

# 6G 통신에서 근거리장 유한 깊이 빔포밍에 관한 연구

양시윤, 채찬병

연세대학교

{siyun.yang, cbchae}@yonsei.ac.kr

## A Survey of the Finite-depth Near-Field Beamforming in 6G Communications

Si Yun Yang, Dong Soo Jun, Chan-Byoung Chae

Yonsei University

### 요약

본 논문은 6G 무선 통신 기술에서 필요한 extremely large aperture array (ELAA)를 사용한 서브 테라헤르츠 (sub-THz) 대역 통신에서의 near-field (NF)에 대해 알아보고 NF의 유한 깊이 빔포밍에 대해 탐구한다. 이를 통해 NF를 고려한 공간 분할 다중 액세스(Spatial division multiple access; SDMA)와 위치 분할 다중 액세스(Location division multiple access; LDMA)의 가능성 대해서 수식적으로 유도하여 서술한다. 이로써 NF 특성을 이용한 새로운 다중 액세스 방식을 통해 6G 통신 시스템에서 요구되는 NF 특성 연구의 필요성을 제안한다.

### I. 서론

1G에서 4G 시스템까지는 무선통신에서 비트레이트(Bit rate)를 올리기 위해서 사용하는 주파수 대역을 MHz부터 수 GHz까지 올려서 대역폭을 넓히고 다중 안테나 기술을 사용하여 스펙트럼 효율을 높이는 방법을 사용해왔다. 이후 5G에서는 밀리미터파 (mmWave)의 본격적 활용이 예정되어 있으며, 빔포밍 및 공간 다중화를 위해 massive Multiple Input Multiple Output (mMIMO) 기술이 연구되어왔다 [1, 2]. 마찬가지로 6G에서 전송 속도를 올리기 위해선 더 넓은 대역폭을 확보하기 위해 서브 테라헤르츠 (sub-THz) 주파수 대역 활용 기술과 ultra mMIMO 기술을 사용하기 위한 기반 연구가 요구된다 [3-5].

하지만 사용하는 주파수 대역이 지나치게 높아질 경우, 또는 통신 링크 거리 대비 안테나 구경의 크기가 클 경우, 실제 무선 통신을 사용할 때 전자기파가 구면파로 입사되는 near-field (NF) 영역에서 통신을 하게 된다. 따라서 기존 far-field (FF) 평면파라 가정하여 사용되었던 빔포밍 알고리즘과 채널 모델을 NF 영역에 맞게 변경되어야 한다 [6]. 또한 THz 초고주파 대역에서는 낮은 회절과 높은 경로 손실 특성으로 line-of-sight (LOS) 전파 링크에 강하게 의존하며, 이를 안정적으로 구현하기 위해 ultra mMIMO 기술 중 하나인 extremely large aperture array (ELAA)를 사용한 통신연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 거리에 따른 NF와 FF를 구분하고, NF의 유한 깊이 빔포밍을 정의한 후 이에 따른 위치기반 다중접속 모델의 가능성에 대해 탐구하였다.

### II. 빔포밍 이론적배경

THz 대역은 광범위하게 0.1-10THz로 정의되며 밀리미터파와 원적외선 범위 사이에 끼어있다. 전파의 경로 손실에 관한 식인 Friis Equation은 다음과 같다.

$$P_{RX} = P_{TX} G_{TX} G_{RX} \left( \frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 전력,  $G$ 는 안테나 이득,  $\lambda$ 는 파장,  $r$ 은 송수신 안테나 사이 거리이다. 사용하는 주파수가 높아지면 경로 손실이 증가하기 때문에 매우 ELAA를 활용한 빔포밍 기술을 사용해야 한다. 또한 주파수가 올라갈

수록 전파의 회절이 부족해져서 LOS 경로가 주 전파 경로가 된다.

한편 THz 대역을 사용하게 되면 FF 가정을 사용할 수 없게 된다. FF 가정은 송수신 안테나 사이 거리를  $r$ 이라 했을 때 다음 식을 만족하면 성립한다.

$$r \geq \frac{2D^2}{\lambda} \quad (2)$$

이때  $D$ 는 개구면 크기이다. 식 (2)의 경계를 프라운호퍼거리라고 한다.

기존 FF 가정을 만족할 때 사용할 수 있는 채널 모델은 다음과 같다.

$$\mathbf{h}_k^{farfield} = \sqrt{\frac{N}{L}} \sum_{l=1}^L \alpha_l \mathbf{a}(\theta_l, \phi_l) \quad (3)$$

$N$ 은 안테나의 개수,  $L$ 은 실질적인 통신경로의 개수이고  $\alpha_l$ ,  $\theta_l$ ,  $\phi_l$ 은 각각 복소 경로 이득,  $l$ 번째 방위각 및 고도각이다. 이때 1개의 LOS 경로와  $L-1$ 개의 non-LOS 경로 중 LOS 경로를 살펴보면  $N$ 개의 안테나를 사용한 Uniform Linear Array (ULA)라고 하면 배열 응답 벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{a}_{ULA}(\phi) = \frac{1}{\sqrt{N}} [1, e^{jk d \sin(\phi)}, \dots, e^{j \frac{2\pi}{\lambda} (N-1) d \sin(\phi)}] \quad (4)$$

$k = 2\pi/\lambda$ 는 파수,  $d$ 는 안테나 요소 사이의 거리이다.

### III. Finite-Depth NF Beamforming

3200개의 반파장 간격 배열 안테나를 사용한다면 식 (2)에 따라 프라운호퍼거리는 약 200m이다. 따라서 ELAA를 사용하면 NF 영역에서의 통신 범위가 늘어나게 되어 구면파 가정에 맞는 새로운 채널 모델이 필요하다. 따라서 새로운 NF 배열 응답 벡터는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mathbf{b}(\theta_r, r_l) = \frac{1}{\sqrt{N}} [e^{-jk(r_l^{(-N)} - r_l)}, \dots, e^{-jk(r_l^{(N)} - r_l)}] \quad (5)$$

$r_l^{(n)}$ 은 사용자와  $n$ 번째 안테나의  $l$ 번째 경로의 거리이고  $r_l$ 은 사용자와 배열 안테나의 중심 사이의 거리이다. 안테나 인덱스  $\bar{N} = \frac{N-1}{2}$ 로  $N$ 은 홀수라 가정하였다. ULA의 경우,  $r_l^{(n)}$ 은 구면파 가정을 이용하면 테일러

수열 확장을 통해 다음과 같이 근사할 수 있다 [7].

$$r_l^{(n)} = \sqrt{r_l^2 + n^2 d^2 - 2ndr_l \sin(\phi_l)} \approx r_l - nd \sin(\phi_l) + \frac{n^2 d^2}{2r_l} \cos^2(\phi_l) \quad (6)$$

FF영역에서의 빔포밍 이득은 다음과 같이 정의된다.

$$|\mathbf{a}^H(\phi_l) \mathbf{a}(\phi_p)| = \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(\frac{1}{2} Nkd(\sin\phi_p - \sin\phi_l))}{\sin(\frac{1}{2} kd(\sin\phi_p - \sin\phi_l))} \right| \quad (7)$$

이때 안테나가 무한이 많을 때 공간 분해능과 관련한 다음 식이 성립한다.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} |\mathbf{a}^H(\phi_l) \mathbf{a}(\phi_p)| = 0, \phi_l \neq \phi_p \quad (8)$$

식 (8)에 따르면 이론적으로 무수히 많은 안테나가 존재한다면 다른 각도에 위치한 두 사용자는 서로 상관관계가 없어져서 구분이 가능해진다. 이처럼 NF 영역에서의 빔포밍도 적절히 설계하면 다른 각도 뿐만이 아닌 다른 거리에서의 상관관계도 없어지게 만들 수 있다. NF영역에서의 빔포밍 이득은 다음과 같다.

$$|\mathbf{b}^H(r_l, \phi_l) \mathbf{b}(r_p, \phi_p)| \approx \frac{1}{N} \left| \sum_{n=-N}^N e^{jk(n d \sin\phi_l - n d \sin\phi_p - \frac{r_l^2 d^2}{2} (\frac{\cos^2\phi_l}{r_l} - \frac{\cos^2\phi_p}{r_p}))} \right| \quad (9)$$

식 (9)에서  $\phi_l = \phi_p$ 의 경우 다음과 같은 조건이 만족한다.

$$|\mathbf{b}^H(r_l, \phi) \mathbf{b}(r_p, \phi)| \approx \left| \frac{C(\beta) + S(\beta)}{\beta} \right| \quad (10)$$

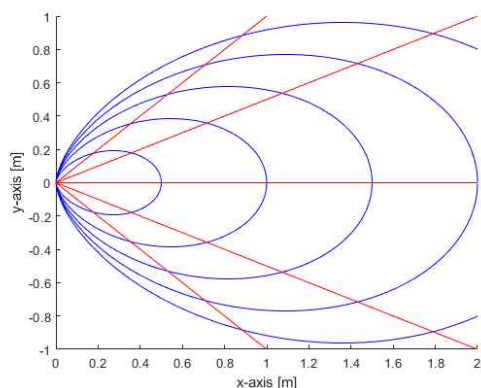
여기서  $\beta = \sqrt{\frac{d^2 \cos^2(\phi)}{2\lambda} (\frac{1}{r_l} - \frac{1}{r_p})} N$  이고,  $C(x) = \int_0^x \cos(\frac{\pi}{2} t^2) dt$ ,

$S(x) = \int_0^x \sin(\frac{\pi}{2} t^2) dt$ 이다. 이때  $N$ 이 무한대로 커지면  $S(\beta)$ 와  $C(\beta)$ 가 1/2로 수렴하면서 NF 배열 응답 벡터의 상관관계가 0에 수렴하게 된다.

만약  $\frac{\cos^2\phi_l}{r_l} = \frac{\cos^2\phi_p}{r_p}$  이라면 식 (9)는 다음과 같이 전개된다.

$$|\mathbf{b}^H(r_l, \phi_l) \mathbf{b}(r_p, \phi_p)| \approx \frac{1}{N} \left| \frac{\sin(\frac{1}{2} Nkd(\sin\phi_p - \sin\phi_l))}{\sin(\frac{1}{2} kd(\sin\phi_p - \sin\phi_l))} \right| \quad (11)$$

따라서 적절한 조건이 주어지면 NF 배열 응답 벡터가 거리와 각도 두 개의 차원에서 직교하므로 다중 사용자 통신의 간섭을 억제할 수 있다. 식 (10)와 (11)을 정리하여 직교 조건을 [그림 1]에 도식화하였다.



[그림 1] NF 배열 응답 벡터 직교 조건 도메인

[그림 1]에서 붉은 직선과 푸른 곡선으로 나누어진 영역은 NF 배열 응답 벡터가 가질 수 있는  $r_l, \phi$  차원이다. 벡터를 구분할 때 붉은 선으로 각도 도메인을 구분하고, 푸른 선으로 깊이 도메인을 구분한다. 만약 서로 다른

거리와 각도를 가지는 두 벡터가 서로 다른 영역에 속해있을 경우 이 두 벡터는 서로 직교한다. 따라서 사용자 위치를 기반으로 하는 새로운 다중 액세스 방식은 NF 통신에서 접근성과 성능을 더욱 향상시킬 것으로 기대되므로 관련 기저 연구가 필요하다.

## V. 결론

FF와 NF의 차이를 구분하여 NF의 특성에 맞는 배열 응답 벡터가 가져야 하는 특성에 대해 이론적으로 접근해보았다. NF의 빔포밍 이득을 최대한으로 하며 서로 다른 사용자를 구분할 수 있는 새로운 다중 액세스 방식은 각도 도메인뿐만이 아닌 깊이 도메인에서도 구분이 가능한 방식으로 구현이 가능함을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과를 통해 NF 영역에서 ELAA를 사용한 채널 분석과 다중 액세스 방식의 기반 연구의 필요성을 제시한다.

## ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. No. 2021-0-00486, 2021-0-02208)

## 참고 문헌

- [1] S.-H. Park, et al. "MmWave Lens MIMO." 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW). IEEE, 2020.
- [2] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta. Massive MIMO is a reality – What is next? Five promising research directions for antenna arrays. Digital Signal Processing, 94:3 – 20, 2019.
- [3] I. F. Akyildiz, J. Jornet, and C. Han, "Terahertz band: Next frontier for wireless communications," Physical Commun., vol. 12, pp. 16 – 32, 2014
- [4] I. F. Akyildiz and J. F. Jornet. Realizing ultra-massive MIMO (1024 × 1024) communication in the (0.06 – 10) terahertz band. Nano Communication Networks, 8:46 – 54, 2016.
- [5] A. Faisal, H. Saniyadeen, H. Dahrouj, T. Y. Al-Naffouri, and M.-S. Alouini. Ultra-massive MIMO systems at terahertz bands: Prospects and challenges. IEEE Vehicular Technology Magazine, 15(4):33 – 42, 2020.
- [6] H. Do, et al. "Terahertz line-of-sight MIMO communication: Theory and practical challenges." IEEE Communications Magazine 59.3 (2021): 104–109
- [7] K. T. Selvan and R. Janaswamy, "Fraunhofer and fresnel distances: Unified derivation for aperture antennas," IEEE Antennas Propag. Mag., vol. 59, no. 4, pp. 12 – 15, Jun. 2017.