

레이 트레이싱 기반 채널 모델링을 통한 주파수 대역 별 실내외 통신 환경 특성 분석

박태제, 성원진
서강대학교

wsung@sogang.ac.kr

Frequency-dependent indoor and outdoor communication environment analysis via ray-tracing channel modeling

Taeje Park and Wonjin Sung
Sogang University

요 약

통신 시스템이 발전하면서 실내외 다양한 환경에서 통신 목적에 따라 다양한 주파수 대역을 사용하고 있다. 이에 주파수 별 레이 트레이싱 기반 채널 모델링을 통해 실제에 가까운 실내외 통신환경에 대한 특성 분석이 필요하다. 본 논문에서는 Wireless Insite 소프트웨어의 X3D 레이 트레이싱 기반 채널 모델링을 통해 사거리 환경에서 반송주파수(carrier frequency) 및 실내외 환경에 따라 수신전력, 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio; SNR), 다중 사용자 다중 입출력(Multiple user-multiple input multiple output; MU-MIMO) 전송 시 합 전송률(sum-rate) 등을 비교 분석한다.

I. 배경 및 연구 목적

밀리미터파를 이용하는 5G 이동통신 시스템을 포함한 통신 시스템은 여러 실내외 환경에서 각 목적에 따라 다양한 주파수 대역을 사용하고 있다 [1]. 무선 통신 시스템은 다양한 환경에서 목적에 따라 활용할 수 있는 채널 특성의 이해가 필수적이다. 본 논문에서는 주파수 별 실내외에 따른 통신 환경 특성을 주변 반사체의 영향을 고려하는 레이 트레이싱 기반으로 분석하고 환경의 채널 상태를 고려한 빔포밍 방식을 제안하여 그 성능과 기존 방식을 비교하여 데이터베이스화한 결과를 제시한다.

II. Wireless Insite 를 이용한 통신 환경 분석

Wireless Insite 소프트웨어의 X3D 레이 트레이싱 모델을 이용하여 채널을 생성했으며, 소프트웨어 내에서 레이에 대한 파라미터를 조절할 수 있다 [2]. 각 레이의 간격, 최대 반사 및 회절 개수를 조절할 수 있는데 각각 프로그램에서 기본으로 제공하는 0.25°, 6, 1로 설정하였다. 장애물을 투과하는 레이의 개수 역시 조절할 수 있는데, 해당 값을 설정하기 위해 값을 1부터 4까지 바꿔가며 실험을 진행하였다. 같은 위치에서 투과 개수에 따라 생성한 네가지 채널 사이에 상관도가 평균 1.0으로 동일한 채널이 생성되어 파라미터 값을 1로 하였다. 전송 환경은 각 차선 폭이 3.5m인 왕복 6차선 사거리로 구성하고, 사거리 중심에서 서쪽으로 20m, 북쪽으로 20m, 높이 10m 위치에 아래 방향으로 12도 기울어진 8x8 MIMO 안테나를 가진 기지국이 있다고 가정한다. 프로그램을 이용하여 환경을 구성하고 반송주파수를 0.9, 1.8, 3.5, 28, 39, 60GHz로 바꿔가며 도로 위와 건물 내부에서 각 층마다 채널을 생성해 성능을 비교한다.

기지국의 MIMO 각 안테나마다 1W의 송신전력을 사용을 가정하여 수신전력을 계산하면 반송주파수가 2배가 되면 평균적으로 실내에서는 8.22dB, 실외에서는

6.48dB 감소한다. 이때 실내에서 반송주파수가 28GHz 이상이 되면 건물 내 모든 위치에서 채널 계수가 0이 되며, 반송주파수가 3.5GHz 일 때 기지국이 마주보고 있는 건물 내에서 층별 수신전력을 비교하면 평균적으로 최대 2dB 차이가 나고 건물 외부 옥상에서의 수신전력과 비교하면 평균적으로 약 21dB 낮다.

III. 실내외 채널 상태를 고려한 빔포밍 방식

5G 이동통신 시스템에서는 높은 주파수 대역을 사용하여 대규모 안테나 어레이를 통한 다중 입출력 전송이 가능하다. 이때 정확한 채널 추정을 통한 빔포밍이 중요하며, 3GPP 표준에는 이산 푸리에 변환(discrete Fourier transform; DFT) 기반 코드북이 사용되고 있다 [3]. 하지만 주파수, 실내외 등 환경에 따라 일부 빔들이 사용되지 않을 수 있기 때문에 환경에 따라 적응 가능한 코드북이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 온라인 심층 학습(online deep neural network) 모델을 이용하여 환경에 따라 적응할 수 있는 코드북을 제안하고, 이산 푸리에 변환 기반 코드북과 제안한 코드북을 이용했을 때 통신 성능을 비교한다.

온라인 심층 학습 모델은 실시간으로 사용자로부터 받는 프리코딩 행렬 지시자(precoding matrix indicator; PMI) 피드백 비율과 코드북 내의 각 빔이 안테나 조준 중심방향과 이루는 각도를 입력하여 새로운 각도를 출력하여 코드북을 생성한다. 모델은 그림 1과 같이 입력층, N_{hidden_layer} 개의 은닉층과 출력층으로 이루어져 있다. 각 은닉층은 N_{node} 개의 노드로 구성되어 있고, ReLU(rectified linear unit) 함수를 활성화 함수로 사용하며 $p_{dropout}$ 의 확률로 드롭아웃을 적용한다. 입력과 출력 차원은 각각 (3, N_{beam}), (2, N_{beam})으로 기지국이 사용자로부터 받은 N_{beam} 개의 빔에 대한 $N_{feedback}$ 개의 PMI 피드백 비율을 입력으로 하여 새로운 빔의 안테나 조준 중심 방향과 이루는 방위각과 천정각을 출력한다.

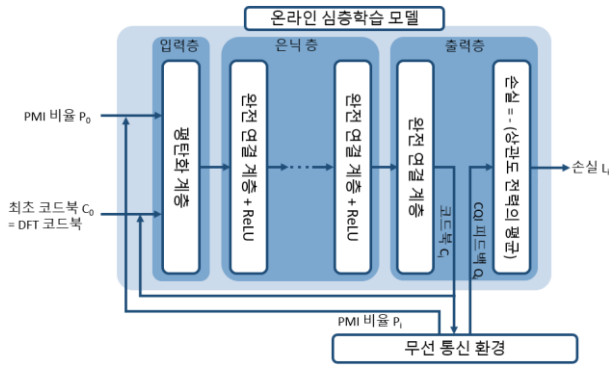


그림 1. 온라인 심층 학습 모델 구조

| 파라미터 | 값 |
|----------------------------|-------|
| N_{beam} | 64 |
| $N_{\text{middle_layer}}$ | 4 |
| N_{node} | 32 |
| p_{dropout} | 0.02 |
| N_{feedback} | 1,000 |
| $N_{\text{iteration}}$ | 500 |

표 1. 모델 파라미터

이때 새로 출력한 각도를 통해 새로운 코드북을 무선 통신 환경에 적용하여 사용자로부터 N_{feedback} 개의 PMI, CQI (channel quality indicator) 피드백을 수신하면 사용자의 채널과 가장 큰 상관도를 갖는 코드벡터와의 상관도 전력의 평균값에 -1 을 곱한 값을 손실함수로 하여 심층 학습 모델을 학습하고, 각 빔의 각도와 PMI 피드백 비율은 다시 심층 학습 모델에 입력한다. 위의 과정을 $N_{\text{iteration}}$ 만큼 반복한다. 모델 학습에 사용한 파라미터는 표 1 과 같으며, 최초에는 이산 푸리에 변환 기반 코드북을 통해 입력 데이터를 생성한다.

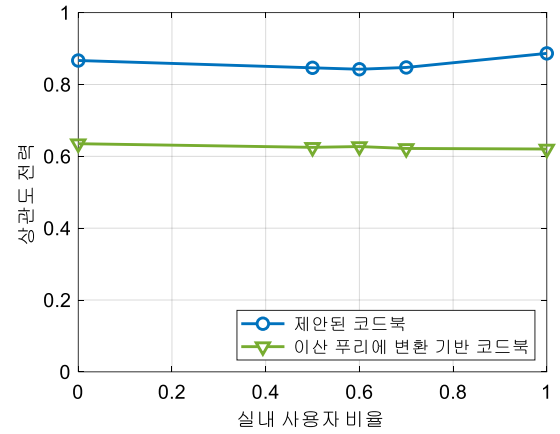
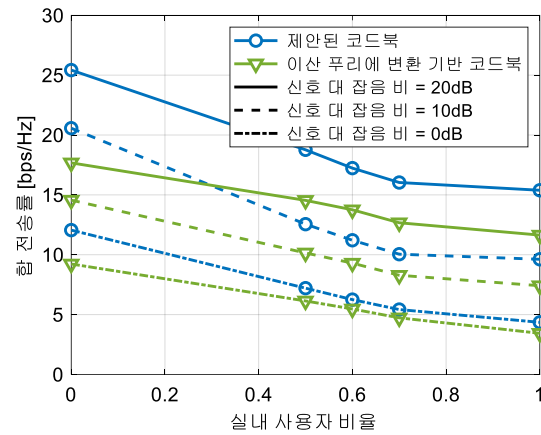
전체 사용자 중 실내 환경에 있는 사용자의 비율을 r_{indoor} 로 정의하고, 반송주파수가 3.5GHz 일 때 표 1 의 파라미터를 적용하여 학습한 모델을 통해 코드북을 생성한다. 이때 $\bar{h} = \frac{h}{\|h\|}$ 라고 할 때, k 번째 사용자의 채널 h_k 와 코드북 내의 가장 큰 상관도를 갖는 코드벡터와의 상관도 전력 (correlation power) q_k 는

$$q_k = \max_{j=1,2,\dots,N_{\text{beam}}} \|\bar{h}_k f_j\|^2$$

로 표현할 수 있다. r_{indoor} 에 따른 평균 상관도 전력은 그림 2 와 같다. 또한, 통신 성능을 나타내는 지표 중 하나인 합 전송률은

$$R = \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{\|h_k f_k\|^2}{\sum_{j \neq k} \|h_k f_j\|^2 + \sigma^2} \right)$$

와 같이 표현할 수 있다. K 는 전체 사용자 수, h_k 와 f_k 는 각각 k 번째 사용자에 대한 채널과 코드북의 코드벡터 중 가장 큰 상관도 전력을 갖는 코드벡터를 통해 만든 프리코딩 벡터를 뜻하고, σ 는 가산 백색 가우스 잡음 (additive white Gaussian noise; AWGN)의 표준편차이다. 심층학습 모델을 통해 생성한 코드북과 이산 푸리에 변환 기반 코드북을 사용했을 때 두가지 경우에 대해 추정된 채널을 통해 간섭제거 (zero forcing) 프리코딩 행렬을 구성하여 신호 대 잡음비가 0, 10, 20dB 일 때 r_{indoor} 에 따라 계산한 합 전송률은 그림 3 과 같다.

그림 2. r_{indoor} 에 따른 평균 상관도 전력그림 3. r_{indoor} 에 따른 SNR, 코드북 별 합 전송률

IV. 결론

본 논문에서는 레이 트레이싱 기반 채널 모델링을 통해 주파수 대역, 실내외에서의 통신 성능을 분석했으며, 이를 통해 실제와 유사한 환경을 구성하여 환경에 적응하는 코드북 설계 방안을 제안하고 그 성능을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 한국연구재단 중견연구지원사업의 지원으로 수행된 연구 결과임 (과제번호 2020RIA2C1004135).

참 고 문 헌

- [1] S. A. Busari, et.al, "Millimeter-wave massive MIMO communication for future wireless systems: A survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 836-869, Secondquarter 2018.
- [2] Remcom, Wireless Insite 3.3.5 Reference Manual. [Online]. Available: <http://www.remcom.com/wireless-insite>
- [3] 3GPP TS 38.214, V17.3.0, *NR; Physical layer procedures for data (Release 17)*, Sep. 2022.