

# การส่งเสียงที่เป็นความลับ

ปริญญา ออบูน

ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

## บทคัดย่อ

โปรเจกต์นำเสนอระบบการสื่อสารเสียงที่เป็นความลับโดยใช้เทคนิคการเลื่อนความถี่สัญญาณไปยังย่านที่มนุษย์ได้ยินแต่จับใจความไม่ได้ การศึกษานี้พัฒนาระบบการสื่อสารที่มีอยู่เดิมโดยพัฒนาด้านความปลอดภัยสูงโดยประยุกต์จากหลักการการประมวลผลสัญญาณดิจิทัล ได้แก่ การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) การแปลง Hilbert (Hilbert Transform) และการใช้ตัวกรองความถี่ (Frequency Filters) เพื่อให้การสื่อสารเสียงมีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้นและสามารถนำมาใช้งานได้จริงระบบประกอบด้วยส่วนสำคัญสองคือ ภาควิชา (Transmitter) ทำหน้าที่รับเสียงจากสัญญาณไมโครโฟน ลดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง และเลื่อนความถี่ไปยังช่วงที่กำหนดคือ 10-18 kHz ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเสียงที่แปลงกลับมาได้อยู่ในเกณฑ์คุณภาพดี โดยมีค่า Signal-to-Noise Ratio (SNR) ระหว่าง 16.09-17.48 dB ค่า Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) ระหว่าง 37.38-39.79 dB ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-correlation) สูงถึง 0.9876-0.9914 ค่าความผิดเพี้ยนของสเปกตรัม (Spectral Distortion) เป็นศูนย์ และค่าคุณภาพเสียงตามการรับรู้ของมนุษย์ (PESQ) ระหว่าง 3.98-4.11 แสดงให้เห็นว่าระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงของการสื่อสารที่พัฒนาขึ้น ระบบนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานตามความปลอดภัยเช่น การสื่อสารทางทหาร การประชุมลับ หรือการสื่อสารในพื้นที่สาธารณะที่ต้องการความเป็นส่วนตัว

คำสำคัญ: การเลื่อนความถี่, การแปลง Hilbert, การสื่อสารเสียงที่เป็นความลับ, การประมวลผลสัญญาณเสียง, การกรองความถี่

## Abstract

This project presents a confidential voice communication system utilizing frequency shifting techniques to transfer signals to ranges that humans can hear but cannot comprehend. The study enhances existing communication systems by improving security through the application of digital signal processing principles, including Fourier Transform, Hilbert Transform, and Frequency Filters, to increase voice communication security and enable practical implementation. The system consists of two main components: the Transmitter, which receives sound from microphone signals, reduces background noise, and shifts the frequency to a designated range of 10-18 kHz. Test results demonstrate that the converted sound maintains good quality, with Signal-to-Noise Ratio (SNR) between 16.09-17.48 dB, Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) between 37.38-39.79 dB, Cross-correlation values as high as 0.9876-0.9914, Spectral Distortion of zero, and Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ) between 3.98-4.11. These metrics indicate the high efficiency of this developed communication system. The system can be applied in security-sensitive contexts such as military communications, confidential meetings, or private communications in public spaces where privacy is required.

Keywords: Frequency Shifting, Hilbert Transform, Secure Voice Communication, Audio Signal Processing, Frequency Filtering

## 1 บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

การสื่อสารด้วยเสียงเป็นวิธีการสื่อสารแบบพื้นฐานที่สุดของมนุษย์และในปัจจุบัน มีความสะดวก รวดเร็วมาก อย่างไรก็ตาม การสื่อสารด้วยเสียงในที่สาธารณะหรือในสภาพแวดล้อมที่ไม่ปลอดภัยส่งผลทำให้การรับรู้ไหลของข้อมูลที่เป็นความลับหรือข้อมูลส่วนบุคคลสามารถรับรู้ได้ง่ายเนื่องจาก สัญญาณเสียงสามารถกระจายไปได้

การใช้แนวคิดเรื่องเสียงของการเลื่อนความถี่ของสัญญาณเป็นการนำเสนอทางเลือกที่ในการแก้ปัญหาที่กล่าวมาได้กล่าวไปในข้างต้น โดยแก้ปัญหาโดยศึกษาจากหลักการทางสรีรวิทยาของการได้ยินของมนุษย์ เลือกที่น่าสนใจในการแก้ปัญหาดังกล่าวโดยอาศัยหลักการทางสรีรวิทยาของการได้ยินของมนุษย์ ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วงความถี่ประมาณ 20 Hz ถึง 20 kHz และโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ความถี่ของเสียงพูดมนุษย์ส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 300 Hz ถึง 3 kHz การเลื่อนความถี่ของสัญญาณเสียงไปยัง ความถี่ที่มนุษย์ได้ยินแต่ไม่สามารถเข้าใจได้ จะช่วยในการสื่อสารมีความปลอดภัยมากขึ้น โดยที่สัญญาณเสียงที่ส่งออกไปจะไม่สามารถเข้าใจได้โดยบุคคลที่ไม่มีอุปกรณ์รับสัญญาณที่เหมาะสม

### 1.2 วัตถุประสงค์

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์หลักดังต่อไปนี้:

1. เพิ่มพัฒนาระบบการสื่อสารเสียงที่มีความปลอดภัยสูง โดยใช้เทคนิคการเลื่อนความถี่ของเสียงไปยังย่าน 10-18 kHz
2. เพื่อประยุกต์ใช้ทฤษฎีและเทคนิคการประมวลผลสัญญาณ ได้แก่ การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) การแปลง Hilbert (Hilbert Transform) และการใช้ตัวกรองความถี่ (Frequency Filters) ในการพัฒนาระบบการสื่อสารเสียงที่เป็นความลับ
3. เพื่อพัฒนาระบบที่สามารถส่งสัญญาณเสียงได้ 2 ช่องพร้อมกันโดยการเลื่อนแต่ละสัญญาณไปยังช่วงความถี่ที่แตกต่างกัน และสามารถแยกสัญญาณเหล่านั้นออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพ
4. เพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบโดยใช้เมตริกที่หลากหลาย ได้แก่ Signal-to-Noise Ratio (SNR),

Mean Square Error (MSE), Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR), Cross-correlation, Spectral Distortion และ Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ)

### 1.3 ขอบเขต

โครงการนี้มีขอบเขตดังต่อไปนี้:

1. ขอบเขตด้านการปฏิบัติ
  - โครงการมุ่งเน้นการพัฒนาระบบการสื่อสารความลับโดยใช้เทคนิคในการเลื่อนความถี่ในช่วง 10-18 kHz
  - ใช้การแปลงแบบ Hilbert ร่วมกับฟังก์ชัน Complex exponential ในการเลื่อนความถี่ของสัญญาณเสียง
  - ใช้การแปลงฟูเรียร์แบบเร็ว (FFT) และการแปลงฟูเรียร์แบบเร็วผกผัน (IFFT) ในการวิเคราะห์สัญญาณโดเมนความถี่
  - ใช้ตัวกรองความถี่แบบ Low-pass filter ในการลดสัญญาณรบกวนพื้นหลังและ Band-pass filter ในการแยกสัญญาณ
2. ขอบเขตด้านการทดสอบ
  - ทดสอบโดยมีไฟล์เสียง (wav) แตกต่างกัน
  - ทดสอบโดยมีเสียงพื้นหลังน้อย
  - ใช้อุปกรณ์บันทึกเสียงเป็นไมค์ของหูฟังและลำโพงมาตรฐานที่มีอยู่ทั่วไปในคอมพิวเตอร์
3. ข้อจำกัด
  - ระบบนี้ไม่ได้เข้ารหัสแต่เป็นการเลื่อนความถี่เป็นกลไกในการรักษาความปลอดภัย
  - ระบบนี้ออกแบบมาสำหรับการสื่อสารระยะใกล้มาก และข้อจำกัดในสภาพแวดล้อมเสียงรบกวนสูง

## 2 ทฤษฎีที่นำเสนอ

### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Theoretical Background)

#### 2.1.1 การแปลงฟูรีเยร์ (Fourier Transform)

การแปลงฟูรีเยร์เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้เราสามารถประมวลผลสัญญาณโดยแปลงจากสัญญาณจากโดเมนเวลา (time domain) ไปเป็นโดเมนความถี่ได้ (frequency domain)

การแปลงฟูรีเยร์แบบต่อเนื่อง (Continuous Fourier Transform) สำหรับสัญญาณ  $x(t)$  สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

เมื่อ

$x(f)$  คือสัญญาณในโดเมนความถี่

$e^{-j2\pi ft}$  คือฟังก์ชันแบบ complex exponential

สำหรับสัญญาณดิจิทัลในที่นี้จะทำการใช้การแปลงฟูรีเยร์แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Fourier Transform, DFT) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$X[e^{j\omega}] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n] e^{-j\omega n} \quad (2)$$

เมื่อ

$X[n]$  คือสัญญาณในโดเมนเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง

$X[e^{j\omega}]$  คือสัญญาณในโดเมนความถี่

$N$  คือจำนวนตัวอย่างทั้งหมด

ในทางปฏิบัติ การคำนวณ DFT จะใช้อัลกอริทึม Fast Fourier Transform (FFT) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงกว่ามาก โดยลดความซับซ้อนของการคำนวณจาก  $O(n^2)$  ไปเป็น  $O(n \log n)$  ในการคำนวณในโครงการนี้ใช้ FFT ในการวิเคราะห์สัญญาณเสียงเพื่อพิจารณาองค์ประกอบความถี่ก่อนที่จะทำการประมวลผลขั้นต่อไป

#### 2.1.2 ตัวกรองความถี่ (Frequency Filters)

ตัวกรองความถี่ (Frequency Filters) เป็นตัวกรองที่ออกแบบมาสำหรับการให้สัญญาณผ่านในช่วงที่กำหนด โดยแบ่งเป็นประเภทหลักๆ ดังนี้

- Low-pass Filter (LPF): ยอมให้ความถี่ต่ำผ่านได้ แต่ความถี่สูงจะถูกกรองออก
- High-pass Filter (HPF): ยอมให้ความถี่สูงผ่านได้ แต่ความถี่ต่ำจะถูกกรองออก

- Band-pass Filter (BPF): ยอมให้ความถี่ในช่วงที่กำหนดผ่านได้ แต่กรองความถี่อื่นออก

- Band-stop Filter (BSF): กรองความถี่ในช่วงที่กำหนดออก แต่ยอมให้ความถี่อื่นผ่านได้

ในโครงการนี้ จะใช้ตัวกรองแบบ Low-pass (LPF) เพื่อลดสัญญาณรบกวนบนความถี่สูงในสัญญาณต้นฉบับที่อัดมาเข้าสู่ตัวระบบ

#### 2.1.3 การเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting)

การเลื่อนความถี่ (Frequency Shifting) เป็นเทคนิคการใช้เปลี่ยนตำแหน่งของสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณ โดยการเลื่อนความถี่จะทำการเลื่อนขึ้นหรือเลื่อนลงด้วยค่าคงที่ การเลื่อนความถี่แตกต่างจากการปรับขนาดของความถี่ (Scaling) ของแกนความถี่ ในโดเมนเวลาการเลื่อนความถี่สามารถทำได้โดยทำการคูณสัญญาณกับฟังก์ชัน Complex exponential ดังสมการที่ (3)

$$y(t) = x(t) e^{j2\pi f_0 t} \quad (3)$$

เมื่อ

$y(t)$  คือสัญญาณที่ถูกเลื่อนความถี่

$x(t)$  คือสัญญาณต้นฉบับ

$f_0$  คือความถี่ที่ต้องการเปลี่ยน

ในโครงการนี้ จะทำการใช้การแปลง Hilbert (Hilbert transform) ร่วมกับ Complex exponential เพื่อเลื่อนความถี่ของสัญญาณเสียงไปยังย่านที่กำหนดและมีความถี่มากกว่าช่วงที่มนุษย์ได้ยินปกติ ทำให้การสื่อสารมีความปลอดภัยเพิ่มมากขึ้น

#### 2.1.4 การแปลง Hilbert (Hilbert Transform)

การแปลง Hilbert เป็นการสร้างสัญญาณวิเคราะห์ (analytic signal) เป็นสัญญาณเชิงซ้อนที่มีส่วนจริงและส่วนจินตภาพ เป็นการแปลง Hilbert ของสัญญาณต้นฉบับ ดังสมการที่ (4)

$$x_a(t) = x(t) + j \cdot H\{x(t)\} \quad (4)$$

เมื่อ

$x_a(t)$  เป็นสัญญาณวิเคราะห์

$x(t)$  เป็นสัญญาณต้นฉบับ

$H\{x(t)\}$  คือการแปลง Hilbert ของ  $x(t)$

สัญญาณวิเคราะห์ที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สเปกตรัมความถี่ของมันมีเฉพาะที่ความถี่บวกเท่านั้น ทำให้เป็นเครื่องมือที่เหมาะสม

สำหรับการเลื่อนความถี่ โดยการคูณกับ Complex exponential

ในโครงงานนี้ การแปลง Hilbert ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างสัญญาณวิเคราะห์ที่สำคัญสำหรับการเลื่อนความถี่ของสัญญาณเสียงทั้งในขั้นตอนการส่ง

## 2.2 การประเมินประสิทธิภาพของระบบ

การประเมินประสิทธิภาพของระบบการส่งเสียงที่เป็นความลับมีการทดสอบเมื่อแปลงกลับดังนี้:

1. Signal-to-Noise Ratio (SNR): วัดอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณ "ต่อกำลังของสัญญาณ" รบกวนแสดงในหน่วย dB
2. Mean Square Error (MSE): วัดค่าเฉลี่ยของกำลังสองต่อกำลังของความแตกต่างระหว่างสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ได้รับ
3. Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR): เป็นเมตริกที่ดัดแปลงจาก MSE ใช้วัดผลคุณภาพของสัญญาณ
4. Cross-correlation: วัดความคล้ายคลึงระหว่างสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ได้รับมีค่าตั้งแต่ -1 ถึง 1
5. Spectral Distortion: วัดความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ได้รับ
6. Perceptual Evaluation of Speech Quality (PESQ): เป็นเมตริกที่จำลองการรับรู้ของมนุษย์ต่อคุณภาพเสียง มีค่าตั้งแต่ 1.0 ถึง 4.5

## 2.3 วิธีการแก้ปัญหา

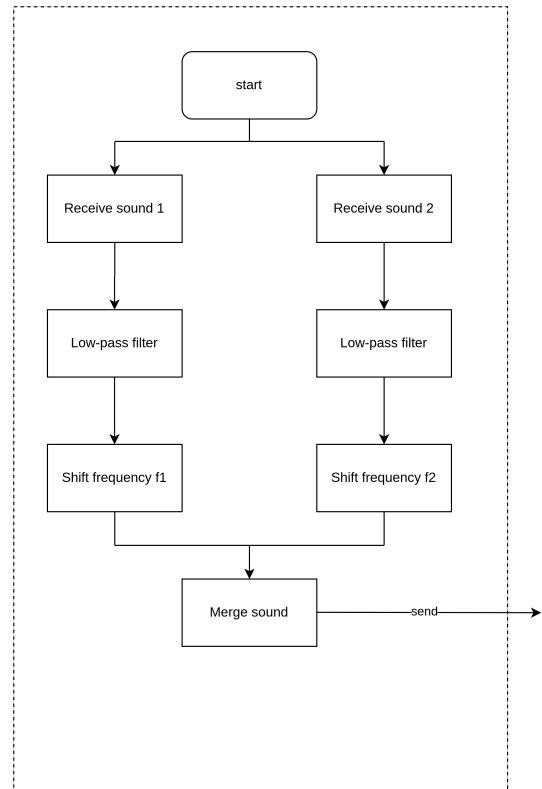
การดำเนินการในโครงงานนี้แบ่งออกเป็นขั้นตอนดังต่อไปนี้

### 2.3.1 การออกแบบระบบโดยรวม

ระบบการส่งเสียงที่เป็นความลับนี้ประกอบด้วย 2 ส่วนของผู้ส่ง (transmitter) และส่วนของผู้รับ (receiver) โดยมีหลักการทำงานดังนี้

1. ผู้ส่ง (transmitter)
  - รับสัญญาณจากเสียงไมโครโฟน
  - ประมวลผลสัญญาณเพื่อลดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

- เลื่อนความถี่ไปยังย่านที่กำหนด
  - ส่งสัญญาณผ่านลำโพง
2. ผู้รับ (receiver)
    - รับสัญญาณจากเสียงไมโครโฟนของผู้ส่ง
    - กรองสัญญาณเฉพาะช่วงความถี่ที่กำหนด
    - เลื่อนความถี่กลับมาที่ย่านที่มนุษย์ได้ยิน



รูปที่ 1: แผนภาพแสดงภาพรวมของระบบ

### 2.3.2 การพัฒนาซอฟต์แวร์

โครงงานนี้พัฒนาซอฟต์แวร์ด้วยภาษา Python 3.12.3 และใช้ไลบรารีดังต่อไปนี้:

- NumPy: สำหรับการจัดการอาร์เรย์และการคำนวณทางคณิตศาสตร์
- SciPy: สำหรับการประมวลผลสัญญาณ รวมถึง Hilbert transform และตัวกรองความถี่
- Sounddevice: สำหรับการเข้าถึงไมโครโฟนและลำโพง
- Matplotlib: สำหรับการสร้างกราฟและการวิเคราะห์สัญญาณเชิงภาพ
- Soundfile: สำหรับการอ่านและเขียนไฟล์เสียง

### 2.3.3 การลดสัญญาณรบกวนพื้นหลัง

การลดสัญญาณรบกวนพื้นหลังโดยใช้การกรองความถี่แบบ Low-pass filter ดังนี้:

1. แปลงความถี่เสียงจากโดเมนเวลาไปยังโดเมนความถี่โดยใช้ FFT
2. สร้างมาสก์ (mask) สำหรับกรองโดยเลือกช่วง 0-3000 Hz จะเป็นความถี่หลักสำหรับเสียงพูดของมนุษย์
3. คูณสเปกตรัมความถี่ของสัญญาณกับมาสก์เพื่อเอาความถี่ที่ต้องการ
4. แปลงกลับมาจากโดเมนความถี่ไปยังโดเมนเวลาโดยใช้ IFFT (Inverse Fast Fourier Transform)

การใช้ Low-pass filter ในขั้นตอนนี้มีความสำคัญเพราะช่วยกำจัดสัญญาณรบกวนความถี่สูงก่อนที่จะเลื่อนไปยังย่านความถี่สูงจะช่วยให้สัญญาณมีคุณภาพที่ดีขึ้น

### 2.3.4 การเลื่อนความถี่

การเลื่อนความถี่เป็นขั้นตอนที่สำคัญเพื่อให้การสื่อสารปลอดภัย โดยมีขั้นตอนดังนี้:

1. แปลงสัญญาณให้เป็นสัญญาณวิเคราะห์โดยใช้การแปลง Hilbert
2. สร้างเวกเตอร์เวลาสำหรับการคำนวณ
3. คูณสัญญาณวิเคราะห์กับ Complex exponential ที่มีความถี่ตามที่กำหนดไว้
4. นำส่วนจริงของผลลัพธ์เป็นสัญญาณที่ถูกเลื่อนความถี่แล้ว

### 2.3.5 การรวมและแยกสัญญาณ

ในระบบนี้ สามารถส่งสัญญาณพร้อมกันได้หลายสัญญาณเสียงโดยแต่ละเสียงจะเลื่อนไปยังความถี่ที่แตกต่างกัน และจะถูก รวมเข้าด้วยกัน:

1. การรวมสัญญาณในภาคส่ง
  - เลื่อนสัญญาณที่ 1 ไปยังความถี่ 10000 Hz
  - เลื่อนสัญญาณที่ 2 ไปยังความถี่ 15000 Hz
  - รวมสัญญาณทั้งสองเข้าด้วยกัน
  - การปรับระดับของสัญญาณเพื่อป้องกันการเกิด คลิปปีง (clipping)
2. การทดสอบแยกสัญญาณในภาครับ

- ใช้ Band-pass Filter กรองสัญญาณเฉพาะช่วงที่ต้องการ
- เลื่อนความถี่กลับมายังที่เดิม
- บันทึกไฟล์เสียงแต่ละสัญญาณที่แยกได้

## 3 ผลการทดลอง

ระบบการส่งเสียงที่เป็นความลับที่ถูกพัฒนาขึ้นมา ได้ถูกทดสอบโดยใช้ไฟล์เสียงต้นฉบับสองไฟล์ ทำการเลื่อนความถี่แล้ว รวมเข้าด้วยกัน จากนั้นทำการแยกสัญญาณและประเมินประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบไฟล์เสียงต้นฉบับและไฟล์เสียงที่สกัดมาได้

### 3.1 การประเมินเชิงปริมาณ (Quantitative Evaluation)

#### 3.1.1 Signal-to-Noise Ratio (SNR)

SNR เป็นการวัดอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณเสียงต้นฉบับต่อกำลังของสัญญาณรบกวน ดังสมการที่ 5:

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{noise}}} \right) (5)$$

ผลการวัด SNR สำหรับสัญญาณที่วัดได้ :

- สัญญาณที่ 1 (เลื่อนจาก 10 kHz) : 17.4842 dB
- สัญญาณที่ 2 (เลื่อนจาก 15 kHz) : 16.0871 dB

ค่า SNR เป็นการวัดอัตราส่วนระหว่างกำลังของสัญญาณที่ต้องการต่อสัญญาณรบกวน โดยค่าที่สูงกว่าแสดงถึงคุณภาพสัญญาณที่ดีกว่า ค่าที่วัดได้ทั้งสองเสียงมีค่าสูงกว่า 15 dB ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่ยอมรับได้สำหรับการสื่อสารด้วยเสียงพูด

การที่ค่า SNR อยู่ในช่วง 16-17 dB มีความหมายว่า:

- กำลังของสัญญาณที่ต้องการมีค่ามากกว่ากำลังของสัญญาณรบกวนประมาณ 40-50 เท่า
- สัญญาณเสียงจะมีความชัดเจนเพียงพอสำหรับการสื่อสาร แม้จะมีสัญญาณรบกวนอยู่บ้าง
- เสียง A มี SNR สูงกว่าเล็กน้อย แสดงว่ามีอัตราส่วนสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนที่ดีกว่า

#### 3.1.2 Mean Square Error (MSE)

MSE วัดค่าเฉลี่ยของกำลังสองของความแตกต่างระหว่างสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ผ่านการกรองดังสมการที่ (6):

$$MSE = (1/n) \cdot \sum (x[i] - y[i])^2$$

- สัญญาณที่ 1: 196213.1875

- สัญญาณที่ 2: 112629.0781

MSE คือค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดกำลังสองระหว่างสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ผ่านการประมวลผล ค่า MSE ที่ต่ำกว่าแสดงถึงความแตกต่างที่น้อยกว่าระหว่างสัญญาณทั้งสอง

ผลจากการวัด:

- สัญญาณที่ 2 มีค่า MSE น้อยกว่าสัญญาณที่ 1 อย่างมีนัยสำคัญ
- การมีค่า MSE ที่ต่ำกว่าของสัญญาณที่ 2 บ่งชี้ว่ามีความแม่นยำในการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ (reconstruction) ที่ดีกว่า

### 3.1.3 Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR)

- สัญญาณที่ 1: 37.38 dB
- สัญญาณที่ 2: 39.79 dB

PSNR เป็นการวัดคุณภาพของการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่ โดยจะทำการเปรียบเทียบกำลังสูงสุดของสัญญาณ ค่า

PSNR ที่สูงจะแสดงถึงคุณภาพการสร้างสัญญาณขึ้นมาใหม่กว่า

ผลการวัด:

- ทั้งสองสัญญาณมีค่า PSNR สูงกว่า 35 dB แสดงว่าคุณภาพเสียงอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก
- สัญญาณที่ 2 มีค่า PSNR สูงกว่าสัญญาณที่ 1 สอดคล้องกับค่า MSE ที่ต่ำกว่า

## 3.2 เมทริกซ์สหสัมพันธ์และสเปกตรัม(Correlation and Spectral Metrics)

### 3.2.1 ค่าสหสัมพันธ์ไขว้ (Cross-correlation)

- สัญญาณที่ 1 : 0.9914
- สัญญาณที่ 2 : 0.9876

Cross-correlation วัดค่าความคล้ายกันของสัญญาณที่ประมวลผลและสัญญาณต้นฉบับ แสดงให้เห็นว่าค่าใกล้เคียง 1 มีความหมายว่าสัญญาณมีความใกล้เคียงสูงมาก

การวิเคราะห์ :

- ทั้งสองสัญญาณมีค่า cross-correlation สูงมาก (มากกว่า 0.985) แสดงว่าทั้งสองสัญญาณที่ผ่านการประมวลผลยังรักษาความสอดคล้องกับสัญญาณเดิมได้เกือบสมบูรณ์

- ค่าที่สูงมากแสดงให้เห็นว่ากระบวนการ frequency-shifting และทำการกู้คืนสัญญาณไม่ได้ทำให้เกิดการเลื่อนของเฟสและการเปลี่ยนแปลงทางเวลาอย่างมีนัยสำคัญ

- สัญญาณที่ 1: มีค่า cross-correlation สูงกว่าสัญญาณที่ 2 แสดงถึงความสอดคล้องทางเวลาที่ดีกว่า

### 3.2.2 ความผิดเพี้ยนของสเปกตรัม (Spectral Distortion)

- ทั้งสองสัญญาณ : 0.0000

Spectral Distortion วัดความแตกต่างระหว่างสเปกตรัมของสัญญาณต้นฉบับและสัญญาณที่ผ่านการประมวลผล ค่าที่ต่ำแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงในโดเมนความถี่ที่น้อย

การวิเคราะห์ :

- ค่าความผิดเพี้ยนของสเปกตรัมเป็นศูนย์สำหรับทั้งสองสัญญาณ แสดงว่าคุณลักษณะในโดเมนความถี่ของสัญญาณมีความสมบูรณ์
- ความผิดเพี้ยนของสเปกตรัมเป็นศูนย์หมายความว่าอัลกอริทึมการเลื่อนความถี่และการกู้คืนสัญญาณทำได้แม่นยำมาก

## 3.3 คุณภาพเชิงการรับรู้ (Perceptual Quality)

PESQ (Perceptual Evaluation of Speech Quality)

- สัญญาณที่ 1: 3.98
- สัญญาณที่ 2: 4.11

PESQ เป็นเมทริกซ์มาตรฐานที่ใช้วัดคุณภาพของเสียงพูดตามการรับรู้ของมนุษย์ มาตรฐาน PESQ มีคะแนนตั้งแต่ 1.0 ถึง 4.5 โดยคะแนนที่สูงกว่าแสดงถึงคุณภาพการรับรู้ที่ดีกว่า

การวิเคราะห์:

- ทั้งสองสัญญาณมีคะแนน PESQ สูงมาก (สูงกว่า 3.95) อยู่ในระดับที่สูงมากๆ
- สัญญาณที่ 2 มีคะแนน PESQ สูงกว่าเสียง A เล็กน้อย (4.11 เทียบกับ 3.98)

## 4 การวิเคราะห์และสรุปผล

### 4.1 ประสิทธิภาพของการเลื่อนความถี่

การเลื่อนความถี่โดยใช้การแปลง Hilbert และ Complex exponential มีประสิทธิภาพสูงในการเลื่อนความถี่ไปยังช่วงที่ได้

กำหนดไว้ โดยไม่ทำให้สัญญาณในโดเมนเวลาเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจาก:

1. การรักษาความสัมพันธ์ของความถี่: การเลื่อนความถี่แบบ additive ทำให้ช่วงห่างระหว่างความถี่ต่างๆยังเหมือนเดิม
2. สัญญาณวิเคราะห์: การใช้ Hilbert เพื่อสร้างสัญญาณวิเคราะห์ ทำให้มีเพียงความถี่ด้านบวกเท่านั้น ช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นเมื่อเลื่อนความถี่ (aliasing) เพื่อทำการเลื่อนความถี่
3. ประสิทธิภาพเชิงคำนวณ: การเลื่อนด้วยวิธีที่นำเสนอไปนี้มีประสิทธิภาพการคำนวณ Complex exponential ทำได้อย่างรวดเร็ว

ข้อจำกัดในการเลื่อนความถี่:

1. ข้อจำกัดทางด้านการสุ่ม: ตามทฤษฎีของ Nyquist-Shannon อัตราการสุ่มต้องมากกว่าสองเท่าของความถี่สูงสุดในสัญญาณ ดังนั้นการเลื่อนความถี่ไปสูงมากๆ อาจถูกจำกัดด้วยอัตราการสุ่มของระบบ

## 4.2 ประสิทธิภาพของการกรองสัญญาณ

การใช้ Low-pass filter และ Band-pass filter ในระบบมีประสิทธิภาพที่ดีมากในการเลือกช่วงความถี่ที่ต้องการโดย:

1. Low-pass filter: สามารถกรองสัญญาณรบกวนความถี่สูงออกได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้สัญญาณต้นฉบับมีคุณภาพดีขึ้นก่อนมีการเลื่อนความถี่
2. Band-pass filter: ช่วยในการแยกสัญญาณในช่วงความถี่ต่างๆแต่ละชุดออกจากสัญญาณรวมได้
3. ความชันของการตัด (Roll-off): การใช้ตัวกรอง Butterworth order 5 ให้ความชันของการตัดที่เหมาะสม สามารถคัดแยกสัญญาณได้ดีโดยไม่สูญเสียข้อมูล

ข้อจำกัดในการกรองสัญญาณ:

1. การสูญเสียพลังงานขอบของความถี่: การกรองทำให้พลังงานของขอบความถี่ลดลง ส่งผลทำให้สูญเสียข้อมูลบางส่วน

## 4.3 ประสิทธิภาพของการสื่อสารความลับ

ระบบที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพดีในแง่ของการรักษาความลับในการสื่อสาร เนื่องจาก:

1. การส่งในย่านความถี่ที่มนุษย์ได้ยินแต่ไม่สามารถเข้าใจได้: การเลื่อนความถี่ไปยัง 10-18 kHz ทำให้มนุษย์ส่วนใหญ่ได้ยิน แต่ไม่สามารถเข้าใจได้
2. การแยกสัญญาณหลายช่อง: ระบบสามารถส่งสัญญาณได้หลายช่องพร้อมกัน โดยแต่ละช่องอยู่ในความถี่ที่แตกต่างกัน ทำให้สามารถส่งข้อมูลได้พร้อมกันหลายชุด
3. ความยากในการดักจับและถอดรหัส: ผู้ที่ต้องการถอดรหัสไม่ทราบถึงความถี่ที่แน่นอนจะมีความยากในการถอดสัญญาณ

ข้อจำกัดในด้านความปลอดภัย:

1. ความเสี่ยงจากการวิเคราะห์สเปกตรัม: ผู้ที่มีเครื่องมือวิเคราะห์สเปกตรัมอาจสามารถตรวจพบว่ามีสัญญาณในความถี่ที่ไม่ปกติได้
2. ความปลอดภัยเชิงสัญญาณ: ระบบนี้ไม่ได้เข้ารหัสเพียงแค่เลื่อนไปยังความถี่สูง ถ้าผู้ดักฟังที่รู้เทคนิคสามารถถอดรหัสได้

## 5 กิตติกรรมประกาศ

โครงการเรื่องการส่งเสียงที่เป็นความลับสามารถดำเนินการจนประสบความสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์และสนับสนุนเป็นอย่างดีจาก อาจารย์ ดร.กิตติพล โหระพงศ์ ที่ได้กรุณาให้โอกาส คำปรึกษา ความรู้ ข้อคิด ข้อเสนอแนะและปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆทำให้โครงการนี้สมบูรณ์มากขึ้น และขอขอบคุณ นาย ศักย์ศรณ์ บัวเผือก ที่ได้ให้ข้อคิดในการทำโปรเจกต์นี้ ทำให้โปรเจกต์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

## 6 เอกสารอ้างอิง

- [1] Anthropic. (February 2025). Claude AI [Large language model]. <https://www.anthropic.com/claude>.
- [2] Bode, M. (n.d.). Playing and Recording Sound in Python. Real Python. Retrieved from

<https://realpython.com/playing-and-recording-sound-python/>

[3] **Horapong, Kittipol**. CH03-Fourier Transform and Frequency Analysis. Department of Computer Engineering, 2025.

[4] **Horapong, Kittipol**. CH04-Discrete-Time Fourier Transform Department of Computer Engineering, 2025.

[5] **Miracle-Ear**. (n.d.). Human Hearing Range. Retrieved from <https://www.miracle-ear.com/blog-news/human-hearing-range>

[6] **natthasit.n** (6 March 2025). [Online] Available : <https://kaset.s.art/TVACqG>.

[7] **OpenAI**. (February 2025). ChatGPT [Large language model]. <https://chat.openai.com/chat>.

[8] **Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W.** (2014). Discrete-time signal processing (3rd ed.). Pearson.

[9] **seaindia.in**. (n.d.). Human Voice Frequency Range. Retrieved from <https://seaindia.in/blogs/human-voice-frequency-range/>

[10] **Matplotlib**. (n.d.). Matplotlib: Python plotting. Retrieved from <https://matplotlib.org>