

6G Holographic OAM 통신 시스템의 전자기 정보 이론적 해석

이영석, 김영담, 정방철

충남대학교

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

Holographic OAM Communication Systems for 6G: An Electromagnetic Information Theory Perspective

Young-Seok Lee, Young Dam Kim, Bang Chul Jung

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 밀리미터파나 테라헤르츠와 같은 고주파 대역을 고려한 차세대 통신 시스템용 메타물질 기반 홀로그래픽 각 궤도 운동량(holographic orbital angular momentum: H-OAM) 통신 시스템을 제안하고, 전자기적(electro-magnetic: EM) 무선 통신 채널과 이에 따른 정보 이론적 성능을 수학적으로 도출한다. 구체적으로, H-OAM 전파에 대한 전기장(electric field)을 유도하고 H-OAM 시스템에서 다양한 통신 파라미터의 영향을 특성화하기 위한 등가 무선 채널을 도출하여 달성 가능한 속도(achievable rate) 성능을 수학적으로 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 제안하는 H-OAM 시스템의 전자기 정보 이론적 해석을 검증하고 균일 원형 배열안테나(uniform circular array: UCA) 기반 OAM 시스템과 비교한다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템에서는 넓은 대역폭을 필요로 하는 초고속 서비스 응용이 대거 출현할 것으로 예상되며, 이에 따라 밀리미터파나 테라헤르츠 대역과 같은 고주파 대역에서의 통신 시스템 설계 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나, 이러한 고주파 대역에선 짧은 파장과 지배적인 가시선(line-of-sight: LoS) 채널 특성으로 인해 전통적인 다중안테나(multiple-input multiple-output: MIMO) 기술로는 높은 공간 다중화(spatial multiplexing) 성능을 달성하는 데 다소 한계가 있다 [1].

최근, 이러한 문제를 해결하기 위해 렌즈나 메타표면 등 공간적으로 연속인 안테나로 구성된 연속 개구면 다중안테나(continuous-aperture MIMO: CAP-MIMO) 또는 홀로그래픽 다중안테나(holographic MIMO: H-MIMO) 시스템이 LoS 채널 환경에서도 높은 공간 다중화 성능을 얻을 수 있는 기술로 크게 주목받고 있다 [2]. 구체적으로, H-MIMO 시스템은 연속적 전류분포로 인해 형성되는 전기장(electric field)을 유도하여 송수신기 간 전자기적 무선 채널을 도출하고 전자기 정보 이론(electromagnetic information theory: EIT) 기반 분석 방법론을 통해 전자기적 무선 채널에 대해 이론적으로 달성할 수 있는 궁극적인 통신 성능을 도출한다 [3]. 한편, 각 궤도 운동량(orbital angular momentum: OAM) 통신 시스템 또한 고주파 대역을 고려한 LoS 채널 환경에서 높은 공간 다중화 성능을 얻을 수 있는 유망 기술로 각광받고 있다 [4-5]. 특히, 다중 OAM 모드를 동시에 송수신할 수 있는 균일 원형 배열안테나(uniform circular array: UCA) 기반 OAM 시스템이 활발히 연구되고 있으나 생성할 수 있는 모드 수가 안테나 수에 제한되는 문제점이 있다.

본 논문에서는 고주파 대역을 고려하는 차세대 통신 시스템용 메타물질 기반 Holographic OAM (H-OAM) 시스템을 제안한다. H-OAM 시스템은 기존 UCA 기반 OAM 시스템의 일반화된 형태로써 OAM 전파 생성/탐색을 위한 임의의 전류분포를 생성할 수 있다. 구체적으로, 본 논문에서는 연속 링 안테나를 갖는 송수신기를 가정하여 전자기(electro-magnetic) 이론에 기반한 전기장과 무선 채널을 유도하고, 이론적 채널 모델로부터 달성 가능한 속도(achievable rate)와 같은 정보 이론적 성능을 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 H-OAM 시스템의 전자기 정보 이론적 해석을 검증하고, 종래의 UCA 기반 OAM 시스템과 비교한다.

II. 제안하는 Holographic OAM 통신 시스템

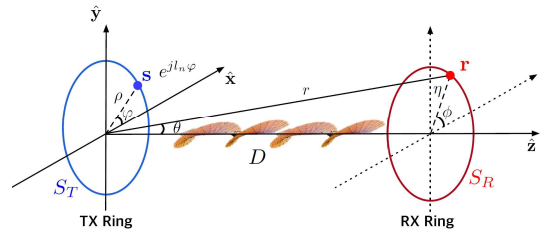


그림 1. 제안하는 연속 링 기반 H-OAM 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 원점을 중심으로 $x-y$ 평면 위 반지름이 ρ 인 메타물질 기반 송신 연속 링 안테나와 z 축으로 전송 거리 D 만큼 떨어진 위치에 반지름이 η 인 수신 연속 링 안테나가 존재하는 통신 환경을 고려한다. 본 논문에서는 송수신기가 완벽히 정렬되어 있다고 가정하였으며, 테라헤르츠와 같은 고주파 대역을 고려하여 다중경로 신호는 없다고 가정하였다 [1]. 송신 연속 링 안테나 S_T 위 소스 점 $\mathbf{s}(\in \mathbb{R}^3)$ 는 반지름과 x 축 기준 양의 각도 $\varphi(\in (0, 2\pi))$ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{s} = \rho \cos \varphi \hat{\mathbf{x}} + \rho \sin \varphi \hat{\mathbf{y}}.$$

수신 연속 링 안테나 S_R 위 관측점 $\mathbf{r}(\in \mathbb{R}^3)$ 은 원점과 관측점 간 거리 $r = \sqrt{D^2 + \eta^2}$, x 축 기준 양의 각도 $\phi(\in (0, 2\pi))$ 및 z 축 기준 고도각 $\theta(\in [-\pi/2, \pi/2])$ 로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{r} = r \sin \theta \cos \phi \hat{\mathbf{x}} + r \sin \theta \sin \phi \hat{\mathbf{y}} + r \cos \theta \hat{\mathbf{z}}.$$

본 논문에서는 통신에 활용되는 OAM 모드 집합을 $\mathcal{M}(\subset \mathbb{Z})$ 으로 정의하고 전체 OAM 모드 수를 나타내는 집합 \mathcal{M} 의 크기를 N 으로 정의한다. H-OAM 시스템의 OAM 전파 생성을 위한 송신 전류분포 $\mathbf{J}(\mathbf{s})(\in \mathbb{C}^3)$ 는 다음과 같이 전력 제한을 만족하도록 설계될 수 있다.

$$P_T = \int_{S_T} |\mathbf{J}(\mathbf{s})|^2 d\mathbf{s} = \sum_{n=1}^N \int_{S_T} |\mathbf{J}_n(\mathbf{s}) x_n|^2 d\mathbf{s},$$

여기서 $\mathbf{J}_n(\mathbf{s})(\in \mathbb{C}^3)$ 은 $n \in \{1, \dots, N\}$ 제 OAM 모드 송신을 위한 송신 전류분포를 나타내고 $x_n(\in \mathbb{C})$ 은 n 제 OAM 모드에 대응되는 송신 신호를 나타낸다. 본 논문에서는 모든 OAM 모드 신호에 동일한 전력을 할당한다고 가정하여 n 제 송신 전류분포는 S_T 에 대해 정규화되어야 한다. 따라서, y 축 편파를 가정한 H-OAM 시스템용 n 제 OAM 모드 전파를

$$H_{mn} = \begin{cases} 2\pi\sqrt{\rho\eta}kZ_0(-j)^{l_n} \frac{e^{jk\sqrt{D^2+\eta^2}}}{16\pi\sqrt{D^2+\eta^2}} J_{l_n}\left(k\rho\sin\left(\tan^{-1}\frac{\eta}{D}\right)\right) j2\left(1+\cos^2\left(\tan^{-1}\frac{\eta}{D}\right)\right), & l_m = l_n, \\ 2\pi\sqrt{\rho\eta}kZ_0(-j)^{l_n} \frac{e^{jk\sqrt{D^2+\eta^2}}}{16\pi\sqrt{D^2+\eta^2}} J_{l_n}\left(k\rho\sin\left(\tan^{-1}\frac{\eta}{D}\right)\right) j\sin^2\left(\tan^{-1}\frac{\eta}{D}\right), & l_m = l_n \pm 2, \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases}$$

생성하기 위한 송신 전류분포는 다음과 같다.

$$\mathbf{J}_n(\mathbf{s}) = \frac{e^{j\mathbf{s}\cdot\mathbf{r}_n}}{\sqrt{2\pi\eta}} \hat{\mathbf{y}}.$$

여기서 $l_n (\in \mathcal{N})$ 은 n 째 OAM 모드 정수를 나타낸다.

III. Holographic OAM 시스템의 전자기 정보 이론적 채널 분석

본 장에서는 H-OAM 시스템의 연속 전자기 채널에 대해 모드 분할 다중화(mode-division multiplexing: MDM)를 고려하여 [4] 이산 등가 무선 채널을 유도한다. 먼저, 수신 연속 링 안테나 위 관측점 \mathbf{r} 에서 측정할 수 있는 전계는 [5]와 같이 유도될 수 있으며, 연속 링 안테나 기반 OAM 수신기에서 송신기가 전송한 $m (\in \{1, \dots, N\})$ 째 OAM 모드를 탐색하기 위한 m 째 수신 전류분포 $\Psi_m(\mathbf{r}) (\in \mathbb{C}^3)$ 는 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$\Psi_m(\mathbf{r}) = \frac{e^{j\mathbf{s}_m\cdot\mathbf{r}}}{\sqrt{2\pi\eta}} \hat{\mathbf{y}}.$$

이후, 수신기는 모든 관측점 \mathbf{r} 에서의 전계에 대해 m 째 수신 전류분포를 정합 필터링(matched-filtering)함으로써 m 째 OAM 모드에 대한 신호 y_m 를 수신할 수 있다.

$$y_m = \sum_{n=1}^N \int_{S_r} \int_{S_t} \Psi_m^H(\mathbf{r}) \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \mathbf{J}_n(\mathbf{s}) d\mathbf{s} d\mathbf{r} x_n + w_m,$$

여기서 w_m 은 m 째 OAM 모드 신호를 수신할 때 발생하는 부가 잡음을 나타내며, 본 논문에서 모든 잡음은 통계적으로 독립이며 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. H-OAM 시스템의 정보 이론적 해석을 위한 수학적 채널 모델로서 송수신 OAM 모드에 대한 등가 무선 채널 행렬 $\mathbf{H} (\in \mathbb{C}^{N \times N})$ 를 정의하면, n 째 송신 OAM 모드로부터 m 째 수신 OAM 모드 간 무선 채널을 나타내는 원소 H_{mn} 은 다음과 같이 정의된다.

$$H_{mn} = \int_{S_r} \int_{S_t} \Psi_m^H(\mathbf{r}) \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \mathbf{J}_n(\mathbf{s}) d\mathbf{s} d\mathbf{r}.$$

단편 형태의 등가 무선 채널 H_{mn} 은 본 페이지 상단 수식과 같이 유도된다. 여기서 k 는 파수(wavenumber)를 나타내고 Z_0 는 고유 임피던스를 의미하며 $J_l(\cdot)$ 은 $l (\in \mathbb{Z})$ 차수 제1종 베셀 함수(Bessel function of the first kind)를 나타낸다. 따라서, 등가 무선 채널 행렬 \mathbf{H} 와 OAM 모드에 대한 수신 신호 벡터 $\mathbf{y} (\in \mathbb{C}^N)$, 송신 신호 벡터 $\mathbf{x} (\in \mathbb{C}^N)$, 잡음 벡터 $\mathbf{w} (\in \mathbb{C}^N)$ 를 이용하여 H-OAM-MDM 시스템의 수신 신호는 다음과 같이 종래의 MIMO 채널에 대한 수신 신호처럼 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{w}.$$

무선 채널의 정보 이론적 해석을 위해선 송수신기 간 채널의 영향에 대한 수학적 모형을 설계하여야 하며, 본 논문의 전자기 채널 분석 결과를 이용한 H-OAM 시스템의 달성 가능한 속도 성능은 다음과 같다.

$$R = \log_2 \left\{ \det \left(\mathbf{I}_N + \frac{G_t G_r \gamma}{N} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right) \right\}$$

여기서 \mathbf{I}_N 은 N 차원 단위행렬을 나타내고 G_t , G_r 은 각각 송신 및 수신 안테나 이득을 나타내며, $\gamma (= P_T/\sigma^2)$ 은 송신 신호 대 잡음비(signal to noise ratio: SNR)를 의미한다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

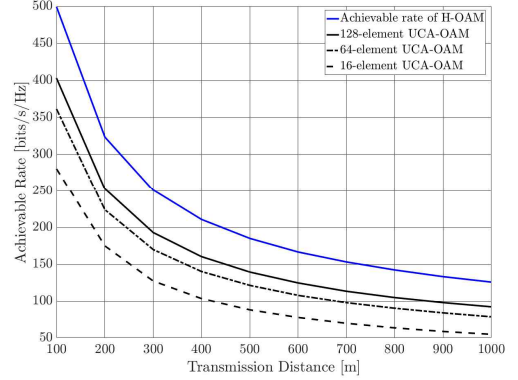


그림 2. H-OAM 시스템의 달성 가능한 속도 성능.

그림 2는 H-OAM 시스템의 달성 가능한 속도 성능을 전송 거리에 따라 도시한 결과이다. 본 모의실험에서 중심 주파수는 100GHz로 설정하였으며 송수신 연속 링 안테나의 반지름은 각각 파장 λ 에 대해 $\rho = 100\lambda (\approx 30\text{cm})$, $\eta = 200\lambda (\approx 60\text{cm})$ 로 설정하였다. OAM 통신에 활용되는 모드 집합은 $\mathcal{N} = \{-10, \dots, -1, 0, 1, \dots, 10\}$ 로 설정하였으며 송수신 안테나 이득 G_t, G_r 은 1로 가정하였다. 또한, 모드 당 송신 SNR은 40dB로 설정하였다. 모의실험을 통해 H-OAM 시스템이 UCA 기반 OAM 시스템보다 모든 전송 거리에 대해 우수한 달성 가능한 속도 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 한편, UCA 안테나 수가 증가할수록 H-OAM 시스템 성능에 도달함을 확인할 수 있다. 이는 H-OAM 시스템이 종래의 UCA-OAM 시스템의 점근적 일반화된 형태로 해석될 수 있음을 시사한다. 즉, H-OAM 시스템이 종래의 이산 배열안테나 기반 OAM 시스템의 궁극적인 성능 한계로 해석될 수 있음을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF2022R1I1A30733740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] H. Do, S. Cho, I. Park, H. -J. Song, N. Lee, and A. Lozano, "Terahertz line-of-sight MIMO communication: Theory and practical challenges," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 3, pp. 104-109, Mar. 2021.
- [2] T. Gong, et. al., "Holographic MIMO communications: Theoretical foundations, enabling technologies, and future directions," *IEEE Commun. Surveys Tuts*, vol. 26, no. 1, pp. 196-257, 1st Quart. 2024.
- [3] I. Zhu, Z. Wan, L. Dai, M. Debbah, and H. V. Poor, "Electromagnetic information theory: Fundamentals, modeling, applications, and open problems," *IEEE Wireless Commun.*, Jan. 2024 (Early access).
- [4] W. Son, K. -H. Lee, E. Choi, and B. C. Jung, "Optimal design of full-duplex orbital angular momentum mode-division multiplexing systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. Workshop*, pp. 180-185, Seoul, Korea, May 2022.
- [5] 이영석, 김영담, 정방철, "6G 이동통신을 위한 연속 링 안테나 기반 각 궤도 운동량 통신 시스템," *한국통신학회 하계종합학술발표회*, pp. 874-875, Jun. 2023.