

6G LoS-MIMO 시스템용 부배열기반 균일 원형 동심 배열안테나 기법의 성능 분석

오민규, 이영석, 정방철
충남대학교

minkyuoh@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Subarray-Based Uniform Circular Concentric Array Techniques for 6G LoS-MIMO Systems

Minkyu Oh, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 주어진 전송 거리에서 채널 용량을 달성하기 위한 송수신 가시선 다중안테나(line-of-sight multiple-input multiple-output: LoS MIMO) 통신 시스템용 저복잡도 부 배열 기반 균일 원형 동심 배열안테나(uniform circular concentric array: UCCA) 선택 기법을 제안한다. 구체적으로, UCCA의 반경과 수신 배열안테나 대비 상대적 회전각뿐만 아니라 각 UCCA 전력을 동적으로 제어하여 공간 다중화 이득을 최대화하는 UCCA를 선택한다. 모의실험을 통해, 다양한 전송 거리에서 제안하는 부 배열 기반 UCCA 선택 기법에 대해 채널 용량 이득과 각 전송 거리에 대한 무선 채널 행렬의 특이값을 산출하여 공간 다중화 성능의 견고성을 검증하였으며 기존 기법 대비 제안한 기법의 성능이 우수함을 확인하였다.

I. 서론

6G 이동통신 시스템의 다양한 응용 분야에서 발생할 수 있는 방대한 통신량을 효율적으로 처리하면서 동시에 초고속 통신 서비스를 지원할 수 있는 차세대 무선 전송 기술의 수요가 급격하게 증가하고 있다. 이로 인해, 밀리미터파(millimeter wave: mmWave) 및 테라헤르츠(terahertz: THz) 대역과 같은 고주파수 대역이 차세대 무선 전송 시스템을 위한 대역으로 최근 각광받고 있다 [1]. 전통적인 다중 안테나(multiple-input multiple output: MIMO) 통신 시스템 관점에서 이러한 고주파수 무선 채널은 다중 경로 성분이 희소하여 가시선 경로(line-of-sight: LoS) 통신 채널로 가정된다. LoS 통신 채널은 물리적 특성으로 인해 전파의 직진성이 높아 공간 다중화 이득을 확보하기 어려운 단점이 있다. 그러나, LoS 환경에서 공간 다중화 이득을 개선하기 위해, MIMO 통신 시스템의 전파 전파(wave propagation)를 해석하는 방식으로 기존 원전계 가정(far-field assumption)이 아닌 근전계 가정(near-field assumption)으로 고려해 전파의 전자기적 특성을 완전히 이용할 수 있는 밀리미터파 및 테라헤르츠 대역용 LoS MIMO 통신 시스템을 위한 공간 다중화 이득(spatial multiplexing gain)의 극대화 연구가 최근 수행되었으며, 각각 균일 선형 배열안테나(uniform linear array: ULA)[2] 및 균일 원형 배열안테나(uniform circular array: UCA)[3, 4]에 대해 안테나 배열 설계 및 배치 최적화 연구가 진행되었다.

그러나, 기존 연구는 송신 배열안테나에서 수신 배열안테나까지의 전송 거리가 주어질 때, 송신 배열안테나의 반경과 수신 배열안테나에 대한 상대적 회전각만을 최적화 파라미터로 고려하였다. 이는 전반적인 전송 거리에 대해 LoS MIMO 통신 시스템의 공간 다중화 이득 성능의 견고성을 보장하지 못한다. 따라서 본 논문에서는 전반적인 전송 거리에 대해 견고한 공간 다중화 성능을 보장할 수 있는 LoS MIMO 통신 시스템용 부 배열 기반 균일 원형 동심 배열안테나(uniform circular concentric array: UCCA) 선택 기법을 제안한다. 구체적으로, 본 논문에서 제안하는 기법은 부분적인 RF-체인의 수를 고려하여 저복잡도로 동작할 수 있도록 설계되었으며, 주어진 전송 거리에서 각 UCCA의 반경과 회전각뿐만 아니라, 동적 전력 할당을 선택 기준으로 고려하여 최적의 송신 UCCA의 개수와 송신 UCCA를 선택한다. 모의실험을 통해, 제안하는 기법이 채널 용량을 달성할 수 있음과 동시에 기존 기법 대비 모든 전송 거리에서 더 견고한 공간 다중화 성능을 제공할 수 있음을 검증한다.

II. LoS MIMO 통신 시스템용 부 배열 기반 UCCA 선택 기법

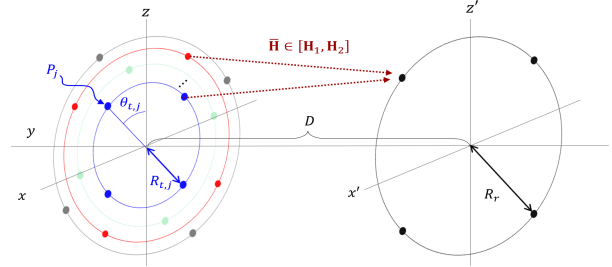


그림 1. 제안하는 부 배열 기반 UCCA 선택 기법의 시스템 모델

A. 부 배열 기반 UCCA 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 LoS 통신 환경에서 각각 서로 다른 반경과 회전각을 가지는 다수의 UCCA로 구성된 송신기와 단일 UCA를 갖는 수신기가 존재하는 점 대 점(point-to-point) 통신을 고려한다. 수신 UCA는 반경이 R_r 이고 M 개의 안테나를 가지며, 송신 배열안테나는 R_t 의 반지름을 가지면서 J 개의 부 배열 구조를 갖는 UCCA를 포함하여 전체 N 개의 안테나를 갖는다고 가정하였다. 여기서 N 은 J 의 배수로 가정하여 각 부 배열 UCCA는 $\tilde{N} = N/J$ 개의 안테나로 구성된다. 또한, $j \in \{1, 2, \dots, J\}$ 번째 UCCA는 $R_{t,j}$ 의 반경을 가지며 UCCA 내의 각각의 안테나는 균일하게 배치되고 중심축을 기준으로 $\theta_{i,j}$ 만큼 수신 UCA 대비 상대적으로 회전되어 있다고 가정하였다. 송수신기 중심 간 전송 거리는 D 이고 송신기와 수신기가 동일 중심축에 대해 완벽하게 정렬되어 있다고 가정하였으며 각각 $K = \min(N, M)$ 개의 부분적인 RF-체인을 갖는다고 가정하였다. 본 논문에서는 채널 용량을 달성하기 위한 최적 UCCA 선택을 위해 전력 할당을 추가적인 기준으로 채택함에 따라 하나 이상의 UCCA가 실제 통신에 수반될 수 있다. 따라서, 실제 전송에 사용된 안테나 수 \bar{N} 은 선택된 $\nu (\leq J)$ 개의 UCCA의 안테나 수와 같으며 $\bar{N} = \nu \tilde{N}$ 로 표현할 수 있다. 따라서, 선택된 UCCA와 수신 UCA 간의 무선 채널 행렬 $\bar{\mathbf{H}} \in \mathbb{C}^{M \times \bar{N}}$ 은 $[\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2, \dots, \mathbf{H}_\nu]$ 로 표현되며, $\mathbf{H}_i \in \mathbb{C}^{M \times \tilde{N}}$ 는 $i \in \{1, \dots, \nu\}$ 번째 선택된 송신 UCCA로부터 수신 UCA까지의 무선 채널 행렬을 나타낸다. \mathbf{H}_i 의 $m \in \{1, \dots, M\}$ 번째 행과 $n \in \{1, \dots, \tilde{N}\}$ 번째 열의 채널 계수 $h_{m,n}^i \in \mathbb{C}$ 는 근전계 가정에 따라 다음과 같이 정의된다.

Algorithm 1 Optimal transmit UCCAs selection

```

1: Input: TX/RX antenna parameters,  $D$ ,  $\mathcal{P}_t$ .
2: Output:  $\nu^*$ ,  $\mathcal{S}^*$ ,  $\mathcal{P}^*$ .
3: Initialization:  $\mathcal{S}^* = \emptyset$ ,  $\mathcal{P}^* = \emptyset$ 
4: for  $\nu = 1, \dots, J$  do
5:   Generate tuples  $\mathcal{S}_\nu$  and  $\mathcal{P}_\nu$ :
6:    $\mathcal{S}_\nu = \{\mathcal{S} \mid |\mathcal{S}| = \nu, \mathcal{S} \subseteq \{1, \dots, \nu\}\}$ .
7:    $\mathcal{P}_\nu = \{\mathcal{P} \mid |\mathcal{P}| = \nu, \mathcal{P} \cup \mathcal{P}_t \subseteq \mathcal{P}_t, \sum_{P \in \mathcal{P}} P = P_t\}$ .
8:    $[\mathcal{S}_\nu, \mathcal{P}_\nu] = \arg \max_{\mathcal{S} \in \mathcal{S}_\nu, \mathcal{P} \in \mathcal{P}_\nu} C(\mathcal{S}, \mathcal{P})$ 
9:    $C_\nu = C(\mathcal{S}_\nu, \mathcal{P}_\nu)$ 
10: end for
11:  $\nu^* = \arg \max_\nu C_\nu$ 
12:  $\mathcal{S}^* \leftarrow \mathcal{S}_{\nu^*}$  and  $\mathcal{P}^* \leftarrow \mathcal{P}_{\nu^*}$ 

```

$$h_{m,n}^i = \frac{\lambda \sqrt{G_t G_r P_i}}{4\pi D} e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{D^2 + R_{t,i}^2 + R_r^2 - 2R_{t,i}R_r \cos(\phi_{m,n}^i)}}$$

$$\phi_{m,n}^i = \theta_{t,i} + (m-1)\frac{2\pi}{M} - (n-1)\frac{2\pi}{N}$$

여기서 λ 는 파장, G_t 와 G_r 은 송신 및 수신 안테나 이득을 의미하며, $\phi_{m,n}^i$ 은 m 번째 수신 UCA 안테나와 i 번째 UCCA의 n 번째 안테나 간 상대적 회전각을 의미한다. 또한, $P_i \in \mathcal{P}_i$ 는 i 번째 선택된 송신 UCCA에 할당된 전력을 의미하며 \mathcal{P}_i 는 선택된 UCCA에 할당할 전력값을 포함하는 후보 집합을 나타낸다. 주어진 전송 거리에 대해, 선택된 송신 UCCA와 수신 UCA 사이의 채널 용량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C^* = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_M + \frac{1}{K\sigma_n^2} \overline{\mathbf{H}\mathbf{H}^H} \right) \right],$$

여기서 σ_n^2 는 부가 열잡음의 분산을 의미한다.

B. 제안하는 부 배열 기반 UCCA 선택 기법

주어진 전송 거리에서, UCCA의 최적 개수와 그에 따라 선택된 UCCA 인덱스 및 할당 전력은 Algorithm 1을 통해 동시에 결정된다. 그림 1에 도시된 바와 같이 송/수신 안테나 파라미터, 전송 거리 D 및 이산 전력 후보 집합 \mathcal{P}_i 가 입력으로 주어지며, UCCA의 수 ν 가 증가함에 따라 선택 가능한 UCCA 인덱스 집합과 할당 가능한 전력값 집합으로 이루어진 튜플 \mathcal{S}_ν 와 \mathcal{P}_ν 를 \mathcal{S}_ν 의 각 UCCA 인덱스 집합 \mathcal{G} 가 서로 배타적으로 구성되며, 전력 할당 집합 \mathcal{P} 는 \mathcal{P}_i 의 부분집합이면서 \mathcal{P} 내의 원소의 합이 최대 전력 P_t 가 되도록 생성한다. 이후, 채널 용량을 극대화할 수 있는 집합 \mathcal{G} 와 \mathcal{P} 를 각각 \mathcal{S}_ν 와 \mathcal{P}_ν 에 저장하고, 이때의 채널 용량을 C_ν 에 기록한다. 최종적으로, 가장 큰 채널 용량을 갖는 ν^* 를 최적 전송 UCCA의 수로 결정하며 이에 따른 인덱스 집합 \mathcal{S}_{ν^*} 와 전력 집합 \mathcal{P}_{ν^*} 를 각각 실제 전송에 사용할 인덱스 및 전력 집합 \mathcal{S}^* 와 \mathcal{P}^* 에 업데이트한다.

C. 부 배열 기반 UCCA 선택 기법의 공간 다중화 성능 평가 지표

본 논문에서는 제안한 부 배열 기반 송신 UCCA 선택 기법의 공간 다중화 성능을 평가하기 위해 정규화된 채널 용량 이득을 성능 지표로 채택하였으며 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{C^*}{K \cdot \log_2 \left[1 + G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \frac{P_t}{\sigma_n^2} \right]}$$

여기서 분자식은 본 논문에서 제안한 부 배열 기반 UCCA 선택 기법을 통해 전송된 무선 채널의 용량을 의미하고 분모식은 K 개의 병렬 가우시안(parallel-Gaussian) 무선 채널을 통해 전송된 무선 채널의 용량을 나타내어 최종적으로 제안된 기법을 통해 전송된 채널 용량 이득 η 의 값은 1로 정규화될 수 있다. 또한, 본 논문에서는 제안된 기법을 평가하기 위해 [4]에서 고안된 각 전송 거리에 대해 무선 채널의 특이값의 기하 평균을 계산하고 모든 전송 거리에 대한 기하 평균의 산술적 평균값을 산출하여 전송 거리에 대한 공간 다중화 성능의 견고성을 평가하였다.

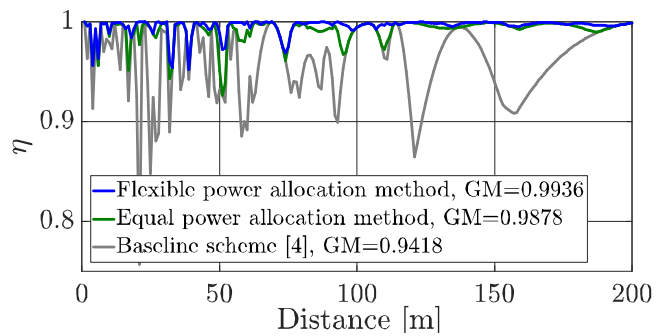
III. 모의실험 결과

그림 2. LoS MIMO 환경에서 부 배열 UCCA 선택 기법의 공간 다중화 성능.

본 논문에서는 제안하는 부 배열 기반 송신 UCCA 선택 기법의 성능이 채널 용량을 달성하고, 다양한 전송 거리에 대한 공간 다중화 성능의 견고성에 대해 MATLAB 모의실험을 통해 검증하였다. 본 모의실험은 반송파 주파수 f_c 는 62GHz, 평균 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)는 30dB로 가정하였으며 전송 거리 D 는 1m부터 200m까지 각 1m 간격으로 채널 용량 이득을 계산하였다. 수신 UCA의 반경 R_r 은 2m로 설정하였고 수신 안테나 수는 4개로 고정하였다. 한편, 송신 배열안테나의 전체 안테나 수는 16개로 설정하였으며 UCCA의 개수 J 는 4개로 설정하였으며 송수신 안테나 이득 G_t , G_r 은 모두 1로 가정하였다. 각 UCCA에 대해 반경과 수신 UCA 대비 상대적 회전각은 각각 $R_{t,j} \in \{0.5, 1, 1.5, 2\}$ m과 $\theta_{t,j} \in \{0.5, 10, 15\}^\circ$ 로 고려하였으며 전력 할당을 위한 후보 전력 집합 \mathcal{P}_i 는 $\{0, 0.25P_t, 0.5P_t, 0.75P_t, P_t\}$ 로 정의하였다. 그림 2는 제안하는 기법의 각 전송 거리별 채널 용량 이득 성능을 도시하였고, 모든 전송 거리에 대해 기하 평균을 계산하고 전체 전송 거리에 대한 산술 평균값 GM을 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 기법은 채널 용량을 달성하기 위해 오직 반경과 회전각만 고려하여 하나의 부 배열을 선택하는 기존 기법[4] 대비 더 다양한 전송 거리에서 채널 용량을 달성할 수 있으며 모든 전송 거리에 대해 더 견고한 공간 다중화 성능을 보이는 것을 확인하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 LoS MIMO 통신 시스템에서 채널 용량을 달성하고 다양한 전송 거리에 대해 공간 다중화 성능의 견고성을 향상할 수 있는 부 배열 기반 송신 UCCA 선택 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 모의실험을 통해 기존 기법 대비 성능이 매우 우수함을 확인하였다. 제안된 기술은 모든 안테나 요소에 대해 전 디지털 RF-체인을 고려하지 않아 저복잡도로 동작하면서 우수하면서 견고한 공간 다중화 성능을 얻을 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1A4A1032580).

참고 문헌

- [1] K. M. S. Huq, J. Rodriguez, and I. E. Otung, "3D network modeling for THz-enabled ultra-fast dense networks: A 6G perspective," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 84–90, Jun. 2021.
- [2] M. H. C. Garcia, M. Iwanow, and R. A. Stirling-Gallacher, "LOS MIMO design based on multiple optimum antenna separations," in *Proc. IEEE 88th Veh. Technol. Conf.*, Chicago, IL, USA, Aug. 2018, pp. 1–5.
- [3] 오민규, 이영석, 손웅, 정방철, "6G 이동통신용 UCA-LoS-MIMO 시스템의 성능 최적화," *통신정보 합동학술대회(IJCCI)*, Apr. 2022.
- [4] M. Palaiologos, M. H. C. Garcia, R. A. Stirling-Gallacher, and G. Caire, "Design of robust LoS MIMO systems with UCAs," in *Proc. IEEE 94th Veh. Technol. Conf.*, Norman, OK, USA, Sep. 2021, pp. 1–5.