

6G 이동통신을 위한 공간 분할 기반 저복잡도 부배열 안테나 선택 기법

오민규, 이영석, 정방철
충남대학교 전자공학과

e-mail : minkyuoh@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Novel Space Division-Based Low-Complexity Subarray Selection Technique for 6G Mobile Communication Systems

Minkyu Oh, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we propose a uniform circular subarray (UCSA) selection technique based on space-division strategies for practical line-of-sight multi-input multi-output (LoS-MIMO) systems. Our proposed technique can efficiently select UCSA to reduce computational time while maintaining robust spatial multiplexing performance. Simulation results show that the proposed space-division-based UCSA selection technique achieves not only the robust channel capacity performance, but very low computation speed compared to existing techniques.

I. 서론

6G 이동통신 시스템의 초고속 통신 서비스를 지원할 수 있는 차세대 무선 전송 기술의 수요를 만족하기 위해 밀리미터파(millimeter wave: mmWave) 및 테라헤르츠(terahertz: THz) 대역과 같은 고주파수 대역이 최근 주목받고 있다 [1]. 이러한 고주파수 대역은 전파의 직진성이 높아 다중 경로 성분이 희소하여 가시선 경로(line-of-sight: LoS)가 지배적이며 공간 다중화 이득(spatial multiplexing gain)을 확보하기 어려운 한계가 있다. 이로 인해, LoS 통신환경에서 공간 다중화 이득을 개선하기 위해 균일 원형 배열안테나(uniform circular array: UCA)[2]와 균일 평면 배열안테나(uniform planar array: UPA)[3,4]에 대한 안테나 배열 설계 및 배치 최적화 연구가 최근 진행되었다.

그러나, 기존 연구는 송신 배열안테나와 수신 배열안테나까지의 전송 거리가 주어질 때, 물리적인 배열 구조인 직경과 상대적 회전각을 고려하여 모든 배열 후보군을 비교해 최적의 배열안테나를 선택하였다. 이러한 방식은 고려해야 할 직경 및 상대적 회전각 후보군이 증가함에 따라 연산시간이 크게 증가하여 실시간 운용을 요구하는 동적 시스템에 적용하기 어려운 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 실제적인 LoS MIMO 통신시스템을 위해 공간-분할 기반 저복잡도 부배열 후보 선택 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 최적의 공간 다중화 성능을 달성하는 부배열을 선택하기 위해 송신 배열안테나를 공간적으로 분할하여 후보군을 축소하는 부배열 선택 기법으로, 모의실험을 통해 기존

기법 대비 연산시간을 크게 줄이면서 미비한 공간 다중화 성능 차이를 보이는 것을 확인한다.

II. 공간-분할 기반 저복잡도 균일 원형 부배열 선택 기법

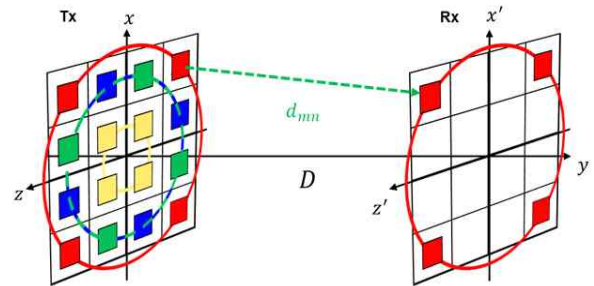


그림 1. 제안하는 공간-기반 부배열 선택 기법의 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 LoS 통신환경에서 각각 서로 다른 반경과 상대적 회전각을 가지는 다수의 균일 원형 부배열안테나(uniform circular subarray: UCSA)로 구성된 UPA 송신기와 단일 UCA로 구성된 수신기가 존재하는 점 대 점(point-to-point) 다중안테나(multiple-input multiple output: MIMO) 통신 시스템을 고려한다. 수신 UCA는 반경이 R_r 이고 M 개의 안테나를 가지며, 송신 UPA는 최대 반지름이 R_t 이고 N 개의 안테나를 가지며, I 개의 UCSA를 갖는다고 가정하였다. 또한, 각 부배열 UCSA는 $\tilde{N}=N/I$ 개의 안테나로 구성되며, $i \in \{1, \dots, I\}$ 째 UCSA는 $R_{t,i}$ 의 반경을 갖고 중심축을 기준으로 수신 UCA 대비 $\theta_{t,i}$ 만큼 상대적 회전이 되어 있다고 가정한다. 송/수신기 중심 간 전송 거리는 D 이고 송신기와 수신기가 동심 축에 대해 완벽하게 정렬되어 있으며, 각 $K=\min(N, M)$ 개의 부분적인 RF-체인을 갖는다.

본 논문에서 제안하는 기법은 최적 성능을 제공할 수 있는 단일 UCSA를 선택하여 전송하는 LoS MIMO 통신시스템을 고려한다. 따라서 선택된 i 째 송신 UCSA와 수신 UPA간 무선 채널 행렬을 $\mathbf{H}_i \in \mathbb{C}^{M \times \tilde{N}}$ 으로 정의하고, $n \in \{1, \dots, \tilde{N}\}$ 째 송신 안테나와 $m \in \{1, \dots, M\}$ 째 수신 안테나 간 무선 채널 계수는

근전계 가정에 따라 다음과 같이 정의될 수 있다.

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

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

여기서 λ 는 파장을 의미하고 d_{mn}^i 과 ϕ_{mn}^i 은 각각 i 제 UCSA의 n 제 송신 안테나와 m 제 수신 안테나까지의 유클리디안 거리 및 상대적 회전각을 나타내며 D 는 각 배열안테나 간 전송 거리를 의미한다. 따라서, 주어진 전송 거리 D 에 대해 선택된 i 제 UCSA와 수신 UCA 간 채널 용량은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C(i,D) = \log_2 \left[\det \left(\mathbf{I}_M + G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \frac{\gamma}{M} \mathbf{H}_i \mathbf{H}_i^H \right) \right],$$

여기서 G_t 와 G_r 은 송/수신 안테나 이득을 의미하고 γ 는 평균 신호 대 잡음 비(signal to noise ratio: SNR)를 나타낸다.

제안하는 기법은 송신 UPA를 공간적으로 균등 분할하고 각 분할 구역별 대표 UCSA를 비교하여 채널 용량이 가장 큰 대표 UCSA의 구역을 선택한 후 해당 구역에서 다시 공간적으로 분할해 각 대표 UCSA를 비교한다. 이러한 과정은 사전에 정의된 공간 분할 종료 영역 M_{DV} 가 될 때까지 반복한다. 예를 들어, M_{DV} 가 2일 때 그림 1과 같이 한 사분면에 대표 UCSA가 오직 4개만 존재하게 되며, M_{DV} 를 만족하면 구역 내에서 최대 채널 용량을 갖는 UCSA를 탐색한다.

본 논문에서는 제안하는 기법의 공간 다중화 성능 및 송신 안테나 수 증가에 따른 성능 안정성을 평가하기 위해 선택된 UCSA와 수신 UCA 간 무선 채널 행렬의 특잇값 간 기하 평균값을 성능 지표로 사용하였다. 구체적으로, \hat{N} 개까지 송신 안테나 수를 늘릴 때 $j \in \{1, \dots, \hat{N}\}$ 개 안테나를 갖는 송신 UPA에 대한 기하 평균을 각각 계산하여 다음과 같이 산술적 성능 지표를 통해 제안하는 기법의 견고성을 측정하였다 [2].

$$GM = \frac{1}{\hat{N}} \sum_{j \in \{1, \dots, \hat{N}\}} gm(j),$$

또한, 본 논문에서는 공간 다중화 성능 지표로 [4]에서 고안한 정규화된 채널 용량 이득을 사용하였다.

III. 모의실험 및 결론

그림 2와 그림 3은 각각 공간-분할 기반 부배열 선택 기법의 연산시간과 공간 다중화 성능을 나타낸다. 본 모의실험은 반송파 주파수 f_c 는 62GHz, 평균 SNR γ 는 30dB로 설정하였으며, 4개의 안테나를 갖는 수신 UCA에 대해 전체 2×2 개 송신 안테나부터 100×100 개 송신 안테나까지 부배열 안테나 수가 증가할 때의 연산시간과 채널 용량 이득을 성능을 도출하였다. 그림 2, 3에서 $M_{DV}=2$, $M_{DV}=8$ 는 각각 대표 UCSA가 4개, 64개가 남을 때까지 공간을 분할한 경우를 의미하며, Baseline 기법은 모든 UCSA 후보군에 대해 완전 탐색을 수행한 기법을 의미한다. 그림 3에서 Rotation scheme은 [2]에서 제안된 상대적 회전각만

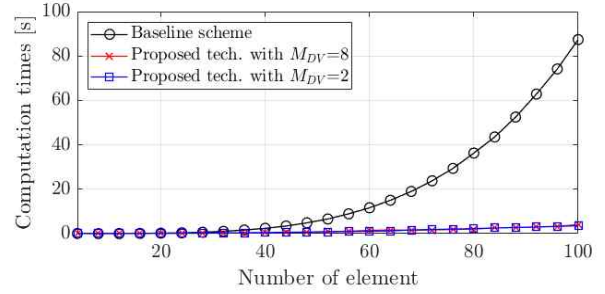


그림 2. LoS MIMO 환경에서 제안 기법의 연산 시간

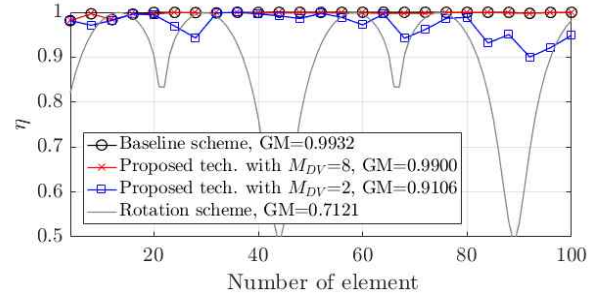


그림 3. LoS MIMO 환경에서 제안 기법의 정규화 채널 용량 성능

고려하여 후보 UCSA를 선택하는 기법을 나타낸다. 모의실험을 통해 제안하는 기법이 안테나 수가 증가함에 따라 기존 기법 대비 매우 낮은 연산시간을 가지면서 견고한 채널 용량 성능을 보이는 것을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R1I1A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [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. 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.
- [3] H. Cho, C. Park, and N. Lee, "Capacity-achieving precoding with low-complexity for terahertz LOS massive MIMO using uniform planar arrays," in *Proc. IEEE Intl. Conf. Inf. Commun. Technol. Convergence (ICTC)*, Jeju, South Korea, pp. 535-539, Oct. 2020.
- [4] 오민규, 이영석, 정방철, "6G LoS-MIMO 시스템용 채널 용량 최대화를 위한 부배열 선택 기법," *대한전자공학회 추계학술발표대회*, Nov. 2022.