

ระบบอลวนซับซ้อนสูงต้นทุนต่ำปรับรูปแบบได้โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Low-cost Microcontroller-based Reconfigurable High-complex Chaotic Generator

จิรัฏฐ์ ฉิมน้อย คุณานนต์ กระจวานิช และ พิพัฒน์ พรหมมี*

ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Email: pipat.pr@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอตัวกำเนิดสัญญาณอลวนซับซ้อนสูงโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยสามารถสร้างลักษณะตัวดึงดูดอลวนแตกต่างกัน 3 รูปแบบ คือ สองม้วน (2-Scrolls) สามม้วน (3-Scrolls) และสี่ม้วน (4-Scrolls) ที่มีความอลวนซับซ้อนสูง การออกแบบวงจรประกอบด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ R2R Ladder ร่วมกับสวิตช์ ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับออกแบบวงจรมีต้นทุนต่ำ การกำเนิดสัญญาณอลวนหลักจะใช้อัลกอริทึมสัญญาณกระตุกแบบตัดแปลง โดยสามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ของฟังก์ชันไม่เชิงเส้นของระบบได้อย่างอิสระ ประสิทธิภาพของระบบสัญญาณอลวนด้วยอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ และ ผลการจำลองเชิงตัวเลขด้วยโปรแกรม MATLAB มีการเปรียบเทียบ พบว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันเป็นอย่างดี ระบบที่ออกแบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น เทคโนโลยีการเข้ารหัสลับ (Cryptography) กลุ่มเส้นทางหุ่นยนต์ (Random Robotic) เป็นต้น

คำสำคัญ: ออสซิลเลเตอร์แบบอลวน ต้นทุนต่ำ ไมโครคอนโทรลเลอร์ กำหนดค่าใหม่ ออลวนซับซ้อนสูง

Abstract

This paper proposed a microcontroller-based high-complex chaotic generator. The proposed chaotic system can generate three different attractors, including 2-scroll, 3-scroll, and high-complex chaotic 4-scroll. The low-cost components include a microcontroller, R2R Ladder, and switches. In chaotic generator uses the modified jerk-based algorithm, which can independently reconfigure the parameters of the nonlinear functions. The experimental and numerical MATLAB simulation results are exhibited and compared, which are agreeable performances. Finally, the proposed system is conveniently applied in many engineering areas, such as cryptography, random robotics, etc.

Keywords: Chaotic generator, Low-cost, Microcontroller, Reconfigurable, High-Complex chaotic

1. บทนำ

ระบบอลวนระบบแรกถูกค้นพบโดย Edward Lorenz ในปี ค.ศ. 1963 มีชื่อว่า Lorenz model [1] หรือที่รู้จักกันในชื่อ โมเดลปีกผีเสื้อ (Butterfly model) และได้ค้นพบพฤติกรรมของระบบอลวนคือ การอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น (Sensitive to initial condition) หรือเรียกว่า the butterfly effect นอกจาก Lorenz แล้ว ระบบอลวนระบบต่างๆ ถูกคิดค้นขึ้นมาอีกหลายระบบด้วยกันในปัจจุบัน โดยระบบที่รู้จักกันดีก็คือระบบ Rossler [2] และ ระบบ Jerk [3] ในปัจจุบันนี้มีการศึกษาเกี่ยวกับ

พฤติกรรมอลวนในระบบไม่เชิงเส้นรูปแบบใหม่ และการนำประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ [4] วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนได้รับความสนใจอย่างมากในหมู่นักวิจัย โดยสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนแบบแอนะล็อกด้วยอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ ไดโอด ออปแอมป์ OTA [5-6] เป็นต้น ในการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนแบบแอนะล็อกนั้น จะมีข้อเสียคือหากมีความต้องการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของสัญญาณเอาต์พุต จำเป็นต้องทำการปรับแต่งค่าอุปกรณ์ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดได้ง่าย นอกจากนี้วงจรถูกกำเนิดสัญญาณอลวนแบบแอนะล็อกมีความอ่อนไหวต่อความร้อนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งเมื่อพิจารณาพฤติกรรมของระบบอลวนที่มีความอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อนำไปประยุกต์ใช้จำเป็นจะต้องใช้ความแม่นยำและสม่ำเสมอการที่จะได้สัญญาณเอาต์พุตที่สมบูรณ์แบบนั้นเป็นผลมาจากการเลือกพารามิเตอร์ของวงจรถูกกำเนิดสัญญาณอย่างแม่นยำเนื่อง ด้วยเหตุนี้จึงเป็นเรื่องที่ยากมากเนื่องจากความไม่สมบูรณ์โดยธรรมชาติของส่วนประกอบแอนะล็อกแต่ละชิ้น [7]

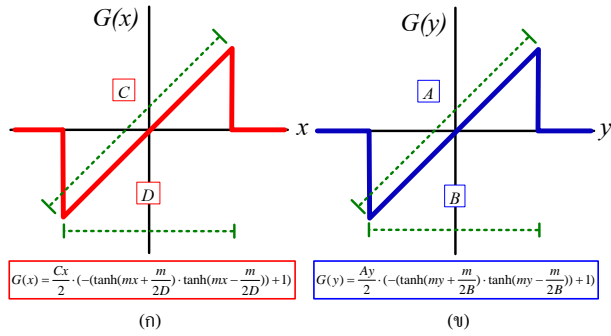
งานวิจัยนี้นำเสนอออสซิลเลเตอร์แบบอลวนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้วงจร R2R Ladder ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณแอนะล็อก การออกแบบดิจิทัลมีข้อดีว่าการออกแบบแอนะล็อก ได้แก่ อุณหภูมิที่เกิดจากอุปกรณ์ความสามารถในการปรับ ขนาดของอุปกรณ์ และการใช้พลังงาน โดยในงานนี้สร้างตัวดึงดูดอลวนที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบจากระบบเดียวกัน โดยลักษณะอลวนทั้ง 3 รูปแบบสามารถกำเนิดสัญญาณได้โดยง่ายจากการกดสวิตช์จากไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งระบบที่ออกแบบสามารถสัญญาณอลวนที่ซับซ้อนสูงได้ถึง สี่ม้วน ด้วยค่าประสิทธิภาพความซับซ้อน (D_{KT}) เท่ากับ 2.57 โดยผลลัพธ์ที่ได้จากอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ถูกตรวจสอบอย่างละเอียดด้วยการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์เชิงตัวเลขจากโปรแกรม MATLAB

2. การวิเคราะห์และออกแบบ

2.1 หลักการออกแบบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงระบบอลวนจากระบบ Jerk ให้ได้ระบบรูปแบบใหม่ และมีความซับซ้อนสูง โดยการเพิ่มฟังก์ชันไม่เชิงเส้นจาก 1 ตำแหน่ง เป็น 2 ตำแหน่ง โดยใช้ฟังก์ชัน $G(x)$ และ $G(y)$ ซึ่งในงานวิจัยนี้ใช้ฟังก์ชันสามเหลี่ยมตัดแปลง (Modified Rectangular function) [5] แต่ละฟังก์ชันมีพารามิเตอร์ 2 ตัว ในฟังก์ชัน $G(x)$ ใช้พารามิเตอร์ C, D และฟังก์ชัน $G(y)$ ใช้พารามิเตอร์ A, B แสดงตัวอย่าง

ฟังก์ชัน ดังรูปที่ 1 ซึ่งสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบของฟังก์ชันโดย A, C เป็นพารามิเตอร์สำหรับปรับความสูงของรูปฟังก์ชัน B, D เป็นพารามิเตอร์สำหรับปรับความกว้างของรูปฟังก์ชัน จากคุณสมบัติของระบบลอวน คือ ความอ่อนไหวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น เมื่อปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์เพียงตัวใดตัวหนึ่งเพียงเล็กน้อย จะส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างมาก



รูปที่ 1 รูปตัวอย่างฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น (ก) ฟังก์ชัน G(x) (ข) ฟังก์ชัน G(y)

2.2 การสร้างสัญญาณลอวนด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์

หัวข้อนี้แสดงการสร้างสัญญาณลอวน 3 รูปแบบ คือ ตัวตั้งจุดลอวน สองม้วน สามม้วน และสี่ม้วน ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยใช้สมการอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สามสมการ ที่ปรับปรุงจากระบบ Jerk เขียนได้ดังสมการที่ (1) [5] ระบบลอวนที่นำเสนอในงานวิจัย มีสมการดังนี้

$$\begin{cases} \dot{x} = y + G(x), \\ \dot{y} = z, \\ \dot{z} = -kz - y - G(x). \end{cases} \quad (1)$$

โดยฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้น G(x) และ G(y) แสดงในสมการ ดังนี้

$$G(x) = \frac{Cx}{2} \cdot \left(-\left(\tanh\left(mx + \frac{m}{2D} \right) \cdot \tanh\left(mx - \frac{m}{2D} \right) \right) + 1 \right) \quad (2)$$

$$G(y) = \frac{Ay}{2} \cdot \left(-\left(\tanh\left(my + \frac{m}{2B} \right) \cdot \tanh\left(my - \frac{m}{2B} \right) \right) + 1 \right) \quad (3)$$

ฟังก์ชันในสมการที่ (2) - (3) เป็นฟังก์ชันรูปแบบเดียวกันต่างกันที่ค่าพารามิเตอร์ที่เลือกใช้ โดยประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ A, B, C, D, k และ m (m=100 คือค่าคงที่เสมอ)

เริ่มทำงานโดยการกำหนดพารามิเตอร์และสมการของระบบลอวนรูปแบบต่างๆ ค่าพารามิเตอร์ถูกแสดงในตารางที่ 1 และกำหนดพอร์ตดิจิตอลเอาต์พุตเพื่อแสดงสัญญาณเอาต์พุตทั้ง 3 แคน โดยมีโครงสร้างอัลกอริทึมของโปรแกรม ดังนี้

ส่วนที่ 1 กำหนดฟังก์ชันไม่เป็นเชิงเส้นจากสมการที่ (2) และ (3)

ส่วนที่ 2 กำหนดสมการอนุพันธ์จากสมการที่ (1)

ส่วนที่ 3 อัปเดตค่าจากตัวแปรในส่วนที่ 2 ด้วยวิธีการของออยเลอร์ เพื่อประมาณค่าเฉลี่ยมสมการอนุพันธ์ (ODE) ของระบบที่นำเสนอ

ส่วนที่ 4 เป็นกระบวนการควบคุมขนาดสัญญาณ (Amplitude Control :AMC) เพื่อปรับค่าจากส่วนที่ 3 ให้อยู่ในช่วงการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งอยู่ในช่วง 0-5 V อธิบายเพิ่มเติมในหัวข้อ 3.2

ส่วนที่ 5 เป็นการสร้างสัญญาณลอวนแบบดิจิตอลขนาด 8 บิตโดยนำค่าที่ได้จากส่วนที่ 4 ส่งผ่านขดลวดที่กำหนดไว้ข้างต้นไปยังวงจร R2R Ladder เพื่อค่าเอาต์พุตลอวนแบบแอนะล็อกแสดงตัวอย่างโปรแกรม ดังรูปที่ 2

```
void loop()
{
  float G(x) = ((C*x) * (- (tanh(m*x + (m/2*D)) * (tanh(m*x - (m/2*D)))) + 1)) / 2);
  float G(y) = ((A*y) * (- (tanh(m*y + (m/2*B)) * (tanh(m*y - (m/2*B)))) + 1)) / 2);
  float dx = y + G(x);
  float dy = z;
  float dz = -(k*(z)) - (y * G(x));
  x += (dx * dt);
  y += (dy * dt);
  z += (dz * dt);
  int digitalValueX = Alpha * ((x - (Vmin)) / (Vmax - (-Vmin))) * 255;
  int digitalValueY = Alpha * ((y - (Vmin)) / (Vmax - (-Vmin))) * 255;
  int digitalValueZ = Alpha * ((z - (Vmin)) / (Vmax - (-Vmin))) * 255;
  for (int i = 0; i < 8; i++)
  {
    digitalWrite(r2rOutputPinX[i], bitRead(digitalValueX, i));
    digitalWrite(r2rOutputPinY[i], bitRead(digitalValueY, i));
    digitalWrite(r2rOutputPinZ[i], bitRead(digitalValueZ, i));
  }
}
```

รูปที่ 2 ตัวอย่างโปรแกรมสำหรับสร้างสัญญาณลอวนในส่วนต่างๆ

2.3 การพิสูจน์ประสิทธิภาพเชิงตัวเลขของระบบลอวน

Lyapunov exponent (LE) คือกระบวนการวิเคราะห์การแตกตัวของและการบรรจบในวิถีวงโคจรของสัญญาณ ซึ่งเป็นเงื่อนไขสำคัญในการตรวจสอบว่าระบบที่ทำกรทดสอบมีความลอวนหรือไม่ โดยระบบอนุพันธ์ที่มีความลอวนจะต้องมีค่าของ LE อย่างน้อย 1 ค่าที่เป็นบวก โดยงานวิจัยนี้ใช้อัลกอริทึมของ Wolf [8] คำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB ค่าพารามิเตอร์และผลการคำนวณ ถูกแสดงในตารางที่ 1 โดยกำหนดค่าเงื่อนไขเริ่มต้น $(x_0, y_0, z_0) \rightarrow (0.1, 0.1, 0.01)$ สำหรับการวิเคราะห์

เนื่องจากความซับซ้อนของระบบลอวน ไม่สามารถบ่งชี้ได้จากสายตาว่าระบบมีความซับซ้อนมากน้อยเพียงใด จึงมีความจำเป็นต้องมีเครื่องมือเพื่อใช้บอกความซับซ้อนของระบบลอวน มาใช้ในการวิเคราะห์ความซับซ้อนของระบบออกมาเป็นค่าเชิงตัวเลขเพื่อง่ายต่อการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้ สูตรดังกล่าวคือ Kaplan-Yorke (D_{KY}) [9] ซึ่งค่า D_{KY} สามารถคำนวณได้จากสมการ ต่อไปนี้

$$D_{KY} = j + \frac{1}{|LE_{j+1}|} \sum_{i=1}^j LE_i = 2 + \frac{LE_1 + LE_2}{|LE_3|} \quad (4)$$

ตารางที่ 1 ประสิทธิภาพความลอวนเชิงตัวเลขและ ตัวแปร ของระบบลอวนทั้ง 3 แบบ

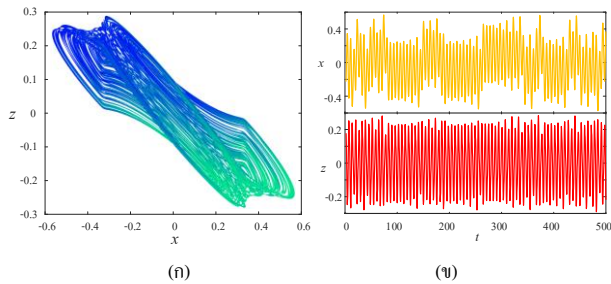
รูปแบบลอวน	พารามิเตอร์จำลอง	พารามิเตอร์ทดสอบจริง	ค่าเลขชี้กำลัง Lyapunov	D_{KY}
2-Scroll	A=0.5, B=1.5, C=0.5, D=1.5, k=0.35	A=0.5, B=1.5, C=0.5, D=1.5, k=0.43	$LE_1=0.087081$ $LE_2=-0.000034$ $LE_3=-0.437047$	2.201
	A=2, B=1, C=2, D=1, k=0.35	A=2, B=1, C=2, D=1, k=0.45	$LE_1=0.103831$ $LE_2=0.000145$ $LE_3=0.453686$	
4-Scroll	A=1, B=2, C=3, D=2, k=0.16	A=1, B=2, C=3, D=2, k=0.3	$LE_1=0.216979$ $LE_2=-0.001062$ $LE_3=-0.375918$	2.574

จากตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่าระบบลอวนที่ออกแบบไว้นั้นจะสามารถปรับวงม้วนของเอาต์พุตเพียงปรับค่า Scroll มีค่า D_{KY} ก่อนข้างสูง ซึ่งในการออกแบบได้ทำการกำหนดค่าไว้ในอัลกอริทึมที่ออกแบบ ซึ่งการ

กำเนิดสัญญาณสามารถทำได้โดยง่ายด้วยการกดสวิตช์เพื่อเลือกรูปแบบคลื่นที่ต้องการ

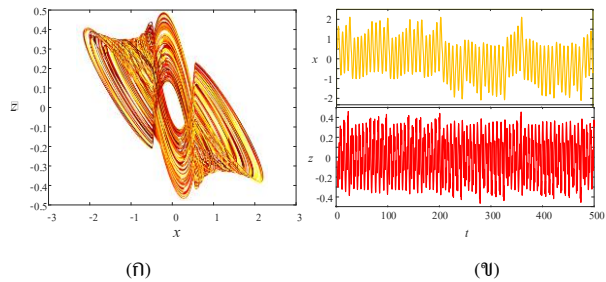
2.4 การจำลองผลเชิงตัวเลข

งานวิจัยนี้มีผลการจำลองการทำงานด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อขึ้นต้นความถูกต้องของระบบ โดยแสดงภาพตัวดึงดูดคลื่น บนระนาบ $x - z$ และสัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t) ของระบบทั้ง 3 รูปแบบ พบว่าตัวดึงดูดคลื่นและเอาต์พุตบนแกนเวลา แบบสองวงม้วน สามวงม้วน และสี่วงม้วน มีลักษณะดังรูป 3 - 5 ตามลำดับ



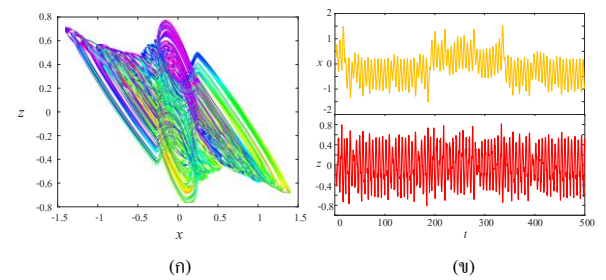
รูปที่ 3 เอาต์พุตของระบบคลื่นแบบสองวงม้วน

(ก) ตัวดึงดูดคลื่นบนแกน $x - z$ (ข) สัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)



รูปที่ 4 เอาต์พุตของระบบคลื่นแบบ สามวงม้วน

(ก) ตัวดึงดูดคลื่น บนแกน $x - z$ (ข) สัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)



รูปที่ 5 เอาต์พุตของระบบคลื่นแบบ สี่วงม้วน

(ก) ตัวดึงดูดคลื่น บนแกน $x - z$ (ข) สัญญาณเอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)

3. การสร้างออสซิลเลเตอร์แบบอลวน

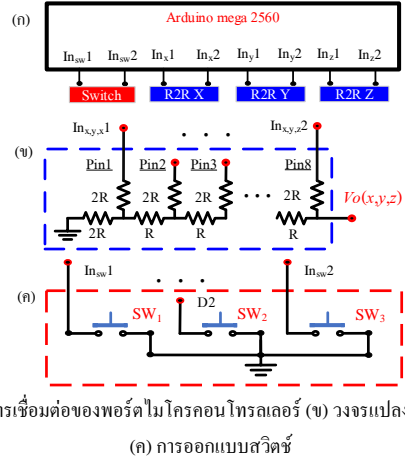
3.1 ส่วนประกอบของออสซิลเลเตอร์แบบอลวน

การสร้างสัญญาณอลวนรูปแบบต่างๆในงานวิจัยนี้ ได้แบ่งการสร้างออกเป็น 3 ส่วน ดังแสดงในรูปที่ 6

ส่วนที่ 1 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสร้างสัญญาณอลวนออกมาในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลแบบขนานเพื่อให้สามารถสร้างสัญญาณได้เร็วที่สุด

ส่วนที่ 2 วงจร R2R ladder แบบ 8 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่มีระดับแรงดันต่างกัน 255 ตำแหน่ง

ส่วนที่ 3 คือ “สวิตช์ (SW₁₋₃)” เพื่อใช้ควบคุมและปรับรูปแบบ (Reconfiguration) ของระบบอลวน



รูปที่ 6 (ก) การเชื่อมต่อของบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (ข) วงจรแปลงสัญญาณ DAC (ค) การออกแบบสวิตช์

ส่วนที่ 1 คือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่เป็นตัวกำเนิดสร้างสัญญาณอลวนออกมาในรูปแบบของสัญญาณดิจิทัลแบบขนานเพื่อให้สามารถสร้างสัญญาณได้เร็วที่สุด

ส่วนที่ 2 วงจร R2R ladder แบบ 8 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก ที่มีระดับแรงดันต่างกัน 255 ตำแหน่ง

ส่วนที่ 3 คือ “สวิตช์ (SW₁₋₃)” เพื่อใช้ควบคุมและปรับรูปแบบ (Reconfiguration) ของระบบอลวน

3.2 ควบคุมขนาดสัญญาณ (Amplitude Control :AMC)

ในงานวิจัยนี้ได้นำอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ มาใช้ในการสร้างสัญญาณอลวน ซึ่งมีข้อจำกัดของแรงดันอยู่ในระดับ 0 - 5 V จากการทำการทดลองการสร้างสัญญาณอลวนเชิงตัวเลขในโปรแกรม MATLAB พบว่ามีช่วงที่แอมพลิจูดของสัญญาณอยู่ในช่วงติดลบ ดังรูปที่ 2 - 4 (ข) จึงมีความจำเป็นต้องนำวิธีการ AMC [10] เพื่อปรับแรงดันของสัญญาณอลวน โดยควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์ ให้ทำงานในช่วง 0 - 5 V โดยใช้สมการ ดังนี้

$$V_{out} = \alpha \cdot \frac{(V_{in} - (V_{min}))}{(V_{max} - (-V_{min}))} \cdot 255 \quad (5)$$

ที่ V_{in} และ V_{out} คือค่าแอมพลิจูดก่อนและหลังทำการ AMC ซึ่ง V_{max} และ V_{min} คือค่าแอมพลิจูดที่มากและน้อยที่สุดของสัญญาณที่สร้างได้ โดยที่ α คือพารามิเตอร์สำหรับควบคุมขนาดสัญญาณ โดยขนาดของสัญญาณขึ้นอยู่กับระบบอลวนที่นำมาใช้ และ การกำหนดค่าตัวแปรต่างๆ ซึ่งค่า α ที่เหมาะสมในการใช้จะอยู่ในช่วง $0 \leq \alpha \leq 1$

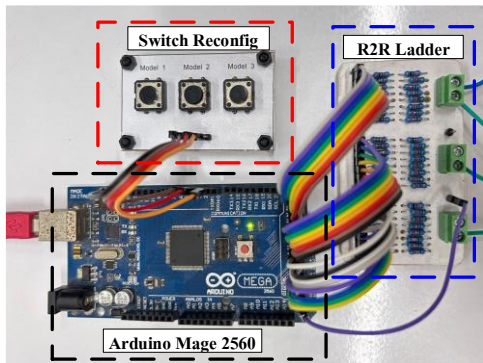
4. ผลการทดลอง

เพื่อให้ระบบอลวนที่นำเสนอมีต้นทุนต่ำ อุปกรณ์ที่ใช้งานก็จะเป็นอุปกรณ์ที่ราคาถูก หาซื้อได้ง่าย ดังนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์หลักจะใช้ Arduino Mega 2560 วงจร DAC ขนาด 8 บิต ทั้งหมด 3 ชุด โดยกำหนด

ตัวต้านทาน R เท่ากับ 10k โอห์ม การทดลองระบบลอวนที่นำเสนอแสดง ดังรูปที่ 7(ก) และ อุปกรณ์ที่ใช้แสดงในรูปที่ 7(ข) โดยกำหนดสมการ สมการอนุพันธ์ และสามารถปรับเปลี่ยนตัวแปรได้ระหว่างที่วงจรทำงาน อยู่ได้อย่างรวดเร็วตามที่โปรแกรมไว้ โดยไม่ต้องทำหุตุการทำงาน และอัปโหลดคำสั่งใหม่ เมื่อต้องการเลือกรูปแบบสัญญาณลอวน ทำให้ โดยเปลี่ยนค่าตัวแปรตามตารางที่ 1 จากการกดสวิทช์ โดยวงจรจะสร้าง สัญญาณลอวนเอาต์พุตในรูปแบบสองวงม้วน สามวงม้วน และ สี่วงม้วน ดังแสดงดังรูปที่ 8 - 10 ตามลำดับ



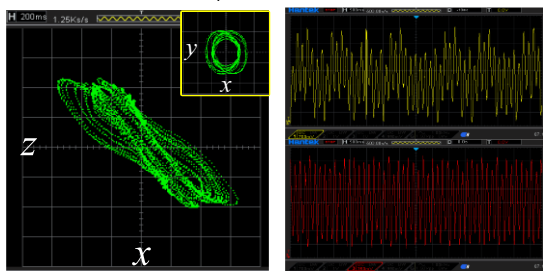
(ก)



(ข)

รูปที่ 7 (ก) ภาพรวมในการทดลองแบบลอวนที่นำเสนอ

(ข) อุปกรณ์ที่ใช้ในทดลอง

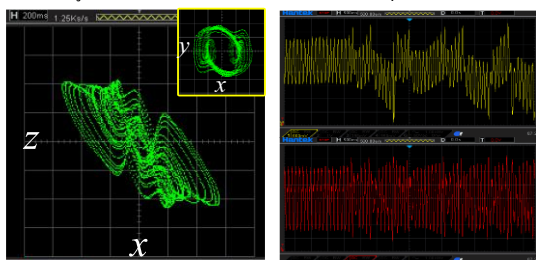


(ก)

(ข)

รูปที่ 8 ผลการทดลองของระบบลอวนแบบ สองวงม้วน

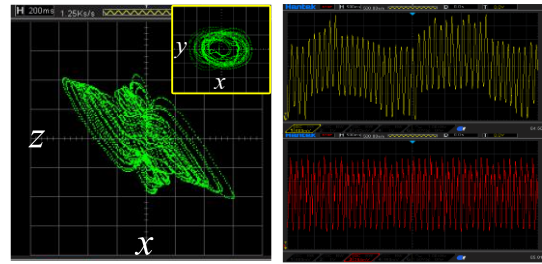
(ก) ตัวคิ่งดูลอวน บนระนาบ $x-z$ และ $x-y$ (ข) เอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)



(ก)

(ข)

(ก) (ข)
รูปที่ 9 ผลการทดลองของระบบลอวนแบบ สามวงม้วน
(ก) ตัวคิ่งดูลอวนบนระนาบ $x-z$ และ $x-y$ (ข) เอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)



(ก)

(ข)

รูปที่ 10 ผลการทดลองของระบบลอวนแบบ สี่วงม้วน

(ก) ตัวคิ่งดูลอวนบนระนาบ $x-z$ และ $x-y$ (ข) เอาต์พุต x และ z บนแกนเวลา (t)

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการสร้างตัวกำเนิดสัญญาณลอวนซับซ้อนสูง ต้นทุนต่ำ สามารถสร้างสัญญาณลอวนได้ 3 รูปแบบ ได้แก่ สองวงม้วน สามวงม้วน และสี่วงม้วน โดยการปรับแต่งค่าตัวแปรได้ใหม่อย่างรวดเร็วแม่นยำ และมีต้นทุนต่ำ โดยใช้อุปกรณ์ในท้องตลาด เช่น ไมโครคอนโทรลเลอร์ ตัวต้านทาน ต่อร่วมกับสวิทช์โดยมีการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบ ลอวนเชิงตัวเลขด้วยการ Simulation ตัวคิ่งดูลอวน สัญญาณเอาต์พุตบน แกนเวลา Lyapunov Exponent และ Kaplan-Yorke จากโปรแกรม MATLAB เพื่อยืนยันผลการทดลองพร้อมทั้งเปรียบกับเอาต์พุตที่ได้จาก ออสซิลเลเตอร์ไมโครคอนโทรลเลอร์ พบว่าผลการทดลองทั้งสอง รูปแบบมีความสอดคล้องกันทุกประการ

เอกสารอ้างอิง

- [1] E N. Lorenz, "Deterministic nonperiodic flow," *J. Atmos. Sci.*, vol.20, no.2, pp. 130-141, 1963.
- [2] O. E. Rössler, "An Equation for Continuous Chaos," *Physics Letters*, vol.57A, no. 5, pp. 397-398, 1976.
- [3] J.C. Sprott, "A New Class of Chaotic Circuit," *Physics Letters A*, vol. 266, pp.19-23, 2000.
- [4] J. Katz, and Y. Lindell, "Introduction to modern cryptography," New York, Taylor & Francis Group, 2008.
- [5] K. Karawanich, M. Kumngern, J. Chimnoy, and P. Prommee, "A four-scroll chaotic generator based on two nonlinear functions and its telecommunications cryptography application," *Int. J. Electron. Commun. (AEU)*, vol.157, 154439, 2022.
- [6] K. Karawanich, and P. Prommee, "High-complex chaotic system based on new nonlinear function and OTA-based circuit realization," *Chaos. Solit. Frac.* Vol.162, 112536, 2022.
- [7] R. Chiuab, M. Mora-Gonzalez, D. Lopez-Mancillaa "Implementation of a Chaotic Oscillator into a Simple Microcontroller" *IERI Procedia*, Vol.4, pp.247 – 252, 2013
- [8] A. Wolf, J.B. Swift, H.L. Swinney, and J.A. Vastano, "Determining Lyapunov exponents from a time series," *Phys. D.*, vol.16, pp.285–317, 1985.
- [9] S.H. Strogatz, "Nonlinear dynamics and chaos," Taylor & Francis Group, 1994.
- [10] Li, C., Sprott J.C., Yuan, Z.Y., Li, H. Constructing chaotic systems with Total amplitude control. *Int. J. Bifurcation Chaos.* 2015;25(10):1530025.