



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรกำเนิดสัญญาณอวกวณความถี่สูงสำหรับการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัย  
High-frequency chaotic oscillator circuit for secure communication

กฤตากร กล่อมการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2558

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนความถี่สูงสำหรับการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัย  
High-frequency chaotic oscillator circuit for secure communication

กฤตากร กล่อมการ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ 2558  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) วงจรกำเนิดสัญญาณอลวนความถี่สูงสำหรับการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัย แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน

ประจำปี งบประมาณ 2558 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 350,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 - 30 กันยายน 2558

หัวหน้าโครงการ นาย กฤตากร กล่อมการ ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล

### บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการสร้างสัญญาณอลวนการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัยและ สำหรับใช้งานการกวนความถี่ ในการสร้างเพื่อจุดสัทธินงานวิจัยเสนอการวงจรถูกกำเนิดความถี่แบบ Colpitts ร่วมกับวงจรถูกสร้างสัญญาณสุ่มเทียม วงจรถูกสร้างสัญญาณอลวนแบบเชิงทอน โครงสร้างของวงจรถูกสร้างได้ตั้งแต่ความถี่ย่าน HF ไปจนถึงระดับ 1GHz

คำสำคัญ : วงจรถูกอลวนความถี่สูง, อิเล็กทรอนิกส์ไม่เป็นเชิงเส้น ,ระบบสื่อสารแบบอลวน

Research High-frequency chaotic oscillator circuit for secure communication

Researcher Mr. Kitdakorn Klomkarn

Faculty Engineering, Department Computer Engineering

#### ABSTRACT

This research project presents a construction of high frequency chaotic circuit for Secure communication system and radio jamming. The purpose of circuit construction is used to apply for patent, the cooperation between Colpitts oscillator circuit and pseudo random binary generator circuit or discrete chaotic signal. The proposed-structure can be used to generate frequency in high frequency band to 1 GHz.

Keyword high frequency chaotic circuit, nonlinear electronics, secure communication.

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยงบประมาณแผ่นดินประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558

กฤตดากร กลุ่มมการ

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญภาพ.....	V
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีเกี่ยวข้อง</b> .....	3
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.2 ทฤษฎี.....	4
2.3 การสร้างตัวดึงดูดแบบต่างๆ.....	5
2.3.1 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz.....	5
2.3.2 ตัวดึงดูดของ Chen.....	7
2.3.3 ตัวดึงดูด Sprott.....	10
2.3.4 วงจร Chua.....	13
2.3.5 วงจรลอวนแบบ Wien.....	18
2.3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบแบบไฮเปอร์.....	19
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินวิจัย</b> .....	20
3.1 การสร้างตัวดึงดูดแบบปรับได้.....	20
3.2 ตัวดึงดูดที่ปรับปรุงใหม่.....	24
3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts.....	24
3.4 การสร้างซีควนกิ่งสุ่ม.....	27
3.5 การสร้างสัญญาณกิ่งสุ่มแบบลอวน.....	31
3.6 การสร้างสัญญาณลอวนแบบสองปีกที่ความถี่สูง.....	35

3.7 การสร้างสัญญาณคลื่นแบบผสม.....	36
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	37
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	48
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวดึงดูดแบบ Chen.....	9
2.2 ตัวดึงดูดแบบ Chen ในแกนเวลา.....	9
2.3 แสดงการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่แทนด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์.....	11
2.4 สัญญาณอลวนจากตัวดึงดูด Sprott.....	12
2.5 วงจร Chua.....	13
2.6 $i-v$ characteristic ของ Chua ไดโอด.....	14
2.7 Chua ไดโอด.....	15
2.8 ตัวอย่างวงจร Chua ในทางปฏิบัติ.....	16
2.9 สัญญาณจาก $V_{c1}$ , $V_{c2}$ เมื่อเทียบกับเวลา.....	16
2.10 สัญญาณจาก $V_{c1}$ เป็นแกน $y$ และ $V_{c2}$ เป็นแกน $x$ .....	17
2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด.....	17
2.12 วงจรอลวนแบบ Wien.....	18
2.13 สัญญาณอลวนในระนาบ XZ.....	18
2.14 วงจรวงจรเกิดสัญญาณแบบแบบไฮเปอร์.....	19
2.15 แสดงผลจากสมการ Hyper chaos ในระนาบ YW.....	19
3.1 สัญญาณในแกน $x, y, z$ ของตัวดึงดูด Lorenz.....	22
3.2 ตัวดึงดูดแบบปรับได้โดยปรับเป็น Lorenz.....	23
3.3 ตัวดึงดูดแบบปรับได้โดยปรับเป็น Lorenz ในแกนเวลา.....	23
3.4 ตัวดึงดูดแบบปรับได้โดยปรับเป็น Chen.....	24
3.5 สัญญาณในแกน $x, y, z$ ของตัวดึงดูดที่ปรับปรุงขึ้น.....	25
3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts.....	25
3.7 สัญญาณจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts โดยสมการ 3.8.....	27
3.8 วงจรชิฟท์รีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้น.....	27
3.9 ชิฟท์รีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้นแบบป้อนกลับแบบภายใน.....	28
3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยมที่สร้างจากพหุนาม $1 + x + x^4$ .....	29
3.11 ระบบการสร้างสัญญาณอลวนเชิงท่อนจากฟังก์ชัน saw tooth.....	31
3.16 Saw tooth map.....	31
3.13 สัญญาณกึ่งสี่เหลี่ยมแบบอลวนจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนแบบ Saw tooth.....	32
3.14 ค่า autocorrelation จำนวน 6,000 จุดของสัญญาณเชิงท่อนแบบ saw tooth.....	32
3.15 ระบบการสร้างสัญญาณอลวนเชิงท่อนจากฟังก์ชัน Tent.....	33

3.16 Tent map.....	33
3.17 สัญญาณกึ่งสุ่มแบบอลวนจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนแบบ Tent.....	34
3.18 ค่า autocorrelation จำนวน 6,000 จุดของสัญญาณเชิงท่อนแบบ Tent.....	34
3.19 การสร้างสัญญาณอลวนแบบสองปีกที่ความถี่สูง.....	35
3.20 ผลการจำลองการสร้างสัญญาณอลวนแบบสองปีกที่ความถี่สูง.....	35
3.21 การสร้างสัญญาณอลวนแบบผสม.....	36
3.22 ผลการจำลองการสร้างสัญญาณอลวนแบบผสม.....	36
4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts ในทางปฏิบัติ.....	37
4.2 ผลการจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts ในทางปฏิบัติ.....	37
4.3 โครงสร้างวงจรถวลวนความถี่สูงแบบปีกผีเสื้อ.....	38
4.4 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจรถวลวนความถี่สูงแบบปีกผีเสื้อ.....	38
4.5 แถบความถี่จากผลการจำลองวงจรถวลวนความถี่สูงแบบ Colpitts.....	39
4.6 แถบความถี่จากผลการจำลองวงจรถวลวนความถี่สูงแบบสองปีก.....	39
4.7 ผลการจำลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบเชิงเส้น.....	40
4.8 แถบความถี่จากผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบเชิงเส้น.....	40
4.9 ผลการจำลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	41
4.10 แถบความถี่จากผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	41
4.11 ผลการทดลองวงจรถวลวนความถี่สูงแบบ Colpitts.....	42
4.12 แถบความถี่จากผลการทดลองวงจรถวลวนความถี่สูงแบบ Colpitts.....	42
4.13 ผลการทดลองวงจรถวลวนความถี่สูงแบบสองปีก.....	43
4.14 แถบความถี่จากผลการทดลองวงจรถวลวนความถี่สูงแบบสองปีก.....	43
4.15 ผลการทดลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบเชิงเส้น.....	44
4.16 แถบความถี่จากผลการทดลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบเชิงเส้น.....	44
4.17 ผลการทดลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	45
4.18 แถบความถี่จากผลการทดลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบไม่เป็นเชิงเส้น.....	45
4.19 แถบความถี่จากผลการทดลองการสร้างสัญญาณอลวนแบบผสม.....	46
4.20 ต้นแบบระบบที่ทดลอง.....	46

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันเป็นที่ทราบว่าการสื่อสารโดยแบบไร้สาย(wireless communication) เป็นการสื่อสารหลักไม่ว่าเป็นการสื่อสารส่วนบุคคลและการสื่อสารสำหรับเชื่อมโยงเช่นการเชื่อมต่อกล้องวงจรปิด ไมโครโฟนไร้สาย การใช้เป็นสัญญาณควบคุม(remote control) การสื่อสารวิทยุระยะใกล้(near filed communication) เพื่อทำการแสดงตนหรือทำการชำระเงิน แต่จุดอ่อนของการสื่อสารแบบไร้สายทุกประเภทก็คือการที่สามารถถูกดักฟังหรือล่วงละเมิดสิทธิเช่นการทำกรอกรูปแบบข้อมูลของบัตรอัจฉริยะแบบไร้สาย ที่ทำได้ง่ายเพราะยากต่อการตรวจจับ ดังนั้นการพิจารณาถึงเรื่องความมั่นคงปลอดภัยจึงเป็นเรื่องสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นส่งภาพผ่านกล้องวงจรปิดไร้สาย การส่งสัญญาณควบคุมเพื่อทำการเปิดปิดเครื่องยนต์(Immobilizer) แม้แต่ไมโครโฟนไร้สาย ดังนั้นในเทคโนโลยีนี้

ปัจจุบันสำหรับพลเรือนจึงเริ่ม มีการออกแบบป้องกันเหตุดังกล่าว โดยใช้การประยุกต์การใช้สัญญาณอลวนมาเป็นคลื่นพาห์สำหรับการสื่อสารเรียกว่า การสื่อสารแบบอลวน(chaos communication) เนื่องจากรูปแบบของสัญญาณสามารถปกปิดหรือซ่อนข่าวสารได้ในตัวโดยหัวใจสำคัญของการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัยดังกล่าวคือวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณอลวนความถี่สูง และงานการสื่อสารทุกประเภทโดยเฉพาะการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัยที่ใช้สัญญาณอลวนนี้จะถูกจดสิทธิบัตรผลิตภัณฑ์สำหรับผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยเฉพาะสิทธิบัตรการสร้างสัญญาณอลวนที่ความถี่สูงซึ่งถูกจดสิทธิบัตรในยุโรป สหรัฐอเมริกา

ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ ผู้วิจัยเสนอการสร้างวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณอลวนความถี่สูงที่ยังไม่มีการค้นคิดขึ้นและการจดสิทธิบัตรมาก่อน เพื่อให้ประโยชน์เป็นคลื่นพาห์สำหรับการสื่อสารอลวนความถี่สูงแบบมั่นคงปลอดภัยดังกล่าว และด้วยคุณสมบัติที่สามารถปรับการกระจายสเปคตรัมโดยการปรับพารามิเตอร์ของวงจรถ่ายขึ้น จึงสามารถใช้วงจรถ่ายที่ความถี่สูงเป็นสัญญาณตัดความถี่วิทยุ (jammimg) แบบเลือกแถบความถี่อีกด้วย

### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 สร้างวงจรถ่ายอลวนความถี่สูงเพื่อใช้กับงานสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัย
- 1.2.2 สร้างองค์ความรู้การออกแบบวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณอลวนที่ความถี่สูง
- 1.2.3 จดสิทธิบัตรวงจรถ่ายต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

การสร้างวงจรถอดความถี่สูงที่สามารถกำเนิดแถบความถี่ได้ HF-VHF ที่สามารถใช้เป็นคลื่นพาห้ของวงจรกำเนิดความถี่เพื่อใช้สำหรับการสื่อสารมั่นคงปลอดภัยโดยสามารถปรับการกระจายสเปคตรัมเพื่อใช้เป็นสัญญาณ jamming แบบเลือกแถบความถี่ โดยตัวต้นแบบสามารถผลิตได้ในอุตสาหกรรมได้จริง

### 1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ทำการหารูปแบบวงจรที่ดีที่สุดเช่นหาสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองปีกเช่นสมการของ Lorenz หรือ Chen หรือแบบ compound ต่างๆ ที่มีผู้ค้นพบหลังปี ค.ศ. 2000 แล้วการแปลงวงจรมอดูมเชิงเส้นที่ใช้ในสมการให้เป็นวงจรมอดูมแบบสวิทช์โดยใช้เทคนิคการคำนวณเชิงเลขเพื่อหาพารามิเตอร์ โดยการใช้วงจรมอดูมแบบสวิทช์หรือวงจร mixer นี้สามารถสร้างได้ที่ความถี่สูงหรือหาเทคนิคการสร้างแบบอื่น ๆ

1.4.2 ทำการจำลองสมการหรือรูปแบบที่ได้โดยคอมพิวเตอร์ทำการสร้างวงจรที่ได้ทดสอบหาคุณสมบัติทางความถี่และคุณสมบัติรูปแบบต่างๆ ของสัญญาณอลวน สร้างต้นแบบที่ได้เพื่อทำการเผยแพร่

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้องค์ความรู้การสร้างวงจรถอดความถี่สูงในการเรียนการสอนในระดับอุดมศึกษา

1.5.2 ได้ผลงานวิจัยตีพิมพ์ในวารสารนานาชาติเรื่องการสร้างวงจรถอดความถี่สูง

1.5.3 ได้สิทธิบัตรการสร้างวงจรถอดความถี่สูงที่สามารถใช้กับการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัย

1.5.4 ได้ต้นแบบวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนความถี่สูง ที่สามารถทำงานเป็นตัวตัดคลื่นวิทยุ (jamming) เฉพาะย่านความถี่เป็นต้นแบบ สามารถสร้างได้ในเชิงพาณิชย์

## บทที่ 2

### ทฤษฎีเกี่ยวข้อง

สัญญาณเป็นสัญญาณที่มีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวนคือมีสมบัติแถบกว้างในโดเมนความถี่ และมีคุณสมบัติที่สามารถชิงโครโนซ์เข้ากับระบบที่มีพารามิเตอร์เหมือนกัน ดังนั้นจึงสามารถใช้ประโยชน์สัญญาณในการสื่อสาร[1] หรืองานทางด้านวิศวกรรมระบบควบคุม[2] ได้และด้วยลักษณะทางเวลาที่เป็นเหมือนค่าสุ่มจึงสามารถนำสัญญาณ มาประยุกต์สำหรับการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ลาดตระเวนให้เคลื่อนที่คลอบคลุมพื้นที่ในเวลาจำกัด[4] การใช้เป็นสัญญาณสุ่มจริงเพื่องานวิทยาการรหัสลับหรือการจำลองทางวิทยาศาสตร์[5] และการใช้ขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อประหยัดพลังงานในงานปั้นผสมอุตสาหกรรม[6] โดยวงจรที่ใช้สร้างสัญญาณดังกล่าวอาจใช้วงจรของ Chua[3] หรือวงจรที่สร้างจากสมการอนุพันธ์ที่สามารถกำเนิดพฤติกรรม[3] โดยผู้วิจัยได้เสนอวงจรสร้างสัญญาณแบบหลากหลายรูป[35] ที่ทำงานในย่านความถี่ 10KHz-1MHz เพื่อใช้สำหรับงานในย่านความถี่ต่ำข้างต้น ด้วยลักษณะของสัญญาณเหมือนค่าสุ่มทำให้การสื่อสารแบบมีคุณสมบัติเข้ารหัสลับได้โดยตัวสัญญาณเอง[7] หรือสัญญาณมีความถี่แถบกว้าง ดังนั้นจึงสามารถใช้สัญญาณเป็นคลื่นพาห้สำหรับการสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัย[8] และด้วยที่ลักษณะของสัญญาณคล้ายสัญญาณรบกวนแต่สามารถวัดค่าคุณสมบัติทางโดเมนของเวลาได้เช่นค่า Lyapunov และค่า correlation dimension จึงทำให้สามารถใช้สัญญาณเป็นคลื่นพาห้เรดาร์[9] และสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลที่ป้องกันการรบกวน(Jamming) ดังในสิทธิบัตร[25]ได้เช่นกัน

### 2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ปัจจุบันการประยุกต์ทฤษฎีสำหรับงานวิศวกรรมไฟฟ้าสื่อสาร วิศวกรรมควบคุม วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์[1-3] ได้เป็นที่ทราบและนิยมอย่างแพร่หลายการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณเพื่อประยุกต์ใช้งานวิศวกรรมต่างๆเช่น การขับเคลื่อนหุ่นยนต์ [4] เป็นสัญญาณสุ่ม[5] การขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อเป็นการปั้นผสม[6] สามารถใช้สัญญาณที่มีความถี่ขนาดต่ำกว่า 1MHz สำหรับการสร้างสัญญาณความถี่สูงที่สำหรับการสื่อสาร [1,7] ได้มีผู้เสนอวิธีการสร้างแบบต่างๆเช่น ในงานวิจัยของ Christopher และ Young [10] เสนอการสร้างวงจรในย่านความถี่ VHF โดยดัดแปลงจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ Duffing [11]ซึ่งเป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ non-autonomous โดยประมาณเทอม cubic ให้เป็นฟังก์ชันเชิงพหุนามและผู้วิจัยได้ทำการจดสิทธิบัตรวงจร[24] ในงานวิจัย [12] เป็นการดัดแปลงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจากวงจรถูกกำเนิดสัญญาณคลื่นไซน์แบบ Wein bridge โดยใช้วงจรรวมโหมตกระแสแต่ขนาดของความถี่ที่ได้ยังอยู่ในช่วงไม่เกิน 10 MHz

การดัดแปลงวงจรถูกกำเนิดสัญญาณจากวงจร Colpitts ซึ่งเป็นวงจรที่นิยมใช้สร้างสัญญาณไซน์ความถี่สูงสามารถสามารถกระทำได้ โดย[14]แสดงการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ autonomous และ[15]แสดงการสร้างวงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ hyper-chaos จากวงจร Colpitts ในย่าน VHF และ UHF แต่สัญญาณที่ได้จากวงจรทั้งสองมีลักษณะไม่ซับซ้อนและขนาดของแถบความถี่ที่ได้มีขนาดแคบ สำหรับวิธีสร้างสัญญาณความถี่สูงแถบกว้างสามารถกระทำได้โดยใช้วงจรขยายความถี่สูงร่วมกับสายส่งทำหน้าที่เป็นตัวหน่วงเวลาที่แสดงการสร้างและวิเคราะห์ใน[16-17] แต่วิธีการนี้ได้ถูกจดสิทธิบัตรยุโรป[22]การอ้างสิทธิคลอบคลุมถึงวิธีการ ใช้การหน่วงเวลาในการกำเนิดสัญญาณ ในงานวิจัย[18] แสดงการสร้างสัญญาณจาก

สายส่งร่วมกับวงจรสร้างความต้านทานลบที่สังเคราะห์จากอุปกรณ์แอกทีฟแต่สัญญาณที่ได้ไม่ซับซ้อน และในงานวิจัย[19]แสดงการวิเคราะห์และจำลองการทำงานวงจร Chua ความถี่สูงขนาด 30 MHz ที่สามารถกำเนิดสัญญาณที่มีความซับซ้อนโดยใช้สายส่ง และ[20] แสดงการสร้างวงจร Chua จริงในทางปฏิบัติเสนอ โดยใช้ tunnel diode เป็นวงจรต้านทานลบแบบไม่เป็นเชิงเส้น แต่วงจรทำงานในระดับย่านความถี่ VHF ยังสร้างได้ยากในทางปฏิบัติรวมทั้งลิทธิบัตรการสื่อสารแบบมัลติแองสิทธิโดยใช้วงจร Chua เป็นหลักเช่น ลิทธิบัตร[22,25,26] สำหรับการสร้างวงจรถ่ายสัญญาณเป็นปีกผีเสื้อที่มักสร้างจากสมการของ Lorenz หรือ Butterfly attractor ที่มีความซับซ้อนเหมาะกับการสื่อสาร ในงานวิจัย[21]แสดงการสร้างโดยใช้วงจรคุณที่ความถี่สูงร่วมกับอุปกรณ์พาสซีฟแต่ขนาดของสัญญาณที่ได้มีแถบความถี่เพียง 0-5 MHz

สำหรับลิทธิบัตรของการสร้างสัญญาณความถี่สูงที่จัดในสหรัฐอเมริกาซึ่งมักครอบคลุม ลิทธิบัตรในยุโรปด้วยเช่นกัน มีดังต่อไปนี้ ลิทธิบัตร[27] เป็นการสร้างสัญญาณสำหรับการสื่อสารแถบกว้าง ยิ่งโดยใช้วงจรถ่ายสัญญาณไซน์แบบวงแหวน(ring) วงจรทำการผสมสัญญาณ(mixing) โดยการป้อนกลับในแต่ละภาคของวงแหวนเลือกกำหนดความถี่ที่ต่างกัน ลิทธิบัตร[28]เป็นการสร้างสัญญาณที่ความถี่สูงโดยใช้สัญญาณพัลส์สามเหลี่ยมหลายๆลูกมารวมกันเพื่อขับ วงจรถ่ายความถี่สูงควบคุมด้วยแรงดัน(voltage control oscillator: VCO) ลิทธิบัตร[29] ใช้สัญญาณ จากเอาต์พุทของวงจรเฟสดีเทคเตอร์ในวงจรเฟสล็อกกลุบซึ่งมีลักษณะเป็นสัญญาณไม่เป็นรายคาบทำการ ผสมทางความถี่เข้ากับสัญญาณที่ได้จาก VCO ลิทธิบัตร[30]เป็นวงจรถ่าย Heterojunction Bipolar Transistor:HBT จัดวงจรเป็นแบบคู่ differential โดยมีวงจรคุณที่ความถี่สูงป้อนกลับแบบบวก ลิทธิบัตร [31] เป็นการใช่วงจรขยายแบบไม่เป็นเชิงเส้นความถี่สูง 3 ตัวทำการต่อ cascade โดยเอาต์พุตสุดท้าย ป้อนกลับมาที่อินพุทโดยมีการคัปปลิงจากสเตทสุดท้ายผ่านวงจร กรองความถี่ผ่านนำไปใช้งาน ลิทธิบัตร [32]เป็นการใช่วงจรพัลส์สี่เหลี่ยมหลายๆสัญญาณมอดูเลตเข้ากับวงจรถ่ายความถี่สูงหลายชุด แล้วนำเอาสัญญาณเอาต์พุทของวงจรถ่ายสัญญาณไซน์รวมกันเพื่อใช้เป็นสัญญาณ ในลิทธิบัตร[33]เป็นการใช้สัญญาณกึ่งสุ่ม(pseudo random)ความถี่สูงผสมกับสัญญาณไซน์ที่ความถี่สูงเพื่อกำเนิดเป็นสัญญาณ โดยในลิทธิบัตรแสดงเทคนิคการสร้างฟลิปฟลอปความเร็วสูงของวงจรถ่ายสัญญาณกึ่งสุ่ม ลิทธิบัตร[34] ใช้ เทคนิคเช่นเดียวกับ[31] แต่ทำการเปลี่ยนการป้อนกลับโดยใช่วงจรกรองความถี่ต่ำและวงจรถ่ายความถี่ ผ่านเพื่อขับวงจรไม่เป็นเชิงเส้น

## 2.2 ทฤษฎี

### นิยาม

ตัวดึงดูด (Chaotic attractor) หรือ ตัวดึงดูด แบบประหลาด (strange attractor) เป็นเส้นทาง โคจร (trajectory) ที่มีขอบเขตอยู่ใน space ขนาด 3 มิติ โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. ถ้าให้  $A$  เป็นขนาดขอบเขตใน 3 มิติแล้ว ทุกๆ เส้นทางโคจรใน  $A$  จะอยู่ใน  $A$  ตลอดไป และ ถ้าค่าเริ่มต้นนอกขอบเขตของ  $A$  แล้วในเวลาต่อมาเส้นทางโคจรจะต้องอยู่ใน  $A$  เราเรียกคุณสมบัติแบบนี้ ว่าคุณสมบัติดึงดูด (attractor) หรือเรียกว่า attractor ถ้า  $A \subset \mathbb{R}^n$  และ  $U$  เป็นค่าใกล้เคียง นอกบริเวณ  $A$  แล้ว  $x$  จะเป็นเส้นทางโคจรของตัวดึงดูด

$$\begin{aligned} \forall x \in U : \varphi(x, t) \in U \quad \text{for } t \geq 0 \\ \lim_{t \rightarrow 0} \varphi(x, t) = A \end{aligned} \quad (2.1)$$

2. ตัวดึงดูดมีความไวขึ้นอยู่กับสภาวะเริ่มต้น (Sensitive dependence on the initial conditions) ถ้าให้  $x$  เป็นเส้นทางโคจรของตัวดึงดูด และ  $s$  เป็นเซตที่แสดงว่าไวต่อค่าเริ่มต้นแล้ว

$$\begin{aligned} \exists \delta > 0 \quad \forall x(0) \in s, \quad \varepsilon > 0, \quad \exists y \in s: \\ |x(0) - y(0)| < \varepsilon, \quad |x(t) - y(t)| > \delta \end{aligned} \quad (2.2)$$

3. ตัวดึงดูดไม่สามารถแยกเป็นเซตย่อยได้ (Indecomposability) แม้แต่ให้ attractor ห่างกันเล็กน้อยดังนั้น attractor มีรายคาบยาวมาก

สำหรับคุณสมบัติที่สำคัญที่แสดงว่าตัวดึงดูด เป็นอลวน คือคุณสมบัติที่ไวต่อค่าเริ่มต้น ซึ่งเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าเริ่มต้นให้ต่างกันเพียงเล็กน้อย เส้นทางโคจรก็จะให้ลักษณะที่ต่างกันโดยสิ้นเชิงนั้น เราสามารถวัดค่าความไวนี้ได้โดย Lyapunov exponents ซึ่งแสดงเส้นทางโคจรของ  $x$  เมื่อ เวลา  $t$  ได้คือ

$$|x(t)| = |x(0)|e^{\lambda t} \quad (2.3)$$

โดย  $\lambda$  เป็นค่า Lyapunov เนื่องจากอลวนติกตัวดึงดูด เกิดขึ้นในมิติขนาด 3 มิติดังนั้นเงื่อนไขที่แสดงความไวต่อค่าเริ่มต้น ของสมการที่ (2.2) ค่า Lyapunov ของทิศทางของการเคลื่อนที่ใน 3 มิติ ( $x, y, z$ ) จะต้องมี ค่าเป็น บวก 1 ค่าเพื่อแสดงทิศทางของการแยกจากกัน(stretch) ของเส้นโคจรของตัวดึงดูด และเพื่อให้ตัวดึงดูด อยู่ในขอบเขตจะต้องมีค่า Lyapunov เป็นลบหนึ่งค่าเพื่อแสดงการพับเข้า(fold) และมีค่า Lyapunov เป็น 0 อยู่หนึ่งค่าเพื่อแสดงทิศทางของการไหลของตัวดึงดูด หรือกล่าวได้ว่า ค่า ถ้าตัวดึงดูด เกิดขึ้นใน 3 มิติและเป็นอลวนแล้ว ถ้า  $\lambda_1$  เป็น Lyapunov ที่มากที่สุด และ  $\lambda_3$  เป็นค่า Lyapunov ที่น้อยที่สุดแล้วค่า Lyapunov ของระบบจะแสดงค่า  $\lambda_1 > \lambda_2 = 0 > \lambda_3$  ซึ่งมีค่า (+, 0, -) โดยในระบบที่มีขอบเขตค่า  $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 < 0$

## 2.3. การสร้างตัวดึงดูดแบบต่างๆ

### 2.3.1 ตัวดึงดูดแบบ Lorenz

เป็นตัวดึงดูด แรกที่รู้จักกันที่ค้นพบโดย E.N Lorenz [1] จากการสร้างแบบจำลองพยากรณ์ อุตุนิยมวิทยาของการแปรผันของสภาวะอากาศ โดยแบบจำลองแสดงได้ โดยสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 คือ

$$x' = -ax + ay \quad (2.4.1)$$

$$y' = rx - y - xz \quad (2.4.2)$$

$$z' = -bz + xy \quad (2.4.3)$$

จากสมการเป็นการแสดงการไหลของอากาศจากการนำความร้อน โดยอากาศร้อนจะไหลขึ้นที่สูง และอากาศเย็นจะตกสู่ระดับล่างเนื่องจากแรงดึงดูดของโลก โดยการเคลื่อนที่ในลักษณะวงแหวน ตัวแปร  $x$  ขึ้นอยู่กับการนำความร้อน และตัวแปร  $y$  และ  $z$  จะเป็นการวัดการกระจายของความร้อนรอบๆ วงแหวนในงานวิจัย Lorenz ได้ให้  $a=10$ ,  $b = 8/3$  และค่า  $r$ . กำหนดให้เป็นพารามิเตอร์ควบคุมโดยปรับให้มีขนาดต่างๆ

จากสมการ (2.4) หาจุดสมดุลของระบบโดย  $x'=y'=z'=0$  จะได้  $y=x, z=r-1$  และ  $x^2=y^2=b(r-1)$  ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอยู่ 3 จุดคือที่  $P^0=(0,0,0)$  และ  $P^\pm=(\pm\sqrt{b(r-1)}, \pm\sqrt{b(r-1)}, r-1)$  โดยจุดสมดุลที่  $P^+$  และ  $P^-$  จะเกิดขึ้นเมื่อค่า  $r > 1$  จากสมการที่ (4) เพื่อหาคุณสมบัติของระบบ ทำการหาค่า Jacobian matrix ซึ่งแสดงได้

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_x}{\partial x} & \frac{\partial f_x}{\partial y} & \frac{\partial f_x}{\partial z} \\ \frac{\partial f_y}{\partial x} & \frac{\partial f_y}{\partial y} & \frac{\partial f_y}{\partial z} \\ \frac{\partial f_z}{\partial x} & \frac{\partial f_z}{\partial y} & \frac{\partial f_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

โดยค่า Jacobian matrix ของสมการที่ (4) มีค่า

$$J = \begin{bmatrix} -\partial & \partial & 0 \\ r-z & -1 & -x \\ y & x & -b \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

สมการคุณสมบัติของระบบหาได้จาก  $|J - \lambda I|$  โดยที่จุดสมดุล  $P^0$  มีสมการคุณสมบัติคือ

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + (a-ar+ab+b)\lambda + ab(1-r) \quad (2.7)$$

และที่จุดสมดุล  $P^\pm$  มีสมการคุณสมบัติคือ

$$\lambda^3 + (a+b+1)\lambda^2 + b(a+r)\lambda + 2ab(r-1) \quad (2.8)$$

ค่า eigen ซึ่งเป็นค่าแสดงพฤติกรรมของระบบหาได้จากให้  $|J - \lambda I| = 0$  ดังนั้นที่จุดสมดุล  $P^0$  ในกรณี  $r < 1$  ค่า eigen ทั้งหมด 3 ค่าจะเป็นค่าจริงและเป็นลบหรืออยู่ด้านซ้ายของระนาบ S (S Plane) และถ้าหาก  $r > 1$  แล้วระบบจะมีค่า eigen 1 ค่าเป็นค่าจริงบวกอยู่ด้านขวาของระนาบ S โดยถ้าหากให้ index  $n$  แสดงจำนวนค่ารากอยู่ด้านขวาของระนาบ S แล้ว เมื่อ  $r > 1$  ระบบจะมีค่า index = 1 และจุดที่นี้เส้นทางโคจรจะมีทั้งเคลื่อนที่เข้าและออก ( Saddle point index 1) สำหรับที่จุดสมดุล  $P^\pm$  จะเกิดขึ้นเมื่อ  $r > 1$  ดังนั้น ถ้าให้  $a_1 = (a+b+1)$ ,  $a_2 = (a+r)b$ ,  $a_3 = 2ab(r-1)$  แล้วจากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz ระบบจะมีเสถียรภาพภายใต้เงื่อนไขเมื่อ  $a_1 > 0$ ,  $a_2 > 0$ ,  $a_3 > 0$  หรือ  $a_1 a_2 - a_3 > 0$  ซึ่งเขียนได้

$$(a+b+1)(a+r)b - 2ab(r-1) > 0 \quad (2.9)$$

ดังนั้นที่จุดสมดุล  $P^\pm$  ระบบจะมีเสถียรภาพถ้า

$$r < \frac{a(a+b+3)}{a-b-1} \quad (2.10)$$

และในทางตรงกันข้ามถ้าให้  $a=10$  ,  $b=8/3$  และถ้าให้  $r > \frac{470}{19}$  ซึ่งทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพที่จุดสมดุล  $P^\pm$  จะมีค่ารากเป็นบวก 1 ค่าอยู่ทางด้านซ้ายของระนาบ  $S$  และมีรากเป็น  $\sigma \pm j\omega$  1 คู่อยู่ด้านขวามือของระนาบ  $S$  ซึ่งที่จุดสมดุล  $P^\pm$  นี้ เส้นโคจรจะแสดงการไหลเข้าและหมุนออกหรือเรียกว่า eigen มีลักษณะเป็น Spiral saddle index 2 ดังนั้นจากจุดสมดุลถ้าที่  $P^o$  แทนการไหลเข้าและไหลออกและที่จุด  $P^\pm$  แทนการไหลเข้าและหมุนออกแล้ว หลังจากค่าเริ่มต้นเส้นทางโคจรไม่สามารถออกจากตัวดึงดูด ได้ ดังนั้นเมื่อตัวดึงดูด ไหลออกจากจุดสมดุล  $P^o$  แล้วจะไหลเข้าสู่สมดุล  $P^+$  หรือ  $P^-$  และทั้งสองจุดนี้จะแทนจุดหมุนออกซึ่งอาจจะหมุนรอบจุดสมดุลนี้หรือไหลกลับเข้าสู่จุดสมดุล  $P^o$  ซึ่งพฤติกรรมนี้จะเกิดการไหลวนในลักษณะหลากหลายหรือแสดงสภาวะ (Chaotic attractor) และเพื่อแสดงว่าระบบ Lorenz เป็นระบบที่มีขอบเขตค่า divergence ของการไหลของตัวดึงดูด ต้องอยู่ในเงื่อนไข

$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial Fz}{\partial z} < 0 \quad (2.11)$$

และสำหรับค่า Lyapunov ของระบบ Lorenz มีค่า  $\lambda_1 = 0.9, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -14.57$

### 2.3.2 ตัวดึงดูดของ Chen

เป็นตัวดึงดูด ค้นพบโดย Chen [12] โดยเกิดจากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไปในทิศทางที่ขาดเสถียรภาพยิ่งขึ้นหรือ ทำให้ระบบที่เป็นอลวนอยู่แล้วให้เป็นอลวนมากขึ้น ซึ่งโดยกระทำด้วยการให้ค่าควบคุมเข้าที่  $y'$  ของระบบ Lorenz หรือแสดงได้

$$x' = -ax + ay \quad (2.12.1)$$

$$y' = cx - y - xz + u \quad (2.12.2)$$

$$z' = -bz + xy \quad (2.12.3)$$

โดยค่าควบคุมมีค่า  $u = k_1x + k_2y + k_3z$

จากสมการ (2.12) เราสามารถหาจุดสมดุลของระบบโดยให้  $x' = y' = z' = 0$  แล้วจะได้จุดสมดุลจุดแรกคือที่  $P^o = (0,0,0)$  และเมื่อให้  $x = y$  จะได้  $z = \frac{1}{b}x^2$  ดังนั้นระบบจะมีจุดสมดุลอีก 2 จุดที่  $P^\pm$  คือ  $x = y = \frac{1}{2}k_3 \pm \frac{1}{2}\sqrt{k^3 + 4(b+k_1+k_2-11)}$  ,  $z = \frac{1}{b}x^2$  จากสมการ(2.12) หาค่า Jacobian matrix ของระบบได้คือ

$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ c+k_1-z & k_2-1 & k_3-x \\ y & x & -b \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

โดยที่จุดสมดุล  $(0,0,0)$  ค่า  $k_3$  ไม่มีผลต่อการเกิดค่า eigen เลือกให้  $k_3=0$  ดังนั้นค่าสมการคุณสมบัติที่จุดสมดุล  $P^\pm$  มีค่า

$$\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 \quad (2.14)$$

โดย  $a_1 = (a+b-k_2+1)$ ,  $a_2 = (ab-ac+a+b+az+x^2-k_1a-k_2a-k_2b)$  และ  $a_3 = (ab-abc+ax^2+axy+abz-k_1ab-k_2ab)$  จากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เพื่อให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ ระบบ Chen เลือกให้  $k_1 = a$   $k_2 = 1+c$  ดังนั้นได้ค่าตัวควบคุมใหม่คือ  $u = -ax + (1+c)y$  ทำให้สมการของระบบ Chen แสดงได้

$$x' = -ax + ay \quad (2.15.1)$$

$$y' = (c-a)x - ay - xz \quad (2.15.2)$$

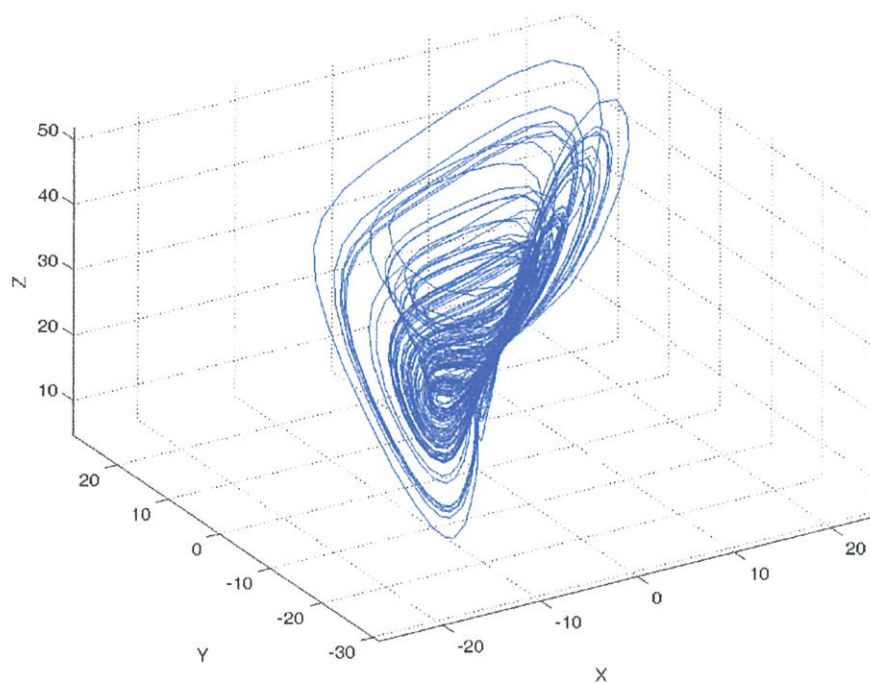
$$z' = -bz + xy \quad (2.15.3)$$

จากสมการเพื่อให้ระบบเป็นระบบ dissipative

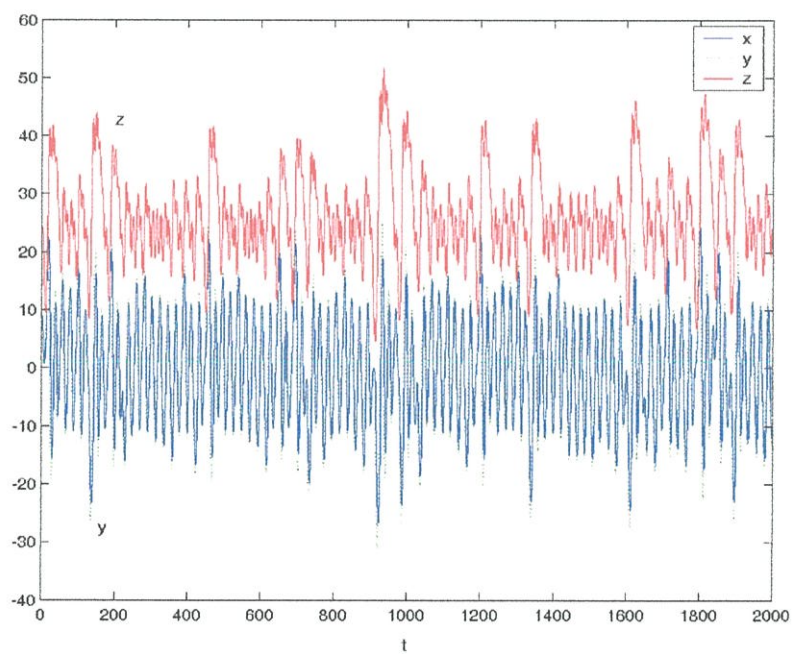
$$\nabla F = \frac{\partial Fx}{\partial x} + \frac{\partial Fy}{\partial y} + \frac{\partial Fz}{\partial z} = -a + c - b < 0 \quad (2.16)$$

ระบบ Chen เลือกให้  $a=35, b=8/3, c=28$  ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล  $P^\circ$  จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่จุดสมดุล  $P^\pm$  มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า  $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$

ระบบ Chen เลือกให้  $a=35, b=8/3, c=28$  ซึ่งเป็นที่อยู่สมดุล  $P^\circ$  จะมีค่า eigen เป็น saddle index 1 และที่จุดสมดุล  $P^\pm$  มีค่า eigen เป็น spiral saddle index 2 และระบบมีค่า  $\lambda_1 = 2.18, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -11.85$



รูปที่ 2.1 ตัวดึงดูดแบบ Chen



รูปที่ 2.2 ตัวดึงดูดแบบ Chen ในแกนเวลา

### 2.3.3 ตัวดึงดูด Sprott

หลังจากที่ Lorenz และ Rossler ได้ค้นพบสมการเกี่ยวกับการสร้างตัวดึงดูดสัญญาณอลวน ต่อมา มีผู้ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสร้างสัญญาณอลวนแบบใหม่ คือ J.C. Sprott ซึ่งได้ใช้คอมพิวเตอร์หาสมการอลวน ทั้งหมดที่เป็นไปได้โดยอยู่ในรูป Jerk function ( $\ddot{x} = J(\dot{x}, x, x)$ ) พร้อมด้วยฟังก์ชันแบบไม่เป็นเชิงเส้น แบบง่าย ๆ 1 ตัว โดยสมการที่ Sprott ค้นพบมีดังนี้

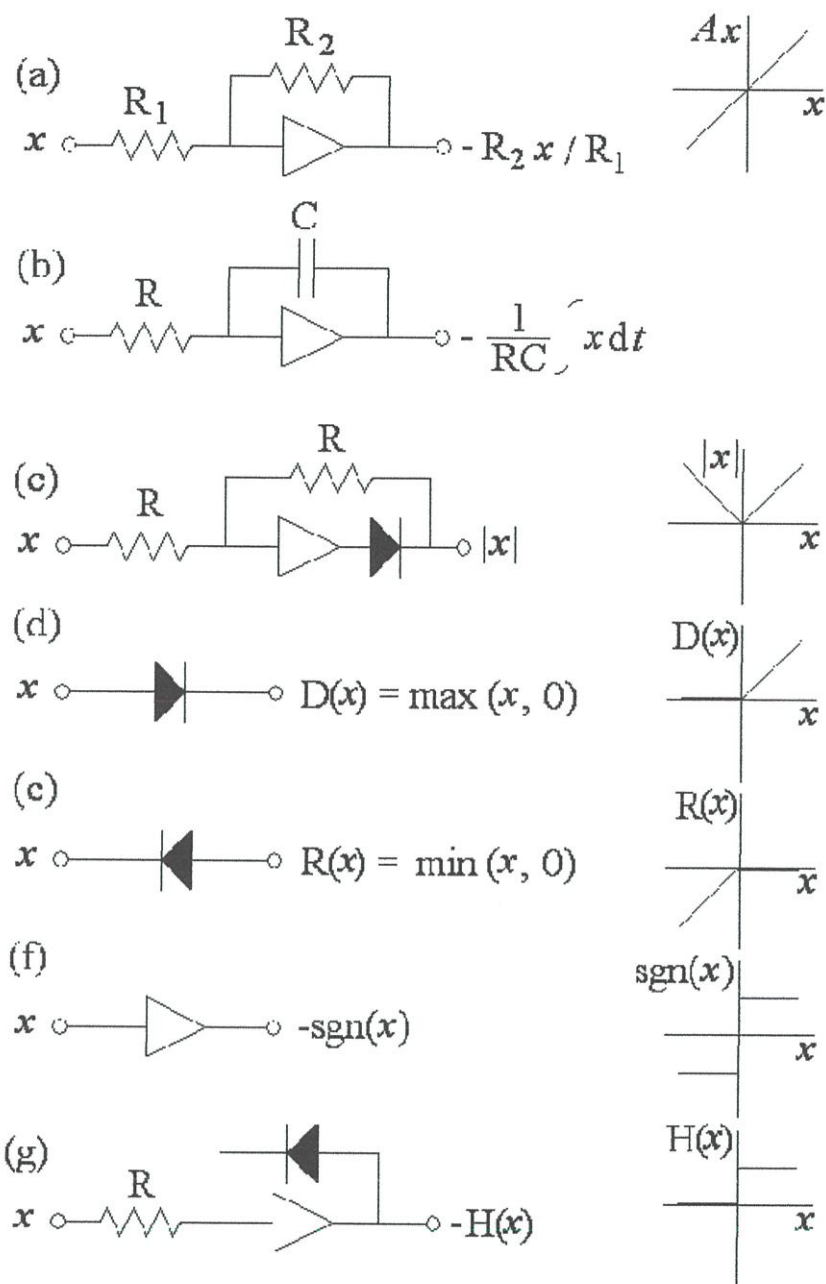
ตารางที่ 2.1 แสดงการสร้างสัญญาณอลวน third-order ODE systems และ Lyapunov exponents

System	Initial conditions ( $x, \dot{x}, \ddot{x}$ )	Lyapunov exponents (base $e$ )
$\ddot{x} = -2.017 \dot{x} \pm x^2 - x$	(0, 0, $\pm 1$ )	0.055, 0, -2.072
$\ddot{x} = -2.8 \dot{x} \pm x + x^2$	( $\mp 0.5, -1, 1$ )	0.002, 0, -0.002
$\ddot{x} = -0.44 \dot{x} - 2\dot{x} \pm (x^2 - 1)$	(0, 0, 0)	0.105, 0, -0.545
$\ddot{x} = -0.5 \dot{x} - \dot{x} \pm x \pm x^2$	(0, $\pm 1, 0$ )	0.094, 0, -0.594
$\ddot{x} = -2 \dot{x} \pm ( x  - 1)$	$\pm(-1, -1, 1)$	0.003, 0, -0.003
$\ddot{x} = -0.6 \dot{x} - \dot{x} \pm ( x  - 1)$	(0, 0, 0)	0.036, 0, -0.636
$\ddot{x} = -0.3 \dot{x} - 0.3 \dot{x} - D(x) + 1$	(0, 0, 0)	0.042, 0, -0.342
$\ddot{x} = -0.3 \dot{x} - 0.3 \dot{x} - R(x) - 1$	(0, 0, 0)	0.042, 0, -0.342
$\ddot{x} = -2.9 \dot{x} \pm (0.7x - D(x) + 1)$	$\pm(0, -0.5, 0.5)$	0.003, 0, -0.003
$\ddot{x} = -2.9 \dot{x} \pm (0.7x - R(x) - 1)$	$\pm(0, 0.5, -0.5)$	0.003, 0, -0.003
$\ddot{x} = -0.5 \dot{x} - \dot{x} - x + \text{sgn}(x)$	(0, 1, 0)	0.152, 0, -0.652
$\ddot{x} = -0.5 \dot{x} - \dot{x} + x - \text{sgn}(x)$	(0, 1, 0)	0.601, 0, -1.101
$\ddot{x} = -0.7 \dot{x} - \dot{x} - x + H(x)$	(0, 1, 0)	0.085, 0, -0.785
$\ddot{x} = -0.4 \dot{x} - \dot{x} - x + 2S(x)$	(0, 1, 0)	0.072, 0, -0.472
$\ddot{x} = -0.4 \dot{x} - \dot{x} + x - 2S(x)$	(0, 1, 0)	0.091, 0, -0.491
$\ddot{x} = -0.19 \dot{x} - \dot{x} - x + 2 \tanh(x)$	(0, 1, 0)	0.128, 0, -0.318
$\ddot{x} = -0.19 \dot{x} - \dot{x} + x - 2 \tanh(x)$	(0, 1, 0)	0.067, 0, -0.257
$\ddot{x} = -3.7 \dot{x} \pm (x - x^3)$	(0, $\pm 0.5, 1$ )	0.002, 0, -0.002
$\ddot{x} = -0.6 \dot{x} + 2.8 \dot{x} - \dot{x}^3 - x$	(0, 1, 0)	0.034, 0, -0.634
$\ddot{x} = -0.7 \dot{x} - \dot{x} + x - x^3$	(0, 1, 0)	0.138, 0, -0.838
$\ddot{x} = -0.35 \dot{x} - \dot{x} - x + x^3$	(0, 1, 0)	0.082, 0, -0.432
$\ddot{x} = -0.2 \dot{x} - \dot{x} \pm \sin(x)$	(0, 1, 0)	0.123, 0, -0.323

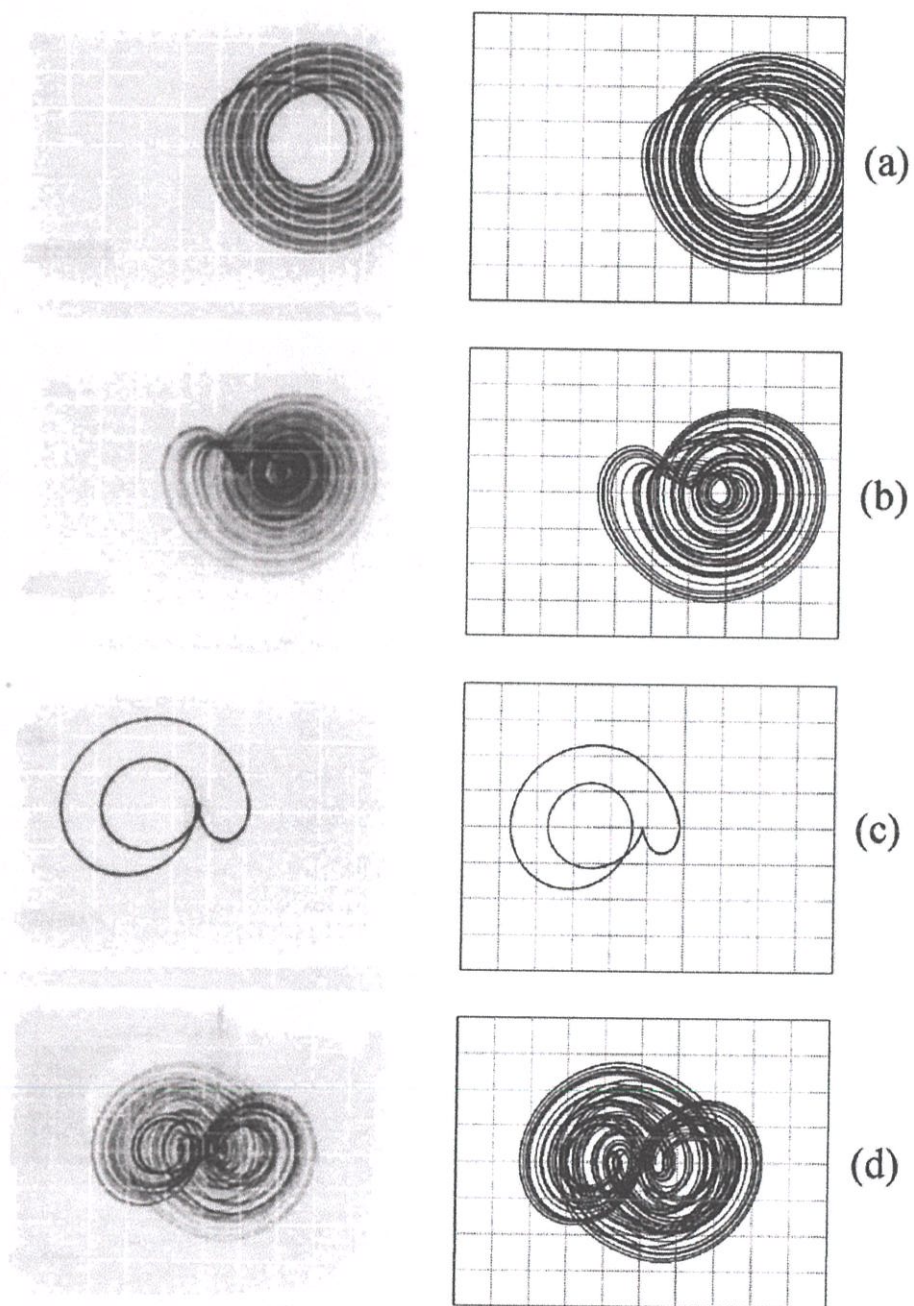
จากตารางที่ 2.1 แสดงสมการอลวนที่อยู่ในรูปแบบของพร้อมกับค่าเริ่มต้นและค่า Lyapunov exponents ที่ J.C. Sprott ค้นพบ

ในการสร้างวงจรในทางปฏิบัติจากสมการคณิตศาสตร์ใช้วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรขยายและวงจรไม่เป็นเชิงเส้นแบบต่างๆ ซึ่งสร้างโดยอาศัยออปแอมป์และไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.3

จากรูปเห็นได้ว่าสามารถสร้างวงจรขยายสัญญาณ วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรแบบไม่เป็นเชิงเส้น ได้ด้วยการใช้ออปแอมป์และไดโอดในระบบนี้ขอกำจำกัดทางความถี่ขึ้นอยู่กับขนาด gain bandwidth ของออปแอมป์



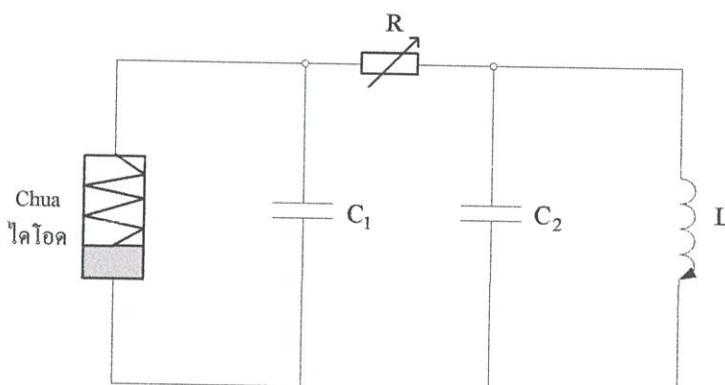
รูปที่ 2.3 แสดงการดำเนินการทางคณิตศาสตร์ที่แทนด้วยวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 2.4 สัญญาณอลวนจากตัวดึงดูด Sprott ในลักษณะ 2 มิติระหว่างระนาบ  $x$  กับ  $x'$

### 2.3.4 วงจร Chua

วงจร Chua เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งสามารถสร้างสัญญาณออสซิลเลชันที่มีความหลากหลาย มากที่สุด และสร้างได้ง่าย โดยวงจรประกอบอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว และอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นอีก 1 ตัว



รูปที่ 2.5 วงจร Chua

วงจร Chua ได้แสดงดังรูปที่ 2.5 ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งสามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้ตามสมการที่ (2.17.1)

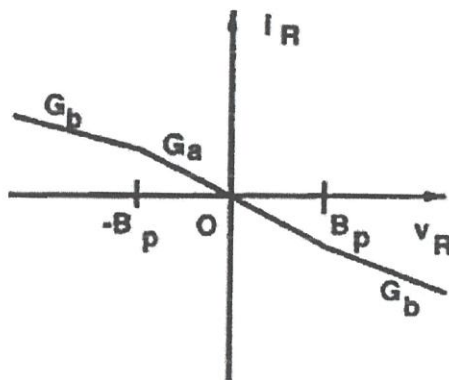
$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_1}{dt} &= \frac{1}{R}(v_2 - v_1) - \hat{f}(v_1) \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} &= \frac{1}{R}(v_1 - v_2) + i_3 \\ L \frac{di_3}{dt} &= -v_2 \end{aligned} \quad (2.17.1)$$

โดย

$$i_R = \hat{f}(v_R) = G_b v_R + \frac{1}{2}(G_a - G_b) \left\{ |v_R + B_p| - |v_R - B_p| \right\} \quad (2.17.2)$$

จากสมการที่ (2.17.2) เป็นการแสดงคุณสมบัติของความต้านทานลบแบบ 3-segment (3-segment odd-symmetric voltage-current characteristic) ของตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Chua ไดโอด) โดยมีความชันเป็น  $G_a, G_b$  และโดยจุดแรงดันคั่นพังทลาย (breakpoint) อยู่ที่  $v_R = -B_p$  และ  $v_R = B_p$  โดยที่  $v-i$  characteristic ของ Chua ไดโอด แสดงดังรูปที่ 2.17.2

สมการอนุพันธ์ (differential equation) ดังที่แสดงในสมการที่ (2.17.1) จัดเป็น *autonomous dynamical system* ซึ่งแสดงว่าเมื่อไม่มีการส่งสัญญาณจากภายนอกเข้าสู่ระบบ ระบบจะดำเนินไปเรื่อยๆ ตามคุณสมบัติธรรมชาติ (natural dynamics) เมื่อ  $R, L$  และ  $C_1, C_2$  ในวงจร Chua มีค่าเป็นบวกจากจุดที่แสดงถึงพลังงานสะสม ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะทำงานเพื่อกำเนิดสัญญาณ (oscillate) และเป็นตัวเดียวที่จะทำให้เกิดการ โดยที่ตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นตัวจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ตัวอื่นในวงจร (passive linear elements) ในขณะที่ตัวต้านทานจะได้รับพลังงานจากแบตเตอรี่



รูปที่ 2.6  $i$ - $v$  characteristic ของ Chua ไดโอด

เมื่อทำการเปลี่ยนตัวแปรในของสมการสถานะ (state equation) ในสมการที่ (2.17.1) ให้อยู่ในรูปที่ไม่มีมิติ (dimensionless)

$$\frac{dx}{d\tau} = k\alpha(y - x - f(x)) \quad (2.18.1)$$

$$\frac{dy}{d\tau} = k(x - y + z) \quad (2.18.2)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -k\beta y \quad (2.18.3)$$

โดย

$$f(x) = bx + \frac{1}{2}(a-b)\{|x+1| - |x-1|\} \quad (2.19)$$

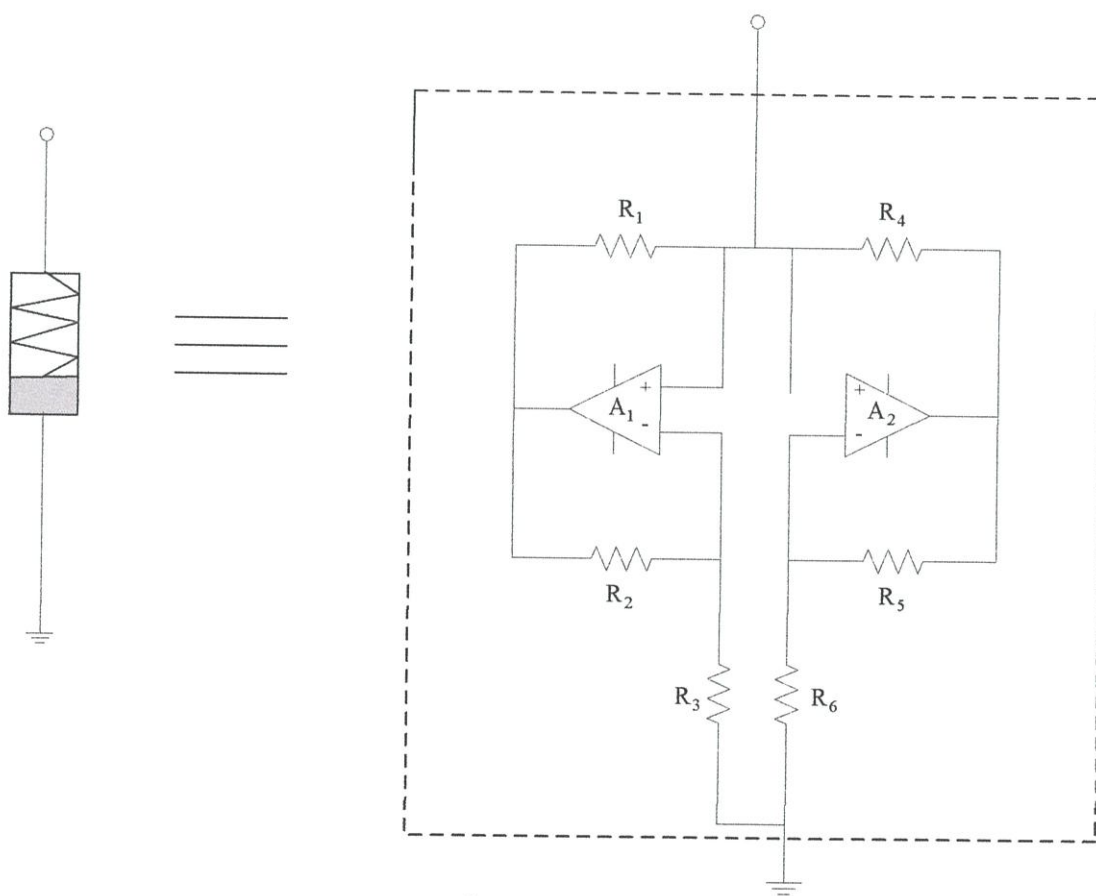
และ

$$\begin{aligned} x &= \frac{\Delta v_1}{B_p}, & y &= \frac{\Delta v_2}{B_p}, & z &= i_3 \left( \frac{R}{B_p} \right) \\ \alpha &= \frac{\Delta C_2}{C_1}, & \beta &= \frac{\Delta R^2 C_2}{L}, & k &= \text{sgn}(RC_2) \\ a &= RG_a, & b &= RG_b, & \tau &= \frac{t}{|RC_2|} \end{aligned} \quad (2.20)$$

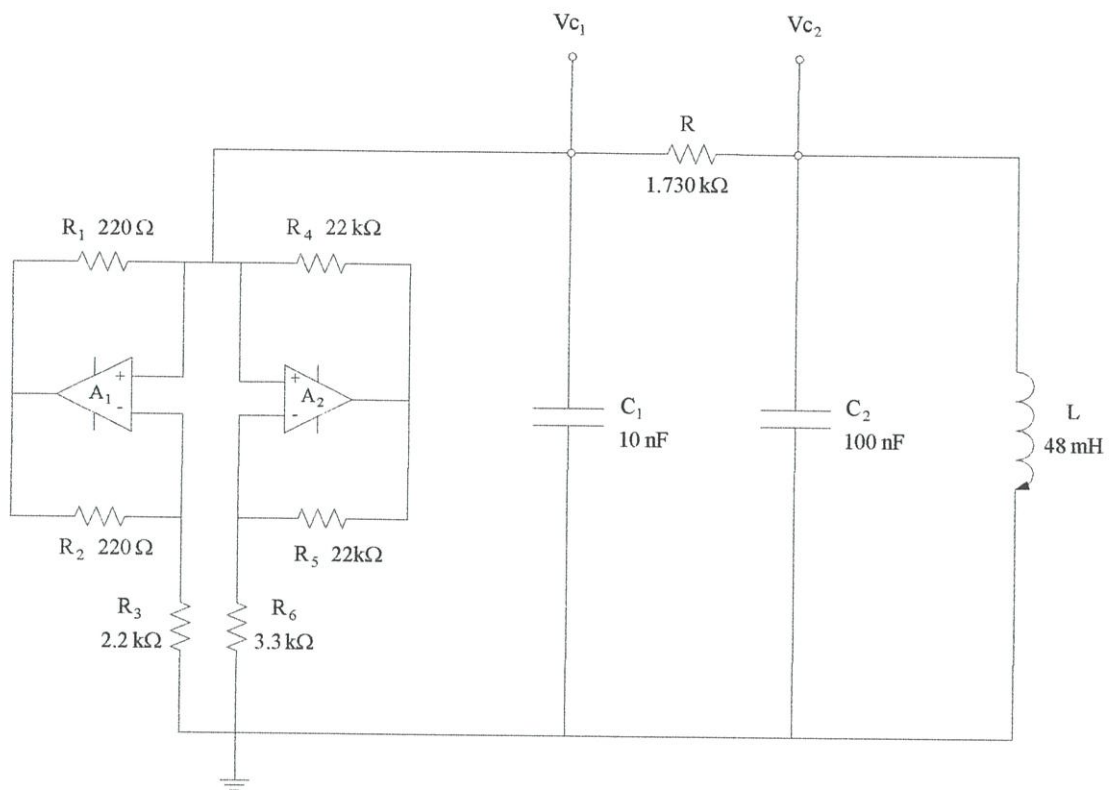
ค่าพารามิเตอร์  $k$  มีค่าเท่ากับ 1 หรือ -1 โดยคำนวณตามทิศทางของเวลา โดยทั้งกรณีที่พารามิเตอร์  $k$  มีค่าเป็น 1 และ -1 จะมีได้ผลลัพธ์ที่เหมือนกัน ยกเว้นกรณีที่อินทิเกรตระบบ

ดังนั้นสัญญาณที่สร้างจากวงจร Chua นั้นจะแปรตามค่าของอุปกรณ์ต่างๆ ในวงจรซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์ที่เป็นเชิงเส้น 4 ตัว (ตัวเก็บประจุ 2 ตัว, ตัวเหนี่ยวนำ 1 ตัว, ตัวต้านทานเชิงเส้น 1 ตัว) และตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้น 1 ตัว (Chua ไดโอด) ซึ่งถ้าต้องการปรับเปลี่ยนสัญญาณก็สามารถทำได้โดยการเปลี่ยนค่าต่างๆ ตามสมการที่ได้กล่าวมาข้างต้น

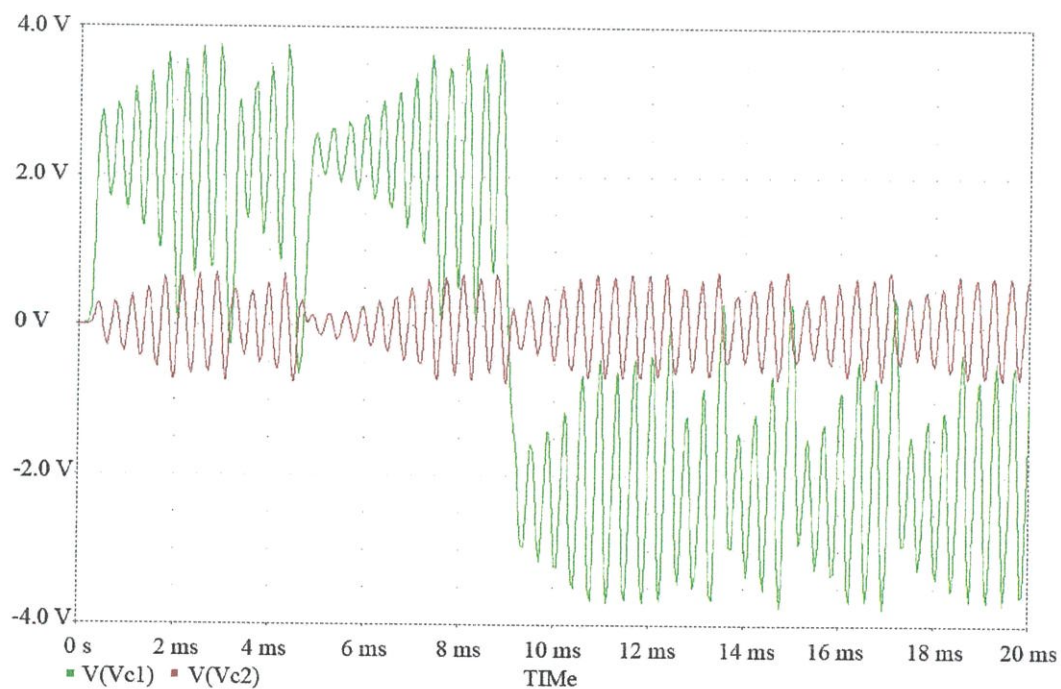
จากรูปที่ 2.5 วงจร Chua มีตัวต้านทานที่ไม่เป็นเชิงเส้นเรียกว่า Chua ไดโอด โดย Chua ไดโอดสร้างได้โดยใช้ออปแอมป์ แสดงดังรูปที่ 2.7 สำหรับตัวอย่างของวงจร Chua ในทางปฏิบัติแสดงดังรูปที่ 2.8 สัญญาณอลวนที่  $V_{c1}, V_{c2}$  เทียบกับเวลาจากวงจรรูปที่ 2.8 แสดงในรูปที่ 2.9 และเมื่อนำเอาความต่างศักย์  $V_{c1}, V_{c2}$  มาเปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 2.10



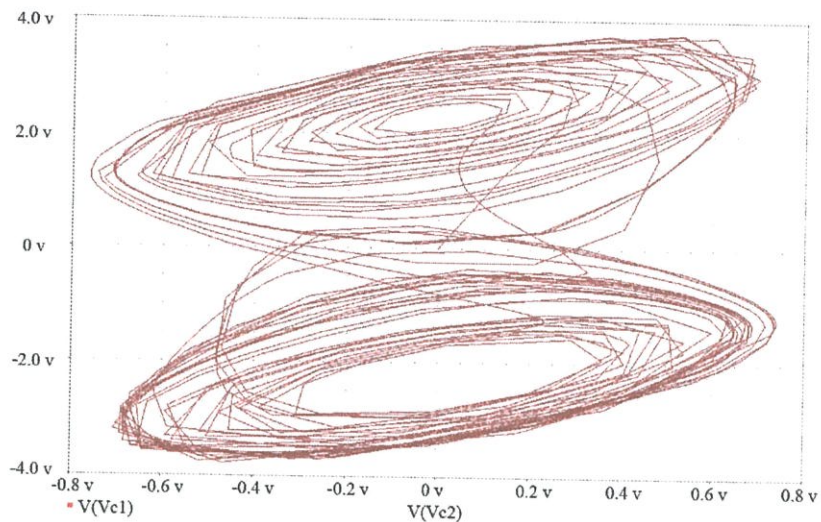
รูปที่ 2.7 Chua ไดโอด



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างวงจร Chua ในทางปฏิบัติ

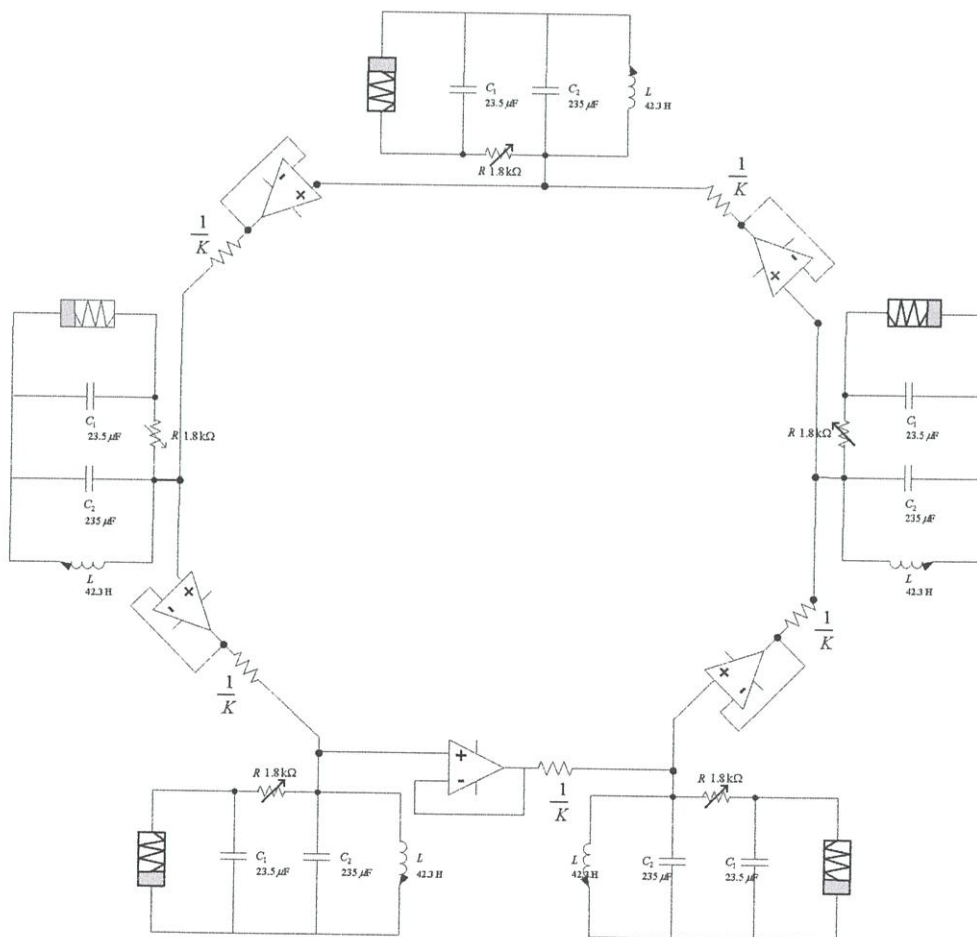


รูปที่ 2.9 สัญญาณจาก  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  เมื่อเทียบกับเวลา



รูปที่ 2.10 สัญญาณจาก  $V_{c1}$  เป็นแกน y และ  $V_{c2}$  เป็นแกน x

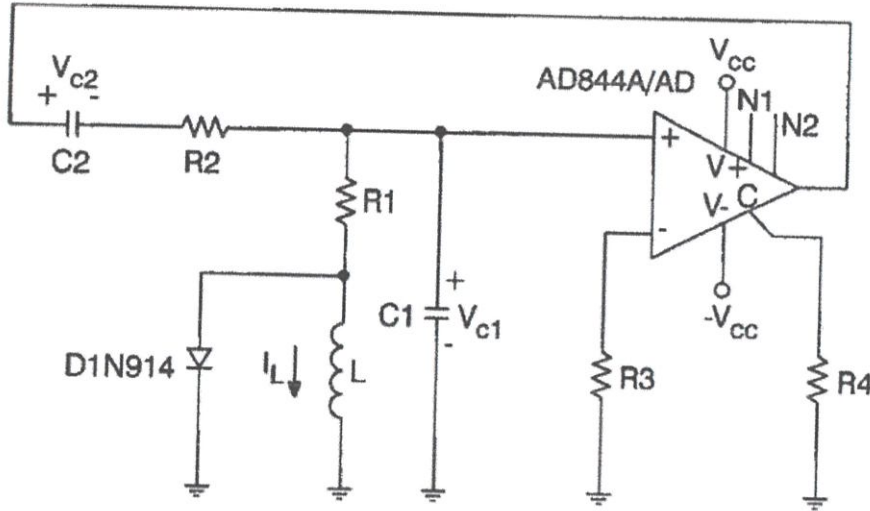
วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิดเป็นตัวอย่างของการสร้างสัญญาณอลวนให้ซับซ้อนขึ้น



รูปที่ 2.11 วงจรกำเนิดสัญญาณจาก วงจร Chua แบบห้วงโซ่แบบปิด

2.3.5 วงจรออสซิลเลชันแบบ Wien [12]

เป็นวงจรที่ประยุกต์จากวงจรวินบรีดจ์โดยส่วนของการป้อนกลับมีตัวเหนี่ยวนำและไดโอดที่เป็นอุปกรณ์ไม่เป็นเชิงเส้นต่อรวมเข้าไปด้วยทำให้เกิดสัญญาณออสซิลเลชัน การทำงานในย่านความถี่สูงสามารถใช้โอปแอมป์ที่ผลตอบสนองในย่านความถี่สูงมาใช้

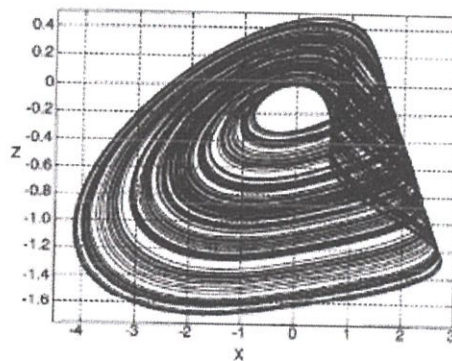


รูปที่ 2.12 วงจรออสซิลเลชันแบบ Wien

วงจรแสดงความสัมพันธ์ในแบบสมการสแตตได้

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \\ \epsilon W' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k-2 & -1 & 0 & 1 \\ k-1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \beta \\ 1 & 0 & -1 & -(1+a) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ a \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

เมื่อ  $a = \alpha W \geq 1$ ,  $a = 0$   $W < 1$  โดย  $K, \epsilon, \alpha, \beta$  เป็นค่าคงที่ซึ่งเมื่อ  $K = 2.15, \epsilon = 0.004, \alpha = 15, \beta = 0.21$  สามารถกำเนิดสัญญาณขึ้นได้ดังรูปดังนี้



รูปที่ 2.13 สัญญาณออสซิลเลชันในระนาบ XZ

$$K = 2 + R_2/R_1$$

$$\varepsilon = C_D/C$$

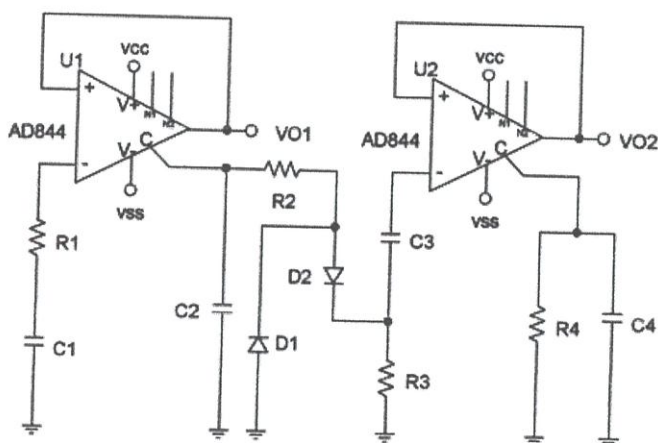
$$\alpha = R/R_D$$

$$\beta = R^2 C/L$$

ค่า  $R_D, C_D$  คือ ค่าความต้านทานและค่าความจุที่ตัวไดโอดตามลำดับ โดยกำหนดค่าของอุปกรณ์นี้ ดังนี้  $C_1 = C_2 = C = 330\text{pF}$ ,  $R_1 = R_2 = R = 500\Omega$ ,  $L = 1\text{mH}$ ,  $R_3 = 1\text{K}\Omega$ ,  $R_4 = 2070\Omega$  เพื่อให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าคงที่ที่เกิดสถานะ และใช้อุปกรณ์โหมตกระแสเพื่อตอบสนองความถี่สูง

### 2.3.6 วงจรเน็ตสัญญาณแบบแบบไฮเปอร์[36]

เป็นวงจรที่สร้างขึ้นมาใช้ในย่านความถี่สูงเช่นเดียวกับวงจรอลวนแบบ Wien แต่ในวงจรนี้แหล่งกำเนิดทั้งสองใช้อุปกรณ์โหมตกระแสสองตัว

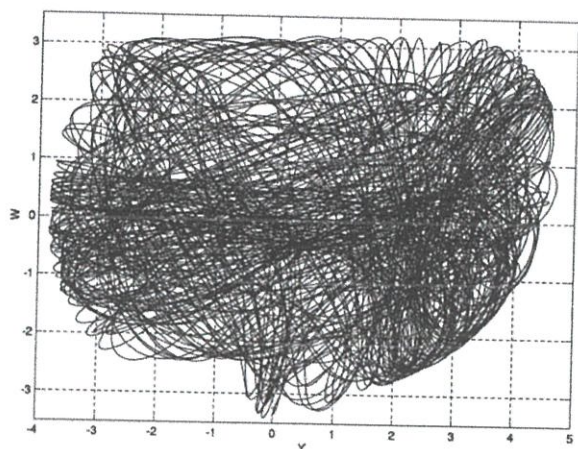


รูปที่ 2.14 วงจรวงจรเน็ตสัญญาณแบบแบบไฮเปอร์

วงจรแสดงความสัมพันธ์ในแบบสมการสแตตได้

$$\begin{bmatrix} 2X' \\ Y' \\ 2Z' \\ W' \\ \varepsilon V' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -(1+a_1) & 1+a_1 & -a_1 \\ 0 & 0 & -(1+a_1) & 1+a_1+1/k & -a_1 \\ 0 & 1 & -a_1 & a_1 & -(1+a_1+a_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ W \\ V \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ a_1 \\ a_1 \\ a_1 - a_2 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

โดย  $K, \varepsilon, \alpha$  เป็นค่าคงที่ซึ่งเมื่อ  $K = 1.7$ ,  $\varepsilon = 0.01$ ,  $\alpha = 10$  สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนแบบไฮเปอร์ขึ้นแสดงได้ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แสดงผลจากสมการ Hyper chaos ในระนาบ YW

$$K = R_4/R$$

$$\mathcal{E} = C_D/C$$

$$\alpha = R/R_D$$

การกำหนดค่าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์แสดงได้ดังนี้  $C_2 = C_4 = C = 50\text{pF}$ ,  $C_1 = C_3 = 100\text{pF}$ ,  $R_1 = R_2 = R_3 = R = 500\Omega$ ,  $R_4 = 1050\Omega$

## บทที่ 3

### วิธีการดำเนินวิจัย

#### แนวความคิดในการออกแบบ

จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยที่ต้องการสร้างวงจรถอดความถี่สูงเพื่อใช้กับงานสื่อสารแบบมั่นคงปลอดภัยรวมทั้งต้องการจัดสิทธิบัตรวงจรต้นแบบที่ได้สร้างขึ้น โดยการสร้างวงจรถอดความถี่สูงที่สามารถกำเนิดแถบความถี่ได้ HF-VHF ที่สามารถใช้เป็นคลื่นพาของวงจรถอดความถี่เพื่อใช้สำหรับการสื่อสารมั่นคงปลอดภัยโดยสามารถปรับการกระจายสเปกตรัมเพื่อใช้เป็นสัญญาณ jamming แบบเลือกแถบความถี่โดยตัวต้นแบบสามารถผลิตได้ในอุตสาหกรรมได้จริง ดังนั้นใน วิธีดำเนินการวิจัย

1. ทำการหารูปแบบวงจรที่ดีที่สุดเช่นหาสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองปีกเช่นสมการของ Lorenz หรือ Chen หรือแบบ compound ต่างๆ ที่มีผู้ค้นพบหลังปี ค.ศ. 2000 แล้วการแปลงวงจรถอดแบบเชิงเส้นที่ใช้ในสมการให้เป็นวงจรถอดแบบสวิตซ์โดยใช้เทคนิคการคำนวณเชิงเลขเพื่อหาพารามิเตอร์ โดยการใช้วงจรถอดแบบสวิตซ์หรือวงจรถอด mixer นี้สามารถสร้างได้ที่ความถี่สูง
2. เทคนิคการสร้างแบบการใช้กำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts เป็นตัวกำเนิดหลักร่วมกับการใช้การสร้างสัญญาณสุ่มเทียมและสัญญาณอลวนแบบเชิงทอน

#### 3.1 การสร้างตัวตั้งจุดแบบปรับได้

จากสมมติฐานของงานวิจัยที่เริ่มต้นทำการหารูปแบบสมการอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถกำเนิดสัญญาณอลวนแบบสองปีกเช่นสมการของ Lorenz หรือ Chen หรือแบบต่างๆที่มีผู้ค้นพบหลังปี ค.ศ. 2000 แล้วการแปลงวงจรถอดแบบเชิงเส้นที่ใช้ในสมการให้เป็นวงจรถอดแบบสวิตซ์โดยใช้เทคนิคการคำนวณเชิงเลขเพื่อหาพารามิเตอร์ โดยการใช้วงจรถอดแบบสวิตซ์หรือวงจรถอด mixer นี้สามารถสร้างได้ที่ความถี่สูง

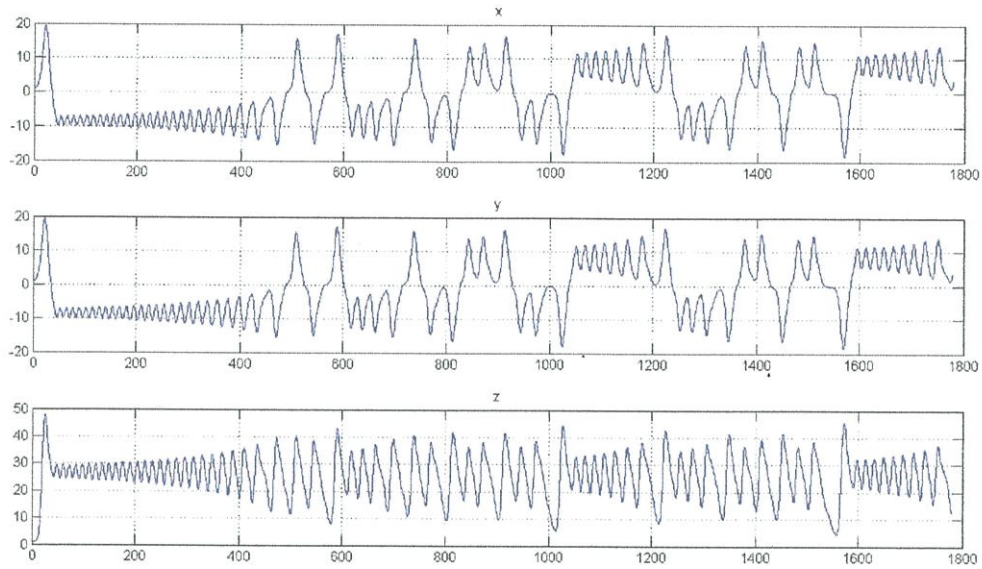
ดังนั้นในบทนี้จะแสดงถึงการออกแบบวงจรถอดการสร้างวงจรถอดความถี่สูงแบบปีกผีเสื้อโดยเริ่มต้นจากการสังเกตพฤติกรรมของ Lorenz โดยแบบจำลองแสดงได้ โดยสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 คือ

$$x' = -ax + ay \quad (3.1.1)$$

$$y' = (b - z)x - y \quad (3.1.2)$$

$$z' = -cz + xy \quad (3.1.3)$$

จากสมการถ้า  $a = 10, b = 28, c = 8/3$  แสดงสัญญาณทั้งแกน  $x, y, z$  ในโดเมนของเวลาได้



รูปที่ 3.1 สัญญาณในแกน  $x, y, z$  ของตัวดึงดูด Lorenz

จากตัวดึงดูดของ Lorenz เมื่อสังเกตค่า  $x, y$  แล้วมีค่าใกล้เคียงกันดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอรูปแบบตัวดึงดูดใหม่โดยประมาณ  $xy \approx |x|$  และตัดเทอม  $y$  ออกจากสมการ  $y'$  ซึ่งแสดงระบบใหม่ได้

$$x' = -ax + ay \quad (3.2.1)$$

$$y' = rx - kxz \quad (3.2.2)$$

$$z' = -bz + k|x| \quad (3.2.3)$$

โดยค่า  $k$  เป็นค่าคงที่เพื่อใช้ scale ขนาดของตัวดึงดูด จากสมการ (3.2) ระบบมีจุดสมดุลที่  $P^0 = (0, 0, 0)$ ,  $P^\pm = (\pm \frac{br}{k^2}, \pm \frac{br}{k^2}, \frac{r}{k})$  และค่า Jacobian matrix ของสมการ (3.2) แสดงได้

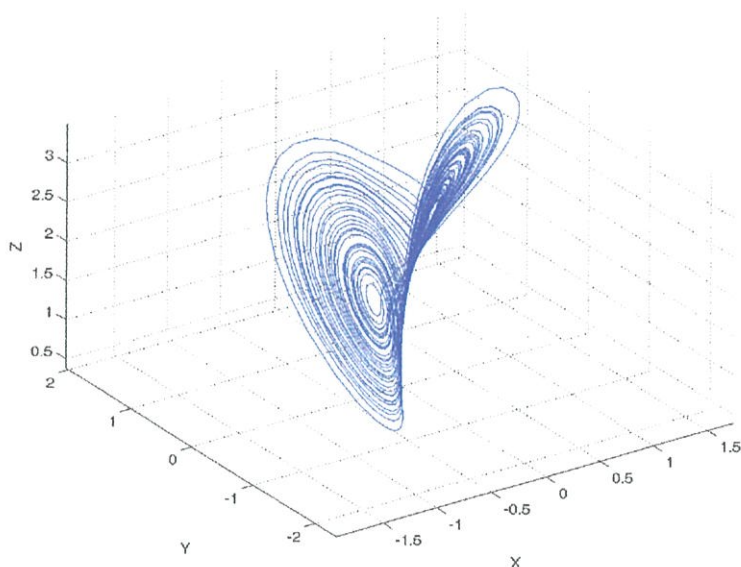
$$J = \begin{bmatrix} -a & a & 0 \\ -kz + r & 0 & -kx \\ k \operatorname{sgn}(x) & 0 & -b \end{bmatrix}$$

ซึ่งค่าของสมการคุณลักษณะหาได้จาก  $|J - \lambda I|$  มีค่า

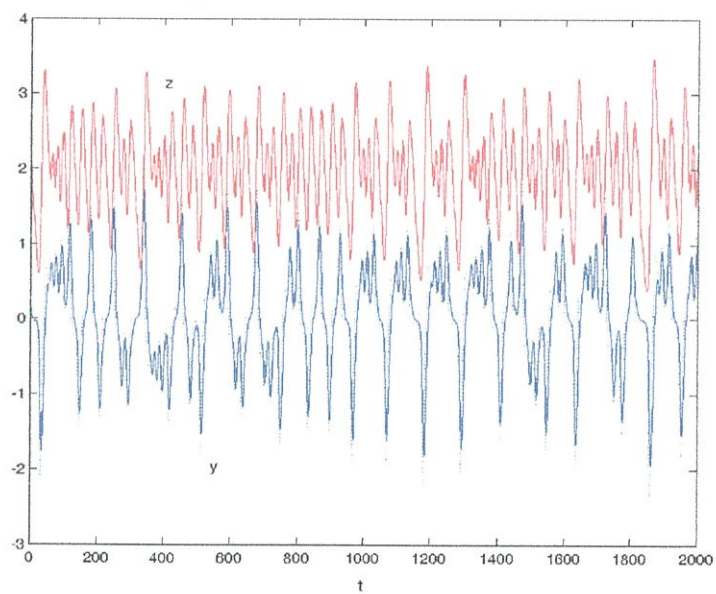
$$\lambda^3 + (a+b)\lambda^2 + (ab - ar + kaz) + k^2 a|x| - k^2 a|x| - arb + kabz \quad (3.3)$$

จากเงื่อนไขของ Routh-Hurwitz เลือกให้ที่จุดสมดุล  $P^0$  เป็น saddle point index 1 และให้จุดสมดุล  $P^\pm$  เป็น spiral index 2 และทำการหาค่า Lyapunov เพื่อให้  $\lambda_1 = +, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -$  แล้ว ที่พารามิเตอร์  $a = 10, r = 20, b = 3$  และ  $k = 10$  ระบบจะแสดงลักษณะตัวดึงดูด เป็น Lorenz และโดยมีค่า Lyapunov ของระบบเท่ากับ  $\lambda_1 = 0.704, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -13.7$  และที่พารามิเตอร์ขนาดเดียวกันแต่ปรับค่า

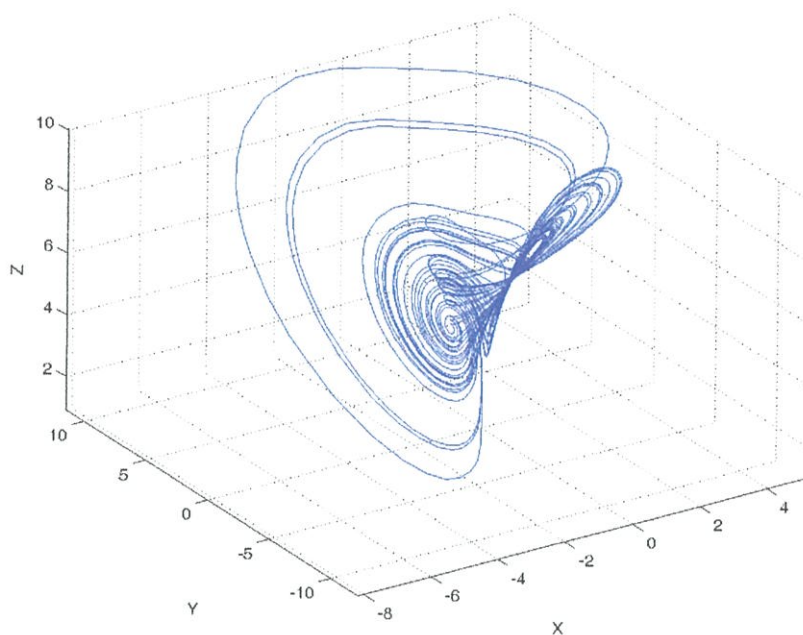
$r = 50$  ระบบแสดงลักษณะตัวดึงดูดแบบ Chen โดยมีค่า Lyapunov เท่ากับ  
 $\lambda_1 = 1.84, \lambda_2 = 0, \lambda_3 = -14.83$



รูปที่ 3.2 ตัวดึงดูดแบบปรับได้โดยปรับเป็น Lorenz



รูปที่ 3.3 ตัวดึงดูดแบบปรับได้โดยปรับเป็น Lorenz ในแกนเวลา



รูปที่ 3.4 ตัวดึงดูดแบบปรับได้โดยปรับเป็น Chen

### 3.2 ตัวดึงดูดที่ปรับปรุงใหม่

จากสัญญาณในรูป 3.1 สัญญาณ  $x$  คล้ายกับสัญญาณ  $y$  โดยมีความสมมาตรในแกน  $z$  โดย  $z$  มีค่าเป็นบวกเสมอข้อสังเกตถ้าหากสัญญาณแกน  $z$  มีขนาดเกินค่า  $b$  แล้วสัญญาณ  $x$  และสัญญาณ  $y$  จะเปลี่ยนจากแรงดันบวกไปลบหรือลบไปบวกหรือค่าแรงดันขีดเริ่มเปลี่ยนของการเปลี่ยน  $\pm \leftrightarrow \mp$  มีขนาด  $b = 28$  ดังนั้นเทอม  $(b - z)x$  แปลงได้เป็น  $k(b - z)$  โดย  $b$  เป็นฟังก์ชันสวิชท์หรือตัวคูณแบบสวิชท์ รูปสัญญาณ  $x$  คล้ายกับสัญญาณ  $y$  หรือ  $x \approx y$  ดังนั้นผลคูณ  $xy$  ใน  $z' = -cz + xy$  สามารถประมาณได้เป็น  $|x|$  ซึ่งการเปลี่ยนเทอม  $xz$  เป็นฟังก์ชันสวิชท์และ  $xy$  เป็นเทอม  $|x|$  ที่สามารถใช้วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นทำให้หลีกเลี่ยงการใช้วงจรคูณที่สร้างได้ยากที่ความถี่สูง

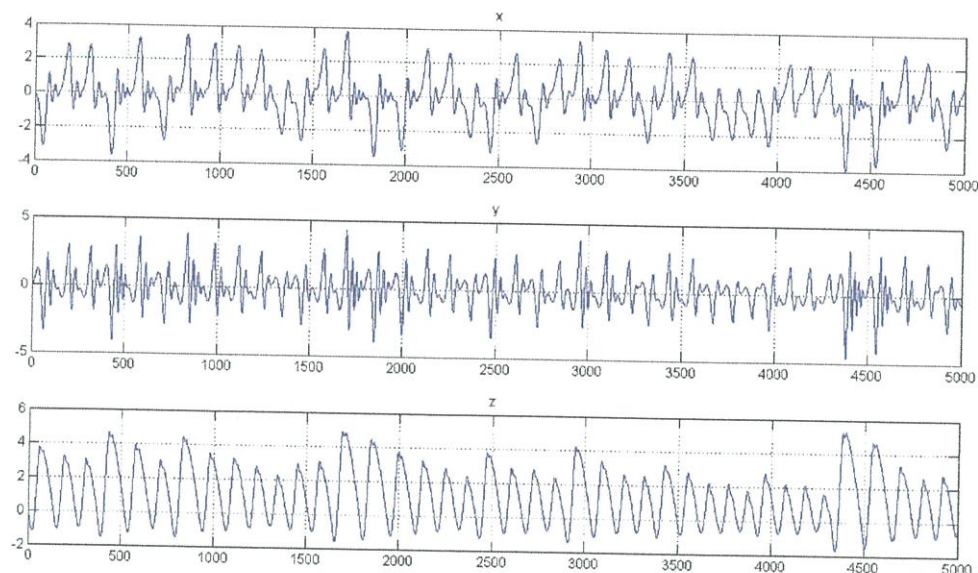
ทำให้สร้างสมการอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีพฤติกรรมเป็นออสซิลเลชันแบบปิกมีสี่เหลี่ยมที่สามารถออกแบบวงจรให้ทำงานที่ความถี่สูงโดยใช้ตัวคูณแบบสวิชท์แสดงสมการได้คือ

$$x' = y \quad (3.4.1)$$

$$y' = kz - ay \quad (3.4.2)$$

$$z' = \text{abs}(x) - b \quad (3.4.3)$$

ค่า  $a = 0.7$   $b = 1$  โดย  $k$  เป็นตัวคูณแบบสวิชท์  $k = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases}$  แสดงรูปแบบสัญญาณที่แกน  $x, y, z$  ได้

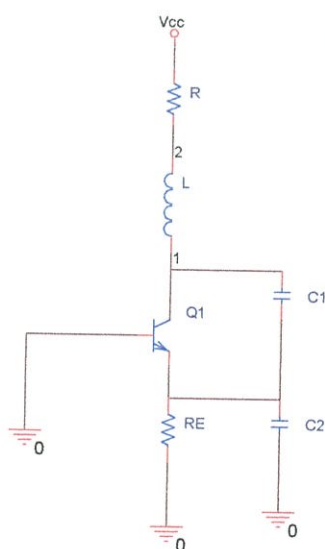


รูปที่ 3.5 สัญญาณในแกน  $x, y, z$  ของตัวดึงดูดที่ปรับปรุงขึ้น

จากรูปแสดงสัญญาณที่ลักษณะมีความสมมาตรในแกน  $z$  และสังเกตว่าสัญญาณ  $x, y$  มีลักษณะคล้ายกัน เช่นเดียวกับระบบ Lorenz แต่สัญญาณ  $x, y$  ไม่ได้แสดงการเพิ่มขนาดแบบ  $e^{at}$  เช่นเดียวกับระบบ Lorenz แต่มีลักษณะที่คล้ายกับสัญญาณอลวนจาก วงจร Colpitts ที่สามารถสร้างที่ความถี่สูงได้ง่าย โดยการสร้างเป็นสองปีกกระทำได้โดยใช้สัญญาณกึ่งสุ่มทำการสวิตซ์ให้เป็นสองระดับ

### 3.3 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts เป็นวงจรถูกกำเนิดสัญญาณความถี่สูงที่สามารถให้รูปแบบสัญญาณอลวนขนาด 1 สกอร์ได้โดยขึ้นอยู่กับการทำงานของกระแสแสดงวงจรถูกกำเนิดรูป



รูปที่ 3.6 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts

จากวงจรมีเงื่อนไขดังนี้

1. กระแสไบอัสที่อิมิตอร์เท่ากับ  $I_0$
2. ที่ขาอิมิตอร์และขาเบสทรานซิสเตอร์ถูกโมเดลเป็นความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้น  $R_{BE}$  ควบคุมด้วยกระแสโดยแสดงความสัมพันธ์ลักษณะ  $V - I$  ของ  $R_{BE}$  ได้คือ

$$I_E = I_S \left[ \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (3.5)$$

โดย  $I_S$  กระแสอิ่มตัวย้อนกลับและถ้าหาก  $V_T = 26\text{mv}$  และ  $V_{BE} > V_T$  แล้วประมาณ (3.5) ได้คือได้คือ

$$I_E \approx I_S \left[ \exp\left(\frac{V_{BE}}{V_T}\right) \right] \quad (3.6)$$

เขียนสมการสแตตได้ดังนี้

$$\frac{C_1 dv_{C1}}{dt} = -f(v_{C2}) + I_L \quad (3.7.1)$$

$$\frac{C_1 dv_{C2}}{dt} = I_L + I_0 \quad (3.7.2)$$

$$\frac{L di_L}{dt} = -V_{C1} - V_{C2} - RI_L + V_{CC} \quad (3.7.3)$$

โดย  $f(\cdot)$  เป็นฟังก์ชันขับของความต้านทานไม่เป็นเชิงเส้นที่สามารถเขียนได้ในเทอมของ  $I_E = f(v_{C2}) = f(V_{BE})$  จากสมการ (3.7) แสดงได้

$$f(v_{C2}) = I_S \left[ \exp\left(-\frac{V_{C2}}{V_T}\right) \right] \quad (3.8)$$

ในกรณีเป็นสมการแบบไม่มีขนาดของกระแสหรือแรงดันแรงสแตตด้วย  $x_1, x_2, x_3$  ความถี่ของวงจรมีขนาด

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \left( \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right)}} \quad (3.9)$$

เขียนสมการสแตตได้

$$\frac{dx_1}{dt} = -a \exp(-x_2) + ax_3 + a \quad (3.10.1)$$

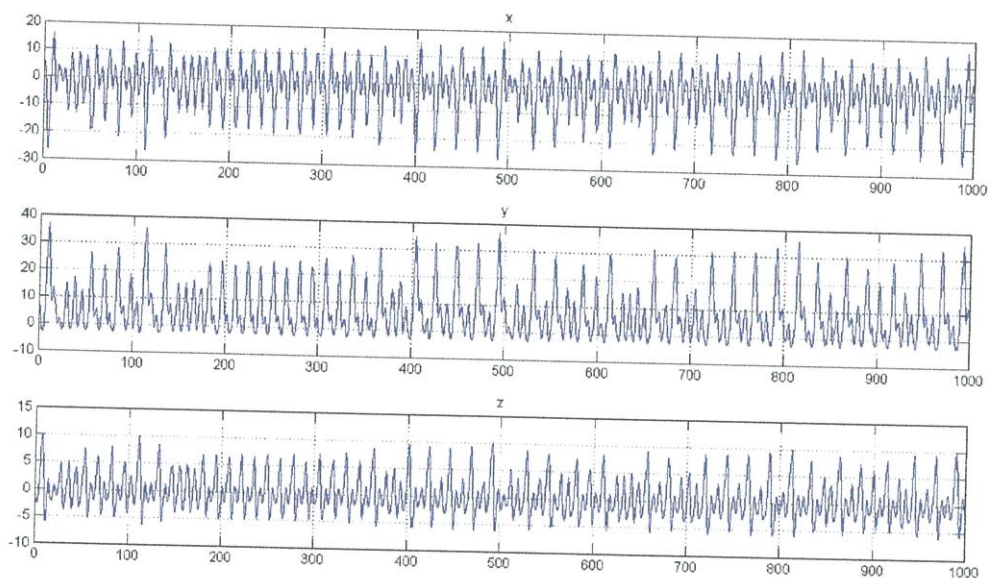
$$\frac{dx_2}{dt} = bx_3 \quad (3.10.2)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = -cx_1 - cx_2 - dx_3 \quad (3.10.3)$$

โดย  $a = \frac{g}{Q(1-k)}$ ,  $b = \frac{g}{Qk}$ ,  $c = \frac{Q(1-k)}{g}$ ,  $d = \frac{1}{Q}$ ,  $k = \frac{C_2}{C_1 + C_2}$ ,  $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$

ค่า  $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$  เป็นค่า quality factor ของวงจร

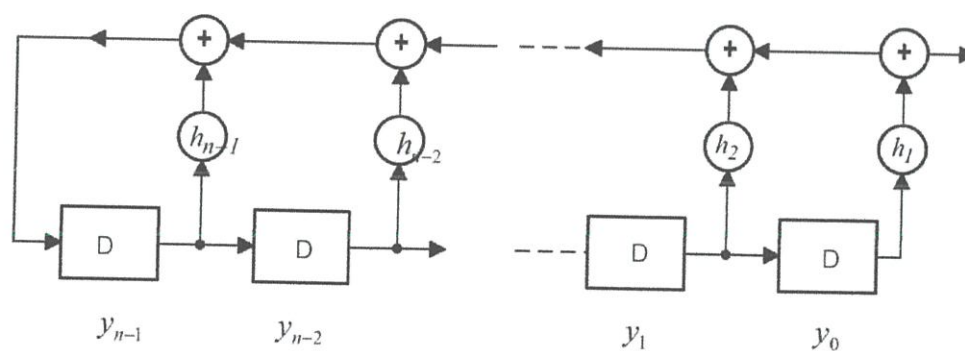
ค่า  $g$  เป็นค่า open loop gain ของวงจร



รูปที่ 3.7 สัญญาณจากวงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts โดยสมการ 3.8

### 3.4 การสร้างซีควนกิ่งสุ่ม

สัญญาณซีควนกิ่งสุ่มสามารถสร้างได้จากวงจรที่ประกอบด้วยชิพรีจิสเตอร์และเอ็กคูซีฟอเกตหรือเรียกว่าวงจรชิพรีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้น (Linear Feedback Shift Register) โดยโครงสร้างวงจรแสดงได้ดังรูป ซึ่งวงจรแบบนี้เป็นการป้อนกลับจากภายนอกหรือแบบวงจรแบบ Fibonacci-LFSR



รูปที่ 3.8 วงจรชิพรีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้น

จากรูปถ้าให้ถ้าให้แต่ละรีจิสเตอร์บรรจุค่าไบนารี  $y$  จากวงจรเป็นการป้อนกลับจาก  $y_0$  ไป  $y_{n-1}$  โดยผ่านค่าสัมประสิทธิ์  $h$  ถ้าหากมีค่าเท่ากับ 0 แล้วส่วนที่เชื่อมต่อระหว่างเอาต์พุตของชิพรีจิสเตอร์แต่ละตัวกับเอ็กคูซีฟอเกตจะเปิดออก แต่ถ้าหาก  $h$  มีค่าเท่ากับ 1 แล้วจะเป็นการต่อวงจรเมื่อมีสัญญาณนาฬิกา 1 ลูกเข้ามาในระบบแล้วสเตตของค่ารีจิสเตอร์ในเวลาต่อไปเขียนได้

$$\begin{aligned}
 y_{0(t+1)} &= y_{1(t)} \\
 y_{1(t+1)} &= y_{2(t)} \\
 &\dots
 \end{aligned}
 \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 y_{n-2(t+1)} &= y_{n-1(t)} \\
 y_{n-1(t+1)} &= 1 + h_1 y_1(t) + h_2 y_2(t) \dots + h_{n-1} y_{n-1}(t)
 \end{aligned}$$

โดยการทำงานทั้งหมดภายใต้มอดุโลสอง สามารถเขียนสมการในรูปของเมตริกซ์คือ  $Y_{t+1} = TY_t$  โดย  $T$  เป็นเมตริกซ์เปลี่ยนสถานะ(transition matrix)

$$\begin{bmatrix} y_{0(t+1)} \\ y_{1(t+1)} \\ \dots \\ y_{n-2(t+1)} \\ y_{n-1(t+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & h_1 & h_2 & \dots & h_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ \dots \\ y_{n-2(t+1)} \\ y_{n-1(t+1)} \end{bmatrix} \tag{3.12}$$

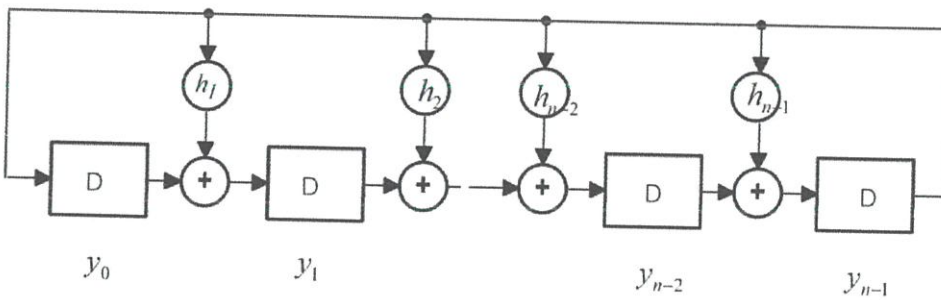
จากสมการสามารถหาค่าสมการคุณลักษณะ  $f(x) = \det(T - Ix)$  ภายใต้มอดุโล 2 ได้คือ

$$f(x) = \begin{vmatrix} x & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & x & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & x & \dots & 1 \\ 1 & h_1 & h_2 & \dots & h_{n-1} + x \end{vmatrix} \tag{3.13}$$

$$f(x) = 1 + h_1 x + h_2 x^2 + \dots + h_{n-1} x^{n-1} + x^n \tag{3.14}$$

โดย  $n$  เป็นขนาดลำดับของพหุนามมีขนาดเท่ากับจำนวนของรีจิสเตอร์จากสมการที่ (3.14) เราเรียกพหุนามลำดับ  $n$  นี้ว่าพหุนามคุณสมบัติ (characteristic polynomial) โดยวงจรจะให้ กำเนิดสัญญาณซีแควนซ์ แรนดัมที่ให้ขนาดของซีแควนสูงสุดเมื่อเป็นพหุนามปฐมฐาน

สำหรับชิพรีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้นแบบป้อนกลับภายในหรือแบบ Golois-LFSR แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.9 ชิพรีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้นแบบป้อนกลับภายใน

จากรูปเมื่อรีจิสเตอร์บรรจุค่าไบนารี  $y$  เมื่อมีสัญญาณนาฬิกา 1 ลูกเข้ามาในระบบแล้วสามารถเขียนสมการในรูปเมตริกซ์เปลี่ยนสถานะ(transition matrix)

$$\begin{bmatrix} y_0(t+1) \\ y_1(t+1) \\ y_2(t+1) \\ \dots \\ y_{n-2}(t+1) \\ y_{n-1}(t+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & h_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & h_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & h_{n-2} \\ 0 & h_1 & h_2 & \dots & h_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ \dots \\ y_{n-2}(t+1) \\ y_{n-1}(t+1) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

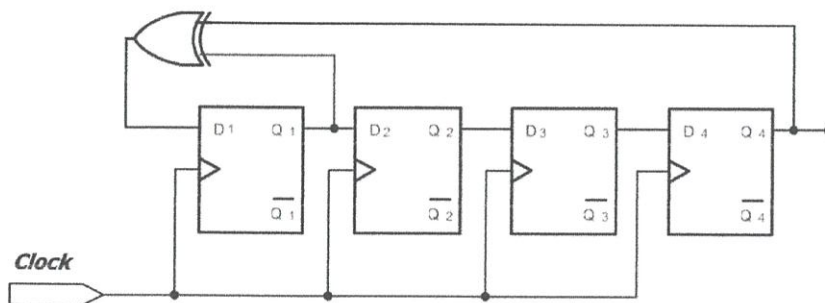
โดยสมการ (3.15) มีค่าสมการคุณลักษณะและสมการพหุนามเช่นเดียวกับ(3.13) แสดงการสร้างวงจรชิฟตรีจิสเตอร์ป้อนกลับแบบเชิงเส้นแบบ Golos ขนาดลำดับ 4 จาก (3.13) ขนาดจำนวนฟลิปฟล็อปที่ใช้มีจำนวน 4 ตัวแสดงสมการสเตตของวงจรได้

$$\begin{aligned} y_0(t+1) &= y_1(t) \\ y_1(t+1) &= y_2(t) \\ y_2(t+1) &= y_3(t) \\ y_3(t+1) &= 1 + h_1 y_1(t) + h_2 y_2(t) + h_3 y_3(t) \end{aligned}$$

เมื่อ  $h = \{0,1\}$  จาก (3.11) ค่าสมการคุณลักษณะภายใต้มอดูโล 2 คือ

$$\begin{aligned} \det(T - Ix) &= \begin{vmatrix} x & 1 & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x & 1 \\ 1 & h_1 & h_2 & h_3 + x \end{vmatrix} \\ &= x \begin{vmatrix} x & 1 & 0 \\ 0 & x & 1 \\ h_1 & h_2 & h_3 + x \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & x & 1 \\ 1 & h_2 & h_3 + x \end{vmatrix} \\ &= 1 + h_1 x + h_2 x^2 + h_3 x^3 + x^4 \end{aligned}$$

จากผลเฉลยของสมการคุณลักษณะซึ่งแสดงเป็นสมการพหุนามอันดับ 4 นั้นค่าพหุนามที่สามารถกำเนิดค่าซีควนสูงสุดต้องเป็นพหุนามแบบปฐมภูมิในซึ่งในที่นี้คือ  $1 + x + x^4$  และ  $1 + x^3 + x^4$



รูปที่ 3.10 วงจรกำเนิดสัญญาณกึ่งสุ่มที่สร้างจากพหุนาม  $1 + x + x^4$

การกำเนิดสัญญาณกิ่งส้มจากพหุนาม  $1 + x + x^4$  โดยแสดงวงจรได้ดังรูปที่ 3.7 จากวงจรซีพรีจิสเตอร์ใช้ D ฟลิปฟลอปมีจำนวนเท่ากับลำดับของพหุนามคือ 4 ตัว อินพุตของวงจรได้จากการป้อนกลับของการ เอ็กคูซีฟออกันระหว่าง  $Q_1$  และ  $Q_4$  ถ้าให้ค่าเริ่มต้นของรีจิสเตอร์ทุกตัวเท่ากับ 1 แล้วแสดงค่าเอาต์พุตของ ฟลิปฟลอปแต่ละตัวต่อเวลาต่าง ๆ ได้ในตาราง

เวลา	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$
$t_0$	1	1	1	1
$t_1$	0	1	1	1
$t_2$	1	0	1	1
$t_3$	0	1	0	1
$t_4$	1	0	1	0
$t_5$	1	1	0	1
$t_6$	0	1	1	0
$t_7$	0	0	1	1
$t_8$	1	0	0	1
$t_9$	0	1	0	0
$t_{10}$	0	0	1	0
$t_{11}$	0	0	0	1
$t_{12}$	1	0	0	0
$t_{13}$	1	1	0	0
$t_{14}$	1	1	1	0
$t_{15}$	1	1	1	1
$t_{16}$	0	1	1	1

ถ้าหากนำเอาต์พุต  $Q_4$  ไปใช้งานค่าซีควนเอาต์พุตที่เวลา  $t_0-t_{14}$  คือ

1111 0101 1001 000

และเมื่อเวลา  $t_{15}-t_{31}$  ซีควนจะมีรูปแบบเช่นเดียวกับเวลา  $t_0-t_{14}$  หรือมีการซ้ำรูปแบบทุก ๆ 15 บิต สำหรับขนาด ซีควนสูงสุดของวงจรกำเนิดสัญญาณกิ่งแรนดัมที่ออกแบบจากพหุนามปฐมฐานลำดับ  $n$  มีขนาด  $2^{n-1}$  โดย จำนวนบิต '1' ในซีควนเท่ากับ  $2^{n-1}/2$  และจำนวนบิต '0' เท่ากับ  $2^{n-1}-1/2$  หรือถ้าหาก  $n$  มีลำดับสูง ๆ แล้วจะถือได้ว่าการเกิดของบิต '0' จะเท่ากับการเกิดบิต '1' หรือมีคุณสมบัติสมมาตร

### 3.5 การสร้างสัญญาณกึ่งสุ่มแบบอลวน

รูปแบบสัญญาณกึ่งสุ่มแบบอลวน(Pseudo chaotic signal) สามารถสร้างจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนแบบต่างๆ ได้ตัวอย่างเช่นฟังก์ชันอลวนแบบ saw tooth แสดงได้

$$x_{n+1} = 2x_n \text{ mod } 1$$

ซึ่งผลของ  $x_{n+1}$  จะเสมือนผลของสมการแปลงฟังก์ชัน saw tooth ที่แสดงได้

$$s(x) = \text{Frac}(2x) \quad (3.16)$$

โดยผลของสมการแสดงได้ในรูปจุดทศนิยม

$$x = a_1 2^{-1} + a_2 2^{-2} + a_3 2^{-3} + a_4 2^{-4} \quad (3.17)$$

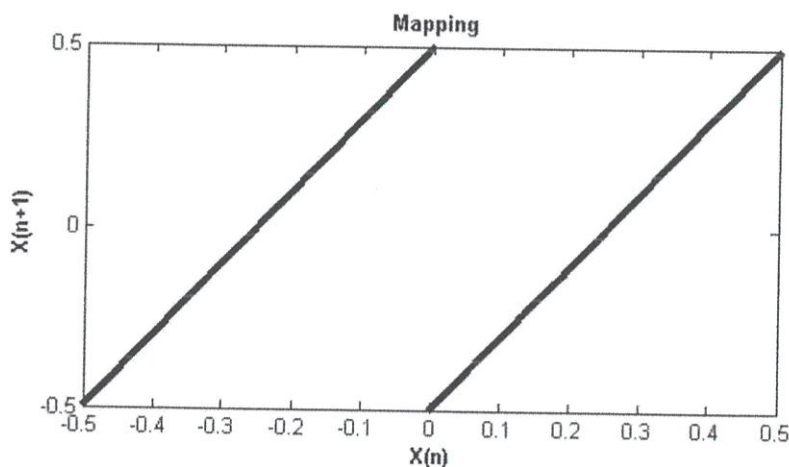
จากซีเควนวงจรถูกกำหนดสัญญาณกึ่งแรนดัม(1) เขียนอยู่ในรูปของจำนวนตักยะในจำนวนทศนิยมได้

$$0.111101011001000$$

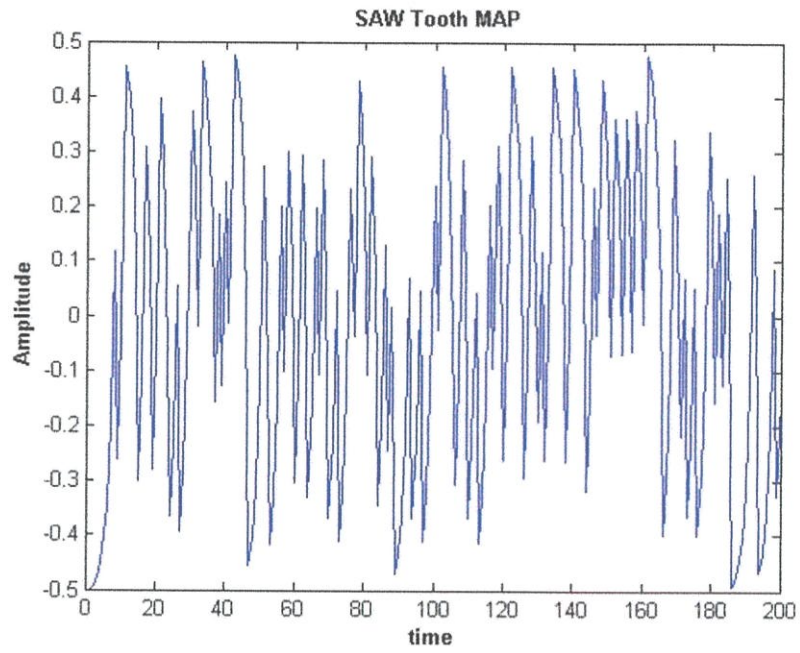
การเลื่อนออกจาก  $Q_4$  ไป 1 บิตซึ่งสอดคล้องกับสมการ (3.16) ทำให้การสร้างสัญญาณอลวนเชิงท่อนสามารถสร้างได้จากเอาต์พุตของฟังก์ชัน saw tooth โดยการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกแสดงได้ดังรูป



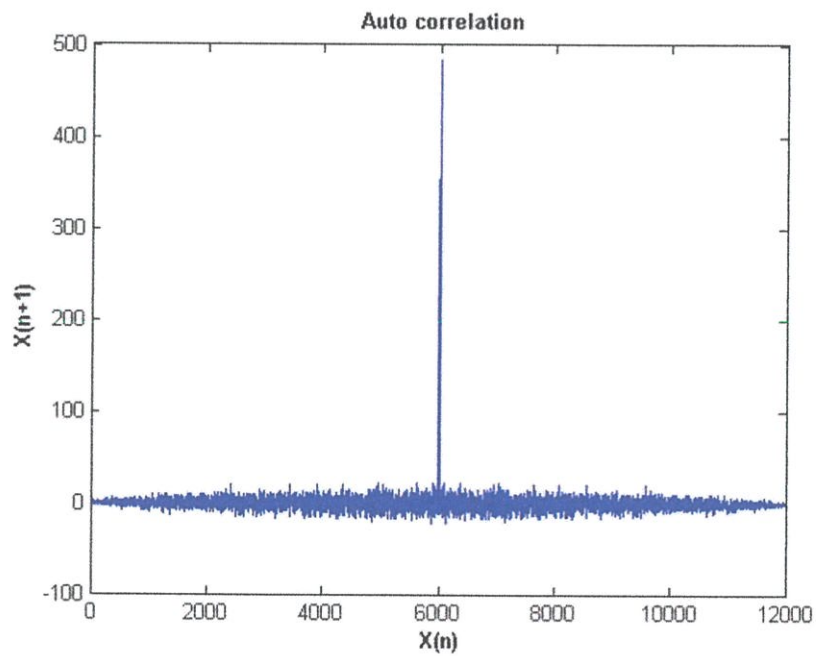
รูปที่ 3.11 ระบบการสร้างสัญญาณอลวนเชิงท่อนจากฟังก์ชัน saw tooth



รูปที่ 3.12 Saw tooth map



รูปที่ 3.13 สัญญาณกิ่งส้มแบบอลวนจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนแบบ Saw tooth



รูปที่ 3.14 ค่า autocorrelation จำนวน 6,000 จุดของสัญญาณเชิงท่อนแบบ saw tooth

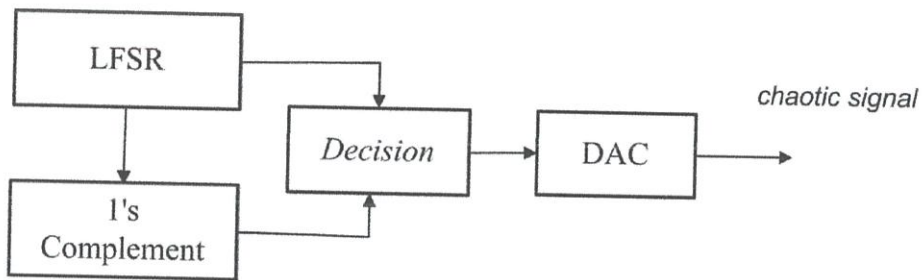
การสร้างสัญญาณกึ่งสุ่มแบบอลวนจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนจากฟังก์ชันอลวนแบบ tent ที่แสดงฟังก์ชันได้

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n \dots \dots & \text{if } x_n < \frac{1}{2} \\ 2(1 - x_n) \dots \dots & \text{if } x_n \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.18)$$

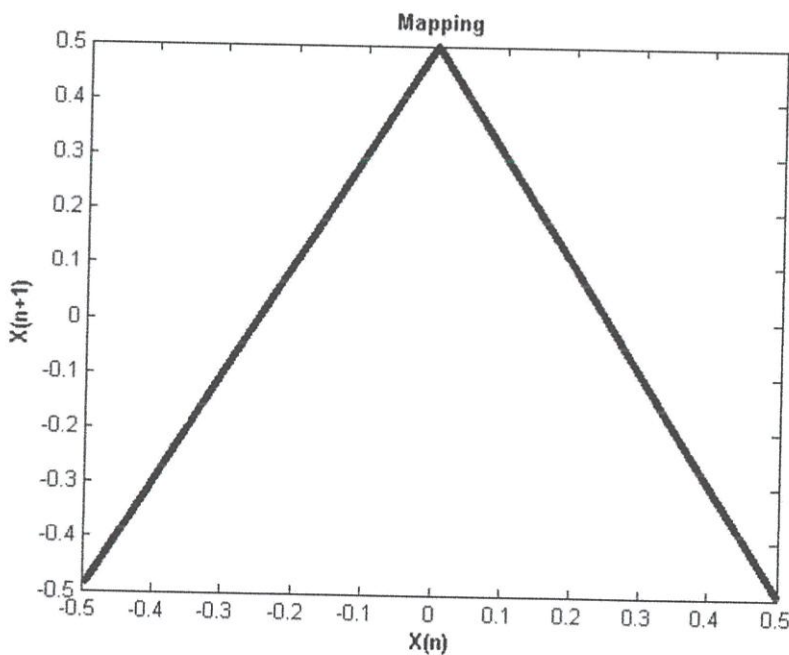
แปลง  $2(1 - x_n)$  เป็น  $2 - 2x_n = 1 - (2x_n - 1)$  หรือการดำเนินการภายใต้มอดุโลได้  $1 - (2x_n \text{ mod } 1)$  ดังนั้นสมการ() เขียนได้เป็น

$$x_{n+1} = \begin{cases} 2x_n \text{ mod } 1 \dots \dots & \text{if } x_n < \frac{1}{2} \\ 1 - (2x_n \text{ mod } 1) \dots \dots & \text{if } x_n \geq \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.19)$$

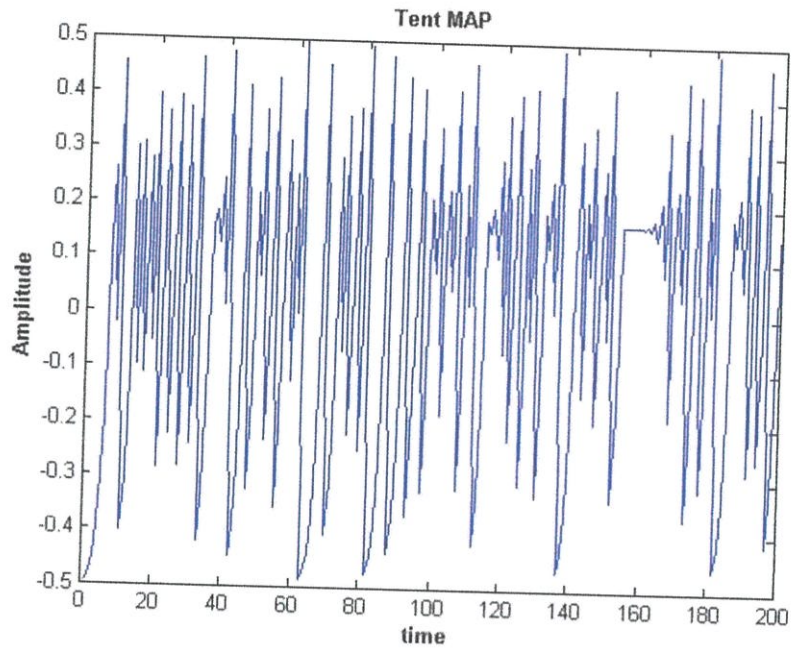
เทอม  $1 - (2x_n \text{ mod } 1)$  ในทางปฏิบัติสามารถแทนได้ด้วยการทำ 1 complement ซึ่งโครงสร้างวงจรสร้างสัญญาณกึ่งสุ่มแบบอลวนจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนจากฟังก์ชันอลวนแบบ tent แสดงได้ดังรูป



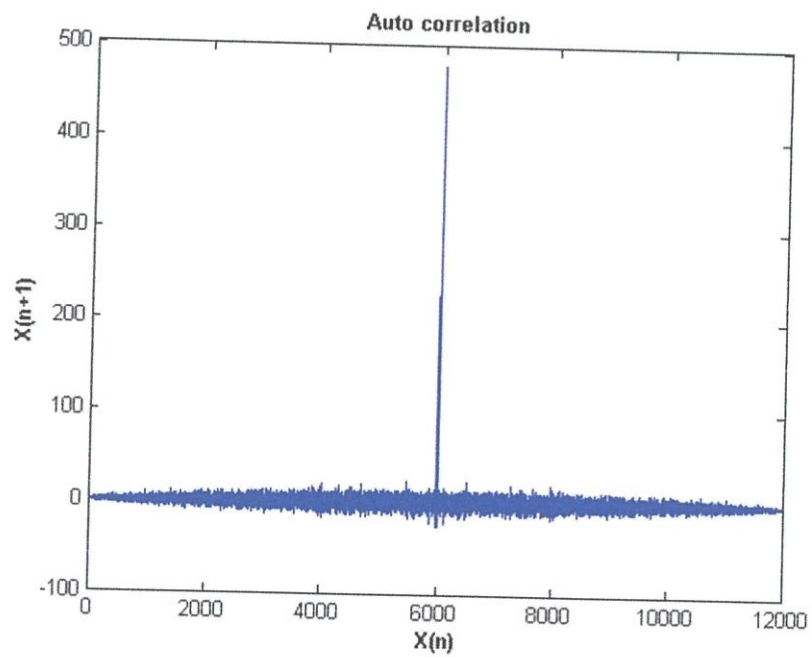
รูปที่ 3.15 ระบบการสร้างสัญญาณอลวนเชิงท่อนจากฟังก์ชัน Tent



รูปที่ 3.16 Tent map



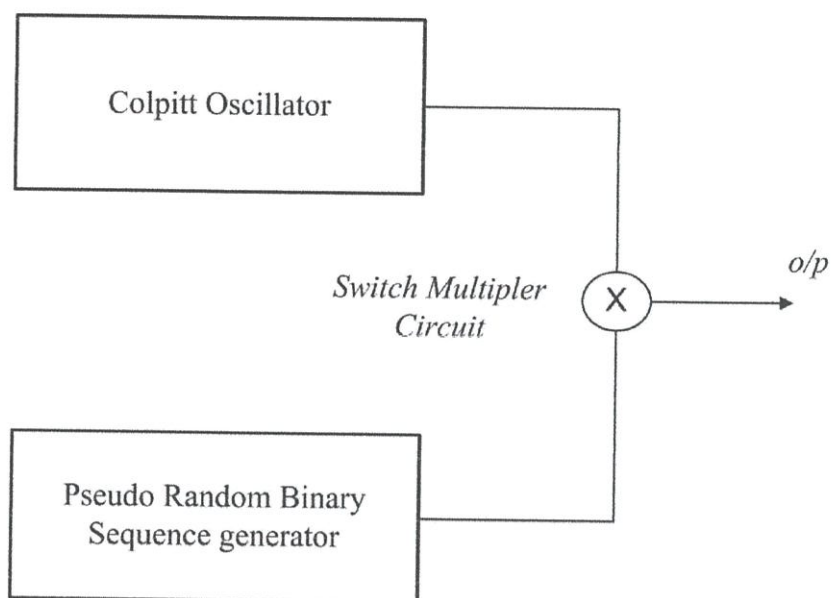
รูปที่ 3.17 สัญญาณกึ่งสุ่มแบบอลวนจากฟังก์ชันอลวนแบบเชิงท่อนแบบ Tent



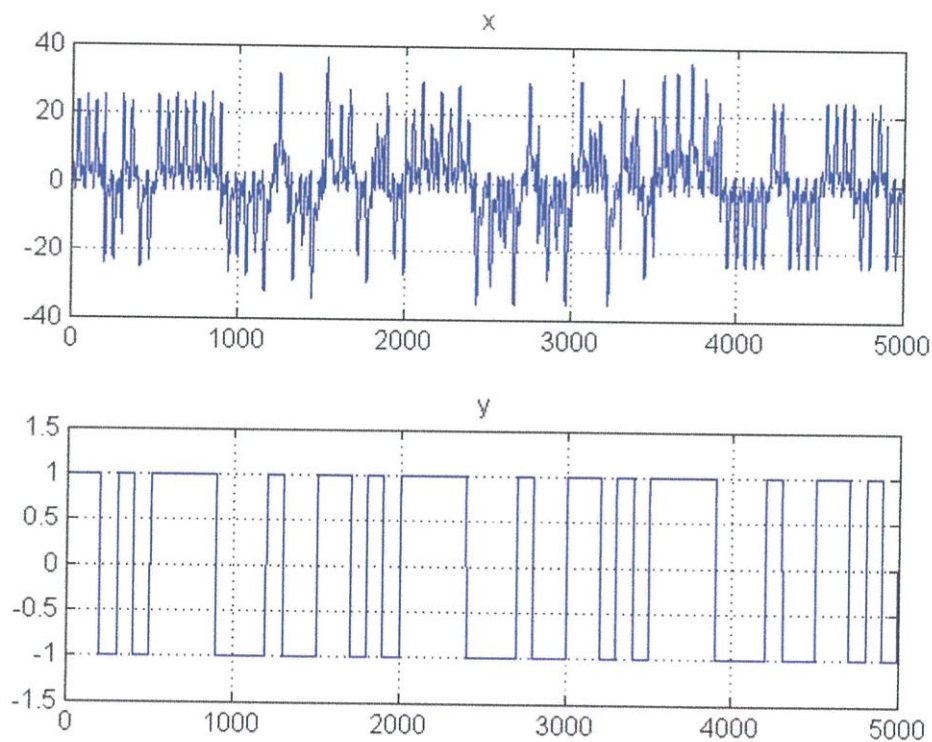
รูปที่ 3.18 ค่า autocorrelation จำนวน 6,000 จุดของสัญญาณเชิงท่อนแบบ Tent

### 3.6 การสร้างสัญญาณอลวนแบบสองปีกที่ความถี่สูง

การสร้างสัญญาณอลวนจาก วงจร Colpitts ให้เป็นสองปีกกระทำได้ โดยการใช้สัญญาณกึ่งสุ่มทำการสวิตซ์ให้เป็นสองระดับแสดงได้โดยบล็อกไดอะแกรมโดยการคูณเป็นการคูณแบบสวิตซ์



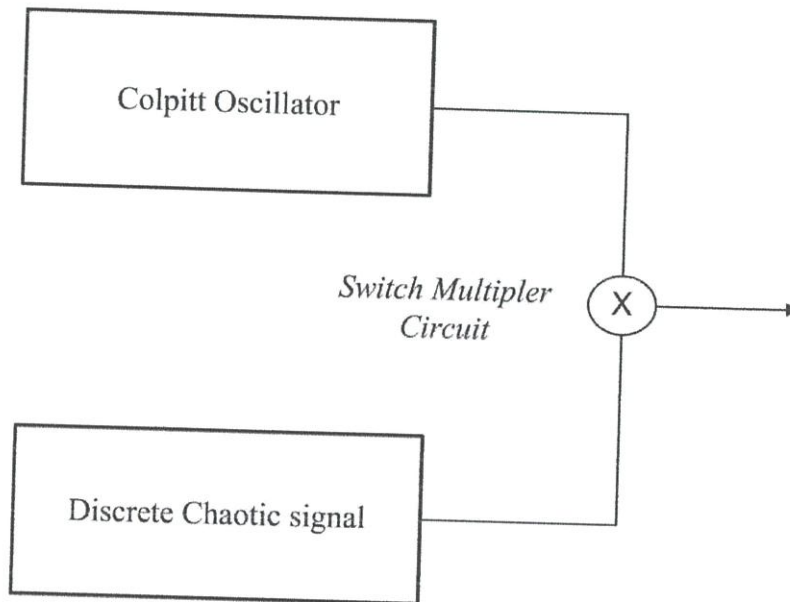
รูปที่ 3.19 การสร้างสัญญาณอลวนแบบสองปีกที่ความถี่สูง



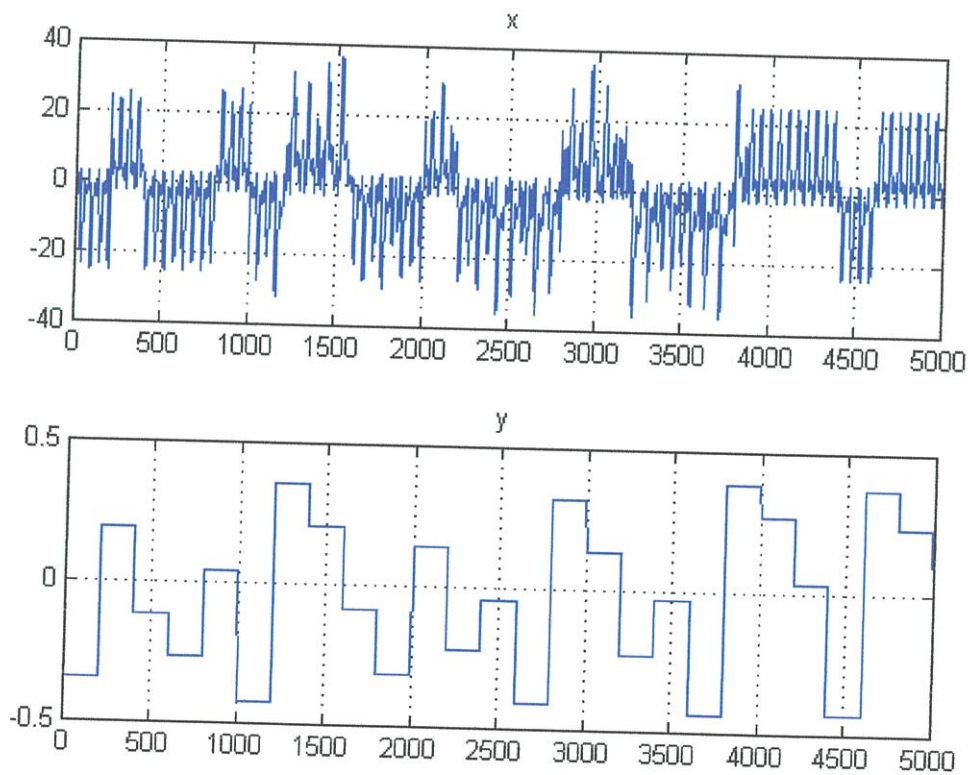
รูปที่ 3.20 ผลการจำลองการสร้างสัญญาณอลวนแบบสองปีกที่ความถี่สูง

### 3.7 การสร้างสัญญาณอลวนแบบผสม

เป็นการสร้างสัญญาณที่เพิ่มความซับซ้อนจากวงจร Colpitts โดยใช้สัญญาณสัญญาณอลวนเชิงท่อนจากฟังก์ชัน Tent คูณแบบสวิตช์แสดงได้ดังรูป



รูปที่ 3.21 การสร้างสัญญาณอลวนแบบผสม

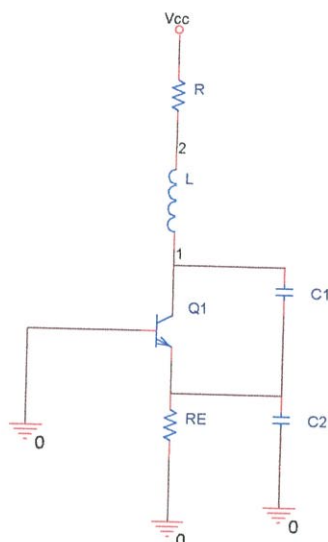


รูปที่ 3.22 ผลการจำลองการสร้างสัญญาณอลวนแบบผสม

## บทที่ 4

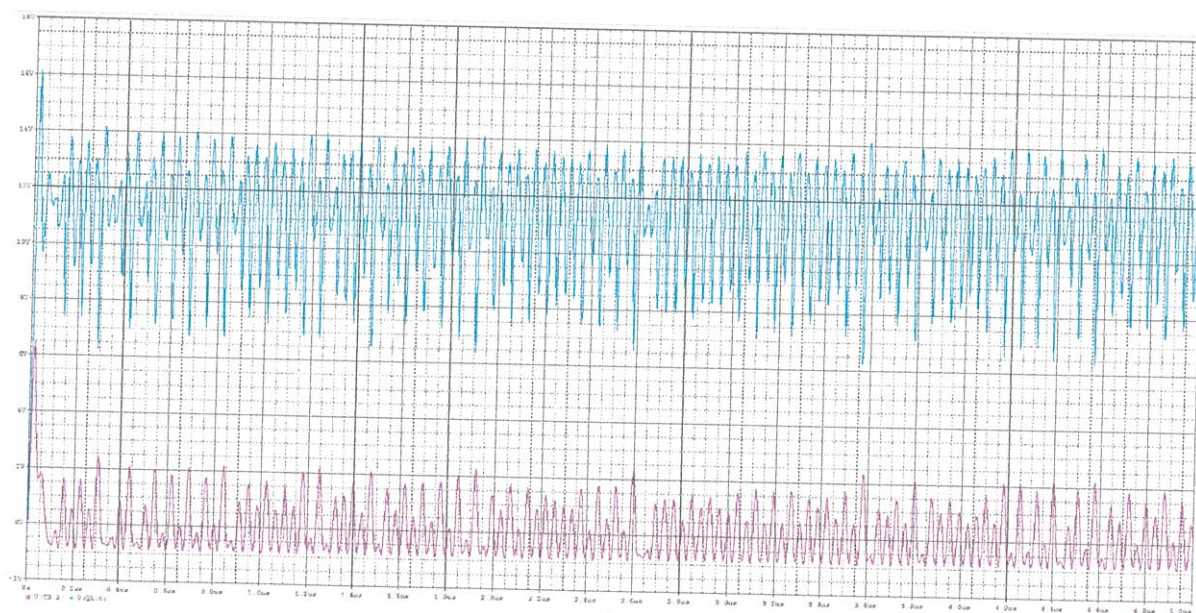
### ผลการทดลอง

วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts ในทางปฏิบัติทดลองสำหรับกำเนิดความถี่ย่าน HF โดยใช้ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N3866



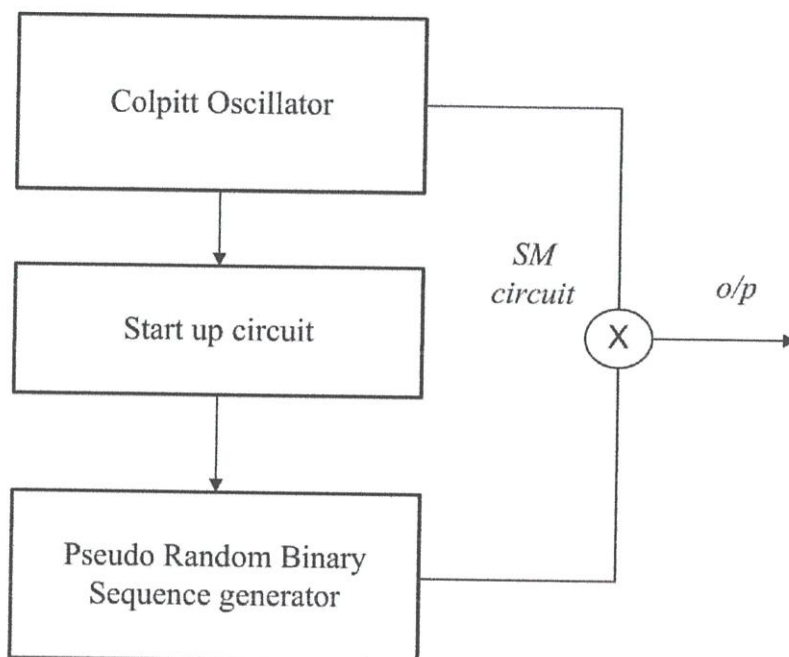
รูปที่ 4.1 วงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitts ในทางปฏิบัติ

โดยมีแรงดัน  $V_{cc} = 24V$ ,  $C_1 = C_2 = 120PF$ ,  $L = 0.5\mu H$ ,  $R = 50\Omega$ ,  $RE = 820\Omega$   
แสดงผลการจำลองสัญญาณที่  $V_{c1}$ ,  $V_{c2}$  ได้



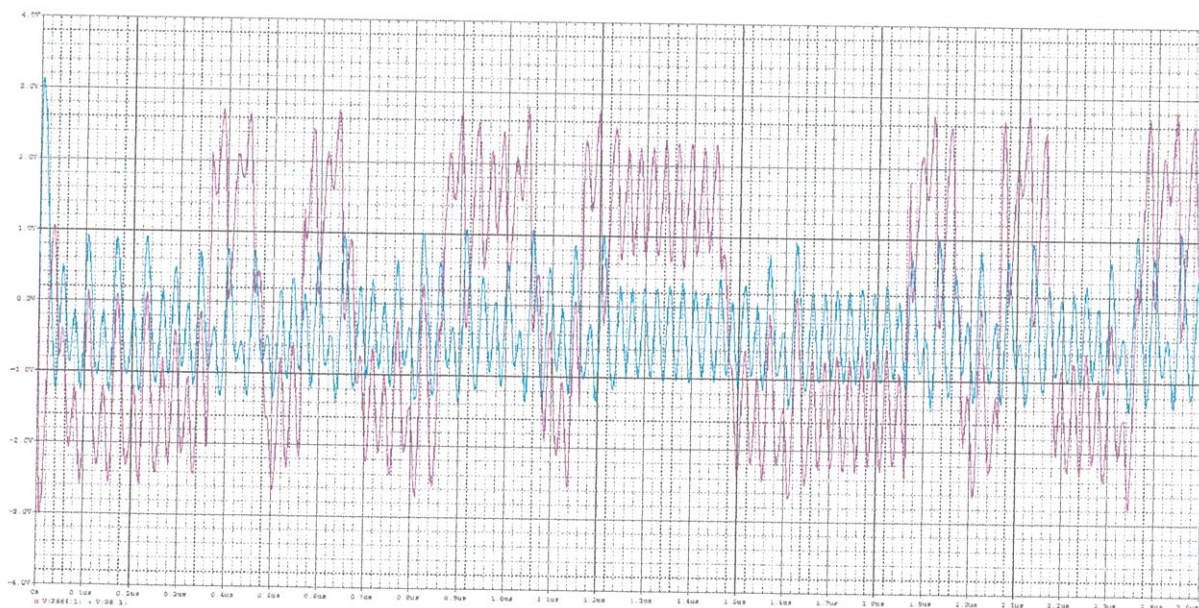
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองวงจรกำเนิดสัญญาณแบบ Colpitt ในทางปฏิบัติ

สำหรับการจัดสิทธิบัตรแบบที่ 1 แสดงส่วนที่เปิดสำหรับรายงานโดยโครงสร้างพอสั่งเซปได้ดังนี้

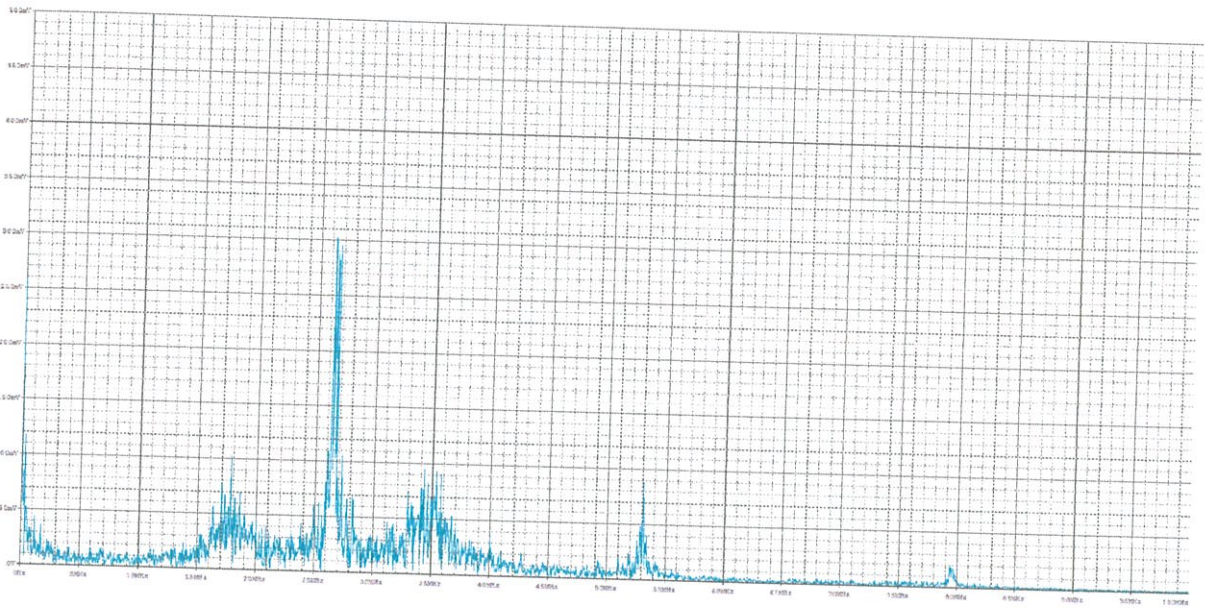


รูปที่ 4.3 โครงสร้างวงจรลอจิกความถี่สูงแบบสองปีก

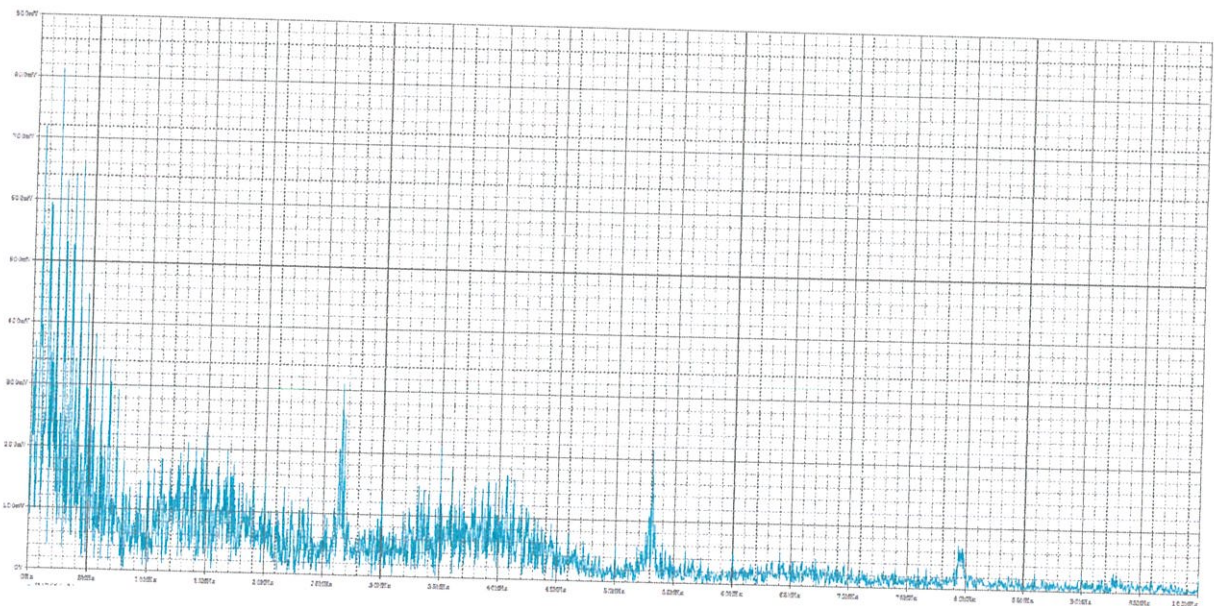
โดยในสิทธิบัตรใช้เทคนิคการคูณแบบสวิตช์เพื่อสร้างสัญญาณให้เป็นสองปีหรือมากกว่าแล้วยังใช้วงจรกำหนดค่าเริ่มต้นที่ทำให้วงจรสร้างสัญญาณกิ่งสุมทำการผลิตสัญญาณให้มีเงื่อนไขเริ่มต้นที่ขึ้นอยู่กับวงกำเนิดสัญญาณ Colpitt ด้วย



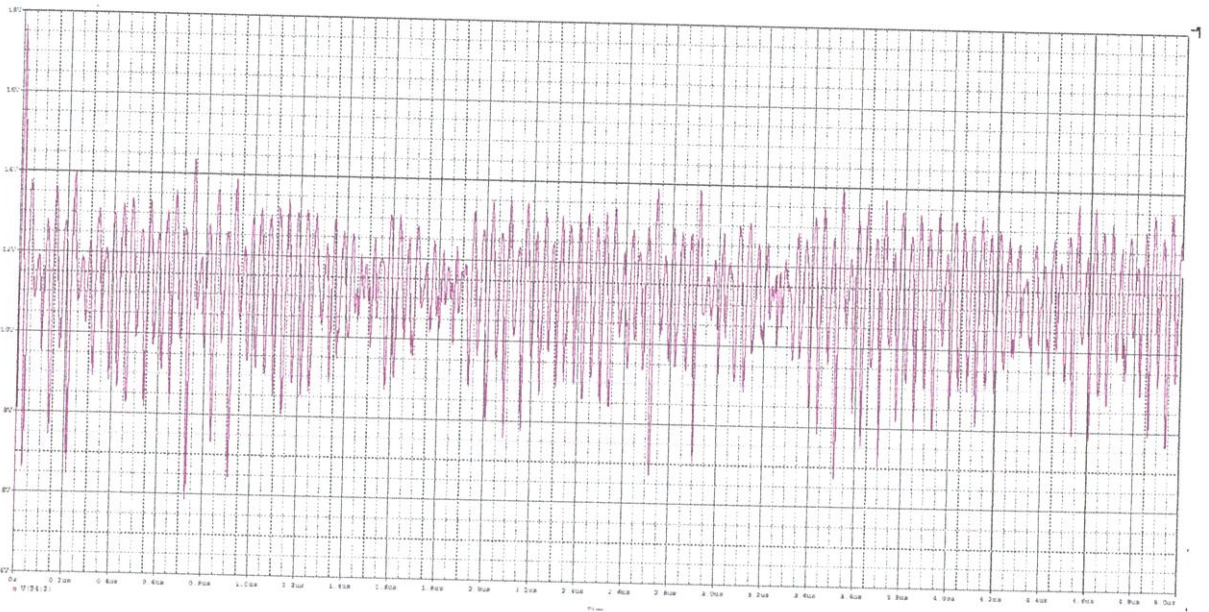
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองสัญญาณจากวงจรลอจิกความถี่สูงแบบสองปีก



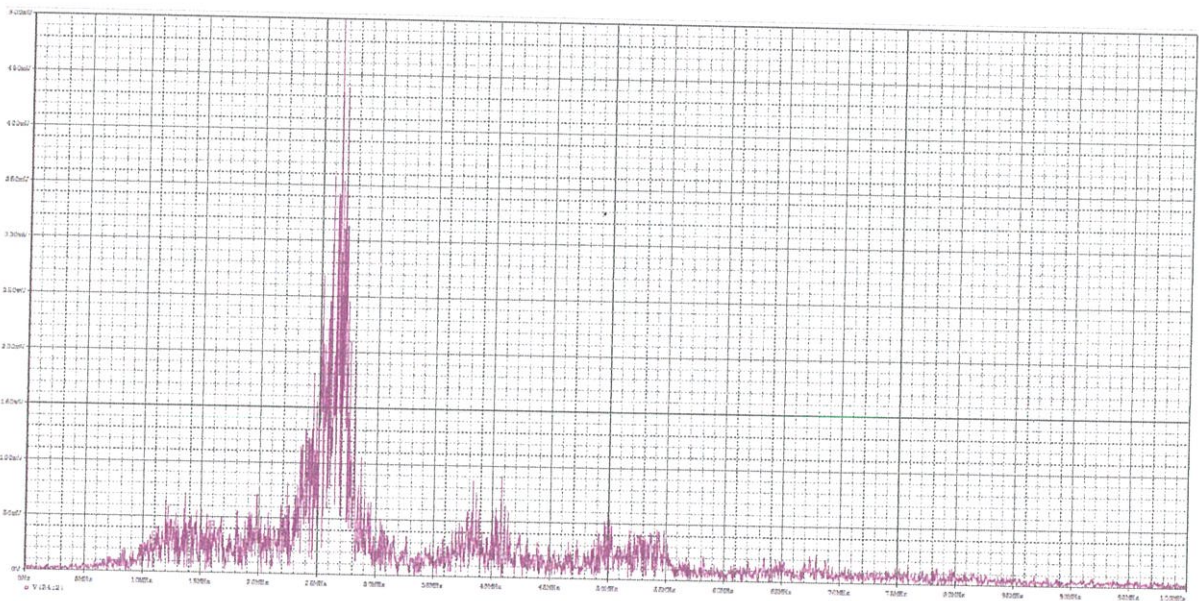
รูปที่ 4.5 แถบความถี่จากผลการจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ Colpitt



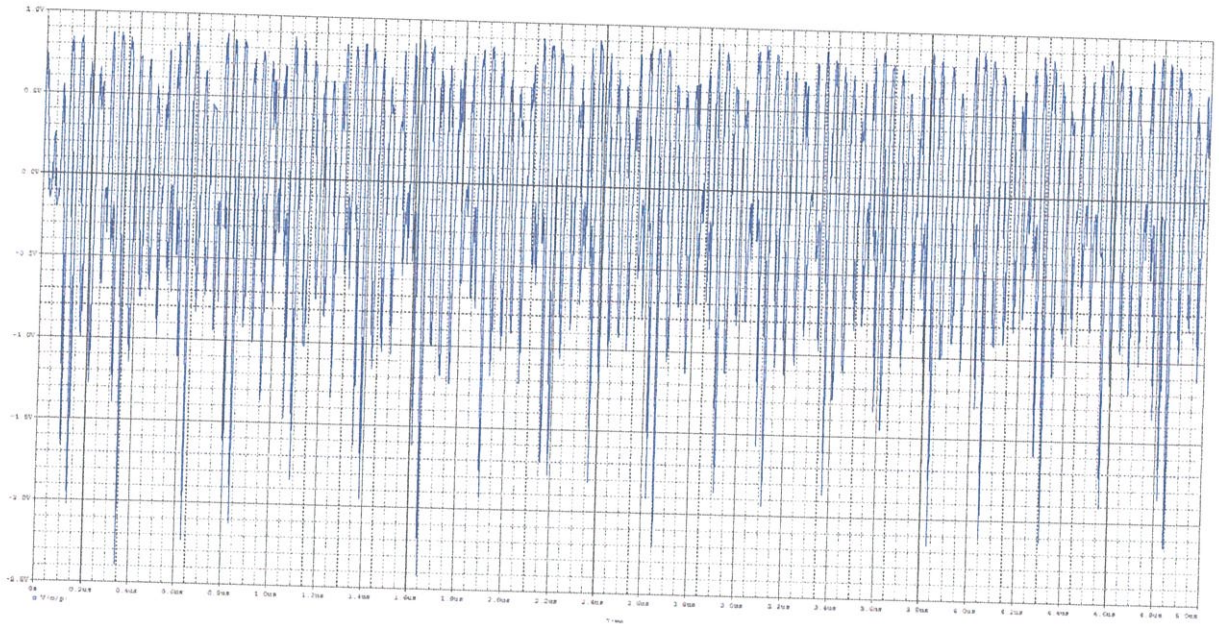
รูปที่ 4.6 แถบความถี่จากผลการจำลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบสองปีก



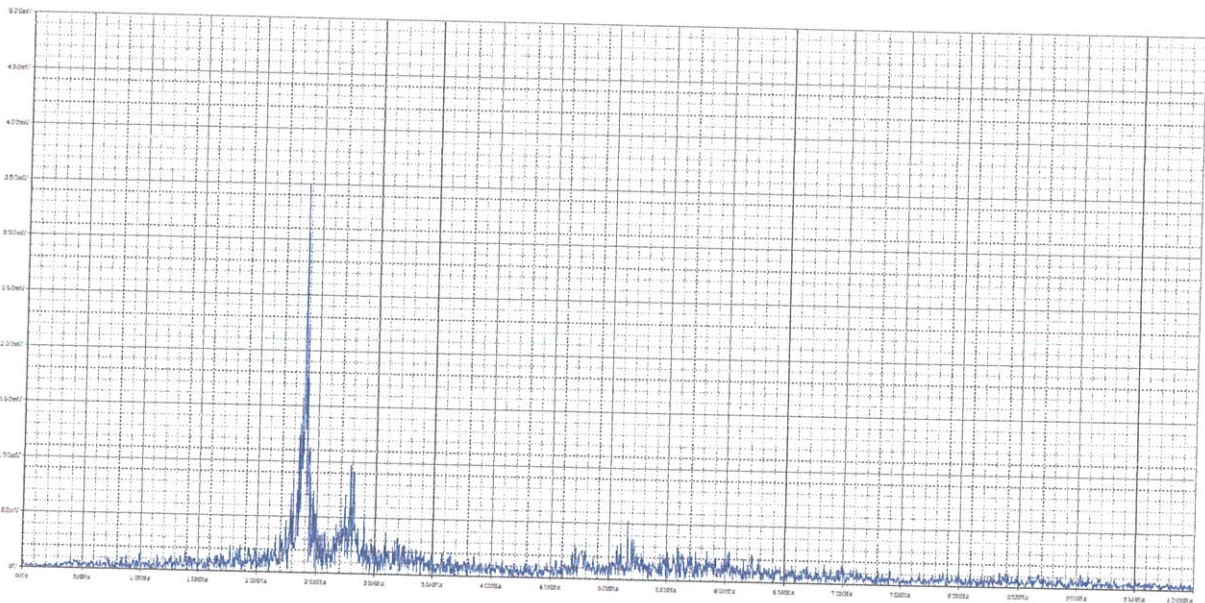
รูปที่ 4.7 ผลการจำลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitt แบบเชิงเส้น



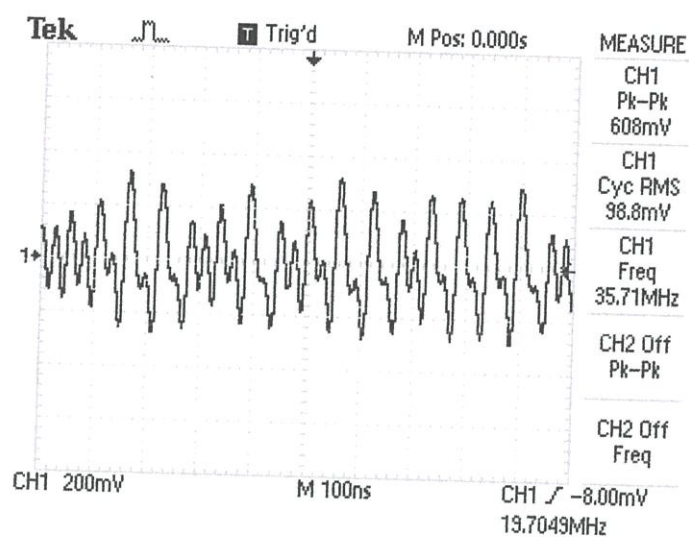
รูปที่ 4.8 แถบความถี่จากผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitt แบบเชิงเส้น



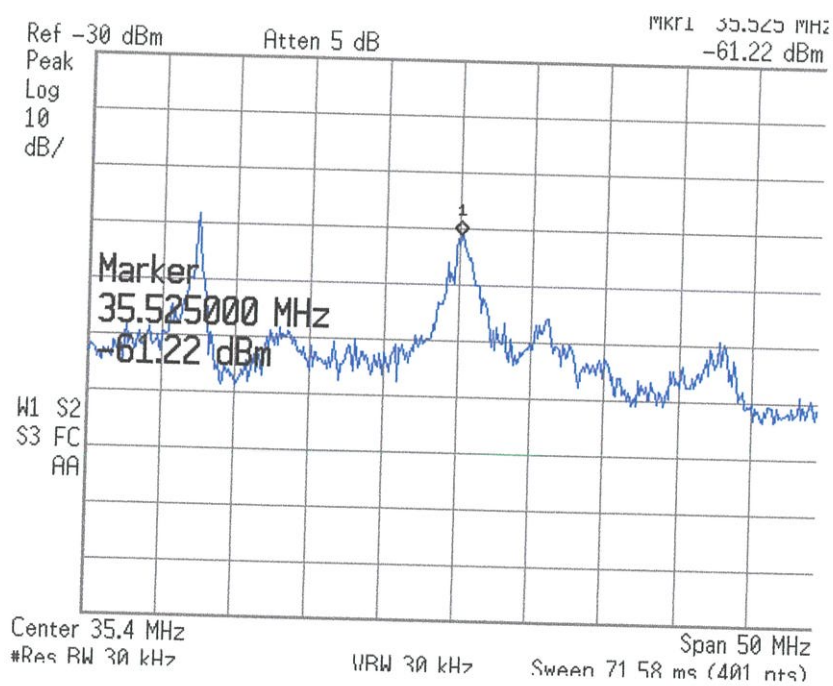
รูปที่ 4.9 ผลการจำลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitt แบบไม่เป็นเชิงเส้น



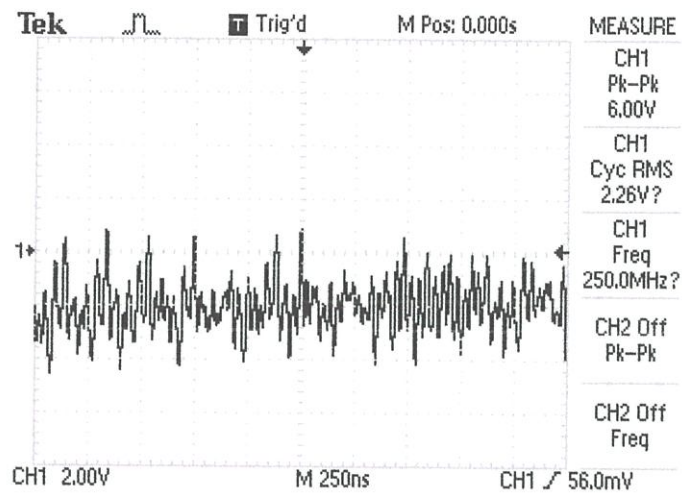
รูปที่ 4.10 แถบความถี่จากผลการจำลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitt แบบไม่เป็นเชิงเส้น



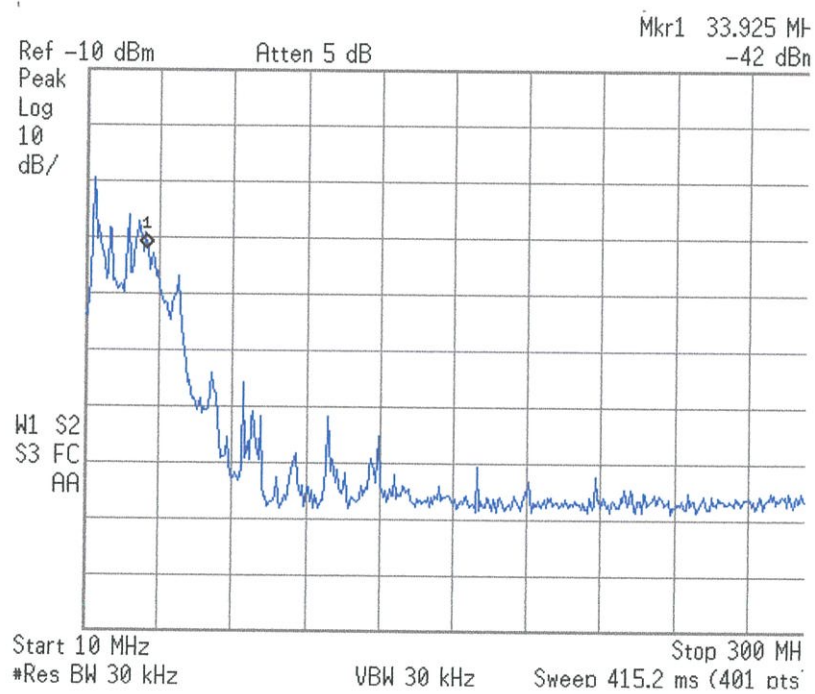
รูปที่ 4.11 ผลการทดลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ Colpitts



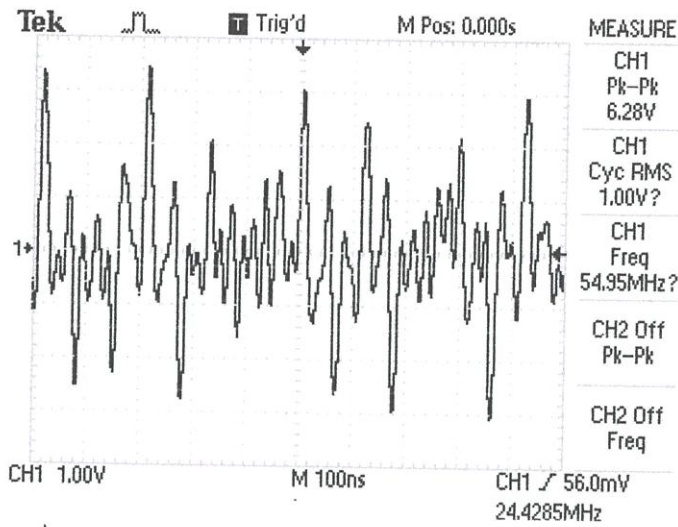
รูปที่ 4.12 แถบความถี่จากผลการทดลองวงจรออสซิลเลเตอร์แบบ Colpitts



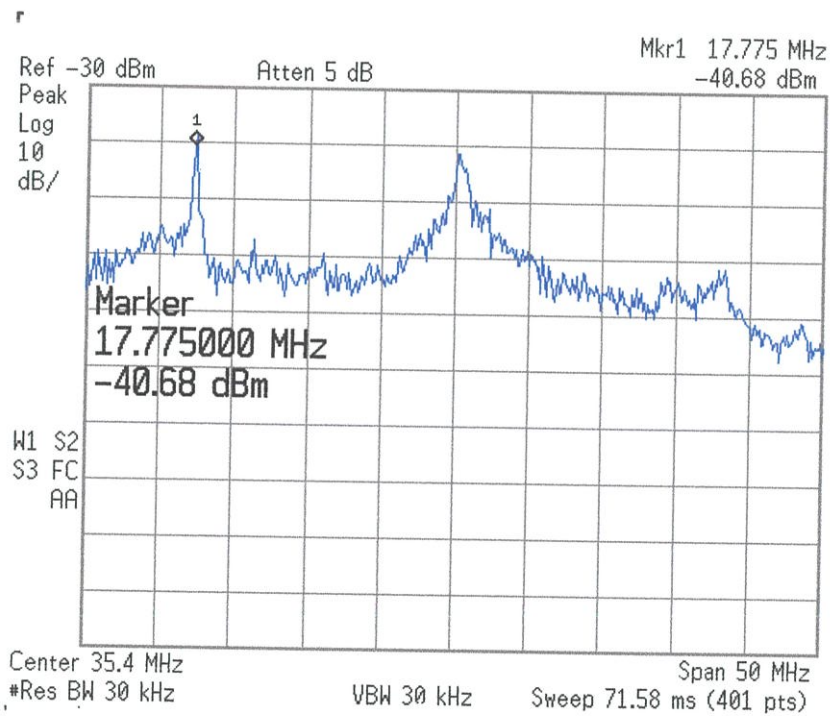
รูปที่ 4.13 ผลการทดลองวงจรออสซิลเลชันความถี่สูงแบบสองปีก



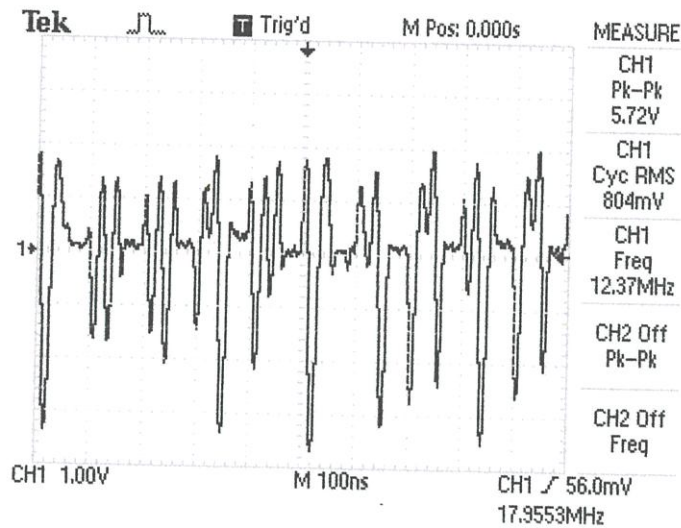
รูปที่ 4.14 แถบความถี่จากผลการทดลองวงจรออสซิลเลชันความถี่สูงแบบสองปีก



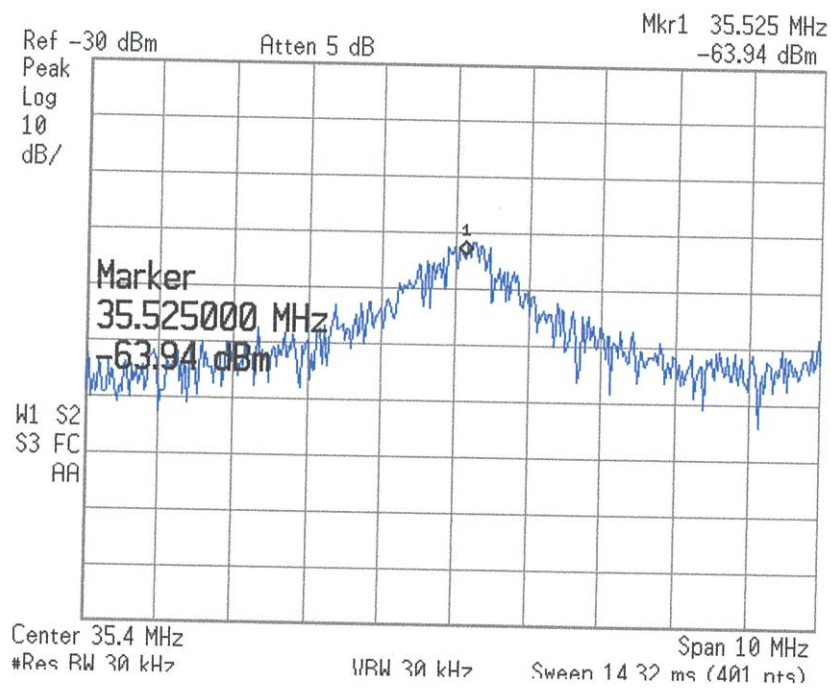
รูปที่ 4.15 ผลการทดลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบเชิงเส้น



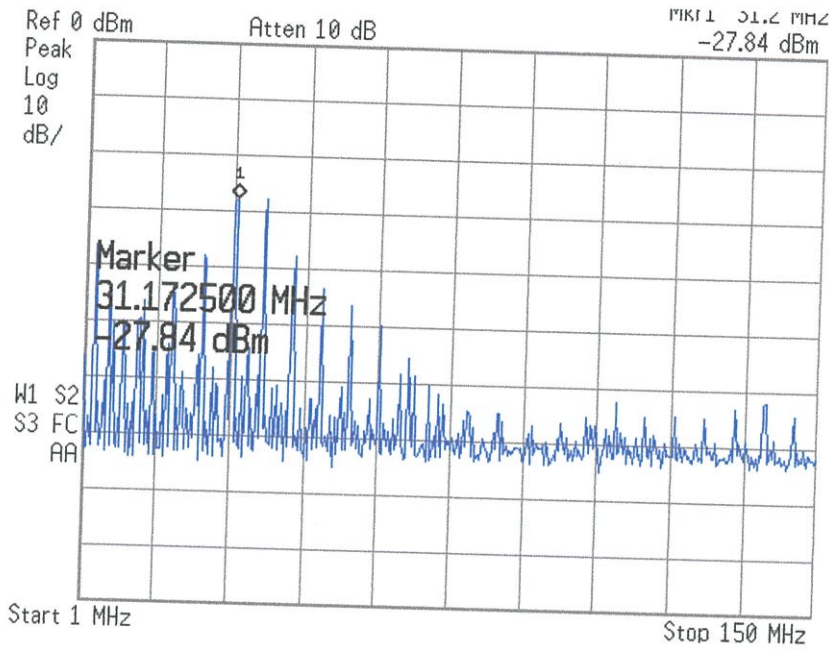
รูปที่ 4.16 แถบความถี่จากผลการทดลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบเชิงเส้น



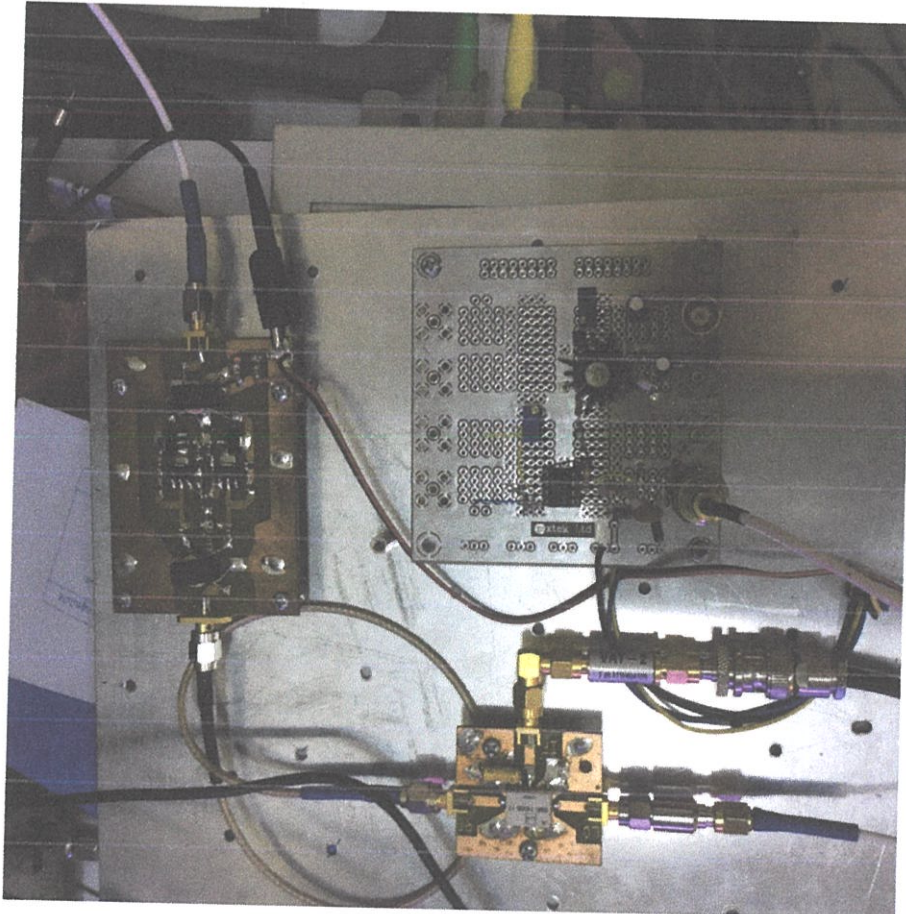
รูปที่ 4.17 ผลการทดลองของสัญญาณจากการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบไม่เป็นเชิงเส้น



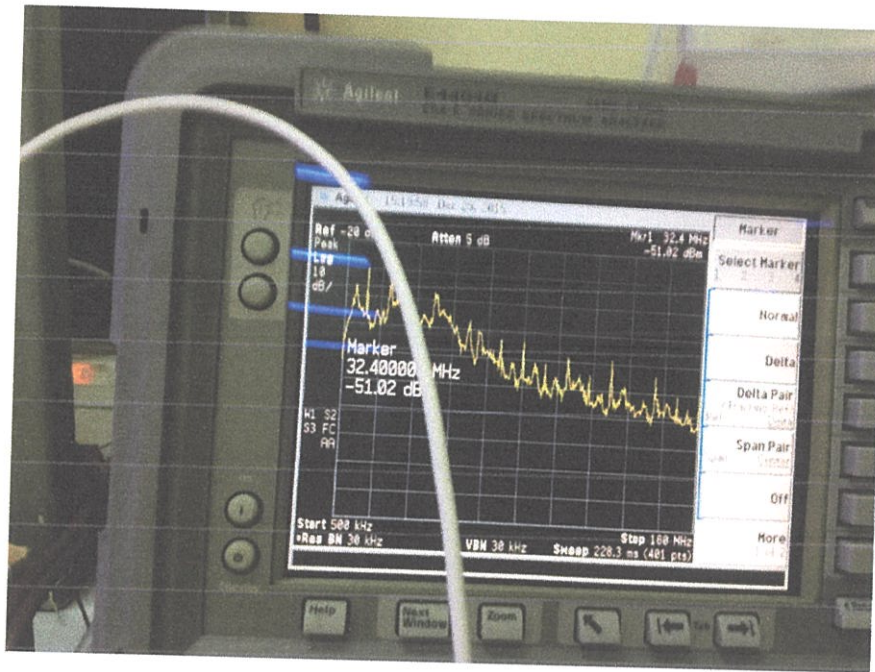
รูปที่ 4.18 แถบความถี่จากผลการทดลองการเชื่อมต่อวงจร Colpitts แบบไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 4.19 แถบความถี่จากผลการทดลองการสร้างสัญญาณออสซิลเลชันแบบผสม



รูปที่ 4.20 ต้นแบบระบบที่ทดลอง



## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้แสดงการวางจรรยาบรรณสัญญาณอลวนที่ความถี่สูงเพื่อจัดสิทธิบัตรสำหรับใช้เป็นวงจรกำเนิดสัญญาณในระบบสื่อสารแบบปลอดภัยรวมทั้งสามารถใช้เป็นระบบกวนสัญญาณ การทำงานออกแบบจากตัวต้นแบบวงจรถอบแบบ Colpitts ที่ร่วมกับวงจรอื่นๆ โดยการเปิดเผยเฉพาะงานวิจัยและผลบางส่วนเพราะระหว่างจัดสิทธิบัตร รวมทั้งจุดมุ่งหมายในอนาคตใช้เป็นต้นแบบสำหรับการสื่อสารปลอดภัยสำหรับความมั่นคงของรัฐ

ทั้งตัวต้นแบบวงจรถอบสามารถกำเนิดสัญญาณโดยขึ้นอยู่กับขนาดของขอบจำกัดของอุปกรณ์ที่ซึ่งโครงสร้างทำงานได้ในระดับความถี่ GHz

### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในอนาคตพัฒนาระบบสื่อสารมั่นคงปลอดภัยโดยวงจรกำเนิดสัญญาณอลวนที่พัฒนาขึ้น

## เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Stavroulakis, *Chaos Applications in Telecommunications*. CRC Press, 2006.
- [2] W. Perruquetti and J. P. Barbot, *Chaos in Automatic Control*, CRC Press, 2005.
- [3] G. Chen and T. Ueta, *Chaos in Circuits and Systems*, World Scientific, Singapore, 2002.
- [4] P. Sooraska and K. Klomkarn, "No-CPU Chaotic Robots: From Classroom to Commerce," *IEEE Circuits and Systems Mag*, vol.10, pp. 46 – 53, First Quarter 2010.
- [5] M.E. Yalcin, "True Random Bit Generation from a Double-Scroll Attractor," *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, vol. 51, no. 7, pp. 1395-1404, 2004.
- [6] Z. Zhang and G. Chen, "Chaotic liquid shaker: design, implement and application," *Int. J Bifurcat. Chaos*, vol. 17, pp. 4443–4451, 2007.
- [7] A. Abel and W. Schwarz, "Chaos communications-principles, schemes, and system analysis," *Proc. of the IEEE*, vol.90, no.5, pp. 691-710, 2002.
- [8] G.M Maggio, N. Rulkov and L. Reggiani, "Pseudo-chaotic time hopping for UWB impulse radio," *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol.48, no.12, pp.1424-1435, 2001.
- [9] Z. Liu, X. ZHU, W. Hu and F. Jiang, "Principles of chaotic signal radars," *Int. J of Bifurcat. Chaos*, vol. 17, no.5, pp. 1735-1739, 2007.
- [10] S. Christopher and P Young, "Implementing RF broadband chaotic oscillators: design issues and results," *Proc. of the 1998 IEEE Int. Symp. on Circuit and system*, vol.4, pp.489-493, 1998.
- [11] J. Guckenheimer and P. Holmes, *Nonlinear Oscillations, Dynamical Systems, and Bifurcations of Vector Fields*, Springer-Verlag, 1983.
- [12] A. S. Elwakil and M. P. Kennedy, "High frequency wien-type chaotic oscillator," *Electron. Lett.*, vol. 34, pp.1161-1162, 1998.
- [13] G. Mykolaitis, A. Tamasevicius and S. Bumeliene, "Experimental demonstration of chaos from Colpitts oscillator in VHF and UHF ranges," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 4, pp. 91-92, 2004.
- [14] A. Tamaševičius, S. Bumelien and E. Lindberg, "Improved chaotic Colpitts oscillator for ultrahigh frequencies," *Electron. Lett.* vol.40, no.25, pp.1569-1570, 2004.
- [15] A. Čenys, A.Tamaševičius, A. Baziliauskas, R. Krivickas and E.Lindberg, "Hyperchaos in coupled Colpitts oscillators," *Chaos, Solitons and Fractals*, vol.17 no.2, pp. 349-353, 2003.
- [16] G. Anagnostopoulos, N. Kalkan, "Very high and ultrahigh frequency hyperchaotic oscillators with delay line," *Chaos Solitons Fractals* 17, pp. 343-347, 2003.
- [17] L. Illing and D. J. Gauthier, "Ultra-high-frequency chaos in a time-delay electronic device with band-limited feedback," *Chaos* 16, no.3, 033119, 2006.
- [18] J.N. Blakely, J.D. Holder, N.J. Corron and S.D. Pethel, "Simply folded band chaos in a VHF microstrip oscillator," *Phys. Lett. A* 346(1-3), pp. 111-114, 2005.

- [19] J. Kawata , Y. Nishio and A. Ushida “Analysis of Chua's circuit with transmission line,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Fundam. Theory Appl.*, vol. 44, no. 6, pp. 556 -558, 1997.
- [20] I. Abdomerovic, A.G. Lozowski, and P.B. Aronhime, “High-frequency Chua's circuit,” *Proc. of the 43rd IEEE Midwest*, pp. 1026-1028, 2000.
- [21] J.N. Blakely, M.B. Eskridge and N. J. Corron, “A simple Lorenz circuit and its radio frequency implementation,” *Chaos* 17, no.2, 023112, 2007.
- [22] EP 0556819 B1, Apparatus and method for generating chaotic signals, 17 Jan. 2001.
- [23] EP 1304824 B1, Method for transmitting data by means of chaotic signals, 26 July 2007.
- [24] US 6127899 A, High frequency anharmonic oscillator for the generation of broadband deterministic noise, 3 Oct. 2000.
- [25] US 7215772 B2, Method and apparatus for remote digital key generation, 8 May 2007.
- [26] US 7245723 B2, Chaotic communication system and method using modulation of nonreactive circuit elements, 17 July 2007.
- [27] US 7463103 B2, Chaotic signal generator for ultra wide band communication system, 9 July 2008.
- [28] US 7642870 B2, Device and method for generating an adjustable chaotic signal, 5 Jan. 2010.
- [29] US 7786815 B2, Apparatus and method for generation of noise signal, 31 Aug. 2010.
- [30] US 7795983 B1, Chaotic signal enabled low probability intercept communication, 14 Sep. 2010.
- [31] US 7830213 B2, Signal generator, signal generation method, and RF communication system using the same, 9 Nov. 2010.
- [32] US 7830214 B2, Adjustable chaotic signal generator using pulse modulation for ultra wideband (UWB) communications and chaotic signal generating method thereof, 9 Nov. 2010.
- [33] US 7945045 B2, Device and method for generating chaotic signal, 17 May 2011.
- [34] US 8005220 B2, RF communication system having a chaotic signal generator and method for generating chaotic signal, 23 Aug. 2011.
- [35] กฤตากร กล่อมการ, วงจรสร้างสัญญาณอววนแบบหลากหลายรูปแบบ, ยื่นจดสิทธิบัตรไทย, 2556.
- [36] A.S. Elwakil, M.P. Kennedy, Inductorless hyperchaos generator, *Microeletr. J.*, 30 ,pp. 739–743, 1999.

ภาคผนวก

สรุปค่าใช้จ่ายการดำเนินงานโครงการวิจัย

รายการ	จำนวนเงิน (บาท)
1. งบบุคลากร	-
2. งบดำเนินงาน	
2.1 ค่าตอบแทน ใช้สอยและวัสดุ	-
2.1.1 ค่าตอบแทน เช่น ค่าอาหารทำการนอกเวลา	-
ค่าตอบแทน ผู้ปฏิบัติงานให้ราชการ ค่าเบี้ยประชุมกรรมการ	-
2.1.2 ค่าใช้สอย เช่น	
1) ค่าจ้างเหมาออกแบบ PCB และทำจัดทำต้นแบบ	10,000
แผงวงจร	
2) ค่าจ้างเหมากัดลายแผ่น PCB และลายวงจร	10,000
3) ค่าจ้างทำกล่องใส่วงจรความถี่สูงป้องกันการรบกวน	
พร้อมทดสอบ	20,000
2.1.3 ค่าวัสดุ เช่น	
1) วัสดุสำนักงาน	
เช่นหมึกพิมพ์ กระดาษพิมพ์	10,000
2) วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ เช่นทรานซิสเตอร์ วงจรรวม	150,000
อุปกรณ์ตัวทานทานและตัวเก็บประจุที่ความถี่สูง	
3) วัสดุเชิงกลเช่น กล่องโลหะ แผ่น PCB ความถี่สูง	100,000
สายส่งความถี่สูง	
4) วัสดุหนังสือ วารสารและตำรา	20,000
5) วัสดุคอมพิวเตอร์	30,000
2.2 ค่าสาธารณูปโภค	-
3. งบลงทุน	
ค่าครุภัณฑ์	-
รวมงบประมาณ	350,000

## ประวัติผู้วิจัย

นายกฤตากร กล่อมการ

ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์

### การศึกษา

อุตสาหกรรมศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์)	สจล.
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (ไฟฟ้า)	สจล.
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต (ไฟฟ้า)	สจล.

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

Information security, Nonlinear electronics

### ผลงานวิจัยตีพิมพ์

1. K. Klomkarn, A. Jansri and P. Sooraksa, "A design of stream cipher based on multi-chaotic functions," *Proc. Int. Symp. IEEE Communications and Information Technology*, pp. 931 – 935, 2004.
2. A. Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Further investigation on trajectory of chaotic guiding signals for robotic systems," *Proc. Int. Symp. IEEE Comm. and Inform. Tech.* 2004, pp.1166 – 1170, 2004.
3. A. Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "On comparison of attractors for chaotic mobile robots," *Proc IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2536 – 2541, 2004, .
4. K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Implement of A true Random Number Generator Using Chen's Attractor," *Proc. Int. Conf. Robot, Vision, Information, and Signal Processing*, pp.781-784, 2005.

### Journal

1. P. Sooraksa and K. Klomkarn, "No-CPU" chaotic robots: from classroom to commerce, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, Vol.10 no.1, p.46-53, 2010.
2. K. Klomkarn, P. Sooraksa and G. Chen, "New Construction of Mixed-Mode Chaotic Circuits," *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, Vol.20 May, pp.1485-1497, 2010.
3. K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Simple Self Instructional Modules Based on Chaotic Oscillator: A Few blocks generate many patterns" *Inter Journal of Bifurcation and Chaos*, May, pp.1469-1491, 2011.

### สิทธิบัตร

P. Sooraksa, K. Klomkarn , AN AUTHENTICATION DEVICE patent application The World Intellectual Property Organization 2006.

กฤดากร กล่อมการ, วิธีการและอุปกรณ์แสดงตนสำหรับไฟล์ (Self authenticating file) เพื่อความมั่นคงของข้อมูล, ยื่นจดสิทธิบัตรไทย อยู่ในระหว่างตรวจสอบ

กฤดากร กล่อมการ, วงจรสร้างสัญญาณอววนแบบหลากหลายรูปแบบ, ยื่นจดสิทธิบัตรไทย, หมายเลขคำขอ 1401000739 พ.ศ. 2557

กฤดากร กล่อมการ, วงจรอววนแบบปีกผีเสื้อที่ความถี่สูง, ร่างสิทธิบัตรเพื่อขอจดสิทธิบัตรไทย

### หนังสือ

กฤดากร กล่อมการ, การสื่อสารข้อมูล, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542

กฤดากร กล่อมการ, วิทยาการรหัสลับเพื่อความมั่นคงปลอดภัยสารสนเทศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2558

### รางวัลงานวิจัย

- 1.งานวิจัยเด่นของ สกว. ปี 51 “การสร้างตัวดึงคู่อววนและการประยุกต์”สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย
2. นวัตกรรมโทรคมนาคมยอดเยี่ยมประเภทต้นแบบโทรคมนาคม (Telecom Prototype) สถาบันวิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมโทรคมนาคม พ.ศ. 2553

### รางวัลวิชาชีพ

- 1.ข้าราชการพลเรือนดีเด่น สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กระทรวงศึกษาธิการ ประจำปี พ.ศ. 2554
2. รางวัลยกย่องเชิดชูเกียรติเป็นผู้ทำคุณประโยชน์ทางการศึกษาระดับจังหวัด พ.ศ. 2555 สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมสวัสดิการและสวัสดิภาพครูและบุคลากรทางการศึกษา