

스프레딩 및 심볼 재배열을 이용한 시맨틱 통신 시스템의 채널 환경 완화 기법

고민재, 유한주, 채찬병*

연세대학교

cloner99@yonsei.ac.kr, cbchae@yonsei.ac.kr

A Simple Spreading Based Preprocessing Method for Robust Semantic Communication over Wireless Channels

Minjae Ko, Hanju Yoo, Chan-Byoung Chae*

Yonsei Univ.

요약

딥러닝 기반 시맨틱 통신 시스템은 일반적으로 AWGN 환경을 가정하여 학습되며, 실제 무선 채널 환경에서는 성능 저하가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 학습된 시맨틱 인코더- 디코더 구조를 변경하지 않고, 전송 전후에 적용되는 간단한 전처리 기법을 통해 채널 환경 변화에 대한 영향을 완화하는 방법을 제안한다. 제안 기법은 심볼 재배열과 스프레딩 변환을 결합한 형태로, 채널로 인해 발생하는 오류가 특정 심볼에 집중되는 현상을 줄이는 데 목적이 있다. 실험 결과, 제안한 방식은 별도의 재학습 없이도 기존 전송 방식 대비 안정적인 복원 성능을 보였다.

I. 서론

시맨틱 통신은 전통적인 비트 오류율 중심의 통신 방식과 달리, 전송 정보의 의미 보존을 목표로 하는 새로운 통신 패러다임이다. 특히 딥러닝 기반의 end-to-end 학습 기법을 활용한 이미지 및 음성 시맨틱 통신 시스템은 낮은 SNR 환경에서도 품질 저하가 심하지 않아 주목받고 있다 [1].

그러나 대부분의 시맨틱 통신 시스템은 AWGN 채널을 가정하여 학습되었기 때문에, 실제 무선 환경에서 존재하는 다중 경로 페이딩이나 시간- 주파수 선택성에 대해 충분한 장인성을 확보하지 못하는 경우가 있다[2]. 이러한 환경에서는 전송 심볼 간 오류가 독립적으로 발생하지 않고, 특정 구간에 집중되는 경향을 보이며, 이는 복원 성능 저하로 이어질 수 있다[3].

본 논문에서는 이러한 문제를 완화하기 위해, 시맨틱 인코더와 디코더를 그대로 유지한 상태에서 적용 가능한 간단한 전처리 기법을 고려한다. 제안 방식은 구현 복잡도가 낮고 추가적인 채널 정보가 필요하지 않다는 점에서 실용적인 접근 방법이다.

본 연구에서 고려하는 전처리 기법은 시맨틱 인코더와 디코더의 내부 구조를 변경하지 않고, 인코더 출력 이후와 디코더 입력 이전에 삽입되는 형태로 적용된다. 따라서 제안 방식은 기존 시맨틱 통신 시스템에 추가적인 모듈로 쉽게 통합될 수 있으며, 인코더 및 디코더의 재학습 없이 적용 가능하다는 장점을 가진다. 또한 전처리 연산은 고정된 선형 변환으로 구성되어 있어, 프레임 간 채널 변화에 따른 추가적인 제어 신호나 피드백을 요구하지 않는다.

II. 본론

시맨틱 통신 시스템에서 인코더는 입력 데이터를 복수의 복소수 심볼로 변환하며, 이 심볼들은 무선 채널을 통해 전송된다. 수신단에서는 채널 보상 및 등화 과정을 거친 후, 디코더를 통해 원본 데이터를 복원한다.

AWGN 환경에서는 잡음이 각 심볼에 독립적으로 영향을 미치므로, 디코더는 인접 심볼 간의 관계를 활용하여 비교적 안정적인 복원을 수행할 수 있다. 반면, 실제 무선 채널에서는 시간 및 주파수 차원의 연속성으로 인해 오류가 국소적으로 발생하며, 이로 인해 특정 심볼 집합이 동시에 손상될 수 있다. 이러한 오류 특성은 학습 과정에서 가정한 조건과 차이를 가지며, 결과적으로 시맨틱 복원 성능에 부정적인 영향을 미친다.

이러한 문제를 해결하기 위해 심볼 재배열과 스프레딩 기반 전처리를 제안한다[4]. 첫 번째 단계로, 전송 심볼의 순서를 고정된 방식으로 재배열하는 것이다. 이를 통해 시간- 주파수 영역에서 인접한 차원에 발생하는 채널 오류가 특정 심볼 인덱스에 집중되는 현상을 줄일 수 있다. 결과적으로 수신 후 판측되는 오류는 보다 분산된 형태를 가지게 된다.

두 번째 단계로, 재배열된 심볼에 대해 스프레딩 변환을 적용한다. 이 변환은 각 심볼이 여러 차원에 걸쳐 영향을 받도록 하여, 국소적인 페이딩이나 간접의 영향을 완화하는 역할을 한다. 이러한 과정은 수신 심볼 간 오류 분포를 보다 균일하게 만드는 데 기여한다.

제안한 심볼 재배열 및 스프레딩 기반 전처리 기법은 특정 채널 환경을 가정하기보다는, 다양한 무선 환경에서 공통적으로 관찰되는 오류 집중 현상을 완화하는 데 목적이 있다. 즉, 본 기법은 채널 특성을 정밀하게 추정하거나 활용하기보다는, 오류가 특정 심볼 구간에 집중되지 않도록 분산시키는 방향으로 설계되었다. 이러한 접근은 채널 조건이 빠르게 변하거나 정확한

채널 모델을 확보하기 어려운 환경에서도 비교적 안정적인 동작을 기대할 수 있다.

실제 무선 전송 환경에서 이미지 시맨틱 통신 실험을 수행하였다. 비교 대상으로는 전처리를 적용하지 않은 기존 전송 방식을 사용하였다. 실험에서는 이미지 기반 시맨틱 통신 시스템을 대상으로 하였으며, 인코더와 디코더는 동일한 학습 모델을 사용하였다. 전송 과정에서는 일반적인 다중 반송과 기반 무선 전송 구조를 고려하였고, 수신단에서는 채널 보상 및 등화 과정을 거쳐 시맨틱 디코더에 입력하였다. 제안한 전처리 기법은 비교의 공정성을 위해 동일한 조건에서 적용 여부만을 달리하여 평가하였다. 실험 결과, 제안한 심볼 재배열 및 스프레딩 전처리를 적용한 경우, 기존 방식 대비 안정적인 복원 성능을 확인할 수 있었다. 특히 채널 환경 변화에 따른 성능 변동이 상대적으로 완만하게 나타났다.

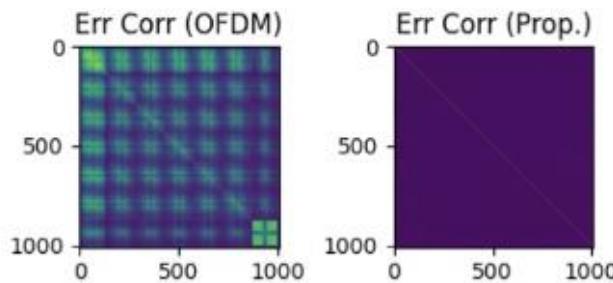


그림 1 전처리 방식 전후 신호를 이퀄라이징 과정을 통해 복원했을 때 실제 수신 신호와의 오차에 대한 상관 계수. 전처리를 하지 않은 상관 계수 분포(왼쪽)과 전처리 후의 상관 계수 분포(오른쪽)

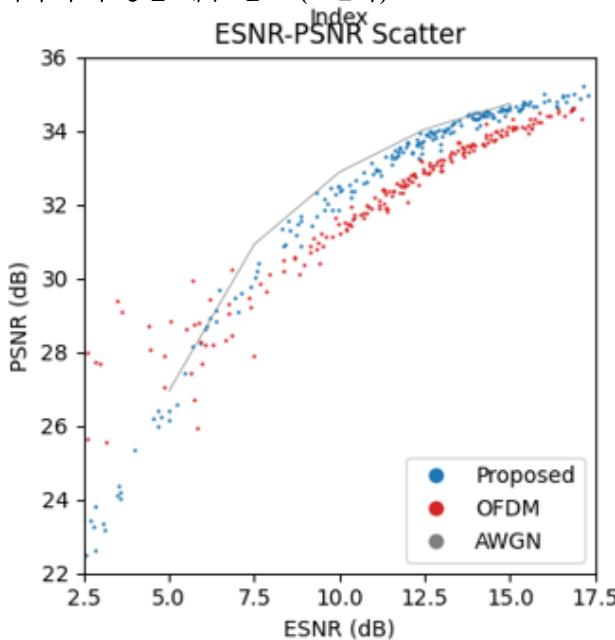


그림 2 전처리 기법 적용 전후의 심볼 오류 간 상관 계수. 회색 기준선은 이론적으로 계산된 성능이며, 빨간 점들은 전처리를 하지 않은 기본 OFDM 방식을 사용할 때의 결과이고, 파란 점들은 제안한 전처리를 적용하였을 때의 결과이다.

그림 1 은 수신 후 심볼 오류 간 상관 계수를 비교한 결과를 나타낸다. 기존 OFDM 기반 전송에서는 시간-주파수 차원의 연속성으로 인해 오류가 특정 심볼 구간에 집중되는 경향을 보인다. 반면, 제안한 전처리

기법을 적용한 경우 오류 상관성이 전반적으로 감소하며, 특정 인덱스에 대한 집중 현상이 완화됨을 확인할 수 있다.

그림 2 는 채널 상태 변화에 따른 복원 성능을 PSNR 기준으로 비교한 결과이다. 기존 방식의 경우 동일한 ESNR 조건에서도 복원 성능의 변동 폭이 크게 나타난다. 반면, 제안한 전처리 기법을 적용한 경우 PSNR 분포가 보다 안정적인 경향을 보이며, 전반적인 성능 변동이 감소함을 확인할 수 있다.

III. 결론

본론에서는 간단한 전처리 기법을 통해 시맨틱 통신 시스템의 채널 환경 민감도를 완화하는 방법을 제안하였다. 제안 방식은 추가적인 학습 과정 없이 적용 가능하며, 실제 무선 환경에서 일정 수준의 성능 개선 효과를 보였다. 향후 다양한 채널 환경에 대한 추가적인 검증을 통해 적용 가능성 확대할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 지원(No. 2021-0-00486, No. 2021-0-02208)과 2023년도 두뇌한국 21 사업(4 단계 BK21 사업)의 지원을 받아 수행된 연구임(School of Integrated Technology / BK21 Graduate Program inIST).

참고 문헌

- [1] D. Gündüz, Z. Qin, I. E. Aguerri, H. S. Dhillon, Z. Yang, A. Yener, K. K. Wong, and C.-B. Chae, "Beyond transmitting bits: Context, semantics, and task-oriented communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 1, pp. 5– 41, Nov. 2023.
- [2] E. Bourtsoulatze, D. Burth Kurka, and D. Gündüz, "Deep joint source-channel coding for wireless image transmission," *IEEE Trans. Cogn. Commun. and Netw.*, vol. 5, no. 3, pp. 567– 579, May 2019
- [3] M. Yang, C. Bian, and H.-S. Kim, "OFDM-guided deep joint source channel coding for wireless multipath fading channels," *IEEE Trans. Cogn. Commun. and Netw.*, vol. 8, no. 2, pp. 584– 599, Feb. 2022.
- [4] H. Yoo, D. Choi, Y. Kim, Y. Kim, S. Kim, C.-B. Chae, and R. W. Heath Jr., "Bridging neural networks and wireless systems with MIMO-OFDM semantic communications," *IEEE Wireless Communications*, vol. 32, no. 5, pp. 48– 55, Sept. 2025