

## บทที่ 2

### เนื้อเรื่อง

#### 2.1 วรรณกรรมปริทัศน์

ตัวดึงดูดคอวน 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 โดยคิดว่าเลขทศนิยมที่ตัดทิ้งจะไม่มีนัยสำคัญแต่ผลของการคำนวณ แต่เมื่อเวลาผ่านไปช่วงเวลาหนึ่ง พบว่าผลของการคำนวณด้วยค่าเริ่มต้นด้วยทศนิยม 3 หลัก ได้เปลี่ยนแปลงจากการคำนวณครั้งก่อนไปอย่างมากมายหรือเพียงกำหนดค่าเริ่มต้นต่างกันเล็กน้อย ผลของสมการอนุพันธ์ ที่ Lorenz จำลองขึ้นนี้จะให้ผลแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง กล่าวได้ว่าระบบที่จำลองขึ้นนี้ไวต่อค่าเริ่มต้นและเมื่อทำการพล็อต ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร  $x$  ต่อ  $y$  และ  $x$  ต่อ  $z$  จะมีลักษณะรูปร่างที่แปลกประหลาดมีลักษณะเป็นตัวดึงดูดคอวน (attractor) โดย ลักษณะของ  $x$  ต่อ  $z$  มีลักษณะคล้ายปีกผีเสื้อ และ Lorenz เรียกปรากฏการณ์ที่ค้นพบโดยบังเอิญนี้ว่าผลกระทบของผีเสื้อ (Butterfly effect) โดยให้ความหมายในระบบอุตุนิยมวิทยาว่าเป็นระบบที่อ่อนไหวมากเพียงผีเสื้อขยับปีกที่ Hong Kong ก็อาจเกิดปรากฏการณ์ Tornado หรือสภาวะสับสนอลหม่านที่ California ได้

หลังจากที่ Lorenz ได้ค้นพบตัวดึงดูดคอวนแรกแล้ว ต่อมา Rossler [2] ได้ค้นพบตัวดึงดูดคอวนจากการจำลองปรากฏการณ์ทางเคมี โดยมีเทอมตัวแปรไม่เป็นเชิงเส้นเพียงเทอมเดียว และในขณะต่อมา Rossler [3] ได้นำเสนอตัวดึงดูดคอวน ขนาด 4 มิติ หรือ ไฮเปอร์เคออสติก โดยการเพิ่มลำดับของสมการจากลำดับ 3 เป็น ลำดับ 4 โดยมีคุณลักษณะของตัวดึงดูดคอวน [4] ดังนี้คือ

- มีความไวต่อค่าเริ่มต้น
- มีลักษณะคล้ายสัญญาณรบกวนใน โดเมนของเวลา
- สเปกตรัมกำลังของสัญญาณมีลักษณะย่านกว้าง

สำหรับการสร้างตัวดึงดูดในวงจรวิศวกรรมไฟฟ้านั้น 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 ขึ้นจริงโดยสร้างจากวงจรที่มีลักษณะคล้ายวงจรของ Chua โดยเพิ่มลำดับของสมการอนุพันธ์ ด้วยการเพิ่มค่าตัวเหนี่ยวนำ

สำหรับการประยุกต์ใช้งานของ ตัวดึงดูดในวงจร นั้น หลังจาก Pecora [7] ได้แสดงให้เห็นว่า ระบบเคออสของ Lorenz และ Rossler สามารถซิงโครไนซ์ (Synchronization) เข้าด้วยกัน โดยมีภาคส่งเรียกว่า ตัวขับ (drive) และภาครับเรียกว่าตัวตอบสนอง (Response) แล้ว ต่อมา Cuomo [8] ได้นำเอาหลักการดังกล่าวไปใช้ในการประยุกต์การสื่อสารแบบปลอดภัยโดยนำสัญญาณเสียง ทำการบวกรวมเข้า (masking) กับตัวขับซึ่งเป็นระบบ Lorenz และเมื่อสัญญาณนี้ส่งผ่านไปในช่วงสัญญาณ ผู้ดักฟังสัญญาณไม่สามารถฟังได้ ยกเว้นจะมีตัวถอดรหัสหรือภาครับที่สามารถตอบสนองกับสัญญาณเคออสเพื่อจะถอดรหัสออกมาได้ซึ่งระบบที่ Cuomo ได้นำเสนอเป็นการเข้ารหัสลับแบบง่าย ๆ

ต่อมา Yang [9] ซึ่งเป็นผู้ร่วมวิจัยกับ Chua ได้เพิ่มความแข็งแกร่งของระบบเข้ารหัสลับที่อยู่บนพื้นฐานของระบบเคออส โดยนอกจากใช้การซิงโครไนซ์ของวงจรของ Chua แล้วยังเพิ่มตัวเข้ารหัสลับที่วงจร Chua อีกหนึ่งชุด สำหรับการสื่อสารแบบกระจายสเปกตรัม Itoh [10] ได้นำประโยชน์จากคุณสมบัติที่สัญญาณเคออสมีย่านความถี่กว้างไปประยุกต์เพื่อเป็นคลื่นพาห้ของการกระจายสเปกตรัม และด้วยคุณสมบัติที่สัญญาณเคออสคล้ายสัญญาณรบกวน Yalcin [11] ได้นำเสนอการสร้างการกำเนิดบิตสุ่มจริงจากตัวดึงดูดโดยการนำการเคลื่อนที่ของวงโคจรของตัวดึงดูดผ่านจุดสมดุลมากำเนิดบิตสุ่ม

หลังจากการค้นพบวงจรของ Chua ซึ่งมีผู้นำไปประยุกต์ใช้งานดังกล่าวมาแล้ว ได้มีผู้สร้างตัวดึงดูดแบบใหม่ๆ โดยอาศัยพื้นฐานจากสมการของ Lorenz โดย Chen [12] ได้ค้นพบตัวดึงดูดแบบใหม่จากการควบคุมระบบ Lorenz ให้ไม่มีเสถียรภาพ หรือการต่อต้านการควบคุม (anti-control) โดยเราเรียกวิธีการนี้ว่า Chaotification ซึ่งตัวดึงดูดของ Chen มีเทอมตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้น 2 เทอมเช่นเดียวกับ Lorenz แต่สัมประสิทธิ์ ของสมการต่างจาก Lorenz และในเวลาต่อมา Lu [13] ซึ่งเป็นผู้ร่วมวิจัยกับ Chen เสนอตัวดึงดูด ที่แสดงลักษณะเหมือนกับ Lorenz และ Chen ด้วยการปรับพารามิเตอร์โดยขณะเวลาเดียวกัน ได้มีผู้เสนอการสร้างวงจรสร้างตัวดึงดูดแบบ Lorenz[14] โดยใช้เทคนิคการคูณแบบสวิทช์แทนการคูณแบบเชิงเส้น

สำหรับการสร้างตัวดึงคูดอลวนแบบง่ายขึ้น Sprott [15] ได้เสนอรูปแบบสมการอนุพันธ์ลำดับ 3 รวมกับตัวแปรแบบไม่เป็นเชิงเส้นแบบง่ายๆ ที่สามารถสร้างได้โดยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่ง สมการของ Sprott ให้กำเนิดรูปแบบตัวดึงคูดอลวนที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนมาก สำหรับการสร้าง ตัวดึงคูดอลวนที่มีความซับซ้อนเพื่อประยุกต์ใช้ในการเข้ารหัสลับหรือสื่อสารแบบปลอดภัยนั้นได้เริ่มพัฒนาโดย Suyken [16] นำเสนอการสร้าง ตัวดึงคูดอลวน แบบหลายสก็อร์ จากวงจรของ Chua ด้วยการเพิ่มท่อนของความต้านทานลบ เพื่อเพิ่มจุดสมดุลในระบบ และ Tang [17] ได้เสนอการสร้างวงจรหลายสก็อร์จากวงจรของ Chua เช่นเดียวกัน โดยการสร้างวงจรต้านทานลบเป็นค่าฟังก์ชัน  $\sin(x)$  สำหรับการสร้างวงจรเพื่อกำเนิดตัวดึงคูดอลวนแบบ 4 มิติ นั้น Li [18] ได้นำเสนอการสร้างตัวดึงคูดอลวนแบบไฮเปอร์โดยเพิ่มขนาดลำดับเพื่อควบคุมสมการของ Lorenz โดย Chen [19] และ Lu [20] ได้ใช้เทคนิคแบบเดียวกันเพื่อสร้างตัวดึงคูดอลวนแบบไฮเปอร์จากตัวดึงคูดอลวนของ Lu[13] และตัวดึงคูดอลวนของ Chua [5] แบบหลายสก็อร์ตามลำดับ

นอกจากประยุกต์ตัวดึงคูดอลวน สำหรับการสื่อสารแบบปลอดภัย การสื่อสารแบบกระจายสเปกตรัม และการกำเนิดเป็นบิตสุ่มจริงแล้ว ผู้วิจัยได้เสนอการใช้ตัวดึงคูดอลวน สำหรับการขับเคลื่อนหุ่นยนต์สนาม [22]-[25] และการขับเคลื่อนมอเตอร์เพื่อการปั่นผสม [26] ซึ่งหัวใจของการประยุกต์ทั้งหมดก็คือตัวกำเนิดสัญญาณเคออสหรือวงจรสร้างตัวดึงคูดอลวน โดยเฉพาะในการสื่อสารแบบปลอดภัยนั้น จำเป็นต้องสร้างตัวดึงคูดอลวนให้มีค่าซับซ้อนสูงเพื่อยากต่อการสร้างสัญญาณกลับ(reconstruction) สำหรับผู้ดักฟัง โดยการประยุกต์เพื่อใช้งานจริงในรูปแบบต่างๆ ที่กล่าวมาผู้วิจัยส่วนใหญ่ได้จดสิทธิบัตรพร้อมกับปกปิดเทคนิคบางอย่างในการสร้าง ดังนั้นเพื่อให้เราสามารถทำงานประยุกต์ใช้งานตัวดึงคูดอลวนหรือระบบไม่เป็นเชิงเส้นสำหรับงานวิศวกรรมได้จริง จำเป็นที่จะต้องมียุทธศาสตร์การสร้างวงจรกิจกรรมกำเนิดตัวดึงคูดอลวน ของเราเอง ดังนั้นในข้อเสนอโครงการวิจัยนี้จึง เสนอวิธีการสร้างตัวดึงคูดอลวนแบบใหม่ขึ้นเพื่อเป็นต้นแบบในการประยุกต์ใช้งานดังกล่าว

สำหรับหลักการสร้าง ตัวดึงคูดอลวน ในรูปแบบที่ใช้เทคนิคการประมาณเทอม เพื่อให้ได้ตัวดึงคูดอลวนแบบใหม่ซึ่งสามารถทำให้เราสร้างฟังก์ชันท่อนแทนค่าสมบูรณ เพื่อใช้สร้างตัวดึงคูดอลวน หลายปีกเป็นการใช้ฟังก์ชันเชิงท่อนที่สร้างขึ้นโดยทางปฏิบัติสามารถสร้างได้ง่ายกว่า ฟังก์ชันเชิงท่อนที่สร้างเป็นค่าความต้านทานลบ[16,17,20] และลักษณะของตัวดึงคูดอลวนยังให้รูปแบบที่ซับซ้อนสูงกว่าแบบอื่นๆมาก [14,19,20] สำหรับตัวดึงคูดอลวนแบบที่ 3 ที่ได้สร้างขึ้นแบบตัวดึงคูดอลวนแบบหลายสก็อร์ สร้างขึ้นจากตัวดึงคูดอลวนซึ่งมีจุดสมดุลเพียงจุดเดียว ทำให้การ โคจรของตัวดึงคูดอลวนวงนอกมีลักษณะลดลงแบบ expnentent ซึ่งจะต่างกับตัวดึงคูดอลวนแบบอื่นๆ[16,17,18,19,20] ที่ได้นำเสนอ และสำหรับตัวดึงคูดอลวน

แบบสุตท้ายนั้น 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] แต่มีการเพิ่มฟังก์ชันการจัดการกุญแจในการเข้ารหัสโดยใช้ PIN ของผู้ส่งฝ่ายเดียว ( ขั้นตอนนี้จะต้องทำการสร้างกุญแจทุกครั้งก่อนส่งเรียกว่า key establishment ( หมายถึง ผู้ส่งและผู้รับจะต้องมีกุญแจในการเข้ารหัสลับของเสียงเป็นตัวเดียวกัน โดยขั้นตอนนี้นุคคตที่ 3 ต้องไม่สามารถล่วงรู้กุญแจนี้ได้)
- US pat.6856687 (Feb, 2005) [29] เป็นอุปกรณ์สื่อสารแบบปลอดภัยแทนที่จะใช้เข้ารหัสเฉพาะโทรศัพท์ได้อย่างเดียวและส่งไปในเครือข่ายโทรศัพท์ ใน [29] สามารถรวมอุปกรณ์สื่อสารทุกอย่างเช่น โทรศัพท์, โทรศัพท์มือถือ และPDA ให้ส่งไปในเครือข่ายสื่อสารสาธารณะใด ๆ เช่น โทรศัพท์ หรือ อินเทอร์เน็ต
- US pat.6907123 (Jun, 2005) [30] เป็น algorithm ส่งข้อมูลจากโทรศัพท์ผ่านเครือข่ายสาธารณะ โดยใช้ public key ของผู้รับ เพื่อสร้าง key establishment พร้อมกับสามารถเลือกalgorithm ในการเข้ารหัสลับได้
- US pat.7003329 (Feb, 2006) [31] แสดงอุปกรณ์ส่วนต่อเข้ากับโทรศัพท์มือถือสำหรับการเข้ารหัสลับ โดยสิทธิบัตรนี้จะทำการสร้างอุปกรณ์เข้ารหัสลับ แล้วเพิ่มเข้าไปกับโทรศัพท์มือถือใด ๆ โดยแสดงเฉพาะโครงสร้างทางกายภาพ
- US pat.7210044 (Apr, 2007) [32] เป็นโทรศัพท์มือถือพร้อมกับฟังก์ชันการทำงานเข้ารหัสลับเพื่อลดข้อยุ่งยากของ key establishment โดยกุญแจในการเข้ารหัสจะใช้รหัสประจำเครื่องของโทรศัพท์มือถือ ในสิทธิบัตรนี้ถือสิทธิร่วมเกือบทุกอย่างสำหรับการเข้ารหัสสำหรับโทรศัพท์มือถือ

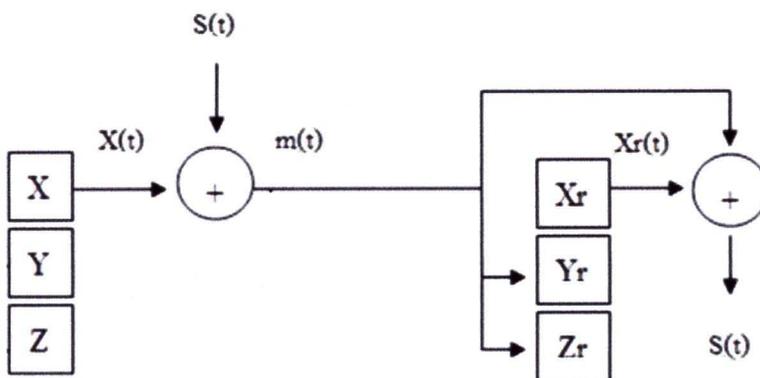
ในงานวิจัยที่จะนำเสนอนี้จะเป็นการใช้เทคนิคดังกล่าวมาแล้วในข้างต้นเพื่อค้นหาสภาวะอลวนแบบใหม่ที่ทำให้ความแข็งแกร่งและคงทนตามวัตถุประสงค์ดังกล่าวแล้วในบทที่ 1 ผู้วิจัยมีความมั่นใจในผลสำเร็จที่คาดหวังเนื่องจากมิได้เริ่มการวิจัยจากศูนย์ ทว่า มีต้นทุนในการศึกษาและประยุกต์สัญญาณอลวนในระดับที่สามารถสร้างอุปกรณ์ได้ [33] หนึ่งในความท้าทายของงานวิจัยเชิงวิชาการก็คือ การหาช่องว่างเพื่อจดสิทธิบัตร (หากคิดตามกรอบเก้าซึ่งเน้นเทคนิคซอฟต์แวร์) 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

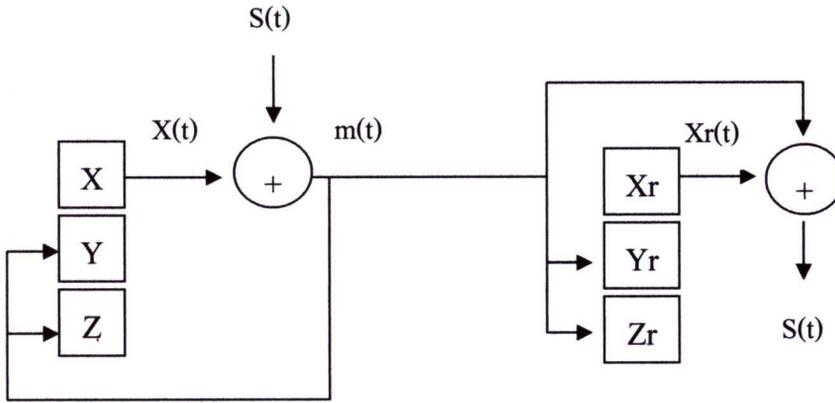
นำสัญญาณข้อมูลมาทำการเข้ารหัส (Encryption) โดยการบวกสัญญาณกับสัญญาณเคออสติคแสดงระบบได้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โค้ดแอมการชิงโครไนซ์ของระบบ simple masking

## 2.2.2 การซิงโครไนซ์ของระบบ self-feeding masking

เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบให้มีค่า สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน simple masking ให้มีค่า สัญญาณต่อสัญญาณรบกวน โดยจะมีการป้อนกลับของสัญญาณรวมไปที่อินพุตของภาคส่ง ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โค้ดแแกรมการซิงโครไนซ์ของระบบแบบ self-feeding masking

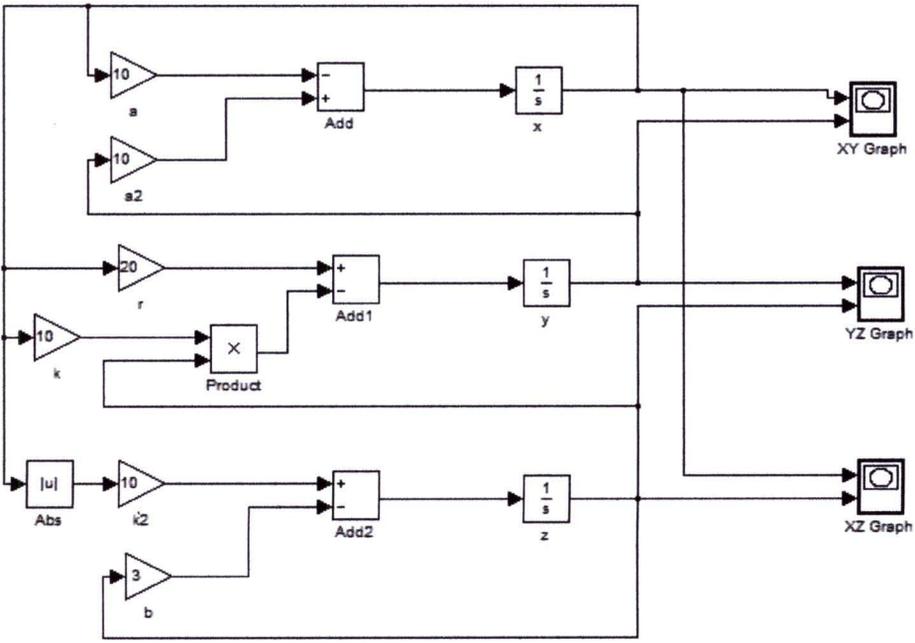
## 2.3 ออกแบบการทดลอง

### 2.3.1 การออกแบบสร้างสัญญาณเคออส

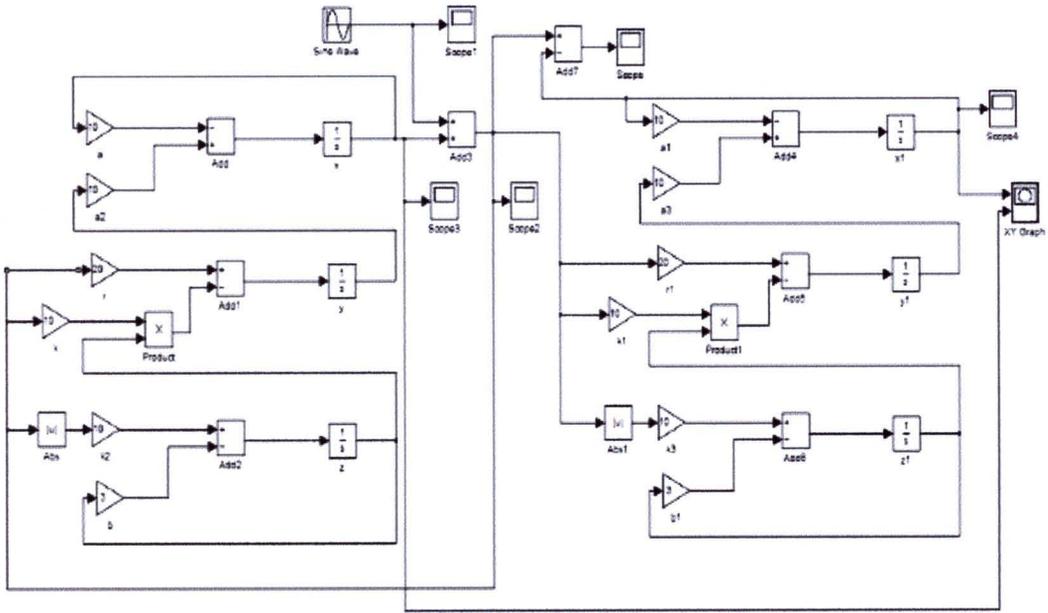
ในการออกแบบวงจรสำหรับสร้างสัญญาณเคออสที่พบใหม่แบบสามารถสร้างได้ง่ายโดยปรับปรุง แอทแทรกเตอร์ของ Lorenz จากสมการ Lorenz เมื่อสังเกตค่า  $x, y$  แล้วมีลักษณะใกล้เคียงกันดังนั้นเมื่อ ประมาณค่าของ  $xy \approx |x|$  แสดงระบบใหม่ได้ดังนี้

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

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



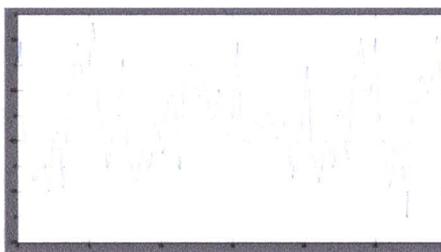
รูปที่ 2.3 แบบจำลองการสร้างสัญญาณเคออสของสมการ(1)



รูปที่ 2.4 แบบจำลองการสร้างวงจรถ้ากาส่งและภากรับซึ่งโครไนซ์ของระบบแบบ self-feeding masking



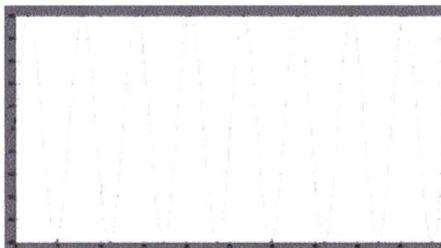
ก



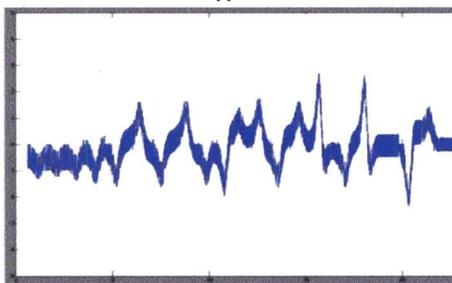
ข



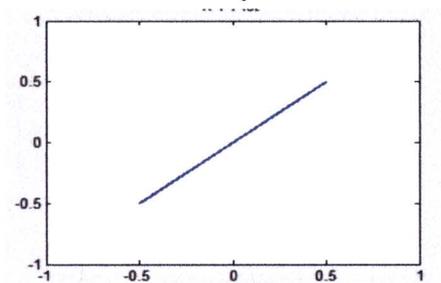
ค



ง



จ



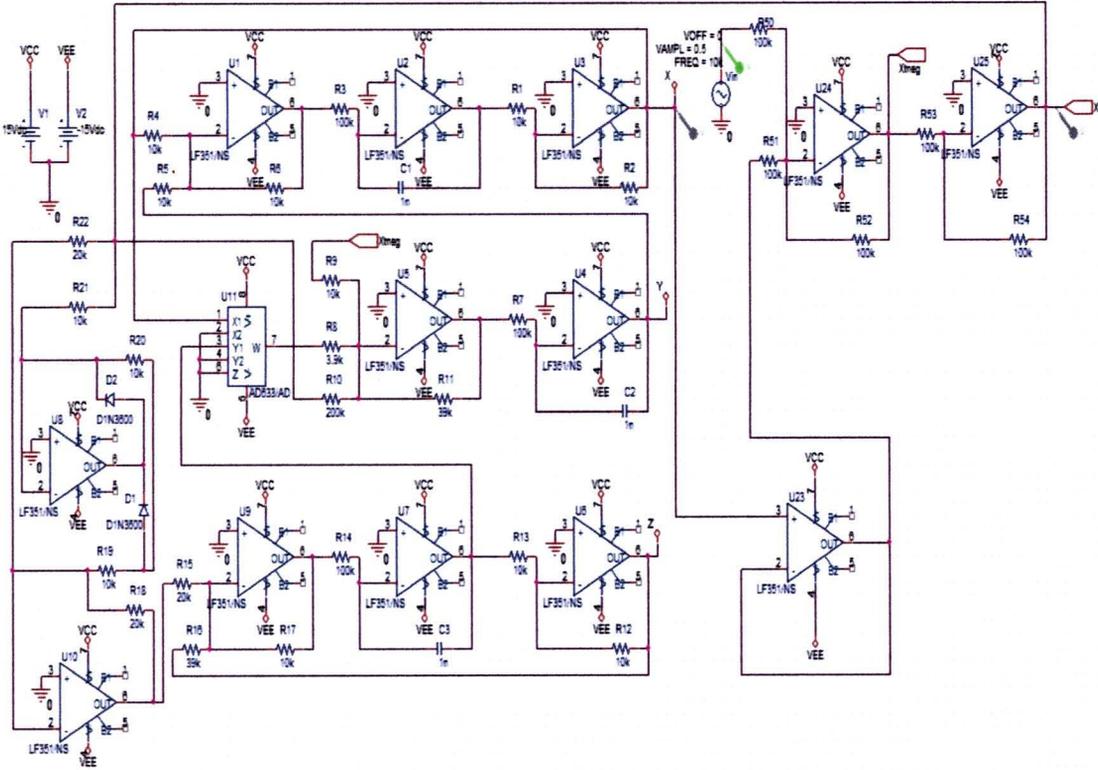
ฉ

รูปที่ 2.5 กราฟที่ได้จากการรันโปรแกรม Matlab

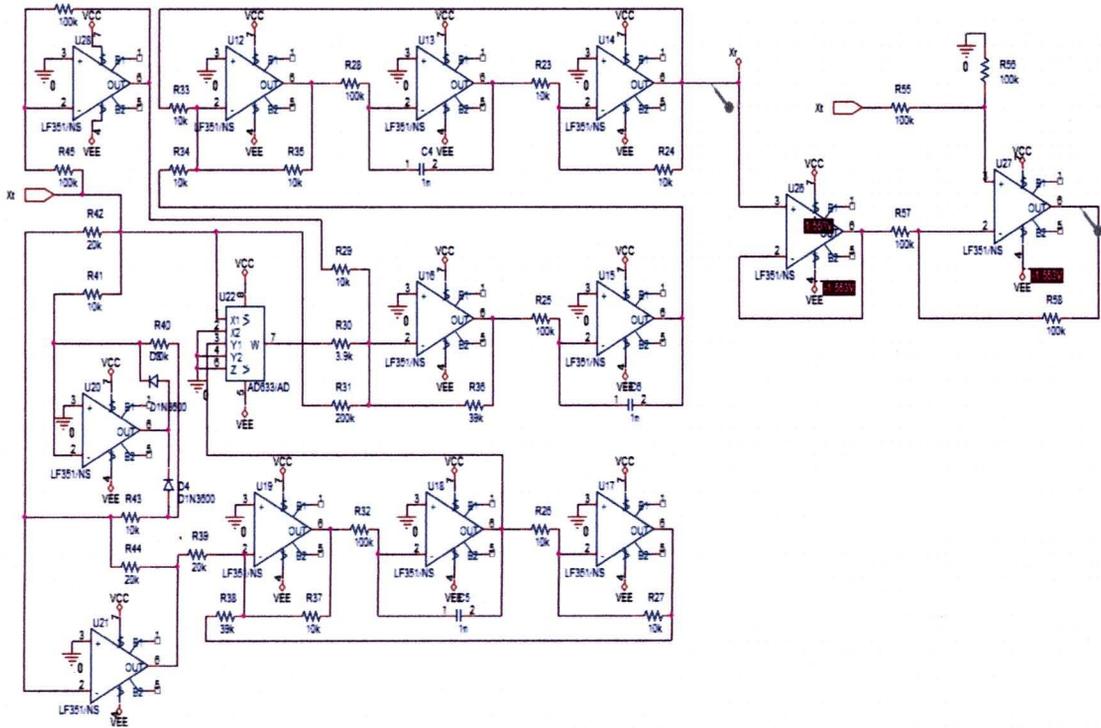
- ก. กราฟที่ได้จากการวัดค่า  $x$  ,ข. กราฟที่ได้จากการวัดค่า  $x_r$ ,ค. กราฟสัญญาณข้อมูลที่รับเข้า  $i(t)$
- ง. กราฟสัญญาณข้อมูลที่รับเข้า  $i_r(t)$ ,จ. กราฟสัญญาณข้อมูลที่มอดูเลชันกับสัญญาณเคออดิค
- ฉ. กราฟการซิงโครไนซ์ระหว่างสัญญาณเข้า  $i(t)$  กับสัญญาณออก  $i_r(t)$

## 2.4 การจำลองพฤติกรรมโดยใช้โปรแกรม Pspice

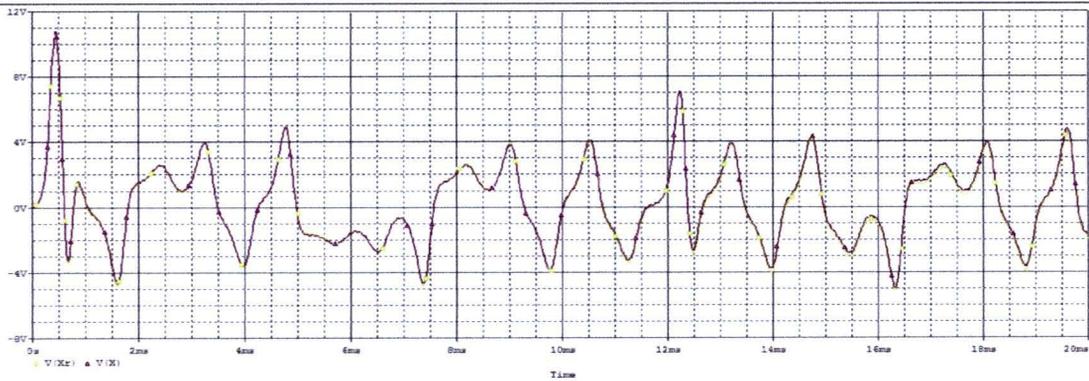
หลังจากที่ได้ประเมินความเป็นไปได้ในการสร้างวงจรจากการทดลองจำลองโดยอาศัยโปรแกรม MATLAB ในหัวข้อย่อที่แล้ว ในหัวข้อย่อตอนนี้ จะทำการจำลองอุปกรณ์ในชั้นออกแบบวงจรที่สอดคล้องกับอุปกรณ์จริงโดยอาศัยโปรแกรม Pspice ดังแสดงวงจรและผลการจำลองในรูปที่ 2.6-2.11



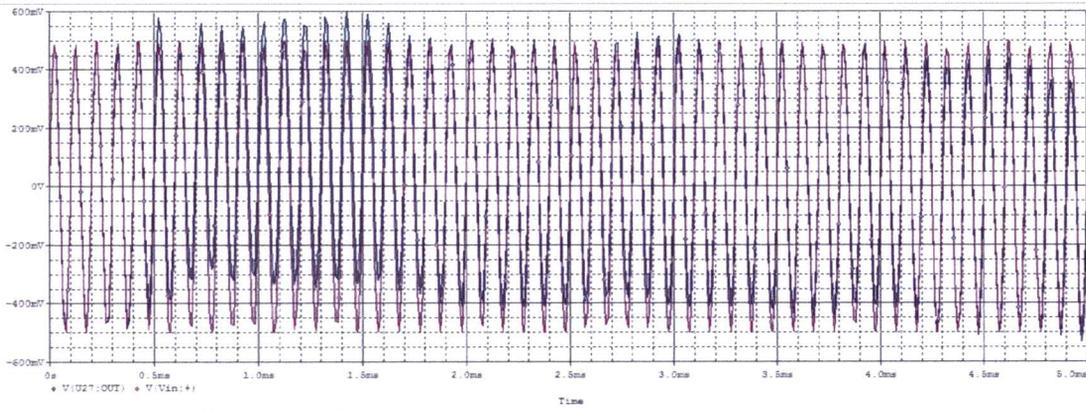
รูปที่ 2.6 การจำลองวงจรภาคส่ง โดยใช้โปรแกรม Pspice



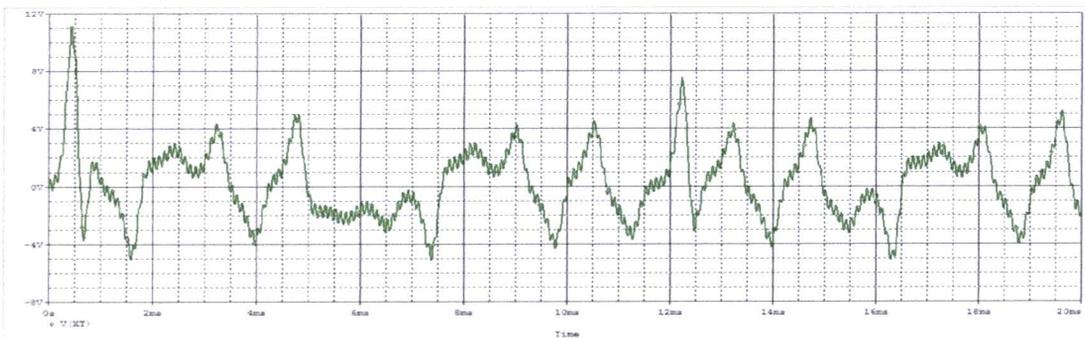
รูปที่ 2.7 การจำลองวงจรภาครับ โดยใช้โปรแกรม Pspice



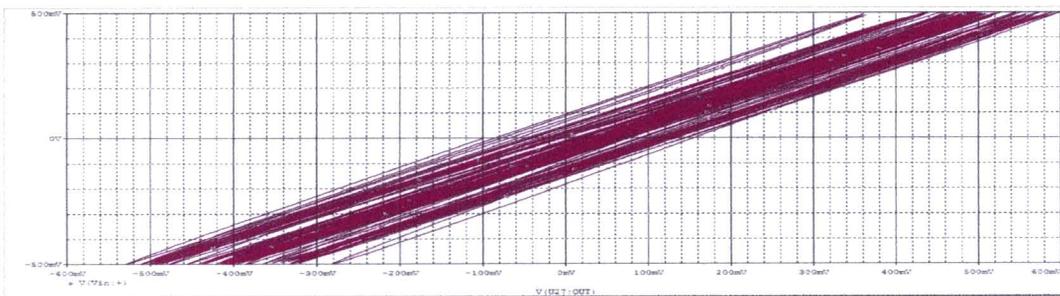
รูปที่ 2.8 กราฟที่ได้จากการวัดค่า  $x$  กับ  $x_r$



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  $i_r(t)$



สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ  
 ห้องสมุดงานวิจัย  
 วันที่..... 1 ต.ค. 2555  
 เลขทะเบียน..... 246486  
 เลขเรียกหนังสือ.....

## 2.5 ผลการทดลอง

### 2.5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างวงจร

จากการออกแบบและสร้างวงจรในทางทฤษฎี สามารถสร้างวงจรในทางปฏิบัติได้ดังนี้

#### ค่าที่ใช้ทางทฤษฎี

##### ตัวต้านทาน (Resistor)

- ตัวต้านทาน 200 k $\Omega$	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 100 k $\Omega$	3 ตัว
- ตัวต้านทาน 39 k $\Omega$	2 ตัว
- ตัวต้านทาน 20 k $\Omega$	15 ตัว
- ตัวต้านทาน 10 k $\Omega$	22 ตัว
- ตัวต้านทาน 3.9 k $\Omega$	2 ตัว

##### ตัวเก็บประจุ (Capacitive)

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

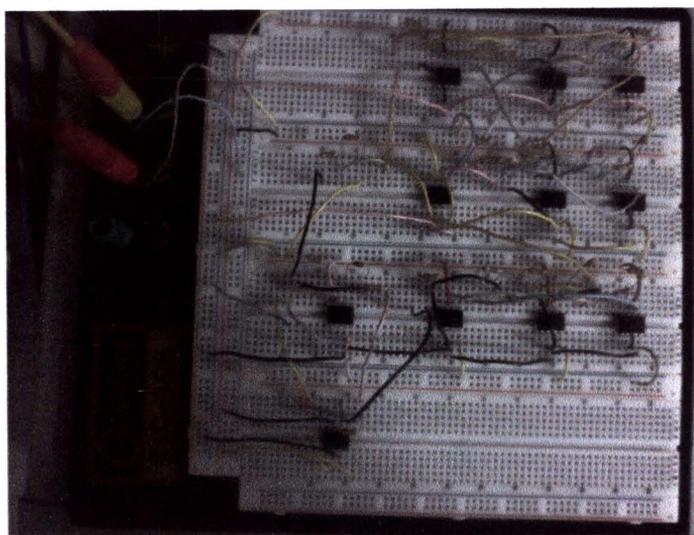
##### ไดโอด (Diode)

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

##### เซมิคอนดักเตอร์ (Semiconductor)

- IC LF351	28ตัว
- IC AD633JN	2 ตัว

การสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 2.12

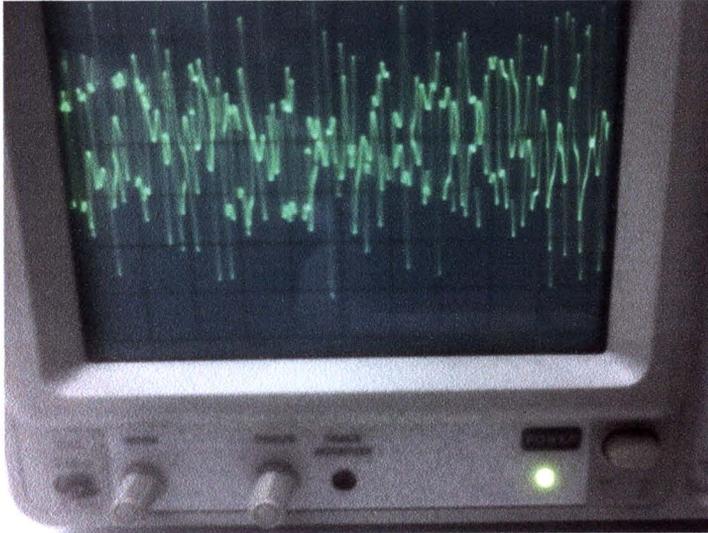


รูปที่ 2.12 วงจรเคออส

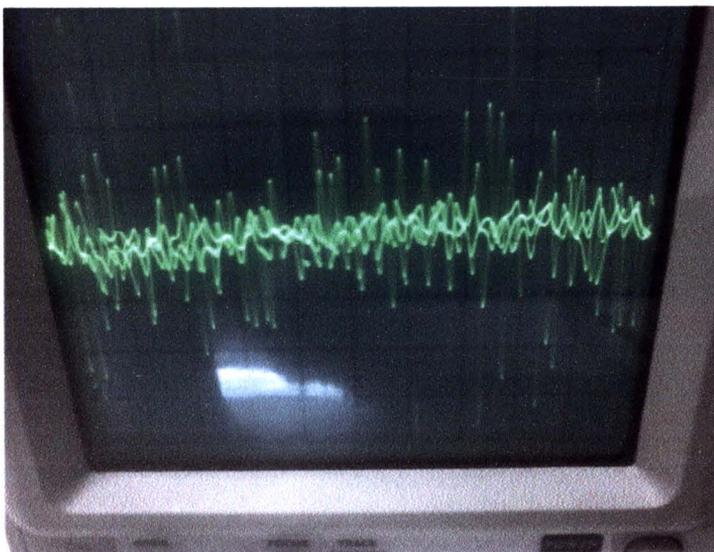
## 2.5.2 ผลที่ได้จากการทดลอง

### 2.5.2.1 วงจรเคออดิก

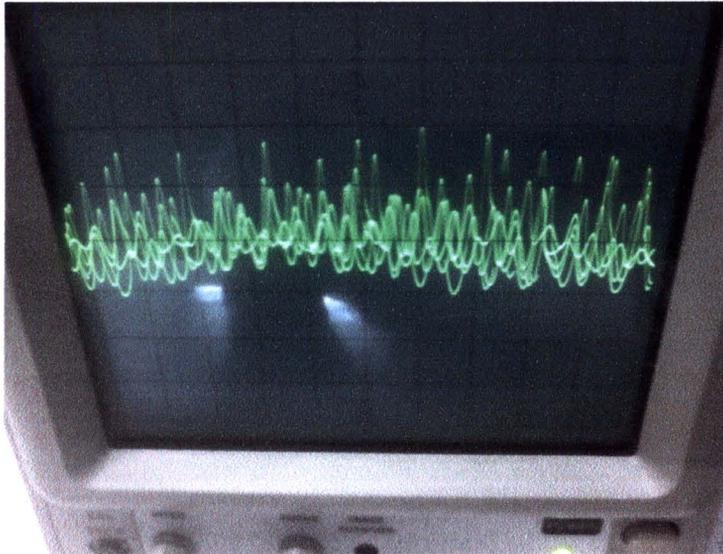
ใช้ออสซิลโลสโคปวัดค่า Output ที่สเตท x,y,z ได้ผลแสดงดังรูปที่ 2.13-2.20 จะเห็นได้ว่าวงจรสร้างได้จริงตามที่ออกแบบไว้ตรงทั้งทฤษฎีและปฏิบัติทุกประการ



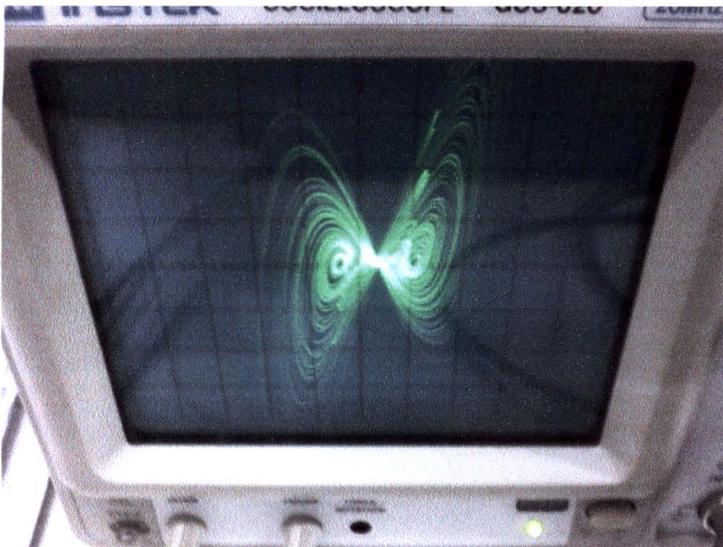
รูปที่ 2.13 กราฟค่า x ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.14 กราฟค่า y ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.15 กราฟค่า  $z$  ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



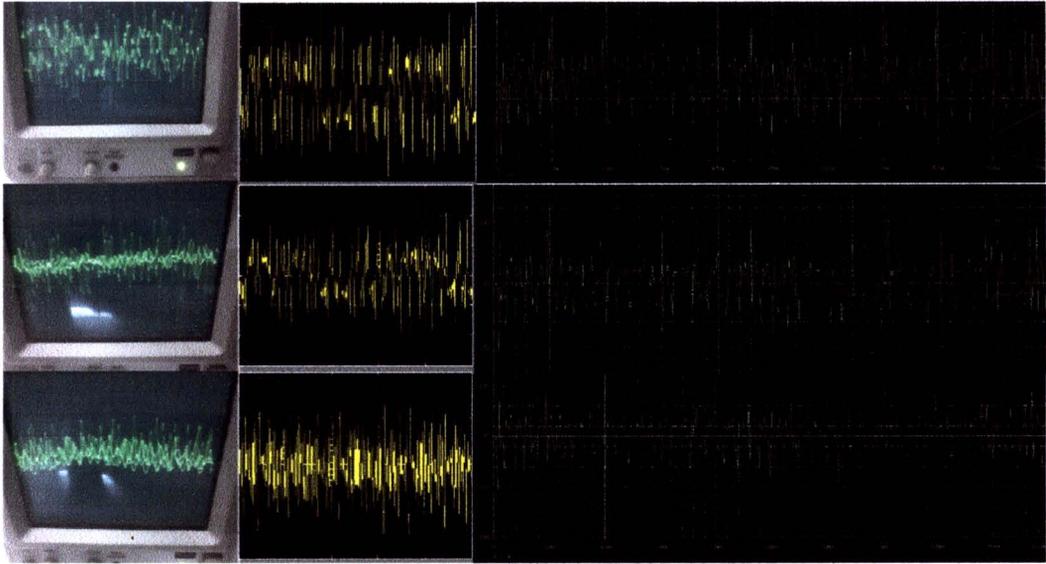
รูปที่ 2.16 กราฟค่า  $x-y$  ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



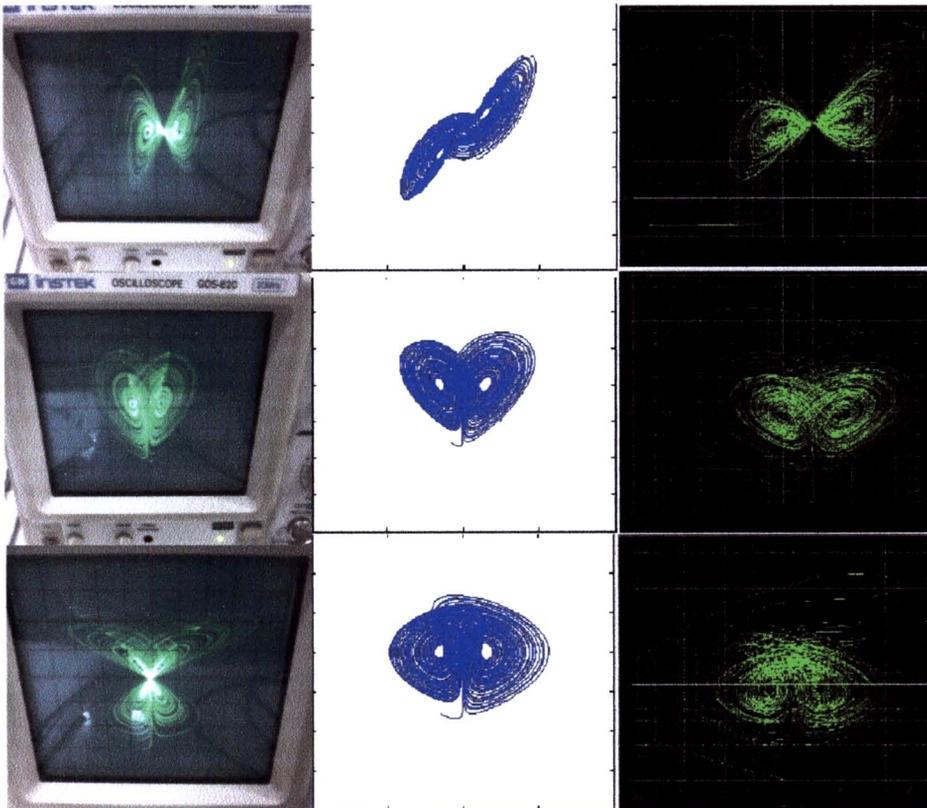
รูปที่ 2.17 กราฟค่า x-z ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



รูปที่ 2.18 กราฟค่า y-z ที่ได้จากออสซิลโลสโคป



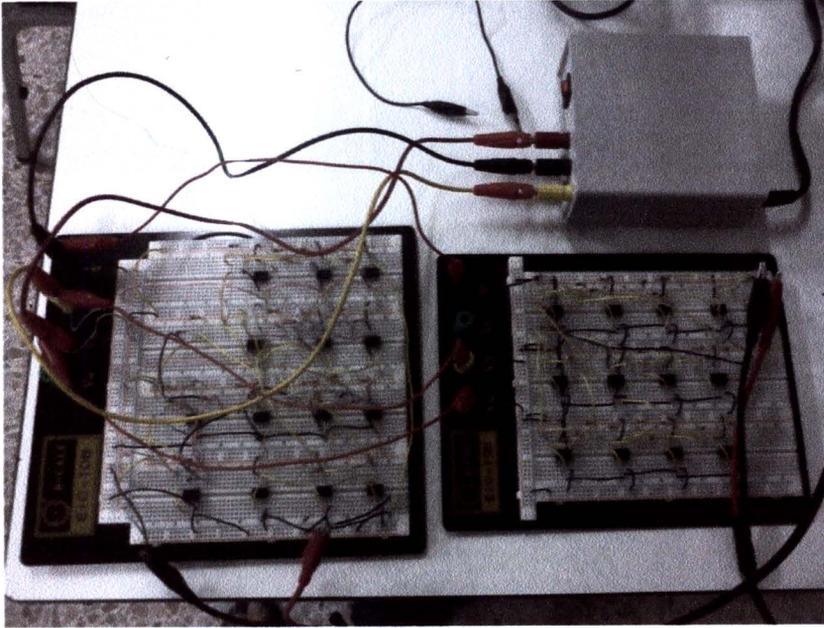
รูปที่ 2.19 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $x, y, z$  จากผลที่ได้รับกับโปรแกรม MATLAB และ PSPICE



รูปที่ 2.20 การเปรียบเทียบค่า  $x-y, x-z, y-z$  จากผลที่ได้รับกับโปรแกรม MATLAB และ PSPICE

### 2.5.2.2 วงจรที่ทำการซิงโครไนซ์แล้ว

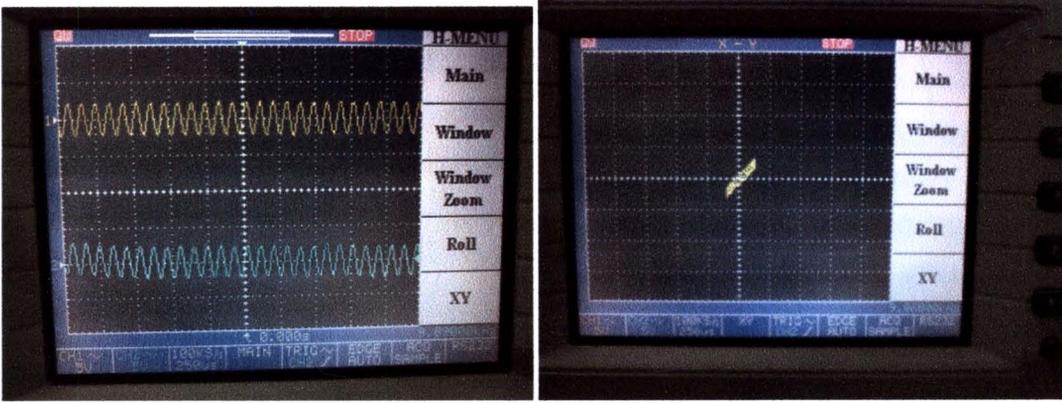
รูปที่ 2.21-2.25 แสดงผลสำเร็จของการทดลองสร้างวงจรที่สามารถส่งได้ในเวลาจริง ดังจะเห็นได้จากสัญญาณภาคส่งและภาครับตรงกัน



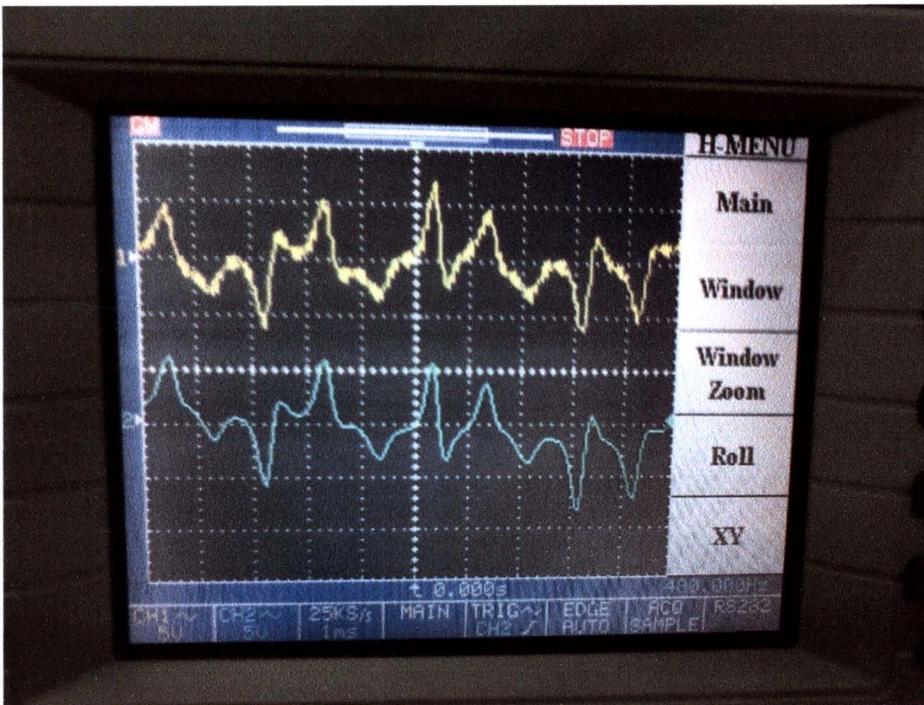
รูปที่ 2.21 วงจรรวมทั้งภาคส่งและภาครับ



รูปที่ 2.22 แสดงการเปรียบเทียบค่า  $x$ ,  $x_r$  จากผลการทดลองจริง

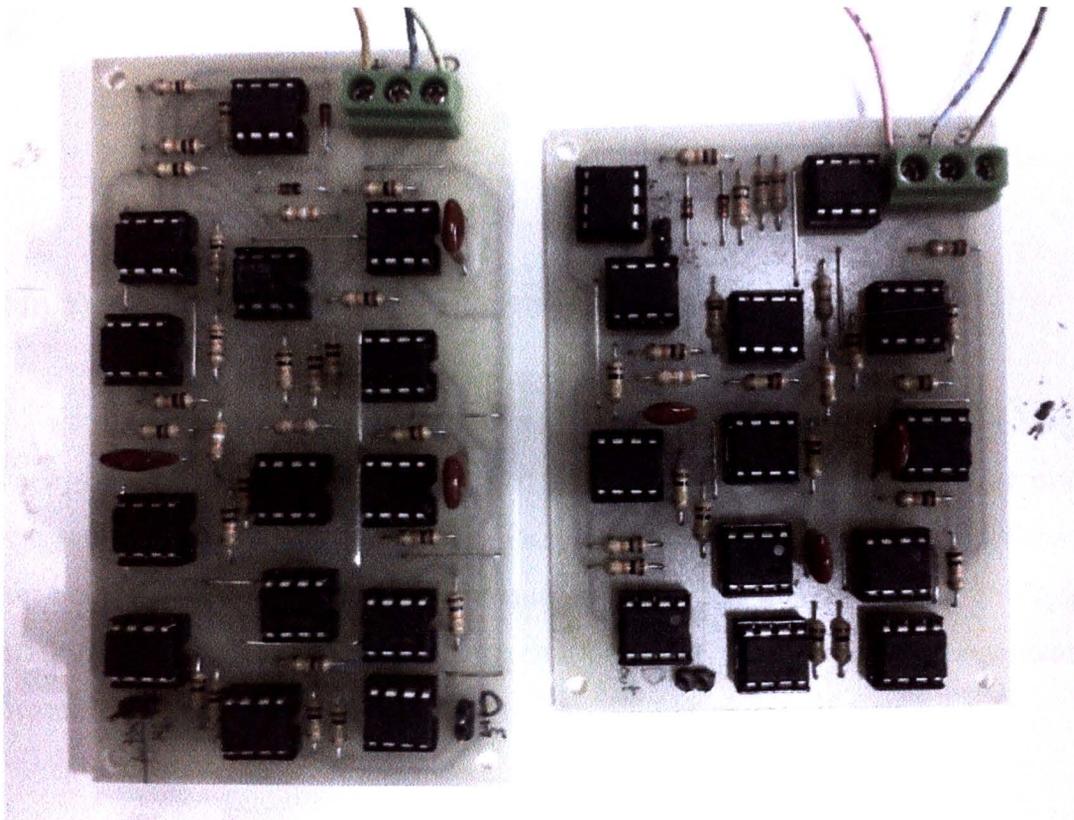


รูปที่ 2.23 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ  $i, ir$  จากผลการทดลองจริง



รูปที่ 2.24 กราฟแสดงการเปรียบเทียบ  $xt+ir, xt$  จากผลการทดลองจริง





รูปที่ 2.25 วงจรต้นแบบที่สำเร็จแล้ว

จากรูปวงจรต้นแบบที่ได้ จะนำไปประกอบและทดสอบภาคสนามร่วมกับอุปกรณ์ในภาคส่งและภาครับระบบสื่อสาร GSM ผลการทดสอบเพิ่มเติมแสดงในภาคผนวก 1 ซึ่งแสดงการทดสอบโดยจำลองภาคสนาม การอภิปรายผลการทดลองนำเสนอในบทถัดไป