

กล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส

CHAOTIC MUSIC BOX SYNTHESIZER



นางสาวกุลธิดา ทศนสุวรรณ

นายธูปน ชูชนะภิรมย์

นายพุดิพงศ์ โตคณิตชาติ

นางสาวภัทราวดี กอสง่าลักษณ์

ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์ กล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส
นักศึกษา นางสาวกุลธิดา ทศนสุวรรณ, นายธูปน ชูวนะภิรมย์,
 นายพุดพิงศ์ โตคณิตชาติ, นางสาวภัทราวดี กอสง่าลักษณ์
รหัสประจำตัว 58010112, 58010317, 58010919, 58010953
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมดนตรี และสื่อประสม
พ.ศ. 2561
อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์ ผศ.ดร. กฤดากร กลุ่มมการ

บทคัดย่อ

โครงการปริญญานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและทดลองสร้างกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส (Chaotic Music Box Synthesizer) ซึ่งเป็นเครื่องดนตรีที่มีการสังเคราะห์เสียงโดยมีพื้นฐานมาจากสมบัติของทฤษฎีความอลวน (chaos theory) โดยมีลักษณะเสียงแบบดนตรีอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งผู้ใช้สามารถสร้างสรรค์ดนตรีจากธรรมชาติของความอลวนที่ไม่สามารถคาดเดาผลลัพธ์ได้ ทำให้เครื่องดนตรีนี้สามารถประยุกต์ใช้งานทางด้านเสียงได้หลากหลาย

Thesis Chaotic Music Box Synthesizer
Student Miss. Kuldhida Thasnasuwarn, Mr. Tapana Choowanapirom,
 Mr. Puttipong Tokanitchat, Miss. Pattarawadee Korsangaluk
Student ID. 58010112, 58010317, 58010919, 58010953
Degree Bachelor of Engineering
Program Music engineering and Multimedia
Year 2018
Thesis Advisor Asst.Prof.Dr. Kitdakorn Klomkarn



ABSTRACT

The project is the creation of a synthesizer called Chaotic Music Box Synthesizer, an audio sound generator that operates according to principles of chaos theory. The instrument becomes an electronic music instrument that invites performers to improvise with the chaotic nature of the synthesizer which is roughly predictable or unpredictable. The instrument can be used in many sound production purposes.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์เรื่องกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส (Chaotic Music Box Synthesizer) ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาปริญญาตรี สำเร็จจุลวงได้ด้วย การสนับสนุนจาก ผศ. ดร. กฤตากร กล่อมการ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ที่ให้คำปรึกษา การอนุเคราะห์ด้านอุปกรณ์และสถานที่ปฏิบัติงาน ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้จัดทำจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรทางการศึกษา สาขาวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่คอยให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ พร้อมทั้งให้คำปรึกษาในการแก้ไขปรับปรุงให้การทำงานในครั้งนี้มีประสิทธิภาพสูงสุด

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณผู้มีส่วนร่วมทุกท่านที่มีส่วนช่วยให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จจุลวงไปด้วยดี และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะสามารถนำไปต่อยอดเป็นนวัตกรรมที่มีประโยชน์ตั้งที่ผู้จัดทำหวังไว้

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญ (ต่อ).....	V
สารบัญ (ต่อ).....	VI
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สารบัญรูป (ต่อ).....	IX
สารบัญรูป (ต่อ).....	X
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตของโครงการ.....	2
1.4 วิธีการดำเนินงานโครงการ.....	3
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและแนวคิดในการออกแบบ.....	4
2.1 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Systems).....	4
2.2 ทฤษฎีความอลวน (chaos theory).....	5
2.3 องค์ประกอบของกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส.....	7
2.4 ตัวขยายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled amplifier, VCA).....	7
2.4.1 SSI2164 quad voltage-controlled amplifier.....	7

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.5	วงจรถูกกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO).....	9
2.5.1	วงจรถูกอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based integrator circuit).....	10
2.5.2	วงจรถูกขมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt triggers)	13
2.5.2.1	วงจรถูกขมิตต์ทริกเกอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based Schmitt trigger)	14
2.5.3	วงจรถูกปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า (input adjustment circuit)	16
2.5.3.1	วงจรถูกขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier). ..	17
2.5.3.2	วงจรถูกเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง (precision half-wave rectifier).....	18
2.6	วงจรถูกกรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled filter, VCF). ..	20
2.6.1	วงจรถูกกรองแบบตัวแปรสถานะ (state variable filter).....	20
2.7	ศูนย์กลางของความอลวน (the heart of chaos circuit, Rungler).....	23
2.7.1	ตัวสร้างเลขสุ่มเทียม (pseudo random number generator: PRNG) ..	23
2.7.1.1	การสร้างเลขสุ่มเทียม	24
2.7.2	วงจรถูกริงเกลอร์ (Rungler).....	25
บทที่ 3	วิธีการดำเนินงานโครงการ	27
3.1	ประชุมและวางแผนการทำงาน	27
3.2	ศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง	27
3.3	ออกแบบวงจรถูกย่อยและสร้างต้นแบบ	27
3.4	การทดสอบวงจรถูกต้นแบบ	29
3.4.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเกตการณ์ทำงานของวงจรถูก	29

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.5 ออกแบบและสร้างวงจรจริง.....	31
3.6 การผลิตชิ้นงาน.....	32
3.7 การทดสอบชิ้นงานจริง.....	35
บทที่ 4 ผลและการอภิปราย	38
4.1 ผลจากวงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO)	38
4.1.1 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based integrator circuit).....	38
4.1.2 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based Schmitt trigger)	39
4.2 ผลจากวงจรส่วนศูนย์กลางของความอลวน (the heart of chaos circuit, Rungler)	40
4.3 ผลเอาต์พุตสุดท้ายจากกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส	41
บทที่ 5 สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ	42
5.1 สรุปผลโครงการ.....	42
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
บรรณานุกรม.....	43

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อผู้มและช่องสัญญาณพร้อมหน้าที่การทำงาน 33



สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 1.1	ซินธิไซเซอร์ชนิดต่างๆ.....	1
รูปที่ 1.2	เคโอดิคซินธิไซเซอร์.....	2
รูปที่ 2.1	วงโคจรของระบบลอเรนซ์ที่มีลักษณะคล้ายผีเสื้อ.....	6
รูปที่ 2.2	แผนภาพบล็อกแสดงองค์ประกอบของกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส.....	7
รูปที่ 2.3	แผนภาพแสดงการกำหนดขาของ SSI2164 quad voltage-controlled amplifier.....	8
รูปที่ 2.4	แผนภาพบล็อกของ SSI2164 quad voltage-controlled amplifier.....	8
รูปที่ 2.5	แผนผังวงจรกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมแบบพื้นฐาน.....	9
รูปที่ 2.6	วงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์.....	10
รูปที่ 2.7	ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์.....	11
รูปที่ 2.8	เปรียบเทียบเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปของวงจรอินทิเกรเตอร์.....	11
รูปที่ 2.9	ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม.....	12
รูปที่ 2.10	สัญลักษณ์แสดงวงจรมิตต์ทริกเกอร์.....	13
รูปที่ 2.11	สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจากวงจรมิตต์ทริกเกอร์.....	13
รูปที่ 2.12	ความแตกต่างของสัญญาณอินพุตระหว่างอุปกรณ์ที่มีขีดเริ่มเปลี่ยนเดียวกับมิตต์ทริกเกอร์.....	14
รูปที่ 2.13	วงจรเปรียบเทียบสัญญาณแรงดัน (voltage comparator).....	15
รูปที่ 2.14	วงจรมิตต์ทริกเกอร์.....	15
รูปที่ 2.15	เอาต์พุตของวงจรมิตต์ทริกเกอร์.....	16
รูปที่ 2.16	วงจรขับแรงดันควบคุมแบบทั่วไป (generic CV driver).....	16
รูปที่ 2.17	วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ.....	17
รูปที่ 2.18	วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง.....	18
รูปที่ 2.19	ตัวอย่างวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง.....	19
รูปที่ 2.20	แผนภาพบล็อกของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ.....	20

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 2.21	วงจรพื้นฐานของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ	21
รูปที่ 2.22	ผลตอบสนองในรูปมาตรฐานของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ.....	21
รูปที่ 2.23	Low pass filter stage.....	23
รูปที่ 2.24	ตัวอย่างการสร้างเลขคู่เต็มด้วยพหุนาม $1+x^{14}+x^{15}$	24
รูปที่ 2.25	แผนภาพบล็อกของวงจรกำเนิดนอยซ์ที่เป็นพื้นฐานของวงจรริงเกลอร์	25
รูปที่ 3.1	ต้นแบบแรกของวงจรถ่วงดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส โดยระบุตำแหน่งวงจรร้อย 28	
รูปที่ 3.2	ออสซิลอสโคป RIGOL รุ่น DS1052E	29
รูปที่ 3.3	สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่วัดจากวงจรอินทิเกรเตอร์ในการทดสอบวงจรถ่วงดนตรี	30
รูปที่ 3.4	สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่วัดจากวงจรมัลติเพล็กซ์ในการทดสอบวงจรถ่วงดนตรี	30
รูปที่ 3.5	รูปแบบของสัญญาณที่วัดจากวงจรริงเกลอร์ในการทดสอบวงจรถ่วงดนตรี	30
รูปที่ 3.6	การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับสร้างวงจรถ่วงความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า	31
รูปที่ 3.7	การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับสร้างวงจรริงเกลอร์	31
รูปที่ 3.8	ถ่วงดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส (ชิ้นงานจริง)	32
รูปที่ 3.9	ตำแหน่งของปั๊มและช่องสัญญาณของชิ้นงาน	33
รูปที่ 3.10	แผ่นครีติกใสสำหรับสร้างแท่นยี่ดวงจร	34
รูปที่ 3.11	ปั๊มปรับสีสันต่างๆเพื่อจำแนกประเภทการปรับสำหรับการใช้งานจริง.....	34
รูปที่ 3.12	เครื่องจัดลำดับดนตรี (sequencer).....	35
รูปที่ 3.13	แผนภาพบล็อกแสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานกับเครื่องจัดลำดับดนตรี	35
รูปที่ 3.14	แผนภาพบล็อกแสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานกับโปรแกรมดนตรี.....	36
รูปที่ 3.15	โปรแกรม Ableton Live 9 Suite.....	36
รูปที่ 3.16	โปรแกรม Logic Pro X.....	37
รูปที่ 3.17	แผนภาพบล็อกแสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานกับซินธิไซเซอร์	37

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆขณะใช้งานจริง	37
รูปที่ 4.1 สัญญาณคลื่นรูปสามเหลี่ยมจากวงจรอินทิเกรเตอร์ของ VCO	38
รูปที่ 4.2 สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมจากวงจรมิตต์ทริกเกอร์ของ VCO	39
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างสัญญาณรูปขั้นจากวงจรรีจิสเตอร์เมื่อเปิดโหมดควบคุมการวนรอบของรีจิสเตอร์	40
รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสัญญาณรูปขั้นจากวงจรรีจิสเตอร์เมื่อปิดโหมดควบคุมการวนรอบของรีจิสเตอร์ .	40
รูปที่ 4.5 ผลเอาต์พุตสุดท้ายจากกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส.....	41



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

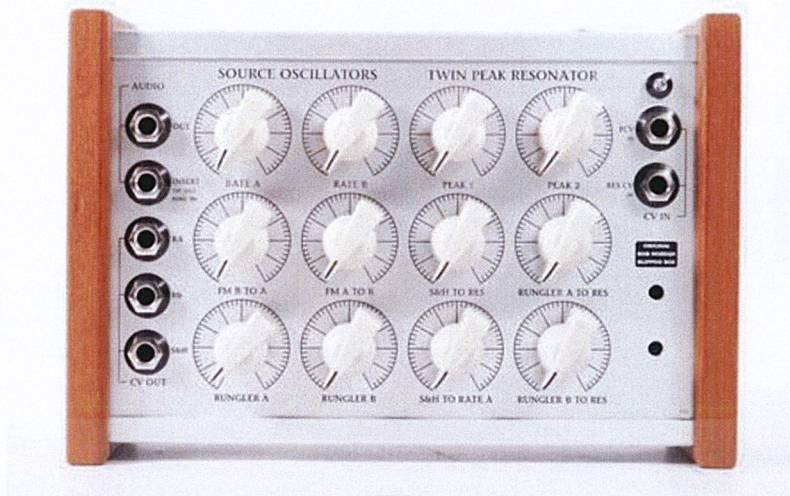
ในปัจจุบันเครื่องสังเคราะห์เสียงหรือซินธิไซเซอร์ (synthesizer) มีบทบาทต่ออุตสาหกรรมดนตรีและภาพยนตร์เป็นอย่างมาก ซินธิไซเซอร์ที่เป็นที่นิยมและพบเห็นมากในท้องตลาดมีอยู่หลายชนิด เช่น โมดูลาซินธิไซเซอร์ (modular synthesizer), กรานูลาซินธิไซเซอร์ (granular synthesizer) และอื่นๆ [8] นอกจากนี้ยังมีซินธิไซเซอร์อีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจและมีเอกลักษณ์ที่โดดเด่น แต่ยังไม่เป็นที่รู้จักมากนัก คือ เคอโอดิคซินธิไซเซอร์ (chaotic synthesizer) ซึ่งผู้จัดทำมีความสนใจที่จะนำทฤษฎีโวลวน (chaos theory) มาศึกษา และทดลองสร้างกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเค-ออส

กล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส เป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วย 3 วงจรหลัก ได้แก่ ออสซิลเลเตอร์ (oscillator), ฟิลเตอร์ (filter) และวงจรรังเกิลอร์ (rangler) ที่เป็นส่วนหลักทำให้เกิดปรากฏการณ์เคออส ของเครื่องดนตรีชิ้นนี้ ซึ่งการบิดและปรับปุ่มเพียงเล็กน้อยจะทำให้เกิดเสียงที่แตกต่างจากเดิมอย่างไม่สามารถคาดเดาได้ จึงทำให้ผู้ใช้สามารถเพิลิดเพิลินไปกับการสร้างและค้นหาเสียงใหม่ๆ ได้อย่างไม่รู้จบ



รูปที่ 1.1 ซินธิไซเซอร์ชนิดต่างๆ

ที่มา : <https://djmag.com/news/new-vst-captures-38-classic-synthesizers-one-plugin>



รูปที่ 1.2 เคโอติกซินธิไซเซอร์

ที่มา : <https://switchedonaustin.com/products/rob-hordijk-blippoo-box>

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

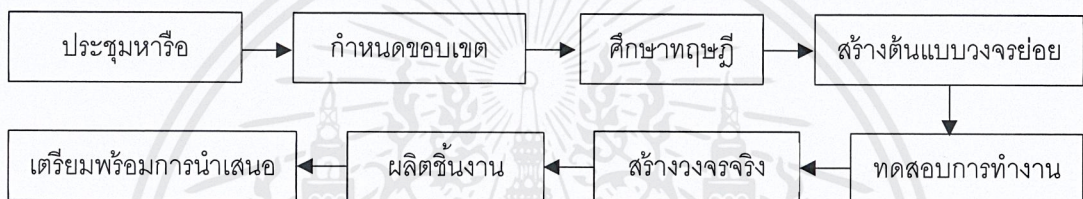
1. เพื่อศึกษาหลักการทำงานของวงจรที่เป็นองค์ประกอบของซินธิไซเซอร์
2. เพื่อศึกษาพฤติกรรมเคออสในเคโอติกซินธิไซเซอร์
3. เพื่อตอบสนองการใช้งานในอุตสาหกรรมผลิตเสียงประกอบภาพเคลื่อนไหว และกลุ่มผู้ชื่นชอบซินธิไซเซอร์แบบอนาล็อก

1.3 ขอบเขตของโครงการ

โครงการเรื่องกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส (chaotic music box synthesizer) ครอบคลุมถึงการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง คือ ทฤษฎีความอลวน (chaos theory) และหลักการทำงานของวงจรที่เป็นองค์ประกอบของซินธิไซเซอร์ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม, รีจิสเตอร์เลื่อนป้อนกลับได้เชิงเส้น (linear-feedback shift register, LFSR) เป็นต้น รวมถึงการสร้างเครื่องต้นแบบและการประกอบชิ้นงานลงกล่องโดยคำนึงถึงความสะดวกต่อการใช้งานของผู้ใช้

1.4 วิธีการดำเนินงานโครงการ

ในการจัดทำโครงการปริญญาโทเรื่องกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส (Chaotic Music Box Synthesizer) คณะผู้จัดทำเริ่มจากการประชุมหารือเพื่อวางแผนการปฏิบัติงาน รับผิดชอบต่อจุดประสงค์และรายละเอียดโครงการ จากนั้นจึงกำหนดขอบเขตของโครงการเพื่อให้เหมาะสมกับระยะเวลาในการปฏิบัติงานตลอดช่วงภาคเรียนที่ 2 โดยการแบ่งงานจะแบ่งเป็นหลายเป้าหมายย่อยและจัดตารางแผนงานให้ชัดเจนแล้วจึงปฏิบัติงานให้สำเร็จลุล่วงเป็นส่วนๆ ระยะเวลาแรกเป็นการศึกษาทฤษฎีและทดลองสร้างวงจรต้นแบบเพื่อทดสอบการทำงานเบื้องต้น โดยคำนึงถึงชนิดของอุปกรณ์ที่ใช้ ขนาด และการใช้งาน จากนั้นจึงทำการทดสอบเพื่อพัฒนาชิ้นงานจริงในขั้นตอนถัดไป ในชิ้นงานจริงนั้นจะมีการคำนึงถึงความสะดวกต่อการใช้งานของผู้ใช้ โดยจะมีการเพิ่มแท่นพร้อมปุ่มปรับและคำอธิบายประกอบ เมื่อชิ้นงานเสร็จสมบูรณ์จะเป็นการเตรียมพร้อมการนำเสนอและจัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์โดยแผนภาพแสดงการทำงานโดยย่อดังนี้



1.5 ประโยชน์ที่ได้รับ

1. ได้นำความรู้ทั้งศาสตร์และศิลป์มาประยุกต์ใช้ด้วยกันเพื่อสร้างสรรค์ชิ้นงานที่ตอบโจทย์คำจำกัดความของวิศวกรรมดนตรีและสื่อประสม
2. เรียนรู้โครงสร้างและการทำงานของวงจรถินอิโซเซอรอนาล็อกชนิดไร้คีย์ (keyless analog synthesizer) รวมถึงวงจรย่อยในเชิงลึก ซึ่งสามารถนำความรู้ไปพัฒนาต่อยอดและประยุกต์ใช้ในอนาคต
3. ได้ชิ้นงานต้นแบบที่สามารถใช้งานได้จริง ในสถานการณ์จริง ตามจุดประสงค์การใช้งานของเครื่อง

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและแนวคิดในการออกแบบ

2.1 ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้น (Linear and Nonlinear Systems)

ความอลวน (chaos) เป็นคำที่ใช้ในการอธิบายพฤติกรรมที่ซับซ้อนซึ่งแสดงออกมาในรูปแบบของระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear systems)

ระบบไม่เชิงเส้น (nonlinear systems) เป็นสมการการวิวัฒนาการในเวลา (time evolution equations) มีการทำงานแบบไม่เชิงเส้น (nonlinear) ซึ่งสามารถอธิบายคุณสมบัติของระบบได้จากตัวแปรพลวัต (dynamical variables) อาทิเช่น ตำแหน่ง (position), ความเร็ว (velocity), ความเร่ง (acceleration), แรงดัน (pressure) เป็นต้น

ระบบเชิงเส้นและระบบไม่เชิงเส้นสามารถอธิบายได้จาก 2 ตัวอย่างของกลศาสตร์เบื้องต้นของกฎการเคลื่อนที่ข้อที่ 2 ของนิวตัน ประกอบด้วยมวล (m) และ แรง (F_x) ที่กระทำต่อวัตถุในทิศทาง x

$$F_x(x, t) = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2.1-1)$$

จากทฤษฎีเบื้องต้น กรณีแรงจากสปริงในอุดมคติที่กระทำต่อมวลวัตถุ ซึ่งแรงคิดจากสมการดังนี้

$$F_x(x) = -kx \quad (2.1-2)$$

โดย x แทนระยะของสปริงจากจุดสมดุล (equilibrium position, ที่จุด $F_x = 0$) และ k คือค่าคงตัวของสปริง (spring constant) จากสมการที่ 2.1-1 และ 2.1-2 จะได้สมการการวิวัฒนาการในเวลา (time evolution equations) สำหรับตำแหน่งของวัตถุ

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{k}{m}x \quad (2.1-3)$$

จากสมการข้างต้นค่า x และอนุพันธ์อันดับ 2 ของ x (ความเร่ง) มีลักษณะเป็นเชิงเส้น ดังนั้นเราสามารถระบุได้ว่าระบบดังกล่าวเป็นระบบเชิงเส้น หากมวลถูกย้ายจากจุดสมดุลและถูกปล่อย มันจะทำให้เกิดการแกว่งผ่านจุดสมดุลเป็นคลื่นรูปไซน์ (sinusoidally) ด้วยความถี่เชิงมุม (angular frequency, ω) ดังนี้

$$\omega = \sqrt{k/m} \quad (2.1-4)$$

ในอีกตัวอย่าง ความสัมพันธ์ระหว่างแรง F_x และ x มีความซับซ้อนขึ้น โดยกำหนดให้ $F = bx^2$ จะได้สมการการวิวัฒนาการในเวลา (time evolution equations) ดังนี้

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{b}{m}x^2 \quad (2.1-5)$$

จากสมการ ระบบนี้ไม่เป็นเชิงเส้นเพราะตำแหน่งของวัตถุ (x) อยู่ในรูปของสมการกำลังสอง

เมื่อพารามิเตอร์ของระบบเชิงเส้น (ตัวแปรค่าคงที่ของสปริง k ในสมการที่ 2.1-3) เปลี่ยนไป ผลลัพธ์ของความถี่ (frequency) และแอมพลิจูด (amplitude) จะเปลี่ยนไปตาม แต่ลักษณะเชิงคุณภาพของพฤติกรรม (การแกว่งแบบฮาร์โมนิกอย่างง่ายดังตัวอย่าง) จะคงเดิม แต่สำหรับระบบไม่เชิงเส้น เมื่อเปลี่ยนพารามิเตอร์เล็กน้อย จะทำให้ลักษณะเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณของพฤติกรรมเปลี่ยนไปอย่างสิ้นเชิง หรือเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์เพียงค่าเดียว พฤติกรรมที่เกิดขึ้นอาจยังเป็นแบบคาบ (periodic) แต่เมื่อมีการเปลี่ยนมากกว่าหนึ่งค่าแม้เพียงเล็กน้อยพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นคาบ (aperiodic) อีกต่อไป

2.2 ทฤษฎีความอลวน (chaos theory)

ทฤษฎีความอลวนหรือทฤษฎีเคออส (chaos theory) คือ ทฤษฎีที่ใช้ในการอธิบายระบบพลวัตหรือระบบที่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่เปลี่ยนไป โดยพฤติกรรมของระบบนี้เสมือนว่าเป็นการสุ่มหรือไร้ระเบียบ (random) แต่ในความเป็นจริงระบบมีความเป็นระเบียบ (deterministic) ระบบเคออสมีความไวต่อเงื่อนไขเริ่มต้นอย่างมาก (sensitive to initial conditions) กล่าวคือ ถ้าระบบ 2 ระบบนั้นเริ่มต้นจากสภาวะที่แตกต่างกันเพียงเล็กน้อย เมื่อระบบได้มีการเปลี่ยนแปลงไประยะหนึ่ง สภาวะของระบบทั้งสองจะแตกต่างกันอย่างสังเกตเห็นได้ชัด ซึ่งระบบไม่จำเป็นต้องแตกต่างกันในแง่ของขนาดของผลลัพธ์เสมอไป แต่อาจแตกต่างกันในแง่ของพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงของระบบ ระบบสามารถใช้การคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อทำนายผลลัพธ์ล่วงหน้าได้ในเวลาหนึ่ง แต่ผลการคำนวณจะแม่นยำหรือไม่ขึ้นอยู่กับค่าที่ใช้ในการคำนวณ มีความแม่นยำเพียงใดและทำนายล่วงหน้าได้นานเท่าไร ผลลัพธ์ทั้งหมดของการเปลี่ยนแปลงนั้นมีขอบเขตจำกัดเพียงแต่ไม่สามารถคาดเดารูปแบบของผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้นได้เสมอไป จึงกล่าวได้ว่าระบบเคออสนั้นไม่ใช้การเปลี่ยนแปลงแบบสุ่ม แต่เป็นการเปลี่ยนแปลงแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear)

ในปี ค.ศ. 1961 นักอุตุนิยมวิทยาชาวอเมริกัน เอ็ดเวิร์ด ลอเรนซ์ ได้คิดค้นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 12 ตัวแปร ซึ่งแสดงถึงความเร็วลมและอุณหภูมิ โดยใช้คอมพิวเตอร์ดิจิทัลในยุคนั้นคือ Royal McBee LGP-30 เขาต้องการที่จะเห็นลำดับข้อมูลอีกครั้ง ในการคำนวณครั้งถัดมาเขาไม่ต้องการเริ่มจำลองจากจุดเริ่มต้นใหม่ เขาจึงใช้ข้อมูลในการคำนวณครั้งก่อนหน้าเพื่อเป็นค่าเริ่มต้น แต่กลับพบว่าผลลัพธ์ที่ได้ต่างกันอย่างสิ้นเชิง เพียงเพราะว่าผลลัพธ์ที่เป็นตัวเลขทศนิยม 6 ตำแหน่ง คือ 0.506127 ถูกปัดเศษจากเครื่องพิมพ์เป็นตัวเลขทศนิยม 3 ตำแหน่งเหลือ 0.506 เขาจึงสรุปว่าค่าเงื่อนไขเริ่มต้นที่เปลี่ยนไปเพียงเล็กน้อยนั้นส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมากในผลลัพธ์ระยะยาว [4][5][6][7]

จากการค้นพบในครั้งนั้น จึงเกิดระบบที่ชื่อว่า ตัวดึงดูดลอเรนซ์ (Lorenz attractor) เป็นระบบพลวัตไม่เป็นเชิงเส้นสามมิติ โดยสามารถเขียนในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ได้ดังนี้

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x) \quad (2.2-1)$$

$$\frac{dy}{dt} = x(r - z) - y \quad (2.2-2)$$

$$\frac{dz}{dt} = xy - bz \quad (2.2-3)$$

โดยที่ σ คือ ตัวเลขพรานด์เทิล (Prandtl number)

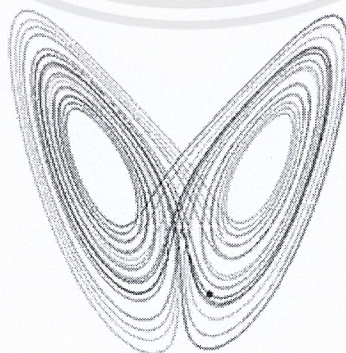
r คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

$$\sigma, r, b > 0$$

ปกติแล้วจะมีค่า $\sigma = 10$, $b = 8/3$ และ r เป็นค่าที่ปรับได้ ซึ่งระบบจะแสดงพฤติกรรมความอลวนที่ค่า $r = 28$

ตัวดึงวิถีหรือตัวดึงดูด (attractor) คือจุดที่ดึงดูดให้ระบบที่มีคุณสมบัติการเคลื่อนที่เป็นวง เคลื่อนที่รอบๆ เข้าหา เพื่อปรับตัวเข้าสู่สมดุล ซึ่งระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงมากจะเคลื่อนที่เป็นวงกว้าง ในทางกลับกันระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยจะเคลื่อนที่เป็นวงแคบ [1]

ตัวดึงดูดลอเรนซ์อธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงไปของระบบพลวัตเมื่อเวลาผ่านไปได้ระยะหนึ่ง โดยระบบจะไม่เข้าสู่จุดสมดุล ลักษณะของพฤติกรรมคล้ายคลึงกับรูปแบบเดิม (self-similarity) เกิดในลักษณะซ้ำเติม (iteration) แต่ไม่ซ้ำรอยเดิมอย่างไม่สามารถคาดเดาได้ (unpredictable) อยู่ตลอดเวลา ภายในขอบเขตจำกัดนั้น ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นตัวดึงดูดประหลาด (strange attractor) [2]

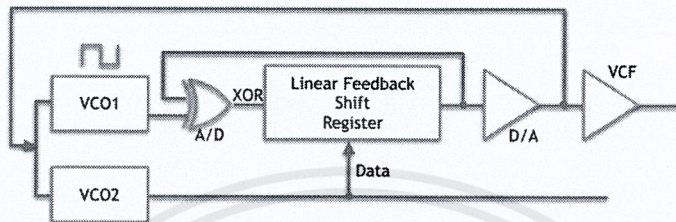


รูปที่ 2.1 วงโคจรของระบบลอเรนซ์ที่มีลักษณะคล้ายผีเสื้อ

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Lorenz_system

รูปร่างของตัวดึงดูดลอเรนซ์มีลักษณะคล้ายผีเสื้อ เป็นส่วนหนึ่งของที่มาของคำว่า ปรากฏการณ์ผลกระทบของผีเสื้อ (butterfly effect) ในทฤษฎีความอลวน

2.3 องค์ประกอบของกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส



รูปที่ 2.2 แผนภาพบล็อกแสดงองค์ประกอบของกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส

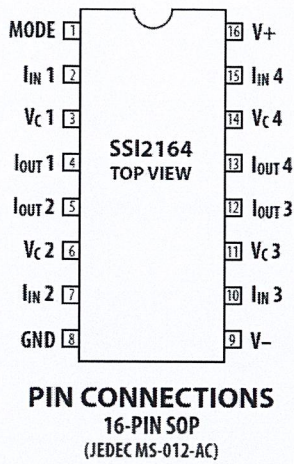
องค์ประกอบของกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสประกอบด้วยวงจรหลัก 3 ส่วน ประกอบด้วยวงจรถ่ายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO) จำนวน 2 วงจร วงจรศูนย์กลางของความอลวนหรือวงจรรังเกิลอร์ (the heart of chaos circuit, Rungler) และวงจรรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled filter, VCF)

2.4 ตัวขยายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled amplifier, VCA)

ตัวขยายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าคือวงจขยายอเล็กทรอนิกส์ที่การปรับเปลี่ยนอัตราขยาย (gain) ขึ้นอยู่กับแรงดันไฟฟ้าควบคุม (control voltage, CV) โดย VCAs สามารถนำมาใช้งานได้หลายรูปแบบอาทิเช่น การควบคุมระดับสัญญาณเสียง (dynamic range compression, DRC / compression) โดยใช้เครื่องควบคุมระดับสัญญาณเสียงหรือคอมเพรสเซอร์ (compressor) และการใช้ปรับระดับแรงดันควบคุมในเครื่องสังเคราะห์เสียง (synthesizer / synth)

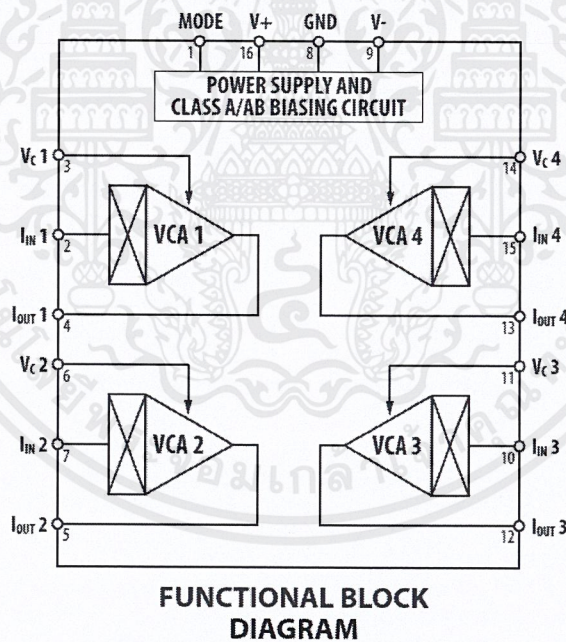
2.4.1 SSI2164 quad voltage-controlled amplifier

SSI2164 เป็นส่วนนอกประสงค์สำหรับวงจรถ่ายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCA) โดยมีช่องสัญญาณทั้ง 4 ที่เป็นอิสระจากกัน และสามารถใช้ในทางด้านเสียงที่มีประสิทธิภาพสูง



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงการกำหนดขาของ SSI2164 quad voltage-controlled amplifier

ที่มา: Sound Semiconductor, “SSI2164 - FATKEYS™ QUAD VOLTAGE CONTROLLED AMPLIFIER”, Rev. 3.1, September 2018: 1



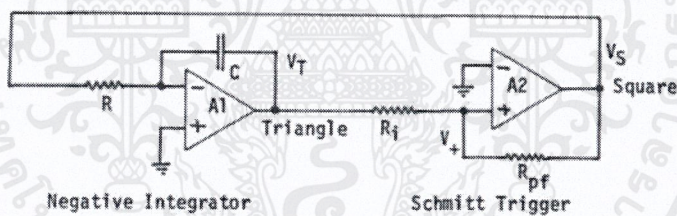
รูปที่ 2.4 แผนภาพบล็อกของ SSI2164 quad voltage-controlled amplifier

ที่มา: Sound Semiconductor, “SSI2164 - FATKEYS™ QUAD VOLTAGE CONTROLLED AMPLIFIER”, Rev. 3.1, September 2018: 1

ในปฏิญานิพนธ์นี้ คณะผู้จัดทำได้เลือกใช้ SSM2164 (ซึ่งเป็นรุ่นเดิมก่อนจะพัฒนามาเป็น SSI2164) ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled resistor) ในส่วนของวงจรกรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled filter, VCF) ใช้สำหรับปรับความถี่ตัด (cutoff frequency) และวงจรกำเนิดสัญญาณใช้เป็นตัวต้านทานส่วนขาเข้า (Rin) ของวงจรถูกอินทิเกรต (negative integrator circuit) เพื่อปรับความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมโดยเป็นการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่เวลาของวงจรอนุกรมอาร์-ซี สำหรับแรงดันควบคุม (CV) จะรับจากวงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า (input adjustment circuit) ในวงจรภาคก่อนหน้าซึ่งจะเชื่อมต่อกับขา Vc ของ SSM2164

2.5 วงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO)

วงจรถูกกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าเป็นวงจรที่สร้างสัญญาณรูปสามเหลี่ยม (triangular) และสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม (square) โดยใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน คือ ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุประกอบกับตัวขยายสัญญาณเชิงดำเนินการ (operational amplifier, op-amp) หรือลอจิกเกต (Logic Gate)



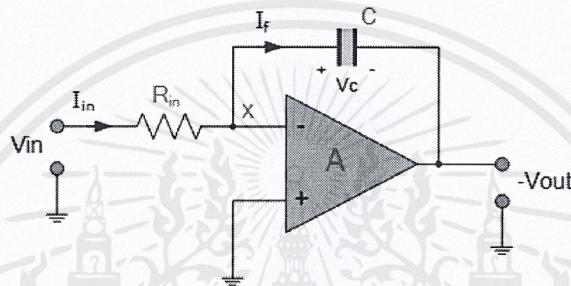
รูปที่ 2.5 แผนผังวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมแบบพื้นฐาน

ที่มา: ELECTRONOTES, "SIMPLE TRIANGLE-SQUARE OSCILLATOR", APPLICATION NOTE NO. 67, 1977: 1

ดังรูปที่ 2.5 แสดงแผนผังวงจรถูกกำเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมซึ่งประกอบด้วยออปแอมป์ 2 ตัวทำงานในรูปแบบของวงจรถูกอินทิเกรต (negative integrator circuit) และ วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt triggers circuit) ต่อกันเป็นวงจรถูกปิด (closed loop)

2.5.1 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based integrator circuit)

การเปลี่ยนความต้านทานบริสุทธิ์ (purely resistive, R_f) ซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนป้อนกลับของวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting amplifier) ให้เป็นรีแอคแตนซ์ (X) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความถี่ เช่น ตัวเก็บประจุ C จะทำให้เกิดเป็นเครือข่าย RC (RC network) ที่เชื่อมต่อข้ามส่วนป้อนกลับของออปแอมป์เกิดเป็นวงจรอีกรูปแบบหนึ่งที่ชื่อว่าวงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based integrator circuit) ดังแสดงในรูปที่ 2.6 [12]



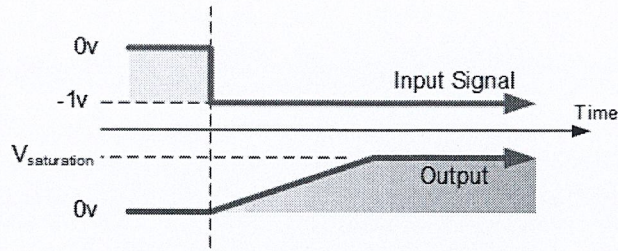
รูปที่ 2.6 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์

ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_6.html

สำหรับการทำงานของวงจรอินทิเกรเตอร์ ณ จุดเริ่มต้น เมื่อ V_{in} มีการสแต็ปที่อินพุตของออปแอมป์ ตัวเก็บประจุ C ที่ยังไม่ถูกประจุ จะเสมือนลัดวงจร (short circuit) ทำให้ที่ R_{in} มีกระแสสูงสุดไหล และไม่มีกระแสไหลเข้าสู่วงจรขยาย ณ จุด X มีลักษณะเป็นกราวด์เสมือน ทำให้อิมพีแดนซ์ (X_C) ของตัวเก็บประจุที่จุดดังกล่าวมีค่าต่ำมาก เป็นเหตุให้อัตราส่วน X_C/R_{in} มีค่าน้อย ดังนั้นอัตราขยายแรงดันจึงมีค่าต่ำกว่า 1

ต่อมาตัวเก็บประจุป้อนกลับ (feedback capacitor) ถูกประจุด้วยอิทธิพลของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า ทำให้อิมพีแดนซ์ (X_C) เพิ่มขึ้น แปรผันตรงตามอัตราการประจุ ซึ่งอัตราในการประจุจะขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลา (T) ของวงจรอนุกรม อาร์-ซี (RC network) จากการที่ตัวเก็บประจุเชื่อมต่ออยู่กับอินพุตลบของออปแอมป์ (inverting input) ซึ่งมีศักย์เป็นศูนย์ (earth potential) และ เอาต์พุตของออปแอมป์ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุที่เพิ่มขึ้นเป็นผลให้กระแสลดลงและอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้น จากอัตราส่วน X_C/R_{in} ที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ศักย์ไฟฟ้าขาออก (output voltage) สูงขึ้นจนกว่าตัวเก็บประจุจะถูกประจุจนเต็ม

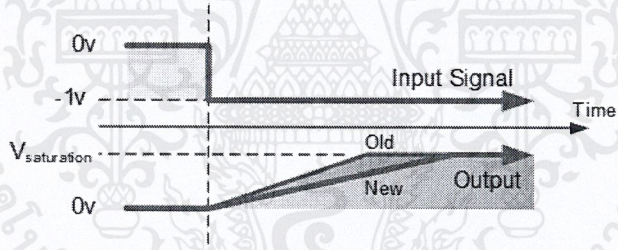
เมื่อถึงจุดที่ตัวเก็บประจุถูกประจุเต็ม ตัวเก็บประจุจะปฏิบัติตัวเสมือนวงจรเปิด ไม่ยอมให้กระแสดีซีไหลผ่าน ส่งผลให้อัตราส่วน X_C/R_{in} เป็นอนันต์ (อัตราขยายแรงดันลูบเปิด) ดังนั้นเอาต์พุตของวงจรขยายจะเกิดการอิมิตัว ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์

ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_6.html

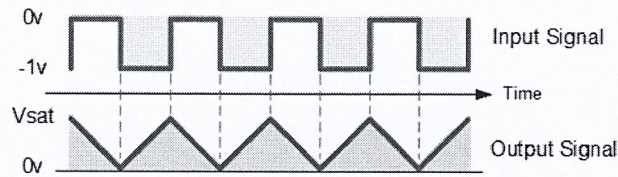
อัตราของแรงดันเอาต์พุตที่เพิ่มขึ้นถูกกำหนดโดยค่าของตัวต้านทานและตัวเก็บประจุซึ่งส่งผลต่อค่าคงที่เวลาของวงจรอนุกรม อาร์-ซี ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทาน R หรือค่าตัวเก็บประจุ C จะทำให้สามารถเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่แรงดันเอาต์พุตเพิ่มขึ้นจนถึงจุดอิมิตัวได้ ดังแสดงในตัวอย่างรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เปรียบเทียบเอาต์พุตที่เปลี่ยนไปของวงจรอินทิเกรเตอร์

ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_6.html

หากใช้สัญญาณอินพุตที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง เช่น สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยม (square wave) ไปเป็นอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ ตัวเก็บประจุจะทำการประจุและคายประจุเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต ซึ่งส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม (triangular wave) โดยขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลาของวงจรอนุกรม อาร์-ซี (RC network) เนื่องจากเมื่อความถี่สูงขึ้น เวลาที่ใช้ในการประจุจนเต็มของตัวเก็บประจุจะสั้นลง จึงสามารถใช้หลักการนี้ในการสร้างวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุตของวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม

ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_6.html

จากคุณสมบัติแรกที่ว่าแรงดันไฟฟ้าบนเพลตของตัวเก็บประจุจะมีค่าเท่ากับจำนวนประจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุ (Q) หารด้วยค่าความจุไฟฟ้า (capacitance) ได้เป็นสมการ $V_C = Q/C$ และจากการที่แรงดันตกคร่อมตัวเก็บประจุคือเอาต์พุต (V_{out}) ดังนั้นจะได้ว่า $-V_{out} = Q/C$ หากตัวเก็บประจุกำลังประจุและคายประจุ อัตราการประจุของแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมตัวเก็บประจุสามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_C = \frac{Q}{C}, \quad V_C = V_X - V_{out} = 0 - V_{out} \quad (2.5.1-1)$$

$$\therefore -\frac{dV_{out}}{dt} = \frac{dQ}{Cdt} = \frac{1}{C} \frac{dQ}{dt} \quad (2.5.1-2)$$

แต่เนื่องจากพจน์ dQ/dt เป็นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าที่โนตรงวมที่อินพุตลบ (inverting input, -) ของออปแอมป์มีค่าเป็นศูนย์ ($X=0$) ดังนั้นกระแสขาเข้า input current (I_{in}) จึงไหลผ่านตัวต้านทาน R_{in} ตามสมการดังนี้

$$I_{in} = \frac{V_{in} - 0}{R_{in}} = \frac{V_{in}}{R_{in}} \quad (2.5.1-3)$$

และกระแสที่ไหลผ่านตัวเก็บประจุย้อนกลับ C สามารถอธิบายเป็นสมการได้ดังนี้

$$I_f = C \frac{dV_{out}}{dt} = C \frac{dQ}{Cdt} = \frac{dQ}{dt} = \frac{dV_{out} \cdot C}{dt} \quad (2.5.1-4)$$

สมมติให้อิมพีแดนซ์อินพุตของออปแอมป์อุดมคตินั้นเป็นอนันต์ ที่เทอร์มินัลของออปแอมป์จะไม่มีกระแสไหล ดังนั้นสมการโนที่อินพุตลบ (inverting input, -) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$I_{in} = I_f = \frac{V_{in}}{R_{in}} = \frac{dV_{out} \cdot C}{dt} \quad (2.5.1-5)$$

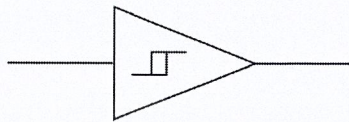
จากสมการข้างต้น แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในอุดมคติสำหรับวงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์เป็นดังสมการ

$$V_{out} = -\frac{1}{R_{in} C} \int_0^t V_{in} dt \quad (2.5.1-6)$$

สามารถเขียนในรูปอย่างง่ายในโดเมนความถี่ได้ดังนี้

$$V_{out} = -\frac{1}{2\pi f_c R_{in} C} V_{in} \quad (2.5.1-7)$$

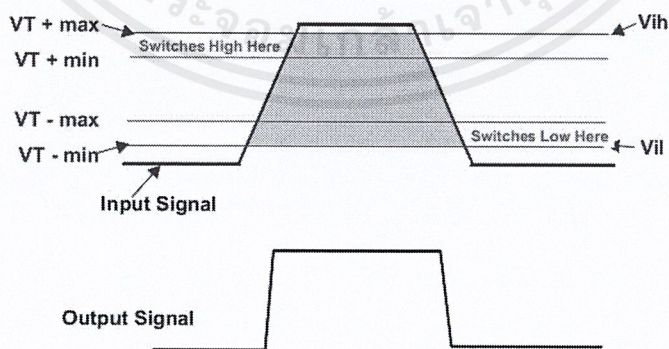
2.5.2 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ (Schmitt triggers)



รูปที่ 2.10 สัญลักษณ์แสดงวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

ที่มา: https://en.wikipedia.org/wiki/Schmitt_trigger

วงจรขมิตต์ทริกเกอร์คืออินพุตแบบลอจิกประเภทหนึ่งที่มีระดับแรงดันไฟฟ้าขีดเริ่มเปลี่ยน (threshold voltage level) ที่แตกต่างกันสองระดับสำหรับขอบขาขึ้น (rising edge) และขอบขาลง (falling edge) ใช้สำหรับการหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดเมื่อต้องการสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมจากสัญญาณอินพุตที่มีสัญญาณรบกวนอยู่มาก (noisy input signal) และการเปลี่ยนรูปคลื่นสัญญาณได้แก่ เปลี่ยนสัญญาณคลื่นรูปไซน์ไปเป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม หรือเปลี่ยนสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของขอบช้า (slow edges) เช่น สัญญาณรูปสามเหลี่ยม ไปเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงของขอบเร็ว (fast edges) ได้แก่ สัญญาณรูปสี่เหลี่ยม โดยวงจรจะสับที่จุดสูง (higher point, V_{t+}) ณ ขอบขาขึ้น และที่จุดต่ำ (lower point, V_{t-}) ณ ขอบขาลง

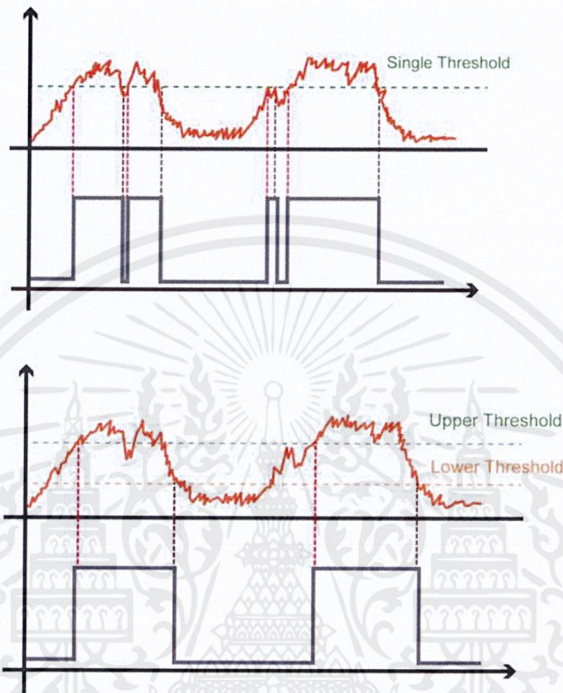


รูปที่ 2.11 สัญญาณอินพุตและเอาต์พุตจากวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

ที่มา: Texas Instruments, "Understanding Schmitt Triggers", Application Report

SCEA046–September 2011: 2

ตัวอย่างแสดงการทำงานของวงจรมีสัญญาณอินพุตที่มีสัญญาณรบกวนดังรูปที่ 2.12 ซึ่งควรจะมีพัลส์เพียงสองลูก ในอุปกรณ์ที่มีจุดอ้างอิงหรือขีดเริ่มเปลี่ยนเดียวจะมีโอกาสอ่านค่าอินพุตผิดพลาดทำให้มีพัลส์มากกว่าสองลูกดังรูป แต่ในกรณีที่ใช่วงจรขมิตต์ทริกเกอร์รับค่าอินพุตเดียวกัน ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกต้องคือได้สัญญาณพัลส์สองลูก เนื่องจากมีขีดเริ่มเปลี่ยนที่ต่างกันสองระดับ

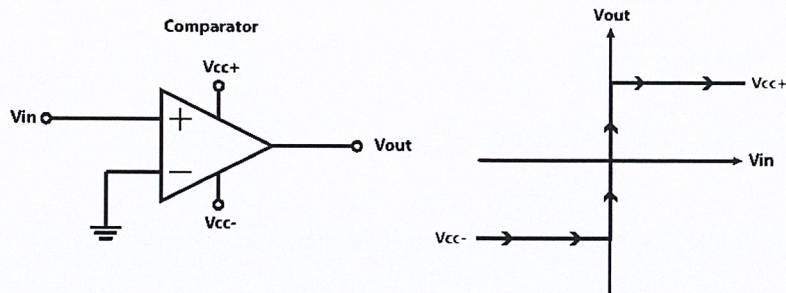


รูปที่ 2.12 ความแตกต่างของสัญญาณอินพุตระหว่างอุปกรณ์ที่มีขีดเริ่มเปลี่ยนเดียวกับขมิตต์ทริกเกอร์

ที่มา: <https://www.allaboutcircuits.com/industry-articles/an-introduction-to-schmitt-triggers-otto-schmitt/>

2.5.2.1 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based Schmitt trigger)

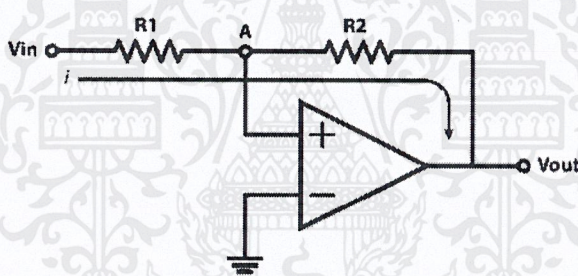
ในรูปที่ 2.13 ที่อินพุตลบของออปแอมป์ (inverting input) ต่อลงกราวด์หรือศูนย์โวลต์ และที่อินพุตบวก (non-inverting input) ต่อเข้ากับอินพุต V_{in} ดังนั้นตัวออปแอมป์จึงทำหน้าที่เป็นวงจรถ่ายกลับสัญญาณแรงดันเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันระหว่างสัญญาณอินพุตบวกและลบของออปแอมป์หรือเทียบ V_{in} กับศักย์ศูนย์โวลต์ ดังนั้นเมื่ออินพุต V_{in} มีค่าต่ำกว่าศูนย์โวลต์ เอาต์พุตของวงจรถ่ายกลับจะมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงลบ (negative V_{CC} , V_{CC-}) และถ้าอินพุตมีค่ามากกว่าศูนย์โวลต์จะทำให้เอาต์พุตมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงบวก (positive V_{CC} , V_{CC+})



รูปที่ 2.13 วงจรเปรียบเทียบสัญญาณแรงดัน (voltage comparator)

ที่มา: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/>

ในรูปที่ 2.14 มีการเพิ่มการป้อนกลับทางบวกโดยต่อเอาต์พุตของออปแอมป์ไปยังอินพุตลบผ่านตัวต้านทาน (R2) และเพิ่มตัวต้านทาน (R1) ต่อระหว่าง Vin กับอินพุตบวก จะได้วงจรมิตต์ทริกเกอร์ที่เอาต์พุตจะสับจาก Vcc- ไป Vcc+ เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่โหนด A เป็นศูนย์



รูปที่ 2.14 วงจรมิตต์ทริกเกอร์

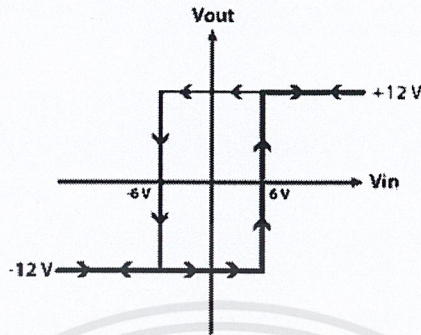
ที่มา: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/>

กล่าวคือการปรับค่าตัวต้านทานจะทำให้สามารถตั้งระดับของสัญญาณอินพุตที่จะทำให้เกิดการสับของเอาต์พุตโดยมีสมการดังนี้

$$V_{in} = -\frac{R_1}{R_2} \times V_{out} \quad (2.5.2.1-1)$$

สมการสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ โดยกระแส i ที่ไหลผ่านมีค่าเท่ากับ $V_{in} - V_A$ ทหารด้วย R_1 หรือ $V_A - V_{out}$ ทหารด้วย R_2 ดังนั้นเมื่อแทนค่า V_A ด้วยศูนย์ (เพื่อให้มีการสับเกิดขึ้น) จะทำให้ได้ตามสมการที่ (2.5.2.1-1)

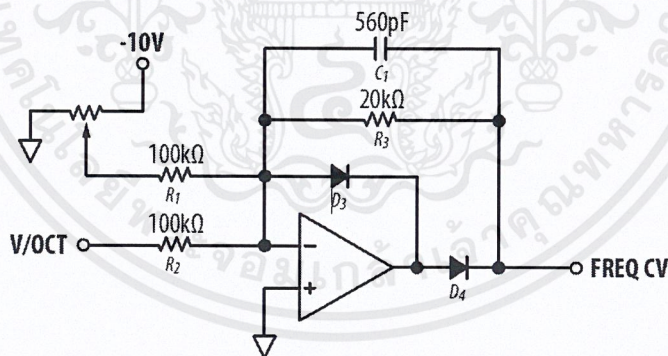
จากรูปที่ 2.14 สามารถยกตัวอย่างโดยกำหนดให้ $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 2k\Omega$ และ $V_{out} = +/-12V$ ถ้าเอาต์พุตมีค่า $-12V$ และ V_{in} เป็นลบและมีค่ามากขึ้น การสลับจาก $-12V$ ไป $+12V$ จะเกิดขึ้นที่ $V_{in} = 6V$ ตามสมการและค่าของตัวต้านทาน ในทานกลับกัน เมื่อ V_{in} มีเป็นบวกและมีค่าลดลง การสลับจาก $+12V$ ไป $-12V$ จะเกิดขึ้นที่ $V_{in} = -6V$ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 [9]



รูปที่ 2.15 เอาต์พุตของวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

ที่มา: <https://howtomechatronics.com/how-it-works/electrical-engineering/schmitt-trigger/>

2.5.3 วงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า (input adjustment circuit)



รูปที่ 2.16 วงจรขับแรงดันควบคุมแบบทั่วไป (generic CV driver)

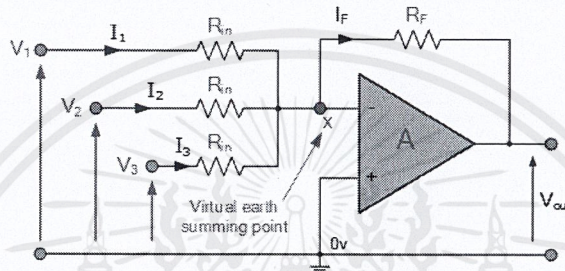
ที่มา: Sound Semiconductor, “SSI2164 - FATKEYS™ QUAD VOLTAGE CONTROLLED AMPLIFIER”, Rev. 3.1, September 2018: 13

วงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า หรือวงจรขับแรงดันควบคุมแบบทั่วไปดังรูปที่ 2.16 เป็นการรวมกันของวงจรรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier) และวงจรรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง (precision half-wave rectifier) ใช้เป็นภาคแรกในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO) โดยสัญญาณควบคุมจะถูกส่งผ่านตัวต้านทาน R2 ไปยังอินพุตลบของออปแอมป์และอัตราส่วนระหว่าง R1 กับ R3 และ R2 กับ R3 แสดงถึงอัตราขยาย

2.5.3.1 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ คือ วงจรออปแอมป์ที่รวมอินพุตตั้งแต่ 2 อินพุตขึ้นไปมารวมกัน และแรงดันเอาต์พุตจะเท่ากับผลรวมของแรงดันอินพุต คูณกับอัตราการขยายของวงจร แสดงดังรูปที่ 2.17 ตัวอย่างวงจรขยายรวมสัญญาณแบบ 3 อินพุต [13]



รูปที่ 2.17 วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ

ที่มา: https://www.electronics-tutorials.ws/opamp/opamp_4.html

พิจารณาจากรูปที่ 2.17 ที่ขั้วอินพุตบวกจะได้

$$V_x = V_+ = 0$$

พิจารณาที่โหนด V_x ด้วยกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์

$$\frac{V_x - V_1}{R_1} + \frac{V_x - V_2}{R_2} + \frac{V_x - V_3}{R_3} + \frac{V_x - V_{out}}{R_f} = 0$$

เมื่อแทนค่า $V_x = 0$ ในสมการข้างต้น จะได้สมการความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตและเอาต์พุต คือ

$$-\frac{V_1}{R_1} - \frac{V_2}{R_2} - \frac{V_3}{R_3} - \frac{V_{out}}{R_f} = 0$$

$$V_{out} = -\left(\frac{R_f}{R_1}V_1 + \frac{R_f}{R_2}V_2 + \frac{R_f}{R_3}V_3\right) \quad (2.5.3.1-1)$$

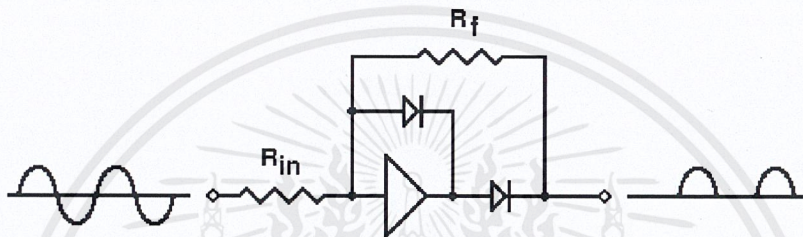
จากสมการที่ (2.4.3.1-1) ถ้า $R_1 = R_2 = R_3 = R_{in}$ จะได้ว่า

$$A = -\frac{R_f}{R_{in}}$$

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R}(V_1 + V_2 + V_3) \quad (2.5.3.1-2)$$

2.5.3.2 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง (precision half-wave rectifier)

การเรียงกระแส (Rectification) เป็นกระบวนการของการแยกส่วนหัวบวกและลบของรูปคลื่นออกจากกันและกัน และเลือกเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งไว้ ในกรณีของการเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น สามารถเลือกเก็บหัวหนึ่งไว้และทิ้งอีกหัวหนึ่ง

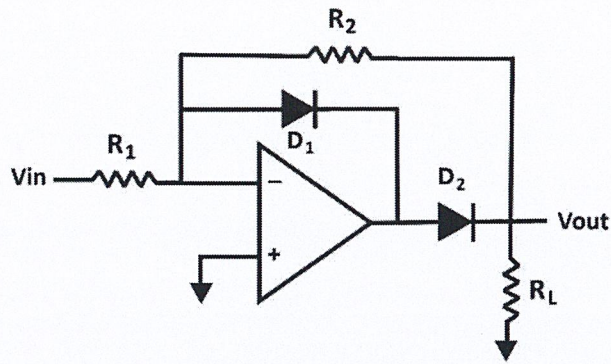


รูปที่ 2.18 วงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง

ที่มา: http://www.play-hookey.com/analog/feedback_circuits/half-wave_rectifier.html

วงจรมีลักษณะดังรูปที่ 2.18 รับคลื่นสัญญาณขาเข้าเข้ามาและถูกกลับหัวด้วยออปแอมป์ แต่อย่างไรก็ตามมีเพียงส่วนที่เป็นบวกของรูปคลื่นของเอาต์พุตซึ่งสอดคล้องกับส่วนที่เป็นลบของสัญญาณอินพุตเท่านั้นที่จะผ่านออกไปได้ ไดโอดจะกำจัดเอาต์พุตที่เป็นลบใด ๆ เพื่อป้องกันการสร้างสัญญาณซ้ำ โดยป้อนกลับไปสู่อินพุตลบของออปแอมป์ แรงดันเล็กน้อยที่ตกคร่อมตัวไดโอดจะถูกบล็อกจากเอาต์พุตโดยไดโอดตัวที่สอง

ไดโอดตัวที่สองช่วยให้แรงดันเอาต์พุตที่เป็นบวกผ่านออกไปได้นอกจากนี้เนื่องจากมีแรงดันเอาต์พุตที่ตกคร่อมตัวไดโอดเอง ทำให้ออปแอมป์จำเป็นต้องชดเชยลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นของไดโอด ด้วยเหตุนี้แรงดันเอาต์พุตจึงเป็นส่วนลบของอินพุตที่กลับหัว ดังนั้นหาก $R_f = R_{in}$ วงจรนี้จะทำงานเป็นวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง (precision half-wave rectifier) และแรงดันเอาต์พุตจะมีแอมพลิจูดเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอินพุต [11]



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง

ที่มา: <https://youtu.be/5HweBajP-5g>

รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรงซึ่งสรุปการทำงานได้ว่าเมื่ออินพุตมีค่ามากกว่าศูนย์ เอาต์พุตของออปแอมป์จะมีค่าเท่ากับศูนย์ เนื่องจากไดโอด D1 จะเหนี่ยวนำ และไดโอด D2 จะไม่ทำงาน และเมื่ออินพุตมีค่าน้อยกว่าศูนย์ ไดโอด D1 จะไม่ทำงาน ส่วนไดโอด D2 จะเหนี่ยวนำ ส่งผลให้อาต์พุตของวงจรเรียงกระแสมีค่าดังนี้

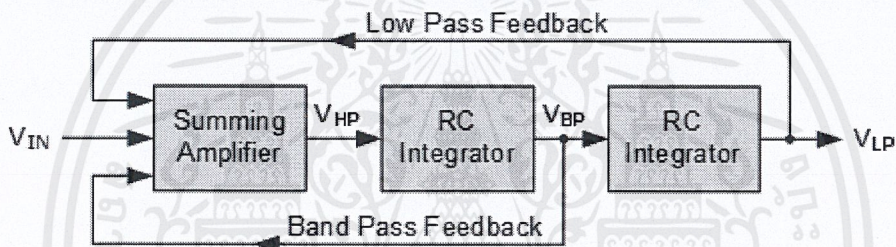
$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \times V_{in} \quad (2.5.3.2-1)$$

สำหรับวงจรถ้าเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสจะประกอบด้วยวงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า หรือวงจรขับแรงดันควบคุมแบบทั่วไป (generic CV driver) ทำงานเป็นภาคอินพุต ซึ่งสร้างจากวงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณ (summing amplifier) และวงจรเรียงกระแสครึ่งคลื่นที่มีความเที่ยงตรง (precision half-wave rectifier) โดยนำแรงดันควบคุมมาขับไอซี SSI2164 เพื่อเปลี่ยนค่าความต้านทานของวงจรถ้าเนิดสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมในภาคถัดไป

2.6 วงจรกรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled filter, VCF)

2.6.1 วงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ (state variable filter)

วงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ คือ วงจรกรองความถี่อาร์-ซีลำดับที่สองแบบแอคทีฟ (second-order RC active filters) ซึ่งใช้อุปกรณ์ 3 ตัวหรือมากกว่าต่อกันแบบคาสเคด (cascade) เพื่อสร้างเอาต์พุตแยกสำหรับตัวกรองแต่ละชนิด ตามแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2.20 ประกอบด้วยวงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้อุปกรณ์ที่เหมือนกันสองวงจร โดยแต่ละวงจรทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่ต่ำผ่านลำดับที่หนึ่งแบบโพลเดี่ยว (single-pole), วงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณในภาคก่อนหน้าที่สามารถตั้งค่าอัตราขยายของตัวกรอง และเครือข่ายแดมพ์ป้อนกลับ (damping feedback network) สัญญาณเอาต์พุตจากออปแอมป์ทั้งสามสถานะจะป้อนกลับไปยังอินพุตให้สามารถกำหนดสถานะของวงจรได้ แผนภาพบล็อกแสดงการทำงานของตัวกรองแสดงดังรูปที่ 2.20

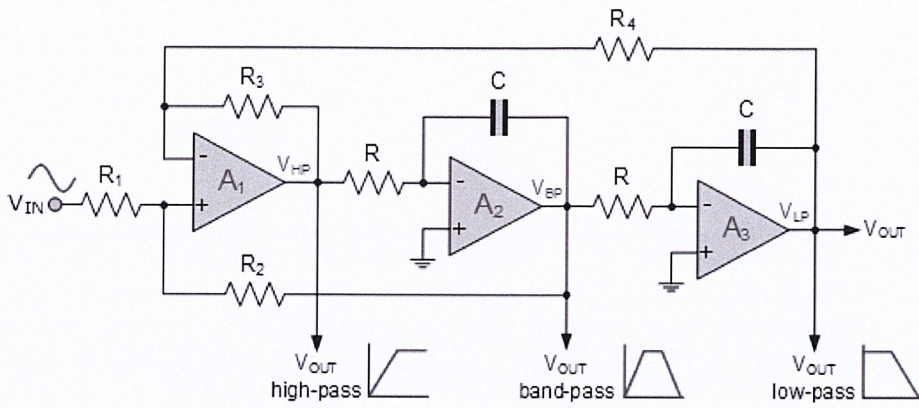


รูปที่ 2.20 แผนภาพบล็อกของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ

ที่มา: <https://www.electronics-tutorials.ws/filter/state-variable-filter.html>

ข้อได้เปรียบของการออกแบบตัวกรองลักษณะดังกล่าวคือความสามารถในการปรับค่าพารามิเตอร์หลักของตัวกรองสามตัวได้แก่ อัตราขยาย (gain, A), ความถี่ตัด (cut off frequency, f_c) และค่าประสิทธิภาพ (Quality factor, Q) ได้อย่างอิสระโดยไม่กระทบต่อประสิทธิภาพของตัวกรอง

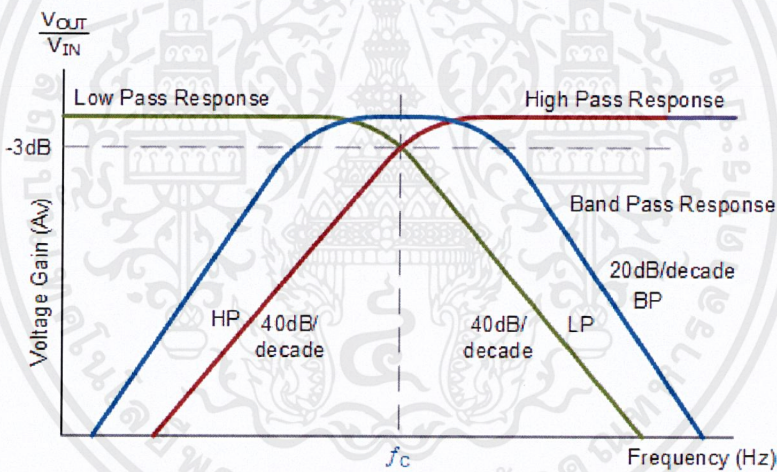
จากแผนภาพบล็อกพื้นฐานของตัวกรองมีสามเอาต์พุตคือ V_{HP} , V_{BP} และ V_{LP} โดยแต่ละจุดออกจากออปแอมป์สามตัว ด้วยแรงดันอินพุต V_{in} คงที่ เอาต์พุตจากวงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณสร้างการตอบสนองความถี่สูง (high pass response) ซึ่งจะกลายเป็นอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์แรก ถัดมาเอาต์พุตของวงจรอินทิเกรเตอร์นี้จะสร้างการตอบสนองแบบแถบความถี่ผ่าน (band pass response) ซึ่งเป็นอินพุตของวงจรอินทิเกรเตอร์ที่สองที่ให้การตอบสนองความถี่ต่ำ (low pass response) ที่เอาต์พุต ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน (transfer function) สำหรับเอาต์พุตแต่ละช่องที่มีความสัมพันธ์กับแรงดันอินพุต



รูปที่ 2.21 วงจรพื้นฐานของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ

ที่มา: <https://www.electronics-tutorials.ws/filter/state-variable-filter.html>

จากวงจรพื้นฐานของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ ผลตอบสนองแอมพลิจูดของทั้งสามเอาต์พุตมีลักษณะดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองในรูปมาตรฐานของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ

ที่มา: <https://www.electronics-tutorials.ws/filter/state-variable-filter.html>

ถ้ากำหนดให้ตัวต้านทานอินพุตและตัวเก็บประจุป้อนกลับของวงจรอินทิเกรเตอร์มีค่าเหมือนกันทั้งสองวงจรจะทำให้สามารถตั้งค่าความถี่ตัด (f_c) ได้โดยไม่มีผลกระทบต่อค่า Q ในทางกลับกัน ค่า Q สามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยไม่กระทบต่อความถี่ตัดของวงจรเช่นกัน โดยความถี่ตัดสามารถคำนวณได้จากสมการดังนี้

$$f_c = \sqrt{\frac{R_3}{R_4 (2\pi RC)^2}}$$

และถ้ากำหนดให้ตัวต้านทานป้อนกลับ R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันแล้ว ความถี่ตัดของเอาต์พุตแต่ละช่องของวงจรกรองนี้จะสามารถหาได้ดังนี้

$$f_{C(HP)} = f_{C(BP)} = f_{C(LP)} = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.6.1-1)$$

ดังนั้นการปรับความถี่ตัดสามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C

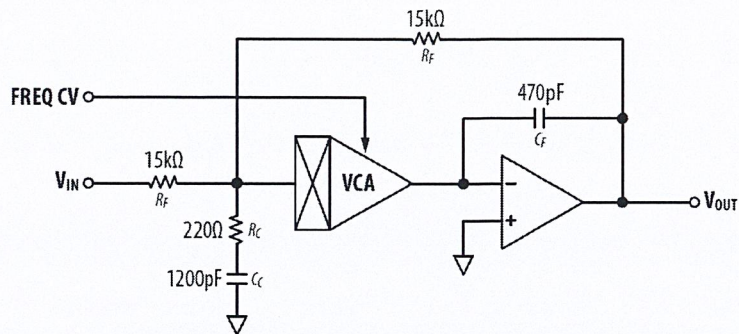
นอกจากผลตอบสนองเอาต์พุตแต่ละตัวที่กำหนดคุณลักษณะของวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะแล้ว ยังมีค่าประสิทธิภาพ Q ที่เกี่ยวข้องกับความคม (sharpness) ของเส้นโค้งของผลตอบสนองแอมพลิจูดของแถบความถี่ผ่าน โดยเมื่อค่า Q สูงจะส่งผลให้ผลตอบสนองเอาต์พุตแคบขึ้นซึ่งหมายความว่าช่วงความถี่ที่ถูกเลือกนั้นน้อยลง

สำหรับวงจรกรองแถบความถี่ผ่าน (Band Pass Filter) ค่า Q สามารถพิจารณาได้จากความถี่กลาง (center frequency) หารด้วยความกว้างแถบความถี่ที่ -3dB (-3dB bandwidth) ซึ่งเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$Q = \frac{f_c}{BW} = \frac{1}{2\zeta} = \frac{R_1(R_3 + R_4)}{R_4(R_1 + R_2)} \sqrt{\frac{R_3}{R_4} \times \frac{RC}{RC}} \quad (2.6.1-2)$$

และถ้าตัวต้านทาน R_3 และ R_4 มีค่าเท่ากันและอุปกรณ์ตัวต้านทาน R และตัวเก็บประจุ C ทั้งสองของวงจรอินทิเกรเตอร์มีค่าเท่ากัน จะทำให้พจน์รากที่สองสุดท้ายของสมการ (2.6.1-2) มีค่าเป็น 1 [14]

ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled filter, VCF) สำหรับกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสคณผู้จัดทำได้เลือกใช้ SSM2164 เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled resistor) ในวงจรอินทิเกรเตอร์ทั้งสองวงจรสำหรับปรับความถี่ตัดของวงจรกรองซึ่งสามารถควบคุมโดยใช้แรงดันไฟฟ้า



รูปที่ 2.23 Low pass filter stage

ที่มา: Sound Semiconductor, “SSI2164 - FATKEYS™ QUAD VOLTAGE CONTROLLED AMPLIFIER”, Rev. 3.1, September 2018: 12

ดังรูปที่ 2.23 แสดงวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (low pass filter) หรือวงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ที่มีความชันของการลดทอนของตัวกรอง 6dB/octave ซึ่งสามารถปรับค่าความถี่ตัดได้ผ่าน FREQ CV ของ SSM2164 ดังนั้นจึงทำให้สามารถออกแบบวงจรกรองความถี่ที่สามารถควบคุมความถี่ตัดด้วยแรงดันไฟฟ้า (CV) จากภายนอกหรือ VCF โดยใช้พื้นฐานจากวงจรรวมอินทิเกรเตอร์และวงจรขยายสัญญาณแบบรวมสัญญาณมาต่อกันในลักษณะของโครงสร้างแบบวงจรกรองแบบตัวแปรสถานะ เพื่อใช้เป็นตัวกรองเอาต์พุตของกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส

2.7 ศูนย์กลางของความอลวน (the heart of chaos circuit, Rungler)

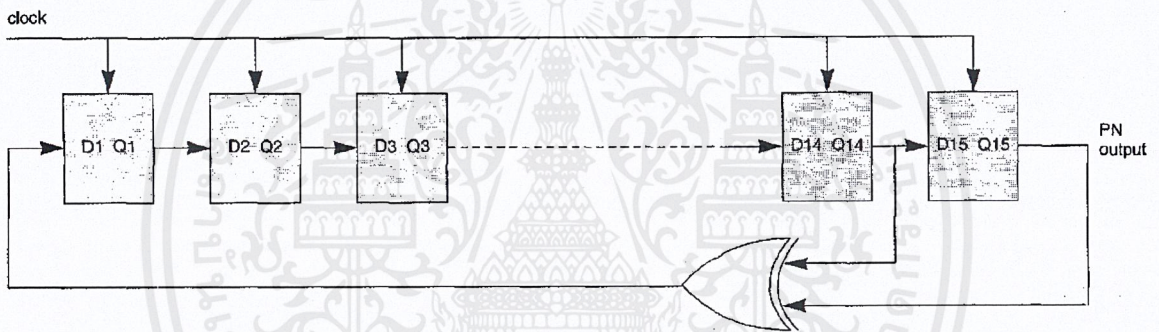
2.7.1 ตัวสร้างเลขสุ่มเทียม (pseudo random number generator: PRNG)

ตัวสร้างเลขสุ่มเทียมหรือที่รู้จักกันในชื่อรีจิสเตอร์เลื่อนบิตย้อนกลับได้เชิงเส้น (linear-feedback shift register, LFSR) คือวิธีการที่ใช้สำหรับการสร้างลำดับของตัวเลขที่มีความใกล้เคียงกับคุณสมบัติของการสุ่ม แต่ลำดับตัวเลขที่ได้จากการสุ่มเทียมนั้นไม่ได้เป็นลำดับตัวเลขแบบสุ่มที่แท้จริงเนื่องจากตัวเลขทั้งหมดได้มาจากกลุ่มของค่าเริ่มต้นที่ถูกกำหนดเป็นค่าเริ่มต้น (seed) ของตัวสร้างเลขสุ่มเทียมซึ่งทำให้เกิดการวนซ้ำของลำดับได้โดยความยาวสูงสุดของลำดับสุ่มเทียมก่อนเกิดการซ้ำ สามารถวัดได้จากขนาดของสถานะซึ่งกำหนดได้จากความยาวของบิต ความยาวคาบของการวนซ้ำสูงสุดจะเพิ่มเป็น 2 เท่าทุกๆ 1บิตที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นถ้าสถานะของตัวสร้างเลขสุ่มเทียมมี n บิต คาบการวนซ้ำจะไม่ยาวเกินกว่า $2n$ [15]

2.7.1.1 การสร้างเลขสุ่มเทียม

เลขสุ่มเทียมสามารถสร้างได้จากการใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์ (shift register) และ modulo-2 adders หรือ Exclusive OR (XOR) หรือที่รู้จักกันในชื่อ Xorshift ซึ่งเป็นคลาสของตัวสร้างเลขสุ่มเทียมและเป็นสับเซตของรีจิสเตอร์เลื่อนบิตย้อนกลับได้เชิงเส้น เอาต์พุตของชิฟต์รีจิสเตอร์จะถูกป้อนให้ XOR และผลลัพธ์จะถูกป้อนกลับสู่รีจิสเตอร์ โดยสถานะที่ n จะสามารถสร้างขนาดของลำดับอนุกรมที่มากที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ $2^n - 1$ บิต ซึ่งเอาต์พุตที่ถูกเลือกมาป้อนกลับจะมีเพียงบางเอาต์พุตที่สามารถทำให้เกิดขนาดของลำดับอนุกรมที่มากที่สุด (กำหนดให้เอาต์พุตถูกแทนด้วยพหุนาม x) [17]

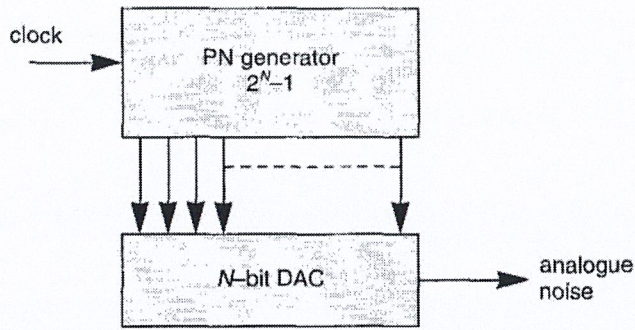
ยกตัวอย่างเช่น พหุนาม $1+x^{14}+x^{15}$ หมายความว่า ผลลัพธ์เอาต์พุตจากสเตจที่ 14 และ 15 จะถูกป้อนให้ XOR และป้อนกลับไปสู่สเตจแรกของรีจิสเตอร์ขนาด 15 สเตจ เพื่อให้ได้ขนาดของลำดับอนุกรมยาวเท่ากับ $2^{15} - 1$ บิต ดังที่แสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ตัวอย่างการสร้างเลขสุ่มเทียมด้วยพหุนาม $1+x^{14}+x^{15}$

ที่มา: R.N. Mutagi, "Pseudo Noise Sequences for Engineers", Electronics and Communication Engineering Journal, UK, Vol.8, No.2, April 1996: 83

ในการสร้างวงจรหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เคออสสำหรับกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส คณะผู้จัดทำได้ใช้ต้นแบบจากวงจรรีจิสเตอร์ซึ่งออกแบบโดย Rob Hordijk ซึ่งวงจรมีพื้นฐานมาจากการสร้างเลขสุ่มเทียมโดยใช้ชิฟต์รีจิสเตอร์, XOR และกระบวนการแปลงเป็นดิจิตอล (digital-to-analog converter : DAC) ประกอบกันดังแผนภาพบล็อกในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แผนภาพบล็อกของวงจรกำเนิดนอยซ์ที่เป็นพื้นฐานของวงจรรังเกิลเลอร์

ที่มา: R.N. Mutagi, "Pseudo Noise Sequences for Engineers", Electronics and Communication Engineering Journal, UK, Vol.8, No.2, April 1996: 83

2.7.2 วงจรรังเกิลเลอร์ (Rungler)

วัตถุประสงค์ของวงจรรังเกิลเลอร์คือการสร้างรูปแบบของสัญญาณขั้นสั้นๆที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวและความเร็ว วงจรต้องการแหล่งกำเนิดความถี่สองแหล่งในการทำงานเพื่อสร้างรูปแบบสัญญาณที่ซับซ้อนซึ่งสามารถป้อนกลับเป็นพารามิเตอร์ความถี่สำหรับขับวงจรกำเนิดสัญญาณหรือออสซิลเลเตอร์ (oscillator) เพื่อสร้างความอลวนที่ไม่มีที่สิ้นสุด ในปริภูมิตฤษฎีสัญญาณนี้คณะผู้จัดทำได้ใช้รูปแบบสัญญาณจากวงจรรังเกิลเลอร์ป้อนเข้าสู่ 2 วงจรได้แก่ วงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้าของวงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCO) รูปแบบของสัญญาณได้แปลงเป็นแรงดันควบคุม (CV) ป้อนเข้าที่ขา Vc ของ SSM2164 ที่ทำหน้าที่เป็นตัวต้านทานชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (Rin) การปรับค่าความต้านทาน Rin ของวงจรรังเกิลเลอร์ ส่งผลต่อค่าคงที่เวลาของวงจรรองกรม อาร์-ซี ทำให้ความถี่ของสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยมจากวงจรมิตต์ทริกเกอร์ในภาคถัดไปเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับระดับแรงดันควบคุมดังกล่าว และอีกวงจรคือวงจรรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCF) ซึ่งในวงจรนี้จะรับสัญญาณมาใช้ 2 จุดคือ เป็นหนึ่งในอินพุต Vin ของวงจรรองโดยป้อนเข้าวงจรรายสัญญาณแบบรวมสัญญาณในภาคแรก และเป็นหนึ่งในสัญญาณควบคุมสำหรับการปรับค่าความถี่ที่ตัดผ่านขา FREQ CV, FCV หรือ Vc ของ SSM2164

วงจรรังเกิลเลอร์มีพื้นฐานมาจากชิพตรีจิสเตอร์แบบซีมอส (CMOS shift register) ที่รับสัญญาณนาฬิกาจากออสซิลเลเตอร์ และรับสัญญาณข้อมูลอินพุตจากออสซิลเลเตอร์ตัวอื่นๆ บิตเอาต์พุตของชิพตรีจิสเตอร์มีลักษณะเป็นรหัสไบนารี (binary code) ซึ่งในกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสนั้นใช้ชิพตรีจิสเตอร์ CMOS 4051 และใช้ค่าจาก 3 สเตจสุดท้ายของชิพตรีจิสเตอร์เพื่อเป็นรหัสขนาด 3 บิตป้อนไปที่ตัวแปลงเป็นดิจิตอลขนาด 3 บิต ซึ่งจะทำให้ได้แรงดันไฟฟ้า 8 ระดับเป็นเอาต์พุตป้อนกลับสู่อินพุตสำหรับควบคุมความถี่ของวงจรรังเกิลเลอร์

วงจรรังเกิลอร์จะพยายามกลับเข้าสู่ภาวะสมดุลจึงทำให้การทำงานของวงจรเป็นไปตามหลักการของทฤษฎีความอลวน (chaos theory) ซึ่งสถานะสมดุลที่เป็นไปได้นั้นราวกับว่ามีไม่จำกัด และเมื่อสถานะสมดุลถูกรบกวนเพียงเล็กน้อย จากการสังเกตพบว่าวงจรต้องใช้เวลาเล็กน้อยในการค้นหาสถานะสมดุลถัดไป [16]



บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานโครงการ

3.1 ประชุมและวางแผนการทำงาน

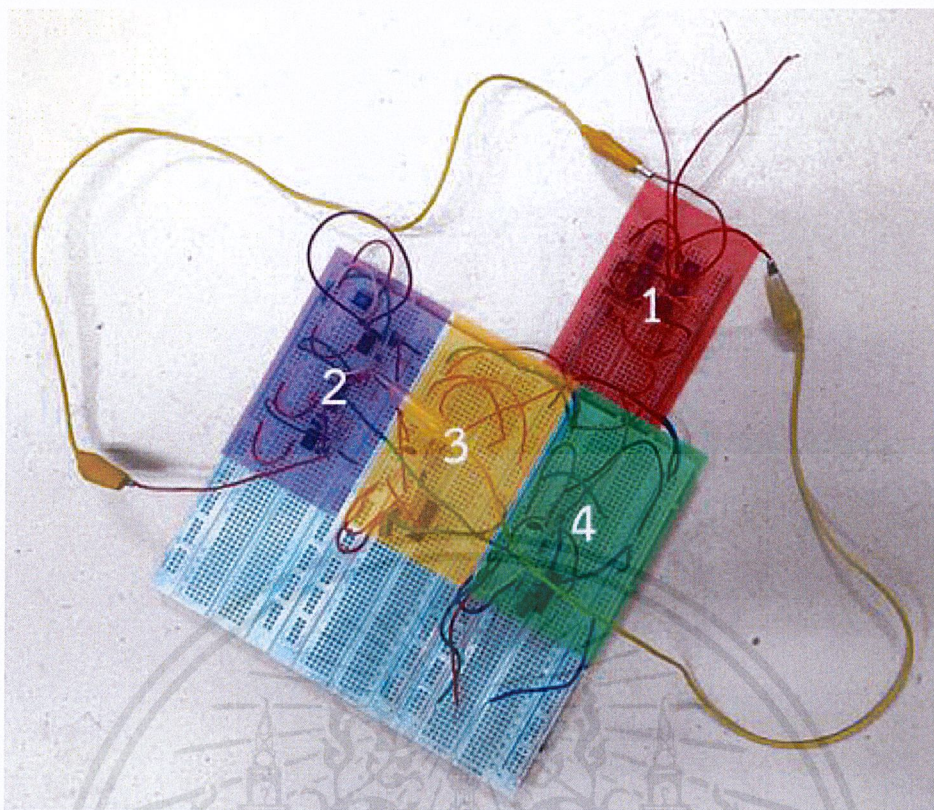
คณะผู้จัดทำและอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมประชุมหารือรับทราบจุดประสงค์ ภาพรวม และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับโครงการทั้งหมด รวมถึงกำหนดขอบเขตการทำงานและวางแผนการทำงานเป็นขั้นตอน

3.2 ศึกษาทฤษฎีและเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง

เริ่มจากการเรียนรู้การทำงานพื้นฐานของซินธิไซเซอร์ เช่น วงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (VCO) ซึ่งประกอบด้วยวงจรร้อยย คือ วงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า และวงจรกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยมและสี่เหลี่ยม พร้อมหาข้อมูลทฤษฎีที่จำเป็นเพิ่มเติม เช่น ระบบเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น และทฤษฎีความอลวน เพื่อให้เกิดความเข้าใจในตัวเองมากยิ่งขึ้น โดยจะศึกษาตั้งแต่คุณสมบัติและหลักการการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดต่างๆ รวมถึงการทำงานของวงจรพื้นฐานที่จำเป็นต่อการสร้างเคออสซินธิไซเซอร์ เช่น ตัวขยายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า วงจรรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า และสร้างปรากฏการณ์เคออสโดยใช้พื้นฐานของรีจิสเตอร์เลื่อนป้อนกลับได้เชิงเส้น (LFSR) เป็นต้น

3.3 ออกแบบวงจรร้อยยและสร้างต้นแบบ

หลังจากศึกษาอุปกรณ์และวงจรที่เกี่ยวข้องแล้ว จะทำการออกแบบวงจรร้อยย 3 ส่วน ซึ่งประกอบไปด้วย วงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO) วงจรรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled filter, VCF) และวงจรที่เป็นศูนย์กลางของความอลวน (the heart of chaos circuit, Rungler) จากนั้นทดลองสร้างต้นแบบ 2 วงจรบนโปรโตบอร์ด (protoboard) โดยแยกส่วนกันได้แก่ วงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า และวงจรริงเกลอร์เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตการทำงานและสัญญาณเอาต์พุตจากวงจร รวมถึงความสะดวกในการแก้ไขเมื่อพบปัญหา ซึ่งสามารถจำกัดวงของปัญหาได้อย่างเจาะจงมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.1 ต้นแบบแรกของวงจรถ่ายสัญญาณเสียงแบบเคออส โดยระบุตำแหน่งวงจรย่อย

จากรูปที่ 3.1 ส่วนของต้นแบบวงจรย่อยสามารถระบุตามตำแหน่งได้ดังนี้

1 คือ ส่วนวงจรปรับระดับสัญญาณควบคุมขาเข้า หรือวงจรขับแรงดันควบคุมแบบทั่วไป (input adjustment circuit) ซึ่งเป็นภาคแรกของวงจรถ่ายสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO) ทั้ง 2 วงจร

2 คือ ส่วนวงจรศูนย์กลางของความอลวน (the heart of chaos circuit, Rungler)

3 และ 4 คือ ส่วนวงจรถ่ายสัญญาณรูปสามเหลี่ยมและสัญญาณรูปสี่เหลี่ยม ซึ่งประกอบด้วยวงจรย่อยได้แก่ วงจรอินทิเกรเตอร์ และวงจรขมิตต์ทริกเกอร์

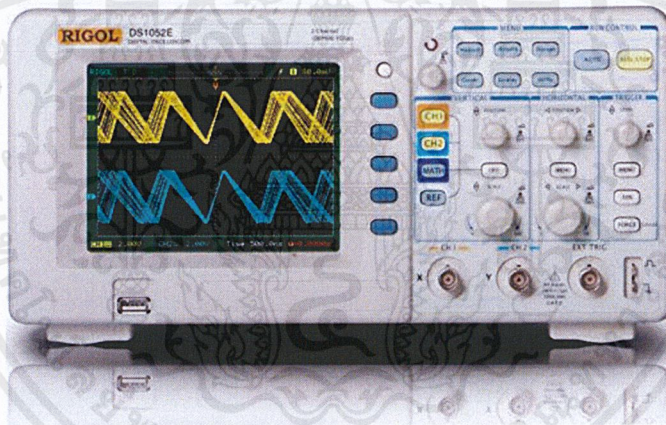
3.4 การทดสอบวงจรต้นแบบ

เมื่อได้บอร์ดวงจรต้นแบบแล้ว จะนำมาทดสอบการทำงานทั่วไปและตรวจดูการทำงานของวงจรว่าทำงานได้เป็นปกติหรือไม่ โดยการจ่ายไฟเลี้ยงเข้าวงจรเพียงอย่างเดียวยังไม่ป้อนสัญญาณใดๆจากภายนอกเข้าไป จากนั้นใช้ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope) เพื่อสังเกตสัญญาณ ณ จุดต่างๆ หากไม่พบสิ่งผิดปกติจากการทำงานของวงจรที่ควรจะเป็นให้ทำการทดลองป้อนสัญญาณภายนอกโดยใช้คลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) แล้วสังเกตการณ์ทำงานและสัญญาณเอาต์พุตจากวงจร

เมื่อการทำงานของวงจรร้อยทุกส่วนสามารถทำงานได้เป็นปกติโดยสัญญาณเอาต์พุตที่ออกมาให้ผลเป็นไปตามที่คาดหวังไว้จึงเริ่มทำการสร้างวงจรจริง

3.4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเกตการณ์ทำงานของวงจร

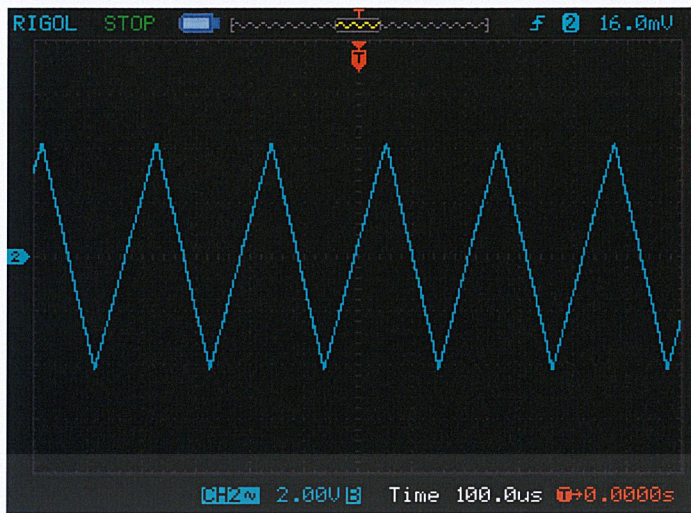
RIGOL DS1052E Digital Oscilloscope 50MHz



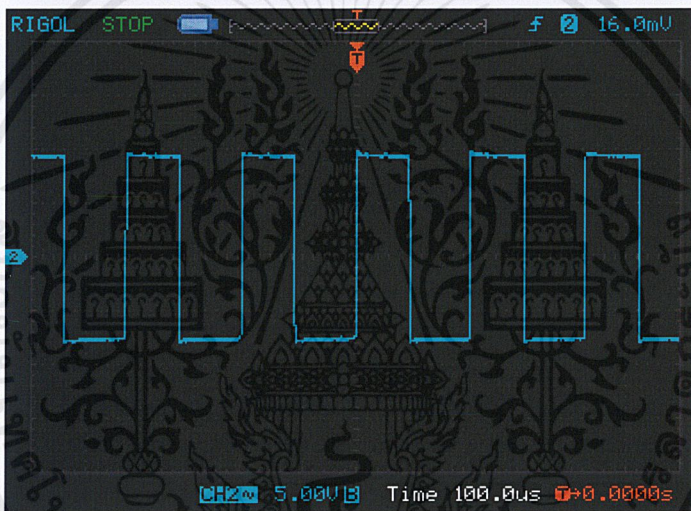
รูปที่ 3.2 ออสซิลโลสโคป RIGOL รุ่น DS1052E

ที่มา: <https://www.amazon.com/Rigol-DS1052E-Digital-Channels-sampling/dp/B003MYND5A>

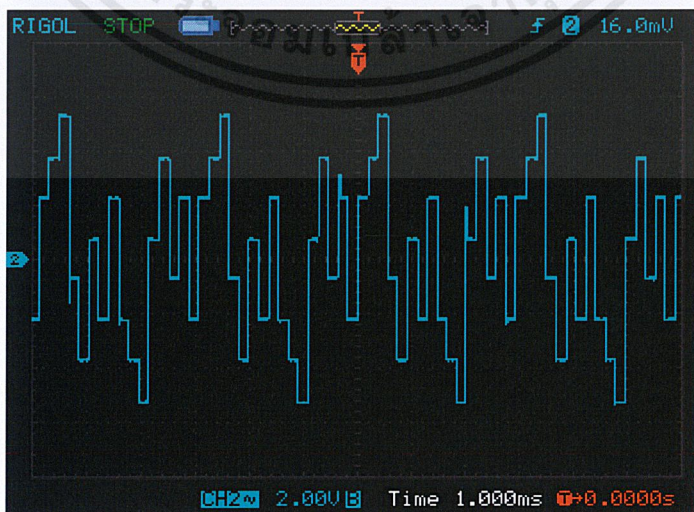
RIGOL DS1052E เป็นเครื่องวัดสัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัล ชนิดมีความกว้างแถบความถี่ (bandwidth) อยู่ที่ 50MHz ตัวเครื่องประกอบด้วยช่องสัญญาณแบบคู่และช่องสำหรับการทริกเกอร์จากภายนอก พร้อมจอขนาด 5.6 นิ้ว เพื่อให้ง่ายต่อการสังเกตสัญญาณ สำหรับการทริกเกอร์สัญญาณสามารถจับได้ทั้งขอบสัญญาณ (edge) ความกว้างพัลส์ (pulse width) ความชัน (slope) รูปแบบการซ้ำสัญญาณ (pattern) และระยะเวลาของสัญญาณ (duration)



รูปที่ 3.3 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมที่วัดจากวงจรอินทิเกรเตอร์ในการทดสอบวงจรต้นแบบ



รูปที่ 3.4 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมที่วัดจากวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ในการทดสอบวงจรต้นแบบ

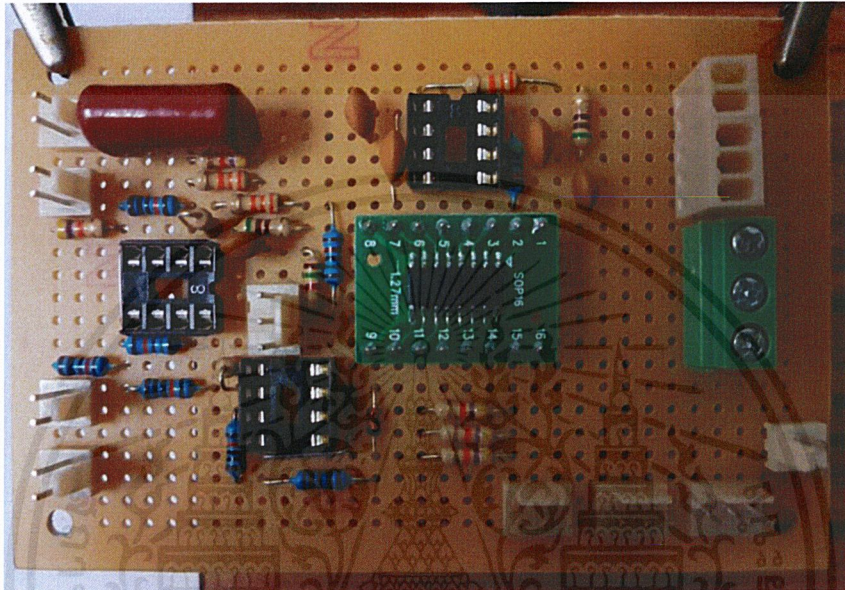


รูปที่ 3.5 รูปแบบของสัญญาณที่วัดจากวงจรรีจเลอรีในการทดสอบวงจรต้นแบบ

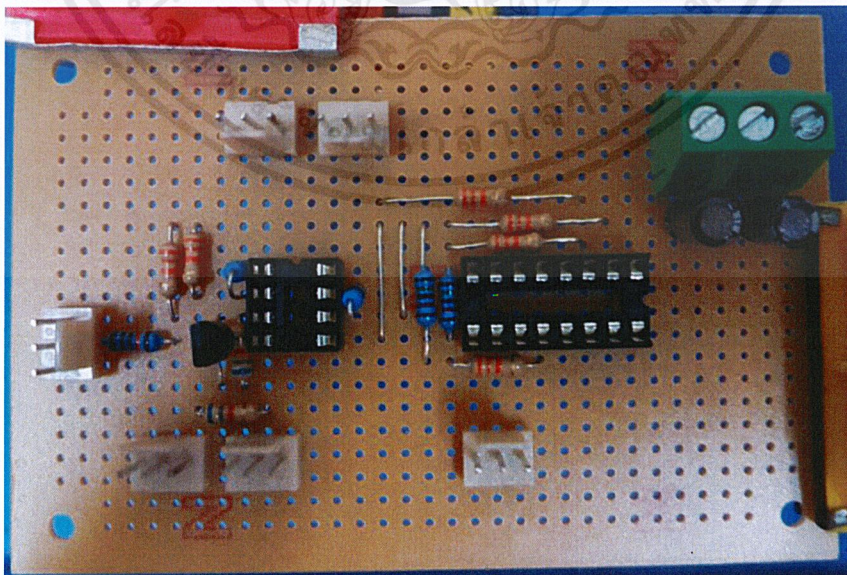
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 ออกแบบและสร้างวงจรจริง

ทำการออกแบบวงจรจริงโดยนำวงจรย่อยทั้ง 3 ส่วนมาจัดเรียง โดยกำหนดไว้ว่าต้องใช้พื้นที่ให้ได้น้อยที่สุด มีเส้นทางการเดินสัญญาณที่สั้นที่สุด และใช้วิธีการวางระบบกราวด์แบบดาว (star ground system) เพื่อลดปัญหาการเกิดวงรอบสายดินหรือกราวด์ลูป (ground loop)



รูปที่ 3.6 การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับสร้างวงจรกรองความถี่ชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า

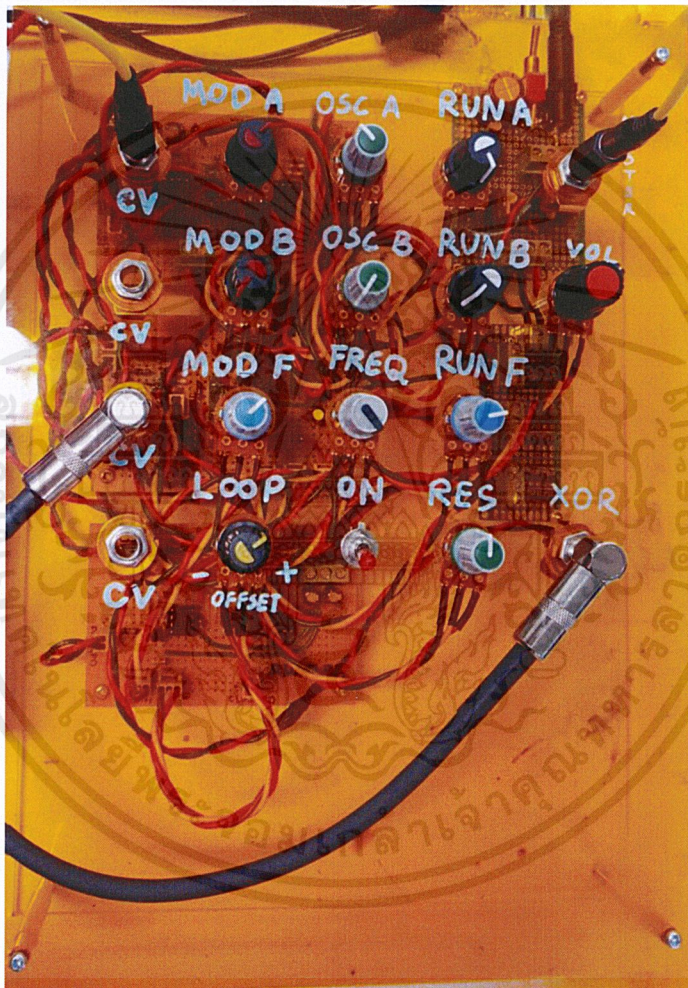


รูปที่ 3.7 การจัดเรียงอุปกรณ์สำหรับสร้างวงจรเรจเงลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

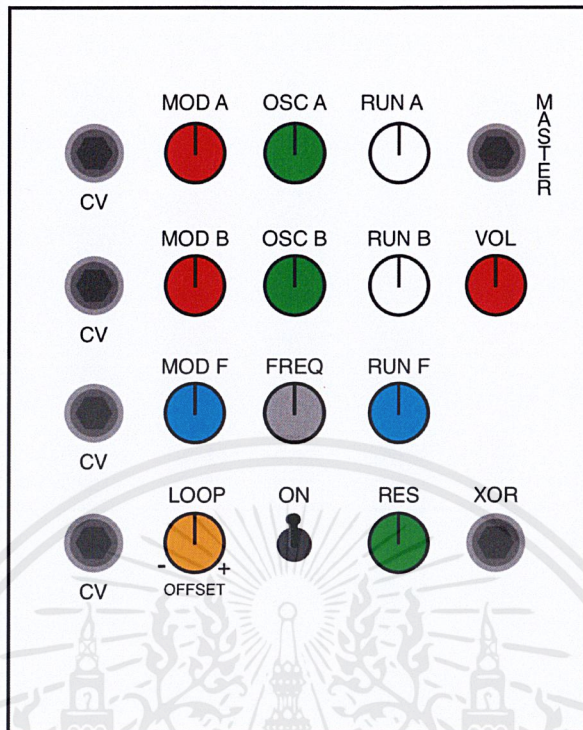
3.6 การผลิตชิ้นงาน

หลังจากได้วงจรมาเป็นที่ยอมรับแล้ว คณะผู้จัดทำได้คำนึงถึงความสะดวกในการใช้งานของเครื่อง จึงจัดทำแทนเพื่อยึดวงจรพร้อมติดตั้งปุ่มปรับค่าต่างๆที่แยกสีเพื่อจำแนกประเภทการปรับสำหรับการใช้งานจริงและคำอธิบายประกอบระบุถึงหน้าที่ของปุ่มนั้นๆ วัสดุที่ใช้ทำแทนนั้นทำมาจากแผ่นอคริลิกใส สามารถมองเห็นวงจรภายในได้เพื่อให้ง่ายต่อการนำเสนอชิ้นงานและอธิบายการทำงานของวงจรภายในต่างๆ



รูปที่ 3.8 กล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส (ชิ้นงานจริง)

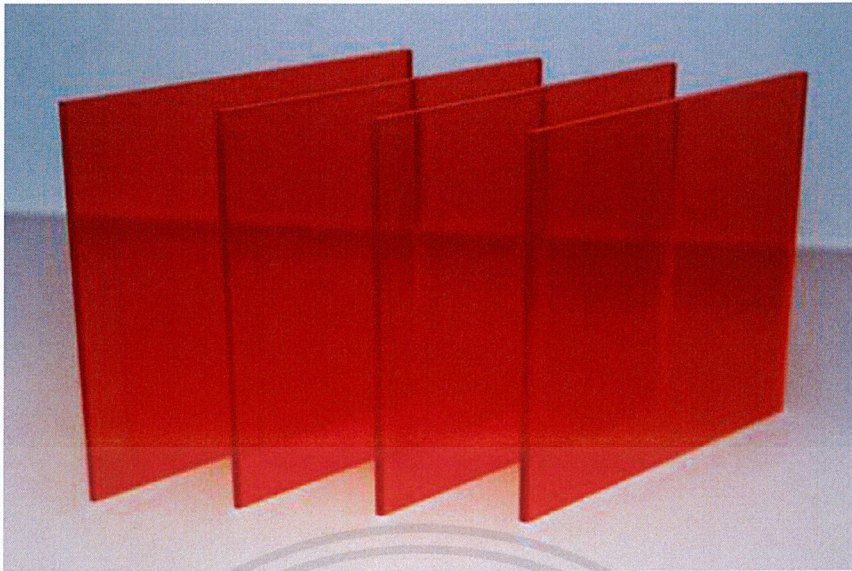
โดยปุ่มปรับและพอร์ทต่างๆมีตำแหน่งดังรูปที่ 3.9 และแสดงหน้าที่ของแต่ละจุดดังตารางที่ 3.1 ดังนี้



รูปที่ 3.9 ตำแหน่งของปุ่มและช่องสัญญาณของชิ้นงาน

ตารางที่ 3.1 แสดงชื่อปุ่มและช่องสัญญาณพร้อมหน้าที่การทำงาน

ชื่อปุ่ม/ช่องสัญญาณ	หน้าที่การทำงาน
Oscillator Manual Controls (OSC)	กำหนดค่าความถี่กลาง (central frequency)
Filter Cutoff Manual Control (FREQ)	กำหนดค่าความถี่ตัด (cut off frequency) ของตัวกรองความถี่สูงผ่านและต่ำผ่าน (high pass/ low pass filter)
Filter Resonance Controls (RES)	กำหนดปริมาณการสั่นพ้อง (resonance) ของตัวกรอง
External Modulation Controls (MOD)	ใช้ปรับค่าแรงดันควบคุมภายนอก
Rungler Modulation Controls (RUN)	ใช้ปรับปริมาณการส่งสัญญาณระหว่างวงจรรังเกิลอร์และวงจรรื่นๆ
Rungler Loop Controls (LOOP)	ใช้ปรับค่าการวนรอบในวงจรรังเกิลอร์
Control Voltage Input (CV)	ใช้รับสัญญาณควบคุมแรงดันไฟฟ้าจากภายนอกเข้ามาควบคุมการทำงานของวงจร
XOR	เอาต์พุต exclusive-or จากวงจรรังเกิลอร์
Master OUT	ช่องสัญญาณขาออก



รูปที่ 3.10 แผ่นอคริลิกใสสำหรับสร้างแท่นยึดวงจร

ที่มา: <https://www.esheet.co.uk/site/product-acrylic.php>



รูปที่ 3.11 ปุ่มปรับสีเส้นต่างๆเพื่อจำแนกประเภทการปรับสำหรับการใช้งานจริง

ที่มา: <https://www.mallinson-electrical.com/components/resistors/potentiometers/tri-colour-mixer-knobs-1-4-splined-6mm-shaft-pot-16mm-diameter.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 การทดสอบชิ้นงานจริง

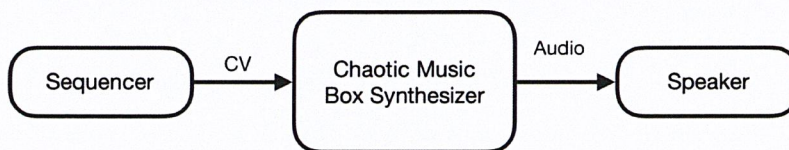
ทำการทดสอบชิ้นงานโดยเริ่มจากการจ่ายไฟเลี้ยงเข้าระบบแล้วนำลำโพงมาต่อที่ช่องสัญญาณขาออกหลัก (master) เพื่อฟังเฉพาะเสียงที่ระบบสร้าง แต่อย่างไรก็ตามแม้ตัวเครื่องนั้นสามารถสร้างสัญญาณด้วยตัวเองได้โดยไม่ต้องพึ่งพาสัญญาณจากภายนอก แต่เมื่อใช้งานจริงผู้ใช้สามารถนำแรงดันควบคุมจากภายนอกและสัญญาณเสียงจากแหล่งอื่นมาควบคุมหรือป้อนแก่ระบบได้เช่นกัน โดยสัญญาณควบคุมสามารถป้อนเข้าทางช่อง CV แต่ละช่อง และสามารถนำสัญญาณเสียง (external audio in) ป้อนเข้าทางช่องสัญญาณ CV ช่องล่างสุด (แสดงดังรูปที่ 3.9) โดยในการทดสอบใช้สัญญาณดังนี้

1. สัญญาณแรงดันควบคุม (CV) จากเครื่องจัดลำดับดนตรี (sequencer) Korg SQ-1 ป้อนเข้าทางช่องสัญญาณช่องสัญญาณ CV ของ VCO 1 และ/หรือ 2 จากนั้นทำการปรับปุ่มควบคุม MOD A และ/หรือ MOD B



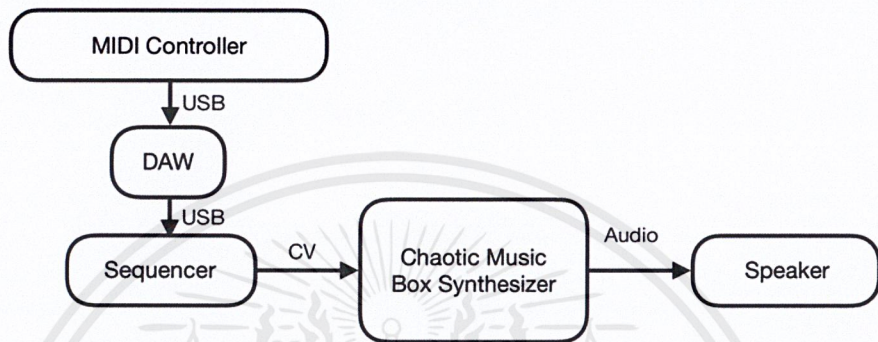
รูปที่ 3.12 เครื่องจัดลำดับดนตรี (sequencer)

ที่มา: https://www.thomann.de/gb/korg_sq_1.htm

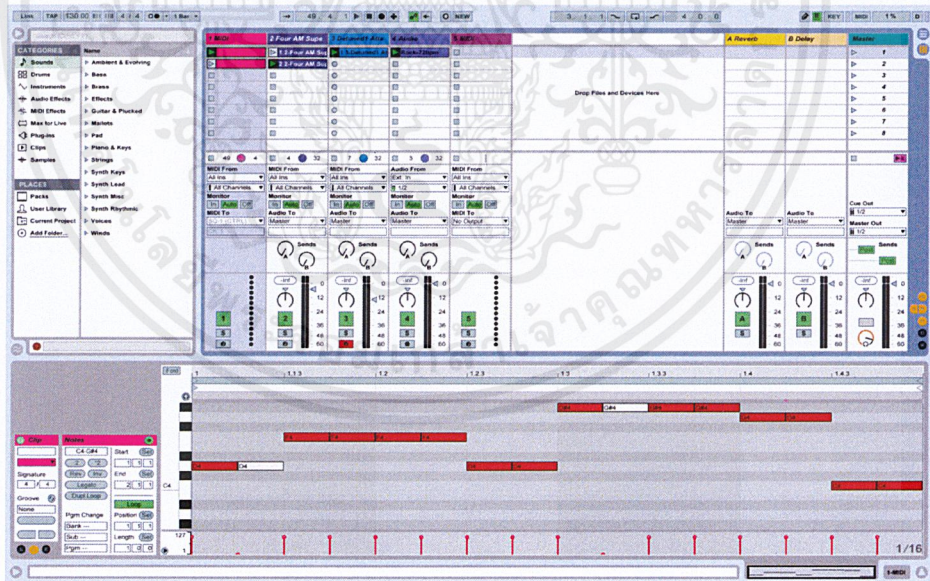


รูปที่ 3.13 แผนภาพบล็อกแสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานกับเครื่องจัดลำดับดนตรี

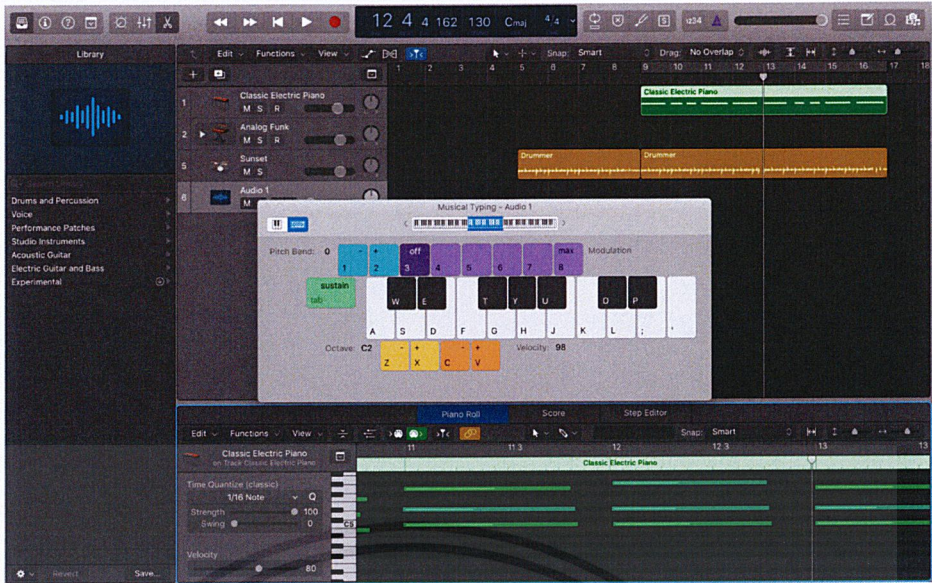
- สัญญาณ MIDI จากโปรแกรมดนตรีหรือดิจิทัลออดิโอเวิร์คสเตชัน (digital audio workstation, DAW) ใช้ป้อนให้กับเครื่องจัดลำดับดนตรีเพื่อแปลงสัญญาณ MIDI ให้เป็นสัญญาณแรงดันควบคุม จากนั้นทำการส่งสัญญาณเข้าเครื่องในลักษณะเดียวกันกับข้อที่ 1 ซึ่งในการทดสอบนี้ใช้โปรแกรม Ableton Live 9 Suite และ Logic Pro X ในการสร้างสัญญาณ MIDI



รูปที่ 3.14 แผนภาพบล็อกแสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานกับโปรแกรมดนตรี

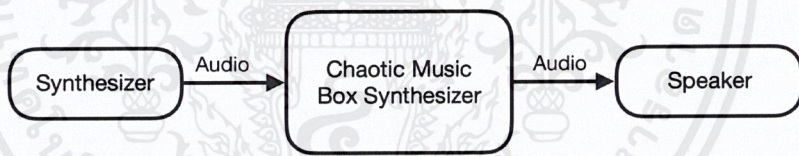


รูปที่ 3.15 โปรแกรม Ableton Live 9 Suite

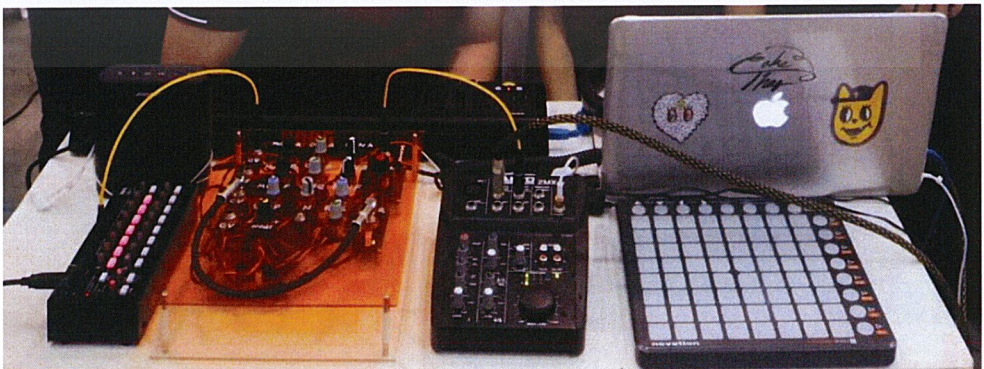


รูปที่ 3.16 โปรแกรม Logic Pro X

- สัญญาณเสียงจากซินธิไซเซอร์ป้อนเข้าที่ช่อง external audio in ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่งช่องสัญญาณ CV ช่องล่างสุด (แสดงดังรูปที่ 3.9)



รูปที่ 3.17 แผนภาพบล็อกแสดงการเชื่อมต่อชิ้นงานกับซินธิไซเซอร์



รูปที่ 3.18 ตัวอย่างการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ต่างๆขณะใช้งานจริง

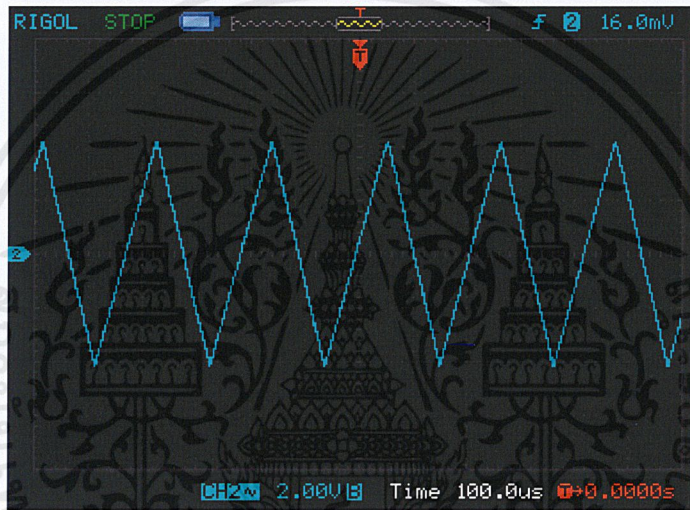
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลและการอภิปราย

4.1 ผลจากวงจรกำเนิดสัญญาณชนิดควบคุมด้วยแรงดันไฟฟ้า (voltage-controlled oscillator, VCO)

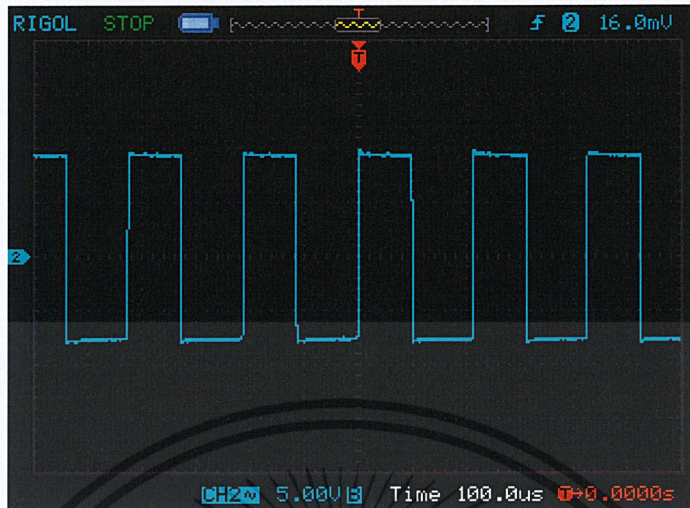
4.1.1 วงจรอินทิเกรเตอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based integrator circuit)



รูปที่ 4.1 สัญญาณคลื่นรูปสามเหลี่ยมจากวงจรอินทิเกรเตอร์ของ VCO

จากรูปที่ 4.1 สัญญาณรูปสามเหลี่ยมเกิดจากการป้อนสัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมซึ่งเป็นสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องกลับมาเป็นอินพุตของวงจรรวมอินทิเกรเตอร์ ดังนั้นตัวเก็บประจุจะทำการประจุและคายประจุเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณอินพุต ซึ่งส่งผลให้สัญญาณเอาต์พุตเกิดเป็นคลื่นรูปสามเหลี่ยม

4.1.2 วงจรขมิตต์ทริกเกอร์แบบใช้ออปแอมป์ (Operational amplifier-based Schmitt trigger)

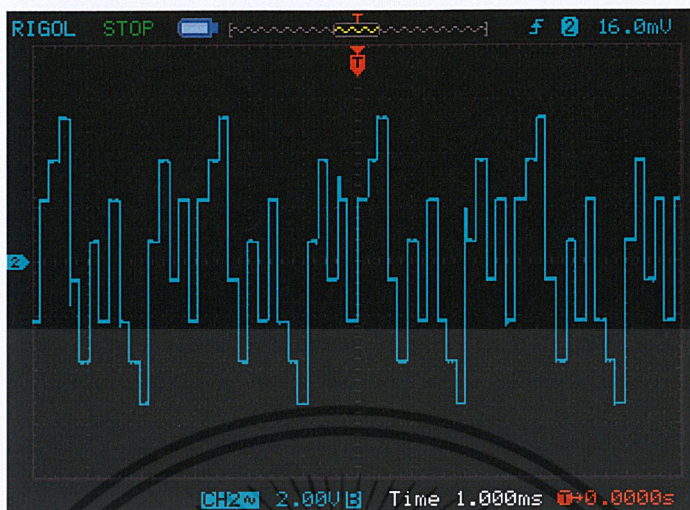


รูปที่ 4.2 สัญญาณคลื่นรูปสี่เหลี่ยมจากวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ของ VCO

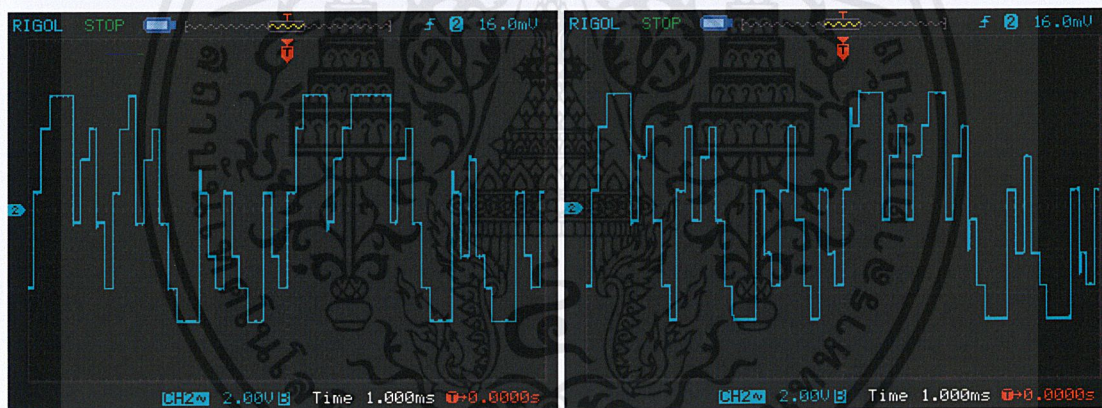
จากรูปที่ 4.2 สัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเกิดจากการที่ตัวออปแอมป์ของวงจรทำหน้าที่เป็นวงจรเปรียบเทียบสัญญาณแรงดันระหว่างสัญญาณอินพุตบวกและลบซึ่งมีศักย์ศูนย์โวลต์ (อินพุตลบถูกต่อลงกราวด์) โดยสัญญาณที่รับมาเป็นสัญญาณรูปสามเหลี่ยมจากวงจรอินทิเกรเตอร์ในภาคก่อนหน้า ดังนั้นเมื่ออินพุตมีค่าต่ำกว่าศูนย์โวลต์ เอาต์พุตของวงจรจะมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงลบ หรือประมาณ $-9V$ และถ้าอินพุตมีค่ามากกว่าศูนย์โวลต์เอาต์พุตจึงมีค่าเท่ากับไฟเลี้ยงบวกหรือประมาณ $+9V$

วงจรขมิตต์ทริกเกอร์ที่ใช้มีค่า $R1 = 15k\Omega$, $R2 = 30k\Omega$ และเอาต์พุตมีขนาดเท่ากับ $\pm 9V$ ดังภาพที่ 4.2 ดังนั้นจึงสามารถคำนวณจุดที่จะเกิดการสับของสัญญาณโดยใช้สมการที่ (2.5.2.1-1) ได้เท่ากับ $\pm 4.5V$ (วิธีคำนวณแสดงไว้ดังหัวข้อที่ 2.5.2.1) ซึ่งหมายความว่าเมื่อสัญญาณรูปสามเหลี่ยมดังรูปที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ $\pm 4.5V$ สัญญาณจากวงจรขมิตต์ทริกเกอร์ในภาคถัดมาจะเกิดการสับทำให้ได้สัญญาณเป็นรูปสี่เหลี่ยม

4.2 ผลจากวงจรส่วนศูนย์กลางของความอลวน (the heart of chaos circuit, Rungler)



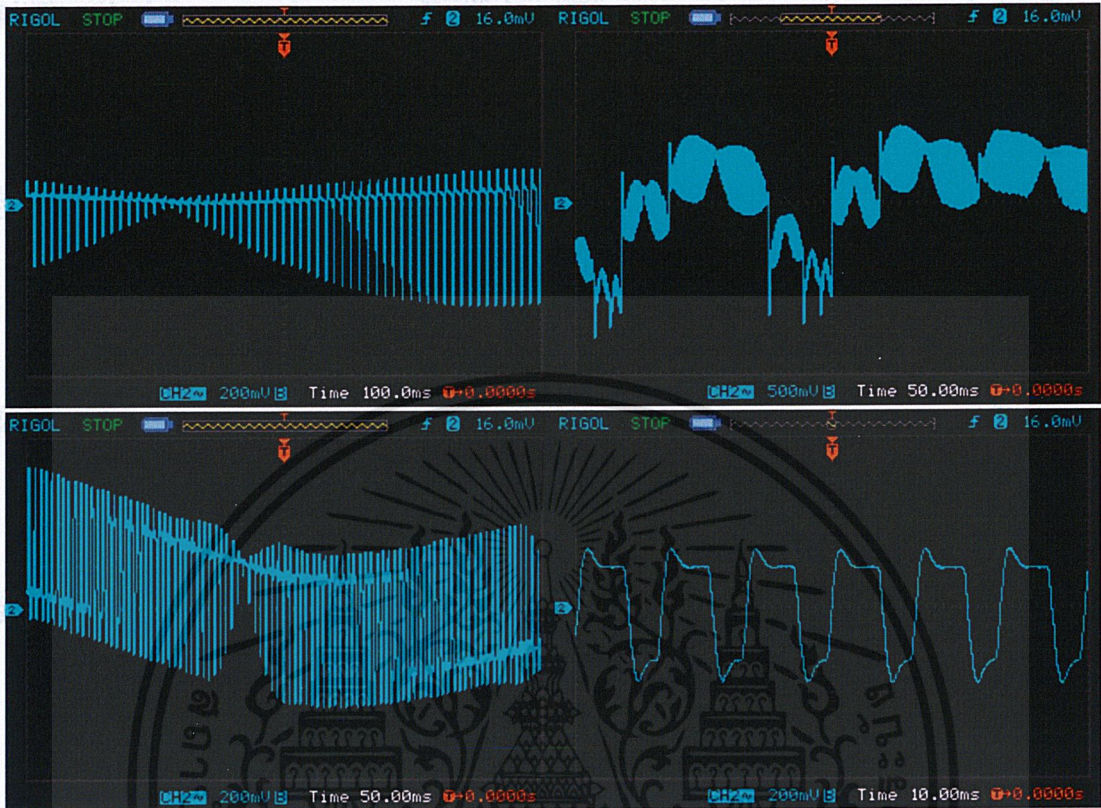
รูปที่ 4.3 ตัวอย่างสัญญาณรูปขั้นจากรังเกลอร์เมื่อเปิดโหมดควบคุมการวนรอบของรังเกลอร์



รูปที่ 4.4 ตัวอย่างสัญญาณรูปขั้นจากรังเกลอร์เมื่อปิดโหมดควบคุมการวนรอบของรังเกลอร์

สัญญาณที่ได้ในรูปที่ 4.4 มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปขั้นสั้นๆเป็นแรงดันไฟฟ้า 8 ระดับ ซึ่งเกิดจากรหัสขนาด 3 บิตที่ออกจากชิพตรีจิสเตอร์ถูกป้อนไปที่ตัวแปลงเป็นดิจิทัลขนาด 3 บิต และในรูปที่ 4.3 เมื่อมีการเปิดโหมดควบคุมการวนรอบของรังเกลอร์ (Rungler loop controls) วงจรรังเกลอร์จะหยุดการรับข้อมูลอินพุตจากรังเกลอร์กำเนิดสัญญาณในภาคก่อนหน้าซึ่งทำให้วงจรออกจากเคโอติกโดเมน ดังนั้นสัญญาณที่ได้จึงมีลักษณะซ้ำเติมเป็นรอบๆที่เกิดจากการป้อนบิตกลับในลักษณะเดิมซ้ำๆ โดยเสียงที่ได้จะเป็นเสียงโดรน (drone) ที่มีการสั่นครางดังอยู่ตลอดเวลา

4.3 ผลเอาต์พุตสุดท้ายจากกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส



รูปที่ 4.5 ผลเอาต์พุตสุดท้ายจากกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออส

สัญญาณทั้ง 4 สัญญาณดังรูปที่ 4.5 เกิดจากการปรับค่าสถานะเริ่มต้นที่ต่างกันเพียงเล็กน้อย จะสังเกตได้ว่ารูปแบบของสัญญาณทั้งสี่นั้นไม่มีความสัมพันธ์ต่อกัน ซึ่งพฤติกรรมที่เกิดในระบบนี้เป็นไปตามหลักการของทฤษฎีความอลวน (chaos theory)

บทที่ 5

สรุปผลโครงการและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลโครงการ

จากโครงการทดลองดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสน์ พบว่าการปรับค่าของปุ่มและการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าทางพอร์ทควบคุมเพียงเล็กน้อยนั้น สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมที่เกิดในระบบได้โดยแทบไม่ทิ้งเค้าโครงของพฤติกรรมก่อนหน้า โดยการเปลี่ยนแปลงสามารถเกิดได้ทั้งในโดเมนของความถี่และเวลา ทำให้เกิดคลื่นรูปแบบใหม่ขึ้นมาอย่างไม่รู้จบ พฤติกรรมเช่นนี้เป็นสิ่งที่ทำให้กล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสมีความแตกต่างจากซินธิไซเซอร์ชนิดอื่น แม้จะไม่ได้มีจุดประสงค์ให้เป็นเครื่องดนตรีที่ใช้ควบคุมโทนเสียงและความดังตามใจชอบ อีกทั้งคาดเดาผลลัพธ์ได้ยาก แต่ผู้ใช้งานสามารถเพลิดเพลินไปกับการค้นพบและสร้างสรรค์เสียงใหม่ๆจากการบิดและปรับปุ่มต่างๆได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากการทำโครงการชิ้นนี้ คณะผู้จัดทำมีข้อเสนอแนะสำหรับผู้สนใจในตัวโครงการดังนี้

1. ในการออกแบบวงจรเพื่อใช้งานจริงนั้น ควรออกแบบในรูปแบบบอร์ดพีซีบี เพื่อลดความซับซ้อนของการเชื่อมต่ออุปกรณ์ ทำให้ระบบมีเสถียรภาพ เชื่อถือได้และสะดวกต่อการตรวจสอบแก้ไขเมื่อเกิดปัญหา ซึ่งเป็นสิ่งที่ควรพิจารณาเมื่อนำไปพัฒนาเพื่อการใช้งานจริง
2. ผู้ใช้สามารถเชื่อมต่อกับกล่องดนตรีสังเคราะห์เสียงแบบเคออสกับอุปกรณ์อื่นๆเพื่อให้สามารถสร้างสรรค์รูปแบบเสียงที่ซับซ้อนและจังหวะแปลกใหม่ได้มากขึ้น ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้งานทางด้านเสียงที่หลากหลาย

บรรณานุกรม

- [1] ตัวดึงวิถี (attractor) ในกระบวนการเปลี่ยนย้ายกระบวนทัศน์. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2WIDM0C>
- [2] “Lorenz system”. (2562). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2i7DwgB>
- [3] Rob Hordijk. “The Blippoo Box: A Chaotic Electronic Music Instrument, Bent by Design”. (2552). Leonardo Music Journal Volume 19. p. 35-43.
- [4] “A simple guide to chaos and complexity”. (2550). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2YHzcaA>
- [5] “ทฤษฎีความอลวน”. (2558). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2PxIXn7>
- [6] ดร.บัญชา ธนบุญสมบัติ. “ทฤษฎีเคออส มีแก่นสารอย่างไร”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2QpOeyZ>
- [7] Robert C. Hilborn. “Chaos and Nonlinear Dynamics”. Oxford University Press Inc., New York. (2545).
- [8] Sam McGuire and Nathan van der Rest. “The Musical Art of Synthesis”. (2016). Focal Press 70 Blanchard Road, Suite 402, Burlington, MA 01803
- [9] “What is Schmitt Trigger”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2VFaj3S>
- [10] Robin Mitchell. “DIY Synth Series Part 1 — The Exponential VCO”. (2559). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2FHJ1kg>
- [11] “A Precision Half-Wave Rectifier”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2wdiAv5>
- [12] “The Integrator Amplifier”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2M1F0dx>
- [13] “The Summing Amplifier”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2R1NJ1t>
- [14] “State Variable Filter”. [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2HLIqfe>
- [15] “ตัวสร้างเลขสุ่มเทียม”. (2561). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2HN0eqg>
- [16] Rob Hordijk. “Benjolin schematics”. (2552). [ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก : <https://bit.ly/2M5NSyV>
- [17] R.N. Mutagi. "Pseudo Noise Sequences for Engineers". Electronics and Communication Engineering Journal. UK. Vol.8, No.2. (2539).