

วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนด้วยแบบจำลองการกระตุ้นรูปแบบกระแสโดยใช้โอทีเอ

Jerk Model Current-mode Chaotic Oscillator based on OTA

คุณานต์ กระจวานิช และ พิพัฒน์ พรหมมี

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
62601093@kmitl.ac.th, pipat.pr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้โครงสร้างตามแบบจำลอง Jerk ของ Sportt ร่วมกับฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum ในการกำเนิดสัญญาณจะทำได้โดยการปรับค่าสัมประสิทธิ์เพียงหนึ่งค่า การออกแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน จะทำงานในรูปแบบกระแสโดยใช้โอทีเอ และ ตัวเก็บประจุเท่านั้น ไม่มีการใช้ความต้านทาน สามารถปรับค่าได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ โดยมีองค์ประกอบหลักสามส่วน ได้แก่ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง และฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งวงจรสามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณได้จากตัวประกอบคุณภาพ (Quality Factor) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง การจำลองการทำงานของวงจรด้วยโปรแกรม PSpice และ โปรแกรม MATLAB พบว่า วงจรสามารถแสดงการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้ และ ยังพบว่าพฤติกรรมของสัญญาณมีช่วงการทำงานที่ค่าที่แน่นอนสอดคล้องกับผลจากวงจร โดยยืนยันได้จากกราฟ Bifurcation

คำสำคัญ: สัญญาณอลวน แบบจำลอง Jerk โอทีเอ กำเนิดสัญญาณ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น

Abstract

This paper describes a chaotic oscillator circuit based on Jerk model and nonlinear function. The signum function is deployed to realize the chaotic oscillator which controlled by using a single parameter. The OTA and grounded capacitors are used without the resistors for achieving the chaotic oscillator. The circuit consists of main three parts, lossless integrator, biquadratic low-pass filter, and nonlinear function circuits. The condition of chaos signal can be electronically tuned through the quality factor of biquadratic low-pass filter. The simulation results are incorporated by PSpice and MATLAB which found that the chaos signal can be generated agree well to the theory. The chaos behavior can also be proved by bifurcation diagram. The signal output has doubling periods according to the circuit results.

Keywords: Chaos signal, Jerk model, OTA, Oscillator, nonlinear function

1. บทนำ

วงจรอิเล็กทรอนิกส์วงจรแรกของ Chua แสดงการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ถูกค้นพบในห้องวิจัยซึ่งยังไม่มีทฤษฎีทางคณิตศาสตร์ [1] โดยมีการใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง (Ordinary Differential Equations) สามสมการ ต่อมาวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนแบบโคลพิทส์ (Chaotic Colpitts Oscillator) ได้นำเสนอโดย Kennedy [2] ค้นพบว่าวงจรเกิดสัญญาณรูปแบบไซน์สามารถเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้ จากนั้น Elwakil และ Kennedy ได้ใช้ กระบวนการกึ่งระบบ มาดัดแปลงวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยมีวงจรกำเนิดสัญญาณไซน์เป็นวงจรหลักและมีการใช้อุปกรณ์แบบไม่เชิงเส้นต่อจากภายนอก เป็นอุปกรณ์จัดเก็บพลังงาน (ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ) และไดโอด [3] นอกจากนี้ยังมีวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) อีกหลายวงจร เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Wein-bridge [3] วงจรเกิดสัญญาณ Twin-T [4] วงจรกำเนิดสัญญาณด้วย CFOA (Current Feedback OPAMP) [5] เป็นต้น จะเห็นได้ว่ามีการคิดค้นวงจรที่สามารถเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้อย่างหลากหลาย จากวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ในแบบต่างๆ ที่กล่าวมา วงจรของ Elwakil และ Kennedy เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากมีการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณที่ง่ายและมีอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นที่แยกเป็นอิสระ ทำให้ลดความซับซ้อนต่อการสร้างวงจร ในบทความนี้จึงเลือกใช้รูปแบบการกระตุ้น (Jerk) ของ Sportt [6-7] ที่มีการสร้างในรูปแบบเดียวกัน มีการนำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับสามเพียงสมการเดียวในรูปแบบ Jerk กับค่าสัมประสิทธิ์ k ซึ่งมีสมการ ดังนี้

$$\frac{d^3x}{dt^3} + k \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{dx}{dt} = G(x) \quad (1)$$

รูปแบบของ Jerk มาจากกลไกที่มี x เป็นค่าการจัด และ อนุพันธ์อันดับต่างๆ เทียบกับเวลาของ x คือ ความเร่ง $\left(\frac{dx}{dt}\right)$, ความเร็ว $\left(\frac{d^2x}{dt^2}\right)$ และการกระตุ้น $\left(\frac{d^3x}{dt^3}\right)$ และ ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(x)$ ที่ใช้ใน

รูปแบบ Jerk ที่สามารถเป็นไปได้เช่น ฟังก์ชันค่าสัมบูรณ์ (Absolute) ฟังก์ชัน ($\tanh(x)$) หรือ ฟังก์ชันเครื่องหมาย ($\text{sgn}(x)$) ดังสมการที่ (2)

$$G(x) = \begin{cases} |x| - 2 & ; K = 0.6 [7] \\ 2 \tanh(x) - x & ; K = 0.19 [6] \\ \text{sgn}(x) - 2x & ; K = 1 [8] \end{cases} \quad (2)$$

จากสมการที่ (2) เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ Sportt นำมาใช้กับรูปแบบของ Jerk บางส่วนมีการใช้ CFOA (Current Feedback OPAMP) [8] ต่อร่วมกับความต้านทาน และ ตัวเก็บประจุ เป็นโครงสร้างตัวดึงดูดความ (Chaotic Attractor) และ โครงสร้างตัวดึงดูดความใน 6 รูปแบบ [9] ซึ่งจริงดังกล่าวในอดีตไม่สามารถปรับค่าทางอิเล็กทรอนิกส์ได้

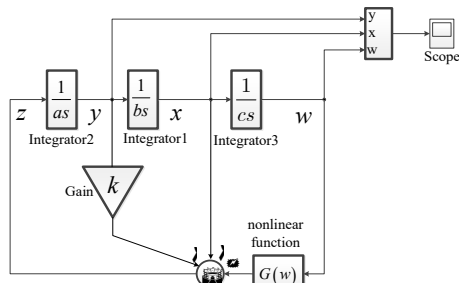
บทความนี้นำเสนอ กำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้วงจรโอทีเอ (OTA: Operational Transconductance Amplifier) และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) โดยใช้โครงสร้างรูปแบบ Jerk และ ยกฟังก์ชัน Signum มา ร่วมกับสมการอนุพันธ์อันดับสาม โดยวงจรสามารถปรับเงื่อนไขของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(x)$ และ ตัวดึงดูดความ (Attractor) ได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอิสระต่อกัน โดยแสดงผลการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ทั้งการจำลองผลจาก MATLAB และ PSpice เปรียบเทียบกัน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลอง Jerk

Sportt ได้นำเสนอรูปแบบการทำงานของระบบพลวัตแบบสามมิติ ซึ่งสามารถแสดงการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้ สมการ Jerk มีฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่สามารถปรับค่าที่ได้ง่ายเนื่องจากเป็นอิสระ และสามารถปรับค่าสัมประสิทธิ์จากค่า k เพียงค่าเดียว ลดความซับซ้อนในการนำไปใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งรูปแบบ Jerk ถูกนำเสนอครั้งแรกโดย Sportt ในปี ค.ศ. 2000

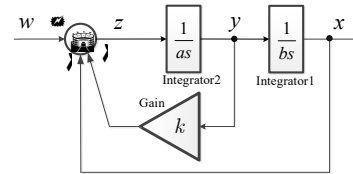
บทความนี้มีการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ที่มีต้นแบบจากรูปแบบ Jerk ของ Sportt ตามที่อธิบายไว้ในสมการที่ (1) มีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์เพียงหนึ่งค่า และ ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น $G(x)$ ซึ่งเมื่อปรับเปลี่ยนค่าฟังก์ชันไม่เชิงเส้นนี้ ก็จะสามารถปรับเปลี่ยนรูปการการเกิดสัญญาณอลวนได้โดยง่าย โดยโครงสร้าง Jerk ของ Sportt สามารถแสดงด้วยตัวแปรสถานะ (State) ทั่วไป ดังแสดงในรูปที่ 1 [9]



รูปที่ 1 แบบจำลอง Jerk ที่มีค่าสัมประสิทธิ์ k

เมื่อพิจารณาแบบจำลอง Jerk รูปที่ 1 เฉพาะสถานะ x - z สามารถนำมาเขียนใหม่ได้ดังรูปที่ 2 และ พบว่าประพจน์ตัวเป็นไบควอดเรติก ฟังก์ชันในรูปตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (LPF) อันดับสองดังสมการที่ (3)

$$\frac{x}{w} = \frac{1}{abs^2 + kbs + 1} \quad (3)$$



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแยกส่วนของแบบจำลอง Jerk

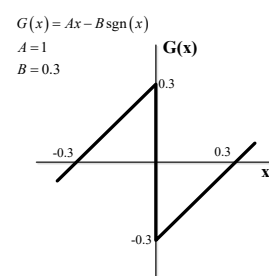
ระบบไม่เชิงเส้นแบบสามมิติรูปแบบ Jerk สามารถอธิบายด้วยสมการอนุพันธ์สามัญ (Ordinary Differential Equations) ดังต่อไปนี้

$$\left. \begin{aligned} \frac{dw}{dt} &= x, \\ \frac{dx}{dt} &= y, \\ \frac{dy}{dt} &= -kz - y + Aw - B \text{sgn}(w), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

โดยที่ k คือ ตัวประกอบในการปรับเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ ค่า A และ B คือ ค่าคงที่เงื่อนไขของฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ซึ่ง ค่า $A=1$ และ $B=0.3$ มีการกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $(w_0, x_0, y_0) = (0.6, 0.3, 0)$ ตามลำดับ

2.2 ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น

ฟังก์ชันไม่เชิงเส้น ที่สามารถนำมาใช้กับรูปแบบ Jerk มีหลายแบบด้วยกันดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 1 โดยฟังก์ชันไม่เชิงเส้นที่ใช้ในบทความนี้จะใช้ฟังก์ชัน Signum ซึ่งเป็นฟังก์ชันที่ประกอบจากฟังก์ชันสัญลักษณ์ และ ฟังก์ชันเชิงเส้น โดยในรูปที่ 3 เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นอิสระปรับเงื่อนไขได้ ด้วยตัวแปร A และ B สำหรับกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) โครงสร้าง Jerk



รูปที่ 3 ตัวอย่างฟังก์ชันไม่เชิงเส้น Signum

2.3 Bifurcation diagram

ในการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ในระบบพลวัต มีผลทางทฤษฎีอธิบายการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) หลายวิธี เช่น Poincare map, LE (Lyapunov Exponent), Bifurcation Diagram เป็นต้น ซึ่งในบทความจะนำเสนอผลของการแยกไปสองทาง (Doubling) โดยทำให้เกิดเป็นการแยกไม่ซ้ำรูปแบบ (Bifurcation) เพื่อพิสูจน์การเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) โดยใช้ทฤษฎีจากสมการ Logistic map ดังนี้

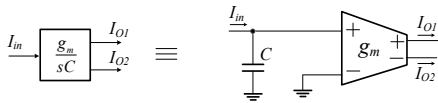
$$x_{n+1} = kx_n(1-x_n) \quad (5)$$

และเมื่อนำมาเขียนอยู่ในรูปแบบตัวแปรสถานะ 3 มิติ (Dimension) ในโปรแกรม MATLAB สำหรับสมการ Jerk จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\left. \begin{aligned} w_{n+1} &= x_n, \\ x_{n+1} &= y_n, \\ y_{n+1} &= -kz_n - y_n + w_n - 0.3 \operatorname{sgn} w_n, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

3. การสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน

ในส่วนการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนโดยใช้หลักการดังรูปที่ 1 นั้น วงจรที่ต้องใช้เป็นหลักคือ อินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย ซึ่งสามารถสร้างได้จากโอทีโอที่แสดงในรูปที่ 4 มีฟังก์ชันถ่ายโอน ดังสมการที่ (7) และ (8)

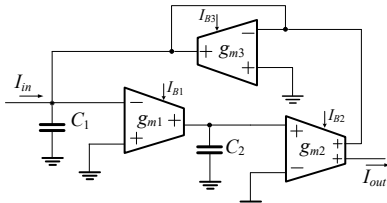


รูปที่ 4 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย

$$\frac{I_{O1}}{I_{in}} = \frac{g_m}{sC} \quad (7)$$

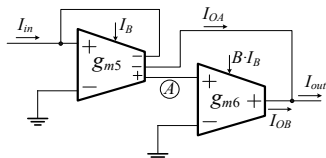
$$\frac{I_{O2}}{I_{in}} = -\frac{g_m}{sC} \quad (8)$$

จากบล็อกไดอะแกรมแยกส่วนของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 2 นั้น มีคุณสมบัติเป็นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ที่สามารถปรับค่าตัวประกอบคุณภาพได้อย่างเป็นอิสระกับความถี่ตอบสนอง สามารถออกแบบได้โดยใช้โอทีโอที่เอและตัวเก็บประจุ ดังแสดงดังรูปที่ 5 มีฟังก์ชันถ่ายโอนกระแสดังสมการที่ (9)



รูปที่ 5 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง

$$\frac{I_{out}}{I_{in}} = \frac{-\frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}}{s^2 + \left(\frac{g_{m3}}{C_1}\right)s + \frac{g_{m1}g_{m2}}{C_1C_2}} \quad (9)$$



รูปที่ 6 วงจรฟังก์ชัน Signum สร้างจากโอทีโอ

จากบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 1 จำเป็นต้องมีวงจรกำเนิดฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(x)$ ซึ่งสามารถสร้างได้จากโอทีโอ 2 ตัวดัง

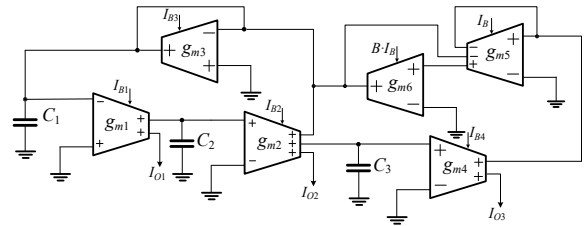
แสดงในรูปที่ 6 โดย OTA_5 ทำหน้าที่เป็นวงจรตามกระแส (Current Follower) ส่วน OTA_6 คือร่วมกับเอาต์พุตของ OTA_5 ทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบกระแส (Current Comparator) เพื่อให้วงจรทำงานเป็นฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น $G(w) = w_n - 0.3 \operatorname{sgn} w_n$ ตามรูปที่ 3 ซึ่งสามารถทำได้โดยปรับกระแสไบอัสของ OTA_5 และ OTA_6 เท่ากับ I_B และ $0.3I_B$ ตามลำดับ สมการกระแสของวงจรรูปที่ 6 สามารถสรุปได้เป็น

$$I_{OA} = I_{in} \quad (10)$$

$$V_A = -V_{sat} \operatorname{sgn}(I_{in}) \quad (11)$$

$$I_{OB} = -0.3I_B \operatorname{sgn}(I_{in}) \quad (12)$$

$$I_{out} = I_{in} - 0.3I_B \operatorname{sgn}(I_{in}) \quad (13)$$



รูปที่ 7 วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนรูปแบบกระแสโดยใช้ OTA

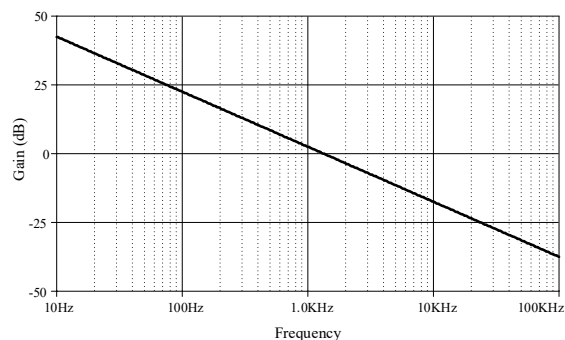
เมื่อนำวงจรย่อยรูปที่ 4-6 มาต่อกันตามบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง Jerk รูปที่ 1 จะได้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนซึ่งสามารถปรับค่าเงื่อนไขการกำเนิดสัญญาณ และ ค่าคงที่ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นได้ทางอิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอิสระต่อกัน โดยสัญญาณอลวนเอาต์พุตที่ตำแหน่งต่างๆ สามารถนำออกจากเอาต์พุตของ OTA_1 , OTA_2 และ OTA_4

4. ผลการทดลอง

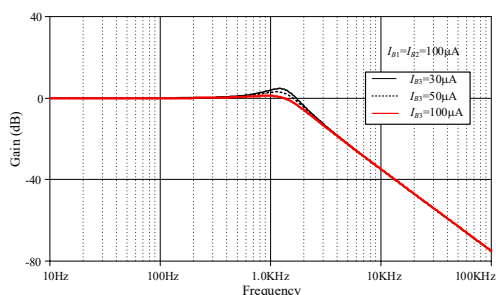
ในการยืนยันการทำงานของวงจรที่นำเสนอจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ผลการจำลองการทำงานด้วย PSpice และ ผลการจำลองการเกิดปรากฏการณ์ Bifurcation ด้วย MATLAB

4.1 ผลจำลองการทำงาน PSpice

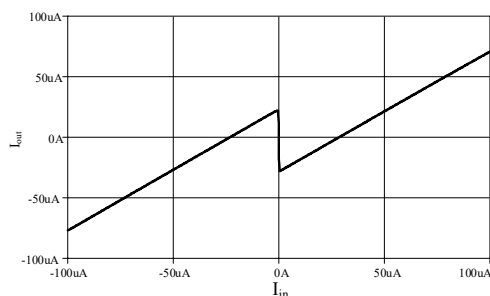
ในการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม PSpice มีผลการทดลอง 4 ส่วน วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง วงจรฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น และ วงจรรวมในการเกิดสัญญาณอลวน โดย OTA ที่ใช้จะเป็นวงจร CMOS-OTA หลายเอาต์พุตอย่างง่าย [10] โดยใช้แบบจำลอง TSMC 0.25μm และ แรงดันไฟเลี้ยง $\pm 1.2V$ ส่วนกระแสไบอัส $I_B=100\mu A$ ทุกตัว ยกเว้น OTA_6 กำหนดให้กระแสไบอัส $BI_B=30\mu A$ ตัวเก็บประจุทุกตัวเท่ากับ 50nF รูปที่ 8 และ 9 แสดงผลการตอบสนองทางขนาดของ วงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย และ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง ตามลำดับ ซึ่งพบว่าผลการตอบสนองทางความถี่จะมีค่าประมาณ 1kHz เท่ากันเนื่องจากใช้ ค่า C และ กระแสไบอัสเท่ากัน และ เมื่อสามารถปรับค่า $I_{B3}=kI_B$ ค่าลงจะพบว่าค่า Q (Quality factor) ของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านจะมีค่าสูงขึ้นแต่ไม่กระทบต่อความถี่ตอบสนอง สอดคล้องกับทฤษฎีทุกประการ ส่วนรูปที่ 10 เป็นวงจรฟังก์ชัน Signum พบว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎีเป็นอย่างดี



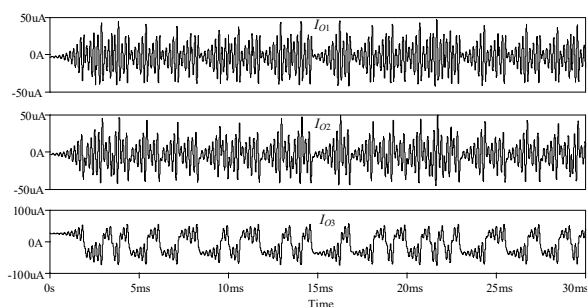
รูปที่ 8 ผลการตอบสนองของวงจรอินทิเกรเตอร์แบบไม่สูญเสีย



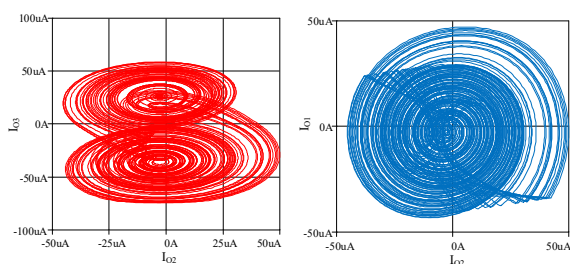
รูปที่ 9 ผลการตอบสนองของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอันดับสอง



รูปที่ 10 กระแสเอาต์พุตของวงจรฟังก์ชัน Signum



รูปที่ 11 สัญญาณอลวน (Chaos) ที่ตำแหน่ง I_{O1} , I_{O2} และ I_{O3}

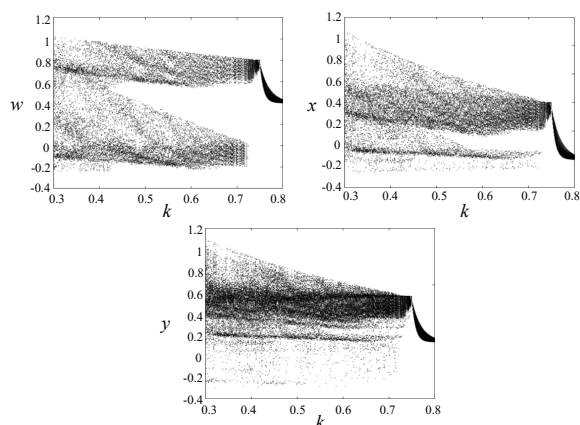


รูปที่ 12 ตัวดึงดูดอลวน (Chaos Attractor) ระบาย I_{O2} , I_{O3} และ I_{O1}

รูปที่ 11 และ 12 เป็นการจำลองการเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ด้วยโปรแกรม PSpice รูปที่ 12 เป็นการแสดงผล I_{O1} , I_{O2} , I_{O3} กับแกนเวลา และ ระบาย x , y ของ I_{O2} , I_{O3} และ I_{O1} ตามลำดับ โดยปรับ $k=0.5$

4.2 ผลจำลองการทำงาน Bifurcation

ในส่วนผลการทดลองเพื่อพิสูจน์การเกิดสัญญาณอลวน (Chaos) ใช้สมการที่ (6) เป็นสมการ state ในรูปแบบ 3 มิติ (Dimension) นำมาเขียนกราฟช่วงทวีค่า (Doubling period) ได้ใน Bifurcation Diagram ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรสเตตทั้งสาม $(w_0, x_0, y_0) = (0.6, 0.3, 0)$ ตามลำดับ จากรูปที่ 13 เป็นการพล็อตตำแหน่ง w , x , และ y เทียบกับแกนพารามิเตอร์ k โดยกำหนดค่าคงที่ $A=1$ และ $B=0.3$ จากผลการทดลองจะสังเกตได้ว่า ช่วง 0.8 ถึง 0.75 เป็นช่วงเริ่มต้นของเวลาที่เอาต์พุตจะเกิดการทวีค่า (Period doubling: period-2 cycle) และเมื่อเกิดค่าที่ไม่ซ้ำกันในหนึ่งช่วงเวลา จากช่วง k มีค่าระหว่าง 0.7 ถึง 0.3 ซึ่งในช่วงนั้นนั่นเอง ระบบจะแสดงพฤติกรรมความอลวน (Chaos) ได้ อย่างชัดเจน



รูปที่ 13 แผนภาพการแยกไปสองทาง (The Bifurcation diagram)

5. สรุป

บทความนี้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ใช้อุปกรณ์โอทีเอ และ ตัวเก็บประจุ (Capacitor) โดยออกแบบด้วยแบบจำลอง Jerk ของ Sportt และ ฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น Signum จากผลการทดลองด้วยโปรแกรม PSpice และ MATLAB แสดงให้เห็นว่า วงจรสามารถกำเนิดสัญญาณอลวน (Chaos) ได้ และยืนยันผลด้วยแผนภาพการแยกไปสองทาง (Bifurcation diagram)

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. S. Ramos, "Introduction to Nonlinear Dynamics of Electronic Systems: Tutorial", *Nonlinear Dynamics*, Vol.44, pp.3–14, 2006.
- [2] M. P. Kennedy, "Chaos in the Colpitts oscillator", *IEEE Trans. Circuit Syst.-I*, Vol.41, pp.771–774, 1994.
- [3] A. S. Elwakil, and M. P. Kennedy, "A Semi-Systematic Procedure for Producing Chaos from Sinusoidal Oscillators Using Diode-

- Inductor and FET-Capacitor Composites,” *IEEE Trans. Circuit Syst.-I*, Vol.47, pp.582-590, 2000.
- [4] A. S. Elwakil, and A. M. Soliman, “Two twin-T based op amp oscillators modified for Chaos”, *J. Franklin Inst*, Vol.335B, pp.771-787, 1998.
 - [5] A. S. Elwakil, and A. M. Soliman, “Chaotic oscillators derived from sinusoidal oscillators based on the current feedback opamp,” *Analog Integr Circuits Signal Process.*, Vol.24, pp.239-251, 2000.
 - [6] J. C. Sprott, “Simple chaotic systems and circuits,” *American. J. Phys.*, Vol.68, No.8, pp.758-763, 2000.
 - [7] J. C. Sprott, “A New Class of Chaotic Circuit,” *Physics Letters A*, vol. 266, pp.19-23, 2000.
 - [8] B. Srisuchinwong, C.-H. Liou, and T. Klongkumnuankan, Prediction of Dominant Frequencies of CFOA-Based Sprott’s Sinusoidal and Chaotic Oscillators, *World Scientific Publishing*, pp.331-337, 2009.
 - [9] T. Siriburanon, B. Srisuchinwong, T. Nontapradit, “Compound Structures of Six New Chaotic Attractors in a Solely-Single-Coefficient Jerk Model with Arctangent Nonlinearity,” *Proc. of Chinese Control and Decision Conference (CCDC 2010)*, Xuzhou, China, pp.985-990, 26-28 May, 2010.
 - [10] E. Saising and P. Prommee, "Fully Tunable all-pass filter using OTA and its application," *Proc. of 39th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP2016)*, Vienna, Austria, 27-29 June 2016.