

근거리장 통신을 위한 저 시간 복잡도 빔 트레이닝 기법

허홍준, 최완

서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소

hhj2681@snu.ac.kr, wanchoi@snu.ac.kr

Low Time Complexity Near-field Beam Training Scheme

HongJun Heo, Wan Choi

Dept. of Electrical and Computer Engineering, and Institute of New Media Communications, Seoul National Univ.

요약

본 연구에서는 상향링크 근거리장 통신 환경에서 DFT 행렬의 열벡터를 수신기(필터)로 사용하였을 때 발생하는 에너지 분산 효과(energy spread effect)를 이용하여 적은 시간 슬롯을 사용하여 최적의 근거리장 빔을 찾을 수 있는 저 시간 복잡도 빔 트레이닝 기법을 제안한다. 제안한 기법은 사용자 단말의 거리 및 각도에 따라 달라지는 에너지 분산 특성을 활용하여, 각도영역에서 채널의 주요 에너지를 포함하는 연속적인 패턴을 추정하고, 이를 기반으로 에너지 분산을 인지하는 에너지 검출 문제로 변환하여 최적의 빔을 선택한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 기법이 유효 전송률 측면에서 선형 기법보다 우수함을 보인다.

I. 서론

근거리장 (near-field) 통신은 전파가 수신 단말 주변에서 구면파 형태로 모델링되며, 원거리장 (far-field) 통신과 달리 각도뿐만 아니라 거리에 대한 분해능을 제공한다. 이러한 특성은 사용자 단말의 위치에 에너지를 정밀하게 집중시킬 수 있는 향상된 빔포밍을 가능하게 하여, 통신 성능의 극대화와 공간 자원의 효율적 활용에 기여한다.

근거리장 통신에서 각도와 거리에 대한 분해능을 활용하기 위해서는 사용자 단말의 위치에 대한 정보를 필요로 한다. 이와 관련하여 최근 근거리장 통신에서 최적의 빔을 찾는 빔 트레이닝 기법에 대한 연구[1],[2]들이 진행되었다. [1]에서는 통신 영역을 채널 벡터간 상관관계를 최소화하는 방식으로 양자화하여 각도는 주파수 분할, 거리는 시간 분할로 탐색하는 방식을 제안하였다. 그러나 이러한 탐색은 여러 개의 시간 슬롯과 많은 전력을 소모한다는 한계를 갖는다. [2]에서는 DFT 코드북의 원거리장 빔을 근거리장 채널 환경에 사용하였을 때 나타나는 에너지 분산패턴을 Fresnel 적분의 형태로 표현하고 이를 바탕으로 수치적으로 거리에 대한 정보를 추정하는 방식을 고안하였다. 그러나, 해당 방식은 수치적 연산양이 많고, 신호 대 잡음비가 큰 상황에서만 적용 가능하다.

본 연구에서는 위상 편이기를 이용하여 원거리장 빔 트레이닝에 이용되던 DFT 빔을 형성하고, 이를 근거리장 통신환경에 사용했을 때의 에너지 분산 효과를 인지한 방식으로 각도와 거리를 동시에 추정하는 방식을 제안한다. 각도-거리 구획에 대한 전체 탐색을 하는 기존 방식에 비해 제안 기법은 각도구획만을 탐색하여 시간 복잡도를 낮

추고, 탐색한 모든 각도의 수신 신호를 활용하여 낮은 신호대잡음비 환경에서도 안정적으로 거리와 각도에 대한 정보를 동시에 추정할 수 있다.

II. 본론

1) 시스템 모델

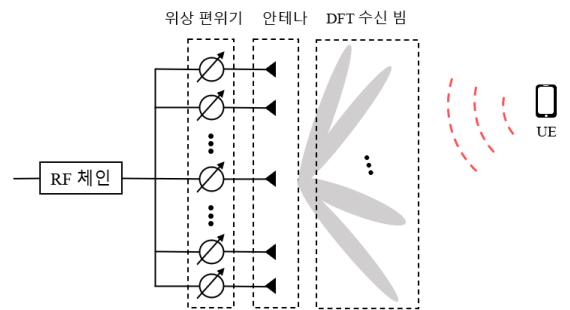


그림 1. 근거리장 빔 정렬 기법 개략도

본 논문에서는 N 개의 안테나를 가진 기지국과 단일 안테나 사용자 단말 사이의 근거리장 통신에서 상향링크 빔 트레이닝을 고려한다. 가시거리 채널은 $\mathbf{h} = \sqrt{N}\beta\mathbf{b}(\theta_0, r_0)$ 이며, (θ_0, r_0) 는 사용자의 위치정보, β 는 자유 공간 경로손실, $\mathbf{b}(\theta_0, r_0)$ 는 배열 응답 벡터 $\frac{1}{\sqrt{N}}[e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r^{(1)}-r_0)}, \dots, e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}(r^{(N)}-r_0)}]^H$, $r^{(n)}$ 는 단말과 n 번째 안테나 사이의 거리, $d = \frac{\lambda}{2}$, λ 는 파장이다. 기지국의 각 안

테나에는 위상 편이기가 연결이 되어 DFT 행렬의 열 벡터 $[\mathbf{a}(\tilde{\theta}_m)]_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[e^{-j\frac{2\pi n \tilde{\theta}_m}{\lambda}} \right]$ 에 해당하는 방향들로 위상을 보상한 신호 결합을 수행한다. 단말에서 송신한 파일럿 x 을 수신기 $\mathbf{v}_m = \mathbf{a}(\tilde{\theta}_m)$ 으로 필터링한 신호는 $y_m = \mathbf{v}_m^H \mathbf{h}x + z_m$ 이다.

2) 제안 기법

근거리장 채널에 DFT 범을 적용하면 각도 영역에서 에너지가 분산되는 것이 알려져 있다 [1]. 분산되는 정도(각도 폭)는 기지국과 사용자 단말 사이의 거리와 각도에 의존한다는 점을 이용하면 각도구획만을 탐색하여 적은 시간슬롯으로 각도와 거리를 동시에 추정할 수 있으며, 그 과정은 다음과 같다.

(1) DFT 범으로 수신한 신호 $\{y_m\}_{m=1}^N$ 에서 에너지 정보를 통해 거리 \hat{r}_0 를 추정한다.

(2) 사용자 단말이 $(\tilde{\theta}, \hat{r}_0)$ 에 위치했을 때, $\tilde{\theta}$ 로부터 $S = \frac{2}{N} \sqrt{\left(\frac{\Delta^2}{2\pi} \left(\frac{\Delta^2}{2\pi} + \frac{2}{\pi\epsilon} \right) \right)} \quad \left(\Delta = N \sqrt{\frac{\pi d(1-\tilde{\theta}^2)}{2\hat{r}_0}} \right)$ 이상 떨어진 방향을

조향하는 DFT 범을 이용하여 수신하면 에너지가 ϵ^2 이하 이므로, 충분히 작은 ϵ 에 대해 에너지 분산의 위치와 폭을 찾는 문제는 각 후보 각도 θ_i 를 기준으로 대칭인 $\pm S$ 내의 DFT 범으로 수신한 신호의 에너지 합을 최대화하는 문제로 정립할 수 있고, 이를 최대화하는 θ_i 를 $\hat{\theta}_0$ 로 추정한다.

자세한 유도 과정과 추정 파라미터 보정을 위한 인공신경망의 효과적인 활용은 본 논문의 확장 버전인 [3]에 상세히 기술되어 있다.

3) 시뮬레이션 결과

성능 검증을 위한 시뮬레이션에서는 안테나 수 $N = 256$, RF 체인의 수 $N_{RF} = 32$, $f_c = 28\text{GHz}$, $\phi_0 \sim \text{Unif}\left(-\frac{\pi}{3}, \frac{\pi}{3}\right)$ [rad], $r_0 \sim \text{Unif}(4, 60)$ [m]를 고려하였다. 트레이닝 주기, 즉 트레이닝에 사용하는 시간 슬롯 수 T_{train} 과 데이터 전송 시간 슬롯 수 T_{data} 의 비율에 따른 유효 데이터 전송률 $R_{\text{eff}} = \left(\frac{T_{\text{data}}}{T_{\text{train}} + T_{\text{data}}} \right) \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{v}_m^H \mathbf{h}|^2}{\sigma^2} \right)$ 을 비교한 결과는 그림 2(a)와 같다. 각 기법이 요구하는 범 트레이닝에 할당된 슬롯 수는 각각 $T_{\text{train, proposed}} = T_{\text{train, [2]}} = \frac{N}{N_{RF}} = 8$, $T_{\text{train, [1]}} = \frac{NQ}{N_{RF}} = 128$ 이다. 그림 1(a)를 통해 제안 기법이 문헌상의 이전 기법보다 유효 전송률을 측면에서 우수함을 확인할 수 있고, 특히 채널상관시간 (coherence time)이 짧은 상황에서는 트레이닝 주기가 짧아지기 때문에 제안 기법의 이득이 더 클 것으로 해석할 수 있다. 그림 2(b)는 $T_{\text{tot}} = 962$ 일 때 파일럿 송신 전력에 따른 유효 전송률을 그래프로 그린 결과이다. 제안한 기법은 비교적 낮은 신호대잡음비에서 선형 기법을 크게 상회하며, 송신전력이 증가함에 따라 상한에 근접하는 우수한 성능을 보인다.

III. 결론

본 논문에서는 근거리장 채널이 각도영역에서 에너지가 분산됨을 이용하여 근거리장 통신환경에서 최적의 범을 찾기 위한 저복잡도 범 트레이닝 기법을 제안하였다. 제안 기법은 많은 트레이닝 시간 슬롯을 요구하는 선형 기법에 비해 적은 트레이닝 시간 슬롯만을 사용함에도 우월한 유효 전송률을 보이며 신호대잡음비가 크지 않은 환경에서도 안정적으로 동작을 할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인

하였다.

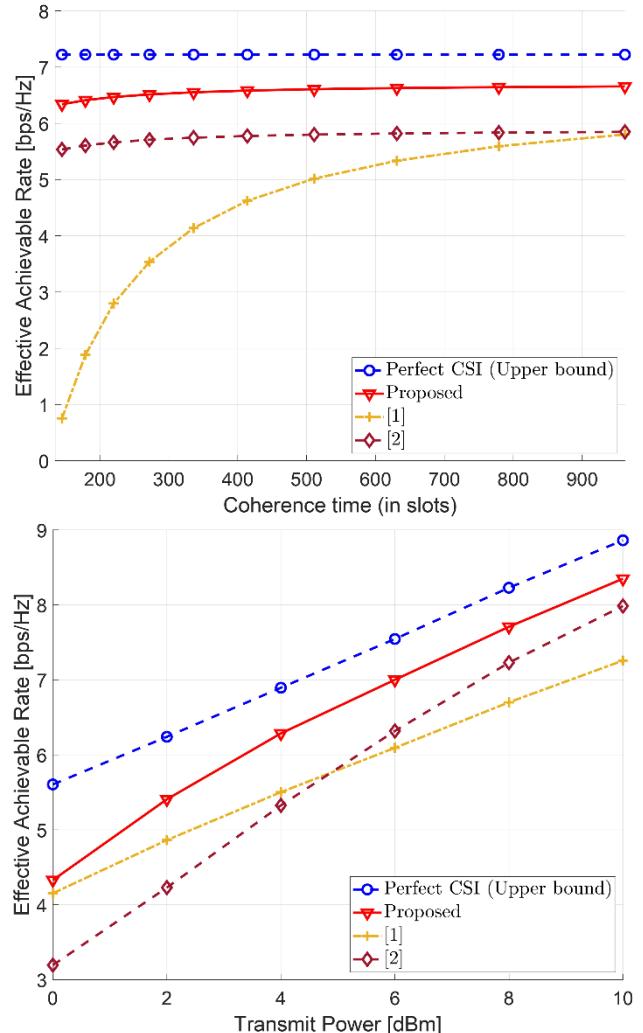


그림 2. (a) 채널상관시간, (b) 송신전력에 따른 유효 전송률

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-2021-0-02048)

참 고 문 헌

- [1] M. Cui, L. Dai, Z. Wang, S. Zhou and N. Ge, "Near-Field Rainbow: Wideband Beam Training for XL-MIMO," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 6, pp. 3899-3912, June 2023.
- [2] X. Wu, C. You, J. Li and Y. Zhang, "Near-Field Beam Training: Joint Angle and Range Estimation With DFT Codebook," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 9, pp. 11890-11903, Sept. 2024.
- [3] H. Heo and W. Choi, "DFT-based near-field beam alignment: Model-based and data-driven hybrid approach," arXiv preprint arXiv:2502.18855, 2025.