

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติก
แบบมีความซับซ้อนมากแบบต่าง ๆ

THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF COMPLEX-CHAOTIC
OSCILLATOR BY COUPLING METHOD



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมสารสนเทศ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2546

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา
ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม หากมีการเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
เลขหมู่ 55760
เลขทะเบียน
วัน,เดือน,ปี 25 พ.ค. 2548



**THE DESIGN AND CONSTRUCTION OF COMPLEX-CHAOTIC
OSCILLATOR BY COUPLING METHOD**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR IN DEPARTMENT OF INFORMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติกแบบมีความซับซ้อนมากแบบต่าง ๆ		
นักศึกษา	นายธีรชาติ	อ่วมเปราะ	รหัสนักศึกษา 44015649
	นายสมบูรณ์	มงคลแมน	รหัสนักศึกษา 44015669
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.นิกร	สุขตมตันติ	
	อาจารย์กฤดากร	กล่อมการ	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2546		

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้รับการอนุมัติเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

(รศ.นิกร สุขตมตันติ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์กฤดากร กล่อมการ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

ลิขสิทธิ์ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	การออกแบบและสร้างวงจรถ้าเนิดสัญญาณเคออสติกแบบมีความซับซ้อนมากแบบต่าง ๆ		
นักศึกษา	นายธีรชาติ	อ่วมเปราะ	รหัสนักศึกษา 44015649
	นายสมบูรณ์	มงคลแมน	รหัสนักศึกษา 44015669
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.นิกร	สุขุตมตันติ	
	อาจารย์กฤดากร	กล่อมการ	
ระดับการศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต		
ภาควิชา	วิศวกรรมสารสนเทศ		
ปีการศึกษา	2546		



ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบ และ สร้างวงจรถ้าเนิดสัญญาณเคออสติกแบบมีความซับซ้อนมาก (Complex-chaotic) แบบต่าง ๆ ซึ่งมีระดับสัญญาณและการซ้ำซ้อนของสัญญาณมากกว่า Chaotic ปรกติ โดยใช้ Op-amp และ Gate รวมถึงการใช้โปรแกรม MATLAB ในการออกแบบ ทำให้เข้าใจถึงการออกแบบวงจร Complex-chaotic เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษา และนำไปประยุกต์ใช้งาน เช่น บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ การผสมของเหลว และการเข้ารหัสข้อมูล

Thesis Title The Design and Construction of Complex-chaotic Oscillator by Coupling Method

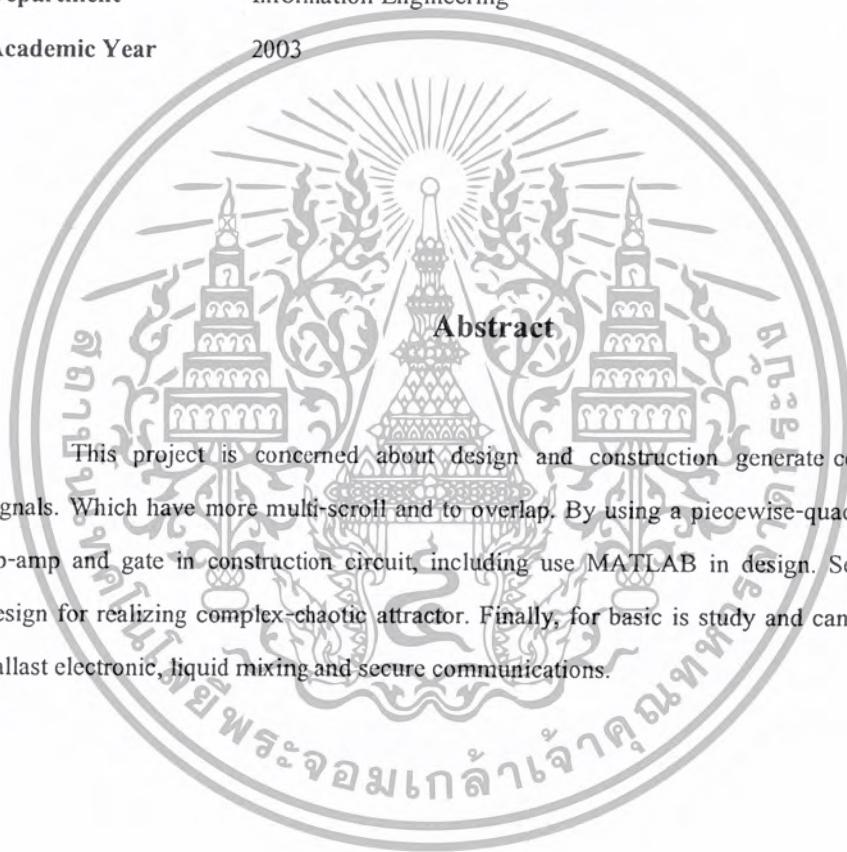
Student Mr. Teerachard Aumprow ID. 42010366
Mr. Somboon Mongkonman ID. 42010408

Advisor Assoc.Prof.Nikron Sukutamatunti
Mr. Kitdakorn Klomkarn

Graduate Level Bachelor Degree of Information Engineering

Department Information Engineering

Academic Year 2003



Abstract

This project is concerned about design and construction generate complex-chaotic signals. Which have more multi-scroll and to overlap. By using a piecewise-quadratic. First, by op-amp and gate in construction circuit, including use MATLAB in design. Second, Circuits design for realizing complex-chaotic attractor. Finally, for basic is study and can be use simple ballast electronic, liquid mixing and secure communications.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำ ได้ทำงานประสบความสำเร็จขึ้นมาได้ เพราะได้รับความอนุเคราะห์ทางด้านต่าง ๆ ทั้งคำปรึกษาทางด้านวิชาการ และคำแนะนำในการปฏิบัติงาน รวมถึงการช่วยเหลือทางด้านอุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ จาก ผศ.ดร.ปิติเชต ผู้รักษา รัช.นิกร สุขุมตันติ และอาจารย์กฤดากร กล่อมการ ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณท่านอาจารย์มา ณ ที่นี้ด้วย

ทางผู้จัดทำขอขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่คอยให้ความรักความห่วงใยตลอดจนให้การสนับสนุนทางการศึกษาด้วยดีมาตลอด รวมถึงเพื่อน ๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ ตลอดจนให้ยืมอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการทำโครงการ

คุณประโยชน์ต่าง ๆ ที่เกิดจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ทางผู้จัดทำขอขอบแต่ผู้มีพระคุณทุก ๆ ท่าน



นายธีรชาติ

อ่วมเประ

นายสมบูรณ์

มงคลแมน

ผู้จัดทำ

ก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา	1
1.2 จุดประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของโครงการ	1
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.5 สถาปัตยกรรมหลักของ โครงการงาน	2
1.5.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)	2
1.5.2 ซอฟต์แวร์ (Software)	2
1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 สัญญาณเคออสติก	3
2.2 นิยามของเคออสติก	6
2.3 Chua's circuit	8
2.4 ค่าความต้านทานลบ (Negative Resistance)	12
2.4.1 โครงสร้างของค่าความต้านทานลบ	12
2.4.2 การแสดงกราฟของค่าความต้านทานติดลบ	13
2.5 ทฤษฎี Rossler	14
2.6 ชิงโคไนซในระบบเคออสติก	16

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบ	17
3.1 การออกแบบและสร้างสัญญาณเคออสติกแบบ Chua	17
3.1.1 การออกแบบสร้างคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ จากความต้านทานลบ	20
3.1.2 การออกแบบคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 16 สกอร์	23
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler	23
บทที่ 4 ผลการทดลอง	32
4.1 ผลการจำลองจากโปรแกรม	32
4.1.1 ผลการจำลองจากวงจรคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua	32
4.1.2 ผลจากการจำลองปรับแต่งค่าพารามิเตอร์จากวงจร คอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua	33
4.1.3 ผลการจำลองจากวงจรคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler	34
4.2 ผลการทดลองจากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณเคออสติก	35
4.2.1 ผลจากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua	35
4.2.2 ผลจากวงจรถ่ายกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler	41
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	45
5.1 สรุปผลการทดลอง	45
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง	46
5.3 แนวทางในการพัฒนา	46
บรรณานุกรม	47
ภาคผนวก	

จ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงเส้น โจรของลูกบอล	6
รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของเส้น โจร 2 เส้น	7
รูปที่ 2.3 วงจร Chua ที่ประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ L, ความต้านทานเชิงเส้น R, ตัวเก็บประจุ 2 ตัว C1 และ C2, และความต้านทานไม่เชิงเส้น (N_R)	9
รูปที่ 2.4 การทำงานของวงจร Chua	10
รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานลบ	11
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของค่าความต้านทานลบ (N_R) ประกอบด้วย Op Amp 2 ตัว และความต้านทานเชิงเส้น 6 ตัว	12
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานลบ	13
รูปที่ 2.8 วงจรตรวจสอบหากราฟค่าความต้านทานลบ	14
รูปที่ 2.9 แสดงเอกเทรคเตอร์ของสมการ Rossler	15
รูปที่ 2.10 แสดงแบบการซิงโคไนซ์ที่สมบูรณ์	16
รูปที่ 3.1 ภาพเอกเทรคเตอร์ของ Chua จากการจำลองด้วย โปรแกรม matlab	17
รูปที่ 3.2 Circuit diagram of Chua's oscillator	18
รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะ v-i ของ chua ไดโอด	18
รูปที่ 3.4 Negative impedance converter	19
รูปที่ 3.5 แสดงการต่อขนานของความต้านทานไม่เชิงเส้น	19
รูปที่ 3.6 การออกแบบจำนวนเบรกพอยต์ให้กับความต้านทานลบ	20
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสร้างสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 4 สเตอร์	22
รูปที่ 3.8 แสดงการเชื่อมต่อ 2 วงจรเข้าด้วยกัน	23
รูปที่ 3.9 ภาพเอกเทรคเตอร์ของ Rossler จากการจำลองด้วยโปรแกรม	24
รูปที่ 3.10 ภาพเอกเทรคเตอร์ของสมการปรับปรุง Rossler จากการจำลองด้วยโปรแกรม	25
รูปที่ 3.11 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของสมการปรับปรุง Rossler	27
รูปที่ 3.12 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของการเชื่อมต่อ 2 ระบบ เข้าด้วยกัน	28
รูปที่ 3.13 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของสมการปรับปรุง Rossler แบบเพิ่มความต้านทาน	30

ณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.14 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของการเชื่อมต่อ 2 ระบบ เข้าด้วยกัน	31
รูปที่ 4.1 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua โดยวัดเทียบ X-Y	32
รูปที่ 4.2 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua ในโดเมนเวลา	32
รูปที่ 4.3 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua โดยวัดค่าความต้านทานลบ	33
รูปที่ 4.4 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก วัดเทียบ X-Y	33
รูปที่ 4.5 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก ในโดเมนเวลา	34
รูปที่ 4.6 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler โดยวัดเทียบ X-Y	34
รูปที่ 4.7 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler ในโดเมนเวลา	35
รูปที่ 4.8 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 3 สกอร์ ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	35
รูปที่ 4.9 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	36
รูปที่ 4.10 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 16 สกอร์ ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	39
รูปที่ 4.11 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 16 สกอร์ ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป	40
รูปที่ 4.12 สัญญาณเคออสติกของสมการปรับปรุง Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	41
รูปที่ 4.13 สัญญาณเคออสติกของสมการปรับปรุง Rossler ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป	41
รูปที่ 4.14 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	42
รูปที่ 4.15 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป	42
รูปที่ 4.16 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	43
รูปที่ 4.17 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป	43
รูปที่ 4.18 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป	44
รูปที่ 4.19 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป	44

ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงรายการอุปกรณ์การสร้างคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ จากความต้านทานลบ	21
ตารางที่ 3.2 แสดงรายการอุปกรณ์การสร้าง Rossler	26
ตารางที่ 3.2 แสดงรายการอุปกรณ์การสร้าง คอมเพลกซ์ Rossler	29



๗

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 แนวคิดและที่มาของปัญหา

เนื่องจากปัจจุบัน สัญญาณเคออสติก ได้รับความสนใจมาก ในการนำไปใช้งาน ให้เกิดประโยชน์ อาทิเช่น มีความสำคัญในวงจรและอุปกรณ์ที่มีการดำเนินงานสูงหรือเกี่ยวกับการผลิตของระบบ การประมวลผลของข้อมูล การผสมของเหลว และการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลข่าวสาร และอื่น ๆ อย่างมาก แต่ในทางกลับกันแล้วเรากลับมีความรู้ในด้านสัญญาณเคออสติกน้อยมาก ดังนั้น จึงมีแนวความคิดในการสร้างสัญญาณเคออสติกที่มีความซับซ้อนมากหลายรูปแบบ (Complex-Chaotic) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาให้เกิดความรู้และความเข้าใจและการนำไปประยุกต์ใช้งานต่าง ๆ ได้ เพื่อให้เกิดการก้าวทันเทคโนโลยีหรือเทียบเท่า แม้แต่การก้าวล้ำ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในอนาคตที่จะมาถึงอันใกล้

1.2 จุดประสงค์

- 1.2.1 เพื่อศึกษาปรากฏการณ์คอมเพลกซ์เคออสติก (Complex-Chaotic) แบบต่าง ๆ
- 1.2.2 เพื่อจำลองการเกิด คอมเพลกซ์เคออสติก โดยการ Simulate ผ่าน โปรแกรม
- 1.2.3 เพื่อสร้างวงจร คอมเพลกซ์เคออสติก หลายรูปแบบ

1.3 ขอบเขตของโครงการ

- 1.3.1 ทำการออกแบบวงจรถ้าเนดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก
- 1.3.2 ทำการสร้างวงจรถ้าเนดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก ได้หลายรูปแบบ
- 1.3.3 นำไปทดลองและประยุกต์ใช้งาน

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.4.1 สามารถทราบและเข้าใจปรากฏการณ์คอมเพลกซ์เคออสติก ได้
- 1.4.2 สามารถออกแบบวงจรถ้าเนดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก ได้
- 1.4.3 สามารถสร้างวงจรถ้าเนดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก หลายรูปแบบได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 สถาปัตยกรรมหลักโครงการ

1.5.1 ฮาร์ดแวร์ (Hardware)

- คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล	จำนวน	1	เครื่อง
- บอร์ดทดลองวงจร	จำนวน	1	ชุด
- ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)	จำนวน	1	เครื่อง
- แหล่งจ่ายไฟ	จำนวน	1	เครื่อง

1.5.2 ซอฟต์แวร์ (Software)

- MATLAB เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการทำงานของวงจร
- Pspice เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองรูปแบบของสัญญาณ

1.6 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ID	Task Name	Start	Finish	Duration	2003					2004						
					Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar		
1	Problem Definition & Get Requirement	2/6/03	17/7/03	34d												
2	Analysis & Design	18/7/03	1/10/03	54d		▽			▽							
3	Software Design	18/7/03	1/10/03	54d												
4	Hardware Design	19/8/03	1/10/03	32d												
5	Implementation	2/10/03	26/1/04	83d					▽							▽
6	Software	2/10/03	24/11/03	38d												
7	Hardware	6/11/03	26/1/04	58d												
8	Test & Debug	2/10/03	26/2/04	106d												
9	Documentation	18/7/03	8/3/04	167d												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สัญญาณเคออสติก

การค้นพบทฤษฎีเคออสติก มีการสรุปเกี่ยวกับทฤษฎีเคออสติก ได้มีทฤษฎีสำคัญ ๆ ทางฟิสิกส์สองทฤษฎี นั่นคือ ทฤษฎีควอนตัม (Quantum Theory) และทฤษฎีสัมพันธภาพ (Relativity Theory)

Len Percival ศาสตราจารย์วิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์แห่งมหาวิทยาลัยควีนแมรี และเวสต์ฟิลด์ คอลเลจ, มหาวิทยาลัยลอนดอน เขียนบทความชื่อ Chaos: a science for the real world. กล่าวไว้ว่าทฤษฎีเคออสติก มาจากทุกสาขาวิชา คณิตศาสตร์ ฟิสิกส์ เคมี วิศวกรรม แพทย์ ชีววิทยา ดาราศาสตร์ และอุทุนิยม

เคออสติก ในความหมายทางวิทยาศาสตร์คือ สภาพและกระบวนการที่ไร้เสถียรภาพ (unstable) ซึ่งมีการกระทบเพียงเล็กน้อย ทำให้เกิดการพัฒนายิ่งที่ไม่เป็นเส้นตรง เป็นเส้นทางคดเคี้ยว กวักแกว่ง บางครั้งถึงก้ำกักระโดดกลับพลัน ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจึงทำนายให้ถูกต้องแม่นยำได้ยาก

ทั้งหมดนี้ล้วนแล้วแต่เป็นสิ่งที่ตรงกันข้ามกับแนวคิดหลักที่เชื่อกันมาตั้งแต่ศตวรรษที่ 17 ว่าสรรพสิ่งทั้งหลายอยู่ภายใต้กฎเกณฑ์ที่สามารถคำนวณได้อย่างถูกต้องไม่ผิดพลาด ขอให้รู้

สมมุติฐานอันเป็นเงื่อนไขเบื้องต้นให้ชัดเจนจริงๆ จะสามารถทำนายผลลัพธ์ออกมาได้อย่างแม่นยำ

นับตั้งแต่ศตวรรษที่ 16 ซึ่งเป็นยุคกำเนิดแห่งความรู้แจ้ง พยายามสลัดให้หลุดจากอิทธิพลของศาสนจักร โดยอาศัยหลักคิดแบบมีเหตุผล อันเป็นพื้นฐานในการพัฒนาวิทยาการสมัยใหม่ วิชาฟิสิกส์ได้รับการยกย่องว่าเป็น “ราชาแห่งวิทยาการ” ตั้งแต่ศตวรรษที่ 17 ได้เป็นแบบอย่างอันดีของวิทยาศาสตร์ที่มีความแม่นยำ ซึ่งศาสตร์สาขาต่าง ๆ นำไปเป็นแบบจำลองในการคิด

ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปรากฏการณ์อันสลับซับซ้อนต่าง ๆ นั้น สามารถทำความเข้าใจได้ไม่ยากนัก โดยการลดส่วนแยกย่อยลงเป็นหน่วยย่อยพื้นฐานของมัน แล้วทำการศึกษาวิเคราะห์กลไกการทำงานของหน่วยงานย่อยโดยใช้หลักคิดของตรรกอย่างมีเหตุผล เมื่อดันพบสาเหตุแล้วก็สามารถทำนายผลลัพธ์ที่ออกมาได้แทบไม่ผิดพลาด เพราะมันอยู่ใต้กฎที่ถูกกำหนดเอาไว้แล้ว

ทัศนคติแบบลดทอนและย่อยส่วน ได้แทรกซึมอยู่ในทุกวงวิทยาการ ในสมัยนั้นไปเลยมีนักฟิสิกส์ผู้หนึ่งชื่อ ปีแอร์ ลาปลาส มั่นใจว่าวันหนึ่งจะมีนักวิทยาศาสตร์ค้นพบสมการคณิตศาสตร์สมการเดียวที่สามารถอธิบายทุกอย่างได้

ฟิสิกส์เป็นหลักในคิดแบบเส้นตรง ซึ่งสามารถคำนวณน้ำขึ้น น้ำลง การเกิดสุริยุปราคาและการโคจรของดวงดาว รวมถึงเหตุการณ์ หลาย ๆ อย่างในธรรมชาติได้อย่างแม่นยำ

อย่างไรก็ตามความคิดเป็นเส้นตรงและย่อส่วนเริ่มถูกท้าทายเมื่อการทดลองใหม่ ๆ นำไปสู่การค้นพบทฤษฎีพื้นฐานที่เป็นปรากฏการณ์ธรรมชาติทางพลวัตศาสตร์ไฟฟ้า (electrodynamics) ของ Maxwell ทฤษฎีอุณหพลวัต (thermodynamics) ของ Boltzmann และทฤษฎีวิวัฒนาการของ Darwin

การทำทนายทางวิทยาศาสตร์ในศตวรรษที่ 19 ที่มีต่อวิทยาศาสตร์ดั้งเดิม ถูกปลุกเร้าหนักยิ่งขึ้นเมื่อ Henri Poincare ได้เพิ่มตัวแปรตัวใหม่เข้าในสมการของนิวตัน เมื่อช่วงต้นศตวรรษที่ 20 สมการของนิวตันที่มีสมมุติฐานของตัวแปรสองตัว เช่น การคำนวณเส้นทางโคจรของโลกกับดวงอาทิตย์ แต่เมื่อเพิ่มดวงดาวใหม่เป็นตัวแปรที่สามเข้าไป ความสัมพันธ์ของดวงดาวทั้งสามจะเปลี่ยนไปทันทีที่เพียงแต่หักเส้นทางโคจรของดาวดวงหนึ่งเพียงเล็กน้อย การโคจรของดาวทั้งสามจะออกนอกกลุ่มนอกทางปิดเป็เหมือนคนเมา แต่เนื่องจากความเชื่อที่มีต่อฟิสิกส์แบบเส้นตรงยังมีอิทธิพลอยู่มาก Poincare จึงไม่มั่นใจในสิ่งที่เขาค้นพบเพราะยังไม่มีสมการที่ฉลาดสามารถยืนยันการคำนวณของเขาว่าไม่ผิดพลาด Poincare จึงทิ้งการค้นคว้าไว้เพียงแค่นั้นจบจนสิ้นอายุของเขา

การประดิษฐ์เครื่องคอมพิวเตอร์ที่สามารถใช้งานใช้งานได้จริง ๆ จึงทำให้มีการรื้อฟื้นการค้นคว้าวิจัย Chaos ขึ้นมาอีกครั้ง เหตุสำคัญที่กระตุ้นให้สนใจศึกษาทฤษฎี Chaos จากการทดลองคำนวณดินฟ้าอากาศระยะยาวของ Edward Lorenz แห่งสถาบัน MIT เมื่อกลางทศวรรษที่ 60 อาจารย์ด้าน Meteorology พยายามสร้างโมเดลการคำนวณในการพยากรณ์อากาศโดยใช้สมการง่าย ๆ แสดงการปฏิสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับกระแสลม เขาป้อนข้อมูลที่มีจุดทศนิยม 6 หลักเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ซึ่งพิมพ์ออกมาทุก ๆ นาที ด้วยความน่าเบื่อหน่ายคอยผลลัพธ์นาน ๆ Lorenz จึงตัดตัวเลขหลังจุดทศนิยมออกไปเสีย 3 หลัก เขาเอาผลลัพธ์จากระยะหนึ่งมาเป็นจุดเริ่มต้นของการคำนวณแล้วสตาาร์ทโปรแกรมใหม่ ผลของการคำนวณระยะแรกเหมือนกับการทดลองเก่า ๆ ที่เคยทำมาครั้งแล้วครั้งเล่า หลังจากถูกไปซังกาแฟแล้วกลับมาดูตัวเลขใหม่ ปรากฏว่าผลลัพธ์ต่างกันโดยสิ้นเชิง โมเดลของดินฟ้าอากาศไปกันคนละทิศละทาง

Lorenz คิดว่าเครื่องคอมพิวเตอร์คงจะมีอาจผิดพลาดจึงทดลองซ้ำอีก ผลคำนวณยังคงยืนยันความแตกต่างดังครั้งแรก เขาทดลองอีกสองสามครั้งซึ่งย้ำความถูกต้องของคอมพิวเตอร์

จนในที่สุดเขาได้รู้ว่าความแตกต่างของโมเดลนั้น มาจากการลดตัวเลข 3 หลักหลังจุดทศนิยมซึ่งเป็น เลื่อนไขเบื้องต้น ในการคำนวณ เพราะผลต่างเพียงน้อยนิดอย่างไม่น่าเชื่อเช่นนี้ทำให้มันได้รับการขนานนามว่าเป็น ผลกระทบผีเสื้อ (butterfly effect)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุดที่เป็นประเด็นสำคัญข้อหนึ่งในทฤษฎีเคออสติก คือความอ่อนไหวอย่างสูงของเงื่อนไขเบื้องต้น กับ principle of weak causality ที่ถือว่าสาเหตุเบื้องต้นเพียงนิดเดียว สามารถก่อให้เกิดผลกระทบอย่างมากได้

2.1.1 ระบบที่เป็นเคออสติกจะประกอบไปด้วยลักษณะดังต่อไปนี้

2.1.1.1) มีคุณสมบัติแบบไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinearly) โดยมีคุณสมบัติตรงกันข้ามกับแบบเชิงเส้น โดยฟังก์ชัน f จะมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้นก็ต่อเมื่อ $f(x+y) = f(x)+f(y)$ นั้นหมายความว่าระบบไม่เป็นเชิงเส้น ผลลัพธ์ของระบบทั้งหมดจะไม่เท่ากับผลรวมของผลลัพธ์ที่เกิดจากระบบย่อยรวมกัน (มากกว่าหรือน้อยกว่าก็ได้) แต่ไม่ใช่ว่าระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเกิดเคออสติกเสมอไป จะมีช่วงพารามิเตอร์ (parameter) ที่จะทำให้ระบบมีพฤติกรรมแบบเคออสติก และระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นบางระบบก็จะเป็นเคออสติกตลอดเวลา

2.1.1.2) ไม่ใช่เกิดขึ้นแบบสุ่ม คือมีสมการอธิบาย (deterministic) กล่าวคือในระบบเคออสติก พฤติกรรมทั้งหลายเกิดขึ้นภายใต้กฎเกณฑ์ที่แน่นอน เหตุการณ์ที่ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าได้แบบการทอดลูกเต๋าจึงไม่ใช่เคออสติก แต่การสุ่ม เพื่อให้เข้าใจว่าเคออสติกไม่ใช่การสุ่มจึงมีการเรียกเคออสติกว่า deterministic chaos

2.1.1.3) ไวต่อสภาวะเริ่มต้น (sensitivity to initial conditions) การที่เงื่อนไขเริ่มต้นต่างกันเพียงเล็กน้อย ทำให้ผลสุดท้ายต่างกันมาก สาเหตุที่เคออสติกไวต่อสภาวะเริ่มต้นเพราะว่ามันขยายความแตกต่างให้เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว การขยายความแตกต่างให้เร็วขึ้นระดับเลขยกกำลัง (exponential) ของเวลา

2.1.1.4) ไม่สามารถทำนายล่วงหน้าในระยะยาวได้ (long-term prediction is impossible) ผลมาจากข้อ 2.1.1.3 เพราะการที่ไวต่อสภาวะเริ่มต้น ทำให้เราไม่รู้จะเป็นอย่างไรในระยะยาว แต่การทำนายในระยะสั้นก็มีโอกาสเป็นไปได้ (short-term prediction)

นอกจากนี้ระบบเคออสติกยังมีอีกหนึ่งคุณสมบัติคือ การแสดงลักษณะ คล้ายกับตัวเอง (self similarity) หรือเรียกว่า “ แฟร็กทัล ” (fractal) ลักษณะนี้จะปรากฏเมื่อเราพลอตเส้นทางการเคลื่อนที่ของระบบในระบบพิกัดที่บ่งถึงสภาวะ (phase space) ลักษณะคล้ายกับตัวเอง หมายความว่า ไม่ว่าเราจะมองเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จากสเกลเล็กหรือใหญ่แค่ไหน มันก็ยังมีลักษณะเหมือนเดิม แต่ลักษณะแบบแฟร็กทัลนี้ ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นในการเกิดเคออสติก แต่อย่างไร เพียงมักพบรวมกันบ่อยเท่านั้น

2.2 นิยามของเกออสติก

นิยาม ของ Lyapunov exponent

จะเป็นการประยุกต์ใช้ทฤษฎีของ Aleksandr M. Lyapunov เกี่ยวกับการวิเคราะห์ความมีเสถียรภาพเส้นตรงที่เส้นโค้งเข้าหากัน เราจะให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ คงที่แล้วดูว่า เมื่อเวลาผ่านไปสถานะ (state) ของระบบ (x) จะเปลี่ยนไปอย่างไร

เป็นอัตราเฉลี่ยของการแยกออกหรือการรวมเข้าหากันของเส้นตรง จะเป็นการพิจารณาเส้นโคจร (trajectory) ที่ใกล้เคียงกัน จำนวนที่ได้คือ จำนวนตัวแปรที่น้อยที่สุดที่ใช้แสดงสมการ (dimension) ของเซต ซึ่งบรรจุ สถานะที่เป็นไปได้ทั้งหมดของระบบ (phase space) อีกอย่างที่เกี่ยวข้องกับ Lyapunov exponent ที่สำคัญเพราะเป็นตัวกำหนด ขอบเขตการทำนาย ทุกการทำนายมีคุณภาพเป็นไปได้สำหรับช่วงเวลามากกว่าที่กำหนดนี้ มันกำหนดให้ด้วย $\ln(\varepsilon)/\lambda_{\max}$ ที่ ε เป็นความผิดพลาดของการวัดของสถานะเริ่มต้น ค่าผิดพลาดนี้จะให้ในหน่วยของ ความกว้างของค่าเฉลี่ย (averaged amplitude) สำหรับการแกว่งที่ไม่สามารถทำนายได้

Lyapunov spectrum ได้มาจาก จินตนาลูกบอลที่มีค่าน้อย ๆ ด้วยรัศมี dr ตั้งอยู่บนสถานะเริ่มต้นของ trajectory ลูกบอลผิกรูปร่างไปสู่วงรีหรือรูปไข่ หลังจากเวลาผ่านไป t Orbit (คำตอบของสมการเคลื่อนที่ในรูปแบบเวลาต่อเนื่อง) ทั้งหมดซึ่งได้เริ่มที่ลูกบอลจะเป็นวงรี i^{th} Lyapunov exponent λ_i ด้วย

$$\lambda_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \ln \left(\frac{dli(t)}{dr} \right)$$

ที่ $dli(t)$ เป็นรัศมีของรูปวงรี

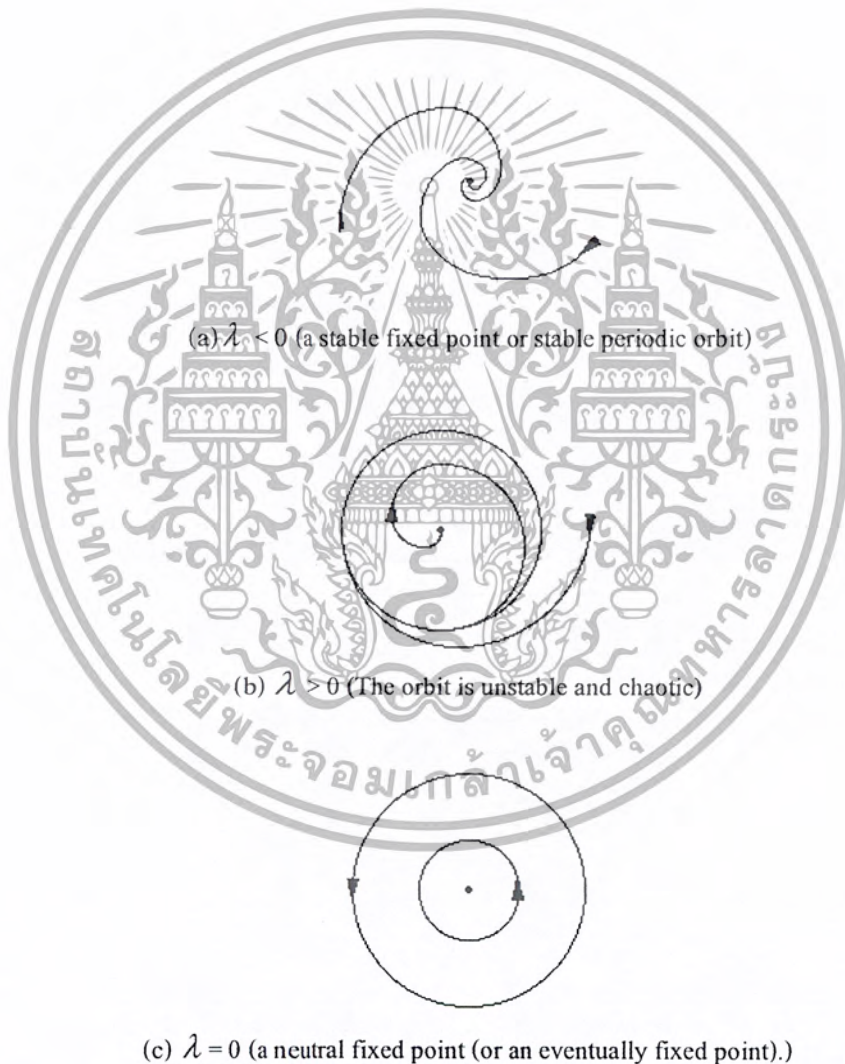


รูปที่ 2.1 แสดงเส้น โคจรของลูกบอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเส้นโคจรสำหรับระบบที่มีเงื่อนไขเริ่มต้น x_0 นิยามว่า $\{ x(t) \mid x(0) = x_0 \}$ พิจารณาเงื่อนไขเริ่มต้น 2 ตัว ซึ่งใกล้เคียงกัน $x(0)$, $x(0)+d_0$ เมื่อค่าเริ่มต้นมีค่าน้อยๆ แต่เมื่อเวลาผ่านไปเท่ากับ t ที่ $x(0)$ กลายเป็น $x(t)$ และ $x(0)+d_0$ กลายเป็น $x(t)+d(t)$ ได้สมการดังนี้

$$\lambda_i = \lim_{\substack{t \rightarrow \infty \\ |\Delta x_0| \rightarrow 0}} \frac{1}{t} \ln \frac{|\Delta x(x_0, t)|}{|\Delta x_0|}$$



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะของเส้นโคจร 2 เส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $\lambda < 0$ จะได้ว่า $d(t)$ เข้าใกล้ ศูนย์ เมื่อเวลาผ่านไป ซึ่งก็คือ 2 trajectory จะรวมเข้าหากันเสมอ

เมื่อ $\lambda > 0$ จะได้ว่า $d(t)$ เพิ่มค่าแบบ exponential เมื่อ t เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น 2 trajectory ที่จุดเริ่มต้นใกล้เดียวกัน จะต่างกันอย่างสิ้นเชิง จนไม่สามารถทำนายได้ คือ ไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้น ก็คือ เकोออสติกนั่นเอง

เมื่อ $\lambda = 0$ ระยะห่างของ $d(t)$ คงที่ จะได้ว่า เป็นว่า 2 trajectory จะขนานกันตลอดไป

สังเกตได้ว่า $\lambda > 0$ แสดงว่ามีค่าเป็นบวกจะเป็นเคออสติกจึงนิยามได้ว่า

ระบบเคออสติกทั้งหมดต้องมีอย่างน้อยที่สุด 1 λ ที่เป็นค่าบวก นิยมเรียกว่า อย่างน้อยที่สุด 1 positive lyapunov exponent

hyper chaotic

ในระบบที่จะเป็นเคออสติกนั้นจะต้องมี $\lambda + (1 \text{ positive lyapunov exponent})$ อย่างน้อยที่สุด 1 ค่า ถึงจะทำให้เกิดสัญญาณเคออสติก แต่ถ้ามี 2 ค่า $\lambda + (2 \text{ positive lyapunov exponent})$ ขึ้นไปก็จะทำให้เป็น Complex Chaotic โดยตรวจสอบจากการหาค่าไอเกน ของสมการระบบ ซึ่งเมื่อสมการเป็นคอมเพลกซ์เคออสติกแล้ว จะทำให้สัญญาณเคออสติกเกิดความซับซ้อนเพิ่มมากขึ้น โดยจะเป็นส่วนสำคัญของโครงงานนี้

2.3 Chua's circuit

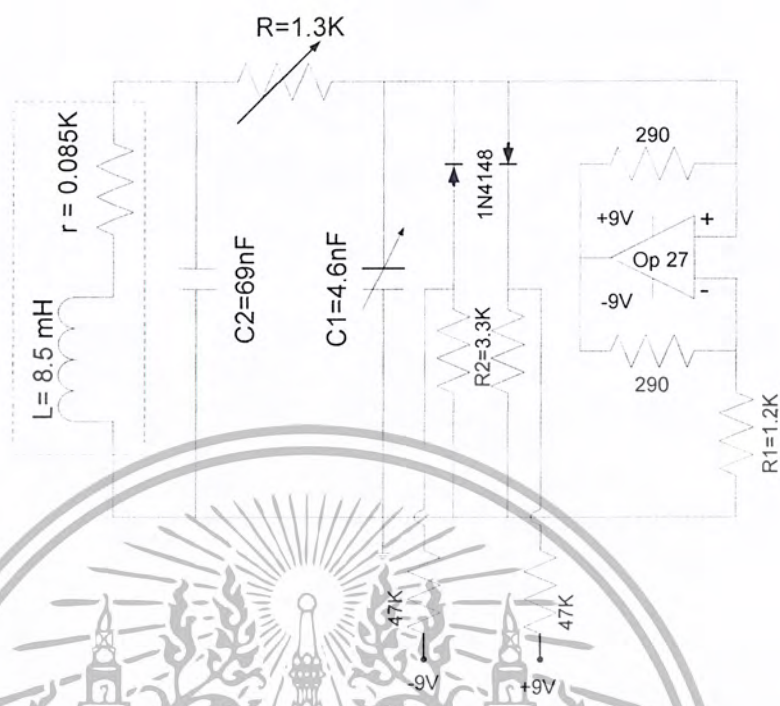
เป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ ที่สร้างสัญญาณเคออสติกที่ง่ายที่สุด ถูกพัฒนาขึ้นโดย Leon Chua มีฟังก์ชัน $f(x) = bx + 0.5(\alpha - b)(|x + 1| - |x - 1|)$, โดยมี a, b เป็นค่าคงที่ และ $\alpha = 9, \beta = 10, a = -1/7, b = 2/7$

$$\frac{dx}{dt} = \alpha(y - x - f(x)),$$

$$\frac{dy}{dt} = x - y - z,$$

$$\frac{dz}{dt} = -\beta y$$

(2.1)



รูปที่ 2.3 วงจร Chua ที่ประกอบด้วย ขดลวดเหนี่ยวนำ L , ความต้านทานเชิงเส้น R , ตัวเก็บประจุ 2 ตัว $C1$ และ $C2$, และความต้านทานไม่เชิงเส้น (N_R)

หลักการทํางานของวงจร

การทํางานของวงจรจะแยกการทํางานออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนที่ 1 วงจรสร้างสัญญาณออสซิลเลเตอร์ ซึ่งเกี่ยวข้องกับ ตัวเหนี่ยวนำ L (ที่มีความต้านทาน r ด้วย) ตัวต้านทาน R ตัวเก็บประจุ $C1$, $C2$ ของวงจร Chua

ส่วนที่ 2 วงจรสร้างความต้านทานลบเกิดจากออปแอมป์และความต้านทานซึ่งมีผลทำให้ความต้านทานมีค่าลบ (Negative Resistance) มีขนาดเปลี่ยนแปลงไปโดย $R1$ ซึ่งปัจจัยสำคัญที่มันเป็นรูปสัญญาณเชิงเส้นอยู่ ซึ่งมันไม่ได้ให้สัญญาณเกออสติก แต่มันเป็นตัวที่กำหนดแรงดันที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่

ส่วนที่ 3 ให้ความไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งต่อขนานกับส่วนที่ 2 ที่เป็นเชิงเส้นโดยจะมีไดโอด เป็นเหมือนสวิตช์ที่ใช้เลือกที่จะทํางานที่ส่วนนี้ เมื่อค่าแรงดันมีมากกว่าส่วนที่ 2

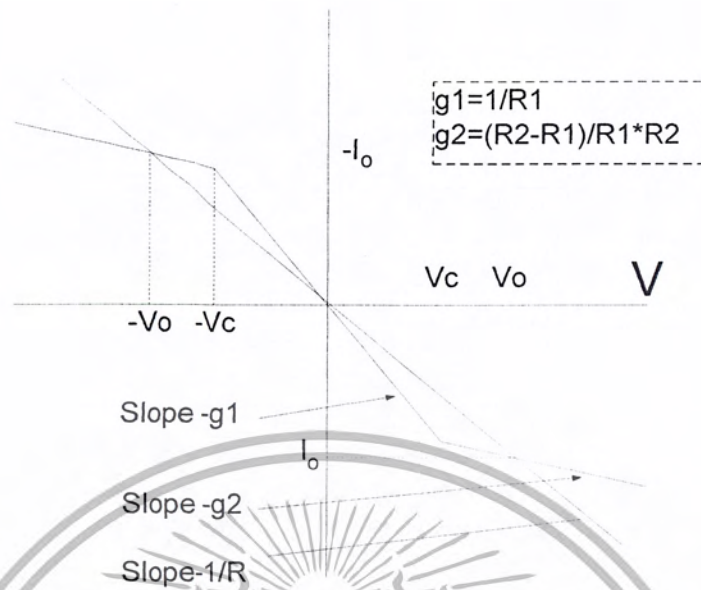
โดยกำเนิดเกออสติกได้จากการวัดค่าแรงดันตกคร่อม c ทั้ง 2 ตัว ซึ่งตรงกับการวัดสัญญาณในออสซิลโลสโคปด้วยย่าน $X-Y$ โดยสัญญาณที่ได้จะเป็นช่วงของวงโคจร และการเกิดการ

เปลี่ยนแปลง ด้วยการปรับค่าความต้านทาน และตัวเก็บประจุอย่างละเอียด (ค่าความต้านทานจาก 1.3 กิโลโอห์ม ถึง 1.2 กิโลโอห์ม ทีละ 0.01) ทำให้รูปสัญญาณที่ได้เปลี่ยนไปตามค่าที่ปรับ ทำให้ดูเหมือนว่าสัญญาณเคออสติกเป็นเหมือนสัญญาณรบกวน

แต่ถ้าเราไม่มีออสซิลโลสโคปที่จะวัด เราก็นำแรงดันตกคร่อม C1 และ C2 ป้อนเข้าเครื่องขยายเสียงที่มีอิมพีแดนซ์สูง ทำให้เราได้ยินเสียง ถ้าเกิดสัญญาณเกิดเคออสติก ซึ่งมีความไวอย่างมากในการปรับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงค่าความต้านทานลบ

สำหรับสัญญาณทาง DC ให้เปิดวงจรที่ C และที่ L ให้ short วงจร ดังนั้นจุดเกิดเป็น I_o, V_o เกิดจากการตัดกันของ 2 เส้น คือเส้น $\text{slope} = -1/R$ (จุดที่ทั้งนี้สามารถเห็นด้วยการให้ $C2 = 75 \text{ nF}$ สำหรับตัวอย่าง) สำหรับค่า $C1, C2$ และ L ที่ลงที่ ทำให้เกิดความไม่เสถียรภาพของออสซิลเลเตอร์ และทำให้เคออสติกเกิดการเคลื่อนไหวอีกด้วย

จากตัวอย่าง จุด I_o, V_o เมื่อ switching back และ forth ระหว่าง ออสซิลเลเตอร์เกี่ยวกับ $+I_o, +V_o$ และ $-I_o, -V_o$

2.4 ค่าความต้านทานลบ (Negative Resistance)

2.4.1 โครงสร้างของค่าความต้านทานลบ

ความต้านทานไม่เชิงเส้น (N_R) หรือความต้านทานลบ สามารถสร้างด้วย Op Amp 2 ตัว และความต้านทานเชิงเส้น 6 ตัว



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของค่าความต้านทานลบ (N_R) ประกอบด้วย Op Amp 2 ตัว และความต้านทานเชิงเส้น 6 ตัว

ลักษณะเฉพาะสำคัญของกราฟ $v - i$ นี้ มี 3 ส่วนในการควบคุมความชันของความต้านทานติดลบ Breakpoint ระหว่างส่วนของเส้นตรงมีสัดส่วนในระดับ Op Amp แต่ละตัวจะให้จุด Breakpoint หนึ่ง ดังนั้นตามความเป็นจริงกราฟ $v - i$ ทั้งหมดประกอบด้วย 5 ส่วน มากกว่า 3 ส่วน ดังแสดงในภาพ



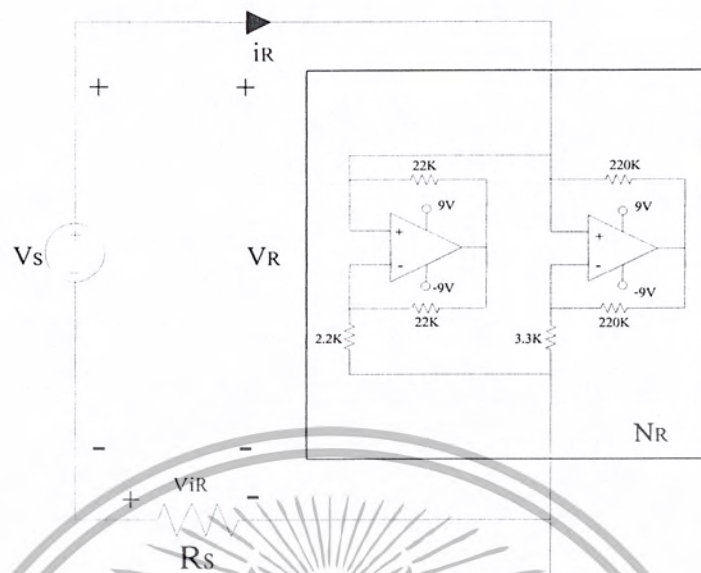
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงค่าความต้านทานลบ

2. 4. 2 การแสดงกราฟของค่าความต้านทานติดลบ

การหากราฟเชิงเส้นของความต้านทานติดลบ (N_R) สามารถหาด้วยการต่อ ความต้านทาน R_S อนุกรมกับ ความต้านทานติดลบ (N_R) โดยป้อนสัญญาณสามเหลี่ยม V_S สามารถวัดได้ดังนี้

1. ป้อนสัญญาณสามเหลี่ยม V_S ปรับ DC offset เป็น 0 ปรับ Amplitude 7 V peak-to-peak ความถี่ 30 Hz Horizontal axis: V_R VR (1V/DIV); Vertical axis: $-V_R$ (100mV/DIV)
2. ป้อนสัญญาณสามเหลี่ยม V_S ปรับ DC offset เป็น 0 ปรับ Amplitude 15 V peak-to-peak ความถี่ 30 Hz Horizontal axis: V_R (2V/DIV); Vertical axis: $-V_R$ (100mV/DIV)

ผลการทดสอบจะได้กราฟไม่เชิงเส้นซึ่งมีส่วนประกอบของเส้นตรง 3 ช่วง และกราฟไม่เชิงเส้นนี้จะมีความชันเพิ่มขึ้นเมื่อเราเพิ่มค่า Amplitude ของสัญญาณสามเหลี่ยม V_S ที่ป้อนให้กับ วงจร



รูปที่ 2.8 วงจรตรวจสอบหากราฟค่าความต้านทานลบ

2.5 ทฤษฎี Rossler

สมการ Rossler เป็นสมการเชิงอนุพันธ์ (Differential Equation) ซึ่งได้ถูกเผยแพร่ในปี 1992 โดย Otto E. Rossler

โดยที่ a, b, c เป็นค่าคงที่ และมีพจน์ที่คูณกัน 1 พจน์ คือ xz ซึ่งจะทำให้เกิดคุณสมบัติไม่เชิงเส้น (Non-Linear Property) และมีค่าคงที่ที่ทำให้เกิดสัญญาณเคออสติก ดังนี้ คือ $a = 0.2, b = 0.2, c = 9$ จะมีสมการดังต่อไปนี้

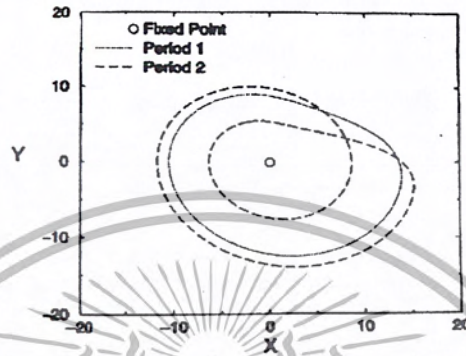
$$\frac{dx}{dt} = -y - z$$

$$\frac{dy}{dt} = x - ay \quad (2.2)$$

$$\frac{dz}{dt} = b + z(x - c)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดสอบค่าของการเคลื่อนที่ไดนามิกแบบปกติและ Sinai-Bowen-Ruelle(SBR)
 วัตนบนเคออสติกแอตแทรกเตอร์ ได้ผลก็คือ $x_{\text{fix point}}$ และ unstable period 1 และ period 2 orbit



รูปที่ 2.9 แสดงเอกเทรคเตอร์ของสมการ Rossler



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 ชิงโครไนซ์ในระบบเคออสติก

คือการเอา 2 ระบบ หรือมากกว่า ของระบบเคออสติกที่เหมือนกันทุกอย่างและเชื่อมต่อเข้าด้วยกันในทางสัญญาณให้ทั้งหมดเป็นจังหวะเดียวกัน (Synchronization) คล้ายกับว่าทำให้สัญญาณทั้ง 2 ระบบมีความแตกต่างกันน้อยที่สุดจนเป็น 0 แต่ในระบบที่แท้จริง เหมือนจะเป็นไปไม่ได้ที่จำลองอย่างแม่นยำด้วยเงื่อนไขเริ่มต้นที่เหมือนกัน ซึ่งมันเป็นไปได้ที่เชื่อมต่อระบบจำนวนมากเข้าด้วยกัน แต่การชิงโครไนซ์ระหว่าง 2 ระบบประสบความสำเร็จได้สูงกว่าเหตุผลที่สนับสนุนการทำชิงโครไนซ์คือ

- พฤติกรรมของเคออสติกเป็นรูปแบบสัญญาณที่จะนำไปใช้ประโยชน์เป็น Carrier เป็น private ในการสื่อสาร

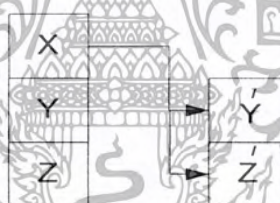
- จะใช้ Fourier spectrum เหมือนกัน

- มีรูปแบบ Dominate ที่ไม่สูง

- ไม่มีความถี่เฉพาะเป็นพิเศษ

- Spectrum เป็น Broadband

และยังได้มีการแนะนำให้ใช้สัญญาณเคออสติกในการควบคุมหุ่นยนต์



รูปที่ 2.10 แสดงแนวการชิงโครไนซ์ที่สมบูรณ์

การนำสัญญาณเคออสติกไปใช้ในการสื่อสาร สามารถนำไปใช้โดยตามความต้องการด้วยวิธีใดก็ตาม ผู้รับจะต้องมีการจำลองสัญญาณเคออสติกของเครื่องส่ง หรือดีกว่าด้วยการชิงโครไนซ์ด้วยเครื่องส่ง

บทที่ 3

การออกแบบ

3.1 การออกแบบสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติกแบบ Chua

จากสมการของ chua มีสมการดังต่อไปนี้

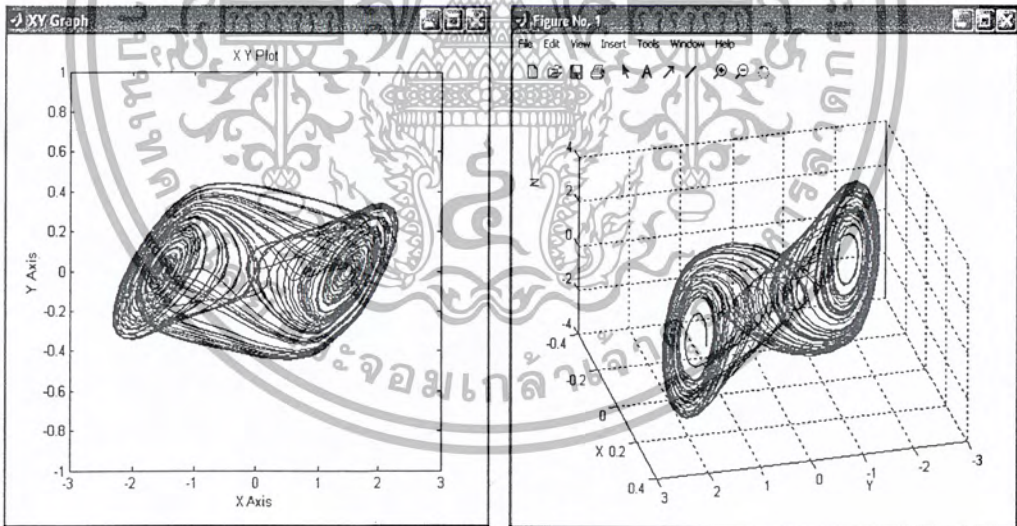
$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= \alpha(y - x - f(x)), \\ \frac{dy}{dt} &= x - y - z, \\ \frac{dz}{dt} &= -\beta y \end{aligned} \tag{3.1}$$

เมื่อ

$$f(x) = bx + 0.5(a - b)(|x + 1| - |x - 1|),$$

และ

$$\alpha = 9, \beta = 10, a = -1/7, b = 2/7,$$



(a)

(b)

รูปที่ 3.1 ภาพเอกเทรคเตอร์ของ chua จากการจำลองด้วยโปรแกรม matlab

(a) ระนาบ x-y (b) เอกเทรคเตอร์ในระนาบ 3 มิติ

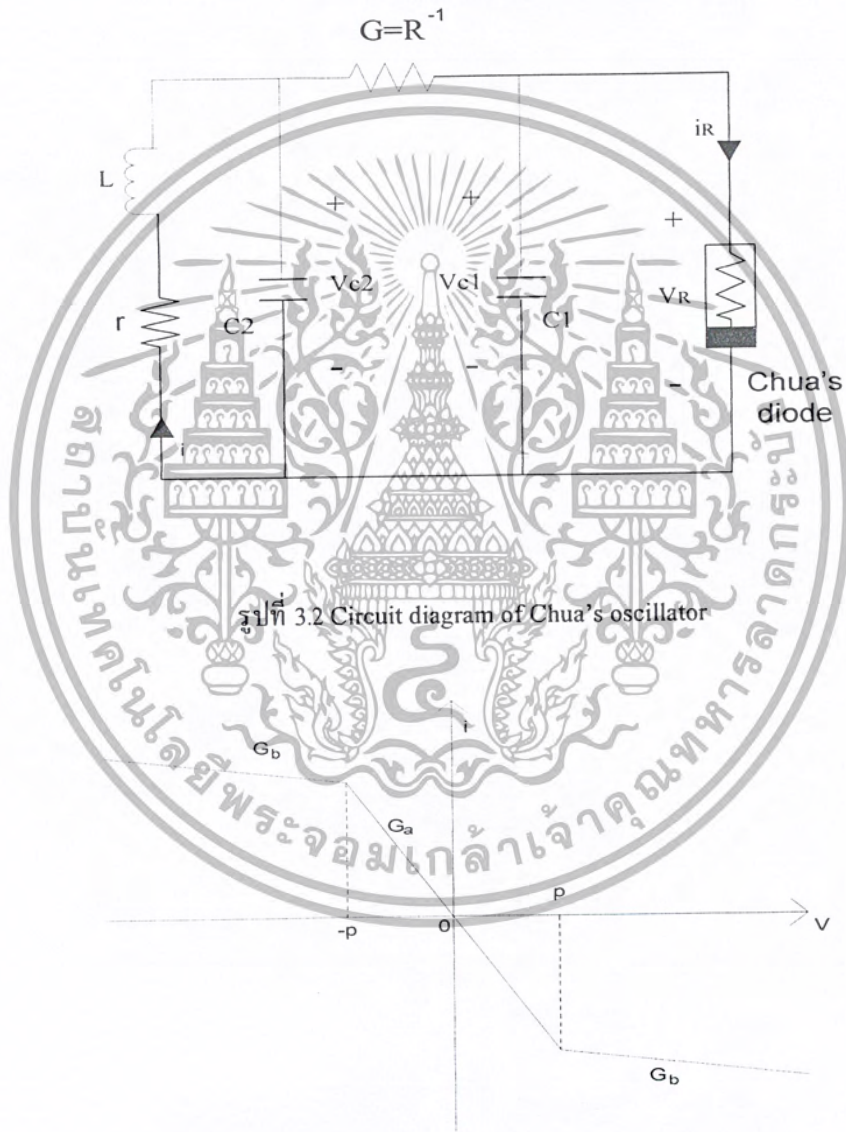
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นจากสมการดิฟเฟอเรนเชียลสามารถทำให้เป็นจริงดังรูปที่ 3.2 ต่อไปนี้ โดยกำหนดให้

$$C_1 = 10^{-8} \text{ (10nF)}$$

$$C_2 = 10^{-7} \text{ (100nF)}$$

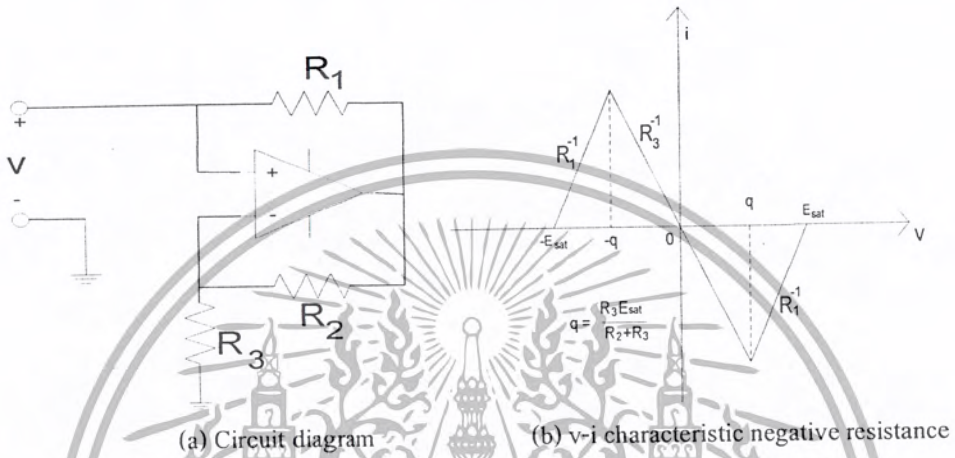
$$L = 2.0 \times 10^{-2} \text{ (20mH)}$$



รูปที่ 3.3 กราฟคุณลักษณะ v-i ของ chua ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะทำ chua's diode ให้เป็นจริงด้วย negative impedance converter พิจารณา circuit diagram ในรูปที่ 3.4 (a) กราฟคุณสมบัติ v-i ของความต้านทานลบดังรูปที่ 3.4 (b) เมื่อพิจารณา ส่วนของเส้นตรง 3 ส่วน มีการขยายสัญญาณได้ ดังนั้นเราสามารถสร้าง chua's diode ด้วยการนำ ส่วนของเส้นตรงดังรูปที่ 3.4 (b) มาต่อขนานกันดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 Negative impedance converter



รูปที่ 3.5 แสดงการต่อขนานของความต้านทานไม่เชิงเส้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 การออกแบบสร้างคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ จากความต้านทานลบ

จากหลักการของการเกิดสัญญาณเคออสติกของวงจรถูก chua ข้างต้น ซึ่งเป็นแนวทางในการออกแบบ ก็คือเพิ่มจำนวนเบรคพอยต์ให้กับความต้านทานติดลบ ดังกล่าวได้นำมาพัฒนาสร้างเป็น Complex Chaotic โดยศึกษาจากจุดเบรคพอยต์ของสัญญาณความต้านทานลบดังนี้



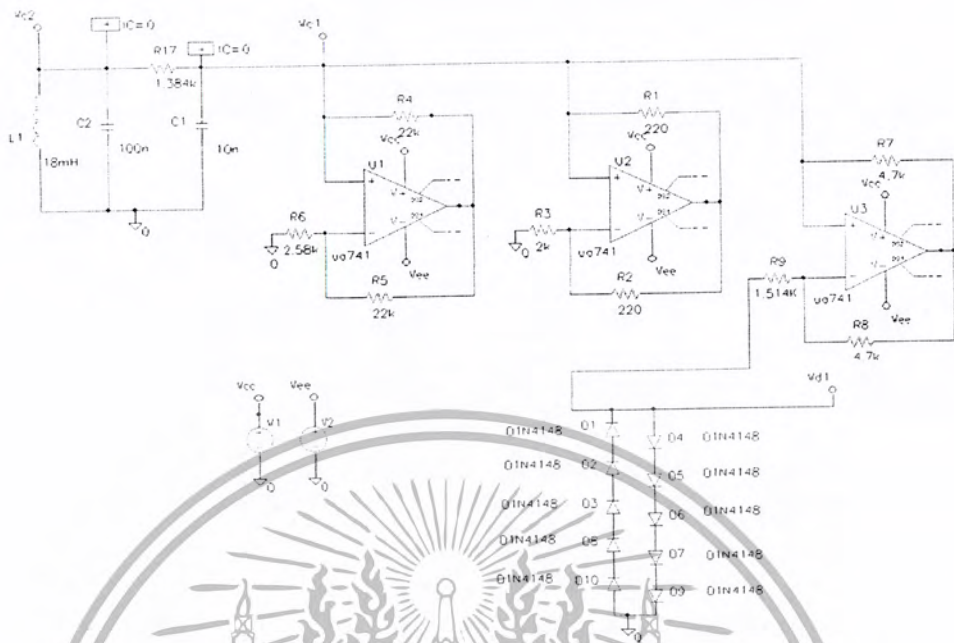
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณดังกล่าวข้างต้นได้นำมาพัฒนาเป็นวงจรโดยประกอบด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ดังตารางต่อไปนี้

อุปกรณ์	รายละเอียด	ค่า	ความผิดพลาด
U1	ออปแอมป์ 741		
R4,R5	¼ W	22 k Ω	$\pm 1\%$
R6	ปรับค่า ¼ W	2.58 k Ω	$\pm 1\%$
U2	ออปแอมป์ 741		
R1,R2	¼ W	220 Ω	$\pm 1\%$
R3	ปรับค่า¼ W	2 k Ω	$\pm 1\%$
U3	ออปแอมป์ 741		
R7,R8	¼ W	4.7 k Ω	$\pm 1\%$
R9	ปรับค่า ¼ W	1.58 k Ω	$\pm 1\%$
ไอโอด	IN4148		
C1	คาปาซิเตอร์	10 nF	$\pm 5\%$
C2	คาปาซิเตอร์	100 nF	$\pm 5\%$
L	ตัวเหนี่ยวนำ	18 mH	
R17	ปรับค่า 20 รอบ	10 k Ω	

ตารางที่ 3.1 แสดงรายการอุปกรณ์การสร้างคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ จากความต้านทานลบ

ค่าต่าง ๆ ในรายการอุปกรณ์เป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้งานซึ่งแสดงด้วยวงจร Pspice ดังวงจรรูปที่ 3.7 แต่ก็สามารถปรับเปลี่ยนค่าต่าง ๆ ได้ คือ R3, R6 และ R9 เป็นการปรับขนาดของสกอร์ที่เกิดส่วน R17 เป็นตัวปรับให้เกิดขึ้นของสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก จะมีค่าที่ละเอียดมาก



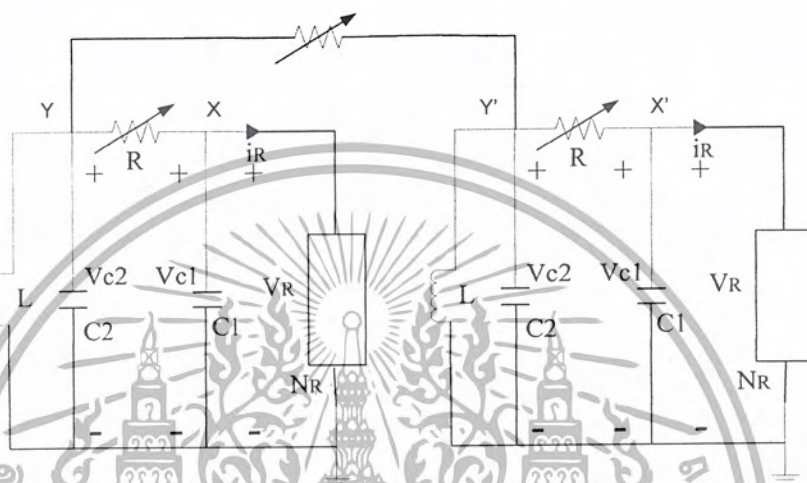
รูปที่ 3.7 แสดงวงจรสร้างสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 4 สกอร์
ผลการทดลองที่ได้แสดงในบทที่ 4

ในที่นี้การเกิดของสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ chua จากความต้านทานลบ อาจไม่มีรูปแบบการเกิดสัญญาณที่เป็นคู่เสมอไป แต่โดยทั่วไปมีลักษณะเกิดเป็นคู่ 4, 6, 8 หรือมากกว่านี้ ตามการออกแบบ แต่ด้วยความไม่แน่นอนของเงื่อนไขเริ่มต้น โครงสร้างนี้จึงมีลักษณะไม่แน่นอนที่จะเกิดขึ้นเป็นสกรูคู่เสมอไป อาจเกิดเป็น 3, 5, 7 สกอร์ แต่ลักษณะในการเกิดมีความยากเป็นไปได้น้อยกว่ามาก ซึ่งเมื่อมองจากกราฟความต้านทานลบแล้วอาจจะไม่มีทางเป็นไปได้ แต่เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่าค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังที่แสดงในผลการทดลองสามารถทำให้เกิด 3 สกอร์ได้

ผลการทดลองที่ได้แสดงในบทที่ 4

3.1.2 การออกแบบคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 16 สกอร์

เราจะทำเชื่อมต่อด้วยจุด Y ซึ่งเราจะใช้ค่าความต้านทาน ต่อक्रमระหว่างจุด Y ทั้งสองสมการ โดยจะใช้ตัวต้านทานที่ค่อนข้างมีความละเอียดในการปรับค่า เนื่องจากความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้นมากแสดงการต่อวงจรดังรูป



รูปที่ 3.8 แสดงการเชื่อมต่อ 2 วงจรเข้าด้วยกัน

จากรูปที่ 3.8 จะเป็นการเชื่อมต่อวงจรกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 4 สกอร์ 2 ระบบเข้าด้วยกัน โดยผลที่ได้คือคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 16 สกอร์

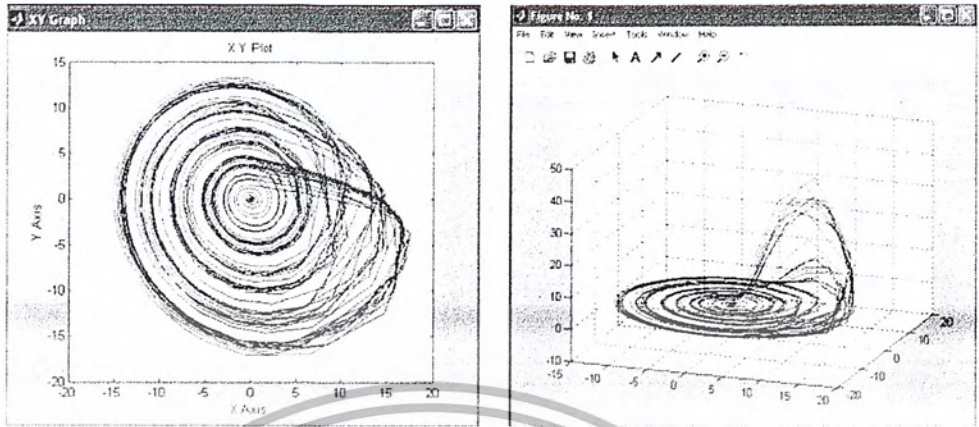
3.2 วงจรกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler

จากสมการของ Rossler ซึ่งมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -y - z \\ \frac{dy}{dt} &= x - ay \\ \frac{dz}{dt} &= b + z(x - c)\end{aligned}\tag{3.2}$$

โดยมี a , b และ c เป็นค่าคงที่ และค่า $a=0.2$, $b=0.2$ และ $c=9$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)

(b)

รูปที่ 3.9 ภาพเอกเทรคเตอร์ของ Rossler จากการจัดลองด้วยโปรแกรม

(a) ระนาบ x-y (b) เอกเทรคเตอร์ในระนาบ 3 มิติ

สังเกตว่าจะมีพจน์ของ zx ที่แสดงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น แต่เพื่อง่ายในการสร้างวงจรและประโยชน์ในการนำไปงานโดยการซึ่งใครในชสามารถที่จะนำมาปรับปรุงคงสมการต่อไปนี้

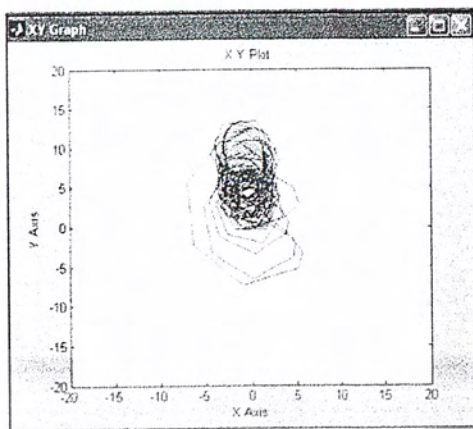
$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\alpha[\Gamma x + \beta y + \lambda z] \\ \frac{dy}{dt} &= -\alpha[-x - \gamma y + 0.02z] \\ \frac{dz}{dt} &= -\alpha[-g(x) + z] \end{aligned} \tag{3.3}$$

$$\begin{aligned} \text{และ } g(x) &= 0 && \text{เมื่อ } x \leq 3 \\ g(x) &= \mu(x-3) && \text{เมื่อ } x > 3 \end{aligned}$$

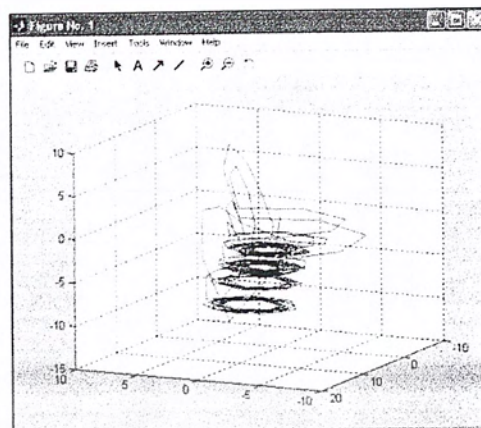
มีค่าพารามิเตอร์ต่างดังนี้

$$\begin{aligned} \alpha &= 10^4 \text{ s}^{-1} Z, \Gamma = 0.05, \beta = 0.5 \\ \lambda &= 1, \gamma = 0.133, \mu = 15 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(a)



(b)

รูปที่ 3.10 ภาพเอกเทรคเตอร์ของสมการปรับปรุ้ง Rossler จากการจำลองด้วยโปรแกรม

(a) ระนาบ x-y (b) เอกเทรคเตอร์ในระนาบ 3 มิติ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

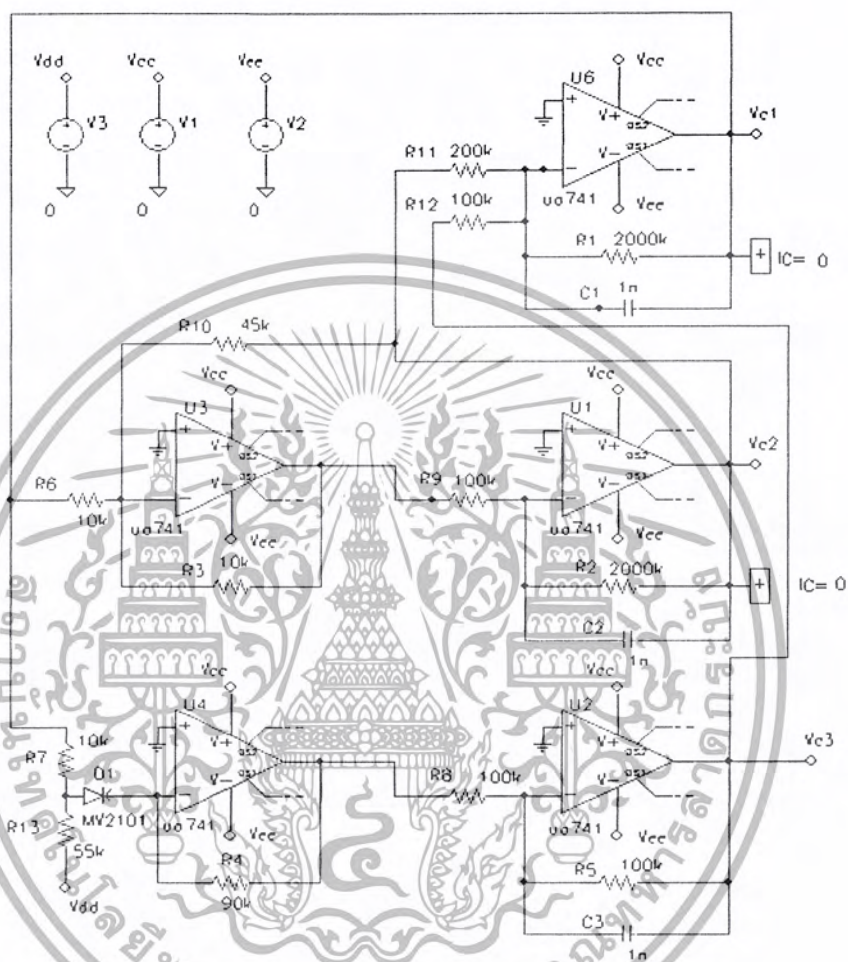
จากสมการปรับปรุง Rossler สามารถที่จะนำมาเขียนเป็นวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ได้ดังนี้

อุปกรณ์	รายละเอียด	ค่า	ความผิดพลาด
U1	ออปแอมป์ 741		
R2	¼ W	2 M Ω	$\pm 1\%$
R9	¼ W	200 k Ω	$\pm 1\%$
C2	คาปาซิเตอร์	1 nF	$\pm 5\%$
U2	ออปแอมป์ 741		
R5, R8	¼ W	100 k Ω	$\pm 1\%$
C3	คาปาซิเตอร์	1 nF	$\pm 5\%$
U3	ออปแอมป์ 741		
R3, R6	¼ W	10 k Ω	$\pm 1\%$
R10	¼ W	45 k Ω	$\pm 1\%$
U4	ออปแอมป์ 741		
D1	ไดโอด MV2101		
R4	¼ W	90 k Ω	$\pm 1\%$
R7	¼ W	10 k Ω	$\pm 1\%$
R13	¼ W	55 k Ω	$\pm 1\%$
U6	ออปแอมป์ 741		
R1	¼ W	2 M Ω	$\pm 1\%$
R11	¼ W	200 k Ω	$\pm 1\%$
R12	¼ W	100 k Ω	$\pm 1\%$
C3	คาปาซิเตอร์	1 nF	$\pm 5\%$

ตารางที่ 3.2 แสดงรายการอุปกรณ์การสร้าง Rossler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

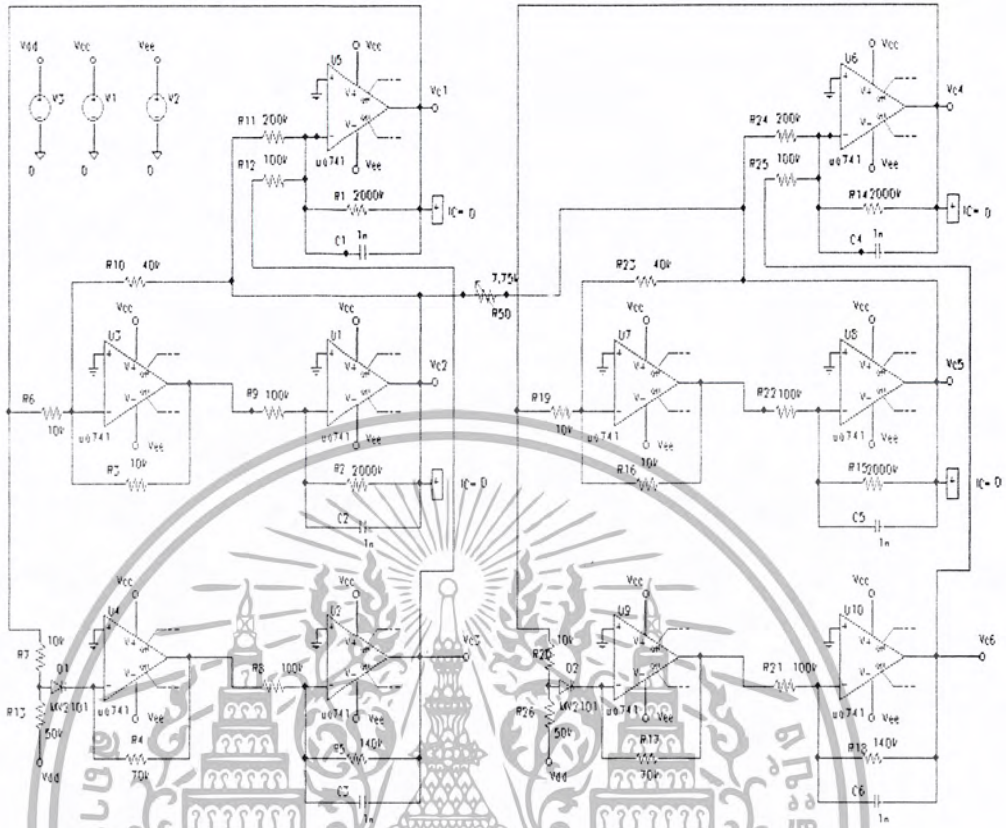
ค่าต่าง ๆ ในรายการอุปกรณ์เป็นค่าที่เหมาะสมในการใช้งานซึ่งแสดงด้วยวงจร Pspice ดัง
วงจรรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของสมการปรับปรุง Rossler

เราสามารถเพิ่มความซับซ้อนสัญญาณเคออสติกจากรูปที่ 3.11 ด้วยการเชื่อมต่อทั้ง 2 วงจร
เข้าด้วยกันดังรูปที่ 3.12 โดยใช้ความต้านทานเป็นตัวเชื่อมและสามารถปรับค่าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของการเชื่อมต่อ 2 ระบบ เข้าด้วยกัน

ซึ่งผลการทดลองที่ได้มีความซับซ้อนของสัญญาณเพิ่มมากขึ้นดังแสดงในบทที่ 4

จากผลของวงจรรูปที่ 3.11 และ 3.12 ความซับซ้อนของสัญญาณยังไม่มากนัก จึงได้มีการพัฒนาวงจรเพิ่มเติมด้านทานและปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ดัง ตารางที่ 3.3

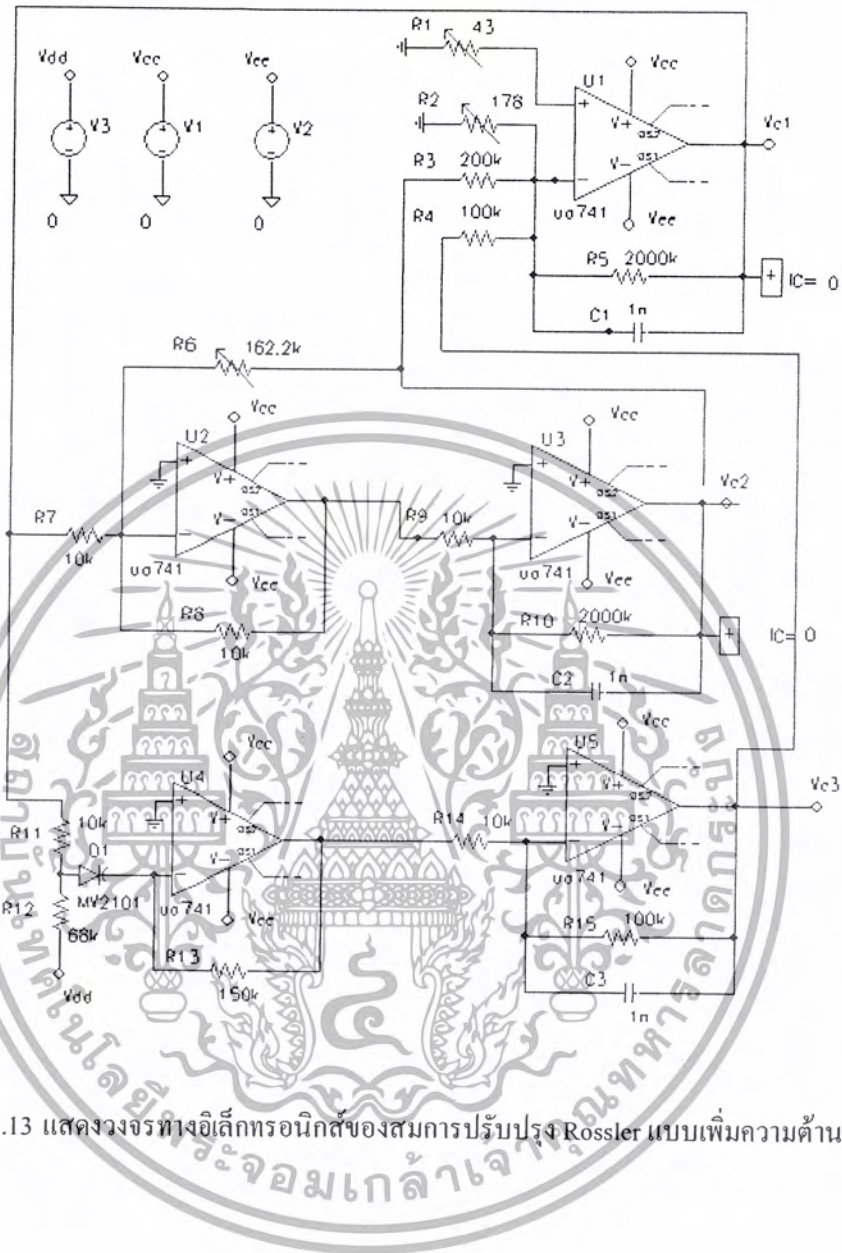
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปวงจรที่ 3.11 ปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อให้เป็นคอมเพลกซ์เคออสติกดังนี้

อุปกรณ์	รายละเอียด	ค่า	ความผิดพลาด
U1	ออปแอมป์ 741		
R1	ปรับค่าได้	43 Ω	$\pm 1\%$
R2	ปรับค่าได้	178 Ω	$\pm 1\%$
R3	$\frac{1}{4}$ W	200k Ω	$\pm 1\%$
R4	$\frac{1}{4}$ W	100k Ω	$\pm 1\%$
R5	$\frac{1}{4}$ W	2M Ω	$\pm 1\%$
C1	คาปาซิเตอร์	1 nF	$\pm 5\%$
U2	ออปแอมป์ 741		
R6	ปรับค่าได้	162.2 k Ω	$\pm 1\%$
R7,R8	$\frac{1}{4}$ W	10k Ω	$\pm 1\%$
U3	ออปแอมป์ 741		
R9	$\frac{1}{4}$ W	10 k Ω	$\pm 1\%$
R10	$\frac{1}{4}$ W	2 M Ω	$\pm 1\%$
C2	คาปาซิเตอร์	1 nF	$\pm 5\%$
U4	ออปแอมป์ 741		
D1	ไดโอด MV2101		
R11	$\frac{1}{4}$ W	10k Ω	$\pm 1\%$
R12	$\frac{1}{4}$ W	68 k Ω	$\pm 1\%$
R13	$\frac{1}{4}$ W	150 k Ω	$\pm 1\%$
U5	ออปแอมป์ 741		
R14	$\frac{1}{4}$ W	10K Ω	$\pm 1\%$
R15	$\frac{1}{4}$ W	100 k Ω	$\pm 1\%$
C3	คาปาซิเตอร์	1 nF	$\pm 5\%$

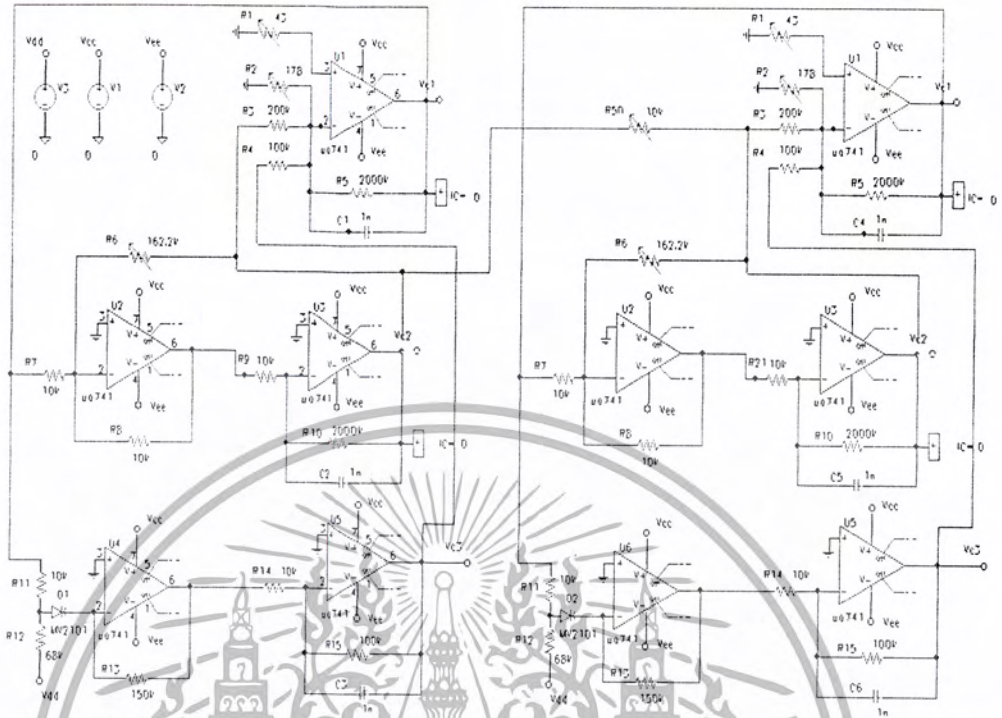
ตารางที่ 3.3 แสดงรายการอุปกรณ์การสร้างคอมเพลกซ์ Rossler

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.13 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของสมการปรับปรุง Rossler แบบเพิ่มความต้านทาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 แสดงวงจรทางอิเล็กทรอนิกส์ของการเชื่อมต่อ 2 ระบบ เช้าด้วยกัน

ซึ่งผลการทดลองที่ได้จะแสดงในบทที่ 4 สัญญาณที่ได้จะมีลักษณะเป็นคอมเพลกซ์เทออส

ตึก Rossler

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4.1 ผลการจำลองจากโปรแกรม

4.1.1 ผลการจำลองจากวงจรคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua

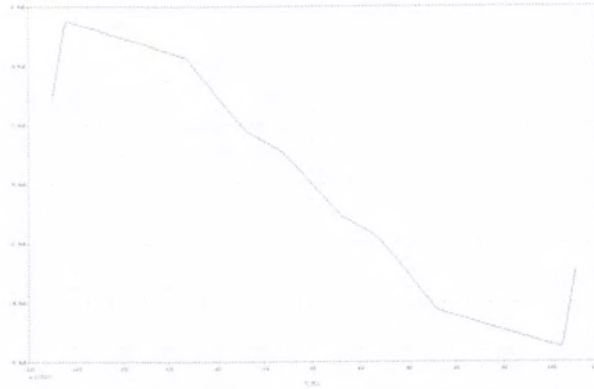
เป็นการจำลองจากโปรแกรม Pspice ของวงจรรูปที่ 3.7 มีค่าพารามิเตอร์ค่าความต้านทานที่สามารถปรับค่าได้ดังนี้ $R17 = 1.384 \text{ K}$, $R3 = 2 \text{ K}$, $R6 = 2.58 \text{ K}$, $R9 = 1.514 \text{ K}$ ทำให้ได้ผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ 4 สกอร์ ชัดเจน



รูปที่ 4.1 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก แบบ Chua โดยวัดเทียบ X-Y

รูปที่ 4.2 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua ใน โดเมนเวลา

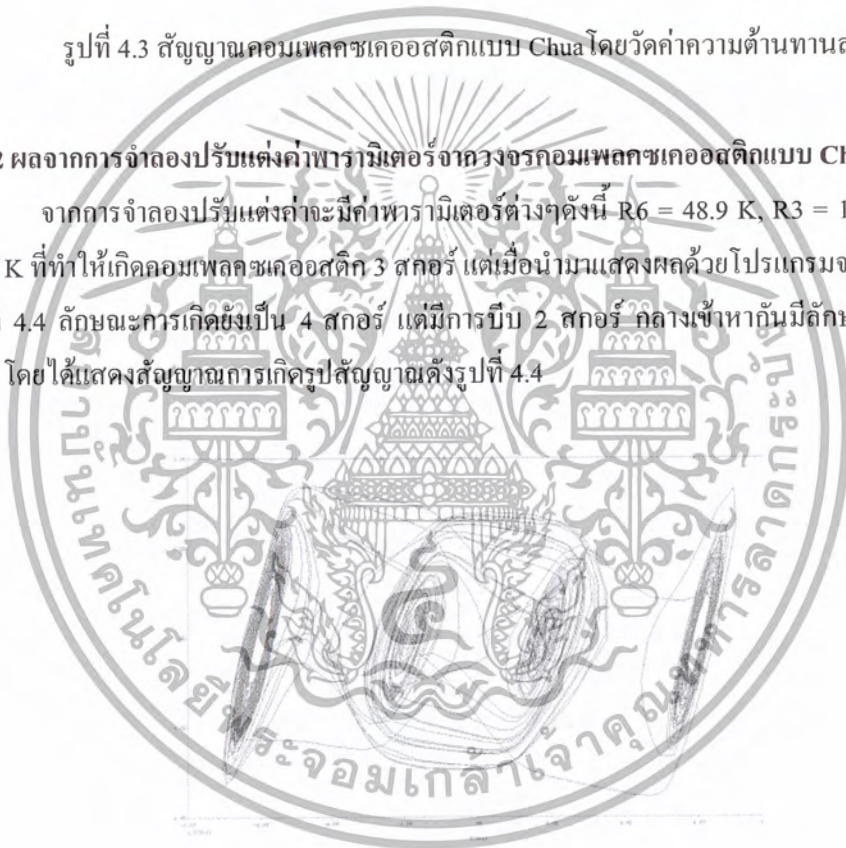
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



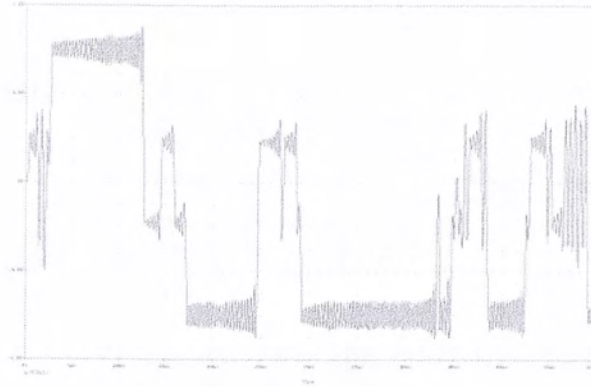
รูปที่ 4.3 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua โดยวัดค่าความต้านทานลบ

4.1.2 ผลจากการจำลองปรับแต่งค่าพารามิเตอร์จากวงจรคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua

จากการจำลองปรับแต่งค่าจะมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆดังนี้ $R_6 = 48.9 \text{ K}$, $R_3 = 1.97 \text{ K}$, $R_9 = 1.65 \text{ K}$ ที่ทำให้เกิดคอมเพลกซ์เคออสติก 3 สกอร์ แต่เมื่อนำมาแสดงผลด้วยโปรแกรมจะแสดงได้ดังรูปที่ 4.4 ลักษณะการเกิดยังเป็น 4 สกอร์ แต่มีการบีบ 2 สกอร์ กลางเข้าหากันมีลักษณะใกล้เคียงมาก โดยได้แสดงสัญญาณการเกิดรูปสัญญาณดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก วัดเทียบ X-Y



รูปที่ 4.5 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก ในโดเมนเวลา

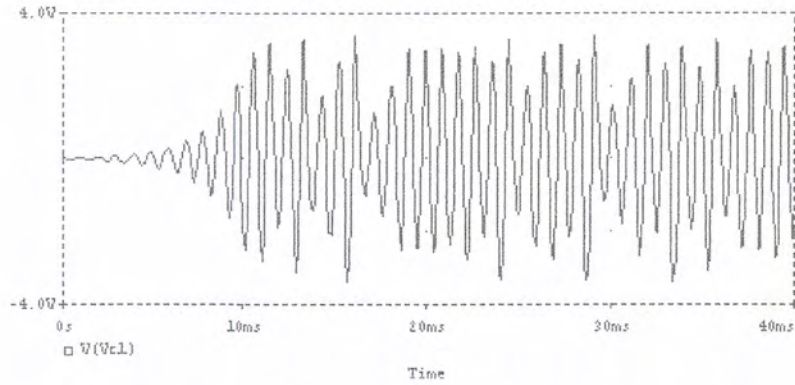
4.1.3 ผลการจำลองจากโปรแกรม Pspice ของวงจรรูปที่ 3.11

เป็นการจำลองจากโปรแกรม Pspice ของวงจรรูปที่ 3.11 จะมีจุดศูนย์กลางในการเกิดที่ตำแหน่ง x-y (0, 0) สัญญาณมีการวนไปรอบๆจุดศูนย์กลางคล้ายกับรูปก้นหอย



รูปที่ 4.6 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก แบบ Rossler วัดเทียบ X-Y

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก แบบ Rossler ในโดเมนเวลา

4.2 ผลการทดลองจากวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติก

4.2.1 ผลจากวงจรกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Chua

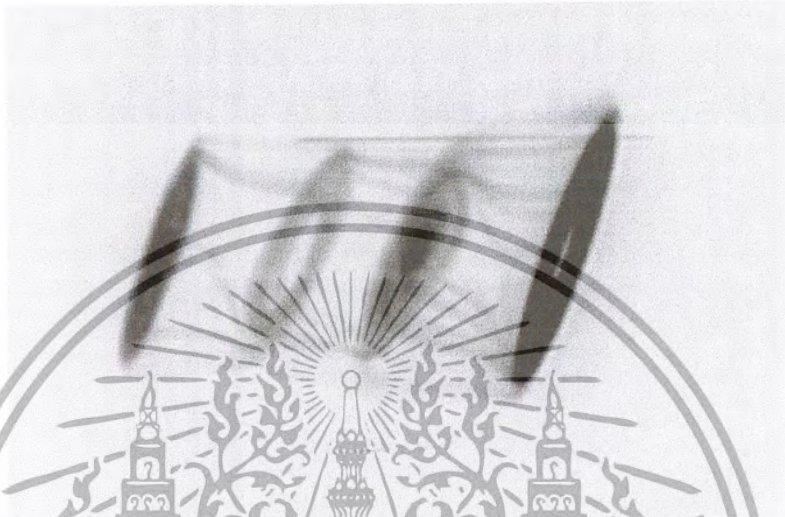
จากวงจรกำเนิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ 4 สกอร์ เมื่อทำการทดลองปรับค่าความต้านทานของค่าต่างๆ จะเกิดเป็นคอมเพลกซ์เคออสติก 3 สกอร์ ซึ่งโอกาสในการเกิดค่อนข้างยากมากกว่าแบบเป็นคู่ โดยแสดงการเกิดของสัญญาณด้วย ออสซิลอสโคป



รูปที่ 4.8 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 3 สกอร์ ย่าน X-Y ของออสซิลอสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

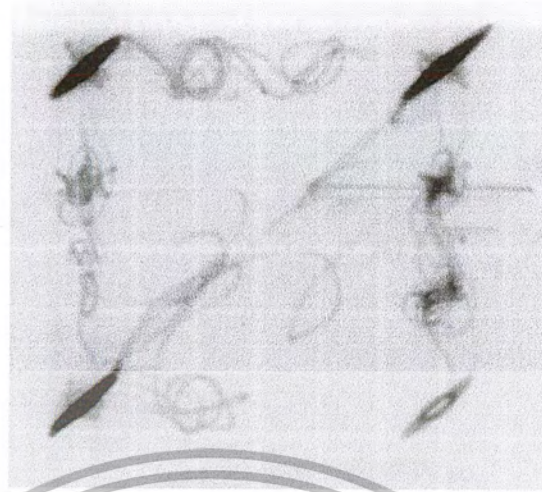
การเกิดคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์จะเป็นเรื่องที่ยากมากที่จะปรับให้มีค่า พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ในการทำให้เกิดการเท่ากันทุกสกอร์เพราะมีความละเอียดมาก



รูปที่ 4.9 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป

เมื่อเชื่อมต่อคอมเพลกซ์เคออสติก 4 สกอร์ ของสองระบบเข้าด้วยกันตามหลักการที่ว่า 2 ระบบต้องมีความเท่ากันในทุกประการในเรื่องของค่าพารามิเตอร์ต่างๆเป็นเรื่องที่ยากมากที่จะปรับให้เท่ากันเนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนต่างๆ ของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทำให้สัญญาณที่ได้นั้น เกิดเป็น 16 สกอร์ ที่ไม่สมบูรณ์โดยจะเกิดการเปลี่ยนแปลงของรูปสัญญาณเปลี่ยนไป เมื่อเวลาผ่านไป แสดงรูปสัญญาณการเกิดขึ้นที่เวลาต่างกัน ในย่าน x-y ของออสซิลโลสโคป และโดเมนเวลาดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

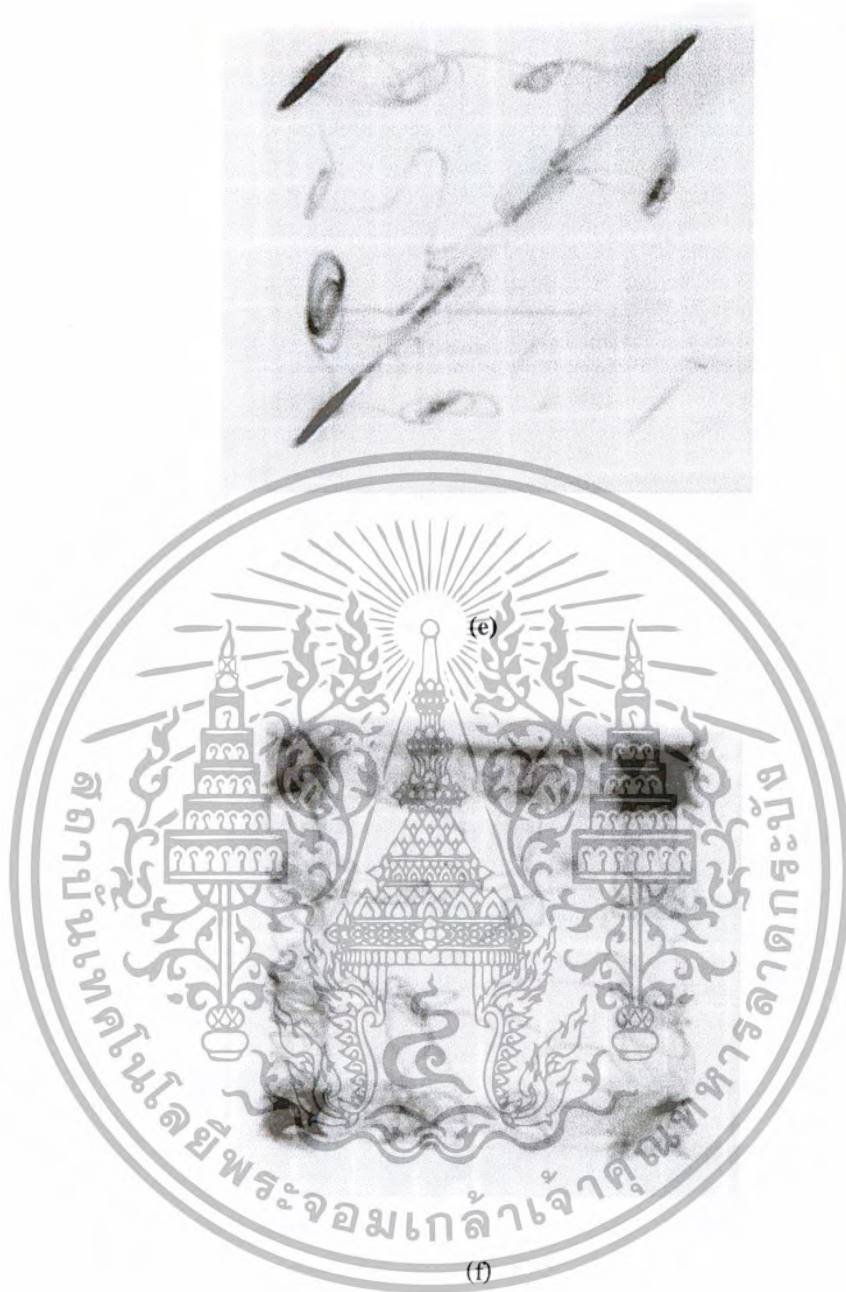


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



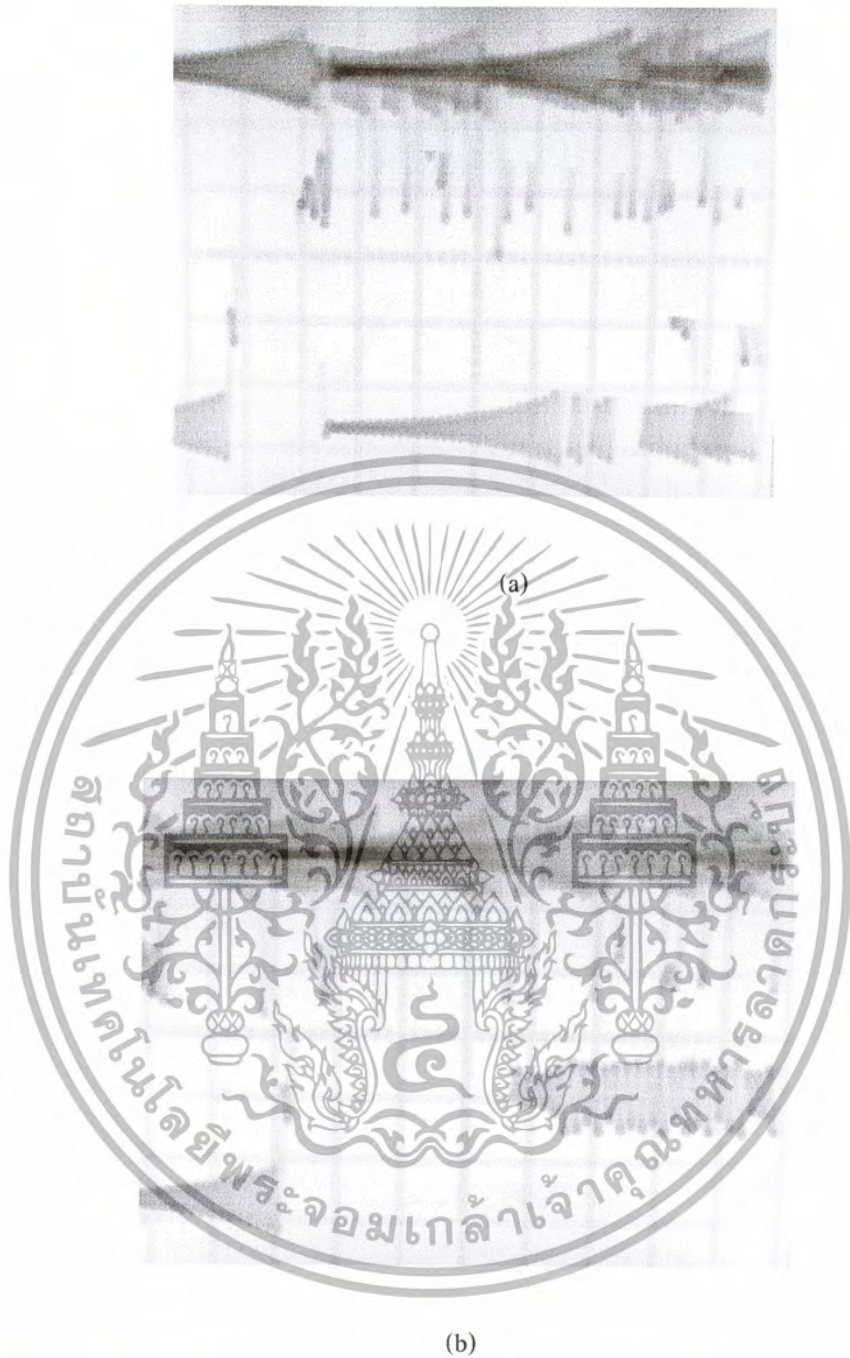
(d)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 16 สกอร์ ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป
แสดงดังรูป (a) – (f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

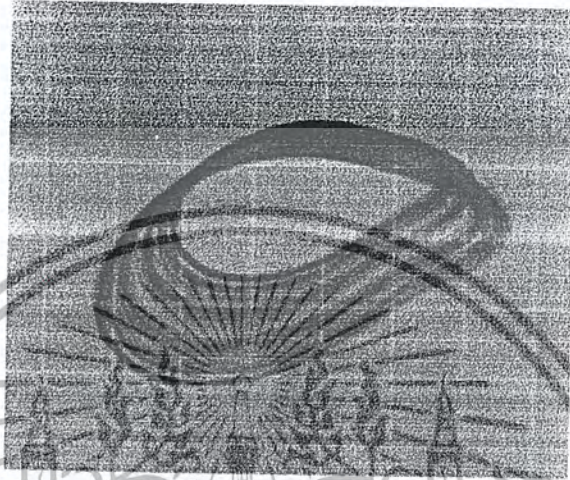


รูปที่ 4.11 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก 16 สกอร์ ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป
แสดงคิงรูป (a) และ (b)

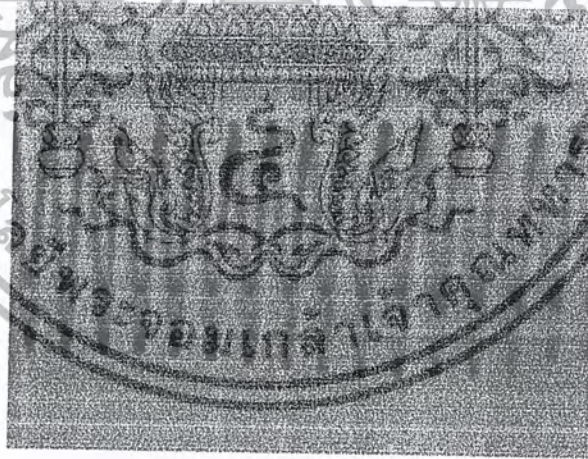
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลจากวงจรถ้าเกิดสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกแบบ Rossler

จากการทดลองวัดค่าจากวงจรรูปที่ 3.11 โดยวัดสัญญาณที่ จุด vc1 และ vc2 ซึ่งแทนด้วยจุด x และ y ตามลำดับ จะได้รูปสัญญาณมีลักษณะเป็นสัญญาณเคออสติกดังนี้



รูปที่ 4.12 สัญญาณเคออสติกของสมการปรับปรุง Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป

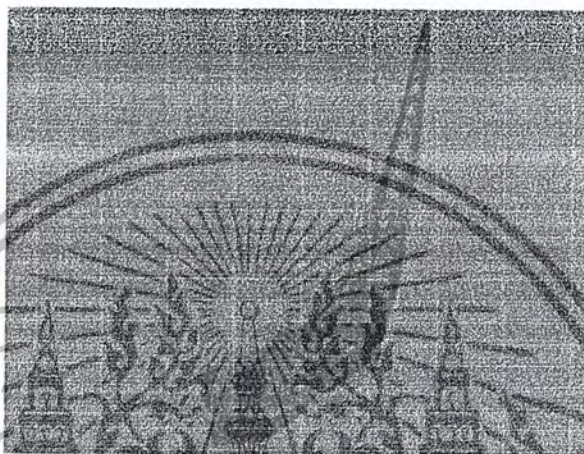


รูปที่ 4.13 สัญญาณเคออสติกของสมการปรับปรุง Rossler ในโดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 และรูปที่ 4.13 สัญญาณที่ได้เป็นเคออสติกที่ยังมีความซับซ้อนน้อยอยู่จึงเพิ่มความซับซ้อนด้วยการเชื่อม คอ 2 วงจรเข้าด้วยกัน

จากการทดลองวัดค่าจากวงจรรูปที่ 3.12 โดยวัดสัญญาณที่ จุด vc1 และ vc2 ซึ่งแทนด้วยจุด x และ y ตามลำดับ จะได้รูปสัญญาณมีลักษณะเป็นสัญญาณเคออสติกดังนี้



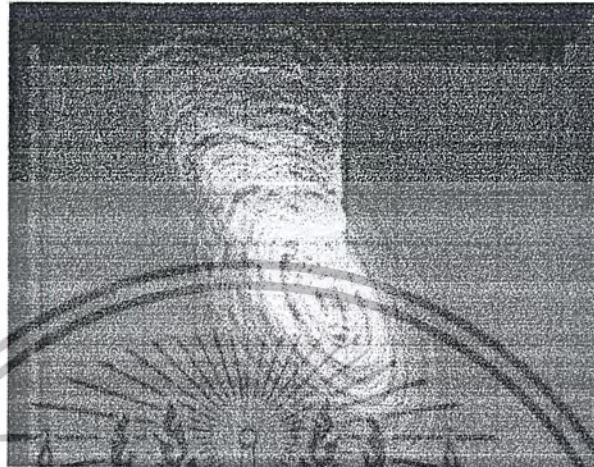
รูปที่ 4.14 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ข่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป



รูปที่ 4.15 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ใน โดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป

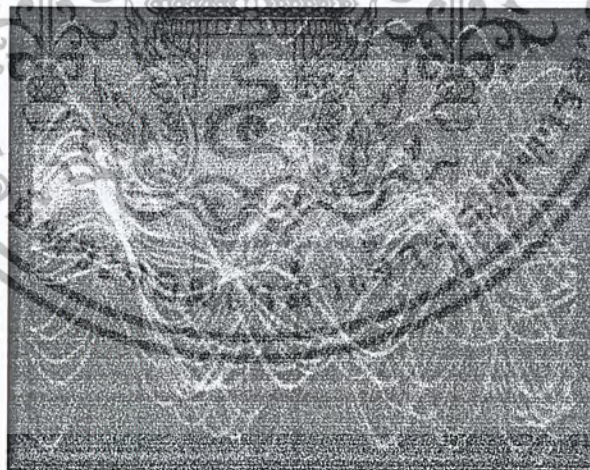
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกที่สร้างจากวงจรรูปที่ 3.13 สัญญาณจะมีความซับซ้อนมากขึ้นกว่าการเชื่อมค่อจากวงจรที่ 3.12 จะได้สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ดังรูป



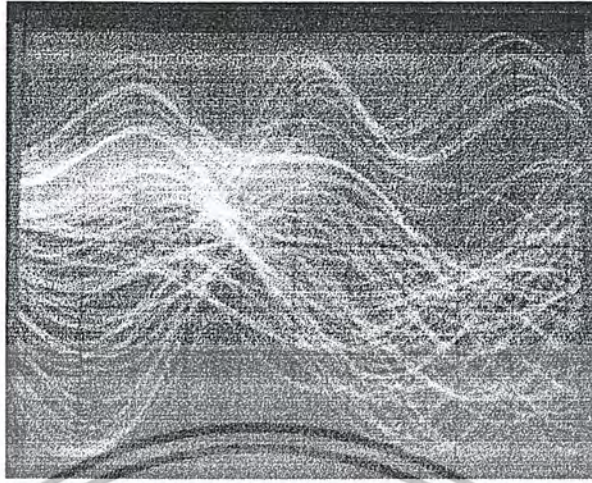
รูปที่ 4.16 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป

เมื่อเรารัดสัญญาณในทางโคเมนเวลาของออสซิลโลสโคป เราจะได้สัญญาณดังรูปที่ 4.17 และ 4.18



รูปที่ 4.17 สัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติก Rossler ในโคเมนเวลาของออสซิลโลสโคป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 สัญญาณคอมเพล็กซ์เคออสติก Rossler ใน โดเมนเวลาของออสซิลโลสโคป

สัญญาณคอมเพล็กซ์เคออสติกที่สร้างจากเชื่อมต่อตามวงจรรูปที่ 3.14 สัญญาณจะมีความซับซ้อนมากเป็นการรวมกันของสัญญาณใช้ R50 เป็นตัวปรับค่าให้เหมาะสม



รูปที่ 4.19 สัญญาณคอมเพล็กซ์เคออสติก Rossler ย่าน X-Y ของออสซิลโลสโคป

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นกรออกแบบและสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติก แบบ มีความซับซ้อนมากแบบต่าง ๆ ซึ่งได้มีการสร้างสัญญาณเคออสติกที่มีความซับซ้อนในรูปแบบต่าง ๆ โดยได้อาศัยการพัฒนาจากวงจรของ Chua และ Rossler

โดยวงจร Chua เราจะนำออฟแอมป์มาต่อขนานกันซึ่งจะทำให้ลักษณะของสัญญาณค่าความต้านทานลบที่สร้างออกมาได้นั้น มีความแตกต่างจากค่าความต้านทานลบเดิม ซึ่งสัญญาณของค่าความต้านทานลบมีจำนวนขั้นบันไดของสัญญาณที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้มีการเกิดสัญญาณเคออสติกที่มีความซับซ้อนมากขึ้นและมีการปรับค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ รวมถึงการเพิ่มอุปกรณ์ ต่าง ๆ ให้แก่วงจรซึ่งจะทำให้ค่าที่วัดได้นั้นเป็นแบบ 4 สกอร์ ซึ่งเมื่อเรานำสัญญาณที่เหมือนกันแบบ 4 สกอร์ ทั้งสองระบบมาเชื่อมต่อกันทางสัญญาณให้มีการทำงานร่วมกันเหมือนเป็นระบบเดียวกัน ก็จะได้สัญญาณแบบ 4 ค้างสองคือ 16 สกอร์ซึ่งเป็นคอมเพลกซ์เคออสติกที่มีความซับซ้อนมาก

ส่วนวงจร Rossler เราจะเลือกใช้สมการปรับปรุง เพื่อง่ายต่อการสร้าง การนำไปประยุกต์ใช้งาน และ เชื่อมสองระบบเข้าด้วยกันเพื่อให้มีการทำงานทั้งสองระบบร่วมกัน โดยทำการสร้างวงจรที่เป็นสัญญาณเคออสติกก่อน แล้วนำวงจรทั้งสองมาเชื่อมต่อกัน ก็จะได้สัญญาณเคออสติกที่มีความซับซ้อนมาก

จากการที่เราวัดค่ารูปสัญญาณเราจะทำการวัดทั้งรูปสัญญาณเคออสติก รูปสัญญาณในโดเมนเวลา และวัดรูปสัญญาณค่าความต้านทานลบซึ่งเป็นตัวสำคัญที่ทำให้เกิดสัญญาณขึ้นมาได้ และสัญญาณเคออสติกมีความไวในการเปลี่ยนแปลงเร็วมาก เห็นได้จากการทดลอง ถ้าปรับค่าเพียงเล็กน้อยหรือตัดแหล่งจ่ายออกก็ทำให้การเปลี่ยนแปลงของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมเลย

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการทดลอง

ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณเคออสติกแบบมีความซับซ้อนมากแบบต่าง ๆ ปัญหาที่พบโดยทั่ว ๆ ไปก็คือ ถ้าเราเอาค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากโปรแกรมและทฤษฎี มาทำการปรับแต่งให้กับอุปกรณ์แล้วสัญญาณที่ได้จะไม่ตรงตามที่ได้จากโปรแกรม เป็นเพราะค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ มีความผิดพลาดเกิดขึ้น และสัญญาณเคออสติกเป็นสัญญาณที่มีความละเอียดอ่อนมากในการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมให้กับวงจร เพราะถ้าเราทำการปรับค่าพารามิเตอร์ไปเพียงเล็กน้อยก็จะทำให้รูปแบบของสัญญาณเปลี่ยนแปลงหายไปเลย ต้องทำการปรับค่าพารามิเตอร์ใหม่

ในการเชื่อมต่อบรรยากาศทั้งสองเข้าด้วยกัน เป็นการยากที่จะให้ทั้งสองวงจรมีรูปสัญญาณที่เหมือนกัน เกิดจากการปรับค่าและความผิดพลาดของอุปกรณ์ ทำให้ประสิทธิภาพรูปสัญญาณที่ได้ไม่สมบูรณ์ ตามที่เราต้องการ

5.3 แนวทางในการพัฒนา

จากการที่ได้ศึกษาทดลองสร้างวงจรสัญญาณคอมเพลกซ์เคออสติกทำให้เราสามารถทราบถึงคุณลักษณะรูปแบบสัญญาณมีหลายรูปแบบ โดยสามารถพัฒนานำไปประยุกต์ใช้กับการส่งข้อมูลข่าวสาร เพราะรูปแบบของสัญญาณมีคุณลักษณะเฉพาะที่มีความซับซ้อนในการเข้ารหัสข้อมูลทำให้ตรวจจับข้อมูลระหว่างทางทำได้ยากกว่าสัญญาณธรรมดาและประยุกต์ใช้กับการควบคุมหุ่นยนต์ เช่น เครื่องล้างจาน รถตัดหญ้า เครื่องผสมสารเคมี เพราะสัญญาณเคออสติกมีลักษณะพิเศษคือเกิดสัญญาณไม่ซ้ำเส้นทางเดิม หรือ ใช้ในการควบคุมเครื่องปรับอากาศให้ทิศทางความเย็นเป็นแบบธรรมชาติ รวมทั้งประยุกต์ใช้กับเครื่องเลเซอร์ ฉายภาพสวยงามเพราะสัญญาณเคออสติกมีลักษณะของสัญญาณที่แปลกและสวยงาม

บรรณานุกรม

ทฤษฎีไร้ระเบียบกับทางแพร่ทางสังคมสยามโดย ชัยวัฒน์ ธีระพันธ์,
ทฤษฎีความโกลาหล โดย สมเกียรติ ตั้งกิจวานิชย์

K. S. Tang, K. F. Man, G.Q. Zhong and G.Chen ,**Some New Circuit Design for Chaos**

Generation, Center for Chaos Control and Synchronization Department of Electronic
Engineering City, University of Hong Kong, Hong Kong, Chinakstang@ee.cityu.edu.hk

**IEEE TRANSACTIONS ON CIRCUIT AND SYSTEMS, FUNDAMENTAL THEORY
AND APPLICATIONS**, Volume44 Number 10

Michael Peter Kennedy , **Experimental chaos via Chua's circuit**, Electronics Research
Laporatory,University of California, Berkeley, CA 94720.

L.J. Kocarev, T.Roska, **Dynamics of the Lorenz equation and Chua's equation: A Tutorial**
Faculty of Electrical Engineering, Cyril and Methodist University, Computer and
Automation Institute of the Hungarian Academic of Scion

Physics letters Volume 71 A, number 2, 3, An equation for hyper chaos,

Meng Zhan, 1 Gang Hu,2,1 Ying Zhang,3 and Daihai He1,**Generalized Splay State in Coupled
Chaotic Oscillators Induced by Weak Mutual Resonant Interactions**, Volume 86,
number 8 physical review letters 18 February 2001

M. Itoh, **Synthesis of Electronic Circuits for simulating Nonlinear Dynamics.**

Chris Ber Gevin , **Synchronization of chaotic circuit** , Physics Department, University of
Arizona, Tucson, AZ 85721

Reggie Brown and Nikolai F. Rulkov ,**Synchronization of chaotic systems: Transverse
stability of trajectories in invariant manifolds** ,Institute for Nonlinear Science,
University of California, San Diego, La Jolla, California 92093-0402

Louis M. Pecora, Thomas L. Carroll, Gregg A. Johnson, and Douglas J. Mar *Code 6343* James
F. Heagy,**Fundamentals of synchronization in chaotic systems, concepts, and
applications**,U.S. Naval Research Laboratory, Washington, District of Columbia 20375
Institutes for Defense Analysis, Science and Technology Division, Alexandria, Virginia
22311-1772

The Chaos Cookbook.

http://www.bwrc.eecs.berkeley.edu/people/Grad_students/wrdavis/chaos.html#DNLD

http://chaos-mac.nrl.navy.mil/circuits/plr_broadband/Broadband_Rossler_circuit.html

http://bill.snr.arizona.edu/demos/rossler/rossler2.html#N_1

<http://www.chaos.umd.edu/reseach.html#chaoticscatering>

http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/chaos_new/Chua.html

http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/chaos_new/chua.html

<http://staff.science.nus.edu.sg/~parwani/c1/node24.html>

<http://intania.kku.ac.th/projects/2003/COE2003-01/>

<http://hypertextbook.com/chaos/>





ภาคผนวก

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MMBV2101LT1 Series, MV2105, MV2101, MV2109, LV2205, LV2209



ON Semiconductor™

<http://onsemi.com>

Silicon Tuning Diodes

6.8–100 pF, 30 Volts
Voltage Variable Capacitance Diodes

These devices are designed in popular plastic packages for the high volume requirements of FM Radio and TV tuning and AFC, general frequency control and tuning applications. They provide solid-state reliability in replacement of mechanical tuning methods. Also available in a Surface Mount Package up to 33 pF.

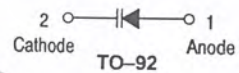
- High Q
- Controlled and Uniform Tuning Ratio
- Standard Capacitance Tolerance – 10%
- Complete Typical Design Curves

MAXIMUM RATINGS

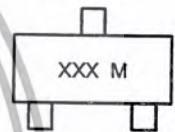
Rating	Symbol	Value	Unit
Reverse Voltage	V_R	30	Vdc
Forward Current	I_F	200	mAdc
Forward Power Dissipation @ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	MMBV21xx	225	mW
		1.8	mW/°C
@ $T_A = 25^\circ\text{C}$ Derate above 25°C	MV21xx	280	
	LV22xx	2.8	
Junction Temperature	T_J	+150	°C
Storage Temperature Range	T_{stg}	-55 to +150	°C

DEVICE MARKING

MMBV2101LT1 = M4G	MMBV2108LT1 = 4X	MV2109 = MV2109
MMBV2103LT1 = 4H	MMBV2109LT1 = 4J	LV2205 = LV2205
MMBV2105LT1 = 4U	MV2101 = MV2101	LV2209 = LV2209
MMBV2107LT1 = 4W	MV2105 = MV2105	



MARKING DIAGRAM



XXX = Device Code*
M = Date Code
* See Table



XX = Device Code Line 1*
XXXX = Device Code Line 2*
M = Date Code
* See Table

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Reverse Breakdown Voltage ($I_R = 10 \mu\text{Adc}$) MMBV21xx, MV21xx LV22xx	$V_{(BR)R}$	30 25	-	-	Vdc
Reverse Voltage Leakage Current ($V_R = 25 \text{ Vdc}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$)	I_R	-	-	0.1	μAdc
Diode Capacitance Temperature Coefficient ($V_R = 4.0 \text{ Vdc}$, $f = 1.0 \text{ MHz}$)	T_C	-	280	-	ppm/°C

Preferred devices are recommended choices for future use and best overall value.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MMBV2101LT1 Series, MV2105, MV2101, MV2109, LV2205, LV2209

Device	C _T , Diode Capacitance V _R = 4.0 Vdc, f = 1.0 MHz pF			Q, Figure of Merit V _R = 4.0 Vdc, f = 50 MHz	TR, Tuning Ratio C ₂ /C ₃₀ f = 1.0 MHz		
	Min	Nom	Max	Typ	Min	Typ	Max
MMBV2101LT1/MV2101	6.1	6.8	7.5	450	2.5	2.7	3.2
MMBV2103LT1	9.0	10	11	400	2.5	2.9	3.2
LV2205/MMBV2105LT1/MV2105	13.5	15	16.5	400	2.5	2.9	3.2
MMBV2107LT1	19.8	22	24.2	350	2.5	2.9	3.2
MMBV2108LT1	24.3	27	29.7	300	2.5	3.0	3.2
LV2209/MMBV2109LT1/MV2109	29.7	33	36.3	200	2.5	3.0	3.2

MMBV2101LT1, MMBV2103LT1, MMBV2105LT1, MMBV2107LT1 thru MMBV2109LT1, are also available in bulk. Use the device title and drop the "T1" suffix when ordering any of these devices in bulk.

PARAMETER TEST METHODS

1. C_T, DIODE CAPACITANCE

(C_T = C_C + C_J). C_T is measured at 1.0 MHz using a capacitance bridge (Boonton Electronics Model 75A or equivalent).

2. TR, TUNING RATIO

TR is the ratio of C_T measured at 2.0 Vdc divided by C_T measured at 30 Vdc.

3. Q, FIGURE OF MERIT

Q is calculated by taking the G and C readings of an admittance bridge at the specified frequency and substituting in the following equations:

$$Q = \frac{2\pi f C}{G}$$

(Boonton Electronics Model 33AS8 or equivalent). Use Lead Length ≈ 1/16".

4. TCC, DIODE CAPACITANCE TEMPERATURE COEFFICIENT

TCC is guaranteed by comparing C_T at V_R = 4.0 Vdc, f = 1.0 MHz, T_A = -65°C with C_T at V_R = 4.0 Vdc, f = 1.0 MHz, T_A = +85°C in the following equation, which defines TCC:

$$TCC = \frac{|C_T(+85^\circ\text{C}) - C_T(-65^\circ\text{C})|}{85 + 65} \cdot \frac{10^6}{C_T(25^\circ\text{C})}$$

Accuracy limited by measurement of C_T to ±0.1 pF.

MMBV2101LT1 Series, MV2105, MV2101, MV2109, LV2205, LV2209

TYPICAL DEVICE CHARACTERISTICS

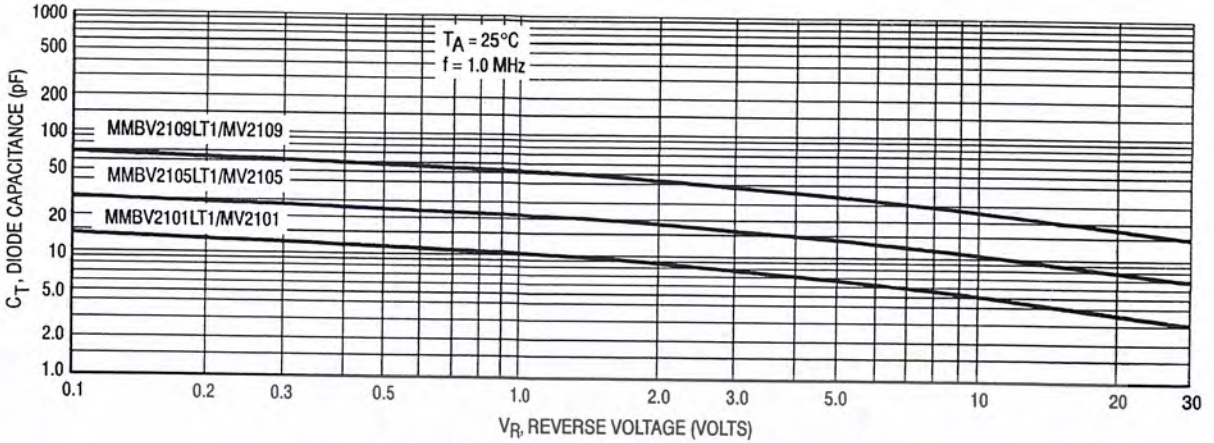


Figure 1. Diode Capacitance versus Reverse Voltage

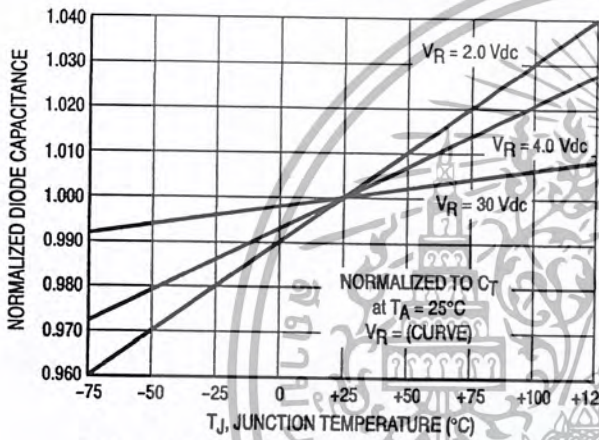


Figure 2. Normalized Diode Capacitance versus Junction Temperature

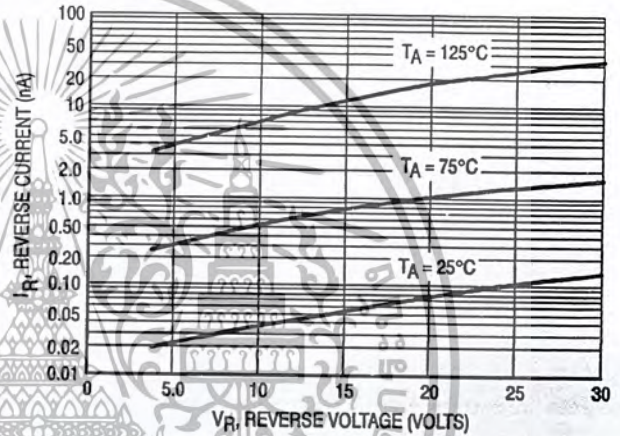


Figure 3. Reverse Current versus Reverse Bias Voltage

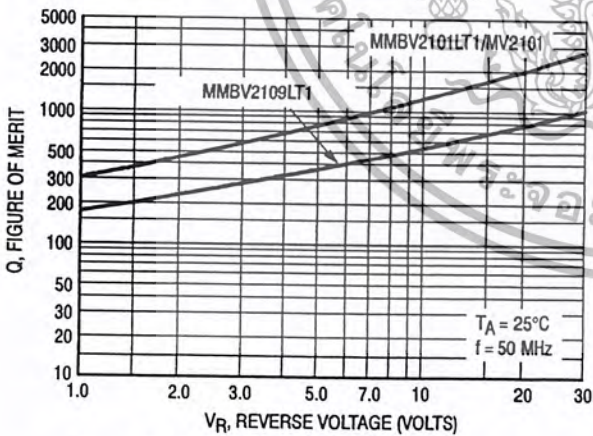


Figure 4. Figure of Merit versus Reverse Voltage

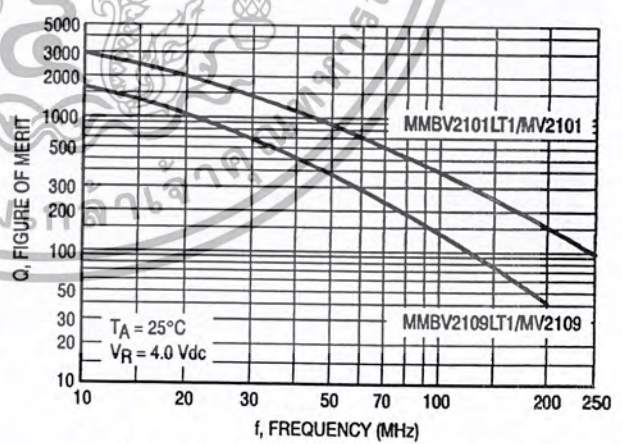


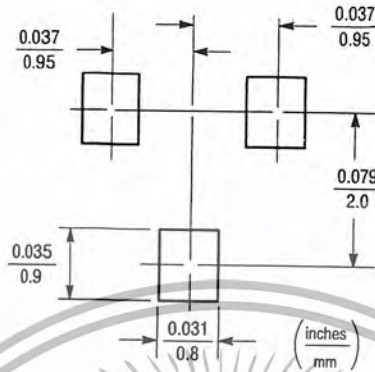
Figure 5. Figure of Merit versus Frequency

INFORMATION FOR USING THE SOT-23 SURFACE MOUNT PACKAGE

MINIMUM RECOMMENDED FOOTPRINT FOR SURFACE MOUNTED APPLICATIONS

Surface mount board layout is a critical portion of the total design. The footprint for the semiconductor packages must be the correct size to insure proper solder connection

interface between the board and the package. With the correct pad geometry, the packages will self align when subjected to a solder reflow process.



SOT-23

SOT-23 POWER DISSIPATION

The power dissipation of the SOT-23 is a function of the pad size. This can vary from the minimum pad size for soldering to a pad size given for maximum power dissipation. Power dissipation for a surface mount device is determined by $T_{J(max)}$, the maximum rated junction temperature of the die, $R_{\theta JA}$, the thermal resistance from the device junction to ambient, and the operating temperature, T_A . Using the values provided on the data sheet for the SOT-23 package, P_D can be calculated as follows:

$$P_D = \frac{T_{J(max)} - T_A}{R_{\theta JA}}$$

The values for the equation are found in the maximum ratings table on the data sheet. Substituting these values into the equation for an ambient temperature T_A of 25°C, one can calculate the power dissipation of the device which in this case is 225 milliwatts.

$$P_D = \frac{150^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}}{556^\circ\text{C/W}} = 225 \text{ milliwatts}$$

The 556°C/W for the SOT-23 package assumes the use of the recommended footprint on a glass epoxy printed circuit board to achieve a power dissipation of 225 milliwatts. There are other alternatives to achieving higher power dissipation from the SOT-23 package. Another alternative would be to use a ceramic substrate or an aluminum core board such as Thermal Clad™. Using a board material such as Thermal Clad, an aluminum core board, the power dissipation can be doubled using the same footprint.

SOLDERING PRECAUTIONS

The melting temperature of solder is higher than the rated temperature of the device. When the entire device is heated to a high temperature, failure to complete soldering within a short time could result in device failure. Therefore, the following items should always be observed in order to minimize the thermal stress to which the devices are subjected.

- Always preheat the device.
 - The delta temperature between the preheat and soldering should be 100°C or less.*
 - When preheating and soldering, the temperature of the leads and the case must not exceed the maximum temperature ratings as shown on the data sheet. When using infrared heating with the reflow soldering method, the difference shall be a maximum of 10°C.
 - The soldering temperature and time shall not exceed 260°C for more than 10 seconds.
 - When shifting from preheating to soldering, the maximum temperature gradient shall be 5°C or less.
 - After soldering has been completed, the device should be allowed to cool naturally for at least three minutes. Gradual cooling should be used as the use of forced cooling will increase the temperature gradient and result in latent failure due to mechanical stress.
 - Mechanical stress or shock should not be applied during cooling.
- * Soldering a device without preheating can cause excessive thermal shock and stress which can result in damage to the device.

SOLDER STENCIL GUIDELINES

Prior to placing surface mount components onto a printed circuit board, solder paste must be applied to the pads. A solder stencil is required to screen the optimum amount of solder paste onto the footprint. The stencil is made of brass or stainless steel with a typical thickness of 0.008 inches.

The stencil opening size for the surface mounted package should be the same as the pad size on the printed circuit board, i.e., a 1:1 registration.

TYPICAL SOLDER HEATING PROFILE

For any given circuit board, there will be a group of control settings that will give the desired heat pattern. The operator must set temperatures for several heating zones, and a figure for belt speed. Taken together, these control settings make up a heating "profile" for that particular circuit board. On machines controlled by a computer, the computer remembers these profiles from one operating session to the next. Figure 7 shows a typical heating profile for use when soldering a surface mount device to a printed circuit board. This profile will vary among soldering systems but it is a good starting point. Factors that can affect the profile include the type of soldering system in use, density and types of components on the board, type of solder used, and the type of board or substrate material being used. This profile shows temperature versus time.

The line on the graph shows the actual temperature that might be experienced on the surface of a test board at or near a central solder joint. The two profiles are based on a high density and a low density board. The Vitronics SMD310 convection/infrared reflow soldering system was used to generate this profile. The type of solder used was 62/36/2 Tin Lead Silver with a melting point between 177–189°C. When this type of furnace is used for solder reflow work, the circuit boards and solder joints tend to heat first. The components on the board are then heated by conduction. The circuit board, because it has a large surface area, absorbs the thermal energy more efficiently, then distributes this energy to the components. Because of this effect, the main body of a component may be up to 30 degrees cooler than the adjacent solder joints.

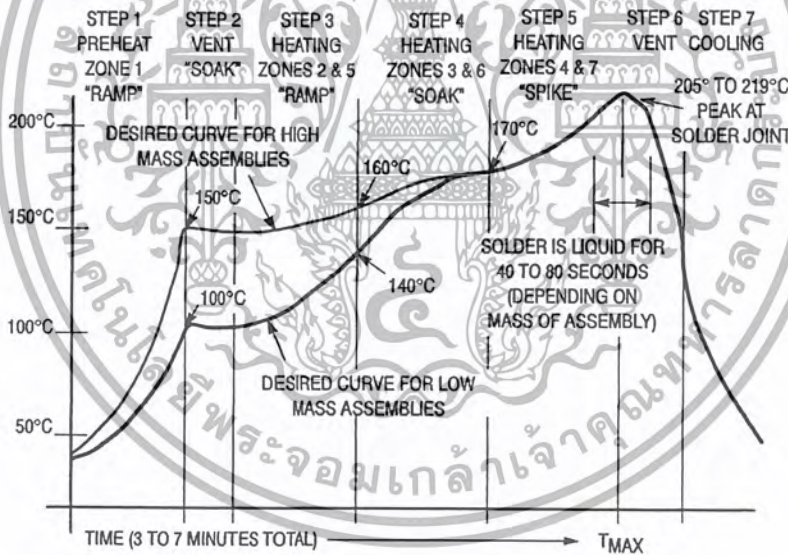


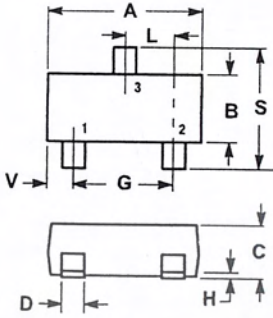
Figure 6. Typical Solder Heating Profile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

MMBV2101LT1 Series, MV2105, MV2101, MV2109, LV2205, LV2209

PACKAGE DIMENSIONS

SOT-23 (TO-236AB)
CASE 318-08
ISSUE AF

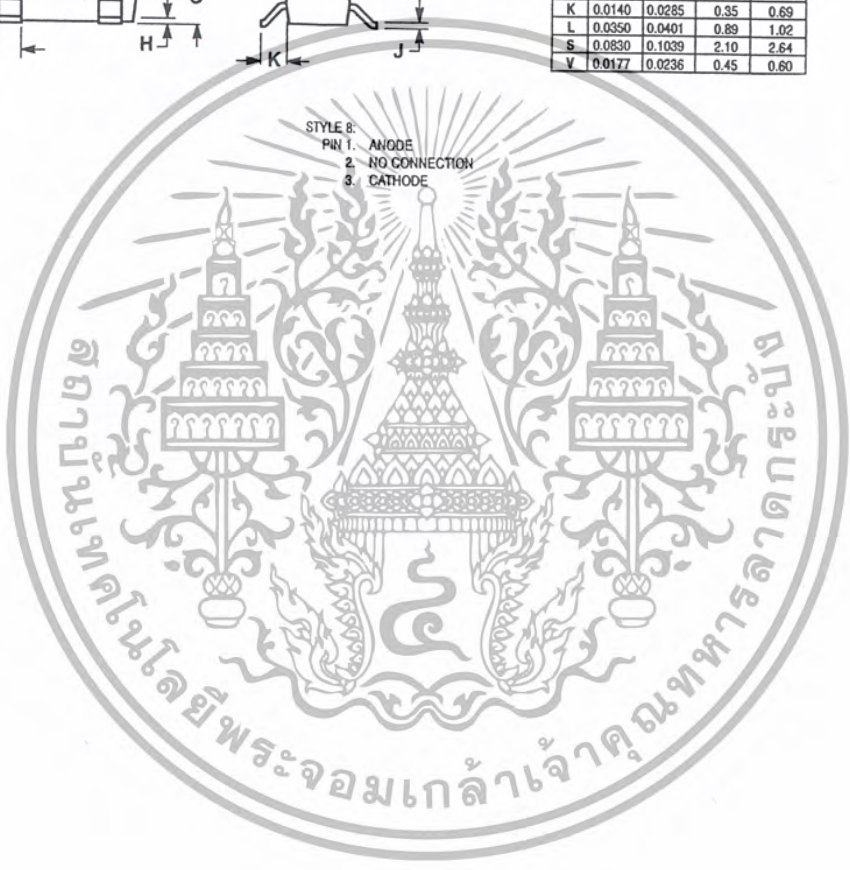


NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
3. MAXIMUM LEAD THICKNESS INCLUDES LEAD FINISH THICKNESS. MINIMUM LEAD THICKNESS IS THE MINIMUM THICKNESS OF BASE MATERIAL.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.1102	0.1197	2.80	3.04
B	0.0472	0.0551	1.20	1.40
C	0.0350	0.0440	0.89	1.11
D	0.0150	0.0200	0.37	0.50
G	0.0701	0.0807	1.78	2.04
H	0.0005	0.0040	0.013	0.100
J	0.0034	0.0070	0.085	0.177
K	0.0140	0.0285	0.35	0.69
L	0.0350	0.0401	0.89	1.02
S	0.0830	0.1039	2.10	2.64
V	0.0177	0.0236	0.45	0.60

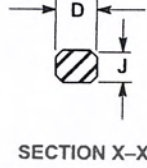
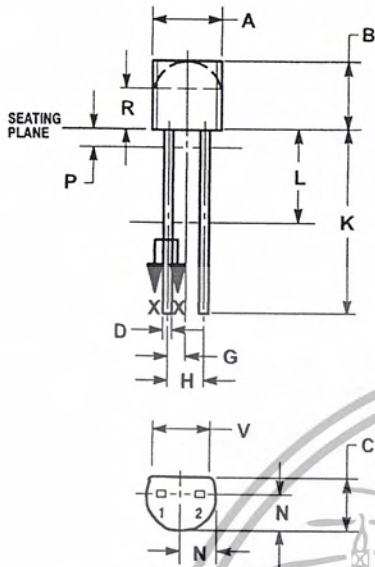
STYLE 8:
PIN 1. ANODE
2. NO CONNECTION
3. CATHODE



MMBV2101LT1 Series, MV2105, MV2101, MV2109, LV2205, LV2209

PACKAGE DIMENSIONS

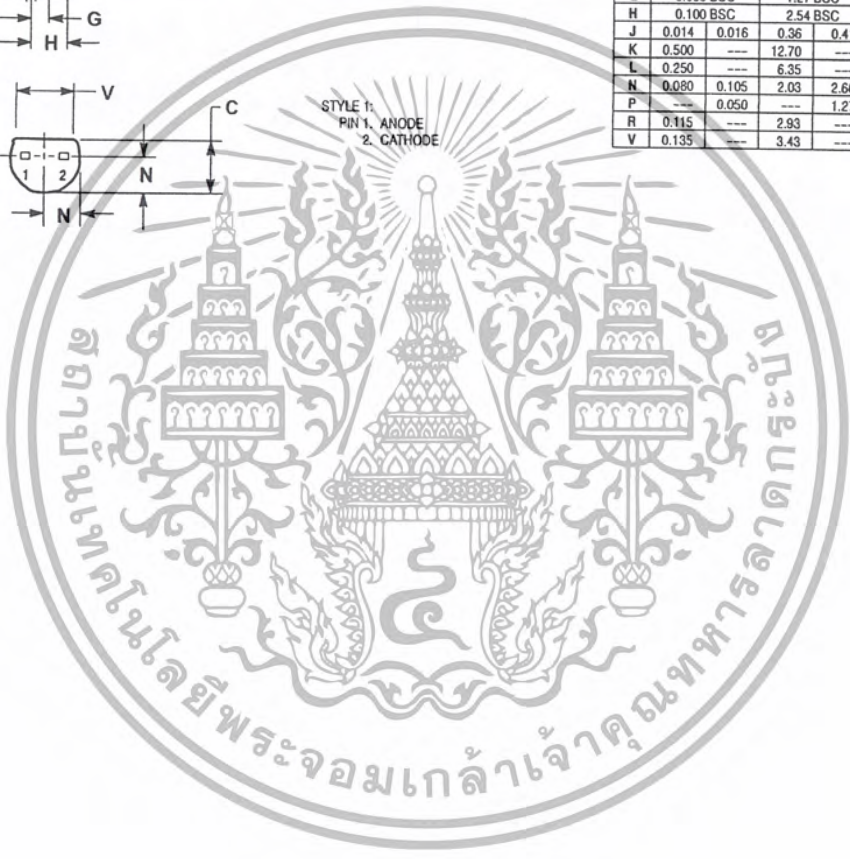
TO-92 (TO-226AC)
CASE 182-06
ISSUE L



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
 3. CONTOUR OF PACKAGE BEYOND ZONE R IS UNCONTROLLED.
 4. LEAD DIMENSION IS UNCONTROLLED IN P AND BEYOND DIMENSION K MINIMUM.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	0.175	0.205	4.45	5.21
B	0.170	0.210	4.32	5.33
C	0.125	0.165	3.18	4.19
D	0.016	0.021	0.407	0.533
G	0.050 BSC		1.27 BSC	
H	0.100 BSC		2.54 BSC	
J	0.014	0.016	0.36	0.41
K	0.500	---	12.70	---
L	0.250	---	6.35	---
N	0.080	0.105	2.03	2.66
P	---	0.050	---	1.27
R	0.115	---	2.93	---
V	0.135	---	3.43	---


STYLE 1:
PIN 1, ANODE
2, CATHODE



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Thermal Clad is a trademark of the Bergquist Company.

ON Semiconductor and  are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

Literature Fulfillment:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com

JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center
4-32-1 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo, Japan 141-0031
Phone: 81-3-5740-2700
Email: r14525@onsemi.com

ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local
Sales Representative.

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

MMBV2101LT1/D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้