

안테나 상호 간섭 환경 DDPG 기반 빔 추적 알고리즘

김동건, 박현우, 최완규, 김선우
한양대학교 융합전자공학과

DDPG-based Beam Tracking under Antenna Mutual Coupling

Donggeon Kim, Hyunwoo Park, Wankyue Choe, and Sunwoo Kim
Department of Electronic Engineering, Hanyang University
{kim2dg, stark95, choewg, remero}@hanyang.ac.kr

요약

본 논문에서는 모바일 밀리미터파(mmWave) 통신의 실환경 안테나 상호 간섭을 고려하는 DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) 기반 빔 추적 알고리즘을 제안한다. 기존의 빔 추적 알고리즘은 안테나 상호 간섭 보정을 위하여 Toeplitz 구조를 활용한 기법들을 사용하지만, 계산 복잡도와 지연성이 높다. 이러한 점을 극복하기 위하여 실환경 시스템 모델링 없이 수신 신호만으로 도래각을 예측하는 DDPG 기반 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션을 통하여 안테나 상호 간섭 환경에서 제안 알고리즘의 도래각 추적 성능을 비교 분석한다. 실험 결과, DDPG 기반 빔 추적 알고리즘은 안테나 상호 간섭의 강도와 관계없이 일관된 빔 추적 성능을 보인다.

I. 서론

밀리미터파(mmWave) 통신에서는 좁은 안테나 간격으로 인한 상호 간섭의 영향을 극복하는 빔 추적이 필수적이다 [1]. 기존의 베이지안 필터 및 머신러닝 기반 빔 추적 기법들은 하드웨어 결함이 존재하는 실제 환경과의 모델 불일치로 인해 성능이 저하되고 그리드 오차가 발생하는 한계를 가진다 [2] [3]. Toeplitz 구조를 활용한 상호 간섭 보정 알고리즘들이 제안되었지만, 계산 복잡성과 각도 해상도에 따라 성능이 제한적이다 [4]. 본 논문에서는 복잡한 모델링 없이 수신 신호만으로 도래각을 추론하는 DDPG (Deep Deterministic Policy Gradient) 기반 빔 추적 알고리즘을 제안하며, 이동체의 도래각 변화를 다양한 안테나 상호 간섭 환경에서 연속적으로 추적하고 성능을 비교한다.

II. 시스템 모델

본 논문은 하나의 모바일 단말기에서 N 개의 배열 안테나 구조를 가진 기지국으로 통신하는 SIMO 상향링크 채널 상황을 고려한다. 단말기와 기지국은 2차원 평면($x-y$) 상에 위치한다. 한 사건은 길이가 T 인 타임 슬롯 K 개로 이루어져 있다. T 는 파일럿 신호와 데이터 전송 파트로 구분되어 있고, k 번째 타임 슬롯에서 단말기가 송신하는 파일럿 신호는 $b_{k,l} \in \mathbb{C}^{1 \times 1}$, $b_{k,1:L} = [b_{k,1}, b_{k,2}, \dots, b_{k,L}]$ 로 표현할 수 있다. 파일럿 신호 $b_{k,l}$ 는 한 타임 슬롯 내에서 L 번 전송하고 $|b_{k,l}| = 1$ 로 설정한다. 도래각 θ_k 는 다음과 같다.

$$\theta_k = \tan^{-1} \left(\frac{y_k}{x_k} \right). \quad (1)$$

기지국이 수신하는 신호는 $z_{k,l}$ 는 다음과 같다.

$$z_{k,l} = \mathbf{w}_{k,l}^H \mathbf{C} \mathbf{h}_k b_{k,l} + n_{k,l}, \quad (2)$$

수식(2)에서, 기지국의 배열 안테나에 형성되는 위상 변화 결함을 고려한 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}_{k,l} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 와 빔포밍 각 $\psi_{k,l}$ 는 다음과 같다.

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

$\mathbf{a}(\theta)$ 는 배열 응답 벡터로 반파장 간격 안테나에서 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{-i\pi \cos \theta}, \dots, e^{-i\pi(N-1)\cos \theta}]^T. \quad (4)$$

$\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 기지국과 단말기 사이의 채널 벡터이고, Additive White Gaussian Noise $n_{k,l}$ 은 $n_{k,l} \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 의 분포를 따른다. \mathbf{h}_k 는

$$\mathbf{h}_k = \alpha_k \mathbf{a}(\theta_k), \quad \alpha_k = \sqrt{\lambda_k} g_k, \quad (5)$$

complex 채널 gain α_k 와 배열 응답 벡터 $\mathbf{a}(\theta_{k,l})$ 의 곱으로 구성되고, 채널 gain α_k 는 경로 손실 λ_k 와 small path fading g_k 의 곱으로 모델링한다. 안테나 간의 상호 간섭 행렬 $\mathbf{C}_{i,j} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{C}_{i,j} = \exp \left(-\frac{2d_{ij}}{\lambda} (\beta + i\pi) \right), \quad i \neq j \quad (6)$$

$$\mathbf{C}_{i,j} = 1 - \frac{1}{N} \sum_i \sum_{i \neq j} \mathbf{C}_{i,j}.$$

$d_{i,j}$ 는 i 번째, j 번째 안테나 사이의 거리, λ 는 파장, β 는 안테나 상호 간섭 계수이다. 상호 간섭 계수 β 의 크기가 작을수록 더 큰 안테나 상호 간섭 효과를 신호 $z_{k,l}$ 에 적용한다.

III. DDPG 기반 빔 추적 알고리즘

k 번째 타임 슬롯에서 송신한 파일럿 신호 L 번 중, 첫 번째부터 L^* 번까지의 신호는 $k-1$ 번째 예측 도래각 $\hat{\theta}_{k-1}$ 를 배열 응답 벡터 \mathbf{w} 에 적용하고 L^* 부터 L 번째까지의 신호는 k 번째 예측 도래각 $\hat{\theta}_k$ 로 \mathbf{w} 를 설정한다.

$$\mathbf{w}_{k,1:L^*} = \mathbf{w}_{k-1,L^*+1:L} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{a}(\hat{\theta}_{k-1}), \quad (7)$$

$$\mathbf{w}_{k,L^*+1:L} = \frac{1}{\sqrt{N}} \mathbf{a}(\hat{\theta}_k).$$

알고리즘의 state는 이전 타임 슬롯과 현재 타임 슬롯의 수신 신호의 실수, 허수부로 정한다.

$$\mathbf{s}_k = \begin{bmatrix} \text{Re}(z_{k-1, L^*+1:L}), \text{Im}(z_{k-1, L^*+1:L}), \\ \text{Re}(z_{k, 1:L^*}), \text{Im}(z_{k, 1:L^*}) \end{bmatrix}^T. \quad (8)$$

action \mathbf{a}_k 는 연속 행동 공간 $\mathcal{A} = [-\Delta_{\theta, \max}, \Delta_{\theta, \max}]$ 상에서 움직인다. 도래각 추정값 $\hat{\theta}_k$ 는 알고리즘에서 예측한 행동 \mathbf{a}_k 가 더해지는 형태로 업데이트한다. 알고리즘의 다양한 탐험을 위해 OUnoise를 action \mathbf{a}_k 에 추가한다.

$$\hat{\theta}_k = \hat{\theta}_{k-1} + \mathbf{a}_k. \quad (9)$$

DDPG 알고리즘은 Actor와 Critic 두가지 네트워크로 구성된다. Actor 네트워크는 state를 입력으로 받아 action을 출력하고 정책함수 $\mu(\mathbf{s} | \Pi^\mu)$ 의 파라미터 Π^μ 를 업데이트한다. Critic 네트워크는 Actor 네트워크의 state와 action을 통해 Q -value를 계산하고 가치함수 $Q(\mathbf{s}, \mathbf{a} | \Pi^Q)$ 의 파라미터 Π^Q 를 업데이트한다.

알고리즘의 reward r_k 는 이전 타임 슬롯의 수신 신호 z_{k-1} 와 현재 타임 슬롯의 수신 신호 z_k 의 비율을 절댓값에 적용하고 로그함수를 취한다.

$$r_k = \log \left| \frac{z_k}{z_{k-1}} \right|. \quad (10)$$

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 신호 대 잡음 비 SNR[dB]이 10, 안테나 개수가 64개인 기지국에서 실제 도래각과 DDPG 알고리즘이 추정한 각의 오차를 비교한다. 매 사건에서 이동체는 최대 20m/s의 속도를 가지고, x 좌표 [-100m, 100m], y 좌표 [0m, 200m] 범위 내 무작위 위치에서 이동성 모델에 따라 움직인다. 기지국 [0m, 0m]에 위치하고, 이동체는 기지국에서 최소 거리 $d_{\min} = 10\text{m}$ 를 유지하도록 설정한다. 최대 속도와 이동체-기지국 간 최소 거리를 이용해 타임 슬롯 간 도래각 변화량 $\Delta \hat{\theta}_k$ 의 상한값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta \hat{\theta}_k \leq \frac{v_{\max} \Delta t}{d_{\min}} = 0.01 [\text{rad}]. \quad (11)$$

action \mathbf{a}_k 는 도래각[rad] 추정 범위 $-0.01 \leq \Delta \theta_k \leq 0.01$ 에서 결정된다. 안테나 상호 간섭 환경에서, 1000번의 사건 동안 타임 슬롯별 알고리즘이 추적한 도래각과 실제 도래각을 비교하고, 추정값과 실제값의 RMSE(Root Mean Square Error) 오차를 계산하여 성능을 측정한다. 시뮬레이션과 DDPG 네트워크의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 환경 및 DDPG 파라미터

Parameter	Value
기지국 안테나 원소 개수 N	64
타임 슬롯 간격 Δt	5[ms]
Actor learning rate	10^{-6}
Critic learning rate	5×10^{-5}
Target update factor τ	2×10^{-4}
discount factor	0.5
OUnoise θ	0.2
OUnoise σ	0.002
Mutual Coupling factor β	0.5, 1, 2

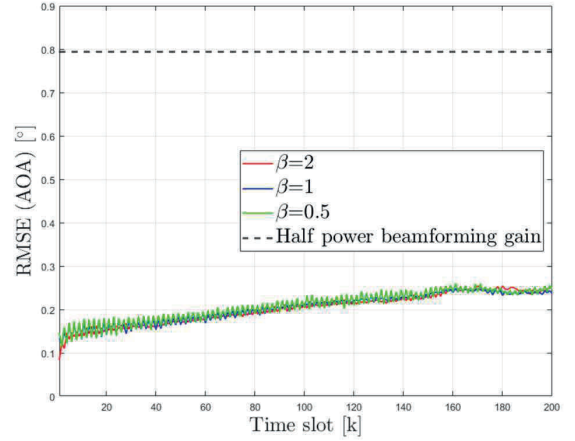


그림 1 상호 간섭 환경에서 알고리즘의 RMSE

그림 1은 사건 1000번에 대한 상호 간섭 계수 β 가 각각 0.5, 1, 2인 시뮬레이션 환경에서 타임 슬롯별로 알고리즘이 추정한 도래각과 실제 도래각의 RMSE 오차 평균을 계산하여 성능을 비교한다. 안테나 상호 간섭 계수가 각각 $\beta = 0.5$, $\beta = 1$, $\beta = 2$ 인 환경에서 알고리즘의 빔 추적 시뮬레이션 결과 모든 경우 평균 0.2도의 RMSE 오차가 발생하는 것을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 안테나 상호 간섭이 존재하는 이동체와 기지국 사이의 상향링크 SIMO 채널에서 실시간으로 빔을 추적하는 DDPG 기반 알고리즘을 제안한다. 실험 결과 3가지 강도의 안테나 상호 간섭이 있는 환경에서 DDPG 알고리즘의 빔 추적 성능이 거의 동일하며, 상호 간섭이 강한 환경에서도 알고리즘의 추적 성능이 강인하다는 것을 확인할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00428780, 6G·클라우드 리더십구축을 위한 교육 연구 오픈 허브).

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] J. Lim et al., "Beam Tracking under Highly Nonlinear Mobile Millimeter-wave Channel," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 3, pp. 450 - 453, Mar. 2019.
- [3] H. Park, A. Conti, M. Z. Win and S. Kim, "Towards Grid-Free Positioning for Near-Field Communications," in *proc. ICAIIC*, Fukuoka, Japan, 2025, pp. 0172-0175
- [4] Xie, Julian, et al. "An optimal robust adaptive beamforming in the presence of unknown mutual coupling." *Multidimensional Systems and Signal Processing* 30 (2019): 295-310.