

Extremely Large-scale MIMO 통신을 위한 Near-field 빔 트레이닝 기술

김영준*, 성명기, 조용수
육군사관학교* 중앙대학교

yjkim@kma.ac.kr*, mg4768@cau.ac.kr, yscho@cau.ac.kr

Near-field Beam Training Technique for Extremely Large-scale MIMO

Yeong Jun Kim, Myeong Gi Sung and Yong Soo Cho
Chung-Ang University

요약

본 논문에서는 extremely large-scale MIMO(XL-MIMO) 통신에서 요구되는 near-field 빔형성을 위하여 빔 방향, 거리, 타이밍을 찾을 수 있는 빔 트레이닝 방식과 검출방식을 제안한다. 기존 near-field 빔 트레이닝에서 요구되는 모든 빔 방향과 거리에 대한 2-D exhaustive search 오버헤드를 감소하기 위하여 송신단에서 각각의 안테나에 서로 다른 주파수를 갖는 tone 을 실어 사용자들이 동시에 신호를 수신하여 검출할 수 있는 빔 트레이닝 방식을 제안한다. Near-field 환경에서의 모의실험을 통하여 기존 방식과 제안된 방식의 검출 성능은 유사하나, 제안된 방식에서 빔 트레이닝을 위한 오버헤드가 크게 감소하는 것을 확인하였다.

I. 서론

Massive MIMO 보다 많은 수의 안테나를 사용하는 extremely large-scale MIMO(XL-MIMO)는 주파수 효율을 크게 향상시킬 수 있어서 6G 핵심기술로서 연구되고 있다. Millimeter-wave(mmWave) or terahertz (THz) 대역에서의 고주파 통신은 넓은 대역폭을 사용할 수 있고 좁은 안테나 간격으로 많은 수의 안테나를 설치할 수 있어 XL-MIMO 구현에 적합하여 최근 활발히 연구되고 있다. 이와 같이 안테나 수가 증가하고 고주파 대역 통신을 할 경우에는 사용자들이 near-field 영역에 존재하게 될 확률이 높아지고 이 영역에서 electromagnetic (EM) wave 는 planar wave 가 아닌 spherical wave 로 전파하게 되어 near-field 통신을 위한 빔형성 기법이 필요하다[1]. 기존 far-field 빔 트레이닝 방식에서는 최적의 빔을 찾기 위하여 각도를 사용한 angle-domain beam codebook 을 사용하였으나, near-field 빔 트레이닝에서는 각도와 거리를 고려한 새로운 codebook 설계가 필요하다. 최근 codebook 의 크기를 줄이기 위하여 hierarchical codebook, polar-domain codebook 설계 방식이 제안되었다[2]. 그러나 이 방식들은 모든 빔 방향과 거리에 대하여 2-D exhaustive search 를 해야 하기 때문에 빔 트레이닝 오버헤드(소요시간)가 많이 필요하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 near-field 에서 오버헤드를 크게 줄이면서 빔 방향, 거리, 타이밍을 찾을 수 있는 빔 트레이닝 설계방식과 검출방식을 제안한다.

II. 본론

기존 near-field 빔 트레이닝 방식은 모든 빔 방향과 거리에 대하여 2-D exhaustive search 를 해야 하기 때문에 빔 트레이닝 오버헤드가 많이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 오버헤드를 크게 줄이면서 빔 방향과 거리를 찾는 방식을 제안한다. 그림 1 은 제안된 빔 트레이닝 방식에 대한 송신단의 구조를 보여준다. 제안된 방식의 송신부에서는 다음과 같은 순서로 빔 트레이닝이 진행된다. 먼저 서로 다른 주파수를 갖는 tone 을 각각의 안테나에 실어준다. 이 때

인접한 안테나로 전송되는 tone 간의 주파수 차이는 Δf 가 정의된다. 제안된 방식에서는 방향에 따라 순차적으로 신호를 전송하지 않고 수신 영역안의 모든 MS(사용자)들이 동시에 신호를 수신할 수 있도록 전송한다. 또한, 수신단에서 신호 검출이 용이하게 하기 위하여 각각의 안테나로부터 전송된 tone 이 채널을 거쳐 수신단에 도달할 때 인접한 신호가 서로 대칭적인 구조를 갖도록 하는 even symbol 과 odd symbol 의 주파수 할당이 서로 역순이 되게 안테나에 tone 을 실어준다.

$$f_{\Delta,m}^{u_{\%2}} = \begin{cases} mf_{\Delta}, & u_{\%2} = 0 \\ (M-m-1)f_{\Delta}, & u_{\%2} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)은 대칭적인 구조에 대한 주파수 할당을 보여준다. 여기서 M, m 은 각각 전체 송신 안테나 수, 안테나 index 를 의미하고, $u_{\%2} = 0$ 인 경우 even symbol, $u_{\%2} = 1$ 인 경우 odd symbol 을 나타낸다. 그림 1 에서 $p_m^u (= s_u e^{(-1)^{u_{\%2}} j 2\pi M m / 2 / M})$ 는 심볼에 곱해지는 위상을 나타내며, r_m^0 는 각각 안테나로부터 MS0 까지의 거리에 대한 정보를 나타낸다.

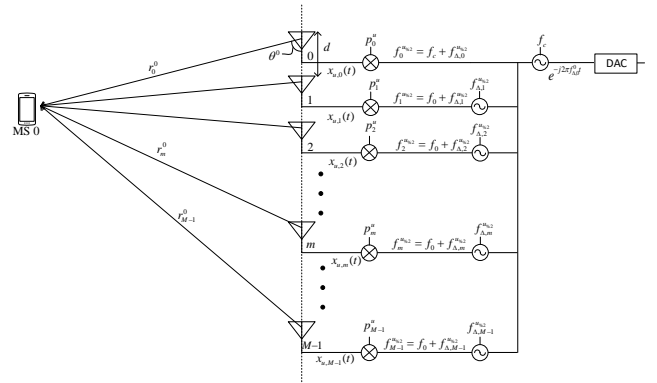


그림 1. 제안된 빔 트레이닝 방식의 송신단 구조

그리고 d, f_c 는 각각 안테나간 거리, 반송파 주파수를 나타낸다. 제안된 방식에서는 모든 단말이 동시에 신호를 수신할 수 있도록 신호를 전송하기 때문에 빔 트레이닝 오버헤드를 감소시킬 수 있지만 빔형성 이득이 없어 성능이 열화된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 수신단에서는 송신단에서 반복 전송한 신호를 combining 함으로써 성능 열화를 극복한다.

식 (2)는 제안된 기법의 송신 신호를 나타낸다.

$$\begin{aligned} z_u(n) &= \sum_{m=0}^{M-1} b_m^{r_0, \theta} x_{u,m}(n) \\ &= s_u \sum_{m=0}^{M-1} b_m^{r_0, \theta} e^{(-1)^{m/2} j2\pi Mm/2/M} e^{j2\pi \Delta_m^2 n/M} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $b_m^{r_0, \theta}$ 는 안테나에 따라 생성되는 빔형성 벡터이며 거리와 각도를 나타내는 r_0, θ 을 포함한다. s_u 는 bipolar pseudo random sequence 를 나타낸다. z_u 를 송신할 때 최대 U 심볼만큼 전송하고 이 때 even 과 odd 심볼 쌍은 $U/2$ 만큼 반복 전송한다.

식 (3)는 u 번째 심볼 구간에서 수신되는 수신 신호 y_u 를 나타낸다.

$$y_u(n) = y(n + uM) = z_u(n) + w(n) \quad (3)$$

여기서 w 는 AWGN 잡음이다.

수신단에서 cross-correlation 과 차등 곱을 이용하여 심볼 타이밍 및 빔형성 벡터를 획득한다. 수신단에서 사용하는 기존 신호는 [2]의 distance sampling 기법을 이용하여 생성한다. 수신된 신호에 대하여 기존 신호를 적용하여 even 심볼과 odd 심볼 각각에 대하여 수행한 cross-correlation 결과는 시간에 대하여 서로 대칭인 형태가 된다. Even 과 odd 심볼에 대하여 수행한 cross-correlation 결과를 각각 combining 하여 combining 이득을 얻어 빔형성 이득 손실에 따른 성능 열화를 극복한다. 이 때 빔형성 이득에 해당하는 combining 이득을 얻기 위해서 U 를 $2M$ 로 정한다. 여기서 Even 과 odd 심볼에 대하여 combining 된 cross-correlation 결과도 서로 대칭이 된다. 이러한 특성을 이용하기 위하여 대칭 차등 곱을 적용하여 cross-correlation 결과의 최대값과 최대값에 해당하는 기준 신호를 검출한다. 또한, 최대값의 위치를 기반으로 심볼 타이밍을 추정한다.

초기 동기화로부터 빔형성 벡터를 획득하기 위해서 단말은 추정된 심볼 타이밍과 기준 신호를 기반으로 해당 기지국에 대한 빔형성 방향을 추정하며, 검출된 기준 신호와 빔형성 방향 정보를 조합하여 빔형성 벡터를 결정한다.

본 논문에서 모의 실험을 위한 파라메타는 다음과 같이 설정하였다. 송신 안테나 수, 반송파 주파수는 각각 256 개, 100GHz 이다. Near-field 환경에서 모의실험하였고 허용가능한 최소 거리는 3m 로 설정하였다.

그림 2 는 제안된 방식과 기존 방식 적용 시에 타이밍 및 빔형성 벡터 검출 성공 확률을 비교한 그림이다. 그림에서 고려하는 검출 성공은 타이밍 오차가 0 이고 검출된 빔형성 벡터가 빔형성 최대 이득 대비 0.7071 이상인 경우를 기준으로 삼았다. 기존 방식은 [2]에서 고려하는 polar domain 빔형성 방식을 적용한 경우를 나타낸다. 이 그림에서 기존 방식과 제안된 방식 모두 SNR -9dB 부근까지 검출 확률이 약 1 이되고, SNR -12dB 에서는 각 0.86 와 0.82 이며 검출 성공 확률이 0.5 이상인 영역에서는 성능이 유사한 것을 볼 수 있다.

표 1 은 기존 방식과 제안된 방식에서 사용된 빔 트레이닝 프리앰블 심볼 수를 보여준다. 여기에서 사용된 안테나 수는 256 과 512 이다. 표 1 로부터 제안된 기법의 빔 트레이닝 심볼 전송 오버헤드는 안테나 수가 각각 256 과 512 일 때 기존 방식에 비해 약 27%와 7.3%만 필요하여 크게 감소하는 것을 알 수 있다.

Conventional_256	469,760
Proposed_256	131,072
Conventional_512	7,170,560
Proposed_512	524,288

표 1. 빔 트레이닝을 위한 사용된 프리앰블 심볼 수 비교

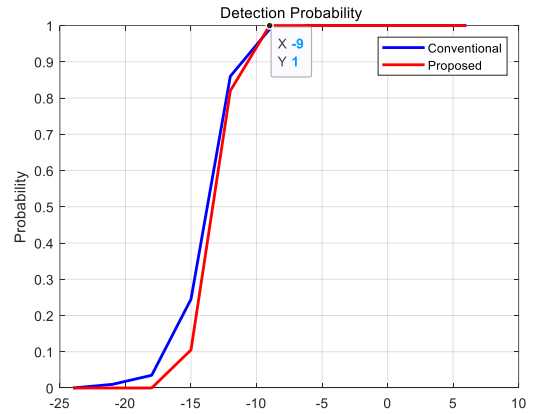


그림 2. 제안된 방식과 기존 방식의 검출 성능 비교

III. 결론

본 논문에서는 near-field 에서 빔 트레이닝 시에 소요되는 오버헤드를 줄이기 위하여 송신단에서 서로 다른 주파수를 갖는 tone 을 전송해 수신 영역안의 모든 사용자들이 동시에 신호를 검출할 수 있는 빔 트레이닝 방식을 제안하였다. 또한 빔형성 이득 손실에 따른 성능 열화를 극복하기 위하여 송신단으로부터 반복 전송된 신호를 수신단에서 combining 함으로써 성능 열화를 극복하였다. 모의실험을 통하여 기존 방식과 제안된 방식의 검출 성능과 오버헤드를 비교하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022R1F1A1064413, RS-2023-00277799).

참고 문헌

- [1] M. Cui, Z. Wu, Y. Lu, X. Wei, and L. Dai, "Near-field MIMO communications for 6G: fundamentals, challenges, potentials, and future directions," IEEE Communications Magazine, vol. 61, no. 1, Jan. 2023.
- [2] M. Cui and L. Dai, "Channel estimation for extremely large-scale MIMO: far-field or near-field?", IEEE Tran. on Communications, vol. 70, no. 4, April 2022.