

6G 통신을 위한 센싱을 활용한 다운링크 프리코딩 기술 연구

노태엽, 심병호

서울대학교

tyroh@islab.snu.ac.kr, bshim@snu.ac.kr

Sensing-aided Downlink Precoder Design for 6G mmWave Communications

Roh Taeyup, Shim Byonghyo

Seoul National Univ.

요약

본 논문은 6G에서 점점 증가하는 데이터 속도 수요를 충족시키기 위해 최근에는 초대량 다중 입력 다중 출력 시스템이 많은 주목을 받고 있습니다. 이 시스템의 주목할만한 측면 중 하나는 매우 큰 규모의 안테나 배열과 높은 전송 주파수의 배치로 인해 채널이 위치의 함수가 되어 신호 전력을 특정 위치에 집중시키는 빔 포밍 기술이다. 이산화된 빔 코드워드의 스위핑에 의존하는 기존 접근 방식은 UM-MIMO 시스템에서 이러한 매우 날카로운 빔 포밍을 지원할 수 없다. 본 논문에서는 센싱 및 컴퓨터 비전 기술을 기반으로 한 새로운 빔 포밍 기술을 제안한다. 특히 본 논문에서는 다중 사용자 시스템에서 신호 대 잡음비를 최대화하기 위해, Fractional Programming의 최적화 기법을 사용하여 프리코딩 행렬을 설계한다. 불연속적이고 시간이 많이 소요되는 빔 스위핑 작업을 고정밀 딥러닝 기반 위치 추정으로 대체함으로써 위치 추정 정확도와 빔 이득을 크게 향상시킬 수 있다. 수치적 평가를 통해 우리는 제안된 방식이 기존의 코드북 기반 빔 포커싱 방식에 비해 상당한 위치 정확도와 데이터 속도 이득을 달성함을 보인다.

I. 서론

최근 밀리미터파(Millimeter Wave, 이하 mmWave) 대역 통신은 6G를 위한 광범위한 데이터 요구 및 지연에 민감한 애플리케이션을 통합할 수 있는 핵심 기술로 많은 주목 받고 있다 [1]. mmWave 대역의 풍부한 주파수 스펙트럼 자원을 활용함으로써 mmWave 통신은 디지털 트윈, 확장 현실(XR) 장치로 구현되는 메타버스, 고충실도 홀로그램과 같은 진정한 물입형 서비스를 지원할 수 있다. mmWave 통신의 주요 병목 현상 중 하나는 전파, 반사, 확산 산란 및 대기 흡수 손실로 인한 신호 전력이 감쇄이다. 이러한 심각한 경로 손실을 보상하기 위한 필수 요소는 초고밀도(UM) 다중 입력 다중 출력(Multiple-Input Multiple-Output, 이하 MIMO) 안테나에 의해 구현되는 빔포밍이다. 빔포밍의 주요 목적은 각 안테나에서 전송되는 신호의 위상을 제어하여 신호의 위상 지연 차이를 보상하는 것이다. 빔포밍 벡터가 신호 전파 경로의 조향 벡터와 올바르게 정렬되어야만 빔포밍 이득이 최대화되므로 기지국(base station, 이하 BS)은 해당 안테나의 정확한 하향링크 채널 정보를 획득해야 한다.

이러한 채널 정보를 획득하고 빔포밍을 수행하기 위해, 본 논문은 센싱 기술을 활용한 하향 링크 프리코더 설계 기법(Sensing-aided Downlink Precoder Design, 이하 SDPD)을 제안한다. 이산화되고 시간이 많이 소요되는 빔 스위핑 작업을 정확한 CV 기반 위치 추정으로 대체함으로써, 위치 추정의 정확도를 크게 향상시킬 수 있으며, 이는 빔 형성의 향상으로 이어진다. 그 후, 스루풋을 최대화하는 위치 인식 프리코더 설계 기술을 설계한다. SDPD의 주요 목표는 센싱 정보들에서 위치 및 클래스의 모바일의 기하학적 정보를 추출한 다음 이를 프리코딩 행렬 생성에 활용하는 것이다. 이를 위해 특정 클래스에서 의미 객체의 인스턴스를 감지하는 데 특화된 컴퓨터 비전(Computer Vision, 이하 CV) 기술인 객체 감지를 사용한다 [2]. 불연속적이고 시간이 많이 걸리는 빔 스위핑 작업을 정확한 CV 기반 위치 추정으로 대체함으로써 위치 추정 정확도를 크게 향상하여

단말로 향하는 신호 대 잡음비(Signal to Interference and Noise Ratio, 이하 SINR)를 최대화한다.

II. 본론

제안된 SDPD의 주요 목표는 센싱 기법을 사용하여 프리코딩 행렬을 설계하는 것이다. 제안 기법은 두 가지 주요 운영 단계로 구성된다: 1) CV 객체 검출기 기반 기기 위치 추정, 2) 포지션 기반 프리코딩 행렬 형성.

1) CV 객체 검출기 기반 기기 위치 추정

가장 흔하게 사용되는 카메라 센서를 기준으로 설명한다. 센서 정보를 사용한 객체 검출기는 k 단말에 대해서 센서의 좌표계를 기준으로 (u_k, v_k) 정보를 제공한다. 이어서, 해당 픽셀에 해당하는 물체로의 거리 정보 d_k 는 레이더 또는 라이다로 추출될 수 있다. 마지막으로, 이미지 평면의 (u_k, v_k, d_k) 를 실제 공간의 (r_k, θ_k, ϕ_k) 로 변환하기 위해 좌표 변환을 수행한다.

$$(\theta_k, \phi_k) = \left(\frac{(v_k - c_v)}{N_v} \theta_f, \frac{(u_k - c_u)}{N_u} \phi_f \right) \quad (1)$$

여기서 (θ_f, ϕ_f) 는 각각 수직 및 수평 화각(field of view)을 나타내며, (c_u, c_v) 는 카메라 렌즈의 기준점을 의미하고, (N_u, N_v) 는 각각 이미지의 수평 및 수직 픽셀 수를 나타낸다.

2) 포지션 기반 프리코딩 행렬 형성

객체 검출기에서 구해진 단말의 위치정보를 사용하여 프리코딩 행렬 \mathbf{F} 의 생성을 설명한다. 구체적으로, 합산 속도(sum-rate)를 최대화하는 최

적화 문제를 해결하여 \mathbf{F} 를 찾는 것으로 다음과 같이 나타낸다.

$$P: \max_{\mathbf{F}} \sum_{k=1}^K \log_2 \left(1 + \frac{|h_k^H \mathbf{f}_k|^2}{\sum_{j \neq k} |h_k^H \mathbf{f}_j|^2 + \sigma_n^2} \right) \quad (2)$$

$$\text{subject to } \|\mathbf{F}\|_F^2 < P_{tx} \quad (3)$$

여기서 로그 안에 두번째 성분은 k번째 모바일의 SINR이다. SINR은 \mathbf{F} 의 비볼록 2차 분수 함수이므로 P 의 최적값을 찾기가 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해서 direct FP(Fractional Programming)으로 접근한다 [4]. Direct FP 방법은 각 SINR 항목에 다차원 이차 변환을 적용해서 새로운 목적 함수 $\gamma(\mathbf{F}, \mathbf{Y})$ 로 공식화한다.

$$\max_{\mathbf{F}, \mathbf{Y}} \gamma(\mathbf{F}, \mathbf{Y}) \quad (4)$$

$$\text{subject to } \|\mathbf{F}\|_F^2 < P_{tx} \quad (5)$$

여기서 \mathbf{Y} 는 추가 변수이고 $\gamma(\mathbf{F}, \mathbf{Y})$ 는 (6)으로 나타낸다.

$$\gamma(\mathbf{F}, \mathbf{Y}) = \sum_{k=1}^K \log(1 + 2\text{Re}\{\mathbf{y}_k^H \mathbf{H} \mathbf{f}_k\} - \mathbf{y}_k^H (\sigma_n^2 \mathbf{I} + \sum_{j \neq k} \mathbf{H} \mathbf{f}_j \mathbf{f}_j^H \mathbf{H}^H) \mathbf{y}_k) \quad (6)$$

고정된 \mathbf{Y} 에 대해서 최적화를 통해 \mathbf{F} 값을 갱신하면서 최적의 해를 구해나간다. \mathbf{Y} 는 각 이터레이션(Iteration) 마다 (7)로 갱신된다.

$$\mathbf{y}_k = (\sigma_n^2 \mathbf{I} + \sum_{j \neq k} \mathbf{H} \mathbf{f}_j \mathbf{f}_j^H \mathbf{H}^H)^{-1} \mathbf{H} \mathbf{f}_k \quad (7)$$

III. 실험결과

시뮬레이션에서는 모바일 장치가 10x10의 정사각형 영역 내에 무작위로 분포한다. 신호 전파는 고주파 시스템에서 LoS 구성 요소에 의해 주로 결정되므로 28 GHz의 반송파 주파수를 가진 LoS 채널 모델을 사용합니다. 라이다와 카메라 센서를 사용하여 위치를 추정하였고, 카메라 이미지에서 CV 기반 객체 검출기를 통해 단말로의 각도를 추출하고 라이다 포인트 클라우드에서 거리 정보를 추출하였다 [35]. 데이터 합산 속도 측면에서 제안 기법의 성능을 평가한 결과, 제안된 SDPD 기법이 데이터 합산 속도에서 기존 방식을 능가함을 확인하였다. 제안된 기법은 5G 빔 관리 기법 그리고 워터필링 기법 비교하였다.

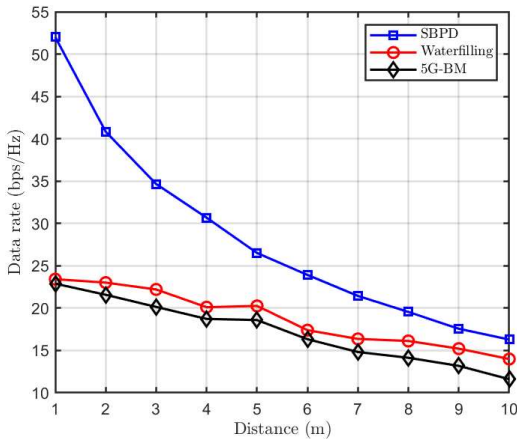


그림 1. 거리에 따른 데이터 합산 속도

그림1에서는 거리에 대한 단말로의 합계 속도를 나타내며, 우리는 제안된 기술이 벤치마크 체계를 능가함을 보여준다. 특히, 가까운 거리에서 서

로다른 단말로의 간섭을 최소화해서 차이가 증가하는 것을 확인하였다. 예를 들어, 거리 5m 내에 있는 단말에 대해서 제안 기법의 합계속도가 5G 빔 관리 기법과 워터필링 기법 대비 모두 2배 이상 증가한다.

III. 결론

본 논문에서는 5G mmWave 통신을 위한 SDPD라는 비전 보조 빔 포밍 기술을 제안한다. 사전 정의된 빔 코드워드의 스위핑에만 의존하는 기존 접근 방식과 달리 우리는 탐지 및 CV 기술을 활용하여 빔 방향을 결정한다. SDPD는 CV 기법을 통해 시각적 센싱 데이터에서 대상 장치의 기하학적 정보를 추출하여 모바일의 위치를 정확하게 식별하고 이를 통해 합산율을 최대화하는 프리코딩 행렬을 생성한다. 캡처된 센서 정보에서 위치 정보가 과생되므로 파일럿 전송 및 채널 피드백을 위한 복잡한 핸드셰이킹 작업을 최소화할 수 있어 빔 트레이닝 오버헤드가 크게 줄어든다. 실제 5G 환경에 대한 수치 평가는 SDPD가 위치 정확도와 함께 속도를 향상시키는 데 매우 효과적이라는 것을 보여준다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00208985)

참고 문헌

- [1] S. Rangan, T. S. Rappaport, and E. Erkip, "Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges," Proc. IEEE, vol. 102, no. 3, pp. 366 - 385, 2014.
- [2] Y. Ahn, J. Kim, S. Kim, K. Shim, J. Kim, S. Kim and B. Shim, "Towards Intelligent Millimeter and Terahertz Communication for 6G: Computer Vision-aided Beamforming," IEEE Wireless Communications, vol. 30, no. 5, pp. 179-186, Oct. 2023.
- [3] Z. Liu, Y. Lin, Y. Cao, H. Hu, Y. Wei, Z. Zhang, S. Lin, and B. Guo, "Swin transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows," in Proc. IEEE/CVF Int. Conf. Comput. Vis., Oct. 2021, pp. 10 012 - 10 022
- [4] K. Shen and W. Yu, "Fractional programming for communication systems-Part II: Uplink scheduling via matching," IEEE Trans. Signal Process., vol. 66, no. 10, pp. 2631 - 2644, May 2018
- [5] Y. Li, A. W. Yu, T. Meng, B. Caine, J. Ngiam, D. Peng, J. Shen, Y. Lu, D. Zhou, Q. V. Le, A. Yuille, and M. Tan, "Deepfusion: Lidar-camera deep fusion for multi-modal 3d object detection," in Proc. IEEE/CVF Conf. Comput. Vis. Pattern Recognit. (CVPR), 2022, pp. 17 182 - 17 191.