

OFDM 통신 시스템에서 오토인코더 기반의 BER 감소 기법

조선민, 이성욱*

한국항공대학교, *중앙대학교

tjsals4514@kau.kr, *seongwooklee@cau.ac.kr

Autoencoder-based BER Reduction in OFDM Communication Systems

Cho Seonmin, Lee Seongwook*

Korea Aerospace Univ., *Chung-Ang Univ.

요약

일반적인 Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) 통신 시스템에서는 주로 M-ary phase shift keying과 M-ary quadrature amplitude modulation 같은 선형 심볼 매핑 및 복원 방식이 널리 사용된다. 본 논문에서는 오토인코더를 활용한 비선형 심볼 매핑 및 복원 방식을 제안한다. 이 새로운 접근법은 전통적인 선형 방식에 비해 약 10%p 증가된 정확도를 달성함으로써 OFDM 통신 시스템에서 심볼 복원의 효율성을 크게 개선할 수 있음을 보여준다.

I. 서론

Joint radar and communication system은 단일 하드웨어에서 센싱과 통신을 동시에 수행함으로써 주파수 자원을 효율적으로 관리하고 비용을 절감하는 시스템이다. 이 시스템의 핵심 기술인 Orthogonal frequency-division multiplexing(OFDM)은 서로 직교하는 다수의 서브 캐리어를 사용하여 데이터를 효율적으로 전송하는 기술로, 현재 대부분의 상용 이동 통신 시스템에서 널리 사용되고 있다.

OFDM의 통신 과정은 그림 1과 같이 이진 비트열을 심볼로 매핑한 뒤 변조하여 송신하며, 변조 과정에서는 Inverse fast Fourier transform (IFFT) 연산이 사용된다. 이와 반대로 수신단에서는 Fast Fourier transform (FFT) 연산을 사용하여 신호를 복조하고, 심볼 디매핑을 통해 원래의 이진 비트열로 복원한다. 이 과정에서 전통적으로 M-ary phase shift keying(M-PSK)나 M-ary quadrature amplitude modulation(M-QAM)과 같은 선형 매핑 방식이 사용되었다[1]. 그러나 선형 매핑 방식은 채널 페이딩과 잡음이 심한 환경에서 Bit error rate (BER)이 저하되는 단점을 가지고 있다[2]. 따라서 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 오토인코더를 활용한 비선형 심볼 매핑 및 복원 방식을 제안한다.

II. 본론

가. 제안한 오토인코더의 구조

본 논문에서는 데이터의 효율적인 재구성을 위해 오토인코더를 사용하

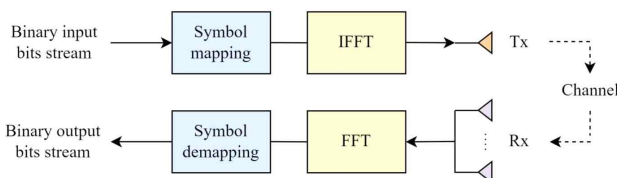


그림 1. OFDM 통신 시스템 블록도

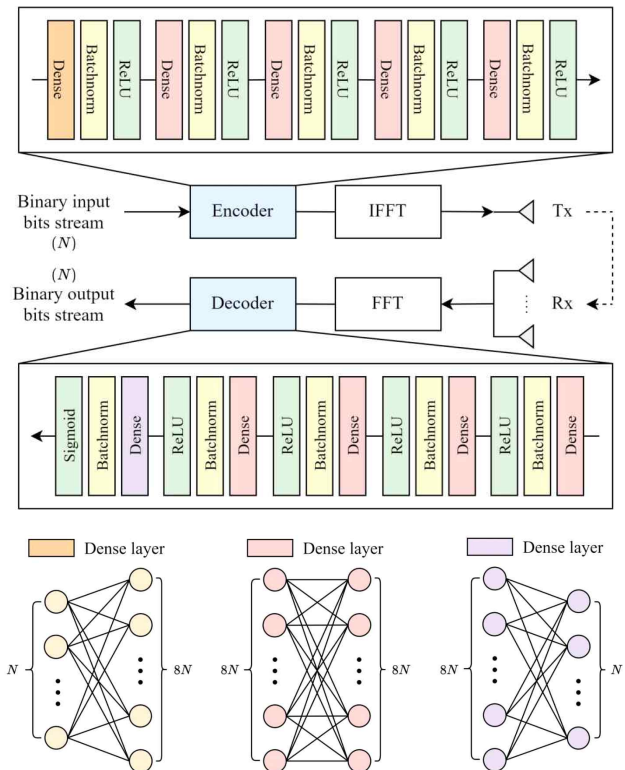


그림 2. 제안한 오토인코더의 구조

며, 오토인코더는 입력 데이터를 새로운 형태로 변환하는 인코더와 이 변환된 표현을 다시 원본 데이터로 복원하는 디코더로 구성된다. 본 논문에서 제안하는 오토인코더의 구조는 그림 2에서 확인할 수 있다. 인코더는 5개의 동일한 하위 레이어 블록으로 구성되며, 각 블록은 입력 노드가 모든 출력 노드에 연결된 선형 레이어, 배치 정규화 레이어, 그리고 Rectified linear unit (ReLU) 활성화 함수로 이루어져 있다. 이때, 각 선형

레이어는 입력 차원의 8배에 해당하는 노드를 갖는다. 디코더는 인코더와 동일한 구조의 하위 레이어 블록을 4회 반복하며, 최종 출력은 입력 데이터와 동일한 차원의 노드를 갖는 선형 레이어와 Sigmoid 활성화 함수를 통해 생성된다. 마지막으로 인코더와 디코더를 결합하여 전체 오토인코더 네트워크를 형성하고, 이는 Adaptive moment estimation 알고리즘을 사용하여 최적화되며 이진 교차 엔트로피 손실 함수로 학습된다.

나. 제안한 방식의 성능 평가

본 논문에서는 기존의 16QAM 변조 방식과 비교하여 제안한 방식의 성능을 평가했다. 이를 위해 서브 캐리어와 심볼의 수를 각각 32와 1000으로 설정하고 다음과 같이 시뮬레이션을 진행하였다. 먼저 랜덤 이진 비트열을 생성하고, 이를 두 방식에 따라 심볼로 매핑한 다음, IFFT를 사용하여 변조했다. 이어서 실제 통신 환경에서 발생할 수 있는 다중 경로 페이딩과 잡음을 고려하여 Signal-to-noise ratio (SNR) 값을 설정하였다. 마지막으로 FFT를 사용하여 복조하고 각 변조 방식에 맞게 심볼을 디매핑하여 최종적인 수신 비트열을 구하였다. 따라서 송신 심볼 \mathbf{r} 에 오토인코더를 적용하여 재구성된 수신 심볼 $\hat{\mathbf{r}}$ 은

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{D} \circ \text{FFT} \circ \mathbf{H} \circ \text{IFFT} \circ \mathbf{E}(\mathbf{r}) \quad (1)$$

와 같이 표현할 수 있다. 여기서 \mathbf{E} 와 \mathbf{D} 는 각각 인코더와 디코더를 나타내며 \mathbf{H} 는 무선 채널 통신 환경에서 발생할 수 있는 채널 잡음을 나타낸다.

16QAM 변조 방식과 오토인코더를 통해 복조된 신호의 성상도는 그림 3에서 확인할 수 있다. 16QAM 변조 방식은 4비트의 이진 비트열을 4×4 격자 모양으로 배열된 16개의 심볼 중 하나로 매핑한다. 반면, 오토인코더

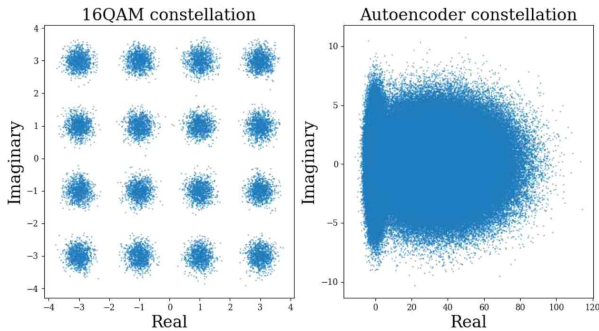


그림 3. 16QAM과 오토인코더를 통해 복조된 신호의 성상도

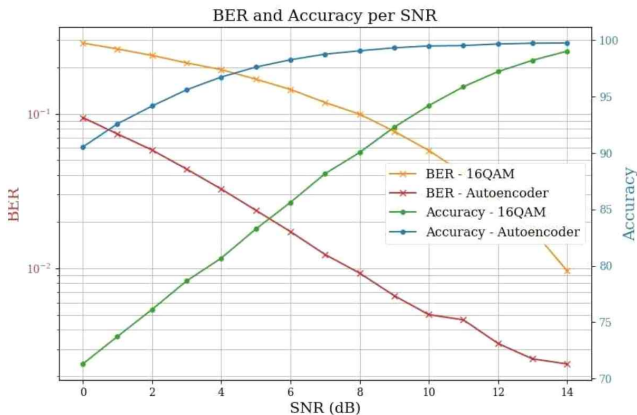


그림 4. SNR에 따른 BER 및 정확도 비교 결과

를 활용한 변조 방식은 기존의 선형 심볼 매핑 방식과 달리, 이진 비트를 고정된 심볼 개수와 구조에 직접 할당하는 것 아닌 복원 효율을 높일 수 있는 새로운 형태로 재구성하는 비선형 매핑 방식을 채택하고 있음을 확인할 수 있다. 또한, 두 방식에서 SNR에 따른 BER 및 정확도 비교 결과는 그림 4와 같다. 제안한 오토인코더 기반의 방식은 16QAM 방식에 비해 평균적으로 약 10%p 증가된 정확도를 달성하였으며, 특히 제안한 방식은 SNR이 낮은 환경에서 BER 개선에 크게 기여함을 알 수 있다.

기존의 선형 매핑 방식은 채널 페이딩 및 잡음에 대해 높은 민감성을 보일 뿐만 아니라, 고정된 매핑 구조를 가지고 있어 다양한 통신 환경과 조건에 대한 적응성이 제한적이다. 반면, 제안한 방식은 학습 데이터를 기반으로 모델이 동적으로 조정되어, 통신 조건과 환경 변화에 효과적으로 적응할 수 있다는 이점이 있다.

III. 결론

본 논문에서는 OFDM 통신 시스템에서 오토인코더를 활용한 새로운 심볼 매핑 및 복원 방법을 제시하였다. 전통적인 선형 매핑 방식은 잡음이 많은 환경에서 성능이 저하되며, 다양한 통신 환경에 적응하는 데 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 우리는 오토인코더 기반의 비선형 매핑 방식을 채택하였다. 전통적인 방식과의 성능을 비교하기 위해, 무작위 이진 비트열을 생성하여 각 방식에 따라 변복조 과정을 거친 후, 송신 심볼의 BER과 정확도를 측정하였다. 이를 통해, 제안한 방식을 활용함으로써 잡음이 포함된 다양한 통신 조건과 환경에서도 효율적으로 심볼을 복원할 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1F1A1065247).

참고 문헌

- [1] I. Bang and T. Kim, "Secure modulation based on constellation mapping obfuscation in OFDM based TDD systems," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 197644-197653, October 2020.
- [2] X. Tang, M.-S. Alouini, and A. J. Goldsmith, "Effect of channel estimation error on M-QAM BER performance in Rayleigh fading," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 47, no. 12, pp. 1856-1864, December 1999.