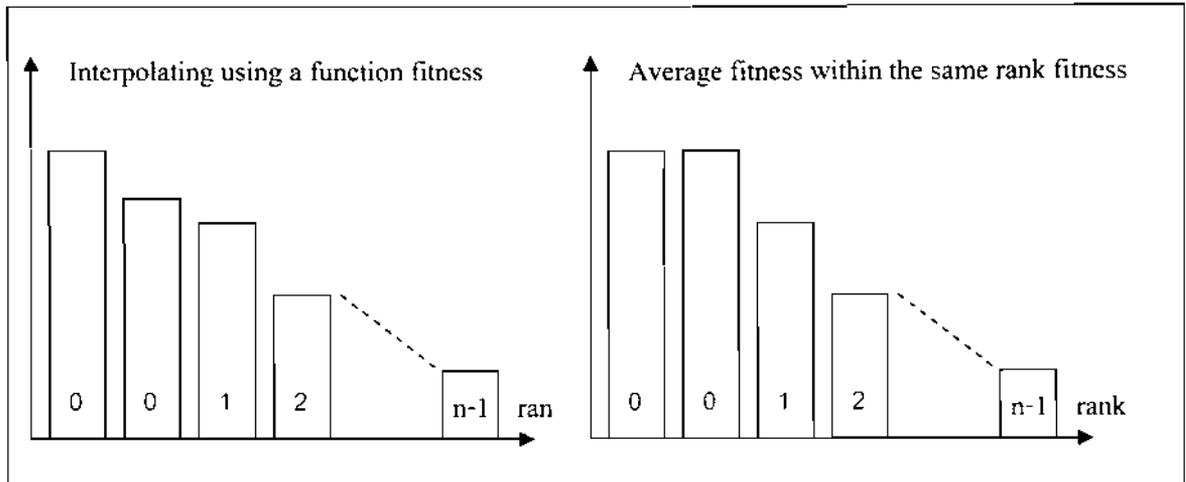
$$\text{และ} \quad (y_a < p y_b) \vee \sim (y_b \leq g) \quad \text{สำหรับ } k=0$$

(2-7)

จะเห็นว่าเงื่อนไขในสมการที่ (2-7) สามารถใช้ได้กับการจัดลำดับที่ซึ่งเสนอโดย Goldberg (1989) ด้วย

2.3.3 การกำหนดค่าความแข็งแรง (Fitness Assignment)

หลังจากที่ได้กำหนดค่าลำดับที่ให้กับสมาชิกแต่ละตัวแล้ว สมาชิกจะถูกจัดเรียงจากลำดับที่สูงสุดไปสู่ลำดับที่ต่ำสุด จากนั้นฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) จะถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าในช่วงค่าความแข็งแรงของสมาชิก แล้วสิ้นสุดด้วยการเฉลี่ยค่าความแข็งแรงระหว่างสมาชิกที่มีค่าลำดับที่เท่ากัน ภาพที่ 2-15 แสดงการกำหนดค่าความแข็งแรงโดยใช้การประมาณค่าในช่วงซึ่งใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น



ภาพที่ 2-15 แสดงการกำหนดค่าความแข็งแรงโดยใช้การประมาณค่าในช่วงซึ่งใช้ฟังก์ชันเชิงเส้น

2.3.4 การแบ่งค่าความแข็งแรง (Fitness Sharing)

การแบ่งค่าความแข็งแรงจะถูกนำมาใช้เมื่อปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดมีลักษณะเป็นปัญหาแบบหลายโหนด (Multi-model Optimisation Problem) เมื่อมีการแบ่งค่าความแข็งแรง ค่าความแข็งแรงของสมาชิกของประชากรจะถูกทำให้ลดลงถ้าสมาชิกที่สนใจอยู่ห่างจากสมาชิกตัวอื่นเป็นระยะที่น้อยกว่า รัศมีการแบ่ง (Sharing Radius) หรือ σ_{share} การแบ่งค่าความแข็งแรงทำให้ประชากรสามารถแบ่งออกเป็นประชากรย่อย (Sub-population) โดยที่ประชากรย่อยแต่ละกลุ่มจะอยู่ในส่วนยอด (Peak) ของพื้นที่ความแข็งแรง (Fitness Landscape) ในกรณีของการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์ เป้าหมายของการค้นหาผลเฉลยก็คือการสร้างประชากรย่อยในปริภูมิจุดประสงค์ (Objective Space) ซึ่งมีผลเฉลยที่มีลักษณะเหมาะสมที่สุดแบบพารेटอ ซึ่งบริเวณในปริภูมิจุดประสงค์ดังกล่าวเรียกว่าขอบพารेटอ (Pareto Front) เนื่องจากขอบพารेटอเป็นบริเวณในปริภูมิจุดประสงค์ การแบ่งค่าความแข็งแรงในกรณีของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์จึงสามารถทำได้โดยพิจารณาระยะห่างระหว่างสมาชิกในปริภูมิจุดประสงค์

หลังจากที่หาค่าจุดประสงค์ของสมาชิกทุกตัวได้แล้ว ค่าสูงสุดของแต่ละค่าจุดประสงค์จากสมาชิกของประชากรก็จะสามารถหาได้ ค่าสูงสุดของค่าจุดประสงค์จะถูกนำมาใช้ในการทำให้ค่าจุดประสงค์ของสมาชิกทุกตัวอยู่ในรูปแบบบรรทัดฐาน (Normal Objective Value) ค่าสูงสุดและค่าสุดของค่าจุดประสงค์แบบบรรทัดฐานจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปเวกเตอร์ได้ดังนี้

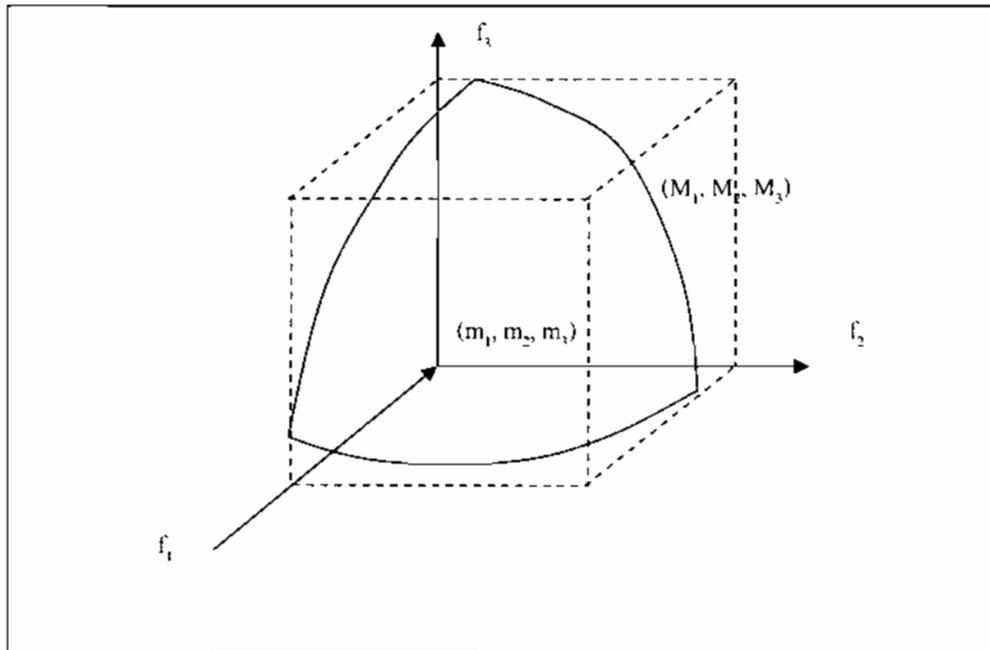
$$m = (\min y_p, \dots, \min y_q) = (m_p, \dots, m_q)$$

$$\text{และ} \quad M = (\max y_p, \dots, \max y_q) = (M_p, \dots, M_q) \quad (2-8)$$

โดยที่ $y = (y_1, y_2, y_3, \dots, y_q)^T$ และ m เป็นเวกเตอร์ของค่าจุดประสงค์แบบบรรทัดฐานสูงสุด (Maximum Normalised Objective Value Vector) ในขณะที่ M เป็นเวกเตอร์ของค่าจุดประสงค์แบบบรรทัดฐานต่ำสุด (Minimum Normalised Objective Value Vector) เวกเตอร์ m และ M จะสามารถนำมาใช้ในการสร้างลูกบาศก์เกิน (Hyper-Cube) ใน q มิติ ดังภาพที่ 2-16

จากภาพที่ 2-16 จะเห็นได้ว่าขอบพาราโตในปริภูมิจุดประสงค์แบบบรรทัดฐาน (Normalised Objective Space) จะมีขนาดเล็กกว่าผิวเกิน (Hyper-surface) A ซึ่งมีขนาดตามสมการที่ (2-9)

$$A = \sum_{i=1}^q \prod_{j=1, j \neq i}^q (M_j - m_j) \quad (2-9)$$



ภาพที่ 2-16 ลูกบาศก์เกินในสามมิติและขอบพาราโต

เพื่อเป็นการสร้างประชากรย่อยที่ขอบพาราโต ผิวเกิน A จะถูกนำมาใช้ในการประมาณขนาดของขอบพาราโตและใช้ในการคำนวณค่ารัศมีการแบ่งได้ดังนี้

$$N = \frac{\prod_{i=1}^q (M_i - m_i + \sigma_{\text{share}}) - \prod_{i=1}^q (M_i - m_i)}{\sigma_{\text{share}}^q} \quad (2-10)$$

โดยที่ N คือ ขนาดของประชากร การแบ่งค่าความแข็งแรงจะกระทำก็ต่อเมื่อสมาชิกสองตัวอยู่ห่างกันเป็นระยะน้อยกว่ารัศมีการแบ่งและมีลำดับที่เดียวกันเท่านั้น

2.3.5 การจำกัดการผสมพันธุ์ (Mating Restriction)

เนื่องจากการแบ่งค่าความแข็งแรงได้ถูกกำหนดให้กระทำโดยพิจารณาระยะระหว่างสมาชิกในปริภูมิจุดประสงค์แบบบรรทัดฐาน การจำกัดการผสมพันธุ์จึงควรกระทำโดยพิจารณาระยะระหว่างสมาชิกในปริภูมิเดียวกันโดยที่รัศมีการจำกัดการผสมพันธุ์ (Mating Restriction Radius) หรือ σ_{share} ก็สามารถจัดให้เท่ากับรัศมีการแบ่งได้ การครอสโอเวอร์จะเกิดขึ้นระหว่างสมาชิกสองตัวได้ก็ต่อเมื่อระยะระหว่างสมาชิกมีค่าไม่เกินรัศมีการจำกัดการผสมพันธุ์

```

/*Multi Objective Genetic Algorithm*/
initialise a set of random individuals;

for (i=0;i< Max generation; i++){
    goal_ranking;
    assign_fitness;
    fitness_sharing;
    selection;
    crossover_with_restriction;
    mutation;
}

```

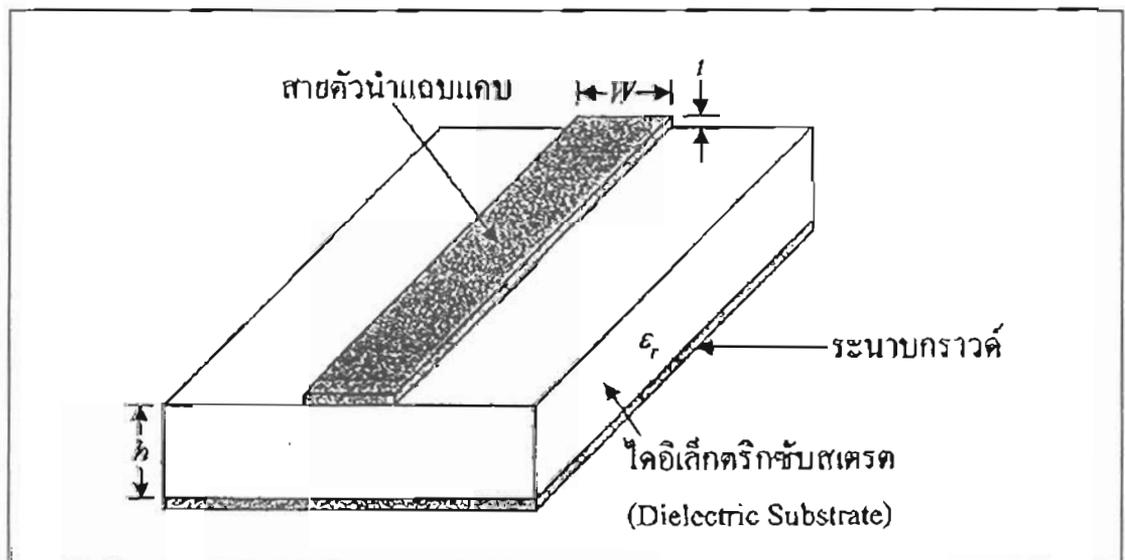
ภาพที่ 2-17 แสดงขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

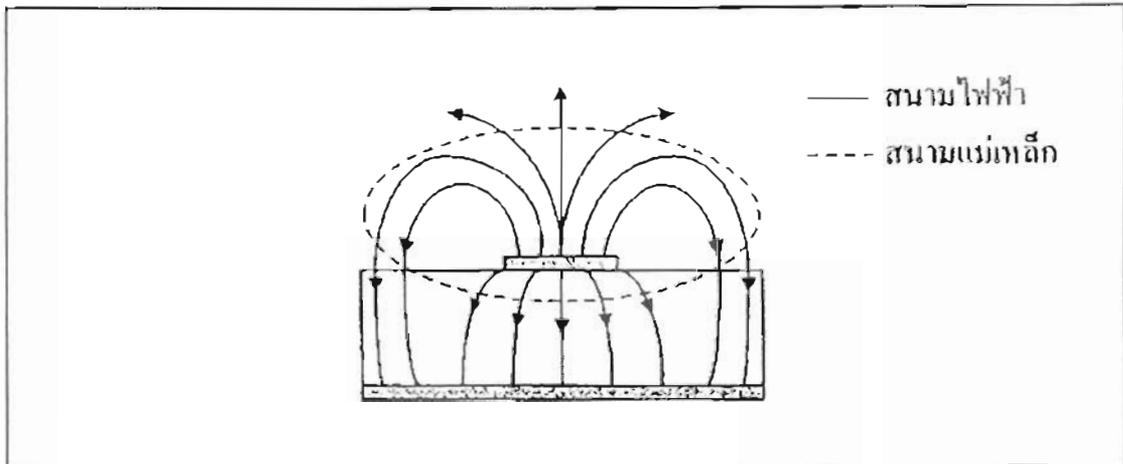
3.1 บทนำ

ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้วงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปให้สามารถกรองผ่านแถบความถี่กว้างได้ โดยทั่วไปคุณสมบัติของสายสัญญาณแบบไมโครสตริปจะมีค่าความสูญเสียที่ไม่เท่ากันตลอดทุกค่าความถี่ จึงทำให้เกิดแนวความคิดในการพัฒนาวงจรกรองผ่านแถบแบบไมโครสตริปเส้นคู่ให้มีคุณสมบัติการกรองผ่านแถบความถี่กว้างให้ดีขึ้น

3.2 สายนำสัญญาณไมโครสตริป



ภาพที่ 3-1 ลักษณะ โครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป



ภาพที่ 3-2 รูปแบบการแพร่กระจายสนามของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

สายนำสัญญาณไมโครสตริป (Guillermo, 1997) เป็นสายนำสัญญาณที่ประกอบด้วยสายตัวนำแถบแคบและระนาบกราวด์ซึ่งอยู่ระหว่างตัวกลางไดอิเล็กตริกโดยลักษณะโครงสร้างจะแสดงในภาพที่ 3-1 ส่วนในภาพที่ 3-2 แสดงในรูปแบบการแพร่กระจายสนามโดยเส้นทึบเป็นเส้นของสนามไฟฟ้าและเส้นประเป็นเส้นของสนามแม่เหล็ก

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ (Relative Dielectric Constant) ของฉาบสเตรด (Substrate) ϵ_r มีค่าที่สัมพันธ์กับค่า ϵ โดย $\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0$ เมื่อ $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m ตัวอย่างค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของฉาบสเตรดของ RT/Duroid ที่มีใช้ เช่น $\epsilon_r = 2.23 \epsilon_0$, $\epsilon_r = 10.5 \epsilon_0$ เป็นต้น ส่วนของวัสดุประเภทอื่นเช่น ควอร์ตซ์ ($\epsilon_r = 3.7 \epsilon_0$), อะลูมินา ($\epsilon_r = 9 \epsilon_0$) เป็นต้น

ลักษณะเส้นทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปไม่ได้อยู่ภายในฉาบสเตรดดังแสดงในภาพที่ 3-2 ดังนั้นรูปแบบการแพร่กระจายของสนามแม่เหล็กไฟฟ้าในไมโครสตริปจึงไม่ใช่รูปแบบแม่เหล็กไฟฟ้าตัดขวางแท้ (TEM mode) แต่คล้าย TEM สมมติการแพร่กระจายคล้ายรูปแบบ TEM ในสายไมโครสตริปจะมีค่าความเร็วเฟสเป็น (Guillermo, 1997)

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3-1)$$

เมื่อ c เป็นความเร็วของแสง (3×10^8 m/s) และ ϵ_{eff} เป็นค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ประสิทธิผล (Effective Relative Dielectric Constant) ของไมโครสตริปและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์

ประสิทธิภาพของไมโครสตริปมีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กตริกสัมพัทธ์ของ ไดอิเล็กตริก
 ชั้นสเตรตและก่อให้เกิดผลต่อสนามแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก

เมื่อ $Z_0 = \sqrt{L/C}$ และ $v_p = 1/\sqrt{LC}$ ดังนั้นอิมพีแดนซ์ลักษณะของสายไมโครสตริปสามารถ
 เขียนในรูปแบบ

$$Z_0 = \frac{1}{v_p C} \quad (3-2)$$

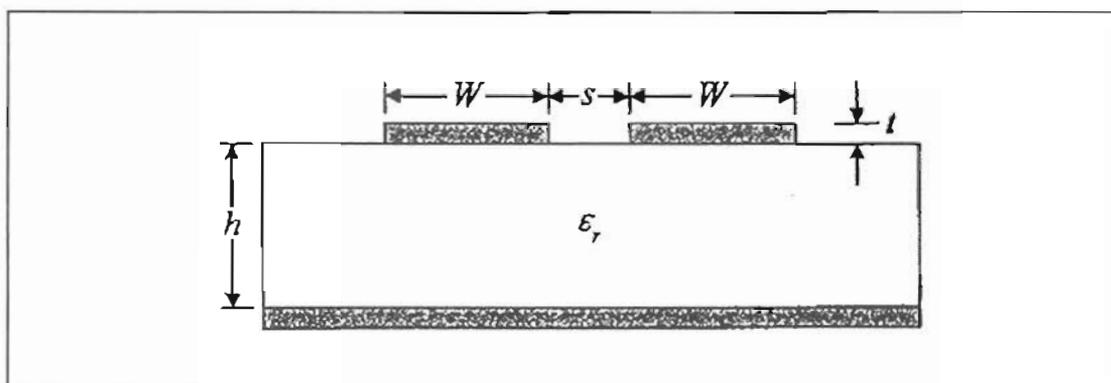
เมื่อ C เป็นค่าความจุต่อหน่วยความยาวของไมโครสตริป ความยาวคลื่นในสายไมโครสตริป
 กำหนดได้โดย

$$\lambda = \frac{v_p}{f} = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_{eff}}} = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (3-3)$$

เมื่อ λ_0 เป็นค่าความยาวคลื่นในอากาศว่าง

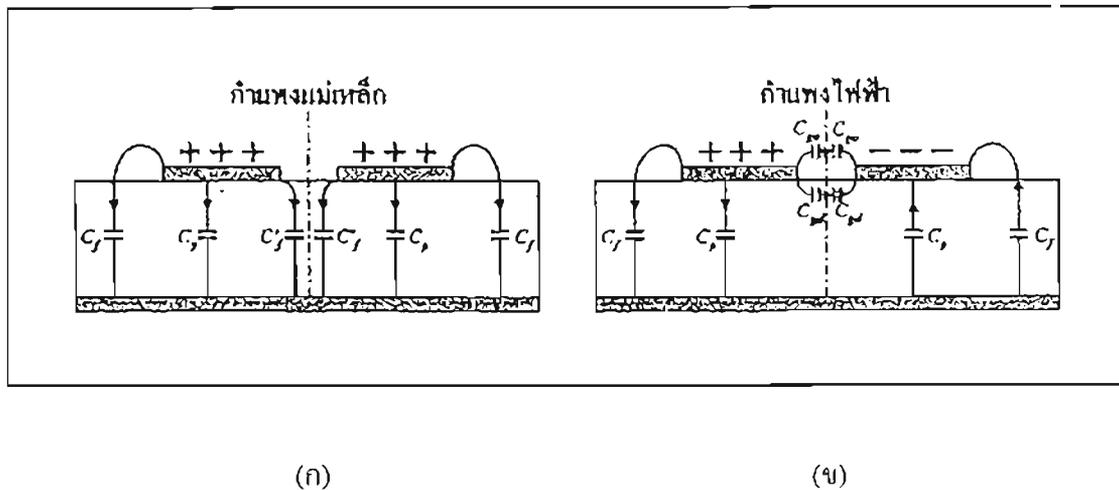
จากสมการ (3-1), (3-2) และ (3-3) เป็นสมการที่ใช้ในการคำนวณหาค่า v_p , Z_0 และ λ ของ
 สายไมโครสตริป (Guillermo, 1997) และถ้าต้องการคำนวณหาค่า ϵ_{eff} และ C แน่ใจว่ารูปแบบ
 ของสมการมีส่วนสำคัญในการออกแบบขนาดของสายไมโครสตริป ดังนั้นในการคำนวณหาค่า
 ϵ_{eff} และ C เป็นค่าพารามิเตอร์พื้นฐานสำหรับรูปแบบสนามแม่เหล็กไฟฟ้าคล้าย TEM

3.3 สายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่



ภาพที่ 3-3 ภาพตัดขวางของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่

สายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ (Hong and Jancadter, 2001) สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นวงจรกรองความถี่แบบ ไมโครสตริปได้ โดยในภาพที่ 3-3 แสดงด้านตัดขวางของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ ซึ่งประกอบด้วยสายนำสัญญาณแถบแคบที่วางอยู่บนชั้นไดอิเล็กตริกซัพสเตรต (Dielectric Substrate) ที่มีความกว้าง (W) เท่ากันทั้งสองเส้นโดยวางขนานกันซึ่งมีระยะห่าง (s) เป็นช่องว่างเชื่อมต่อกันและมีอากาศคั่นระหว่างกลางของสายนำสัญญาณเส้นคู่ ส่วนด้านล่างของชั้นไดอิเล็กตริกซัพสเตรต (Dielectric Substrate) จะเป็นระนาบกราวด์ของสายนำสัญญาณ ลักษณะการนำคลื่นจะเป็นลักษณะคล้าย TEM ซึ่งมีสองโหมด คือ โหมดคู่ (Even Mode) และโหมดคี่ (Odd Mode) ดังแสดงในภาพที่ 3-4



ภาพที่ 3-4 ลักษณะสนามคล้ายรูปแบบ TEM ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ (ก) โหมดคู่ (ข) โหมดคี่

ลักษณะการกระตุ้นในโหมดคู่ (Even Mode) จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกบนสายตัวนำแถบแคบทั้งสองเส้น ดังนั้นถ้าเกิดแต่ประจุบวกบนสายตัวนำแถบแคบแต่ละเส้นจะทำให้เกิดกำแพงแม่เหล็กคั่นระหว่างกลางสายตัวนำแถบแคบทั้งสองเส้นดังภาพที่ 3-4 (ก) ส่วนการกระตุ้นโหมดคี่ (Odd Mode) จะมีค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่เป็นบวกและลบบนสายตัวนำแถบแคบทั้งสองเส้น ดังนั้นถ้าเกิดประจุบวกและประจุลบบนสายตัวนำแถบแคบแต่ละเส้นจะทำให้เกิดกำแพงไฟฟ้าคั่นระหว่างกลางสายตัวนำแถบแคบทั้งสองเส้นดังแสดงในภาพที่ 3-4 (ข) และในกรณีทั่วไป ทั้งสองโหมดจะถูกกระตุ้นเป็นบางครั้ง อย่างไรก็ตามการแพร่กระจายของสนามในลักษณะนี้จะทำให้เกิดความเร็วเฟสที่แตกต่างกันเพราะว่าโหมดที่เกิดขึ้นจะไม่ใช่โหมด TEM จริง ซึ่งหมายความว่า

เส้นคู่จะมีคุณสมบัติของอิมพีแดนซ์คุณลักษณะที่ดีกว่าค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพสำหรับสองโหมด

3.3.1 ค่าความจุของโหมดคู่และโหมดคี่

ในการเข้าสู่สถานะสถิตคล้ายคลึงกับสายนำสัญญาณไมโครสตริปหนึ่งเส้น ซึ่งค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของโหมดคู่และโหมดคี่และค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิภาพของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่อาจถูกกำหนดในเทอมของค่าความจุโหมดคู่และโหมดคี่ (Hong and Lancaster, 2001) ซึ่งแทนด้วย C_c และ C_o ซึ่งแสดงในภาพที่ 3-4 ค่าความจุโหมดคู่ C_c และค่าความจุโหมดคี่ C_o สามารถกระจายในรูปของ

$$C_c = C_p + C_f + C'_f \quad (3-4)$$

$$C_o = C_p + C_f + C_{gd} + C_{ga} \quad (3-5)$$

เมื่อ C_p เป็นค่าความจุของแผ่นตัวนำระหว่างสายตัวนำแถบแคบกับระนาบกราวด์ที่วางขนานและค่าความจุหาได้จาก

$$C_p = \epsilon_0 \epsilon_r W / h \quad (3-6)$$

C_f เป็นค่าความจุบริเวณขอบแผ่นตัวนำไมโครสตริปเส้นเดียวที่ไม่เกิดการเชื่อมต่อกันซึ่งหาได้จาก

$$2C_f = \sqrt{\epsilon_{re}} / (cZ_0) - C_p \quad (3-7)$$

เทอมของ C'_f เป็นค่าความจุบริเวณขอบแผ่นตัวนำไมโครสตริปเส้นเดียวที่เกิดอยู่ระหว่างสายตัวนำอีกเส้นและค่าความจุหาได้จาก

$$C'_f = \frac{C_f}{1 + A(h/s) \tanh(8s/h)} \quad (3-8)$$

เมื่อ

$$A = \exp[-0.1 \exp(2.33 - 2.53W/h)]$$

สำหรับโหมคี่ ค่า C_{ga} เป็นค่าความจุบริเวณขอบแผ่นตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างร่อง s โดยมีอากาศเป็นตัวกลางและ C_{gd} เป็นค่าความจุบริเวณขอบแผ่นตัวนำที่เชื่อมต่อระหว่างร่อง s โดยมีชั้นไดอิเล็กทริกเป็นตัวกลาง ซึ่งค่าความจุ C_{gd} อาจเกิดจากรูปทรงของสายนำสัญญาณแถบแคบที่คล้ายกันประกอบกับช่องว่างระหว่างกราวด์กำหนดโดย $2h$ ดังนั้นสมการของ C_{gd} คือ

$$C_{gd} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\pi} \ln \left[\coth \left(\frac{\pi s}{4h} \right) \right] + 0.65 C_f \left(\frac{0.02 \sqrt{\epsilon_r}}{s/h} + 1 - \frac{1}{\epsilon_r} \right) \quad (3-9)$$

ค่าความจุ C_{ga} สามารถปรับเปลี่ยนได้จากค่าความจุที่สอดคล้องกับสายตัวนำแถบแคบระนาบร่วมและขยายในเทอมของอัตราส่วนของสองฟังก์ชันวงรี

$$C_{ga} = \epsilon_0 \frac{K(k')}{K(k)} \quad (3-10ก)$$

เมื่อ

$$k = \frac{s/h}{s/h + 2W/h} \quad (3-10ข)$$

$$k' = \sqrt{1 - k^2}$$

และอัตราส่วนของฟังก์ชันวงรีกำหนดได้โดย

$$\frac{K(k')}{K(k)} = \begin{cases} \frac{1}{\pi} \ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right) & ; 0 \leq k^2 \leq 0.5 \\ \frac{\pi}{\ln \left(2 \frac{1 + \sqrt{k'}}{1 - \sqrt{k'}} \right)} & ; 0.5 \leq k^2 \leq 1 \end{cases} \quad (3-10ค)$$

ค่าความจุกำหนดได้โดยใช้สมการข้างบนซึ่งใช้ในการออกแบบและพบว่ามีความถูกต้องภายใน 3% ถ้าเกินช่วง $0.2 \leq W/h \leq 2, 0.05 \leq s/h \leq 2$ และ $\epsilon_r \geq 1$

3.3.2 อิมพีแดนซ์คุณลักษณะและค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของโหมคคู่และโหมคเดี่ยว อิมพีแดนซ์คุณลักษณะของโหมคคู่ Z_{0e} และโหมคเดี่ยว Z_{0o} สามารถหาได้จากค่าความจุคือ (Hong and Jancadter, 2001)

$$Z_{0e} = \left(c \sqrt{C_e^o C_e} \right)^{-1} \quad (3-11)$$

$$Z_{0o} = \left(c \sqrt{C_o^a C_o} \right)^{-1} \quad (3-12)$$

ค่าคงตัวไดอิเล็กตริกประสิทธิผลของโหมคคู่ ϵ_{re}^e และโหมคเดี่ยว ϵ_{re}^o สามารถหาได้จาก C_e และ C_o โดยใช้ความสัมพันธ์

$$\epsilon_{re}^e = C_e / C_e^a \quad (3-13)$$

และ

$$\epsilon_{re}^o = C_o / C_o^a \quad (3-14)$$

เมื่อ C_e^a เป็นค่าความจุของโหมคคู่และ C_o^a เป็นค่าความจุของของโหมคเดี่ยวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ที่มีอากาศเป็นไดอิเล็กตริก

3.3.3 อิมพีแดนซ์และสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ ค่าสัมประสิทธิ์การเชื่อมต่อ k ระหว่างสายไมโครสตริปเส้นคู่สามารถคำนวณได้จาก (Adam, 1995: 1389-1392)

$$k = \frac{Z_{0e} - Z_{0o}}{Z_{0e} + Z_{0o}} \quad (3-15)$$

ค่าอิมพีแดนซ์ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่เมื่อนำมาเชื่อมต่อ Z สามารถหาได้จาก

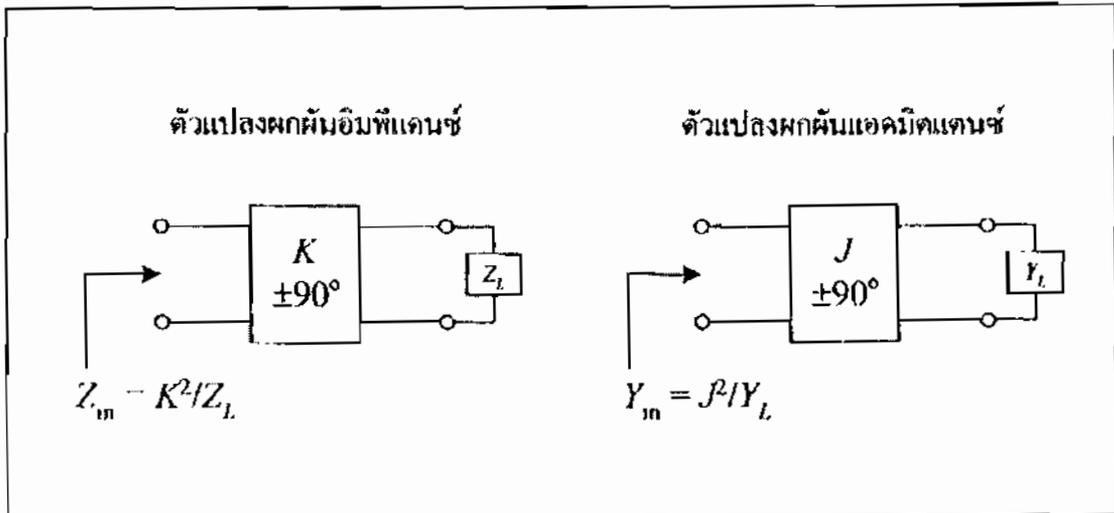
$$Z = \sqrt{Z_{0e} Z_{0o}} \quad (3-16)$$

จากสมการที่ (3-15) และ (3-16) สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของโหมคคู่และโหมคเดี่ยวได้

$$Z_{0e} = Z \sqrt{\frac{1+k}{1-k}} \quad (3-17ก)$$

$$Z_{oo} = Z \sqrt{\frac{1-k}{1+k}} \quad (3-17\text{ก})$$

3.4 ตัวแปลงผกผันอิมพีแดนซ์และตัวแปลงผกผันแอดมิตแตนซ์



ภาพที่ 3-5 ตัวแปลงผกผันอิมพีแดนซ์และตัวแปลงผกผันแอดมิตแตนซ์

ตัวแปลงผกผันอิมพีแดนซ์ (Impedance Inverter) ในทางอุดมคติเป็นวงจรสองทางเข้าออกที่มีคุณสมบัติเพียงหนึ่งเดียวที่ทุกความถี่และสามารถแปลงโหลดอิมพีแดนซ์ Z_L ให้เหมาะสมกับค่าอิมพีแดนซ์ด้านเข้า Z_{in} ดังแสดงในภาพที่ 3-5 โดยที่ K เป็นค่าจำนวนจริงซึ่งเป็นอิมพีแดนซ์คุณลักษณะของตัวแปลงผกผัน โดยทั่วไปตัวแปลงผกผันอิมพีแดนซ์จะเรียกว่า ตัวแปลงผกผัน K สามารถเขียนในรูปของ $ABCD$ เมตริกซ์ได้เป็น (Hong and Ilancadter, 2001)

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mu jK \\ -\frac{1}{\pm jK} & 0 \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

ในทำนองเดียวกันตัวแปลงผกผันแอดมิตแตนซ์ (Admittance Inverter) ในทางอุดมคติเป็นวงจรสองทางเข้าออกที่มีคุณสมบัติเพียงหนึ่งเดียวที่ทุกความถี่และสามารถแปลงโหลดแอดมิตแตนซ์ Y_L ให้เหมาะสมกับค่าแอดมิตแตนซ์ด้านเข้า Y_{in} ดังแสดงในภาพที่ 3-5 โดยที่

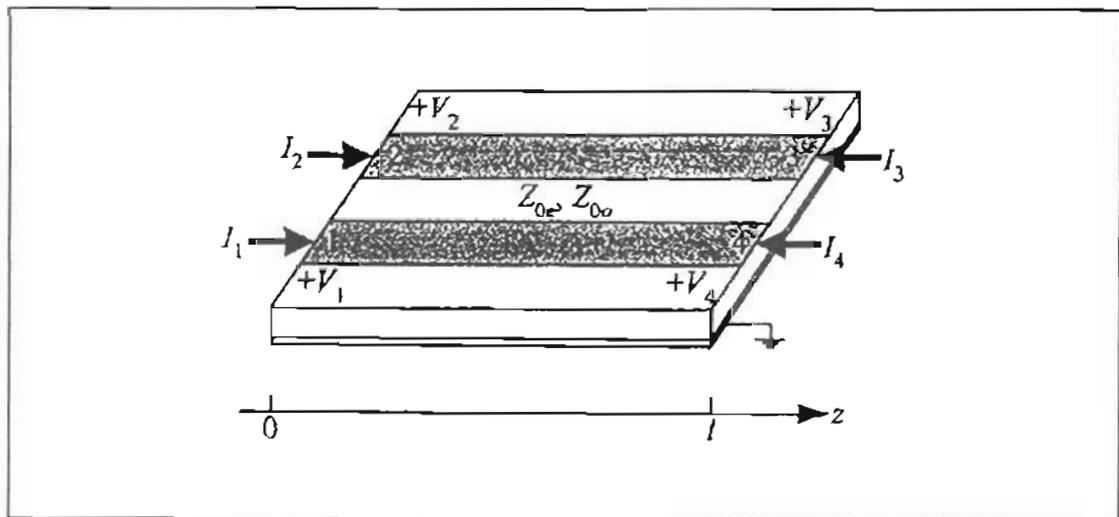
J เป็นค่าจำนวนจริงซึ่งเป็นแอดมิตแดนซ์คุณลักษณะของตัวแปลงผกผัน โดยทั่วไปตัวแปลงผกผันแอดมิตแดนซ์จะเรียกว่า ตัวแปลงผกผัน J สามารถเขียนในรูปของ $ABCD$ เมตริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \mp jJ & 0 \end{bmatrix} \quad (3-19)$$

3.5 วงจรกรองแบบเส้นคู่

สายนำสัญญาณแบบเส้นคู่สามารถนำไปสร้างเป็นวงจรกรองได้หลายแบบ การสร้างวงจรกรองผ่านแถบแบบเส้นคู่ (Pozar, 1990) สามารถทำได้ง่ายโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงสร้างแบบไมโครสตริปในการเพิ่มแบนด์วิดท์การกรองสัญญาณผ่านแถบของวงจรกรองแบบเส้นคู่ทำได้โดยให้ระยะห่างของสายนำสัญญาณทั้งสองเส้นให้มีระยะที่ชิดกันมากที่สุดซึ่งทำได้ยากมากในการสร้าง การศึกษาคุณสมบัติการกรองของวงจรกรองแบบเส้นคู่เริ่มจากการหาคุณสมบัติการกรองของวงจรกรองแบบเส้นคู่ที่มีความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (Quarter-Wave) หนึ่งชุดและจากนั้นจะเป็นการนำวงจรกรองแต่ละชุดไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ

3.5.1 คุณสมบัติการกรองของสายไมโครสตริปคู่ขนาน



ภาพที่ 3-6 ส่วนของสายคู่ขนานประกอบด้วยทางเข้าออกแรงดันและทิศทางกระแส

สายไมโครสตริปคู่ขนานหนึ่งชุดแสดงในภาพที่ 3-6 ประกอบด้วยทางเข้าออกแรงดันและกระแส ซึ่งพิสูจน์ด้วยเมตริกซ์อิมพีแดนซ์วงจรเปิดสำหรับทางเข้าออกของโครงข่ายสี่ทิศทางโดยทำ

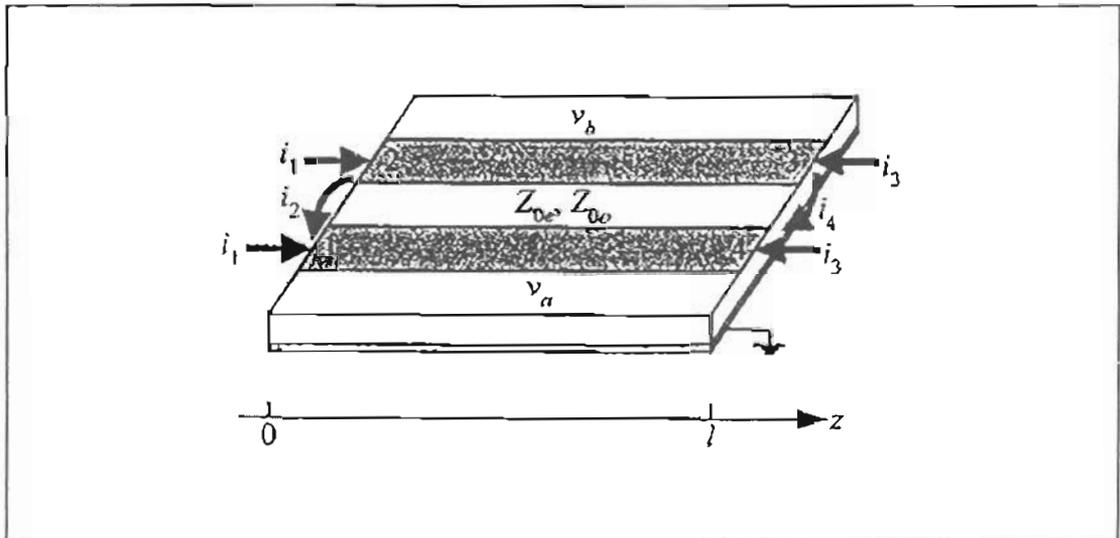
การพิจารณาการทับซ้อนสภาวะที่ถูกกระตุ้นแบบโหมดคู่ (Even Mode) และแบบโหมดคี่ (Odd Mode) ซึ่งจะแสดงในภาพที่ 3-7 ดังนั้น แหล่งจ่ายกระแส i_1 และ i_3 ที่เคลื่อนที่ตามสายแบบโหมดคู่ ขณะที่ i_2 และ i_4 ที่เคลื่อนที่ตามสายแบบโหมดคี่ โดยวิธีการทับซ้อนกระแสจะเป็นการมองกระแสทางเข้าออกทั้งหมด I_1 สามารถที่จะเขียนในเทอมของกระแสแบบโหมดคู่และโหมดคี่ดังนี้

$$I_1 = i_1 + i_2 \quad (3-20ก)$$

$$I_2 = i_1 - i_2 \quad (3-20ข)$$

$$I_3 = i_3 - i_4 \quad (3-20ค)$$

$$I_4 = i_3 + i_4 \quad (3-20ง)$$



ภาพที่ 3-7 ส่วนของสายคู่ขนานประกอบด้วยแหล่งจ่ายกระแสโหมดคู่และโหมดคี่

อันดับแรกทำการพิจารณากระแสที่เคลื่อนที่ตามสายแบบโหมดคู่โดยแหล่งจ่ายกระแส i_1 ถ้าทางเข้าออกอื่นเป็นวงจรเปิดดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่มองเข้าพอร์ต 1 หรือ 2 คือ (Pozar, 1990)

$$Z_{in}^e = -jZ_{0e} \cot \beta l \quad (3-21)$$

แรงดันบนตัวนำแต่ละตัวสามารถที่จะแสดงในรูปของ

$$\begin{aligned} v_a^1(z) = v_b^1(z) &= V_e^+ [e^{-j\beta(z-l)} + e^{j\beta(z-l)}] \\ &= 2V_e^+ \cos \beta(l-z) \end{aligned} \quad (3-22)$$

ดังนั้นแรงดันที่ทางเข้าออก 1 หรือ 2 คือ

$$v_a^1(0) = v_b^1(0) = 2V_e^+ \cos \beta l = i_1 Z_m^e$$

ผลลัพธ์ที่ได้นี้และสมการ (3-21) สามารถนำไปใช้ในการเขียนสมการที่ (3-22) ในเทอมของ i_1 คือ

$$v_a^1(z) = v_b^1(z) = -jZ_{0e} \frac{\cos \beta(l-z)}{\sin \beta l} i_1 \quad (3-23)$$

ในทำนองเดียวกัน แรงดันระหว่างแหล่งจ่ายกระแส i_3 เคลื่อนที่ตามสายในลักษณะโหมคคือ

$$v_a^3(z) = v_b^3(z) = -jZ_{0e} \frac{\cos \beta z}{\sin \beta l} i_3 \quad (3-24)$$

ทำการพิจารณากระแสที่ไหลตามสายในลักษณะโหมคคือโดยทิศทางกระแส i_2 ถ้าทางเข้าออกอื่นเป็นวงจรเปิดและอิมพีแดนซ์ที่มองเข้าพอร์ต 1 หรือ 2 คือ

$$Z_m^o = -jZ_{0o} \cot \beta l \quad (3-25)$$

แรงดันบนตัวนำแต่ละตัวสามารถที่จะแสดงในรูปของ

$$\begin{aligned} v_a^2(z) = -v_b^2(z) &= 2V_o^+ [e^{-j\beta(z-l)} + e^{j\beta(z-l)}] \\ &= 2V_o^+ \cos \beta(l-z) \end{aligned} \quad (3-26)$$

ดังนั้นแรงดันที่ทางเข้าออก 1 หรือ 2 คือ

$$v_a^2(0) = -v_b^2(0) = 2V_o^+ \cos \beta l = i_2 Z_m^o$$

ผลลัพธ์ที่ได้นี้และสมการที่ (3-25) สามารถนำไปใช้ในการเขียนสมการที่ (3-26) ในเทอมของ i_2 คือ

$$v_a^2(z) = -v_b^2(z) = -jZ_{0e} \frac{\cos \beta(l-z)}{\sin \beta l} i_2 \quad (3-27)$$

ในทำนองเดียวกัน แรงดันระหว่างแหล่งจ่ายกระแส i_4 เคลื่อนที่ตามสายในลักษณะโหนดก็คือ

$$v_a^4(z) = -v_b^4(z) = -jZ_{0o} \frac{\cos \beta z}{\sin \beta l} i_4 \quad (3-28)$$

ดังนั้นแรงดันทั้งหมดที่ทางเข้าออก 1 คือ

$$\begin{aligned} V_1 &= v_a^1(0) + v_b^2(0) + v_a^3(0) + v_b^4(0) \\ &= -j(Z_{0e}i_1 + Z_{0o}i_2) \cot \theta - j(Z_{0e}i_3 + Z_{0o}i_4) \csc \theta \end{aligned} \quad (3-29)$$

เมื่อผลลัพธ์ของสมการ (3-23), (3-24), (3-27) และ (3-28) และ $\theta = \beta l$ ต่อไป ทำการแก้สมการ (3-20) ของ i_j ในเทอมของ I_S :

$$i_1 = \frac{1}{2}(I_1 + I_2) \quad (3-30ก)$$

$$i_2 = \frac{1}{2}(I_1 - I_2) \quad (3-30ข)$$

$$i_3 = \frac{1}{2}(I_3 + I_4) \quad (3-30ค)$$

$$i_4 = \frac{1}{2}(I_4 - I_3) \quad (3-30ง)$$

และแทนผลลัพธ์ในสมการ (3-29):

$$\begin{aligned} V_1 &= -\frac{j}{2}(Z_{0e}I_1 + Z_{0e}I_2 + Z_{0o}I_1 - Z_{0o}I_2) \cot \theta \\ &\quad -\frac{j}{2}(Z_{0e}I_3 + Z_{0e}I_4 + Z_{0o}I_4 - Z_{0o}I_3) \csc \theta \end{aligned} \quad (3-31)$$

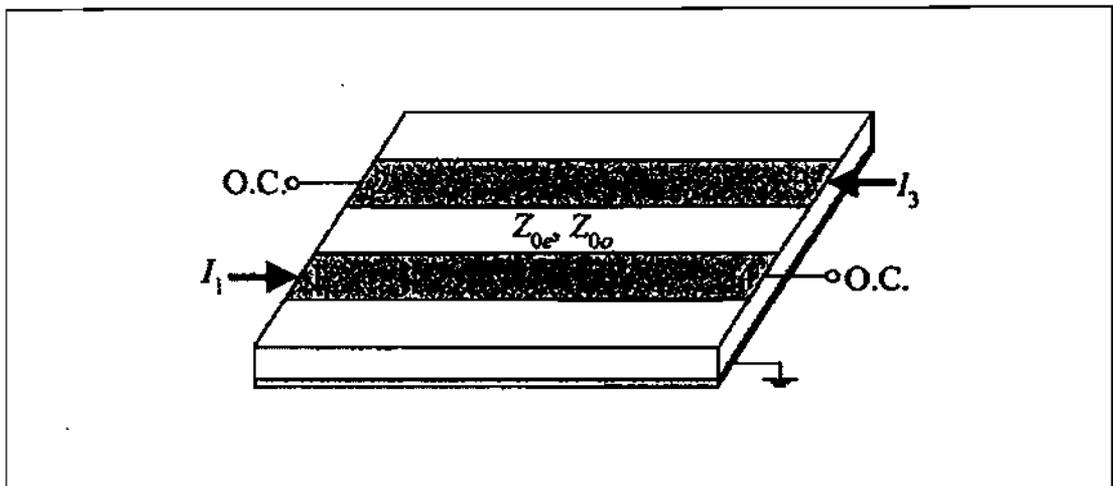
ผลลัพธ์ที่ได้จากแถวบนของเมตริกซ์อิมพีแดนซ์วงจรเปิดนั้นอธิบายในส่วนของเส้นคู่ จากความสัมพันธ์ขององค์ประกอบของเมตริกซ์อื่น ๆ สามารถคำนวณหาค่าของแถวแรกได้ ดังนั้นค่าองค์ประกอบของเมตริกซ์คือ

$$Z_{11} = Z_{22} = Z_{33} = Z_{44} = -\frac{j}{2}(Z_{0e} + Z_{0o}) \cot \theta \quad (3-32ก)$$

$$Z_{12} = Z_{21} = Z_{34} = Z_{43} = -\frac{j}{2}(Z_{0e} - Z_{0o}) \cot \theta \quad (3-32ข)$$

$$Z_{13} = Z_{31} = Z_{24} = Z_{42} = -\frac{j}{2}(Z_{0e} - Z_{0o}) \csc \theta \quad (3-32ค)$$

$$Z_{14} = Z_{41} = Z_{23} = Z_{32} = -\frac{j}{2}(Z_{0e} + Z_{0o}) \csc \theta \quad (3-32ง)$$



ภาพที่ 3-8 ส่วนของวงจรสองทางเข้าออกแบบเส้นคู่ที่มีผลตอบสนองแบบผ่านแถบ

จากภาพที่ 3-8 แสดงส่วนของวงจรสองทางเข้าออกแบบเส้นคู่ที่มีผลตอบสนองแบบผ่านแถบ โดยเลือกทางเข้าออก 2 เป็นทางเข้าและเลือกทางเข้าออก 4 เป็นทางออก เมื่อเทียบเป็นเมตริกซ์อิมพีแดนซ์วงจรเปิด $[Z]$ แบบสองทางเข้าออกได้

$$[Z] = \begin{bmatrix} -\frac{j}{2}(Z_{0e} + Z_{0o}) \cot \theta & -\frac{j}{2}(Z_{0e} - Z_{0o}) \csc \theta \\ -\frac{j}{2}(Z_{0e} - Z_{0o}) \csc \theta & -\frac{j}{2}(Z_{0e} + Z_{0o}) \cot \theta \end{bmatrix} \quad (3-33)$$

ทำการแปลงเมตริกซ์อิมพีแดนซ์วงจรเปิด $[Z]$ จากสมการที่ (3-33) เป็น $ABCD$ พารามิเตอร์ดังนี้

$$A = \frac{Z_{11}}{Z_{21}} = \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \cos \theta$$

$$B = \frac{Z_{11}Z_{22} - Z_{12}Z_{21}}{Z_{21}} = j \frac{(Z_{0e} - Z_{0o})^2 - (Z_{0e} + Z_{0o})^2 \cos^2 \theta}{2(Z_{0e} - Z_{0o}) \sin \theta}$$

$$C = \frac{1}{Z_{21}} = j \frac{2 \sin \theta}{Z_{0e} - Z_{0o}}$$

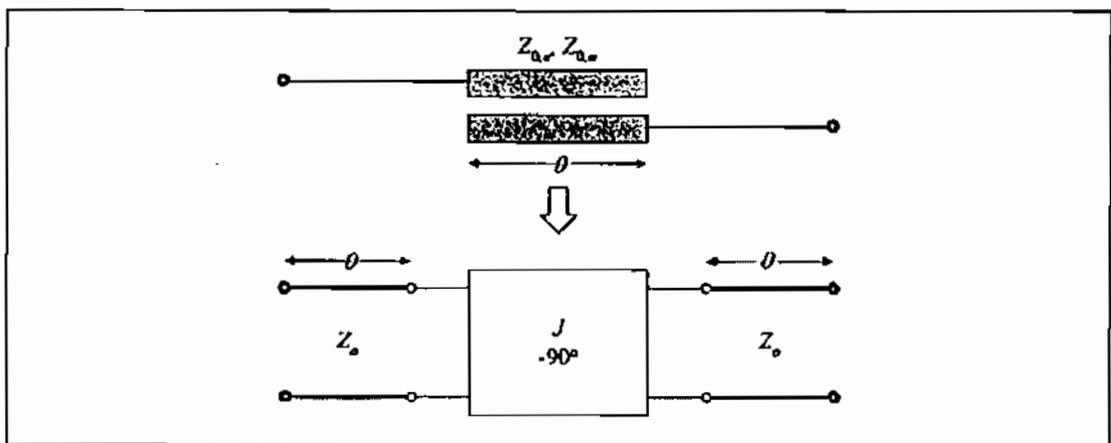
$$D = \frac{Z_{22}}{Z_{21}} = \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \cos \theta$$

นำมาจัดเรียงในรูปของ ABCD เมตริกซ์ได้

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \cos \theta & j \frac{(Z_{0e} - Z_{0o})^2 - (Z_{0e} + Z_{0o})^2 \cos^2 \theta}{2(Z_{0e} - Z_{0o}) \sin \theta} \\ j \frac{2 \sin \theta}{Z_{0e} - Z_{0o}} & \frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

3.5.2 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบเส้นคู่

ในการสร้างวงจรกรองผ่านแถบสามารถสร้างได้จากการนำสายนำสัญญาณแบบเส้นคู่ที่ได้ในแต่ละชุดจากภาพที่ 3-8 นำมาต่อเรียงกัน ในการพิสูจน์สมการที่ใช้ในการออกแบบวงจรกรองลักษณะนี้ อันดับแรกจะแสดงการคำนวณวงจรกรองผ่านแถบ 1 ชุดซึ่งสามารถประมาณรูปจำลองโดยวงจรสมมูลในภาพที่ 3-9



ภาพที่ 3-9 วงจรสมมูลของสายนำสัญญาณเส้นคู่ 1 ชุดเมื่อเทียบกับภาพที่ 3-8

ค่า $ABCD$ พหามิตอร์ของวงจรสมมูลสามารถคำนวณโดยใช้ $ABCD$ เมตริกซ์ของสายนำสัญญาณได้ (Makimoto and Yamashita, 1980)

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \theta & \frac{j \sin \theta}{Y_0} \\ jY_0 \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -jJ & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & \frac{j \sin \theta}{Y_0} \\ jY_0 \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \left(\frac{J}{Y_0} + \frac{Y_0}{J} \right) \sin \theta \cos \theta & j \left(\left(\frac{J}{Y_0} \right)^2 \sin^2 \theta - \frac{1}{J} \cos^2 \theta \right) \\ j \left(\frac{Y_0^2}{J} \sin^2 \theta - J \cos^2 \theta \right) & \left(\frac{J}{Y_0} + \frac{Y_0}{J} \right) \sin \theta \cos \theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3-35)$$

ทำการเทียบ $ABCD$ เมตริกซ์ที่ได้จากสมการที่ (3-34) กับสมการที่ (3-35) ได้

$$\frac{Z_{0e} + Z_{0o}}{Z_{0e} - Z_{0o}} \cos \theta = \left(\frac{J}{Y_0} + \frac{Y_0}{J} \right) \sin \theta \cos \theta \quad (3-36)$$

$$\frac{(Z_{0e} - Z_{0o})^2 - (Z_{0e} + Z_{0o})^2 \cos^2 \theta}{2(Z_{0e} - Z_{0o}) \sin \theta} = \left(\frac{J}{Y_0} \right)^2 \sin^2 \theta - \frac{1}{J} \cos^2 \theta \quad (3-37)$$

$$\frac{2 \sin \theta}{Z_{0e} - Z_{0o}} = \frac{Y_0^2}{J} \sin^2 \theta - J \cos^2 \theta \quad (3-38)$$

จากสมการที่ได้จากการเทียบค่า $ABCD$ เมตริกซ์ซึ่งไม่เป็นอิสระจากกันดังนั้นจึงใช้สมการที่ (3-36) และ (3-38) ทำการแก้สมการได้

$$Z_{0e} = \frac{1}{Y_0} \left[\frac{1 + (j/Y_0) \csc \theta + (J/Y_0)^2}{1 - (J/Y_0)^2 \cot^2 \theta} \right] \quad (3-39)$$

$$Z_{0o} = \frac{1}{Y_0} \left[\frac{1 - (j/Y_0) \csc \theta + (J/Y_0)^2}{1 - (J/Y_0)^2 \cot^2 \theta} \right] \quad (3-40)$$

ในกรณีที่ทำกรเชื่อมต่อด้วยความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (Quarter-Wave) โดยทำการพิจารณาตำแหน่งของ $\theta = \pi/2$ ทำให้สมการที่ (3-39) และ (3-40) ได้

$$Z_{0e} = \frac{1}{Y_0} \left[1 + \frac{J}{Y_0} + \left(\frac{J}{Y_0} \right)^2 \right] \quad (3-41)$$

$$Z_{0o} = \frac{1}{Y_0} \left[1 - \frac{J}{Y_0} + \left(\frac{J}{Y_0} \right)^2 \right] \quad (3-42)$$

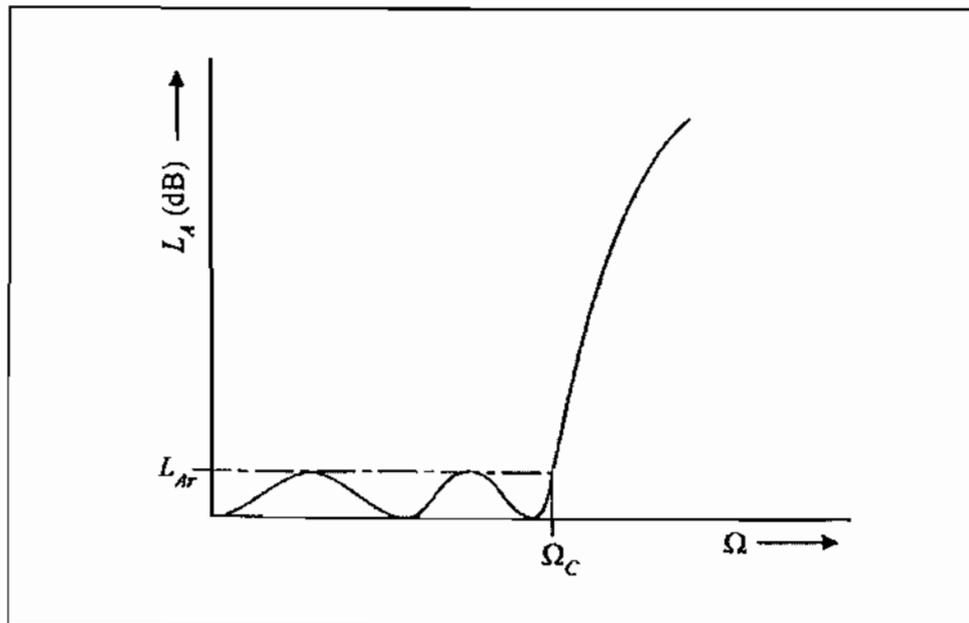
3.6 ผลตอบสนองเชบีเชฟ

ผลตอบสนองเชบีเชฟ (Hong and Lancaster, 2001) จะแสดงถึงความพลีวแถบผ่านที่เท่ากัน และมีความราบเรียบมากที่สุดในช่วงแถบหยุดซึ่งแสดงในภาพที่ 3-10 โดยขนาดของฟังก์ชันการถ่ายโอนยกกำลังสองมีรูปแบบผลการตอบสนองจาก (Hong and Lancaster, 2001)

$$|S_{21}(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega)} \quad (3-43)$$

เมื่อค่าคงที่ความพลีว ε มีความสัมพันธ์กับค่าความพลีวแถบผ่าน L_{Ar} dB โดย

$$\varepsilon = \sqrt{10^{\frac{L_{Ar}}{10}} - 1} \quad (3-44)$$



ภาพที่ 3-10 ผลตอบสนองผ่านต่ำเชบีเชฟ

$T_n(\Omega)$ คือฟังก์ชันเชบีเชฟแบบแรกของอันดับ n ซึ่งกำหนดได้จาก

$$T_n(\Omega) = \begin{cases} \cos(n \cos^{-1} \Omega) & |\Omega| \leq 1 \\ \cosh(n \cosh^{-1} \Omega) & |\Omega| \geq 1 \end{cases} \quad (3-45)$$

ดังนั้น วงจรกรองที่ได้จากสมการที่ (3-43) โดยทั่วไปเรียกว่า วงจรกรองเชบีเชฟ

3.6.1 วงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำเชบีเชฟ

สำหรับวงจรกรองต้นแบบผ่านต่ำเชบีเชฟ (Hong and Jancadter, 2001) มีฟังก์ชันถ่ายโอนในสมการที่ (3-43) ประกอบด้วยความพลีแฉผ่าน L_{Ar} dB และความถี่ตัด $\Omega_c = 1$ มูลค่าองค์ประกอบสำหรับโครงข่ายสองทางเข้าออกแสดงในภาพที่ 3-11 ได้มาจากการคำนวณโดยใช้สูตร

$$g_0 = 1.0 \quad (3-46ก)$$

$$g_1 = \frac{2}{\gamma} \sin\left(\frac{\pi}{2n}\right) \quad (3-46ข)$$

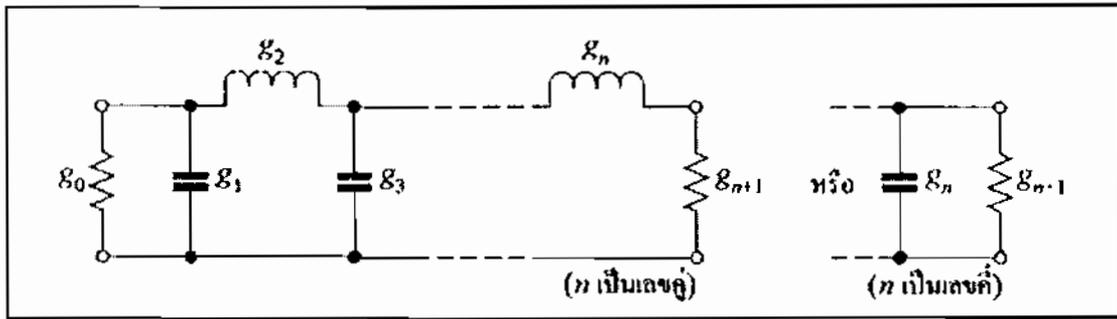
$$g_i = \frac{1}{g_{i-1}} \frac{4 \sin\left[\frac{(2i-1)\pi}{2n}\right] \sin\left[\frac{(2i-3)\pi}{2n}\right]}{\gamma^2 + \sin^2\left[\frac{(i-1)\pi}{n}\right]} \quad \text{for } i = 2, 3, \dots, n \quad (3-46ค)$$

$$g_{n+1} = \begin{cases} 1.0 & \text{for } n \text{ odd} \\ \coth^2\left(\frac{\beta}{4}\right) & \text{for } n \text{ even} \end{cases} \quad (3-46ง)$$

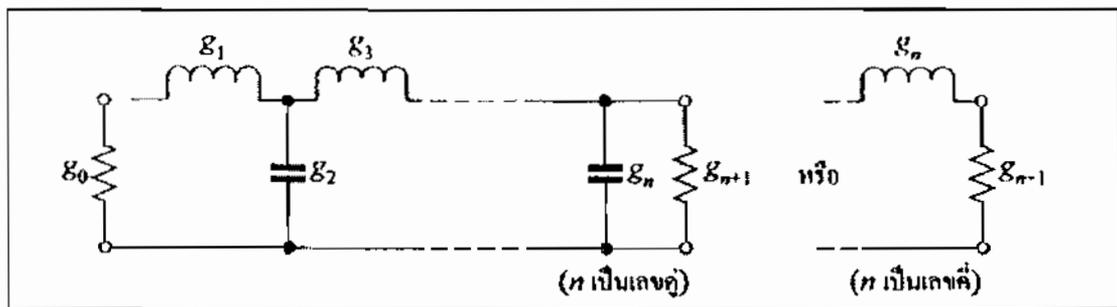
เมื่อ

$$\beta = \ln\left[\coth\left(\frac{L_{Ar}}{17.37}\right)\right] \quad (3-47ก)$$

$$\gamma = \sinh\left(\frac{\beta}{2n}\right) \quad (3-47ข)$$



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3-11 โครงสร้างวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำแบบวงจรข่ายบันไดสำหรับวงจรกรอง
โพลทุกตัว (ก) เริ่มต้นด้วยตัวเก็บประจุขนาน (ข) เริ่มต้นด้วยตัวเหนี่ยวนำอนุกรม

3.6.2 การแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบ

สมมติให้วงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำมีผลตอบสนองความถี่จากการแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบในช่วง $\omega_2 - \omega_1$ เมื่อ ω_1 และ ω_2 คือช่วงของความถี่แถบผ่านโดยสามารถเขียนเป็นสมการที่ใช้ในการแปลงได้

$$\Omega = \frac{\Omega}{FBW} \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \quad (3-48ก)$$

โดยที่

$$FBW = \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0}$$

$$\omega = \sqrt{\omega_1 \omega_2} \quad (3-48ข)$$

ซึ่ง ω_0 คือความถี่กลางเชิงมุมในหน่วยของเรเดียน และ FBW คืออัตราส่วนของแบนด์วิดท์ (Fractional Bandwidth) ในการแปลงความถี่ขององค์ประกอบรีแอคแตนซ์ g ที่ได้จากวงจรกรอง ดันแบบชนิดผ่านต่ำสามารถเขียนได้เป็น

$$j\Omega \rightarrow j\omega \frac{\Omega_c g}{FBW \omega_0} + \frac{1}{j\omega} \frac{\Omega_c \omega_0 g}{FBW} \quad (3-48ก)$$

ดังนั้นค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำหรือความจุในวงจรกรองดันแบบชนิดผ่านต่ำสามารถแปลง เป็นวงจรเรโซแนนซ์ LC อนุกรมหรือขนานในรูปแบบของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบ ซึ่งค่า องค์ประกอบของเรโซเนเตอร์ LC อนุกรมของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบสามารถหาได้จาก

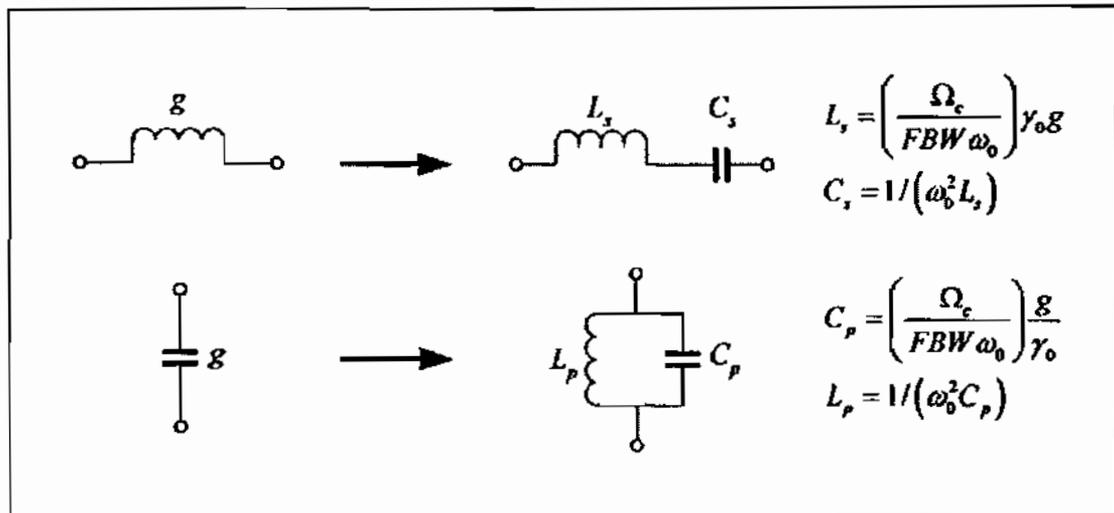
$$L_s = \left(\frac{\Omega_c}{FBW \omega_0} \right) \gamma_0 g$$

$$C_s = \left(\frac{FBW \omega_0}{\Omega_c} \right) \frac{1}{\gamma_0 g} \quad \text{สำหรับ } g \text{ ที่เป็นตัวเหนี่ยวนำ} \quad (3-49ก)$$

ในทำนองเดียวกันสามารถแปลงค่าองค์ประกอบความเหนี่ยวนำหรือความจุในวงจรกรองดันแบบ ชนิดผ่านต่ำให้อยู่ในรูปของเรโซเนเตอร์ LC ขนานของวงจรกรองความถี่ผ่านแถบได้เป็น

$$C_p = \left(\frac{\Omega_c}{FBW \omega_0} \right) \frac{g}{\gamma_0}$$

$$L_p = \left(\frac{FBW}{\Omega_c \omega_0} \right) \frac{\gamma_0}{g} \quad \text{สำหรับ } g \text{ ที่เป็นตัวเก็บประจุ} \quad (3-49ข)$$



ภาพที่ 3-12 การแปลงค่าขององค์ประกอบพื้นฐานจากวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำไปเป็นวงจรกรองความถี่ผ่านแถบ

จากสมการ (3-49) สามารถแทนค่า $\omega_0 L_s = 1 / (\omega_0 C_s)$ และ $\omega_0 L_p = 1 / (\omega_0 C_p)$ ซึ่งจะทำการแปลงขององค์ประกอบความเหนี่ยวนำหรือความจุในกรณีนี้แสดงในภาพที่ 3-12

ในส่วนของตัวแปลงผกผันแอดมิแตนซ์ (Admittance Inverter) หรือค่า J_1 และ J_2 สามารถหาได้จากสมการที่ได้จากการแปลงวงจรกรองผ่านแถบแบบเส้นคู่ที่มีขนาดความยาวหนึ่งในสี่ของความยาวคลื่น (Quarter-Wave) หนึ่งชุดเปรียบเทียบกับวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำเซบีเชฟที่ทำการแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบในหัวข้อที่ 3.6 ซึ่งจะได้ (Pozar, 1990), (Kuo and Shih, 2002)

$$\frac{J_1}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_1}} \quad (3-50)$$

$$\frac{J_{N+1}}{Y_0} = \sqrt{\frac{\pi \Delta}{2g_n}} \quad (3-51)$$

$$\frac{J_p}{Y_0} = \frac{\pi \Delta}{2\sqrt{g_{i-1}g_i}} \quad (3-52)$$

เมื่อ

N เป็นจำนวนของเรโซเนเตอร์อิมพีแดนซ์แบบขั้น (SIR)

n เป็นอันดับของวงจรกรองต้นแบบผ่านต่ำเซบีเชฟ

$p = 2, 3, 4, 5, \dots, N$ และ $i = 3, 5, 7, 9, \dots, n$

Δ เป็นค่าอัตราส่วนแบนด์วิดท์ (Fractional Bandwidth) ของวงจรกรองผ่านแถบ

โดย

$$\Delta = \frac{BW}{f_0} = \frac{f_2 - f_1}{f_0} \quad (3-53)$$

เมื่อ

f_0 เป็นค่าความถี่กลาง

f_1 เป็นค่าความถี่เริ่มต้น

f_2 เป็นค่าความถี่สิ้นสุด

บทที่ 4

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปคู่ขนานและ ผลการออกแบบ

ในการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบจะใช้วิธีการเขียนโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบจากสมการในบทที่ 3 โดยกำหนดให้ค่า Z_{0e}, Z_{0o} เป็นค่าตัวแปรตัดสินใจ เพื่อคำนวณหาขนาดของสายนำสัญญาณไมโครสตริปโดยใช้สมการที่ใช้ในการออกแบบของไมโครสตริปมาตรฐาน ซึ่งมีค่า Return Loss และ ค่า Insertion Loss เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์

4.1 การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบไมโครสตริปเส้นคู่

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบในขั้นตอนแรกให้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญเพื่อใช้ในการออกแบบ โดยเริ่มต้นจากการเปรียบเทียบลักษณะโครงสร้างของวงจรกรองกับวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านต่ำเซมิเชฟที่ทำการแปลงเป็นวงจรกรองผ่านแถบเพื่อหาอันดับของวงจรกรองต้นแบบซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการคำนวณทำให้ได้อันดับของวงจรกรองต้นแบบเป็นอันดับ 3 กำหนดความถี่กลาง $f_0 = 2.45$ GHz และค่าอิมพีแดนซ์คุณลักษณะ (Characteristic Impedance) 50 โอห์ม โดยในส่วนของ การเขียนโปรแกรม กำหนดให้ช่วงค่าตัวแปรตั้งแต่ 100-1000 MHz เป็นค่าแบนด์วิดท์ในการสร้างประชากรเริ่มต้น (Initial Populations) แล้วทำการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (3-53) ได้เป็นค่า Δ จากค่าที่ได้ทำการคำนวณหาค่า J_1/Y_0 และ J_2/Y_0 ของวงจรสมมูล ซึ่งค่า $J_1/Y_0 = J_2/Y_0$ ดังนั้นจึงให้ใช้เป็นค่าเดียวกันโดยใช้สมการ (3-50) และ (3-51) และหาค่า Z_{0e}, Z_{0o}, k, Z ของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่โดยใช้สมการที่ (3-39), (3-40), (3-15) และ (3-16) ซึ่งเป็นสมการที่ใช้กับสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ที่มีความยาวทางไฟฟ้าเท่ากับ $\pi/2$ ส่วนฟังก์ชันจุดประสงค์ หาได้จาก

$$S_{11} = \frac{(Z_{0e} - Z_{0o})^2 - 4Z_0^2}{(Z_{0e} - Z_{0o})^2 + 4Z_0^2} \quad (4-1)$$

$$S_{21} = \frac{1}{j} \frac{4Z_0(Z_{0e} - Z_{0o})}{(Z_{0e} - Z_{0o})^2 + 4Z_0^2} \quad (4-2)$$

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรกรองต้นแบบชนิดผ่านค่าเซบีเซฟอันดับ 3 หาได้จากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบร่วมกับสมการที่ (3-46) กับ (3-47) ได้

$$g_0 = 1, g_1 = 1.3713, g_2 = 1.1378, g_3 = 1.3713, g_4 = 1$$

เมื่อโปรแกรมทำการคำนวณจากค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ โดยมีค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss : S_{11}) และ ค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss : S_{21}) เป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ จนได้ค่าเหมาะที่สุดแบบหลายจุดประสงค์ (Multi-objective Optimization) ซึ่งจะได้ค่า Z_{0e}, Z_{0o}

4.2 ผลการจำลอง

ผลที่ได้จากการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ที่ความถี่ 2.45 GHz, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6$ mm จะได้ค่า Z_{0e}, Z_{0o} หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปหาค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ในโปรแกรม IE3D จะได้ค่าความกว้างและความยาวตามตารางที่ 4-1 จากนั้นเมื่อนำค่าที่ได้ไปวาดรูปจำลองของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ จะได้สายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ ดังในภาพที่ 4-1 และได้ค่า S_{11}, S_{21} ดังในภาพที่ 4-2

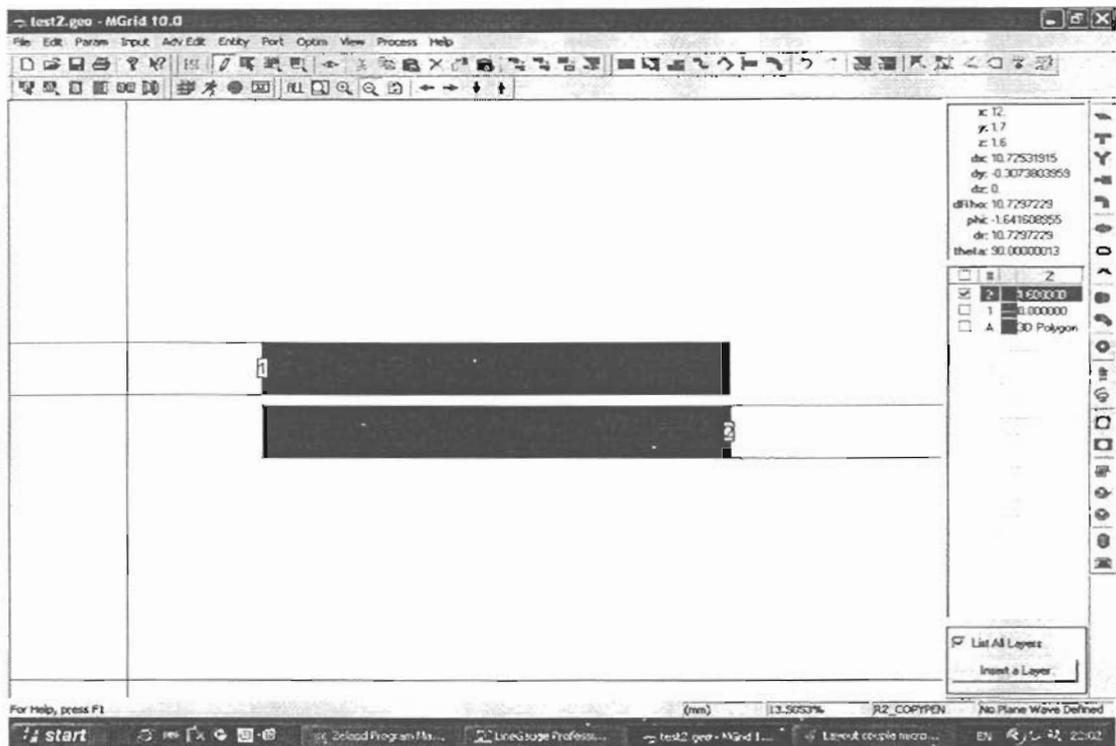
ตารางที่ 4-1 ผลที่ได้จากการออกแบบโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

Z_{0e}	Z_{0o}	W (mm)	s (mm)	P (mm)
118.5680	50.6509	1.00	0.30	15.50

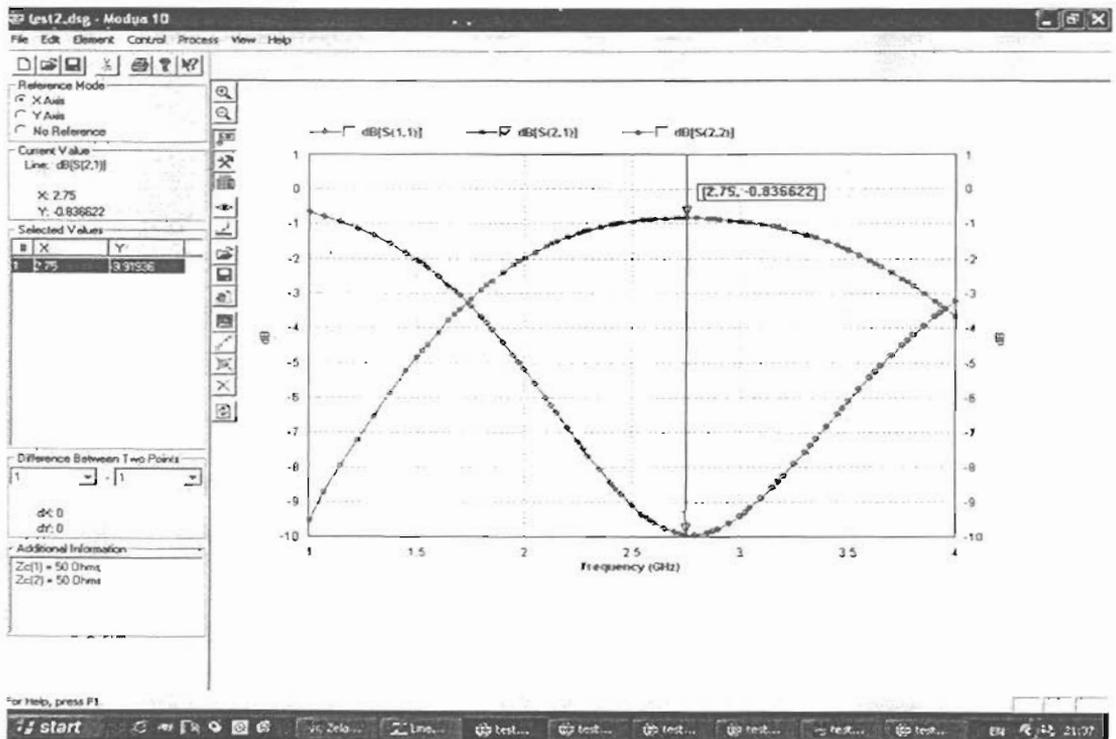
ส่วนการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ที่ความถี่ 2.45 GHz, $\epsilon_r = 4.4$, $h = 1.6$ mm จะได้ค่า Z_{0e}, Z_{0o} และค่าความกว้างและความยาวจาก โปรแกรม IE3D ตามตารางที่ 4-2 จากนั้นเมื่อนำค่าที่ได้ไปวาดรูปจำลองของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่ และทำการ Simulate จะได้ค่า S_{11}, S_{21} ดังในภาพที่ 4-3

ตารางที่ 4-2 ผลที่ได้จากการออกแบบโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์

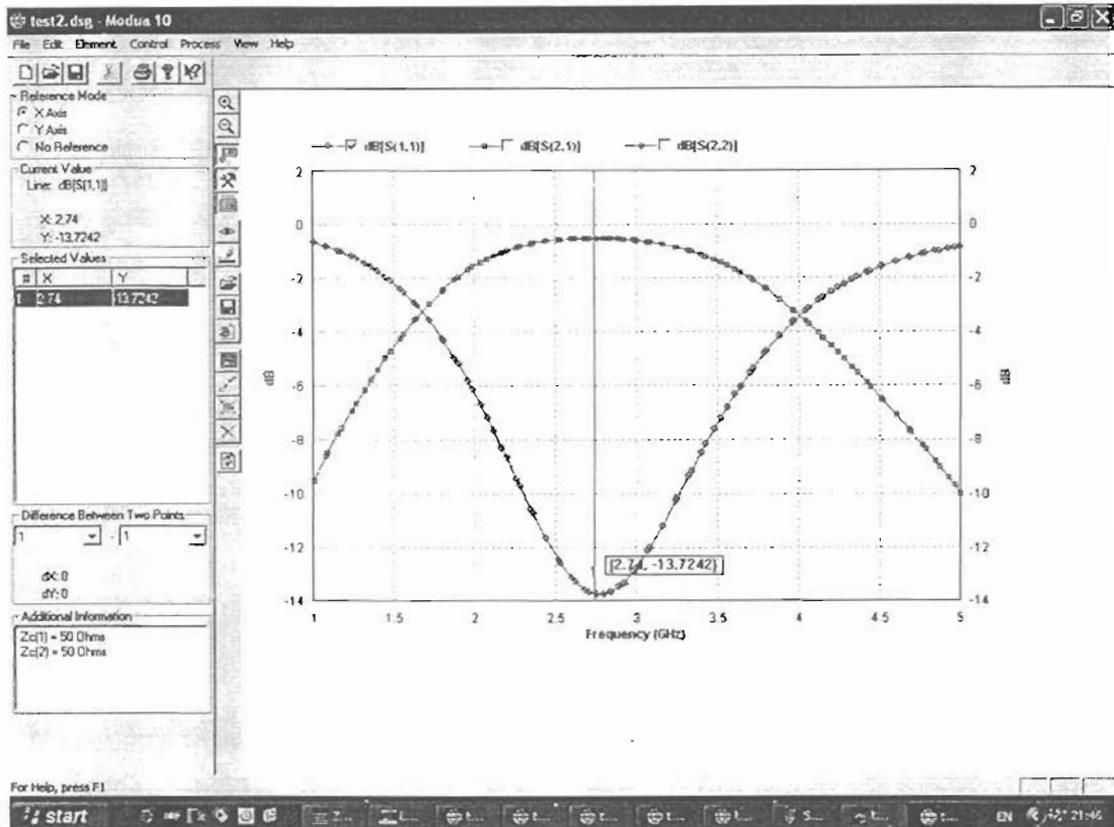
Z_{0e}	Z_{0o}	W (mm)	s (mm)	P (mm)
131.4310	54.3049	0.80	0.30	15.50



ภาพที่ 4-1 แสดงลักษณะโครงสร้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริปเส้นคู่จำลองที่ได้จากการนำค่าที่ได้จากออกแบบไปสร้างในโปรแกรม IE3D



ภาพที่ 4-2 แสดงผล S_{11} , S_{21} ที่ได้จากโปรแกรม IE3D เมื่อออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์



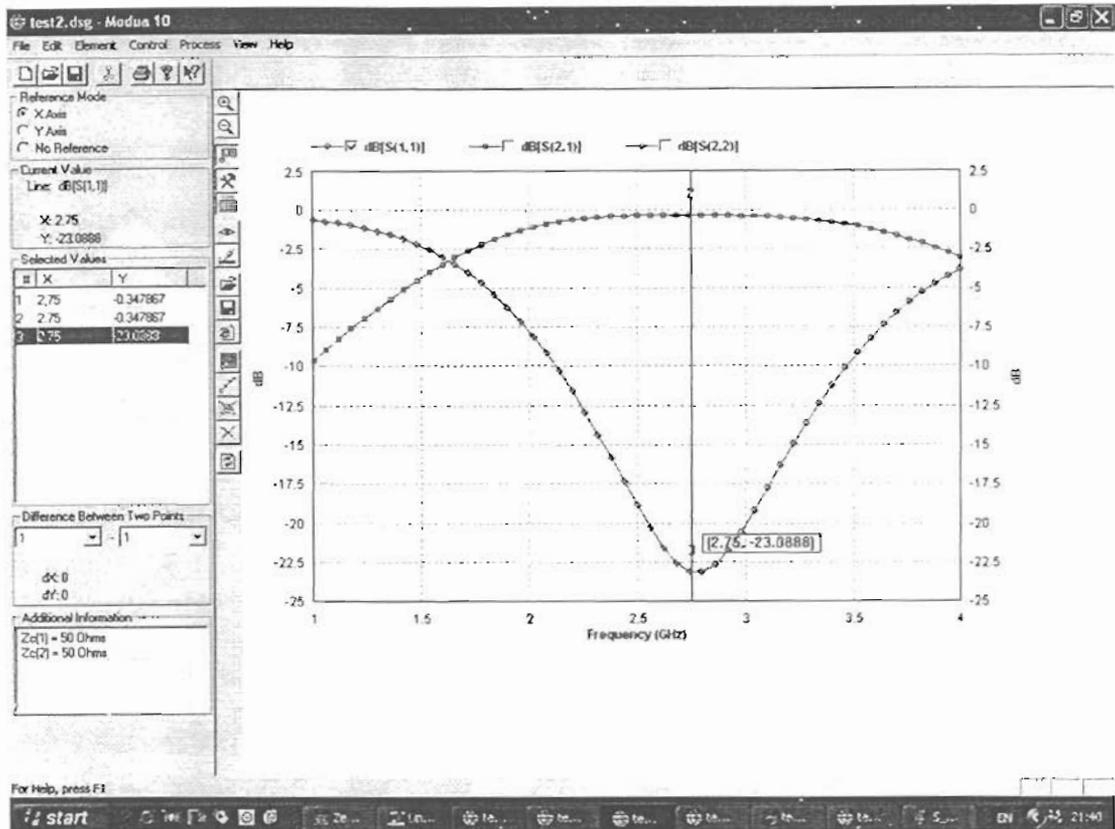
ภาพที่ 4-3 แสดงผล S_{11}, S_{21} ที่ได้จากโปรแกรม IE3D เมื่อออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์

จากผลที่ได้จะเห็นว่าค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์จะได้ค่า S_{11}, S_{21} ที่ดีกว่าค่าที่ได้จากการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์มีการลู่เข้าของค่าตอบดีกว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์โดยดูจากจำนวน Generation ที่ใช้ในการหาค่าตอบที่น้อยกว่า

จากค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ได้จากการออกแบบนำมาทำการปรับขนาดเพื่อให้ได้ค่า S_{11} ที่ต่ำลง ตามตารางที่ 4-3 จะได้ค่า S_{11}, S_{21} ดังในภาพที่ 4-4

ตารางที่ 4-3 ค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริปที่ทำการปรับแต่งด้วยโปรแกรม IE3D

Z_{0c}	Z_{0o}	W (mm)	s (mm)	P (mm)
148.1490	59.2347	0.60	0.30	15.50



ภาพที่ 4-4 แสดงผล S_{11} , S_{21} ที่ได้จากโปรแกรม IE3D เมื่อทำการปรับค่าความกว้างและความยาวของสายนำสัญญาณไมโครสตริป

จากผลที่ได้จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการปรับแต่งค่าความกว้างของสายนำสัญญาณไมโครสตริป จะส่งผลให้ค่า S_{11} , S_{21} ดีขึ้น

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

จากการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่ไมโครสตริปโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ (Multi-objective Genetic Algorithm, MOGA) ซึ่งทำการเปรียบเทียบกับการออกแบบแบบขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ (Co-operative Co-evolutionary Multi-objective Genetic Algorithms, CCMOGA) ผลที่ได้จากการออกแบบ ทำให้ทราบผลสรุปว่า การออกแบบโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ จะให้ค่าที่ดีกว่าการออกแบบโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์ เนื่องจากเทคนิคในการคัดเลือกและการปรับค่าความแข็งแรงของประชากรในแต่ละรุ่น และการเข้าสู่ของคำตอบที่เร็วกว่า ซึ่งทำให้เห็นว่าการออกแบบโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบวิวัฒนาการและการทำงานร่วมกันแบบหลายจุดประสงค์ (Co-operative Co-evolutionary Multi-objective Genetic Algorithms, CCMOGA) สามารถประยุกต์ใช้ได้กับงานออกแบบต่าง ๆ ได้เช่นกัน

5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการสร้างวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์นั้น ส่วนที่สำคัญคือ ฟังก์ชันจุดประสงค์ที่ต้องการหา ซึ่งในการกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์นั้นจำเป็นต้องเป็นจุดประสงค์ที่ขัดแย้งกันเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ส่วนค่าพารามิเตอร์ของวัสดุที่ใช้ในการ Simulate ในโปรแกรม IE3D ก็มีผลกับค่าความสูญเสียเนื่องจากการย้อนกลับ (Return Loss : S_{11}) และค่าความสูญเสียเนื่องจากการใส่แทรก (Insertion Loss : S_{21}) ด้วยเช่นกัน ซึ่งต้องสอดคล้องกับวัสดุที่จะใช้ในการสร้างชิ้นงานจริง

เมื่อได้ผลจากการหาโดยวิธีขั้นตอนเชิงพันธุกรรมแล้วนำค่า Z_{0e}, Z_{0o} ที่ได้ไปใส่ในโปรแกรม IE3D ค่าระยะห่างระหว่างสายนำสัญญาณไมโครสตริปคู่ขนานจะมีค่าน้อยมาก จึงต้องทำการปรับแต่งเล็กน้อย ในกรณีที่ต้องการจะนำไปสร้างชิ้นงานจริง

บรรณานุกรม

ภาษาอังกฤษ

- Adam, A. "New Model of Coupled Transmission Lines." **IEEE Transaction on Microwave Theory and Techniques.** 6 (1995) : 1389-1392.
- Fonesca, C. M. and Fleming, P. J. "An Overview of Evolutionary Algorithm in Multi-objective Optimization" **Evolutionary Computation.** 3(1995) : 1-16.
- Goldberg, D. E. **Genetic Algorithms : In Search, Optimization, and Machine Learning.** Reading, MA : Addison-Wesley , c1989.
- Guillermo, G. **Microwave Transistor Amplifiers Analysis and Design.** Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, c1997.
- Holland, J. **Adaptation in Natural and Artificial System.** Ann Arbor, MI : University of Michigan Press, c1975.
- Hong, J. G. and Lancadter, M. J. **Microstrip Filters for RF/Microwave Applications.** New York, NY : John Wiley & Sons, c2001.
- Kuo, J.-T. and Shih, E. "Wideband Bandpass Filter Design with Three-Line Microstrip Structures." **IEE Proceedings – Microwaves, Antenas and Propagation.** 149 (2002) : 243-247.
- Ludwig, R. and Bretchko, P. **RF Circuit Design.** Upper Saddle River, NJ : Prentice Hall, c2000.
- Makimoto, M. and Yamashita, S. "Bandpass Filters Using Parallel Coupled Stripline Stepped Impedance Resonators." **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.** 12 (1980) : 1413-1417.
- Maneeratana, K., Boonlong, K. and Chaiyaratana, N. "Multi-objective Optimisation by Co-operative Co-evolution." **Lecture Notes in Computer Science.** 3242 (2004) : 772-781.
- Potter, M. A., and De Jong, K. A. "A Cooperative Coevolutionary Approach to Function Optimization." **Lecture Notes in Computer Science.** 866 (1994) : 249-257.
- Pozar, D. M. **Microwave Engineering.** 2nd ed. New York, NY : John Wiley & Sons, c1990.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ : นายสุภชัย ชมภูงูช

ชื่อวิทยานิพนธ์ : การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบความถี่แบบไมโครสตริปโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบหลายจุดประสงค์

สาขาวิชา : วิศวกรรมไฟฟ้า

ประวัติ

ประวัติส่วนตัว เกิดเมื่อวันที่ 2 มิถุนายน พ.ศ. 2522 ที่จังหวัด ชลบุรี ปัจจุบันอยู่บ้านเลขที่ 2 ถนน สันติเกษม ต.แสนสุข อ.เมือง จ. ชลบุรี งานอดิเรก คือ ดูหนัง เล่นอินเทอร์เน็ต และ เล่น แบดมินตัน

ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม จากโรงเรียนสาธิตพิบูลบำเพ็ญในปี พ.ศ. 2540 และ ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไฟฟ้าจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือในปี พ.ศ. 2545