

비-직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템 설계 및 구현

김선민, 성재협*, 신원재

아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI 융합네트워크 학과

{ksm990323, *john12234, wjshin}@ajou.ac.kr

NOMA-Based Acoustic Communication System Design and Implementation

Seonmin Kim, *Jaehyup Seong, Wonjae Shin

Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.

*Department of AI Convergence Network, Ajou Univ.

요약

본 논문에서는 비-직교 다중접속기술(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)을 이용한 자원 효율적인 음파통신 시스템을 제안한다. 최근 다양한 무선 통신 시스템 도입과 함께 사용자 수의 급격한 증가로 동일한 자원을 사용할 필요성이 대두되고 있다. 다수의 사용자를 지원하는 음파통신 시스템을 설계할 때 기존 직교 다중접속기술(Orthogonal Multiple Access, OMA)을 사용할 경우 각 사용자 별로 자원을 할당하여 정보를 전송하기 때문에 자원 효율성의 문제가 존재한다. 이를 개선하기 위해 비-직교 다중접속기술을 사용한 음파통신 시스템 모델을 제안하고, 실제 음파통신 테스트 베드를 구축하여 제안하는 기술이 기존의 직교 다중접속기술 기반 음파통신 시스템에 비해 자원 효율성 및 저 지연성 측면에서의 우수한 성능을 보임을 검증한다.

I. 연구 배경 및 목적

최근 다양한 무선 통신 시스템 도입과 함께 사용자 수의 급격한 증가로 동일한 자원을 사용할 필요성이 대두되고 있다 [1]. 이러한 배경에서 모든 자원을 공유하고, 중첩된 신호를 전송하여 높은 자원의 효율성을 얻을 수 있는 비-직교 다중접속기술(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA)이 차세대 무선 통신 시스템에 적용하기 위한 기술로 각광 받고 있다.

음파통신은 송신부에서 전송하려는 데이터를 음파신호로 변환해서 스피커를 통해 전송하고 수신부에서 마이크와 같은 음성장치로 음파신호를 수신하여, 전송된 데이터로 변환하는 기술이다. 음파통신은 마이크와 스피커와 같은 간단한 음성장치만 있으면 통신이 가능하여, 스마트폰을 이용한 카드 결제나 수중에서 잠수함 감지 및 다이버 간 통신 등 여러 분야에 활용되고 있다. 다수의 사용자를 지원하는 음파통신 시스템을 설계할 때, 그림 1과 같이 시간 대역을 나눠 사용자에게 할당하는 직교 다중접속기술(Orthogonal Multiple Access, OMA)을 사용할 경우 자원 효율성에 대한 문제가 발생한다.

이를 개선하기 위해 본 논문에서는 비-직교 다중접속기술을 사용하여 다중사용자 시스템에서 자원을 효율적으로 사용할 수 있는 음파통신 시스템을 설계한다. 최종적으로 테스트 베드를 구축하고, 직교 다중접속기술을 사용한 모델과의 비교를 통해 제안하는 기술의 우수한 성능을 검증한다.

II. 시스템 모델

비-직교 다중접속기술은 송신단에서 중첩코딩(Superposition Coding)을 하여 신호를 전송하기 때문에 가까운 거리의 사용자는 순차적 간섭제거기법(Successive Interference Cancellation, SIC)을 사용한다는 특징이 있다. 이때 가까운 사용자가 먼 거리에 있는 사용자의 신호를 디코딩했을 때 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)이 0에 가까워야, 오류전파 현상 없이(Error Propagation) 성공적으로 SIC를 수행하여 본인의 신호를 오류 없이 얻을 수 있다.

이를 위해 제안하는 음파통신 시스템 모델에서는 수신단에서 발생하는

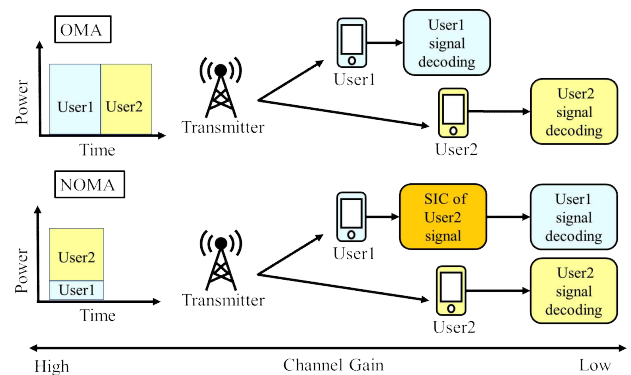


그림 1. 직교 다중접속기술과 비-직교 다중접속기술의 동작도

오류전파 현상을 방지하고자 송신단에서 신호를 전송할 때 비트를 3번 반복하여 송신하고 수신단에서는 반복된 3개의 비트 중 0이 1보다 많으면 0, 1이 많으면 1로 비트를 결정하는 1/3-repetition coding을 사용한다.

또한 신호를 송·수신하는 과정에서 발생하는 다중경로 페이딩 문제를 극복하기 위해 다중의 반송파를 사용하여 데이터를 전송하는 직교-주파수 분할 다중화 방식(Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM)을 사용한다. OFDM을 통해 데이터를 송신하는 과정에서 식 (1)과 같이 Inverse Discrete Fourier Transform (IDFT)를 사용하여 독립적으로 변조된 N 개의 부반송파를 시간 영역으로 변환하여 신호를 송신한다.

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

$$\text{PAPR} = \frac{\max_{0 \leq n \leq N-1} |x[n]|^2}{E[|x[n]|^2]}. \quad (2)$$

이때 특정 $x[n]$ 의 전력이 식 (2)와 같이 평균전력보다 일정값 이상 커지면 Peak-to-Average Power Ratio (PAPR)가 증가하여 전력 증폭기의 효율이 감소하기 때문에 전송한 신호가 변형되는 문제가 발생한다 [2].

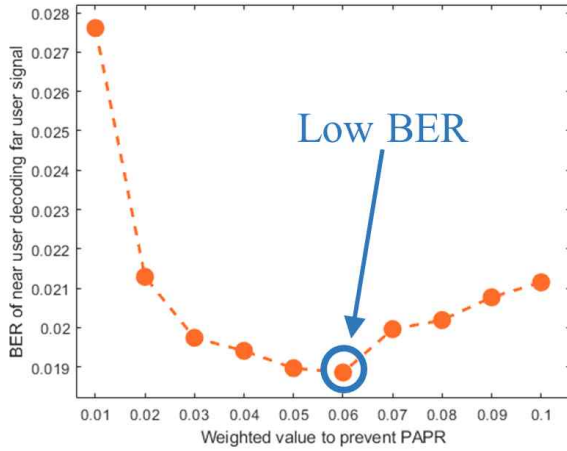


그림 2. 가중치에 따른 사용자1이 사용자2 신호들의 BER

이는 BER의 열화를 발생시켜 수신단의 오류전과 현상을 증가시킨다. 이를 극복하기 위해 제안하는 시스템에서는 인코딩된 심볼에 가중치를 곱하여 송신하고, 가까운 사용자는 신호를 수신하여 먼 거리 사용자의 신호를 디코딩한다. 이때 최적의 가중치를 찾기 위해 그림 2와 같이 가중치를 변경해 가며 SIC 과정에서의 가장 낮은 BER 을 가지는 값을 가중치로 설정하여, 수신단에서 발생하는 오류전과 현상을 방지한다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 시스템 모델을 나타낸다. 음성 출력 장치가 있는 송신단과 음성 입력 장치가 있는 2개의 수신단이 존재한다. 사용자1의 채널이 사용자2의 채널보다 좋다는 가정하에 전력할당을 1대 4의 비율로 설정한다. 송신단에서 사용자1의 심볼 x_1 과 사용자2의 심볼 x_2 을 중첩코딩 하여 전송 했을 때 심볼은 식 (4), i 번째 사용자가 수신받는 신호는 식 (5)와 같다.

$$\alpha + 4\alpha = 1, \quad (3)$$

$$x = \sqrt{\alpha P_t} x_1 + \sqrt{4\alpha P_t} x_2, \quad (4)$$

$$y_i = h_i x + n_i. \quad (5)$$

여기서 h_i , n_i 은 i 번째 사용자의 채널과 잡음을 의미한다. 채널코딩과 PAPR을 방지하기 위해 곱해진 가중치의 영향으로 사용자1은 수신한 신호에서 사용자2의 신호를 오류가 거의 없이 복조한다. 복조하여 얻은 사용자2의 신호를 다시 재변조 하고 추정된 h_1 와 $\sqrt{4\alpha P_t}$ 를 곱한 뒤 식 (5)에서 이를 제거하고, 남은 신호를 복조하면 사용자 1은 수신하고자 하는 신호를 최종적으로 얻을 수 있다. 이때 사용자2는 전력이 상대적으로 약한 사용자1의 신호를 간섭으로 취급하여 자신의 신호를 복조하고, 최종적으로 수신하고자 하는 신호를 얻는다.

III. 테스트베드 구축을 통한 성능 분석

송신단을 기준으로 사용자1과 사용자2의 거리가 2배 차이가 나는 상황에서, 제안하는 기술과 직교 다중접속기술 종류 중 하나인 시분할 다중접속 (Time Division Multiple Access, TDMA)을 적용했을 때 사용자1, 2의 BER 성능과 데이터 전송에 소요된 시간에 대해 분석한다. 동일한 환경에서 음파통신을 10번을 수행하여 이에 대한 평균 값을 바탕으로 분석한다.

표 1.은 제안하는 모델과 TDMA를 적용했을 때의 사용자1, 2에 대한 BER과 데이터 전송 시간을 나타낸다. BER의 경우 TDMA를 적용 했을 때가 더 우수하지만, 이는 제안하는 모델에 비해 전송시간 및 에너지를

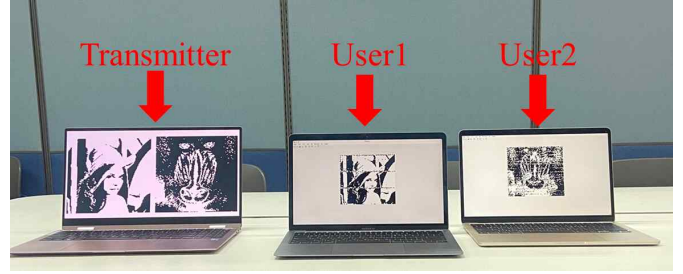






그림 3. 제안하는 비-직교 다중접속기술을 적용한 시스템 모델

표 1. 제안하는 모델과 직교 다중접속 기술적용시 성능 비교

비-직교 다중접속기술		직교 다중접속기술	
사용자1	사용자2	사용자1	사용자2
			
총 데이터 전송시간		총 데이터 전송시간	
14.5 sec		29 sec	
BER	BER	BER	BER
0.0403	0.1421	0.01881	0.1197

2배 더 사용해야 한다는 결점이 존재한다. 반면 제안하는 모델의 경우 모든 자원을 공유하며 사용자의 채널을 고려해 전력을 나눠 할당하였기 때문에, TDMA를 사용하였을 때 보다 데이터 전송률 및 통신 과정에서의 에너지 효율성이 높다는 장점이 있다. 즉, 제안하는 모델은 직교 다중접속 기반의 음파통신 시스템에 비해 자원 효율성 및 저 지연성 측면에서 우수한 성능을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 다중사용자 음파통신 시스템에서 직교 다중접속기술을 적용했을 때 발생하는 자원 효율성의 문제를 비-직교 다중접속기술을 사용하여 개선할 수 있는 모델을 제안한다. 또한 테스트 베드 구축을 통한 성능 분석을 통해 제안하는 모델이 자원 효율성 및 저 지연성 측면에서 우수함을 보인다. 차후 이를 활용하여 수중 음파통신을 이용한 해양 재난 재해 모니터링 등, 대규모 단말들이 존재하는 차세대 무선 통신 시스템에서 요구되는 서비스를 효율적으로 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2022R1A2C4002065, No. 2021R1A4A1030775), 정보통신기획평가원(No. 2021-0-00467)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] M. A. Durmaz *et al.*, "A Four-User Non-Orthogonal Multiple Access System Implementation in Software Defined Radios," 2020 *IEEE International BlackSeaCom*, pp. 1-5, 2020.
- [2] Seok-Joong Heo *et al.*, "Concatnation for PAPR Reduction Schemes in OFDM System," *J. KICS*, vol. 45, no. 2, pp.468-471, Feb, 2020.