

다중 접속 채널을 위한 확산 강화 NOMA 기반

Deep Joint Source–Channel coding

서재우, 서효운*
광운대학교, 성균관대학교

jwseo@kw.ac.kr, * hyowoonseo@skku.edu

Diffusion-Enhanced NOMA Guided Deep Joint Source–Channel Coding for Multiple Access Channels

Jaewoo Seo, Hywoon Seo*
Kwangwoon Univ., *Sungkyunkwan Univ.

요약

본 논문은 다중 사용자 환경에서 고효율 무선 이미지 전송을 위해 비직교 다중 접속(Non-Orthogonal Multiple Access, NOMA) 기반 Deep JSCC(Joint Source–Channel Coding) 구조를 제안하고, 복원 성능 향상을 위해 디코더(decoder) 후단에 확산 모델(diffusion model) 기반 복원 모듈을 결합한 시스템을 구성하였다. 또한 제안된 확산 강화 비직교 다중 접속 모델 구조는 기준 시간 분할 다중 접속 모델(Time Division Multiple Access, TDMA) 대비 향상된 복원 성능을 보였다.

I. 서 론

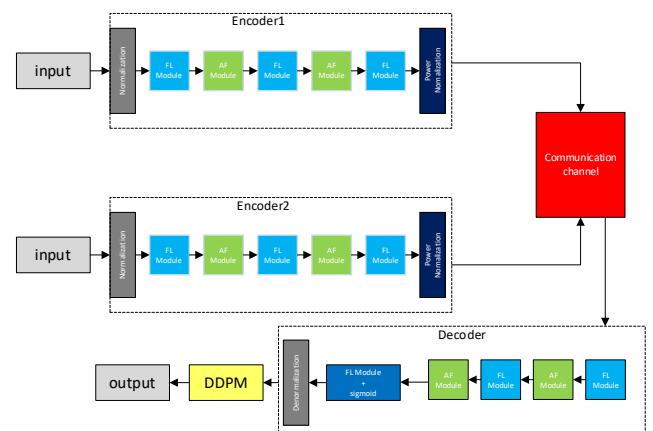
현대 무선 통신 시스템은 고속 데이터 전송 및 초저지연 응용 환경의 요구에 따라 발전하고 있으며, Shannon 이 제안한 기준의 분리 기반 소스-채널 코딩(Source–Channel coding) 방식은 다중 사용자 환경 및 유한 블록 길이 조건에서 비최적성을 보이는 한계가 있다 [1]. 이를 극복하기 위해 딥러닝 기반의 종단 간 Deep JSCC 방식이 주목받고 있으며, 이 방식은 낮은 SNR(Signal Noise Ratio)에서도 점진적 성능 저하를 보이는 강건한 특성을 가진다 [2].

본 논문에서는 Deep JSCC 프레임워크를 기반으로 한 비 직교 다중 접속 기술 기반 다중 사용자 이미지 전송 시스템을 제안하며, 디코더 출력의 노이즈 억제 및 세부 묘사 향상을 위해, denoising 확산 모델 기반 정제 모듈을 추가하였다. 제안된 시스템은 다중 접속 채널(Multiple Access Channel, MAC)에서의 신호 중첩 문제를 효과적으로 처리하고, PSNR(Peak to Signal Noise Ratio) 및 SSIM(Structural Similarity Index Measure) 향상 효과를 실험적으로 확인하였다.

II. 본론

본 논문에서는 두 개의 송신기와 단일 수신기가 존재하는 업링크 다중 접속 채널(MAC) 환경을 고려하며, 채널 모델은 가산 백색 가우시안 잡음(Additive white Gaussian Noise, AWGN) 및 Rayleigh fading 을

제안한다. 또한, 복원 이미지의 시작적 품질 개선을 위해, 디코딩 결과에 후속적으로 확산 모델 처리 단계를 설계하였다. 제안하는 전체 구조는 그림 1에 요약된다.



[그림 1] 제안하는 Diffusion Enhanced-NOMA DEEP JSCC 구조

각 송신기 $i \in \{1,2\}$ 는 입력 이미지 $x_i \in \mathbb{R}^{C_{in} \times W \times H}$ 받아, 인코딩 함수 $E(\cdot)$ 통해 복소 잠재 벡터(Complex latent vector) $z_i \in \mathbb{C}^k$ 로 변환하고, z_i 벡터는 다음 식 (1)과 같이 평균 전력 제약 조건을 만족한다.

$$\frac{1}{k} \|z_i\|_2^2 \leq P_{avg} \quad i=1,2 \quad (1)$$

수신기는 중첩된 신호 $y = z_1 + z_2 + n$ 을 수신하고, 디코딩 함수 $D(\cdot)$ 통해 두 이미지를 동시에 식 (2)와 같이 복원한다.

$$[\hat{x}_1, \hat{x}_2] = D(y) \quad (2)$$

학습 시에는 원본 이미지와 복원된 이미지 간의 평균 제곱 오차(Mean Squared Error, MSE)를 손실 함수로 식 (3)을 사용하여 모델을 최적화한다.

$$L(\theta) = MSE(x_1, \hat{x}_1) + MSE(x_2, \hat{x}_2) = \frac{1}{m} \|x_1 - \hat{x}_1\|_2^2 + \frac{1}{m} \|x_2 - \hat{x}_2\|_2^2 \quad (3)$$

여기서 $m = C_{in} \times W \times H$ 는 전체 픽셀 수이다. 또한 수신기 SNR에 따라 적응적 압축을 수행하기 위해, 송신기 인코더(encoder)에는 AF(Attention Feature) 모듈이 삽입되며, 피드백 채널을 통해 측정된 SNR 이 입력된다[3]. 다양한 SNR 환경에서의 훈련을 통해 강건한 성능을 유도할 수 있으며, AF 모듈은 SNR에 따라 압축 강도를 동적으로 조절한다.

또한, 비직교 다중 접속의 중첩 특성으로 인한 신호 구분 문제를 해결하기 위해 송신기마다 고유한 학습 가능한 임베딩 텐서 $r_i \in \mathbb{R}^{1 \times W \times H}$ 부여하고 입력 이미지에 식 (4)와 같이 결합한다.

$$\tilde{x}_i = \text{Concat}(x_i, r_i) \in \mathbb{R}^{(C_{in}+1) \times W \times H} \quad (4)$$

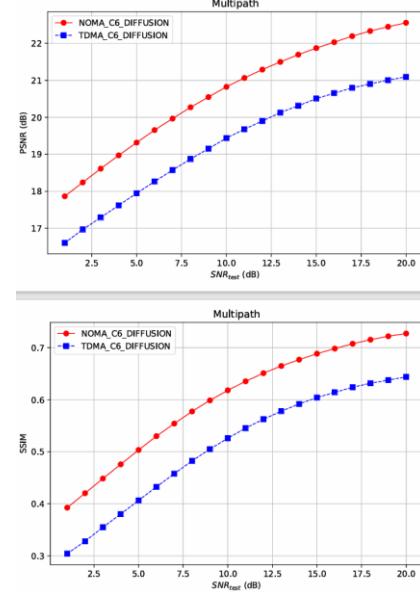
마지막으로, 수신기에서 복원된 이미지에 확산 모델 기반 후처리 네트워크를 적용하여 시각 품질을 향상시킨다.

III. 결론

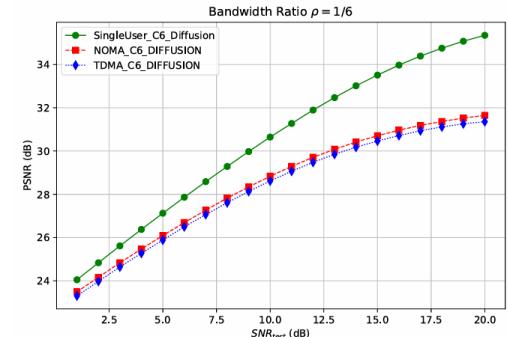
본논문에서는 무선 환경에서의 효율적인 이미지 전송을 위해 Deep JSCC 구조에 비직교 다중 접속 및 확산 모델 기반 후처리 모델을 통합한 새로운 통신 프레임워크를 제안하였다. 특히, 다중경로 환경과 같은 실질적인 무선 채널 조건을 고려하고, 송신기 간 간섭을 고려한 학습 전략과 SNR 적응형 AF 모듈을 활용함으로써, 다양한 환경에서의 강건한 복원 성능을 실현하였다. 또한, 실험은 CIFAR-10 데이터셋을 기반으로 구성되었으며, 제안된 모델은 PyTorch 기반으로 구현하였다. 다중 사용자 시나리오는 디바이스 2 개로 설계되었고, 전송 채널은 다중경로 및 백색 가우시안 잡음 채널 환경을 시뮬레이션 하였다. 또한, 학습은 다양한 SNR 0~20dB 을 무작위로 샘플링 하여 attention 기반으로 수행되었다. 또한, 확산 모델 기반 후처리 과정을 통해, 전송 과정에서 손상된 세부 정보를 보완하였다.

시뮬레이션 결과는 그림 2 과 그림 3 에서 다음과 같은 결론을 도출하였다. 그림 2 은 각각 PSNR 및 SSIM 지표에 대한 SNR 변화에 따른 시간 분할 다중 접속 대비 비직교 다중 접속 성능 우위를 명확히 드러내며, 약 1~2dB 수준의 PSNR 및 0.1 수준의 SSIM 향상을 나타낸다. 그림 3 에서는 이상적인 SingleUser 전송과의 비교를 통해, 제안된 비직교 다중 접속 모델이 얼마나 균접한 성능을 달성할 수 있는지를 보여준다. 따라서, 실질적인 무선 채널 환경에서도 고품질 이미지 전송이 가능함을 보였으며, 특히 다중 접속 조건에서도 디지털 전송 방식의 한계를 극복하고, 강건하고 효율적인 성능을

제공하는 통신 시스템 구현 가능성을 실험적으로 검증하였다.



[그림 2] 다중경로 환경에서 NOMA 및 TDMA PSNR/SSIM 성능



[그림 3] AWGN 환경에서 SingleUser, NOMA 및 TDMA PSNR 성능

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, under the ITRC (Information Technology Research Center) support program (IITP-205-RS-2023-00258639) supervised by the IITP.

참 고 문 헌

- [1] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," The Bell system technical journal, vol. 27, no. 3, pp. 379– 423, 1948.
- [2] E. Bourtsoulatze, D. B. Kurka, and D. Gündüz, "Deep joint source channel coding for wireless image transmission," IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw., vol. 5, no. 3, pp. 567– 579, Sep. 2019.
- [3] J. Xu, B. Ai, W. Chen, A. Yang, P. Sun, and M. Rodrigues, "Wireless image transmission using deep source channel coding with attention modules," IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol., early access, May 21, 2021.