



SOPFIA: Sound Protocol For Information Access

¹25-095 이호준

¹Korea Science Academy

I.DEV()

DEVELOP OUR WORLD

개요

SOPFIA(SOund Protocol For Information Access)는 스피커와 마이크를 통해 데이터를 전송하는 근거리 무선 통신 프로토콜이다. 인간의 가청주파수 대역(20Hz ~ 20kHz)을 살짝 벗어나거나 경계에 있는 주파수(예: 18kHz ~ 22kHz)를 사용하여, 일상적인 소음과 구별되면서도 대부분의 상용 스피커 및 마이크 송수신이 가능하도록 설계되었다. 별도의 하드웨어 모듈 없이 오디오 입출력 장치만 있다면 다양한 기기 간 정보 교환이 가능하며, NFC나 블루투스과 같이 복잡한 페어링 과정이 필요 없다는 장점을 가진다. 짧은 텍스트 정보(URL, 간단한 메시지, 인증 토큰 등)를 간편하게 공유하는 데 활용될 수 있다.

연구 동기

스마트폰, 노트북 등 대부분의 디지털 기기는 스피커와 마이크를 기본적으로 탑재하고 있어, 이를 활용한 소리 기반 통신은 하드웨어 제약 없이 높은 범용성을 가질 잠재력이 있다. 또한, Wi-Fi Direct 나 Bluetooth와 달리 사전 페어링 절차가 불필요하여 사용 편의성을 높일 수 있다. 하지만 현재 이러한 장점을 활용하여 널리 사용되는 표준화된 데이터 통신 프로토콜이 부재한 상황이다. 본 연구는 이러한 배경에서 출발하여, 간편하고 범용적인 오디오 기반 통신 프로토콜 SOPFIA를 개발하고 그 실효성을 검증하고자 한다.

개발 환경

본 프로토콜 개발 및 테스트는 Samsung Galaxy Book 4 Pro 360 노트북에서 진행되었다. 프로그래밍 언어는 Python 3.x 버전을 사용하였으며, NUMPY, SoundDevice 등의 라이브러리를 활용하여 오디오 신호 처리 및 입출력을 구현했다. 별도의 외부 마이크나 스피커 없이 노트북 내장 마이크와 스피커를 사용하였으며, 오디오 샘플링 레이트는 48,000Hz로 설정하여 비교적 넓은 주파수 대역을 처리할 수 있도록 했다.

선행 연구

Google Tone (구글 톤)

2015년 구글에서 실험적으로 공개했던 Chrome 브라우저 확장 프로그램이다. 오디오를 통해 URL 등의 짧은 정보를 주변 기기와 공유하는 기능을 제공했다. 주로 DTMF(Dual-Tone Multi-Frequency)와 유사한 방식으로, 여러 주파수를 조합하여 데이터를 인코딩하고 이를 소리로 재생하여 전송하는 원리를 사용한 것으로 알려져 있다. 별도의 페어링 없이 작동하며, 같은 공간에 있는 여러 기기에 동시에 정보를 전달할 수 있었다. 하지만 현재는 공식적으로 서비스가 종료된 상태이다.

Chirp (처프)

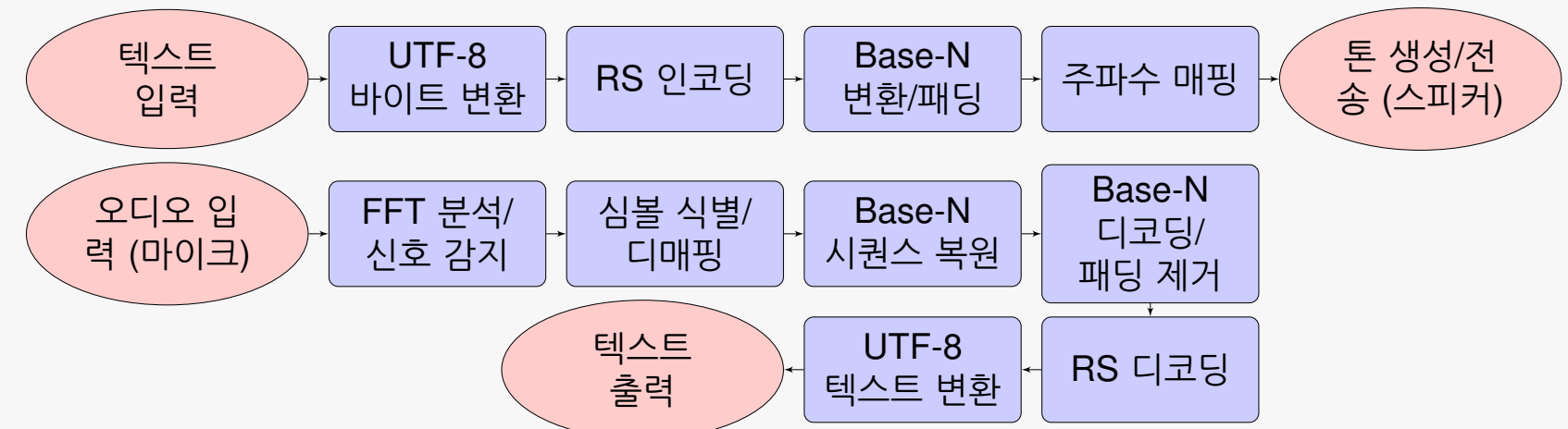
Chirp.io에서 개발했던 데이터 오버 사운드 기술로, 짧은 처프(chirp) 사운드를 이용하여 데이터를 인코딩하고 전송했다. 가청 주파수 및 초음파 영역을 모두 활용 가능했으며, SDK 형태로 제공되어 다양한 애플리케이션에 통합될 수 있었다. 기기간 파일 공유, 모바일 결제, 스마트 기기 제어 등 다양한 분야에서 활용 사례를 제시했으나, 이 역시 현재는 서비스를 중단한 것으로 보인다. 정확한 중단 사유는 알려지지 않았으나, 상용화 및 지속적인 기술 지원의 어려움이 있었을 것으로 추정된다.

Noncoherent Low-Frequency Ultrasonic Communication System with Optimum Symbol Length (K.M. Jeon et al., 2016)

본 논문은 상용 스피커와 마이크(COTS)를 사용하는 근거리 비동기식 저주파 초음파(LFU) 통신 시스템을 제안한다. LFU 채널의 주파수 선택적 특성을 고려하여, 순방향 오류 수정(FEC)을 포함한 차동 위상 편이 변조(DPSK) 방식을 기본 설계로 채택했다. 또한, LFU 통신 채널에서 반송파 주파수 대역의 자동 이득 제어(AGC)를 제안하고, 실제 공중 음향 채널 환경에서 최적의 심볼 길이를 찾기 위해 공중 음향 감쇠를 통합한 LFU 통신 채널의 전파 모델을 제시했다. 실험 결과, 제안된 시스템은 80dB의 소음 환경에서도 최대 8m 거리까지 비트 오류 없이 작동했으며, URL 전송 작업에서 Google Tone보다 높은 성공률(STR)을 보였다. 주요 기술적 특징은 다음과 같다:

- 변조 방식: Windowed Differential Phase-Shift Keying (DPSK)
- 오류 수정 부호: Perfect Binary Golay code (G23)
- 핵심 최적화: 공중 음향 감쇠 모델을 이용한 심볼 길이 최적화 (논문에서는 96 샘플을 최적 값으로 도출)
- 주요 성능: 다양한 소음 조건(최대 80dB SPL)에서 8m까지 오류 없는 통신, Google Tone 대비 높은 URL 전송 성공률

동작 구조



수송신 알고리즘

송신 과정 핵심 로직:

- 입력 텍스트 → UTF-8 Bytes: `text.encode('utf-8')`
- Reed-Solomon 인코딩: `rs.encode(data_bytes)`
- 각 바이트를 Base-N으로 변환 (패딩 적용): 예를 들어, 1바이트(256가지 값)를 Base-32로 표현하려면 $\lceil \log_{32} 256 \rceil = \lceil 8 / \log_2 32 \rceil = \lceil 8 / 5 \rceil = 2$ 개의 Base-32 심볼 필요. 각 심볼은 0-9, A-V 등으로 표현.
- Base-N 심볼 시퀀스를 주파수 톤 시퀀스로 변환 후 송출. (예: 'A' -> [19000Hz, 19200Hz] 동시 재생)

수신 과정 핵심 로직:

- 오디오 스트림 FFT 분석 → 주파수별 에너지 레벨 확인.
- 문턱값 이상 에너지 감지된 주파수 조합 → Base-N 심볼로 디맵핑 (Demapping).
- 수신된 Base-N 심볼 시퀀스 → Base-N 디코딩 (패딩 제거) → 바이트 배열.
- Reed-Solomon 디코딩: `rs.decode(received_bytes)` → 오류 수정된 바이트 배열.
- UTF-8 Bytes → 원본 텍스트: `decoded_bytes.decode('utf-8')`
- 자동 파라미터 예측 및 적용 (범용성 확보): SOPFIA 수신기는 사전에 약속된 핵심 파라미터 (고정된 6개의 주파수 사용, 각 주파수 간의 일정한 간격, 신호(심볼) 사이의 고정된 시간 간격, Reed-Solomon 부호의 심볼 수 10개)를 기반으로 동작한다. 이를 통해, 나머지 세부 파라미터 (정확한 주파수 값 시작점, 심볼당 정확한 지속 시간, 데이터 Base 값 등)는 수신된 신호의 특징을 분석하여 시스템이 능동적으로 예측하고 적용한다. 이 기능은 일대다 통신 시 각기 다른 마이크 성능을 가진 다양한 수신 기기들이 보다 안정적으로 데이터를 수신할 수 있도록 지원하며, 예를 들어 수신단에서 자체적으로 다양한 FFT 윈도우 크기를 적용하여 대역폭을 조절하거나, 신호 간 간격 변화를 분석하여 타이밍을 보정하는 방식으로 별도의 복잡한 설정 없이 다양한 환경과 기기에서 SOPFIA가 효과적으로 동작하도록 한다.

구체적인 주파수 할당, 심볼 당 시간, 에러 보정을 위한 파라미터(Base, RS 심볼 개수 등)는 실험을 통해 최적화한다.

리드-솔로몬 부호 (Reed-Solomon Codes)

리드-솔로몬(RS) 부호는 통신 채널에서 발생할 수 있는 오류, 특히 연속적으로 발생하는 버스트 오류(burst errors)에 효과적으로 대응하기 위한 강력한 순방향 오류 정정(FEC) 부호이다. RS 부호의 핵심 원리는 데이터를 유한체(Finite Field, 또는 Galois Field, GF) 상의 원소로 간주하고, 이 원소들을 계수로 하는 다항식을 구성하여 부호화하는 것이다.

부호화 과정 (Encoding):

- 메시지 다항식 생성: 전송할 k 개의 데이터 심볼 (m_0, m_1, \dots, m_{k-1})을 GF(q) 상의 원소로 보고, 이들을 계수로 하는 메시지 다항식 $P(x)$ 를 생성한다:

$$P(x) = m_{k-1}x^{k-1} + m_{k-2}x^{k-2} + \dots + m_1x + m_0$$

- 부호어 생성: 이 메시지 다항식 $P(x)$ 를 GF(q) 내의 서로 다른 n 개의 평가점 ($\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{n-1}$)에서 각각 평가하여 n 개의 심볼로 이루어진 부호어 $C = (P(\alpha_0), P(\alpha_1), \dots, P(\alpha_{n-1}))$ 를 생성한다. 여기서 $n > k$ 이며, n 은 전체 부호어 길이(블록 길이), k 는 메시지 심볼의 수이다. $n - k$ 개의 심볼은 오류 정정을 위한 중복성(redundancy)을 제공한다.

오류 정정 능력: RS 부호는 최대 t 개의 심볼 오류를 정정할 수 있으며, 이 값은 다음과 같이 결정된다:

$$t = \lfloor (n - k) / 2 \rfloor$$

즉, 부호어 내의 t 개 심볼에 오류가 발생하더라도 원본 메시지를 정확하게 복원할 수 있다.

복호화 과정 (Decoding): 수신된 부호어 R 은 채널 노이즈로 인해 원본 부호어 C 와 다를 수 있다 (즉, $R = C + E$, 여기서 E 는 오류 다항식). 복호화 알고리즘(예: Berlekamp-Massey 알고리즘, Euclidean 알고리즘 등)은 수신된 R 로부터 오류의 위치와 값을 찾아내어 원본 메시지 다항식 $P(x)$ 를 복원한다.

갈루아 필드 (Galois Fields, GF): RS 부호는 일반적인 정수 연산 대신 갈루아 필드, 특히 GF(2^m) 상에서의 연산을 사용한다. GF(2^m)는 2^m 개의 원소를 가지는 유한체로, 각 심볼을 m 비트로 표현할 수 있어 디지털 시스템에 적합하다. 유한체 연산은 덧셈, 뺄셈, 곱셈, 나눗셈(0으로 나누는 경우 제외)이 항상 필드 내에서 정의되므로 연산의 폐쇄성을 보장하고 부호 설계를 용이하게 한다.

SOPFIA에서는 이러한 리드-솔로몬 부호를 통해 스피커와 마이크 사이의 음향 채널에서 발생하기 쉬운 데이터 손실이나 변형(예: 짧은 순간의 소음, 신호 감지로 인한 특정 주파수 성분 왜곡 등)에 강인하게 대처하여 전체 통신 시스템의 신뢰성을 크게 향상시킨다.

결론 및 제언

결론: SOPFIA 프로토콜은 표준 오디오 하드웨어를 사용하여 근거리에서 짧은 데이터를 전송하는 실용적인 가능성을 보여주었다. 실험 결과, 주변 소음이 적은 환경에서는 비교적 안정적인 데이터 전송이 가능했으며, 리드-솔로몬 오류 정정 부호를 통해 약간의 오류는 극복할 수 있음을 확인했다. 전송 속도는 현재 빠르지 않지만(예: 수십 수백 bps 수준), 간단한 URL, 인증 코드, 짧은 메시지 등 소량의 데이터를 주고받는 용도로는 충분히 활용 가능성이 있다. 이는 QR 코드와 유사한 역할을 수행하면서도, 별도의 카메라 스캔 과정 없이 정보를 전달할 수 있다는 점에서 차별화된다.

제언 및 향후 연구 방향:

- 전송 속도 및 안정성 향상:
 - 변조 방식 고도화: 단순 주파수 매핑 외에 DPSK (Differential Phase Shift Keying), FSK (Frequency Shift Keying)의 다중 레벨 적용, 또는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)과 같은 고급 변조 기술을 음향 채널에 맞게 변형하여 적용함으로써 전송 효율을 높일 수 있다.
 - 적응형 파라미터 설정: 채널 상태(소음 수준, 거리 등)를 실시간으로 추정하고, 이에 따라 변조 방식, 심볼 길이, 오류 수정 부호의 강도 등을 동적으로 조절하는 적응형 알고리즘을 도입하여 다양한 환경에서의 안정성을 높일 수 있다.
 - 다중 주파수 동시 전송 (Multi-tone / Frequency Hopping): 단일 주파수보다 여러 주파수를 동시에 사용하거나, 주파수 호핑(Frequency Hopping Spread Spectrum) 기술을 응용하여 특정 주파수 대역의 간섭에 대한 강인성을 높이고 전송률을 개선할 수 있다.
- 오류 제어 강화: 더욱 강력한 오류 정정 부호(예: LDPC, Turbo codes 등)의 적용 가능성을 탐색하거나, ARQ(Automatic Repeat reQuest)와 FEC를 결합한 하이브리드 ARQ 방식을 도입하여 신뢰도를 높일 수 있다.
- 사용자 경험(UX) 개선: 송수신 과정을 시각적으로 표현해주거나, 전송 성공/실패 여부를 명확히 피드백하는 등 사용자 인터페이스를 개선하여 사용 편의성을 높일 필요가 있다.
- 다양한 애플리케이션 탐색: 현재 구상 중인 QR 코드 대체를 넘어, 오프라인 간편 결제, 스마트 가전 제어, 출입 통제 시스템, 박물관/전시장 정보 안내 등 창의적인 활용 사례를 발굴하고 프로토타입을 개발하여 실용성을 검증할 수 있다.
- 보안성 강화: 전송되는 데이터에 대한 간단한 암호화 계층을 추가하여 민감한 정보 전송 시 보안성을 확보하는 방안도 고려할 수 있다.

SOPFIA는 아직 초기 단계이지만, 향후 지속적인 연구와 개선을 통해 일상생활에서 유용하게 활용될 수 있는 음향 통신 프로토콜로 발전할 수 있을 것으로 기대한다.