

딥러닝 기반 무선 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법에 관한 연구

윤상석, 김경표*, 신우람*
부경대학교, *한국전자통신연구원

ssyun@pknu.ac.kr, kpkim@etri.re.kr, w.shin@etri.re.kr

A Study on the Deep Learning-based Channel Estimation and Phase Noise Compensation

Sangseok Yun, Kyeongpyo Kim*, Wooram Shin*

Pukyong National Univ., *Electronics and Telecommunications Research Institute

요 약

본 논문에서는 차세대 무선통신 시스템을 위한 딥러닝 기반 무선 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법에 관한 연구를 수행하였다. 차세대 무선통신 시스템의 주파수 대역 후보로 예상되는 sub-THz 대역은 반송파 주파수에 비례적으로 증가하는 위상 잡음으로 인해 상당한 성능 열화가 발생하므로 이에 대한 대책이 필수적이다. 본 논문에서는 딥러닝 기술을 활용하여 무선 채널의 페이딩을 보다 정확하게 추정하고 동시에 위상 잡음을 효과적으로 보상할 수 있는 기법에 관한 연구를 수행하였다. 성능 평가 결과 기존 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법 대비 낮은 비트 오류율을 획득할 수 있음을 확인할 수 있었다.

I. 서론

지난 수십년간 주파수 대역폭 수요는 꾸준히 증가해왔으며, 최근 무선통신의 다양한 응용 분야로의 확장과 더불어 대역폭 수요가 급증하고 있다. 이러한 대역폭 수요를 만족시키기 위해 차세대 이동통신 시스템은 테라헤르츠 (THz: Tera Hertz) 주파수 대역을 활용할 것으로 예측되고 있다. THz 주파수 대역을 활용하는 경우 넓은 대역폭을 확보하고 급증한 주파수 수요를 만족시킬 수 있을 것으로 기대되나, 저주파 대역에서는 관측되지 않았던 다양한 문제들이 발생할 수 있다.

테라헤르츠 주파수 대역의 대표적인 문제점 중 하나는 반송파 주파수에 비례적으로 증가하는 위상 잡음 문제이다. 위상 잡음은 송신 및 수신 과정에서 사용되는 로컬 오실레이터가 발생시키는 반송파 신호에 포함된 잡음으로 반송파 주파수가 두 배가 될 때 마다 위상 잡음의 PSD (power spectral density)가 약 6dB 씩 증가[1]한다. 기존 무선통신 대비 수십 내지 수백 배 이상 높은 주파수 대역을 이용하는 테라헤르츠 무선통신은 이러한 위상 잡음의 영향으로 인해 수신 성능의 상당한 열화가 발생하므로 높은 성능 획득을 위해서는 위상 잡음 보상에 관한 연구가 필수적이다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 딥러닝 기술을 활용하여 무선 채널 추정 및 위상 잡음 보상을 수행하는 기법을 제안하였다. 본 논문에서 제안하는 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법을 활용하는 경우 기존 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법에 비해 동일 수신 신호 대 잡음 비 (SNR: signal-to-noise ratio)에서 낮은 비트 오류율을 획득할 수 있음을 모의실험을 통해 검증하였다.

II. 딥러닝 기반 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법

본 논문에서 고려하는 송수신 시스템 모델은 다음과 같다. 먼저 송신기는 랜덤 비트 시퀀스를 생성한 후 QAM (Quadrature Amplitude Modulation) 변조를 통해 송신 심볼을 생성하고 OFDM (orthogonal frequency division modulation) 변조 후 무선 채널을 통해 전송한다. 이 과정에서 송신기는 채널 추정을 위한 DM-RS (demodulation reference signal) 신호와 위상 잡음 보상을 위한 PT-RS (phase tracking reference signal) 신호를 함께 전송[2]한다. 수신기는 무선 채널 및 위상 잡음을 통과한 수신 신호를 OFDM 복조한 후 DM-RS (demodulation reference signal) 신호로부터 채널을 추정하고 등화를 수행한다. 다음으로 PT-RS (phase tracking reference signal) 신호로부터 위상 잡음 보상을 위한 필터를 추정하고 등화된 수신 신호에 이를 적용해 위상 잡음을 보상한다. 마지막으로 수신기는 위상 잡음이 보상된 수신 신호에 QAM 복조를 적용하여 송신 비트 시퀀스를 추정한다.

상용 무선통신 시스템에서는 DM-RS 신호로부터의 무선 채널 추정 및 PT-RS 신호로부터의 위상 잡음 보상 필터 추정을 위해 LS (least square) 추정 기법을 사용한다. 수신 신호가 무선 채널 혹은 위상 잡음 중 한 가지에만 영향을 받는 경우 LS 추정 기법이 높은 성능을 획득할 수 있으나 일반적으로 수신 신호는 무선 채널과 위상 잡음을 동시에 겪는다. 따라서 오차의 전파에 의해 수신 성능의 열화가 불가피하며, 특히 위상 잡음의 영향이 큰 테라헤르츠 주파수 대역의 경우 이러한 문제가 심화되어 치명적인 성능 감소가 발생한다.

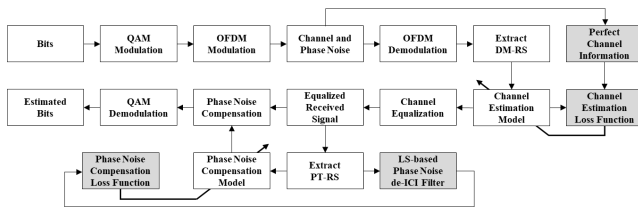


그림 1. 딥러닝 기반 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법

본 논문에서는 이러한 채널 추정 및 위상 잡음 보상의 성능을 향상시키기 위해 딥러닝 기법을 활용하는 것을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 딥러닝 기반 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법의 개념도를 그림 1에 도시하였다. 제안하는 기법에서는 LS 추정 기법을 활용하는 기존 기법과 달리 채널 추정 인공 신경망을 활용해 채널 추정을 수행하고 위상 잡음 보상 인공 신경망을 활용하여 위상 잡음 보상 필터 추정을 수행한다. 채널 추정 인공 신경망은 실제 무선 채널과 신경망의 출력 사이의 MSE (mean squared error)를 최소화하도록 훈련되었으며, 위상 잡음 보상 인공 신경망은 LS 추정 기법을 이용해 획득한 위상 잡음 보상 필터와 신경망의 출력 사이의 MSE를 최소화하도록 훈련되었다. 그림 1에서 회색 음영 처리된 블록 및 굵은 실선은 인공 신경망의 훈련 과정에서만 수행되므로 실제 동작 시 연산이 발생하지 않는다.

III. 모의 실험

본 논문에서 제안한 딥러닝 기반 무선 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법의 성능을 평가하기 위해 기존 LS 추정 기반 수신기와 제안 기법을 활용하는 수신기의 수신 비트 오류율 성능을 모의 실험을 통해 비교하였다.

제안 기법이 사용하는 채널 추정 인공 신경망은 5개의 2D convolutional layer를 쌓아 구성하였으며 각 layer는 $[9 \times 5, 5 \times 5, 5 \times 5, 5 \times 5, 5 \times 5]$ 의 kernel size와 $[64, 64, 64, 32, 1]$ 의 filter size를 갖는다. 뿐만 아니라 비선형성을 위해 마지막 layer를 제외한 각 layer의 출력에 ReLU (rectified linear units) 활성화 함수를 적용하였다. 제안 기법이 사용하는 위상 잡음 보상 인공 신경망의 경우 6개의 fully connected layer를 쌓아 구성하였으며, 각각 $[312, 624, 1248, 624, 312, 10]$ 개의 hidden node를 갖는다. 마찬가지로 마지막 layer를 제외한 각 layer의 출력에 ReLU 활성화 함수를 적용하였으며 신경망의 정규화를 위해 20% dropout을 적용하였다. 두 인공 신경망 모두 훈련에 ADAM optimizer를 사용하였으며, 학습률과 배치 크기는 각각 0.0001과 32를 사용하였다.

위상 잡음 생성을 위해 표준화 단체 3GPP가 sub-THz 대역에서 실측한 위상 잡음 모델[3]을 사용하였으며, 모의 실험에서 사용한 무선 통신 시스템, 무선 채널 및 위상 잡음 모델의 매개변수는 표 1에 요약하였다.

표 1 모의 실험 매개변수

Carrier frequency	30 GHz
Subcarrier spacing	30 kHz
Modulation order	16 QAM
Channel model	TDL-C
Delay spread	300 ns
Maximum Doppler shift	50 Hz
Phase Noise Model	Parameter set A [3]
PSD0	-79.4 dBc/Hz
Fp	[0.1, 0.2, 8] MHz
Fz	[1.8, 2.2, 40] MHz

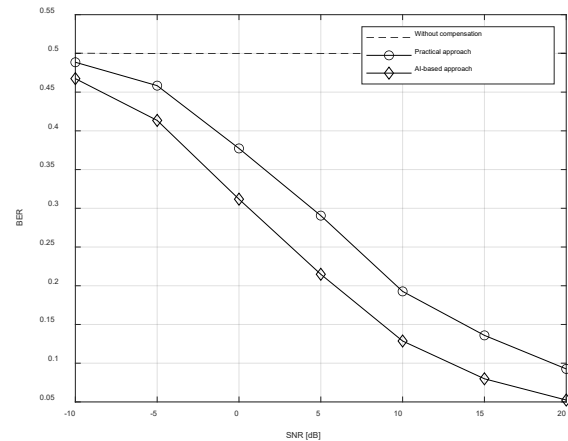


그림 2. SNR에 대한 비트 오류율 성능 비교

그림 2에 제안하는 딥러닝 기반 무선 채널 및 위상 잡음 보상 기법을 활용하는 수신기와 기존 LS 추정 기반 수신기, 그리고 채널 등화 및 위상 잡음 보상을 수행하지 않는 수신기의 비트 오류율을 비교하였다. 먼저 채널 등화 및 위상 잡음 보상을 수행하지 않는 수신기의 경우 SNR에 무관하게 수신률이 불가능한 것을 확인할 수 있다. 또한, 제안하는 딥러닝 기반 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법을 활용하는 수신기가 SNR에 무관하게 기존 LS 추정 기반 수신기에 비해 낮은 비트 오류율을 획득하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구 계획

본 연구는 테라헤르츠 주파수 대역을 활용하는 차세대 무선통신 시스템을 위한 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법에 대한 연구이다. 본 연구에서 제안한 딥러닝 기반 채널 추정 및 위상 잡음 보상 기법을 활용하는 경우 기존 기법 대비 향상된 비트 오류율 성능을 획득할 수 있었으며, 결합 복호, 반복 복호 등을 통해 제안 기법의 성능을 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.2021-0-00746, Tbps 무선통신 기술 개발).

참고 문헌

- [1] A. Ergintav, F. Herzel, G. Fischer, and D. Kissinger, "A Study of Phase Noise and Frequency Error of a Fractional-N PLL in the Course of FMCW Chirp Generation," IEEE Trans. Circuits and Systems, vol. 66, no. 5, pp. 1670-1680, May 2019.
- [2] 3GPP TS 38.211. "NR; Physical channels and modulation (Release 15)." 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network.
- [3] 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #85, R1-163984, "Discussion on phase noise modeling," Nanjing, China 23rd - 27th May 2016.