

รายงานการวิจัย

การประยุกต์สัญญาณอลวนเพื่อสร้างความมั่นคงแก่ข้อมูลความลับสำหรับ
ใช้ในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้: เฟสสอง
ความปลอดภัยในการสื่อสารทางโทรศัพท์

Applications of Chaotic Signals for Retaining Confidential Data using in
Three-deep Southern Provinces of Thailand:
Phase II...Secured Phone



ชื่อผู้วิจัย

นายปิติเชต สุรักษา

นายฤตดากร กล่อมการ

นายศักดิ์ดา สาครนันท์

นายเจตน์ ออสวัสดิ์

หนังสือเป็นสมบัติของท่าน

โปรดช่วยกันรักษา

www.lib.kmitl.ac.th

สำนักหอสมุดกลาง โทร. 0 2329 8231

RCH

๑

172.5

.C 45

ก 491

ด. 2

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน.....121353

วัน, เดือน, ปี.....3.08.2555

b. 12400120
i.

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน

ประจำปีงบประมาณ 2554

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2554
สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ (เงินงบประมาณแผ่นดิน/เงินรายได้)

ส่วนที่ 1: ข้อมูลทั่วไป

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การประยุกต์สัญญาณออสตวนเพื่อสร้างความมั่นคงแก่ข้อมูลความลับสำหรับใช้ใน
สามจังหวัดชายแดนภาคใต้: เฟสสอง..ความปลอดภัยในการสื่อสารทางโทรศัพท์

ชื่อโครงการ(ภาษาอังกฤษ) Applications of Chaotic Signals for Retaining Confidential Data using in
Three-deep Southern Provinces of Thailand: Phase II...Secured Phone

ประจำปีงบประมาณ 2554

จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 585,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2553 ถึง 30 กันยายน 2554.....

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัดและ อีเมล

หัวหน้าโครงการ รองศาสตราจารย์ปิติกเขต สุริรักษา

ผู้ร่วมโครงการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤตภากร กล่อมการ

ผู้ช่วยนักวิจัยคนที่ 1 นายศักดา สาครนนท์

ผู้ช่วยนักวิจัยคนที่ 2 นายเจตน์ ออสวัสดิ์

หน่วยงานที่สังกัด สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หมายเลขโทรศัพท์ 02-7392382 **โทรสาร** ...02-326-4176..... **e-mail:** pitikhate@hotmail.com

คำสำคัญ (Keywords) สัญญาณออสตวน (chaotic signal) การเข้ารหัสลับ (cryptography) สามจังหวัดภาคใต้
(Three-deep southern provinces) ความปลอดภัยทางโทรศัพท์ (Secured phone)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่ 2: บทคัดย่อ

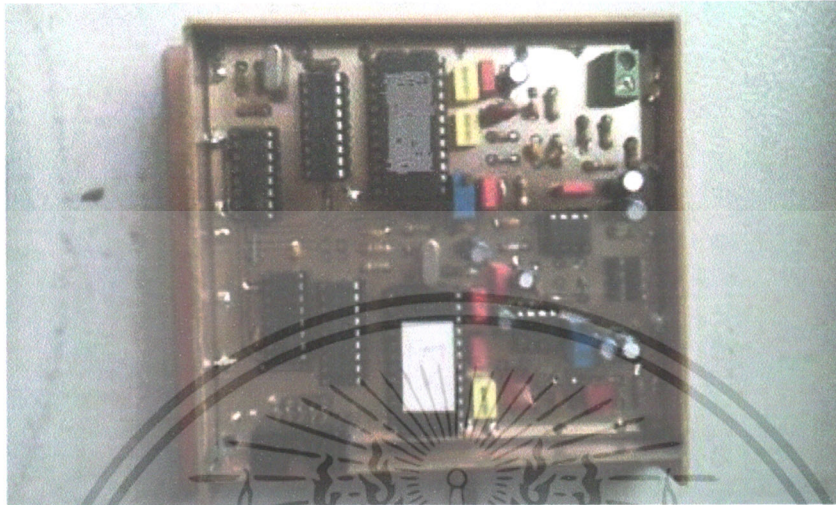
บทคัดย่อ

ประเด็นการดักฟังโทรศัพท์ที่เป็นประเด็น “ข่าวคัง” ที่ปรากฏบ่อย ๆ ในหน้าหนังสือพิมพ์ และสื่ออื่น ๆ จากแหล่งข่าวต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดักฟังเพื่อหาประโยชน์จากการล่วงรู้ความลับในการเคลื่อนไหวทางการเมือง งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนที่ได้ในโครงการงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2553 (ปีที่แล้ว) มาต่อยอดโดยขยายผลประยุกต์สร้างความมั่นคงให้ข้อมูลความลับสำหรับป้องกันการดักฟังการสนทนาทางโทรศัพท์ ผลของการศึกษาค้นคว้าได้วิธีการสร้าง และได้สร้างโทรศัพท์ที่สามารถป้องกันการดักฟังการสนทนาสัมฤทธิ์ผลดังวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้โดยได้ต้นแบบจำนวน 2 ชิ้น นอกจากนี้ผลงานทางวิชาการที่ได้จากงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ให้ลงในวารสารนานาชาติ International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)

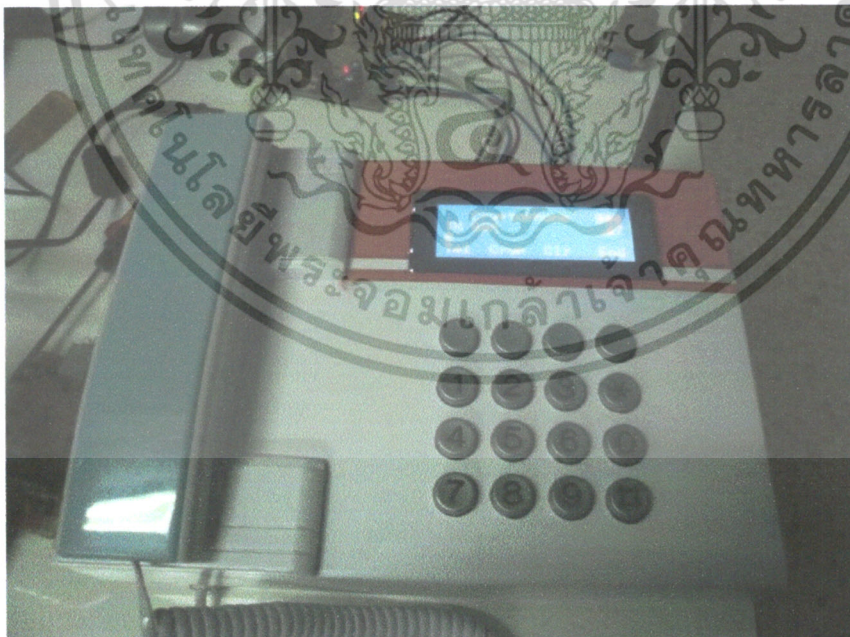
Abstract

Telephone tapping by the third party is often “a hot topic” appeared on newspapers and other media. Especially, conversation of politicians on the phone can be benefiting the opponent party. This research extends the past one of the year A.D. 2553 (last year) for secure communication. The findings reveal how to construct the prototypes. Two prototypes are obtained and the results have been published in International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC).

ส่วนที่ 3: รูปภาพผลงานวิจัย

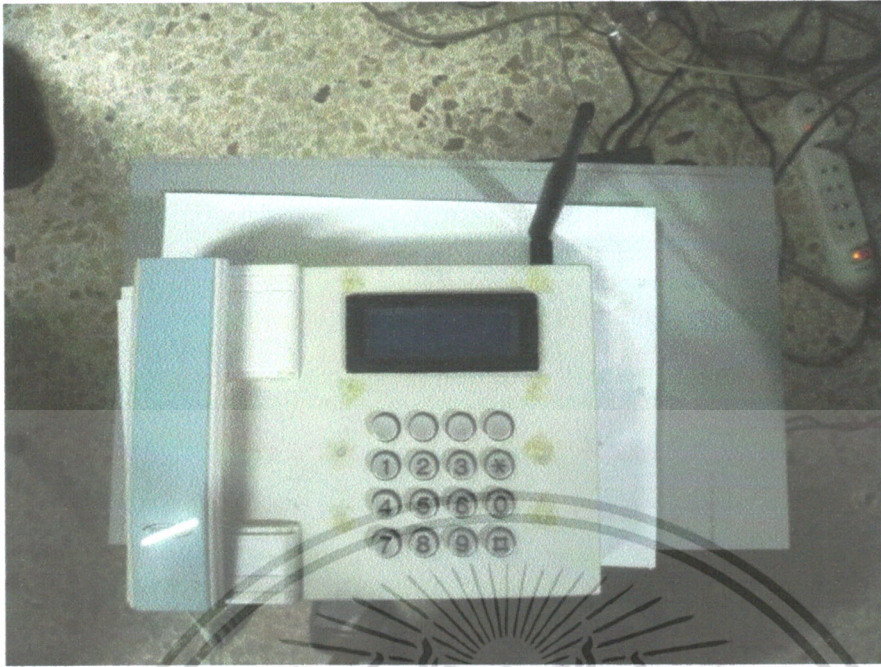


รูปที่ A1 ดันแบบวงจรเข้าและถอดรหัสลับด้วยสัญญาณอลวนสำหรับป้องกันการดักฟังทางโทรศัพท์



รูปที่ A2 ดันแบบชุดที่ 1 ชุดล่ายชุดโทรศัพท์ตั้งโต๊ะ แต่เป็น GSM เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ A3 ต้นแบบชุดที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญเรื่อง (Table of Contents)

หน้า

บทนำ.....	1
เนื้อเรื่อง.....	3
อภิปรายผล.....	22
สรุปผลการวิจัยและผลสัมฤทธิ์.....	25
บรรณานุกรม.....	27

เอกสารแนบหมายเลข 1

เอกสารแนบหมายเลข 2

เอกสารแนบหมายเลข 3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (List tables)

ตารางที่	หน้า
3.1 การเปรียบเทียบผลเชิงคุณภาพ โดยผู้สังเกตจากการลอบฟัง.....	24
3.2 การเปรียบเทียบผลเชิงคุณภาพ โดยผู้สังเกตใช้หลังจากถอดรหัส.....	24



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ^{viii} และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ (List of illustration)

รูปที่	หน้า
2.1 ไคอะแกรมการซิงโครไนซ์ของระบบ simple masking.....	7
2.2 ไคอะแกรมการซิงโครไนซ์ของระบบแบบ self-feeding masking.....	8
2.3 แบบจำลองการสร้างสัญญาณเคออสของสมการ(1).....	9
2.4 แบบจำลองการสร้างวงจรทั้งภาคส่งและภาครับซิงโครไนซ์ของระบบแบบ self-feeding masking.....	9
2.5 กราฟที่ได้จากการรัน โปรแกรม Matlab.....	10
2.6 การจำลองวงจรภาคส่ง โดยใช้โปรแกรม Pspice.....	11
2.7 การจำลองวงจรภาครับ โดยใช้โปรแกรม Pspice.....	12
2.8 กราฟที่ได้จากการวัดค่า x กับ x_r	12
2.9 กราฟที่ได้จากการวัดค่า $i(t)$ กับ $i_r(t)$ ขนาดแอมพลิจูด 0.5 V.....	13
2.10 กราฟสัญญาณข้อมูล $i(t)$ ที่มอดูเลชันกับสัญญาณเคออสคิต x	13
2.11 กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า $i(t)$ กับสัญญาณออก $i_r(t)$	13
2.12 วงจรเคออส.....	14
2.13 กราฟค่า x ที่ได้จากออสซิลโลสโคป	15
2.14 กราฟค่า y ที่ได้จากออสซิลโลสโคป	15
2.15 กราฟค่า z ที่ได้จากออสซิลโลสโคป	16
2.16 กราฟค่า $x-y$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป.....	16
2.17 กราฟค่า $x-z$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป.....	17
2.18 กราฟค่า $y-z$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป.....	17
2.19 แสดงการเปรียบเทียบค่า x, y, z จากผลที่ได้รับกับ โปรแกรม MATLAB และ PSPICE.....	18
2.20 การเปรียบเทียบค่า $x-y, x-z, y-z$ จากผลที่ได้รับกับ โปรแกรม MATLAB และ PSPICE.....	18
2.21 วงจรรวมทั้งภาคส่งและภาครับ.....	19
2.22 แสดงการเปรียบเทียบค่า x, x_r จากผลการทดลองจริง.....	19
2.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ i, i_r จากผลการทดลองจริง.....	20
2.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $xt+i_r, xt$ จากผลการทดลองจริง.....	20
2.25 วงจรต้นแบบที่สำเร็จแล้ว.....	21
3.1 การเข้ารหัสลับ และถอดรหัสลับของเสียง.....	22
3.2 การวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนของเวลา สัญญาณอลวนพร้อมสัญญาณเสียง.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา^{ix} และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวิเคราะห์สัญญาเวลาโดยสัญญาการเช่ารหัสของสัญญา โดยวงจรรวม (PCD44440T) พร้อม
สัญญาเสียง.....23



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ภูมิหลังและความสำคัญของปัญหา

โครงการวิจัยนี้เป็นโครงการวิจัยที่ขยายผลและต่อยอดมาจากโครงการในปีที่แล้ว (ทุนงบประมาณแผ่นดินประจำปี พ.ศ. 2553) โดยโครงการที่ผ่านมาเมื่อปีที่แล้วเป็นประเด็นการแก้ของกรร่วไหลของของเอกสารลับราชการที่มุ่งแก้ไขด้วยวิธีการเข้ารหัสลับด้วยสัญญาณอลวนซึ่งพัฒนาการเข้ารหัสลับของพหุสื่อ (multi-media) ด้วยสัญญาณอลวนซึ่งมุ่งค้นคว้าพัฒนาในรูปแบบที่มีความปลอดภัยสูงสุดแก่กองทัพ อย่างไรก็ตาม งานในโครงการในปีงบประมาณนี้เป็นการขยายผลจากปีที่แล้วซึ่งในปีที่ผ่านมาเป็นแบบการเข้ารหัสนอกเวลาจริง (off-line) ส่วนในโครงการนี้เป็นการเข้ารหัสป้องกันการดักฟังทางโทรศัพท์ซึ่งเป็นแบบในเวลาจริง (on-line real-time)

ประเด็นการดักฟังโทรศัพท์เป็นประเด็น “Talk of the town” ที่ปรากฏบ่อย ๆ ในหน้าหนังสือพิมพ์และสื่ออื่น ๆ จากแหล่งข่าวต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการดักฟังเพื่อหาประโยชน์จากการล่วงรู้ความลับในการเคลื่อนไหวทางการเมือง นอกจากนี้ ในยุคสารสนเทศที่การแข่งขันขึ้นอยู่กับข่าวและข้อมูลเพื่อการตัดสินใจนั้น การปกปิดการเจรจาในเชิงความลับทางการค้าหรือการผลิตก็มีความสำคัญไม่น้อยไปกว่าการเมือง ในหลาย ๆ กรณีการดักฟังการสนทนาทางโทรศัพท์นั้นอาจจัดได้ว่าเป็นการละเมิดต่อสิทธิส่วนบุคคลของผู้ถูกดักฟัง อย่างไรก็ตาม ภาวะของการใช้งานการป้องกันการดักฟังนั้น ขึ้นอยู่กับระดับชั้นของความลับ สำหรับความลับระดับชาติที่อาจส่งผลกระทบต่อความมั่นคงในส่วนรวมแล้ว การป้องกันการดักฟังจึงมีจำเป็นอย่างยิ่ง หากลองนึกสมมติว่าผู้ก่อการร้ายในสามจังหวัดชายแดนภาคได้ใช้การดักฟังการสั่งการในเรื่องนโยบายและแผนการปราบปรามจากการใช้เครื่องจำลองเครือข่ายชุมสาย สันติสุขที่คาดว่าจะมีขึ้นโดยเร็วพลัน อาจต้องเลื่อนเวลาออกไปอย่างไม่มีกำหนด เพราะความลับสุดยอดของภาครัฐเปิดเผยผ่านการลักลอบดักฟังได้โดยไม่ยาก แม้ว่าจะมีอุปกรณ์การป้องกันการดักฟังจำหน่ายในกลุ่มประเทศสหภาพยุโรป สหรัฐอเมริกาและอิสราเอล ทว่า อุปกรณ์การป้องกันการดักฟังดังกล่าวใช้เทคโนโลยีระดับสูงซึ่งจัดเป็นสินค้ายุทธปัจจัยที่ประเทศมหาอำนาจไม่อนุญาตให้มีการส่งออก โดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งออกองค์ความรู้ในชั้น “Know-how” ประเด็นที่สำคัญประการหนึ่งก็คือ การที่ประเทศไทยไม่มีเทคโนโลยีป้องกันการดักฟังของตนเอง ในยามที่เกิดภาวะสงคราม การแกะรหัสหรือถอดรหัสสื่อสารจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

เนื้อเรื่อง

2.1 วรรณกรรมปริทัศน์

ตัวดึงดูดคออลวน ค้นพบโดยบังเอิญโดย ศาสตราจารย์ Edward N. Lorenz [1] นักอุตุนิยมวิทยาแห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่งรัฐแมสซาชูเซต (MIT) ในปี พ.ศ. 2506 โดยเวลานั้น Lorenz ได้พยายามสร้างแบบจำลองทางอุตุนิยมวิทยาด้วยสมการอนุพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นขนาดลำดับ 3 ตัว x , y , z ของความสัมพันธ์ระหว่าง อุณหภูมิ ความกดอากาศ ความเร็วลม โดยในสมการมีตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น (quadratic nonlinear) อยู่ 2 เทอม และให้ประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ โดยเริ่มประมวลผลด้วยทศนิยม 6 หลัก แต่เนื่องจากขณะนั้นคอมพิวเตอร์มีประสิทธิภาพต่ำ Lorenz จึงได้ลดหลักทศนิยมของค่าเริ่มต้นของการคำนวณด้วยเลขทศนิยมจาก 6 หลักเหลือ 3 หลัก โดยคิดว่าเลขทศนิยมที่ตัดทิ้งจะไม่มีนัยสำคัญต่อผลของการคำนวณ แต่เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง พบว่าผลของการคำนวณด้วยค่าเริ่มต้นด้วยทศนิยม 3 หลัก ได้เปลี่ยนแปลงจากการคำนวณครั้งก่อนไปอย่างมากหรือเพียงกำหนดค่าเริ่มต้นต่างกันเล็กน้อย ผลของสมการอนุพันธ์ ที่ Lorenz จำลองขึ้นนี้จะให้ผลแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวได้ว่าระบบที่จำลองขึ้นนี้ไวต่อค่าเริ่มต้นและเมื่อทำการพล็อต ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร x ต่อ y และ x ต่อ z จะมีลักษณะรูปร่างที่แปลกประหลาดมีลักษณะเป็นตัวดึงดูดคออลวน (attractor) โดย ลักษณะของ x ต่อ z มีลักษณะคล้ายปีกผีเสื้อ และ Lorenz เรียกปรากฏการณ์ที่ค้นพบโดยบังเอิญนี้ว่าผลกระทบของผีเสื้อ (Butterfly effect) โดยให้ความหมายในระบบอุตุนิยมวิทยาว่าเป็นระบบที่อ่อนไหวมากเพียงผีเสื้อขยับปีกที่ Hong Kong ก็อาจเกิดปรากฏการณ์ Tornado หรือสภาวะสับสนอลหม่านที่ California ได้

หลังจากที่ Lorenz ได้ค้นพบตัวดึงดูดคออลวนแรกแล้ว ต่อมา Rossler [2] ได้ค้นพบตัวดึงดูดคออลวนจากการจำลองปรากฏการณ์ทางเคมี โดยมีเทอมตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นเพียงเทอมเดียว และในขณะต่อมา Rossler [3] ได้นำเสนอตัวดึงดูดคออลวน ขนาด 4 มิติ หรือ ไฮเปอร์เคออสติก โดยการเพิ่มลำดับของสมการจากลำดับ 3 เป็น ลำดับ 4 โดยมีคุณลักษณะของตัวดึงดูดคออลวน [4] ดังนี้คือ

- มีความไวต่อค่าเริ่มต้น
- มีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวนในโดเมนของเวลา
- สเปกตรัมกำลังของสัญญาณมีลักษณะย่านกว้าง

สำหรับการสร้างตัวดึงดูดลอวนในวงจรวิศวกรรมไฟฟ้า นั้น Chua [5] ได้นำเสนอการสร้างวงจรเพื่อกำเนิด สัญญาณเคออสขึ้น โดยวงจรประกอบด้วย ความต้านทาน 1 ตัว ตัวเก็บประจุ 2 ตัว ความเหนี่ยวนำ 1 ตัวและอุปกรณ์สร้างความต้านทานลบไม่เป็นเชิงเส้น 1 ชุด โดยวงจรนี้ สามารถกำเนิดสัญญาณเคออสได้ทั้งแบบ 1 สกอร์ และ 2 สกอร์ โดยปรับที่ตัวต้านทาน และเราเรียกววงจรที่ Chua ประดิษฐ์ขึ้นว่า วงจรของ Chua (Chua's Circuit) พร้อมขณะเดียวกัน Matsumoto[6] ผู้ที่ทำการร่วมวิจัยกับ Chua ได้นำเสนอวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสแบบ 4 มิติ หรือ ไฮเปอร์เคออส ขึ้นจริง โดยสร้างจากวงจรที่มีลักษณะคล้ายวงจรของ Chua โดยเพิ่มลำดับของสมการอนุพันธ์ ด้วยการเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของ ตัวดึงดูดลอวน นั้น หลังจาก Pecora [7] ได้แสดงให้เห็นว่า ระบบเคออสของ Lorenz และ Rossler สามารถซิงโครไนซ์ (Synchronization) เข้าด้วยกัน โดยมีภาคส่งเรียกว่า ตัวขับ (drive) และภาครับเรียกว่าตัวตอบสนอง (Response) แล้ว ต่อมา Cuomo [8] ได้นำเอาหลักการดังกล่าวไปใช้ในการประยุกต์การสื่อสารแบบปลอดภัย โดยนำสัญญาณเสียง ทำการบวกรบกวน (masking) กับตัวขับซึ่งเป็นระบบ Lorenz และเมื่อสัญญาณนี้ส่งผ่านไปในช่วงสัญญาณ ผู้ดักฟังสัญญาณ ไม่สามารถฟังได้ ยกเว้นจะมีตัวถอดรหัสหรือภาครับที่สามารถตอบสนองกับสัญญาณเคออสเพื่อจะถอดรหัสออกมาได้ซึ่งระบบที่ Cuomo ได้นำเสนอเป็นการเข้ารหัสลับแบบง่าย ๆ

ต่อมา Yang [9] ซึ่งเป็นผู้ร่วมวิจัยกับ Chua ได้เพิ่มความแข็งแกร่งของระบบเข้ารหัสลับที่อยู่บนพื้นฐานของระบบเคออสโดยนอกจากใช้การซิงโครไนซ์ของวงจรของ Chua แล้วยังเพิ่มตัวเข้ารหัสลับที่วงจร Chua อีกหนึ่งชุด สำหรับการสื่อสารแบบกระจายสเปกตรัม Itoh [10] ได้นำประโยชน์จากคุณสมบัติที่สัญญาณเคออสมีความถี่กว้าง ไปประยุกต์เพื่อเป็นคลื่นพาห้ของการกระจายสเปกตรัม และด้วยคุณสมบัติที่สัญญาณเคออสคล้ายสัญญาณรบกวน Yalcin [11] ได้นำเสนอการสร้างการกำเนิดบิตสุ่มจริงจากตัวดึงดูดลอวน โดยการนำการเคลื่อนที่ของวงโคจรของตัวดึงดูดลอวนผ่านจุดสมดุลมากำเนิดบิตสุ่ม

หลังจากการค้นพบวงจรของ Chua ซึ่งมีผู้นำไปประยุกต์ใช้งานดังกล่าวมาแล้ว ได้มีผู้สร้างตัวดึงดูดลอวนแบบใหม่ๆ โดยอาศัยพื้นฐานจากสมการของ Lorenz โดย Chen [12] ได้ค้นพบตัวดึงดูดลอวนแบบใหม่จากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไม่มีเสถียรภาพ หรือการต่อต้านการควบคุม (anti-control) โดยเราเรียกวิธีการนี้ว่า Chaotification ซึ่งตัวดึงดูดลอวนของ Chen มีเทอมตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2 เทอมเช่นเดียวกับ Lorenz แต่สัมประสิทธิ์ ของสมการต่างจาก Lorenz และในเวลาต่อมา Lu [13] ซึ่งเป็นผู้ร่วมวิจัยกับ Chen เสนอตัวดึงดูดลอวน ที่แสดงลักษณะเหมือนกับ Lorenz และ Chen ด้วยการปรับพารามิเตอร์โดยขณะเวลาเดียวกัน ได้มีผู้เสนอการสร้างวงจรสร้างตัวดึงดูดลอวนปีกผีเสื้อแบบ Lorenz[14] โดยใช้เทคนิคการคูณแบบสวิทช์แทนการคูณแบบเชิงเส้น

สำหรับการสร้างตัวคิ่งคูดอลวนแบบง่ายขึ้น Sprott [15] ได้เสนอรูปแบบสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 รวมกับตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบง่ายๆ ที่สามารถสร้างได้โดยวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง สมการของ Sprott ให้กำเนิดรูปแบบตัวคิ่งคูดอลวนที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนมาก สำหรับการสร้าง ตัวคิ่งคูดอลวนที่มีความซับซ้อนเพื่อประยุกต์ใช้ในการเข้ารหัสลับหรือสื่อสารแบบปลอดภัยนั้นได้เริ่มพัฒนาโดย Suyken [16] นำเสนอการสร้าง ตัวคิ่งคูดอลวน แบบหลายสกอร์ จากวงจรของ Chua ด้วยการเพิ่มท่อนของความต้านทานลบ เพื่อเพิ่มจุดสมดุลในระบบ และ Tang [17] ได้เสนอการสร้างวงจรหลายสกอร์จากวงจรของ Chua เช่นเดียวกัน โดยการสร้างวงจรต้านทานลบเป็นค่าฟังก์ชัน $\sin(x)$ สำหรับการสร้างวงจรเพื่อกำเนิดตัวคิ่งคูดอลวนแบบ 4 มิติ นั้น Li [18] ได้นำเสนอการสร้างตัวคิ่งคูดอลวนแบบไฮเปอร์โดยเพิ่มขนาดลำดับเพื่อควบคุมสมการของ Lorenz โดย Chen [19] และ Lu [20] ได้ใช้เทคนิคแบบเดียวกันเพื่อสร้างตัวคิ่งคูดอลวนแบบไฮเปอร์จากตัวคิ่งคูดอลวนของ Lu[13] และตัวคิ่งคูดอลวนของ Chua [5] แบบหลายสกอร์ตามลำดับ

นอกจากประยุกต์ตัวคิ่งคูดอลวน สำหรับการสื่อสารแบบปลอดภัย การสื่อสารแบบกระจายสเปกตรัม และการกำเนิดเป็นบิตสุ่มจริงแล้ว ผู้วิจัยได้เสนอการใช้ตัวคิ่งคูดอลวน สำหรับการเป็นการขับเคลื่อนหุ่นยนต์สนาม [22]-[25] และการขับมอเตอร์เพื่อการปั่นผสม [26] ซึ่งหัวใจของการประยุกต์ทั้งหมดก็คือตัวกำเนิดสัญญาณเคออสหรือวงจรสร้างตัวคิ่งคูดอลวน โดยเฉพาะในการสื่อสารแบบปลอดภัยนั้น จำเป็นต้องสร้างตัวคิ่งคูดอลวนให้มีค่าซับซ้อนสูงเพื่อยากต่อการสร้างสัญญาณกลับ(reconstruction) สำหรับผู้ดักฟัง โดยการประยุกต์เพื่อใช้งานจริงในรูปแบบต่างๆที่กล่าวมาผู้วิจัยส่วนใหญ่ได้จดสิทธิบัตรพร้อมกับปกปิดเทคนิคบางอย่างในการสร้าง ดังนั้นเพื่อให้เราสามารถทำงานประยุกต์ใช้งานตัวคิ่งคูดอลวนหรือระบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับงานวิศวกรรมได้จริง จำเป็นที่ต้องมีเทคนิคการสร้างวงจรมำเนิดตัวคิ่งคูดอลวน ของเราเอง ดังนั้นในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้จึง เสนอวิธีการสร้างตัวคิ่งคูดอลวนแบบใหม่ขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว

สำหรับหลักการสร้าง ตัวคิ่งคูดอลวน ในรูปแบบที่ใช้เทคนิคการประมาณเทอม เพื่อให้ได้ตัวคิ่งคูดอลวนแบบใหม่ซึ่งสามารถทำให้เราสร้างฟังก์ชันท่อนแทนค่าสมบูรณ เพื่อใช้สร้างตัวคิ่งคูดอลวน หลายปีกเป็นการใช้ฟังก์ชันเชิงท่อนที่สร้างขึ้นโดยทางปฏิบัติสามารถสร้างได้ง่ายกว่า ฟังก์ชันเชิงท่อนที่สร้างเป็นค่าความต้านทานลบ[16,17,20] และลักษณะของตัวคิ่งคูดอลวนยังให้รูปแบบที่ซับซ้อนสูงกว่าแบบอื่นๆมาก [14,19,20] สำหรับตัวคิ่งคูดอลวนแบบที่ 3 ที่ได้สร้างขึ้นแบบตัวคิ่งคูดอลวนแบบหลายสกอร์ สร้างขึ้นจากตัวคิ่งคูดอลวนซึ่งมีจุดสมดุลเพียงจุดเดียว ทำให้การ โคจรของตัวคิ่งคูดอลวนวงนอกมีลักษณะลดลงแบบ exponent ซึ่งจะต่างกับตัวคิ่งคูดอลวนแบบอื่นๆ[16,17,18,19,20] ที่ได้นำเสนอ และสำหรับตัวคิ่งคูดอลวน

แบบสุดท่ายนั้น ใช้หลักการ chaotification และร่วมกับการป้อนกลับทำให้ได้ attractor ที่มีค่า Lyapunov ที่สูง

จากการสืบค้นสิทธิบัตรนานาชาติ พบว่ามีผู้จดสิทธิบัตรครอบคลุมการเข้ารหัสลับสำหรับโทรศัพท์ชนิดต่าง ๆ สิทธิบัตรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้ได้แก่ [27] US pat.597412 (Oct, 1999) เป็น Cryptophone ใช้กับโทรศัพท์ (land line) โดยการแปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณดิจิทัลแล้ว encryption เข้ากับ crypto-module (ซึ่งถือว่าทุก algorithm ในการเข้ารหัสลับเป็น crypto-module) ทำให้การตีความทางกฎหมาย ไม่ว่าผู้วิจัยต่อมาจะต่อยอดโดยใช้วิธีการใดก็ตามสิทธิบัตรนี้สามารถอ้างสิทธิได้หากเข้าในกรอบที่กำหนด อย่างไรก็ตาม ช่องว่างของสิทธิบัตรดังกล่าวยังคงมีอยู่ทำให้มีผู้ที่จดสิทธิบัตรในปีต่อ ๆ มาดังนี้

- US pat.6266418 (Jul, 2001) [28] แสดงอุปกรณ์เข้ารหัสลับพร้อมกับโทรศัพท์ ทำการเข้ารหัส โดยการแปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณดิจิทัล และทำการเข้ารหัสลับเช่นเดียวกับ [27] แต่มีการเพิ่มฟังก์ชันการจัดการกุญแจในการเข้ารหัส โดยการใช้ PIN ของผู้ส่งฝ่ายเดียว (ขั้นตอนนี้จะต้องทำการสร้างกุญแจทุกครั้งก่อนส่งเรียกว่า key establishment (หมายถึง ผู้ส่งและผู้รับจะต้องมีกุญแจในการเข้ารหัสลับของเสียงเป็นตัวเดียวกัน โดยขั้นตอนนี้บุคคลที่ 3 ต้องไม่สามารถล่วงรู้กุญแจนี้ได้)
- US pat.6856687 (Feb, 2005) [29] เป็นอุปกรณ์สื่อสารแบบปลอดภัยแทนที่จะใช้เข้ารหัสเฉพาะโทรศัพท์ได้อย่างเดียวและส่งไปในเครือข่ายโทรศัพท์ ใน [29] สามารถรวมอุปกรณ์สื่อสารทุกอย่างเช่น โทรศัพท์, โทรศัพท์มือถือ และ PDA ให้ส่งไปในเครือข่ายสื่อสารสาธารณะใด ๆ เช่น โทรศัพท์ หรือ อินเทอร์เน็ต
- US pat.6907123 (Jun, 2005) [30] เป็น algorithm ส่งข้อมูลจากโทรศัพท์ผ่านเครือข่ายสาธารณะ โดยใช้ public key ของผู้รับ เพื่อสร้าง key establishment พร้อมกับสามารถเลือก algorithm ในการเข้ารหัสลับได้
- US pat.7003329 (Feb, 2006) [31] แสดงอุปกรณ์ส่วนต่อเข้ากับโทรศัพท์มือถือสำหรับการเข้ารหัสลับ โดยสิทธิบัตรนี้จะทำการสร้างอุปกรณ์เข้ารหัสลับ แล้วเพิ่มเข้าไปกับโทรศัพท์มือถือใด ๆ โดยแสดงเฉพาะโครงสร้างทางกายภาพ
- US pat.7210044 (Apr, 2007) [32] เป็นโทรศัพท์มือถือพร้อมกับฟังก์ชันการทำงานเข้ารหัสลับเพื่อลดข้อยุ่งยากของ key establishment โดยกุญแจในการเข้ารหัสจะใช้รหัสประจำเครื่องของโทรศัพท์มือถือ ในสิทธิบัตรนี้ถือสิทธิรวมเกือบทุกอย่างสำหรับการเข้ารหัสสำหรับโทรศัพท์มือถือ

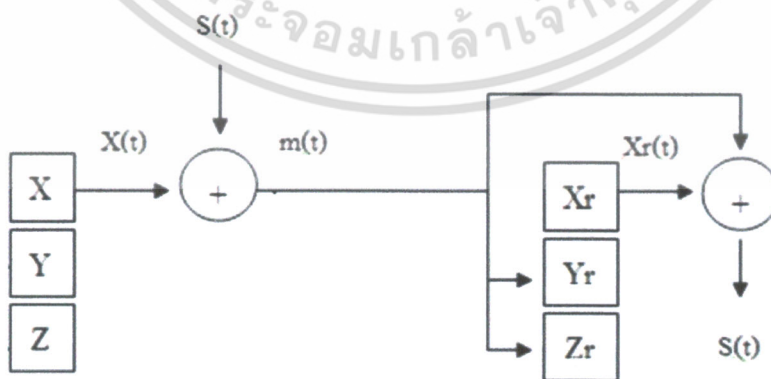
ในงานวิจัยที่จะนำเสนอนี้จะเป็นการใช้เทคนิคดังกล่าวมาแล้วในข้างต้นเพื่อค้นหาสภาวะอลวนแบบใหม่ที่ทำให้ความแข็งแกร่งและคงทนตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวแล้วในบทที่ 1 ผู้วิจัยมีความมั่นใจในผลสำเร็จที่คาดหวังเนื่องจากมิได้เริ่มการวิจัยจากศูนย์ ทว่า มีต้นทุนในการศึกษาและประยุกต์สัญญาณอลวนในระดับที่สามารถสร้างอุปกรณ์ได้ [33] หนึ่งในความท้าทายของงานวิจัยเชิงวิชาการก็คือ การหาช่องว่างเพื่อจดสิทธิบัตร (หากคิดตามกรอบเก่าซึ่งเน้นเทคนิคซอฟต์แวร์) เพื่ออ้างสิทธิในการสร้างองค์ความรู้ใหม่จึงต้องหาช่องว่างจากการกำหนดกรอบใหม่โดยผู้วิจัยพบความเป็นไปได้ในการต่อยอดโดยอาศัยฐานงาน [33] ร่วมกับช่องว่างนวัตกรรมในส่วนที่เป็น key establishment ที่จะค้นคว้าต่อไปในงานวิจัยนี้ให้ไม่ซ้ำรูปแบบกับสิทธิบัตรในอดีต ซึ่งคณะผู้วิจัยมีความมั่นใจในความใหม่เนื่องจากคณะผู้วิจัยค้นพบสัญญาณอลวนแบบใหม่ ซึ่งได้ตีพิมพ์ปรากฏในวารสารนานาชาติในภาคผนวกที่ 2

ในเฟส (phase) การวิจัยนี้ทำการทดลอง ชิงโครไนซ์ของระบบการส่งข้อมูลที่เข้ารหัสลับนั้นสามารถกระทำได้โดยกับสัญญาณเคออสติคตามปกติแล้วระบบเคออสติคจะมีความสามารถในการชิงโครไนซ์ด้วยตัวของมันเอง โดยเมื่อมันถูกแยกออกเป็นระบบย่อย 2 ระบบ คือ ตัวส่งข้อมูล (Transmitter) หรือเรียกว่าระบบขับ (Drive system) และตัวรับข้อมูล (Receiver) หรือเรียกว่าระบบตอบสนอง (Response system) ได้ผลการวิจัยดังกล่าวในหัวข้อที่ 2.2

2.2 การชิงโครไนซ์

2.2.1 การชิงโครไนซ์ของระบบ simple masking

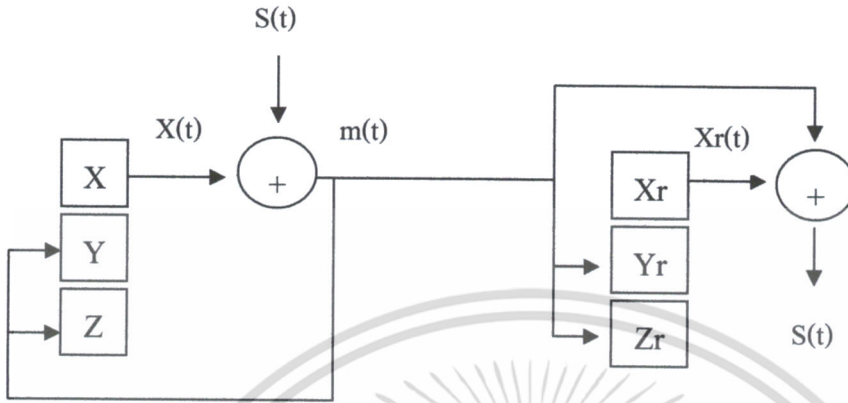
นำสัญญาณข้อมูลมาทำการเข้ารหัส (Encryption) โดยการบวกสัญญาณกับสัญญาณเคออสติคแสดงระบบได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โค้ดแอมการชิงโครไนซ์ของระบบ simple masking

2.2.2 การชิงโครไนซ์ของระบบ self-feeding masking

เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้มีค่า สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน simple masking ให้มีค่า สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยจะมีการป้อนกลับของสัญญาณรวมไปที่อินพุตของภาคส่ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โดอะแกรมการชิงโครไนซ์ของระบบแบบ self-feeding masking

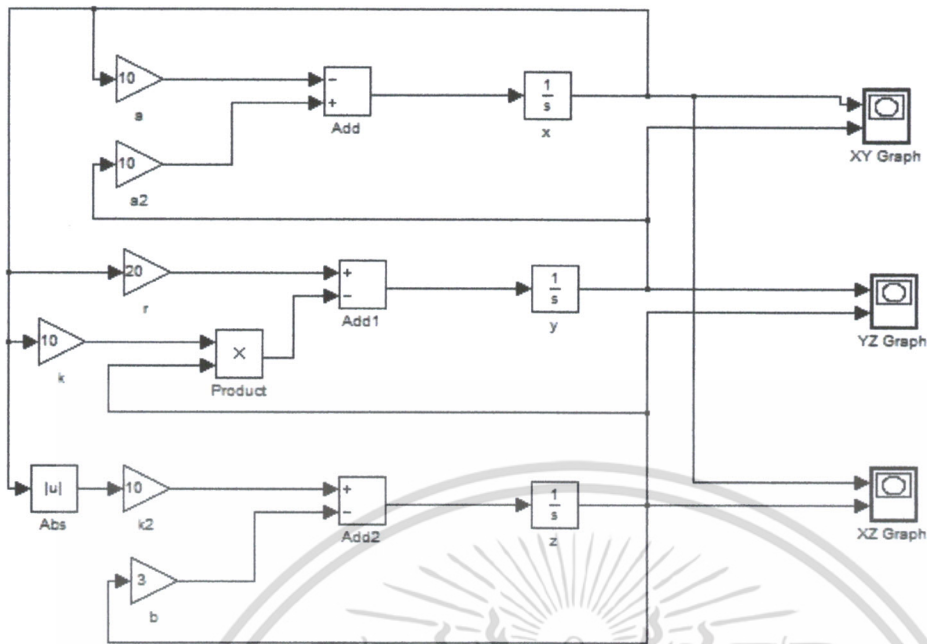
2.3 ออกแบบการทดลอง

2.3.1 การออกแบบสร้างสัญญาณเคออส

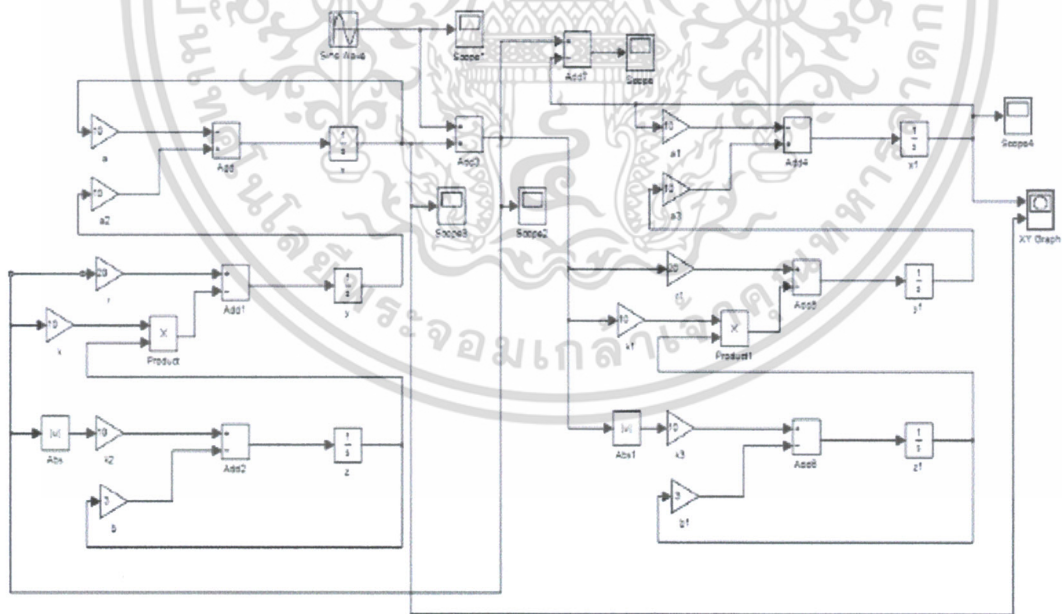
ในการออกแบบวงจรสำหรับสร้างสัญญาณเคออสที่พบใหม่แบบสามารถสร้างได้ง่ายโดยปรับปรุง แอทแทรกเตอร์ของ Lorenz จากสมการ Lorenz เมื่อสังเกตค่า x, y แล้วมีลักษณะใกล้เคียงกันดังนั้นเมื่อ ประมาณค่าของ $xy \approx |x|$ แสดงระบบใหม่ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x' &= -ax + ay \\ y' &= rx - kxz \\ z' &= -bz + k|x| \end{aligned} \quad (1)$$

โดยค่า k เป็นค่าคงที่เพื่อใช้ scale ขนาดของแอทแทรกเตอร์ ให้พารามิเตอร์ $a = 10$, $r = 20$, $b = 3$, $k = 10$ ระบบจะแสดงลักษณะแอทแทรกเตอร์เป็นแบบ Lorenz แต่เมื่อปรับค่า $r = 50$ พารามิเตอร์อื่นมีค่าเท่าเดิม ระบบจะแสดงแอทแทรกเตอร์แบบ Chen แบบจำลองระบบและผลการจำลอง เบื้องต้น ดังรูปที่ 2.3-2.5

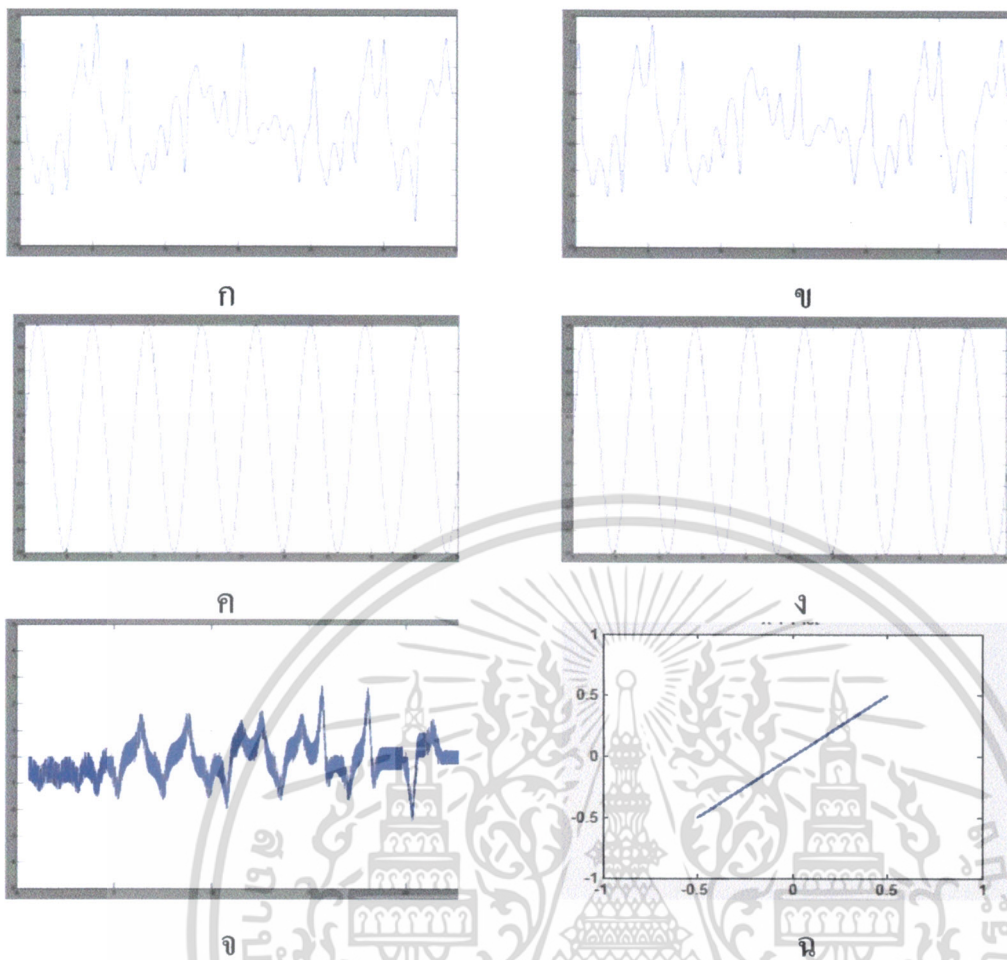


รูปที่ 2.3 แบบจำลองการสร้างสัญญาณเคออสของสมการ(1)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการสร้างวงจรทั้งภาคส่งและภาครับซึ่งโครโนซ์ของระบบแบบ self-feeding masking

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 9
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

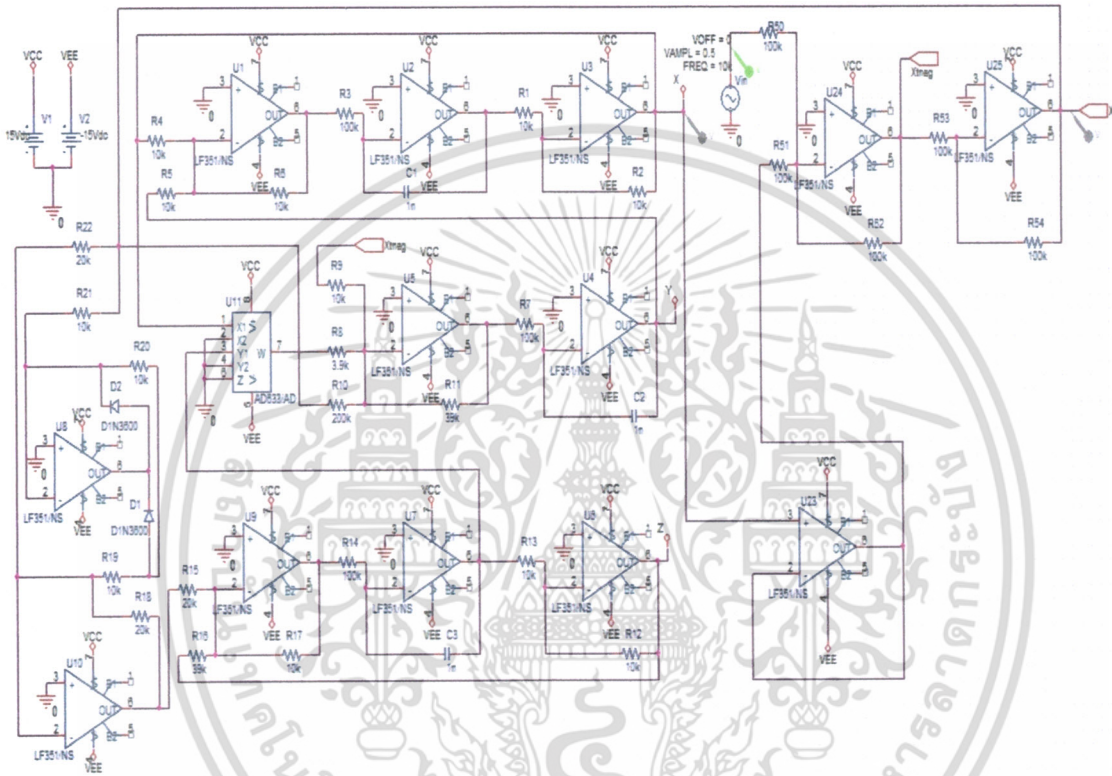


รูปที่ 2.5 กราฟที่ได้จากการรัน โปรแกรม Matlab

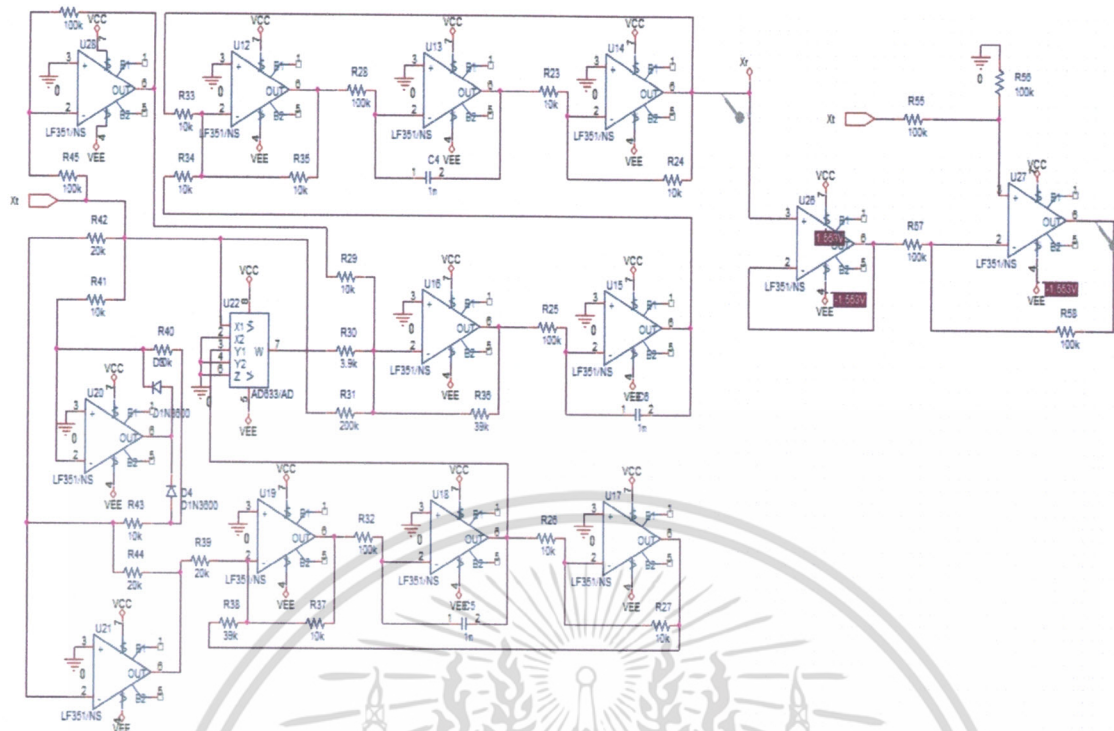
- ก. กราฟที่ได้จากการวัดค่า x , ข. กราฟที่ได้จากการวัดค่า x_r , ค. กราฟสัญญาณข้อมูลที่ได้รับเข้า $i(t)$
 ง. กราฟสัญญาณข้อมูลที่ได้รับเข้า $i_r(t)$, จ. กราฟสัญญาณข้อมูลที่มีอคติขึ้นกับสัญญาณเคออดีค
 ฉ. กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า $i(t)$ กับสัญญาณออก $i_r(t)$

2.4 การจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Pspice

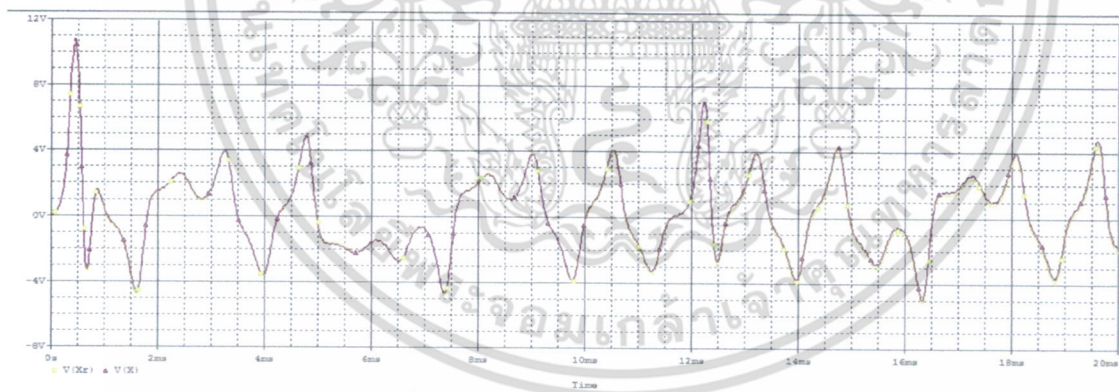
หลังจากที่ได้ประเมินความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรจากการทดลองจำลองโดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อย่อยที่แล้ว ในหัวข้อย่อยนี้ จะทำการจำลองอุปกรณ์ในขั้นตอนแบบวงจรที่สอดคล้องกับอุปกรณ์จริงโดยอาศัยโปรแกรม Pspice ดังแสดงวงจรและผลการจำลองในรูปแบบที่ 2.6-2.11



รูปที่ 2.6 การจำลองวงจรภาคส่ง โดยใช้โปรแกรม Pspice

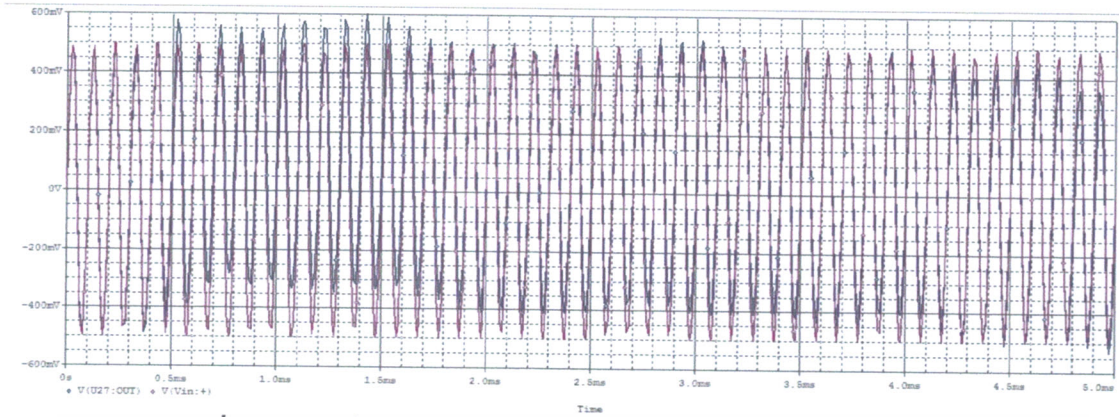


รูปที่ 2.7 การจำลองวงจรภาครับ โดยใช้โปรแกรม Pspice

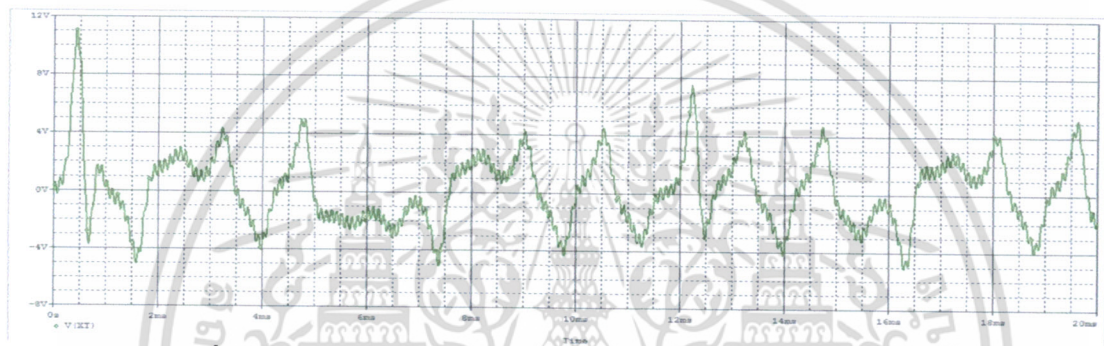


รูปที่ 2.8 กราฟที่ได้จากการวัดค่า x_e กับ x_r

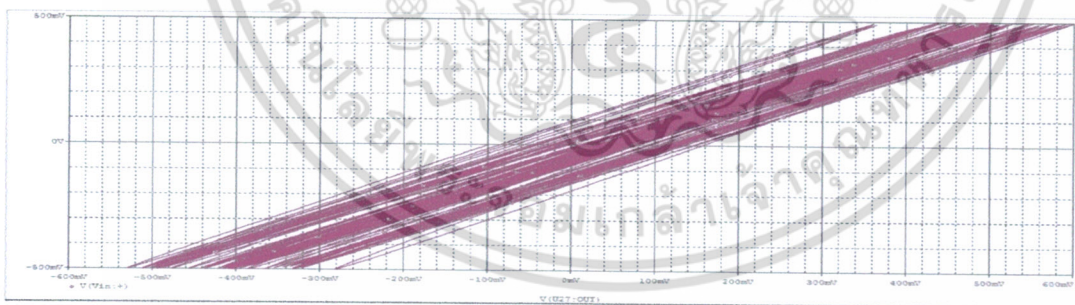
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 กราฟที่ได้จากการวัดค่า $i(t)$ กับ $i_r(t)$ ขนาดแอมพลิจูด 0.5 V



รูปที่ 2.10 กราฟสัญญาณข้อมูล $i(t)$ ที่มอดูเลชันกับสัญญาณเคออดิค x



รูปที่ 2.11 กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า $i(t)$ กับสัญญาณออก $i_r(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 ผลการทดลอง

2.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจร

จากการออกแบบและสร้างวงจรในทางทฤษฎี สามารถสร้างวงจรในทางปฏิบัติได้ดังนี้
ค่าที่ใช้ทางทฤษฎี

ตัวต้านทาน (Resistor)

- ตัวต้านทาน 200 k Ω	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 100 k Ω	3 ตัว
- ตัวต้านทาน 39 k Ω	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 20 k Ω	15 ตัว
- ตัวต้านทาน 10 k Ω	22 ตัว
- ตัวต้านทาน 3.9 k Ω	2 ตัว

ตัวเก็บประจุ (Capacitive)

- ตัวเก็บประจุ 1 nF	6 ตัว
---------------------	-------

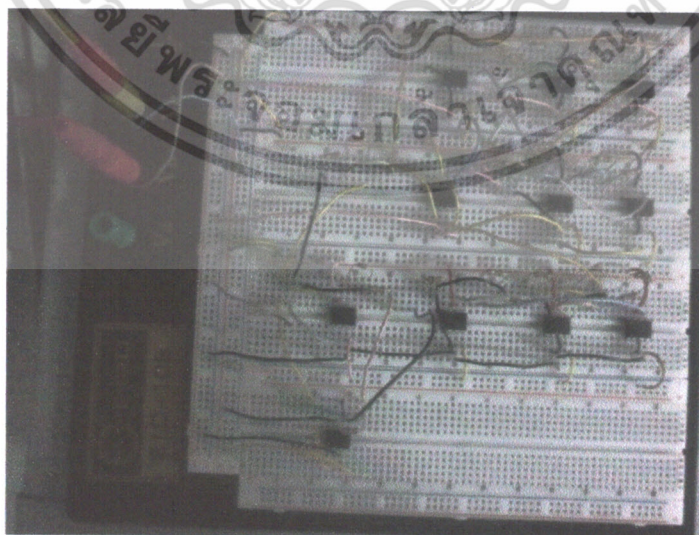
ไดโอด (Diode)

- ไดโอด D1N3600	4 ตัว
-----------------	-------

เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor)

- IC LF351	28 ตัว
- IC AD633JN	2 ตัว

การสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 วงจรเคออส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

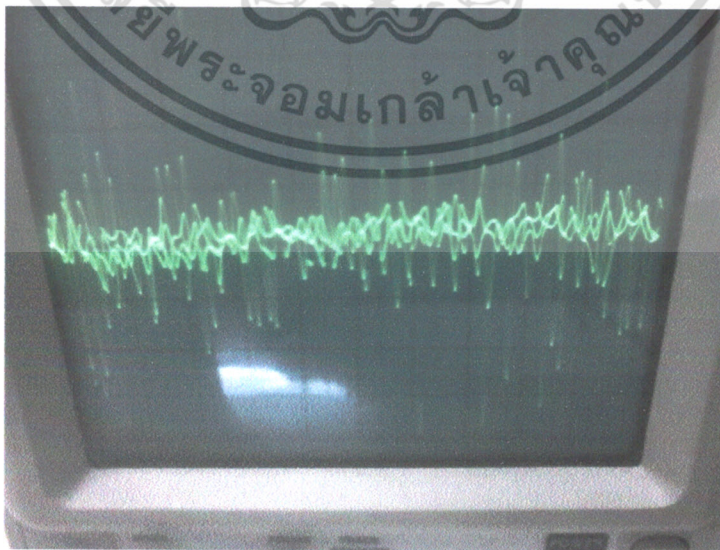
2.5.2 ผลที่ได้จากการทดลอง

2.5.2.1 วงจรเคออดติก

ใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่า Output ที่สเตท x,y,z ได้ผลแสดงดังรูปที่ 2.13-2.20 จะเห็นได้ว่าวงจรสร้างได้จริงตามที่ออกแบบไว้ตรงทั้งทฤษฎีและปฏิบัติทุกประการ

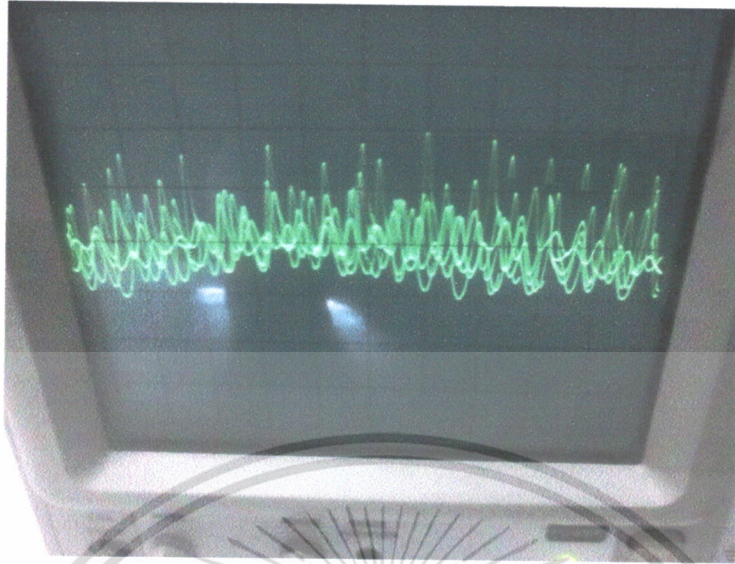


รูปที่ 2.13 กราฟค่า x ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.14 กราฟค่า y ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 กราฟค่า z ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.16 กราฟค่า $x-y$ ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



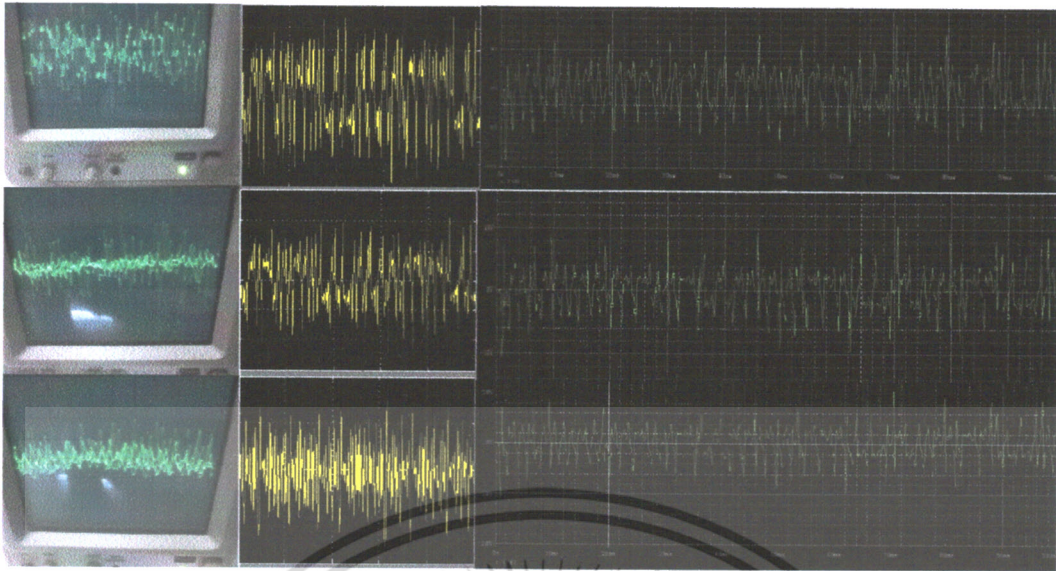
รูปที่ 2.17 กราฟค่า x-z ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



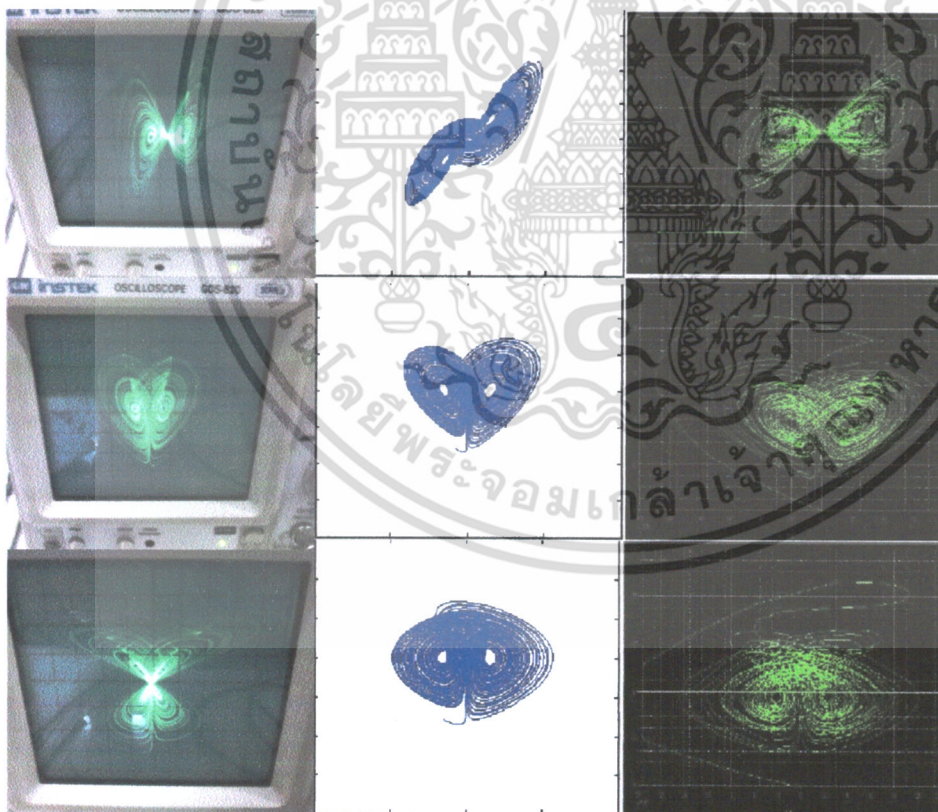
รูปที่ 2.18 กราฟค่า y-z ที่ได้จากออสซิลโลสโคป

121353

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบค่า x , y , z จากผลที่ได้รับกับ โปรแกรม MATLAB และ PSPICE

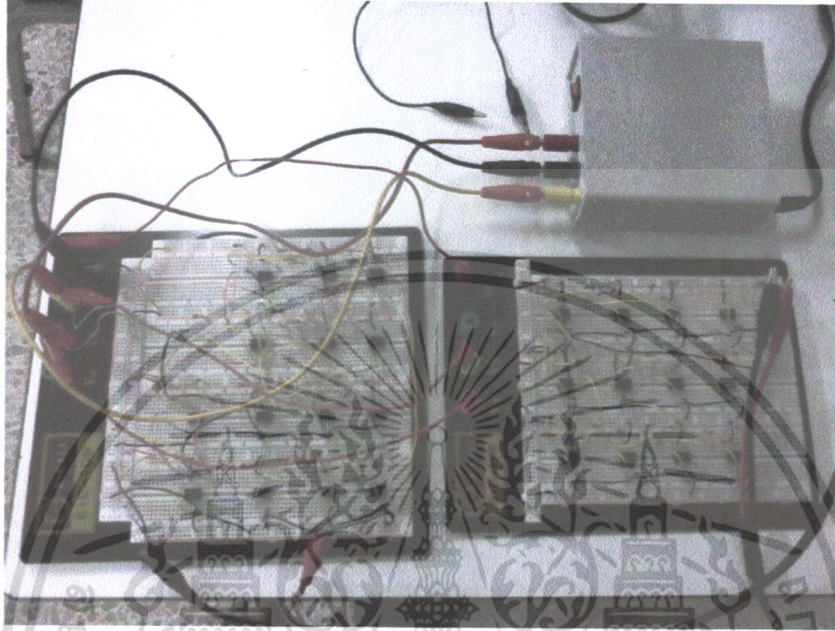


รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบค่า x - y , x - z , y - z จากผลที่ได้รับกับ โปรแกรม MATLAB และ PSPICE

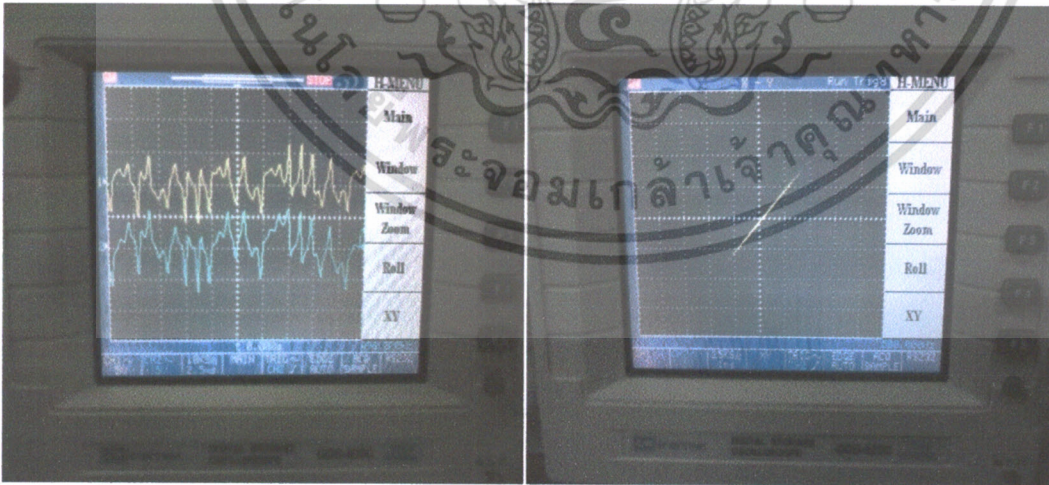
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2.2 วงจรที่ทำการชิงโคไนซ์แล้ว

รูปที่ 2.21-2.25 แสดงผลสำเร็จของการทดลองสร้างวงจรที่สามารถส่งได้ในเวลาจริง ดังจะเห็นได้จากสัญญาณภาคส่งและภาครับตรงกัน

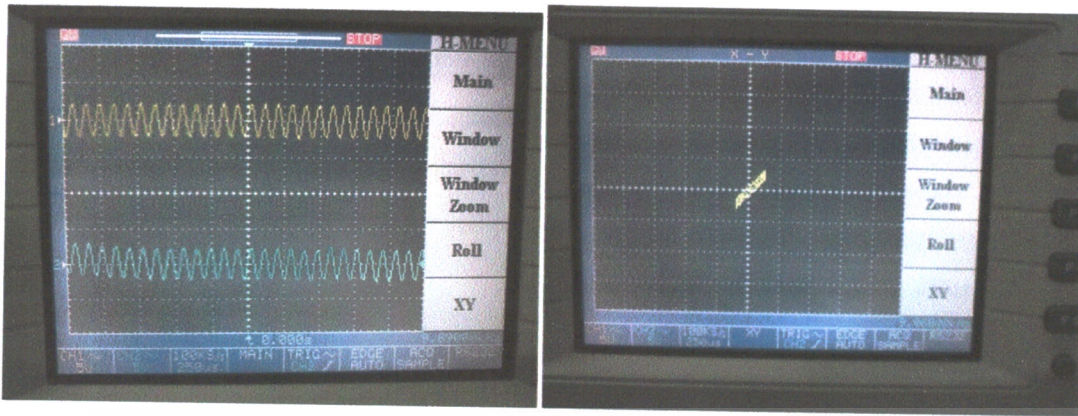


รูปที่ 2.21 วงจรรวมทั้งภาคส่งและภาครับ

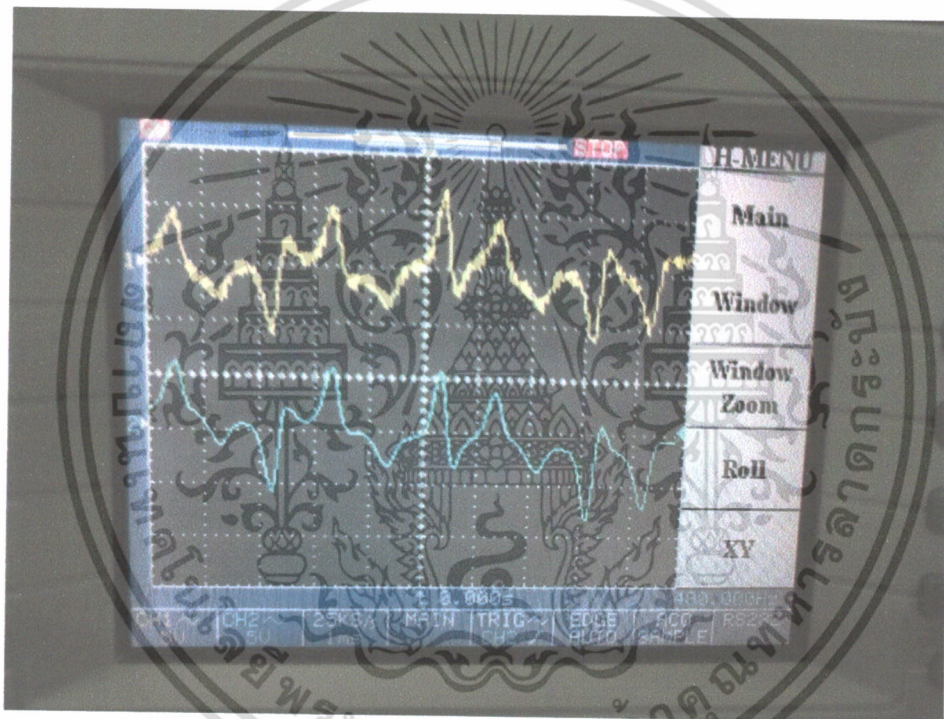


รูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบค่า x , x_r จากผลการทดลองจริง

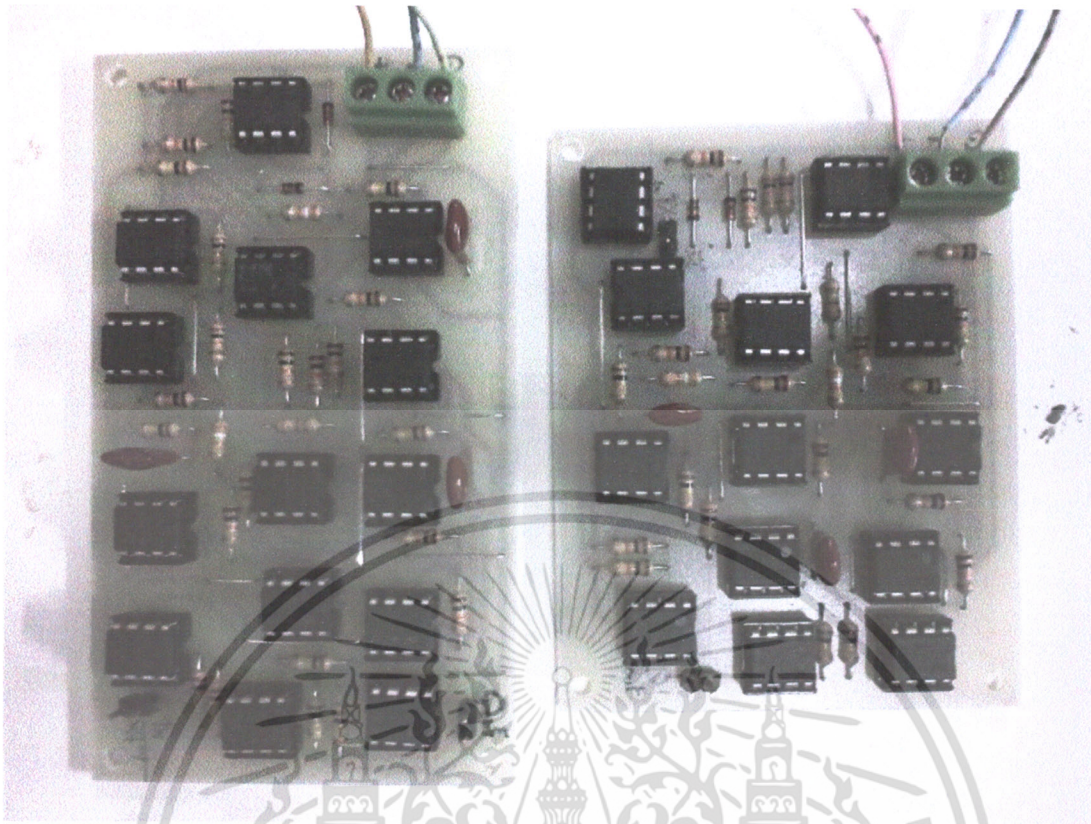
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ i,ir จากผลการทดลองจริง



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ $xt+ir,xt$ จากผลการทดลองจริง



รูปที่ 2.25 วงจรต้นแบบที่สำเร็จแล้ว

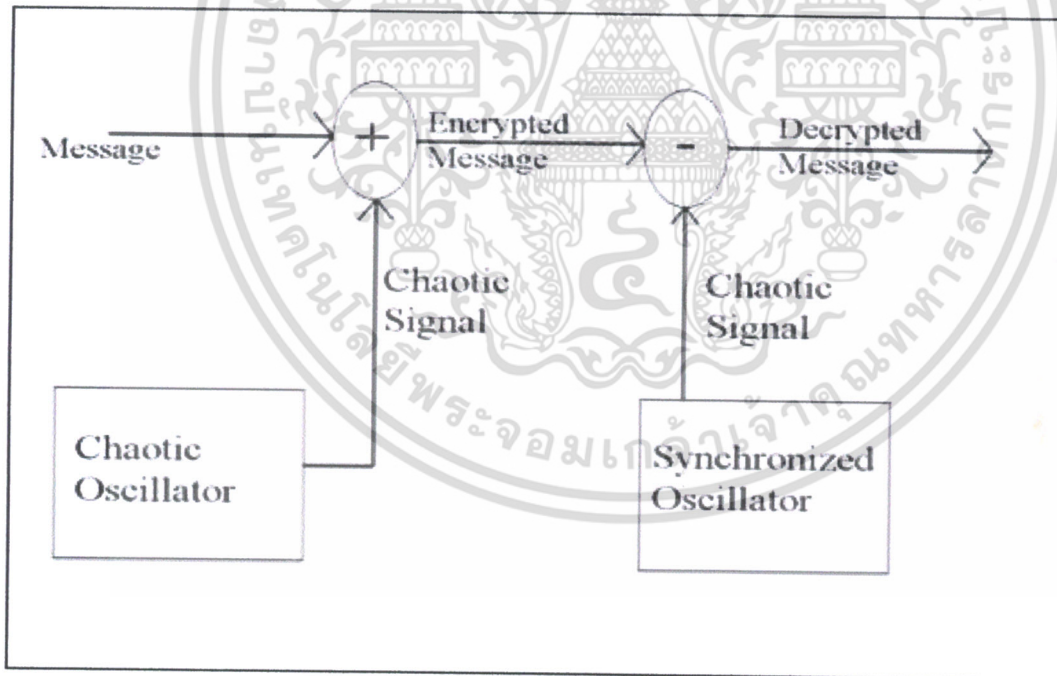
จากรูปวงจรถิ่นแบบที่ได้ จะนำไปประกอบและทดสอบภาคสนามร่วมกับอุปกรณ์ในภาคส่งและภาครับระบบสื่อสาร GSM ผลการทดสอบเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก 1 ซึ่งแสดงการทดสอบโดยจำลองภาคสนาม การอภิปรายผลการทดลองนำเสนอในบทถัดไป

บทที่ 3

อภิปรายผล

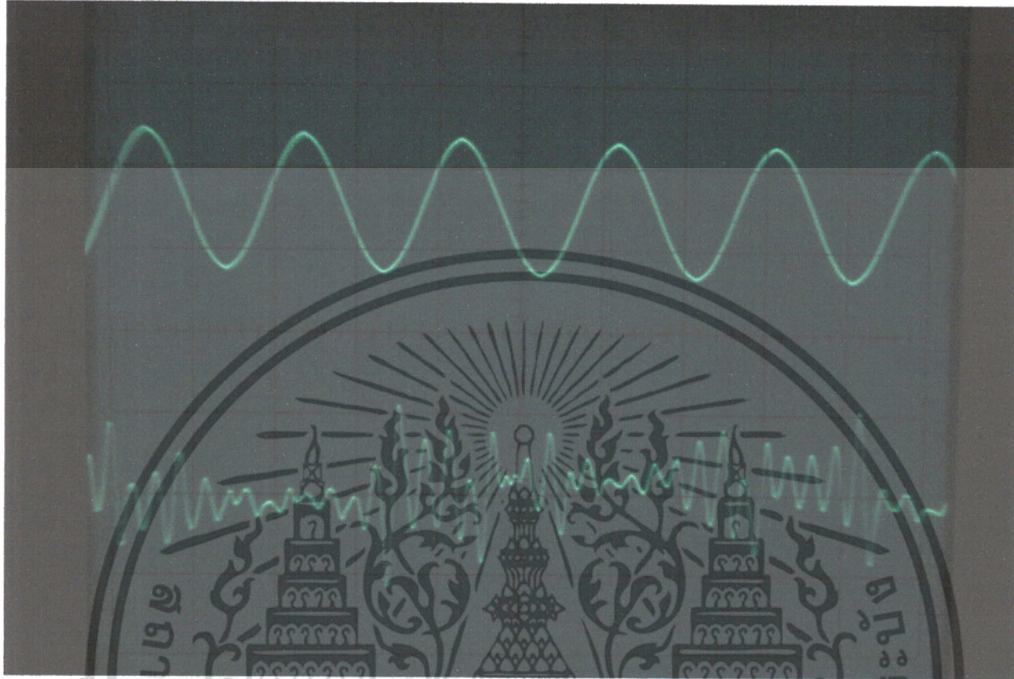
3.1 อภิปรายการทดลอง การเข้ารหัสลับ และถอดรหัสลับของเสียง

จากการทดลอง Synchronize เพื่อทดสอบผล เปรียบเทียบกับในกรณีที่มีการวิเคราะห์รหัส โดยผู้ถูกรุก สำหรับการทดลอง Synchronize ในขั้นแรกใช้ การสร้างวงจรภาคส่งของการสร้างสัญญาณอลวนบวกกับสัญญาณเสียง หรือเป็นสัญญาณที่ถูกเข้ารหัส (Encrypted message) และทำการ ขับสัญญาณดังกล่าวเข้ากับวงจร ออลวนที่มีคุณสมบัติ เหมือนกัน และทำการแยกหรือ Decrypted สัญญาณ โดยการนำเอาสัญญาณที่รับมา กับสัญญาณที่สร้างขึ้นที่ภาครับ โดยในการทดลองได้ทำการ Synchronized โดยใช้สัญญาณอลวนแบบหลายปีกผีเสื้อ ในการป้องกันการดักฟังนั้นอาจเขียนเป็นแผนภาพ ได้ดังรูปที่ 3.1

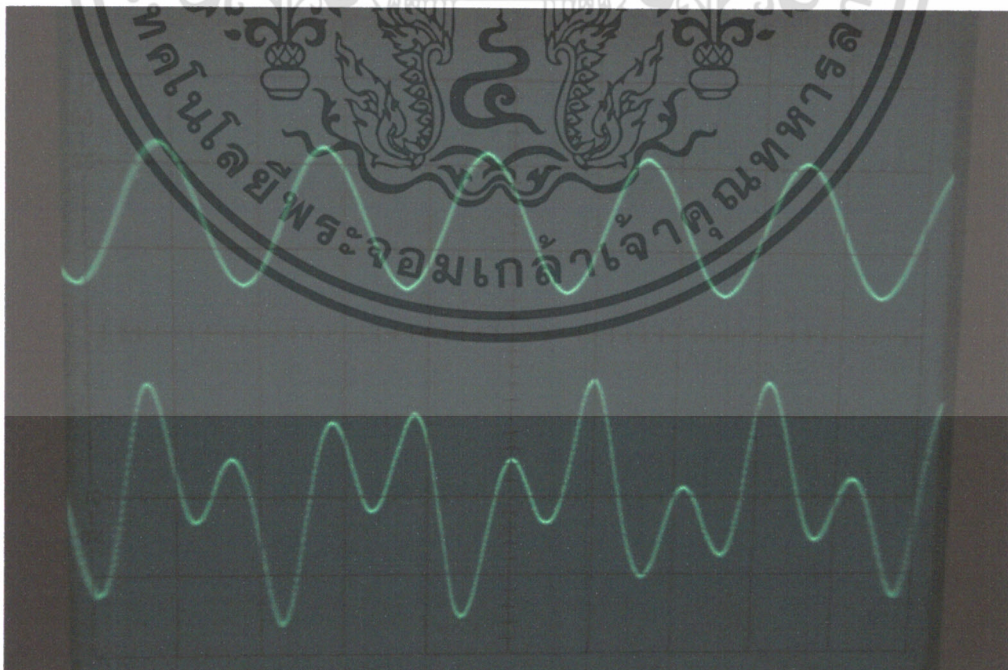


รูปที่ 3.1 การเข้ารหัสลับ และถอดรหัสลับของเสียง

จะเห็นได้โดยง่ายว่าการเข้ารหัสลับด้วยสัญญาณออลวนในรูปที่ 3.2 ได้ผลดีกว่าคู่เทียบ ซึ่งเป็น Rolling Code ของบริษัท Phillips PCD44440T รูปที่ 3.3 ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีสัญญาณการเข้ารหัสความซับซ้อนมากกว่า นั่นคือ การถอดรหัสหรือเดาจากรูปแบบจะเป็นไปได้ยากกว่าในเชิงการกระจายรูปของความถี่สัญญาณ



รูปที่ 3.2 การวิเคราะห์สัญญาณในโดเมนของเวลา สัญญาณออลวนพร้อมสัญญาณเสียง



รูปที่ 3.3 การวิเคราะห์สัญญาณเวลาโดยสัญญาณการเข้ารหัสของสัญญาณ
โดยวงจรรวม (PCD44440T) พร้อมสัญญาณเสียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา ²³ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 อภิปรายผลโดยการวิเคราะห์เทียบเชิงคุณภาพ

ในระดับของการวิเคราะห์จะกระทำโดยวิเคราะห์รูปสัญญาณได้ทำใน โดเมนของเวลา และการสังเกตความถี่ ในหัวข้อย่อหน้านี้ การวิเคราะห์โดยใช้การฟังเปรียบเทียบเชิงคุณภาพ โดยผู้สังเกตนั้น สามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การเปรียบเทียบผลเชิงคุณภาพ โดยผู้สังเกตจากการลอบฟัง

เวลาที่ใช้ในการฟัง	วงจรรวมสำเร็จรูป	สัญญาณอลวนที่สร้างขึ้น
30 วินาที	เสียงบู๊บี	ไม่สามารถสังเกตได้
1 นาที	จับประโยคได้ แต่ไม่สามารถวิเคราะห์	ไม่สามารถสังเกตได้
3 นาที	คาดเดาความหมายได้	ไม่สามารถสังเกตได้

จะเห็นได้ว่าการเข้ารหัสลับสัญญาณเสียงสำหรับการสื่อสารทางโทรศัพท์ด้วยสัญญาณอลวนนั้นให้ความมั่นคงต่อข้อมูลดีกว่าการเข้ารหัสลับสัญญาณเสียงด้วย Rolling Code ซึ่งเป็น IC สำเร็จรูปที่จำหน่ายในท้องตลาด ดังนั้นการใช้เทคนิคที่น่าเสนอในที่นี้จึงให้ความมั่นคงของข้อมูลและทำให้ยากต่อการดักฟัง สำหรับการเปรียบเทียบผลการถอดรหัสเชิงคุณภาพ โดยผู้ใช้งานแสดงดังตารางที่ 3.2 นั้น พบว่าการถอดรหัสสัญญาณแบบอลวน ได้ผลดีเท่ากับวงจรที่ใช้โค้ดอิเล็กทรอนิกส์เชิงพาณิชย์

ตารางที่ 3.2 การเปรียบเทียบผลเชิงคุณภาพ โดยผู้สังเกตใช้หลังจากถอดรหัส

เวลาที่ใช้ในการฟัง	วงจรรวมสำเร็จรูป	สัญญาณอลวนที่สร้างขึ้น
30 วินาที	ได้ยินข้อความควบคุมเสียงกวน	ได้ยินข้อความควบคุมเสียงกวน
1 นาที	ได้ยินข้อความควบคุมเสียงกวน	ได้ยินข้อความควบคุมเสียงกวน
3 นาที	ได้ยินข้อความควบคุมเสียงกวน	ได้ยินข้อความควบคุมเสียงกวน

บทที่ 4

สรุปผลการวิจัยและผลสัมฤทธิ์

4.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ

1.) นำสัญญาณอลวนที่ได้ในโครงการงบประมาณประจำปี พ.ศ. 2553 (ปีที่แล้ว) มาต่อยอดโดยขยายผลประยุกต์สร้างความมั่นคงให้ข้อมูลความลับสำหรับป้องกันการดักฟังการสนทนาทางโทรศัพท์

จากผลการทดลองที่ได้จากงานวิจัยได้ผลเป็นที่น่าพอใจซึ่งจากการเปรียบเทียบผลการเข้ารหัสลับและถอดรหัสด้วยวิธีที่นำเสนอโดยใช้กับความมั่นคงปลอดภัยจากการสนทนาทางโทรศัพท์นั้น จะเห็นได้ว่าการเข้ารหัสลับอลวนให้ผลรูปกระสวนสัญญาณที่บิดเป็นความถี่และเชิงสทัมพันธ์ได้ดีกว่าการใช้ Rolling Code ซึ่งเป็น IC สำเร็จรูป ในขณะที่ให้ค่าผลลัพธ์ของสัญญาณเสียงที่ส่งผ่านโทรศัพท์ได้คุณภาพดีจากการสังเกตเชิงคุณภาพโดยผู้ใช้เท่ากัน ซึ่งจากภาคผนวกที่ 1 หรือเอกสารอ้างอิงหมายเลขที่ 1 จะเห็นได้ว่าการขยายผลดังกล่าวได้ผลสัมฤทธิ์ตามจุดประสงค์ที่ตั้งไว้

2.) ส่งมอบชิ้นงานและซอฟต์แวร์ที่ได้ในข้อ 1.) แก่หน่วยงานความมั่นคงที่เกี่ยวข้องกับการสร้างและรักษาความสงบในสามจังหวัดชายแดนภาคใต้

เนื่องจากการส่งมอบชิ้นงานมีความเกี่ยวข้องกับความมั่นคงทางการรักษาข้อมูลชั้นความลับ คณะผู้วิจัยจำเป็นต้องส่งมอบพร้อมการถ่ายทอดวิธีการเข้ารหัส เพื่อเป็นการดำเนินงานให้สอดคล้องกันทั้งสามเฟส คือเฟสที่หนึ่งการเข้ารหัสฟลิวส์ซึ่งได้รับทุนในปี 2553 และในเฟสที่สองทุนงบประมาณประจำปี 2554 ซึ่งก็คือเฟสนี้ เป็นการป้องกันการดักฟังทางโทรศัพท์ และเฟสที่สามในปีหน้า 2555 นั้น เป็นการวางพิคชูดั้มครองครูดด้วยเครือข่ายสื่อสาร 3G หรือเครือข่ายท้องถิ่นที่มีอยู่ จะนำส่งมอบชิ้นงานที่ได้พร้อม ๆ กันเพื่อความสะดวกในการดำเนินการ

อนึ่ง เนื่องจากโครงการนี้ เสมือนเป็นคาบสองคม การเขียนรายงานอย่างละเอียดอาจเสมือนชี้โพรงให้กระรอก เพราะอุปกรณ์การเข้ารหัสทางโทรศัพท์ หากตกอยู่ในมือของเครือข่ายชายาเสพติดหรือองค์กรจัดตั้งทางอาชกรรมย่อมเป็นโทษต่อสังคม เพราะการแกะรหัสเป็นไปได้ยากเพราะกระสวนอลวนที่ใช้ยังไม่เคยตีพิมพ์ที่ใดมาก่อน แม้ผู้เชี่ยวชาญคงต้องใช้เวลาเกือบปีในการแกะรหัส และเมื่อถึงเวลานั้น กระสวนก็กระโดด (hopping) เปลี่ยนแบบแล้ว ดังนั้น จึงไม่มีการเผยแพร่งานวิจัยในแนวนี้อย่างละเอียดในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา²⁵ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารสาธารณะ เท่าที่คณะผู้วิจัยสืบค้นดู มีเพียงการนำเสนอเพื่อหวังผลเชิงพาณิชย์เท่านั้น แต่ผู้วิจัยจะ
ซื้อได้ต้องผ่านระบบตรวจสอบหลายขั้นตอน เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว ในการนำเสนอผลงานจึงนำเสนอแบบ
ตัดช่วงต่อคือเสนอในส่วนที่เป็นทฤษฎีบริสุทธิ์สลับเทคนิคการสร้างสัญญา คังได้นำเสนอในวารสาร
นานาชาติที่ผลิตได้จากโครงการนี้ซึ่งขอขอบคุณ NRCT ใน Acknowledgement ดังเอกสารแนบที่ 2

4.2 ผลสัมฤทธิ์

- 4.2.1 ได้องค์ความรู้ในวิทยาการเข้ารหัสลับด้วยสัญญาณอวตวนที่ขาดต่อการถอดรหัสซึ่งสามารถเผยแพร่ใน
วารสารนานาชาติดังแสดงในเอกสารแนบที่ 2
- 4.2.2 ต้นแบบที่วิจัยได้สามารถนำไปใช้ในการสร้างความมั่นคงให้กับข้อมูลความลับในองค์กรเกี่ยวกับ
ความมั่นคงของชาติได้ทันทีในพื้นที่เป้าหมายดังแสดงในเอกสารแนบที่ 1
- 4.2.3 ผลงานที่ได้จากงานวิจัยเฟสที่แล้วนำไปต่อยอดขยายผลเป็นสิ่งประดิษฐ์และได้รับรางวัล
ต้นแบบยอดเยี่ยมทางโทรคมนาคม ปี 2553 จัดประกวดโดย TRIDI ซึ่งแจกรางวัลในเดือน
พฤศจิกายน 2553 ดังแสดงในเอกสารแนบที่ 3

บรรณานุกรม

- [1] E. N. Lorenz, "Deterministic non-periodic flow," *J. Atmospheric Science*, vol. 20, pp. 130-141, 1963.
- [2] O.E. Rössler, "An equation for continuous chaos," *Phys. Lett. A*, vol. 57, pp. 397-398, 1976.
- [3] O.E. Rössler, "An equation for hyperchaos," *Phys. Lett. A*, vol. 71, pp. 155-157, 1979.
- [4] G. Chen and X. Dong, *From Chaos to Order: Methodologies, Perspectives and applications*, World Scientific, Singapore, 1998.
- [5] L.O. Chua, M. Komuro and T. Matsumoto, "The double scroll family," *IEEE Trans Circuits Syst.*, vol. 33, pp. 1072-1118, 1986.
- [6] T. Matsumoto, L.O. Chua and K. Kobayashi, "Hyperchaos: laboratory experiment and numerical confirmation," *IEEE Trans Circuits Syst.*, vol. 33, pp. 1143-1147, 1986.
- [7] L.M. Pecora and T.L. Carroll, "Synchronization in chaotic systems," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 64, pp. 821-823, 1990.
- [8] K.M. Cuomo and A.V. Oppenheim, "Circuit implementation of synchronized chaos with applications to communication," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, pp. 65-68, 1993.
- [9] T. Yang, C.W. Wu and L.O. Chua, "Cryptography based on chaotic systems," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I: Fundam. Appl.*, vol. 44, pp. 469-472, 1977.
- [10] M. Itoh, "Spread spectrum communication via chaos," *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 9, pp. 155-213, 1996.
- [11] M.E. Yalçın, J.A.K. Suykens and J. Vandewalle, "True random bit generation from a double scroll attractor," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I*, vol. 51, pp. 1395-1404, 2004.
- [12] G. Chen, and T. Ueta, "Yet another chaotic attractor," *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 9, pp. 1465-1466, 1999.
- [13] J. Lü, G. Chen, D. Cheng and S. Čelikovský, "Bridge the gap between the Lorenz system and the Chen system," *Int. J. Bifurcation Chaos*, vol. 12, pp. 2917-2926, 2002.
- [14] A.S. Elwakil, S. Özogus and M.P. Kennedy, "Creation of a complex butterfly attractor using a novel Lorenz-type system," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I*, vol. 49, pp. 527-530, 2002.
- [15] J.C. Sprott, "Simple chaotic systems and circuits," *Am. J. Phys.*, vol. 68 pp. 758-763, 2000.
- [16] J.A.K. Suykens, A. Huang and L.O. Chua, "A family of n -scroll attractors from a generalized Chua's circuit," *AEU. Int. J. Electron. Commun.*, vol. 51, pp. 131-138, 1997.
- [17] K.S. Tang, G.Q. Zhong, G. Chen and K.F. Man, "Generation of n -scroll attractors via sine function," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I*, vol. 48, pp. 1369-1372, 2001.
- [18] Y. Li, W.K.S. Tang and G. Chen, "Hyperchaos evolved from the generalized Lorenz equation," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 33, pp. 235-251, 2005.
- [19] A. M. Chen, J. A. Lu, J. Lü and S. M. Yu, "Generating hyperchaotic Lü attractor via state feedback Control," *Physica A*, vol. 364, pp. 103-110, 2006.
- [20] S. M. Yu, J. Lü and G. Chen, "A family of n -scroll hyper-chaotic attractors and its realizations,"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา²⁷ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Phys. Lett. A*, 2007, vol. 364, 244-251, 2007.
- [21] 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.
- [22] A. Jansri, K. Klomkarn an P.Sooraksa, "Further investigation on trajectory of chaotic guiding signals for robotic systems," *Proc. Int. Symp. IEEE Communications and Information Technology*, pp.1166 – 1170, 2004.
- [23] A.Jansri, K. Klomkarn and P. Sooraksa, "On comparison of attractors for chaotic mobile robots," *Proc. IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2536 – 2541, 2004.
- [24] K. Klomkarn and P. Sooraksa, "Implementation on "NO CPU" Chaotic robot," *Proc. the 5th Asian Symposium on Applied Electromagnetics and Machanics*, 2005.
- [25] C. Chanvech, K. Klomkarn and P.Sooraksa, "Combined Chaotic Attractor Mobile Robots," *Int. Joint Conf. SICE-ICASE*, pp. 3079 – 3082, 2006.
- [26] S. Sakornantant, K. Klomkarn, T. Thossansin, and P. Sooraksa, "Chaotic Mixing Biodiesel," *Inter. Conf. on Applied Science*, Vientiane, Loas, 2006.
- [27] US pat.597412 (Oct , 1999)
- [28] US pat.6266418 (Jul , 2001)
- [29] US pat.6856687 (Feb , 2005)
- [30] US pat.6907123 (Jun , 2005)
- [31] US pat.7003329 (Feb, 2006)
- [32] US pat.7210044 (Apr , 2007)
- [33] Sooraksa, P. and Klomkarn, K., An Authentication Device, World Intellectual Property Organization, WO 2008/044998 A1.



เอกสารแนบหมายเลข 1 (ภาคผนวก 1)

การประกอบและทดสอบต้นแบบขั้นสุดท้าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

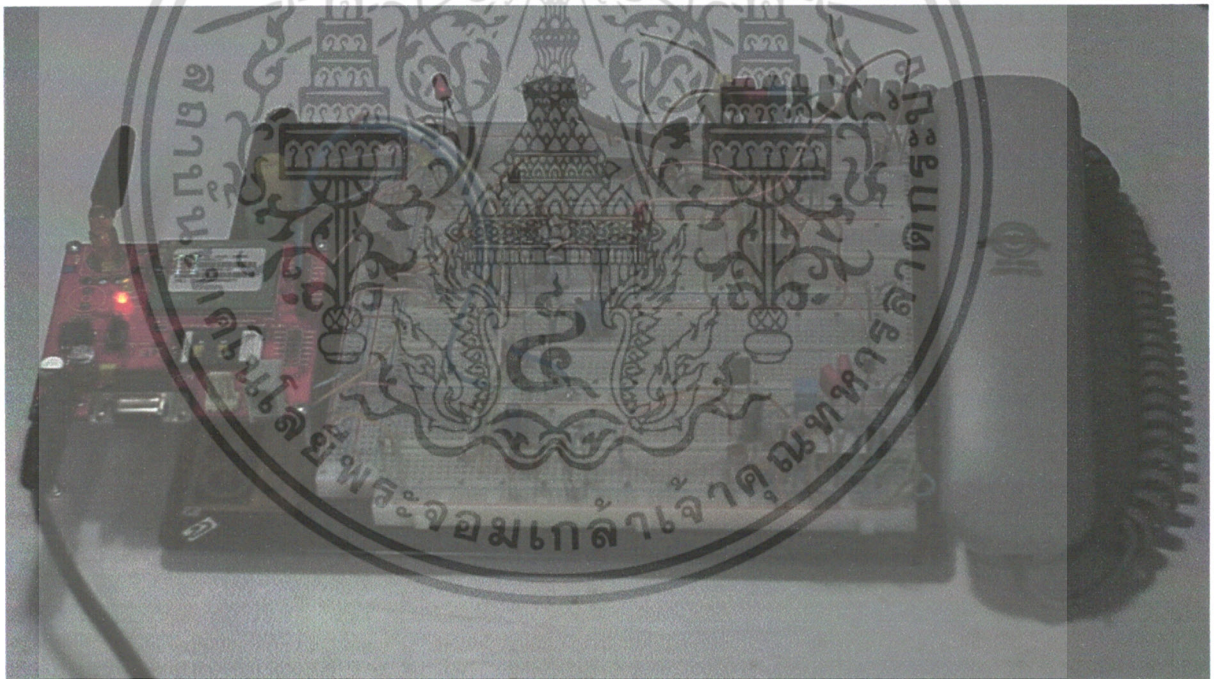
ภาคผนวก 1: การประกอบและทดสอบต้นแบบขั้นสุดท้าย

ก. เป้าหมาย

เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบสำเร็จพร้อมใช้

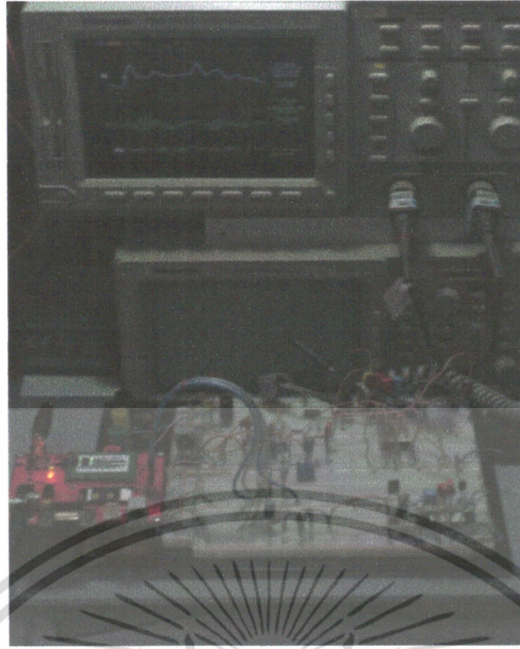
ข. ผลการทดลอง

ได้นำแบบวงจรในไตรมาสที่แล้ว มาทำการสังเคราะห์สัญญาณคลื่นและเชื่อมต่อกับ โทรศัพท์ซึ่งประกอบชิ้นส่วนและวงจรขึ้นเอง ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 1-9

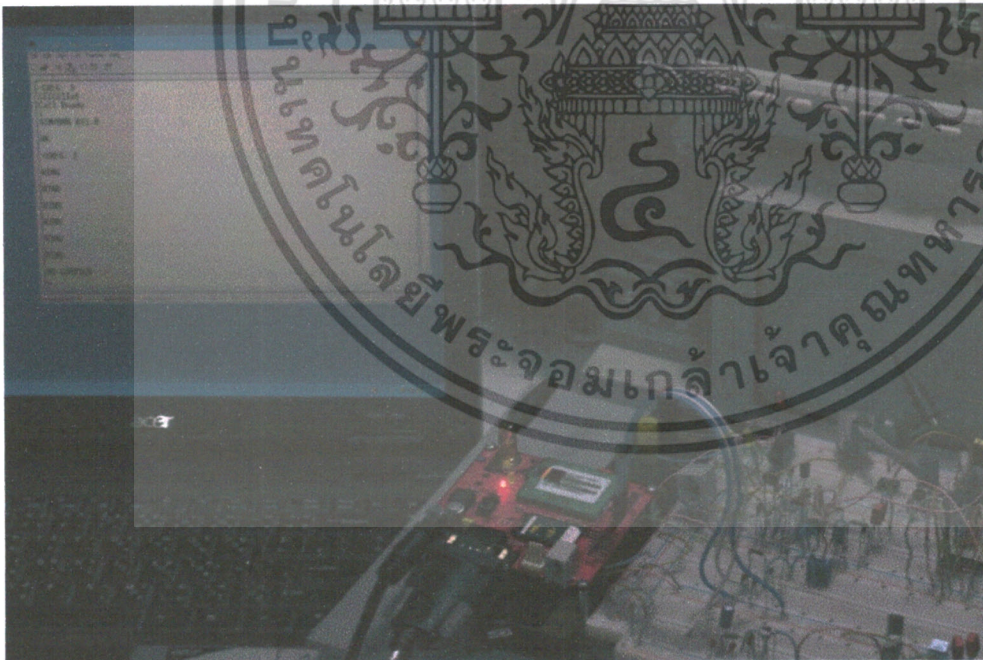


รูปที่ ๑.1 วงจรจากบอร์ดทดลองในห้องปฏิบัติการก่อนทำการกัดลงแผ่น PCB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๒.2 การทดลองวัดสัญญาณจากวงจรเข้ารหัสลับเสียง โดยผ่านระบบ GSM



รูปที่ ๒.3 การทดลองเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์โดยจำลองเป็นเครือข่าย GSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Test_gsm - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
+CPIN: READY
+CREG: 0
+CREG: 2
Call Ready
+CREG: 1
RING
RING
RING
RING
RING
RING
ata
OK
Connected 0:01:37 Auto detect 115200 8-N-1 SCROLL CAPS NUM Capture Print echo

```

รูปที่ ๓.๔ การเรียกสัญญาณเข้าและการรับสายผ่านการทดสอบ

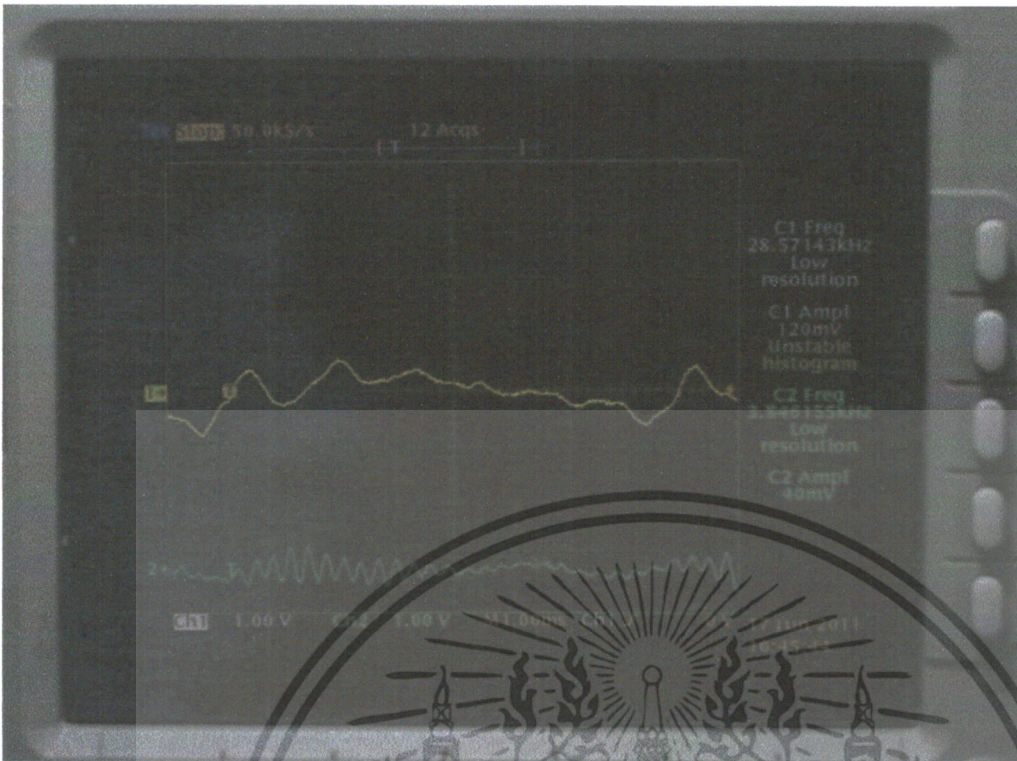
```

Test_gsm - HyperTerminal
File Edit View Call Transfer Help
IIIIIIII
RDY
+CFUN: 1
+CPIN: READY
+CREG: 0
+CREG: 2
Call Ready
+CREG: 1
ATD0884555555:
OK
ATH
OK
Connected 0:06:43 Auto detect 115200 8-N-1 SCROLL CAPS NUM Capture Print echo

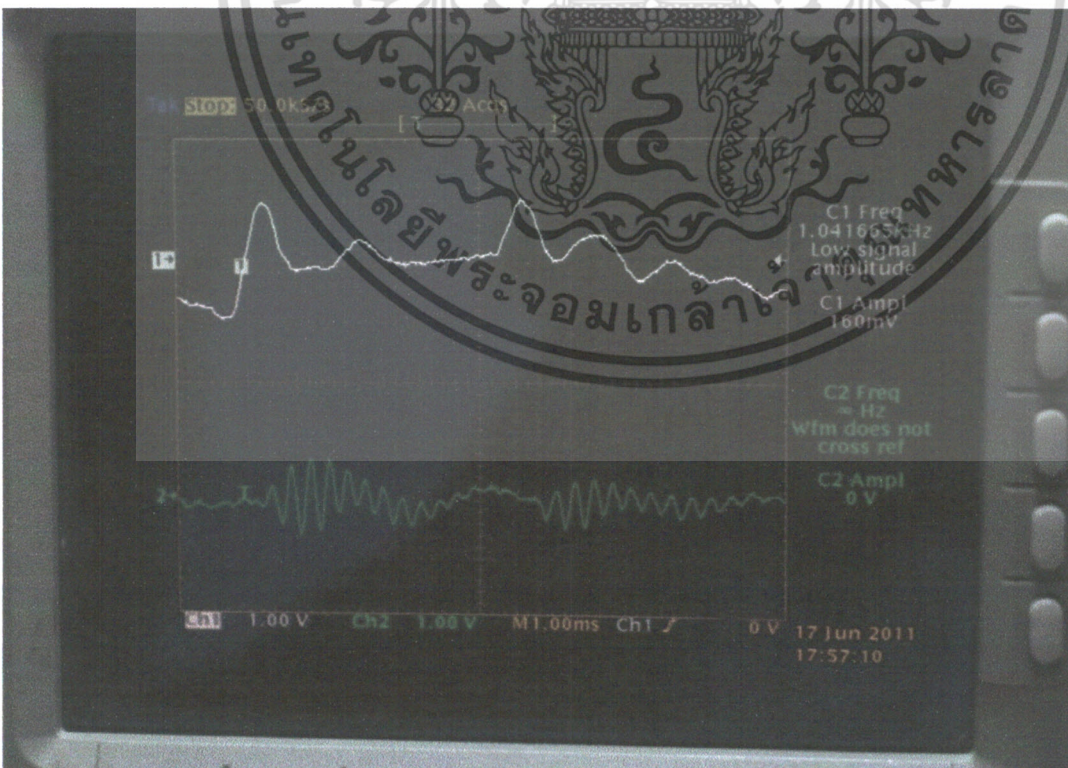
```

รูปที่ ๓.๕ การโทรออกและการวางสายผ่านการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

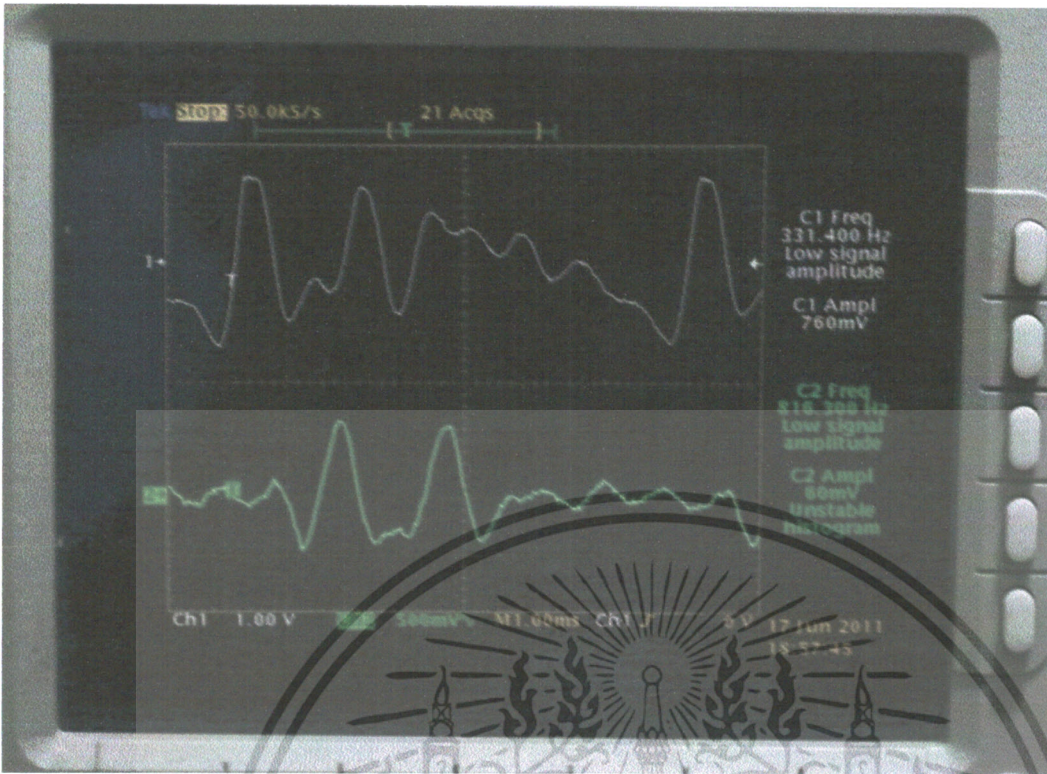


รูปที่ ๖.6 สัญญาณเสียงเข้า และเสียงที่ถูกเข้ารหัส



รูปที่ ๖.7 สัญญาณเสียงเข้า และเสียงออกที่ไม่ถูกถอดเข้ารหัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



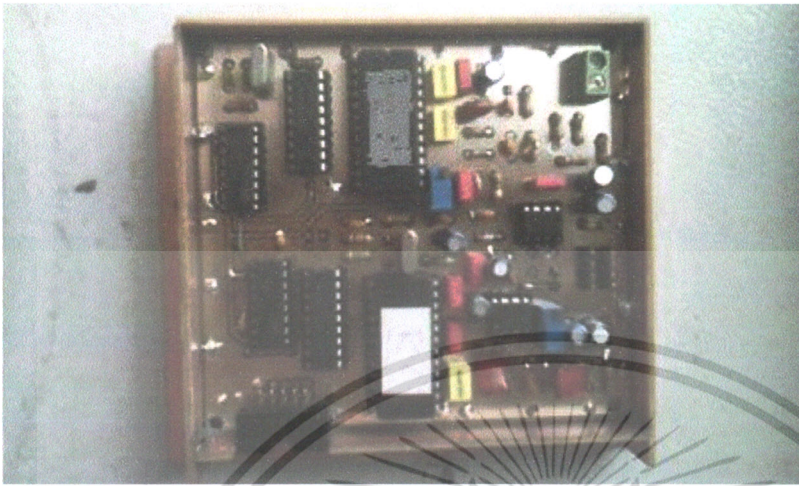
รูปที่ ๘.๘ สัญญาณเสียงเข้า และเสียงออกที่บายพาสผ่านวงจร



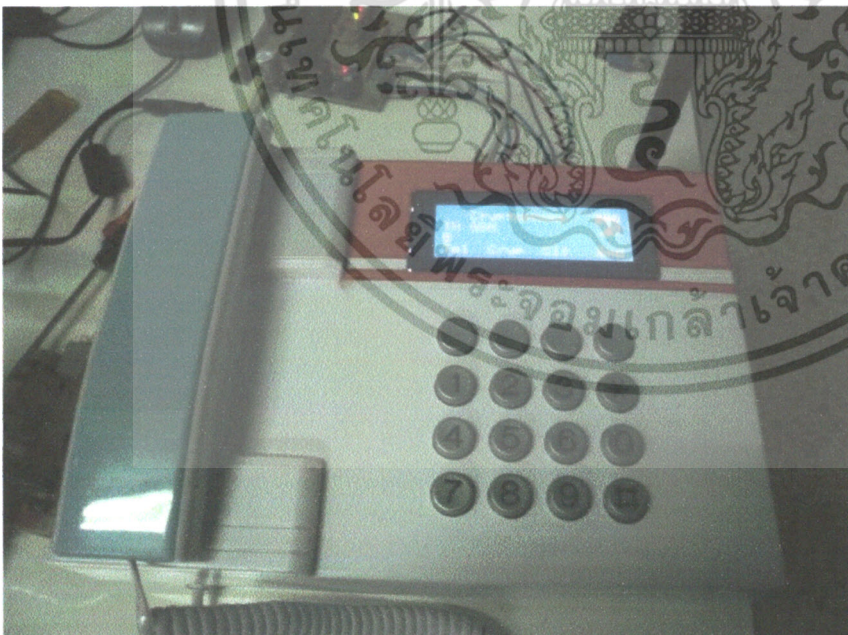
รูปที่ ๘.๙ สัญญาณเสียงเข้า และเสียงออกที่ถอดรหัสผ่านวงจร จะเห็นว่าสัญญาณพอใช้ได้ แต่จะดีขึ้นเมื่อต่อวงจรกรองสัญญาณรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. การทำต้นแบบ



รูปที่ ก.10 วงจรเข้ารหัสลับสัญญาณเสียงและวงจรถอดรหัสหลังลงแผ่น PCB



รูปที่ ก.11 ต้นแบบชุดที่ 1 คู่มือย้ายชุดโทรศัพท์ตั้งโต๊ะ แต่เป็น GSM เคลื่อนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ ๑.12 ต้นแบบชุดที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารแนบหมายเลข 2
ผลงานที่ได้รับการตอบรับให้ตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสาร
International Journal of Bifurcation and Chaos (IJBC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



SIMPLE SELF-INSTRUCTIONAL MODULES BASED ON CHAOTIC OSCILLATORS: FEW BLOCKS GENERATING MANY PATTERNS

KITDAKORN KLOMKARN* and PITIKHATE SOORAKSA†

*School of Computer Engineering, Faculty of Engineering,
King Monkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*

**kkkitdak@kmitl.ac.th*

†kspitikh@kmitl.ac.th

Received May 20, 2010; Revised February 23, 2011

Chaotic circuits have been widely used in the teaching of nonlinear dynamics disciplines, where a common practice is pedagogically based on the circuit point of view. Chua's circuit is the most popular platform for the demonstration of its components with rich dynamical patterns. However, engineering students majoring in control systems are more familiar with feedback systems rather than physical electronics with nonlinear components. This may lead to some difficulty in understanding the nonlinear properties of Chua's circuit, at least on first sight. This paper provides an alternative approach to teaching and learning chaotic oscillators by using the inherent understanding of feedback systems with simple modules at the undergraduate level. Utilizing the idea of chaotification, which means to make a nonchaotic module chaotic, the modules consist of only four blocks yet can generate more than thirty types of chaotic patterns via their various combinations. Conceptually, the blocks can be assembled as various mixed-mode chaotic circuits. Functionally, the blocks are easy-to-use in a Simulink-like fashion. Structurally, they are a LEGO-like educational kit. With low-cost implementation employing a few op-amps for each block, the newly proposed modules are simple, self-instructional and suitable for teaching and training students in school laboratories and in experimental environments.

Keywords: LEGO; Simulink; education; chaotic oscillator; mixed-mode circuit.

1. Introduction

Exploiting chaos properties for applications in sciences is an interesting research topic in engineering community especially in various fields of electrical engineering. In electronic systems, the complex noise-like property is used to improve electromagnetic interference (EMI) in power convector [Hong *et al.*, 2010] and can be applied as testing signals both for analog and mixed-mode circuits [Ma *et al.*, 2008; Addabbo *et al.*, 2010]. In control engineering, the generated chaotic signal is utilized in path planning for mobile robots [Sooraksa & Klomkarn, 2010], enhancing the motion capability

of walking micro-robots [Buscarino *et al.*, 2007], and increasing efficiency of industrial liquid mixing processes [Zhang & Chen, 2007].

In computer and information engineering, the rich variety of dynamical behaviors can be served as a random source of cryptography [Yalcin *et al.*, 2004], and be exploited for a pattern generator in chaos computing [Ditto *et al.*, 2008]. In communication engineering, synchronized property is a great source producing potential applications for radar [Liu *et al.*, 2007] and secure communication [Tam *et al.*, 2006].

As far as the above applications are concerned, the study of chaotic dynamics for the undergraduate

majoring in electrical engineering has become important and is a powerful tool to transform fundamental knowledge into chaotic products for creative economy. A question is how to give lecture and set up a laboratory experiment such that a concept of design and construction chaos is clear, concise, and coherent with engineering nature. Starting from the engineering point of view, the design and construction of chaotic circuit as major building tool boxes for the applications are practical in order to introduce the student to understand chaotic dynamics and related behaviors. In [Tam *et al.*, 2006], a chaotic oscillator for education purpose is presented by introducing the third-order autonomous chaotic oscillator modified from a formal sinusoidal oscillator. Although the circuit contains a few elements, easy-to-build and simple-for-measurement, it only exhibits a single scroll attractor. To obtain a variety of chaotic dynamical behaviors, the well-known Chua's circuit is an excellent example, it is a useful education tool for high school students to learn and play creating fascinating music and amazing arts from the chaotic attractor [Bilotta *et al.*, 2010]. For a computer based laboratory setup at undergraduate student level, PC Chua [Törres *et al.*, 2005] that demonstrates control and synchronization by a personal computer, is proposed. For an intensive study and implementation, the practical guide to construct Chua's circuit in Field Programmable Analog Array: FPAA, presenting mix-mode chaos and guiding to laboratory setup, can be found in the monograph [Kiliç, 2010].

However, Chua's circuit concept lies on a circuit based design. The circuit consists of a nonlinear negative resistor and passive components such as resistors, capacitors and requires one inductor. For a student, when conducting a hands-on laboratory experiment, starting with the circuit is easy when constructing but may be difficult in re-scaling frequency. In addition, for those who are beginners, the circuit does not easily realize a suitable inductor without prior knowledge of an equivalent gyrator. Trying to understand behaviors of a nonlinear element in the circuit without a background in physical electronics or electromagnetics may be a bit of a challenge.

In fact, the students are already familiar with the second-order linear system in fundamental engineering courses such as differential equation, signal and systems, automatic control or feedback control. Embracing the concept of the second-order one, and extending by adding one more integrator

to the system, a chaotic system can be achieved by applying the Poincare Bendixson theorem [Hirsh & Smale, 1974]. The theorem states a necessary condition for an n -dimensional continuous vector field to be chaotic; to obtain such a system, n must be greater or equal to 3. Adopting this concept, the construction of a chaotic circuit in the laboratory becomes simple when a lecturer starts teaching with a background concept of the second-order system, and then extending to the third-order nonlinear system with Poincare Bendixson theorem. In other words, a chaotic system can be obtained by chaotification transforming the second-order ordinary system to be the third-order chaotic system with a feedback loop [Tang & Zhong, 2003]. To visualize the chaotic dynamical behaviors throughout the chaotification process, before carrying out an experiment, students are encouraged to use graphical software such as MATLAB/Simulink [Chaturvedi, 2010] to simulate chaotic systems.

This paper presents an alternative approach to enhance the effectiveness of laboratory pedagogy by using chaotification approach instead of introducing Chua's circuits to undergraduate students for the construction and understanding of chaotic phenomena. To achieve this objective, the functional level electronic design as module based chaotic circuit introduced in [Yu *et al.*, 2007] is adopted. In [Yu *et al.*, 2007], the module provides three-scroll and butterfly attractor scrolls. Unlike [Yu *et al.*, 2007], instead of using multiplier device in nonlinear modules, we adapt the module by using simple nonlinear devices designed as Simulink-like function blocks with only four simple blocks and three external sources. Structurally the four blocks have a LEGO-like structure consisting of a core module possessing the property of the second-order linear system, an auxiliary module having an extended integrator and two nonlinear modules. Possible combination of selecting elements out of the four provides four main chaotic models and various chaotic mixed-mode attractors ranging from a single scroll to complex scroll chaotic attractors. Apparently more than 30 chaotic patterns are obtained.

This paper is organized as follows. In Sec. 2, three autonomous chaotic systems and two nonautonomous chaotic systems used in the experiment are reviewed. Providing both pulse and sine drives for the nonautonomous system in this paper can be considered as some extension of the past research illustration of module-based chaotic circuits design. In other words, the multiscroll patterns generated

by a sine wave drive is fulfils the gap of missing members in the collection of complete modules. This point alone is one of the contributions by the authors besides creating the new educational kit. Four main models derived from typical forms of chaotic equations are also briefly illustrated. Some example of Simulink model and the simulation results are provided as well. In Sec. 3, the electronic circuits implemented in each module are explained. A combination of utilizing the modules from the models for generating a chaotic attractor is demonstrated in Sec. 4, while the results are shown in Sec. 5. Section 6 concludes the paper.

2. System Models

In this section, a brief review of four typical chaotic forms called system equations or system models is presented as a basic guideline for the study. A family of chaotic signals can be easily generated by varying the parameters of the model and combining them. From system perspective, each model can be viewed as a block library containing designed parameters. The main models are presented as follows.

2.1. Model I: The third-order autonomous chaotic system I

In order to construct a third-order circuit with nonlinear feedback concept for laboratory experiment, a family of simple chaotic circuits can be written in a single third-order ordinary differential equation called “jerk equation,” introduced by Sprott [2000]. The families of the simple Sprott’s circuit using a few operational amplifiers (OAs) and simple nonlinear elements, provided single or double-scroll attractors, are easy to construct. To realize a simple Sprott’s circuit, [Elwakil & Kennedy, 2001] shows that integrator summer architecture with the signum function as a nonlinear feedback can be realized to generate double scroll-like chaotic attractors. To increase the number of scroll attractors from the jerk architecture, generating a grid scroll chaotic attractor using hard limit series as nonlinearity was suggested by [Yalcin *et al.*, 2002]. For another implementation to increase the complexity of the attractor, YU and others [Yu *et al.*, 2005] proposed a nonlinear modulating function to generate n -scroll attractors. However, generating double scroll and complex scroll from the general jerk

or the modified general jerk circuit as appeared in [Elwakil & Kennedy, 2001; Yalcin *et al.*, 2002] using the relatively expensive current conveyor were exploited. And in [Yu *et al.*, 2005], the coefficients of the linear circuit require on adjustment of precision, not being easy to realize in the laboratory experiment at an undergraduate level.

In this paper, we simplify the construction of the third-order autonomous chaotic system which can obtain a wide range of chaotic signals from a single scroll to complex scrolls by only jumping the connectors and adding an external driving function in the laboratory test bed. The proposed model, Model I, is specified as follows:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & a & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_p(t) \\ 0 \\ f(x) + x_p(t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

where $f(x) = a$ nonlinear function, a is the rate of divergence of an unstable system, and $x_p(t)$, $y_p(t)$ are optional external driving pulse functions.

The system equation (1) consists of the third-order linear system, a nonlinear element and driving pulses. In linear system, states x and y are the second-order unstable subsystems. Adding the state as a hyperplane, the third-order nonlinear dynamical system in (1) is dissipative, and has a negative eigenvalue and a pair of complex conjugates with positive real part. The equilibrium point $(0, 0, 0)$ is an index-2 spiral-saddle point. Since the system is unstable on the x - y plane, the trajectory scrolls are away from the equilibrium point. To fold the trajectories, nonlinear elements in Eqs. (2a)–(2d) can be employed. In Model I, the Heaviside function in Eq. (2a) is applied to obtain a single scroll, while the signum function in Eq. (2b) and the hysteresis function in Eq. (2c) are enforced to generate double scrolls. To assign single or double scroll, the saturating function in Eq. (2d) can be used for generating chaotic signals by threshold control [Lü *et al.*, 2008]. The method is as simple as adjusting the gain of the amplifier in the system. To generate multi-scroll attractors, the staircase function in Eqs. (2e₁) and (2e₂) together with external driving pulse functions $x_p(t)$ and $y_p(t)$ are used to alter the equilibrium of the system. All nonlinear functions used herein are summarized as:

$$H(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ 0 & x < 0 \end{cases} \quad (2a)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

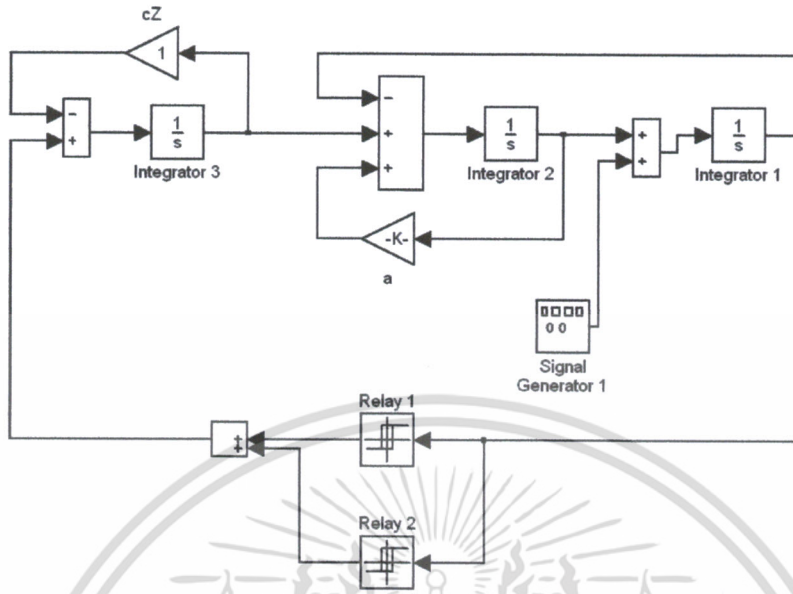


Fig. 1. Simulink model of the third-order autonomous chaotic system I, Model I, with the staircase function using Eq. (2e₁).

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x \geq 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (2b)$$

$$\text{hys}(x) = \begin{cases} +1 & -1 < x < \infty \\ -1 & -\infty < x < 1 \end{cases} \quad (2c)$$

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1 & x > L \\ kx & |x| < L \\ -1 & x < -L \end{cases} \quad (2d)$$

where $L = |x/k|$, k is amplifier gain,

$$f(x) = 2\{\text{sgn}(x + v_1) + \text{sgn}(x - v_1)\} \quad (2e_1)$$

$$f(x) = \{\text{sgn}(x) + \text{sgn}(x + v_1)\text{sgn}(x - v_1)\} \quad (2e_2)$$

and v_1 is the reference voltage associated with the creation of the new equilibrium. In order to explain the relative structure between Simulink models and the module based chaotic oscillators, Fig. 1 gives an example of Simulink model for the simulation of Model 1. Based on our experiences, the students can use the nonlinear function in Eq. (2e₁) with the external driving signal to generate a 6-scroll chaotic attractor. We encourage the reader to simulate and figure out the parameters to obtain such a system as a good exercise. Note that, in the simulation model, integrator, amplifier and summing building blocks are provided and some of the nonlinear functions such as the signum and the saturation building blocks can be selected from the math operation and discontinuity block library of Simulink.

The Heaviside and the hysteresis functions can be setup from the relay block diagram.

In Fig. 1, the nonlinear equation (2e₁) is represented by summing output Relays 1 and 2 in which parameter setup is shown in Table 1, the amplitude and frequency of $y_p(t)$ is ± 1 and 0.2 rad/s, the simulation result of the Simulink model is depicted in Fig. 2(c). To illustrate more effects on selecting the nonlinear functions, Figs. 2(a) and 2(b) show simulation results of system equation (1) with the Heaviside and the signum function, respectively. As can be seen from the figures, choices of nonlinearity alter the equilibrium and folding patterns of the trajectories. All simulations set parameter a representing the rate of divergence of an unstable system equal to 0.085.

2.2. Model II: The third-order autonomous chaotic system II

In the previous subsection, we investigate that using the signum function in Model I, the state space of

Table 1. Setup parameter for relays of the Simulink model in Fig. 1.

Relay	SW On Point	SW Off Point	O/P When On	O/P When Off
1	2	2	4	0
1	2	2	4	0

Note that O/P stands for outputs.



Fig. 2. Simulink simulation results of Model I: (a) with the Heaviside function, (b) with the signum function, (c) with the staircase function ($2e_1$).

the system is divided into two subsystems by separating in parallel to the z -axis. Applying the outcome by extending the one-dimensional z -axis onto the two-dimensional x - z plane and using a similar approach, the third-order chaotic system of the modified type can be expressed as

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & a & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_p(t) \\ f(x+z) \\ f(x+z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

where $f(x+z)$ is a nonlinear function, $y_p(t)$ is an optional external driving pulsed signal. To generate double scrolls, we set $f(x+z)$ as the signum

function of Eq. (2b). In similar manner, the multi-scroll chaotic attractors can be obtained by using

$$f(x+z) = 2\{\text{sgn}(x+z+v_1) + \text{sgn}(x+z-v_1)\} \quad (4a)$$

$$f(x+z) = \frac{1}{2}\{\text{sgn}(x+z) + \text{sgn}(x+z+v_1) \times \text{sgn}(x+z-v_1)\}. \quad (4b)$$

The staircase functions in Eqs. (4a) and (4b) are modified from the staircase functions in Eqs. (2e₁) and (2e₂) with scaling factor 1/2.

Note that the eigenvalues of Model II possess the same property as those of Model I, except the

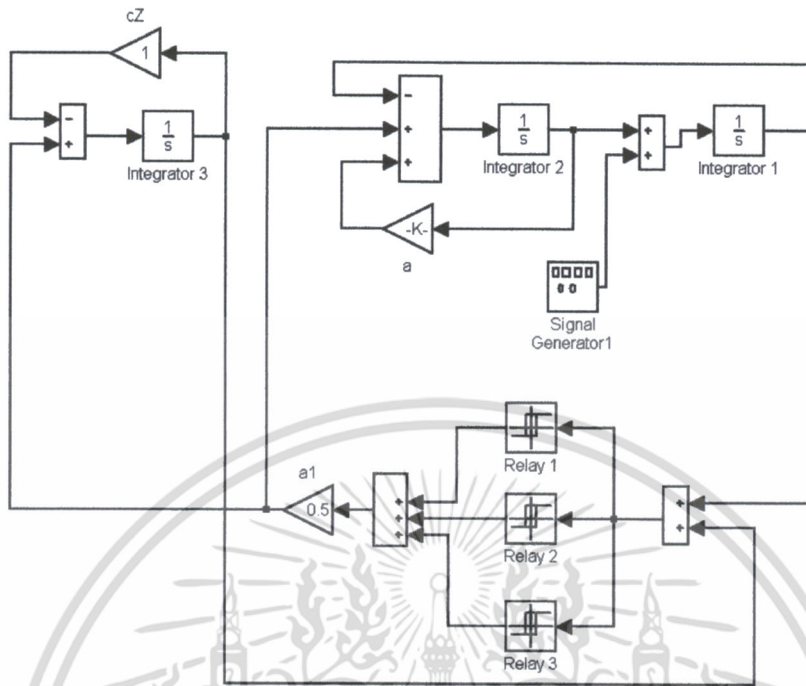


Fig. 3. Simulink model of the third-order autonomous chaotic system II, Model II, with the staircase function (4a).

system has coupled the state z by feeding it back to the nonlinear function. In simulation, Simulink model of Model II employing the nonlinear function (4b) with the external driving signal $y_p(t) = \pm 0.5$ is illustrated in Fig. 3. The summing of signal outputs of Relays 1–3 with scaling 1/2 are obtained corresponding to the nonlinear function in Eq. (4b). Setup parameters for the relays are shown in Table 2.

An 8-scroll chaotic attractor obtained from the system in Fig. 3 is shown in Fig. 4(b). A simplified version of the nonlinear function as the signum function $f(x+z)$ can be shown by the double-scroll pattern in Fig. 4(a).

2.3. Model III: The second-order autonomous chaotic system

To demonstrate a simple chaotic oscillator, the second-order autonomous chaotic system is

Table 2. Setup parameter for relays of the Simulink model in Fig. 3.

Relay	SW On Point	SW Off Point	O/P When On	O/P When Off
1	0	0	1	-1
2	2	2	2	0
3	-2	-2	0	-2

exploited and the state equation can be described as:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}' \\ \dot{y}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ hys(x) \end{bmatrix} \quad (5)$$

where $hys(x)$ is the hysteresis function and a is the rate of divergence of an unstable system which equals to 0.085.

This system is proposed in [Cook, 1985] and has a simple structure. A detailed study of chaotic behaviors corresponding to Model III is presented in [Moreno *et al.*, 2001]. The model consists of an unstable second-order linear system with a hysteresis feedback. This linear system has complex conjugate eigenvalues on the right-half plane (RHP) with two unstable focuses on the x - y plane providing a stretch mechanism for the dynamic trajectory. The hysteresis element can be used as a switch or folding mechanism to excite the trajectory to another unstable plane. Since the model is obviously a simple system, computer simulation is not provided in this subsection. The readers are referred to [Cook, 1985; Moreno *et al.*, 2001] for more information. However, experimental results corresponding to Model III are given in Sec. 4. It is worth noting that, during a laboratory class, the lecturer may mention about the hardware realization corresponding to this model which may be simple as a flip-flop with two comparators forming a memory.

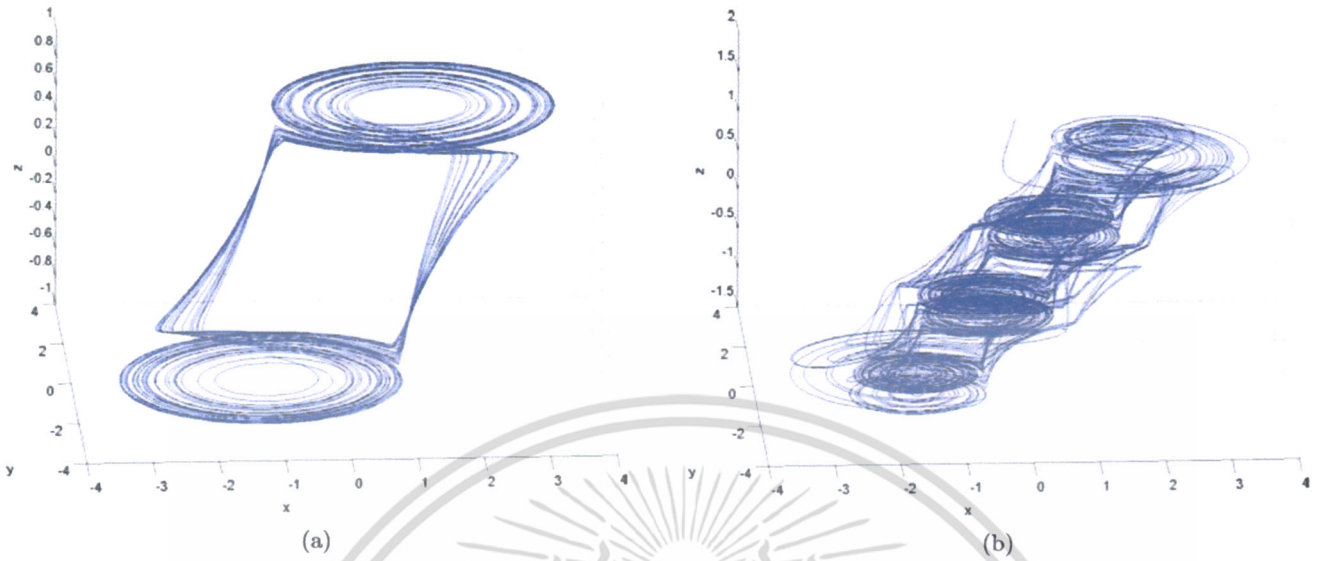


Fig. 4. Simulation results of Model II: (a) with the signum function, (b) with the staircase function (4b).

2.4. Model IV: The nonautonomous chaotic oscillator

In the previous subsections, all models are autonomous types. This subsection presents Model IV which is a nonautonomous chaotic oscillator. To generate a chaotic attractor from a nonautonomous system, the system consists of the second-order linear circuit and a nonlinear element in the feedback loop is driven by time-varying sinusoidal signal [Mykolaitis *et al.*, 2000]. The system is realized by a comparator as the signum function [Mykolaitis *et al.*, 2000] implying the potential application in secure communication [Milioua *et al.*, 2007]. A different approach in realizing the system can be achieved by exploiting a saturating amplifier as a threshold controller for the nonlinear element [Mohamed *et al.*, 2010].

To model the module based chaotic oscillator, the nonautonomous chaotic oscillator system is constructed by using the equation:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f(x) \\ f_s(\omega t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

where $f_s(t)$ can be selected as sinusoidal or periodic pulse driving signals with angular velocity ω .

The system equation (6) consists of the second-order stable linear system with a sign function in the feedback loop driven by the sinusoidal signal. The system can generate a double-scroll chaotic attractor. We can also modify the system to obtained multiscrolls by using the nonlinear function as described in Eqs. (2e₁) and (2e₂).

In [Ozoguz & Elwakil, 2004], the sinusoidal force is replaced by pulse excitation and can be proved that strange attractors exist in the system. This can be done by adding the sign for a nonlinear transistor. The nonautonomous chaotic system illustrated in Eq. (6) is a dissipative system and can be analyzed as the fourth-order autonomous chaotic system by transforming the sinusoidal and pulse forcing functions into a second-order system.

To demonstrate some simulation examples, Simulink model of Model IV with sinusoidal driving signal that exploit the nonlinear function in Eq. (2e₂) having parameters as in Table 1 is shown

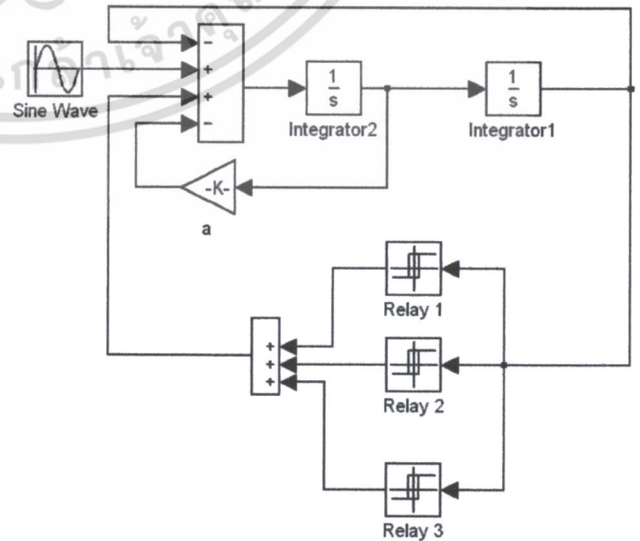


Fig. 5. Simulink model of the nonautonomous chaotic system, Model III, with the staircase function using Eq. (2e₂).

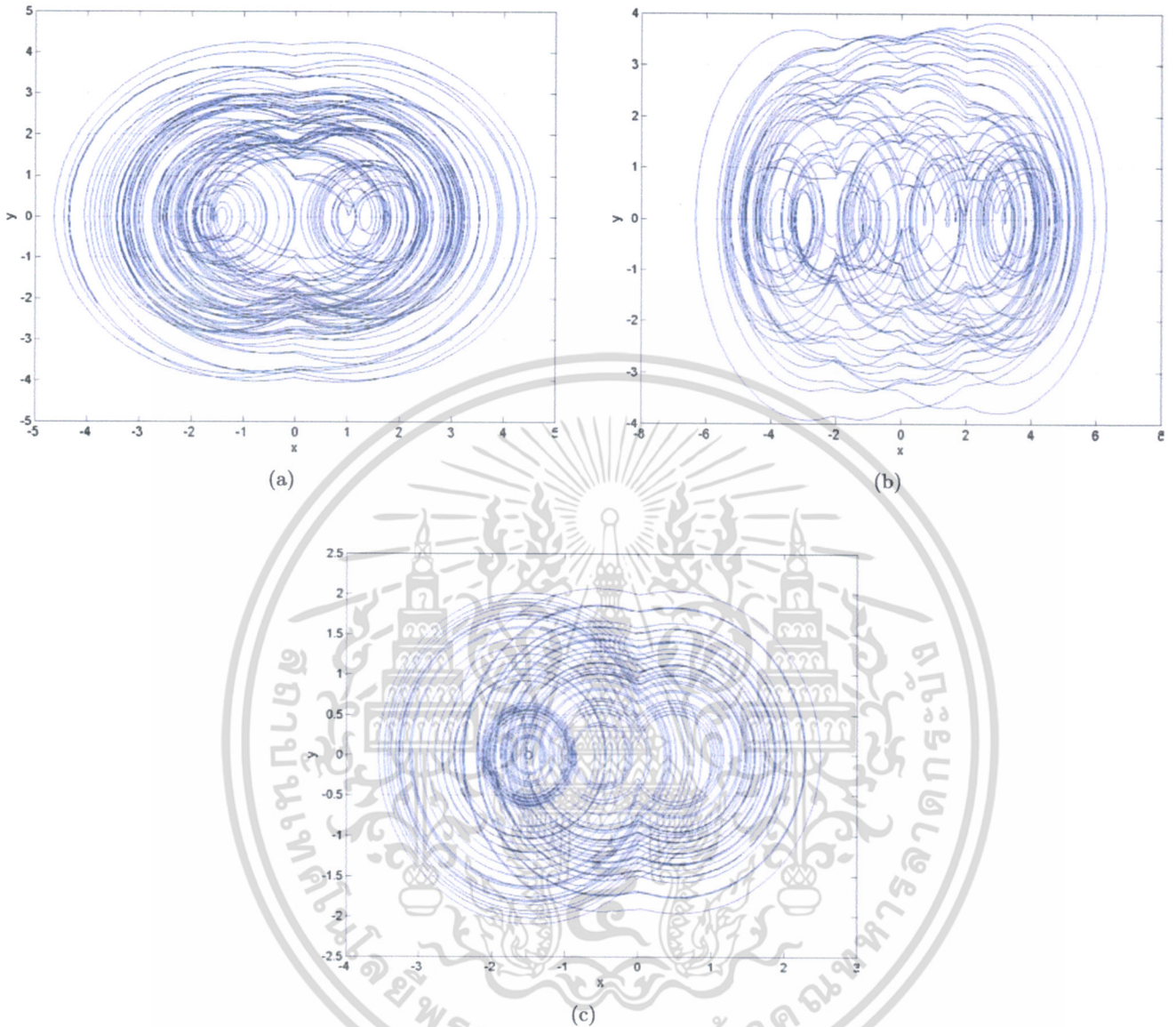


Fig. 6. Simulation results of the nonautonomous chaotic system, Model IV: (a) with the signum function driven by sinusoidal signal, (b) with the staircase function (4b) driven by sinusoidal signal, (c) with the Heaviside function driven by pulse signal.

in Fig. 5, where the simulation result is shown in Fig. 6(b). The damping coefficient of second-order system is -0.025 and the amplitude and frequency of the sinusoidal wave are 1 and 1.1 rad/s, respectively. For the case of using the signum function as the nonlinear element with sinusoidal driving signal, a double-scroll attractor in Fig. 6(a) is obtained. Figure 6(c) shows the use of the Heaviside function and pulse driving signal with setup amplitude and frequency equal to $\pm 0.5, 0.2$ rad/s, respectively. We will see later that the simulation results obtained in this section agreed with experimental results by using the modules in the next section.

3. Circuit Modules

Instead of starting from circuits to systems, our approach in this section is for a top down designed educational material — from systems to circuits. According to Gestalt psychology [Gray, 2010], we realize that the learning perception is best understood as an organized whole pattern rather than as separate parts. In this section, we describe how to design and construct circuit modules based on the guideline of the system models in the previous section.

From Simulink diagrams, the main block diagrams in Figs. 1–3 are the second-order linear

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

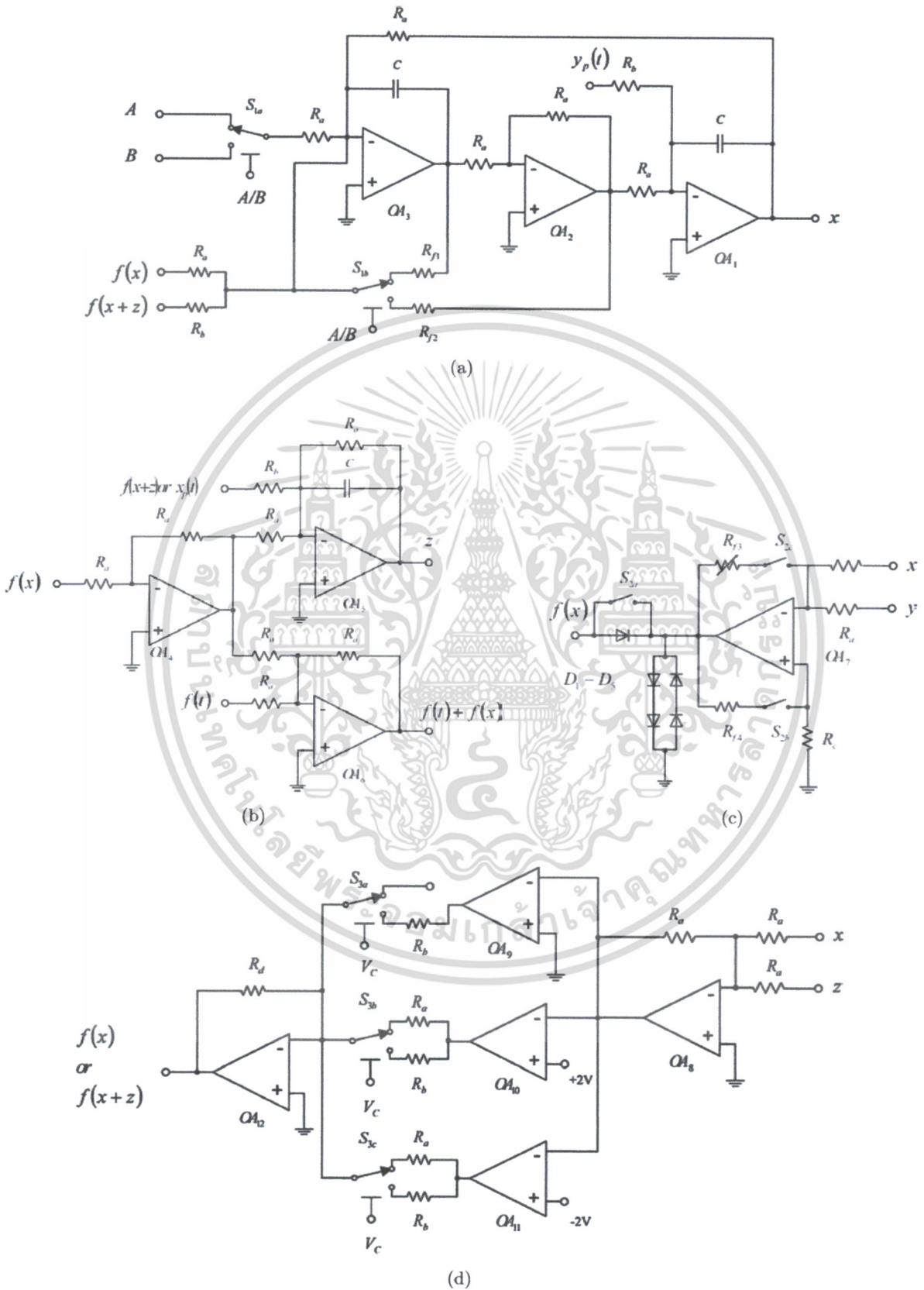


Fig. 7. Experiment modules: (a) Module A: The two-integrator loop module, (b) Module B: The extended integrator module, (c) Module C: The programmable nonlinear function module, (d) Module D: The staircase function module.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตให้เสียประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

system consisting of two integrators and feedback coefficient amplifiers. For an autonomous chaotic system in Figs. 1 and 2, the third integrator is used to extract the third-order linear system. For each simulation in the previous section, the nonlinear block is assigned by using Eqs. (2a)–(2d) to obtain a single scroll or double scroll. Similarly, Eqs. (2e₁), (2e₂), (4a) and (4b) are assigned to obtain a multi-scroll chaotic attractor.

Therefore in the experimental setup, the four modules of circuits depicted in Fig. 7 are implemented to accomplish the construction of all proposed models in the previous section. These four modules are described in the following.

3.1. Module A: The two-integrator loop module

This main module, Module A, is depicted in Fig. 7(a) used for assigning the states x and y of the linear systems in Eqs. (1), (3), (5) and (6). The second-order system is the main part of the linear system for Models III and IV and is a subsystem used for connecting with the state z in the linear part of Models I and II. This circuit module consists of an inverting integrator OA₁, an inverting amplifier OA₂ and a summing inverting integrator OA₃. It is a closed-loop second-order system, where the states x and y are outputs of OA₁ and OA₃. And the output of state x is a feedback input of itself. In order to assign the complex conjugate poles moving between the LHP and the RHP, the coefficients of the output of the state y can be selected by using an analog multiplexer. The negative and positive coefficients are defined as Rf_1 and Rf_2 respectively. The time constant of an integrator setting frequency of the chaotic oscillator is $1/R_a C$. To connect the main module with another module, the input terminals A and B selected by an analog multiplexer can be used to connect with the linear function in Module B. Pins $f(x)$ and $f(x+z)$ are used for connecting with the nonlinear function in Module C.

3.2. Module B: The extended integrator module

This module is shown in Fig. 7(b). The module consists of a lossy integrator and a summing amplifier. The integrator is implemented by OA₅ and a resistor R_a and a capacitor C used for the extension of a second-order module to a third-order linear system. The summing amplifier OA₆ is designed for a

mixed-mode operation by adding a signal from the nonlinear device and the driving signal generator.

3.3. Module C: The programmable nonlinear function module

In this module, OA₃ shown in Fig. 7(c) is assigned as a nonlinear function. To activate the Heaviside, the sign, the saturate and the hysteresis functions, this can be done by setting switches 2a–2c to select the feedback resistor and the output voltage of the OA. The operational functions of switches are shown in Table 3.

Because voltage bias of OA is in the range of ± 15 V, and the saturation output is in the operational range of ± 13.5 V; therefore, suitable diodes D1–D4 are identified as 1N914 which can be used to limit the voltage of the nonlinear function and to scale the behavior of the chaotic signals.

3.4. Module D: The staircase function module

The module is depicted in Fig. 7(d). Module D consists of operational amplifiers: OA₉–OA₁₁ which are realized as nonlinear functions described by Eqs. (2e₁), (2e₂), (4a) and (4b) to set the equilibriums of chaotic systems of Models I, II and IV. Detail configuration for composing the circuit modules to be a system model via interconnection is shown in Sec. 4. To make a module functional as Eqs. (2e₁) and (4a) or as Eqs. (2e₂) and (4b), this can be done by setting analog multiplexers S_{3a} – S_{3c} to connect with resistors R_a and R_b accordingly. For all functional modules, an operational amplifier LF 351 is supplied with ± 15 V supply voltage. The analog multiplexer in use is an IC CD4052 having two inputs multiplexed with the ± 12 V supply voltage functioning as an automatic switch. The switch enables the student to select the desired input as can be seen from the output later in the next section that the three- or four-chaotic scrolls can be obtained accordingly.

Table 3. Parameter configuration of switches for activation of selected function.

Function	S_{2a}	S_{2b}	S_{2c}
Heaviside	Off	Off	Off
Signum	On	Off	Off
Saturate	On	Off	On
Hysteresis	On	Off	Off

Note that circuit components used throughout this paper are: $R_a = 10\text{ k}\Omega$, $R_b = 20\text{ k}\Omega$, $R_c = 50\text{ k}\Omega$, $R_d = 1.5\text{ k}\Omega$, $R_{f4} = 50\text{ k}\Omega$, and $C = 3\text{ nF}$.

4. Modules to Models

In previous sections, we first presented a whole picture of the chaotic systems as models in Sec. 2 and then described separated elements of the designed circuits as the block modules in Sec. 3. For logical presentation throughout this paper, we apply the reasoning structure in dynamic programming using the Bellman’s optimality principle [Lewis & Syrmos, 1995] to achieve optimal learning. The key idea suggests that after working backward from the goal to the initial point as the top-down approach, we then work forward from the initial point to complete the goal as the bottom up approach. Analogically, adopting the Gestalt’s learning concept [Gray, 2010], the top down pedagogy is proposed in the transition from Secs. 2 and 3. The transition from Secs. 3 and 4 can be considered as the bottom up learning process in dynamic programming establishing a progressive learning for students.

To benefit from psychological learning theory, this section has adopted the “learning-by-doing” concept in the progressive learning theory founded by John Dewey [1938]. Knowing properties of each block modules from Sec. 3, this section presents how the circuit Modules A–D based on chaotic oscillators can be composed to construct the system Models I–IV spanning from autonomous chaotic

system, nonautonomous chaotic system to mixed mode chaotic ones. The known property of each block is a self-instruction in the sense of LEGO-like style. The combination is dependent on the designer where the choices are free to be chosen. For example, some selected six chaotic system models can be established by using the four circuit block modules. The demonstration is performed as follows.

4.1. Experimental set up for Model I

To set up the third-order autonomous chaotic system, Model I, the two-integrator loop module or the main module or Module A and the extended integrator module or Module B are used to compose the assigned system. For a nonlinear version, the model can be achieved by combining the third-order linear system with a programmable nonlinear function or Module C. Output choices to be single or double scrolls are dependent on the assigned function which can be the Heaviside, the signum, the saturate or the hysteresis functions. The connection diagram and the block layout of this experimental set-up are shown in Fig. 8. Here, for the main module, the analog multiplexer is set to position A in order to operate in unstable mode. The connection diagram shows that output of the main module is connected to the input x of the nonlinear module. And the output z of the extended integrator module is connected to input A of the main module. Finally, the programmable nonlinear function

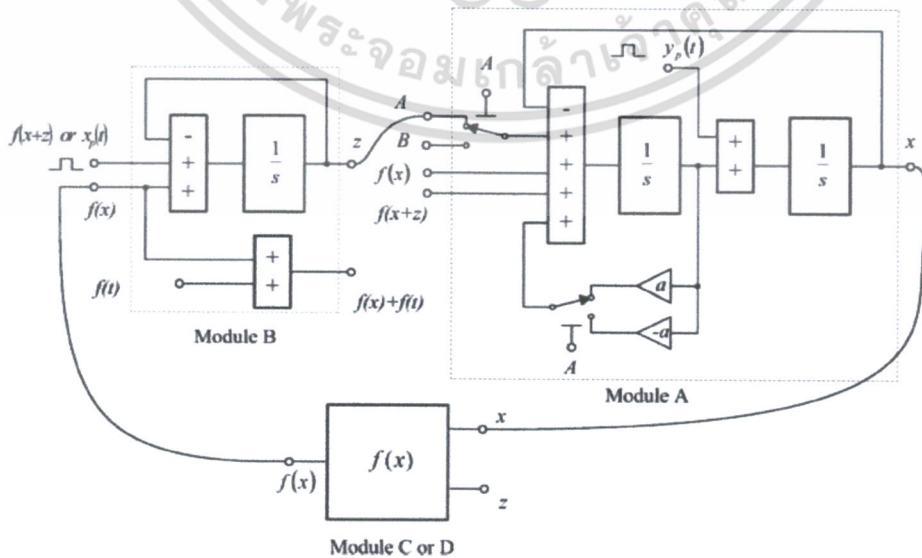


Fig. 8. Experimental set up for Model I.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

module output is connected to input $f(x)$ of the extended integrator module.

To set up the multiscroll attractor, the stair case function module, Module D, is used as a nonlinear function instead of selecting the programmable nonlinear function, Module C. In this experiment, the complexity of the chaotic attractor can be increased by applying the external driving pulse signal with amplitude ± 2 to the inputs $x_p(t)$ and $y_p(t)$ of the extended integrator and the main module to extend more scrolls in the x and y axes, respectively.

4.2. Experimental set up for Model II

In the experiment of the third-order autonomous chaotic system in Model II, all modules are used to compose the required system as shown in Fig. 9. To exhibit a double-scroll attractor, an analog multiplexer in the main module (Module A) is set to position A and the programmable nonlinear function (Module C) is set to be the signum function. In order to set up a multiscroll chaotic oscillator, the stair case function module (Module D) is used as a nonlinear function to obtain 3 or 4 scrolls. The connection diagram of this experiment is shown in Fig. 9, according which, the output of the staircase function module (or the programmable nonlinear function module) is connected to the input $f(x+z)$ of the main module and the extended integrator module (Module B). In this operational configuration, the system can increase scrolls in the y axis by driving

the pulse signals with magnitude ± 1 V at the input $y_p(t)$ of the main module.

4.3. Experimental set up for Model III

In this configuration, the main module (Module A) and the programmable nonlinear function module (Module C) are used for setting up the experiment. The experimental configuration is illustrated in Fig. 10. In the figure, the analog switch in the main module is set to position A for exhibiting an unstable second-order linear system and the programmable nonlinear function module is assigned for the hysteresis function.

4.4. Experimental set up for Model IV

In this experiment, the set up for the nonautonomous chaotic oscillator can be divided into two schemes. The first scheme shown in Fig. 11, a nonautonomous chaotic oscillator using pulse excited with the Heaviside or the signum function as a nonlinear function is set up by using the main module and the programmable nonlinear function. From the system equation of Model IV, a second or a linear system is a stable system. To achieve this mode, the analog multiplexer is set to position B. The 1 kHz square wave pulsed with amplitude ± 1 V is applied to excite an input (B) of the main module.

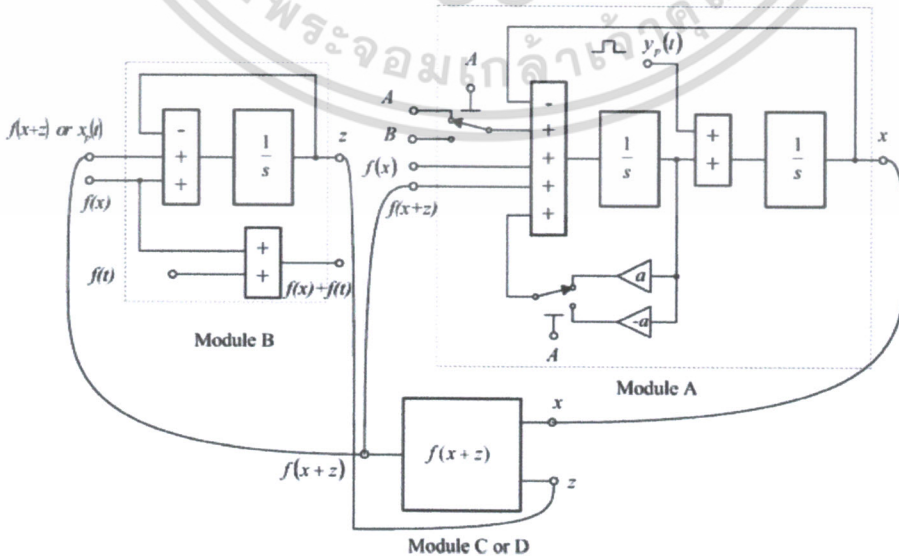


Fig. 9. Experimental set up for Model II.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

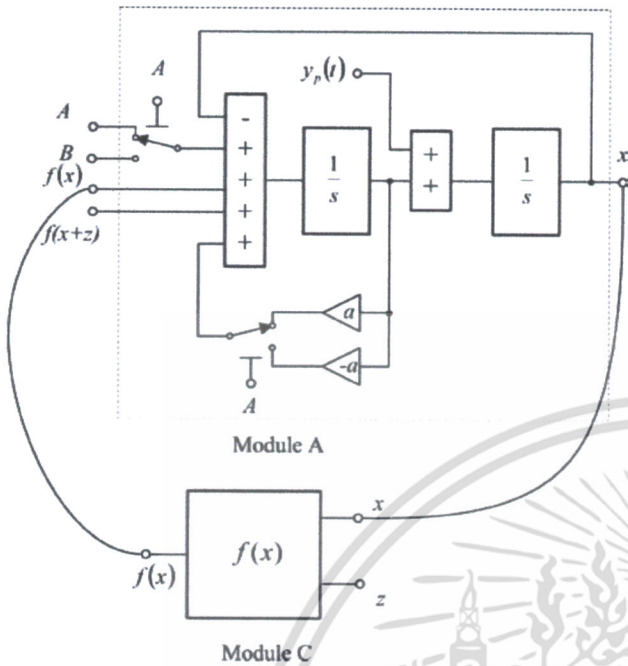


Fig. 10. Experimental set up for Model III.

In the second scheme, a nonautonomous chaotic system with a sinusoidal driver can be obtained. The double scrolls can be achieved when using the programmable nonlinear function module as the signum function. Likewise, the system exhibits three or four scrolls when using the staircase function module.

The experimental set up configuration is the same as the first scheme except the sinusoidal signal

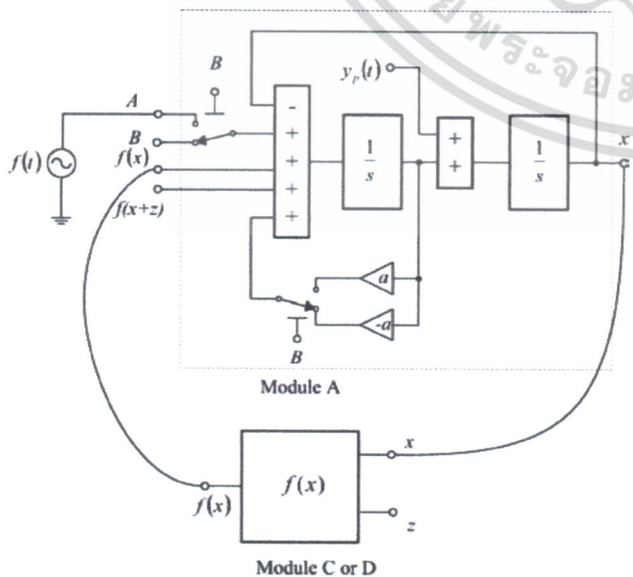


Fig. 11. Experimental set up for Model IV.

is applied to excite at input B of the main module. And the staircase function module is used as a non-linear function for the experimental set up to obtain the 3- or 4-scroll chaotic oscillator.

4.5. Experimental set up for the mixed-mode chaotic oscillators

In this experiment, the module based chaotic system can be set up to generate a mixed-mode chaotic oscillator exhibiting behaviors in between Models I and IV. In other words, the mix-mode model can be generated by hybridizing or interconnecting the main module, the extended integrator and the programmable nonlinear function modules. Alternatively, the programmable nonlinear function module can be interchanged with the stair case function module. In the main module, analog multiplexers S_{1a} and S_{1b} can be switched between inputs A or B and between unstable or stable by controlling from the external pulse signal driver at the terminal A/B. Variation of the mixed-mode schemes are demonstrated as follows.

In the first scheme, the mixed mode lies in between an autonomous chaotic system in Model I and a nonautonomous chaotic system with the driving pulse signal in Model IV. In this mode, the programmable nonlinear function module is set as the Heaviside or the signum function. The scheme is shown in Fig. 12. In the figure, the driving pulse generator and the output of the nonlinear module are connected to inputs $f(t)$ and $f(x)$, respectively. Output of the extended integrator $f(x)+f(t)$, which is added between the signal from the nonlinear module and the driving pulse, is connected to terminal B of the main module. And the output z of the extended or the third-order integrator is connected to terminal A of the main module. The switched control signal applied to the control terminal A/B has square pulses with ± 12 V amplitude.

For the second mixed-mode scheme, the autonomous chaotic system in Model I is mixed with the nonautonomous chaotic system in Model IV and with the sinusoidal driving pulse signals using the signum function as a nonlinear element. The configuration of this scheme is the same as shown in Fig. 12 but the sinusoidal signal is applied to the terminal $f(t)$ of the extended integrator instead.

The third mixed-mode scheme is multiscroll chaos that occurs in an autonomous chaotic system in Model I and a nonautonomous

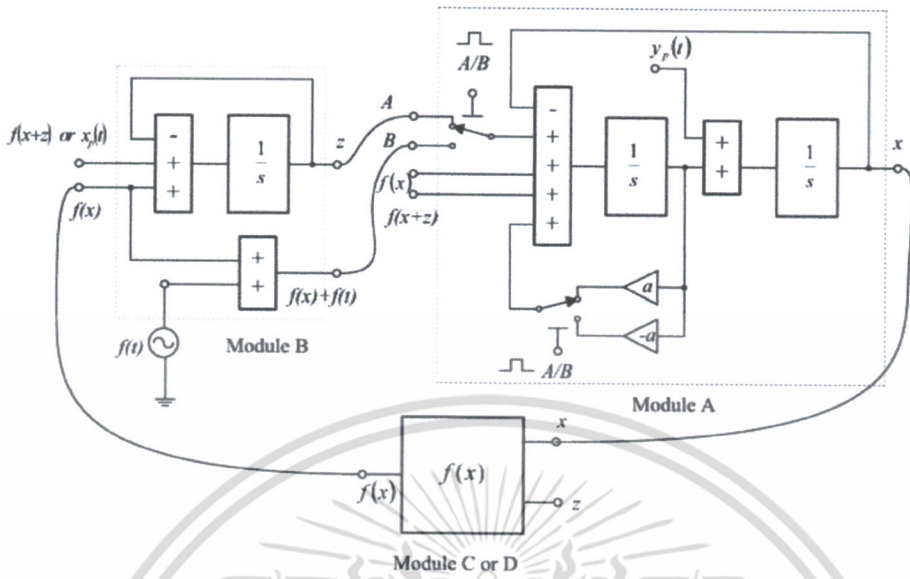


Fig. 12. Experimental set up for a mixed mode chaotic oscillator.

system in Model IV by selecting the staircase non-linear function used together with the main and the extended integrator models.

4.6. Experimental set up of the pseudo 7-scroll chaotic attractor

The last demonstration for the experimental set up in this section is the pseudo 7-scroll chaotic

oscillator. To achieve this mode, Model I or Model II consisting of the main module, the extended integrator and the staircase functions can be composed together. The pseudo 7-scroll pattern is exhibited by swapping back and forth between the 3-scroll and 4-scroll modes, as the name implies. Due to the limitation of the human eyes, the pattern seems to be appear in seven scrolls by our visual memory illusion. An analog multiplexer in the staircase module is controlled by the external pulse signal generator.

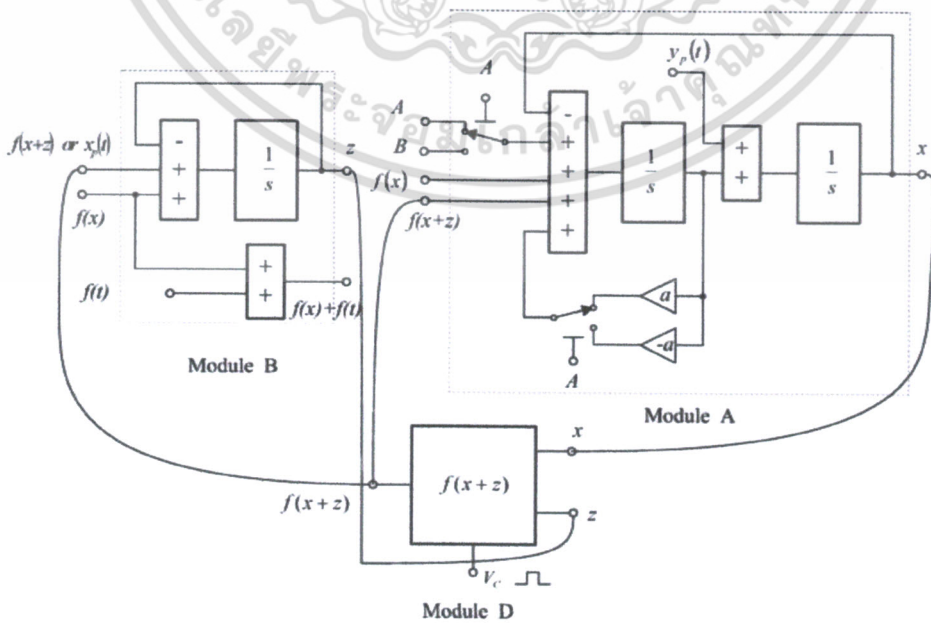


Fig. 13. Experimental set up for the pseudo 7-scroll chaotic oscillator.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญญาติเห็น่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The amplitude and the frequency of switching pulse in the mixed-mode and the pseudo 7-scroll experiment set up are $\pm 12\text{V}$ and 200Hz . The configuration of this mode is exhibited in Fig. 13. Experimental results from the module block topology in this section will be presented in the next section.

5. Experimental Results

From the experimental set up in Sec. 4, various chaotic models can be obtained by using

the designed block modules. This section aims to present experimental results in accordance with some selected possible configurations of using block modules presented in the last section.

5.1. Results from Model I

To begin with, the third-order autonomous chaotic system of Model I that provides a single-scroll or double-scroll chaotic attractor can be obtained by setting the programmable nonlinear function in a

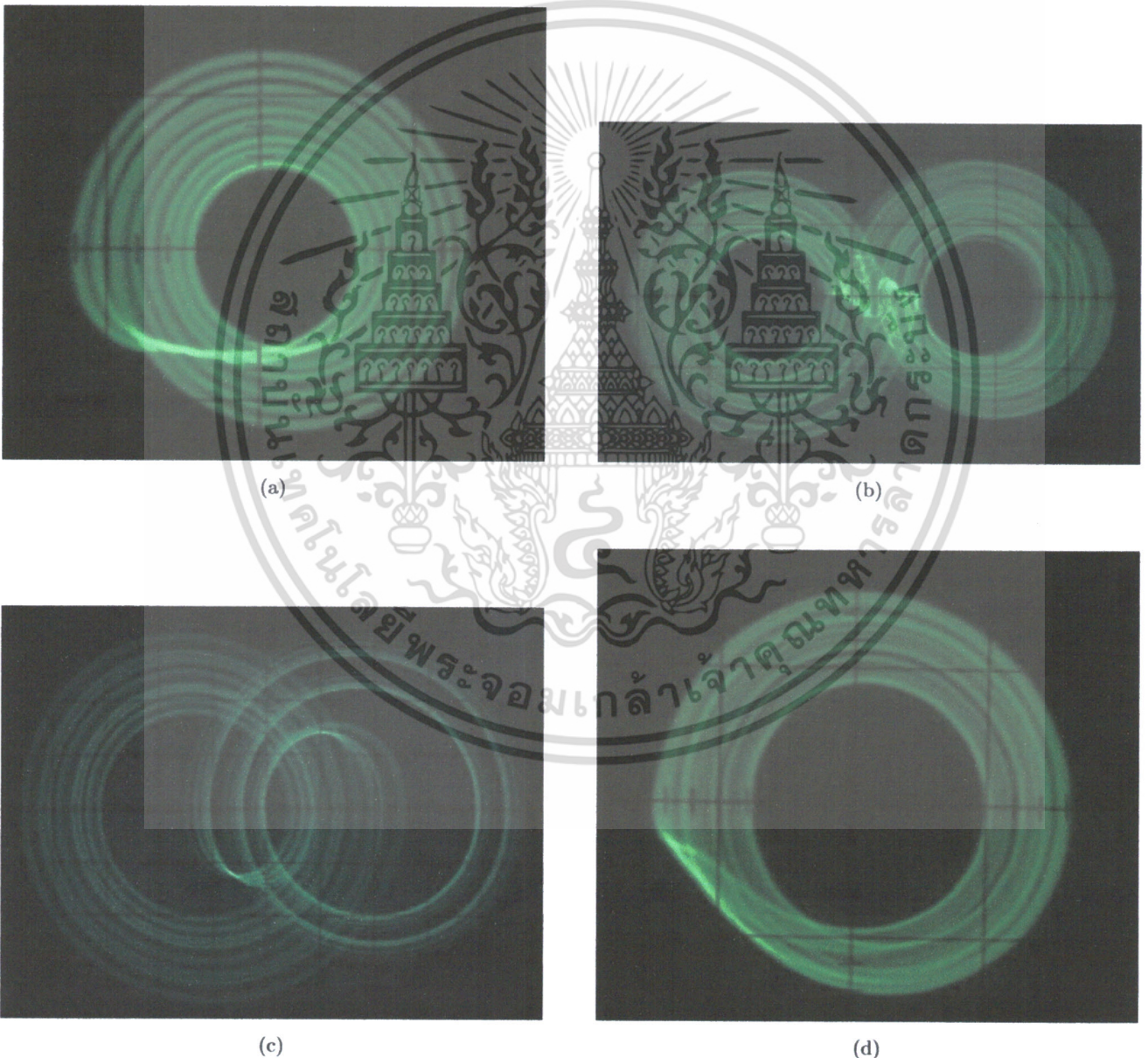


Fig. 14. Experimental results of the chaotic circuits of Model I: (a) using the Heaviside function, (b) using the signum function, (c) using the hysteresis function, (d) using the saturate function gain $k = 5.2$, (e) using the saturate function gain $k = 7$, (f) using the signum function with the $\pm 1\text{V}$ driving pulse at $x_p(t)$, (g) using the signum function with the $\pm 1\text{V}$ driving pulse at $y_p(t)$. Note that, for all subfigures, we set $x = 1\text{V/div}$ and $y = 1\text{V/div}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

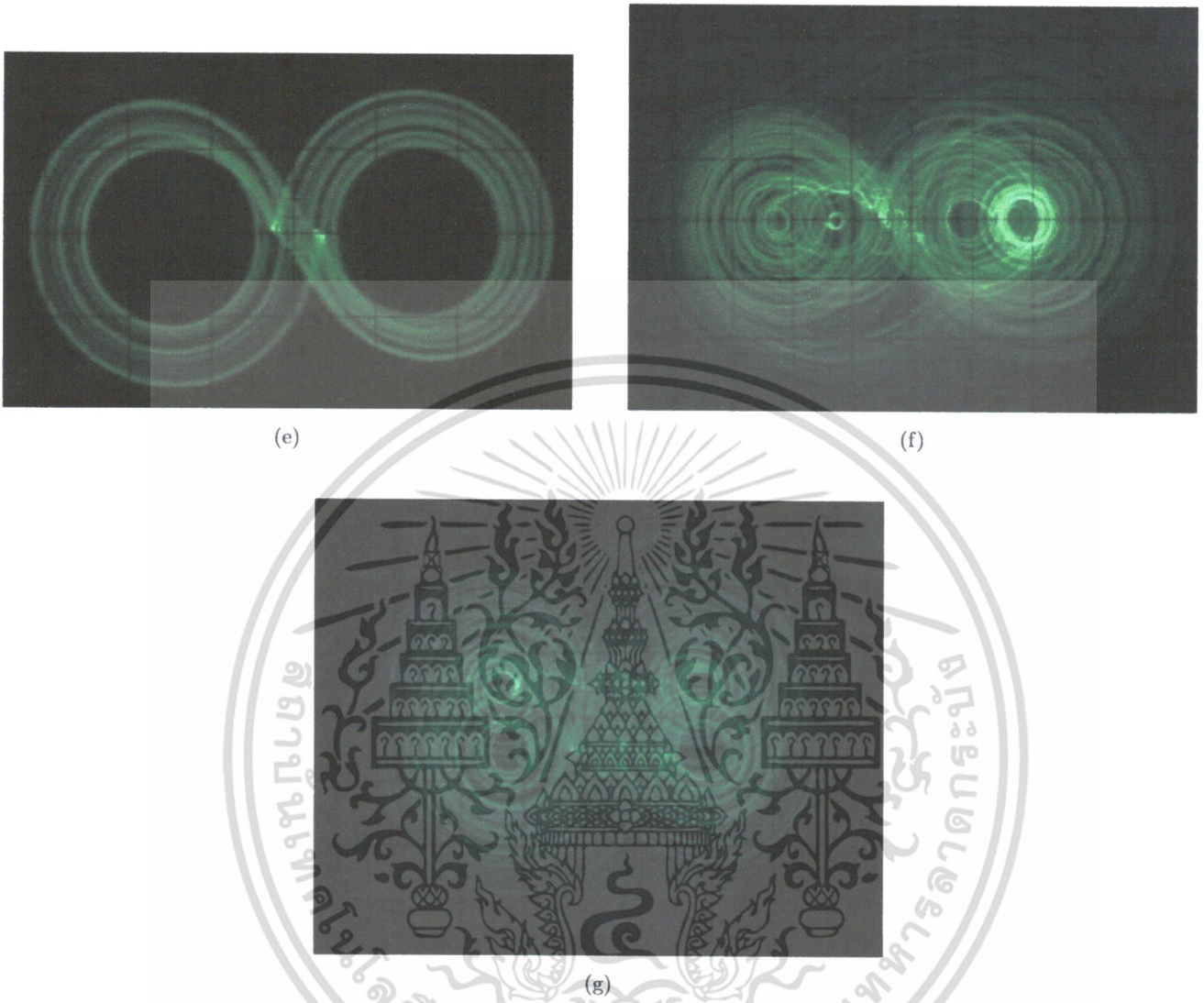


Fig. 14. (Continued)

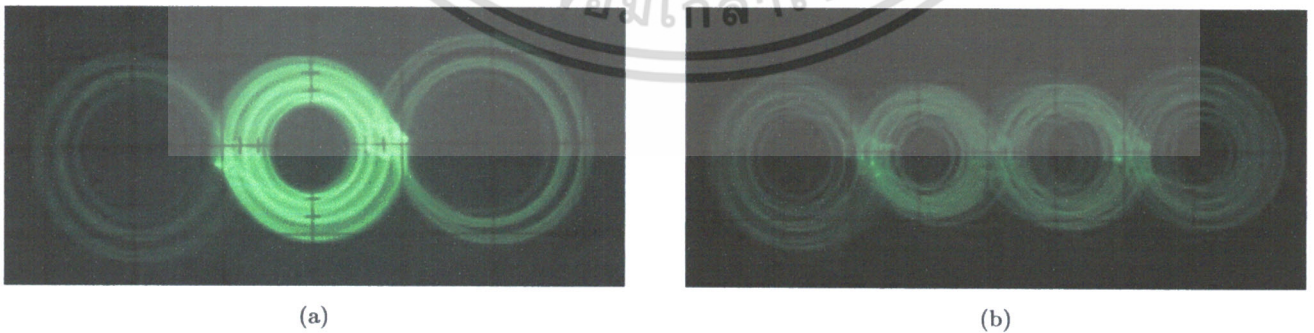


Fig. 15. Experimental results of the multiscroll chaotic circuits of Model I: (a) using the staircase function ($2e_1$), (b) using the staircase function ($2e_2$), (c) using the staircase function ($2e_1$) with the $\pm 2\text{V}$ driving pulse for $x_p(t)$, (d) using the staircase function ($2e_1$) with the $\pm 2\text{V}$ driving pulse for $y_p(t)$, (e) using the staircase function ($2e_1$) with the $\pm 2\text{V}$ driving pulse for both $x_p(t)$ and $y_p(t)$, (f) using the staircase function ($2e_1$) with the $\pm 2\text{V}$ driving pulse for $x_p(t)$, (g) using the staircase function ($2e_2$) with the $\pm 2\text{V}$ driving pulse for $y_p(t)$, (h) using the staircase function ($2e_2$) with the $\pm 2\text{V}$ driving pulse both for $x_p(t)$, $y_p(t)$. Note that the axes of subfigures (a)–(e): $x = 2\text{V/div}$ and $y = 2\text{V/div}$ and for (f)–(h): $x = 1\text{V/div}$ and $y = 2\text{V/div}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Fig. 15. (Continued)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

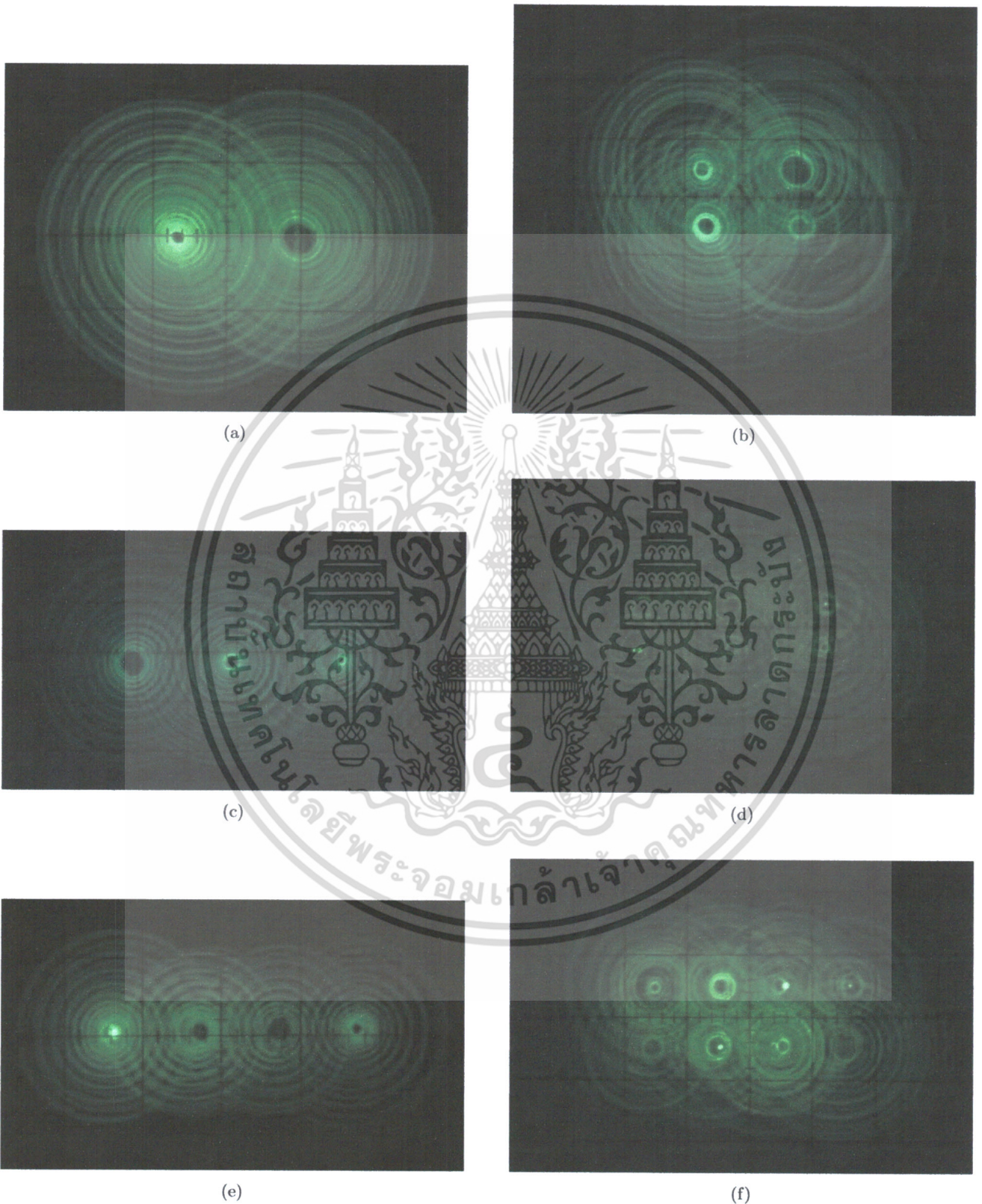


Fig. 16. Experimental results of the setup system Model II: (a) using the signum function, (b) using the signum function with the 1V driving pulse for, (c) using the staircase function ($2e_1$), (d) using the staircase function ($2e_1$) with the 1 V driving pulse for, (e) using the staircase function ($2e_2$), (f) using the staircase function ($2e_2$) with 1V driving pulse for. Note that all subfigures: $x = 1 \text{ V/div}$ and $y = 1 \text{ V/div}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

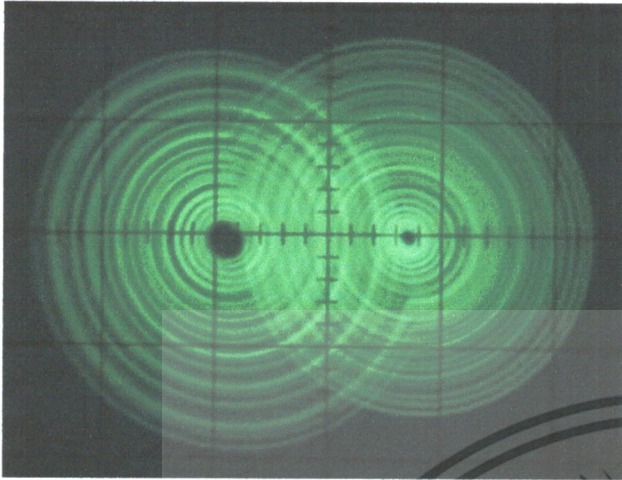


Fig. 17. Experimental results of the system Model III. Note that axes $x = 2\text{ V/div}$ and $y = 1 = 2\text{ V/div}$.

variety of choices as the Heaviside, the signum, the hysteresis and the saturate functions having voltage gains 5 and 7. The results of this experiment are shown in Figs. 14(a)–14(e) respectively. The four-scroll chaotic attractor is also shown in Figs. 14(f) and 14(g) achieved by using the signum function in system Model I with 2 V driving external pulse signals for $x_p(t)$ and $y_p(t)$.

By replacing the programmable nonlinear function in Model I with the staircase function, the chaotic system can be obtained as a 3-scroll and 4-scroll attractor as shown in Figs. 15(a) and 15(b) by applying voltage level at the terminal V_c of

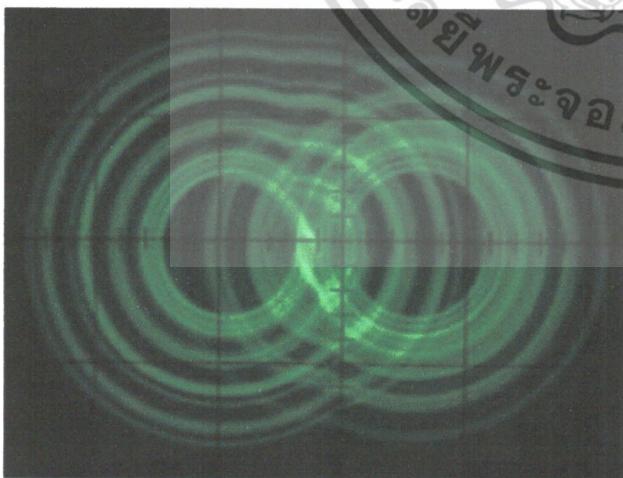
the staircase function module. Figures 15(c), 15(d), 15(f) and 15(g) are the 6-scrolls and the 8-scrolls generated from the system in Model I having the nonlinear equations (2e₁) and (2e₂) by driving external pulse signals to the terminals $x_p(t)$ or $y_p(t)$. Figures 15(e)–15(h) are two-dimensional grid scrolls which can be obtained by applying pulse signals to both $x_p(t)$ and $x_p(t)$.

5.2. Results from Model II

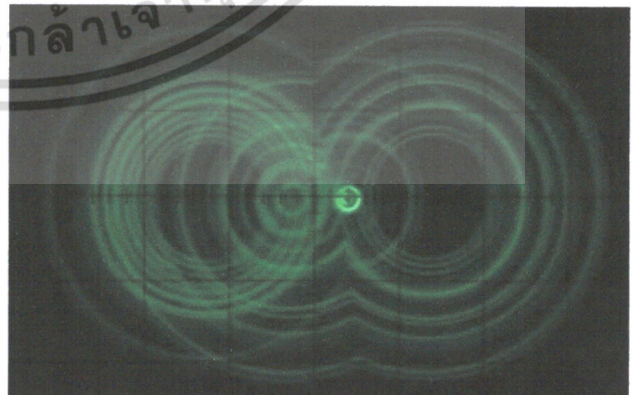
Figure 16(a) shows the result of the experimental set up corresponding to Fig. 9 for Model II, which is a double-scroll chaotic attractor obtained by using the signum function. In addition, experimental results of the system Model II using the staircase function is a 3- or 4-scroll chaotic attractor shown in Figs. 16(c) and 16(e). To increase the number of scrolls of both systems in Model II using the signum and the staircase functions, multiscroll attractors are shown in Figs. 16(b), 16(d), 16(f), that are obtained as the extended forms of double-, 3- and 4-scroll systems in Figs. 16(a), 16(c), 16(e) along the y -axis by injecting the external pulse signal to the terminal $y_p(t)$ in the main module.

5.3. Results from Model III

Figure 17 shows the results of the chaotic oscillator in system Model III. Figures 18(a) and 18(b) show



(a)



(b)

Fig. 18. Experimental results of the system Model IV: (a) using the Heaviside function with the driving pulse signal, (b) using the signum function with the driving pulse signal, (c) using the signum function with the driving sinusoidal signal, (d) using the staircase function (2e₁) with the driving sinusoidal signal, (e) using the staircase function (2e₂) with the driving sinusoidal signal. Note that $x = 2\text{ V/div}$ and $y = 2\text{ V/div}$.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

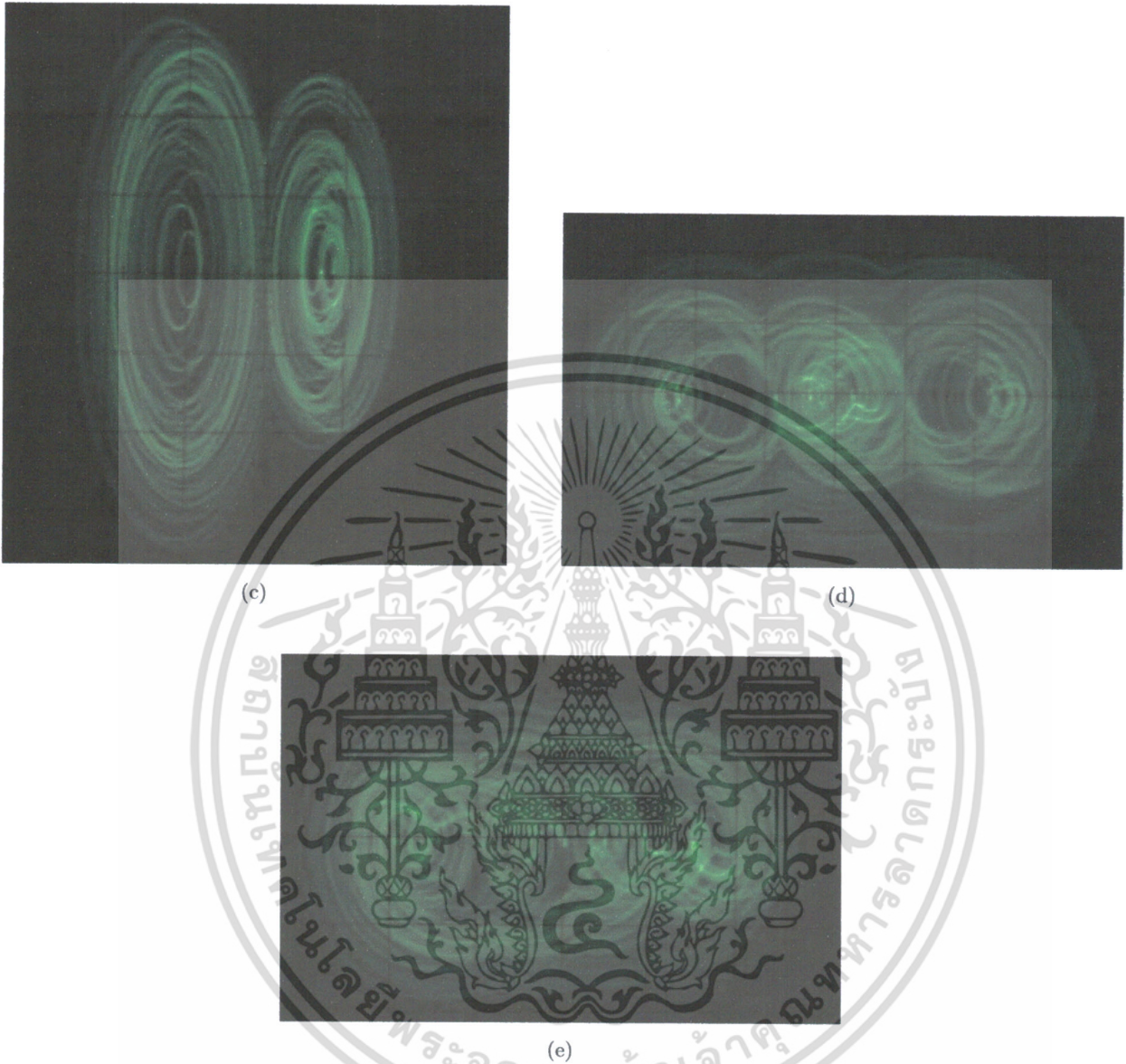


Fig. 18. (Continued)

results of the experimental setup corresponding to the nonautonomous chaotic oscillator excited by the external pulse signal with the Heaviside or the signum functions, respectively.

5.4. Results from Model IV

In Fig. 18(c), a double-scroll chaotic oscillator is obtained from the nonautonomous chaotic system using the signum function with the sinusoidal signal driving force. By using the staircase module instead, 3- and 4-scrolls are obtained and shown in Figs. 18(d) and 18(f).

5.5. Results of the mixed-mode models

For a mixed-mode chaotic oscillator, results of the experimental set up of Scheme 1 which is the third-order autonomous chaotic system mixed with a second-order nonautonomous chaotic system with the pulse excitation using the Heaviside and the signum functions as the nonlinear elements are shown in Figs. 19(a) and 19(b), respectively. For the mixed-mode Scheme 2 the nonautonomous chaotic system Model IV is excited with the signum function by the sinusoidal signal, the results of the experimental is shown in Fig. 19(c).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figures 19(d) and 19(e) are the 3 and 4-scroll chaotic attractors obtained from the experimental set up of the mixed mode Scheme 3, where the staircase function and the external pulse driving force are used to compose the main module. Finally

the pseudo 7-scroll chaotic pattern obtained from toggling an analog multiplex switch in the nonlinear module multiscroll chaotic system in Models I and II is shown in Figs. 19(f) and 19(g). As can be seen in the figures that the real 3-scroll and 4-scroll

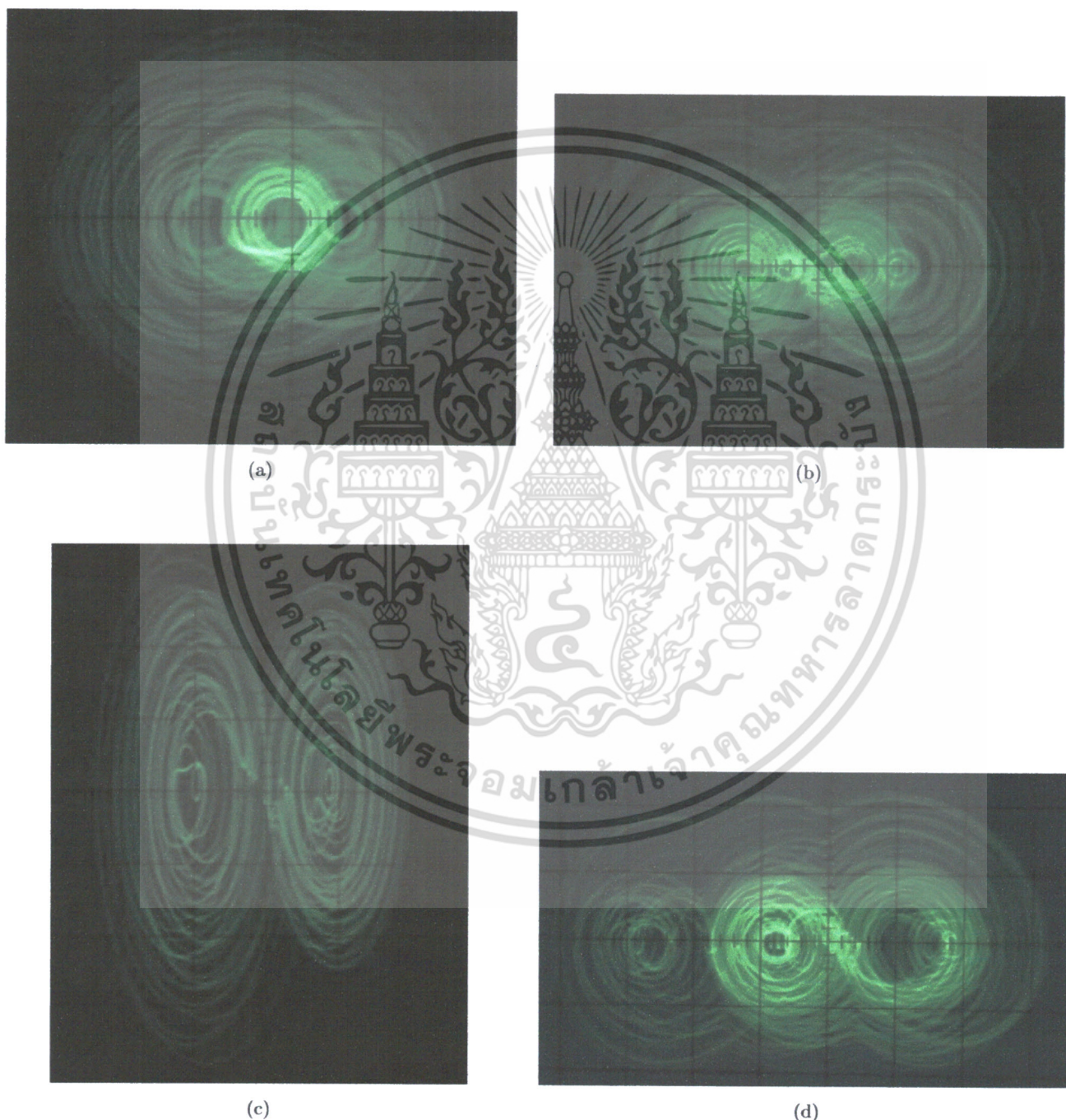
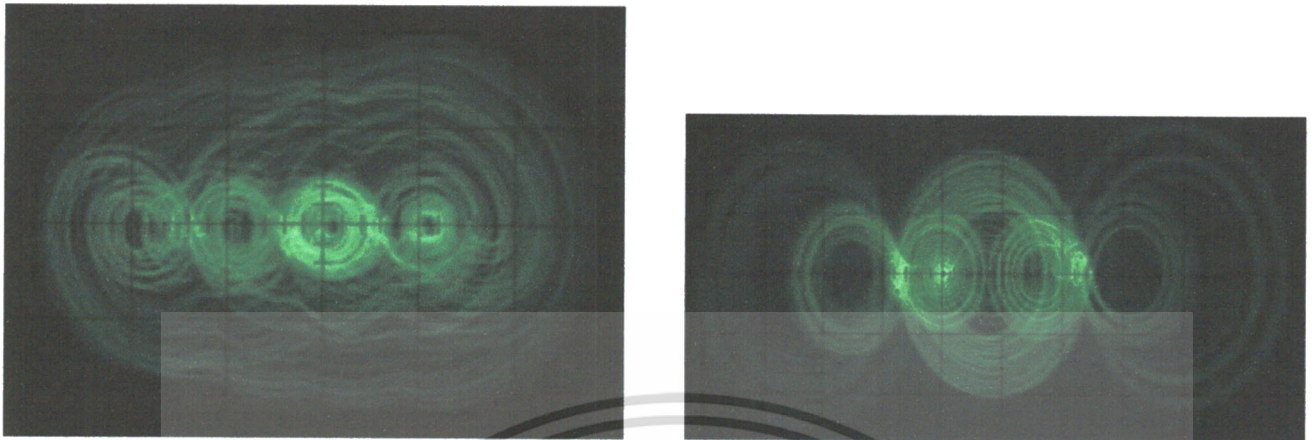


Fig. 19. Experimental results of the mixed-mode chaotic circuit: (a) Scheme 1 using the Heaviside function (b) Scheme 1 using the signum function (c) Scheme 2 (d) Scheme 3 using the staircase function ($2e_1$) (e) Scheme 3 using the staircase function ($2e_2$) (f) The pseudo 7-scroll pattern using the staircase functions ($2e_1$) and ($2e_2$) (g) The pseudo 7-scroll pattern using the staircase functions (4a) and (4b).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(e)

(f)



(g)

Fig. 19. (Continued)

patterns are visualized by adding to 7-scrolls. The fast switching effect cannot be caught in a snapshot even by an analog 200 Hz oscilloscope.

6. Conclusions

The objective of this work is to design and construct a few block modules that can generate many chaotic signals for engineering students at the undergraduate level. The pedagogy and teaching strategy for using these proposed tool kits are carried out by considering students' background in the second-order dynamic system or a feedback system. Under this assumption, the chaotification approach can be alternatively introduced rather than using the well-known Chua's circuit for conducting the laboratory experiment. For fruitful learning results, students are first introduced to system models and

then the property is explored and philosophy of the circuit modules designed and its topological terminology.

Familiarizing with the circuit modules, the students are then encouraged to experiment by composing the modules corresponding to the various system models for constructing various chaotic patterns as simple as wire jumping to interconnecting the subsystems. In this paper, more than 30 chaotic patterns can be obtained from possible combination of only the four block modules. Each module is cost-effective, so relatively inexpensive multipliers are required and is easy-to-implement by using only a few op-amps. Simulation results agree with the experiment revealing the effectiveness of the designed educational kit. The readers are encouraged to construct the kit by using the design guideline provided in this paper.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acknowledgments

This research is supported by Thailand Research Fund under grant RGJ-PhD/231/2547 and the NRCT grant for the fiscal years of 2553 and 2554.

References

- Addabbo, T., Fort, A., Rocchi, S. & Vignoli, V. [2010] "Exploiting chaotic dynamics for A-D converter testing," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **20**, 1099–1118.
- Bilotta, E., Bossio, E. & Pantano, P. [2010] "Chaos at school: Chua's circuit for students in junior and senior high school," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **20**, 1–28.
- Buscarino, A., Fortuna, L., Frasca, M. & Muscato, G. [2007] "Chaos does help motion control," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **17**, 3577–3582.
- Chaturvedi, D. K. [2010] *Modeling and Simulation of Systems Using MATLAB and Simulink* (CRC Press, FL).
- Cook [1985] "Simple feedback systems with chaotic behavior," *Syst. Contr. Lett.* **6**, 223–227.
- Dewey, J. [1938] *Experience and Education* (McMillan, NY).
- Ditto, W. L., Murali, K. & Sinha, S. [2008] "Chaos computing: Ideas and implementations," *Phil. Trans. R. Soc. A* **366**, 653–664.
- Elwakil, A. S. & Kennedy, M. P. [2001] "Construction of classes of circuit independent chaotic oscillators using passive-only non-linear devices," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I* **48**, 289–307.
- Gray, P. O. [2010] *Psychology*, 6th edition (Worth Publishers, NY).
- Hirsch, M. W. & Smale, S. [1974] *Differential Equations, Dynamical Systems and Linear Algebra* (Academic Press, NY).
- Hong, L., Zhong, L., Zhang, B., Wang, F., Tan, N. & Halang, W. A. [2010] "Design of analogue chaotic PWM for EMI suppression," *IEEE Trans. EMC* **52**, 1001–1007.
- Kiliç, R. [2010] *A Practical Guide for Study Chua's Circuits* (World Scientific, Singapore).
- Lewis, F. L. & Syrmos, V. [1995] *Optimal Control*, 2nd edition (John Wiley and Sons, NY).
- Liu, Z., Zhu, X. H., Hu, W. & Fei, J. [2007] "Principles of chaotic signal radar," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **17**, 1735–1739.
- Lü, J. H., Murali, K., Sinha, S., Leung, H. & Aziz-Alaoui, M. A. [2008] "Generating multiscroll chaotic attractors by thresholding," *Phys. Lett. A* **372**, 3234–3239.
- Ma, H. G., Zhua, X. F., Xua, J. F. & Ai, M. S. [2008] "Circuit state analysis using chaotic signal excitation," *J. Franklin Inst.* **345**, 75–86.
- Milioua, A. N., Antoniadasa, I. P., Stavrinos, S. G. & Anagnostopoulos, A. N. [2007] "Secure communication by chaotic synchronization: Robustness under noisy conditions," *Nonlin. Anal. Real World Appl.* **8**, 1003–1012.
- Mohamed, I. R., Murali, K., Sinha, S. & Lindberg, E. [2010] "Design of threshold controller based chaotic circuits," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **20**, 2185–2191.
- Moreno, U. F., Peres, P. L. D. & Bonatti, I. S. [2001] "Analysis of piecewise-linear oscillators," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I* **50**, 1120–1124.
- Mykolaitis, A., Tamasevicius, A., Namajunas, A., Cenys, A. & Anagnostopoulos, A. [2000] "Non-autonomous 2nd order chaotic circuit with comparator," *IEE Proc. G Circuits, Devices Syst.* **147**, 291–292.
- Ozoguz, S. & Elwakil, A. S. [2004] "On the realization of circuit-independent nonautonomous pulse-excited chaotic oscillator circuits," *IEEE Trans. Circuits Syst.-II* **51**, 552–556.
- Sooraksa, P. & Klomkarn, K. [2010] "No-CPU chaotic robots: From classroom to commerce," *IEEE Circuits Syst. Mag.* **10**, 46–53.
- Sprott, J. C. [2000] "Simple chaotic systems and circuits," *Amer. J. Phys.* **68**, 758–763.
- Tam, W. M., Lau, F. C. M. & Tse, C. K. [2006] *Digital Communications with Chaos: Multiple Access Techniques and Performance* (Elsevier, Amsterdam).
- Tamaševičius, A., Mykolaitis, G., Pyragas, V. & Pyragas, K. [2005] "A simple chaotic oscillator for educational purposes," *Eur. J. Phys.* **26**, 61–63.
- Tang, K. S. & Zhong, G. Q. [2003] "Chaotification of linear continuous-time systems using simple nonlinear feedback," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **13**, 3099–3106.
- Tórres, L. A. B. & Aguirre, L. A. [2005] "PC ChuaA laboratory setup for real-time control and synchronization of chaotic oscillators," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **15**, 2349–2360.
- Yalcin, M. E., Suykens, J. A. K., Vandewalle, J. & Ozoguz, S. [2002] "Families of scroll grid attractors," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **12**, 23–41.
- Yalcin, M. E., Suykens, J. A. K. & Vandewalle, J. [2004] "True random bit generation from a double-scroll attractor," *IEEE Trans. Circuits. Syst.-I* **51**, 1395–1404.
- Yu, S. M., Lü, J. H., Leung, H. & Chen, G. [2005] "Design and implementation of n -scroll chaotic attractors from a general jerk circuit," *IEEE Trans. Circuits Syst.-I* **52**, 1459–1476.
- Yu, S. M., Lü, J. H. & Chen, G. [2007] "A module-based and unified approach to chaotic circuit design and its applications," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **17**, 1785–1800.
- Zhang, Z. & Chen, G. [2007] "Chaotic liquid shaker: Design, implement and application," *Int. J. Bifurcation and Chaos* **17**, 4443–4451.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารแนบหมายเลข 3
ผลงานที่ได้จากทฤษฎีวิจัยได้รับรางวัลนวัตกรรมต้นแบบยอดเยี่ยมด้าน
โทรคมนาคมจาก TRIDI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประมวลภาพงานผลการตัดสินรางวัล Telecommunication Innovation
Award ณ. ห้างเอสพานาด ถ.รัชดา วันที่ 26 พ.ย. 2553



บูธจัดแสดงในนาม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า - ลาดกระบัง

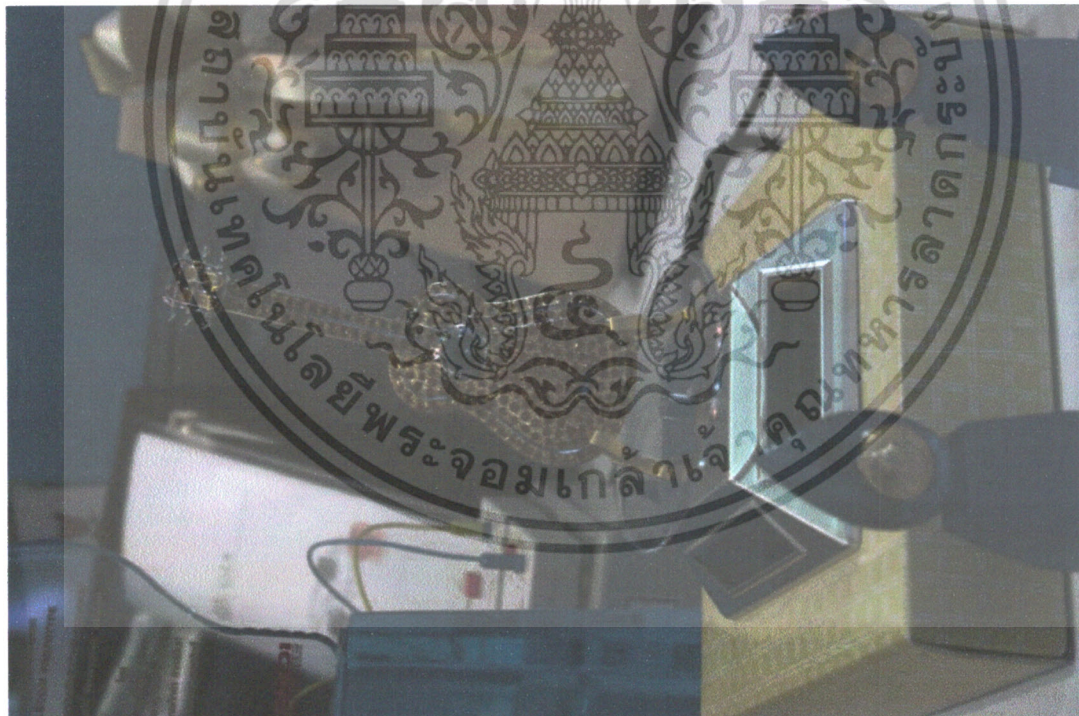


รศ.ดร. ปิติเขต สุรรักษา หัวหน้าทีมรับรางวัลยอดเยี่ยมประเภท telecom
proto-type จาก พอ.ดร. นที สุกลรัตน์ กรรมการ กทช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



VDO รศ.ดร. ปิติเชต สุ์รักษา ให้สัมภาษณ์ สื่อมวลชน



ตัวต้นแบบอุปกรณ์เข้ารหัสลับด้วยสัญญาณอลวน (chaotic encryption device) ที่ได้รับทุนจากสภาวิจัย ประจำปี 2553

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้