

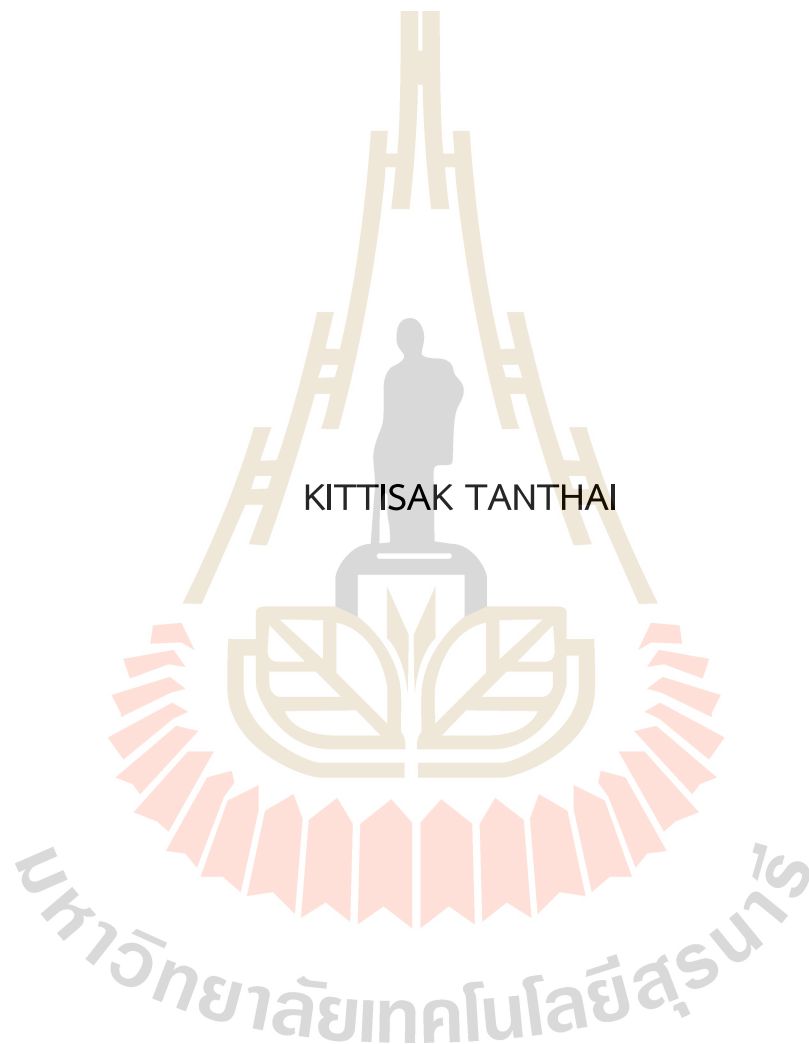
การออกแบบสร้างระบบขับไล่คางคกโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของ
คลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ



นายกิตติศักดิ์ แทนไทย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2567

DESIGN OF BAT REPELLING SYSTEM BY USING THE MULTI-LEVEL
HIGH-FREQUENCY SOUND WAVES METHOD



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Electrical Engineering
Suranaree University of Technology
Academic Year 2024

การออกแบบสร้างระบบขับเคลื่อนด้วยประยุตใ้ใช้วิธีการผสมผสานของคลื่นเสียง
ความถี่สูงหลายระดับ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.อภิชาติ อัครพานิชย์)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร.ธนเสฏฐ์ ทศดีกรพัฒน์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษา)

(รศ. ดร.ชาญชัย ทองโสภณ)

กรรมการ

(รศ.ดร.ยุพาพร รักสกุลวัฒน์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและประกันคุณภาพ

(รศ.ดร.พรศิริ จงกล)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

กิตติศักดิ์ แทนไทย : การออกแบบสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสม
สัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ (DESIGN OF BAT REPELLING SYSTEM BY
USING THE MULTI-LEVEL HIGH-FREQUENCY SOUND WAVES METHOD)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิกรพัฒน์, 87 หน้า.

คำสำคัญ : ค้างคาว, คลื่นเสียงความถี่สูง, แมทซิงอิมพีแดนซ์

งานวิจัยวิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอการออกแบบและพัฒนาระบบขับไล่ค้างคาว
โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูง จากงานวิจัยที่พบว่า ค้างคาวมี
ความไวในการตอบสนองต่อคลื่นเสียงความถี่สูงที่ระดับความดัง 90 dB SPL และมีการตอบสนองต่อ
ช่วงความถี่เสียงระหว่าง 20 kHz ถึง 100 kHz ซึ่งลักษณะของการตอบสนองนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของ
ค้างคาวแต่ละประเภท จากการศึกษาพบว่า เมื่อค้างคาวได้รับสัญญาณเสียงในระดับดังกล่าว สมอ
ของพวกมันจะเกิดการตอบสนองต่อความถี่สูงที่มีความเข้มของเสียงมากพอ ทำให้เกิดความรำคาญ
และบินหนีออกจากบริเวณนั้น ด้วยเหตุนี้ การออกแบบระบบที่สามารถสร้างสัญญาณเสียงที่มีระดับ
ความดังเพียงพอจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง โดยงานวิจัยนี้มีการกำหนดเป้าหมายในการออกแบบระบบ
ที่สามารถปล่อยคลื่นเสียงที่มีความดัง 90 dB SPL ในระยะ 5 เมตร นอกจากการสร้างสัญญาณเสียง
ที่มีความเข้มสูงเพียงพอแล้ว งานวิจัยนี้ยังได้นำเสนอเทคนิคการผสมสัญญาณรบกวนลงในคลื่นเสียงที่
ปล่อยออกมา โดยผสมเสียงรบกวนเข้ากับสัญญาณเสียงธรรมชาติของค้างคาว ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อ
เพิ่มประสิทธิภาพในการขับไล่ค้างคาวอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ ระบบที่ออกแบบยังมาพร้อม
กับวงจรขยายกำลังเสียง เพื่อให้สามารถเพิ่มระดับความดังของสัญญาณให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมต่อ
การขับไล่ค้างคาว อีกทั้ง ในการพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าว ผู้วิจัยได้ทำการออกแบบวงจรแมตซิง
อิมพีแดนซ์ (Impedance Matching Circuit) ซึ่งช่วยให้สามารถใช้งานร่วมกับลำโพงทวีตเตอร์ทั่วไป
ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แทนการใช้ลำโพงเฉพาะทางที่มีราคาสูง โดยการปรับแต่งระบบขยาย
สัญญาณและปรับปรุงวงจรแมตซิงอิมพีแดนซ์นี้ เป็นการช่วยลดต้นทุนในการผลิต แต่ยังคง
ประสิทธิภาพสูงในการขับไล่ค้างคาว ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีการนำเสนอแนวทางการออกแบบที่
ครอบคลุมทั้งในด้านการผสมสัญญาณ การขยายกำลังเสียง และการปรับปรุงวงจรเพื่อให้ระบบขับไล่
ค้างคาวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะเดียวกันยังคงคำนึงถึงความคุ้มค่าในการ
ใช้งานร่วมกับอุปกรณ์ที่หาได้ทั่วไปในตลาด

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

ปีการศึกษา 2567

ลายมือชื่อนักศึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

KITTISAK TANTHAI : DESIGN OF BAT REPELLING SYSTEM BY USING THE MULTI-LEVEL HIGH-FREQUENCY SOUND WAVES METHOD. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THANASET THODSADEEKORAPHAT, Ph.D. 87 PP.

Keyword: Bats, High-frequency sound wave, Matching Impedance

This thesis proposes the design and development of a bat repellent system by using high-frequency sound waves mixing method. Based on research findings, bats are sensitive to high-frequency sound waves at a sound pressure level (SPL) of 90 dB and respond to frequencies between 20 kHz and 100 kHz. The response to these frequencies varies depending on the species of bats. Studies have shown that when bats are exposed to sound signals at this level, their brains respond to high frequencies with sufficient sound intensity, causing discomfort and prompting them to fly away from the area. Therefore, designing a system capable of generating sound signals with adequate loudness is crucial. This research aims to design a system that can emit sound waves at 90 dB SPL at distance of 5 meters. In addition to creating sound signals with sufficient intensity, the research also introduces a technique of mixing noise into the emitted sound waves by blending noise with the natural sound signals of bats to enhance the effectiveness of repelling them. The system is also equipped with a power amplifier circuit to boost the sound signal to a level suitable for bat repulsion. Furthermore, in the development of this technology, the researcher designed an impedance matching circuit to enable the use of common tweeter speakers effectively, instead of relying on specialized and expensive speakers. The adjustments to the amplifier system and improvements to the impedance matching circuit help reduce production costs while maintaining high efficiency in bat repulsion. Thus, this research presents a comprehensive design approach covering signal mixing, power amplification, and circuit improvements to ensure that the bat repellent system operates with maximum efficiency, while also considering cost-effectiveness by utilizing readily available equipment from the market.

School of Electronic Engineering
Academic Year 2024

Student's Signature.....
Advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีนั้น ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบุคคล และกลุ่มบุคคล ดังต่อไปนี้ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ และช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด ทั้งในด้านวิชาการและด้านการดำเนินงานวิจัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนเสฏฐ์ ทศศิริพัฒน์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่เมตตาให้ความรู้ ชี้แนะ อบรม สั่งสอน และช่วยเหลือแก่ผู้วิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งช่วยตรวจทานและแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.อภิชาติ อินทรพานิชย์ ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางทางทำวิทยานิพนธ์นี้ และช่วยตรวจทานและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

อาจารย์ ดร.ศุภวัฒน์ ศษประดิษฐ์ อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ ให้คำปรึกษาการทำวิจัย และแนะนำการใช้เครื่องมือประเภทต่าง ๆ รวมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก กรรมการ และอาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้ความรู้ การแนะนำแนวทางการทำงาน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สำราญ สันทาลุนัย อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่กรุณาให้การแนะนำ ชี้แนะ และให้คำปรึกษาการทำวิจัย รวมทั้งช่วยตรวจและแก้ไขเนื้อหาวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจเป็นอย่างดีเสมอมา อีกทั้งขอขอบคุณพี่ ๆ และ เพื่อน ๆ ที่ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือมาโดยตลอด ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จคุณค่าทั้งหลายที่ได้รับจากรายงานการศึกษานี้ ผู้เขียนขอมอบเป็นกตัญญูแด่บิดา มารดา และบูรพาจารย์ที่เคยอบรมสั่งสอน รวมทั้งผู้มีพระคุณทุกท่าน

กิตติศักดิ์ แทนไทย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	ง
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ฎ

บทที่

1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	3
1.3 สมมติฐานของการวิจัย.....	3
1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น	3
1.5 ขอบเขตของการวิจัย	4
1.6 วิธีการดำเนินงาน.....	4
1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน.....	4
1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย.....	4
1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย	5
1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย.....	5
1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล	5
1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
2 บรรณานุกรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.2 การรับรู้คลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว	6
2.3 การขับไล่ค้างคาวโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง.....	12

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4	สรุป.....	14
3	ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
3.1	บทนำ.....	16
3.2	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียง.....	16
3.2.1	การเคลื่อนที่ของเสียงผ่านตัวกลาง.....	16
3.2.2	การได้ยิน.....	17
3.2.3	ความเข้มเสียง.....	18
3.3	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการได้ยินของค้างคาว.....	19
3.3.1	การได้ยินและโครงสร้างของหู.....	19
3.3.2	ความสามารถในการใช้เสียงสะท้อน (Echolocation).....	20
3.3.3	ความถี่และการรับรู้ของเสียง.....	22
3.4	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการขยายสัญญาณเสียง.....	23
3.4.1	ทฤษฎีของทรานซิสเตอร์.....	23
3.4.2	ประเภทของวงจรขยายเสียง.....	26
3.4.3	การคำนวณการขยายเสียง.....	27
3.5	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับออปแอมป์.....	28
3.5.1	โครงสร้างของออปแอมป์.....	28
3.5.2	ออปแอมป์ในอุดมคติ (Ideal Operational Amplifier).....	28
3.5.3	การขยายสัญญาณ.....	29
3.5.4	การใช้งานของออปแอมป์ในวงจร.....	30
3.6	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์.....	32
3.6.1	ความหมายของ Impedance Matching.....	32
3.6.2	หลักการของ Impedance Matching.....	32
3.6.3	ประเภทของ Impedance Matching.....	33
3.6.4	อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor).....	33
3.6.5	การคำนวณและการวิเคราะห์ Impedance Matching.....	35
3.6.6	การใช้งาน Impedance Matching ในการออกแบบวงจร.....	35
3.6.7	อุปกรณ์ที่ใช้ในการจับคู่ความต้านทาน.....	36

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6.8	ผลกระทบจากการไม่จับคู่ความต้านทาน	36
3.7	หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลำโพงและไมโครโฟนขนาดเล็ก.....	37
3.7.1	องค์ประกอบหลักของลำโพง.....	37
3.7.2	ประเภทของลำโพง	38
3.7.3	การใช้ลำโพงความถี่สูงในการวิจัยเสียง Ultrasonic.....	40
3.7.4	ทฤษฎีการทำงานของลำโพง Ultrasonic.....	40
3.7.5	องค์ประกอบของลำโพงความถี่สูง	41
3.8	สรุป.....	41
4	การออกแบบสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ	43
4.1	บทนำ	43
4.2	วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ	43
4.3	วงจรสร้างสัญญาณรบกวน.....	46
4.4	วงจรผสมสัญญาณ.....	48
4.5	วงจรขยายกำลังงาน	51
4.5.1	ภาคขยายอินพุต (Input Amplification Stage)	52
4.5.2	ภาคขยายชั้นกลาง (Intermediate Amplification Stage).....	53
4.5.3	ภาคขยายกำลัง (Power Amplification Stage).....	53
4.5.4	ภาคขยายสุดท้ายด้วย MOSFET (Final Amplification with MOSFET) .	54
4.5.5	ภาค Matching Impedance และการต่อกับลำโพง.....	54
4.6	สรุป.....	59
5	การทดลองและผลการทดลอง.....	61
5.1	บทนำ	61
5.2	การทดสอบวงจรภายในระบบ	61
5.2.1	วงจรภาครับสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณ.....	62
5.2.2	วงจรสร้างสัญญาณรบกวน.....	65
5.2.3	วงจรผสมสัญญาณ	68
5.2.4	วงจรภาคขยายกำลังงาน (Power Amplifier)	69

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3 การทดสอบทั้งระบบ.....	73
5.4 สรุป.....	76
6 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	78
เอกสารอ้างอิง	79
ภาคผนวก ก.....	81
บทความวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่	82
ประวัติผู้เขียน.....	87

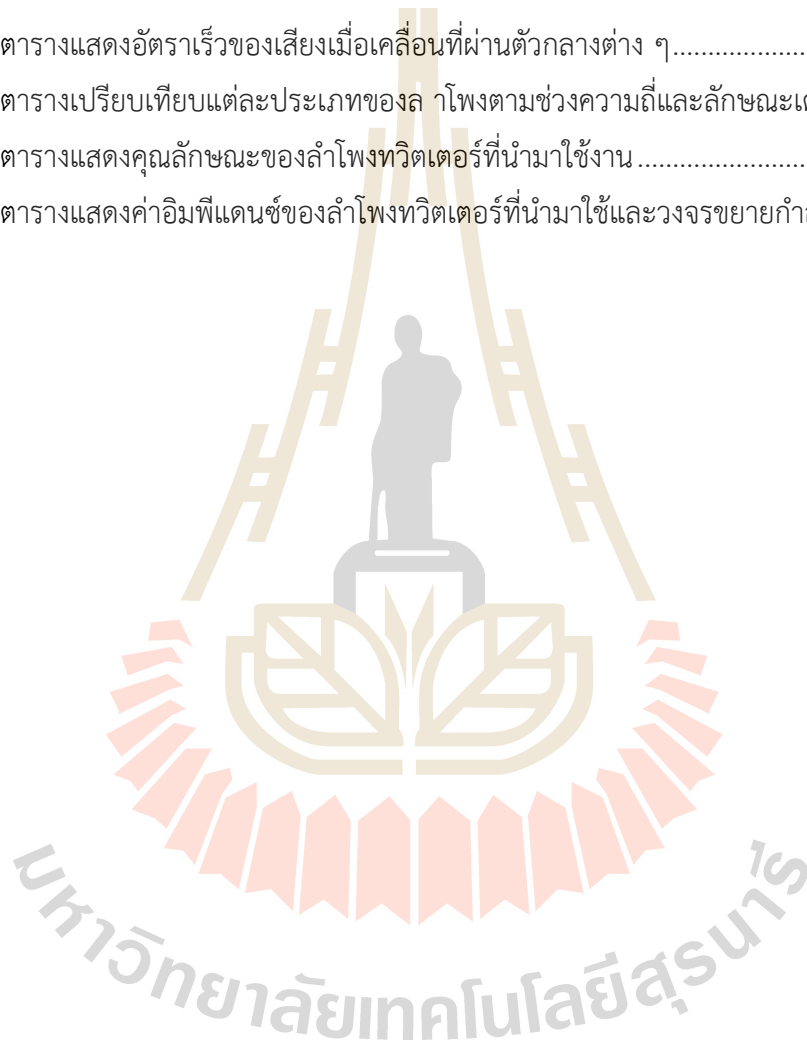


สารบัญตาราง

ตารางที่

หน้า

3.1	ตารางแสดงอัตราเร็วของเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ.....	17
3.2	ตารางเปรียบเทียบแต่ละประเภทของลำโพงตามช่วงความถี่และลักษณะเด่น	40
4.1	ตารางแสดงคุณลักษณะของลำโพงทวีตเตอร์ที่นำมาใช้งาน	51
4.2	ตารางแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของลำโพงทวีตเตอร์ที่นำมาใช้และวงจรขยายกำลังงาน	55



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตอบสนองของเซลล์ประสาทต่อลักษณะเสียงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในสมองของค้างคาว เมื่อ a. การตอบสนองต่อเสียงความถี่สูง, b. การตอบสนองต่อเสียงความถี่ต่ำ, c. การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเสียง, d. การตอบสนองต่อเสียงที่มีการซ้อนทับ, e. การเปรียบเทียบระหว่างเสียงที่แตกต่างกัน และ f. การตอบสนองต่อเสียงที่เป็นลำดับ	8
2.2 แสดงโครงสร้างของเปลือกสมองส่วนการได้ยินของค้างคาว	10
2.3 สเปกตรัมพลังงาน (power spectrum) ที่เป็นตัวแทนของเสียงเรียก (echolocation calls) ของค้างคาวแต่ละชนิด เทียบกับเสียงจำลองของฝูงตั๊กแตน (katydid chorus playback) โดยระบุถึงความเป็นไปได้ในการเกิดการบดบังทางเสียง (acoustic masking)	13
3.1 การส่งคลื่นเสียงของค้างคาวเมื่อกระทบกับเหยื่อ	21
3.2 พิสัยการได้ยินของค้างคาว	23
3.3 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ Bipolar Junction Transistor	24
3.4 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ Junction FET	25
3.5 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ Metal-Oxide-Semiconductor FET	26
3.6 โครงสร้างออปแอมป์ในอุดมคติ	28
3.7 วงจรขยายสัญญาณ Non-inverting Amplifier	29
3.8 วงจรขยายสัญญาณ Inverting Amplifier	30
3.9 องค์ประกอบหลักของลำโพง	37
4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ	43
4.2 Schematics วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ	44
4.3 วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วย Pre-Amplifier	46
4.4 Schematics วงจรสร้างสัญญาณรบกวน	46
4.5 วงจรสร้างสัญญาณรบกวน	48
4.6 Schematics วงจรผสมสัญญาณ	48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7	วงจรผสมสัญญาณ50
4.8	Schematics วงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)51
4.9	การวัดอิมพีแดนซ์ของลำโพงทวิตเตอร์ด้วยเครื่อง Keysight Impedance Analyzer E4990A.....55
4.10	การวัดอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายกำลังงานด้วยเครื่อง Keysight Impedance Analyzer E4990A.....56
4.11	วงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)58
4.12	วงจรแมตชิ่งอิมพีแดนซ์58
4.13	วงจรของระบบขับไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ59
5.1	สเปกโตรแกรม ของไฟล์เสียงค้างคาวที่นำมาใช้62
5.2	ทดสอบสัญญาณของไฟล์เสียงจากคอมพิวเตอร์63
5.3	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มของเสียงค้างคาว ด้วยเครื่อง Audio Analysis.....63
5.4	ทดสอบวงจรขยายสัญญาณ64
5.5	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มของเสียงเมื่อต่อวงจรขยายสัญญาณด้วยเครื่อง Audio Analysis65
5.6	ทดสอบวงจรสร้างสัญญาณรบกวนด้วยเครื่องออสซิลโลสโคป และ Audio Analysis.....66
5.7	ความเข้มเสียงสูงสุดของวงจรสร้างสัญญาณรบกวน66
5.8	ความเข้มเสียงต่ำสุดของวงจรสร้างสัญญาณรบกวน67
5.9	กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรรบกวนสัญญาณ67
5.10	ทดสอบวงจรผสมสัญญาณด้วยเครื่อง Audio Analysis68
5.11	สัญญาณของวงจรผสมสัญญาณเมื่อวัดด้วยเครื่อง Audio Analysis.....69
5.12	ทดสอบวงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)..... 70
5.13	กราฟเปรียบเทียบความเข้มของเสียงและความถี่ของสัญญาณ เมื่อไม่ได้ต่อวงจรแมตชิ่งอิมพีแดนซ์..... 71
5.14	กราฟเปรียบเทียบความเข้มของเสียงและความถี่ของสัญญาณ เมื่อต่อวงจรแมตชิ่งอิมพีแดนซ์..... 71

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อไม่ได้ต่อกับวงจรแมทชิงอิมพีแดนซ์	72
5.16 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อต่อกับวงจรแมทชิงอิมพีแดนซ์	73
5.17 การเชื่อมต่อการทดลองของระบบ.....	73
5.18 การเชื่อมต่อการทดลองของระบบจริง.....	74
5.19 กราฟสัญญาณที่ได้จากเครื่อง Audio Analysis ของระบบ	75
5.20 กราฟเปรียบเทียบความเข้มเสียงระหว่างไฟล์เสียงคํางาวและหลังออกจากระบบ	76



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ค้างคาวเป็นสัตว์ปีกเช่นเดียวกับนก แต่มีฟันและหูที่มีลักษณะคล้ายหนู ไม่ฟักไข่ แต่ออกลูกเป็นตัวและเลี้ยงลูกด้วยน้ำนม ปัจจุบันนักชีววิทยามีความเข้าใจเกี่ยวกับค้างคาวมากขึ้น พบว่ามีค้างคาวประมาณ 1,000 ชนิดทั่วโลก โดยชนิดที่มีขนาดเล็กที่สุดคือค้างคาวกิตติ (*Craseonycteris thonglongyai*) ซึ่งมีน้ำหนักเพียง 1.75-2.00 กรัม และมีช่วงปีกกว้าง 16 เซนติเมตร ส่วนชนิดที่มีขนาดใหญ่ที่สุดคือ *Pteropus neo-hibernicus* ซึ่งมีช่วงปีกกว้างถึง 1.65 เมตร ค้างคาวเป็นสัตว์ที่ออกหาอาหารในเวลากลางคืนและใช้เสียงเพื่อนำทาง การทดลองในปี ค.ศ. 1794 โดยนักชีววิทยาชาวอิตาลี ลาซาโรสปัลลันซานี (Lazaro Spallanzani) ได้ปิดตาค้างคาวทั้งสองข้างแล้วปล่อยให้บินหาอาหาร พบว่าค้างคาวยังสามารถหาอาหารได้อย่างไม่มีปัญหาใด ๆ แต่เมื่อปิดหูค้างคาว ค้างคาวจะบินชนผนังและไม่สามารถหาเหยื่อได้ สปัลลันซานีจึงสรุปว่าค้างคาวใช้หูในการ "มองเห็น" อย่างไรก็ตาม ในยุคนั้นแนวคิดนี้ถูกมองว่าเหลวไหลและไม่มีผู้ใดให้ความสนใจ จนกระทั่งปี ค.ศ. 1940 นักชีววิทยาชาวอเมริกัน โดนัลด์ กริฟฟิน (Donald Griffin) ได้ทำการทดสอบซ้ำและยืนยันว่าค้างคาวใช้การฟังเสียงสะท้อนเพื่อระบุตำแหน่งและลักษณะของเหยื่อ กริฟฟินเรียกเทคนิคนี้ว่า "การหาดำแหน่งด้วยเสียงสะท้อน" หรือ echolocation กริฟฟินยังค้นพบว่าค้างคาวชนิด *Eptesicus fuscus* ซึ่งเป็นค้างคาวสีน้ำตาลขนาดใหญ่ สามารถมองเห็นวัตถุขนาดเล็กเพียง 0.01 เมตร ได้อย่างชัดเจนในระยะห่าง 2 เมตร ในวารสาร Nature ฉบับวันที่ 10 มิถุนายน ค.ศ. 2006 ที. คิงส์ตัน (T. Kingston) และ เอส.เจ. รอสซิเตอร์ (S.J. Rossiter) ได้รายงานว่าค้างคาวชนิด *Rhinolophus philippinensis* ในออสเตรเลียสามารถปรับความถี่เสียงที่ใช้ในการหาเหยื่อ โดยขณะที่หาเหยื่อขนาดใหญ่จะใช้ความถี่ 27.2 ± 0.2 กิโลเฮิรตซ์ แต่เมื่อหาเหยื่อขนาดเล็กจะเปลี่ยนไปใช้ความถี่ 53.6 ± 0.6 กิโลเฮิรตซ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค้างคาวสามารถปรับความถี่เสียงที่ส่งออกไปตามขนาดของเหยื่อได้ ค้างคาวเป็นสัตว์สังคม มักอาศัยอยู่เป็นกลุ่มใหญ่ เวลาพักผ่อนจะใช้เล็บยึดเกาะเพดานถ้ำแล้วห้อยหัวลง การอยู่ในที่สูงทำให้สัตว์ที่บินไม่ได้ไม่สามารถทำอันตรายต่อมันได้ นอกจากนี้ เมื่อมีศัตรูบินเข้ามาทำร้าย ค้างคาวสามารถปล่อยกรงเล็บและบินหนีได้ทันที แม้ว่าค้างคาวจะบินได้ไม่เร็วเท่าเหยี่ยว แต่เนื่องจากค้างคาวหาอาหารในเวลากลางคืน ขณะที่เหยี่ยวหาอาหารในเวลากลางวัน ทำให้ค้างคาวไม่ได้ตกเป็นเหยื่อของเหยี่ยวบ่อยนัก อย่างไรก็ตาม ค้างคาวยังมีศัตรู เช่น นกเค้าแมว และมนุษย์ที่ล่าค้างคาวเป็น

อาหาร ค้างคาวที่กินพืชจะกินผลไม้และน้ำหวานจากดอกไม้ ส่วนค้างคาวที่กินสัตว์จะกินแมลง หนู กบ ปลา ฯลฯ การที่ค้างคาวกินแมลงทำให้มันมีประโยชน์ต่อเกษตรกรที่ประสบปัญหาแมลงศัตรูพืช และการดูดน้ำหวานยังช่วยในกระบวนการผสมเกสรของพืชอีกด้วย เมื่อค้างคาวกินผลไม้ เมล็ดของผลไม้จะถูกขับถ่ายออกมาพร้อมกับมูลค้างคาวซึ่งเป็นปุ๋ยที่มีคุณภาพ ช่วยให้เมล็ดงอกและแพร่พันธุ์พืชได้ อย่างไรก็ตาม ค้างคาวที่แอบกินผลไม้ในสวนอาจทำให้เกษตรกรสูญเสียรายได้ และถ้าค้างคาวเป็นพาหะของโรคกลัวน้ำ (rabies) แล้วกัดมนุษย์ มนุษย์จะติดโรคและล้มป่วยตามมา

ค้างคาวที่กินผลไม้ในประเทศไทยมีประมาณ 9 ชนิด ได้แก่ ค้างคาวแม่ไก่ ค้างคาวบัว ค้างคาวขอบหูขาว ค้างคาวขอบหูดำ ค้างคาวหัวดำ ค้างคาวปีกจุด ค้างคาวดอย ค้างคาวเล็บกุด และ ค้างคาวหน้ายาว โดยชนิดที่พบมากที่สุด 3 ชนิด ได้แก่ ค้างคาวบัว ค้างคาวขอบหูขาว และค้างคาวเล็บกุด ซึ่งค้างคาวเหล่านี้มักเข้ามากินผลไม้ในสวน ทำให้เกิดความเสียหายต่อผลผลิต และลดรายได้ของเกษตรกร ชาวสวนจึงพยายามคิดค้นวิธีการป้องกันและกำจัดค้างคาว เช่น การสร้างเสียงดังด้วยการจุดประทัด ใช้ปืนยิง หรือใช้ห่านเพื่อส่งเสียงรบกวนค้างคาวให้ตกใจและบินหนีไป แต่ก็ได้ผลเพียงระยะเวลาสั้น ๆ และอาจเป็นอันตรายต่อค้างคาว เนื่องจากค้างคาวมีความไวต่อเสียงสูง อีกวิธีที่ใช้ในการป้องกันคือการใช้ตาข่ายขนาดใหญ่คลุมต้นไม้เพื่อป้องกันค้างคาวไม่ให้เข้ามากินผลไม้ วิธีนี้ป้องกันไม่ให้ค้างคาวเข้าถึงผลผลิต แต่ค้างคาวหลายตัวอาจติดอยู่ในตาข่ายและไม่สามารถบินหนีได้นอกจากนี้ยังมีวิธีการขับไล่ค้างคาวด้วยการใช้ควัน โดยการจุดไฟเผาต้นมันสำปะหลังที่มีใบสดบริเวณสวนเพื่อให้เกิดควัน ค้างคาวจะรู้สึกระคายเคืองและบินหนีไป อย่างไรก็ตาม วิธีนี้อาจก่อให้เกิดปัญหากับชาวบ้านใกล้เคียงจากการได้รับผลกระทบจากควัน และต้องคำนึงถึงทิศทางลมอีกด้วย วิธีการเหล่านี้เป็นแนวทางที่ชาวสวนมักใช้ในปัจจุบัน แต่ยังไม่มียุทธวิธีที่สามารถขับไล่ค้างคาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ยังมีแนวทางอื่น ๆ ที่มีการนำความรู้เกี่ยวกับการที่ค้างคาวใช้เสียงในการนำทางขณะออกหาอาหารมาประยุกต์ใช้ โดยมีงานวิจัยหลายชิ้นที่พยายามใช้คลื่นเสียงในการขับไล่ค้างคาว หลักการคือการปล่อยคลื่นเสียงโซนิกและอัลตราโซนิกเพื่อรบกวนการได้ยินของค้างคาว ทำให้ค้างคาวไม่สามารถใช้เสียงนำทางได้ในพื้นที่ที่มีการติดตั้งระบบนี้ การรบกวนคลื่นเสียงจะทำให้ค้างคาวรู้สึกถึงความผิดปกติในการบินและพยายามหลีกเลี่ยงพื้นที่นั้น คลื่นเสียงที่ใช้ในกระบวนการนี้เป็นคลื่นความถี่ที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยิน จึงไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่สามารถรบกวนค้างคาวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากการศึกษาที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยได้ตระหนักว่าการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการขับไล่ค้างคาวนั้นเป็นวิธีที่มีประสิทธิผล อย่างไรก็ตาม วิธีการที่ใช้อยู่ในปัจจุบันยังคงเป็นการปล่อยคลื่นเสียงที่มีความถี่หลากหลายออกมาโดยไม่คำนึงถึงความแตกต่างทางการรับรู้ความถี่เสียงของค้างคาวแต่ละชนิด ซึ่งค้างคาวแต่ละชนิดมีช่วงความถี่ที่ตอบสนองแตกต่างกัน ทำให้บางครั้งคลื่นเสียงที่ปล่อยออกมาไม่สามารถขับไล่ค้างคาวบางชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากค้างคาวใช้คลื่นเสียงในการ

นำทางและหาเหยื่อ ซึ่งเรียกว่า echolocation ผู้วิจัยจึงพัฒนานวัตกรรมใหม่ที่ไม่ได้เน้นการสร้างคลื่นเสียงขึ้นมาใหม่ แต่ใช้งานจากเสียงของค้างคาวที่มีการบันทึกหรือข้อมูลเสียงที่มีอยู่เดิม ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความถี่ที่ค้างคาวแต่ละชนิดใช้ โดยการนำเสียงของค้างคาวเหล่านี้มาขยายสัญญาณให้มีความดังและความชัดเจนมากยิ่งขึ้น และเพิ่มสัญญาณรบกวนเข้าไปในเสียงดังกล่าว เพื่อสร้างสัญญาณเสียงที่ส่งกลับไปยังค้างคาว ทำให้ค้างคาวเกิดความสับสนกับคลื่นเสียงที่ได้รับ วิธีการนี้ไม่ใช่การสร้างคลื่นเสียงขึ้นมาใหม่ แต่เป็นการประยุกต์ใช้เสียงที่ค้างคาวปล่อยออกมาในการดำเนินชีวิต ทำให้สามารถปรับใช้ได้กับค้างคาวหลากหลายชนิด เนื่องจากใช้เสียงที่ค้างคาวมีการตอบสนองโดยตรง เมื่อเสียงถูกขยายและเพิ่มสัญญาณรบกวน ค้างคาวจะไม่สามารถใช้คลื่นสะท้อนในการนำทางและหลบหลีกสิ่งกีดขวางได้อย่างปกติ ส่งผลให้ค้างคาวต้องหลีกเลี่ยงและบินหนีออกจากพื้นที่ที่ติดตั้งระบบนี้ นวัตกรรมนี้มีประสิทธิภาพในการขับไล่ค้างคาวมากกว่าระบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน เพราะการใช้เสียงของค้างคาวเองช่วยให้สามารถขับไล่ค้างคาวได้ทุกชนิดอย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ เนื่องจากคลื่นเสียงที่ใช้เป็นคลื่นความถี่ที่มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้ จึงไม่ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหรือผู้อยู่อาศัยในพื้นที่

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาและออกแบบสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ
- 2) เพื่อศึกษาและวิเคราะห์ผลสำหรับการขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ

1.3 สมมติฐานของการวิจัย

การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการขับไล่ค้างคาวโดยการใช้สัญญาณที่มีอยู่ซึ่งสอดคล้องกับช่วงความถี่ของค้างคาวมาขยายสัญญาณและนำไปผสมกับสัญญาณรบกวน และส่งกลับไปจะสามารถนำไปขับไล่ค้างคาวได้

1.4 ข้อตกลงเบื้องต้น

ออกแบบสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับได้ โดยใช้ลำโพงทั่วไปตามท้องตลาดสำหรับใช้เป็นโหนดสำหรับปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูง โดยออกแบบวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์ที่ความถี่ 50 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งเป็นความถี่กลางของระบบและสามารถสร้างสัญญาณเอาต์พุตที่มีระดับความดังมากกว่า 90 dB SPL

1.5 ขอบเขตของการวิจัย

- 1) ศึกษาประสิทธิภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการขับไล่ค่างคาว
- 2) ออกแบบสร้างระบบขับไล่ค่างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับได้ตั้งแต่ในช่วงความถี่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ ถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์
- 3) ออกแบบสร้างวงจรอิมพีแดนซ์ระหว่างวงจรขยายสัญญาณของระบบกับลำโพงที่มีอยู่ในปัจจุบันในช่วงความถี่ตั้งแต่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์
- 4) ทดสอบและเก็บผล ระบบขับไล่ค่างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ เพื่อทำการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของสัญญาณในการขับไล่ค่างคาว รวมถึงวิเคราะห์คุณภาพของระบบ

1.6 วิธีการดำเนินงาน

1.6.1 แนวทางการดำเนินงาน

ศึกษาและสำรวจประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการใช้คลื่นเสียงความถี่สูง มาใช้ในการขับไล่ค่างคาว เพื่อใช้ในการออกแบบระบบขับไล่ค่างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับให้ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทำงาน โดยออกแบบวงจรอิมพีแดนซ์ของวงจรให้ใช้กับลำโพงที่มี และสามารถปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงได้ตั้งแต่ 10 กิโลเฮิร์ตซ์ จนถึง 100 กิโลเฮิร์ตซ์ได้ โดยไม่ต้องสร้างลำโพงขึ้นมาใหม่ เมื่อระบบพร้อมใช้งานจึงทำการทดสอบการทำงานของระบบและทำการบันทึกค่าของระบบดังนี้ ค่าแรงดันสัญญาณก่อนเข้าระบบ ค่าแรงดันสัญญาณหลังออกจากระบบที่ระยะต่าง ๆ ค่ากำลังงานที่ใช้ เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความเหมาะสมในการนำไปติดตั้งในพื้นที่จริง และการใช้กำลังงานไฟฟ้า เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการแล้วจึงทำการเผยแพร่ผลงานทางวิชาการ และจัดทำรายงาน

1.6.2 ระเบียบวิธีวิจัย

- 1) ศึกษาค้นคว้าและเก็บรวบรวมข้อมูลโดยการสำรวจประสิทธิภาพและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์
- 2) วิเคราะห์ ออกแบบ และศึกษาข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือทางวิชาการถึงวิธีการออกแบบสร้างชุดวงจรอิมพีแดนซ์ของลำโพงคลื่นเสียงความถี่สูงเพื่อใช้สำหรับการขับไล่ค่างคาว
- 3) สร้างเครื่องต้นแบบเพื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพในการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงสำหรับการขับไล่ค่างคาว

1.6.3 สถานที่ทำการวิจัย

ห้องวิจัยและปฏิบัติการสื่อสารไร้สาย อาคารเครื่องมือ 3 (F3) ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ขั้นสูง อาคารสิรินธรวิศวะพัฒน์ (F11) และห้องปฏิบัติการวงจรอิเล็กทรอนิกส์เกษตร อาคารเกษตรวิวัฒน์ (F14) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถ.มหาวิทยาลัย ต.สุรนารี อ.เมือง นครราชสีมา จ.นครราชสีมา 30000

1.6.4 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

- 1) คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- 2) ฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ (Function Generator)
- 3) ออสซิลโลสโคป (Oscilloscope)
- 4) เครื่องวิเคราะห์สัญญาณย่านความถี่ (Audio Test)
- 5) เครื่องวัดอิมพีแดนซ์ (Impedance Analyzer)

1.6.5 การเก็บรวบรวมข้อมูล

- 1) เก็บรวบรวมข้อมูลจากการสำรวจประสิทธิภาพวงจรที่เกี่ยวข้อ
- 2) เก็บรวบรวมผลจากการออกแบบ สร้าง และวัดผลการทดสอบวงจรขยายสัญญาณที่สามารถผสมสัญญาณรบกวน และใช้งานร่วมกับลำโพงที่มีได้

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ได้ระบบขับไล่คางคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ ที่สามารถใช้ลำโพงที่มีอยู่ได้โดยไม่ต้องออกแบบสร้างลำโพงขึ้นมาใหม่ และสามารถนำไปขับไล่คางคาวได้จริงโดยไม่ส่งผลให้เกิดอันตรายใด ๆ ต่อมนุษย์และคางคาว
- 2) ได้องค์ความรู้ในเรื่องการออกแบบวงจรขยายสัญญาณที่สามารถผสมสัญญาณรบกวน และใช้งานร่วมกับลำโพงที่มีได้ ซึ่งเป็นแนวทางให้กับ ชาวไร่ชาวนา ในการนำระบบนี้ไปใช้ในการขับไล่คางคาว หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการขับไล่สัตว์ประเภทอื่น ๆ ที่ได้ยินคลื่นเสียงความถี่สูงได้ เพื่อยกระดับให้มีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

บทที่ 2

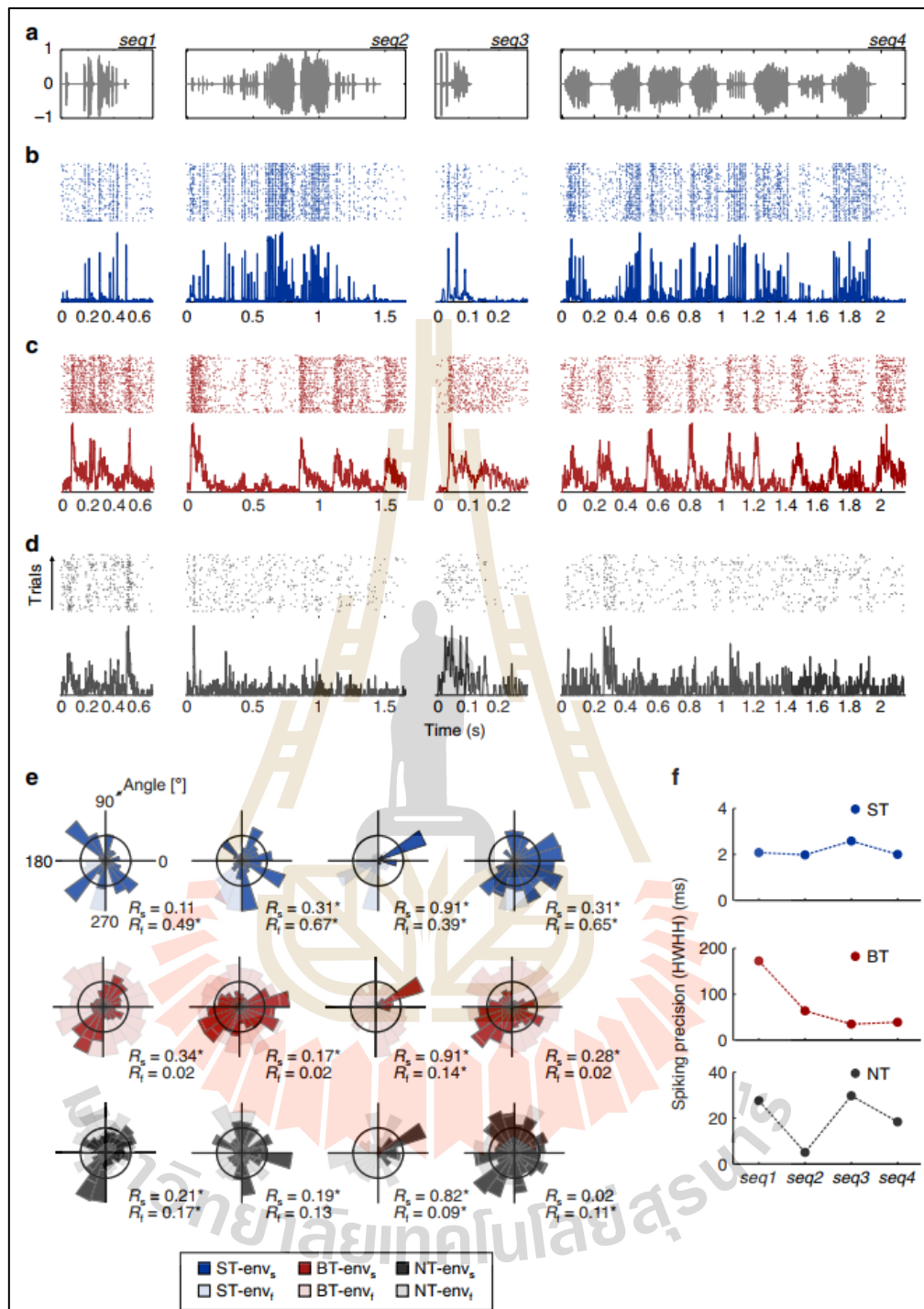
ปรีทัศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 บทนำ

งานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีวัตถุประสงค์หลักในการออกแบบและพัฒนาระบบขับไล่ค้างคาว โดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ โดยนำคลื่นเสียงของค้างคาวที่ได้มีการบันทึกไว้มาผสมกับสัญญาณรบกวน จากนั้นทำการผสมสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงหลายระดับ เข้ากับคลื่นเสียงของค้างคาว และทำการขยายกำลังไฟฟ้าของคลื่นเสียงที่ได้ เพื่อส่งกลับไปยังค้างคาว และขับไล่ค้างคาวให้ออกจากพื้นที่ที่มีการติดตั้งระบบ สำหรับงานวิจัยนี้ได้มุ่งเน้นการออกแบบและสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยอาศัยเทคนิคการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ นอกจากนี้ ยังได้มีการศึกษาปรีทัศน์วรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้คลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว และการนำคลื่นเสียงความถี่สูงมาใช้ในการขับไล่ค้างคาว เพื่อพัฒนาระบบที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการใช้งาน

2.2 การรับรู้คลื่นเสียงความถี่สูงของค้างคาว

ค้างคาวเป็นสัตว์ที่พึ่งพาการรับรู้ทางเสียงเป็นหลักในการดำรงชีวิต พวกมันมีความสามารถพิเศษในการตรวจจับและประมวลผลข้อมูลเสียงอย่างละเอียด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ช่วยให้พวกมันสามารถสื่อสารกับสมาชิกในฝูง นำทางในความมืด และหาเหยื่อที่มีการพรางตัวได้อย่างแม่นยำ การรับรู้ของค้างคาวเกิดจากการประมวลผลข้อมูลเสียงในสมองส่วนการได้ยิน (auditory cortex) ที่ซับซ้อน และยังอาศัยการปรับตัวทางสรีรวิทยาเพื่อใช้ประโยชน์จากเสียงสะท้อน (echolocation) งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับกลไกการเข้ารหัสเสียงและการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมของค้างคาวได้แสดงให้เห็นถึงบทบาทของสมองและวิธีการที่พวกมันใช้เพื่อแยกแยะเสียงที่ซับซ้อนในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ



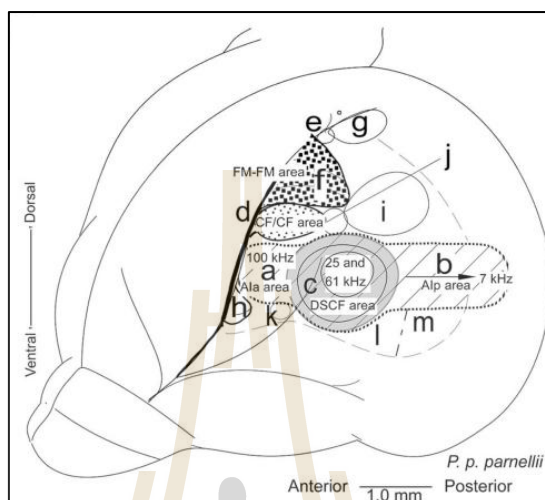
รูปที่ 2.1 การตอบสนองของเซลล์ประสาทต่อลักษณะเสียงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาในสมองของค้างคาว เมื่อ a. การตอบสนองต่อเสียงความถี่สูง, b. การตอบสนองต่อเสียงความถี่ต่ำ, c. การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเสียง, d. การตอบสนองต่อเสียงที่มีการซ้อนทับ, e. การเปรียบเทียบระหว่างเสียงที่แตกต่างกัน และ f. การตอบสนองต่อเสียงที่เป็นลำดับ

ในงานวิจัยของ Francisco García-Rosales และคณะในปี 2018 ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการเข้ารหัสเสียงในสมองของค้างคาว โดยพบว่าค้างคาวมีความสามารถในการแยกแยะลักษณะเสียงที่ซับซ้อนและเปลี่ยนแปลงในหลายระดับเวลา (multiscale temporal features) โดยเฉพาะในระดับมิลลิวินาทีและวินาที เซลล์ประสาทในสมองส่วนการได้ยินของค้างคาวสามารถเข้ารหัสและตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้ได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างยิ่งในการสื่อสารทางสังคม เช่น การตอบสนองต่อเสียงเรียกหรือสัญญาณเตือนจากสมาชิกในฝูง ในรูปที่ 2.1 มีการแสดงการตอบสนองของเซลล์ประสาทต่อเสียงที่มีลักษณะต่าง ๆ ซึ่งแบ่งออกเป็นหัวข้อย่อย ที่ช่วยให้เห็นถึงกลไกการเข้ารหัสเสียงในสมองของค้างคาว ดังนี้

- a. การตอบสนองต่อเสียงความถี่สูง แสดงให้เห็นการกระตุ้นของเซลล์ประสาทเมื่อมีเสียงในช่วงความถี่สูง ซึ่งแสดงถึงความสามารถของค้างคาวในการแยกแยะเสียงที่มีความถี่สูงได้ดี
- b. การตอบสนองต่อเสียงความถี่ต่ำ แสดงการตอบสนองของเซลล์ประสาทต่อเสียงที่มีความถี่ต่ำ โดยแสดงให้เห็นถึงการทำงานที่เฉพาะเจาะจงของสมองในช่วงความถี่นี้
- c. การตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงเสียง เน้นการตอบสนองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะเสียง เช่น ความดังหรือความถี่ในช่วงเวลาที่กำหนด ซึ่งมีความสำคัญต่อการตรวจจับสัญญาณเสียงที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว
- d. การตอบสนองต่อเสียงที่มีการซ้อนทับ แสดงถึงการตอบสนองของเซลล์ประสาทเมื่อมีเสียงหลายเสียงเกิดขึ้นพร้อมกัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าค้างคาวสามารถแยกแยะเสียงในสถานการณ์ที่มีเสียงรบกวนได้
- e. การเปรียบเทียบระหว่างเสียงที่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นการเปรียบเทียบการตอบสนองของเซลล์ประสาทต่อเสียงที่มีลักษณะและคุณสมบัติแตกต่างกัน เช่น เสียงเรียกหรือสัญญาณเตือนจากสมาชิกในฝูง
- f. การตอบสนองต่อเสียงที่เป็นลำดับ แสดงถึงการตอบสนองของเซลล์ประสาทต่อเสียงที่เกิดขึ้นในลำดับที่กำหนด ซึ่งช่วยให้ค้างคาวสามารถจำแนกและตอบสนองต่อการสื่อสารในรูปแบบที่ซับซ้อนได้

การเข้ารหัสเสียงในหลายระดับเวลานี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้ค้างคาวสามารถแยกแยะเสียงที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ยังช่วยให้พวกมันสามารถรับรู้ข้อมูลเสียงที่แสดงถึงการ

เปลี่ยนแปลงอย่างละเอียดในสภาพแวดล้อมที่อาศัยอยู่ได้ดีขึ้น โดยส่งผลให้ค้างคาวสามารถทำหน้าที่ในการสื่อสารและการล่าเหยื่อได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย



รูปที่ 2.2 แสดงโครงสร้างของเปลือกสมองส่วนการได้ยินของค้างคาว

การรับรู้เสียงของค้างคาวเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งพึ่งพาการทำงานของสมองหลายส่วน โดยเฉพาะส่วน auditory cortex ซึ่งเป็นศูนย์กลางสำคัญในการแยกแยะเสียงและวิเคราะห์ข้อมูลเสียง การศึกษาของ Jagmeet S. Kanwal และคณะในปี 2014 ได้อธิบายบทบาทของสมองส่วนต่างๆ ในการประมวลผลเสียง โดยในรูปที่ 2.2 ของบทความนี้ได้แสดงให้เห็นถึงจุดสำคัญที่มีการระบุเป็น a ถึง m ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงโครงสร้างและการทำงานของสมองในด้านการรับรู้เสียง ดังนี้

- a. AI-anterior (Primary Auditory Cortex - Anterior) - ส่วนหน้าของเปลือกสมองการได้ยินหลัก (A1) ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลเสียงในลักษณะพื้นฐาน
- b. AI-posterior (Primary Auditory Cortex - Posterior) - ส่วนหลังของ A1 ที่มีบทบาทในการแยกแยะเสียงที่ซับซ้อนมากขึ้น
- c. DSCF area - โซนที่ตอบสนองต่อเสียงที่มีความถี่เฉพาะ โดยเฉพาะเสียงที่มีความถี่ประมาณ 60.6 ถึง 62.3 kHz ซึ่งแสดงถึงการจัดระเบียบตามโทโนโทปีใน A1
- d. CF/CF area - พื้นที่ที่ตอบสนองต่อเสียงที่มีความถี่เฉพาะ โดยทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลข้อมูลเสียงในระดับสูง
- e. DIF area - พื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลเสียงที่มีความถี่เฉพาะหรือเป็นพื้นที่ที่ช่วยในการวิเคราะห์เสียงในลักษณะเฉพาะ

- f. FM-FM area - พื้นที่ที่มีบทบาทในการประมวลผลเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ (frequency modulation) โดยอาจมีความสำคัญในการรับรู้ลักษณะของเสียงที่ซับซ้อน
- g. DF area - โซนที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลเสียงในลักษณะต่าง ๆ โดยเฉพาะการแยกแยะเสียงที่ซับซ้อน
- h. VF area - พื้นที่ที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสียงในระดับความถี่ต่ำ
- i. DM area - พื้นที่ที่อาจเกี่ยวข้องกับการประมวลผลข้อมูลเสียงในมิติที่หลากหลาย
- j. TE area - โซนที่เกี่ยวข้องกับการประมวลผลเสียงในลักษณะเฉพาะ
- k. H1-H2 area - พื้นที่ที่อาจเกี่ยวข้องกับการแยกแยะเสียงที่มีความถี่สูง
- l. VA area - โซนที่เกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสียงในลักษณะต่าง ๆ
- m. VP area - พื้นที่ที่มีบทบาทในการประมวลผลเสียงในระดับสูง โดยอาจเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์เสียงที่มีความซับซ้อน

การทำงานของโซนต่าง ๆ ในสมองค้ำควานี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการรับรู้และประมวลผลเสียง โดยเฉพาะการทำงานของ Primary Auditory Cortex (A1) ที่มีบทบาทสำคัญในการแยกแยะคุณสมบัติพื้นฐานของเสียง เช่น ความถี่และความเข้ม ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สมองใช้ในการรับรู้และแยกเสียงเฉพาะของสปีชีส์

Primary Auditory Cortex (A1) เป็นส่วนสำคัญในการแยกแยะคุณสมบัติพื้นฐานของเสียง เช่น ความถี่และความเข้ม ซึ่งเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่สมองใช้ในการรับรู้และแยกเสียงเฉพาะของสปีชีส์ ในขณะที่ Secondary Auditory Cortex (A2) ทำหน้าที่ประมวลผลเสียงที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ช่วยในการแยกแยะลำดับเสียงที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ซึ่งมีความสำคัญต่อการสื่อสารระหว่างสมาชิกในฝูงค้ำควา การทำงานร่วมกันของ A1 และ A2 ทำให้ค้ำควาสามารถเข้าใจและตอบสนองต่อเสียงในลักษณะที่มีความหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ Prefrontal Cortex (PFC) ยังมีบทบาทสำคัญในการจดจำเสียง เช่น การจดจำเสียงเรียกของสมาชิกในฝูง ซึ่งช่วยในการสร้างปฏิสัมพันธ์และการรับรู้ภายในสังคมของค้ำควา ความสามารถในการจดจำเสียงที่มีความหมายช่วยให้ค้ำควาสร้างความสัมพันธ์ที่ดีกับสมาชิกในฝูง

Inferior Colliculus (IC) เป็นส่วนที่สำคัญในการประมวลผลเสียงเบื้องต้นและวิเคราะห์ทิศทางของเสียง ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการนำทางและการใช้เสียงสะท้อนในการหาเหยื่อ การทำงานร่วมกันของส่วนต่าง ๆ ของสมองนี้ทำให้ค้ำความีความสามารถในการรับรู้และตอบสนองต่อเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

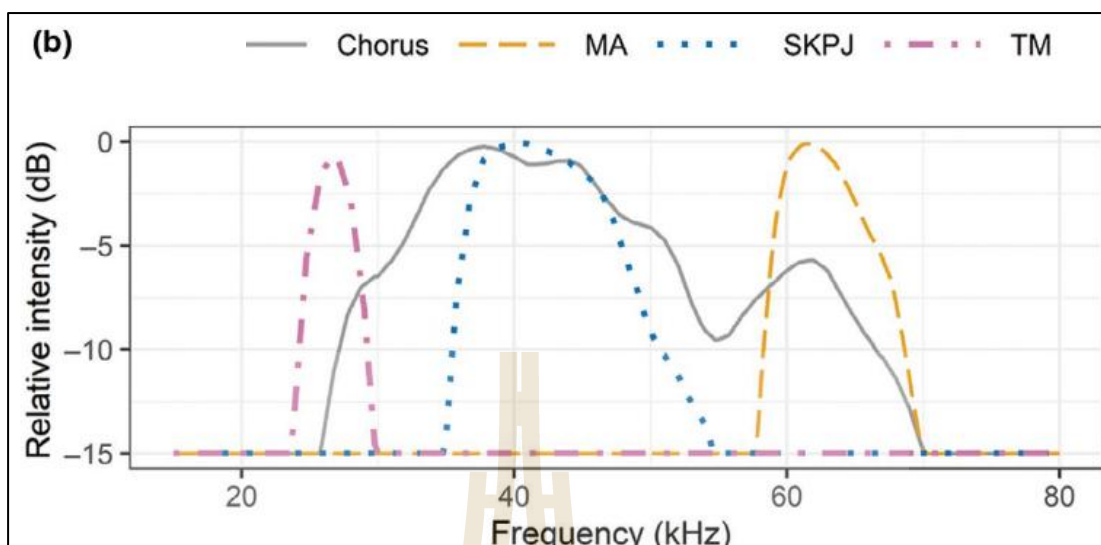
การเข้าใจการทำงานของสมองในบริบทนี้ไม่เพียงแต่ช่วยให้เราเห็นภาพรวมของกลไกการรับรู้เสียงที่ซับซ้อนของค้างคาวในธรรมชาติ แต่ยังเป็นแนวทางในการศึกษาการรับรู้เสียงในสัตว์ชนิดอื่น ๆ ที่มีการสื่อสารผ่านเสียงอีกด้วย รูปที่ 2.2 จึงเป็นการแสดงให้เห็นถึงโครงสร้างและการทำงานของสมองในบริบทนี้ โดยสามารถระบุจุดสำคัญที่เชื่อมโยงกับฟังก์ชันการรับรู้เสียงและการสื่อสารในค้างคาวได้อย่างชัดเจน

โดยรวมแล้ว สมองของค้างคาวมีการประสานงานระหว่างส่วนต่าง ๆ อย่างซับซ้อน เพื่อให้มันสามารถรับรู้และตอบสนองต่อเสียงที่ซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความสามารถในการเข้ารหัสข้อมูลเสียงในระดับเวลาต่าง ๆ เป็นสิ่งที่ช่วยให้ค้างคาวสามารถสื่อสารกันภายในฝูงและนำทางในสภาพแวดล้อมที่มีดิสสนิท การทำงานร่วมกันระหว่างสมองส่วน auditory cortex และส่วนอื่น ๆ ในการประมวลผลเสียงช่วยให้ค้างคาวสามารถแยกแยะข้อมูลเสียงได้อย่างละเอียดและแม่นยำ กลไกการรับรู้ทางเสียงที่ซับซ้อนนี้เป็นสิ่งที่ทำให้ค้างคาวสามารถดำรงชีวิตและปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่หลากหลายได้อย่างดี

2.3 การขับไล่ค้างคาวโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

การขับไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเป็นวิธีการที่มีความท้าทายและต้องอาศัยการเลือกใช้ความถี่และระดับเสียงที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการป้องกันการชนกับโครงสร้างต่าง ๆ เช่น กังหันลม ซึ่งในบทความวิจัยสองฉบับที่เกี่ยวข้องได้อธิบายรายละเอียดที่สำคัญเกี่ยวกับความถี่และระดับความเข้มเสียง รวมถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการขับไล่ค้างคาว

ในงานวิจัย "A phantom ultrasonic insect chorus repels low-flying bats, but most are undeterred" ของ Jodi L. Sedlock และคณะ ทำการทดลองโดยมีการใช้เสียงอัลตราซาวด์ที่เลียนแบบเสียงของแมลง โดยเสียงที่ใช้ในการทดลองหลักคือเสียงของ ตั๊กแตนและผีเสื้อกลางคืน ซึ่งถูกสร้างขึ้นเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมที่มีแมลงอยู่ โดยมีความถี่อยู่ในช่วงประมาณ 20 kHz ถึง 40 kHz ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมการบินของค้างคาวบางชนิดได้ ในการศึกษา ในรูปที่ 2.3 กล่าวถึงสเปกตรัมพลังงานของเสียงตั๊กแตนที่มีความถี่ที่ส่งผลต่อค้างคาวแต่ละชนิด จากการทดลองพบว่าค้างคาวบางตัวที่บินอยู่ในระดับต่ำสามารถรู้สึกถึงเสียงนี้และเลือกที่จะหลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีเสียงอัลตราซาวด์ อย่างไรก็ตาม ค้างคาวส่วนใหญ่ยังคงไม่ตอบสนองต่อเสียงเหล่านี้ โดยการทดลองแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับรู้เสียงอาจขึ้นอยู่กับชนิดของค้างคาวและความสูงที่มันบินอยู่



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมพลังงาน (power spectrum) ที่เป็นตัวแทนของเสียงเรียก (echolocation calls) ของค้างคาวแต่ละชนิด เทียบกับเสียงจำลองของฝูงตั๊กแตน (katydid chorus playback) โดยระบุถึงความเป็นไปได้ในการเกิดการบดบังทางเสียง (acoustic masking)

การที่ค้างคาวไม่ชอบเสียงของสัตว์อย่างตั๊กแตนและผีเสื้อกลางคืนอาจมีสาเหตุที่เกี่ยวข้องกับพฤติกรรมการเอาชีวิตรอดและการพัฒนาทางวิวัฒนาการ ได้แก่ เสียงที่บ่งบอกถึงอันตราย ซึ่งเสียงที่เกิดจากตั๊กแตนและผีเสื้อกลางคืนอาจเป็นเสียงที่ค้างคาวตีความว่าเป็นสัญญาณของความไม่ปลอดภัย หรือความเสี่ยง การส่งเสียงที่ดังหรือมีลักษณะเฉพาะอาจบ่งบอกถึงการมีคู่แข่งหรือการข่มขู่จากศัตรู ทำให้ค้างคาวเลือกที่จะหลีกเลี่ยงเสียงเหล่านี้เพื่อลดความเสี่ยงที่จะถูกล่า นอกจากนี้ เสียงที่ผลิตโดยสัตว์เหล่านี้ อาจถูกตีความว่าเป็นสัญญาณว่ามีการต่อสู้หรือการแข่งขันเกิดขึ้น ค้างคาวอาจมีสัญชาตญาณในการหลีกเลี่ยงพื้นที่ที่มีเสียงดังเหล่านี้เพื่อลดโอกาสในการเผชิญหน้ากับคู่แข่งในการหาอาหาร การเรียนรู้และการปรับตัวที่เกิดขึ้นจากประสบการณ์ในอดีตเกี่ยวกับเสียงของตั๊กแตนและผีเสื้อกลางคืนก็มีส่วนช่วยในการพัฒนาพฤติกรรมนี้ ซึ่งเสียงเหล่านี้ อาจเชื่อมโยงกับการถูกล่า หรือการสูญเสียอาหารที่มาจากการเข้าไปในพื้นที่ที่มีเสียงเหล่านี้ ค้างคาวจึงเลือกที่จะหลีกเลี่ยงเสียงของสัตว์ทั้งสองชนิดเพื่อรักษาความปลอดภัยและการอยู่รอด

ในงานวิจัย "Evaluating the Effectiveness of an Ultrasonic Acoustic Deterrent for Reducing Bat Fatalities at Wind Turbines" โดย Edward B. Arnett และคณะ มีการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์เสียงอัลตราซาวด์ที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการขับไล่ค้างคาวจากบริเวณใกล้เคียงกังหันลม อุปกรณ์นี้มีความถี่ในการทำงานอยู่ในช่วง 30 kHz ถึง 50 kHz โดยการออกแบบให้มีเสียงที่ปล่อย

ออกมาในระดับ 90 dB SPL (Sound Pressure Level) ที่ระยะ 1 เมตร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขับไล่คางคาว

อุปกรณ์ที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เป็นอุปกรณ์เสียงอัลตราซาวด์ที่ถูกออกแบบมาเฉพาะเพื่อสร้างเสียงที่มีความถี่สูง และสามารถปรับระดับเสียงได้ตามต้องการ อุปกรณ์นี้มักจะติดตั้งไว้ในบริเวณที่มีโอกาสสูงในการเกิดการชนระหว่างคางคาวและกิ้งก้านลม เพื่อสร้างเสียงที่รบกวนคางคาวเมื่อเข้าใกล้บริเวณดังกล่าว โดยมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความถี่ที่ดีที่สุดและการตอบสนองของคางคาวต่อเสียงที่ปล่อยออกมา

ถึงแม้ว่าอุปกรณ์เสียงอัลตราซาวด์จะมีประสิทธิภาพในการลดอัตราการชนของคางคาวในบางกรณี แต่การทดลองยังแสดงให้เห็นว่าผลลัพธ์อาจแตกต่างกันไปในแต่ละสถานการณ์ และคางคาวบางชนิดยังคงสามารถปรับตัวและบินผ่านเสียงที่ปล่อยออกมาได้ นอกจากนี้ยังมีการเสนอว่าอุปกรณ์เสียงอัลตราซาวด์อาจต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อให้สามารถสร้างเสียงในระดับที่ดึงดูดความสนใจของคางคาวและทำให้มันรู้สึกไม่สบายใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

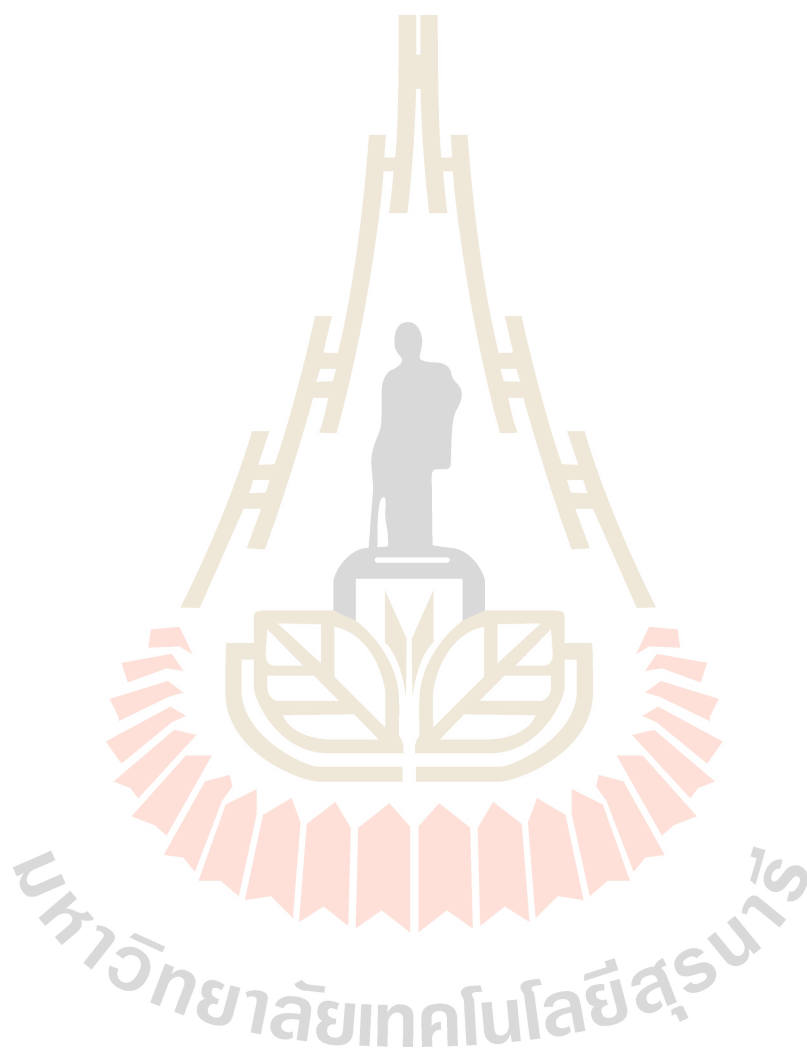
โดยรวมแล้ว การใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการขับไล่คางคาวมีทั้งข้อดีและข้อจำกัดที่ควรพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการป้องกันอันตรายจากการชนระหว่างคางคาวและโครงสร้างต่าง ๆ การเลือกใช้ความถี่ที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วง 20 kHz ถึง 50 kHz และระดับเสียงที่มีความเข้มประมาณ 90 dB SPL จะช่วยเพิ่มโอกาสในการขับไล่คางคาวจากบริเวณที่อันตรายได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.4 สรุป

จากการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูลในบทนี้ พบว่าการออกแบบและสร้างระบบขับไล่คางคาวโดยใช้คลื่นเสียงความถี่สูงมีความสำคัญและจำเป็นต่อการป้องกันการชนระหว่างคางคาวและโครงสร้างต่าง ๆ การรับรู้คลื่นเสียงความถี่สูงของคางคาวเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนซึ่งพึ่งพาการทำงานร่วมกันของส่วนต่าง ๆ ของสมอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วน auditory cortex ที่มีบทบาทสำคัญในการแยกแยะและประมวลผลข้อมูลเสียง

นอกจากนี้ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถของคางคาวในการแยกแยะลักษณะเสียงที่ซับซ้อน รวมถึงการตอบสนองต่อเสียงความถี่สูงและการเปลี่ยนแปลงของเสียง โดยการใช้อุปกรณ์เสียงความถี่สูงเพื่อขับไล่คางคาวนั้นต้องอาศัยการเลือกใช้ความถี่และระดับเสียงที่เหมาะสมซึ่งอยู่ในช่วง 20 kHz ถึง 100 kHz โดยระดับเสียงที่มีความเข้มประมาณ 90 dB SPL จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการขับไล่คางคาว

โดยรวมแล้ว การศึกษาในบทนี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการพัฒนาระบบขับเคลื่อนที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งควรอิงตามความเข้าใจในกลไกการรับรู้เสียงของค้ำคาว รวมถึงการเลือกใช้ความถี่และระดับเสียงที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขับเคลื่อนและลดความเสี่ยงจากการชนกับโครงสร้างต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



บทที่ 3

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

3.1 บทนำ

ค้างคาวเป็นสัตว์ที่ออกหากินเวลากลางคืน อาหารของค้างคาวนั้นแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ กลุ่มที่กินแมลงเป็นอาหาร และกลุ่มที่กินผลไม้เป็นอาหาร ซึ่งกลุ่มประเภทที่กินผลไม้เป็นอาหารนั้น คอยสร้างความเดือนร้อนให้กับเกษตรกร เนื่องจากค้างคาวกลุ่มนี้นั้นจะชอบกินผลไม้ที่เกษตรกรปลูก ทำให้ได้ผลผลิตที่น้อยลง เกษตรกรขาดรายได้ อีกทั้งค้างคาวยังเป็นสัตว์ที่เป็นพาหะนำโรคหลาย ๆ อย่างมาสู่คน ในปัจจุบันมีหลากหลายวิธีในการขับไล่ค้างคาวซึ่งในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการขับไล่ค้างคาว เนื่องจากค้างคาวใช้เสียงในการนำทาง โดยค้างคาวจะได้ยินเสียงตั้งแต่ 1 kHz ถึง 100 kHz ซึ่งความถี่ 20 kHz ขึ้นไปจะเป็นความถี่ที่มนุษย์ไม่ได้ยิน โดยจะอธิบายหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องของระบบขับไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ในบทนี้

3.2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับคลื่นเสียง

คลื่นเสียง เป็นเสียงที่เกิดจากหูได้รับพลังงานจากการสั่นของแหล่งกำเนิดเสียงผ่านโมเลกุลของอากาศ ลักษณะการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของอากาศจะอยู่ในรูปของคลื่นตามยาว มีผลทำให้ความดันของอากาศบริเวณที่มีการถ่ายทอดพลังงานมีค่าเปลี่ยนแปลงไปจากความดันปกติ บริเวณที่มีความดันมากกว่าปกติเราเรียกว่า ส่วนอัด ส่วนบริเวณที่มีความดันน้อยกว่าปกติเราเรียกว่า ส่วนขยาย

3.2.1 การเคลื่อนที่ของเสียงผ่านตัวกลาง

เมื่อเสียงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่ง ความถี่เสียงจะมีค่าคงตัว เท่ากับความถี่ของแหล่งกำเนิดเสียง ส่วนอัตราเร็วของเสียงในตัวกลางหนึ่ง ๆ จะคงตัว เมื่ออุณหภูมิของตัวกลางนั้นคงตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงอัตราเร็วของเสียงเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ

สถานะของตัวกลาง	ตัวกลาง	อัตราเร็ว (เมตร/วินาที)
แก๊ส	อากาศ (0 °C)	331
	อากาศ (20 °C)	343
	ไฮโดรเจน (0 °C)	1286
	ออกซิเจน (0 °C)	317
	ฮีเลียม (0 °C)	972
ของเหลว (25° C)	น้ำ	1493
	เมทิลแอลกอฮอล์	1143
	น้ำทะเล	1533
ของแข็ง	อะลูมิเนียม	5100
	ทองแดง	3560
	เหล็ก	5130
	ตะกั่ว	1322

จากอัตราเร็วของเสียงในอากาศพบว่า อัตราเร็วของเสียงมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิของอากาศ โดยเป็นไปตามสมการ

$$v_t = 331 + 0.6t \quad (3.1)$$

เมื่อ v_t คือ อัตราเร็วของเสียงในอากาศที่อุณหภูมิ t ใด ๆ มีหน่วยเป็น เมตร/วินาที

t คือ อุณหภูมิของอากาศ มีหน่วยเป็น องศาเซลเซียส

3.2.2 การได้ยิน

การได้ยิน (Hearing) หมายถึง กระบวนการทางสรีรวิทยาที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้และตีความเสียงซึ่งเกิดจากคลื่นเสียงที่เคลื่อนที่ในอากาศหรือสื่ออื่น ๆ การได้ยินเป็นหนึ่งในห้าประสาทสัมผัสหลักของมนุษย์ และมีบทบาทสำคัญต่อการสื่อสารและการมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม

กระบวนการการได้ยิน

การได้ยินเริ่มต้นเมื่อคลื่นเสียงเข้ามาถึงหูมนุษย์ โดยมีขั้นตอนหลักดังนี้

1. การรับเสียง (Sound Reception) คลื่นเสียงที่เคลื่อนที่เข้ามาทำให้เยื่อแก้วหูสั่นสะเทือน ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงพลังงานเสียงเป็นพลังงานกล
2. การส่งสัญญาณ (Signal Transmission) การสั่นสะเทือนจากเยื่อแก้วหูจะถูกส่งผ่านไปยังกระดูกในหูชั้นกลาง และในที่สุดจะไปถึงหูชั้นใน ซึ่งมีโครงสร้างที่เรียกว่า คอเคลีย (Cochlea) ที่เปลี่ยนพลังงานกลเป็นสัญญาณประสาท
3. การตีความสัญญาณ (Signal Interpretation) สัญญาณประสาทจะถูกส่งไปยังสมอง โดยเฉพาะที่ เปลือกสมองส่วนการได้ยิน (Auditory Cortex) ซึ่งทำหน้าที่ตีความเสียงและสร้างความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะของเสียง เช่น ความถี่และความดัง

ความสำคัญของการได้ยิน

การได้ยินมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการสื่อสารและการมีปฏิสัมพันธ์ทางสังคม มันช่วยให้มนุษย์สามารถรับรู้และตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ การได้ยินยังมีบทบาทในการเรียนรู้และการพัฒนาทักษะต่าง ๆ เช่น การฟังเพลง การเรียนภาษา และการสนทนา ในทางวิทยาศาสตร์ การศึกษาเกี่ยวกับการได้ยินยังเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์คุณสมบัติของเสียงและการพัฒนาวิธีการรักษาอาการสูญเสียการได้ยิน ซึ่งเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของผู้คนในหลาย ๆ ด้าน

3.2.3 ความเข้มเสียง

ความเข้มเสียง (Sound Intensity) หมายถึง พลังงานเสียงที่ผ่านพื้นที่หน่วยหนึ่งในหน่วยเวลา โดยทั่วไปจะแสดงเป็นพลังงานต่อหน่วยพื้นที่ (Watts per square meter, W/m^2) ความเข้มเสียงเป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงระดับความแรงของเสียงที่เกิดขึ้นจากแหล่งเสียงหนึ่ง ๆ และเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญในการศึกษาเสียงในด้านฟิสิกส์และวิศวกรรมเสียง

ลักษณะและการวัดความเข้มเสียง

$$I_0 = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มเสียง มีหน่วยเป็น วัตต์ต่อตารางเมตร

P คือ พลังงานเสียงที่ถูกปล่อยออกมาจากแหล่งเสียง มีหน่วยเป็น วัตต์

A คือ พื้นที่ที่เสียงกระจายออกไป มีหน่วยเป็น ตารางเมตร

การวัดความเข้มเสียงสามารถทำได้ด้วยการใช้เครื่องมือเฉพาะ เช่น ไมโครโฟน และเครื่องวัดความเข้มเสียง (Sound Level Meter) ซึ่งจะช่วยในการประเมินระดับเสียงในหน่วย เดซิเบล (dB) โดยทั่วไปแล้ว ความเข้มเสียงในหน่วยเดซิเบลสามารถคำนวณได้จากความเข้มเสียงที่วัดได้เมื่อเทียบกับระดับเสียงอ้างอิง (ทั่วไปคือ 10^{-12} W/m^2) ดังนี้

$$L = 10 \log_{10} \left(\frac{I}{I_0} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ L คือ ระดับเสียง มีหน่วยเป็น เดซิเบล

I_0 คือ ความเข้มเสียง มีค่าเท่ากับ 10^{-12} W/m^2

3.3 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการได้ยินของค้างคาว

ค้างคาว (Bats) เป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่อยู่ในกลุ่ม Chiroptera ซึ่งมีความหลากหลายทางสายพันธุ์มากที่สุดในกลุ่มสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม มีประมาณ 1,300 สายพันธุ์ทั่วโลก ค้างคาวมีลักษณะเด่นที่ปีกที่พัฒนาไปจากมือ และมีความสามารถในการบินได้ ซึ่งทำให้พวกมันเป็นนักล่าที่มีประสิทธิภาพในการหากินในเวลากลางคืน การมีปีกที่มีโครงสร้างพิเศษช่วยให้ค้างคาวสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างคล่องตัวในอากาศ โดยเฉพาะเมื่อค้นหาเหยื่อในความมืด

ค้างคาวมีบทบาทสำคัญในระบบนิเวศ เนื่องจากพวกมันช่วยควบคุมประชากรแมลงและทำหน้าที่ในการผสมเกสรพืชหลายชนิด นอกจากนี้ ค้างคาวยังเป็นสัตว์ที่มีความสามารถพิเศษในการใช้เสียงสะท้อน (Echolocation) เพื่อช่วยในการนำทางและค้นหาอาหารในสภาพแวดล้อมที่มืด ซึ่งทำให้พวกมันมีความสามารถในการรับรู้เสียงที่สูงมากและความแม่นยำในการแยกแยะวัตถุ

การได้ยินเป็นกระบวนการที่สำคัญสำหรับการดำรงชีวิตของค้างคาว โดยเฉพาะการใช้การได้ยินในการหาอาหารและหลบเลี่ยงอุปสรรคในสภาพแวดล้อมที่มืด ค้างคาวใช้เทคนิคเสียงสะท้อน ซึ่งช่วยให้สามารถระบุระยะทางและลักษณะของเหยื่อได้อย่างแม่นยำ

3.3.1 การได้ยินและโครงสร้างของหู

การได้ยินของค้างคาวเริ่มต้นจากโครงสร้างของหู ซึ่งมีความพิเศษและแตกต่างจากสัตว์ชนิดอื่น โดยทั่วไปโครงสร้างของหูของค้างคาวแบ่งออกเป็นสามส่วนหลัก ได้แก่ หูชั้นนอก หูชั้นกลาง และหูชั้นใน

หูชั้นนอก (Outer ear) หูชั้นนอกของค้างคาวมีรูปร่างที่โดดเด่น ซึ่งช่วยในการรวบรวมเสียงจากสิ่งแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยทั่วไปจะมีรูปร่างเป็นกรวยหรือพัด ซึ่งช่วยให้

สามารถรับเสียงได้ดีในทุกทิศทาง นอกจากนี้ หูชั้นนอกยังมีความยืดหยุ่น ทำให้สามารถปรับตำแหน่งเพื่อรับเสียงในทิศทางที่ต้องการได้

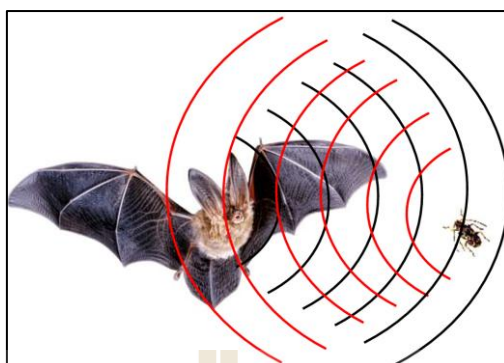
หูชั้นกลาง (Middle ear) ในหูชั้นกลางจะมีโครงสร้างที่เรียกว่า หูกลม (Tympanic membrane) ทำหน้าที่เป็นพรมแดนระหว่างหูชั้นนอกกับหูชั้นกลาง เมื่อมีเสียงเข้ามาหูจะทำให้หูกลมสั่นสะเทือน โดยการสั่นสะเทือนนี้จะถูกส่งต่อผ่านกระดูกเล็ก ๆ ที่เรียกว่า ออสซิเคลา (Ossicles) ซึ่งประกอบไปด้วยกระดูก 3 ชิ้น ได้แก่ มอลเลียส (Malleus), อีสตาซิอุส (Incus), และสเตปิส (Stapes) กระดูกเหล่านี้ช่วยขยายแรงของเสียงและส่งสัญญาณเสียงไปยังหูชั้นในได้อย่างมีประสิทธิภาพ

หูชั้นใน (Inner ear) หูชั้นในมีโครงสร้างที่เรียกว่า คอเคลีย (Cochlea) ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ทำหน้าที่แปลงพลังงานเสียงเป็นสัญญาณประสาท การมีขดลวดในคอเคลียทำให้เสียงสามารถถูกแปลงเป็นสัญญาณที่หลากหลาย คอเคลียมีรูปร่างเป็นเกลียวและมีน้ำอยู่ภายใน ซึ่งช่วยในการส่งผ่านเสียงอย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ยังมีโครงสร้างที่เรียกว่า เซลล์รับเสียง (Hair cells) ซึ่งทำหน้าที่รับและแปลงสัญญาณเสียงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สมองสามารถตีความได้

การพัฒนาโครงสร้างของหูในค้างคาวทำให้มันมีความสามารถในการได้ยินเสียงที่หลากหลายและสามารถแยกแยะเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โครงสร้างที่ซับซ้อนนี้เป็นสาเหตุที่ทำให้ค้างคาวสามารถรับรู้เสียงความถี่สูงได้ดีกว่าสัตว์ชนิดอื่น นอกจากนี้ การได้ยินที่แม่นยำยังช่วยให้ค้างคาวสามารถสื่อสารกับกันได้ด้วยเสียง ซึ่งมีความสำคัญต่อการสร้างกลุ่มสังคมและการป้องกันตนเองจากอันตราย

3.3.2 ความสามารถในการใช้เสียงสะท้อน (Echolocation)

ค้างคาวมีความสามารถพิเศษในการใช้เสียงสะท้อนในการนำทางและค้นหาอาหาร โดยปล่อยเสียงออกไปในลักษณะของเสียงความถี่สูง และฟังเสียงสะท้อนกลับมาเพื่อตรวจจับสิ่งของและเหยื่อรอบตัว ดังรูปที่ 3.1 เสียงที่ปล่อยออกมามักอยู่ในช่วงความถี่สูงประมาณ 20 kHz ถึง 100 kHz ซึ่งสูงกว่าที่มนุษย์สามารถได้ยินได้ (20 Hz ถึง 20 kHz)



รูปที่ 3.1 การส่งคลื่นเสียงของค้างคาวเมื่อกระทบกับเหยื่อ

หลักการของ Echolocation

ทฤษฎีเสียงสะท้อนอธิบายว่าค้างคาวปล่อยเสียงออกมาในรูปแบบคลื่นเสียงที่เดินทางผ่านอากาศ เมื่อคลื่นเสียงชนกับวัตถุ มันจะถูกสะท้อนกลับมาที่ค้างคาว โดยการวิเคราะห์เวลาที่ใช้สำหรับเสียงสะท้อนกลับมาถึงและคุณลักษณะของเสียงที่เปลี่ยนแปลงไป ค้างคาวสามารถสร้างภาพสามมิติของสิ่งรอบตัวได้

1. การวิเคราะห์เวลาที่เสียงสะท้อนกลับมา ค้างคาวจะคำนวณระยะห่างจากการวัดเวลาที่เสียงใช้ในการเดินทางไปและกลับ การประมวลผลนี้ทำให้ค้างคาวสามารถประเมินระยะทางได้อย่างแม่นยำ โดยทั่วไปแล้วเสียงที่เดินทางในอากาศจะใช้เวลาประมาณ 0.01 วินาทีต่อเมตร
2. การวิเคราะห์คุณลักษณะของเสียงสะท้อน นอกจากการวัดระยะทางแล้ว ค้างคาวยังวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงในความถี่และระดับเสียงของเสียงสะท้อนที่กลับมา (Doppler Effect) ซึ่งช่วยให้ค้างคาวสามารถระบุลักษณะของวัตถุ เช่น ขนาด รูปร่าง และวัสดุที่สร้างขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยให้ค้างคาวสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวของเหยื่อได้

การใช้เสียงสะท้อนช่วยให้ค้างคาวสามารถรับรู้ตำแหน่งและลักษณะของวัตถุในสภาพแวดล้อมที่มืด โดยการวิเคราะห์เวลาที่เสียงสะท้อนกลับมาถึงและความเปลี่ยนแปลงของความถี่ของเสียงสะท้อน ค้างคาวสามารถสร้างภาพสามมิติของสิ่งรอบตัวได้ การเปลี่ยนแปลงของความถี่เสียงที่ส่งออกไปช่วยให้ค้างคาวสามารถแยกแยะเหยื่อและวัตถุในสภาพแวดล้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เสียงสะท้อนยังแบ่งออกเป็นสองประเภทหลักคือ Frequency Modulation (FM) และ Constant Frequency (CF)

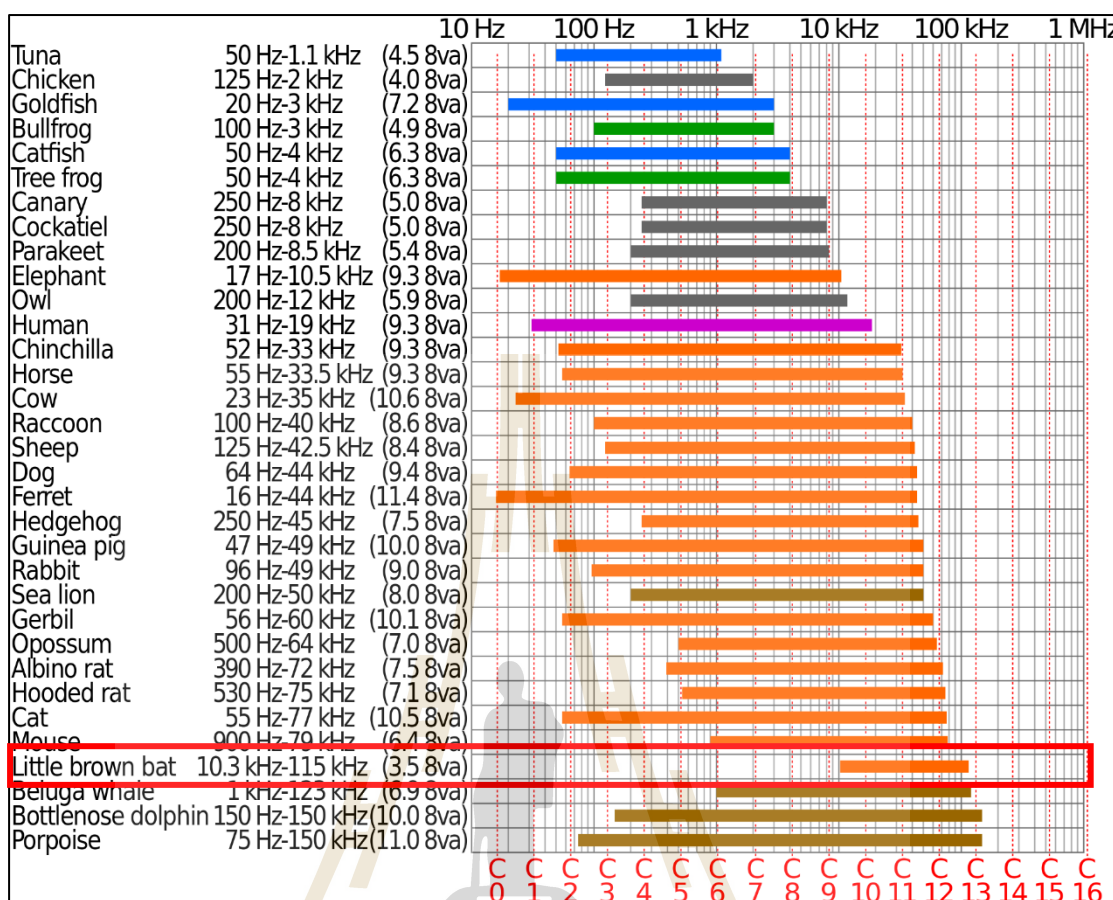
1. Frequency Modulation (FM) ค้างคาวจะปล่อยเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่ในช่วงเวลาสั้น ๆ ซึ่งช่วยในการสร้างข้อมูลที่ละเอียดเกี่ยวกับสิ่งรอบตัว โดยเสียงที่มีการเปลี่ยนแปลงความถี่จะช่วยให้ค้างคาวตรวจจับขนาด รูปร่าง และตำแหน่งของวัตถุได้ดียิ่งขึ้น โดยเฉพาะเมื่อเหยื่อเคลื่อนไหวรวดเร็ว
2. Constant Frequency (CF) ค้างคาวยังใช้เสียงที่มีความถี่คงที่เพื่อประโยชน์ในการตรวจจับระยะห่างระหว่างค้างคาวกับวัตถุ โดยเฉพาะเมื่อวัตถุอยู่ในที่นิ่งหรือเคลื่อนไหวช้า การใช้ CF ช่วยให้ค้างคาวสามารถรับรู้ระยะห่างได้อย่างแม่นยำ

การใช้ FM และ CF ทำให้ค้างคาวมีความสามารถในการแยกแยะเสียงที่ซับซ้อนในสภาพแวดล้อมที่มืด และสามารถปรับตัวตามความต้องการในการล่าเหยื่อและการนำทาง

3.3.3 ความถี่และการรับรู้ของเสียง

ค้างคาวมีพิสัยการได้ยินที่ยอดเยียม โดยเฉพาะในช่วงความถี่ 10.3 - 115 kHz ดังรูปที่ 3.2 ซึ่งช่วยให้สามารถตรวจจับเสียงสะท้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การที่ค้างคาวสามารถแยกแยะเสียงได้ดีขึ้นนั้นมาจากการใช้เสียงในช่วงความถี่ที่หลากหลาย โดยเฉพาะเสียงที่มีพลังมากในความถี่สูง การที่สามารถปรับความถี่เสียงตามสภาพแวดล้อมและประเภทของเหยื่อที่ล่า่นั้นทำให้ค้างคาวสามารถเลือกรูปแบบเสียงที่เหมาะสมได้

ค้างคาวที่ล่าแมลงจะมักใช้ FM เพื่อให้สามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวที่รวดเร็ว ในขณะที่ค้างคาวที่ล่าหนูหรือสัตว์เลื้อยลูกด้วยนมอื่น ๆ อาจเลือกใช้ CF เพื่อให้สามารถประเมินระยะห่างได้อย่างแม่นยำ ความร่วมมือระหว่างโครงสร้างหูและการใช้เสียงในความถี่ที่แตกต่างกันนี้ทำให้ค้างคาวมีความสามารถในการรับรู้และปรับตัวได้อย่างยอดเยี่ยมในสภาพแวดล้อมที่ท้าทาย



รูปที่ 3.2 พิสัยการได้ยินของค้างคาว

3.4 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการขยายสัญญาณเสียง

การขยายเสียง (Sound Amplification) เป็นกระบวนการที่สำคัญในการเพิ่มระดับความเข้มของเสียง เพื่อให้เสียงที่อ่อนแอหรือมีระดับเสียงต่ำสามารถได้ยินได้ชัดเจนมากขึ้น โดยเฉพาะในกรณีที่เสียงมาจากแหล่งที่มีระดับต่ำ เช่น เสียงจากค้างคาว ซึ่งมีความสำคัญในด้านการศึกษาและการวิจัยด้านนิเวศวิทยา การขยายเสียงทำให้ผู้ฟังสามารถรับรู้และวิเคราะห์เสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในการออกแบบระบบเสียงที่มีประสิทธิภาพ การทำให้เสียงที่อ่อนแอจากแหล่งต่าง ๆ สามารถได้ยินได้ชัดเจนเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อให้การสื่อสารหรือการฟังเพลงเป็นไปได้อย่างราบรื่น

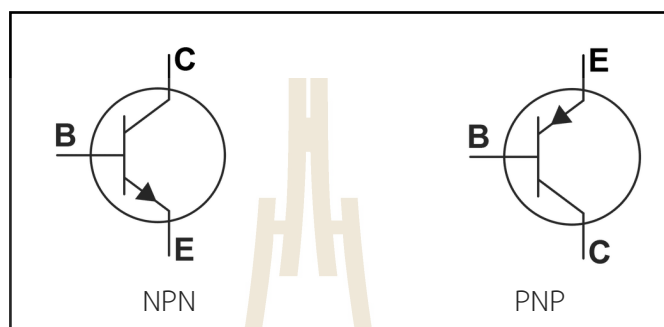
3.4.1 ทฤษฎีของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์ (Transistor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการควบคุมและขยายสัญญาณไฟฟ้า มีบทบาทสำคัญในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยเฉพาะในระบบเสียงและการสื่อสาร

Bipolar Junction Transistor (BJT)

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

BJT เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ควบคุมและขยายสัญญาณไฟฟ้า โดยมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยสามชั้นของวัสดุที่มีการนำไฟฟ้าต่างกัน แบ่งออกเป็นประเภท NPN และ PNP ดังรูปที่ 3.3 ซึ่งทำงานในลักษณะที่แตกต่างกัน



รูปที่ 3.3 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ Bipolar Junction Transistor

1. NPN ใน BJT ประเภท NPN กระแสไฟฟ้าจะไหลจากคอลเลคเตอร์ (C) ไปยังอีมิเตอร์ (E) เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าจากเบส (B) ส่งผลให้เกิดสนามไฟฟ้าที่ช่วยให้กระแสไหลไปได้ ในกรณีนี้กระแสที่ไหลผ่านจะมีความสามารถในการขยายสัญญาณได้ดี
2. PNP ใน BJT ประเภท PNP จะทำงานในลักษณะตรงกันข้าม โดยกระแสจะไหลจากอีมิเตอร์ (E) ไปยังคอลเลคเตอร์ (C) เมื่อมีแรงดันไฟฟ้าที่เบส (B) ส่งผลให้สนามไฟฟ้าที่สร้างขึ้นจะควบคุมการไหลของกระแสได้เช่นเดียวกัน

การควบคุมกระแสใน BJT จะมีอัตราขยาย (Beta) ซึ่งแสดงถึงอัตราส่วนของกระแสที่ไหลจากคอลเลคเตอร์ไปยังเบส โดยทั่วไปจะมีค่าอยู่ระหว่าง 20 ถึง 1000 ขึ้นอยู่กับประเภทของทรานซิสเตอร์และการออกแบบ BJT มักใช้ในวงจรขยายเสียงที่ต้องการประสิทธิภาพสูง แต่จะมีข้อเสียในการใช้พลังงานที่สูงกว่าทรานซิสเตอร์ประเภทอื่น ๆ ทำให้เกิดความร้อนมากขึ้น

Field Effect Transistor (FET)

ทฤษฎีและหลักการทำงาน

FET เป็นทรานซิสเตอร์ที่ควบคุมการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านสนามไฟฟ้า ซึ่งแบ่งออกเป็นหลายประเภท โดยจะควบคุมการทำงานผ่านการประยুক্তิใช้แรงดันที่เกต (Gate) ซึ่งช่วยใน

การควบคุมการไหลของกระแสจากแหล่ง (Source) ไปยังท่อ (Drain) FET มีข้อดีในการใช้พลังงานต่ำ และสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้

ประเภทของ FET

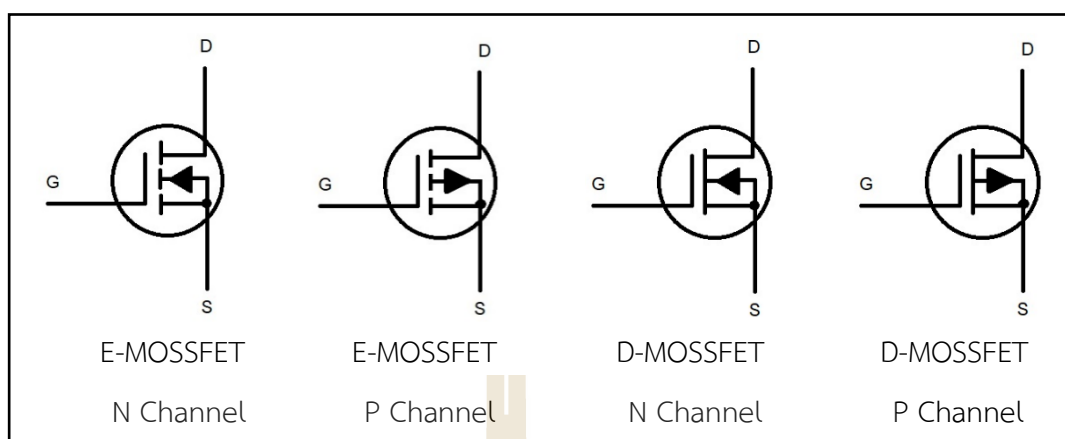
1. Junction FET (JFET) ประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำที่มีการสร้างช่องทางนำไฟฟ้า และมีจุดเชื่อมระหว่าง N-type และ P-type ทำงานโดยใช้สนามไฟฟ้าที่สร้างจากแรงดันที่เกต ซึ่งจะควบคุมการไหลของกระแสในช่องทางนำไฟฟ้า โดยเมื่อมีการประยุกต์ใช้แรงดันที่เกต จะมีการปรับขนาดของช่องทางนำไฟฟ้า ทำให้กระแสที่ไหลผ่านลดลงหรือลดความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ JFET เป็นที่นิยมในวงจรที่ต้องการคุณภาพเสียงสูงและการใช้พลังงานต่ำ โดยมีสัญลักษณ์ดังรูป

3.4



รูปที่ 3.4 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ Junction FET

2. Metal-Oxide-Semiconductor FET (MOSFET) มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นฉนวนระหว่างเกตกับช่องทางนำไฟฟ้า ทำให้สามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องใช้กระแสที่เกต ใช้หลักการควบคุมสนามไฟฟ้าเพื่อเปิดและปิดการไหลของกระแส โดยเมื่อมีแรงดันที่เกตเกิดขึ้น จะสร้างสนามไฟฟ้าที่ทำให้เกิดช่องทางนำไฟฟ้า ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีสัญลักษณ์ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 สัญลักษณ์ของทรานซิสเตอร์ Metal-Oxide-Semiconductor FET

1. Enhancement-mode MOSFET จะทำงานเมื่อมีแรงดันที่เกทเพิ่มขึ้น และจะไม่มีกระแสไหลของกระแสไฟฟ้าในสถานะปกติ
2. Depletion-mode MOSFET จะทำงานในสถานะที่มีการไหลของกระแสอยู่แล้ว และการประยุกต์ใช้แรงดันที่เกทจะช่วยลดกระแสที่ไหลผ่าน

3.4.2 ประเภทของวงจรขยายเสียง

การขยายเสียงสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท โดยแต่ละประเภทมีลักษณะและการทำงานที่แตกต่างกัน

การขยายเสียงแบบอนาล็อก

การขยายเสียงแบบอนาล็อกจะทำงานกับสัญญาณเสียงที่มีลักษณะต่อเนื่อง โดยสามารถรักษาคุณภาพเสียงให้มีความเป็นธรรมชาติและมีความละเอียดสูง การใช้งานทั่วไปของวงจรขยายเสียงแบบอนาล็อกมักพบในเครื่องเสียงที่ต้องการคุณภาพเสียงสูง เช่น เครื่องเสียงสเตอริโอหรือแอมพลิฟายเออร์สำหรับดนตรี

การขยายเสียงแบบดิจิทัล

การขยายเสียงแบบดิจิทัลจะใช้สัญญาณเสียงที่ถูกแปลงเป็นรูปแบบดิจิทัลแล้วทำการขยาย การขยายเสียงประเภทนี้มีการควบคุมที่ซับซ้อนกว่าและสามารถปรับแต่งเสียงได้อย่างมีประสิทธิภาพ มักใช้ในอุปกรณ์เสียงสมัยใหม่ เช่น คอมพิวเตอร์และลำโพงที่รองรับระบบดิจิทัล

ประเภท Class Amplifier

1. Class A วงจรขยายเสียง Class A มีการทำงานโดยใช้ทรานซิสเตอร์ที่เปิดตลอดเวลา ทำให้มีคุณภาพเสียงดีที่สุด แต่มีประสิทธิภาพในการใช้พลังงานต่ำ (ประมาณ 20 - 30%) ทำให้เกิดความร้อนสูงและจำเป็นต้องใช้ระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ
2. Class B วงจร Class B จะใช้ทรานซิสเตอร์สองตัวในการทำงานโดยแต่ละตัวจะทำงานในครึ่งวงจร โดยมีการประหยัดพลังงานที่สูงกว่าประเภท Class A แต่จะมีการบิดเบือนเสียงเล็กน้อยที่จุดตัด (crossover distortion)
3. Class AB เป็นการรวมกันระหว่าง Class A และ Class B โดยมีลักษณะการทำงานที่ช่วยลดการบิดเบือนเสียงในขณะที่ยังคงให้ประสิทธิภาพในการใช้พลังงานสูงขึ้น ทำให้มีคุณภาพเสียงที่ดีมากและเหมาะสำหรับการใช้งานทั่วไป
4. Class D ใช้เทคโนโลยีการสวิตชิ่งในการขยายเสียง ทำให้มีประสิทธิภาพสูง (มากกว่า 80% ถึง 95%) และมีการใช้พลังงานน้อย เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการกำลังขับสูง เช่น เครื่องเสียงพกพาหรือเครื่องเสียงในรถยนต์

3.4.3 การคำนวณการขยายเสียง

การคำนวณการขยายเสียงเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบวงจร โดยใช้สมการ

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.4)$$

เมื่อ G คือ อัตราการขยายเสียง

V_{out} คือ แรงดันไฟฟ้าที่ออกจากวงจร มีหน่วยเป็น โวลต์

V_{in} คือ แรงดันไฟฟ้าที่เข้าสู่วงจร มีหน่วยเป็น โวลต์

การกำหนดค่า G เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากจะช่วยให้สามารถออกแบบวงจรที่มีประสิทธิภาพตรงตามความต้องการเสียงที่ต้องการได้ หากค่าการขยายเสียงต่ำเกินไป อาจส่งผลให้เสียงที่ออกมามีระดับเสียงต่ำเกินไป หรือไม่เพียงพอต่อการใช้งาน

3.5 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับออปแอมป์

ออปแอมป์ (Operational Amplifier) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบมาเพื่อขยายสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปออปแอมป์จะอยู่ในรูปแบบของวงจรรวม (Integrated Circuit - IC) ที่มีความสามารถในการประมวลผลสัญญาณในหลายรูปแบบ ออปแอมป์ถือเป็นส่วนประกอบพื้นฐานในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อน และใช้ในหลากหลายการใช้งาน เช่น วงจรขยายเสียง วงจรสร้างสัญญาณ วงจรกรองสัญญาณ และวงจรเปรียบเทียบ

3.5.1 โครงสร้างของออปแอมป์

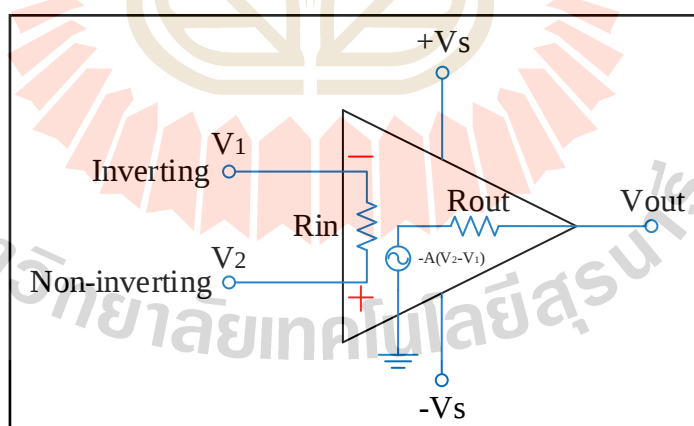
ออปแอมป์ประกอบด้วยขาเข้า (Input) สองขา ได้แก่

Inverting Input (-) ขานี้ใช้สำหรับสัญญาณที่ต้องการการขยายสัญญาณในลักษณะผกผัน (Inverted)

Non-inverting Input (+) ขานี้ใช้สำหรับสัญญาณที่ไม่ต้องการการผกผัน

นอกจากนี้ยังมีขาออก (Output) ที่จะให้สัญญาณที่ขยายแล้ว และขาแรงดันไฟฟ้าจ่าย (Power Supply) ที่จำเป็นต่อการทำงานของออปแอมป์

3.5.2 ออปแอมป์ในอุดมคติ (Ideal Operational Amplifier)



รูปที่ 3.6 โครงสร้างออปแอมป์ในอุดมคติ

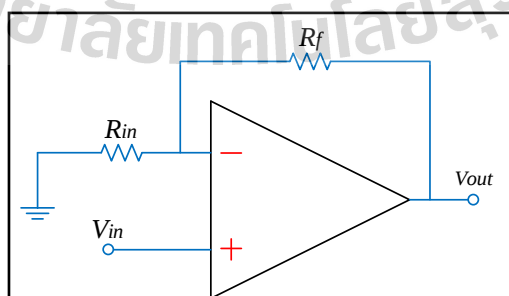
ออปแอมป์ในอุดมคติคือออปแอมป์ที่มีคุณสมบัติที่สมบูรณ์แบบดังรูปที่ 3.6 ในทางทฤษฎี โดยมีลักษณะสำคัญดังนี้

1. อัตราการขยายที่ไม่จำกัด ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีอัตราการขยาย (Gain) ที่ไม่มีขีดจำกัด ซึ่งหมายความว่าสามารถขยายสัญญาณได้อย่างมากโดยไม่มีการบิดเบือน
2. ความต้านทานขาเข้าไม่จำกัด ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีความต้านทานที่ขาเข้า (Input Resistance) ที่ไม่มีขีดจำกัด ซึ่งช่วยลดการโหลดของกระแสจากแหล่งสัญญาณเข้าไปยังออปแอมป์ ทำให้สัญญาณที่เข้ามาไม่ถูกบิดเบือน
3. ความต้านทานขาออกเป็นศูนย์ ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีความต้านทานที่ขาออก (Output Resistance) เท่ากับศูนย์ ซึ่งหมายความว่าสามารถส่งสัญญาณได้อย่างเต็มที่โดยไม่สูญเสียพลังงาน
4. ความเร็วในการตอบสนองไม่จำกัด ออปแอมป์ในอุดมคติจะมีความเร็วในการตอบสนองที่ไม่มีขีดจำกัด ทำให้สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณได้อย่างรวดเร็ว
5. ไม่มีสัญญาณรบกวนภายใน ออปแอมป์ในอุดมคติจะไม่มีสัญญาณรบกวนภายใน ทำให้สามารถสร้างสัญญาณที่บริสุทธิ์โดยไม่มีการบิดเบือน

3.5.3 การขยายสัญญาณ

ออปแอมป์ทำหน้าที่ขยายสัญญาณโดยการเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามาที่ขา Inverting และ Non-inverting และสร้างสัญญาณขาออกที่มีระดับแรงดันที่สูงขึ้น สมการที่ใช้อธิบายการทำงานของการทำงานของการขยายสัญญาณ ได้แก่

วงจรขยายสัญญาณ Non-inverting Amplifier



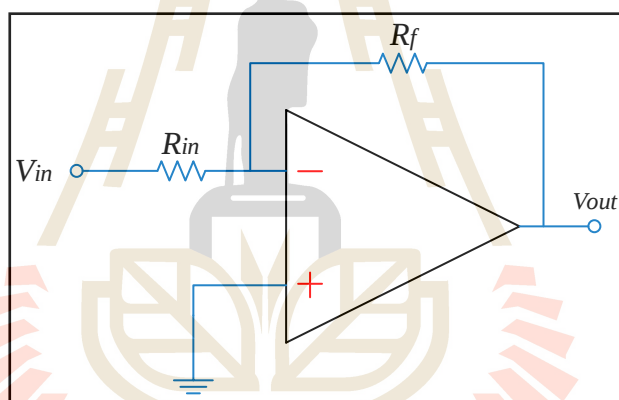
รูปที่ 3.7 วงจรขยายสัญญาณ Non-inverting Amplifier

เมื่อมีสัญญาณเข้าที่ขา Non-inverting (+) สูงกว่าสัญญาณที่ขา Inverting (-) ออปแอมป์จะสร้างสัญญาณที่ขาออกสูงขึ้น ซึ่งจะมีทิศทางตรงกับสัญญาณที่ขา Non-inverting โดยมีแรงดันที่ขาออกดังสมการที่ 3.5

$$V_{out} = (1 + \frac{R_f}{R_{in}})V_{in} \quad (3.5)$$

เมื่อ R_f คือ ความต้านทานย้อนกลับ มีหน่วยเป็น โอห์ม
 R_{in} คือ ความต้านทานที่ขาเข้า มีหน่วยเป็น โอห์ม

วงจรขยายสัญญาณ Inverting Amplifier



รูปที่ 3.8 วงจรขยายสัญญาณ Inverting Amplifier

เมื่อมีสัญญาณเข้าที่ขา Inverting (-) สูงกว่าสัญญาณที่ขา Non-inverting (+) ออปแอมป์จะสร้างสัญญาณที่ขาออกสูงขึ้น ซึ่งจะมีทิศทางผกผัน (Inverted) กับสัญญาณที่ขา Inverting โดยมีแรงดันที่ขาออกดังสมการที่ 3.6

$$V_{out} = -\frac{R_f}{R_{in}}V_{in} \quad (3.6)$$

3.5.4 การใช้งานของออปแอมป์ในวงจร

วงจรขยายเสียงและวงจรสร้างสัญญาณรบกวน

ออปแอมป์ถูกนำมาใช้ในหลายประเภทของวงจร โดยเฉพาะในวงจรที่เกี่ยวข้องกับการขยายเสียงและการประมวลผลสัญญาณ เช่น

1. วงจรขยายเสียง ใช้ในการขยายสัญญาณเสียงที่อ่อนแอให้มีระดับที่สูงขึ้นเพื่อส่งต่อไปยังลำโพงหรือตัวขยายเสียง
2. วงจรสร้างสัญญาณรบกวน นอกจากการขยายสัญญาณที่มีคุณภาพแล้ว ออปแอมป์ยังสามารถใช้ในการสร้างและขยายสัญญาณรบกวนภายในวงจรได้ เช่น การสร้างสัญญาณรบกวนแบบสุ่ม (Random Noise) หรือการสร้างสัญญาณรบกวนที่มาจากการรบกวนทางไฟฟ้าภายนอก เช่น คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าหรือสัญญาณที่มีความถี่ต่างกัน ซึ่งการสร้างสัญญาณรบกวนเหล่านี้มีความสำคัญในการทดสอบระบบที่ต้องการความทนทานต่อสัญญาณรบกวน ออปแอมป์จึงสามารถใช้ในวงจรที่ต้องการการจำลองสภาพแวดล้อมที่มีสัญญาณรบกวนสูงเพื่อดูว่าวงจรจะทำงานได้ดีเพียงใดเมื่อเจอสัญญาณรบกวน

วงจรกรองสัญญาณ

ออปแอมป์สามารถนำมาใช้ในการสร้างวงจรกรองสัญญาณ (Filter Circuit) ซึ่งช่วยลดสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการออกไป และยังคงรักษาคุณภาพของสัญญาณหลัก เช่น การใช้วงจรกรองแบบ Low-pass, High-pass, หรือ Band-pass เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงหรือความถี่ต่ำเกินไป

วงจรเปรียบเทียบ

ใช้ในการเปรียบเทียบระดับแรงดันของสัญญาณขาเข้าเพื่อสร้างสัญญาณที่เปิดหรือปิดตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ เช่น ในวงจรควบคุมอัตโนมัติ ออปแอมป์สามารถใช้เป็นวงจรควบคุมที่ตรวจจกระดับแรงดันไฟฟ้าและเปิดหรือปิดอุปกรณ์ตามความต้องการ

ออปแอมป์เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญในการขยายสัญญาณและการประมวลผลสัญญาณในระบบอิเล็กทรอนิกส์ มีการทำงานที่สามารถขยายสัญญาณไฟฟ้าได้อย่างมีประสิทธิภาพและยังสามารถสร้างสัญญาณรบกวนได้ในขณะเดียวกัน ซึ่งต้องพิจารณาอย่างรอบคอบในการออกแบบวงจรเพื่อให้มั่นใจว่าสัญญาณที่ได้มีคุณภาพสูงสุด ออปแอมป์จึงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบเสียงและการสื่อสาร เพื่อให้การขยายสัญญาณมีคุณภาพและสามารถใช้งานได้มีประสิทธิภาพ

3.6 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับวงจรแมทชิงอิมพีแดนซ์

การจับคู่ความต้านทาน (Impedance Matching) เป็นหนึ่งในหัวใจสำคัญของการออกแบบวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณในระบบต่าง ๆ โดยเฉพาะในวงจรที่เกี่ยวข้องกับการส่งผ่านพลังงานหรือข้อมูล เช่น ระบบเสียง ระบบการสื่อสาร หรือระบบการขยายสัญญาณ การจับคู่ความต้านทานเป็นการปรับค่าความต้านทานของแหล่งกำเนิดสัญญาณและโหลดให้มีค่าใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้การส่งสัญญาณเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และลดการสูญเสียพลังงานในกระบวนการส่งสัญญาณ

3.6.1 ความหมายของ Impedance Matching

Impedance Matching คือกระบวนการที่ทำให้ความต้านทานของแหล่งจ่าย (Source Impedance) และความต้านทานของโหลด (Load Impedance) มีค่าเท่ากันหรือใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการส่งผ่านพลังงานหรือสัญญาณจากแหล่งกำเนิดไปยังโหลดได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ หากความต้านทานของแหล่งจ่ายและโหลดไม่ตรงกัน จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ (Signal Reflection) ซึ่งเป็นสาเหตุของการสูญเสียพลังงานและคุณภาพสัญญาณ

3.6.2 หลักการของ Impedance Matching

หลักการของการจับคู่ความต้านทานนั้นเกี่ยวข้องกับกฎของการส่งพลังงานสูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem) โดยกฎนี้ระบุว่า เมื่อความต้านทานของแหล่งจ่าย Z_{source} มีค่าเท่ากับความต้านทานของโหลด Z_{load} จะทำให้พลังงานที่ถูกส่งไปยังโหลดมีค่ามากที่สุด

กฎการส่งผ่านพลังงานสูงสุด (Maximum Power Transfer Theorem)

$$Z_{source} = Z_{load} \quad (3.7)$$

เมื่อ Z_{source} คือ ความต้านทานของแหล่งจ่าย มีหน่วยเป็น โอห์ม

Z_{load} คือ ความต้านทานของโหลด มีหน่วยเป็น โอห์ม

การจับคู่ความต้านทานนี้มีความสำคัญในหลายด้าน ไม่ว่าจะเป็นการออกแบบวงจร RF (Radio Frequency), การส่งสัญญาณเสียงในระบบลำโพง หรือการส่งผ่านสัญญาณในสายส่งต่าง ๆ เช่น สายโคแอกเชียล (Coaxial Cable) หรือสายโทรศัพท์

3.6.3 ประเภทของ Impedance Matching

การจับคู่ความต้านทานสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภทหลัก

1. Resistive Matching

เป็นการจับคู่ความต้านทานแบบอิมพีแดนซ์เชิงต้านทานล้วน (Purely Resistive Matching) ซึ่งหมายถึงการจับคู่ความต้านทานในวงจรที่เกี่ยวข้องกับตัวต้านทานเท่านั้น เช่น วงจรไฟฟ้ากระแสตรง (DC Circuit) หรือวงจรที่ไม่มีองค์ประกอบเชิงซ้อนอย่างตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) หรือตัวเก็บประจุ (Capacitor)

2. Complex Impedance Matching

เป็นการจับคู่ความต้านทานที่มีการเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบเชิงซ้อน เช่น ตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุ ซึ่งมีทั้งส่วนที่เป็นความต้านทานจริง (Resistive) และส่วนที่เป็นอิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Reactive) เช่น วงจรไฟฟ้ากระแสสลับ (AC Circuit) โดยในกรณีนี้ เราต้องคำนึงถึงเฟสของสัญญาณเพื่อให้การจับคู่มีประสิทธิภาพสูงสุด

3.6.4 อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Capacitor) และตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ (Capacitor)

ตัวเก็บประจุ (Capacitor) มีคุณสมบัติในการเก็บประจุไฟฟ้าและปล่อยประจุเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันไฟฟ้าในวงจร โดยอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะมีค่าเชิงซ้อนและสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในวงจร อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ Z_C สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.8)$$

เมื่อ	Z_C	คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น โอห์ม
	j	คือ หน่วยเชิงจินตภาพ ซึ่งบ่งชี้ว่าค่าของอิมพีแดนซ์เป็นเชิงซ้อน
	ω	คือ ความถี่เชิงมุมของสัญญาณไฟฟ้า มีหน่วยเป็น เรเดียนต่อวินาที
	C	คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุ มีหน่วยเป็น ฟารัด

โดยสามารถหาค่าความถี่เชิงมุมของสัญญาณไฟฟ้า (ω) ได้จาก

$$\omega = 2\pi f \quad (3.9)$$

เมื่อ f คือ ความถี่ มีหน่วยเป็น เฮิรตซ์

จากสมการที่ 3.8 จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะลดลงเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่าที่ความถี่สูง ตัวเก็บประจุจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำ และยอมให้สัญญาณไฟฟ้าไหลผ่านได้มากขึ้น ส่วนที่ความถี่ต่ำ อิมพีแดนซ์ของตัวเก็บประจุจะสูง ทำให้มีการต้านทานสัญญาณมากขึ้น

อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ (Inductor)

ตัวเหนี่ยวนำ (Inductor) มีคุณสมบัติในการเก็บพลังงานในรูปของสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไหลผ่าน โดยอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ Z_L ก็มีค่าเชิงซ้อนเช่นกัน และสัมพันธ์กับความถี่ของสัญญาณที่ใช้ในวงจร อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$Z_L = j\omega L \quad (3.10)$$

เมื่อ Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น โอห์ม

L คือ ค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำ มีหน่วยเป็น เฮนรี

จากสมการ 3.10 จะเห็นว่าอิมพีแดนซ์ของตัวเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่อความถี่เพิ่มขึ้น ซึ่งหมายความว่า ที่ความถี่ต่ำ ตัวเหนี่ยวนำจะมีอิมพีแดนซ์ต่ำและยอมให้กระแสไหลผ่านได้ง่าย แต่ที่ความถี่สูง อิมพีแดนซ์จะเพิ่มขึ้นและทำให้มีการต้านทานต่อกระแสสูง

การใช้งานของอิมพีแดนซ์ของ C และ L ในวงจร Impedance Matching

ในการออกแบบวงจรที่ต้องการจับคู่ความต้านทาน (Impedance Matching) ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำมักถูกนำมาใช้ร่วมกันในวงจรที่เรียกว่า Matching Networks เพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายให้เข้ากับอิมพีแดนซ์ของโหลดได้อย่างเหมาะสม

ตัวเก็บประจุ จะถูกใช้เพื่อลดอิมพีแดนซ์ที่ความถี่สูง ในขณะที่ ตัวเหนี่ยวนำ จะถูกใช้เพื่อเพิ่มอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ต่ำ ดังนั้น การเลือกค่าของ C และ L ที่เหมาะสมในวงจร Matching

Network จะช่วยให้สามารถปรับค่าอิมพีแดนซ์ได้อย่างแม่นยำ เพื่อให้แหล่งจ่ายและโหลดสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

3.6.5 การคำนวณและการวิเคราะห์ Impedance Matching

เพื่อให้การจับคู่ความต้านทานมีประสิทธิภาพ เราจำเป็นต้องทำการคำนวณอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายและโหลดโดยใช้สมการที่เหมาะสม การคำนวณอิมพีแดนซ์ในวงจรไฟฟ้าสลับ (AC Circuit) ที่ประกอบด้วยตัวต้านทาน ตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ สามารถทำได้โดยใช้สมการ

$$Z = R + jX \quad (3.11)$$

เมื่อ Z	คือ อิมพีแดนซ์รวมของวงจร มีหน่วยเป็น โอห์ม
R	คือ ความต้านทาน (Resistance) มีหน่วยเป็น โอห์ม
X	คือ อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน (Reactance) ที่อาจเป็นความเหนี่ยวนำ (Inductive Reactance) หรือความเก็บประจุ (Capacitive Reactance)

ในกรณีที่มีการใช้อิมพีแดนซ์เชิงซ้อน เราต้องพิจารณาเฟสของสัญญาณ ซึ่งจะช่วยให้การจับคู่ความต้านทานนั้นสามารถส่งพลังงานได้เต็มประสิทธิภาพ

3.6.6 การใช้งาน Impedance Matching ในการออกแบบวงจร

Impedance Matching เป็นสิ่งสำคัญในการออกแบบวงจรต่าง ๆ เช่น วงจรขยายเสียง (Audio Amplifier Circuit)

ในระบบเครื่องเสียง การจับคู่ความต้านทานระหว่างเครื่องขยายเสียง (Amplifier) และลำโพงมีความสำคัญอย่างยิ่ง เพื่อให้เสียงที่ได้ออกมามีคุณภาพและพลังงานที่สมบูรณ์ หากมีการจับคู่ความต้านทานที่ไม่ดี เสียงที่ได้อาจมีความเพี้ยนและสูญเสียพลังงานไป

วงจรสื่อสาร RF (Radio Frequency Circuit)

ในระบบการสื่อสารที่ใช้คลื่นความถี่สูง การจับคู่ความต้านทานระหว่างแหล่งกำเนิดสัญญาณกับสายส่งหรือสายอากาศเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อป้องกันการสะท้อนกลับของสัญญาณซึ่งอาจทำให้สัญญาณสูญหายหรือคุณภาพลดลง

วงจรไมโครเวฟและแสง (Microwave and Optical Circuits)

ในการส่งผ่านสัญญาณด้วยคลื่นความถี่สูงมาก เช่น ไมโครเวฟ หรือในระบบแสง การจับคู่ความต้านทานเป็นปัจจัยสำคัญในการป้องกันการสูญเสียพลังงานที่ไม่จำเป็น

3.6.7 อุปกรณ์ที่ใช้ในการจับคู่ความต้านทาน

ในการจับคู่ความต้านทาน มีอุปกรณ์หลายประเภทที่สามารถช่วยในกระบวนการนี้ได้ เช่น

Transformers

หม้อแปลง (Transformer) ใช้ในการเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสมกับแหล่งจ่ายและโหลด โดยการเลือกอัตราส่วนของขดลวดที่เหมาะสม

Matching Networks

วงจร Matching Network เป็นวงจรที่ใช้ตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำในการปรับเปลี่ยนค่าอิมพีแดนซ์เพื่อให้แหล่งจ่ายและโหลดสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.6.8 ผลกระทบจากการไม่จับคู่ความต้านทาน

หากมีการจับคู่ความต้านทานที่ไม่ดี จะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ (Reflection) ซึ่งทำให้พลังงานบางส่วนไม่สามารถส่งผ่านไปยังโหลดได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เกิดผลกระทบดังนี้

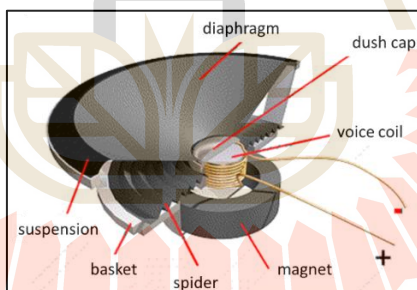
1. การสูญเสียพลังงาน พลังงานบางส่วนจะสูญหายหรือถูกสะท้อนกลับไปยังแหล่งกำเนิด ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ควรจะไปถึงโหลด
2. การบิดเบือนของสัญญาณ การสะท้อนของสัญญาณอาจทำให้สัญญาณที่ส่งผ่านไปมีการบิดเบือน หรือไม่สามารถรักษาคุณภาพที่ดีพอสำหรับการใช้งาน
3. ความเสียหายต่ออุปกรณ์ ในบางกรณี การสะท้อนกลับของสัญญาณอาจทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้นในอุปกรณ์ และส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์

การ Impedance Matching เป็นหลักการสำคัญในการออกแบบและพัฒนางจรอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับการส่งสัญญาณหรือพลังงาน โดยการจับคู่ความต้านทานที่เหมาะสมจะช่วยให้การส่งผ่านสัญญาณหรือพลังงานเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพที่สุด ลดการสูญเสียพลังงาน และการสะท้อนของสัญญาณ และรักษาคุณภาพของสัญญาณ

3.7 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับลำโพงและไมโครโฟนขนาดเล็ก

ลำโพง (Loudspeaker) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง เพื่อให้มนุษย์ได้ยิน โดยปกติลำโพงจะทำงานโดยรับสัญญาณไฟฟ้าจากเครื่องขยายเสียง (Amplifier) แล้วแปลงสัญญาณนั้นให้กลายเป็นเสียงผ่านการสั่นสะเทือนของไดอะแฟรม (Diaphragm) หรือกรวยลำโพง (Speaker Cone) ลำโพงมีหลายประเภทและรูปแบบที่ออกแบบมาให้สามารถตอบสนองต่อความถี่และระดับเสียงต่าง ๆ ตามการใช้งานที่แตกต่างกันไป

3.7.1 องค์ประกอบหลักของลำโพง



รูปที่ 3.9 องค์ประกอบหลักของลำโพง
(ที่มา : <https://www.sounddd.shop/parts-of-speaker>)

ลำโพงมีองค์ประกอบหลักหลายอย่างที่ทำางานร่วมกันเพื่อสร้างเสียงที่มีคุณภาพสูง ดังรูปที่ 3.9

1. Diaphragm (ไดอะแฟรม) เป็นส่วนที่สั่นเพื่อสร้างเสียง โดยการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมจะเกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไปในขดลวด (Voice Coil) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ไดอะแฟรมขยับออกและเข้า ทำให้เกิดการอัดและขยายคลื่นเสียงในอากาศ

2. Dust Cap (ฝาปิดฝุ่น) ฝาครอบเล็ก ๆ ที่ติดอยู่บนไดอะแฟรม ทำหน้าที่ป้องกันฝุ่นและสิ่งสกปรกไม่ให้เข้าไปภายในขดลวดเสียง (Voice Coil) หรือเข้าสู่กลไกภายในของลำโพง
3. Voice Coil (ขดลวดเสียง) ขดลวดที่ทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานกลโดยการสร้างสนามแม่เหล็ก เมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านขดลวด จะทำให้ขดลวดเคลื่อนที่ไปมาในสนามแม่เหล็ก ทำให้ไดอะแฟรมสั่นและผลิตเสียง
4. Suspension (ช่วงล่าง) ชิ้นส่วนยึดหยุ่นที่ทำหน้าที่ควบคุมการเคลื่อนไหวของไดอะแฟรม ช่วยให้ไดอะแฟรมกลับไปยังตำแหน่งเดิมหลังจากเคลื่อนที่ ช่วงล่างนี้ยังช่วยให้ไดอะแฟรมเคลื่อนไหวในแนวตรงได้ด้วยความแม่นยำ
5. Basket (ตะกร้าหรือโครงสร้าง) โครงสร้างที่รองรับส่วนประกอบทั้งหมดของลำโพง เป็นตัวฐานที่ยึดส่วนต่าง ๆ ไว้ด้วยกันเพื่อความแข็งแรงและความมั่นคง
6. Spider (สไปเดอร์) ส่วนที่ยึดหยุ่นอยู่ตรงกลางระหว่างขดลวดและไดอะแฟรม ช่วยในการควบคุมการเคลื่อนไหวของขดลวดให้อยู่ในแนวที่ถูกต้องและทำให้ขดลวดกลับไปยังตำแหน่งเริ่มต้นเมื่อหยุดการเคลื่อนไหว
7. Magnet (แม่เหล็ก) แม่เหล็กที่สร้างสนามแม่เหล็กถาวร เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านขดลวดเสียง สนามแม่เหล็กนี้จะทำปฏิกิริยากับขดลวด ทำให้ขดลวดเคลื่อนที่และส่งผลให้ไดอะแฟรมสั่นผลิตเสียง

องค์ประกอบเหล่านี้ทำงานร่วมกันในการสร้างคลื่นเสียงเมื่อมีกระแสไฟฟ้าผ่านลำโพง โดยการเคลื่อนที่ของไดอะแฟรมทำให้เกิดการอัดและขยายของอากาศ ทำให้เกิดเสียงที่เราได้ยิน

3.7.2 ประเภทของลำโพง

ลำโพงสามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภทตามการใช้งานและความสามารถในการตอบสนองต่อความถี่เสียงที่แตกต่างกัน

1. ลำโพงซับวูฟเฟอร์ (Subwoofer) ลำโพงประเภทนี้ถูกออกแบบมาเพื่อสร้างเสียงในช่วงความถี่ต่ำ (ต่ำกว่า 200 Hz) โดยเฉพาะเสียงเบสที่หนักแน่น ลำโพงซับวูฟเฟอร์มักถูกใช้ในการสร้างบรรยากาศเสียงที่สมจริงในโรงภาพยนตร์หรือระบบโฮมเธียเตอร์

2. ลำโพงมิดเรนจ์ (Mid-Range Speaker): ออกแบบมาเพื่อถ่ายทอดเสียงในช่วงกลาง (200 Hz ถึง 2,000 Hz) ซึ่งเป็นย่านเสียงที่ครอบคลุมเสียงพูดและเสียงดนตรีส่วนใหญ่
3. ลำโพงฟูลเรนจ์ (Full-Range Speaker): เป็นลำโพงที่สามารถถ่ายทอดเสียงได้ทุกช่วงความถี่ ตั้งแต่เสียงเบสต่ำไปจนถึงเสียงแหลมสูง (40 Hz ถึง 20,000 Hz) ลำโพงชนิดนี้มักถูกใช้ในระบบเสียงทั่วไปและเหมาะสำหรับการฟังเพลงหรือภาพยนตร์ที่ต้องการความครบถ้วนของย่านเสียง
4. ลำโพงทวิตเตอร์ (Tweeter): ออกแบบมาเพื่อสร้างเสียงในช่วงความถี่สูง (มากกว่า 2,000 Hz) ซึ่งเป็นเสียงแหลมที่มีความละเอียดและคมชัด โดยทวิตเตอร์ที่ดีจะต้องสามารถถ่ายทอดเสียงในช่วงความถี่สูงได้โดยไม่บิดเบือน ทวิตเตอร์มีหลายรูปแบบ เช่น โดมทวิตเตอร์ (Dome Tweeter) และ ริปบอนทวิตเตอร์ (Ribbon Tweeter)
5. ลำโพงซูเปอร์ทวิตเตอร์ (Super Tweeter): ลำโพงซูเปอร์ทวิตเตอร์ออกแบบมาเพื่อเพิ่มความละเอียดของเสียงในช่วงความถี่สูงพิเศษ (สูงกว่า 10,000 Hz) และสามารถถ่ายทอดเสียงได้ถึงความถี่สูงสุดประมาณ 100,000 Hz ลำโพงชนิดนี้เหมาะสำหรับระบบเสียงที่ต้องการรายละเอียดเสียงในระดับสูงมาก โดยเฉพาะในระบบเสียงไฮเอนด์ที่ต้องการความชัดเจนของเสียงแหลม

โดยสามารถนำมาเขียนเป็นตารางเปรียบเทียบได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 3.2 ตารางเปรียบเทียบแต่ละประเภทของลำโพงตามช่วงความถี่และลักษณะเด่น

ประเภทลำโพง	ช่วงความถี่ (Hz)	ลักษณะเด่น
ลำโพงซับวูฟเฟอร์ (Subwoofer)	< 200	ให้เสียงเบสต่ำที่หนักแน่น เช่นเสียงกลองและเสียงเบส
ลำโพงมิดเรนจ์ (Mid-Range Speaker)	200 - 2,000	ให้เสียงชัดเจนในช่วงกลาง เช่นเสียงพูดและดนตรี
ลำโพงฟูลเรนจ์ (Full-Range Speaker)	40 - 20,000	ครอบคลุมทั้งเสียงเบสและเสียงแหลม
ลำโพงทวิตเตอร์ (Tweeter)	> 2,000	ให้เสียงที่คมชัดในช่วงความถี่สูง เช่นเสียงเครื่องดนตรีแหลม
ลำโพงซูเปอร์ทวิตเตอร์ (Super Tweeter)	> 10,000 - 100,000	ให้ความละเอียดสูงสุดในเสียงความถี่สูง เช่นระบบเสียงไฮเอนด์

3.7.3 การใช้ลำโพงความถี่สูงในการวิจัยเสียง Ultrasonic

ลำโพงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในการแปลงสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณเสียงโดยทั่วไป ลำโพงมาตรฐานสามารถถ่ายทอดสัญญาณเสียงในช่วงความถี่ที่มนุษย์ได้ยินได้ (ประมาณ 20 Hz ถึง 20 kHz) อย่างไรก็ตาม ในบางการใช้งานทางเทคโนโลยีและงานวิจัย จำเป็นต้องสร้างเสียงที่มีความถี่สูงกว่า 20 kHz ซึ่งเป็นช่วงที่มนุษย์ไม่สามารถได้ยินได้ แต่สัตว์บางชนิด เช่น ค้างคาว หนู หรือแมว สามารถได้ยิน การสร้างเสียงในช่วงความถี่นี้ต้องการลำโพงที่ออกแบบมาเฉพาะเพื่อการถ่ายทอดเสียงความถี่สูง ซึ่งเรียกว่า ลำโพงความถี่สูง (High-Frequency Speaker หรือ Ultrasonic Speaker)

3.7.4 ทฤษฎีการทำงานของลำโพง Ultrasonic

ลำโพงความถี่สูงที่ใช้ในการถ่ายทอดเสียง ultrasonic มักใช้เทคโนโลยีที่ช่วยให้สามารถถ่ายทอดสัญญาณความถี่สูงได้อย่างแม่นยำ เช่น ทวิตเตอร์แบบ ริปบอน (Ribbon Tweeter) หรือ ทวิตเตอร์แบบโดม (Dome Tweeter) ที่มีน้ำหนักเบาและตอบสนองต่อความถี่สูงได้ดี การออกแบบให้ตัวทวิตเตอร์มีมวลน้อย ช่วยให้สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเพื่อตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงโดยไม่เกิดการบิดเบือน (distortion) ของสัญญาณ

ลำโพง Ultrasonic ยังต้องมีความไวสูง (high sensitivity) เนื่องจากสัญญาณความถี่สูงมักจะถูกดูดกลืนได้ง่ายในอากาศ และต้องใช้ระดับความดังที่สูงเพียงพอเพื่อให้สัญญาณเสียงยังสามารถตรวจจับได้ในระยะไกล

3.7.5 องค์ประกอบของลำโพงความถี่สูง

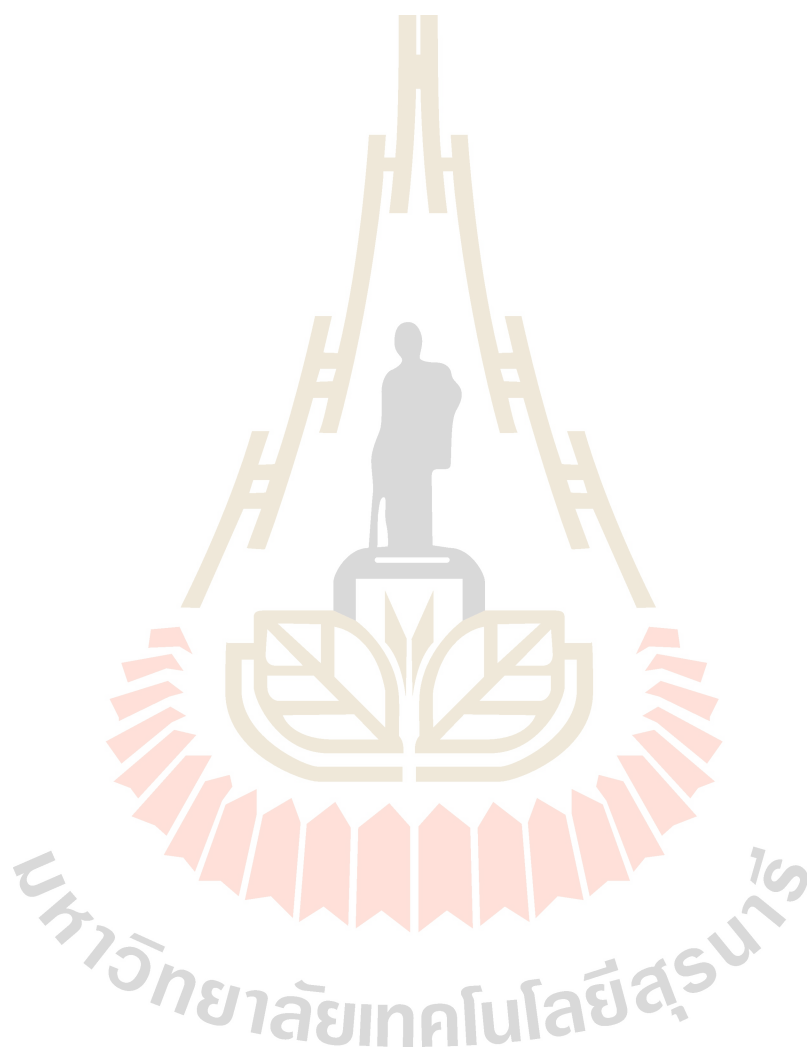
ลำโพงที่ถูกออกแบบมาเพื่อสร้างเสียงในช่วงความถี่สูงมักประกอบด้วย

1. หน่วยทวิตเตอร์ (Tweeter Unit) ทวิตเตอร์เป็นส่วนที่สำคัญของลำโพงที่ทำหน้าที่สร้างเสียงในช่วงความถี่สูง ทวิตเตอร์ที่นิยมใช้ในลำโพงความถี่สูงมักเป็นทวิตเตอร์แบบบริบบอนที่มีน้ำหนักเบาและเคลื่อนที่ได้เร็ว ช่วยให้ตอบสนองต่อสัญญาณเสียงที่มีความถี่สูงได้ดี นอกจากนี้ยังมีทวิตเตอร์แบบโดมที่มีการออกแบบเป็นทรงกลมเพื่อกระจายเสียงได้กว้างขึ้น
2. ครอสโอเวอร์ (Crossover Network) วงจรครอสโอเวอร์ทำหน้าที่แยกความถี่เสียงให้เหมาะสมกับหน่วยทวิตเตอร์ โดยครอสโอเวอร์จะทำหน้าที่กรองสัญญาณเสียงความถี่ต่ำและส่งเฉพาะความถี่สูงไปยังทวิตเตอร์ เพื่อให้ได้คุณภาพเสียงที่ดีที่สุด
3. โครงสร้างตัวลำโพง (Cabinet) ตัวโครงสร้างลำโพงถูกออกแบบมาเพื่อลดการสั่นสะเทือนและเสียงสะท้อนที่ไม่พึงประสงค์ การใช้วัสดุที่แข็งแรงและมีการดูดซับเสียงจะช่วยให้เสียงที่ถ่ายทอดออกมาไม่มีการบิดเบือน
4. ระดับความดังเสียง (Sound Pressure Level, SPL) ลำโพงความถี่สูงต้องสามารถสร้างระดับความดังเสียงได้สูงพอในช่วงความถี่สูง (โดยทั่วไปต้องมี SPL มากกว่า 90 dB) เพื่อให้สามารถจับเสียงในระยะไกลได้อย่างมีประสิทธิภาพ

3.8 สรุป

ค้างคาวใช้กระบวนการ Echolocation ซึ่งเป็นการนำทางและหาอาหารด้วยการปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูง หรือที่เรียกว่า อัลตราโซนิก (ความถี่มากกว่า 20 kHz) คลื่นเสียงเหล่านี้เมื่อสะท้อนกลับจากวัตถุรอบข้างจะถูกค้างคาวรับฟังและวิเคราะห์ ทำให้มันสามารถคำนวณตำแหน่ง ระยะห่าง ขนาด และความเร็วของสิ่งกีดขวางหรือเหยื่อได้อย่างแม่นยำ การทำงานของค้างคาวเป็นตัวอย่างที่ดีของการใช้คลื่นเสียงในธรรมชาติ ซึ่งนักวิจัยได้นำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับคลื่นเสียงความถี่สูง โดยใช้ลำโพงความถี่สูง เพื่อสร้างคลื่นอัลตราโซนิกและเพื่อรับคลื่นเสียงที่เกิดขึ้นจากการสะท้อน การทำงานของอุปกรณ์เหล่านี้อาศัยวงจรขยายสัญญาณที่ช่วยเพิ่มความชัดเจนของสัญญาณที่ได้ส่งออก เพื่อให้ข้อมูลที่ได้จากการทดลองมีความแม่นยำสูงสุด การใช้คลื่นเสียงความถี่สูง

นี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอื่น ๆ นอกเหนือจากการศึกษา เช่น การสร้าง ระบบขับไล่ ค้างคาว ด้วยคลื่นอัลตราโซนิก โดยการปล่อยคลื่นเสียงที่รบกวนกระบวนการ Echolocation ของ ค้างคาว ทำให้มันไม่สามารถนำทางหรือหาอาหารในพื้นที่ที่ต้องการขับไล่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ



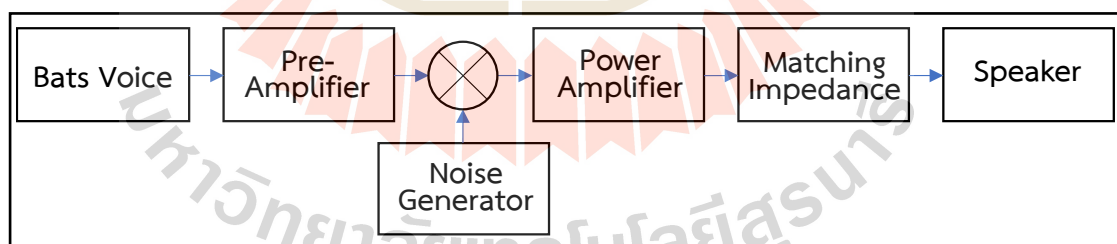
บทที่ 4

การออกแบบสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ

4.1 บทนำ

ในงานวิจัยวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีการออกแบบและสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ ซึ่งคลื่นเสียงความถี่สูงเหล่านี้ไม่สามารถได้ยินโดยมนุษย์ แต่สามารถก่อให้เกิดความรำคาญและส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของค้างคาวได้ เป้าหมายของงานนี้คือการพัฒนาวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถสร้างคลื่นเสียงความถี่สูงดังกล่าวให้มีระดับความดังถึง 90 dB SPL ที่ระยะทาง 5 เมตร เพื่อให้มีประสิทธิภาพในการขับไล่ค้างคาวออกจากพื้นที่

วงจรที่ใช้ในการออกแบบประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ที่สำคัญ เช่น วงจรขยายเสียง วงจรผสมสัญญาณ วงจรสร้างสัญญาณรบกวน และวงจรขับลำโพง ซึ่งได้รับการปรับแต่งเพื่อให้ได้สัญญาณเสียงที่เหมาะสมในการขับไล่ค้างคาว ซึ่งจะสร้างคลื่นเสียงความถี่สูงตามที่ต้องการ โดยมีบล็อกไดอะแกรมของระบบดังรูปที่ 4.1

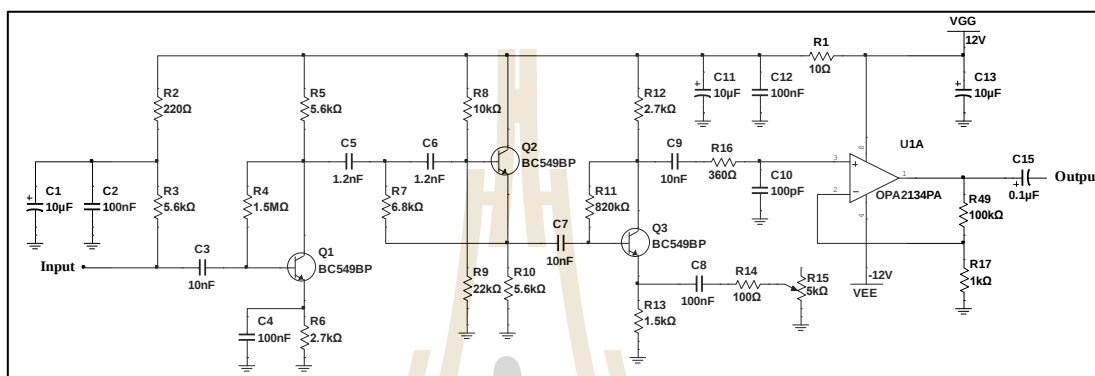


รูปที่ 4.1 บล็อกไดอะแกรมของระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ

4.2 วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ

วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณนี้ ถูกออกแบบมาเพื่อขยายสัญญาณของเสียงค้างคาวที่ได้รับการบันทึกไว้ โดยมีลักษณะการต่อวงจรดังรูปที่ 4.2 โดยใช้ในการขยายสัญญาณ

หลายขั้นตอนเพื่อให้สามารถรองรับและขยายสัญญาณความถี่สูง เช่น เสียงคังคาว ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 20 kHz ถึง 100 kHz วงจรประกอบด้วยส่วนขยายสัญญาณที่ใช้ทรานซิสเตอร์ BC549BP ชนิด NPN หลายตัว ร่วมกับการขยายสัญญาณขั้นสุดท้ายด้วย OPA2134 ซึ่งเป็น Operational Amplifier (Op-Amp) ที่รองรับความถี่สูงและให้การตอบสนองที่ดี



รูปที่ 4.2 Schematics วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ

จากรูปที่ 4.2 เริ่มต้นจากภาคอินพุต ซึ่งเป็นสัญญาณเสียงของคังคาวโดยใช้งานไฟล์เสียงผ่านคอมพิวเตอร์ โดยสัญญาณเสียงของคังคาวนี้จะเข้าสู่วงจรผ่านตัวเก็บประจุ C1 (10 µF) และ C2 (100 nF) ซึ่งทำหน้าที่กรองสัญญาณกระแสตรง (DC Blocking) เพื่อให้สัญญาณกระแสสลับ (AC) ที่เป็นเสียงผ่านเข้าสู่วงจรได้ ตัวเก็บประจุเหล่านี้ช่วยกรองสัญญาณรบกวนและป้องกันไม่ให้สัญญาณ DC รบกวนการทำงานของวงจร

เมื่อสัญญาณผ่านเข้ามาแล้ว จะถูกขยายในขั้นตอนแรกโดยทรานซิสเตอร์ Q1 (BC549BP) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ NPN ที่ถูกไบอัสให้ทำงานในโหมด Active โดยมีตัวต้านทาน R2, R3 และ R4 ทำหน้าที่ปรับค่าแรงดันที่ขั้วฐานของทรานซิสเตอร์เพื่อให้สามารถขยายสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพในการออกแบบวงจรขยายด้วยทรานซิสเตอร์ ค่าการไบอัสที่ฐานต้องมีค่าใกล้เคียงกับ 0.7V เพื่อให้ทรานซิสเตอร์เปิดตัวเต็มที่ ค่าแรงดันที่ได้จะเหมาะสมกับการเปิดการทำงานของ Q1 ในโหมด Active หลังจากสัญญาณถูกขยายในขั้นตอนแรกผ่าน Q1 สัญญาณจะถูกส่งผ่านตัวเก็บประจุ C5 (1.2 nF) เพื่อกรองสัญญาณ DC ออกไป และเข้าสู่การขยายสัญญาณในขั้นตอนที่สองด้วยทรานซิสเตอร์ Q2 (BC549BP)

ทรานซิสเตอร์ Q2 ทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่ถูกกรองมาแล้วอีกครั้ง โดยตัวเก็บประจุ C6 (1.2 nF) ทำหน้าที่เป็นฟิลเตอร์กรองสัญญาณความถี่ต่ำ โดยใช้หลักการกรองผ่านสูง (High-Pass

Filter) การเลือกค่าตัวเก็บประจุ C5 และ C6 ในวงจรนี้ออกแบบมาเพื่อให้กรองความถี่ต่ำกว่า 20 kHz ออกไป โดยใช้สูตรคำนวณความถี่ตัด (Cutoff Frequency) ดังนี้

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4.1)$$

เมื่อเลือกใช้ตัวต้านทาน R7 = 6.8 kΩ และตัวเก็บประจุ C6 = 1.2 nF

$$f_c = \frac{1}{2\pi(6.8k\Omega)(1.2nF)} \approx 19.5kHz$$

จากการคำนวณพบว่าความถี่ตัดที่ได้อยู่ใกล้เคียงกับ 20 kHz ซึ่งเป็นความถี่ที่ต้องการกรองสัญญาณที่ผ่าน Q2 จะถูกขยายต่ออีกครั้งผ่านทรานซิสเตอร์ Q3 (BC549BP) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับ Q2 ในการขยายสัญญาณให้แรงขึ้น โดยมีตัวเก็บประจุ C7 (10 nF) ทำหน้าที่กรองสัญญาณความถี่ต่ำออกไปอีกครั้ง

หลังจากสัญญาณผ่านภาคขยายด้วยทรานซิสเตอร์แล้ว สัญญาณจะเข้าสู่ภาคขยายสัญญาณขั้นสุดท้ายที่ใช้ OPA2134 ซึ่งเป็น Operational Amplifier (Op-Amp) ที่รองรับการขยายสัญญาณในช่วงความถี่สูง วงจร OPA2134 ถูกออกแบบในโหมด Non-Inverting Amplifier ซึ่งจะเพิ่มค่าการขยายโดยไม่กลับเฟสของสัญญาณ การตั้งค่าการขยายสัญญาณในส่วนนี้ถูกกำหนดโดยตัวต้านทาน R49 (100 kΩ) และ R17 (1 kΩ) ค่าการขยายสามารถคำนวณได้จากสูตร

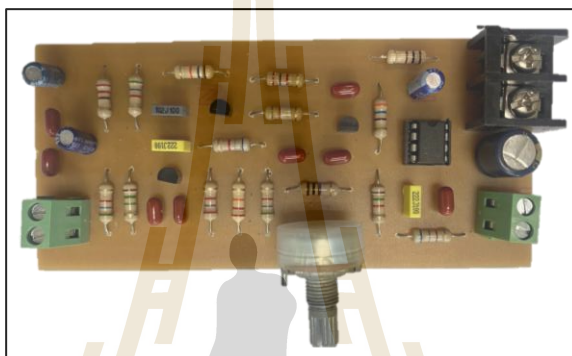
$$Gain = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (4.2)$$

โดยที่ $R_f = R49 = 100k\Omega$ และ $R_i = R17 = 1k\Omega$

$$Gain = 1 + \frac{100k\Omega}{1k\Omega} = 101 \text{ เท่า (หรือ 40 dB)}$$

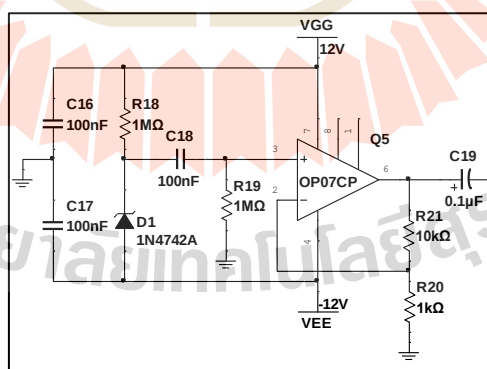
การเลือกค่าเกนนี้ช่วยให้สัญญาณที่ได้รับการขยายจากทรานซิสเตอร์สามารถถูกขยายในระดับที่สูงขึ้น ตัวเก็บประจุ C10 (100 pF) ที่อยู่ในวงจร Feedback ของ OPA2134 ทำหน้าที่ปรับเสถียรภาพของวงจรในช่วงความถี่สูง โดยป้องกันการสั่น (Oscillation) ที่อาจเกิดขึ้นในวงจร

ภาคจ่ายไฟของวงจรนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสมมาตร $\pm 12\text{V}$ ซึ่งจำเป็นสำหรับการทำงานของ OPA2134 ที่ต้องใช้แรงดันสองขั้ว (Dual Power Supply) ในการทำงานเพื่อให้สามารถขยายสัญญาณทั้งบวกและลบได้เต็มประสิทธิภาพ ตัวเก็บประจุ C11 และ C12 ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับ OPA2134 เพื่อลดสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดจากแหล่งจ่ายไฟ สัญญาณขาออกจาก OPA2134 จะถูกส่งผ่านตัวเก็บประจุ C15 ($0.1\ \mu\text{F}$) เพื่อกรองสัญญาณ DC ออกอีกครั้งก่อนที่จะส่งสัญญาณออกไปใช้งานต่อ ซึ่งทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาได้ดังรูป 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรภาครับสัญญาณและขยายด้วย Pre-Amplifier

4.3 วงจรสร้างสัญญาณรบกวน



รูปที่ 4.4 Schematics วงจรสร้างสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 4.4 เป็นวงจรสร้างสัญญาณรบกวนที่ถูกออกแบบมาเพื่อสร้างสัญญาณรบกวนที่มีลักษณะเป็นสัญญาณสุ่ม (Random Noise) โดยใช้ Zener Diode (D1: 1N4742A) ทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวนเบื้องต้น จากนั้นใช้ Operational Amplifier (OP07CP) ในการขยาย

สัญญาณให้มีขนาดที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งาน สัญญาณรบกวนนี้สามารถนำไปใช้ในงานต่างๆ เช่น การทดสอบระบบที่ต้องการสัญญาณรบกวนเป็นอินพุต หรือเพื่อประเมินการทำงานของระบบกรองสัญญาณ (Filter)

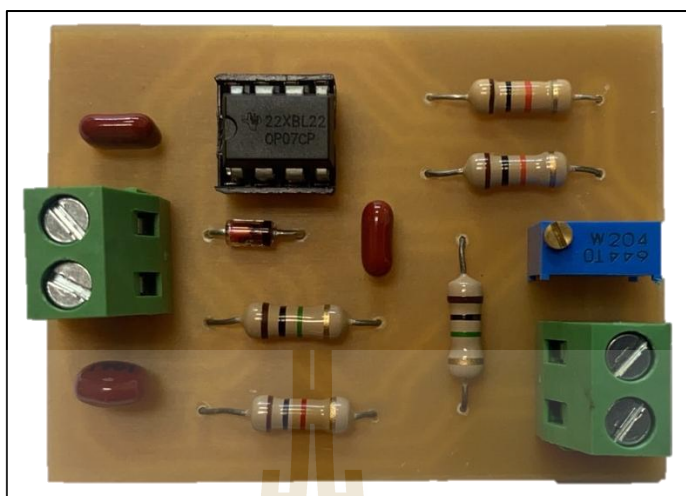
หลักการทำงานเริ่มต้นจากการใช้ Zener Diode ซึ่งถูกไบอัสด้วยแรงดันที่เกินค่าซึนเนอร์ (Zener Voltage) เพื่อให้ไดโอดทำงานในโหมด Breakdown การทำงานในโหมดนี้จะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันสุ่มขนาดเล็ก ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณรบกวน โดยมีตัวต้านทาน R18 (1 M Ω) ทำหน้าที่ไบอัสแรงดันให้กับไดโอดเพื่อให้ทำงานในโหมดนี้ ขณะที่ตัวเก็บประจุ C16 และ C17 ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ โดยเฉพาะความถี่สูงที่อาจเกิดขึ้นจากการทำงานของไดโอดซึนเนอร์

เมื่อสัญญาณรบกวนถูกสร้างขึ้นจากไดโอดแล้ว จะถูกส่งผ่านไปยัง OP07CP ซึ่งเป็น Operational Amplifier ที่ใช้ในการขยายสัญญาณดังกล่าว โดยค่าการขยายสัญญาณ (Gain) ถูกกำหนดโดยตัวต้านทาน R21 (10 k Ω) และ R20 (1 k Ω) ค่าการขยายนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4.2

$$Gain = 1 + \frac{R21}{R20} = 1 + \frac{10k\Omega}{1k\Omega} = 11 \text{ เท่า}$$

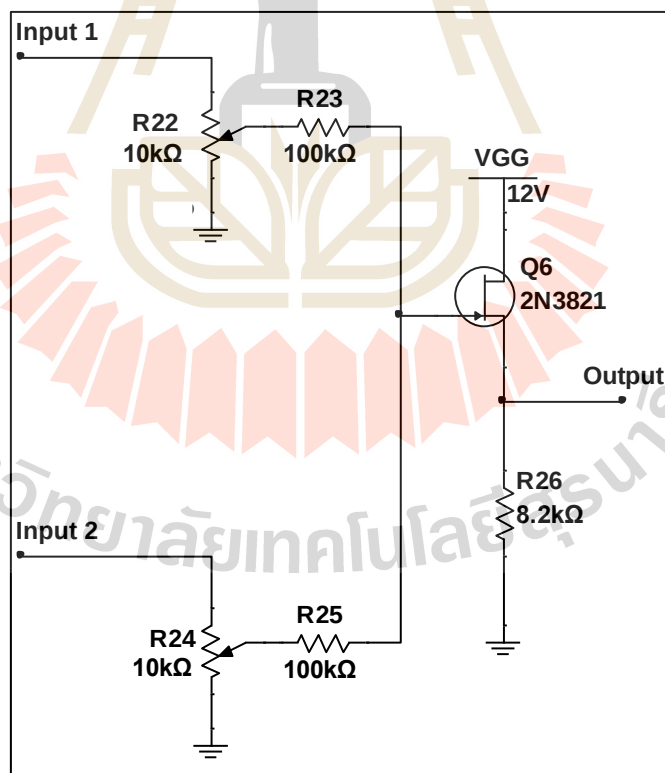
ดังนั้น สัญญาณรบกวนที่ได้จากไดโอดซึนเนอร์จะถูกขยายขึ้น 11 เท่า โดย OP07CP สัญญาณนี้จะถูกส่งผ่านตัวเก็บประจุ C19 (0.1 μ F) ที่ขาเอาต์พุตของ OP07CP เพื่อกรองสัญญาณ DC ออก และปล่อยเฉพาะสัญญาณ AC ซึ่งเป็นสัญญาณรบกวนที่ต้องการนำไปใช้งาน

ในส่วนของแหล่งจ่ายไฟ วงจรนี้ใช้แหล่งจ่ายไฟแบบสมมาตร $\pm 12V$ เพื่อให้ OP07CP สามารถทำงานได้ทั้งขั้วบวกและขั้วลบ ตัวเก็บประจุ C16 และ C17 ทำหน้าที่กรองแรงดันไฟฟ้าที่เข้ามาจากแหล่งจ่ายไฟ เพื่อป้องกันสัญญาณรบกวนจากแหล่งจ่ายไฟเข้ามากระทบการทำงานของวงจร ซึ่งทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาได้ตามรูป 4.5



รูปที่ 4.5 วงจรสร้างสัญญาณรบกวน

4.4 วงจรผสมสัญญาณ



รูปที่ 4.6 Schematics วงจรผสมสัญญาณ

จากรูปที่ 4.6 วงจรผสมสัญญาณนี้เป็นการรวมสัญญาณสองแหล่งเข้าด้วยกัน โดยสัญญาณที่ผสมมาจากวงจรที่อินพุตที่ 1 ซึ่งเป็นสัญญาณที่มาจากวงจรขยายสัญญาณ และวงจรที่อินพุตที่ 2 ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้มาจากวงจรสร้างสัญญาณรบกวน ที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ วงจรนี้ทำหน้าที่ผสมสัญญาณจากทั้งสองแหล่งเข้าด้วยกันและส่งออกที่จุด Output ผ่านการควบคุมโดยทรานซิสเตอร์ JFET ชนิด 2N3821 ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณหลังจากการผสม

การทำงานของวงจรเริ่มจากการรับสัญญาณจาก อินพุต 1 และ อินพุต 2 ผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้ R22 (10 k Ω) และ R24 (10 k Ω) ตัวต้านทานเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นการควบคุมระดับของสัญญาณจากทั้งสองอินพุต ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถปรับอัตราส่วนการผสมของสัญญาณได้ เช่น อาจต้องการให้สัญญาณจากอินพุต 1 มีความเข้มข้นมากกว่าสัญญาณจากอินพุต 2 หรือปรับให้สัญญาณทั้งสองมีส่วนที่เท่ากันก็ได้ หลังจากผ่านตัวต้านทานปรับค่าได้แล้ว สัญญาณจะถูกส่งต่อผ่านตัวต้านทาน R23 (100 k Ω) และ R25 (100 k Ω) ซึ่งเชื่อมต่อกับเกตของทรานซิสเตอร์ JFET (2N3821) ทั้งสองสัญญาณจะถูกผสมเข้าด้วยกันที่เกตของ JFET

สำหรับการคำนวณแรงดันที่เกตของ JFET นั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรการแบ่งแรงดัน (Voltage Divider) โดยพิจารณาจากสัญญาณอินพุต แต่ละแหล่ง สำหรับอินพุต 1 แรงดันที่เกิดขึ้นที่เกตของ JFET V_{g1} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{g1} = \frac{R23}{R22 + R23} \times V_1 \quad (4.3)$$

เช่นเดียวกับสำหรับอินพุต 2 แรงดันที่เกิดขึ้นที่เกตจากสัญญาณอินพุต 2 V_{g2} สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$V_{g2} = \frac{R25}{R24 + R25} \times V_2 \quad (4.4)$$

ซึ่ง V_1 และ V_2 คือแรงดันของสัญญาณจากอินพุต 1 และอินพุต 2 ตามลำดับ เมื่อคำนวณค่าแรงดันที่เกิดขึ้นจากทั้งสองแหล่งแล้ว สัญญาณที่เกตของ JFET จะเป็นผลรวมเชิงเส้นของแรงดันทั้งสองดังนี้

$$V_g = V_{g1} + V_{g2} \quad (4.5)$$

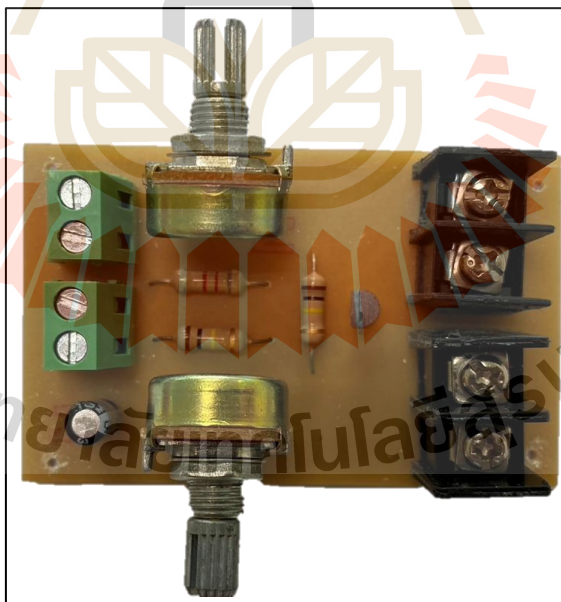
เมื่อสัญญาณผสมแล้วจะถูกส่งผ่านเกตของ JFET ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณและควบคุมการไหลของกระแสระหว่างขา Drain และ Source โดยแรงดันที่เกิดขึ้นที่เกตจะควบคุม

กระแสที่ไหลจากขา Drain ผ่านตัวต้านทาน R26 (8.2 k Ω) ไปยังขา Source ซึ่งทำให้เกิดแรงดันที่ขา Output ของวงจร การขยายสัญญาณนี้ทำให้สามารถส่งสัญญาณผสมออกไปในระดับที่เพียงพอต่อการใช้งาน

ระดับการขยายของ JFET ขึ้นอยู่กับแรงดันที่เกตและกระแสที่ไหลผ่านขา Drain โดยสามารถคำนวณแรงดันที่ขา Drain (V_D) ได้จาก

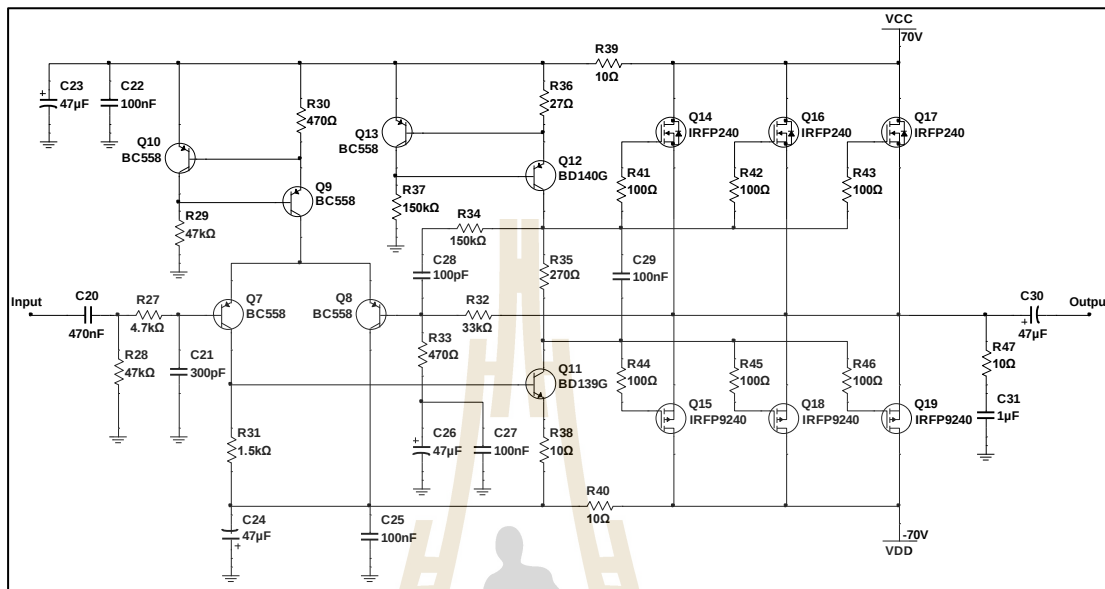
$$V_D = V_{GG} - I_D \times R_{26} \quad (4.6)$$

โดยที่ V_{GG} คือแรงดันไฟที่จ่ายที่ขา Drain (12 V) และ I_D คือกระแสที่ไหลผ่าน JFET ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดันที่เกต การควบคุมการทำงานของวงจรสามารถทำได้โดยการปรับค่าตัวต้านทานปรับค่าได้ R22 และ R24 ซึ่งจะเปลี่ยนระดับสัญญาณที่ถูกผสมจากอินพุต 1 และอินพุต 2 ให้มีสัดส่วนตามที่ต้องการ หากปรับค่าให้ทั้งสองตัวต้านทานมีค่าเท่ากัน จะทำให้สัญญาณที่ผสมออกมามีสัดส่วนเท่ากันจากทั้งสองอินพุต แต่ถ้าปรับตัวต้านทานหนึ่งให้มิต่ำลง สัญญาณจากอินพุต นั้นก็จะมี ความเข้มข้นมากขึ้นในผลรวมของสัญญาณ ซึ่งทำการออกแบบและสร้างขึ้นมาได้ดังรูป 4.7



รูปที่ 4.7 วงจรผสมสัญญาณ

4.5 วงจรขยายกำลังงาน



รูปที่ 4.8 Schematics วงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)

จากรูปที่ 4.8 วงจรนี้เป็นวงจรขยายกำลังแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage Power Amplifier) ที่ออกแบบมาเพื่อขยายกำลังงานของวงจร โดยรับอินพุตจากวงจรผสมสัญญาณที่ได้รับ การผสมสัญญาณแล้วจาก วงจรขยายสัญญาณ และ วงจรสร้างสัญญาณรบกวน ที่ผสมกันก่อนหน้านี้ วงจรนี้ใช้ทรานซิสเตอร์ BJT และ MOSFET ในโครงสร้างแบบ Push-Pull เพื่อให้สามารถขับสัญญาณ กำลังสูงสำหรับการใช้งานกับลำโพงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณลักษณะของลำโพงทวิตเตอร์ที่นำมาใช้งาน

คุณสมบัติ	รายละเอียด
การตอบสนองความถี่	สูงสุดถึง 30 kHz
กำลังขยาย	สูงสุดถึง 200 W
ความไวเสียง	82 dB
ความต้านทานที่กำหนด	4 โอห์ม

เนื่องจากลำโพงที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้คือ ลำโพงทวิตเตอร์ ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 4.1 เมื่อนำข้อมูลที่ได้มาแสดงวิธีการคำนวณหากำลังงานที่เหมาะสมสำหรับสร้างวงจรขยายกำลังงาน

เพื่อให้สามารถ ส่งคลื่นเสียงของค้ำควาที่ความถี่ 20 kHz – 100 kHz ที่ระยะ 5 เมตร ได้ในระดับความดัง 90 dB SPL ซึ่งสามารถนำไปขับไล่ค้ำควาได้นั้นจะแสดงวิธีการคำนวณดังนี้

สมการลดทอนระดับเสียงตามระยะทาง : การลดทอนพลังงานเสียงตามระยะทางในพื้นที่เปิดโล่ง

$$Loss_d = 20 \log_{10} \left(\frac{d}{d_{ref}} \right) \quad (4.7)$$

เมื่อ d คือ ระยะทางที่ต้องการ มีหน่วยเป็น เมตร
 d_{ref} คือ ระยะทางที่อ้างอิง มีหน่วยเป็น เมตร

$$Loss_d = 20 \log_{10} \left(\frac{5}{1} \right) \approx 13.98 \text{ dB}$$

ดังนั้น ระดับเสียงที่ระยะ 5 เมตร จะลดลงประมาณ 13.98 dB

เมื่อทราบแล้วว่าที่ระยะ 5 เมตรนั้นมีการลดทอนระดับเสียงลงไป 13.98 dB หรือก็คือการออกแบบวงจรภาคขยายกำลังงานนั้นจะต้องออกแบบในส่วนที่ช่วยในการหักล้างกับค่านี้เพื่อให้สามารถส่งคลื่นเสียงความถี่สูงในระดับ 90 dB SPL ได้ที่ระยะ 5 เมตร โดยจะต้องมีความเข้มเสียงจากแหล่งกำเนิดคือ

$$L = 90 \text{ dB} + 13.98 \text{ dB} = 103.98 \text{ dB}$$

จากการคำนวณทำให้ทราบว่าระบบขับไล่ค้ำควาโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับนั้นจะต้องออกแบบให้ได้เอาต์พุตที่มีความเข้มเสียงเท่ากับ 103.98 dB เพื่อให้สามารถนำไปขับไล่ค้ำควาได้ที่ระยะ 5 เมตร

4.5.1 ภาคขยายอินพุต (Input Amplification Stage)

ในขั้นตอนนี้ สัญญาณอินพุตถูกส่งผ่านตัวเก็บประจุ C20 (470 nF) ซึ่งทำหน้าที่กรองสัญญาณกระแสตรง (DC) เพื่อให้เหลือเพียงสัญญาณกระแสสลับ (AC) ที่จะนำไปขยายเท่านั้น

ตัวเก็บประจุนี้ยังช่วยป้องกันไม่ให้สัญญาณ DC ที่อาจมีอยู่ในวงจรก่อนหน้าเข้าสู่วงจรขยายและส่งผลให้วงจรทำงานผิดปกติ

จากนั้นสัญญาณจะถูกส่งผ่าน R27 ($4.7\text{ k}\Omega$) ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่ทำหน้าที่ลดแรงดันสัญญาณให้พอเหมาะสำหรับการขยาย ตัวต้านทานนี้จะป้องกันไม่ให้สัญญาณที่เข้ามามีระดับแรงดันสูงเกินไปและส่งผลกระทบต่อการทำงานของทรานซิสเตอร์ในภาคขยายถัดไป

ในขั้นตอนนี้ สัญญาณจะเข้าสู่ทรานซิสเตอร์ Q7 และ Q8 (BC558) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์ชนิด PNP ที่ทำงานเป็นขยายสัญญาณเบื้องต้น ตัวเก็บประจุ C21 (300 pF) ทำหน้าที่กรองความถี่สูงที่อาจเป็นสัญญาณรบกวน และตัวต้านทาน R31 ($1.5\text{ k}\Omega$) ช่วยควบคุมกระแสที่เข้าสู่ทรานซิสเตอร์เพื่อให้การขยายสัญญาณมีเสถียรภาพมากขึ้น

4.5.2 ภาคขยายชั้นกลาง (Intermediate Amplification Stage)

เมื่อสัญญาณผ่านภาคขยายอินพุตแล้ว จะเข้าสู่ Q9 และ Q10 (BC558) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์แบบดาร์ลิ่งตัน (Darlington Pair) การใช้ทรานซิสเตอร์ในรูปแบบดาร์ลิ่งตันนี้ทำให้สามารถขยายสัญญาณได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากทรานซิสเตอร์ดาร์ลิ่งตันมีการขยายกระแสที่สูง โดยใช้กระแสเบสเพียงเล็กน้อย ก็สามารถควบคุมการขยายได้ดี การใช้โครงสร้างดาร์ลิ่งตันจะช่วยให้สัญญาณที่ได้มีความเข้มแข็งมากขึ้นและพร้อมสำหรับการส่งต่อไปยังภาคขยายกำลังต่อไป

C22 (100 nF) และ C23 ($47\text{ }\mu\text{F}$) เป็นตัวเก็บประจุที่ช่วยกรองสัญญาณรบกวนที่อาจเกิดขึ้นในวงจร และปรับสัญญาณที่ได้รับให้มีคุณภาพสูงขึ้น

4.5.3 ภาคขยายกำลัง (Power Amplification Stage)

ในขั้นตอนนี้ สัญญาณที่ผ่านการขยายในภาคกลางจะถูกส่งไปยัง Q11 (BD139) และ Q12 (BD140) ซึ่งเป็นทรานซิสเตอร์แบบ BJT ที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีกำลังมากขึ้นเพียงพอสำหรับการขับ MOSFET ในภาคขยายสุดท้าย ทรานซิสเตอร์ทั้งสองนี้ทำงานร่วมกันในโหมดขยายกำลัง (Power Amplification) เพื่อเพิ่มขนาดของสัญญาณก่อนที่จะถูกส่งไปยังขั้นตอนขยายสุดท้าย

ตัวต้านทาน R32 ($33\text{ k}\Omega$) และ R33 ($470\text{ }\Omega$) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของทรานซิสเตอร์โดยควบคุมกระแสที่ไหลผ่านแต่ละตัว เพื่อให้การขยายสัญญาณเป็นไปอย่างเสถียรและไม่มีอาการบิดเบือน ตัวเก็บประจุ C26 ($47\text{ }\mu\text{F}$) และ C27 (100 nF) ทำหน้าที่กรองสัญญาณรบกวนที่ไม่ต้องการ และปรับให้การขยายสัญญาณเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

4.5.4 ภาคขยายสุดท้ายด้วย MOSFET (Final Amplification with MOSFET)

ในขั้นสุดท้ายของการขยายกำลัง วงจรใช้ MOSFET ซึ่งประกอบด้วย Q14, Q16, และ Q17 (IRFP240) ซึ่งเป็น MOSFET แบบ N-Channel และ Q15, Q18, และ Q19 (IRFP9240) ซึ่งเป็น MOSFET แบบ P-Channel MOSFET ทั้งสองชนิดทำงานร่วมกันในโครงสร้าง Push-Pull โดย N-Channel MOSFET ทำหน้าที่ขยายครึ่งบวกของสัญญาณ ขณะที่ P-Channel MOSFET ขยายครึ่งลบของสัญญาณ ทำให้สัญญาณขาออกสมบูรณ์แบบทั้งสองด้าน

ตัวต้านทาน R41-R46 (100 Ω) ที่ต่อกับขาเกตของ MOSFET ทำหน้าที่ควบคุมกระแสที่เข้าสู่ขาเกต เพื่อป้องกันการทำงานผิดพลาดของ MOSFET หรือการเกิดการสั้นในระหว่างการขยายสัญญาณ ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้บ่อยในวงจรขยายกำลังสูง

วงจรมีตัวเก็บประจุ C28 (100 pF) และ C29 (100 nF) ที่ช่วยกรองสัญญาณรบกวนในภาคขยายกำลัง และป้องกันการทำงานที่ไม่เสถียรของ MOSFET ขณะที่ขยายสัญญาณด้วยกำลังสูง

4.5.5 ภาค Matching Impedance และการต่อกับลำโพง

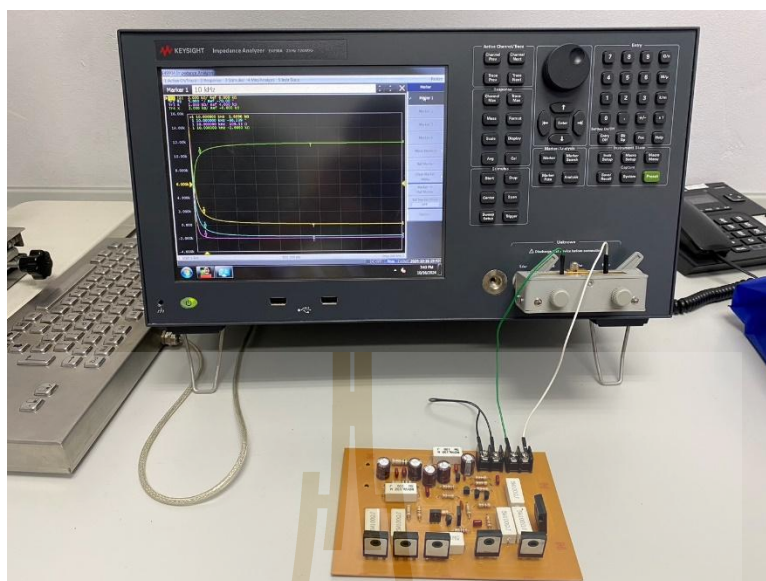
หลังจากการขยายสัญญาณด้วย MOSFET แล้ว สัญญาณจะถูกส่งไปยังลำโพงผ่านวงจร Matching Impedance เพื่อปรับอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายกำลังงานให้เข้ากับลำโพง โดยจะอธิบายวิธีการคำนวณเพื่อออกแบบวงจร Matching Impedance โดยลำโพงมีอิมพีแดนซ์ $Z_{load} = 20 \Omega$ และมีมุมเฟส 6.78° ที่ความถี่ 50 kHz ซึ่งได้จากการนำลำโพงไปวัดโดยใช้เครื่อง Keysight Impedance Analyzer E4990A ดังตารางที่ 4.2 ที่ช่วงความถี่ 20 kHz ถึง 100 kHz ในที่นี้จะคำนวณที่ความถี่กลางคือ 50 kHz เพื่อให้สะดวกต่อการออกแบบวงจร

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าอิมพีแดนซ์ของลำโพงทวีตเตอร์ที่นำมาใช้และวงจรขยายกำลังงาน

ความถี่	ค่าอิมพีแดนซ์ (Ω)	
	ลำโพงทวีตเตอร์	วงจรขยายกำลังงาน
10 kHz	$14.809 - j1.7337$	$108.5 - j1672.4$
20 kHz	$4.3268 - j0.7505$	$29.901 - j842.86$
30 kHz	$4.1944 + j1.1633$	$14.423 - j563.43$
40 kHz	$4.2759 + j2.3763$	$8.7875 - j423.12$
50 kHz	$4.3326 + j3.0086$	$6.1052 - j339.02$
60 kHz	$4.2147 + j4.0125$	$4.5920 - j282.69$
70 kHz	$4.2363 + j4.9019$	$3.6670 - j242.32$
80 kHz	$4.2669 + j5.7526$	$3.0491 - j212.05$
90 kHz	$4.3095 + j6.5772$	$2.6258 - j188.49$
100 kHz	$4.3721 + j7.3266$	$2.3260 - j169.61$



รูปที่ 4.9 การวัดอิมพีแดนซ์ของลำโพงทวีตเตอร์ด้วยเครื่อง Keysight Impedance Analyzer E4990A



รูปที่ 4.10 การวัดอิมพีแดนซ์ของวงจรขยายกำลังงานด้วยเครื่อง Keysight Impedance Analyzer E4990A

1. คำนวณค่าตัวเก็บประจุ C30

เนื่องจากลำโพงที่นำมาใช้นั้นมีจำนวน 2 ตัวเพื่อให้รองรับต่อกำลังงานของวงจร จึงนำมาต่อกันในรูปแบบขนานทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของลำโพงเปลี่ยนไปจากเดิมเป็น $2.16 + j1.5 \Omega$ ดังนั้น Z_{load} ซึ่งก็คือลำโพงทวิตเตอร์ 2 ตัวขนานกันมีค่า อิมพีแดนซ์เชิงจินตภาพ = $+j1.5 \Omega$ จึงมีความจำเป็นต้องลดค่าดังกล่าวดังกล่าวเพื่อให้ลำโพงสามารถประสิทธิภาพได้สูงที่สุดจากการนำตัวเก็บประจุมาต่อในวงจร ซึ่งหาค่าได้จากการคำนวณดังนี้

$$Z_C = \frac{1}{j2\pi fC}$$

$$1.5 = \frac{1}{j2\pi(50\text{kHz})C}$$

$$C \approx 2.12 \mu\text{F}$$

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องใช้ค่าตัวเก็บประจุ C30 เท่ากับ $2.12 \mu\text{F}$ หรือประมาณ $2 \mu\text{F}$ และเมื่อคำนวณย้อนกลับโดยใช้ค่าตัวเก็บประจุเป็น $2 \mu\text{F}$ จะมีค่า Z_C เท่ากับ $-j1.59 \Omega$

2. คำนวณอิมพีแดนซ์รวมของ R47 และ L1

เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของลำโพงนั้นมีค่าต่ำกว่าอิมพีแดนซ์ของระบบจึงต้องทำการขนาน R47 และ L1 เข้าไปในวงจรเพื่อลดอิมพีแดนซ์ของระบบลงมาให้เท่ากับอิมพีแดนซ์ของลำโพงโดยคำนวณได้ดังนี้

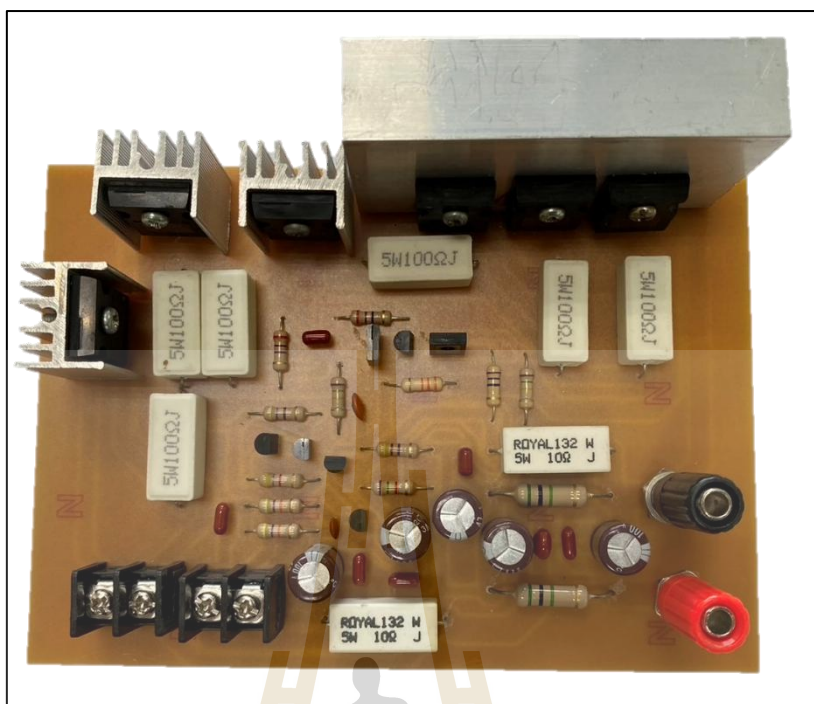
$$\begin{aligned} Z_{SPEAKER} &= (Z_{CIRCUIT} \parallel Z_{R47+L1}) + Z_{C30} \\ 2.16 + j1.5 &= (6.1052 - j339.02 \parallel Z_{R47+L1}) - j1.59 \\ Z_{R47+L1} &= 2.121 + j3.08\Omega \end{aligned}$$

จากการคำนวณเราจึงเลือกใช้ R47 คือ 2.121 Ω หรือ 2 Ω โดยหาค่าตัวเหนี่ยวนำ L1 ได้จาก

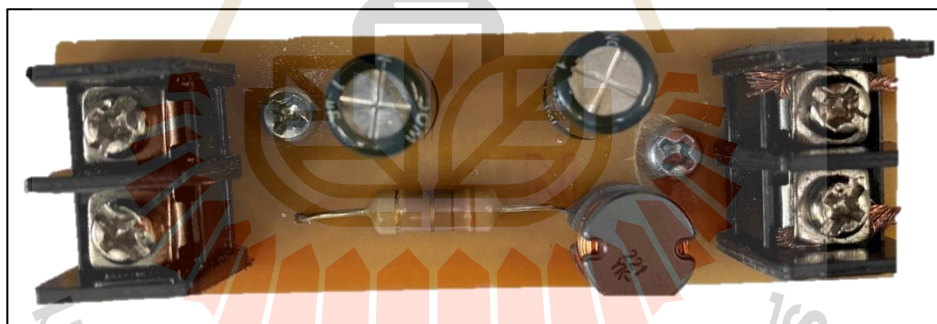
$$\begin{aligned} Z_L &= j2\pi fL \\ 3.08 &= j2\pi(50\text{kHz})L \\ L &\approx 9.8\mu\text{H} \end{aligned}$$

จากการคำนวณเราจึงเลือกใช้ L1 คือ 9.8 μH

สรุปได้ว่าโดยในวงจรนี้ใช้ R47 (2 Ω), C30 (2 μF) และ L1 (9.8 μH) อุปกรณ์เหล่านี้นอกจากจะช่วยในเรื่องควบคุมอิมพีแดนซ์ของวงจรแล้วนั้น R47 (2 Ω) ยังสามารถทำหน้าที่ควบคุมระดับความต้านทานและกำลังที่ส่งไปยังลำโพง เพื่อป้องกันการสูญเสียกำลังที่มากเกินไปหรือการเสียหายของลำโพงได้อีกด้วยและตัวเก็บประจุ C30 (2 μF) ทำหน้าที่กรองสัญญาณกระแสตรง (DC) ออก เพื่อป้องกันไม่ให้สัญญาณ DC ถูกส่งไปยังลำโพง ซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายต่อออดิโอลำโพงได้ การกรองนี้สำคัญเนื่องจากสัญญาณ DC อาจทำให้ลำโพงเกิดความร้อนสูงและเสียหาย

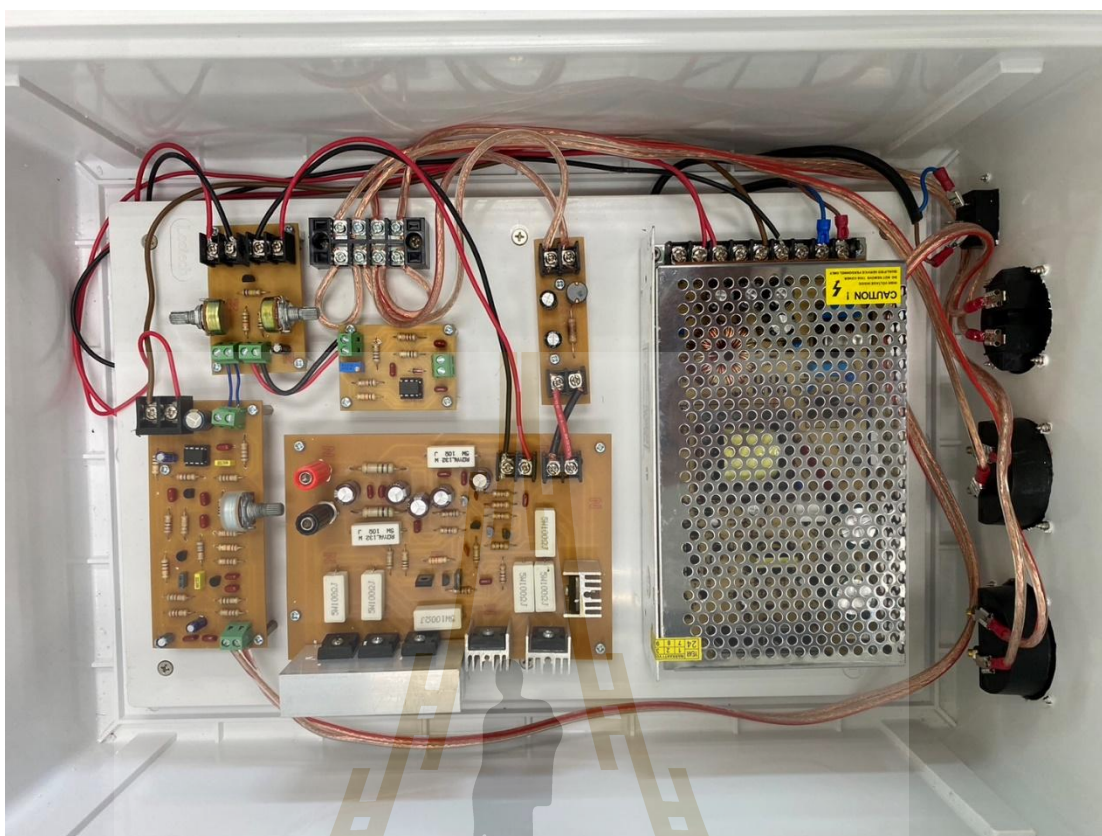


รูปที่ 4.11 วงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)



รูปที่ 4.12 วงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์

จากที่กล่าวมาทั้งหมดจึงได้ออกแบบและนำวงจรมารวมกันเป็นระบบขับไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับที่สามารถขับไล่ค้างคาวได้ที่ระยะ 5 เมตร ในระดับความดังเสียง 90 dB SPL ดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 วงจรของระบบขับไล่คางคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ

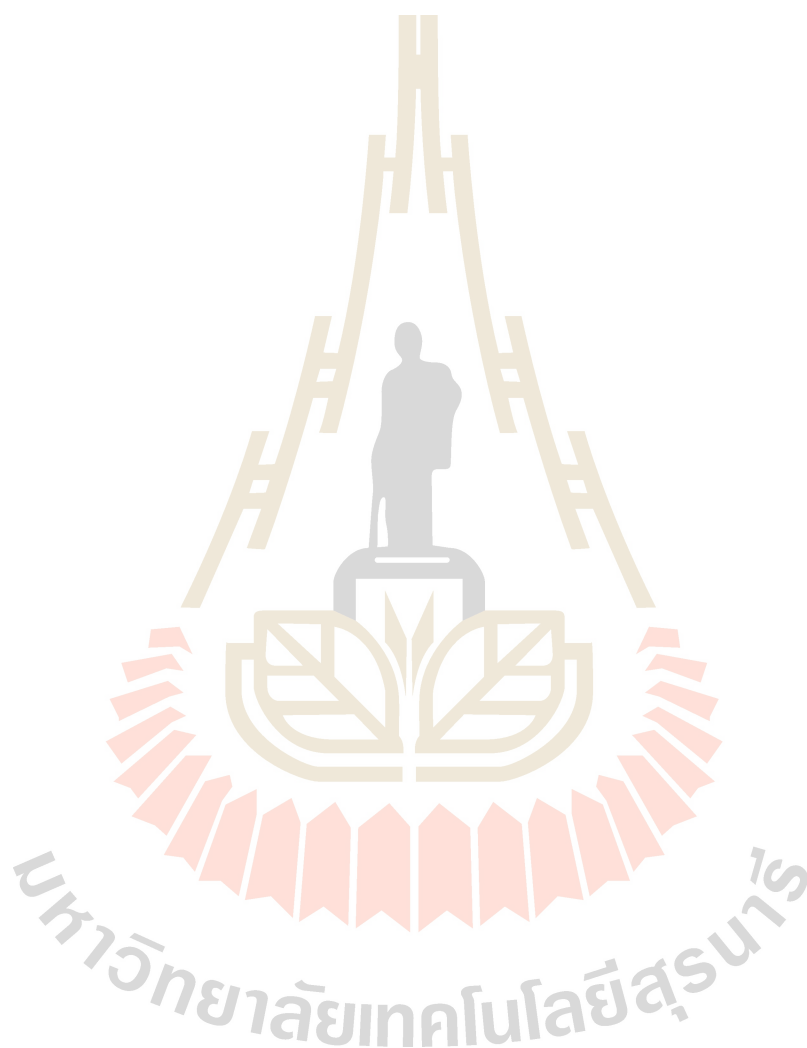
4.6 สรุป

การออกแบบวงจรขยายสำหรับการใช้งานขับไล่คางคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับได้ครอบคลุมขั้นตอนสำคัญต่าง ๆ ตั้งแต่การออกแบบวงจรขยายภาครับสัญญาณ (Pre-Amplifier) วงจรสร้างสัญญาณรบกวน วงจรผสมสัญญาณ และวงจรขยายกำลัง (Power Amplifier) การออกแบบเริ่มต้นด้วยการใช้เสียงของคางคาวที่ได้มีการบันทึกไว้ และใช้ Pre-Amplifier ในการขยายสัญญาณเบื้องต้น โดยมีการคำนวณค่าความถี่ตัดเพื่อให้สามารถกรองสัญญาณที่ไม่ต้องการและขยายสัญญาณที่มีความถี่สูงได้

วงจรสร้างสัญญาณรบกวนใช้ Zener Diode ร่วมกับ Operational Amplifier เพื่อสร้างสัญญาณสุ่มที่สามารถนำไปใช้ร่วมกับวงจรผสมสัญญาณ การผสมสัญญาณทำโดยใช้ทรานซิสเตอร์ JFET เพื่อควบคุมการรวมสัญญาณจากแหล่งที่มาสองแหล่งและขยายสัญญาณให้เพียงพอสำหรับการนำไปใช้ในวงจรขยายกำลัง

วงจรขยายกำลังเป็นแบบ Push-Pull โดยใช้ทรานซิสเตอร์ BJT และ MOSFET เพื่อให้สามารถขยายสัญญาณกำลังสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่วนสุดท้ายของวงจรคือวงจร Matching

Impedance ที่ออกแบบมาเพื่อให้วงจรขยายสามารถถ่ายเทพลังงานไปยังลำโพงได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ทำการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์เพื่อให้สอดคล้องกับลำโพงที่ใช้งาน และมีการคำนวณค่าจริงและค่าจินตภาพของอิมพีแดนซ์ ให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง



บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

5.1 บทนำ

จากที่ได้กล่าวมาจากบททฤษฎีและการออกแบบที่ผ่านมา การออกแบบสร้างระบบขับไล่ ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ ในบทนี้จะพูดถึงผล การออกแบบและสร้างระบบ อีกทั้งทดสอบถึงความเป็นไปได้ของระบบในการนำไปขับไล่ค้างคาว จากการศึกษางานวิจัยพบว่าค้างคาวจะมีปฏิกิริยาไม่เข้าใกล้พื้นที่ในบริเวณที่มีคลื่นเสียงความถี่สูงใน ระดับความดัง 90 dB SPL จากการคำนวณในบทก่อนหน้านี้ที่ระยะ 5 เมตรนั้นจะต้องสร้าง วงจรขยายสัญญาณที่มีความเข้มของเสียงมากกว่า 103.98 dB SPL เพื่อให้สามารถนำไปขับไล่ ค้างคาวได้ โดยระบบนี้จะใช้คลื่นเสียงของค้างคาวที่ได้ถูกบันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเป็นเสียง ค้างคาว หลังจากนั้นจะนำสัญญาณที่ได้ไปขยายด้วยวงจรขยายสัญญาณ และผสมกับสัญญาณรบกวน ที่ถูกสร้างจากวงจรสร้างสัญญาณรบกวน เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีการขยายและมีสัญญาณรบกวน เมื่อ เสร็จสิ้นขั้นตอนการผสมสัญญาณแล้วนั้น จึงจะนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่วงจรขยายกำลังงาน เพื่อนำมา ขยายให้ได้ความเข้มของเสียงมากกว่า 103.98 dB SPL ตามวัตถุประสงค์ของระบบ แล้วจึงนำ สัญญาณที่ได้รับการขยายแล้วไปยังลำโพงทวิตเตอร์ที่ใช้ตามท้องตลาด โดยลำโพงที่นำมาใช้นั้นรองรับ กำลังงานไฟฟ้าได้สูงถึง 200 วัตต์ โดยมีความจำเป็นต้องออกแบบวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้ สามารถนำวงจรที่มีไปใช้งานร่วมกับลำโพงที่นำมาใช้ได้ โดยในงานวิจัยจะใช้เครื่อง Audio Analysis ยี่ห้อ Keysight รุ่น U8903B ในการวิเคราะห์สัญญาณแทนการทดสอบจริง ซึ่งในการทดลองนี้จะมี การทดลองในเรื่องของการแมตซ์อิมพีแดนซ์เนื่องจากลำโพงที่ใช้นั้น มีอิมพีแดนซ์ที่ไม่เท่ากับตัว ระบบ โดยจะมีการเปรียบเทียบว่าการมีวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์กับไม่มีวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์ สัญญาณที่ได้จะมีผลอย่างไร โดยจะกล่าวในลำดับถัดไป

5.2 การทดสอบวงจรภายในระบบ

ในการทดสอบวงจรภายในของระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของ คลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับนั้น จะเป็นการทดสอบให้ทราบถึงผลที่ได้จากการออกแบบและสร้าง

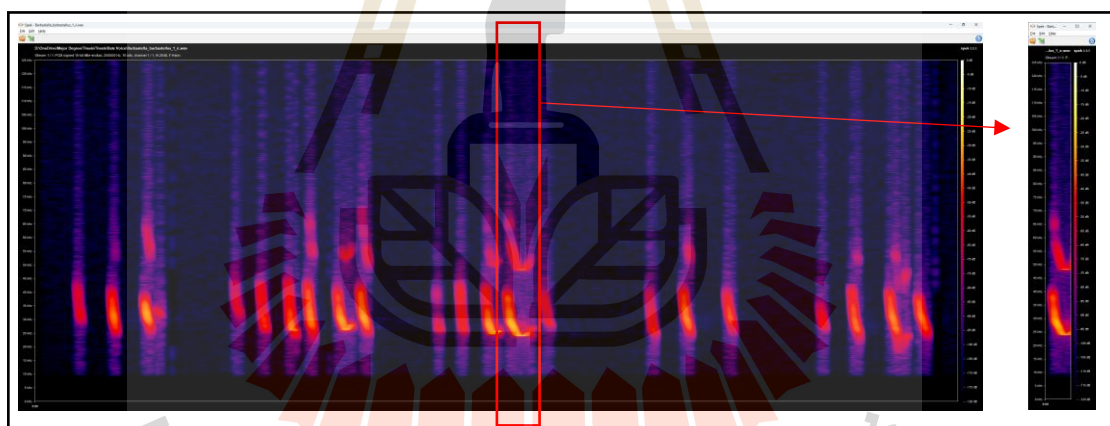
วงจรขึ้นมาในแต่ส่วน โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วนดังนี้

1. วงจรภาครับสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณ
2. วงจรสร้างสัญญาณรบกวน
3. วงจรผสมสัญญาณ
4. วงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier) และแมตชิงอิมพีแดนซ์

5.2.1 วงจรภาครับสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณ

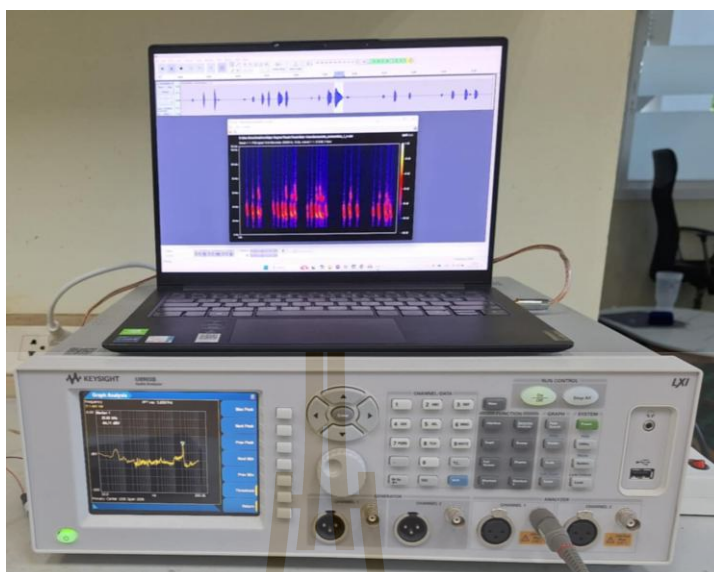
ในการทดสอบวงจรภาครับสัญญาณและวงจรขยายสัญญาณ เป็นการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบการรับสัญญาณจากเสียงของค้ำคาวที่ได้มีการบันทึกไว้ และขยายสัญญาณก่อนเข้าสู่ขั้นตอนต่อไป โดยมีการทดสอบเป็นดังนี้

1. ทำการวัดสัญญาณโดยตรงจากไฟล์เสียงค้ำคาวที่อยู่บนเครื่องคอมพิวเตอร์ เพื่อตรวจสอบความเข้มของเสียงที่ความถี่ต่าง ๆ

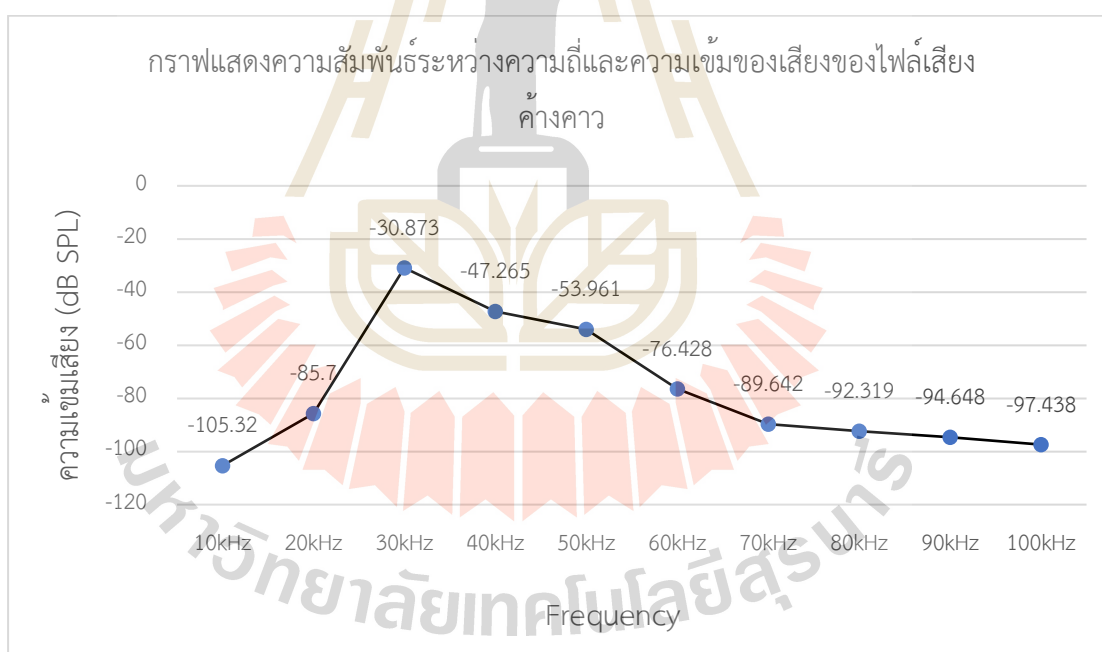


รูปที่ 5.1 สเปกโตรแกรม ของไฟล์เสียงค้ำคาวที่นำมาใช้

จากรูปที่ 5.1 เป็นการแสดงกราฟ สเปกโตรแกรม ของไฟล์เสียงค้ำคาว โดย แกนแนวนอน (horizontal axis) แสดงเวลา และแกนแนวตั้ง (vertical axis) แสดงความถี่ ส่วนสีที่ปรากฏบนกราฟบ่งบอกถึงพลังงานหรือความเข้มของสัญญาณเสียงที่ความถี่นั้น ๆ ในแต่ละช่วงเวลา สีสว่างแสดงถึงพลังงานที่สูงกว่า ส่วนสีเข้มแสดงถึงพลังงานที่ต่ำกว่า โดยจะทำการตัดออกมา 1 ลูกคลื่นตามรูปทางด้านขวามือ เพื่อใช้ในการจำลองของระบบ โดยใช้คอมพิวเตอร์ในการเล่นไฟล์เสียง 1 ลูกคลื่นนี้ โดยใช้เครื่อง Audio Analysis ในการวิเคราะห์สัญญาณเสียงดังรูปที่ 5.2



รูปที่ 5.2 ทดสอบสัญญาณของไฟล์เสียงจากคอมพิวเตอร์

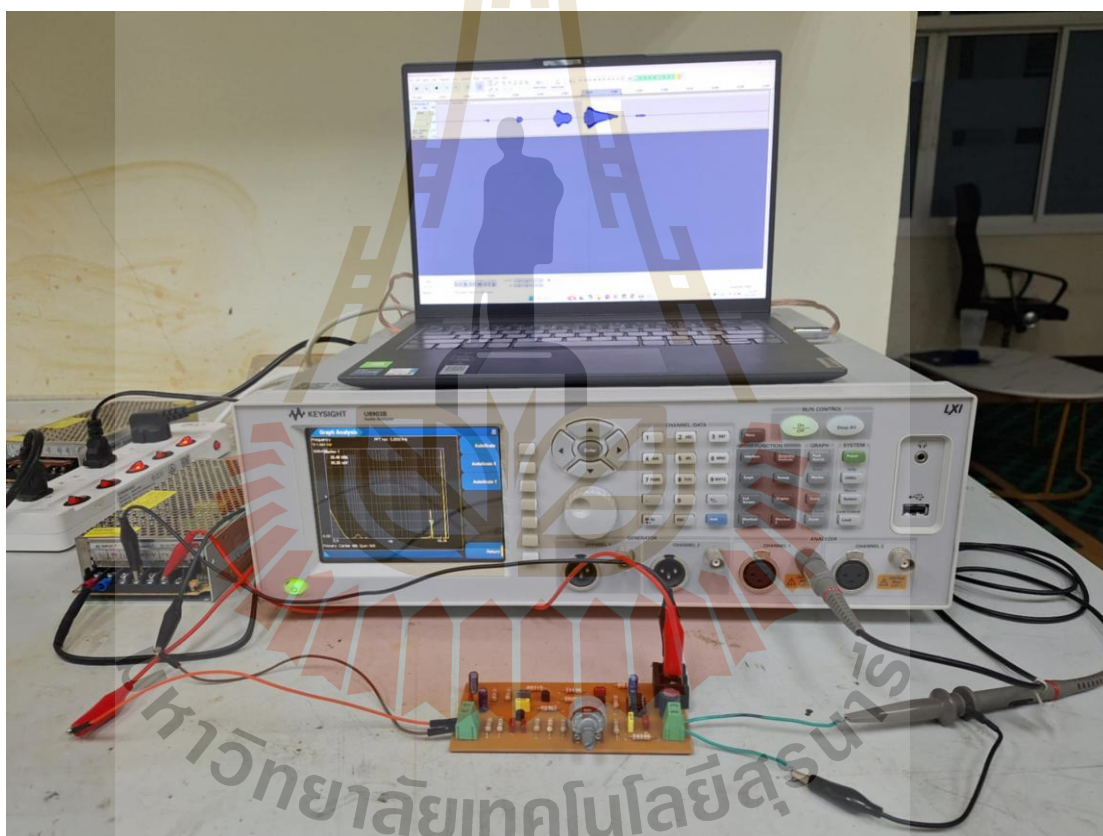


รูปที่ 5.3 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มของเสียงค้างคาว ด้วยเครื่อง Audio Analysis

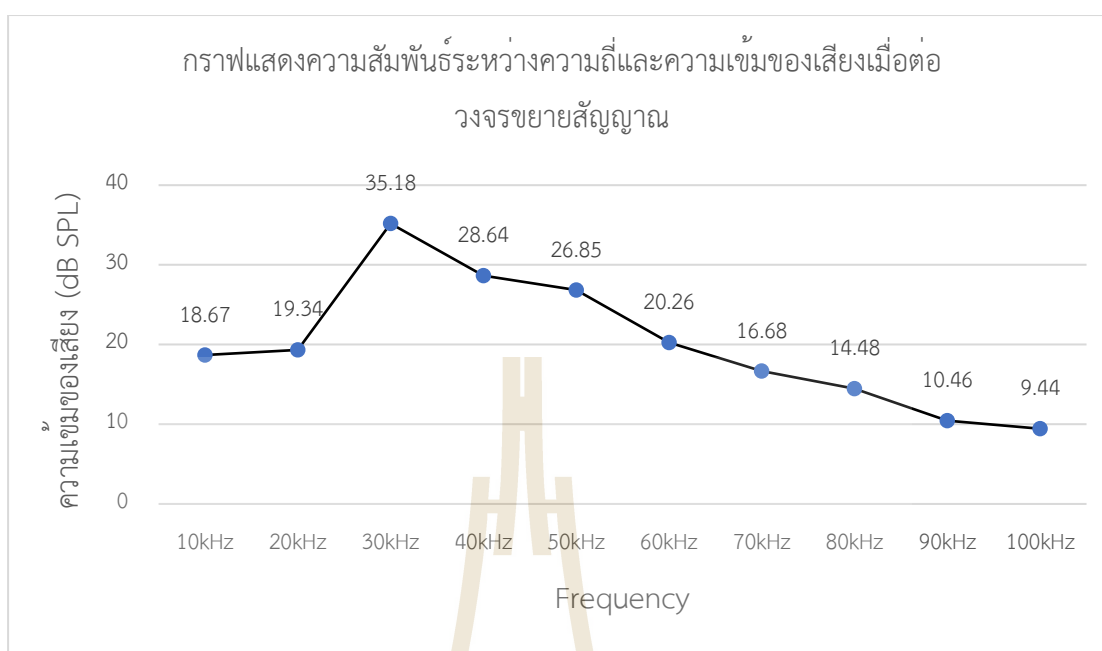
ผลการทดสอบพบว่าไฟล์เสียงของค้างคาวที่จะนำมาจำลองการทำงานของระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับนั้นสามารถใช้งานได้จริง และมีความเข้มของสัญญาณดังรูปที่ 5.3 ซึ่งสัญญาณที่ได้นั้นเป็นสัญญาณที่มี

ความถี่ตั้งแต่ 10 kHz จนถึง 100 kHz โดยสัญญาณที่ได้นั้นมีความเข้มของเสียงมากที่สุดที่ 30 kHz เนื่องจากสัญญาณที่นำมาทดสอบมีความเข้มมากที่สุดในช่วง 30 kHz ในความเป็นจริงแล้วความเข้มของเสียงจะขึ้นอยู่กับค่าความถี่แต่ละชนิดที่ใช้ความถี่ที่แตกต่างกันในการส่งเสียงออกมาเพื่อหาเหตุ

2. เมื่อทราบแล้วว่าไฟล์เสียงที่นำมาใช้ในการจำลองนั้นมึลักษณะที่มีความเข้มของเสียงในช่วงความถี่ 10 kHz จนถึง 100 kHz ก็ให้นำสัญญาณที่ได้ต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ เพื่อทดสอบว่าวงจรสามารถขยายสัญญาณได้จริงในช่วงความถี่ดังกล่าว ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 ทดสอบวงจรขยายสัญญาณ

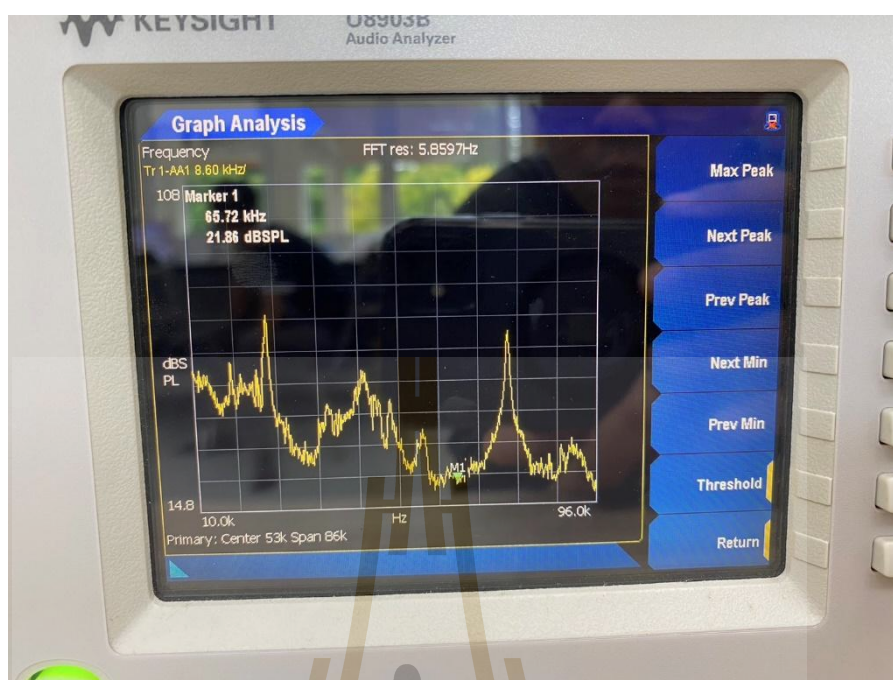


รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความถี่และความเข้มของเสียงเมื่อต่อวงจรขยายสัญญาณด้วย
เครื่อง Audio Analysis

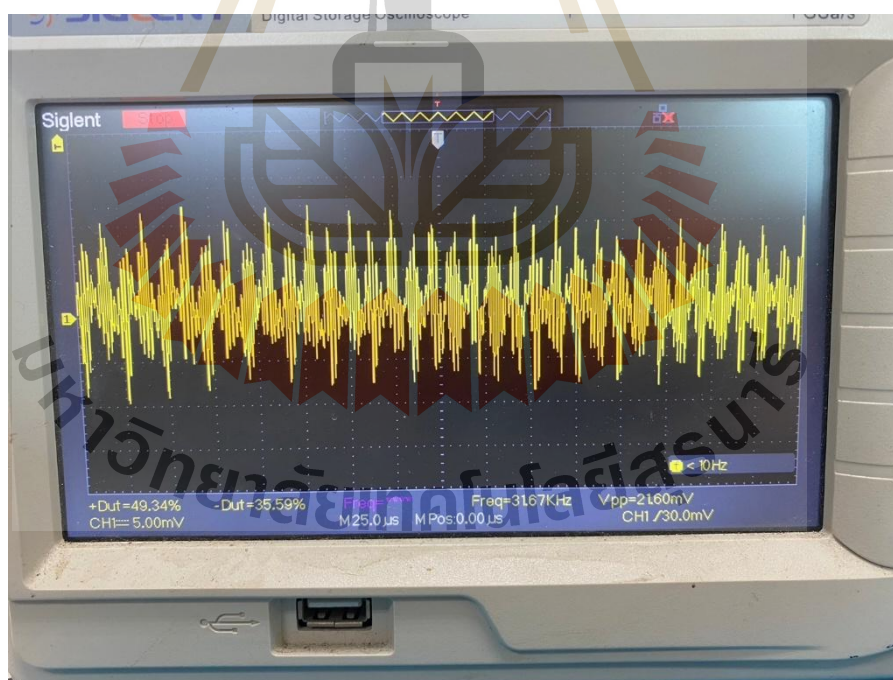
ผลการทดสอบพบว่าความเข้มของสัญญาณมีค่าสูงจากการทดสอบแรกดังรูปที่ 5.5 โดยมีอัตราขยายที่สูงมาก ซึ่งเพียงพอต่อการนำไปใช้ในวงจรลำดับถัดไป เมื่อทราบแล้วว่าวงจรขยายสัญญาณ นั้นสามารถใช้งานได้ดีในช่วงความถี่ 10 kHz ถึง 100 kHz

5.2.2 วงจรสร้างสัญญาณรบกวน

การทดสอบวงจรสร้างสัญญาณรบกวนนี้ เป็นการทดสอบวงจรว่าสามารถสร้างสัญญาณรบกวนได้ซึ่งจะถูกนำไปผสมกับสัญญาณของคางคาวที่ออกจากวงจรขยายสัญญาณ เพื่อเสริมลักษณะของสัญญาณให้สามารถนำไปรบกวนการสื่อสารของคางคาวที่ใช้ในการล่าเหยื่อ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในการขับไล่คางคาวออกจากพื้นที่ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัย โดยทำการวัดด้วยเครื่อง Audio Analysis ดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.8 ความเข้มเสียงต่ำสุดของวงจรสร้างสัญญาณรบกวน



รูปที่ 5.9 กราฟสัญญาณที่ได้จากวงจรรบกวนสัญญาณ

ในการทดสอบพบว่าวงจรที่ทำการออกแบบมานั้นสามารถสร้างสัญญาณรบกวนได้จริง ดังรูปที่ 5.7 และ 5.8 ที่วัดด้วยเครื่อง Audio Analysis ซึ่งปล่อยสัญญาณที่มีการสลับระดับ

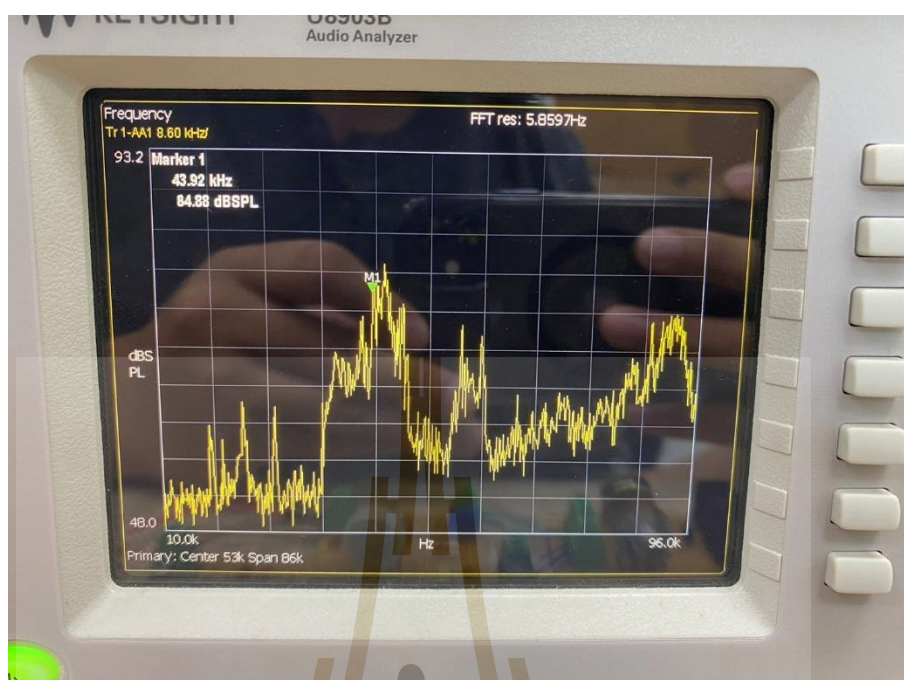
แรงดันไปเรื่อย ๆ ในแต่ละความถี่โดยครอบคลุมความถี่ที่ต้องการของระบบนี้ และได้ทำการทดสอบรูปสัญญาณด้วยเครื่องออสซิลโลสโคปดังรูปที่ 5.9 โดยมีสัญญาณที่มีคลื่นความถี่หลายความถี่ผสมอยู่รวมกันตามวัตถุประสงค์ เมื่อทำการทดสอบเรียบร้อยแล้วก็นำสัญญาณที่ได้ไปผสมกับสัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณในลำดับถัดไป

5.2.3 วงจรผสมสัญญาณ

การทดสอบวงจรผสมสัญญาณนี้นั้นจะทดสอบว่าเมื่อสัญญาณจาก 2 แหล่งคือสัญญาณจากวงจรขยายสัญญาณที่มีแหล่งเสียงต้นทางคือไฟล์เสียงของคังคาวจากคอมพิวเตอร์ ที่ต่อตรงเข้ากับวงจรเพื่อให้สัญญาณมีความชัดเจนขึ้นสำหรับการทดสอบนี้ และอีกแหล่งคือสัญญาณจากวงจรสร้างสัญญาณรบกวน เพื่อนำสัญญาณจาก 2 แหล่งนี้มาผสมกัน เพื่อทดสอบว่าสามารถผสมกันได้จริงก่อนนำไปเข้าสู่วงจรภาคขยายกำลัง ซึ่งทดสอบด้วยเครื่อง Audio Analysis โดยมีลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ทดสอบวงจรผสมสัญญาณด้วยเครื่อง Audio Analysis



รูปที่ 5.11 สัญญาณของวงจรผสมสัญญาณเมื่อวัดด้วยเครื่อง Audio Analysis

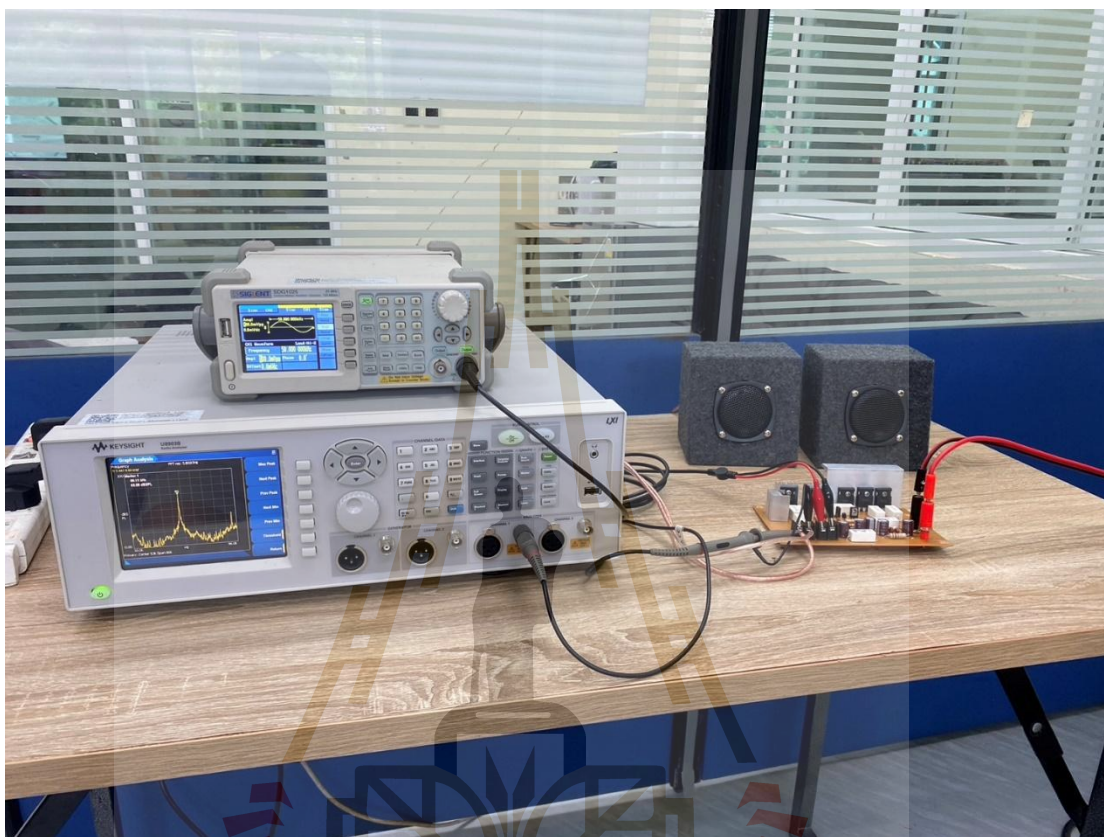
จากการทดสอบพบว่าสัญญาณที่ออกจากวงจรผสมสัญญาณนั้นเป็นสัญญาณที่มีการผสมกันแล้วซึ่งตรวจสอบได้จากการที่เครื่อง Audio Analysis มีแรงดันสัญญาณทั้ง 2 สัญญาณอยู่ร่วมกัน สุดท้ายนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่ภาคขยายกำลัง

5.2.4 วงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)

ภาคสุดท้ายของระบบ คือวงจรขยายกำลังงาน ที่จะนำไปต่อกับลำโพงในขั้นตอนสุดท้าย สำหรับการทดสอบวงจรขยายกำลังงานนั้นจะทดสอบโดยการใช้สัญญาณอินพุต จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ที่ความถี่ 10 kHz ถึง 100 kHz โดยจ่ายแรงดันเท่ากับแรงดันที่ทดสอบในวงจรผสมสัญญาณ เพื่อทดสอบกำลังงานของระบบในแต่ละความถี่ และทดสอบการแมตซ์อิมพีแดนซ์ด้วยเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบคือ $6.1052 - j339.02$ โอห์ม และอิมพีแดนซ์ของลำโพงที่ใช้คือ $4.3326 + j3.0086$ โอห์ม จากการวัดจริงด้วยเครื่องวัดอิมพีแดนซ์ เพื่อทดสอบว่าลักษณะของสัญญาณดีขึ้นหรือไม่ถ้าได้รับการแมตซ์อิมพีแดนซ์ เพื่อแสดงให้เห็นว่าลำโพงทั่วไปก็สามารถใช้งานได้ถึงความถี่สูงเพียงแต่จะต้องทำชุดวงจรแมตซ์ให้เหมาะสมนั่นเอง

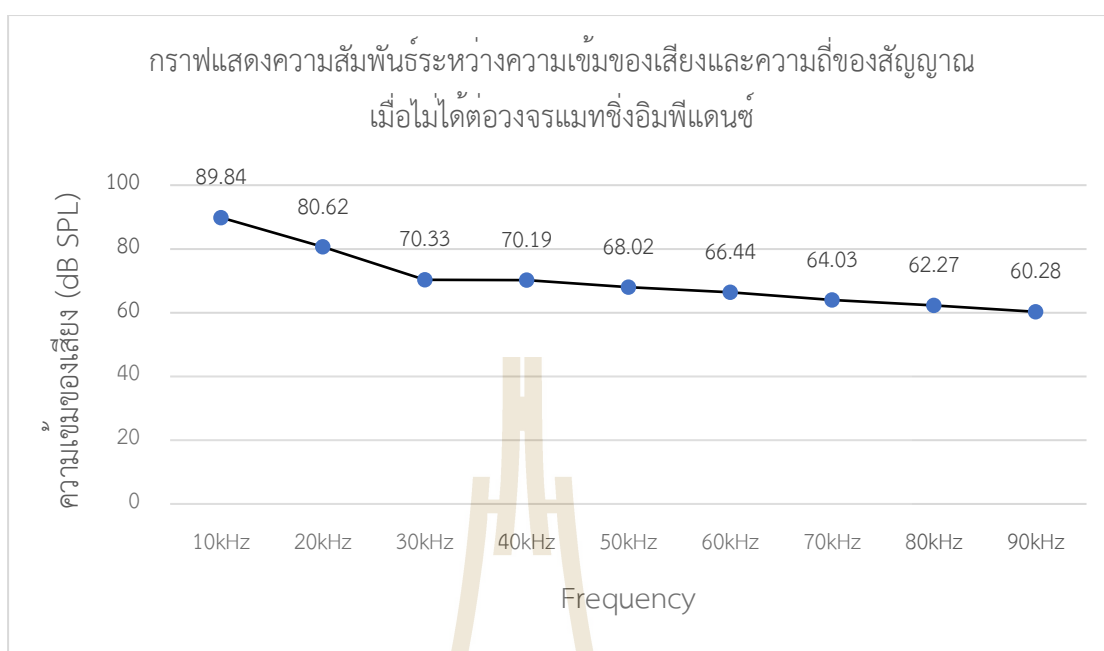
การทดสอบวงจรขยายกำลังงาน โดยใช้อินพุตจากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์ ที่ความถี่ต่าง ๆ โดยใช้เครื่อง Audio Analysis ในการวิเคราะห์สัญญาณ และดูค่าความเข้มของเสียง ดังรูปที่

5.12 ทั้งในรูปแบบที่ยังไม่ได้ต่อวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์เข้ากับวงจรขยายกำลังงาน และแบบที่ต่อวงจรแมตซ์อิมพีแดนซ์เข้ากับวงจรขยายกำลังงาน เพื่อเปรียบเทียบกัน

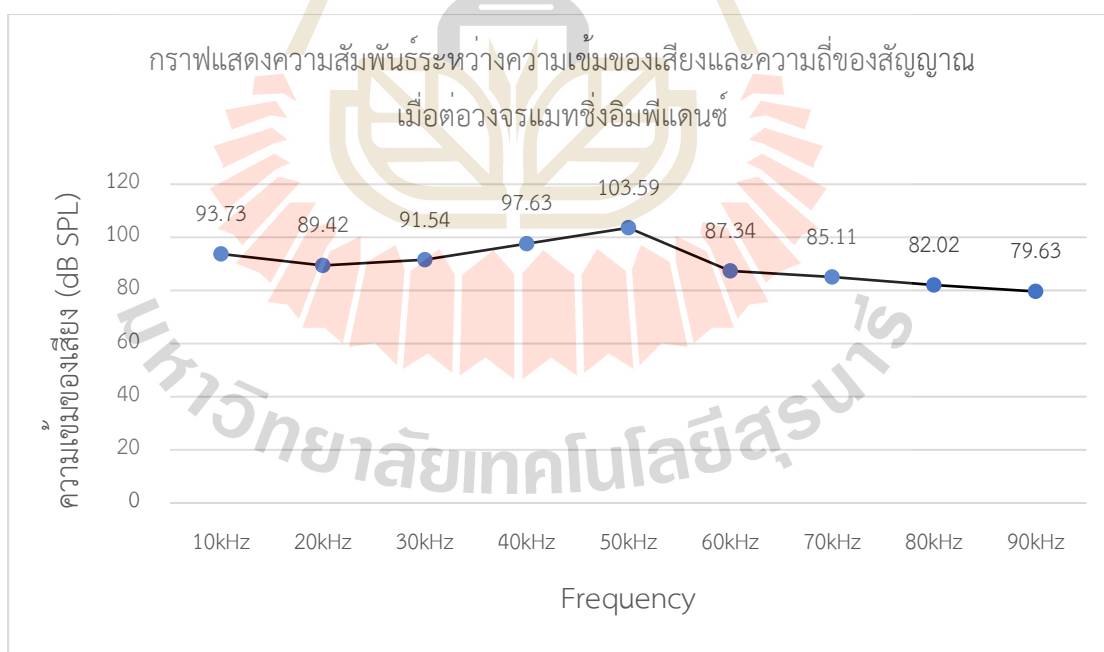


รูปที่ 5.12 ทดสอบวงจรขยายกำลังงาน (Power Amplifier)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

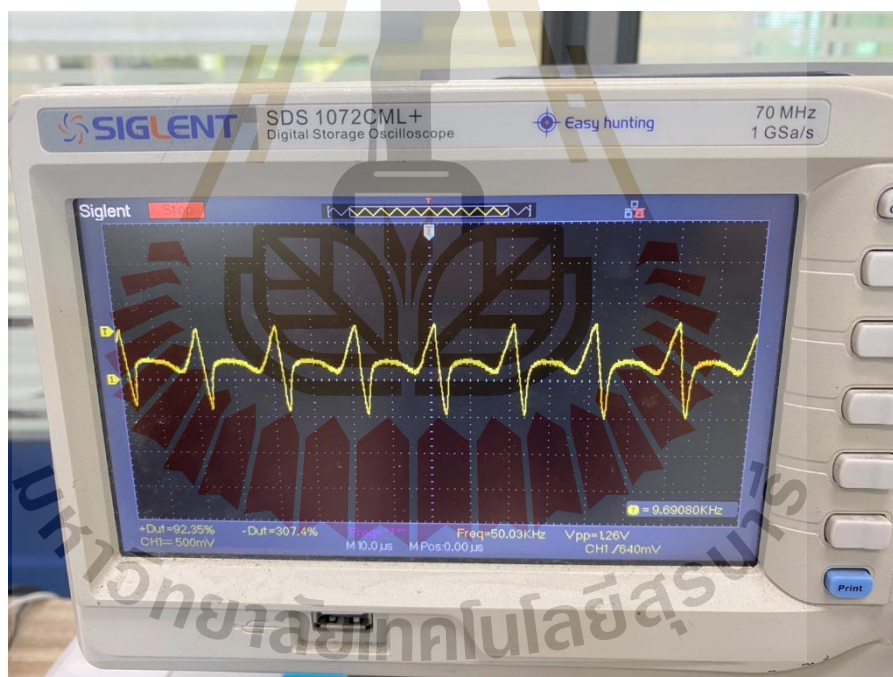


รูปที่ 5.13 กราฟเปรียบเทียบความเข้มของเสียงและความถี่ของสัญญาณ เมื่อไม่ได้ต่อวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์

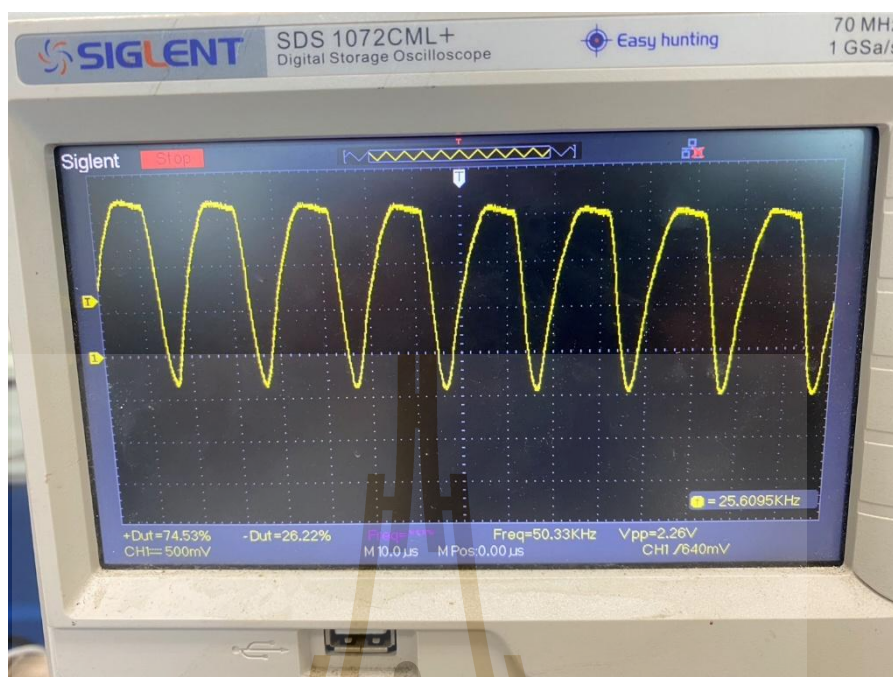


รูปที่ 5.14 กราฟเปรียบเทียบความเข้มของเสียงและความถี่ของสัญญาณ เมื่อต่อวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์

จากรูปที่ 5.13 และ 5.14 ในทดสอบพบว่าเมื่อไม่ใช้วงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ในการเชื่อมต่อระหว่างวงจรขยายกำลังงานและลำโพง ระบบจะใช้กำลังงานที่ต่ำลงอย่างมากเมื่อเทียบกับการใช้วงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ที่ช่วยให้สามารถส่งผ่านกำลังงานได้สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม เมื่อความถี่ของสัญญาณเพิ่มขึ้น ค่าอิมพีแดนซ์ของลำโพงจะเปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากคุณสมบัติของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำ ซึ่งส่งผลให้กำลังงานลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับความถี่ 50 kHz ที่มีการออกแบบวงจรแมทชิ่งไว้แล้ว สิ่งนี้ยืนยันถึงความสำคัญของวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายโอนกำลังงานในระบบ และยังแสดงให้เห็นว่าลำโพงทั่วไปสามารถทำงานได้ที่ความถี่สูงเมื่อมีการออกแบบวงจรแมทชิ่งที่เหมาะสมกับอิมพีแดนซ์ของลำโพง โดยเมื่อทดสอบโดยใช้เครื่องออสซิลโลสโคปวัดสัญญาณโดยรูปที่ 5.15 เป็นสัญญาณเมื่อไม่ได้ต่อกับวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ และรูปที่ 5.16 เป็นสัญญาณเมื่อต่อวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์ จะพบว่าสัญญาณที่ต่อวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์นั้นมีความเรียบและดีกว่าการที่ไม่ได้ต่อวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์



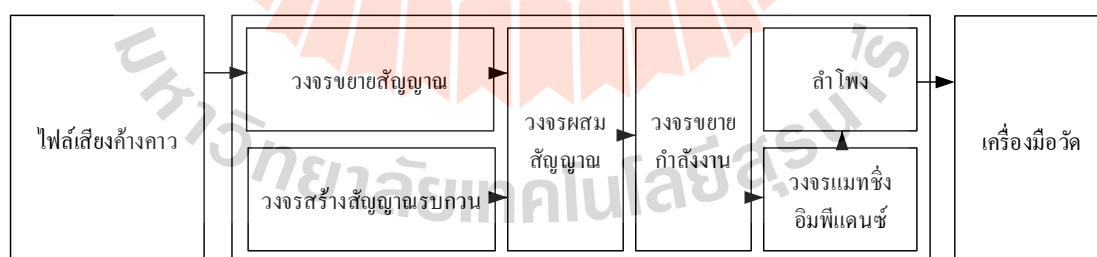
รูปที่ 5.15 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อไม่ได้ต่อกับวงจรแมทชิ่งอิมพีแดนซ์



รูปที่ 5.16 สัญญาณเอาต์พุตเมื่อต่อกับวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์

5.3 การทดสอบทั้งระบบ

ในการทดสอบระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณของคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับนั้น โดยทำการต่อวงจรทั้งหมดที่ได้ทำการสอบมาก่อนหน้านี้มาต่อร่วมกันเพื่อทดสอบถึงความเป็นไปได้ของระบบในการใช้ขับไล่ค้างคาวดังรูปที่ 5.17



รูปที่ 5.17 การเชื่อมต่อการทดลองของระบบ



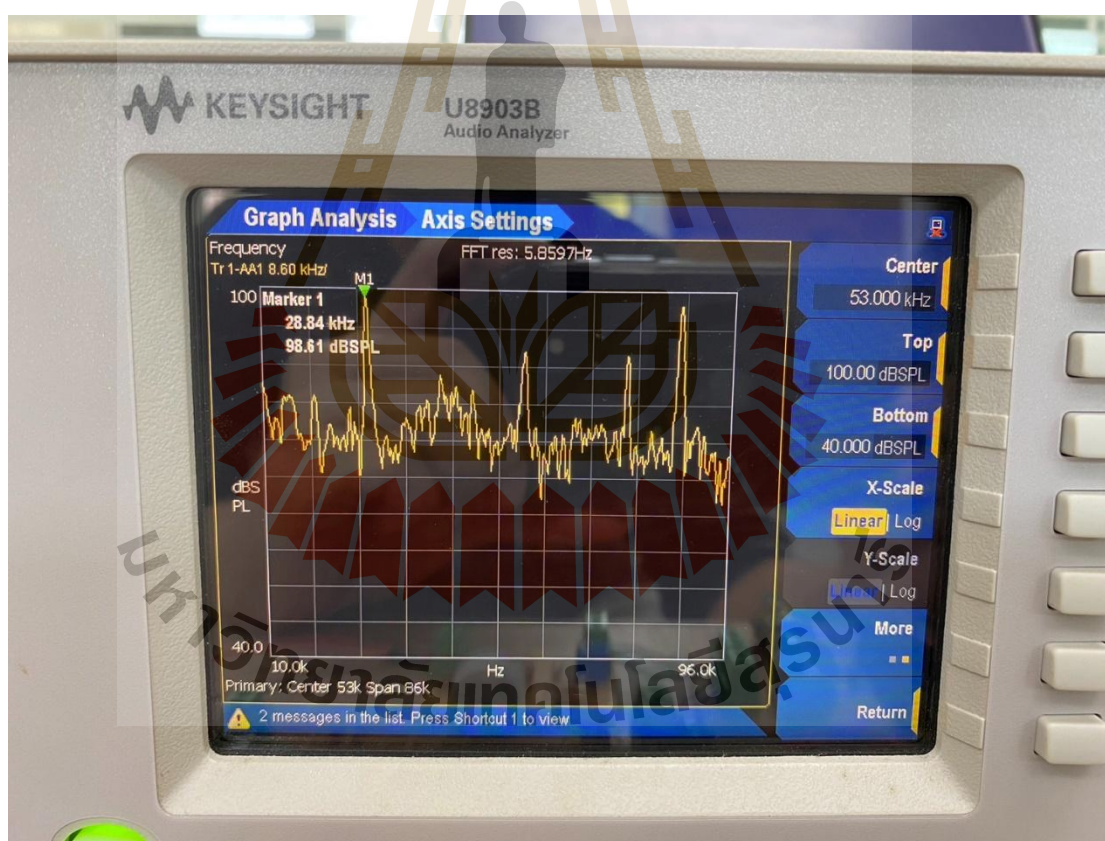
รูปที่ 5.18 การเชื่อมต่อทดสอบของระบบจริง

จากรูปที่ 5.17 และ 5.18 แสดงถึงกระบวนการทดสอบที่ออกแบบมาเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบขับไล่คางคาว โดยขั้นตอนเริ่มต้นจากการนำไฟล์เสียงของคางคาวที่ได้ถูกบันทึกไว้ในสภาพแวดล้อมจริงมาใช้งาน ไฟล์เสียงนี้ถูกนำเข้าสู่ระบบขับไล่คางคาวซึ่งทำงานโดยประยุกต์ใช้วิธีการผสมสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงที่หลากหลายเพื่อสร้างเสียงที่มีความเข้มข้นและซับซ้อนยิ่งขึ้น โดยเริ่มจากการเล่นไฟล์เสียงผ่านคอมพิวเตอร์เพื่อจำลองเสียงคางคาวที่ใกล้เคียงกับสภาพการใช้งานจริง หลังจากนั้นสัญญาณจากคอมพิวเตอร์จะถูกส่งไปยังวงจรขยายสัญญาณ ซึ่งทำหน้าที่เพิ่มแรงดันของสัญญาณให้อยู่ในระดับที่สูงพอที่จะทำให้สามารถนำสัญญาณไปผสมกับสัญญาณรบกวนที่ถูกสร้างขึ้นโดยวงจรสร้างสัญญาณรบกวน

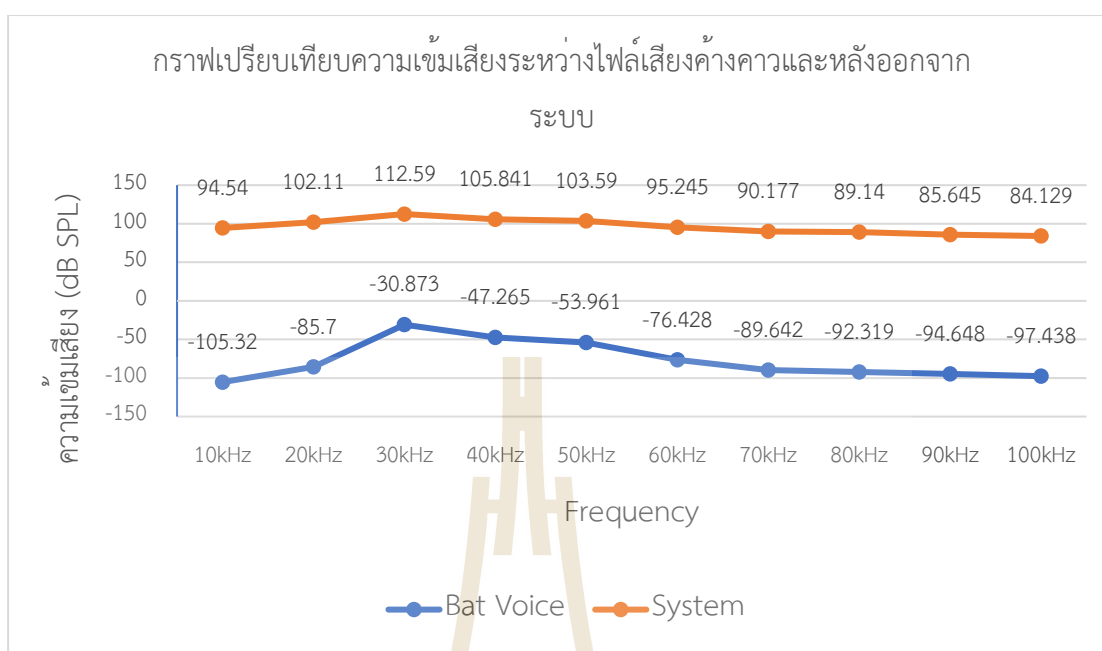
การผสมสัญญาณนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้สัญญาณที่มีองค์ประกอบของเสียงคางคาวผสมกับสัญญาณรบกวนอย่างเหมาะสม ซึ่งจะทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีคุณสมบัติที่ทำให้คางคาวเกิดความรำคาญ จากนั้น สัญญาณที่ผ่านการผสมแล้วจะถูกนำเข้าสู่วงจรขยายกำลังงาน เพื่อขยายสัญญาณให้มีระดับความเข้มเสียงสูงกว่า 90 dB SPL ซึ่งเป็นระดับที่เพียงพอในการรบกวนหรือทำให้คางคาวไม่สบายใจจนบินหนีออกจากพื้นที่นั้น ๆ ในขั้นตอนนี้ วงจรแมทซิงอิมพีแดนซ์ถูกใช้เพื่อลดการสูญเสีย

กำลังงาน โดยการทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของเอาต์พุตวงจรขยายกำลังงานตรงกับอิมพีแดนซ์ของลำโพงที่ใช้ การแมทชิงอิมพีแดนซ์นี้มีความสำคัญอย่างยิ่งในการถ่ายโอนกำลังงานจากวงจรขยายไปยังลำโพงอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งช่วยเพิ่มความเข้มเสียงให้ถึงเกณฑ์ที่กำหนด

สุดท้าย การวัดผลของการทดสอบนี้ดำเนินการโดยใช้เครื่อง Audio Analysis ซึ่งทำหน้าที่ในการตรวจสอบรูปแบบคลื่นของสัญญาณและความเข้มของเสียงในระบบ ข้อมูลที่ได้จากการทดสอบจะแสดงเป็นกราฟในรูปที่ 5.19 ซึ่งแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณหลังผ่านการขยายและการผสม โดยผลที่ได้ช่วยยืนยันว่า ระบบสามารถสร้างสัญญาณเสียงที่มีความเข้มข้นพอที่จะรบกวนคังคาวได้ และการออกแบบวงจรขยายกำลังงานร่วมกับวงจรแมทชิงอิมพีแดนซ์นั้นมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนพลังงานไปยังลำโพง และนำค่าไปพล็อตกราฟดังรูปที่ 5.20 โดยเปรียบเทียบระหว่างค่าสัญญาณของไฟล์เสียงคังคาวเมื่อยังไม่ได้ต่อเข้ากับระบบกับค่าที่ได้เมื่อทั้งระบบ



รูปที่ 5.19 กราฟสัญญาณที่ได้จากเครื่อง Audio Analysis ของระบบ



รูปที่ 5.20 กราฟเปรียบเทียบความเข้มเสียงระหว่างไฟล์เสียงค้างคาวและหลังออกจากระบบ

จากผลการทดสอบที่แสดงในรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 พบว่าหลังจากเปิดใช้งานระบบขับไล่ค้างคาวแล้ว เสียงของค้างคาวที่มาจากไฟล์เสียงที่บันทึกไว้สามารถถูกขยายให้มีความเข้มเสียงสูงกว่า 90 dB SPL ตามที่กำหนดไว้ นอกจากนี้ ระบบยังสร้างสัญญาณรบกวนที่ครอบคลุมทุกย่านความถี่ โดยมีระดับความดังเฉลี่ยที่ประมาณ 96.3 dB SPL ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการออกแบบระบบเพื่อรบกวนการสื่อสารหรือการนำทางของค้างคาว ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

5.4 สรุป

ระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับนั้น มีวงจรภายในระบบหลายภาคส่วน นำมาซึ่งการทดสอบในแต่ละวงจร จากการทดสอบพบว่าวงจรขยายสัญญาณในขั้นตอนแรกสามารถใช้งานได้ โดยการนำเสียงของค้างคาวเข้าสู่วงจรโดยตรง สำหรับวงจรอื่น ๆ นั้นไม่ว่าจะเป็นวงจรผสมสัญญาณ หรือวงจรสร้างสัญญาณรบกวนสามารถนำไปใช้งานได้จริงและยังสามารถนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่วงจรขยายกำลังงานให้ได้มาซึ่งความเข้มเสียงที่มากกว่า 90 dB SPL เพื่อให้สามารถขับไล่ค้างคาวได้ที่ระยะ 5 เมตร และยังได้มีการทดสอบว่าสามารถใช้ลำโพงทวีตเตอร์ทั่วไปในการใช้งานที่คลื่นเสียงความถี่สูงในย่านอัลตราโซนิกหรือก็คือตั้งแต่ 20 kHz ถึง 100 kHz ได้ อีกด้วยโดยการปรับวงจรที่ทำการแมทชิงอิมพีแดนซ์ให้เหมาะสม โดยรวมแล้วระบบขับไล่ค้างคาวโดย

ประยุกต์ใช้คลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ สามารถนำไปใช้งานได้ในระดับห้องปฏิบัติการ และเพื่อทดสอบถึงความเป็นไปได้ในการขับไล่คางคาว



บทที่ 6

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการออกแบบและสร้างระบบขับไล่ค้างคาวโดยประยุกต์ใช้วิธีผสมสัญญาณคลื่นเสียงความถี่สูงหลายระดับ เพื่อใช้ในการขับไล่ค้างคาว และใช้ลำโพงที่มีขายทั่วไปตามท้องตลาดในการนำเป็นตัวปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงไปยังค้างคาวเพื่อขับไล่ออกจากบริเวณที่มีการติดตั้งระบบ จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับค้างคาวและวิธีการขับไล่ค้างคาวด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงพบว่าค้างคาวมีการตอบสนองต่อคลื่นเสียงความถี่สูงไม่เหมือนกับมนุษย์ โดยค้างคาวมีความไวต่อเสียงในช่วงคลื่นอัลตราโซนิก (20kHz – 100kHz) ซึ่งเป็นช่วงความถี่ที่หูของมนุษย์นั้นไม่สามารถได้ยิน โดยค้างคาวมีสมองที่สามารถแยกแยะคลื่นเสียงได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วน auditory cortex ที่มีบทบาทสำคัญในการแยกแยะและประมวลผลข้อมูลเสียง เพื่อใช้ในการตรวจจับเหยื่อและเพื่อใช้ในการเดินทางในเวลากลางคืน โดยค้างคาวจะปล่อยคลื่นเสียงความถี่สูงออกมา และรับคลื่นเสียงกลับเข้าสู่หูเพื่อนำไปวิเคราะห์ว่าสัญญาณที่ถูกส่งกลับมานั้นมีลักษณะเป็นอย่างไร

โดยการขับไล่ค้างคาวนั้นมีด้วยกันหลากหลายวิธีแต่วิธีที่สามารถนำไปใช้งานได้จริงและไม่ส่งผลต่อค้างคาวมากนักก็คือการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในการขับไล่ จากการศึกษาค้นคว้าการวิจัยพบว่า ค้างคาวจะมีปฏิกิริยาต่อคลื่นเสียงความถี่สูงในที่มีความเข้าในระดับ 90 dB SPL ซึ่งเป็นระดับความดังที่ทำให้ค้างคาวรู้สึกรำคาญได้ ทำให้จากการศึกษาค้นคว้าพบว่า ควรออกแบบระบบให้ได้ความเข้มเสียงในระดับ 90 dB SPL ในระยะที่เราการ ต่อมาจึงได้เริ่มศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างวงจรคลื่นเสียงความถี่สูง โดยมีการนำวงจรสร้างสัญญาณรบกวนเข้ามาในระบบเพื่อทำการผสมสัญญาณกับเสียงของค้างคาวเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการขับไล่ค้างคาวมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังมีการทำวงจรแมทซ์อิมพีแดนซ์เพื่อให้สามารถนำระบบนี้ไปใช้งานร่วมกับลำโพงทวิตเตอร์ทั่วไปได้ โดยไม่มีความจำเป็นที่จะต้องออกแบบสร้างลำโพงขึ้นมาใหม่ให้เปลืองงบประมาณ เนื่องจากลำโพงทั่วไปนั้นสามารถใช้งานที่คลื่นเสียงความถี่สูงที่มาก 20 kHz ได้ จากการศึกษาในงานวิจัยฉบับนี้ ที่ได้ทำการวัดอิมพีแดนซ์ของลำโพงและพบว่าสามารถนำไปใช้งานได้จริง

สำหรับแนวทางการพัฒนาระบบให้ดียิ่งขึ้นนั้นควรที่จะใช้คลื่นเสียงที่รับมาจากค้างคาวจริง แทนการใช้ไฟล์เสียงของค้างคาวเนื่องจากค้างคาวแต่ละชนิดใช้คลื่นเสียงในช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน และเพื่อให้สามารถขับไล่ค้างคาวได้ในระยะที่ไกลขึ้นนั้นควรใช้งานลำโพงร่วมกับสายอากาศแบบจานสะท้อนเพื่อให้สามารถขยายสัญญาณได้ดียิ่งขึ้นและมีทิศทางที่แม่นยำสำหรับการขับไล่ค้างคาว

เอกสารอ้างอิง

- García-Rosales, F., Beetz, M. J., Cabral-Calderin, Y., Kössl, M., & Hechavarria, J. C. (2018). Neuronal coding of multiscale temporal features in communication sequences within the bat auditory cortex. *Communications biology*, 1(1), 200.
- Kanwal, J. S., & Rauschecker, J. P. (2007). Auditory cortex of bats and primates: managing species-specific calls for social communication. *Frontiers in bioscience: a journal and virtual library*, 12, 4621.
- Sedlock, J. L., Gomes, D. G., Rubin, J. J., Woody, S., Hadi, B. A., & Barber, J. R. (2021). A phantom ultrasonic insect chorus repels low-flying bats, but most are undeterred. *Functional Ecology*, 35(12), 2743-2752.
- Arnett, E. B., Hein, C. D., Schirmacher, M. R., Huso, M. M., & Szewczak, J. M. (2013). Evaluating the effectiveness of an ultrasonic acoustic deterrent for reducing bat fatalities at wind turbines. *PloS one*, 8(6), e65794.
- Finch, D., Schofield, H., & Mathews, F. (2020). Traffic noise playback reduces the activity and feeding behaviour of free-living bats. *Environmental Pollution*, 263, 114405.
- Bank of Thailand., Total Value and Quantity of Exports Classified by Product Group, Thailand, 2020.
- Kalyanee, B., and Sawai, W., Bats of Thailand, Thailand, 2003.
- Austin, K. B., H. H. Thomas, Jr. P. R. Moosman, K. Veasna, B. Crepeau, R. Farnsworth, B. Huff, P. Lustig, and M. Tatro. Capturing the Auditory Experience of Behaving Bats: A Preliminary Study. In 2009 International Conference on Computing, Engineering and Information, 123-126, 2009.
- Whitaker, J.O. National Audubon Society Field Guide to North American Mammals. New York, 312, 1996.

- Abbaszadeh, Javad, Herlina Rahimb, Sahar Sarrafic, Ruzairi Bin, and Herlina Rahim., Design and Manufacture an Ultrasonic Dispersion System with Automatic Frequency Adjusting Property, *Sensors & Transducers*, 126, 2011.
- Götze, S., A. Denzinger, and H.-U. Schnitzler, High frequency social calls indicate food source defense in foraging Common pipistrelle bats. *Scientific Reports*, 2020. 10(1): p. 5764.
- Geipel, I., et al., Bats Actively Use Leaves as Specular Reflectors to Detect Acoustically Camouflaged Prey. *Current Biology*, 2019. 29(16): p. 2731-2736.e3.
- ณัฐพล โชติศรีสุภรัตน์. การหาตำแหน่งที่อยู่ของวัตถุโดยใช้เสียงสะท้อน (echolocation) ในสัตว์. แหล่งที่มา: <http://www.thaiphysoc.org/>.





รายชื่อบทความวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

บทความวิชาการ

- K. Tanthai, T. Thosdeekoraphat, C. Thongsopa and S. Santalunai, “Design a High-Frequency Sound Wave Receiving and Transmission System Mimicking Real Signals from The Source by an Ultrasonic Transduced,” in 2021 The 15th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC), Indonesia, Feb. 2021.



DESIGN A HIGH-FREQUENCY SOUND WAVE RECEIVING AND TRANSMISSION SYSTEM MIMICKING REAL SIGNALS FROM THE SOURCE BY AN ULTRASONIC TRANSDUCER

*Kittisak Tanthai⁽¹⁾, *Thanaset Thodsdeekorapat⁽¹⁾, Chanchai Thongsopa⁽¹⁾,
Samran Santalunai⁽¹⁾

⁽¹⁾ School of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology, Thailand

*Corresponding author: m6300982@g.sut.ac.th, thanaset@sut.ac.th

ABSTRACT

This research proposes to design and construct a system for transmitting and transmitting high-frequency sound waves, mimicking real signals from sources by ultrasonic transducers. Systems designed to protect and repel animals using ultrasonic waves, such as bats, ultrasonic transducers are used as sound wave transducers and devices. The frequency used for testing is between 20 kHz and 80 kHz, which is the ultrasonic frequency range. In this research, Oscilloscopes are mainly used because of their relatively low frequency. It will measure the broadcasting pattern of the reflector antenna. And measures the signal entering and exiting the system in the FFT mode of the Oscilloscope.

Keywords: *ultrasonic, wave, high-frequency sound wave, ultrasonic transducer*

1. INTRODUCTION

At present, the fruit industry in Thailand It is a large export industry. And generates a lot of income for Thailand According to statistics, the export of fruit in Thailand has continued to increase (Bank of Thailand 2020), most of which is the output of large fruit factories. Obtained from continuous harvesting every year and every year there will be many problems such as the product being eaten by various animals and damaged some of the produce. And cannot be exported May cause a lack of income from this section Most of the animals that affect farmers are poultry. To keep flying and eating fruit such as bats, etc.

There are many types of bats. The food of bats is insects and various fruits (Kalyanee Boonkird & Sawai Wanghongsa (2003)), the fruits eaten by bats are mostly fruits produced from farmers' gardens. It also creates a nuisance to the villagers in some areas. Because bats like to build nests on the roof of the house Bats are active during the night. It will use the ear to navigate. The bat's ears are large in response to the sounds they hear. Bats send high-frequency sound waves to resonate with surrounding objects. The sound is then reflected back to the bat, causing the bat to perceive its surroundings (Austin et al. 2009). Use that will be in the ultrasonic sound Frequency 20 kHz to 100 kHz (Whitaker, J.O (1996)).

As mentioned above, the high-frequency sound transmission system is designed to mimic the real signal from the source using ultrasonic transducers, the principle is to amplify the sound wave by the bat and amplify it to high power. Send it back to the fishy trade. Using ultrasonic transducers as a receiver and transmitter, it is used in conjunction with a reflector antenna to increase the signal reception and transmission rates. This will benefit farmers suffering from fruit bats in their gardens. Including other animals that use high-frequency sound wave.

2. EXPERIMENT

The experiment was divided into two experiments: the diffusion experiment of the reflective antenna and receiving - sending high frequency sound waves into the system and leaving the system.

2.1 The experiment for the diffusion of the reflector antenna

The echo antenna propagation experiment will be an experiment to discover the theoretical (Brueckmann 1963)) form of antenna transmission by using a reflection antenna in conjunction with an Ultrasonic transducer to receive signals from outside External signal, we will use a Function Generator to send a signal to the Flyback Converter circuit and send it to the antenna using Ultrasonic transducer is a transmitter, as shown in Fig. 1 The experiment will be performed at frequencies of 20 kHz, 55 kHz and 80 kHz.



Fig. 1. Test for the diffusion pattern of the antenna

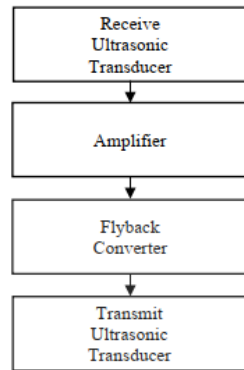


Fig. 2. Block Diagram

From the block diagram in Fig. 2, the whole circuit is obtained as shown in Fig 5. This circuit will be used to experiment in Section 2.2 Receiving - Transmission high-frequency sound waves into the system and leaving the system

2.2 Receiving - Transmission high-frequency sound waves into the system and leaving the system

2.2.1 Receiving high-frequency sound waves into the system

Experiment for receiving high-frequency sound waves into the system. It is a test that our system can actually receive the signal. This test will be tested by using the early circuit of the Block Diagram as shown in Fig. 2 by using a series of simulators to transmit sound waves of the bat as a signal to the system. It consists of a Function Generator that supplies the signal to the Flyback Converter circuit and sends it out to the antenna using a Ultrasonic transducer as the transmitter. An ultrasonic transducer receives the signal in the system and uses an amplifier to read the input signal, which is performed at frequencies of 20 kHz to 80 kHz.



Fig. 3. Ultrasonic receiver test

2.2.2 Transmission of high-frequency sound waves when leaving the system

An experiment to transmit high-frequency sound waves from a system is a test that our system can actually transmit the signal. Using the circuit in the latter part of the block diagram shown in Fig 2, the input signal is used as a function generator instead of the receive Ultrasonic transducer to find the lowest signal this system can operate, where the applicable function generator can deliver a minimum of 4 mVpp. And frequencies from 20 kHz to 80 kHz. This test measures the output signal on the ultrasonic transducer at the output signal.



Fig. 4. Ultrasonic transmitter test

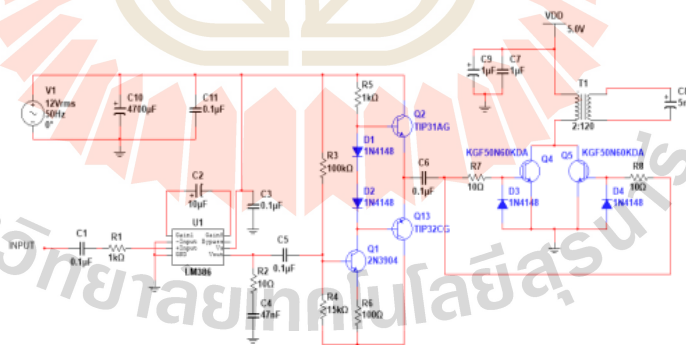


Fig. 5. The circuit of high-frequency sound wave receiving and transmission system mimicking real signals from the source by an ultrasonic transducer

3.1 The results obtained from the diffusion antenna diffusion experiment

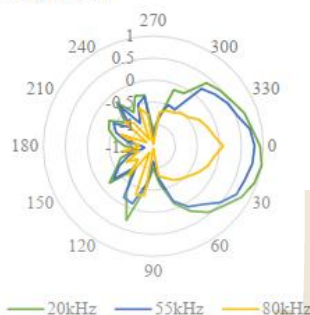


Fig. 6. Distribution patterns of a reflector antenna

The results obtained from the experiments measure the propagation of the signal of the dish antenna has a direction that is directed forward which each frequency will get different distance values when compared to each other, you will see that the lower the frequency, the farther forward can be propagated than the high frequency as shown in Fig 6.

3.2 The results obtained from the experiments receiving high-frequency sound waves into the system



Fig. 7. The receiving signal is 20 kHz when passing through the amplifier circuit

Oscilloscopes used to read the lowest value of -68 dBVrms, if the input signal is lower, it cannot be read. And when testing the receiver, this system can actually receive the signal as Fig 7 shows that at 20 kHz it can read -19.2 dBVrms and when the frequency increases to 80 kHz, it will know that this system can receive the signal best. Received at a frequency of 45 kHz, as shown in Fig 8.

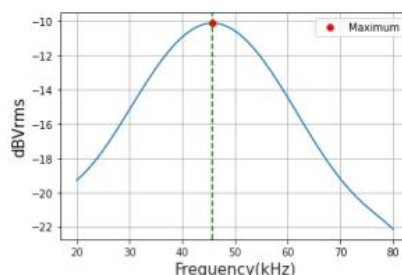


Fig. 8. The graph shows the frequency at which the signal can receive the best signal

3.3 The results obtained from the experiment transmission high-frequency sound waves when leaving the system

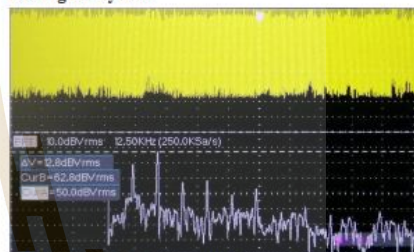


Fig. 9. The graph shows the frequency at which the signal can receive the best signal

When testing the transmitter, this system can actually transmit the signal, as Fig 9 shows it is 20 kHz capable, the output value is 50 dBVrms, which is a reasonable value due to the ultrasonic transducer 300 Vpp or 50 watts is required to operate (Abbaszadeh et al. 2011). When changing the unit, the value should exceed 40.5 dBVrms. After that, increase the frequency gradually, from 20 kHz to 80 kHz, knowing that the optimal output frequency is 45 kHz, as shown in Fig 10.

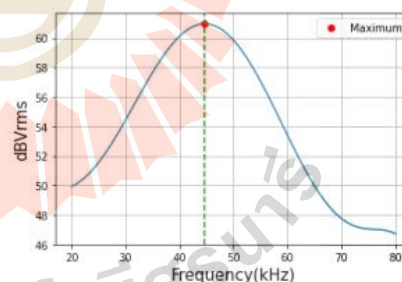


Fig. 10. The graph shows the frequency at which the signal can receive the best signal

4. CONCLUSIONS

In the experiment, the propagation of a reflector antenna had a more forward direction than it could be. And when put into practice Therefore, it is necessary to turn the reflector to the bat or the area to be repelled. This system works best when the batting frequency is 45 kHz.

From the experiment, it was known that this system could actually be used. The system was then tested on real bats, selecting where the bats were and installing equipment from the following evening, the results showed that none of the bats remained.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Suranaree University of Technology (SUT).

REFERENCES

- Bank of Thailand., Total Value and Quantity of Exports Classified by Product Group, Thailand, 2020.
- Kalyanee, B., and Sawai, W., Bats of Thailand, Thailand, 2003.
- Austin, K. B., H. H. Thomas, Jr. P. R. Moosman, K. Veasna, B. Crepeau, R. Farnsworth, B. Huff, P. Lustig, and M. Tatro. Capturing the Auditory Experience of Behaving Bats: A Preliminary Study. In 2009 International Conference on Computing, Engineering and Information, 123-126, 2009.
- Whitaker, J.O. National Audubon Society Field Guide to North American Mammals. New York, 312, 1996.
- Brueckmann, H. Antenna pattern measurement by satellite, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 11: 143-47, 1963.
- Abbaszadeh, Javad, Herlina Rahimb, Sahar Sarrafic, Ruzairi Bin, and Herlina Rahim., Design and Manufacture an Ultrasonic Dispersion System with Automatic Frequency Adjusting Property, Sensors & Transducers, 126, 2011.

PHOTOS AND INFORMATION



Kittisak Tanthai received the B.E. (2019) degrees in electronics engineering from Suranaree University of Technology. Currently studying at a Master's degree in Electrical Engineering, Suranaree University of Technology.



Thanaset Thodsdeekorapat received the B.E. (2006), M.E. (2009), and D.E. (2013) degrees in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology. He is an Assistant Professor, Department of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology. His Current interests include Hyperthermia, RF & Microwave circuit design, Microwave heating



Chanchai Thongsopa received the B.E. (1991) degrees in Electronics Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, M.E. (1996) degrees in Electrical Engineering from Kasetsart University, and D.E. (2002) degrees in Electrical Engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. He is an Associate Professor, Department of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology. His Current interests include RF and Microwave circuit design, Active antenna, Heating application, Network Design.



Samran Santalunai received the B.E. (2007), M.E. (2009), and D.E. (2014) degrees in Telecommunication Engineering from Suranaree University of Technology. He is a Lecturer, Department of Electronic Engineering, Suranaree University of Technology. His Current interests include Design a dielectric heater system for eliminating pests, design an induction heating circuit for heating metallic materials, designing radio frequency and microwave circuits for applications in various fields.

ประวัติผู้เขียน

นายกิตติศักดิ์ แทนไทย เกิดเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม พ.ศ. 2541 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนปลายจากโรงเรียนพระหฤทัยนนทบุรี อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จังหวัดนครราชสีมา เมื่อปี พ.ศ. 2563 ต่อมาในปี พ.ศ. 2563 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต หลักสูตรวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

