

6G 이동통신을 위한 연속 링 안테나 기반 각 궤도 운동량 통신 시스템

이영석, 김영담, 정방철

충남대학교

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

Continuous Ring Antenna-Based Orbital Angular Momentum Communication System for 6G Mobile Communications

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

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 차세대 이동통신을 위한 연속 링 송수신 안테나 기반 각 궤도 운동량(orbital angular momentum: OAM) 통신 시스템을 제안한다. 또한, 본 논문에서는 연속 링 안테나 기반 OAM 시스템의 모드 분할 다중화를 위한 송수신 기저 함수(basis function)를 모델링하였고, 이를 기반으로 수신기에서 관측할 수 있는 전기장(electric field)과 유효 무선 채널을 전자기학적 관점에서 분석하였다. 제안하는 연속 링 안테나 기반 OAM 통신 시스템은 기존 균일 원형 배열안테나(uniform circular array: UCA) 기반 OAM 통신 시스템의 일반화된 송수신기 구조로, 기존 UCA 기반 OAM 통신 시스템에서 제한되었던 OAM 모드 수를 급격히 늘릴 수 있어 차세대 이동통신용 무선 백홀 네트워크에서 효율적으로 응용될 것으로 예상된다.

I. 서론

차세대 이동통신은 초고속 통신 성능을 요구하는 서비스 응용이 대거 출현할 것으로 예상되며, 넓은 주파수 대역을 이용할 수 있는 밀리미터파(millimeter wave: mmWave)나 테라헤르츠(terahertz: THz) 대역과 같은 초고주파 대역 통신 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 그러나, 초고주파 대역의 경우 파장이 매우 짧고 높은 경로 감쇠로 인해 장거리 통신에 활용하기 어려우며, 전파의 높은 직진성으로 인해 가시선(line-of-sight: LoS) 성분이 매우 우세하여 기존 다중안테나(multiple-input multiple-output: MIMO) 시스템보다 매우 낮은 공간 다중화 성능을 갖는다.

이를 위해, LoS MIMO 통신 시스템에서 공간 다중화 성능을 향상하기 위한 연구가 지속적으로 보고되고 있다. 대표적으로, [1]에서는 주어진 통신 거리에 대해 안테나 배치 및 파라미터를 가변하여 채널 용량을 최대화할 수 있는 배열 안테나 최적화 방법이 제안되었다. [2]에서는 연속 개구면 MIMO(continuous aperture MIMO: CAP-MIMO)를 가정하고 기존 원전계(far-field) 가정의 평면파(plane wave) 전파 모델을 근접 및 원전계를 모두 포함하는 구면파(spherical wave) 전파로 해석하여 무선 채널의 궁극적 성능 한계를 정의하고자 하는 전자기 정보이론적 분석 연구가 진행되었다. 또한, 특정 모드(mode)에 해당하는 위상제어를 통해 다수의 모드가 중첩된 각 궤도 운동량(orbital angular momentum: OAM) 전자기파를 생성하여 공간 다중화 성능을 향상할 수 있는 OAM 통신 시스템에 대한 통신 공학적 분석이 활발히 보고되고 있다 [3]. 특히, 균일 원형 배열안테나(uniform circular array: UCA)를 이용하여 각 안테나 소자가 위치하는 물리적 각도를 이용한 OAM 전파 생성은 가장 간단한 OAM 전파 생성 방법으로 알려져 있으나, 물리적으로 분리된 안테나 소자 간 각도에 의해 OAM 모드를 생성함으로써 정보 이론적 관점에서 채널 용량 및 공간 자유도(degrees of freedom: DoF)가 크게 제한될 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 연속적인 각도에 대응되는 OAM 전파를 생성하여 궁극적인 OAM 무선 채널의 한계를 도출하도록 연속 링 안테나 기반 OAM(continuous ring antenna-based OAM) 송수신 통신 시스템을 제안한다. 구체적으로, 본 논문에서는 연속 링 안테나 기반 OAM 송수신 전류 분포를 모델링하고 맥스웰 방정식으로부터 전기장(electric-field)을 유도하여 근접 및 원전계 영역과 관계없이 임의의 3차원 공간에서의 OAM 채널을 전자기적 관점에서 분석 및 해석한다.

II. 연속 링 안테나 OAM 통신 시스템의 전자기적 전기 분석

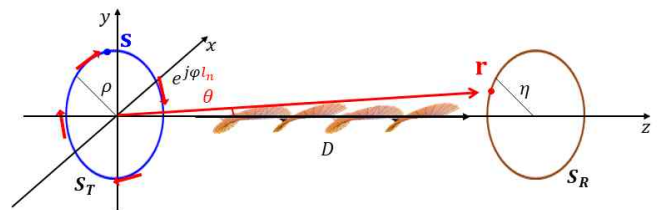


그림 1. 연속 링 안테나 기반 OAM 송수신 시스템 모델.

본 논문에서는 그림 1과 같이 원점을 중심으로 하는 $x-y$ 평면상에 반지름이 ρ 인 연속 링 안테나 OAM 송신기가 존재하고, z 축으로 전송 거리 D 에 반지름이 η 인 연속 링 안테나 OAM 수신기가 존재한다고 가정한다. 이때, 두 송수신기는 완벽히 정렬되어 있다고 가정하였다. 송신 연속 링 안테나 위의 소스 점 $\mathbf{s}(\in \mathbb{R}^3)$ 는 x 축과 이루는 각도 $\varphi \in (0, 2\pi]$ 에 대해 다음과 같이 정의될 수 있다:

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

또한, 수신 연속 링 안테나 위의 관측점 $\mathbf{r}(\in \mathbb{R}^3)$ 은 x 축과 이루는 각의 각도 $\phi \in (0, 2\pi]$ 와 z 축과 이루는 각도 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ 에 대해 다음과 같이 정의된다:

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

본 논문에서는 OAM 전파를 생성하기 위해 송신 전류분포 $\mathbf{J}(\mathbf{s}) \in \mathbb{C}^3$ 를 다음과 같은 전력 제한을 만족하도록 설계하였다:

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

여기서 S_T 는 $\mathbf{s}$ 가 존재하는 영역을 의미하며 본 논문에서는 송신 링 안테나를 나타내고, $N \subset \mathbb{Z}$ 은 송신할 OAM 모드 집합을 의미한다. 이때, 송신할 OAM 모드 집합 N 의 원소의 개수를 N 으로 정의하였으며 본 논문에서는 각 모드당 전체 송신 전력 P_t 에 대해 동일하게 분할된 전력으로 OAM 전파를 송신한다고 가정하였다. 따라서, 본 논문에서는 y 축 편파에 대해 송신 OAM 전류분포 $\mathbf{J}(\mathbf{s})$ 를 다음과 같이 설계할 수 있다 [4]:

$$\mathbf{J}(\mathbf{s}) = \sum_{n=1}^N \mathbf{J}_n(\mathbf{s}) = \sum_{n=1}^N \sqrt{\frac{P_t}{N}} \frac{e^{j\phi_n \varphi}}{\sqrt{2\pi\rho}} \hat{\mathbf{y}},$$

여기서 $l_n \in \mathcal{N}$ 은 n 째 송신 OAM 모드를 의미한다.

관측점 $\mathbf{r}$ 에서의 전계 $\mathbf{E}(\mathbf{r}) \in \mathbb{C}^3$ 는 다이어틱 그린 함수(dyadic Green's function)를 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \int_{S_r} \mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{s}) \mathbf{J}(\mathbf{s}) d\mathbf{s},$$

여기서 다이어틱 그린 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다 [2].

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}, \mathbf{s}) = jkZ_0 \left(\mathbf{I} + \frac{1}{k^2} \nabla \nabla^T \right) \frac{e^{jk\|\mathbf{r}-\mathbf{s}\|}}{4\pi\|\mathbf{r}-\mathbf{s}\|} \approx jkZ_0 \frac{e^{jk\|\mathbf{r}-\mathbf{s}\|}}{4\pi\|\mathbf{r}-\mathbf{s}\|} (\mathbf{I} - \hat{\mathbf{p}}\hat{\mathbf{p}}^T),$$

이때, k 는 파수(wavenumber)를 의미하며 파장 λ 에 대해 $k = 2\pi/\lambda$ 로 표현할 수 있고, Z_0 는 고유 임피던스(intrinsic impedance)를 나타낸다. 또한, $\hat{\mathbf{p}} = \mathbf{r} - \mathbf{s} / \|\mathbf{r} - \mathbf{s}\|$ 을 나타낸다. 다이어틱 그린 함수에서 경로 손실에 해당하는 분모 부분은 $\|\mathbf{r} - \mathbf{s}\| \approx r$ 로 근사할 수 있고, 지수에 포함된 위상 부분은 근축 근사(paraxial approximation)를 이용하여 다음과 같이 근사할 수 있다:

$$\|\mathbf{r} - \mathbf{s}\| \approx r - \rho \sin\theta \cos(\phi - \varphi), \quad r \gg \rho.$$

따라서, 앞서 정의한 송신 OAM 전류분포를 이용하여 연속 링 안테나 OAM 시스템의 수신 전계는 각 편파에 대해 다음과 같이 유도된다 [4]:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}) = & \sum_{n=1}^N kZ_0 \sqrt{2\pi\rho} (-j)^{l_n} \frac{e^{jk\rho}}{16\pi r} J_{l_n}(k\rho \sin\theta) \left\{ (\cos^2\theta - 1) e^{j(l_n+2)\phi} \left(\hat{\mathbf{x}} - e^{j\frac{\pi}{2}} \hat{\mathbf{y}} \right) \right. \\ & + (1 - \cos^2\theta) e^{j(l_n-2)\phi} \left(\hat{\mathbf{x}} + e^{j\frac{\pi}{2}} \hat{\mathbf{y}} \right) + 2j(1 + \cos^2\theta) e^{jl_n\phi} \hat{\mathbf{y}} \\ & \left. - 2\sin\theta \cos\theta (e^{j(l_n+1)\phi} - e^{j(l_n-1)\phi}) \hat{\mathbf{z}} \right\}, \end{aligned}$$

여기서 $J(\cdot)$ 는 제1종 베셀 함수(Bessel function of the first kind)를 나타낸다. 전계 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 을 통해 연속 링 안테나 OAM 전파의 경로 감쇠나 안테나 이득 및 주파수에 의한 감쇄 영향뿐만 아니라 모드 간 간섭 등을 파악할 수 있다. 특히, 송신 l_n 모드 OAM 전파 생성 시 전계를 통해 $l_n + 2$ 모드에서 우회선파(right hand circular polarization: RHCP)가 생성됨을 알 수 있고, $l_n - 2$ 모드에 대해서 좌회선파(left hand circular polarization: LHCP)가 생성됨을 알 수 있다. 또한 z 축 편파에 대해서 $l_n - 1$ 과 $l_n + 1$ 모드에 대한 간섭 신호가 발생함을 확인할 수 있다. 한편, 순수한 l_n 모드 OAM 전파는 오직 y 축 편파에 대해서만 수신할 수 있다.

본 논문에서는 송신 전류 분포를 y 축 편파에 대해 정의하였고, y 축 전계에 송신 l_n 모드가 수신될 수 있음을 전계 유도를 통해 확인할 수 있으므로 연속 링 안테나 OAM 수신기는 다음과 같이 y 축 편파에 대해 수신 전류분포를 모델링하여 OAM 전파를 수신하도록 설계할 수 있다:

$$\boldsymbol{\psi}(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^M \boldsymbol{\psi}_m(\mathbf{r}) = \sum_{m=1}^M \frac{e^{jl_m\phi}}{\sqrt{2\pi\eta}} \hat{\mathbf{y}},$$

여기서 $l_m \in \mathcal{M}$ 은 수신 OAM 모드를 의미하며 $\mathcal{M} \subset \mathbb{Z}$ 은 수신할 OAM 모드를 원소로 갖는 집합을 의미하고 집합 $\mathcal{M}$ 내 원소의 개수는 M 으로 정의하였다. 따라서, m 째 수신 OAM 모드에 대한 수신 신호 $\mathbf{y}_m \in \mathbb{C}^3$ 은 다음과 같이 m 째 수신 전류분포를 전계에 정합 필터링(matched filtering)하여 수신할 수 있다.

$$\mathbf{y}_m = \int_{S_R} \boldsymbol{\psi}_m^H(\mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{r}) d\mathbf{r} + \mathbf{n}_m,$$

여기서 $\mathbf{n}_m \in \mathbb{C}^3$ 은 m 째 OAM 모드를 수신할 때 3차원 공간에서 발생하는 부가 잡음 성분을 나타내고, S_R 은 $\mathbf{r}$ 이 존재하는 영역을 의미하며 본 논문에서는 연속 링 안테나 수신기 영역을 나타낸다. 따라서, 연속 링 안테나 OAM 수신기는 $\mathbf{y}_m$ 신호에 대해 y 축 편파를 추출하여 송신한 OAM 전파를 수신할 수 있다.

III. 모의실험 결과 및 결론

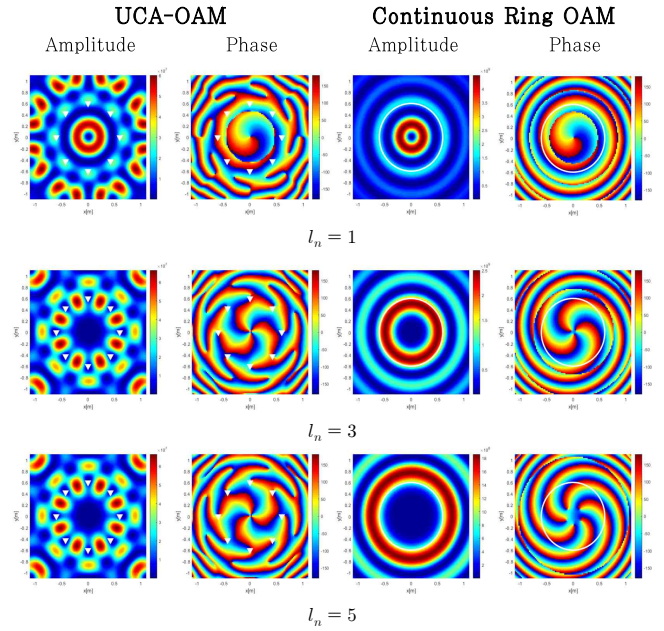


그림 2. 제한하는 연속 링 안테나 기반 OAM 전계 및 UCA-OAM 전계 비교.

그림 2는 제한하는 연속 링 안테나 기반 OAM 송수신 시스템에 대한 전계를 MATLAB 시뮬레이션을 통해 도시하였다. 본 논문에서는 중심 주파수를 100GHz로 가정하였으며 연속 링 송수신 안테나의 반지름은 각각 $\rho = 100\lambda \approx 30\text{cm}$, $\eta = 200\lambda \approx 60\text{cm}$ 로 설정하였고 전계에 각 수신 안테나 영역을 흰색으로 표시하였다. 통신 거리는 75m로 고정하였으며 8 소자 UCA와 연속 링 안테나 간 OAM 전계를 각 모드에 대해 비교하였다. 8소자 UCA의 경우 기하학적 안테나 구조로 인해 $l_n = 5$ 모드 OAM 전파를 생성할 수 없는 반면, 연속 링 안테나 OAM 송수신기의 경우 기존 안테나 수의 제약으로 인한 OAM 모드 제한을 효과적으로 해결할 수 있다. 또한, 근거리 환경에서 UCA 소자가 생성한 OAM 전파는 왜곡이 발생하며 수신 UCA의 물리적인 한계로 인해 각 안테나 소자가 효율적으로 전계를 수신하는 데 어려운 점이 있다. 반면, 연속 링 안테나 OAM 전파의 경우 연속 링 영역에 대한 전계를 모두 수신할 수 있어 통신 공학적 성능 향상도 기대할 수 있다. 추후, 이를 기반으로 연속 링 안테나 OAM 시스템의 전자기 정보 이론적 관점에서의 통신 성능을 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 삼성전자 미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 SRFC-TB1803-51).

참고 문헌

- [1] 오민규, 이영성, 정방철, "6G LoS-MIMO 시스템용 부배열기반 균일 원형 동심 배열안테나 기법의 성능 분석," *한국통신학회 추계종합학술 발표회*, Nov. 2022.
- [2] L. Sanguinetti, A. A. D'Amico, and M. Debbah, "Wavenumber-division multiplexing in line-of-sight holographic MIMO communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 4, pp. 2186-2201, Apr. 2023.
- [3] A. Sawant, I. Lee, B. C. Jung, and E. Choi, "Ultimate capacity analysis of orbital angular momentum channels," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 1, pp. 90-96, Feb. 2021.
- [4] D. Liu *et al.*, "Theoretical analysis and comparison of OAM waves generated by three kinds of antenna array," *Digital Commun. Netw.*, vol. 7, no. 1, pp. 16-28, Feb. 2021.