

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

김영준*, 이강행, 조용수
육군사관학교*, 중앙대학교

yjkim@kma.ac.kr*, gwezxc223211@naver.com, yscho@cau.ac.kr

Near-field Beam Tracking Technique for Extremely large-scale MIMO

Young Jun Kim*, Kang Haeng Lee, Yong Soo Cho
Chung-Ang University.

요 약

Near-field 환경에서 빔형성시 가장 큰 어려움은 EM wave 형태의 변화로 인한 antenna index 와 non-linear 한 phase 이다. 본 논문에서는 전체적인 어레이는 near-field 이지만, subarray 내에선 far-field 인 array 를 이용하여 수신신호의 차등을 활용하고 SNR 이득을 최대화하기 위해 삼각형의 결정 조건을 이용한 빔 트래킹 방식을 제안한다. 모의실험을 통하여 제안된 방식이 near-field 환경하에서 빔 트래킹을 잘 수행할 수 있음을 확인한다.

I. 서 론

Massive MIMO 보다 많은 수의 안테나를 사용하는 extremely large-scale MIMO (XL-MIMO)는 주파수 효율을 크게 향상시킬 수 있어서 6G 핵심기술로서 연구되고 있다. 이와 같이 안테나 수가 증가하고 고주파 대역 통신을 할 경우에는 사용자들이 near-field 영역에 존재하게 될 확률이 높아져서 near-field 통신을 위한 빔형성 기법이 필요하다[1]. 이러한 near-field 환경에서는 각도만 추적하는 far-field 빔 트래킹과 달리 각도와 거리를 함께 추적해야 한다[2][3]. 본 논문에서는 XL-MIMO 통신시스템에서 각도와 거리를 추적하는 near-field 빔 트래킹 기법을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 near-field 상황에서 extremely large array 를 far-field 를 경험하는 subarray set 으로 나눈 후 각각의 subarray 의 AOA 를 추정한다. 그리고 이를 이용하여 계산된 단말의 위치를 기반으로 전체 어레이의 빔포밍 벡터를 구한다.

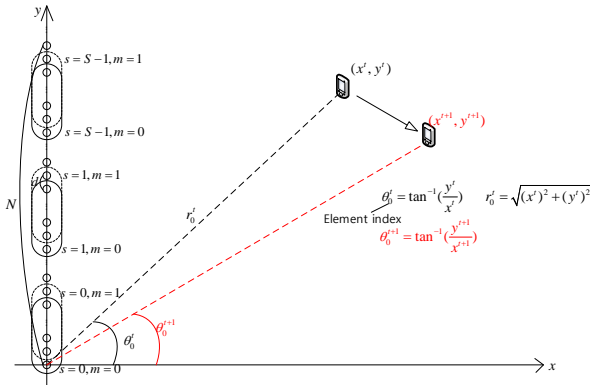


그림 1. 제안된 빔 트래킹 기술에서의 subarray 구조

본 논문에서 고려하는 subarray 구조는 그림 1 과 같이 전체 어레이 내에 총 S 개의 subarray set 이 존재하고, 각 subarray set 은 2 개의 subarray 로 구성된다. Subarray set 내 0 번째와 1 번째 subarray 는 한 안테나 엘리먼트만큼 차이를 두고 겹치게 구성한다. 이와 같은 구조에서 전체 안테나의 개수가 N , subarray 내의 안테나의 개수가 N_{sub} 인 각 subarray 가 수신한 신호는 다음과 같다.

$$z_{s,m} = \sum_{n=0}^{N_{sub}-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(n+m)\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_0'^{t+1}} \quad (1)$$

여기서, n 은 각 subarray 내의 안테나 인덱스이고, s 는 각 subarray set 을 구분하는 인덱스이며, m 은 subarray 인덱스이다. 각 subarray 는 far-field 인 환경을 갖도록 구성하였다. Subarray 내에서 안테나에 수신되는 환경이 far-field 임을 가정하면 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$z_{s,m} = \sum_{n=0}^{N_{sub}-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(n+m)\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_0'^{t+1}} = e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_0'^{t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}} \sum_{n=0}^{N_{sub}-1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}dn(\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1})} \quad (2)$$

$$= e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_0'^{t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}} \frac{1 - e^{j\frac{2\pi}{\lambda}dN_{sub}(\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1})}}{1 - e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1})}}$$

$$= e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_0'^{t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}} \frac{\sin(\pi \frac{d}{\lambda} N_{sub} (\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}))}{\sin(\pi \frac{d}{\lambda} (\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}))}$$

$$= W_{\theta_s^{t+1}}^{N_{sub}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}r_0'^{t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d(N_{sub}-1)\sin\theta_s^{t+1} - \sin\theta_s^{BF,t+1}}$$

여기서 $\theta_s^{BF,t+1}$ 는 t 시간에서 추정된 subarray 의 AOA 를 기반으로 계산된 subarray 별 빔 방향을 나타낸다. 이전 빔포밍 정보를 기반으로 현재 빔포밍 정보를 추정하는 빔 트래킹 방식에서는 이전 빔포밍 정보를 이용할 수 있기 때문에 다음과 같이 subarray set 내에서 두 subarray 로 수신된 신호에 대하여 차등 위상을 구함으로써 AOA 를 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} \angle z_{s,1}(z_{s,0})^* &= 2\pi \frac{d}{\lambda} (\sin \theta_s^{t+1} - \sin \theta_s^{BF,t+1}) \\ \hat{\theta}_s^{t+1} &= \sin^{-1} \left(\frac{\lambda}{2\pi d} \angle z_{s,1}(z_{s,0})^* + \sin \theta_s^{BF,t+1} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 추정된 subarray 의 AOA 와 subarray set 간의 거리를 이용하여 삼각형 공식으로부터 단말의 위치를 계산한다. 이때 어레이 내에서 가능한 모든 subarray set 에 대하여 삼각형을 만든다. 그리고 각각의 삼각형으로부터 계산된 단말 위치를 모두 더하여 계산된 단말의 평균 위치를 구한다. 안테나 어레이가 y 축 상에 있다고 가정하면 위쪽의 각이 ϕ , 아래쪽의 각이 θ , 밑변의 길이가 d 인 경우의 꼭짓점의 좌표는 $(\frac{d \tan \theta \tan \phi}{\tan \theta + \tan \phi}, \frac{d \tan \theta}{\tan \theta + \tan \phi})$ 와 같이 표현할 수 있다. 해당 식을 이용하면 UE 의 위치를 각 변수를 포함하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(\hat{x}_{s,t}^{t+1}, \hat{y}_{s,t}^{t+1}) = \left(\frac{sN_{sub}d \tan(\frac{\pi}{2} + \hat{\theta}_{s,t}^{t+1}) \tan(\frac{\pi}{2} - \hat{\theta}_s^{t+1})}{\tan(\frac{\pi}{2} + \hat{\theta}_{s,t}^{t+1}) + \tan(\frac{\pi}{2} - \hat{\theta}_s^{t+1})}, \frac{sN_{sub}d \tan(\frac{\pi}{2} + \hat{\theta}_{s,t}^{t+1})}{\tan(\frac{\pi}{2} + \hat{\theta}_{s,t}^{t+1}) + \tan(\frac{\pi}{2} - \hat{\theta}_s^{t+1})} \right) \quad (4)$$

Subarray 인덱스가 s 인 경우, 삼각형은 총 $S-s-1$ 개 만들 수 있으므로 모든 삼각형을 이용하여 평균을 낸 UE 의 추정된 위치는 다음과 같다.

$$(\bar{x}^{t+1}, \bar{y}^{t+1}) = \frac{2}{S(S-1)} \sum_{s=0}^{S-2} \sum_{t=s+1}^{S-1} (\hat{x}_{s,t}^{t+1}, \hat{y}_{s,t}^{t+1}) \quad (5)$$

해당 추정된 위치를 기반으로 기준 안테나와의 거리인 $\hat{r}_0^{t+1} = \sqrt{(\bar{x}^{t+1})^2 + (\bar{y}^{t+1})^2}$ 와 AOA 인 $\hat{\theta}_0^{t+1} = \tan^{-1} \frac{\bar{y}^{t+1}}{\bar{x}^{t+1}}$ 을 정의할 수 있으며, 이를 이용하여 안테나 인덱스 n 을 이용한 $\hat{r}_n^{t+1} = \sqrt{(\hat{r}_0^{t+1})^2 + \{(n-1)d\}^2 - 2\hat{r}_0^{t+1}(n-1)d \sin(\hat{\theta}_0^{t+1})}$ 과 $t+1$

시간의 n 번째 빔 스티어링 벡터인 $[\hat{\mathbf{b}}^{t+1}]_n = e^{j\frac{2\pi}{\lambda} \hat{r}_n^{t+1}}$ 을 표현할 수 있다. 이 경우 빔포밍 gain 은 추정 값이 아닌 실제 정답 값인 θ_0^{t+1} 를 대입하였을 때 가장 높은 값을 가지고, 거리의 차이보다 약간의 AOA 오차로도 성능이 크게 저하된다. 따라서 제안된 방식에서는 추정된 거리로부터 구한 빔 스티어링 벡터에 대해 AOA 를 보정하여 최종 빔 스티어링 벡터를 구한다.

모의실험에서는 256 개의 안테나 수, $\frac{\lambda}{2}$ 의 안테나 간격, 8 개의 subarray set, 16 개의 N_{sub} 을 사용하였다. 반송파 주파수가 100GHz, SNR 이 -15dB 인 환경에서, 그림 1 에 나타난 바와 같이 UE 의 위치를 등간격으로 0.0283m 씩 100 회 이동하며 모의 실험을 진행하였다.

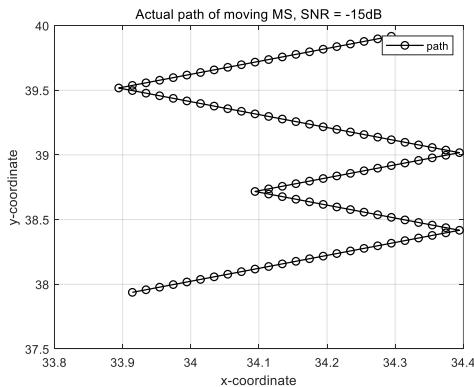
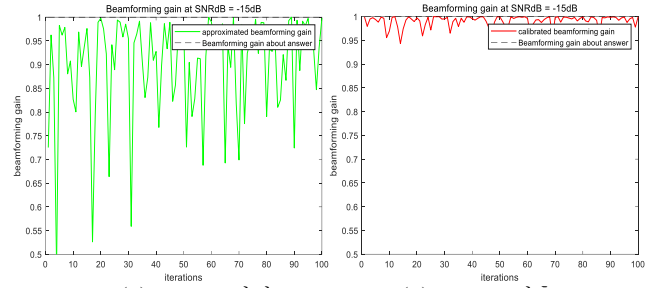


그림 2. UE 의 이동 경로



(a) AoA 보정 전 (b) AoA 보정 후

그림 3. UE 의 이동에 따른 빔 트래킹 성능

그림 3 은 SNR 이 -15dB 인 경우, 그림 2 에 해당하는 UE 의 이동경로에 대한 빔 트래킹 성능을 보여준다. 그림 3(a)는 추정된 단말 위치로부터 구한 빔 스티어링 벡터를 적용한 경우의 빔포밍 이득을 보여준다. 최대값이 1 인 경우 약 0.5 까지 빔포밍 이득이 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 3(b)는 추정된 단말 위치로부터 구한 정보들에 대하여 AOA 를 보정하여 빔 스티어링 벡터를 구한 경우의 빔포밍 이득을 보여준다. 이 경우, 빔포밍 이득의 최소값이 약 0.95 로 빔 트래킹을 원활하게 수행하는 것을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 near-field 환경에서 삼각형의 결정 조건을 활용한 빔 트래킹 기법을 제안하였다. 기존의 트래킹 방식과 다르게 각 subarray 내에서는 far-field 인 조건을 이용할 수 있도록 subarray 를 구성하여 잡음에 따른 빔 트래킹 성능을 향상하였다. 이후 추정된 AOA 를 상관 연산을 최대화하도록 보정해주어 정확한 빔 트래킹을 수행할 수 있었다.

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.
- [3] K. Chen, A. Qi, C-X Wang, and G.Y. Li, "Beam training and tracking for extremely large-scale MIMO communications", IEEE Tran. on Wireless Communications, early access, 2024.