

6G LoS-MIMO 시스템용 최소 채널 용량 보장을 위한 부배열 선택 기법

오민규, 이영석, 정방철
 충남대학교 전자공학과

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

A Subarray Selection Technique to Guaranteeing Minimum Capacity for 6G LoS-MIMO Systems

Minkyu Oh, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we propose a novel uniform circular subarray(UCSA) selection technique based on max-min channel capacity strategy for practical line-of-sight multiple-input multiple-output(LoS MIMO) communication systems. Our proposed technique continues to use only one UCSA for a specific distance interval, providing high spatial multiplexing capabilities. Through simulations, we show that the proposed max-min channel capacity strategy based UCSA selection technique achieves almost the same performance conventional scheme in term of achievable rate and robustness.

I. 서론

최근 밀리미터파(millimeter wave: mmWave) 및 테라헤르츠(terahertz: THz) 대역과 같은 고주파수 대역에서 대용량 무선 전송을 위한 기술 연구가 최근 활발히 보고되고 있다. 고주파수 대역 통신은 물리적 특성으로 인해 주로 가시선 경로 다중 안테나(line-of-sight multi-input multi-output: LoS MIMO) 통신 채널로 가정된다. 최근, 이러한 LoS MIMO 통신 시스템에서 균일 선형 배열안테나(uniform linear array: ULA)[1] 및 균일 평면 배열안테나(uniform planar array: UPA)[2, 3]에 대해 공간 다중화(spatial multiplexing) 성능을 확보하기 위한 안테나 배치 최적화 연구가 진행되었다.

그러나, 기존 연구는 특정 전송 거리에 대한 송/수신 배열안테나 파라미터 최적화가 수행되어 모든 전송 거리에 대해 공간 다중화 성능을 극대화하도록 설계되었다. 이는 동적인 환경을 고려할 때, 모든 전송 거리에 대한 적응형 안테나 배치 최적화 기술이 요구되어 실제적인 시스템 운용에 제약이 있다. 따라서, 본 논문에서는 실제적인 LoS MIMO 통신시스템을 위해, 특정 구간에서 각 전송 거리에 대한 최소 채널 용량을 최대화할 수 있는 부배열을 선택하여 운용하는 기법을 제안한다. 본 논문에서는 제안하는 기법이 각 전송 거리마다 최적화 과정을 통해 안테나 선택을 수행하는 기존 기법과 미비한 공간 다중화 성능 차이를 보이는 것을 확인하였다.

II. 제안하는 Max-Min 채널 용량 전략 기반 부배열 선택 기법

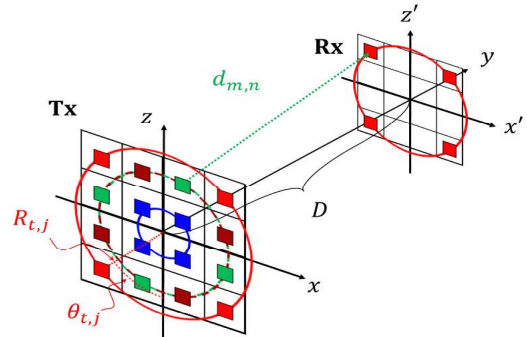


그림 1. 제안하는 Max-Min 채널 용량 전략 기반 부배열 선택 기법의 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 서로 다른 반경과 회전각을 가지는 J 개의 균일 원형 부배열(uniform circular subarray: UCSA)로 구성된 UPA 송신기와 단일 UPA 수신기가 존재하는 LoS MIMO 통신시스템을 고려한다. 구체적으로, 수신 UPA는 대각선 길이가 R_r 이고 M 개의 안테나를 가진다고 가정하였으며, 송신 UPA 내 각 UCSA도 M 개의 안테나를 갖고 있다고 가정하였다. 이때 송신 UPA의 최대 대각선 길이는 R_t 으로 정의하였고 $j \in \{1, \dots, J\}$ 번째 UCSA는 $R_{t,j}$ 반지름을 가지면서 수신 UPA 대비 $\theta_{t,j} \in [0, 2\pi]$ 만큼 회전되어 있다고 가정하였다.

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

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

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

여기서 λ 는 파장을 의미하고 d_{mn}^i 과 ϕ_{mn}^i 은 각각 i 번째

UCSA의 n 째 송신 안테나와 m 째 수신 안테나까지의 유클리디안 거리와 상대적 회전각을 나타내며 D 는 각 배열안테나 간 전송 거리를 의미한다. 따라서, 주어진 전송 거리 D 에 대해 선택된 i 째 UCSA와 수신 UPA 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 전체 전송 거리를 일정 간격으로 분할하여 각 구간에 동일한 송신 UCSA를 사용한다. 따라서, 본 논문에서는 각 구간 내 전송 거리에 대한 채널 용량의 최솟값이 선택될 수 있는 모든 UCSA 중 최대가 되는 UCSA를 선택하는 기법을 제안한다. 즉 특정 전송 거리 구간 ΔD 에 대해서 다음과 같은 기준으로 송신 UCSA i 를 선택한다.

$$i = \arg \max_{j=\{1, \dots, J\}} \{ \min_{D \in \Delta D} C(j, D) \}$$

즉, 특정 전송 구간 ΔD 내의 전송 거리 D 에 대해서 송신 UPA는 오직 하나의 UCSA만 이용할지라도, 높은 공간 다중화 성능을 제공할 수 있는 UCSA를 선택하도록 주어진 구간 내의 최소 채널 용량이 최대가 되는 UCSA를 선택하는 최대-최소 채널 용량 전략을 도입하였다.

본 논문에서는 제안하는 기법의 안정성 및 구간별 공간 다중화 성능을 평가하기 위해 선택된 UCSA와 수신 UPA 간 무선 채널 행렬에서 특잇값 간 기하 평균의 전체 구간 내 전송 거리에 대한 산술적 평균을 성능 지표로 사용하였으며 다음과 같이 정의된다 [4].

$$GM = \frac{1}{|\Delta D|} \sum_{D \in \Delta D} gm(D)$$

여기서 $|\Delta D|$ 는 구간 ΔD 내의 고려하고 있는 전체 전송 거리 D 의 개수를 의미하고 $gm(D)$ 는 특정 전송 거리 D 에 대해 선택한 UCSA와 수신 UPA의 무선 채널 행렬의 기하 평균을 의미한다. 또한, 본 논문에서는 제안한 기법의 채널 용량 성능을 평가하기 위해 다음과 같이 정규화된 채널 용량 이득을 사용하였다.

$$\eta = \frac{C(i, D)}{M \log_2 \left[1 + G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi D} \right)^2 \gamma \right]}$$

여기서 분모식은 M 개의 병렬 가우시안(Gaussian) 무선 채널을 통해 전송된 무선 채널의 용량을 나타내어 최종적으로 제안된 기법을 통해 전송된 채널 용량 이득 η 의 값은 1로 정규화된다.

III. 모의실험 및 결론

그림 2는 최대-최소 채널 용량 전략 기반 부배열 선택 기법의 공간 다중화 성능을 도시한다. 본 모의실험은 반송파 주파수 f_c 는 62GHz, 평균 SNR γ 는 45dB로 설정하였으며 10m부터 100m까지 0.1m 간격으로 채널 용량 이득을 계산하였다. 제안하는 기법은 10m 간격으로 분할한 구간에 대해 각각 적용하였으며, 전체 전송

표 1. 구간별 특잇값 기하 평균의 산술 평균값

Distance (D) [m]	Mean of Geometric mean (GM)	
	Baseline	Proposed
10 ~ 20	0.9148	0.7249
20 ~ 30	0.9033	0.7482
30 ~ 40	0.8904	0.6077
40 ~ 50	0.9284	0.8720
50 ~ 60	0.7819	0.7526
60 ~ 70	0.8333	0.8136
70 ~ 80	0.9405	0.9405
80 ~ 90	0.9533	0.9448
90 ~ 100	0.7165	0.5867

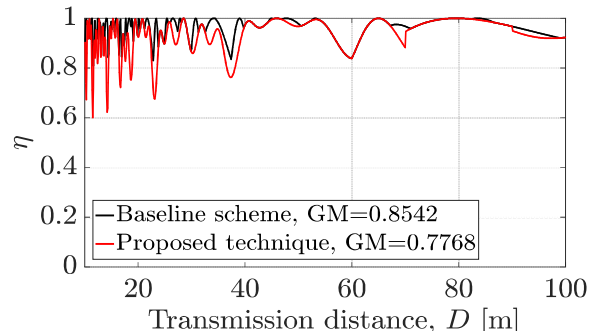


그림 2. LoS MIMO 환경에서 제안하는 기법의 채널 용량 이득 성능. 거리에 대한 GM은 그림 2와 같고 구간별 GM은 표 1과 같다. 제안하는 기법은 모든 전송 거리에 대해 안테나 배치 최적화를 수행한 기존 기법 대비 평균 0.0968 정도의 구간별 GM 오차를 갖는 것을 확인하였다. 따라서, 제안하는 기법은 주어진 구간에 대해 동일한 부배열로 통신하더라도 우수한 공간 다중화 성능을 보이므로 실제적인 LoS MIMO 통신시스템 운용 방안으로 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고문헌

- [1] H. Do, N. Lee, and A. Lozano, "Reconfigurable ULAs for line-of-sight MIMO transmission," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 20, no. 5, pp. 2933 - 2947, May 2020.
- [2] 오민규, 이영석, 정방철, "6G 무선통신 시스템을 위한 균일 평면 배열 안테나기반 LOS-MIMO 기술의 성능 분석," *한국통신학회 하계종합학술발표회*, Jun. 2022.
- [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. Int. Conf. on Inf and Commun. Technol. Convergence*, Jeju, Korea, Oct. 2020, pp. 535 - 539.
- [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.