

UPA 안테나 환경 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘

최윤하, 김동건, 김리나, 김선우

한양대학교 융합전자공학과

ML-based Beam Tracking Algorithm for UPA Antenna

Yunha Choi, Donggeon Kim, Yekaterina Kim, and Sunwoo Kim

Department of Electronic Engineering, Hanyang University

{summerchoi, kim2dg, kattykimchi, remero}@hanyang.ac.kr

요약

본 논문에서는 모바일 밀리미터파(mmWave) 통신 환경 및 균일 평면 배열 (Uniform Planar Array, UPA) 환경에서 수신 신호를 기반으로 도래각을 추적하는 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘을 제안한다. 기존의 빔 추적 기법들은 안테나 배열과 채널에 대한 정교한 모델링 및 복잡한 신호 처리가 필요하여 계산 복잡도가 높다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 하이브리드 빔포밍 구조에서 수신 신호만으로 단말의 방위각과 도래각 변화량을 학습하고 추정하는 머신러닝 기반 빔 추적 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 이동체 환경에서 제안 알고리즘의 빔 추적 성능을 분석한다.

I. 서론

밀리미터파(mmWave) 통신에서는 높은 경로 손실로 인해 대규모 안테나 배열 기반 빔 추적이 필수적이다 [1]. 특히 균일 평면 배열 (Uniform Planar Array, UPA) 환경에서는 2차원 각도 영역에서의 빔 정렬이 요구되므로, 정확한 도래각 추정 및 추적이 중요하다 [2], [3]. 기존의 베이지안 필터 기반 기법은 채널 및 이동성에 대한 사전 모델에 의존하며, 실제 환경의 비선형성과 잡음으로 인해 성능 저하가 발생할 수 있다 [4]. 본 논문에서는 UPA 안테나와 하이브리드 빔포밍 구조를 활용하여 단말의 도래각 변화를 추정하는 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘을 제안하고, 시뮬레이션 환경에서 그 성능을 확인한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 이동 단말이 다수의 안테나 요소로 구성된 기지국과 통신하는 SIMO 상향링크 시스템을 고려한다. 기지국은 $N = N_x \times N_y$ 개의 안테나로 이루어진 균일 평면 배열(Uniform Planar Array, UPA)을 사용한다. 단말기는 2차원 평면 ($x-y$) 상에 위치하며 초기 위치가 알려져 있고, 기지국은 2차원 평면 ($x-z$) 상에 위치한다. 기지국의 수신 신호는 방위각과 고도각 성분으로 표현된다. 기지국은 총 L 개의 RF 채널인으로 구성된 하이브리드 구조를 채택하고 부분 배열 (subarray)은 안테나 $N_{RF} = N/L$ 개로 설정한다. 하나의 사건은 총 K 개의 타임 슬롯으로 구성되며 송신 신호 b_k 는 전송 전력 $|b_k| = 1$ 로 정규화되어 있다. 기지국의 안테나 중심 z 좌표가 z_0 일 때, k 번째 타임 슬롯에서 방위각 ϕ_k 과 고도각 θ_k 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\phi_k &= \tan^{-1}\left(\frac{y_k}{x_k}\right), \\ \theta_k &= \tan^{-1}\left(\frac{z_0}{\sqrt{x_k^2 + y_k^2}}\right).\end{aligned}\quad (1)$$

k 번째 타임 슬롯에서 기지국의 수신 신호 $\mathbf{z}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{z}_k = (\mathbf{w}_k \odot \mathbf{h}_k) b_k + \mathbf{n}_k, \quad (2)$$

식 (2)에서, 복소 가우시안 잡음 벡터 $\mathbf{n}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 은 평균이 0, 분산이 σ_n^2 이다. $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 은 기지국의 빔포밍 벡터이며, $\mathbf{w}_k$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{w}_{k,l} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{a}(\theta_k, \phi_k). \quad (3)$$

$\mathbf{a}(\cdot)$ 는 배열 응답으로, 고도각과 방위각 정보를 담고 있는 파동 벡터 $\mathbf{k}$ 와 안테나 요소의 위치 벡터 $\mathbf{p}$ 의 내적으로 계산한다.

$$\mathbf{a}(\theta_k, \phi_k) = \left[e^{-i \frac{2\pi(\mathbf{k}\mathbf{p})_1}{\lambda}}, e^{-i \frac{2\pi(\mathbf{k}\mathbf{p})_2}{\lambda}}, \dots, e^{-i \frac{2\pi(\mathbf{k}\mathbf{p})_N}{\lambda}} \right]^T. \quad (4)$$

$$\mathbf{k} = [\cos\theta_k \cos\phi_k, \cos\theta_k \sin\phi_k, \sin\theta_k], \quad (5)$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_N \\ y_1 & y_2 & \dots & y_N \\ z_1 & z_2 & \dots & z_N \end{bmatrix}. \quad (6)$$

식 (6)에서, x_i, y_i, z_i ($i = 1, 2, \dots, N$)는 순서대로 UPA의 i 번째 안테나의 x 좌표, y 좌표, z 좌표를 의미한다. 채널 벡터 $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned}\mathbf{h}_k &= \alpha_k \mathbf{a}(\theta_k, \phi_k), \\ \alpha_k &= \sqrt{\lambda_k g_k}.\end{aligned}\quad (7)$$

복소 채널 이득 α_k 와 배열 응답 벡터 $\mathbf{a}(\cdot)$ 의 곱으로 구성되고, 채널 gain α_k 는 경로 손실 λ_k 와 small path fading g_k 의 곱으로 모델링한다.

III. 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘

제안된 알고리즘은 4D-CNN 모델을 활용하여 도래각 변화를 추정하는 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘이다. 타임 슬롯 k 에서 관측된 수신 신호 $\mathbf{z}_k$ 를 활용하여 입력 $\mathbf{X}_k \in \mathbb{R}^{2 \times N \times 1}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} \text{Re}(\mathbf{z}_k) \\ \text{Im}(\mathbf{z}_k) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

모델은 $\mathbf{X}_k$ 를 입력으로 받아 회귀 출력 $\hat{\mathbf{y}}_k = f_{\omega}(\mathbf{X}_k) \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 을 산출한다. 여기서 ω 는 모델의 신경망 파라미터를 나타낸다. 제안된 알고리즘은 모델이 출력한 도래각 변화량 추정값을 이용하며, 추정값은 아래의 식과 같이 갱신한다.

$$\begin{aligned}\hat{\theta}_k &= \hat{\theta}_{k-1} + \Delta \hat{\theta}_k, \\ \hat{\phi}_k &= \hat{\phi}_{k-1} + \Delta \hat{\phi}_k, \\ \hat{\theta}_0 &= \theta_0, \hat{\phi}_0 = \phi_0.\end{aligned}\quad (9)$$

모델은 갱신된 도래각 추정값을 기반으로 다음 타임 슬롯의 수신 신호를 입력받아 동일한 과정을 반복한다. 정답 도래각 $\mathbf{y}_k \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$ 는 $k-1$ 번째 타임 슬롯과 k 번째 타임 슬롯의 방위각, 고도각 차이를 나타낸다.

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \Delta \theta_k \\ \Delta \phi_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \theta_k - \theta_{k-1} \\ \phi_k - \phi_{k-1} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

알고리즘은 도래각 추정값 $\hat{\mathbf{y}}_k$ 와 정답 도래각 $\mathbf{y}_k$ 사이의 평균 제곱 오차를 최소화하도록 파라미터를 업데이트한다.

$$L(\omega) = \frac{1}{C} \sum_{i=c}^C (f_{\omega}(\mathbf{X}_c) - \mathbf{y}_c)^2. \quad (11)$$

목적함수 $L(\omega)$ 은 경사하강법을 통하여 학습을 수행하며 미니 배치 C 의 단위 손실을 적용해 ω 를 업데이트한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 신호 대 잡음 비 SNR[dB]이 10이고 안테나 개수 N 은 64개 ($N_x = N_y = 8$) 인 기지국을 고려하여, 실제 도래각과 머신러닝 알고리즘이 추정한 각의 오차를 비교한다. 송신 전력이 1일 때, SNR[dB]는 다음과 같다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma_n^2} \right). \quad (12)$$

매 사건에서 이동체는 최대 10 [m/s]의 속도를 가지며, x좌표와 y좌표는 각각 [-50m, 50m], [0m, 100m] 범위 내의 위치에서 이동성 모델에 따라 움직인다. 기지국의 안테나 중심은 [0m, 0m, 5m]에 위치한다. 이동체와 기지국 사이의 거리는 10m 이하가 되도록 설정한다. UPA 환경에서 1000번의 사건 동안, 각 사건에 대해 타임 슬롯별로 알고리즘이 추적한 도래각과 실제 도래각을 비교한다. 성능은 추정값과 실제값의 RMSE (root mean square error) 오차를 계산하며, 시뮬레이션과 머신러닝의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 환경 및 머신러닝 파라미터

Parameter	Value
기지국 안테나 원소 개수 N	64
타임 슬롯 간격 Δt	10[ms]
중심 주파수	13[GHz]
episode	100000
learning rate	10^{-5}
SNR	10[dB]
epoch	50
batch size	32
이동체 최대 속도	10[m/s]
노이즈 분산 σ_n^2	10^{-1}

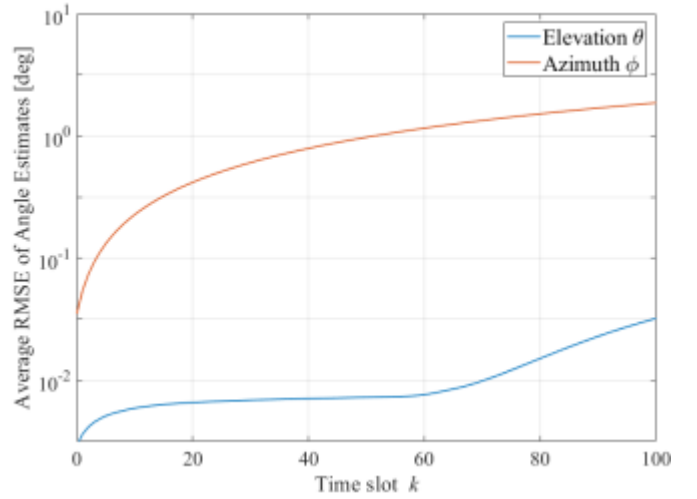


그림 1 알고리즘의 빔 추적 RMSE

그림 1는 시뮬레이션 환경에서 사건 1000번에 대한 타임 슬롯 별 알고리즘이 추정한 도래각과 실제 도래각의 RMSE 오차 평균을 계산하여 빔 추적 성능을 확인한다. 시뮬레이션 결과 제안하는 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘은 100번의 타임 슬롯 동안 방위각은 1.9도, 고도각은 0.05도 이내의 RMSE 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 이동체와 UPA 안테나 구조의 기지국 사이의 상황링크 SIMO 채널에서 실시간으로 방위각과 도래각의 변화량을 추정하는 머신러닝 기반 빔 추적 알고리즘을 제안한다. 실험 결과 방위각은 1.9도 이내, 고도각은 0.05도 이내 빔 추적 성능을 보이는 것을 확인하였다. 향후 더 정교한 빔 추적 성능 검증을 위하여, 거대한 UPA 안테나 구조를 활용한 빔 추적 알고리즘을 연구할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00409492).

참고 문헌

- [1] A. Yadav et al., "Energy and Traffic Aware Full-Duplex Communications for 5G Systems," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 11278-11290, May 2017.
- [2] L. Wei, Q. Li, and G. Wu, "Direction of Arrival Estimation with Uniform Planar Array," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC-Fall)*, Sep. 2017.
- [3] Park, Hyunwoo, et al. "Deep Q-network based beam tracking for mobile millimeter-wave communications." *IEEE Transactions on Wireless Communications* vol. 22, no. 2, 961-971, 2023.
- [4] Lim, Jaechan, Hyung-Min Park, and Daehyoung Hong. "Beam tracking under highly nonlinear mobile millimeter-wave channel." *IEEE Communications Letters* vol. 23, no. 3, 450-453, 2019.