

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ 4 อย่างเหมาะสมด้วยตัวหาค่าเหมาะที่สุดแบบหมาป่าสีเทา

Optimal Design of Fourth-Order Active Band-Pass Filter via Grey Wolf Optimizer

วัฒนวงศ์ ร่มไทร¹ ทิวา จิตหวัง² และ เดชา พวงดาวเรือง^{3*}
Wattanawong Romsai¹, Thiwa Jitwang²
and Deacha Puangdownreong^{3*}

Received: 13 July 2024

Revised: 12 October 2024

Accepted: 22 October 2024

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 อย่างเหมาะสมด้วยตัวหาค่าเหมาะที่สุดแบบหมาป่าสีเทา (grey wolf optimizer: GWO) ซึ่งเป็นเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศึกษาสำนึกที่ทรงประสิทธิภาพโดยอาศัยโครงสร้างวงจรตามแบบ Sallen-Key ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 ด้วย GWO บนหลักการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth จากผลการออกแบบพบว่าวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบด้วย GWO ให้ผลใกล้เคียงกับผลตอบสนองทางความถี่อุดมคติกว่าวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth อย่างน่าพึงพอใจ

คำสำคัญ: วงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟ ตัวหาค่าเหมาะที่สุดแบบหมาป่าสีเทา เทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศึกษาสำนึก หลักการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่

¹สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพธนบุรี กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10170

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Bangkokthonburi University, Bangkok, Thailand 10170

²นักวิชาการอิสระ นนทบุรี ประเทศไทย 11140

²Independent Scholar, Nonthaburi, Thailand 11140

³สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ กรุงเทพมหานคร ประเทศไทย 10160

³Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University, Bangkok, Thailand 10160

*ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author) e-mail: deachap@sau.ac.th

ABSTRACT

This paper proposes the optimal design of the fourth-order active band-pass filter by using the grey wolf optimizer (GWO) which is one of the most efficient metaheuristic optimization techniques. The structure of the fourth-order band-pass filter aligns the Sallen-Key topology. Results of the fourth-order active band-pass filter designed by the GWO based on the modern optimization will be compared with those obtained by the conventional technique using the Butterworth filter coefficient comparison principle. As results, it was found that the fourth-order active band-pass filter designed by the GWO yields very satisfactory frequency response with closer to the ideal response than the classical technique using the Butterworth filter coefficient comparison principle.

Keywords: Active Band-Pass Filter; Grey Wolf Optimizer; Metaheuristic Optimization Technique; Modern Optimization

บทนำ

วงจรกรองผ่านแถบ (band-pass filter) คือวงจรกรองความถี่ที่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่อยู่ระหว่างความถี่ตัดด้านต่ำ (lower cutoff frequency) และความถี่ตัดด้านสูง (higher cutoff frequency) ผ่านได้ แต่จะไม่ยอมให้สัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่ตัดด้านต่ำและสูงกว่าความถี่ตัดด้านสูงผ่านได้ [1] วงจรกรองผ่านแถบได้ถูกประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายทั้งในงานวิศวกรรมโทรคมนาคม ระบบควบคุม การประมวลผลภาพ และการแพทย์ [1-3] โดยเฉพาะในระบบสื่อสารไร้สาย 5G วงจรกรองผ่านแถบได้ถูกนำมาใช้เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวน รวมถึงงาน RFID [4] นอกจากนี้วงจรกรองผ่านแถบยังถูกใช้ในทางดาราศาสตร์ เพื่อทำหน้าที่กรองสเปกตรัมของแสงบางส่วนไม่ให้เข้าไปในเครื่องมือรวมทั้งช่วยค้นหาตำแหน่งของดวงดาวและการเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสง (redshifts) อีกด้วย [5]

แนวทางการออกแบบวงจรกรองแบบดั้งเดิมจะอาศัยหลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองมาตรฐาน เช่น วงจรกรอง Butterworth, Chebyshev, Bessel และ Elliptic เป็นต้น [1-3] การออกแบบดังกล่าวมีความสะดวกแต่จะมีความคลาดเคลื่อนระหว่างผลตอบสนองทางอุดมคติและผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบ ทั้งนี้เนื่องจากวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ อาศัยหลักการประมาณค่าในรูปของการนอร์มัลไลซ์ (normalized) จากนั้นอาศัยตัวประกอบการปรับมาตราเชิงความถี่ (frequency-scaling factor: FSF) และตัวประกอบการปรับมาตราเชิงอิมพีแดนซ์ (impedance-scaling factor: ISF) มาช่วยในการเลื่อนค่าความถี่ตัด (cutoff frequency) ให้มีค่าตามที่ต้องการ และเพื่อปรับค่าตัวต้านทานและค่าตัวเก็บประจุให้เหมาะสม ด้วยขั้นตอนดังกล่าวทำให้ผลการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่พอสมควร ในปัจจุบันได้มีการนำเทคนิคอภิศักศึกษาสำนึก (metaheuristic technique) มาออกแบบวงจรกรองแบบแอคทีฟตามแนวทางการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ (modern optimization) อย่างกว้างขวาง เช่น การออกแบบวงจรกรองแบบแอคทีฟโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) [6] อาณานิคมผึ้งประดิษฐ์ (artificial bee colony: ABC) [7] การหาค่าเหมาะที่สุดแบบฝูงอนุภาค (particle swarm optimization: PSO) [8] การหาค่าเหมาะที่สุดแบบอาณานิคมมด (ant colony optimization: ACO) [9] การค้นหาแบบ

กระแสน (current search: CuS) [10] การค้นหาแบบกระแสนเข้มข้น (intensified current search: ICuS) [11] การค้นหาแบบกระแสนเข้มข้นผสม (hybrid intensified current search: HICuS) [12] การค้นหาแบบกระแสนเข้มข้นผสม (meta-hybrid intensified current search: MHICuS) [13] และขั้นตอนวิธีการผสมเกสรดอกไม้ (flower pollination algorithm: FPA) [14] เป็นต้น

จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าตัวหาค่าเหมาะที่สุดแบบหมาป่าสีเทา (grey wolf optimizer: GWO) [15] เป็นเทคนิคการค้นหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศาสตร์ที่ทรงประสิทธิภาพขั้นตอนวิธี GWO ได้รับการพัฒนาขึ้นจากพฤติกรรมของหมาป่าสีเทา (Canis lupus) โดยเลียนแบบลำดับชั้นความเป็นผู้นำและกลไกการล่าเหยื่อในธรรมชาติ หมาป่าสีเทา 4 ประเภทได้แก่อัลฟา (alpha) เบต้า (beta) เดลต้า (delta) และโอเมก้า (omega) ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองลำดับชั้นของความเป็นผู้นำภายในฝูงรวมถึงขั้นตอนการล่า 3 รูปแบบ คือ การค้นหาเหยื่อ (searching for prey) การล้อมเหยื่อ (encircling prey) และการโจมตีเหยื่อ (attacking prey) ขั้นตอนวิธี GWO ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น การแก้ปัญหาทางวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ การจัดการพลังงาน วิศวกรรมโทรคมนาคม วิศวกรรมเครื่องกล การแพทย์ วิศวกรรมเคมี วิศวกรรมปิโตรเลียม วิศวกรรมธรณี วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมควบคุม วิศวกรรมอุตสาหการ การวางแผนการผลิตการประมวลผลสัญญาณและภาพและอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (internet of things: IoT) เป็นต้น [16-18]

ในบทความวิจัยนี้ขั้นตอนวิธี GWO จะถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 อย่างเหมาะสมผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth เพื่อยืนยันผลการออกแบบ ผ่านการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB และ LTspice ลำดับถัดไปจะนำเสนอวิธีดำเนินการวิจัยผลการวิจัยอภิปรายและสรุปผลการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีดำเนินการวิจัย โดยเริ่มต้นจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองผ่านแถบที่พิจารณา กรอบงานการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบและขั้นตอนวิธี GWO ดังรายละเอียดต่อไปนี้

1.แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองผ่านแถบ

ลักษณะสมบัติที่สำคัญของวงจรกรองผ่านแถบคือความถี่เรโซแนนซ์ (resonant frequency: ω_0) ความถี่ตัดด้านต่ำ (lower cutoff frequency: ω_l) ความถี่ตัดด้านสูง (higher cutoff frequency: ω_h) แบนด์วิดท์ (bandwidth: B) และตัวประกอบคุณภาพ (quality factor: Q) ในกรณีที่ $B < 0.01$ และ $Q > 10$ (หรือ $\omega_h/\omega_l < 2$) วงจรกรองผ่านแถบจะถูกพิจารณาเป็นวงจรกรองผ่านแถบเฉพาะความถี่ช่วงแคบ (narrowband - passfilter) และในกรณีที่ $B > 0$ และ $Q < 10$ (หรือ $\omega_h/\omega_l > 2$) วงจรกรองผ่านแถบจะถูกพิจารณาเป็นวงจรกรองผ่านแถบเฉพาะความถี่ช่วงกว้าง (wide band-passfilter) [1-3]

วงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟเฉพาะความถี่ช่วงกว้างอันดับ-4 ที่อาศัยโครงสร้างวงจรตามแบบ Sallen-Key จะเกิดจากการนำวงจรกรองผ่านต่ำ (low-pass filter) อันดับ-2 จำนวน 2 ตัวและวงจรกรองผ่านสูง (high-passfilter) อันดับ-2 จำนวน 2 ตัวมาต่อคาสเคดกัน ดังแสดงใน Figure 1

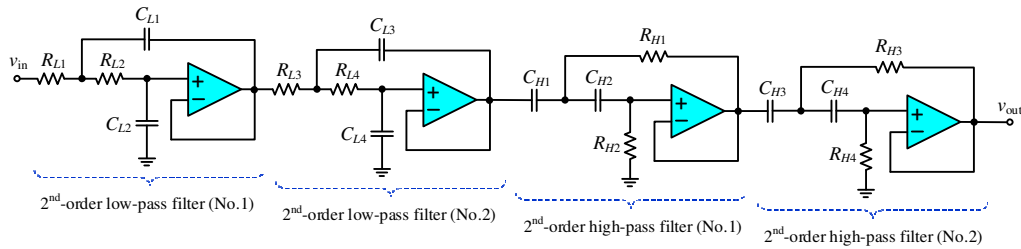


Figure 1 Fourth-Order Active Band-Pass Filter (Sallen-Key).

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 ใน Figure1 แสดงด้วยฟังก์ชันถ่ายโอนดังสมการที่ (1) [1-3]

$$H(s) = \frac{V_{out}(s)}{V_{in}(s)} = \left\{ \frac{\omega_{oL1}^2}{\left(s^2 + \frac{\omega_{oL1}}{Q_{L1}}s + \omega_{oL1}^2\right)} \times \frac{\omega_{oL2}^2}{\left(s^2 + \frac{\omega_{oL2}}{Q_{L2}}s + \omega_{oL2}^2\right)} \times \frac{s^2}{\left(s^2 + \frac{\omega_{oH1}}{Q_{H1}}s + \omega_{oH1}^2\right)} \times \frac{s^2}{\left(s^2 + \frac{\omega_{oH2}}{Q_{H2}}s + \omega_{oH2}^2\right)} \right\} \quad (1)$$

เมื่อ ω_{oL1} คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองผ่านต่ำตัวที่1

ω_{oL2} คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองผ่านต่ำตัวที่2

ω_{oH1} คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองผ่านสูงตัวที่1

ω_{oH2} คือ ความถี่เรโซแนนซ์ของวงจรกรองผ่านสูงตัวที่2

Q_{L1} คือ ตัวประกอบกำลังของวงจรกรองผ่านต่ำตัวที่ 1

Q_{L2} คือ ตัวประกอบกำลังของวงจรกรองผ่านต่ำตัวที่ 2

Q_{H1} คือ ตัวประกอบกำลังของวงจรกรองผ่านสูงตัวที่ 1

Q_{H2} คือ ตัวประกอบกำลังของวงจรกรองผ่านสูงตัวที่ 2

ค่า ω_{oL1} , ω_{oL2} , ω_{oH1} และ ω_{oH2} ได้แสดงไว้ในสมการที่(2) และค่า Q_{L1} , Q_{L2} , Q_{H1} และ Q_{H2} ได้แสดงไว้ในสมการที่ (3) ตามลำดับ

$$\left\{ \begin{aligned} \omega_{oL1} &= \frac{1}{\sqrt{R_{L1}R_{L2}C_{L1}C_{L2}}}, \omega_{oL2} = \frac{1}{\sqrt{R_{L3}R_{L4}C_{L3}C_{L4}}}, \\ \omega_{oH1} &= \frac{1}{\sqrt{R_{H1}R_{H2}C_{H1}C_{H2}}}, \omega_{oH2} = \frac{1}{\sqrt{R_{H3}R_{H4}C_{H3}C_{H4}}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} Q_{L1} &= \frac{\sqrt{R_{L1}R_{L2}C_{L1}C_{L2}}}{C_{L1}(R_{L1}+R_{L2})}, Q_{L2} = \frac{\sqrt{R_{L3}R_{L4}C_{L3}C_{L4}}}{C_{L3}(R_{L3}+R_{L4})}, \\ Q_{H1} &= \frac{\sqrt{R_{H1}R_{H2}C_{H1}C_{H2}}}{R_{H1}(C_{H1}+C_{H2})}, Q_{H2} = \frac{\sqrt{R_{H3}R_{H4}C_{H3}C_{H4}}}{R_{H3}(C_{H3}+C_{H4})} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2. กรอบงานการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบ

การออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO ตามแนวทางการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่เริ่มต้นจากการกำหนดให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) ในรูปของผลรวมของผลต่างยกกำลังสอง (sum-squared error:SSE) ระหว่างผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบอุดมคติและผลตอบสนองทางความถี่ของวงจรกรองผ่านแถบที่ได้จากการออกแบบดังแสดงใน Figure 2 ผลต่างซึ่งแสดงด้วยแถบแรเงาจะถูกทำให้มีค่าน้อยที่สุดดังสมการที่ (4) เมื่อ M คือผลตอบสนองอุดมคติ M^* คือ ผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบ และ N_p คือ จำนวนข้อมูล ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ ในสมการที่ (4) จะถูกป้อนให้กับขั้นตอนวิธี GWO เพื่อทำให้มีค่าน้อยที่สุดโดยการค้นหาค่า $x=[R_{L1},R_{L2},C_{L1},C_{L2},R_{L3},R_{L4},C_{L3},C_{L4},R_{H1},R_{H2},C_{H1},C_{H2},R_{H3},R_{H4},C_{H3},C_{H4}]$ ที่เหมาะสมของวงจรกรองผ่านแถบใน Figure 1

$$\text{Min } f(x) = \sum_{i=1}^{N_p} (M_i - M_i^*)^2, \quad (4)$$

$$x = \{R_{L1}, R_{L2}, C_{L1}, C_{L2}, R_{L3}, R_{L4}, C_{L3}, C_{L4}, R_{H1}, R_{H2}, C_{H1}, C_{H2}, R_{H3}, R_{H4}, C_{H3}, C_{H4}\}$$

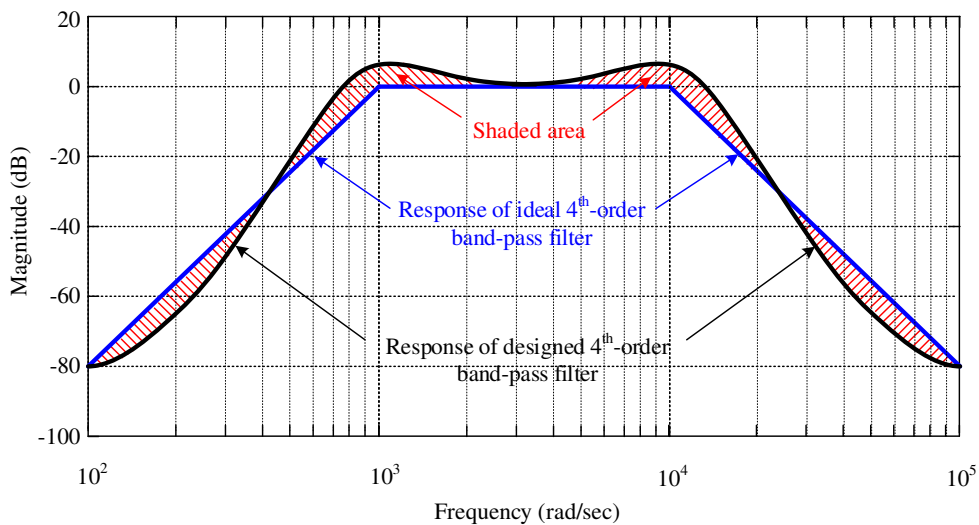


Figure 2 Design Framework of Fourth-Order Active Band-Pass Filter by GWO.

การใช้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลตอบสนองทางความถี่อุดมคติและผลตอบสนองทางความถี่ที่ได้จากการออกแบบ ในรูปของ SSE มากำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ เนื่องจากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่างานวิจัยบางส่วน [6-7] มีการใช้แถบความถี่ (bandwidth) มากำหนดเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ แต่ใน

งานวิจัยส่วนใหญ่ [8-12] พบว่าได้กำหนดให้ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลตอบแทนทางความถี่อุดมคติและผลตอบแทนทางความถี่ที่ได้จากการออกแบบเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ทั้งนี้เพราะเป็นการอ้างอิงกับผลตอบแทนทางความถี่อุดมคติโดยตรง นั้นหมายความว่าเมื่อขั้นตอนวิธี GWO สามารถทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน SSE ยังมีค่าน้อยลงเท่าใด ผลตอบแทนทางความถี่ที่ได้จากการออกแบบก็จะยิ่งมีความใกล้เคียงกับผลตอบแทนทางความถี่อุดมคติมากขึ้นเท่านั้น และถ้าขั้นตอนวิธี GWO สามารถทำให้ค่าความคลาดเคลื่อน SSE มีค่าเป็นศูนย์ นั้นหมายความว่าผลตอบแทนทางความถี่ที่ได้จากการออกแบบจะมีค่าตรงกับผลตอบแทนทางความถี่อุดมคติ

3. ขั้นตอนวิธี GWO

ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในบทนำ ขั้นตอนวิธี GWO [15] ถูกพัฒนาขึ้นจากการได้รับแรงบันดาลใจเกี่ยวกับพฤติกรรมของหมาป่าสีเทา (Canis lupus) โดยจะเลียนแบบลำดับชั้นความเป็นผู้นำและกลไกการล่าเหยื่อในธรรมชาติหมาป่าสีเทา 4 ประเภท ได้แก่ อัลฟา (alpha) เบต้า (beta) เดลต้า (delta) และโอเมก้า (omega) ถูกนำมาใช้เพื่อจำลองลำดับชั้นของความเป็นผู้นำภายในฝูงดังแสดงใน Figure 3 รวมถึงขั้นตอนการล่า 3 รูปแบบ คือ การค้นหาเหยื่อ (searching for prey) การล้อมเหยื่อ (encircling prey) และการโจมตีเหยื่อ (attacking prey)

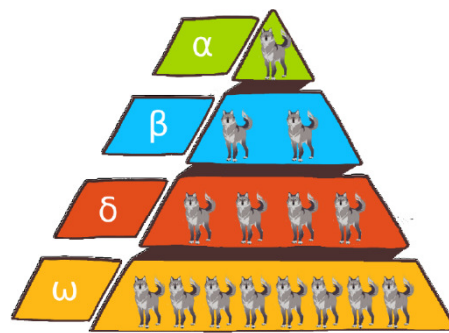


Figure 3 GWO Hierarchical Categories [16].

การล้อมเหยื่อจะอาศัยกลไกตามสมการที่ (5) - (8) เมื่อ t คือรอบการวนซ้ำ $\vec{X}_p$ คือตำแหน่งของเหยื่อ $\vec{X}$ คือตำแหน่งของหมาป่า $\vec{A}, \vec{C}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ $\vec{a}$ คือค่าสัมประสิทธิ์ที่ลดลงแบบเชิงเส้นจาก $2 \rightarrow 0$ ตามจำนวนรอบการวนซ้ำ t และ $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ คือค่าสุ่มในช่วง $[0,1]$ ที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป (uniform distribution)

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (5)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (6)$$

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (7)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (8)$$

การล่าเหยื่อ จะอาศัยกลไกตามสมการที่ (9)-(11)

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)|, \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t)|, \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t)| \quad (9)$$

$$\vec{X}_1(t) = \vec{X}_\alpha(t) - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_2(t) = \vec{X}_\beta(t) - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta), \vec{X}_3(t) = \vec{X}_\delta(t) - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1(t) + \vec{X}_2(t) + \vec{X}_3(t)}{3} \quad (11)$$

การโจมตีเหยื่อหรือการค้นหาเหยื่อจะอาศัยเงื่อนไข ดังนี้ถ้า $|A| < 1$ ให้เลือกโจมตีเหยื่อ แต่ถ้า $|A| \geq 1$ ให้เลือกค้นหาเหยื่อใหม่ขั้นตอนวิธี GWO สามารถแสดงด้วยรหัสเทียมได้ดัง Figure 4

Initialize:

- Initialize the objective function $f(x)$ and search spaces
- Initialize the grey wolf population X_i ($i = 1, 2, \dots, n$)
- Initialize a , A , and C
- Evaluate all agents X_i via $f(x)$
- Ranking X_α = the best agent, X_β = the second best agent, and X_δ = the third best agent

while ($t \leq$ Max number of iterations)

for $i = 1 : n$ (all n grey wolf population)

- Update the position of the current search by using (11)

end for

- Update a , A , and C
- Evaluate all agents X_i via $f(x)$
- Update X_α , X_β and X_δ
- $t = t + 1$

end while

- Report the best solution X_α

Figure 4 Pseudo Code of GWO.

จากขั้นตอนวิธี GWO ที่แสดงด้วยรหัสเทียมใน Figure 4 สามารถอธิบายเป็นขั้นตอนการค้นหาผลเฉลยตามขั้นตอนวิธี GWO ได้ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่-0 กำหนดฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ และปริภูมิการค้นหา (search spaces) ของผลเฉลย x กำหนดจำนวนประชากรหมาป่าสีเทา X_i , $i = 1, 2, \dots, n$ จำนวน n ตัว กำหนดค่าสัมประสิทธิ์ a , A และ C จากนั้นประเมินหมาป่าสีเทาจำนวน n ตัว ผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ แล้วนำมาเรียงลำดับ (ranking) โดยกำหนดให้ X_α คือหมาป่าสีเทาที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ มีค่าน้อยที่สุดอันดับที่หนึ่ง X_β คือหมาป่าสีเทาที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ มีค่าน้อยที่สุดอันดับที่สอง และ X_δ คือหมาป่าสีเทาที่ทำให้

- ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ มีค่าน้อยที่สุดอันดับที่สาม ตามลำดับ กำหนดให้ $t = 1$ คือจำนวนรอบการค้นหาเริ่มต้นและกำหนดให้ t_Max คือจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด
- ขั้นตอนที่-1 ถ้า $t \leq t_Max$ ให้ดำเนินการค้นหาต่อไปในขั้นตอนที่-2 ไม่เช่นนั้นให้ข้ามไปยังขั้นตอนที่-7
- ขั้นตอนที่-2 อาศัยกลไกการล่อเหยื่อในสมการที่ (5) - (8) และกลไกการล่าเหยื่อในสมการที่ (9) - (10) ทำการปรับค่าตำแหน่งหมาป่าสีเทาทุกตัว ตามสมการที่ (11)
- ขั้นตอนที่-3 สุ่มค่า r_1 และ r_2 ในช่วง $[0,1]$ ที่มีการแจกแจงแบบเอกรูป เพื่อปรับค่าสัมประสิทธิ์ a , A และ C ตามสมการที่ (7) - (8)
- ขั้นตอนที่-4 ประเมินหมาป่าสีเทาจำนวน n ตัวผ่านฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$
- ขั้นตอนที่-5 ปรับค่าตำแหน่งของหมาป่าสีเทาภายในฝูง โดยเรียงลำดับหมาป่าสีเทาที่ผ่านการประเมินในขั้นตอนที่-4 กำหนดให้ X_α คือหมาป่าสีเทาที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ มีค่าน้อยที่สุดอันดับที่หนึ่ง X_β คือหมาป่าสีเทาที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ มีค่าน้อยที่สุดอันดับที่สอง และ X_γ คือหมาป่าสีเทาที่ทำให้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ $f(x)$ มีค่าน้อยที่สุดอันดับที่สาม ตามลำดับ
- ขั้นตอนที่-6 ปรับค่าจำนวนรอบการค้นหา $t = t + 1$ แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่-1 เพื่อดำเนินการค้นหาในรอบต่อไป
- ขั้นตอนที่-7 รายงานผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด (optimal solutions) X_α ที่ได้จากการค้นหา และหยุดการค้นหา

ผลการวิจัย

หัวข้อผลการวิจัยนำเสนอผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 เมื่อตัวต้านทานทุกตัวและตัวเก็บประจุทุกตัวใน Figure 1 ได้รับการค้นหา และผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 เมื่อตัวต้านทานทุกตัวใน Figure 1 ได้รับการค้นหาและตัวเก็บประจุทุกตัวในวงจรดัง Figure 1 ถูกกำหนดให้คงค่า (ไม่ต้องค้นหา) ดังต่อไปนี้

1. ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยวิธีดั้งเดิม

เมื่อกำหนดให้ $\omega_l = 1,000 \text{ rad/sec}$ ($f_l = 159.15 \text{ Hz}$) และ $\omega_h = 10,000 \text{ rad/sec}$ ($f_h = 1.59 \text{ KHz}$) วงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth แสดงดัง Figure 5 ผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) แสดงดัง Figure 6 โดยที่ค่า SSE ระหว่างผลตอบสนองอุดมคติและผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมมีค่าเท่ากับ 595.36 และมีแถบความถี่เท่ากับ 6.72 krad/sec ($\approx 1.07 \text{ KHz}$)

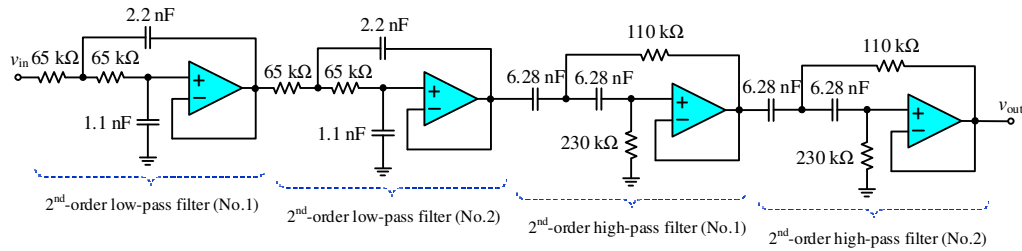


Figure 5 Fourth - Order Active Band - Pass Filter Designed by Conventional Method (Butterworth).

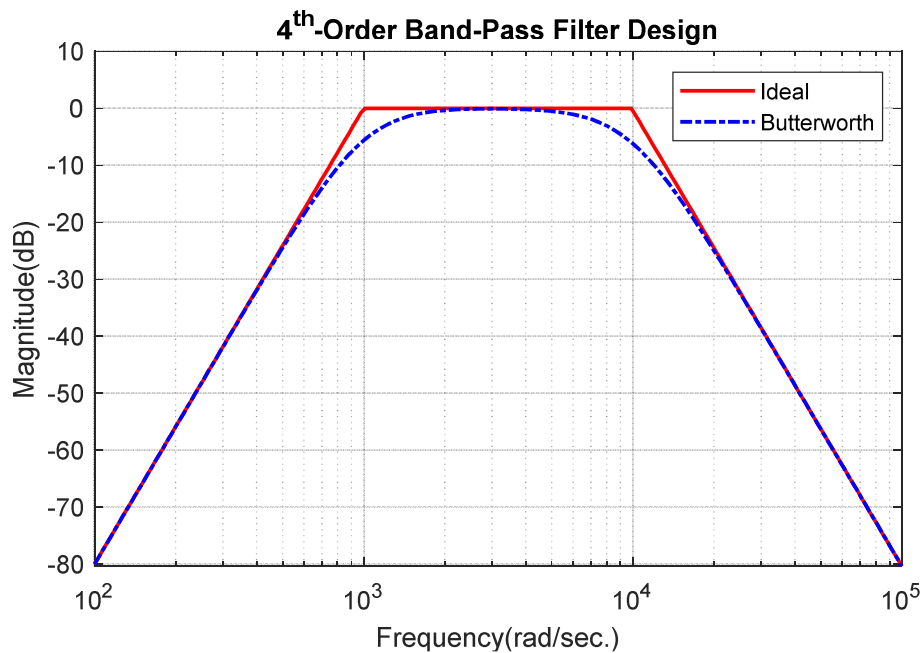


Figure 6 Responses of fourth - order active band - pass filter designed by conventional method (butterworth) obtained by MATLAB.

2. ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1

ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอคทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 เมื่อตัวต้านทาน ทุกตัวและตัวเก็บประจุทุกตัวใน Figure 1 ได้รับการค้นหา กล่าวคือทำการค้นหาค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุทุกตัว รวมทั้งหมดจำนวน 16 ตัวนั้นคือ $x=[R_{L1}, R_{L2}, C_{L1}, C_{L2}, R_{L3}, R_{L4}, C_{L3}, C_{L4}, R_{H1}, R_{H2}, C_{H1}, C_{H2}, R_{H3}, R_{H4}, C_{H3}, C_{H4}]$ กำหนดให้ $\omega_l = 1,000$ rad/sec ($f_l = 159.15$ Hz) และ $\omega_h = 10,000$ rad/sec ($f_h = 1.59$ KHz) ขั้นตอนวิธี GWO จะถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาค่าด้วย MATLAB version 2017b (License No. #40637337) เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel(R) Core(TM) i7-10510U

CPU@2.3 GHz, 80.GB – RAM ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธี GWO ได้รับการทดสอบโดยการปรับจำนวนหมาป่า $n = 5, 10, \dots, 50$ ซึ่งพบว่า $n = 25$ คือค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหา ในกรณีนี้กำหนดให้เกณฑ์ยุติการค้นหาค้นหา (termination criteria: TC) คือจำนวนรอบการค้นหาค้นหาสูงสุด (Max_Iteration) = 200 และดำเนินการค้นหาค้นหาทั้งหมด 50 ครั้ง (trials) เพื่อค้นหาค่าตัวต้านทานและตัวเก็บประจุที่เหมาะสมที่สุด ในกรณีนี้ 1 นี้ได้กำหนดให้ขอบเขตการค้นหาค้นหาแสดงดังสมการที่ (12) จากผลการค้นหาค้นหาจำนวน 50 ครั้ง อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี GWO แสดงดัง Figure 7

$$\text{Subject to } \left. \begin{aligned} R_{L1} &= R_{L2} = R_{L3} = R_{L4} = [60\text{k}\Omega - 65\text{k}\Omega], \\ C_{L1} &= C_{L3} = [1\text{nF} - 5\text{nF}], \\ C_{L2} &= C_{L4} = [0.5\text{nF} - 3\text{nF}], \\ R_{H1} &= R_{H3} = [90\text{k}\Omega - 120\text{k}\Omega], \\ R_{H2} &= R_{H4} = [200\text{k}\Omega - 250\text{k}\Omega], \\ C_{H1} &= C_{H2} = C_{H3} = C_{H4} = [5\text{nF} - 10\text{nF}] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

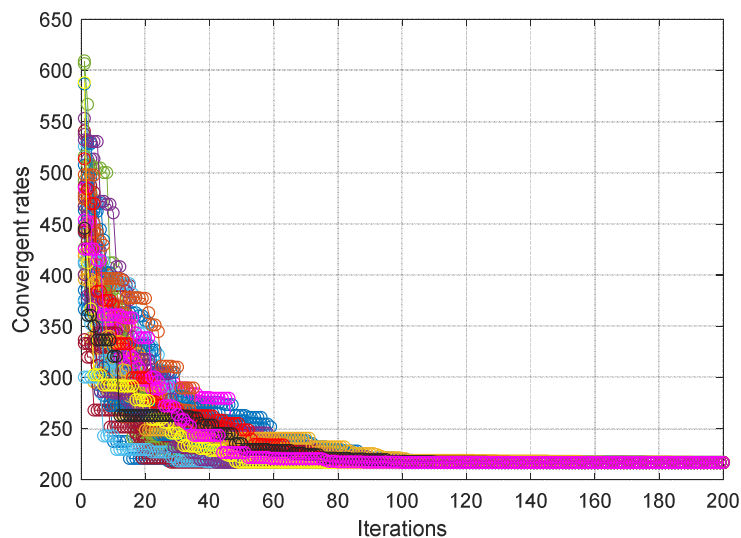


Figure 7 Convergent Rates of GWO from Fourth-Order Active Band-Pass Filter Design (Case-I).

จาก Figure 7 พบว่าขั้นตอนวิธี GWO สามารถค้นพบผลเฉลยเหมาะสมที่สุดในทุกครั้ง จากการดำเนินการทั้งหมด 50 ครั้ง วงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ในกรณีนี้ 1 แสดงดัง Figure 8 และผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) แสดงดัง Figure 9 โดยที่ค่า SSE ระหว่างผลตอบสนองอุดมคติและผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 มีค่าเท่ากับ 211.50 และมีแถบความถี่เท่ากับ 8.37 krad/sec ($\cong 1.33$ kHz) โดยขั้นตอนวิธี GWO จะใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหาค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 12.58 วินาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการค้นหาค้นหาผลเฉลยแต่ละครั้งอาจแตกต่างกันอยู่บ้าง ทั้งนี้ขึ้นกับการประมวลผลของหน่วยประมวลผลกลาง (CPU) ที่กำลังทำงานในขณะนั้น

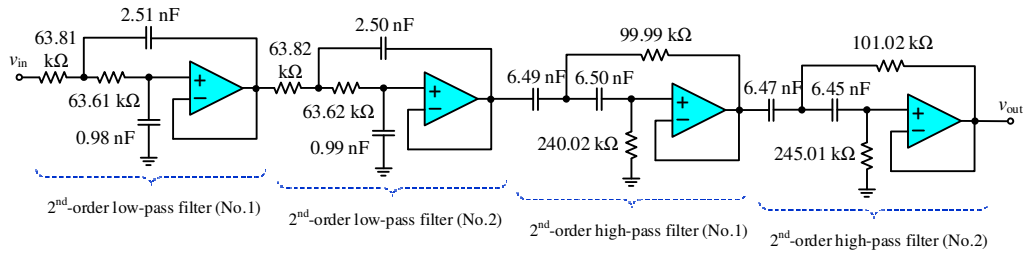


Figure 8 Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-I).

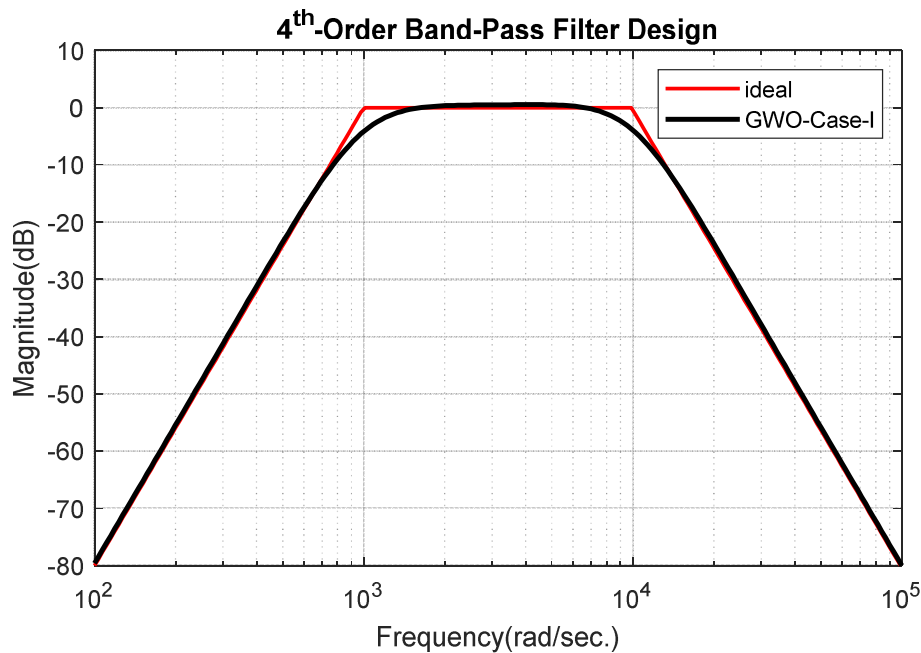


Figure 9 Responses of Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-I) obtained by MATLAB.

3. ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2

ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 เมื่อตัวต้านทานทุกตัว ใน Figure 1 ได้รับการค้นหาในขณะที่ตัวเก็บประจุใน Figure 1 ถูกกำหนดให้คงค่า (ไม่ต้องค้นหา) ดังนี้ $C_{L1}=C_{L3}=2.2\text{nF}$, $C_{L2}=C_{L4}=1\text{nF}$, $C_{H1}=C_{H2}=C_{H3}=C_{H4}=6.8\text{nF}$ ตามมาตรฐานอนุกรม-E24 ซึ่งมีค่าผิดพลาดอยู่ที่ $\pm 5\%$ ดังนั้นในกรณีที่ 2 นี้ จะทำการค้นหาค่าเฉพาะตัวต้านทานทุกตัว รวมทั้งหมดจำนวน 8 ตัวนั้นคือ $x=[R_{L1}, R_{L2}, R_{L3}, R_{L4}, R_{H1}, R_{H2}, R_{H3}, R_{H4}]$ กำหนดให้ $\omega=1,000 \text{ rad/sec}$ ($f=159.15 \text{ Hz}$) และ $\omega=10,000 \text{ rad/sec}$ ($f=1.59 \text{ KHz}$) เช่นเดียวกับกรณีที่ 1 ขั้นตอนวิธี GWO จะถูกพัฒนาเป็นโปรแกรมการค้นหาด้วย MATLAB version 2017b (LicenseNo. #40637337) เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์

Intel(R) Core(TM) i7-10510U CPU@2.3 GHz, 80.GB-RAM ค่าพารามิเตอร์ของขั้นตอนวิธี GWO ได้รับการทดสอบโดยการปรับจำนวนหมาป่า $n = 5, 10, \dots, 50$ ซึ่งพบว่า $n = 20$ คือค่าที่เหมาะสมสำหรับปัญหาในกรณีนี้กำหนดให้เกณฑ์ยุติการค้นหา (TC) คือจำนวนรอบการค้นหาสูงสุด (Max_iteration)=200 และดำเนินการค้นหาทั้งหมด 50 ครั้ง (trials) เพื่อค้นหาค่าตัวต้านทานที่เหมาะสมที่สุดในกรณีที่ 2 นี้กำหนดให้ขอบเขตการค้นหาแสดงดังสมการที่ (13) จากผลการค้นหาจำนวน 50 ครั้ง อัตราการลู่เข้าหาผลเฉลยของขั้นตอนวิธี GWO จะมีลักษณะการลู่เข้าเช่นเดียวกับ Figure 7

$$\text{Subject to } \left. \begin{aligned} R_{L1} = R_{L2} = R_{L3} = R_{L4} &= [65\text{k}\Omega - 70\text{k}\Omega], \\ R_{H1} = R_{H3} &= [90\text{k}\Omega - 120\text{k}\Omega], \\ R_{H2} = R_{H4} &= [200\text{k}\Omega - 250\text{k}\Omega] \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

วงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ในกรณีที่ 2 แสดงดัง Figure 10 และผลการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB version 2017b (License No. #40637337) แสดงดัง Figure 11 โดยที่ค่า SSE ระหว่างผลตอบสนองอุดมคติและผลตอบสนองที่ได้จากการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 มีค่าเท่ากับ 352.94 และมีแถบความถี่เท่ากับ 7.53 krad/sec (1.20 kHz) โดยขั้นตอนวิธี GWO จะใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหาผลเฉลยเท่ากับ 7.26 วินาที

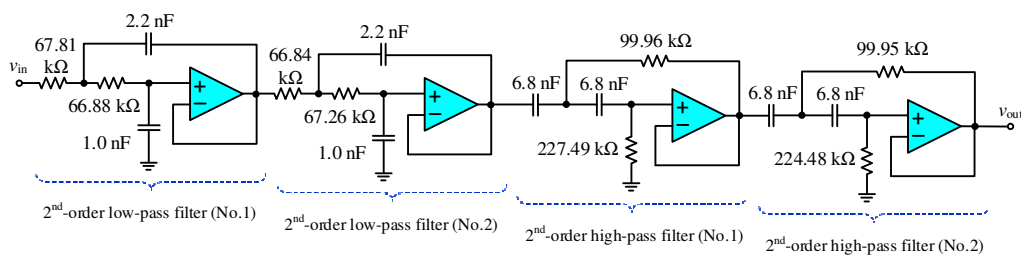


Figure 10 Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-II).

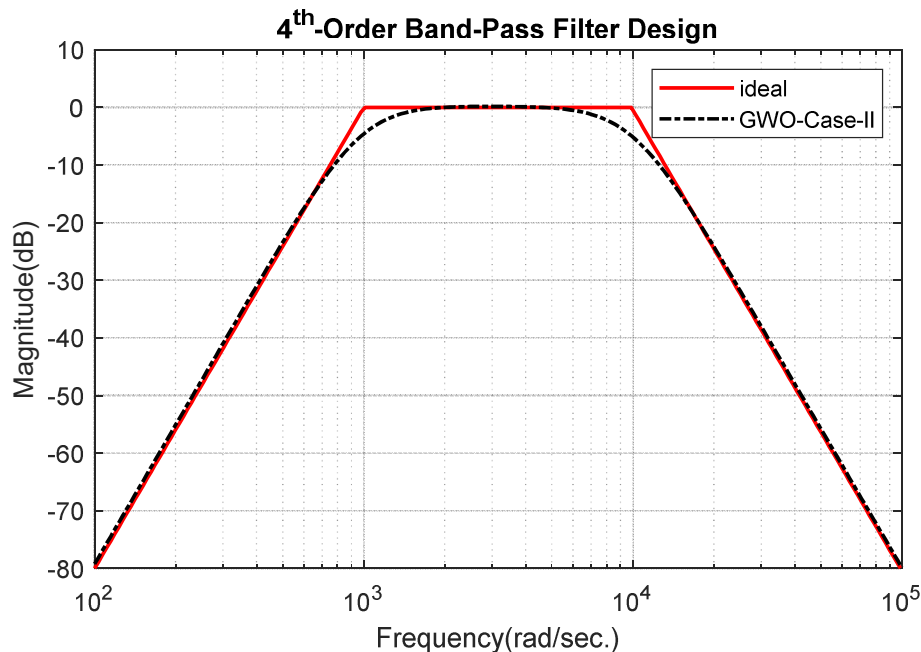


Figure 11 Responses of Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-II) obtained by MATLAB.

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยในหัวข้อที่ผ่านมา ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 และผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 ถูกนำเสนอเพื่อการเปรียบเทียบดังแสดงใน Figure 12 ซึ่งพบว่าผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับผลตอบสนองอุดมคติของวงจรกรองผ่านแถบอันดับ-4 มากกว่าผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 จะพบว่า ผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 จะให้ผลตอบสนองที่ใกล้เคียงกับผลตอบสนองอุดมคติของวงจรกรองผ่านแถบอันดับ-4 มากกว่าผลการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่ 1 ขั้นตอนวิธี GWO จะดำเนินการค้นหาค่าตัวด้านทานและตัวเก็บประจุทุกตัวรวมทั้งหมดจำนวน 16 ตัว จึงมีโอกาที่จะพบผลเฉลยที่เหมาะสม (optimal solutions) ได้มากกว่าการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 ที่ดำเนินการค้นหาเพียงตัวด้านทานจำนวน 8 ตัวเท่านั้น (ตัวเก็บประจุทุกตัวถูกกำหนดให้คงค่าตามมาตรฐานอนุกรม-E24) อย่างไรก็ตาม ผลการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 2 จะสามารถนำไปอนุวัติ (implementation) เป็นวงจร

กรองผ่านแถบอันดับ-4 เพื่อใช้งานจริงได้สะดวกกว่าผลการออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO กรณีที่ 1 เนื่องจากตัวเก็บประจุทุกตัวสามารถหาได้ในท้องตลาด และตัวต้านทานทุกตัวสามารถใช้ตัวต้านทานแบบปรับค่าได้ในท้องตลาดมาปรับค่าให้ได้ตามที่ออกแบบไว้

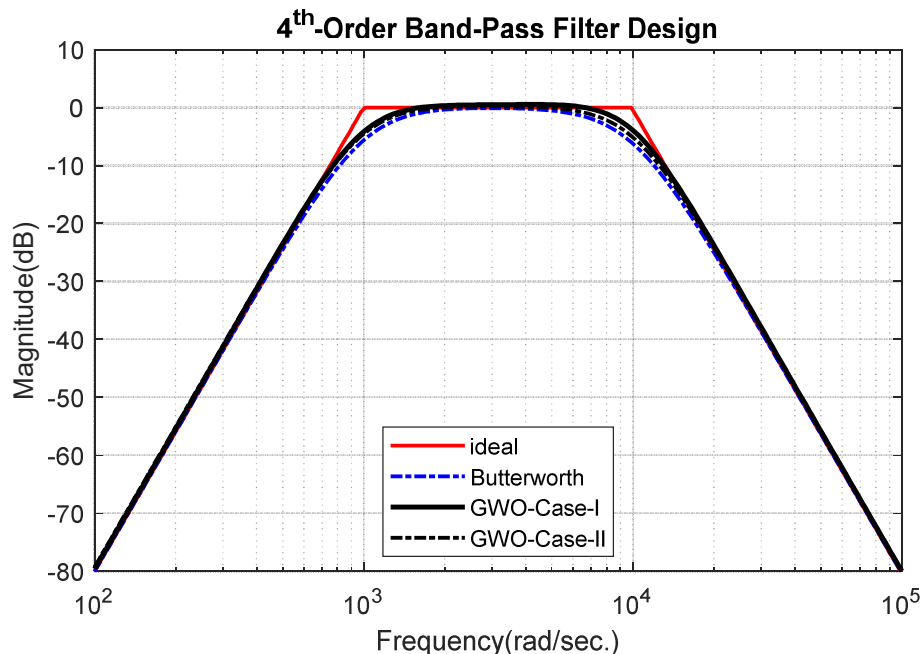


Figure 12 Responses of Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by Conventional Method (Butterworth), GWO (Case-I) and GWO (Case-II) obtained by MATLAB.

อย่างไรก็ตามเนื่องจากผลตอบสนองใน Figure 12 เป็นผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม MATLAB ที่อาศัยสมการคณิตศาสตร์ตามแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวงจรกรองผ่านแถบในการประมวลผล ดังนั้นเพื่อเป็นการเปรียบเทียบและยืนยันผลเพิ่มเติม จึงได้นำวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth และขั้นตอนวิธี GWO ในกรณีที่ 1 และกรณีที่ 2 ดังแสดงใน Figure 5 Figure 8 และ Figure 10 มาจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม LTspice ซึ่งจะอาศัยการสร้างวงจรจริงขึ้นมาตาม Figure 5 Figure 8 และ Figure 10 เพื่อการประมวลผล ทำการกำหนดค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุตามค่าที่ได้จากการออกแบบและอาศัยออปแอมป์ LM741 ที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดเป็นวงจรขยาย

วงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth ที่แสดงใน Figure 5 ถูกนำมาสร้างเป็นวงจรเพื่อจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม LTspice ดังแสดงใน Figure 13 และให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงใน Figure 14 ซึ่งพบว่าสอดคล้องกับ Figure 6 นั่นคือมีค่าแถบความถี่เท่ากับ 1.06 kHz ($\cong 6.66$ krad/sec)

วงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO ในกรณีที่ 1 ที่แสดงใน Figure 8 ถูกนำมาสร้างเป็นวงจรเพื่อจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม LTspice ดังแสดงใน Figure 15 และให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงใน Figure 16 ซึ่งพบว่า สอดคล้องกับ Figure 9 นั่นคือมีค่าแถบความถี่เท่ากับ 1.32 kHz ($\cong 8.29$ krad/sec)

และวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนวิธี GWO ในกรณีที่ 2 ที่แสดงใน Figure 10 ถูกนำมาสร้างเป็นวงจรเพื่อจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม LTspice ดังแสดงใน Figure 17 และให้ผลการจำลองสถานการณ์ดังแสดงใน Figure 18 ซึ่งพบว่า สอดคล้องกับ Figure 11 นั่นคือมีค่าแถบความถี่เท่ากับ 1.19 kHz ($\cong 7.47$ krad/sec)

เมื่อพิจารณาผลการออกแบบในภาพรวม จะพบว่าขั้นตอนวิธี GWO สามารถออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ได้อย่างเหมาะสม และให้ผลตอบสนองทางความถี่ที่ใกล้เคียงกับผลตอบสนองทางความถี่อุดมคติของวงจรกรองผ่านแถบอันดับ-4 มากกว่าผลการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรอง Butterworth จากผลการออกแบบวงจรกรองผ่านแถบแบบแอกทีฟอันดับ-4 ด้วยขั้นตอนวิธี GWO ตามกรอบงานที่นำเสนอ จะพบว่าเป็นกรอบงานวางนัยทั่วไป (generalized framework) เพราะสามารถประยุกต์ขั้นตอนวิธี GWO เพื่อการออกแบบวงจรกรองชนิดใดก็ได้ อันดับใดก็ได้ และช่วงความถี่เท่าใดก็ได้ตามที่ต้องการ โดยไม่ต้องพึ่งพาการประมาณค่า และการปรับมาตรา FSF และ ISF เหมือนการออกแบบด้วยวิธีดั้งเดิมที่ใช้หลักการเทียบค่าสัมประสิทธิ์

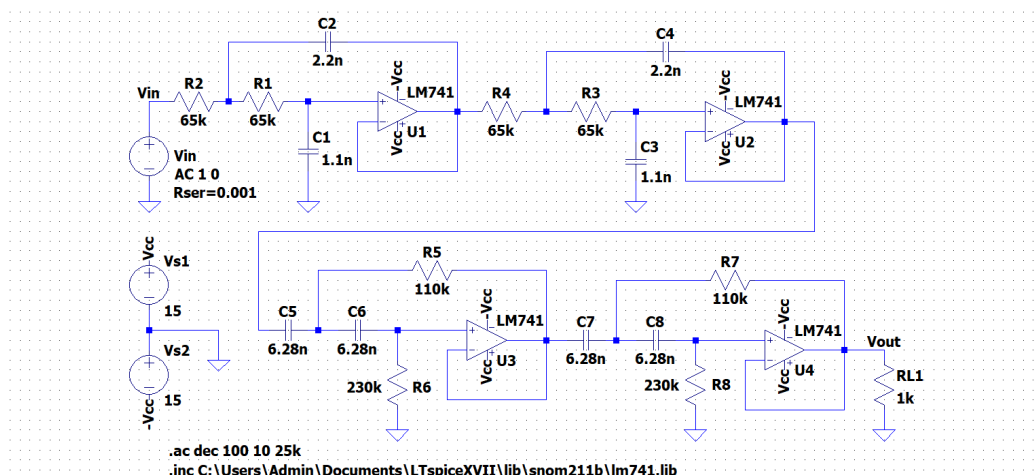


Figure 13 LTspice for Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by Conventional Method (Butterworth) in Figure 5.

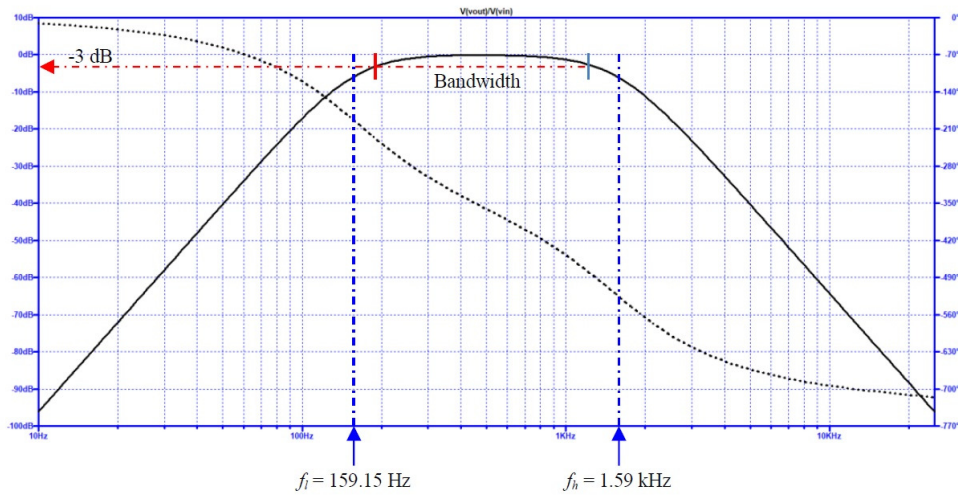


Figure 14 Responses of Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by Conventional Method (Butterworth) obtained by LTspice.

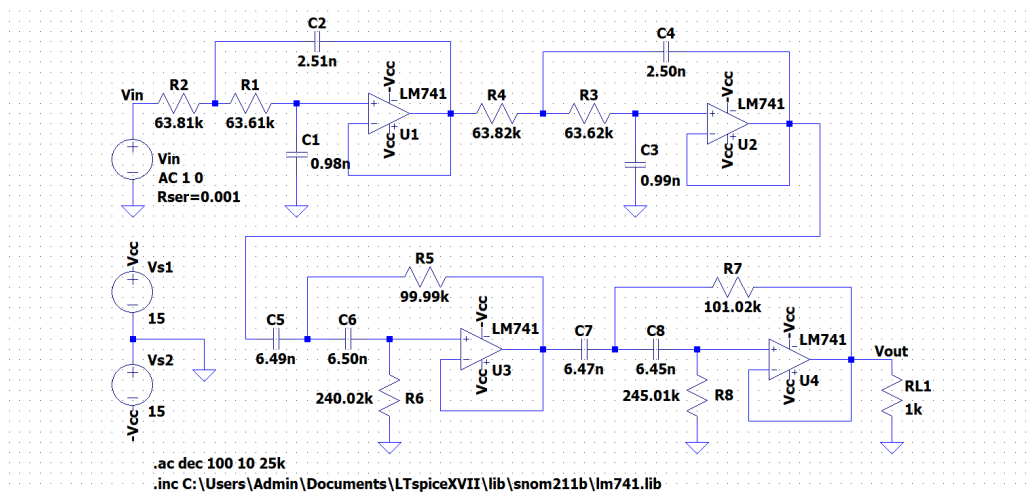


Figure 15 LTspice for Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-I) in Figure 8.

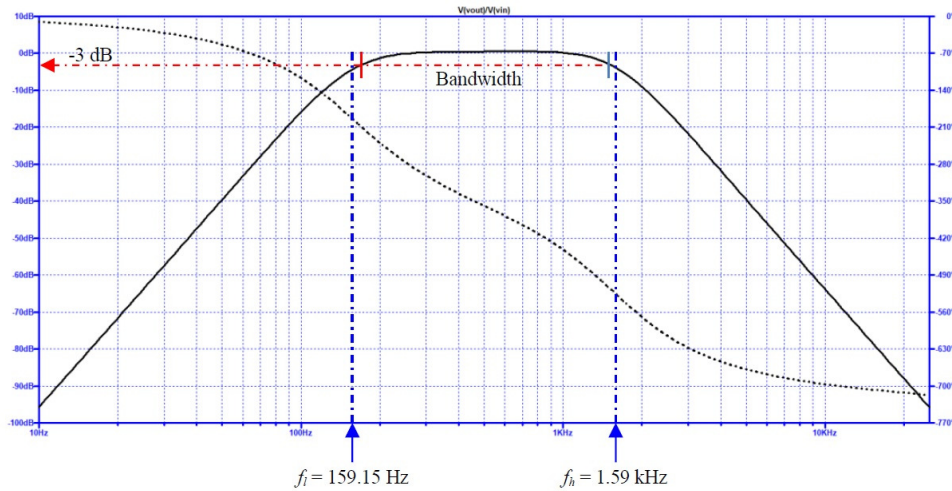


Figure 16 Responses of Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-I) obtained by LTspice.

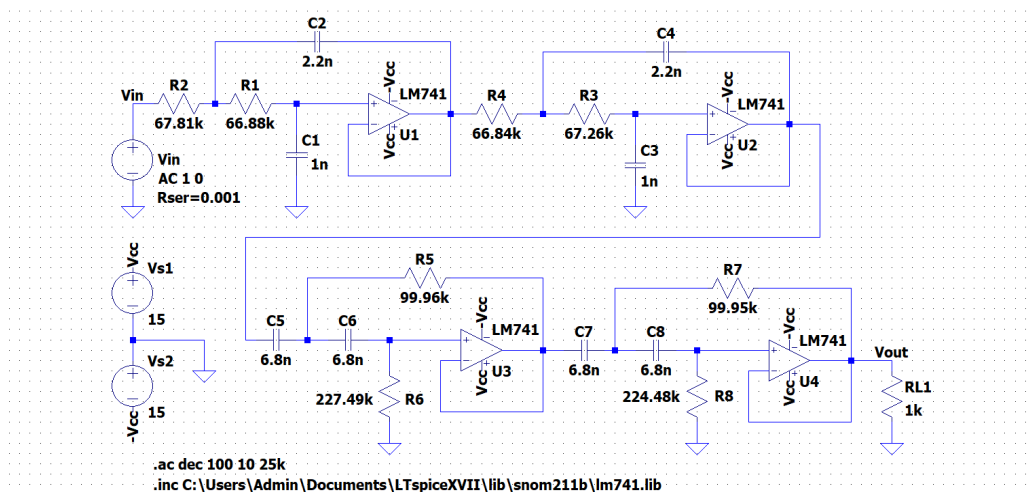


Figure 17 LTspice for Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-II) in Figure 10.

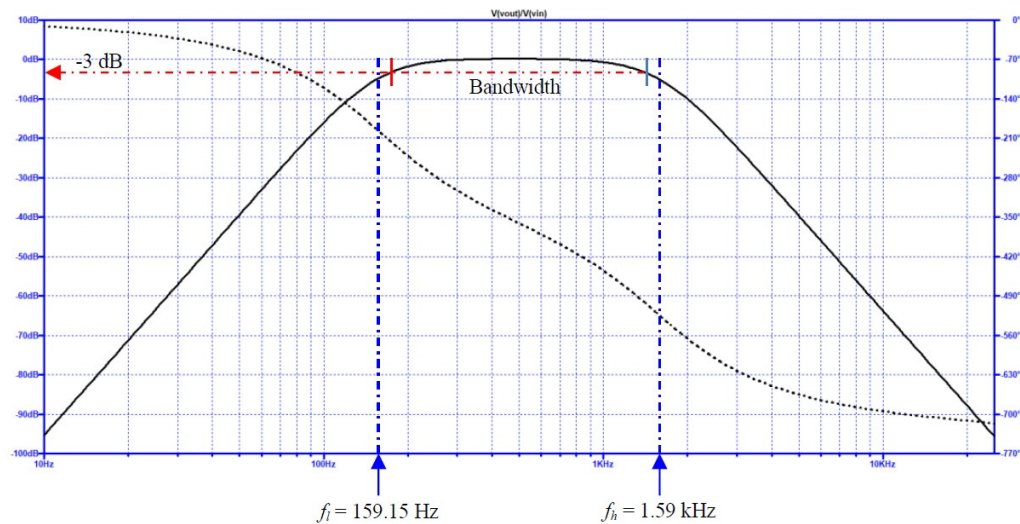


Figure 18 Responses of Fourth-Order Active Band-Pass Filter Designed by GWO (Case-II) obtained by LTspice.

References

- [1] Zverev, A. I. (1967). *Handbook of filter synthesis*. New York: John Wiley.
- [2] Sheno, B. A. (2006). *Introduction to Digital Signal Processing and Filter Design*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [3] Pactis, S. A. (2007). *Active Filters Theory and Design*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [4] Rodriguez, J. (2015). *Fundamentals of 5G Mobile Networks*. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons.
- [5] Sutherland, N. S. (1979). *Tutorial Essays in Psychology*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- [6] Kaya, T. & Ince, M. C. (2012). The Design of Analog Active Filter with Different Component Value using Genetic Algorithm. *International Journal of Computer Applications*, 45(8), 43-47.
- [7] Bose, D., et al. (2014). Optimal Filter Design using an Improved Artificial Bee Colony Algorithm. *Information Sciences*, 281, 443-461.
- [8] Vural, R. A. & Yildirim, T. (2010). Component value selection for analog active filter using particle swarm optimization. In *The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)* (p.25-28). 26–28 February, 2010, Singapore.

- [9] Benhala, B. (2014). Ant Colony Optimization for Optimal Low-Pass Butterworth Filter Design. *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, 13, 313-318.
- [10] Puangdownreong, D. & Sukulin, A. (2012). Current Search and Applications in Analog Filter Design Problems. *Journal of Communication and Computer*, 9(9), 1083-1096.
- [11] Majuang, C., et al. (2022). Optimal Active Filter Design by ICuS Algorithm. *Pathumwan Academic Journal*, 12(35), 70-79. (in Thai)
- [12] Romsai, W., et al. (2022). Design of optimal active low-pass filter by hybrid intensified current search. In *The 5th ECTI Northern Section Conference on Electrical, Electronics, Computer and Telecommunications Engineering (ECTI-NCON 2022)* (p.383-386). 26-28 January, 2022, Chiangrai, Thailand.
- [13] Romsai, W., et al. (2024). Optimal design of fourth-order active band-pass filter via MHICuS algorithm. In *The 16th Electrical Engineering Network: EENET-2024* (p.133-136). 29-31 May, 2024, Nong Khai, Thailand. (in Thai)
- [14] Pulpoka, S. & Puangdownreong, D. (2023). Optimal design of active low-pass filter by flower pollination algorithm. In *The 15th Electrical Engineering Network: EENET-2023* (p.150-153) 1-3 May, 2023, Nakhon Phanom, Thailand. (in Thai)
- [15] Mirjalili, S., et al. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46-61.
- [16] Makhadmeh, S. N., et al. (2023). Recent Advances in Grey Wolf Optimizer, its Versions and Applications: Review. *IEEE Access*, 12, 22991-23028.
- [17] Mosavi, S. K., et al. (2023). A Comprehensive Survey of Grey Wolf Optimizer Algorithm and its Application. *International Journal of Advance Robotics & Expert Systems*, 1(6), 23-45.
- [18] Fari, H., et al. (2018). Grey Wolf Optimizer: a Review of Recent Variants and Applications. *Neural Computing and Applications*, 30, 413-435.