

6G 이동통신 시스템용 THz 부배열 가시선 다중안테나 기법

염정선, 정방철

충남대학교 전자공학과

e-mail : jsyeom@cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

THz Subarray Line-of-Sight Multiple Antenna Technique for 6G Mobile Communication Systems

Jeong Seon Yeom and Bang Chul Jung

DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

Chungnam National University

Abstract

In this paper, we analyze the performance of spectral efficiency of uniform linear array (ULA) multiple-input multiple-output antenna based on subarray structure in tera-hertz (THz) band. We form a line-of-sight channel matrix of this system by using spherical wavefront propagation model and subarray-wise ULA beamforming model. Through the simulation results, it is shown that the ULA MIMO antenna based on subarray structure can achieve channel capacity at a specific signal-to-noise ratio(SNR) according to the antenna structure in the same way as the rotating ULA MIMO antenna scheme in terms of spectral efficiency in low signal-to-noise ratio. Because the subarray-wise ULA beamforming provides beam gain in proportion to the number of antenna elements in a subarray.

I. 서론

최근 이동통신의 발전 방향 중 하나는 높은 통신 주파수 대역을 사용함으로써 넓은 대역폭을 확보하는 것이다. 5세대 이동통신(fifth-generation: 5G)의 주파수 할당은 밀리미터파(mmWave) 대역인 28Ghz 대역에서는 총 2.4 Ghz(한국 기준)의 대역폭이 할당되었다. 이러한 넓은 대역폭을 바탕으로 5G의 주요 성능들을 향상할 수 있다.

현재 활발한 연구가 진행중인 6세대 이동통신(sixth-generation)은 mmWave 대역보다 더 높은 테라헤르츠(tera-hertz: THz) 대역을 상용화하여 102Ghz 대역폭을 제공하는 것을 목표로 하고 있다[1]. 테라헤르츠 대역의 전파는 물리적으로 회절 및 굴절, 반사 현상들이 mmWave와 sub-6GHz 대역보다 약하며 또한 경로손실이 매우 크다. 그러므로 테라헤르츠 전파의 비가시선(non-lin-

e-of-sight) 성분은 거의 존재하지 않으며 가시선(line-of-sight: LoS) 성분만을 고려하여 채널을 모델링한다. 하지만 이러한 채널 모델은 다중 경로 채널로부터 오는 이점인 공간 다중화(spatial multiplexing)가 불가능하다는 것을 의미한다. 테라헤르츠 채널 모델에서 공간 다중화는 다중 경로 채널 모델과 다르게 짧은 파장으로부터 비롯될 수 있으며 어레이 개구 (array aperture)의 크기를 조절함으로써 LoS 채널의 rank를 증가시킬 수 있다. 예로써 균일 선형 배열 (uniform linear array: ULA) 다중 입력 다중 출력 (multiple-input multiple-output: MIMO) 안테나의 경우 안테나 요소 간격 d 가 $\sqrt{\lambda D/N}$ 경우인 레일리(Rayleigh) 거리를 유지함으로써 이론적으로 LoS 채널의 특이값(singular value)이 모두 동일하여 다중화 이득을 최대화할 수 있다[2],[3]. 여기서 λ 는 전송 주파수에 대한 파장이며 D 는 통신 거리, N 은 안테나 요소의 수이다. 높은 공간 다중화는 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio: SNR)가 높은 통신 환경에서 주파수 효율성을 향상시킬 수 있는 반면 SNR이 낮은 통신환경에서는 최대 특이값을 갖는 채널을 통한 빔포밍으로 신호를 전송하는 것이 주파수 효율성을 더욱 향상시킬 수 있는 방법이다. 문헌 [4]에서는 송수신 ULA MIMO 안테나 시스템에서 안테나를 SNR에 따라 회전함으로써 특이값의 분포를 변화시켜 SNR에 따라 주파수 효율성을 최대화하는 기법을 제안하였다.

본 논문에서는 테라헤르츠 대역 주파수 효율성을 향상을 위해서 송수신단 부배열 가시선 다중 안테나 기법의 성능을 분석한다. 부배열 ULA 안테나 구조는 다수의 ULA 안테나들을 부배열로 갖는다. 전파 모델과 채널 모델은 문헌 [4]와 동일하게 각각 구면파(spherical wavefront) 모델과 LoS 채널을 고려한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 ULA 안테나 회전 기법과 비교하여 동일 SNR에 대해서 본 논문에서 고려하는 다중 안테나 기법 또

한 MIMO 채널 용량(capacity)을 달성할 수 있음을 보인다.

II. Thz 대역 부배열 가시선 다중안테나 기법 및 송수신 빔포밍 기법

2.1. 부배열 ULA MIMO 안테나 구조 및 Thz 채널 모델

본 논문에서 그림 1과 같이 송수신단은 M 개의 부배열과 부배열 당 N 개의 안테나 요소로 구성된 ULA 안테나 구조를 가지고 있다. 부배열 내 안테나 요소

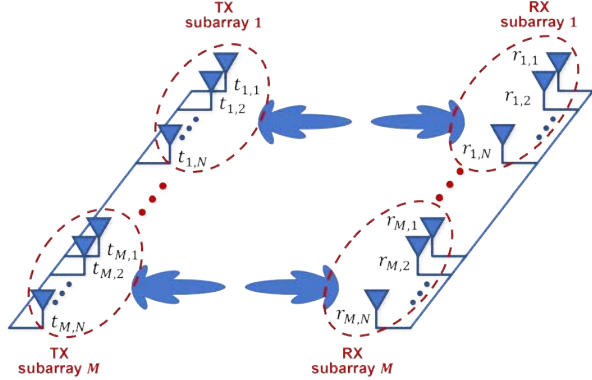


그림 1 송수신단 부배열 ULA MIMO 안테나 시스템 모델

간의 거리는 $\lambda/2$ 이며 각 부배열의 중심을 기준으로 부배열 간의 거리는 $\sqrt{\lambda D/M}$ 이다. 본 논문에서 통신 거리 D 는 부배열 내 ULA 안테나 개수 크기인 $\lambda(N-1)/2$ 보다 매우 크다고 가정하여 $m (m \in \{1, 2, \dots, M\})$ 번째 송신단 부배열과 $m' (m' \in \{1, 2, \dots, M\})$ 번째 수신단 부배열 간의 송신 및 수신 배열 안테나 빔 이득을 수식 1로 모델링할 수 있다[5]. 여기서 $\theta_{m,m'}$ 은 m 번째 부배열과 m' 번째 부

$$G(\theta_{m,m'}) = \frac{\sin^2\left(\frac{\pi}{2} N \sin(\theta_{m,m'})\right)}{N \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \sin(\theta_{m,m'})\right)}. \quad (1)$$

배열 간의 상대적 발사각(angle of departure) 및 도래각(angle of arrival)을 의미한다. 그러므로 구형파 채널 모델 기반 부배열 ULA 안테나 시스템의 m 번째 송신단 부배열로부터 m' 번째 수신단 부배열까지의 채널 계수는 수식 2와 같다. 여기서 $D_{m,m'}$ 은 m 번째 송신

$$h_{m,m'} = \frac{\sqrt{G(\theta_{m,m'})^2 \lambda}}{4\pi D_{m,m'}} \exp(-j2\pi D_{m,m'}/\lambda), \quad (2)$$

$$D_{m,m'} = \sqrt{\lambda D(m-m')^2/M + D^2}.$$

단 부배열과 m' 번째 수신단 부배열 간의 거리이다. 본 논문에서 송수신 배열 안테나 이득에 따른 성능 변화를 검증하기 위해서 송수신단 간 채널 행렬 $\mathbf{H}$ 의 m 번째

열 및 m' 번째 행의 요소는 $G(\theta_{m,m'})^2 \exp(-j2\pi D_{m,m'}/\lambda)$ 로 주어진다.

2.2. 특이값 분해(Singular Value Decomposition: SVD) 기반 송수신 빔포밍 기법

송수신단은 MIMO 시스템에서 최적의 전송율을 제공하는 SVD 기반 송수신 빔포밍을 수행한다. SVD 기반 빔포밍을 위해 채널을 다음과 같이 분해한다. 여기서

$$\mathbf{H} = \mathbf{U} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V}^H \in \mathbb{C}^{(M \times N) \times (M \times N)} \quad (3)$$

$\mathbf{U}$ 와 $\mathbf{V}$ 는 각각 유니터리(unitary) 행렬이며, $\mathbf{\Sigma}$ 는 채널 행렬 $\mathbf{H}$ 의 특이값들($\sigma_1 > \sigma_2 > \dots > \sigma_M$)을 내림차순으로 하여 대각 성분으로 갖는 대각 행렬이다. 송신 전력 할당은 water-filling 알고리즘을 통해 다음과 같이 주어진다. 여기서 $x^+ := \max(x, 0)$ 이며 P_t 는 송신단의

$$P_m^* = \left(\frac{1}{\Lambda} - \frac{N_0}{\sigma_m^2} \right)^+, \quad (4)$$

$$\sum_{m=1}^M \left(\frac{1}{\Lambda} - \frac{N_0}{\sigma_m^2} \right)^+ = P_t. \quad (5)$$

총 전송 전력. P_m^* 은 m 번째 송신 부배열의 총 전송 전력, N_0 는 잡음 전력, Λ 는 식 (6)의 조건을 만족하는 라그랑주 승수(Lagrange multiplier)이다.

그러므로 테라헤르츠 대역 부배열 ULA MIMO 안테나 시스템의 채널 용량은 다음과 같다.

$$C = \sum_{m=1}^M \log_2(1 + P_m^* \sigma_m^2). \quad (6)$$

IV. 시뮬레이션 분석 및 결론

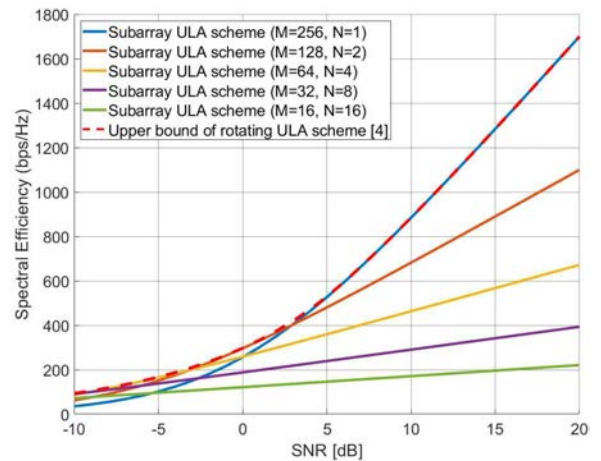


그림 2 부배열 ULA MIMO 안테나 기법과 ULA MIMO 안테나 회전 기법의 주파수 효율성

그림 2는 $\text{SNR} = P_t \lambda^2 / \{ (4\pi D)^2 N_0 \}$ 이고 $\theta_{m,m} = 0^\circ$ ($m \in \{1, 2, \dots, M\}$)일 때, 부배열 ULA MIMO 안테나 기법의 주파수 효율성과 문헌 [4]에서 제안하는 ULA MIMO 안테나 회전 기법의 최적 주파수 효율성을 보여준다. 모든 시뮬레이션에 대해서 300GHz 주파수 대역

에서 전체 안테나 요소를 256 개로 고정하였다. 높은 SNR에서 ULA MIMO 안테나 회전 기법의 회전각은 0° 이므로 부배열 당 안테나 요소가 1 개인 $M=256$, $N=1$ 인 경우와 동일한 성능을 보인다. 또한, 부배열 당 안테나 요소가 증가하였을 때 특정 SNR에서 채널 용량을 달성할 수 있음으로 보이고 있다. 이는 동일 성능임에도 기계적으로 ULA 안테나를 회전하지 않으면서 더 작은 안테나 면적을 활용할 수 있다는 이점이 있다.

Acknowledgement

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1A4A1032580).

참고문헌

- [1] Z. Zhang et al., "6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 28-41, Sept. 2019.
- [2] J.-S. Jiang and M. A. Ingram, "Spherical-wave model for short-range MIMO," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 53, no. 9, pp. 1534-1541, Sept. 2005.
- [3] H. Do, S. Cho, J. Park, H. -J. Song, N. Lee, and A. Lozano, "Terahertz Line-of-Sight MIMO Communication: Theory and Practical Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 3, pp. 104-109, Mar. 2021.
- [4] H. Do, N. Lee, and A. Lozano, "Reconfigurable ULAs for Line-of-Sight MIMO Transmission," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 5, pp. 2933-2947, May 2021.
- [5] X. Yu, J. Zhang, M. Haenggi, and K. B. Letaief, "Coverage Analysis for Millimeter Wave Networks: The Impact of Directional Antenna Arrays," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 7, pp. 1498-1512, July 2017.