


24-2 학기 종합설계 II 졸업논문

오페라 음악과 비가청 주파수  
대역을 활용한 이미지 전송  
시스템 설계

고려대학교 전기전자공학부

2020171095 문 기 옥

지도교수: 신 원 재  (인)

학점: A+

2024 년 12 월

# 오페라 음악과 비가청 주파수 대역을 활용한 이미지 전송 시스템 설계

문기욱, 신원재  
고려대학교 전기전자공학부  
{okmunkiok, wjshin}@korea.ac.kr

## Design of an Image Transmission System Using Opera Music and Inaudible Frequency Bands

Kiok Mun, Wonjae Shin  
School of Electrical Engineering, Korea University

### 요 약

음파 통신은 데이터를 음파 신호로 변환하여 송신하고, 수신 측에서 이를 복원하는 통신 방식으로, 스피커와 마이크만으로 구현 가능하다는 장점이 있다. 그러나 가청 주파수를 이용한 음파 통신은 사람의 귀에 소음으로 들리는 문제가 있다. 본 논문에서는 사람의 귀에 들리지 않는 비가청 주파수 대역 (16kHz~20kHz)을 활용하여 소음 없이 데이터를 전송하고, 이 때 오페라 음악 파일을 시간 동기화 신호로 활용하여 사용자 경험을 향상시키는 이미지 전송 시스템을 설계한다. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술을 수정하여 비가청 주파수 대역만을 사용하도록 하였으며, 수신기에서는 시간 동기화를 위해 음악 신호와의 상호상관을 활용하였다. 실험 결과, 제안한 시스템은 기존 가청 주파수를 사용하는 음파 통신 대비 ISO 532-1:2017 의 Zwicker 방법에 따른 소음 수준이 일반적인 도시 소음 수준으로 감소하였으며, 중간값 필터를 적용함으로써 비트 오류율 (Bit Error Rate)이 평균 10.7% 개선됨을 알 수 있다. 또한, 잡음 환경에서도 평균 BER 이 0.0569 으로 우수한 성능을 확인할 수 있다.

### 1. 서 론

무선 통신은 공간을 통해 전자기파나 음파 등을 이용하여 정보를 전달하는 기술로, 현대 사회에서 중요한 역할을 하고 있다. 무선 통신의 한 종류로 **음파 통신**이 있으며, 이는 데이터를 음파 신호로 변환하여 스피커를 통해 송신하고, 마이크로 수신하여 원래 데이터를 복원하는 기술이다. 음파 통신은 스마트폰 등 대부분의 전자기기에 기본적으로 포함된 스피커와 마이크만으로 구현할 수 있고, 전파 통신의 간섭을 피할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 일반적으로 사용하는 가청 주파수 대역 (20Hz~16kHz)의 음파를 이용한 통신은 스피커를 통해 송신된 신호가 사람의 귀에 소음으로 들린다는 단점이 있다. 이러한 소음은 사용자 경험을 저해하고, 실제 환경에서의 활용을 어렵게 만든다.

본 논문에서는 사람의 귀에 들리지 않는 비가청 주파수 대역 (16kHz~20kHz)을 활용하여 소음 없이 데이터를 전송하고, 이때, 오페라 음악 파일을 시간 동기화 신호로 활용하여 사용자 경험을 향상시키는 이미지 전송 시스템을 설계한다. 비가청 주파수 대역만을 사용하기 위해 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 수정하였으며, 음악 신호와 중첩하여 통신함으로써 시간 동기화와 사용자 경험을 동시에 향상시켰다. 이후, 제안한 시스템에서 발생하는 소음을 ISO 532-1:2017 의 **Zwicker 방법**에 따라 측정하고, 잡음을 주입한 환경에서의 성능을 평가하였다 [1].

### 2. 시스템 모델

본 논문에서는 비가청 주파수 대역 (16kHz~20kHz)을 활용한 음파 통신을 통해 이미지를 송신기에서 수신기로 전송하는 시스템을 설계하였다. 구체적으로 송신기는 아래와 같은 과정을 통해 데이터를 스피커로 송신한다.

**1) 소스 코딩 (Source Coding):** 입력 이미지를 흑백으로 변환하고, 이진화하여 비트열로 변환한다. 이때, 흑백 이미지로 변환하기 위해 **Otsu 의 이진화 알고리즘**을 사용한다 [2].

**2) 채널 코딩 (Channel Coding):** 채널에서 발생할 수 있는 오류를 정정하기 위해 **1/3 반복 코드**를 적용한다. 즉, 각 비트를 세 번 반복하여 송신함으로써 오류 정정 능력을 향상시킨다.

**3) 변조 (Modulation):** 변조 단계에서는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying)를 사용하여 비트열을 심볼로 매핑한다. 두 개의 비트를 한 개의 심볼로 매핑하여 총 네 개의 위상(0°, 90°, 180°, 270°)에 대응시킨다.

**4) 다중화 (Multiplexing):** 다중화 단계에서는 서로 직교하는 부반송파를 활용하여 주파수 효율적으로 데이터를 전송하는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)을 사용한다. 일반적인 OFDM 의 경우, 전체 주파수 대역을 사용하나, **비가청 주파수 대역만 사용하기 위해 OFDM 의 부반송파 선택을 수정**하였다. 구체적인 내용은 3 장에서 설명하도록 한다.

**5) 동기화 신호 중첩 (Synchronization Signal Overlay):** 이미지 데이터 신호에 **오페라 음악 신호를 중첩**한다. 앞선 다중화 과정에서 데이터는 비가청 주파수

대역으로 전송하고, 오페라 음악 신호의 경우, 가청 주파수 대역으로만 전송되기 때문에 두 신호 사이의 간섭이 발생하지 않는다. 또한, 오페라 음악은 수신기에서 상호상관을 시간 동기화를 수행하는 역할을 한다. 이 때, 오페라 음악 신호는 송신기와 수신기 사이에 공유된다고 가정한다.

**6) 신호 전송:** Cyclic Prefix 와 채널 추정을 위한 Pilot 신호를 추가한 후 스피커를 통해 음파 신호를 송신한다.

다음으로, 수신기는 마이크를 통해 음파 신호를 수신한 후, 아래와 같은 단계를 수행하여 원래의 이미지를 복원한다.

**1) 신호 수신 및 시간 동기화 (Signal Reception and Time Synchronization):** 수신된 신호에서 시간 동기화를 위해 송신기와 공유된 음악 신호를 활용하여 상호상관을 계산한다. 이를 수행하는 구체적인 내용은 4 장에서 설명하도록 한다.

**2) 다중화 역연산 (Demultiplexing):** 송신기에서 보낸 데이터를 추출하기 위해 수신된 신호에 대한 FFT (Fast Fourier Transform)를 수행하도록 한다. 이때, 송신기에서 사용한 비가청 주파수 대역의 부반송파만을 선택한다.

**3) 복조 (Demodulation):** Pilot 신호를 바탕으로 채널을 추정하고, 채널 등화를 수행한 뒤 QPSK 복조를 통해 채널 코딩 된 데이터를 추정한다.

**4) 채널 디코딩 (Channel Decoding):** 3 번 반복된 비트 중 가장 많이 나타나는 비트로 채널 디코딩을 수행하는 다수결 투표 방식을 통해 원래의 비트로 복원한다.

**5) 소스 디코딩 (Source Decoding):** 복원된 비트열을 이용하여 이미지를 재구성한다.

덧붙여, 본 논문에 따라 실제 통신을 진행하면 통신 장소에 상관없이 그림 1 과 같이 점의 형태로 노이즈가 군데군데 발생하는 소금-후추 잡음이 일관되게 검출된다.



그림 1. 소금-후추 잡음의 예시

이러한 소금-후추 잡음을 제거하기 위해 식 (1)의 중간-값 필터를 사용한다.

$$g(x, y) = \text{median}\{f(s, t) | (s, t) \in S_{xy}\} \quad (1)$$

이 때,  $f(s, t)$  는 원본 이미지에서  $(s, t)$  위치의 픽셀 값을 의미하며,  $g(x, y)$  는 필터링된 이미지에서  $(x, y)$  위치의 픽셀 값을,  $S_{xy}$  는  $(x, y)$  를 중심으로 하는  $3 \times 3$  이웃 픽셀 집합을 의미한다.

### 3. 비가청 주파수 대역 전송을 위한 OFDM 부반송파 할당

이미지 데이터를 비가청 주파수 대역의 음파 신호만으로 전송하기 위해서는 송신 단계에서 OFDM 을 이용한 다중화 단계의 부반송파 할당을 수정해야 한다. 일반적인 OFDM 은 이산 푸리에 역변환 (Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)을 사용하여 데이터 심볼을 주파수 영역에서 시간 영역 신호로 변환한다. 식 (2)은 IDFT 를 통해 다중화된 OFDM 신호  $x[n]$ 을 나타낸다.

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] e^{j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (2)$$

이 때,  $X[k]$  는 주파수 영역에서 보내고자 하는 데이터 심볼을 나타내며,  $N$  은 부반송파의 수,  $n$  은 0 부터  $N - 1$ 까지의 시간 인덱스,  $k$  는 0 부터  $N - 1$ 까지의 부반송파 인덱스를 나타낸다. 단, 0 부터  $N - 1$ 까지의 모든  $k$  에 데이터가 들어가는 것은 아니다. 유효한 음파 신호로 만들기 위해서는 연산 결과가 실수로 나와야 하므로 Conjugate-Symmetric 을 맞춰줄 필요가 있기 때문이다. 예를 들어서  $N = 6$ ,  $n = 1$  상황을 가정한다면,  $x[1] = \frac{1}{\sqrt{6}} (X[0]e^{j \frac{2\pi \times 0}{6} \times 1} + X[1]e^{j \frac{2\pi \times 1}{6} \times 1} + X[2]e^{j \frac{2\pi \times 2}{6} \times 1} + X[3]e^{j \frac{2\pi \times 3}{6} \times 1} + X[4]e^{j \frac{2\pi \times 4}{6} \times 1} + X[5]e^{j \frac{2\pi \times 5}{6} \times 1})$  이다.  $X[1] = X^*[5]$ ,  $X[2] = X^*[4]$  를 만족해야만 이 연산의 결과가 실수로 될 수 있다. 즉 부반송파의 절반에만 데이터가 할당된다. 따라서 본 논문의 시스템은  $N = 288$  이므로,  $N = 0$  부터  $N = 143$  까지만 데이터가 할당된다.

여기서, 비가청 주파수 대역만을 통해 데이터를 전송하기 위해 원하는 주파수 대역 외의 부반송파에는 데이터를 할당하지 않고 0 으로 설정한다. 즉, 식 (3)와 같이 부반송파 인덱스  $k$  를 비가청 주파수 대역에 해당하는 인덱스  $k_{\min}$  에서  $k_{\max}$  로 제한한다.

$$x[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} X[k] e^{j \frac{2\pi k n}{N}} \quad (3)$$

본 논문에서는 샘플링 주파수  $f_s = 48\text{kHz}$  를 사용하였으며, 부반송파의 개수는  $N = 288$  을 선택하였다. 따라서, 부반송파 스페이싱은  $\Delta f = \frac{f_s}{N} =$

166.67Hz이며, 비가칭 주파수 대역 16kHz~20kHz을 활용하고자 할 때, 필요한 부반송파 인덱스  $k_{\min}$ 과  $k_{\max}$ 는 다음과 같다.

$$k_{\min} = \left\lceil \frac{16000\text{Hz}}{\Delta f} \right\rceil = \left\lceil \frac{16000}{166.67} \right\rceil = 96$$

$$k_{\max} = \left\lfloor \frac{20000\text{Hz}}{\Delta f} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{20000}{166.67} \right\rfloor = 120$$

따라서, 부반송파 인덱스  $k$ 를 96에서 120까지로 제한하였으며, 이를 통해 그림 2와 같이 16kHz~20kHz의 비가칭 주파수 대역만을 통해 데이터가 전송되는 것을 확인할 수 있다.

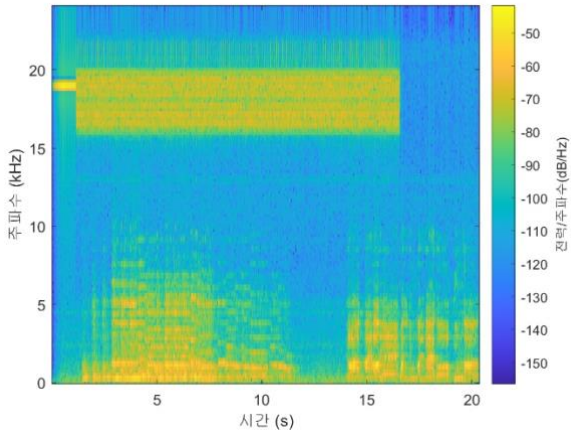


그림 2. 수신 신호의 스펙트로그램

#### 4. 오페라 음악 기반 시간 동기화

송신기의 스피커에서 음파 신호가 발생하지 않더라도 수신기의 마이크는 계속하여 녹음을 수행하며, 이 때, 송신기가 음파 신호를 보내기 시작했다는 것을 인지하기 위해 시작 시각을 정확히 파악하는 시간 동기화 단계가 필요하다. 본 논문에서는 음악 신호를 송신기와 수신기가 서로 알고 있다는 가정하에 식 (4)의 상호상관 함수를 수신 신호와 음악 신호 사이에 사용하여 시간 동기화를 수행한다.

$$R_{xy}[k] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]y[n+k] \quad (4)$$

#### 5. 성능 분석

제안한 시스템의 성능을 평가하기 위해 다음과 같은 지표를 사용하였다:

1. **소음 수준 비교:** 제안한 시스템과 기존의 가칭 주파수를 사용하는 음파 통신 시스템 간의 소음 수준을 ISO 532-1:2017의 **Zwicker 방법**에 따라 비교하였다 [1].
2. **중간값 필터 적용 여부에 따른 BER 비교:** 중간값 필터 적용 전후의 Bit Error Rate (BER)을 비교하여 노이즈 제거 효과를 확인하였다.
3. **이미지 데이터 세트에 대한 통신 성능 평가:** USC-SIPI Image Database [3]에서 선택한 100 개의 이미지

데이터에 대해 통신 성능을 평가하였다. 일반적인 실험 환경과 의도적으로 잡음을 주입한 환경에서의 결과를 비교하였다.

실험은 48kHz의 샘플링 주파수를 사용하였으며, 송신기와 수신기는 동일한 방 안에서 약 0.5 미터의 거리를 두고 배치하였다. 잡음 환경은 주변 소음을 최소화한 조용한 환경과, 추가적인 잡음을 주입한 잡음 환경으로 각각 구성하였다. 주입된 잡음 환경은 말리의 교향곡 3 번을 재생하여 생성하였다. 그림 3은 조용한 환경에서의 잡음, 그림 4는 주입된 잡음의 스펙트로그램을 나타낸다.

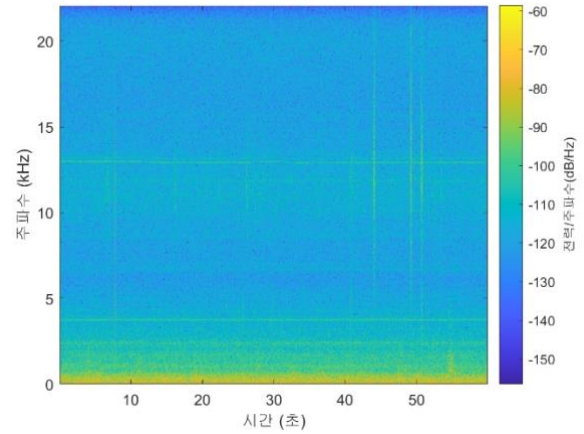


그림 3. 실험 환경의 잡음 스펙트로그램

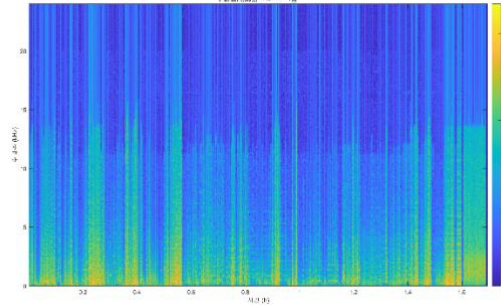


그림 4. 주입된 잡음의 스펙트로그램 (말리 교향곡 3 번)

첫째로 Zwicker에 따르면, ISO 532-1:2017의 **Zwicker 방법**으로 산출된 Sharpness 값이 인간 청각의 불쾌감을 결정짓는 요소이다 [4]. 통상적인 방법으로 음파 통신 신호를 만들었을 때의 Sharpness는 2.6313 acum으로, 이는 치과 드릴이 천천히 동작할 때의 Sharpness와 같다 [5]. 본 논문의 방법으로 오페라 음악에 기반한 음파 통신 신호를 만들면 Sharpness가 1.4615 acum으로, 이것은 도시 소음의 통상적인 Sharpness와 비슷한 수준으로 개선된 것이다 [6].

다음으로, 중간값 필터 사용을 통한 성능 개선을 확인하기 위해 Bit Error Rate (BER)을 비교하도록 한다. 그림 5, 6와 같이 중간값 필터 사용 여부에 따른 수신 이미지가 도출되었으며, BER은 각각 0.030701과 0.027405로 나타났다. 이를 통해, 중간값 필터를

사용함으로써 소금-후추 잡음을 제거하여 성능 개선이 이루어짐을 확인할 수 있다.



그림 5. 중간값 필터를 사용하지 않은 수신 이미지



그림 6. 중간값 필터를 사용한 수신 이미지

마지막으로, USC-SIPI Image Database의 이미지 데이터 100 개의 통신 BER 값의 평균 및 분포, 그리고 통신 성공 여부를 확인하였다. 통상의 실험 환경에서 실험한 결과와 의도적으로 잡음이 삽입된 실험 환경에서 실험한 결과를 비교하도록 한다.

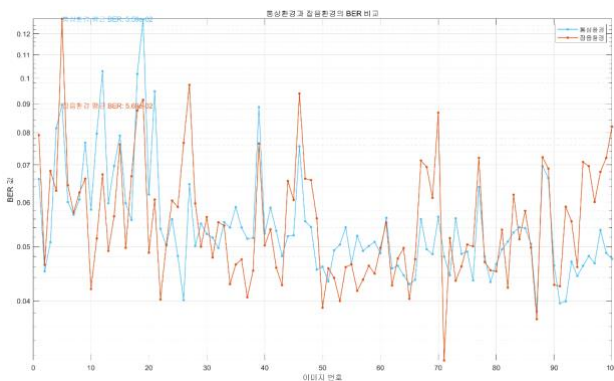


그림 7. 이미지 각각에서의 잡음 여부에 따른 BER 비교

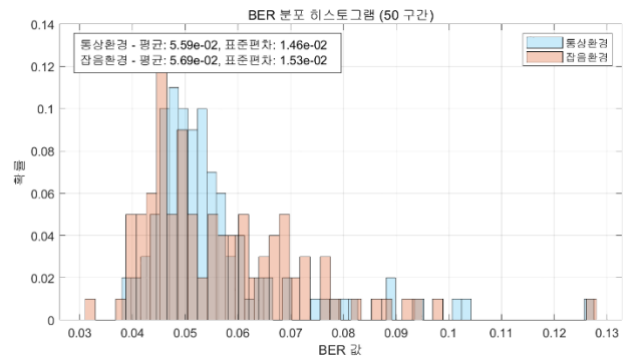


그림 8. 잡음 여부에 따른 BER 히스토그램

그 결과, 잡음에도 불구하고 평균 BER 이 평균 1.8% 정도밖에 증가하지 않음을 확인할 수 있어, 결론적으로 제안하는 시스템이 기존 시스템 대비 우수함을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 가청 주파수를 활용한 음파 통신에서 발생하는 소음을 제거하기 위하여 비가청 주파수 대역과 음악을 활용한 통신 시스템을 설계한 후 소음을 비교하였다. 실험 과정에서 발견된 통신 채널의 잡음에 대응하여 중간값 필터를 사용하였으며, 이미지 데이터 100 개를 잡음을 주입한 채널에서 통신한 결과 기존 시스템 대비 성능이 개선됨을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] International Organization for Standardization, "Acoustics — Methods for calculating loudness — Part 1: Zwicker method," ISO Standard 532-1, 2017.
- [2] N. Otsu, "A threshold selection method from gray-level histograms," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 9, no. 1, 1979.
- [3] University of Southern California Signal and Image Processing Institute Image Database, <http://sipi.usc.edu/database/>
- [4] E. Zwicker, and H. Fastl, *Psychoacoustics: Facts and Models*, 3rd ed. Springer Science & Business Media, 2007. pp. 243-245.
- [5] T. Yamada, S. Kuwano, S. Ebisu, and M. Hayashi, "Statistical analysis for subjective and objective evaluations of dental drill sounds," *\*PLoS ONE\**, vol. 11, no. 7, p. e0159926, Jul. 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0159926.
- [6] M. Raimbault, C. Lavandier, and M. Bérengier, "Ambient sound assessment of urban environments: field studies in two French cities," *\*Applied Acoustics\**, vol. 64, pp. 1241–1256, 2003, doi:10.1016/S0003-682X (03)00061-6.