

อุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน  
COMMUNICATION DEVICE WITH NOISE CANCELLATION



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2560

อุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน

COMMUNICATION DEVICE WITH NOISE CANCELLATION



600264474

TB00620

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมระบบควบคุม

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# COMMUNICATION DEVICE WITH NOISE CANCELLATION



THIS THESIS IS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF  
BACHELOR OF ENGINEERING IN CONTROL ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2017

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2560

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน  
COMMUNICATION DEVICE WITH NOISE CANCELLATION

ผู้จัดทำ นายวรายุส สมบัติศรี 57011119  
นายเวชพิสิฐ สาริก 57011212



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนาสุทธี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# อุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน

โดย

นายวรายุส สมบัติศรี 57011119

นายเวชพิสิฐ สาริก 57011212

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ

ปีการศึกษา 2560

## บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ และการสร้างต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน ทฤษฎีที่นำมาประยุกต์ใช้ ได้แก่ วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยมีหลักการพื้นฐานมาจาก กระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด เพื่อทำการลดเสียงรบกวนที่ปะปนอยู่ในเสียงสนทนา อุปกรณ์สื่อสารชิ้นนี้จะประกอบไปด้วยไมโครโฟน 2 ชิ้น ทำการรับเสียงจากผู้ส่งสารที่ปะปนไปด้วยเสียงรบกวน และรับเสียงรบกวนโดยตรงจากบริเวณรอบ ๆ ผู้พูด วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด จะทำการประมวลผลให้ได้เสียงที่มีลักษณะคล้ายและใกล้เคียงกับเสียงรบกวน ผลต่างของเสียงที่ผ่านการประมวลผลกับเสียงจากผู้พูดที่ปะปนกับเสียงรบกวน ให้ผลลัพธ์ออกมาที่มีลักษณะคล้ายกับเสียงจากผู้พูดโดยตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และฟ้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# COMMUNICATION DEVICE WITH NOISE CANCELLATION

By

Mr.Warayus                      Sombatsri                      57011119

Mr.Wechpisit                      Sarik                      57011212

Advisor

Assoc.Prof.Dr.Taworn Benjanarasuth

Academic Year 2017

## ABSTRACT

The objective of this project is to build a noise cancelling communication device prototype from parts which are easy to find. The technique used in the device is adaptive digital filter based on Least Mean Squares technique, also known as LMS. To reduce sound interference in human desired speech, this device must have two microphones for receiving the desired speech with interference noise and the interference noise. Adaptive digital filter calculates a sound that looks like the interference noise. The difference of the calculated sound and the desired speech with interference noise are the output desired speech.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ถาวร เบญจนราสุทธิ อาจารย์ที่ปรึกษา ที่คอยชี้แนะ ให้คำปรึกษาแนวทางการแก้ปัญหาต่าง ๆ รวมไปถึงการฝึกฝนให้ผู้เขียนมีความรู้ ความเข้าใจในการทำปริญญาานิพนธ์เป็นอย่างดี

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมการวัดและควบคุม ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ ความรู้ทั้งในภาคทฤษฎีและภาคปฏิบัติให้แก่ผู้เขียน และได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ที่จำเป็นในการทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณครอบครัว บิดา มารดาที่เคารพรัก ที่สนับสนุนในด้านการเรียน แก่ผู้เขียนเป็นอย่างดี ตลอดจนเพื่อน ๆ พี่ ๆ ทุกคนที่ได้ช่วยให้คำปรึกษา แนะนำและเป็นกำลังใจให้เสมอมา จนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์



ผู้จัดทำ  
วรายุส สมบัติศรี  
เวชพิสิฐ สาริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ III อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปริญญาานิพนธ์	1
1.2 วัตถุประสงค์	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์	1
1.4 รายละเอียดของปริญญาานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎี หลักการ และความรู้ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 คลื่นเสียง	3
2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข	3
2.2.1 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด	4
2.2.2 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด	6
2.3 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้	9
2.3.1 หลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้	10
2.3.2 หลักการทำงานของกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	12
2.4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปริญญาานิพนธ์	13
2.4.1 วงจรขยายสัญญาณชนิดกลับเฟส	13
2.4.2 วงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส	14
2.4.3 วงจรบัฟเฟอร์	16
2.4.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน	16
2.4.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทาน ชั้นบันได	17
2.4.6 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	18
2.5 ทฤษฎีการกล้ำสัญญาณ	19
2.5.1 การกล้ำสัญญาณเชิงขนาด	20
2.5.2 การกล้ำสัญญาณเชิงความถี่	25
2.5.3 การกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่	29

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 การออกแบบ</b>	32
3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริภูมิพนธ์	32
3.2 แนวคิดการออกแบบ	33
3.3 ฮาร์ดแวร์	33
3.3.1 แบบจำลองชิ้นงาน	33
3.3.2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า	35
3.3.3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก	38
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในปริภูมิพนธ์	41
3.4.1 ไมโครโฟน	42
3.4.2 หูฟังพร้อมไมโครโฟน	42
3.4.3 รูไมโครโฟนและหูฟัง	43
3.4.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์	43
3.4.5 โมดูลสื่อสารไร้สาย	44
3.4.6 ไอซี TL072	44
3.4.7 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Converter	44
3.4.8 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Step-Up	45
3.4.9 แบตเตอรี่	45
3.5 โปรแกรมสำหรับอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน	45
3.5.1 ส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย	46
3.5.1.1 การกำหนดค่าเริ่มต้น	46
3.5.1.2 การรับข้อมูลผ่านการอินเทอร์เฟซ	47
3.5.1.3 การประมวลผลโดยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	49
3.5.1.4 การส่งออกข้อมูลสัญญาณเสียง	50
3.5.2 ส่วนรับข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายแล้วส่งออกข้อมูลเสียงไปยังหูฟัง	50
<b>บทที่ 4 ผลการทดลอง</b>	52
4.1 การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB	52
4.1.1 ผลการจำลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์	52
4.1.2 ผลการจำลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว	53
4.1.3 ผลการจำลองเมื่อใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน	54
4.2 การทดลองอุปกรณ์ต้นแบบ	55
4.2.1 การทดลองกรองเสียงรบกวนแบบไม่มีเสียงพูด	57
4.2.1.1 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์	57
4.2.1.2 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว	57
4.2.1.3 ผลการทดลองเมื่อใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ V อย่างอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.2 การทดลองกรองเสียงรบกวนแบบมีเสียงพูด	58
4.2.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์	59
4.2.2.2 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว	59
4.2.2.3 ผลการทดลองเมื่อใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน	60
<b>บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ</b>	61
5.1 สรุปผล	61
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	61
5.3 ข้อเสนอแนะ	62
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	63
<b>ภาคผนวก</b>	64
<b>ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในปริญญานิพนธ์</b>	65
ก.1 คู่มือการใช้งานไอซี TL072	65
ก.2 คู่มือการใช้งานโมดูลสื่อสาร nRF24L01	67
ก.3 คู่มือการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3	69
<b>ภาคผนวก ข Instrumentation, Control and Automation Senior Project -Conference 2018 (ICA SP-CON 2018)</b>	70
<b>ภาคผนวก ค โปสเตอร์</b>	72

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และVIของอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข	4
2.2 ตัวอย่างโครงสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด	5
2.3 โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด	6
2.4 บล็อกไดอะแกรมการหาจำนวนรณเฉลี่ยนาที่ที่ 5	9
2.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้	10
2.6 โครงสร้างวงจรขยายสัญญาณชนิดกลับเฟส	14
2.7 โครงสร้างวงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส	15
2.8 โครงสร้างวงจรบัฟเฟอร์	16
2.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอย่างง่าย	17
2.10 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันได	18
2.11 ตัวอย่างวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า	18
2.12 ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณคลื่นพาห์	21
2.13 ตัวอย่างผลของการกล้ำสัญญาณกรณีที่ขนาดของ $m(t)$ มีค่าน้อยกว่า 1 ตลอดทุกช่วง	22
2.14 ตัวอย่างผลของการกล้ำสัญญาณกรณีที่ขนาดของ $m(t)$ มีค่ามากกว่า 1 ในบางช่วง	22
2.15 โครงสร้างวงจรตรวจจับกรอบคลื่น	23
2.16 วงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาที่เหมาะสม	25
2.17 วงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาน้อยเกินไป	25
2.18 วงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาที่มากเกินไป	25
2.19 สัญญาณข้อมูลชนิดชั้นบันไดหนึ่งหน่วย $m(t)$	27
2.20 สัญญาณคลื่นพาห์	27
2.21 ผลจากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่	28
2.22 ขั้นตอนการกล้ำสัญญาณกลับเชิงความถี่ด้วยวิธีซีโรครอสซิงติเทกเตอร์	28
2.23 สัญญาณในแต่ละขั้นตอนของวิธีซีโรครอสซิงติเทกเตอร์	29
2.24 การกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่	30
2.25 บล็อกไดอะแกรมการกล้ำสัญญาณดิจิทัลกลับด้วยเครื่องตรวจจับการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่	31
2.26 รูปสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของการกล้ำสัญญาณดิจิทัลกลับด้วยเครื่องตรวจจับการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่	31
3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน	32
3.2 แบบจำลองชิ้นงานสามมิติในมุมมองต่าง ๆ	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIT อย่างเป็นทางการถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 การวางอุปกรณ์ในแบบจำลองชิ้นงาน	35
3.4 โครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า	35
3.5 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า	37
3.6 โครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก	38
3.7 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก	41
3.8 ไมโครโฟน	42
3.9 หูฟังพร้อมไมโครโฟน	42
3.10 รูเสียบไมโครโฟนและหูฟัง	43
3.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3	43
3.12 โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01	44
3.13 ไอซี TL072	44
3.14 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Converter	44
3.15 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Step-Up	45
3.16 แบตเตอรี่	45
3.17 แผนผังการทำงานของส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย	46
3.18 โปรแกรมส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น	47
3.19 แผนผังการทำงานของอินเทอร์รัพท์	48
3.20 โปรแกรมของอินเทอร์รัพท์	48
3.21 โปรแกรมส่วนกำหนดตัวบ่งชี้ข้อมูล	49
3.22 โปรแกรมการทำงานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	49
3.23 การตั้งค่าไลบารีรับส่งสัญญาณการสื่อสารไร้สาย	50
3.24 โปรแกรมการทำงานของ การส่งสัญญาณการสื่อสารไร้สาย	50
3.25 แผนผังการทำงานของ ฟังก์ชันรับข้อมูลสัญญาณเสียงผ่านการสื่อสารไร้สาย	51
3.26 โปรแกรมฟังก์ชันรับข้อมูลสัญญาณเสียงผ่านการสื่อสารไร้สาย	51
4.1 แบบจำลองโดยใช้ Simulink	52
4.2 สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ความถี่ 700 เฮิร์ตซ์	53
4.3 สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ความถี่ 700 เฮิร์ตซ์ เมื่อผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	53
4.4 สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว	54

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวเมื่อผ่านวงจรรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	54
4.6 เสียงเครื่องจักรในโรงงาน	55
4.7 เสียงเครื่องจักรในโรงงานเมื่อผ่านวงจรรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	55
4.8 ลำโพง	56
4.9 การจัดวางลำโพงและไมโครโฟน	56
4.10 การเปรียบเทียบสัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ก่อนและหลังกรอง	57
4.11 การเปรียบเทียบสัญญาณเสียงรบกวนสีขาวก่อนและหลังกรอง	58
4.12 การเปรียบเทียบเสียงเครื่องจักรในโรงงานก่อนและหลังกรอง	58
4.13 สัญญาณเสียงของคำพูดคำว่า “หนึ่ง”	59
4.14 สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์แบบมีเสียงพูด	59
4.15 สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวแบบมีเสียงพูด	60
4.16 เสียงเครื่องจักรในโรงงานแบบมีเสียงพูด	60

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความถี่เสียงจำแนกตามแหล่งกำเนิดเสียง	3
2.2 ข้อมูลจำนวนรถ	8
2.3 สรุปขั้นตอนวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	13
2.4 แถบความถี่และการใช้งาน	19



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และX้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญญานิพนธ์

จากการไปฝึกงานภาคฤดูร้อนที่บริษัท IRPC ได้ประสบปัญหาภายในโรงงาน ผู้ปฏิบัติงานแต่ละคนหากต้องการสื่อสารกัน จำเป็นต้องตะโกนสื่อสารกันแม้อยู่ในระยะใกล้กัน สาเหตุเกิดจากเสียงดังรบกวนที่มาจากเครื่องจักรและกระบวนการผลิตที่ดำเนินการอยู่ภายในโรงงาน ทำให้การติดต่อสื่อสารกันระหว่างตัวผู้ปฏิบัติงานเป็นไปได้ยาก และเสียงรบกวนดังกล่าวอาจส่งผลให้เกิดความผิดปกติของเนื้อความที่ต้องการสื่อสาร ซึ่งสามารถส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานได้ แนวทางในการแก้ปัญหาสามารถทำได้ 2 วิธี วิธีที่ 1 เป็นการแก้ปัญหาที่ตัวเครื่องจักรและกระบวนการผลิต โดยอาศัยการติดตั้งกำแพงที่จะประกอบไปด้วยวัสดุดูดซับเสียงในแต่ละย่านความถี่ เพื่อป้องกันและลดเสียงรบกวนแก่ตัวผู้ปฏิบัติงาน แต่การแก้ปัญหาดังกล่าวทำได้ยากและมีค่าใช้จ่ายสูง เนื่องจากตัวเครื่องจักรนั้นมีขนาดใหญ่ วิธีที่ 2 การแก้ปัญหาดังกล่าวที่ตัวผู้ปฏิบัติงาน โดยให้ผู้ปฏิบัติงานสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันเสียงรบกวน ได้แก่ ที่ครอบหู (Ear Muff) หรือที่อุดหู (Ear Plugs) อุปกรณ์ทั้งสองนี้จะทำได้แค่เพียงลดเสียงรบกวน หรืออาจใช้อุปกรณ์อีกประเภทหนึ่ง คือ ชุดหูฟังสื่อสารที่สามารถตัดเสียงรบกวนพร้อมทั้งสื่อสาร ซึ่งโดยทั่วไปแล้วใช้สำหรับนักบินในห้องเครื่องและมีราคาสูง ด้วยเหตุนี้ปัญญานิพนธ์ฉบับนี้ต้องการนำเสนอแนวคิดการสร้างอุปกรณ์สื่อสารที่ทำให้การสื่อสารกันระหว่างผู้ปฏิบัติงานเป็นไปได้ด้วยความราบรื่น สามารถส่งข้อความที่ต้องการสื่อสารกันอย่างถูกต้องครบถ้วน และราคาไม่แพง

### 1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนราคาประหยัด

### 1.3 ขอบเขตของปัญญานิพนธ์

1. ศึกษากระบวนการทำงานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้
2. เขียนโปรแกรมการตัดเสียงรบกวนด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (Least Mean Square Algorithm, LMS)
3. ศึกษาและสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสม สำหรับประยุกต์ใช้ในปัญญานิพนธ์
4. ทดลองใช้งานเพื่อตัดเสียงรบกวน โดยเปรียบเทียบจากอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน และเทียบกับการอาศัยโปรแกรม MATLAB
5. บันทึกผล วิเคราะห์ผล สรุปผล และจัดทำปัญญานิพนธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 รายละเอียดของปฏิญานิพนธ์

เนื้อหาที่จะกล่าวในปฏิญานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท เอกสารอ้างอิง และภาคผนวก ประกอบด้วยรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงที่มาและความสำคัญ วัตถุประสงค์ ขอบเขตโครงการ และรายละเอียดของปฏิญานิพนธ์ในแต่ละบท

บทที่ 2 ทฤษฎี หลักการ และความรู้ที่เกี่ยวข้อง กล่าวถึงหลักการของคลื่นเสียง ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ และทฤษฎีการกล้ำสัญญาณ (Modulation)

บทที่ 3 การออกแบบและโครงสร้าง กล่าวถึงหลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปฏิญานิพนธ์ แนวคิดการออกแบบในส่วนของฮาร์ดแวร์คือ การออกแบบแบบจำลองชิ้นงาน แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ที่ใช้ในปฏิญานิพนธ์ และในส่วนของซอฟต์แวร์คือ การเขียนโปรแกรม

บทที่ 4 การทดลอง และผลการทดลอง มีการทดลองการตัดเสียงรบกวน โดยเปรียบเทียบกับโปรแกรม MATLAB และจากอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน

บทที่ 5 บทวิจารณ์และสรุปผลการทดลอง กล่าวถึงการสรุปผลการดำเนินการในปฏิญานิพนธ์ทั้งหมด ปัญหาที่พบเจอ แนวทางการปรับปรุงแก้ไข

ในส่วนสุดท้ายของปฏิญานิพนธ์ เอกสารอ้างอิง ประกอบไปด้วยแหล่งที่มาของข้อมูล ความรู้ในการทำปฏิญานิพนธ์ และทฤษฎีต่าง ๆ ภาคผนวก แบ่งออกเป็น ภาคผนวก ก คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในปฏิญานิพนธ์ ภาคผนวก ข เอกสารปฏิญานิพนธ์ที่นำเสนอในงาน Instrumentation, Control and Automation Senior Project Conference 2018 (ICA SP-CON 2018) และภาคผนวก ค โปสเตอร์นำเสนอปฏิญานิพนธ์ในงาน KMITL Engineering Project Day 2018

## ทฤษฎี หลักการ และความรู้ที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีที่ใช้ในปริภูมิอนุพันธ์ฉบับนี้ประกอบไปด้วย 5 หัวข้อ ในหัวข้อแรก คลื่นเสียง กล่าวถึงความรู้ที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียงเบื้องต้น หัวข้อที่สอง ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข กล่าวถึงวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขเบื้องต้น วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอนิมพัลส์ไม่จำกัด (Infinite Impulse Response, IIR) และชนิดผลตอบสนองอนิมพัลส์จำกัด (Finite Impulse Response, FIR) หัวข้อที่สาม วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ กล่าวถึงหลักการทํางานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้และหลักการทํางานของกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด (Least Mean Square Algorithm) หัวข้อที่สี่ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปริภูมิอนุพันธ์ กล่าวถึงทฤษฎีเบื้องต้นของวงจรต่าง ๆ เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรบัฟเฟอร์ และวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นต้น และหัวข้อที่ห้า ทฤษฎีการกล้ำสัญญาณ กล่าวถึงการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด (Amplitude Modulation, AM) การกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ (Frequency Modulation, FM) และการกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่ (Frequency Shift Keying, FSK)

### 2.1 คลื่นเสียง

คลื่นเสียง เกิดจากการสั่นสะเทือนของวัตถุ เมื่อวัตถุได้มีการสั่นแล้วทำให้เกิดเสียงได้จะเรียกว่า แหล่งกำเนิดเสียง พลังงานที่ทำให้เกิดการสั่นของวัตถุจะถูกโอนถ่ายผ่านตัวกลางที่เรียกว่า อากาศ ทำให้ผู้ฟังได้ยินเสียง ดังนั้นการที่ผู้ฟังจะได้ยินเสียง จึงจำเป็นต้องอาศัยตัวกลาง

โดยทั่วไปแล้วมนุษย์มีประสาทสัมผัสการรับฟังคลื่นเสียง ในลักษณะของความดังและความถี่ของเสียง ซึ่งความถี่เสียงที่ต่ำที่สุดที่มนุษย์นั้นสามารถได้ยินได้จะอยู่ที่ 20 เฮิรตซ์ และความถี่เสียงที่สูงที่สุดที่มนุษย์นั้นสามารถได้ยินจะอยู่ที่ 20,000 เฮิรตซ์ เมื่อจำแนกความถี่ตามแหล่งกำเนิดเสียงที่พบโดยทั่วไป จะมีความถี่สอดคล้องแสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความถี่เสียงจำแนกตามแหล่งกำเนิดเสียง

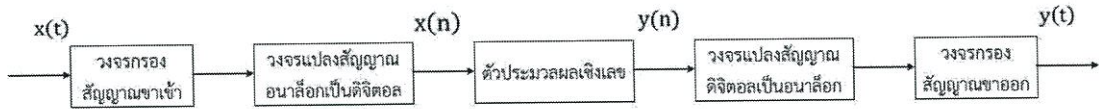
แหล่งกำเนิดเสียง	ความถี่เสียง
เสียงพูดของคนทั่วไป	300 – 4,000 เฮิรตซ์
เสียงจากเครื่องดนตรี	20 – 15,000 เฮิรตซ์
เสียงจากเครื่องเสียงสเตอริโอ	15 – 30,000 เฮิรตซ์
เสียงจากการทํางานของเครื่องจักร	1,250 – 12,500 เฮิรตซ์

### 2.2 ทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข

ในหัวข้อของทฤษฎีพื้นฐานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานและหลักการทํางานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอนิมพัลส์ไม่จำกัด และวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอนิมพัลส์จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรรองสัญญาณเชิงเลขคือ กระบวนการที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสเปกตรัมของสัญญาณให้มีสเปกตรัมเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ซึ่งอาจเป็นการเพิ่มหรือลดทอนค่าขนาดของสัญญาณในช่วงแถบความถี่ที่กำหนดไว้ ซึ่งในการวิเคราะห์และสังเคราะห์วงจรมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์เข้าช่วย จึงเรียกวงจรรองชนิดนี้ว่า “วงจรรองสัญญาณเชิงเลข” ลักษณะของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรองสัญญาณเชิงเลข

หลักการการทำงานของวงจรรองสัญญาณเชิงเลข ในขั้นต้นวงจรรองสัญญาณขาเข้า ทำการกรองสัญญาณขาเข้าให้สัญญาณอยู่ในช่วงความถี่ที่เหมาะสมกับอัตราการสุ่มตัวอย่างของตัวประมวลผลเชิงเลข ต่อมาสัญญาณขาเข้าซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อก  $x(t)$  จะถูกทำการแปลงสัญญาณด้วยวงจรแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter, ADC) ให้เป็นสัญญาณเชิงเลข  $x(n)$  อยู่ในรูปของเลขฐานสองซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการประมวลผล หลังจากนั้นสัญญาณเชิงเลข  $x(n)$  จะผ่านไปยังตัวประมวลผลเชิงเลข (Digital Processor) ทำหน้าที่คำนวณทางตัวเลขหรือกรองสัญญาณต่าง ๆ โดยอาศัยวงจรลอจิก ได้แก่ ตัวบวก ตัวคูณ และตัวลบ เป็นต้น ได้ผลลัพธ์มาเป็นสัญญาณเชิงเลข  $y(n)$  ต่อมาสัญญาณเชิงเลข  $y(n)$  จะถูกแปลงกลับไปเป็นสัญญาณอนาล็อกด้วยวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก (Digital to Analog Converter, DAC) เมื่อสัญญาณ  $y(n)$  ผ่านวงจรมีจะให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นสัญญาณอนาล็อก  $y(t)$  สุดท้ายผ่านวงจรรองสัญญาณขาออก ซึ่งเป็นการกรองสัญญาณขาออกให้อยู่ในช่วงความถี่เดียวกันกับวงจรรองสัญญาณขาเข้า เพื่อไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

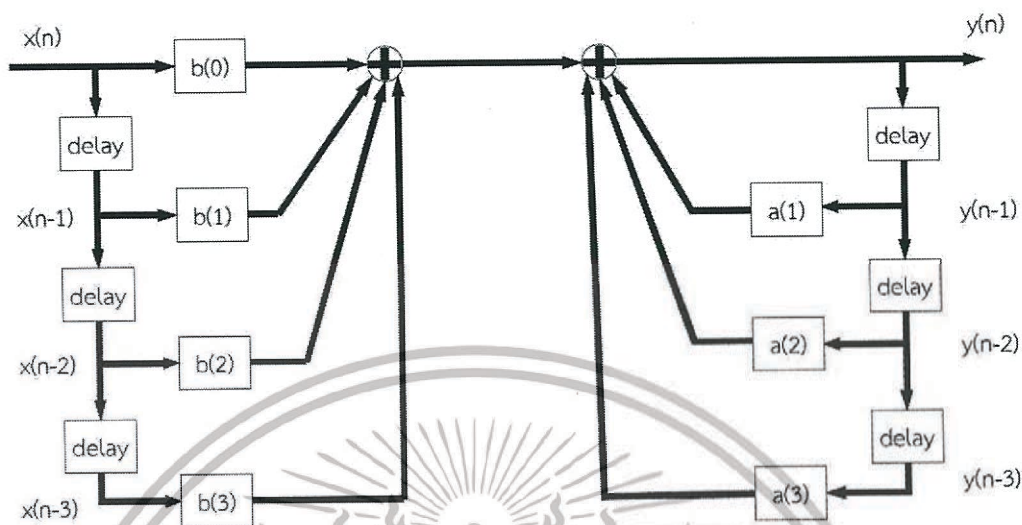
วงจรรองสัญญาณเชิงเลขสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของผลตอบสนองอิมพัลส์ ได้แก่ 1. วงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด 2. วงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด

### 2.2.1 วงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

วงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด เป็นวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดหนึ่ง ซึ่งสัญญาณขาออกของวงจรมีที่มาจากค่าการคำนวณระหว่างสัญญาณขาเข้า และสัญญาณขาออกก่อนหน้า มีความแตกต่างกับวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดที่สัญญาณขาออกจะทำการคำนวณจากสัญญาณขาเข้าเพียงอย่างเดียว การคำนวณของวงจรมีผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัดมีรูปแบบการคำนวณเป็นลักษณะแบบป้อนกลับ ส่งผลให้ถ้าออกแบบโครงสร้างระบบได้ไม่ดี จะทำให้วงจรไม่เสถียร

เมื่อได้ป้อนสัญญาณขาเข้าที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 เป็นช่วงระยะเวลาหนึ่งแก่วงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด เมื่อสัญญาณขาเข้าผ่านวงจรรองสัญญาณแล้ว ส่งผลให้เกิดสัญญาณขาออกที่มีค่าไม่เท่ากับ 0 และจะมีสัญญาณออกตลอดช่วงเวลา ถึงแม้ว่าสัญญาณขาเข้า

จะไม่ได้ถูกป้อนให้แก่วงจรแล้วก็ตาม ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด และตัวอย่างลักษณะวงจรกรองสัญญาณชนิดนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างโครงสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์ไม่จำกัด

จากตัวอย่างโครงสร้างวงจรในรูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ (2.1)

$$y(n) = b(0)x(n) + b(1)x(n-1) + b(2)x(n-2) + b(3)x(n-3) + a(1)y(n-1) + a(2)y(n-2) + a(3)y(n-3) \quad (2.1)$$

เมื่อ

$y(n)$  คือ สัญญาณขาออก

$x(n)$  คือ สัญญาณขาเข้า

$b(n)$  คือ สัมประสิทธิ์ป้อนไปข้างหน้า (Feedforward Coefficients)

$a(n)$  คือ สัมประสิทธิ์ป้อนกลับ (Feedback Coefficients)

จากสมการที่ (2.1) ทำการแปลงแซด (z-transform) และเขียนให้อยู่ในรูปมาตรฐานได้ดังสมการที่ (2.2) คือ สมการที่ใช้จำนวนตัวหน่วงเวลาฝั่งสัญญาณขาเข้าเท่ากับ 3 ตัว และใช้จำนวนตัวหน่วงเวลาฝั่งสัญญาณขาออกเท่ากับ 3 ตัว ในการคำนวณสัญญาณขาออก

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^3 b(k)z^{-k}}{1 - \sum_{k=0}^3 a(k)z^{-k}} \quad (2.2)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$Y(z)$  คือ สัญญาณขาออกที่ถูกแปลงแซด

$X(z)$  คือ สัญญาณขาเข้าที่ถูกแปลงแซด

หรือสมการที่มีการใช้ตัวห้วงเวลาทั้งฝั่งขาเข้าและฝั่งขาออกเป็นจำนวนใด ๆ เขียนอยู่ในรูปมาตรฐานได้ดังสมการที่ (2.3)

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\sum_{k=0}^N b(k)z^{-k}}{1 - \sum_{k=0}^M a(k)z^{-k}} \quad (2.3)$$

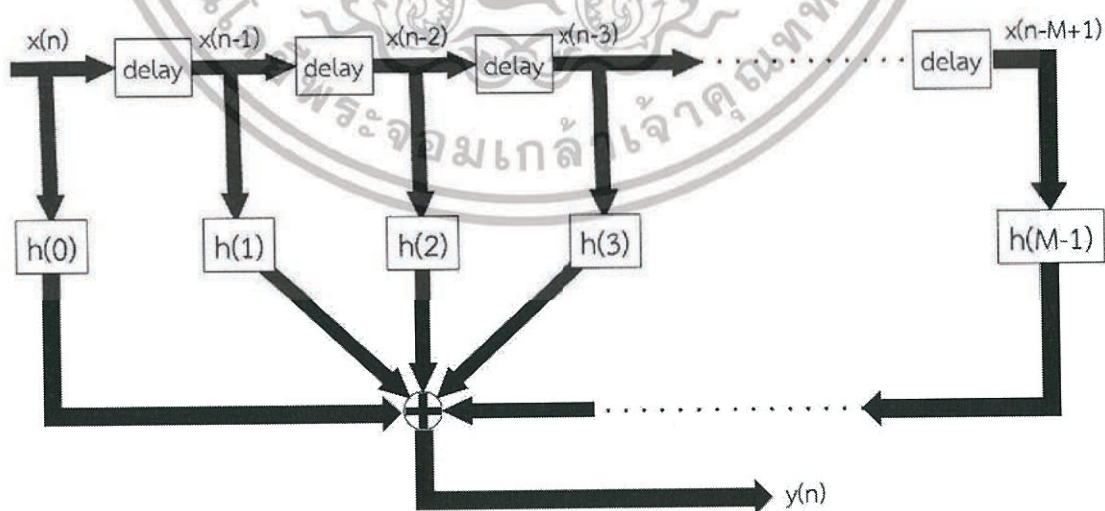
เมื่อ

$N$  คือ จำนวนตัวห้วงเวลาฝั่งสัญญาณขาเข้า

$M$  คือ จำนวนตัวห้วงเวลาฝั่งสัญญาณขาออก

## 2.2.2 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด

วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด เป็นวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตหนึ่ง จะให้สัญญาณขาออกก็ต่อเมื่อมีสัญญาณขาเข้าที่มีจำนวนจำกัดและไม่ใช่ค่า 0 เข้ามา วงจรกรองสัญญาณชนิดนี้ก็จะให้สัญญาณขาออกที่มีจำนวนจำกัดออกไป ถ้าหากว่าสัญญาณที่เข้ามาทั้งหมดมีค่าเท่ากับ 0 ในที่สุดแล้วสัญญาณขาออกของวงจรกรองสัญญาณก็จะให้ค่าเท่ากับ 0 เช่นกัน ซึ่งเป็นคุณลักษณะเด่นของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด ลักษณะของวงจรกรองสัญญาณชนิดนี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.3 เมื่อกำหนดให้  $h(0)$  ไปจนถึง  $h(M-1)$  คือ ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิต



รูปที่ 2.3 โครงสร้างวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถเขียนสมการสัญญาณขาออกของวงจรกรองเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดได้ดังสมการที่ (2.4) หรือกล่าวได้ว่าเป็น การคอนโวลูชัน (Convolution) กันระหว่าง ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรองสัญญาณ  $h(n)$  กับสัญญาณขาเข้า  $x(n)$

$$y(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k)x(n-k) = h(n) * x(n) \quad (2.4)$$

เมื่อ

$y(n)$  คือ สัญญาณขาออก

$x(n)$  คือ สัญญาณขาเข้า

$h(n)$  คือ ผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ หรือสัมประสิทธิ์วงจรกรองสัญญาณ

$M$  คือ จำนวนตัวหน่วงเวลาที่ใช้ในวงจรกรองสัญญาณ

ในการออกแบบวงจรกรองสัญญาณสามารถทำการกำหนดลักษณะสัญญาณที่ต้องการ จากวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัดได้ โดยการเปลี่ยนแปลงผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรองสัญญาณ เช่น ต้องการวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขความถี่ต่ำ วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขความถี่แถบผ่าน หรือวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขความถี่สูง สามารถทำได้ด้วยการปรับค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรองสัญญาณ ซึ่งวงจรกรองสัญญาณแต่ละแบบก็จะมีชุดของค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรองสัญญาณที่ไม่เหมือนกัน

จากคุณสมบัติของการแปลงแซด

$$y(n) = h(n) * x(n) \xrightarrow{Z} H(Z) \cdot X(Z) \quad (2.5)$$

$$y(n) = h(n) * x(n) \xleftarrow{Z^{-1}} H(Z) \cdot X(Z) \quad (2.6)$$

เมื่อ

$H(Z)$  คือ สเปกตรัมผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ของวงจรกรองสัญญาณ

$X(Z)$  คือ สเปกตรัมสัญญาณขาเข้า

ในการวิเคราะห์หากอาศัยการแปลงดิสครีตฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม (Discrete Fourier Transform, DFT) พบว่าคุณสมบัติการคอนโวลูชันดังสมการที่ (2.5) และสมการที่ (2.6) กล่าวคือ เมื่อทำการแปลงดิสครีตฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มของการคอนโวลูชันระหว่างค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองสัญญาณและสัญญาณขาเข้า จะมีค่าเท่ากับการคูณกันของสเปกตรัมสัญญาณขาเข้ากับสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณ จากคุณสมบัตินี้หากทำการกำหนดสเปกตรัมค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณให้เป็นไปตามที่ต้องการ จะสามารถแปลงกลับหาค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์หรือสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณได้เช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวคิดเบื้องต้นวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด อาจพิจารณาจากการประมวลผลค่าเฉลี่ยของข้อมูล แสดงดังตัวอย่างที่ 2.1

**ตัวอย่าง 2.1** หากต้องการทราบจำนวนรถเฉลี่ยต่อนาทีที่เข้ามาภายในห้างสรรพสินค้าในช่วงเวลา 5 นาที และมีข้อมูลดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ข้อมูลจำนวนรถ

นาทีที่	จำนวนรถต่อนาที (x)	จำนวนรถเฉลี่ย (y)
1	10	-
2	22	-
3	24	-
4	42	-
5	37	27
6	77	40.4
7	89	53.8
8	22	53.4
9	63	57.6

จากตารางที่ 2.2 หากต้องการทราบจำนวนรถเฉลี่ยต่อนาทีในช่วงเวลา 5 นาที หาได้จากการนำจำนวนของรถในแต่ละนาที ตั้งแต่ นาทีที่ 1 จนถึง นาทีที่ 5 มาหาค่าเฉลี่ย สามารถทำการคำนวณได้ดังนี้  $(10+22+24+42+37)/5 = 27$  คันต่อนาที หากต้องการทราบจำนวนรถเฉลี่ยต่อในช่วงเวลา 5 นาที ตั้งแต่ นาทีที่ 2 ไปจนถึง นาทีที่ 6 สามารถทำได้ในลักษณะเดียวกัน  $(22+24+42+37+77)/5 = 40.4$  คันต่อนาที จากกรคำนวณข้างต้น การหาจำนวนรถต่อนาทีเฉลี่ยในช่วง 5 นาทีแรก สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.7)

$$y(5) = \frac{1}{5}[x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(5)] \quad (2.7)$$

หรือเขียนในการหาค่าเฉลี่ยจำนวนรถในช่วง 5 นาที ณ นาทีที่ n ดังสมการที่ (2.8)

$$y(n) = \frac{1}{5}[x(n-4) + x(n-3) + x(n-2) + x(n-1) + x(n)] = \frac{1}{5}\sum_{k=n-4}^n x(k) \quad (2.8)$$

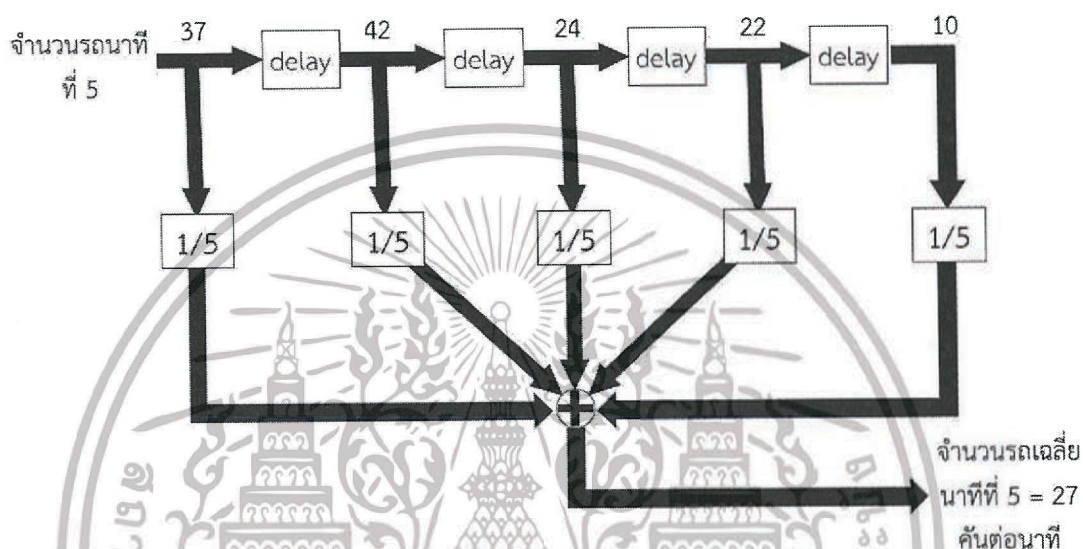
เมื่อ

$y(n)$  คือ ค่าเฉลี่ยจำนวนรถต่อนาทีที่ n

$x(n)$  คือ จำนวนรถนาทีที่ n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ (2.8) การหาจำนวนรถเฉลี่ยนาที่ที่  $n$  สามารถหาได้จากจำนวนรถนาที่ที่  $n$  และจำนวนรถนาที่ที่  $n-1, n-2, n-3, n-4$  มาเฉลี่ย สามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.4 จะเห็นว่า มีลักษณะการทำงานเป็นวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด ในรูปที่ 2.3 คือ สัญญาณขาออกของวงจรกรองสัญญาณชนิดนี้จะถูกทำให้หน่วงเวลาไปเป็นจำนวน  $M$  ค่า กำหนดให้ค่าของ  $M$  เท่ากับจำนวนข้อมูลที่จะต้องใช้ในการคำนวณ และในการคำนวณสัญญาณขาออกของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตผลตอบสนองอิมพัลส์จำกัด จะทำการคำนวณจากสัญญาณขาเข้าเท่านั้น จำนวนสัญญาณขาออกก่อนหน้านั้นจะไม่ได้ถูกนำมาใช้ในการคำนวณใด ๆ ทั้งสิ้น



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมการหาจำนวนรถเฉลี่ยนาที่ที่ 5

ความแตกต่างในรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.3 คือ ในรูปที่ 2.4 มีการใช้ค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์เท่ากับ  $1/5$  เท่ากันทั้งหมด ซึ่งในกรณีใช้งานจริง ค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณอิมพัลส์ในวงจรจะมีค่าที่แตกต่างกันไปในแต่ละตัว ตามวัตถุประสงค์ของวงจรมัน ๆ จากตัวอย่างการคำนวณค่าเฉลี่ยจำนวนรถนาที่ที่  $n$  ตัวประมวลผลเชิงเลขจะทำการกำจัดจำนวนรถที่นาที่ที่เก่าที่สุดทิ้งไป เพื่อรองรับการเลื่อนตำแหน่งของจำนวนรถที่นาที่ที่  $n$  โครงสร้างที่ใช้กระบวนการเลื่อนตำแหน่งของสัญญาณขาเข้าเช่นนี้ โดยทั่วไปจะเรียกว่า โครงสร้างแบบ “Transversal”

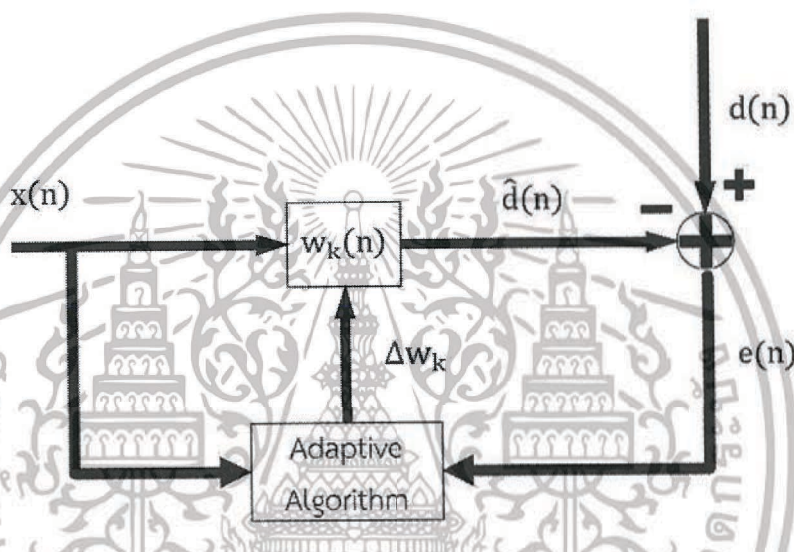
## 2.3 วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้

วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้ เป็นวงจรกรองสัญญาณที่สามารถทำการปรับค่าสัมประสิทธิ์ได้โดยอัตโนมัติให้เข้ากับสภาวะและเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์คือ การลดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (Mean-Square Error) ให้เหลือน้อยที่สุด หรือมีลู่เข้าสู่ 0 ในหัวข้อมงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้ จะกล่าวถึงหลักการทำงานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้ และหลักการทำงานของกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.1 หลักการทำงานของวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้

หลักการทำงานของวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ แสดงดังรูปที่ 2.5 กระบวนการปรับตัว (Adaptive Algorithm) ดำเนินการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณเพื่อให้สัญญาณขาเข้า  $x(n)$  ผ่านวงจรรองสัญญาณที่มีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ  $w_k(n)$  ได้ผลลัพธ์คือสัญญาณขาออก  $\hat{d}(n)$  ที่มีความใกล้เคียงกับสัญญาณที่ต้องการ  $d(n)$  วงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้จะมีกระบวนการทำงานวนซ้ำ ๆ ในการลดค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองให้เหลือน้อยที่สุด ซึ่งดำเนินการไปพร้อมกับการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณ และค่าความผิดพลาด  $e(n)$  ที่ผ่านการคำนวณมาแล้ว จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการปรับตัวของวงจรรองสัญญาณ



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมของวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้

จากบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 2.5 ค่าความผิดพลาดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.9)

$$e(n) = d(n) - \hat{d}(n) \quad (2.9)$$

เมื่อ

- $e(n)$  คือ ค่าความผิดพลาด
- $d(n)$  คือ สัญญาณที่ต้องการ
- $\hat{d}(n)$  คือ สัญญาณขาออก

จากสมการที่ (2.9) ค่าของสัญญาณขาออก  $\hat{d}(n)$  เมื่อผ่านวงจรรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ ที่มีค่าสัมประสิทธิ์  $w_k(n)$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.10)

$$\hat{d}(n) = \sum_{k=0}^{M-1} w_k(n)x(n-k) \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$d(n)$  คือ สัญญาณขาออก

$w_k$  คือ สัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้

$M$  คือ จำนวนสัมประสิทธิ์ในวงจรรองสัญญาณ หรือจำนวนข้อมูลที่ใช้ในการคำนวณ

และการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณที่ทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสองเหลือน้อยที่สุด สามารถหาได้จากสมการที่ (2.11) หรือสมการ Wiener-Hopf

$$R_x w_k = r_{dx} \quad (2.11)$$

เมื่อ

$R_x$  คือ อัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ของสัญญาณขาเข้า  $x(n)$

$r_{dx}$  คือ สหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-correlation) ระหว่างสัญญาณที่ต้องการ  $d(n)$  และสัญญาณขาเข้า  $x(n)$

จากสมการที่ (2.11) การหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้ จะต้องทราบค่าของ  $R_x$  และ  $r_{dx}$  ซึ่งสามารถหาได้จากการประมาณค่า เพื่อที่จะลดความยุ่งยากในการคำนวณให้น้อยลง ในกระบวนการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณที่เหมาะสม ทำการพิจารณาการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณใหม่ ได้ดังสมการที่ (2.12)

$$w_k(n+1) = w_k(n) - \Delta w_k(n) \quad (2.12)$$

เมื่อ

$\Delta w_k(n)$  คือ ค่าปรับปรุงสัมประสิทธิ์

หลักสำคัญของวงจรรองสัญญาณเชิงเลขคณิตปรับตัวได้คือ การที่จะนิยาม  $\Delta w_k$  หรือค่าปรับปรุงสัมประสิทธิ์ว่ามีกระบวนการสังเคราะห์ขึ้นมาอย่างไร ซึ่งแน่นอนว่าค่าที่ได้มาจะต้องทำให้ค่าเฉลี่ยผิดพลาดกำลังสองมีค่าน้อยลง และในกระบวนการหาค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณที่แตกต่างกันไปแต่ละชนิด จะต้องมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.11) ด้วยเหตุนี้ภายใต้สภาวะเงื่อนไขต่าง ๆ วงจรรองสัญญาณจะต้องดำเนินกระบวนการสังเคราะห์ค่าปรับปรุงสัมประสิทธิ์  $\Delta w_k$  ในลักษณะที่เมื่อเวลาผ่านไป ค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรรองสัญญาณจะต้องมีค่าลู่เข้าใกล้ค่าอินเวอร์สของอัตสหสัมพันธ์สัญญาณขาเข้า  $R_x^{-1}$  คูณกับค่าสหสัมพันธ์ไขว้ระหว่างสัญญาณที่ต้องการและสัญญาณขาเข้า  $r_{dx}$  ดังสมการที่ (2.13)

$$\lim_{n \rightarrow \infty} w_k(n) = R_x^{-1} r_{dx} \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 หลักการทำงานของกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

กระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด เป็นหนึ่งในหลาย ๆ กระบวนการที่ใช้ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข โดยทั่วไปแล้วมีแนวคิดพื้นฐานที่มาจากกระบวนการสตีปเปสแตสเซนต์ (Steepest Descent Algorithm) ซึ่งเป็นหนึ่งในกระบวนการที่ใช้ในการประมาณค่าเช่นกัน หลักการทำงานของกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด เริ่มต้นจากการกำหนดค่าปรับปรุงสัมประสิทธิ์  $\Delta w_k(n)$  ดังสมการที่ (2.14)

$$\Delta w_k(n) = \mu \nabla e^2(n) \quad (2.14)$$

เมื่อ

$\nabla$  คือ ตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์เวกเตอร์

$\mu$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า (Step Size)

$e^2(n)$  คือ ค่าความผิดพลาดกำลังสอง

จากสมการที่ (2.14) สามารถพิจารณาสมการที่ (2.12) เขียนใหม่ได้ดังสมการที่ (2.15)

$$w_k(n+1) = w_k(n) - \mu \nabla e^2(n) \quad (2.15)$$

นิยามตัวดำเนินการเชิงอนุพันธ์เวกเตอร์  $\nabla$  ดังสมการที่ (2.16)

$$\nabla = \left[ \frac{\partial}{\partial w_0} \quad \frac{\partial}{\partial w_1} \quad \dots \quad \frac{\partial}{\partial w_{M-1}} \right]^T \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.9) ผลของการดำเนินการเชิงอนุพันธ์เวกเตอร์ค่าความผิดพลาด จะได้ดังสมการที่ (2.17)

$$\nabla e(n) = -x(n) \quad (2.17)$$

จากสมการที่ (2.17) ผลของการดำเนินการเชิงอนุพันธ์เวกเตอร์ค่าความผิดพลาดกำลังสอง จะได้ดังสมการที่ (2.18)

$$\nabla e^2(n) = -2e(n)x(n) \quad (2.18)$$

ดังนั้นสมการที่ใช้สำหรับการประมาณค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด แสดงดังสมการที่ (2.19)

$$w_k(n+1) = w_k(n) + 2\mu e(n)x(n) \quad (2.19)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการทั้งหมดของกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด สามารถสรุปขั้นตอนดำเนินการในรูปเวกเตอร์ได้ตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 สรุปขั้นตอนวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

การกำหนดตัวแปรและค่าเริ่มต้น	
ด้านขาเข้า : เวกเตอร์สัมประสิทธิ์	$\mathbf{w}_k(n) = [w_0(n) \ w_1(n) \ \dots \ w_{M-1}(n)]^T$
เวกเตอร์สัญญาณขาเข้า	$\mathbf{x}(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-M+1)]^T$
สัญญาณที่ต้องการ	$d(n)$
ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า	
ด้านขาออก : สัญญาณขาออก	$\hat{d}(n)$
เวกเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ปรับค่าแล้ว	$\mathbf{w}_k(n+1)$
การประมวลผล	
ขั้นตอนที่ 1. การกรองสัญญาณ	$\hat{d}(n) = \mathbf{w}_k^T(n)\mathbf{x}(n)$
ขั้นตอนที่ 2. การประมาณค่าความผิดพลาด (เสียงพูดที่ต้องการ)	$e(n) = d(n) - \hat{d}(n)$
ขั้นตอนที่ 3. การปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด	$\mathbf{w}_k(n+1) = \mathbf{w}_k(n) + 2\mu e(n)\mathbf{x}(n)$

## 2.4 วงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปริภูมิสัญญาณ

หัวข้อวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในปริภูมิสัญญาณ จะกล่าวถึงทฤษฎี ความรู้พื้นฐานและสมการต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณของวงจรขยายสัญญาณชนิดกลับเฟส วงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส วงจรบัฟเฟอร์ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันได และวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

### 2.4.1 วงจรขยายสัญญาณชนิดกลับเฟส

วงจรขยายสัญญาณชนิดกลับเฟส เป็นวงจรขยายสัญญาณที่ใช้โอปแอมป์เป็นวงจรพื้นฐาน โดยสัญญาณขาออกจากวงจร จะมีมุมเฟสที่ต่างกัน 180 องศา โครงสร้างของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.6 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณขาเข้า ถูกป้อนเข้าที่ขั้วลบของโอปแอมป์ และขั้วบวกจะถูกต่อเข้ากับกราวด์ของวงจร สัญญาณที่ถูกป้อนเข้าผ่านตัวต้านทาน  $R_1$  และ  $R_2$  ซึ่งเป็นตัวป้อนกลับแบบลบ สามารถหาอัตราขยายสัญญาณได้จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ดังสมการที่ (2.20)

$$\frac{v_s - v_i}{R_1} + \frac{v_o - v_i}{R_2} = i_i \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$v_s$  คือ แรงดันสัญญาณขาเข้า

$v_o$  คือ แรงดันสัญญาณขาออก

$v_i$  คือ แรงดันที่ขั้วลบของออปแอมป์

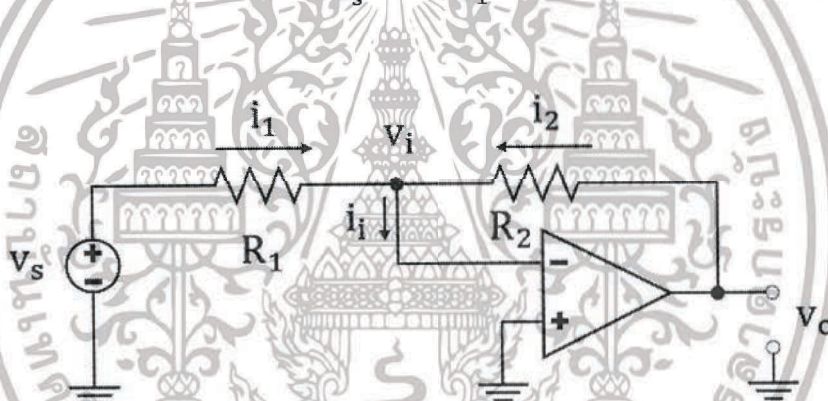
$i_i$  คือ กระแสไหลเข้าขั้วลบของออปแอมป์

เนื่องจากความต้านทานที่สัญญาณขาเข้าของออปแอมป์มีค่าที่สูงมากจนถึงอนันต์ จึงเปรียบได้ว่าไม่มีกระแสไหลเข้าขั้วลบของออปแอมป์ พิจารณาใหม่ได้ดังสมการที่ (2.21)

$$\frac{v_s}{R_1} + \frac{v_o}{R_2} = 0 \quad (2.21)$$

จะได้อัตราขยายสัญญาณขาออกต่อสัญญาณขาเข้าดังสมการที่ (2.22)

$$\frac{v_o}{v_s} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (2.22)$$



รูปที่ 2.6 โครงสร้างวงจรขยายสัญญาณชนิดกลับเฟส

#### 2.4.2 วงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส

วงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส เป็นวงจรขยายสัญญาณที่ใช้ออปแอมป์เป็นวงจรพื้นฐาน โดยสัญญาณขาออกจากวงจรมีมุมเฟสที่เท่ากับสัญญาณขาเข้า มีอัตราขยายสัญญาณต่ำสุดอยู่ที่ 1 เท่า โครงสร้างของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.7 จากรูปจะเห็นว่าสัญญาณขาเข้าถูกป้อนเข้าที่ขั้วบวกของออปแอมป์ สามารถหาอัตราขยายสัญญาณได้จากกฎกระแสไฟฟ้าของเคอร์ชอฟฟ์ ดังสมการที่ (2.23)

$$\frac{0-v_i}{R_1} + \frac{v_o-v_i}{R_2} = i_i \quad (2.23)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$v_o$  คือ แรงดันสัญญาณขาออก

$v_i$  คือ แรงดันที่ขั้วลบของออปแอมป์

$i_i$  คือ กระแสไหลเข้าขั้วลบของออปแอมป์

เนื่องจากความต้านทานภายในออปแอมป์มีค่าสูงมาก ส่งผลให้ไม่มีกระแสไหลเข้าที่ขาอินพุตทั้งขั้วบวกและขั้วลบของออปแอมป์ และเปรียบเสมือนว่าขาอินพุตของทั้งสองขั้วเชื่อมติดกัน พิจารณาได้ดังสมการที่ (2.24)

$$v_i = v_s \quad (2.24)$$

เมื่อ

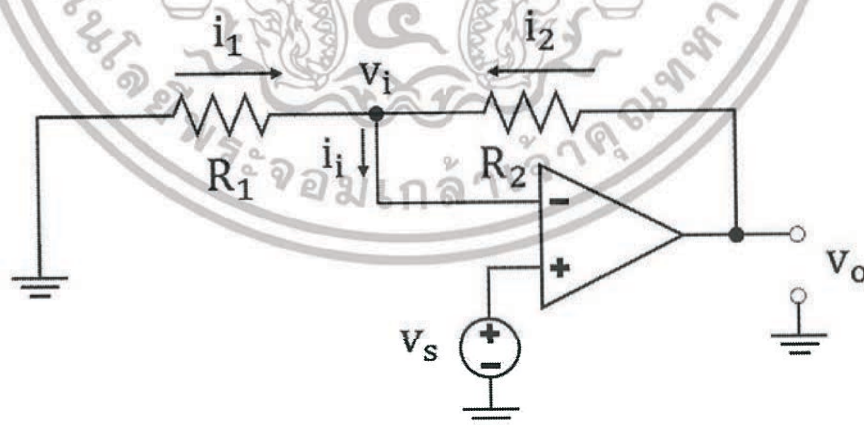
$v_s$  คือ แรงดันสัญญาณขาเข้า

จากสมการที่ (2.24) สามารถเขียนสมการที่ (2.23) ใหม่ ได้ดังสมการที่ (2.25)

$$\frac{0 - v_s}{R_1} + \frac{v_o - v_s}{R_2} = 0 \quad (2.25)$$

ซึ่งจะได้อัตราขยายสัญญาณขาออกต่อสัญญาณขาเข้า ดังสมการที่ (2.26)

$$\frac{v_o}{v_s} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (2.26)$$

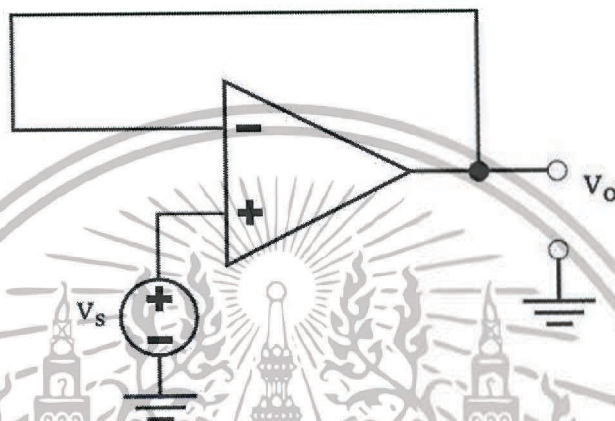


รูปที่ 2.7 โครงสร้างวงจรขยายสัญญาณชนิดไม่กลับเฟส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 วงจรบัฟเฟอร์

วงจรบัฟเฟอร์หรือวงจรตามแรงดัน มีลักษณะคล้ายกันกับวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส ในรูปที่ 2.7 แต่มีเงื่อนไขเพิ่มเติมคือ มีค่า  $R_2 = 0$  หรือว่าลัดวงจร และค่า  $R_1 = \infty$  หรือว่าเปิดวงจร โครงสร้างวงจรแสดงดังรูปที่ 2.8 วงจรบัฟเฟอร์เป็นวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟสที่มีอัตราขยายสัญญาณเท่ากับ 1 หรืออีกนัยหนึ่ง สัญญาณขาเข้าเท่ากับสัญญาณขาออก เป็นวงจรที่มีไว้เพื่อป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณขาออกที่จะเกิดขึ้นเมื่อนำไปต่อกับโหลดต่าง ๆ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างวงจรบัฟเฟอร์

### 2.4.4 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน

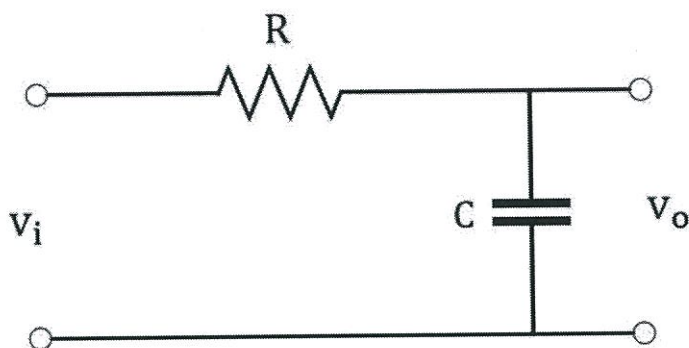
วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน เป็นวงจรที่จะยอมให้ความถี่ของสัญญาณขาเข้าตั้งแต่ 0 เฮิรตซ์ ไปจนถึงความถี่ตัดที่ได้กำหนดไว้ผ่านได้โดยไม่มีการลดทอน หากเลยจุดกำหนดความถี่ต่ำผ่านแล้ว สัญญาณขาเข้าที่ความถี่สูงขึ้นจะถูกลดทอนลงไปตามลำดับ โครงสร้างของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอย่างง่ายแสดงดังรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นว่าวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอย่างง่ายจะใช้เพียงแค่วัสด์ต้านทานและตัวเก็บประจุเพียงเท่านั้น ซึ่งสามารถคำนวณหาความถี่ตัด (Cut-off Frequency) ได้จากสมการที่ (2.27)

$$\omega_c = \frac{1}{RC} = 2\pi f_c \quad (2.27)$$

เมื่อ

- $\omega_c$  คือ ความถี่ตัดเชิงมุม มีหน่วยเป็นเรเดียน/วินาที
- $f_c$  คือ ความถี่ตัดเชิงเส้น มีหน่วยเป็นเฮิรตซ์
- $R$  คือ ความต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโอห์ม
- $C$  คือ ความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็นฟารัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 วงจรกรองความถี่ต่ำผ่านอย่างง่าย

#### 2.4.5 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันได

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันได ทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก โดยอาศัยหลักการในการแปลงน้ำหนักของรหัสเลขฐานสองที่มาจากไมโครคอนโทรลเลอร์ หรือไมโครคอมพิวเตอร์ เมื่อสัญญาณดิจิทัลผ่านวงจรแปลงสัญญาณจะกลายเป็นสัญญาณอนาล็อก ความละเอียดของแรงดันสัญญาณอนาล็อกนั้นจะขึ้นอยู่กับขนาดบิตของวงจรแปลงสัญญาณ หากใช้วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อกขนาด  $n$  บิต จะสามารถหาความละเอียดของแรงดันสัญญาณขาออกได้ตามสมการที่ (2.28)

$$Res = 2^n \quad (2.28)$$

เมื่อ

Res คือ ความละเอียดของสัญญาณขาออก

$n$  คือ ขนาดบิตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก

วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันไดมีข้อดี ในด้านการออกแบบและการสร้างวงจรที่ง่าย เพราะว่ามีการใช้ค่าความต้านทานเพียง 2 ค่าเท่านั้น คือ  $R$  และ  $2R$  ตัวอย่างวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันไดขนาด  $n$  บิต แสดงดังรูปที่ 2.10 บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดคือ บิตที่  $A_n$  อยู่ที่ตำแหน่งขวามือสุดของวงจร บิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดคือ บิตที่  $A_1$  อยู่ที่ตำแหน่งซ้ายมือสุดของวงจร และสามารถหาค่าแรงดันสัญญาณขาออกได้จากสมการที่ (2.29)

$$V_o = -V_r \left( \frac{A_n}{2^1} + \frac{A_{n-1}}{2^2} + \frac{A_{n-2}}{2^3} + \frac{A_{n-3}}{2^4} + \dots + \frac{A_1}{2^n} \right) \quad (2.29)$$

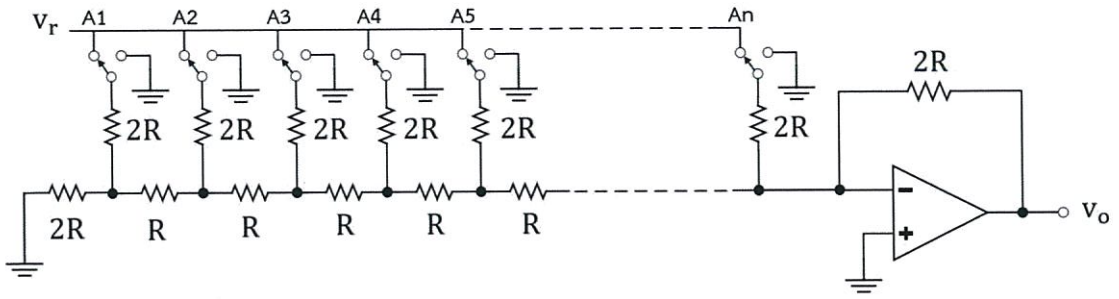
เมื่อ

$A_k$  คือ สถานะของบิตที่  $k$  เมื่อ  $k = 1, 2, 3, \dots, n$

$V_r$  คือ แรงดันอ้างอิง

$V_o$  คือ แรงดันสัญญาณขาออก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันได

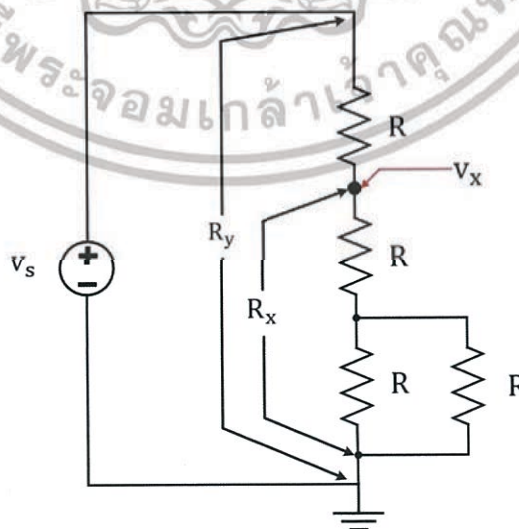
2.4.6 วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าคือ วงจรที่มีหน้าที่ในการแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับมาจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าหรือจากวงจรอื่น ๆ ประกอบไปด้วยตัวต้านทานตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป ต่ออนุกรมกัน ตัวต้านทานแต่ละตัวที่นำมาต่อในวงจรจะทำหน้าที่ในการแบ่งแรงดันไฟฟ้า ตัวอย่างวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยตัวต้านทาน 4 ตัวแสดงดังรูปที่ 2.11 ในการคำนวณแรงดันไฟฟ้า ณ จุดที่อยู่ระหว่างตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมหรือขนานกันอยู่ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.30) ซึ่งมีที่มาจากกฎของโอห์ม

$$V_x = V_s \left( \frac{R_x}{R_y} \right) \tag{2.30}$$

เมื่อ

- $V_x$  คือ แรงดันไฟฟ้า ณ จุด x
- $V_s$  คือ แรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้า
- $R_x$  คือ ความต้านทานรวม ณ จุด x
- $R_y$  คือ ความต้านทานรวมทั้งหมด



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 ทฤษฎีการกล้ำสัญญาณ

ทฤษฎีการกล้ำสัญญาณหรือการมอดูเลต ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ติดต่อสื่อสาร ซึ่งวัตถุประสงค์ในการติดต่อสื่อสาร คือการส่งผ่านข้อมูลข่าวสารจากภาคส่งสัญญาณ ลงบนช่องสื่อสารไปจนถึงภาครับสัญญาณ ก่อนที่จะนำสัญญาณข้อมูลลงบนช่องสื่อสารจะต้องถูกนำไปปรับคุณลักษณะของสัญญาณให้มีความเหมาะสมที่ภาคส่งสัญญาณเสียก่อน เรียกกระบวนการนี้ว่า การกล้ำสัญญาณ และที่ภาครับสัญญาณจะมีกระบวนการที่กลับกันเพื่อที่แปลงสัญญาณข้อมูลที่ถูกปรับคุณลักษณะไปแล้ว ให้กลับมาเป็นสัญญาณข้อมูลดั้งเดิมก่อนที่จะถูกปรับคุณลักษณะ จะเรียกกระบวนการนี้ว่า การกล้ำสัญญาณกลับหรือการดีมอดูเลต (Demodulation) การกล้ำสัญญาณอาจกล่าวได้ว่าเป็นกระบวนการนำสัญญาณข้อมูลผสมเข้ากับสัญญาณคลื่นพาห้ (Carrier Signal) ความถี่ค่า ๆ หนึ่ง เพื่อไม่ให้สัญญาณข้อมูลต่าง ๆ ทับซ้อนและรบกวนกันในการติดต่อสื่อสาร ซึ่งสามารถพิจารณาแถบความถี่ในการใช้งานต่าง ๆ ได้ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แถบความถี่และการใช้งาน

แถบความถี่	ชื่อแถบความถี่	การใช้งาน
3-30 kHz	ความถี่ต่ำมาก (Very Low Frequency : VLF)	ระบบนำวิถีระยะไกล ระบบโซนาร์
30-300 kHz	ความถี่ต่ำ (Low Frequency : LF)	ระบบนำวิถี
300-3,000 kHz	ความถี่ปานกลาง (Medium Frequency : MF)	ระบบวิทยุ AM
3-30 MHz	ความถี่สูง (High Frequency : HF)	ระบบโทรเลข ระบบโทรศัพท์
30-300 MHz	ความถี่สูงมาก (Very High Frequency : VHF)	ระบบแพร่รูปโทรศัพท์ VHF ระบบวิทยุ FM ระบบสื่อสารของตำรวจ
0.3-3 GHz	ความถี่สูงยิ่ง (Ultra High Frequency : UHF)	ระบบแพร่รูปโทรศัพท์ UHF ระบบโทรศัพท์เคลื่อนที่ ระบบเรดาร์ความปลอดภัย ระบบสื่อสารดาวเทียม ระบบสื่อสาร LAN ชนิดไร้สาย

โดยทั่วไปแล้วนิยามของการกล้ำสัญญาณคือ กระบวนการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติบางอย่าง เช่น ขนาด ความถี่ หรือเฟสของสัญญาณคลื่นพาห้ ให้มีลักษณะเป็นไปตามลักษณะของสัญญาณข้อมูล และในปัจจุบันนิยมใช้สัญญาณรูปไซน์เป็นสัญญาณคลื่นพาห้ในกระบวนการ การกล้ำสัญญาณ ที่กล่าวถึงในปริญญาณิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่ การกล้ำสัญญาณเชิงขนาด (Amplitude Modulation) การกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ (Frequency Modulation) และการกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่ (Frequency Shift Keying)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.1 การกล้ำสัญญาณเชิงขนาด

การกล้ำสัญญาณเชิงขนาดคือ การเปลี่ยนแปลงขนาดของสัญญาณคลื่นพาห์ ให้มีลักษณะเป็นไปตามขนาดของสัญญาณของข้อมูลที่จะทำการกล้ำสัญญาณ ในสมการที่ (2.31) แสดงถึงองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประกอบรวมกันเป็นสัญญาณคลื่นพาห์

$$c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t) \quad (2.31)$$

เมื่อ

$c(t)$  คือ สัญญาณคลื่นพาห์

$A_c$  คือ ขนาดสูงสุดของสัญญาณคลื่นพาห์

$f_c$  คือ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาห์

กำหนดให้  $v(t)$  คือ สัญญาณข้อมูลหรือเรียกอีกชื่อว่าสัญญาณเบสแบนด์ (Baseband) นำมากล้ำสัญญาณ จะสามารถหาสัญญาณที่ได้จากกระบวนการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดได้จากสมการที่ (2.32)

$$S_{AM}(t) = [A_c + v(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (2.32)$$

เมื่อ

$S_{AM}(t)$  คือ สัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด

สามารถเขียนสมการที่ (2.32) ได้อีกรูปแบบหนึ่ง ดังสมการที่ (2.33) เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์สัญญาณ

$$S_{AM}(t) = A_c [1 + m(t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (2.33)$$

เมื่อ

$m(t)$  คือ สัญญาณข้อมูลที่ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานด้วยขนาดสูงสุดของสัญญาณคลื่นพาห์ที่มีขนาดเท่ากับ  $A_c$

ในกระบวนการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด จะมีการระบุค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญอยู่ค่าหนึ่ง เรียกว่า ดรรชนีการกล้ำสัญญาณ แทนด้วยสัญลักษณ์  $\mu$  กำหนดให้ให้มีค่าสูงสุดเท่ากับค่าสูงสุดของของสัญญาณ  $m(t)$  สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2.34) ตัวอย่างการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดด้วยสัญญาณไซน์ซอชอยด์ แสดงดังตัวอย่างที่ 2.2

$$\mu = \frac{A_m}{A_c} \quad (2.34)$$

เมื่อ  $A_m$  คือ ขนาดของสัญญาณข้อมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวอย่างที่ 2.2** สัญญาณข้อมูลที่จะนำไปกล้ำสัญญาณเชิงขนาด มีลักษณะเป็นสัญญาณไซน์ซอซด์ เขียนเป็นสมการได้ดังสมการที่ (2.35) โดยในการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด สัญญาณคลื่นพาห้จะมีลักษณะตามสมการที่ (2.32)

$$v(t) = A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (2.35)$$

สัญญาณ  $v(t)$  ถูกทำให้เป็นบรรทัดฐานด้วยขนาดสูงสุดของสัญญาณคลื่นพาห้ตั้งโครงสร้างในสมการ (2.33) สามารถเขียนสมการของ  $m(t)$  ได้ดังสมการที่ (2.36)

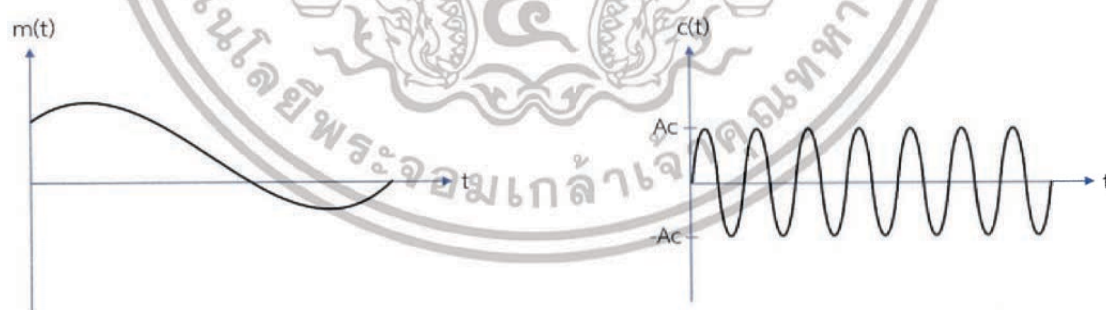
$$m(t) = \frac{A_m}{A_c} \cos(2\pi f_m t) \quad (2.36)$$

จากสมการที่ (2.34) และสมการที่ (2.36) สามารถเขียนสมการสัญญาณเบสแบนด์ที่ผ่านกระบวนการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดได้ดังสมการที่ (2.37)

$$S_{AM}(t) = A_c [1 + \mu \cos(2\pi f_m t)] \cos(2\pi f_c t) \quad (2.37)$$

จะเห็นได้ว่าสมการที่ (2.37) จะมีลักษณะเหมือนกับสมการที่ (2.33) ซึ่งก็คือ นิยามสัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณระหว่างสัญญาณคลื่นพาห้และสัญญาณข้อมูล

รูปที่ 2.12 (ก) คือ ตัวอย่างสัญญาณข้อมูล  $m(t)$  ที่จะถูกนำไปกล้ำสัญญาณเชิงขนาดเข้ากับสัญญาณคลื่นพาห้ในรูปที่ 2.12 (ข)

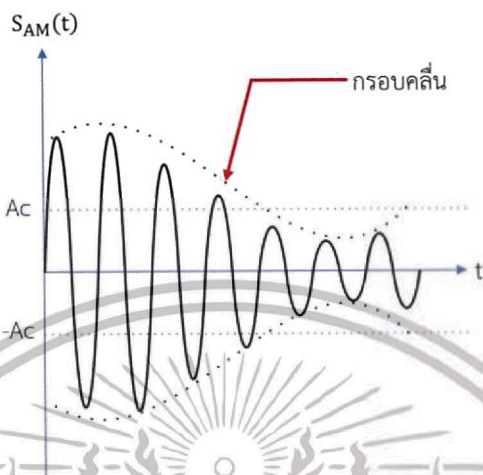


ก. สัญญาณข้อมูล  $m(t)$

ข. สัญญาณคลื่นพาห้  $c(t)$

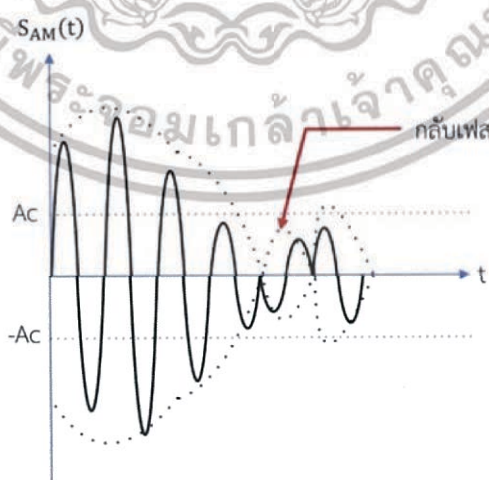
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างสัญญาณข้อมูลและสัญญาณคลื่นพาห้

ในกระบวนการการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด จะแยกพิจารณาออกเป็น 2 กรณี ในกรณีที่ 1 จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขอัตราส่วนการกล้ำสัญญาณหรือขนาดของ  $m(t)$  มีค่าน้อยกว่า 1 ตลอดทุกช่วงเวลา  $t$  สัญญาณที่ได้จากการการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดจะได้ดังรูปที่ 2.13 จะเห็นได้ว่ากรอบคลื่นของสัญญาณที่ได้จากการการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดแล้ว จะมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณข้อมูลในทุก ๆ ช่วง



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างผลของการการกล้ำสัญญาณกรณีที่มีขนาดของ  $m(t)$  มีค่าน้อยกว่า 1 ตลอดทุกช่วง

ในกรณีที่ 2 จะอยู่ภายใต้เงื่อนไขการการกล้ำสัญญาณหรือขนาดของ  $m(t)$  มีค่ามากกว่า 1 ในบางช่วงเวลา สัญญาณที่ได้จากการการกล้ำสัญญาณเชิงขนาดจะได้ดังรูปที่ 2.14 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่ขนาดของ  $m(t)$  มีค่ามากกว่า 1 กรอบคลื่นของสัญญาณจะเกิดการกลับเฟสของสัญญาณ ในสถานะที่เกิดการกลับเฟสของสัญญาณเช่นนี้จะเรียกว่า มีการการกล้ำสัญญาณเกินขนาด (Overmodulation) ซึ่งในสถานะที่เกิดการการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด จะส่งผลต่อการออกแบบวงจรที่ภาครับสัญญาณที่อยู่ในกระบวนการการการกล้ำสัญญาณกลับให้มีโครงสร้างที่ซับซ้อนมากขึ้น แนวทางการแก้ปัญหาที่ดีควรจะควบคุมกระบวนการการการกล้ำสัญญาณมิให้เกิดการการกล้ำสัญญาณเกินขนาดขึ้น



รูปที่ 2.14 ตัวอย่างผลของการการกล้ำสัญญาณกรณีที่มีขนาดของ  $m(t)$  มีค่ามากกว่า 1 ในบางช่วง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยสรุปแล้วสภาวะเงื่อนไขที่จำเป็นในกระบวนการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด มีอยู่ 2 เงื่อนไข

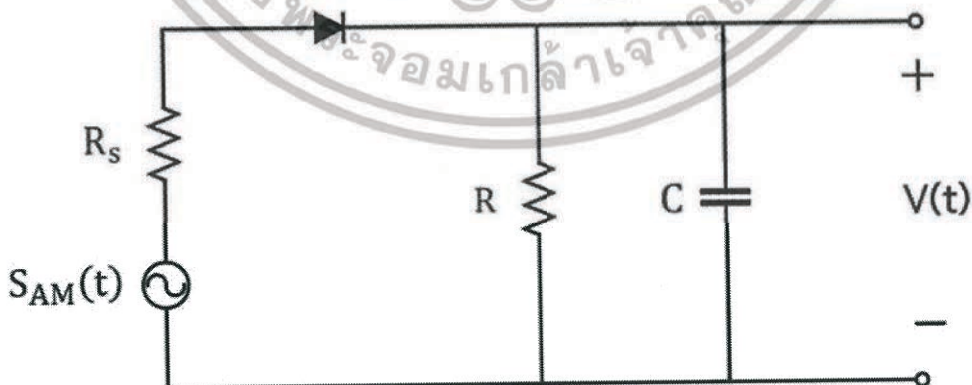
1. ขนาดของ  $m(t)$  จะต้องมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอในทุก ๆ ช่วงเวลา  $t$  ที่อยู่ในกระบวนการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด

2. สัญญาณคลื่นพาห้จะต้องมีความถี่  $f_c$  สูงกว่าองค์ประกอบความถี่สูงสุด  $W$  ของสัญญาณข้อมูล โดยที่  $W$  คือ ความกว้างคลื่นความถี่ (Bandwidth) ของสัญญาณข้อมูล เนื่องจากหากสัญญาณข้อมูลมีความถี่ที่ใกล้เคียงกับสัญญาณคลื่นพาห้ จะทำให้ไม่สามารถมองเห็นกรอบคลื่นของสัญญาณที่ได้ผ่านกระบวนการกล้ำสัญญาณได้อย่างชัดเจน

### การกล้ำสัญญาณกลับเชิงขนาด

ในกระบวนการกล้ำสัญญาณกลับเชิงขนาด มีวัตถุประสงค์เพื่อนำสัญญาณข้อมูลกลับคืนมาให้อยู่ในรูปเดิม สามารถทำได้หลายวิธีการ หนึ่งในวิธีการที่มีรูปแบบไม่ซับซ้อนคือ การกล้ำสัญญาณกลับด้วยวงจรตรวจจับกรอบคลื่น (Envelope Detector) เป็นวงจรที่มีโครงสร้างค่อนข้างง่าย มีประสิทธิภาพ และมีการนำมาใช้งานกันทั่วไปในเครื่องรับสัญญาณวิทยุแบบกล้ำสัญญาณเชิงขนาดหรือวิทยุแบบ AM

วงจรตรวจจับกรอบคลื่น จะประกอบไปด้วย ไดโอด ตัวต้านทาน  $R$  และตัวเก็บประจุ  $C$  โครงสร้างของวงจรแสดงดังรูปที่ 2.15 การทำงานของวงจรมีอยู่ 2 ช่วง ซึ่งสอดคล้องไปกับการทำงานของไดโอดในวงจร ช่วงไบอัสตรงเป็นช่วงที่สัญญาณพาห้ที่ถูกกล้ำสัญญาณเชิงขนาดมีลักษณะอยู่ในด้านซีกบวก ส่งผลให้ไดโอดทำงาน และตัวเก็บประจุทำการเก็บประจุจนมีขนาดแรงดันเทียบเท่ากับสัญญาณพาห้เข้าไปจนถึงขนาดสูงสุดสัญญาณ จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงไบอัสกลับ เมื่อสัญญาณพาห้เข้ามามีขนาดลดลงจนทำให้ไดโอดไม่สามารถทำงานได้หรือสัญญาณพาห้เข้าอยู่ในด้านซีกลบ ตัวเก็บประจุก็จะทำการคายประจุออกมาอยู่เรื่อย ๆ ผ่านตัวต้านทาน  $R$  จนกระทั่งสัญญาณพาห้เข้ากลับมาเป็นซีกบวกจนทำให้ไดโอดสามารถทำงานได้อีกครั้ง ก็จะกลับไปสู่ช่วงไบอัสตรงลักษณะการทำงานก็จะเกิดขึ้นวนไปซ้ำ ๆ ระหว่างช่วงไบอัสตรงและช่วงไบอัสกลับ



รูปที่ 2.15 โครงสร้างวงจรตรวจจับกรอบคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ไดโอดที่ใช้งานในวงจรมีคุณสมบัติเป็นไปตามอุดมคติคือ ในช่วงที่สัญญาณขาเข้าเป็นซิกบวกลไดโอดมีการทำงาน ไดโอดจะมีความต้านทานที่ต่ำมากเท่ากับ  $R_f$  และในช่วงที่สัญญาณขาเข้าเป็นซิกลบไดโอดหยุดทำงาน ไดโอดจะมีความต้านทานสูงมากเป็นอนันต์ และกำหนดให้สัญญาณขาเข้า  $S_{AM}(t)$  เป็นแหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้าที่มีความต้านทานภายในเท่ากับ  $R_s$  ดังนั้นเพื่อให้ตัวเก็บประจุสามารถทำการเก็บสะสมประจุได้อย่างรวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้า ค่าคงตัวทางเวลา (Time Constant) ในการเก็บสะสมประจุ จำเป็นที่จะต้องมีความถี่ที่ต่ำกว่าคาบของสัญญาณคลื่นพาห์ ดังสมการที่ (2.38)

$$(R_f + R_s)C \ll \frac{1}{f_c} \quad (2.38)$$

เมื่อ

- $R_f$  คือ ความต้านทานภายในของไดโอดขณะที่มีการทำงาน
- $R_s$  คือ ความต้านทานภายในแหล่งกำเนิดแรงดันที่สัญญาณขาเข้า
- $C$  คือ ค่าของตัวเก็บประจุภายในวงจร
- $f_c$  คือ ความถี่ของสัญญาณพาห์

ในทางกลับกันช่วงไบอัสกลับ ในขณะที่ตัวเก็บประจุทำการคายประจุออกมาผ่านทางตัวต้านทาน  $R$  จำเป็นที่จะต้องมีความถี่ที่ค่อนข้างมาก เพื่อให้กระบวนการคายประจุเป็นไปอย่างช้า ๆ ระหว่างคลื่นซิกบวกลที่ติดกัน แต่ไม่ควรที่จะนานเกินไปเพื่อประสิทธิภาพในการติดตามสัญญาณขาเข้าที่มีเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังสมการที่ (2.39)

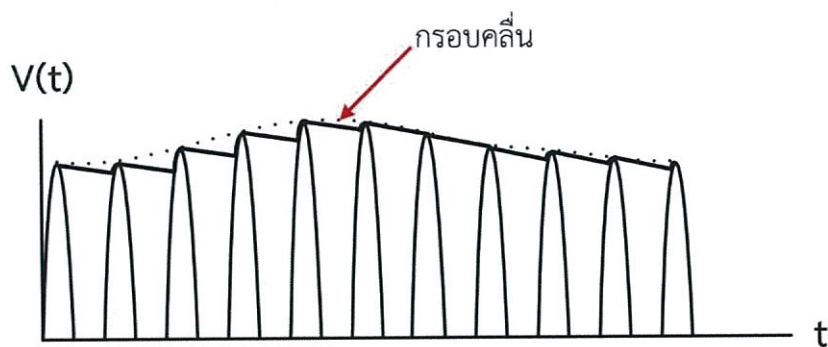
$$\frac{1}{f_c} \ll RC \ll \frac{1}{W} \quad (2.39)$$

เมื่อ

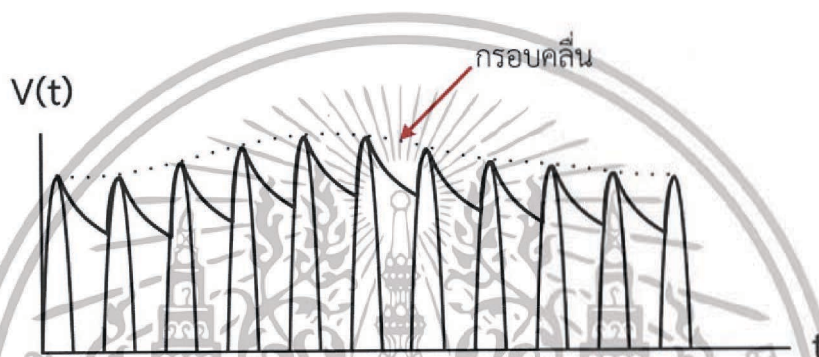
- $R$  คือ ความต้านทานภายในวงจร
- $C$  คือ ค่าของตัวเก็บประจุภายในวงจร
- $W$  คือ ความกว้างคลื่นความถี่ของสัญญาณข้อมูล

จากการทำงานของวงจรตรวจจับกรอบคลื่น ผลที่ได้คือ แรงดันที่คร่อมตัวเก็บประจุจะมีลักษณะคล้ายกับกรอบคลื่นของสัญญาณข้อมูลที่ถูกกล้าสัญญาณเชิงขนาด แสดงดังรูปที่ 2.16 หากวงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาที่เหมาะสม จะเห็นได้ว่าแรงดันที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับกรอบคลื่นของสัญญาณข้อมูลที่ถูกกล้าสัญญาณเชิงขนาด ส่งผลให้กระบวนการกล้าสัญญาณกลับแปลงสัญญาณข้อมูลกลับออกมาได้อย่างมีประสิทธิภาพ รูปที่ 2.17 เมื่อค่าคงตัวทางเวลาของวงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าน้อยเกินไป ส่งผลให้ในช่วงที่ตัวเก็บประจุมีการคายประจุออกมาเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว มีการกระเพื่อมของแรงดัน (Ripple) ค่อนข้างมาก แรงดันที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณข้อมูล และรูปที่ 2.18 เมื่อค่าคงตัวทางเวลาของวงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าที่มากเกินไป ส่งผลให้ช่วงการคายประจุเป็นไปอย่างช้า ๆ ทำให้ไม่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาเข้าได้ แรงดันที่ได้จะมีความผิดเพี้ยนไปจากสัญญาณข้อมูลเช่นกัน

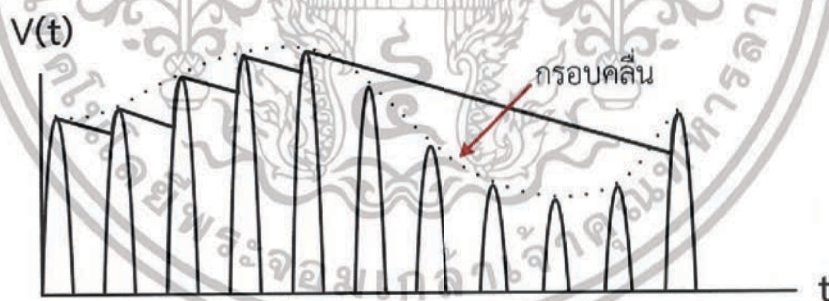
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 วงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาที่เหมาะสม



รูปที่ 2.17 วงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาน้อยเกินไป



รูปที่ 2.18 วงจรตรวจจับกรอบคลื่นมีค่าคงตัวทางเวลาที่มากเกินไป

## 2.5.2 การกล้ำสัญญาณเชิงความถี่

การกล้ำสัญญาณเชิงความถี่คือ การกล้ำสัญญาณที่มีการเปลี่ยนแปลงมุมเฟสของสัญญาณ คลื่นพาทำให้สอดคล้องไปตามขนาดของสัญญาณข้อมูล มีที่มาจากการกล้ำสัญญาณเชิงมุม ซึ่งขนาดของสัญญาณที่ถูกกล้ำสัญญาณเชิงมุมจะมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง และการกล้ำสัญญาณประเภทนี้จะป้องกันสัญญาณรบกวนได้ดีกว่าการกล้ำสัญญาณเชิงขนาด แต่ต้องการความกว้างคลื่นความถี่ของสัญญาณข้อมูลที่สูง เนื่องจากยังมีความกว้างมากเท่าไรจะส่งผลให้คุณภาพของการรับส่งสัญญาณข้อมูลดีขึ้นเช่นกัน สมการที่ใช้ในกระบวนการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ แสดงดังสมการที่ (2.40) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณรวมของสัญญาณคลื่นพาร์จากสมการที่ (2.31) ที่มีการแปรเปลี่ยนไปตามขนาดสัญญาณข้อมูล

$$S_{FM}(t) = A_c \cos(\theta(t)) \quad (2.40)$$

เมื่อ

$S_{FM}(t)$  คือ สัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่  
 $A_c$  คือ ขนาดของสัญญาณคลื่นพาร์  
 $\theta(t)$  คือ มุมเฟสของสัญญาณ

ในการกล้ำสัญญาณสัญญาณข้อมูลลงไป ในมุมเฟส  $\theta(t)$  ของสัญญาณคลื่นพาร์ สามารถทำได้ ด้วยวิธีการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้งานกันทั่วไป ผลของการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ทำให้ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาร์แปรผันตามขนาดของสัญญาณข้อมูลแบบเชิงเส้น ดังสมการที่ (2.41)

$$f(t) = f_c + k_f m(t) \quad (2.41)$$

เมื่อ

$f(t)$  คือ ความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ ณ ช่วงเวลา  $t$  ใด ๆ  
 $f_c$  คือ ความถี่ของสัญญาณคลื่นพาร์  
 $k_f$  คือ ความไวต่อความถี่ของวงจรถักสัญญาณเชิงความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์/โวลต์  
 $m(t)$  คือ สัญญาณข้อมูล

จากสมการที่ (2.41) เห็นได้ว่าความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ ณ ช่วงเวลา  $t$  ใด ๆ ขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณคลื่นพาร์ ความไวต่อความถี่ของวงจรถักสัญญาณเชิงความถี่ และขนาดของสัญญาณข้อมูล ในการหามุมเฟสของสัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ สามารถหาได้จากสมการที่ (2.42)

$$\theta(t) = 2\pi \int_{-\infty}^t f(t) dt \quad (2.42)$$

$$\theta(t) = 2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(t) dt \quad (2.43)$$

จากสมการที่ (2.43) สามารถเขียนสมการที่ (2.40) ใหม่ ได้รูปมาตรฐานที่ใช้นิยามสัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ดังสมการที่ (2.44)

$$S_{FM}(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + 2\pi k_f \int_{-\infty}^t m(t) dt) \quad (2.44)$$

รูปที่ 2.19 สัญญาณข้อมูลที่มีลักษณะเป็นสัญญาณขั้นบันไดแบบหนึ่งหน่วย (Unit Step) นำไป เอกสารก็กล้ำสัญญาณกับสัญญาณคลื่นพาร์ที่มีความถี่ของสัญญาณเท่ากับ  $f_c$  ในรูปที่ 2.20 ผลของการกล้ำ ไม่ว่าจะเป็นกรณีใด ๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณเชิงความถี่ระหว่างสัญญาณข้อมูลแบบขึ้นบันได และสัญญาณคลื่นพาห้ความถี่  $f_c$  แสดงดังรูปที่ 2.21 เห็นได้ว่าช่วงเวลา  $t$  น้อยกว่า  $t_0$  ขนาดของสัญญาณข้อมูลมีค่าเท่ากับ 0 สัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณ มีความถี่เท่ากับ  $f_c$  และในช่วงเวลาที่  $t$  มากกว่า  $t_0$  ขนาดของสัญญาณข้อมูลมีค่าเท่ากับ 1 สัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณ มีความถี่เท่ากับ  $f_c + f_d$  ค่าของ  $f_d$  สามารถหาได้จากสมการที่ (2.45) ซึ่งสรุปได้ว่าความถี่ของสัญญาณที่ได้จากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ มีค่าแปรผันตามขนาดของสัญญาณข้อมูล  $m(t)$  ดังนั้นเมื่อขนาดของสัญญาณข้อมูลมีค่ามากขึ้น ความถี่ของสัญญาณจากการกล้ำสัญญาณก็จะมากขึ้นตามไปด้วย

$$f_d = k_f m(t) \quad (2.45)$$

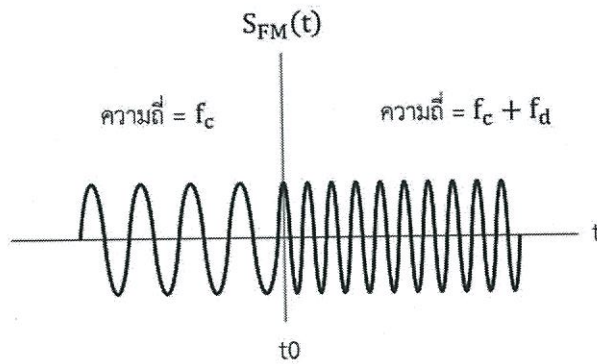
เมื่อ

$f_d$  คือ ความถี่ที่แปรเปลี่ยนไปตามขนาดของสัญญาณข้อมูล



รูปที่ 2.20 สัญญาณคลื่นพาห้

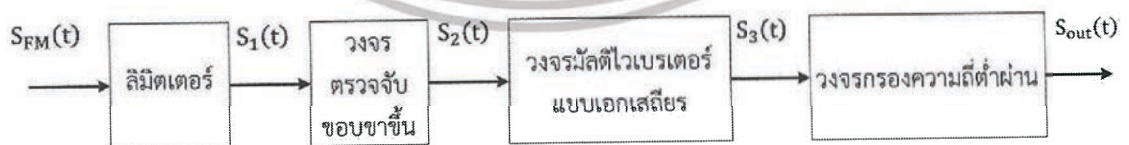
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



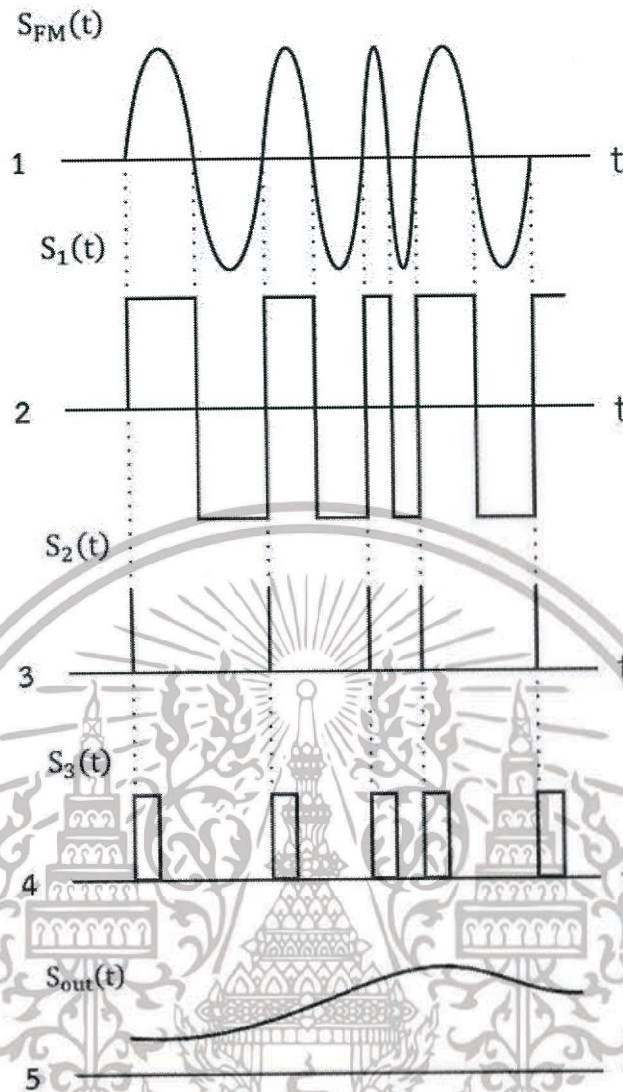
รูปที่ 2.21 ผลจากการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่

### การกล้ำสัญญาณกลับเชิงความถี่

การกล้ำสัญญาณกลับเชิงความถี่คือ กระบวนการแปลงสัญญาณข้อมูลผ่านการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ให้กลับมาเป็นสัญญาณข้อมูลอีกครั้ง สามารถใช้ได้หลายวิธี โดยวิธีที่จะกล่าวถึงนี้ ได้แก่ วิธีซีโรครอสซิงดีเทกเตอร์ (Zero-Crossing Detector) ซึ่งหลักการในการกล้ำสัญญาณกลับเชิงความถี่ของวิธีซีโรครอสซิงดีเทกเตอร์นี้มีอยู่ 5 ขั้นตอน ในรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการทั้งหมดในการกล้ำสัญญาณกลับเชิงความถี่ด้วยวิธีซีโรครอสซิงดีเทกเตอร์ ขั้นตอนที่ 1 สัญญาณที่ถูกกล้ำด้วยวิธีการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่  $S_{FM}(t)$  ถูกส่งผ่านเข้าไปยังวงจรที่ 1 คือ วงจรลิมิตเตอร์ เมื่อผ่านวงจรลิมิตเตอร์ออกมา จะได้สัญญาณพัลส์  $S_1(t)$  ที่มีความกว้างเท่ากับความถี่ของสัญญาณ ณ ขณะนั้น ๆ ขั้นตอนที่ 2 สัญญาณพัลส์  $S_1(t)$  ที่ได้จากวงจรลิมิตเตอร์จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรที่ 2 คือวงจรตรวจจับขอบขาขึ้นของสัญญาณ เมื่อสัญญาณผ่านวงจรตรวจจับขอบขาขึ้นของสัญญาณแล้ว จะได้สัญญาณพัลส์  $S_2(t)$  ซึ่งจะถูกนำไปใช้สำหรับสร้างสัญญาณพัลส์ที่มีความคาบเวลาคงที่ ขั้นตอนที่ 3 สัญญาณพัลส์  $S_2(t)$  จะถูกส่งไปยังวงจรที่ 3 คือ วงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบเอกเสถียร สัญญาณที่ผ่านวงจรมัลติไวเบรเตอร์แบบเอกเสถียร จะออกมาเป็นสัญญาณพัลส์ที่มีความคาบเวลาคงที่  $S_3(t)$  ขั้นตอนที่ 4 สัญญาณพัลส์  $S_3(t)$  ที่มีความคาบเวลาคงที่ จะถูกส่งผ่านไปยังวงจรที่ 4 คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน โดยจะทำหน้าที่คล้ายกับการหาค่าเฉลี่ยของสัญญาณ ขั้นตอนที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายกับสัญญาณข้อมูลโดยลักษณะของสัญญาณในแต่ละขั้นตอนต่าง ๆ จะแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 ขั้นตอนการกล้ำสัญญาณกลับเชิงความถี่ด้วยวิธีซีโรครอสซิงดีเทกเตอร์

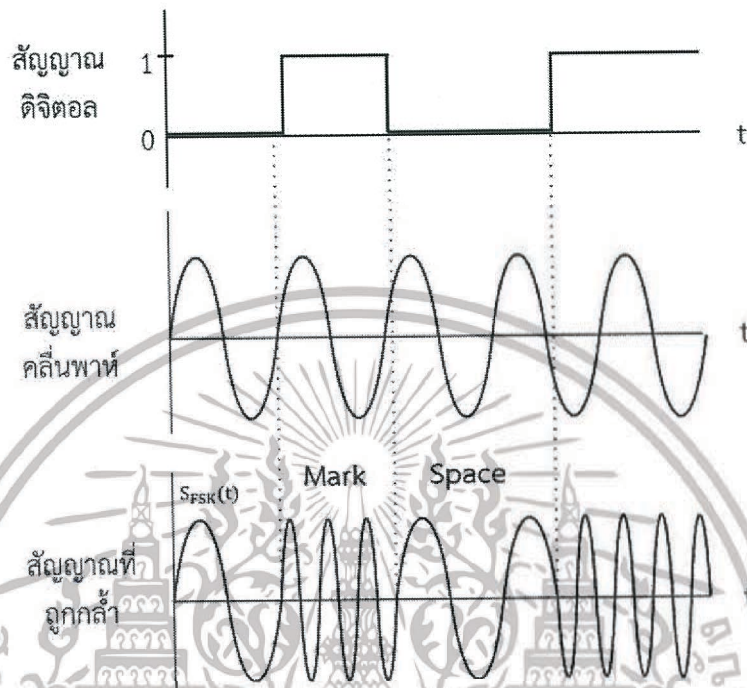


รูปที่ 2.23 สัญญาณในแต่ละขั้นตอนของวิธีซีโรครอสซิงตีเทกเตอร์

### 2.5.3 การกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่

การกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่คือ การนำสัญญาณดิจิทัลมาทำการกล้ำสัญญาณก่อนที่จะส่งข้อมูลออกไป มีลักษณะคล้ายกับการกล้ำสัญญาณแอนะล็อก แต่ต่างกันที่สัญญาณข้อมูลที่จะนำมาทำการกล้ำสัญญาณ ซึ่งในการการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่จะใช้สัญญาณข้อมูลเป็นสัญญาณอนาล็อก ส่วนการกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่จะใช้สัญญาณข้อมูลเป็นสัญญาณดิจิทัล ข้อดีของการกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่คือ มีสัญญาณรบกวนที่ต่ำ ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้ช่วงความถี่คลื่นสัญญาณมากในการกล้ำสัญญาณเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการสื่อสาร หลักการทำงานของ การกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่ สัญญาณคลื่นพาห้จะมีลักษณะขนาดของสัญญาณคงที่แต่มีความเปลี่ยนแปลงในเชิงความถี่ ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของสัญญาณข้อมูล เมื่อผ่านกระบวนการกล้ำสัญญาณแล้วจะเป็นสัญญาณที่มีความถี่ 2 ค่า มีลักษณะแสดงดังรูปที่ 2.24 เมื่อสัญญาณข้อมูลมีค่าเท่ากับ 1 ผ่านการกล้ำสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะมีความถี่เท่ากับ  $f_1$  เมื่อสัญญาณข้อมูลมีค่าเท่ากับ 0 ผ่านการกล้ำสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะมีความถี่เท่ากับ  $f_2$  ในช่วงของสัญญาณจะมีความถี่ที่แตกต่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน ช่วงที่มีความถี่มากกว่ามีชื่อว่าความถี่ “Mark” ส่วนช่วงที่มีความถี่น้อยกว่ามีชื่อว่าความถี่ “Space” ทั้งสองชื่อนี้ถูกตั้งให้สอดคล้องกับสัญญาณของดิจิตอลที่มีค่าระหว่าง 1 และ 0 ตามลำดับ โดยกำหนดให้  $S_{FSK}(t)$  คือ สัญญาณที่ผ่านการกล้ำสัญญาณดิจิตอลเชิงความถี่



รูปที่ 2.24 การกล้ำสัญญาณดิจิตอลเชิงความถี่

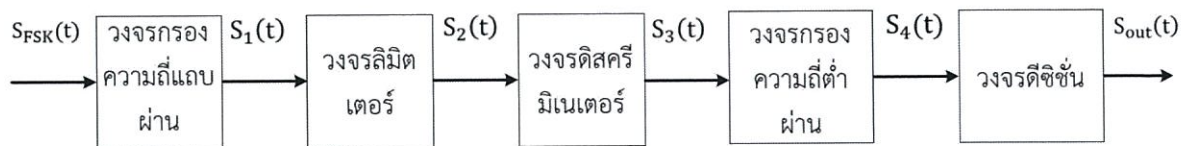
### การกล้ำสัญญาณดิจิตอลกลับเชิงความถี่

การกล้ำสัญญาณกลับสำหรับสัญญาณที่ผ่านการกล้ำสัญญาณดิจิตอลเชิงความถี่ มีอยู่หลายวิธี ซึ่งในปริณญาณิพนธ์ฉบับนี้จะกล่าวเพียง วิธีการกล้ำสัญญาณดิจิตอลกลับด้วยเครื่องตรวจจับการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่ (FM Detector Demodulators) บล็อกไดอะแกรมแสดงดังรูปที่ 2.25 หลักการทำงานของการกล้ำสัญญาณดิจิตอลกลับเชิงความถี่ มีทั้งหมด 5 ขั้นตอน ขั้นตอนที่ 1 สัญญาณที่ผ่านการกล้ำสัญญาณดิจิตอลเชิงความถี่  $S_{FSK}(t)$  ในรูปที่ 2.26 (ก) มีลักษณะที่ถูกแทรกแซงด้วยสัญญาณรบกวนในขั้นตอนส่งสัญญาณ ทำให้มีลักษณะผิดเพี้ยนไป สัญญาณ  $S_{FSK}(t)$  จะผ่านเข้าไปที่วงจรรองความถี่แถบผ่าน เพื่อทำการกำจัดความถี่ช่วงอื่น ๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องและรับสัญญาณเพียงช่วงความถี่ที่ต้องการเท่านั้น สัญญาณที่ได้  $S_1(t)$  แสดงดังรูปที่ 2.26 (ข) ขั้นตอนที่ 2 นำสัญญาณ  $S_1(t)$  ผ่านเข้าไปที่วงจรมิตเตอร์ เพื่อทำการกำจัดแอมพลิจูดส่วนเกินที่เป็นสัญญาณรบกวน ให้เหลือเพียงช่วงแอมพลิจูดของสัญญาณคลื่นพาห้ สัญญาณที่ได้  $S_2(t)$  แสดงดังรูปที่ 2.26 (ค) ขั้นตอนที่ 3 นำสัญญาณ  $S_2(t)$  ผ่านเข้าไปที่วงจรถิศจริมิเนเตอร์ (Discriminator Circuit) ซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างสัญญาณซีกบวค เมื่อความถี่ของสัญญาณมีค่าเท่ากับความถี่ Mark และสร้างสัญญาณซีกลบเมื่อความถี่ของสัญญาณมีค่าเท่ากับความถี่ Space สัญญาณที่ได้  $S_3(t)$  แสดงดังรูปที่ 2.26 (ง) ขั้นตอนที่ 4 นำสัญญาณ  $S_3(t)$  ผ่านเข้าไปที่วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน เพื่อกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงที่ปะปนอยู่ในสัญญาณ และทำให้สัญญาณมีความเรียบมากขึ้น สัญญาณที่ได้  $S_4(t)$  แสดงดังรูปที่ 2.26

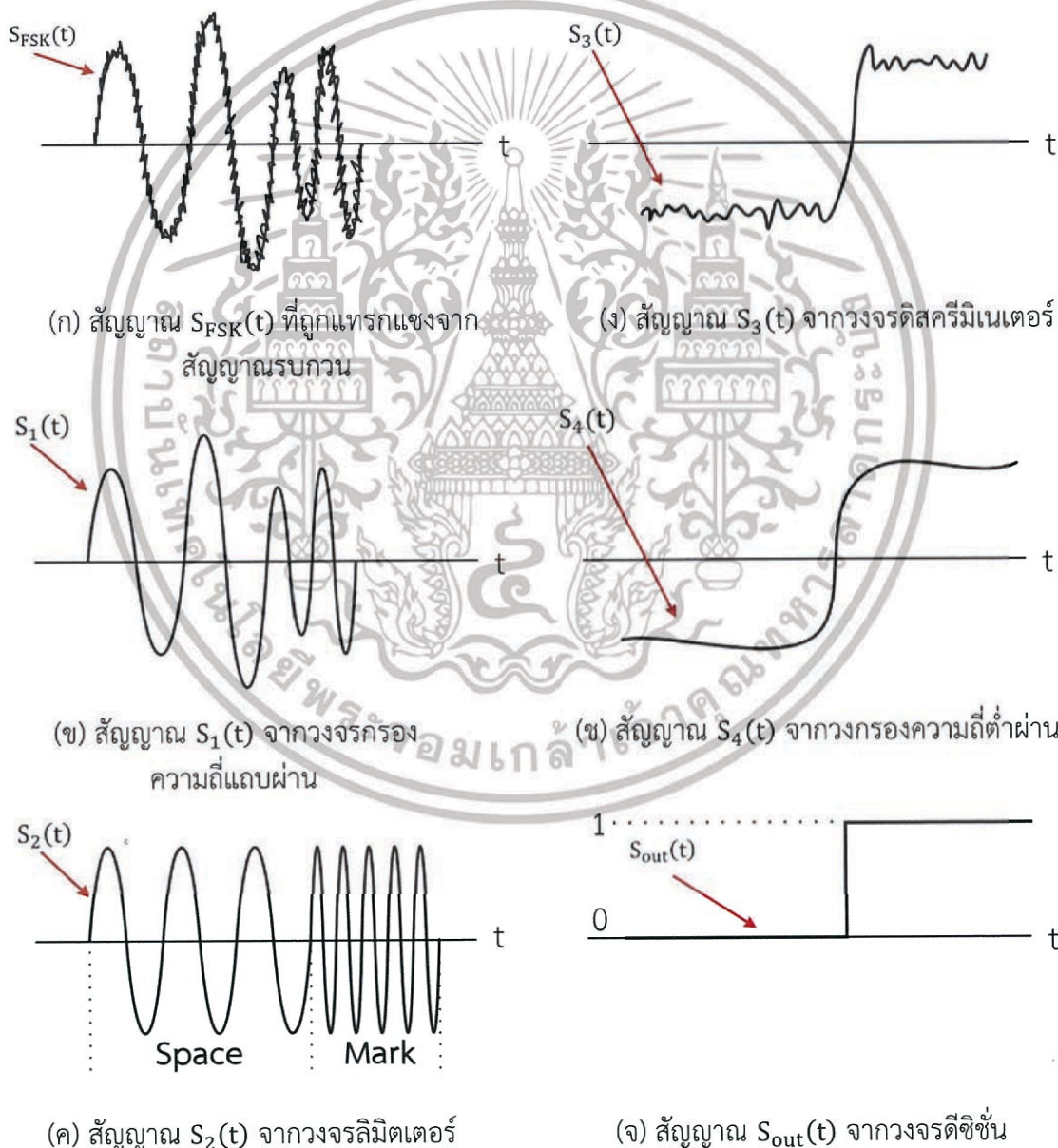
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ข) ขั้นตอนที่ 5 สัญญาณ  $S_4(t)$  จะถูกส่งผ่านเข้าไปที่วงจรตัดสินใจ (Decision Circuit) ซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณซีกบวกเป็นสัญญาณดิจิทัลที่มีสถานะเท่ากับ 1 และแปลงสัญญาณซีกลบเป็นสัญญาณดิจิทัลสถานะ 0 สัญญาณที่ได้  $S_{out}(t)$  แสดงดังรูปที่ 2.26 (จ)



รูปที่ 2.25 บล็อกไดอะแกรมการกล้ำสัญญาณดิจิทัลกลับด้วยเครื่องตรวจจับการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่



รูปที่ 2.26 รูปสัญญาณในแต่ละขั้นตอนของการกล้ำสัญญาณดิจิทัลกลับด้วยเครื่องตรวจจับการกล้ำสัญญาณเชิงความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

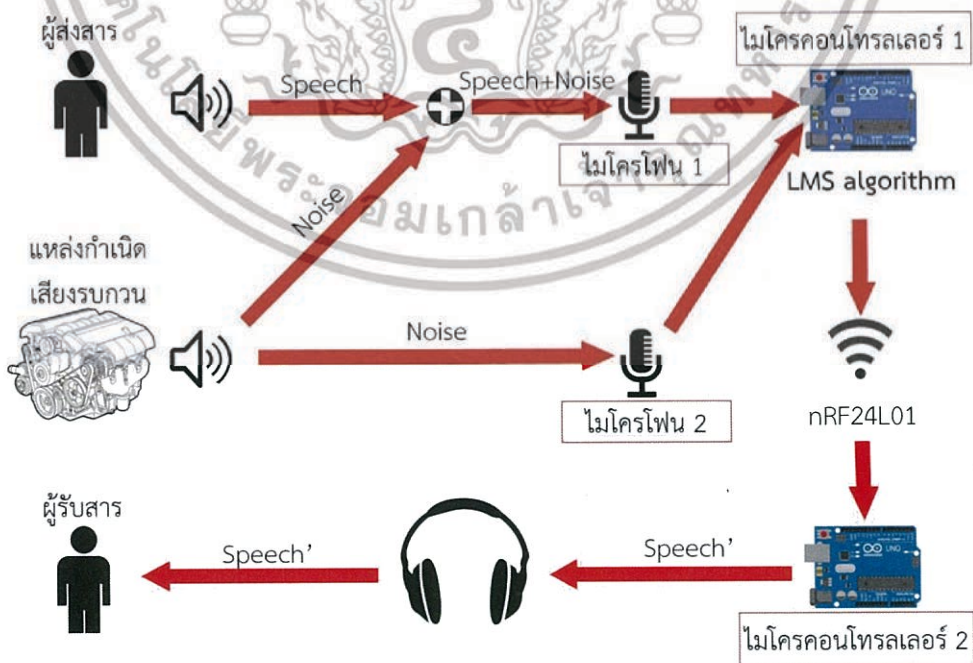
## บทที่ 3

### การออกแบบ

การออกแบบในบทที่ 3 นี้จะเกี่ยวข้องกับหลักการการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริภูมิสัญญาณ แนวคิดการออกแบบ ในส่วนของฮาร์ดแวร์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยหัวข้อย่อยแบบจำลองชิ้นงาน วงจรอิเล็กทรอนิกส์ อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่เลือกใช้ในปริภูมิสัญญาณ และในส่วนของซอฟต์แวร์ เนื้อหาจะเกี่ยวข้องกับการเขียนโปรแกรมให้ทำงานเป็นไปตามวัตถุประสงค์ เช่น การรับสัญญาณข้อมูล การประมวลผลสัญญาณข้อมูลด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด การส่งออกสัญญาณข้อมูล และการสื่อสารไร้สายผ่านโมดูลสื่อสาร ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริภูมิสัญญาณ

หลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริภูมิสัญญาณฉบับนี้ แสดงดังรูปที่ 3.1 โดยหลักการทำงาน ประกอบไปด้วยแหล่งกำเนิดเสียง 2 แหล่ง ได้แก่ ผู้ส่งสาร และแหล่งกำเนิดเสียงรบกวนคือ เสียงกระบวนการผลิต หรือเสียงเครื่องจักรต่าง ๆ เสียงจากทั้ง 2 แหล่ง จะเข้าไปยังไมโครโฟนตัวที่ 1 คือ ไมโครโฟนที่ติดอยู่กับหูฟัง ทำหน้าที่ในการรับเสียงจากผู้ส่งสารซึ่งปะปนไปด้วยเสียงรบกวน และไมโครโฟนตัวที่ 2 คือ ไมโครโฟนที่ติดตั้งอยู่กับตัวอุปกรณ์ ทำหน้าที่ในการรับเสียงรบกวนบริเวณรอบ ๆ ผู้ส่งสาร เสียงจากไมโครโฟนทั้ง 2 ตัว จะถูกส่งเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 1 เพื่อทำการประมวลผลลดเสียงรบกวนด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด เมื่อประมวลผลเสร็จ จะทำการส่งออกข้อมูลเสียงด้วยโมดูลสื่อสารไร้สาย ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 2 เมื่อได้รับข้อมูลเสียงแล้ว จะทำการส่งข้อมูลเสียงออกไปยังหูฟังของผู้รับสาร



รูปที่ 3.1 หลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3.2 แนวคิดการออกแบบ

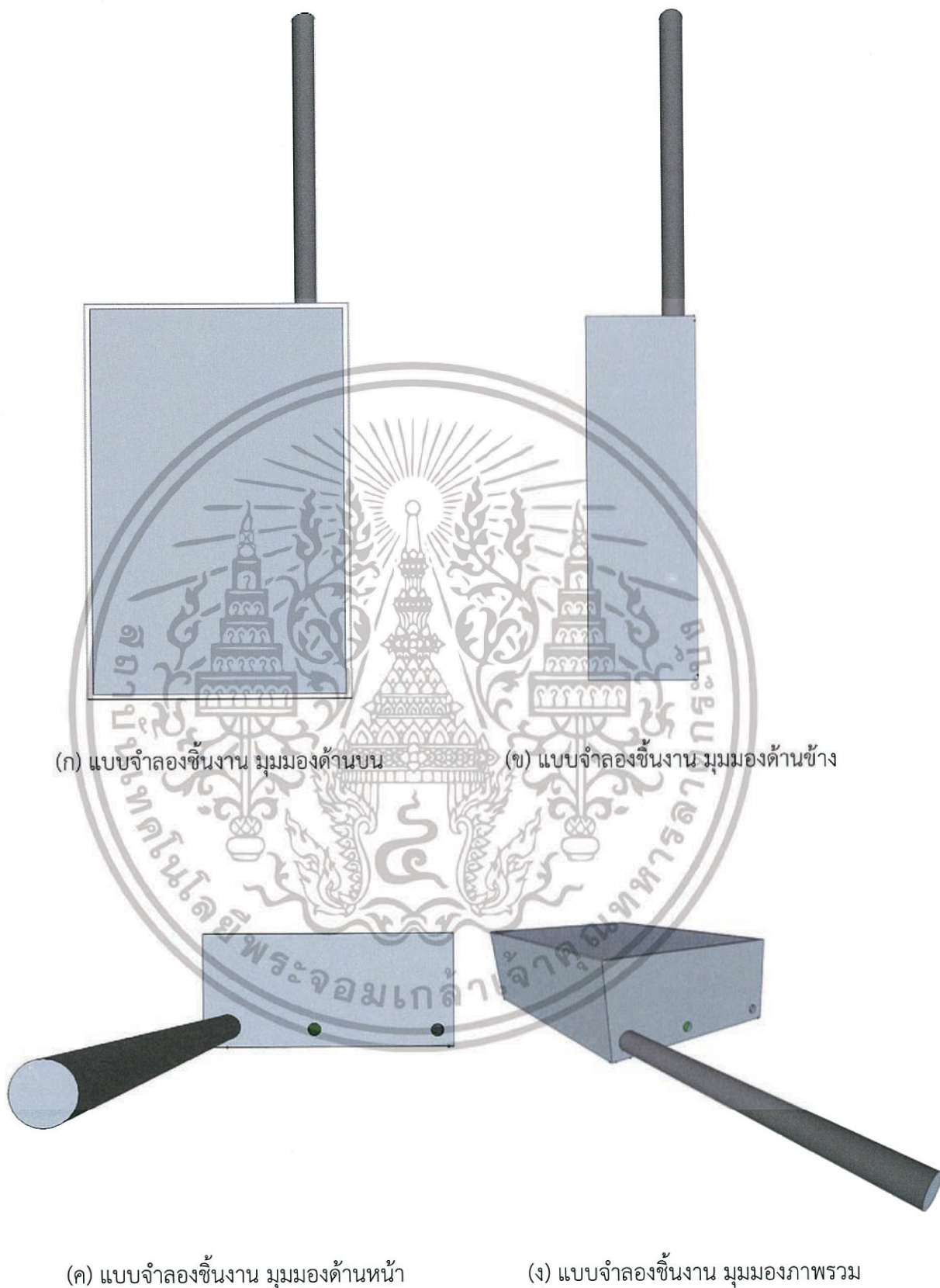
แนวคิดในการออกแบบอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน ได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ส่วน โดยประกอบไปด้วยส่วนของฮาร์ดแวร์และส่วนของโปรแกรม ในส่วนของฮาร์ดแวร์ ได้มีการออกแบบให้สอดคล้องกับหลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน ซึ่งสรุปได้ว่าส่วนประกอบหลักที่มีความจำเป็น จะประกอบไปด้วย ไมโครโฟน 2 ตัว ทำหน้าที่ในการรับเสียงเพื่อนำไปใช้ในการประมวลผล ไมโครคอนโทรลเลอร์ 2 ตัว ตัวที่ 1 ทำหน้าที่ในการประมวลผลด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดเพื่อลดเสียงรบกวน และส่งสัญญาณข้อมูลเสียงออกไปด้วยการสื่อสารแบบไร้สาย ตัวที่ 2 ทำหน้าที่ในการรับสัญญาณข้อมูลจากการสื่อสารแบบไร้สาย และส่งสัญญาณเสียงไปยังหูฟัง โมดูลสื่อสารไร้สาย 2 ตัว ตัวที่ 1 ทำหน้าที่รับสัญญาณข้อมูล และตัวที่ 2 ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณข้อมูล รายละเอียดของอุปกรณ์และหน้าที่ของอุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ จะกล่าวในหัวข้อ 3.4 และในส่วนของแนวคิดการออกแบบโปรแกรม จากหลักการทำงานของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน ซึ่งสรุปได้ว่าจะต้องประกอบไปด้วยโปรแกรมส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย และโปรแกรมส่วนรับข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายแล้วส่งออกข้อมูลเสียงไปยังหูฟัง ซึ่งรายละเอียดแต่ละโปรแกรมจะกล่าวในหัวข้อที่ 3.5

## 3.3 ฮาร์ดแวร์

ฮาร์ดแวร์ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยแบบจำลองชิ้นงาน วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณ วงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณ และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่เลือกใช้ในปริญญานิพนธ์ โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการออกแบบจำลองชิ้นงาน การวางตำแหน่งของอุปกรณ์ภายในแบบจำลอง หน้าที่ของวงจรอิเล็กทรอนิกส์แต่ละประเภท การคำนวณสมการในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และหน้าที่ของอุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในปริญญานิพนธ์ เป็นต้น

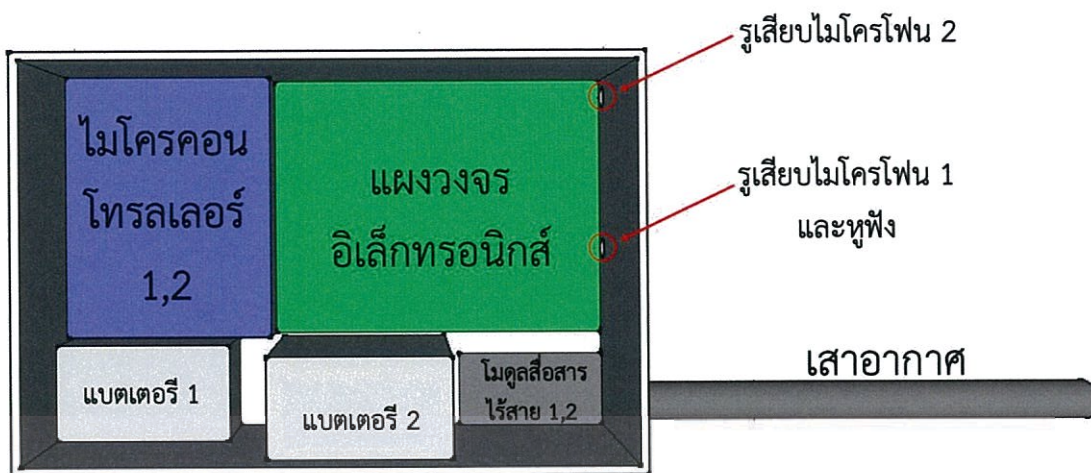
### 3.3.1 แบบจำลองชิ้นงาน

แบบจำลองชิ้นงาน การออกแบบชิ้นงานเลือกให้มีลักษณะคล้ายกับวิทยุสื่อสาร แสดงดังรูปที่ 3.2 เป็นภาพแบบจำลองสามมิติ ประกอบไปด้วย (ก) มุมมองด้านบน (Top View) (ข) มุมมองด้านข้าง (Side View) (ค) มุมมองด้านหน้า (Front View) (ง) มุมมองภาพรวม และได้ทำการกำหนดการวางส่วนประกอบอุปกรณ์ต่าง ๆ ลงในแบบจำลองชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.3 ซึ่งเป็นภาพจากมุมมองด้านบน อุปกรณ์ภายในแบบจำลองชิ้นงาน ประกอบไปด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ตัวที่ 1, 2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่ตัวที่ 1, 2 โมดูลสื่อสารไร้สายตัวที่ 1, 2 โดยเลือกใช้โมดูลสื่อสารไร้สายพร้อมเสาอากาศ รูเสียงหูฟังพร้อมไมโครโฟนตัวที่ 1 และไมโครโฟนตัวที่ 2



รูปที่ 3.2 แบบจำลองชิ้นงานสามมิติในมุมมองต่าง ๆ

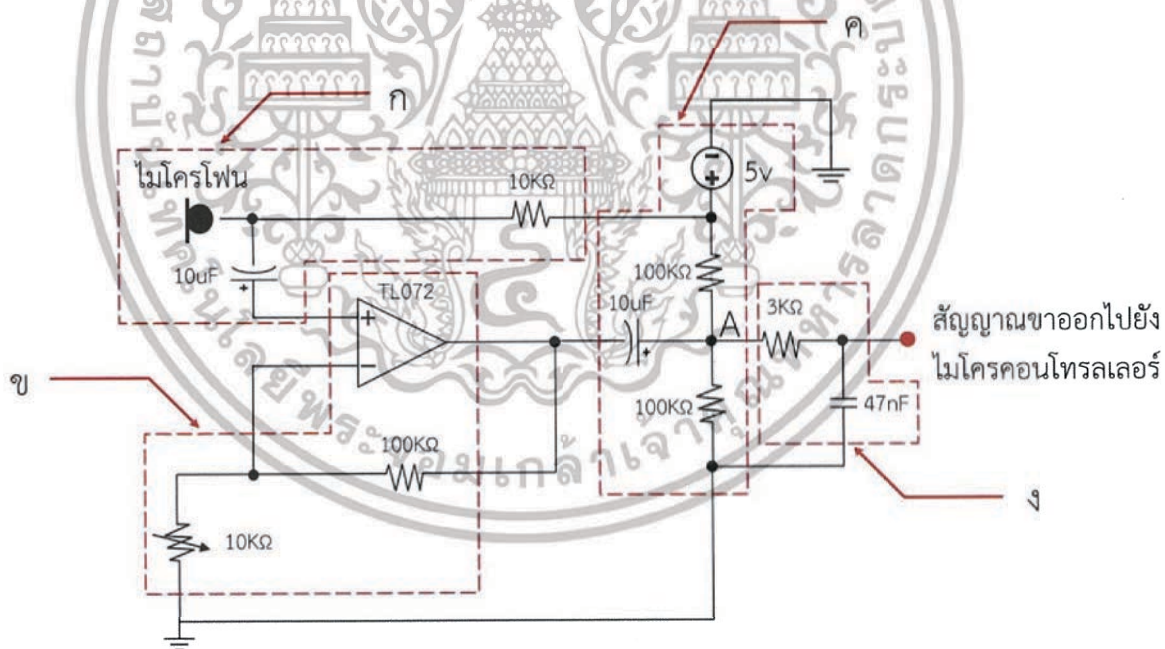
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 การวางอุปกรณ์ในแบบจำลองชิ้นงาน

### 3.3.2 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า ประกอบไปด้วยวงจรย่อย 4 วงจร ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันไปในแต่ละวงจร โครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้าแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 โครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า

วงจรส่วน ก ในรูปที่ 3.4 ประกอบไปด้วยไมโครโฟน ทำหน้าที่รับสัญญาณเสียงผ่านเข้ามายังวงจรภาครับสัญญาณขาเข้า ตัวต้านทานขนาด 10 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่จำกัดกระแสจากแหล่งจ่ายไฟ 5 โวลต์ เพื่อนำไปเป็นพลังงานให้ไมโครโฟน และตัวเก็บประจุขนาด 10 ไมโครฟารัด ทำหน้าที่กำจัดแรงดันไฟตรงที่ปะปนอยู่ในสัญญาณขาเข้าก่อนที่จะทำการขยายสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรส่วน ข ในรูปที่ 3.4 คือ วงจรขยายสัญญาณ ประกอบไปด้วยไอซีเบอร์ TL072 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ ตัวต้านทานขนาด 100 กิโลโอห์ม และตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 กิโลโอห์ม ตัวต้านทานทั้งสองตัวนี้ ทำหน้าที่ในการปรับอัตราขยายสัญญาณขาเข้า โดยสามารถทำการปรับอัตราขยายได้จากการหมุนตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 กิโลโอห์ม สัญญาณขาออกจากวงจรขยายคำนวณได้จากสมการที่ (3.1)

$$V_o = V_m \left( 1 + \frac{100k\Omega}{10k\Omega} \right) \quad (3.1)$$

เมื่อ

$V_o$  คือ สัญญาณขาออก

$V_m$  คือ ระดับแรงดันของสัญญาณจากไมโครโฟน

จากการคำนวณในสมการที่ (3.1)  $V_m$  หรือระดับแรงดันของสัญญาณจากไมโครโฟน โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ในช่วงบวกลบ 200 ถึง 250 มิลลิโวลต์ ดังนั้นสัญญาณขาออกจากวงจรขยายสัญญาณจะมีค่าอยู่ในช่วงบวกลบ 2.5 โวลต์ ซึ่งเป็นการคิดจากระดับแรงดันสูงสุด

วงจรส่วน ค ในรูปที่ 3.4 คือ ตัวเก็บประจุขนาด 10 ไมโครฟารัด ทำหน้าที่ในการกำจัดแรงดันไฟตรงที่ปะปนมากับสัญญาณขาออกจากวงจรขยายสัญญาณ และวงจรแบ่งแรงดัน ประกอบไปด้วย แหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์ ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานให้แก่ไมโครโฟนและวงจรแบ่งแรงดัน ตัวต้านทานขนาด 100 กิโลโอห์ม จำนวน 2 ตัว ทำหน้าที่ในการแบ่งแรงดันจากแหล่งจ่ายแรงดัน 5 โวลต์ เนื่องจากตัวไมโครคอนโทรลเลอร์สามารถรับแรงดันสัญญาณอนาล็อกขาเข้าได้เพียง 0 ถึง 5 โวลต์ ดังนั้นแรงดันที่จุด A จะต้องมียกระดับแรงดันสัญญาณที่เหมาะสมสำหรับแรงดันที่จะผ่านเข้าไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถคำนวณแรงดันที่เหมาะสมได้จากสมการที่ (3.2) เป็นการคิดที่พิกัดแรงดันสัญญาณอนาล็อกขาเข้าสูงสุดของไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ที่ 5 โวลต์ และสัญญาณขาออกจากวงจรขยายสัญญาณที่มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 2.5 โวลต์

$$5V = V_A + V_o \quad (3.2)$$

เมื่อ

$V_A$  คือ แรงดัน ณ จุด A

จากการคำนวณในสมการที่ (3.2) แรงดัน ณ จุด A มีค่าเท่ากับ 2.5 โวลต์ ดังนั้นจึงต้องทำการแบ่งแรงดันด้วยวงจรแบ่งแรงดัน โดยได้ทำการเลือกค่าของตัวต้านทานที่เหมาะสมตามที่กล่าวมาแล้ว สามารถคำนวณแรงดันไฟฟ้าจากวงจรแบ่งแรงดัน ณ จุด A ได้จากสมการที่ (3.3)

$$V_A = 5V \left( \frac{100k\Omega}{100k\Omega + 100k\Omega} \right) \quad (3.3)$$

จะได้แรงดัน ณ จุด A มีค่าเท่ากับ 2.5 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วงจรส่วน ง ในรูปที่ 3.4 คือ วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน ประกอบไปด้วยตัวต้านทานขนาด 3 กิโลโอห์ม และตัวเก็บประจุขนาด 47 นาโนฟารัด หลังจากที่ได้สัญญาณถูกยกระดับ ณ จุด A แล้ว จะถูกนำไปกรองเพื่อกำจัดความถี่สูงออกไป และให้สอดคล้องกับความถี่การซีกตัวอย่างของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ (3.4) ความถี่การซีกตัวอย่างที่ได้กำหนดไว้ในการเขียนโปรแกรมอยู่ที่ประมาณ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนั้นวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านควรมีจุดความถี่ตัดไม่เกิน 1 กิโลเฮิร์ตซ์ เพื่อไม่ให้เกิดความผิดเพี้ยนของข้อมูล (Alias) แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ จำเป็นต้องใช้ตัวต้านทานขนาด 3 กิโลโอห์ม และตัวเก็บประจุขนาด 47 นาโนฟารัด ซึ่งมีจุดความถี่ตัดที่ใกล้เคียง 1 กิโลเฮิร์ตซ์ จุดความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่านคำนวณได้จากสมการที่ (3.5)

$$f_n = 2f_t \quad (3.4)$$

เมื่อ

$f_n$  คือ ความถี่การซีกตัวอย่าง

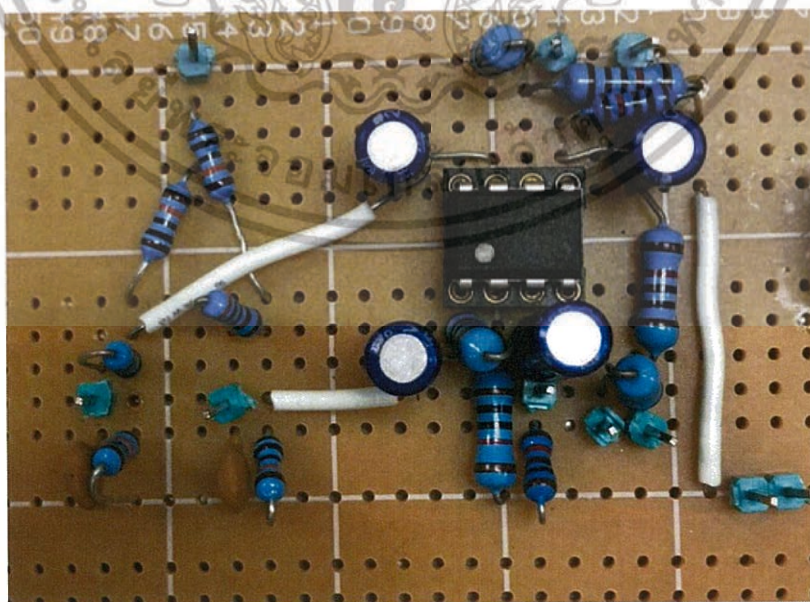
$f_t$  คือ ความถี่สูงสุดของสัญญาณข้อมูล

$$f_c = \frac{1}{2\pi(47\text{nF})(3\text{k}\Omega)} \quad (3.5)$$

เมื่อ

$f_c$  คือ ความถี่ตัดของวงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน มีค่าประมาณ 1.1 กิโลเฮิร์ตซ์

จากโครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้าในรูปที่ 3.4 ได้ทดลองสร้างขึ้นเป็นแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 3.5

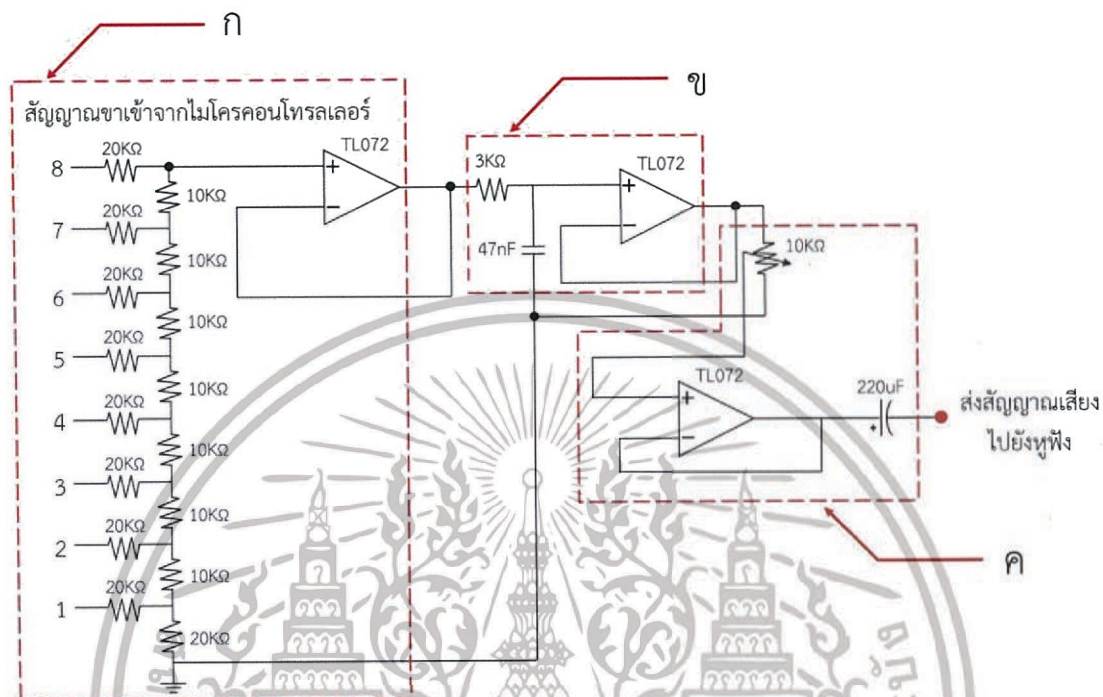


รูปที่ 3.5 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการเรียนการสอนเท่านั้น เมื่อผู้เอาต์เห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.3 แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก

แผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก ประกอบไปด้วยวงจรย่อย 3 วงจร ซึ่งมีหน้าที่แตกต่างกันไปในแต่ละวงจร โครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออกแสดงดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โครงสร้างวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก

วงจรส่วน ก ในรูปที่ 3.6 ประกอบไปด้วย วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อก ชนิดความต้านทานชั้นบันไดขนาด 8 บิต ทำหน้าที่แปลงสัญญาณดิจิทัลที่ผ่านการประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์เป็นสัญญาณอนาล็อก หลักการทำงานของวงจร ค่าที่ได้จากการประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์จะถูกแปลงให้อยู่ในเลขฐาน 2 จำนวน  $n$  บิต กำหนดให้  $n$  คือ ขนาดบิตของวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นอนาล็อก ซึ่งขนาดบิตของวงจรส่งผลต่อความละเอียดของสัญญาณอนาล็อก สามารถคำนวณความละเอียดของสัญญาณอนาล็อกได้จากสมการที่ (3.7) เนื่องจากวงจรมีขนาดเท่ากับ 8 บิต แต่ละบิตจะถูกแทนด้วยขาสัญญาณดิจิทัลขาออก (Digital Output) ทั้ง 8 ขาของไมโครคอนโทรลเลอร์ แต่ละขาจะมีการแสดงผลอยู่ 2 สถานะ คือ 1 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 5 โวลต์ 0 มีค่าแรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0 โวลต์ สามารถคำนวณหาค่าสัญญาณอนาล็อกจากสถานะแต่ละขาสัญญาณดิจิทัลขาออกได้จากสมการ (3.6) แล้วผ่านเข้าสู่วงจรบัฟเฟอร์ ทำหน้าที่ในการป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณ เมื่อมีการต่อโหลดเข้ามาเพิ่มเติมภายในวงจร

$$V_{\text{analog}} = 5 \left( \frac{DO_8}{2} + \frac{DO_7}{4} + \frac{DO_6}{8} + \frac{DO_5}{16} + \frac{DO_4}{32} + \frac{DO_3}{64} + \frac{DO_2}{128} + \frac{DO_1}{256} \right) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

$V_{analog}$  คือ ค่าสัญญาณอนาล็อก มีหน่วยเป็นโวลต์

$DO_1$  ถึง  $DO_8$  คือ ขาสัญญาณดิจิทัลขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ ตั้งแต่ขาที่ 1 ไปจนถึงขาที่ 8

เมื่อทำการคำนวณจากสมการที่ (2.28) จะได้ว่า

$$Res = 2^8$$

ความละเอียดของแรงดันสัญญาณมีค่าเท่ากับ 256 ที่แรงดันอ้างอิง 5 โวลต์ ค่าของแรงดันสัญญาณจะมีความแตกต่างกันอยู่ที่ 19 มิลลิโวลต์ เมื่อค่าที่ได้จากการประมวลผลต่างกันเท่ากับ 1

ตัวอย่างการแปลงเลขฐาน 2 ของค่าที่ได้มาจากการประมวลผลโดยไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อที่จะนำไปแทนในแต่ละขาสัญญาณดิจิทัลขาออกแสดงดังตัวอย่างที่ 3.1, 3.2

**ตัวอย่างที่ 3.1** วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 8 บิต ได้รับค่าที่ผ่านการประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเท่ากับ 221 เป็นข้อมูลที่มีขนาด 8 บิต เนื่องจากขนาดข้อมูลที่ได้รับมามีค่า 8 บิตเท่ากับขนาดของวงจร สามารถทำการแปลงเป็นการแปลงเป็นเลขฐาน 2 ได้ทันที

$$221/2 = 110 \text{ เศษ } 1 \text{ บิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB)}$$

$$110/2 = 55 \text{ เศษ } 0$$

$$55/2 = 27 \text{ เศษ } 1$$

$$27/2 = 13 \text{ เศษ } 1$$

$$13/2 = 6 \text{ เศษ } 1$$

$$6/2 = 3 \text{ เศษ } 0$$

$$3/2 = 1 \text{ เศษ } 1$$

$$1/2 = 0 \text{ เศษ } 1 \text{ บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (MSB)}$$

เขียนเป็นเลขฐาน 2 ได้เป็น 11011101 บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดจะเป็นบิตที่อยู่ซ้ายสุด จากเลขฐาน 2 ชุดนี้ นำไปแทนสถานะขาสัญญาณดิจิทัลขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ในสมการที่ (2.28) โดยบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดคือ ขาสัญญาณดิจิทัลขาออกขาที่ 8 และบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดคือ ขาสัญญาณดิจิทัลขาออกขาที่ 1

$$V_{analog} = 5 \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{4} + \frac{0}{8} + \frac{1}{16} + \frac{1}{32} + \frac{1}{64} + \frac{0}{128} + \frac{1}{256} \right)$$

จากการคำนวณ สัญญาณอนาล็อกมีค่าเท่ากับ 4.316 โวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**ตัวอย่างที่ 3.2** วงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกขนาด 8 บิต ได้รับค่าที่ผ่านการประมวลผลจากไมโครคอนโทรลเลอร์มีค่าเท่ากับ 682 เป็นข้อมูลขนาด 10 บิต ต้องทำการแปลงข้อมูลขนาด 10 บิต เป็นข้อมูลขนาด 8 บิต ก่อนที่จะทำการแปลงเป็นเลขฐาน 2 สามารถคำนวณได้ด้วยสมการที่ (3.7)

$$x_a \left( \frac{2^b - 1}{2^a - 1} \right) = y_b \quad (3.7)$$

เมื่อ

$x_a$  คือ ค่าที่ได้มาจากการประมวลผล มีขนาด a บิต

$y_b$  คือ ค่าที่ผ่านการแปลงขนาดของข้อมูลจากขนาด a บิต เป็นขนาด b บิต

แทนค่าในสมการที่ (3.7)

$$682 \left( \frac{2^8 - 1}{2^{10} - 1} \right) = 170$$

ทำการแปลงเป็นเลขฐาน 2

$$170/2 = 85 \text{ เศษ } 0 \text{ บิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุด (LSB)}$$

$$85/2 = 42 \text{ เศษ } 1$$

$$42/2 = 21 \text{ เศษ } 0$$

$$21/2 = 10 \text{ เศษ } 1$$

$$10/2 = 5 \text{ เศษ } 0$$

$$5/2 = 2 \text{ เศษ } 1$$

$$2/2 = 1 \text{ เศษ } 0$$

$$1/2 = 0 \text{ เศษ } 1 \text{ บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุด (MSB)}$$

เขียนเป็นเลขฐาน 2 ได้เป็น 10101010 บิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดจะเป็นบิตที่อยู่ซ้ายสุด จากเลขฐาน 2 ชุดนี้ นำไปแทนสถานะขาสัญญาณดิจิทัลขาออกของไมโครคอนโทรลเลอร์ในสมการที่ (2.28) โดยบิตที่มีนัยสำคัญสูงสุดคือ ขาสัญญาณดิจิทัลขาออกขาที่ 8 และบิตที่มีนัยสำคัญต่ำสุดคือ ขาสัญญาณดิจิทัลขาออกขาที่ 1

$$V_{\text{analog}} = 5 \left( \frac{1}{2} + \frac{0}{4} + \frac{1}{8} + \frac{0}{16} + \frac{1}{32} + \frac{0}{64} + \frac{1}{128} + \frac{0}{256} \right)$$

จากการคำนวณ สัญญาณอนาล็อกมีค่าเท่ากับ 3.323 โวลต์

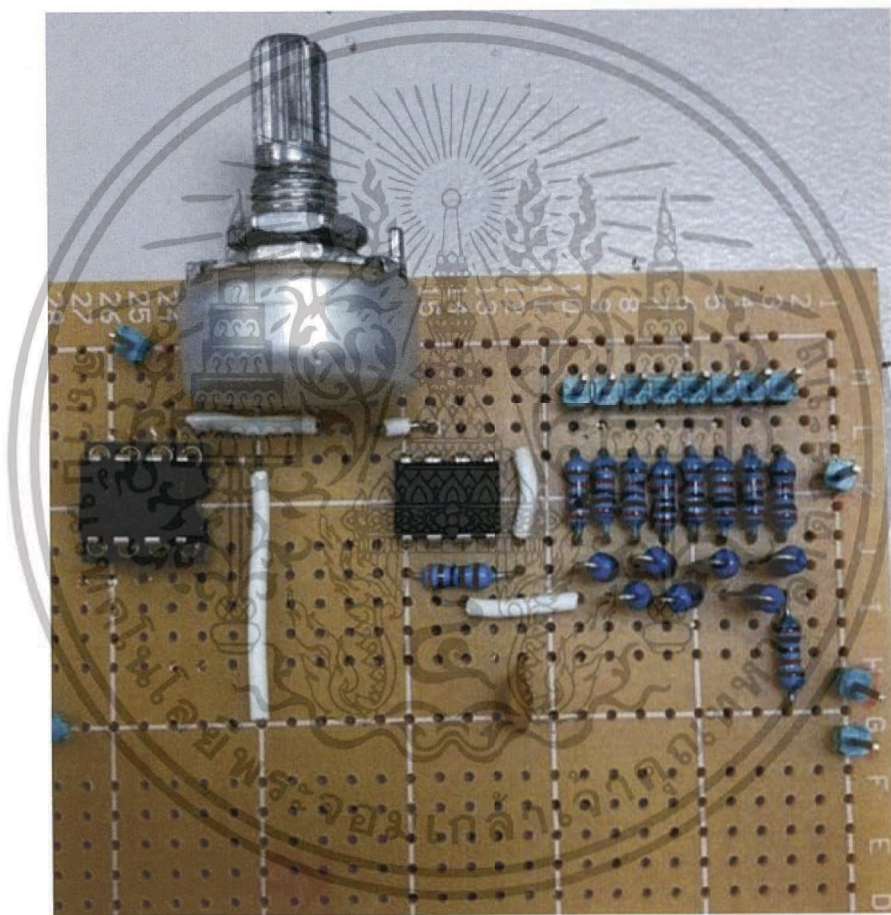
วงจรส่วน ข ในรูปที่ 3.6 ประกอบไปด้วย วงจรรองความถี่ต่ำผ่าน ทำหน้าที่ในกำจัดสัญญาณที่ความถี่สูงออกไป มีการเลือกใช้จุดตัดความถี่เดียวกันกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์กรองสัญญาณขาเข้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการคำนวณว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเลือกใช้ที่จุดตัดความถี่เดียวกัน เป็นการเลือกใช้ให้มีความเหมาะสมกันของสัญญาณในระหว่างภาครับสัญญาณขาเข้าและภาคส่งสัญญาณขาออก และวงจรรีบเฟออร์ ทำหน้าที่ในการป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณ

วงจรรส่วน ค ในรูปที่ 3.6 ประกอบไปด้วย ตัวต้านทานปรับค่าได้ขนาด 10 กิโลโอห์ม ทำหน้าที่ในการปรับขนาดของสัญญาณ หรือระดับความดังของเสียง วงจรรีบเฟออร์ ทำหน้าที่ในการป้องกันความผิดเพี้ยนของสัญญาณ และตัวเก็บประจุขนาด 220 ไมโครฟารัด ทำหน้าที่ในการกำจัดแรงดันไฟตรงที่ปะปนมากับสัญญาณขาออก ก่อนที่จะส่งสัญญาณขาออกไปยังหูฟัง

จากโครงสร้างวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก ในรูปที่ 3.6 ได้ทดลองสร้างขึ้นเป็นแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ภาคส่งสัญญาณขาออก

### 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์

อุปกรณ์ที่ใช้ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่อยู่ในแผงวงจรรอิเล็กทรอนิกส์ และที่ติดตั้งอยู่ภายในตัวชิ้นงาน ได้แก่ ไมโครโฟน หูฟังพร้อมไมโครโฟน รูเสียบหูฟัง ไมโครคอนโทรลเลอร์ โมดูลสื่อสารไร้สาย ไอซีเบอร์ TL072 วงจรรสำเร็จรูป DC/DC Converter วงจรรสำเร็จรูป DC/DC Step-Up และแบตเตอรี่ ในหัวข้อนี้กล่าวถึงหน้าที่ของแต่ละอุปกรณ์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.1 ไมโครโฟน

ไมโครโฟน หรือไมโครโฟนตัวที่ 2 ในแบบจำลองชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.8 ทำหน้าที่รับเสียงรบกวนที่บริเวณรอบ ๆ และให้สัญญาณเสียงที่มีระดับแรงดันอยู่ในช่วง 200 ถึง 250 มิลลิโวลต์ มีการติดตั้งอยู่บนตัวชิ้นงาน เสียงรบกวนที่ผ่านเข้ามายังไมโครโฟน จะผ่านไปยังวงจรมัลติเพล็กซ์และเข้าไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ นำไปใช้ในการประมวลผลด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด เพื่อลดเสียงรบกวนในการสื่อสาร



รูปที่ 3.8 ไมโครโฟน

### 3.4.2 หูฟังพร้อมไมโครโฟน

หูฟังพร้อมไมโครโฟน หรือ ไมโครโฟนตัวที่ 1 ในแบบจำลองชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3.9 ไมโครโฟนที่ติดอยู่กับหูฟังทำหน้าที่รับเสียงจากผู้พูดผ่านไปยังวงจรมัลติเพล็กซ์และเข้าไปที่ไมโครคอนโทรลเลอร์ นำไปประมวลผลในกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด และหูฟังทำหน้าที่เล่นเสียงที่มาจากคู่สนทนา

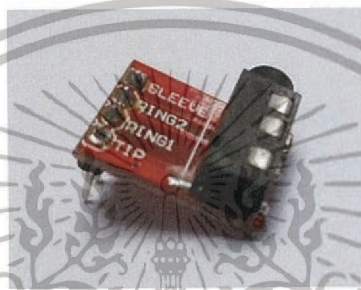


รูปที่ 3.9 หูฟังพร้อมไมโครโฟน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.3 รู็เสียบไมโครโฟนและหูฟัง

รู็เสียบไมโครโฟนและหูฟัง แสดงดังรูปที่ 3.10 ภายในรู็เสียบหูฟังจะมีส่วนนำสัญญาณสัมผัสกับแจ็คของไมโครโฟนหรือหูฟัง ซึ่งช่องนำสัญญาณของไมโครโฟนจะประกอบไปด้วย 4 ส่วน สอดคล้องกับรู็เสียบหูฟัง ได้แก่ ทิป (Tip) คือ ส่วนนำสัญญาณเสียงไปยังหูฟังข้างซ้าย ริง1 (Ring1) คือ ส่วนนำสัญญาณเสียงไปยังหูฟังข้างขวา ริง2 (Ring2) คือ ส่วนกราวด์ของไมโครโฟน และสลีฟ (Sleeve) คือ ส่วนรับสัญญาณเสียงจากไมโครโฟน โดยรู็เสียบไมโครโฟนและหูฟัง จะทำหน้าที่นำเข้าสู่สัญญาณเสียงจากไมโครโฟน 1 และไมโครโฟนที่ติดอยู่กับหูฟัง หรือไมโครโฟน 2 ไปยังแผงวงจรภาครับสัญญาณขาเข้า และทำหน้าที่ส่งผ่านสัญญาณเสียงจากแผงวงจรภาคส่งสัญญาณขาออกไปยังหูฟัง



รูปที่ 3.10 รู็เสียบไมโครโฟนและหูฟัง

### 3.4.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งเลือกใช้ในอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริญญาบัตรฉบับนี้ คือ ตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 แสดงดังรูปที่ 3.11 ซึ่งสามารถหาซื้อได้ง่าย มีราคาถูก และมีคุณสมบัติสำคัญ ได้แก่ บริโภคพลังงานต่ำ มีขารับสัญญาณอนาล็อก มีขาส่งสัญญาณดิจิทัล และพัลส์วิตท์มอดูเลชัน (Pulse Width Modulation, PWM) มีความเร็วสัญญาณนาฬิกาสูงถึง 16 เมกะเฮิร์ตซ์ ซึ่งไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำหน้าที่ในการประมวลผลลดเสียงรบกวนด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด รับสัญญาณขาเข้าและส่งสัญญาณขาออก



รูปที่ 3.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิอนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 โมดูลสื่อสารไร้สาย

โมดูลสื่อสารไร้สาย ซึ่งเลือกใช้ในอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ คือ โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01 แสดงดังรูปที่ 3.12 ทำหน้าที่ส่งและรับข้อมูลสัญญาณเสียงที่ผ่านการประมวลผลจากระบบการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดด้วยระบบการกล้ำสัญญาณดิจิทัลเชิงความถี่ หรือ FSK เพื่อให้เกิดการสื่อสารกันระหว่างคู่สนทนา การสื่อสารระหว่างโมดูลสื่อสารไร้สายจะอยู่ในช่วงความถี่ที่ 2.4 จิกะเฮิรตซ์ มีคุณสมบัติบริโภคพลังงานน้อยมาก มีความรวดเร็วในการรับและส่งข้อมูล ระยะในการสื่อสารประมาณ 100 เมตร และมีการประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย



รูปที่ 3.12 โมดูลสื่อสารไร้สาย nRF24L01

### 3.4.6 ไอซี TL072

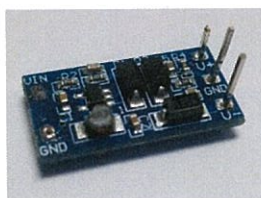
ไอซี TL072 แสดงดังรูปที่ 3.13 เป็นไอซีออปแอมป์ ทำหน้าที่เป็นวงจรขยายสัญญาณและวงจรบัฟเฟอร์ ให้แก่แผงวงจรทั้งภาครับสัญญาณและภาคส่งสัญญาณ ซึ่งมีคุณสมบัติ มีสัญญาณรบกวนน้อย บริโภคพลังงานน้อย และเหมาะสำหรับการนำมาใช้งานทางด้านเสียง



รูปที่ 3.13 ไอซี TL072

### 3.4.7 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Converter

วงจรสำเร็จรูป DC/DC Converter แสดงดังรูปที่ 3.14 ทำหน้าที่แปลงไฟจากแบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้า 3.7 โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า  $\pm 12$  โวลต์ เพื่อใช้ในเป็นไฟเลี้ยงให้แก่ ไอซีเบอร์ TL072 ทั้งแผงวงจรภาครับสัญญาณและภาคส่งสัญญาณ

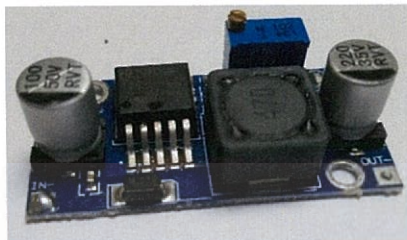


รูปที่ 3.14 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Converter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น มิอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.8 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Step-Up

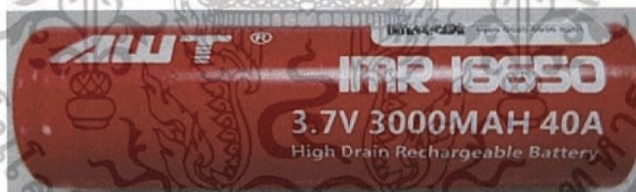
วงจรสำเร็จรูป DC/DC Step-Up แสดงดังรูปที่ 3.15 ทำหน้าที่แปลงไฟจากแบตเตอรี่ที่แรงดันไฟฟ้า 3.7 โวลต์ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้า 9 โวลต์ หรือ 12 โวลต์ เพื่อใช้ในเป็นไฟเลี้ยงให้แก่ไมโครคอนโทรลเลอร์ทั้ง 2 ตัว



รูปที่ 3.15 วงจรสำเร็จรูป DC/DC Step-Up

### 3.4.9 แบตเตอรี่

แบตเตอรี่ ซึ่งเลือกใช้ในอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนในปริญญาโทฉบับนี้แสดงดังรูปที่ 3.16 โดยในแต่ละอุปกรณ์สื่อสารจะใช้แบตเตอรี่ 2 ก้อน ก้อนที่ 1 นำไปใช้กับวงจรสำเร็จรูปที่ใช้ในการแปลงไฟสำหรับไอซี TL072 และก้อนที่ 2 นำไปใช้กับวงจรสำเร็จรูปอีกหนึ่งวงจรเพื่อแปลงไฟให้เหมาะสมสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์ จึงเลือกใช้แบตเตอรี่ขนาด 3.7 โวลต์ ยี่ห้อ AWI ทำหน้าที่ในการเป็นแหล่งพลังงานให้แก่วงจรสำเร็จรูปทั้งสอง ซึ่งคุณสมบัติของแบตเตอรี่ สามารถนำไปชาร์ตใหม่ได้ สามารถใช้ได้นาน และจ่ายกระแสได้สูงถึง 40 แอมป์ซึ่งเพียงพอแก่วงจรสำเร็จรูป



รูปที่ 3.16 แบตเตอรี่

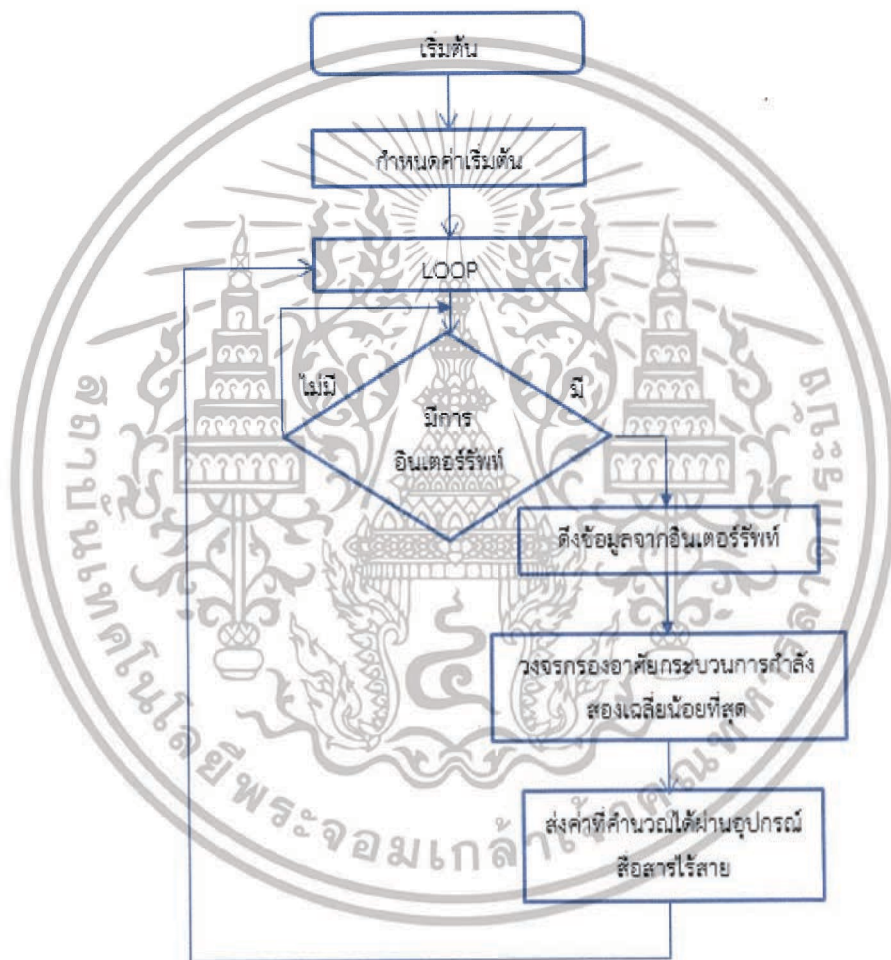
## 3.5 โปรแกรมสำหรับอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน

โปรแกรมสำหรับอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนนั้นจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย และส่วนรับข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายแล้วส่งออกข้อมูลเสียงไปยังหูฟัง โดยทั้งสองส่วนจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์อย่างละ 1 ตัว ซึ่งโปรแกรมของอุปกรณ์สื่อสารไร้สายจะทำการกำหนดให้ใช้จำนวนค่าสัมประสิทธิ์วงจรรองสัญญาณ 5 ตัว และใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า  $\mu$  เท่ากับ 0.0000005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1 ส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย

ส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายมีแนวคิดแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.17 ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ การกำหนดค่าเริ่มต้น การรับข้อมูลผ่านการอินเทอร์เน็ตร์รัพท์ การประมวลผลโดยอาศัยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด และการส่งออกข้อมูลสัญญาณเสียงด้วยการสื่อสารไร้สาย โดยจะรับค่าสัญญาณเสียงของไมโครโฟนทั้ง 2 ตัวมาจากอินเทอร์เน็ตร์รัพท์ แล้วนำมาคำนวณโดยอาศัยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุดแล้วจะได้ค่าสัญญาณที่ผ่านการประมวลผลแล้วส่งข้อมูลสัญญาณผ่านทาง การสื่อสารไร้สายไปยังฝั่งตัวรับต่อไป



รูปที่ 3.17 แผนผังการทำงานของส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย

#### 3.5.1.1 การกำหนดค่าเริ่มต้น

การกำหนดค่าเริ่มต้นเป็นสิ่งจำเป็นในการเขียนโปรแกรม โดยจะใช้ในการประกาศชื่อตัวแปรต่าง ๆ ซึ่งโปรแกรมของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนนั้นจำเป็นต้องทำการกำหนดค่าเริ่มต้นทั้งในส่วนประมวลผลและส่งข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สาย และส่วนรับข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายแล้วส่งออกข้อมูลเสียงไปยังหูฟังโดยโปรแกรมส่วนของการกำหนดค่าเริ่มต้นได้แสดงในรูปที่ 3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

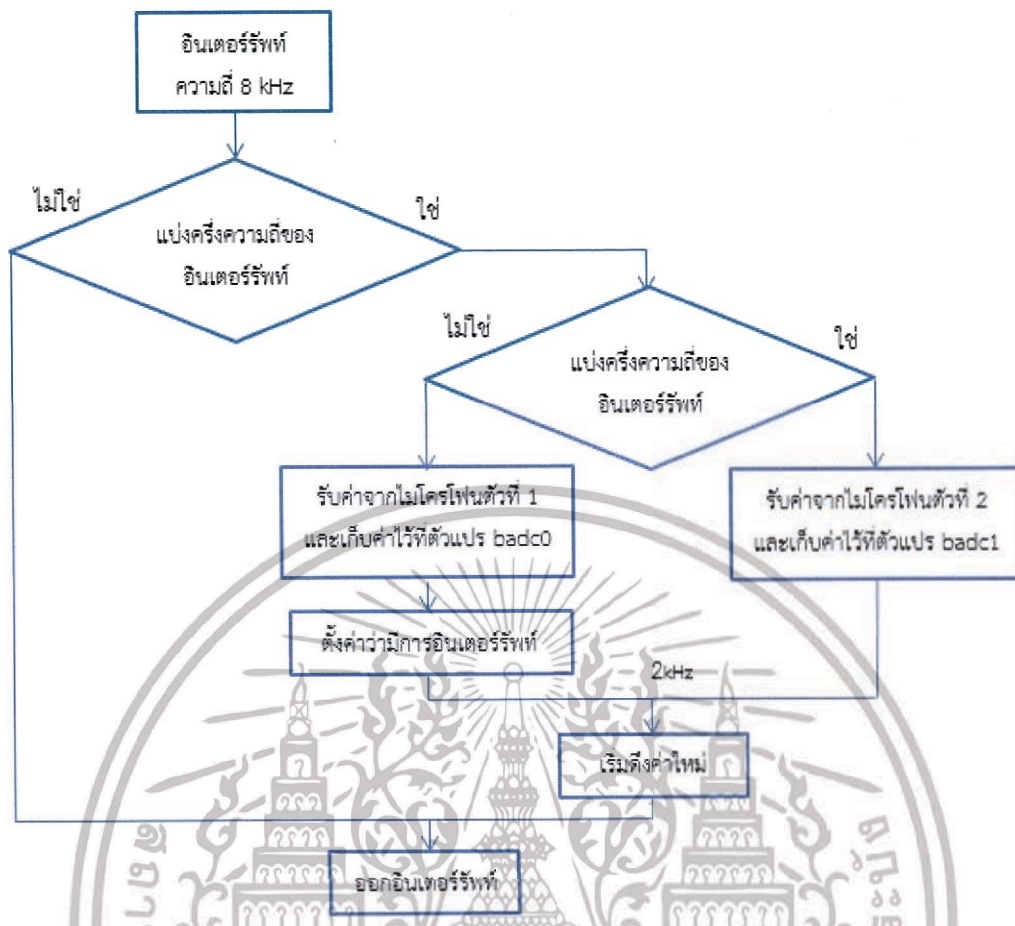
// กำหนดตัวแปร
volatile boolean f_sample;
volatile byte badc0;
volatile byte badc1;
volatile boolean div4;
volatile boolean div2;
double u = 0.0000005;
double E;
double Y;
double R;
double X[5];
double De[5];
double wnew1;
double wnew2;
double wnew3;
double wnew4;
double wnew5;
int T = 5;
int t, b, c, d, e;
int in, ii;

```

รูปที่ 3.18 โปรแกรมส่วนกำหนดค่าเริ่มต้น

### 3.5.1.2 การรับข้อมูลผ่านการอินเตอร์รัพท์

การประมวลผลรับสัญญาณเสียงจากแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ภาครับสัญญาณขาเข้าจะใช้ฟังก์ชัน ADC (Analog to Digital Converter) ในการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งจะเขียนฟังก์ชันนี้ในอินเตอร์รัพท์โดยรูปที่ 3.19 อธิบายถึงแผนผังการทำงานของอินเตอร์รัพท์คือ กำหนดความถี่ของอินเตอร์รัพท์อยู่ที่ 8 กิโลเฮิร์ตซ์ แล้วลดลงมาให้อยู่ที่ 2 กิโลเฮิร์ตซ์ และทำการรับค่าสัญญาณไมโครโฟนที่รับเสียงผู้พูดและเสียงรบกวนมาจากขารับสัญญาณอนาล็อก A0 แล้วนำค่าที่ได้ไปเก็บไว้ในตัวแปร badc0 จากนั้นรับค่าสัญญาณไมโครโฟนที่รับเสียงรบกวนเพียงลำพังจากขารับสัญญาณอนาล็อก A1 แล้วนำค่าที่ได้ไปเก็บไว้ในตัวแปร badc1 สลับกันไปเรื่อย ๆ โดยการทำงานของอินเตอร์รัพท์แบบนี้จะทำให้สามารถเก็บค่าสัญญาณอนาล็อก 2 ค่า พร้อมกันได้ ซึ่งโปรแกรมของอินเตอร์รัพท์นั้นได้แสดงไว้อยู่ในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 แผนผังการทำงานของอินเทอร์รัพท์

```

ISR(TIMER2_OVF_vect) { // timer2 มีความถี่ 16000000/256/8 = 7812 Hz
    div4 = !div4; // แบ่งความถี่ของ timer2 ลงครึ่งหนึ่งเป็น 3906 Hz
    if (div4) {
        div2 = !div2; // แบ่งความถี่ของ timer2 ลงครึ่งหนึ่งเป็น 1953 Hz
        if (div2) {
            badc0 = ADCH; // รับค่า analog จาก a0 เก็บไว้ที่ตัวแปร badc0
            sbi(ADMUX, MUX0); // ตั้งค่าให้รับค่า analog จาก a1
        }
        else {
            badc1 = ADCH; // รับค่า analog จาก a1 เก็บไว้ที่ตัวแปร badc1
            cbi(ADMUX, MUX0); // ตั้งค่าให้รับค่า analog จาก a0
            f_sample = true; // ตั้งค่า flag เป็น 1
        }
    }
    sbi(ADCSRA, ADSC); // เริ่มตั้งค่าอีกครั้ง
}
  
```

รูปที่ 3.20 โปรแกรมของอินเทอร์รัพท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1.3 การประมวลผลโดยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

การประมวลผลโดยอาศัยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด คือ นำสัญญาณดิจิทัลที่ถูกแปลงมาจากฟังก์ชันการแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิทัล มาทำการคำนวณโดยใช้กระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ซึ่งในตัวสมการนั้นมีการนำข้อมูลเก่ามาคิดจึงจำเป็นต้องเก็บข้อมูลสัญญาณเสียงให้อยู่ในรูปแบบของอาร์เรย์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงกำหนดตัวบ่งชี้ข้อมูลของอาร์เรย์ โดยโปรแกรมของการกำหนดตัวบ่งชี้ข้อมูลได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.21

```

De[t] = badc0;           // แปลง analog เป็น array
X[t] = badc1;           // แปลง analog เป็น array
//set case loop for index
b = t + 1;
c = t + 2;
d = t + 3;
e = t + 4;
if (b >= T) {           //กรณีที่จะทำให้ X[b] = X[t-4]
    b = b - T;}
if (c >= T) {           //กรณีที่จะทำให้ X[c] = X[t-3]
    c = c - T;}
if (d >= T) {           //กรณีที่จะทำให้ X[d] = X[t-2]
    d = d - T;}
if (e >= T) {           //กรณีที่จะทำให้ X[e] = X[t-1]
    e = e - T;}

```

รูปที่ 3.21 โปรแกรมส่วนกำหนดตัวบ่งชี้ข้อมูล

จากแผนผังการทำงานของผังตัวประมวลผลและส่งสัญญาณ ข้อมูลมีส่วนสำคัญคือ กระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยสมการนั้นอ้างอิงมาจากสมการที่ (2.14) ซึ่งจะใช้ในการประมาณค่าสัมประสิทธิ์จริงจกรกรองสัญญาณไปเรื่อย ๆ จนมีค่าที่เหมาะสม โดยสมการดังกล่าวสามารถเขียนโปรแกรมได้ดังรูปที่ 3.22

```

//Adaptive Digital Filter base on LMS Algorithm
//LMS algorithm
Y = (X[t] * wnew1) + (X[e] * wnew2) + (X[d] * wnew3) + (X[c] * wnew4) + (X[b] * wnew5);
//error=input-output
E = De[t] - Y ;
//ค่าคงที่ เพื่อลดเวลาการทำงานของ CODE
R = u * E;
//update filter weight
wnew1 = wnew1 + (R * X[t]);
wnew2 = wnew2 + (R * X[e]);
wnew3 = wnew3 + (R * X[d]);
wnew4 = wnew4 + (R * X[c]);
wnew5 = wnew5 + (R * X[b]);
in = E;           // แปลงค่าจาก double เป็น array

```

รูปที่ 3.22 โปรแกรมการทำงานของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการ

กำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5.1.4 การส่งออกข้อมูลสัญญาณเสียง

การส่งออกข้อมูลสัญญาณเสียงนั้นได้ใช้ไลบรารี nRF24L01 ช่วยในการรับส่งข้อมูล โดยจะต้องกำหนดช่องการสื่อสาร และชื่อช่องการสื่อสาร ให้ตรงกันทั้งตัวรับและตัวส่งดังรูปที่ 3.23

```
SPI.begin(); //ตั้งค่า Wireless
SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
transmitter.channel(50); // ตั้งช่องการสื่อสาร
transmitter.TXaddress("ALL1"); // กำหนดชื่อช่องการสื่อสาร
transmitter.init();
```

รูปที่ 3.23 การตั้งค่าไลบรารีรับส่งสัญญาณการสื่อสารไร้สาย

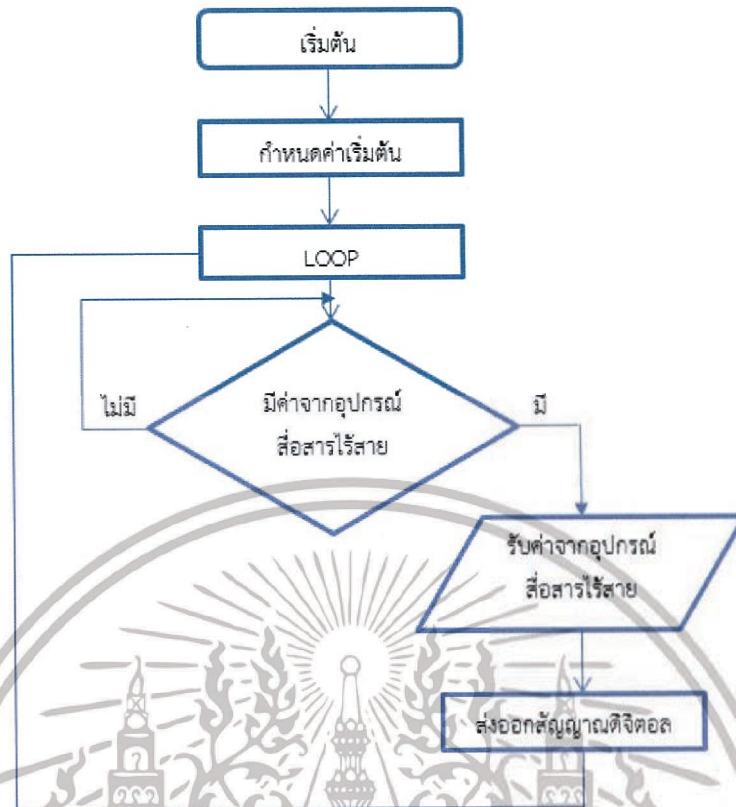
จากนั้นทำการกำหนดตัวแปรที่จะส่งข้อมูลสัญญาณในโปรแกรมของฝั่งตัวส่งและกำหนดวิธีการส่งข้อมูลสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 3.24

```
transmitter.txBL(in); // กำหนดตัวแปร in เป็นตัวแปรที่จะส่ง wireless
transmitter.send(FAST); // ส่งข้อมูลทาง wireless
```

รูปที่ 3.24 โปรแกรมการทำงานของ การส่งสัญญาณการสื่อสารไร้สาย

### 3.5.2 ส่วนรับข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายแล้วส่งออกข้อมูลเสียงไปยังหูฟัง

ส่วนรับข้อมูลสัญญาณเสียงแบบไร้สายแล้วส่งออกข้อมูลเสียงไปยังหูฟัง มีแนวคิดแผนผังการทำงานดังรูปที่ 3.25 ซึ่งการรับข้อมูลสัญญาณเสียง ต้องมีการตั้งค่าช่องการสื่อสาร และชื่อช่องการสื่อสารให้ตรงกับทางฝั่งส่งข้อมูลเมื่อรับข้อมูลสัญญาณเสียงมาแล้ว จะทำการส่งข้อมูลสัญญาณเสียงออกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล โดยใช้คำสั่ง PORTD จะได้สัญญาณออกมาเป็นสัญญาณดิจิทัลขนาด 8 บิต ส่งไปยังวงจรแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณอนาล็อกชนิดความต้านทานชั้นบันไดขนาด 8 บิต และส่งสัญญาณเสียงไปที่หูฟัง โดยโปรแกรมของฝั่งตัวรับจะแสดงในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.25 แผนผังการทำงานของฝั่งตัวรับข้อมูลสัญญาณเสียงผ่านการสื่อสารไร้สาย

```

#include <SPI.h>
#include <nRF24L01p.h>
nRF24L01p receiver(9, 10); // CSN, CE
void setup() {
  for (byte i = 0; i < 8; i++) {
    pinMode(i, OUTPUT); // set digital pins 0-7 as outputs (DAC)
  }
  Serial.begin(115200);
  SPI.begin();
  SPI.setBitOrder(MSBFIRST);
  receiver.channel(0); // ตั้งชื่อความถี่ให้ตรงกัน
  receiver.RXaddress("ALL2"); // ตั้งชื่อตำแหน่งให้ตรงกัน ข้อตั้งได้สูงสุด 5 ตัวอักษร
  receiver.init();
}
int in;

void loop() {
  if (receiver.available()) {
    receiver.read(); // ส่งให้เริ่มอ่าน
    receiver.rxPL(in); // ส่งให้อ่านเก็บไว้ที่ตัวแปร
    PORTD = in+127;
  }
}
  
```

รูปที่ 3.26 โปรแกรมฝั่งตัวรับข้อมูลสัญญาณเสียงผ่านการสื่อสารไร้สาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

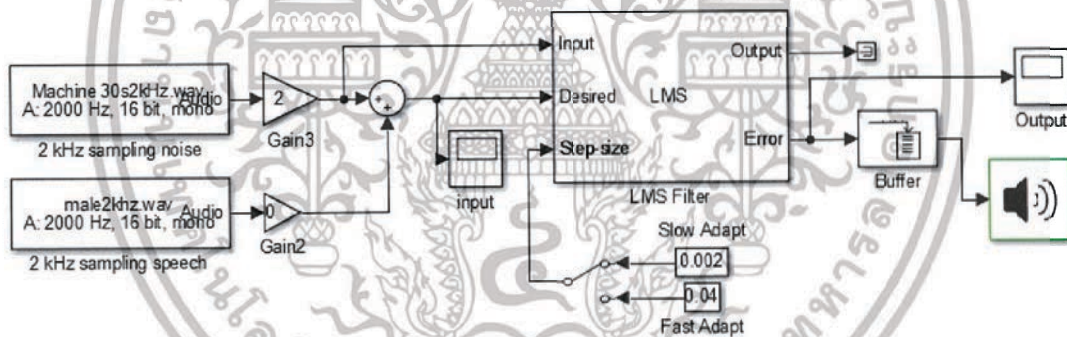
## บทที่ 4

### ผลการทดลอง

บทนี้จะเป็นการนำเสนอการทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยเปรียบเทียบจากผลการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB และผลการทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์สื่อสารแบบตัดเสียงรบกวน โดยมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1 การจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB

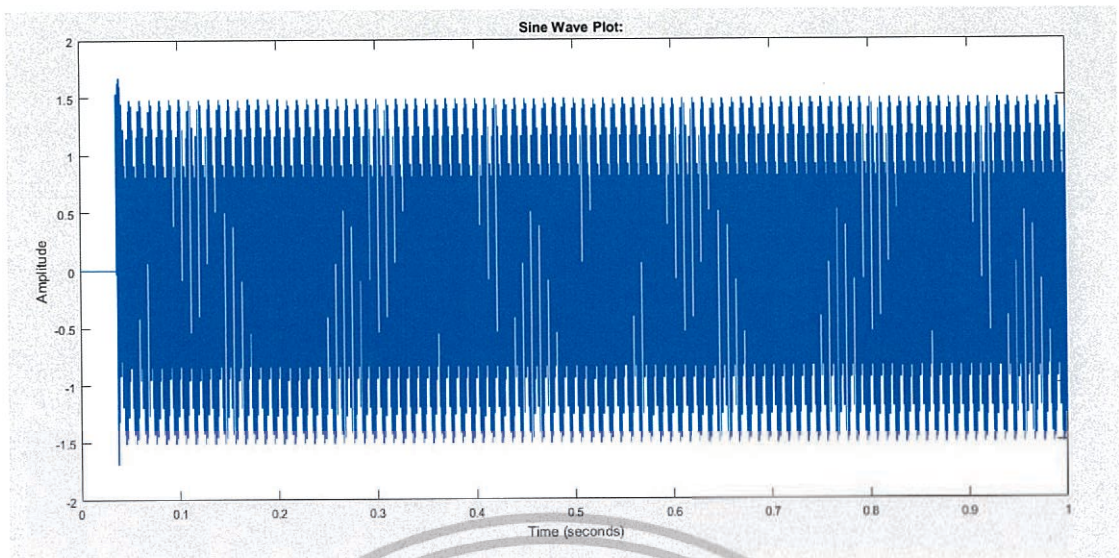
ในการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB จะใช้ Simulink ทำการจำลองวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยใช้จำนวนค่าสัมประสิทธิ์วงจรกรองสัญญาณเชิงเลข 5 ตัว และไม่มีเสียงจากผู้พูดเพื่อง่ายต่อการสังเกตและดูว่าสามารถกรองเสียงรบกวนออกไปได้หรือไม่ โดยบล็อกไดอะแกรมแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งจะทำการจำลองโดยการเปลี่ยนใช้เสียงรบกวน 3 แบบคือ สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ (Sine Wave) สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว (White Noise) และเสียงเครื่องจักรในโรงงาน



รูปที่ 4.1 แบบจำลองโดยใช้ Simulink

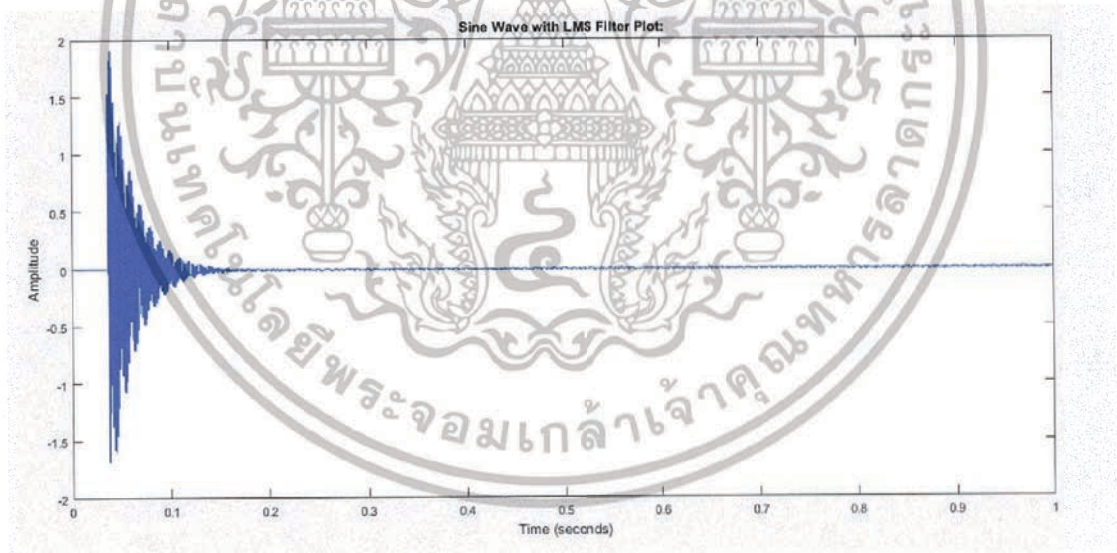
##### 4.1.1 ผลการจำลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์

การทดลองโดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์จะใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ที่มีความถี่ 700 เฮิรตซ์ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2 จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวมากรองด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด



รูปที่ 4.2 สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ความถี่ 700 เฮิรตซ์

โดยผลการทดลองการจำลองระบบจะเห็นได้ว่า เมื่อนำสัญญาณเสียงรบกวนมากรองด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด สัญญาณเสียงรบกวนจะถูกกรองออกไปเกือบสมบูรณ์ โดยใช้เวลาประมาณ 0.15 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.3

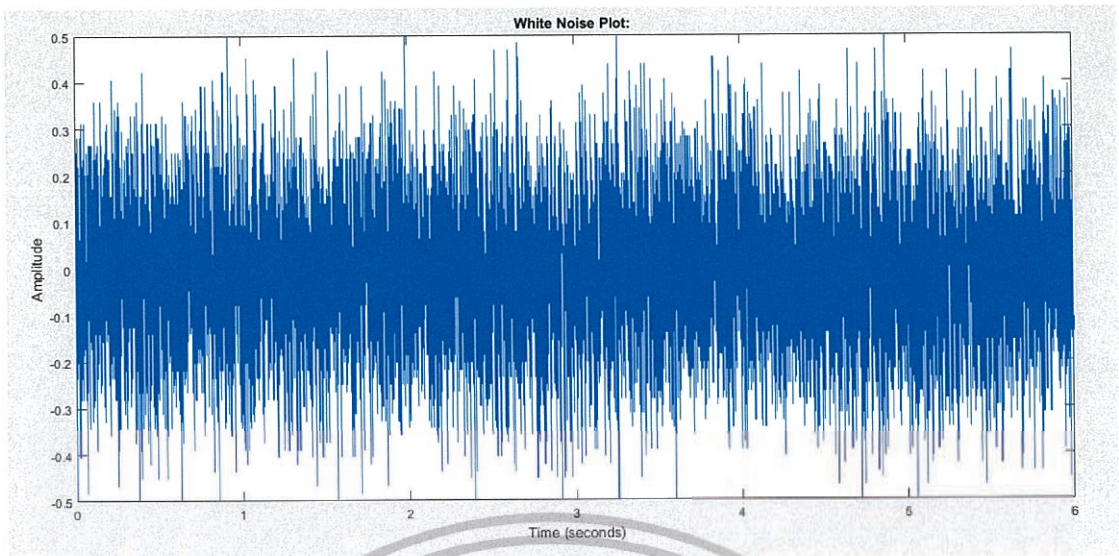


รูปที่ 4.3 สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ความถี่ 700 เฮิรตซ์ เมื่อผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

#### 4.1.2 ผลการจำลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว

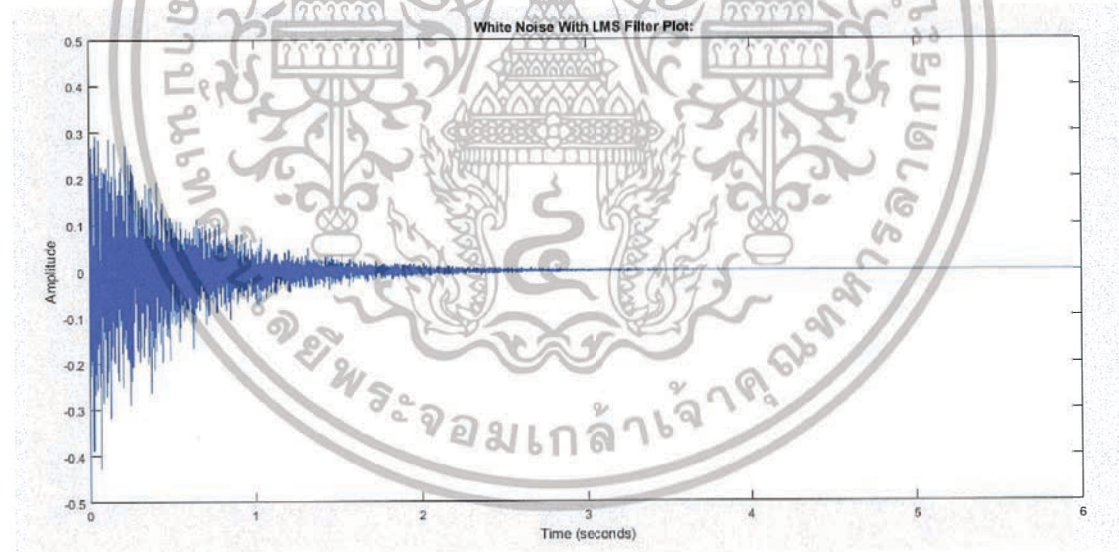
การทดลองโดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว จะใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวที่แสดงดังรูปที่ 4.4 จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวมากรองด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว

โดยผลการทดลองการจำลองระบบจะเห็นว่า เมื่อนำสัญญาณเสียงรบกวนมากรองด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด สัญญาณเสียงรบกวนจะถูกกรองออกไปได้แต่ใช้เวลานานขึ้น โดยใช้เวลาประมาณ 2.5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.5

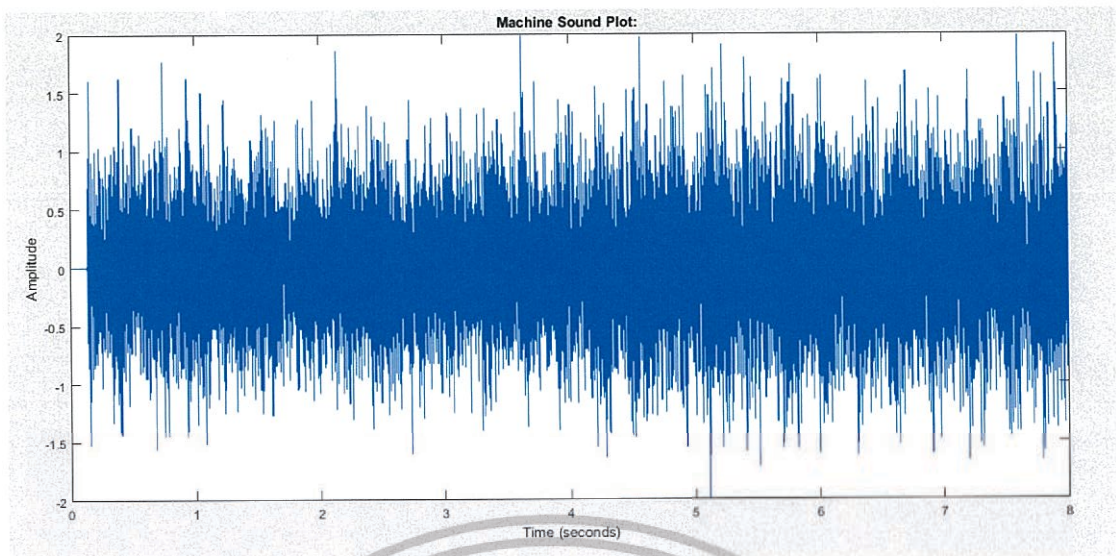


รูปที่ 4.5 สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวเมื่อผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

#### 4.1.3 ผลการจำลองเมื่อใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน

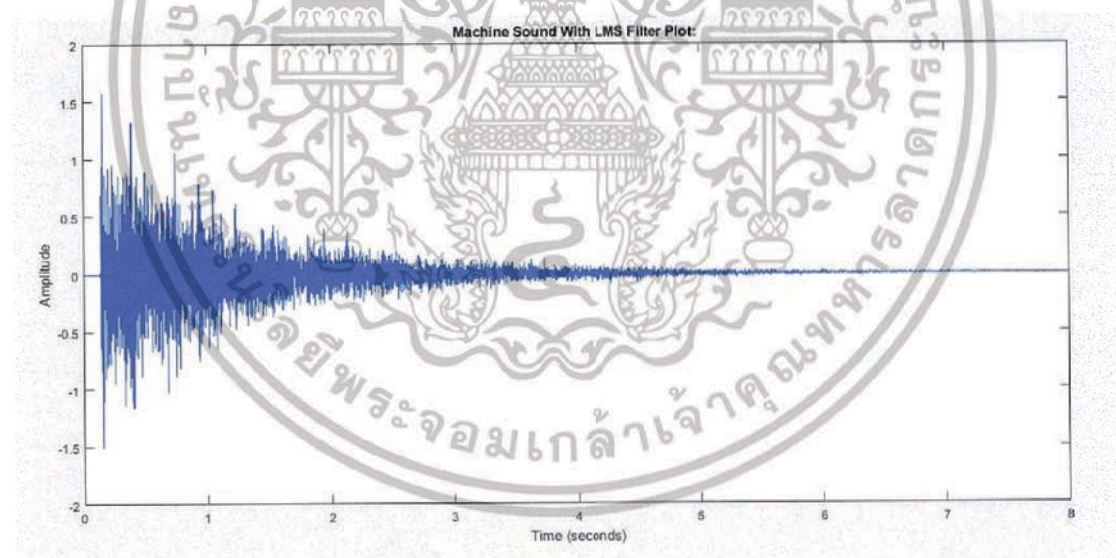
การทดลองโดยใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน จะใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงานซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.6 จากนั้นนำสัญญาณดังกล่าวมากรองด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 เสียงเครื่องจักรในโรงงาน

โดยผลการทดลองการจำลองระบบจะเห็นได้ว่า เมื่อนำสัญญาณเสียงรบกวนมากรองด้วยวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด สัญญาณเสียงรบกวนจะถูกกรองออกไปได้แต่ใช้เวลานานยิ่งขึ้นอีก โดยใช้เวลาประมาณ 5 วินาที ดังแสดงในรูปที่ 4.7

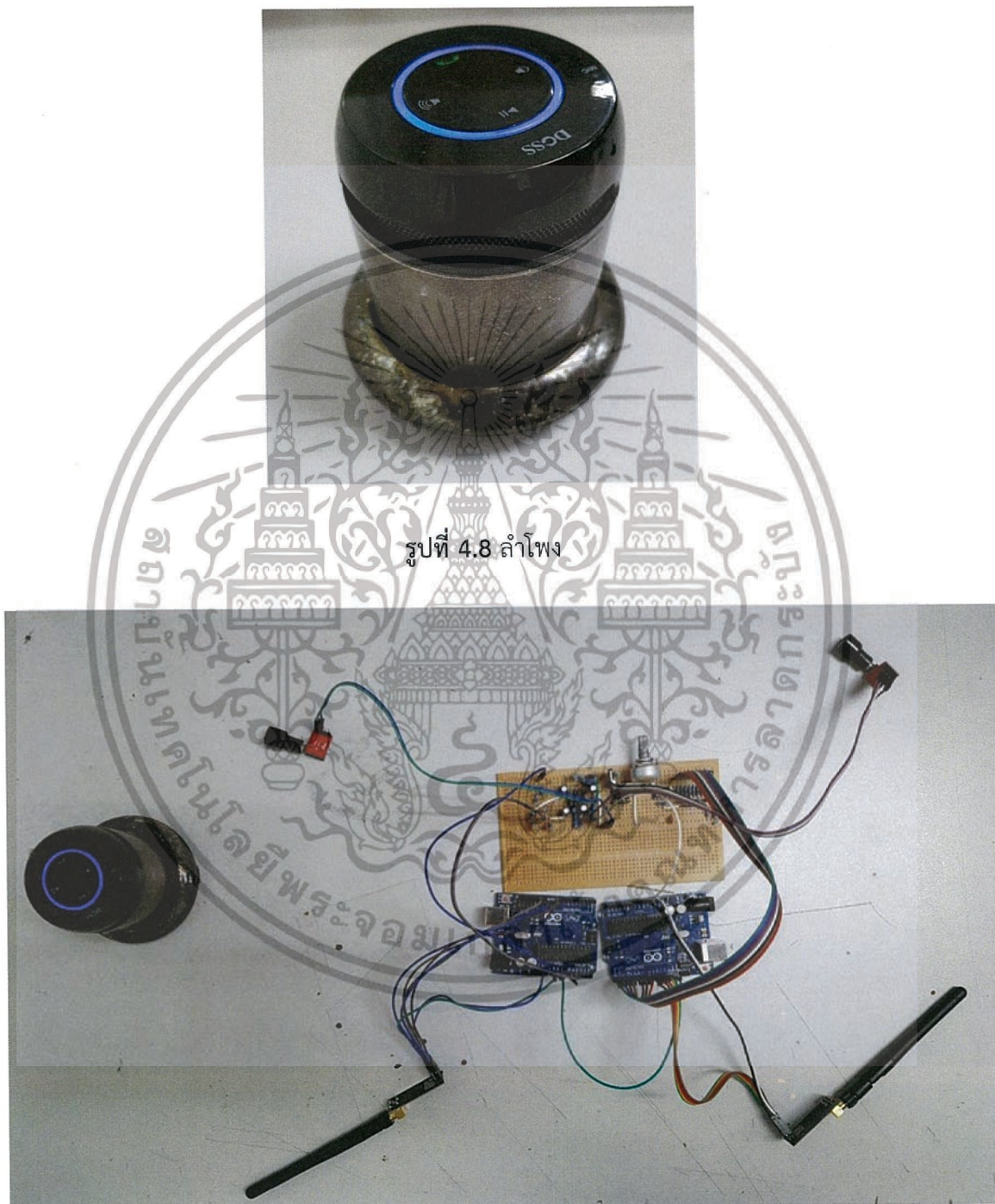


รูปที่ 4.7 เสียงเครื่องจักรในโรงงานเมื่อผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด

## 4.2 การทดลองอุปกรณ์ต้นแบบ

การทดลองนี้ จะทำการทดสอบความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ต้นแบบ เมื่อใช้เสียงรบกวน 3 แบบคือ สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว และเสียงเครื่องจักรในโรงงาน ซึ่งทำการทดลองโดยเปิดเสียงรบกวนทั้ง 3 แบบผ่านทางลำโพง ซึ่งแสดงในรูปที่ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.8 และมีการจัดวางไมโครโฟนพูด และไมโครโฟนเสียงรบกวน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 โดยการทดลอง จะใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลู่เข้า  $\mu$  เท่ากับ 0.0000005 และจำนวนค่าสัมประสิทธิ์เชิงจรรจงสัญญาณเชิงเลข 5 ตัว ซึ่งจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ประเภทคือกรองเสียงรบกวนแบบไม่มีเสียงพูด และกรองเสียงรบกวนโดยมีเสียงพูด



รูปที่ 4.8 ลำโพง

รูปที่ 4.9 การจัดวางลำโพงและไมโครโฟน

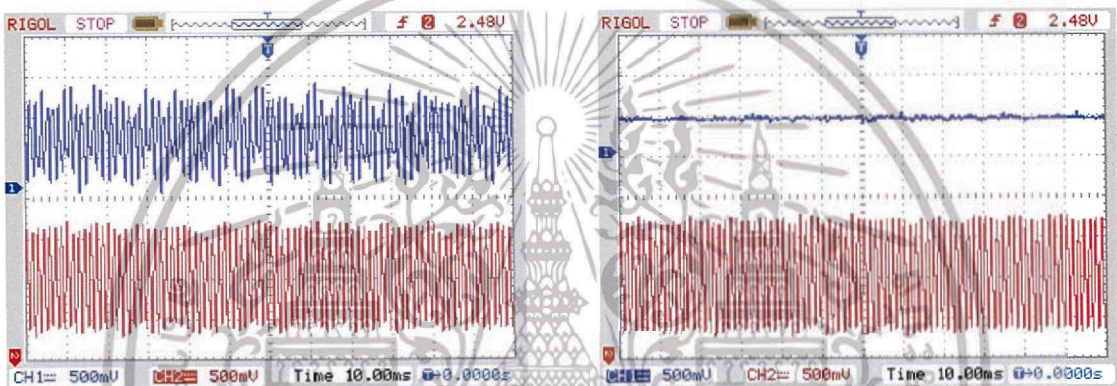
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.1 ผลการทดลองกรองเสียงรบกวนแบบไม่มีเสียงพูด

การทดลองกรองเสียงรบกวนแบบไม่มีเสียงพูด ทำเพื่อดูความสามารถในการกรองสัญญาณเสียงรบกวนของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน โดยทำการทดลองในห้องเงียบเปิดเสียงรบกวนทางลำโพงให้มีแต่เสียงรบกวนเข้าไมโครโฟนพูดและไมโครโฟนเสียงรบกวน

##### 4.2.1.1 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์

การทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ โดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ที่ความถี่ 700 เฮิรตซ์ ดังรูปที่ 4.10 (ก) โดยกราฟสัญญาณเสียงรบกวนที่กรองแล้วจะแสดงในรูปที่ 4.10 (ข) เมื่อกราฟสีแดงคือ สัญญาณก่อนผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข และกราฟสีน้ำเงินคือ สัญญาณหลังผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข

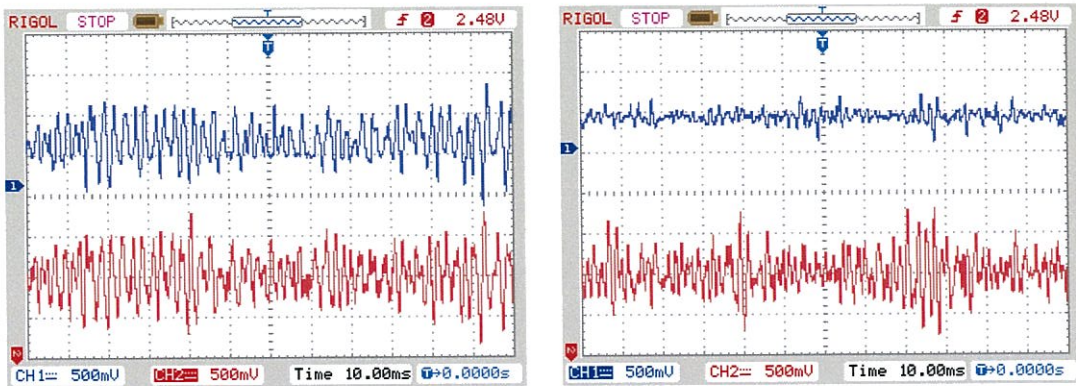


(ก) สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ (ข) สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์เมื่อผ่านการกรอง

รูปที่ 4.10 การเปรียบเทียบสัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ก่อนและหลังกรอง

##### 4.2.1.2 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว

การทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ โดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว ดังรูปที่ 4.11 (ก) โดยกราฟสัญญาณเสียงรบกวนที่กรองแล้วจะแสดงในรูปที่ 4.11 (ข) เมื่อกราฟสีแดงคือ สัญญาณก่อนผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข และกราฟสีน้ำเงินคือ สัญญาณหลังผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข



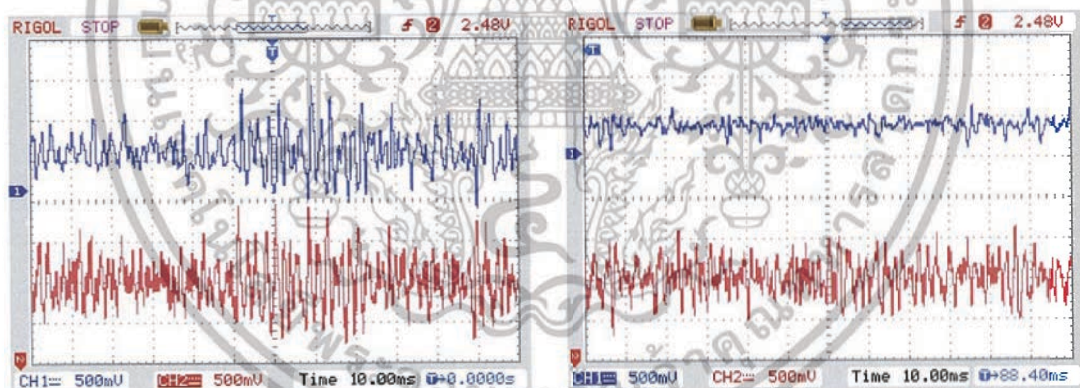
(ก) สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว

(ข) สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวเมื่อผ่านการกรอง

#### รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบสัญญาณเสียงรบกวนสีขาวก่อนและหลังกรอง

#### 4.2.1.3 ผลการทดลองเมื่อใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน

การทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ โดยใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงานดังรูปที่ 4.12 (ก) โดยกราฟสัญญาณเสียงรบกวนที่กรองแล้วจะแสดงในรูปที่ 4.12 (ข) เมื่อกราฟสีแดงคือ สัญญาณก่อนผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข และกราฟสีน้ำเงินคือ สัญญาณหลังผ่านวงจรกรองสัญญาณเชิงเลข



(ก) เสียงเครื่องจักรในโรงงาน

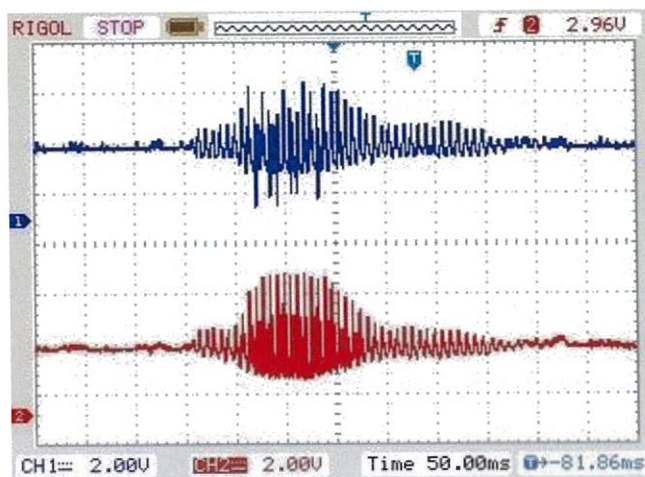
(ข) เสียงเครื่องจักรในโรงงานเมื่อผ่านการกรอง

#### รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบเสียงเครื่องจักรในโรงงานก่อนและหลังกรอง

#### 4.2.2 การทดลองกรองเสียงรบกวนแบบมีเสียงพูด

การทดลองกรองเสียงรบกวนแบบมีเสียงพูด ทำเพื่อทดสอบความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน โดยมีเสียงคำพูดเข้าไปที่ไม่โครโฟนพูด โดยเสียงพูดที่ใช้จะเป็นการพูดคำว่า “หนึ่ง” โดยสัญญาณเสียงของคำพูดคำว่า “หนึ่ง” แสดงไว้ในรูปที่ 4.13

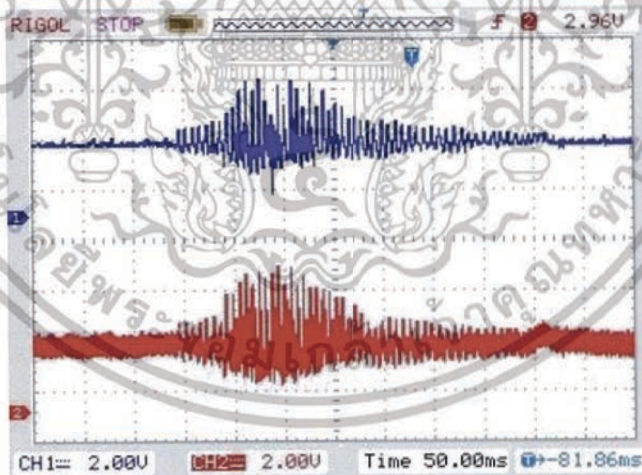
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านธุรกิจ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 สัญญาณเสียงของคำพูดคำว่า “หนึ่ง”

#### 4.2.2.1 ผลการทดลองเมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์

ผลการทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ โดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ความถี่ 700 เฮิร์ตซ์แสดงดังรูปที่ 4.14 โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้ว ส่วนกราฟสีแดงแสดงถึงสัญญาณเสียงที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณเมื่อผ่านการกรองด้วยอุปกรณ์แล้วสามารถกรองสัญญาณเสียงรบกวนออกไปแล้วแต่ไม่กรองเสียงพูดออกไปด้วย

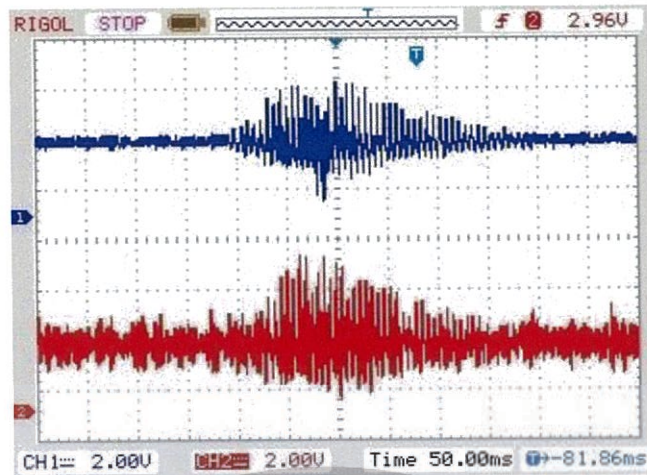


รูปที่ 4.14 สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์แบบมีเสียงพูด

#### 4.2.2.2 ผลการทดลองโดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาว

ผลการทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ โดยใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวแสดงดังรูปที่ 4.15 โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้ว ส่วนกราฟสีแดงแสดงถึงสัญญาณเสียงที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณเมื่อผ่านการกรองด้วยอุปกรณ์แล้วสามารถกรองสัญญาณเสียงรบกวนออกไปแล้วแต่ไม่กรองเสียงพูดออกไปด้วย

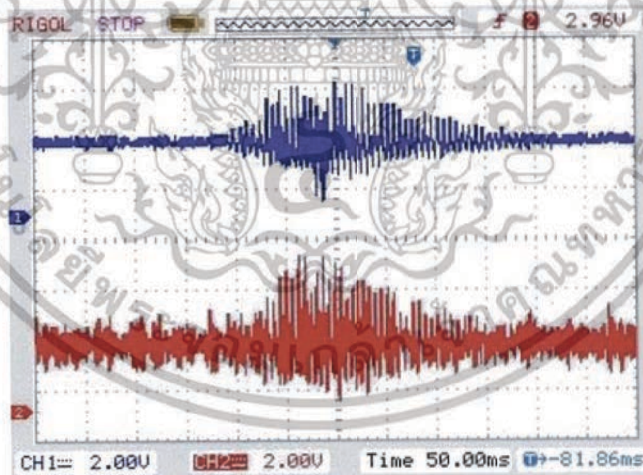
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวแบบมีเสียงพูด

#### 4.2.2.3 ผลการทดลองโดยใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงาน

ผลการทดลองความสามารถในการกรองเสียงรบกวนของอุปกรณ์ โดยใช้เสียงเครื่องจักรในโรงงานแสดงดังรูปที่ 4.16 โดยกราฟสีน้ำเงินแสดงถึงสัญญาณที่ผ่านการกรองแล้ว ส่วนกราฟสีแดงแสดงถึงสัญญาณเสียงที่ยังไม่ได้ผ่านการกรอง ซึ่งจะเห็นได้ว่าสัญญาณเมื่อผ่านการกรองด้วยอุปกรณ์แล้วสามารถกรองสัญญาณเสียงรบกวนออกไปแล้วแต่ไม่กรองเสียงพูดออกไปด้วย



รูปที่ 4.16 เสียงเครื่องจักรในโรงงานแบบมีเสียงพูด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

# สรุปผลและข้อเสนอแนะ

บทนี้กล่าวถึงข้อสรุป ปัญหาที่เกิดขึ้นในปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ตลอดจนข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อไป

### 5.1 สรุปผล

ปริญาานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างต้นแบบอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวน โดยการใช้วงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด ในการปรับค่าสัมประสิทธิ์ของวงจรกรองสัญญาณเพื่อให้สอดคล้องกับสัญญาณเสียงรบกวนตลอดเวลา โดยการทดสอบอุปกรณ์สื่อสารแบบตัดเสียงรบกวนนั้นแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB และการทดสอบชิ้นงานจริง ซึ่งก่อนทำชิ้นงานได้ทำการจำลองการกรองสัญญาณของวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งจากการจำลองพบว่าสามารถกรองสัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ออกไปได้อย่างรวดเร็ว แต่ถ้าใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวและเสียงเครื่องจักรในโรงงานนั้น ก็สามารถกรองเสียงรบกวนออกไปได้แต่ต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นตามลำดับ ซึ่งผลจากการจำลองโดยโปรแกรม MATLAB นั้นบ่งบอกว่าวงจรกรองสัญญาณเชิงเลขชนิดปรับตัวได้ด้วยกระบวนการกำลังสองเฉลี่ยน้อยที่สุด นั้นสามารถกรองสัญญาณเสียงรบกวนได้ ส่วนการทดสอบในชิ้นงานจริงได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ การทดลองกรองเสียงรบกวนแบบไม่มีเสียงพูด และการทดลองกรองเสียงรบกวนแบบมีเสียงพูด โดยการทดลองกรองเสียงรบกวนแบบไม่มีเสียงพูดให้ผลว่า เมื่อใช้สัญญาณเสียงรบกวนคลื่นไซน์ ตัวอุปกรณ์สามารถกรองเสียงรบกวนออกไปได้อย่างดี แต่ถ้าใช้สัญญาณเสียงรบกวนสีขาวและเสียงเครื่องจักรในโรงงาน ตัวอุปกรณ์สามารถกรองเสียงรบกวนได้ในระดับที่น่าพึงพอใจแม้ยังมีเสียงรบกวนปะปนอยู่บ้าง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าสอดคล้องกับการจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB ส่วนการทดลองกรองเสียงรบกวนแบบมีเสียงพูด พบว่าสัญญาณเสียงที่กรองออกมาจากสัญญาณเสียงรบกวนทั้ง 3 แบบ กรองเสียงรบกวนออกไปได้โดยสามารถให้เสียงพูดใกล้เคียงกับเสียงจากผู้ส่งสารและสามารถรับสารที่ผู้พูดส่งมาได้ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์สื่อสารตัดเสียงรบกวนสามารถกรองเสียงรบกวนได้จริง อย่างไรก็ตาม เสียงที่ได้มีความทึบเนื่องจากความถี่ในการซัดตัวอย่างสามารถทำได้เพียง 1.9 กิโลเฮิรตซ์

### 5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

ปัญหาที่พบส่วนใหญ่เกิดมาจากปัญหาในส่วนของวงจรและอุปกรณ์ ซึ่งในช่วงแรกของการทำวงจร ได้ใช้ตัวเก็บประจุชนิดที่ไม่เหมาะสมกับการใช้งานในด้านสัญญาณ ทำให้ตัวประมวลผลรับข้อมูลมาประมวลผลได้ไม่ถูกต้อง จึงไม่สามารถกรองสัญญาณเสียงรบกวนออกไปได้ วิธีแก้คือ เปลี่ยนตัวเก็บประจุชนิดเซรามิกมาใช้ตัวเก็บประจุชนิดอิเล็กโทรไลติกแทน ซึ่งได้ผลที่น่าพอใจ และอีกปัญหาหนึ่งคือ ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยในปริญาานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO เพื่อใช้ในการประมวลผล ซึ่งไม่ได้ถูกออกแบบมาเพื่อรับค่าอนาล็อกได้ทีละหลาย ๆ ค่า จึงทำให้เกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อจำกัดอย่างมากในการเขียนโปรแกรม ซึ่งวิธีแก้ปัญหาคือ ทำการออกแบบโปรแกรมให้ใช้ตัวประมวลผลน้อยที่สุด แล้วใช้พื้นที่ส่วนที่เหลือในการใช้รับค่าอนาล็อกแทน

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

ข้อเสนอแนะในการพัฒนาปริญญาบัตรฉบับนี้คือ ควรศึกษาเพื่อเลือกใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ โดยคำนึงถึงความเร็วสัญญาณนาฬิกา เนื่องจากความเร็วสัญญาณนาฬิกาที่ช้าทำให้จำเป็นต้องกำหนดความถี่ในการซักตัวอย่างได้น้อย ทำให้เสียงที่ออกมาจากอุปกรณ์มีความทุ้ม และควรคำนึงถึงตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีหน่วยประมวลผลทศนิยม เพราะถ้าตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ใช้ไม่มีหน่วยประมวลผลทศนิยม จะทำให้ต้องใช้เวลาในการแปลงการประมวลผลทศนิยม (Floating Point) เป็นการประมวลผลจำนวนเต็ม (Fixed Point) ซึ่งใช้หลายคำสั่งในการแปลงกลับไปมา จึงเสนอแนะให้ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีความเร็วสูงกว่าเดิมและมีหน่วยประมวลผลทศนิยมด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Richard G. Lyons. (2553). Understanding Digital Signal Processing (3rd Edition) Publisher by Prentice Hall; 3 edition (November 11, 2010)
- [2] Simon O. Haykin. (2556). Adaptive Filter Theory (5th Edition) Publisher by Pearson; 5 edition (June 2, 2013)
- [3] Amanda Ghassaei. (2555). Arduino Audio Input. สืบค้นข้อมูลจาก <http://www.instructables.com/id/Arduino-Audio-Input/>
- [4] Amanda Ghassaei. (2555). Arduino Audio Output. สืบค้นข้อมูลจาก <http://www.instructables.com/id/Arduino-Audio-Output/>
- [5] Martin Nawrath. Arduino Realtime Audio Processing. สืบค้นข้อมูลจาก <http://interface.khm.de/index.php/lab/interfaces-advanced/arduino-realtime-audio-processing/>
- [6] AmirAslan Haghrah. (2559). Least Mean Square Algorithm. สืบค้นข้อมูลจาก <https://www.codeproject.com/Articles/1000084/Least-Mean-Square-Algorithm-using-Cplusplus>
- [7] maxtic maxtic (2558). วิธีใช้งาน NRF24L01 โมดูลสื่อสารไร้สาย. สืบค้นข้อมูลจาก <https://www.youtube.com/watch?v=VAp3lagUbSw>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้




เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

# คู่มือการใช้งานอุปกรณ์ในปริญญาบัตร

## ก.1 คู่มือการใช้งานไอซี TL072

Product Folder Order Now Technical Documents Tools & Software Support & Community



**TL071, TL071A, TL071B**  
**TL072, TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B, TL072M, TL074M**  
SLOS080N – SEPTEMBER 1978 – REVISED JULY 2017

---

### TL07xx Low-Noise JFET-Input Operational Amplifiers

#### 1 Features

- Low Power Consumption
- Wide Common-Mode and Differential Voltage Ranges
- Low Input Bias and Offset Currents
- Output Short-Circuit Protection
- Low Total Harmonic Distortion: 0.003% (Typical)
- Low Noise  
 $V_n = 18 \text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$  (Typical) at  $f = 1 \text{ kHz}$
- High-Input Impedance: JFET Input Stage
- Internal Frequency Compensation
- Latch-Up-Free Operation
- High Slew Rate:  $13 \text{ V}/\mu\text{s}$  (Typical)
- Common-Mode Input Voltage Range Includes  $V_{CC}$

#### 2 Applications

- Motor Integrated Systems: UPS
- Drives and Control Solutions: AC Inverter and VF Drives
- Renewables: Solar Inverters
- Pro Audio Mixers
- DLP Front Projection System
- Oscilloscopes

#### 3 Description

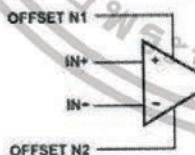
The TL07xx JFET-input operational amplifiers incorporate well-matched, high-voltage JFET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit. The devices feature high slew rates, low-input bias and offset currents, and low offset-voltage temperature coefficient. The low harmonic distortion and low noise make the TL07x series ideally suited for high-fidelity and audio pre-amplifier applications. The TL071 device has offset pins to support external input offset correction.

Device Information <sup>(1)</sup>		
PART NUMBER	PACKAGE	BODY SIZE (NOM)
TL07xxD	SOIC (14)	8.65 mm x 3.91 mm
	SOIC (8)	4.90 mm x 3.90 mm
TL07xxJG	CDIP (8)	9.59 mm x 6.67 mm
TL074xJ	CDIP (14)	19.56 mm x 6.62 mm
TL07xxP	PDIP (8)	6.59 mm x 6.35 mm
TL07xxPS	SO (8)	6.20 mm x 5.30 mm
TL074xN	PDIP (14)	19.3 mm x 6.35 mm
TL074xNS	SO (14)	10.30 mm x 5.30 mm
TL07xxPW	TSSOP (8)	4.40 mm x 3.00 mm
TL074xPW	TSSOP (14)	5.00 mm x 4.40 mm

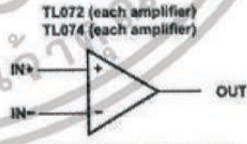
(1) For all available packages, see the orderable addendum at the end of the data sheet.

#### Logic Symbols

TL071



TL072 (each amplifier)  
TL074 (each amplifier)



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

**▲** An IMPORTANT NOTICE at the end of this data sheet addresses availability, warranty, changes, use in safety-critical applications, intellectual property matters and other important disclaimers. PRODUCTION DATA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TL071, TL071A, TL071B  
 TL072, TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B, TL072M, TL074M  
 SLOS080N – SEPTEMBER 1978 – REVISED JULY 2017



www.ti.com

## 6 Specifications

### 6.1 Absolute Maximum Ratings

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted) <sup>(1)</sup>

	MIN	MAX	UNIT
$V_{CC-} - V_{CC+}$ Supply voltage	-0.3	36	V
$V_i$ Input voltage <sup>(2)</sup>	$V_{CC-} - 0.3$	$V_{CC+} + 36$	V
$I_{IK}$ Input clamp current		-50	mA
Duration of output short circuit <sup>(3)</sup>	Unlimited		
$T_J$ Operating virtual junction temperature		150	°C
Case temperature for 80 seconds - FK package		260	°C
Lead temperature 1.8 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		300	°C
$T_{stg}$ Storage temperature	-65	150	°C

- (1) Stresses beyond those listed under *Absolute Maximum Ratings* may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under *Recommended Operating Conditions* is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.
- (2) Differential voltage only limited by input voltage.
- (3) The output may be shorted to ground or to either supply. Temperature and supply voltages must be limited to ensure that the dissipation rating is not exceeded.

### 6.2 ESD Ratings

	VALUE	UNIT
$V_{ESD}$ Electrostatic discharge	Human body model (HBM), per ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 <sup>(1)</sup>	±2000
	Charged-device model (CDM), per JEDEC specification JESD22-C101 <sup>(2)</sup>	±1000
		V

- (1) JEDEC document JEP155 states that 600-V HBM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.
- (2) JEDEC document JEP157 states that 250-V CDM allows safe manufacturing with a standard ESD control process.

### 6.3 Recommended Operating Conditions

over operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

	MIN	MAX	UNIT
$V_{CC+}$ Supply voltage <sup>(1)</sup>	8	15	V
$V_{CC-}$ Supply voltage <sup>(1)</sup>	-5	-15	V
$V_{CM}$ Common-mode voltage	$V_{CC-} + 4$	$V_{CC+}$	V
$T_A$ Operating free-air temperature	TL07xM	-55	125
	TL08xQ	-40	125
	TL07xI	-40	85
	TL07xAC, TL07xBC, TL07xC	0	70

- (1)  $V_{CC-}$  and  $V_{CC+}$  are not required to be of equal magnitude, provided that the total  $V_{CC}$  ( $V_{CC+} - V_{CC-}$ ) is between 10 V and 30 V.

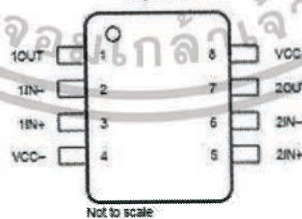


TL071, TL071A, TL071B  
 TL072, TL072A, TL072B, TL074, TL074A, TL074B, TL072M, TL074M

www.ti.com

SLOS080N – SEPTEMBER 1978 – REVISED JULY 2017

TL072x D, JG, P, PS and PW Package  
 8-Pin SOIC, CDIP, PDIP, SO  
 Top View



Pin Functions: TL072x

PIN		IO	DESCRIPTION
NAME	NO.		
1IN-	2	I	Inverting input
1IN+	3	I	Noninverting input
1OUT	1	O	Output
2IN-	6	I	Inverting input
2IN+	5	I	Noninverting input
2OUT	7	O	Output
VCC-	4	—	Power supply
VCC+	8	—	Power supply

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ก.2 คู่มือการใช้งานโมดูลสื่อสาร nRF24L01



### nRF24L01+

### Single Chip 2.4GHz Transceiver

### Product Specification v1.0

#### Key Features

- Worldwide 2.4GHz ISM band operation
- 250kbps, 1Mbps and 2Mbps on air data rates
- Ultra low power operation
- 11.3mA TX at 0dBm output power
- 13.5mA RX at 2Mbps air data rate
- 900nA in power down
- 26µA in standby-I
- On chip voltage regulator
- 1.9 to 3.6V supply range
- Enhanced ShockBurst™
- Automatic packet handling
- Auto packet transaction handling
- 6 data pipe MultiCeiver™
- Drop-in compatibility with nRF24L01
- On-air compatible in 250kbps and 1Mbps with nRF2401A, nRF2402, nRF24E1 and nRF24E2
- Low cost BOM
- ±60ppm 16MHz crystal
- 5V tolerant inputs
- Compact 20-pin 4x4mm QFN package

#### Applications

- Wireless PC Peripherals
- Mouse, keyboards and remotes
- 3-in-1 desktop bundles
- Advanced Media center remote controls
- VoIP headsets
- Game controllers
- Sports watches and sensors
- RF remote controls for consumer electronics
- Home and commercial automation
- Ultra low power sensor networks
- Active RFID
- Asset tracking systems
- Toys

All rights reserved.

Reproduction in whole or in part is prohibited without the prior written permission of the copyright holder.  
September 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 Pin functions

Pin	Name	Pin function	Description
1	CE	Digital Input	Chip Enable Activates RX or TX mode
2	CSN	Digital Input	SPI Chip Select
3	SCK	Digital Input	SPI Clock
4	MOSI	Digital Input	SPI Slave Data Input
5	MISO	Digital Output	SPI Slave Data Output, with tri-state option
6	IRQ	Digital Output	Maskable interrupt pin. Active low
7	VDD	Power	Power Supply (+1.9V - +3.6V DC)
8	VSS	Power	Ground (0V)
9	XC2	Analog Output	Crystal Pin 2
10	XC1	Analog Input	Crystal Pin 1
11	VDD_PA	Power Output	Power Supply Output (+1.8V) for the internal nRF24L01+ Power Amplifier. Must be connected to ANT1 and ANT2 as shown in Figure 32.
12	ANT1	RF	Antenna interface 1
13	ANT2	RF	Antenna interface 2
14	VSS	Power	Ground (0V)
15	VDD	Power	Power Supply (+1.9V - +3.6V DC)
16	IREF	Analog Input	Reference current. Connect a 22kΩ resistor to ground. See Figure 32.
17	VSS	Power	Ground (0V)
18	VDD	Power	Power Supply (+1.9V - +3.6V DC)
19	DVDD	Power Output	Internal digital supply output for de-coupling purposes. See Figure 32.
20	VSS	Power	Ground (0V)

Table 1. nRF24L01+ pin function

## 1.2 Block diagram

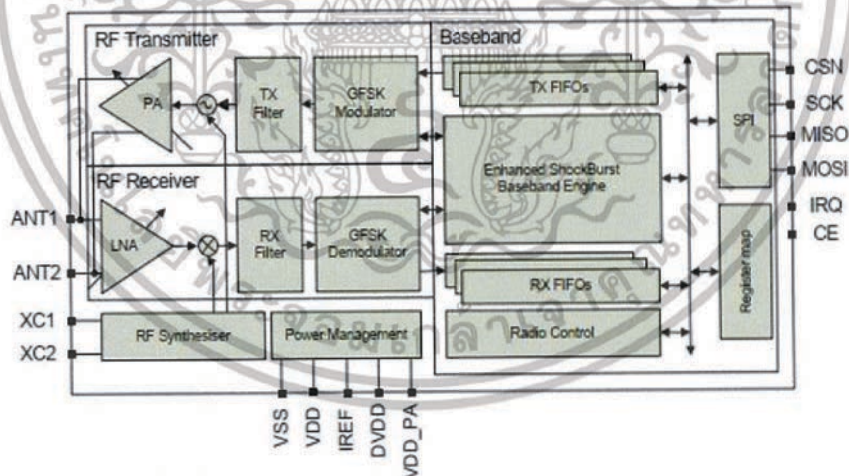
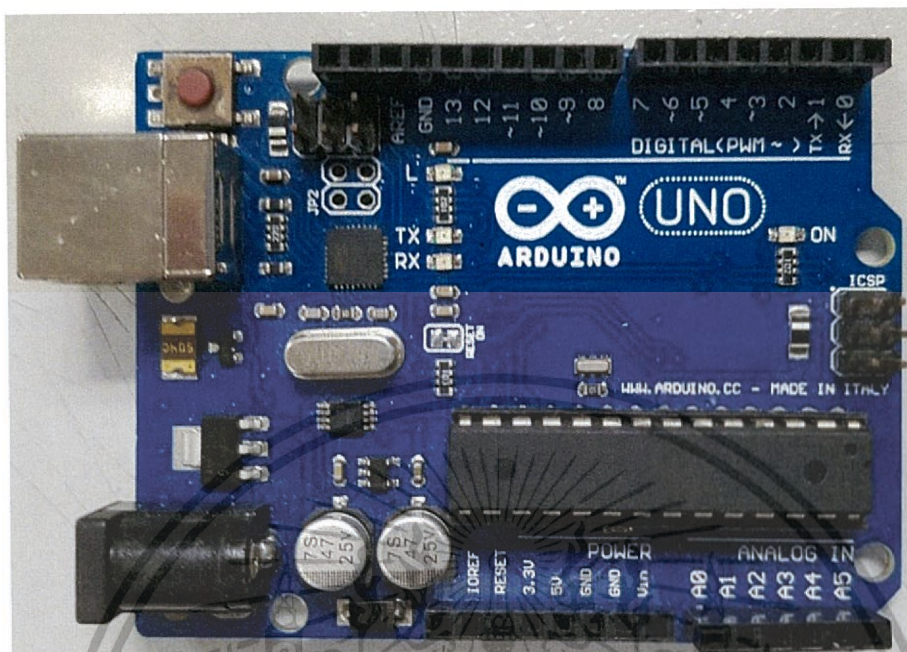


Figure 1. nRF24L01+ block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ก.3 คู่มือการใช้งานไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3



#### OVERVIEW

#### TECH SPECS

#### DOCUMENTATION

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

Instrumentation, Control and Automation Senior  
Project Conference 2018 (ICA SP-CON 2018)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่วางไว้เพื่อใช้ในการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Noise Cancelling in Communication Device

Warayus Sombatsri and Wechpisit Sarik

Department of Instrumentation and Control Engineering, Faculty of Engineering,  
 King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Abstract:** The objective of this project is to build a noise cancelling communication device from parts which are easy to find. The technique used in the device is "adaptive algorithm" based on "Least Mean Squares" technique, also known as LMS. To reduce sound interference in human desired speech, this device must have two microphones for receiving the desired speech with interference noise and the interference noise. LMS algorithm calculates a sound that looks like the interference noise. The difference of the calculated sound and the desired speech with interference noise are the output desired speech.

Advisor: Assoc.Prof.Dr. Taworn Benjanarasuth

### 1. Introduction

In most factories, ear plug are used to reduce noise exposure of work but people cannot talk to each other with ordinary speaking voice so they have to speak more loudly. The problem can be fixed by using the proposed noise cancelling communication device. LMS algorithm is a part of an adaptive algorithm which can reduce sound interference although attribute of a noise has changed.

### 2. Methodology

The hardware consists of Arduino UNO for process LMS algorithm, two microphones (Mic 1 for speech + noise and Mic 2 for noise only) and wireless module nrf24l01 for sending the filtered signal to another device. The concept is shown in Figure 1.

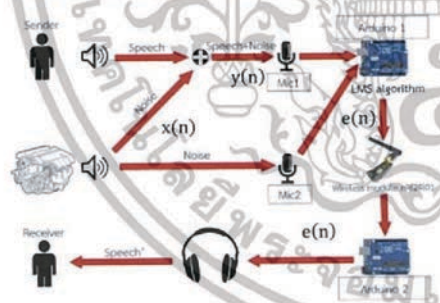


Figure 1 Conceptual diagram

The software is implemented mainly as an adaptive filter. The output can be computed by (1),

$$e(n) = y(n) - \sum_{i=0}^k w_i(n)x(n-i) \quad (1)$$

when  $y(n)$  is speech with noise,  $x(n)$  is noise,  $e(n)$  is output,  $w_i(n)$  is filter coefficient, and  $k$  is filter order. The filter coefficients are updated based on LMS algorithm in (2),

$$w_i(n+1) = w_i(n) + ue^T(n)x(n) \quad (2)$$

when  $u$  is step size.

### 3. Results

The developed noise cancelling communication device uses 5 taps filter, 2kHz sampling rate and 0.000001 step size  $u$ . The results when interference noise is continuously-working machine sound and the sender is silent are shown in Figure 2.

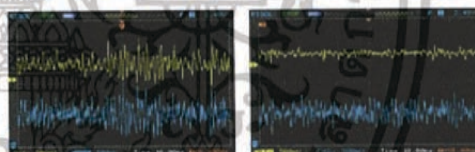


Figure 2 Experimental results (blue: input, yellow: output).

### 4. Conclusion

In this project, the noise cancelling communication device is successfully developed based on LMS algorithm to adjust the filter weight of the adaptive filter. From the results, the device can effectively reduce the interference noise from human speech but the sound quality is low because this device uses only 2kHz sampling rate due to hardware limitations.

ภาคผนวก ค

## โปสเตอร์

Department of Instrumentation and Control Engineering  
(Control Engineering)  
IC 6029

**KMIT ENGINEERING PROJECT DAY 2018**

## Communication device with noise cancellation

**Warayus Sombatsri, Wechpisit Sarik and Assoc.Prof.Dr.Taworn Benjanarasuth**

---

### Abstract

The objective of this work is to build a device for communication from materials which are easy to find. The techniques used in the device is "Adaptive algorithm" in parts of "Least Mean Squares" algorithm, also known as LMS algorithm. To remove unwanted signal in human speech, One used LMS algorithm to calculate to get a sound that looks like the original speech and communicate with people who also has this device. Arduino used for processing all of works is a developed board which has an ADC/DAC and microcontroller inside.

### Introduction

In most factories noise cancellation devices are used to reduce noise exposure of work and to communicate among workers, people cannot talk to each other with ordinary speaking voice then they have to speak loudly the problem can be fixed by using communication device with "Adaptive algorithm". LMS algorithm is a part of an adaptive algorithm which can remove unwanted signal although attribute of a noise has changed.

### Methodology

Step 1 : Design circuit board communication device.  
Step 2 : Build circuit board.  
Step 3 : Program Arduino using LMS algorithm.  
Step 4 : Equipment assembly.  
Step 5 : Testing device and summarize.

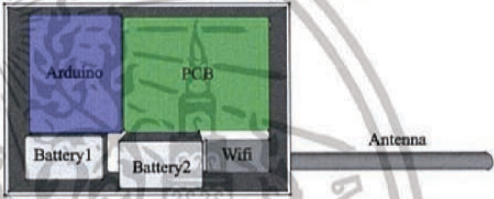


Figure1. Communication device model

### Results

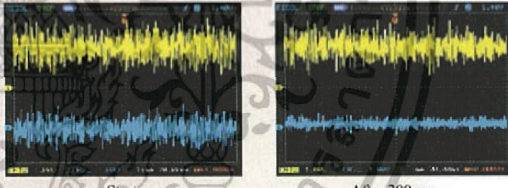


Figure3. Noise source : White noise  
Yellow : Input (Mic1)  
Blue : Output (Speech)

### Conclusion

In this project, the communication device with noise cancellation is developed. Using LMS algorithm adjust filter weight of LMS filter for consistent with the noise all the time. From the results, the device can effectively remove periodic noise but cannot remove non-periodic noise. This is because Arduino UNO can process LMS Algorithm well using 5 filter length which is not enough for non-periodic signal. This issue can be solved by using microcontroller with high clock speed like "Arduino DUE". This will allow the system to process in 40 filter length and can remove non-periodic signal.

### References

- [1] M. Nawrath, "Arduino realtime audio processing," <http://interface.khm.de/index.php/lab/experiments/arduino-realtime-audio-processing/>
- [2] "Arduino timer interrupt" <http://www.instructables.com/id/Arduino-Timer-Interrupts/>
- [3] S. Haykin Adaptive Filter Theory, 4th Edition, Prentice-Hall.
- [4] Mr. Tamer abdelazim Mellik "LMS Algorithm Demo" <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/3649-lms-algorithm-demo>

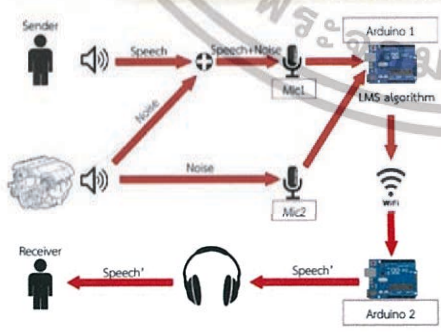




Figure2. Schematic diagram



**ENGINEERS**  
**LADKRABANG**

สมาคมวิศวกรและช่างเทคนิคภาคตะวันออก



E-mail: 57011119@kmit.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้