

# 제한된 채널 상태 정보를 통한 자율적 빔포밍을 수행하는 무선 유닛 설계 방안

최민우, 박상천, 이성빈, 성원진  
서강대학교 전자공학과

wsung@sogang.ac.kr

## Design of a Radio Unit Performing Autonomous Beamforming via Statistical Learning of Feedback Signals

Minwoo Choi, Sangchun Park, Sunbeen Lee, Wonjin Sung  
Department of Electronic Engineering, Sogang University

### 요 약

제한된 채널 상태 정보를 갖는 채널 상태 정보를 활용하여 효율적인 빔포밍을 수행하는 방안은 거대 규모 다중 입출력 송수신 전송을 위해 중요한 설계 요소이다. 5G NR 을 비롯한 3GPP 표준에서 채택되어 사용되는 이산 푸리에 변환 기반 코드백터를 사용하는 빔포밍은 서비스 영역의 지리적 특성과 사용자 분포에 무관한 고정된 위치로의 빔 형성을 수행함으로써 인해 환경 및 이동성 적응에 제약을 갖는다. 본 논문에서는 사용자의 제한된 채널 상태 정보를 통계적으로 활용하는 심층 학습을 적용하여 무선 유닛에서 자율적으로 코드백터를 변형하여 빔포밍을 수행하는 방안을 제안하고 적용 사례를 소개한다.

### I. 서 론

채널 상태 정보 (channel state information; CSI)의 제한된 채널을 이용하는 다중입력-다중출력 (multiple-input multiple-output; MIMO) 전송 수행 시 빔포밍 (beamforming) 성능은 해당 무선 유닛 (radio unit)에서 사용하는 코드북 (codebook)에 크게 좌우된다. 코드북은 사용자에 의해 선호 코드 벡터로 선택될 가능성이 있는 빔포밍 벡터의 집합이다. 다양한 코드북 설계 방안 중 이산 푸리에 변환 (discrete Fourier transform; DFT) 기반 코드북은 방향성 빔 형성을 위해 설계 및 활용이 용이하여 3GPP 표준을 포함하여 광범위하게 채택되어 적용되고 있다 [1]. 그러나 DFT 코드북은 기지국 서비스 영역의 지리적 특성을 반영하지 않고 시변하는 사용자 분포에 적응하지 않음으로 인해, 코드북 내의 코드벡터들 중 일부는 거의 사용되지 않는 상황이 발생하는 등 효율성이 감소되는 문제를 가지고 있다.

본 연구에서는 사용자들로부터 보고받는 제한된 채널 상태 정보의 통계를 무선 유닛의 심층 신경망 (deep neural network; DNN)에 대한 입력으로 사용하여 자율적으로 빔포밍을 수행하는 방안을 제안한다. 심층 신경망과 통계적 제한된 채널 상태 정보 간의 실시간 상호 작용은 주어진 환경에 적응적으로 업데이트되는 코드북의 생성을 가능하게 한다.

### II. 학습을 통한 자율적 빔 생성 방안

다중 사용자 MIMO 하향 전송을 고려하며 전송 채널은 다중 경로 무선 통신에서 널리 사용되는 Saleh-Valenzuela 채널 모델을 기반으로 생성되었고 무선 유닛의 안테나는 균일 평면 어레이 (uniform planar array; UPA)를 활용함을 가정하였다 [2][3].

채널 상태를 추정하기 위해 사용자에게 보고받는 대표적인 제한된 채널 상태 정보에는 코드북의 빔포밍 벡터들 중 각 사용자가 선호하는 코드벡터의 인덱스를 나타내는 PMI (precoding matrix indicator)와 해당 코드벡터를 통한 전송 채널의 품질을 나타내는 정보인 CQI (channel quality indicator)가 있다. 사용자로부터 PMI 및 CQI 제한된 채널 상태 정보를 수신하면 무선 유닛은 동시 다중 사용자 전송을 위한 사용자 집합을 스케줄링하고 프리코딩 행렬 (precoding matrix)을 결정한다 [4]. 기지국은 코드북의 실시간 적용을 통해 사용자들의 제한된 채널 상태 정보를 심층 학습 (deep learning; DL)의 입력 데이터로 사용하고, 제안 방식에서는 비지도 학습 (unsupervised learning)을 활용하는 심층 학습을 수행한다.

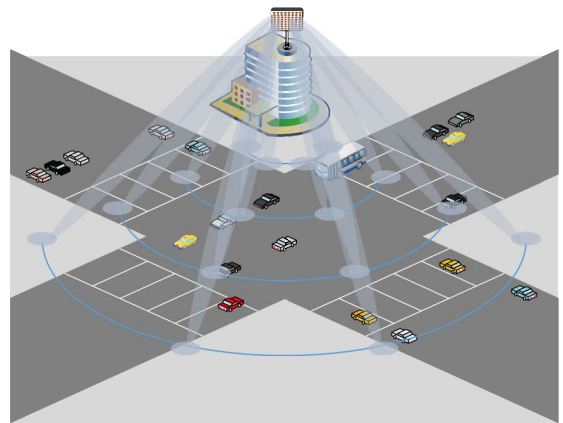


그림 1. 사거리 도로 환경 상에서의 DFT 기반 코드북을 활용하는 빔포밍

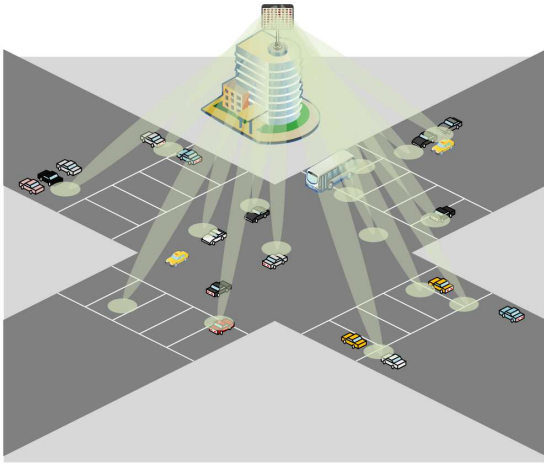


그림 2. 채널 정보의 통계적 학습을 통해 생성된 코드북을 활용하는 빔포밍.

DNN 입력은 이전에 적용된 코드북과 그에 해당하는 PMI 채널 정보로 구성되며, 출력층에서는 새로운 코드북을 출력한다. 학습의 손실 함수는 사용자와 코드벡터의 평균 상관도 (correlation)의 음의 값으로 설정한다.

### III. 성능 평가

제안 방안의 성능 평가를 위해 사거리 도로 환경상의 차량 사용자를 가정하였다. 그림 1 은 사거리 사분면 상에 위치한 무선 유닛으로부터 전송되는 DFT 코드북을 활용하는 빔포밍을 시각화 하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 사용자의 개별적 위치와는 무관한 방향으로의 빔들도 존재하게 된다. 반면 그림 2 에서 도시하는 제안 방식으로 생성된 코드북을 활용하는 빔포밍은 사용자 분포에 적응적으로 업데이트되어 전송의 효율성을 향상시키는 것을 알 수 있다. 그림 3 은 통계적 채널 신호를 입력으로 하는 학습이 반복됨에 따라, 동작 성능 지표로 활용될 수 있는 DNN 손실 함수의 값의 변화를 나타낸다. 수십 회의 반복만으로 수렴하는 성능을 나타냄을 보인다.

제안 방안의 정량적인 성능 비교를 위해 사용자의 시선 (line-of-sight; LOS) 벡터와 인접한 코드벡터 사이의 각도 차로 정의되는 각 거리 (angular distance)를 평가한 결과, 기존 빔포밍 방식의 평균 각거리는 8.6 도인 것에 비해 제안 방식의 평균 각거리는 3.5 도로 절반 이상 감소하였다. 또한 무선 통신 시스템에서의 전송 성능을 나타내는 중요한 지표인 합 전송률 (sum-rate) 은

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2 \left( 1 + \frac{\|\mathbf{h}_k \mathbf{f}_k\|^2}{\sum_{j \neq k} \|\mathbf{h}_k \mathbf{f}_j\|^2 + \sigma_n^2} \right)$$

와 같이 나타낼 수 있으며, 이때  $\mathbf{h}_k$ 와  $\mathbf{f}_k$ 는 각각  $k$  번째 사용자의 채널 및 프리코딩 형렬이다.  $K$ 는 전체 사용자 수를 의미하며,  $\sigma_n$ 는 가산 백색 가우스 잡음 (additive white Gaussian noise; AWGN)의 표준편차를 의미한다.

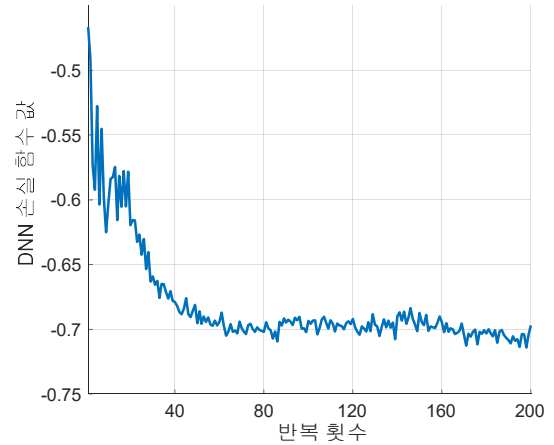


그림 3. 학습을 통한 DNN 손실 함수 값의 변화

$K = 10$  인 경우 신호 대 잡음비 10dB 환경에서 합 전송률은 14.6bits/Hz 에서 23.9bits/Hz 로 크게 증가함을 실험을 통해 확인하였다.

### IV. 결 론

기존 코드북이 가지는 한계점을 해결하기 위해 심층 학습을 통해 자율적으로 생성되는 코드북 활용 방안을 제안하였다. 시변하는 채널 및 사용자 분포에 대해 적응적인 업데이트를 통해 다양한 무선 통신 시스템에 적용될 수 있으며, 빔 생성 방향의 정확도 및 합 전송률 측면에서의 성능 이득을 검증하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 중견연구자지원사업 (과제번호 2020R1A2C1004135) 및 서강대학교 교내연구비 (과제번호 202119008)의 지원으로 수행된 연구 결과임.

### 참 고 문 헌

- [1] 3GPP TS 36.213, V16.4.0, Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures (Release 16). Dec. 2020.
- [2] A. A. M. Saleh and R. A. Valenzuela, "A statistical model for indoor multipath propagation," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 5, no. 2, pp. 128-137, Feb. 1987.
- [3] O. E. Ayach, R. W. Heath, Jr., S. Abu-Surra, S. Rajagopal, and Z. Pi, "The capacity optimality of beam steering in large millimeter wave MIMO systems," in Proc. 2012 IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC '19), Cesme, Turkey, June 2012, pp. 100-104.
- [4] 3GPP TS 38.214, V16.4.0, NR; Physical Layer Procedures for Data (Release 16). Dec. 2020.