

UCA에 의한 OAM 전자기파의 극소 다이폴 모델링을 이용한 정확한 해석방법

김영담, 이영석^o, 정방철
충남대학교 전자공학과

An Accurate Analysis of OAM Electromagnetic Wave via UCA using Infinitesimal Dipole Modeling

Young Dam Kim, Young-Seok Lee^o, Bang Chul Jung
Dept. of Electronics Engineering
Chungnam National University
youngdamkim@cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

요 약

본 논문은 별도의 원전계 가정 없이 근접 및 원거리 영역 모두에 해당하는 임의의 3차원 방사 공간에 대해 UCA 기반의 OAM 전자기파 방사 문제를 해석하는 방법에 대해 서술하였다. 해당 방법은 OAM을 형성하는 UCA를 극소 다이폴 모델링을 통해 수학적으로 표현하고 해당 극소 다이폴 모델의 복소 전류분포의 전자기파 방사 문제를 별도의 가정 없이 해석한다. 제안한 방법을 통해 임의의 3차원 공간에서 정확한 OAM 전자기파를 해석할 수 있으며 30개 소자로 구성된 UCA에 대한 시뮬레이션 해석 결과를 나타내었다.

I. 서 론

UCA(Uniform Circular Array)를 이용하여 OAM(Orbital Angular Momentum) 전자기파를 생성하는 기본 방법에 대해 먼저 설명하고자 한다. 먼저 생성하고자 하는 특정 모드에 해당하는 정수를 l 로 결정한다. 그 후 UCA의 각 소자에 해당 소자가 위치하고 있는 물리적인 각도와 생성하고자 하는 모드의 곱으로 결정되는 위상값을 모든 UCA 소자들에 대해 위상제어를 함으로써 UCA 기반 OAM 전자기파를 발생시킬 수 있다 [1]. UCA 기반 OAM 전자기파의 방사 문제는 이상적인 미소 전류분포를 자유 공간상에 배치하고 여기에 벡터 자기 포텐셜 및 자유공간 그린함수를 사용하여 해석할 수 있다. 이러한 UCA의 방사 전자기파가 원전계 조건을 만족한다는 가정하에 OAM 전자기파의 엄밀한 방사 수식이 유도되었다 [2]. 하지만 실제 배열안테나의 원전계 조건을 만족시키기 위한 최소거리 R 은 배열안테나 전체 크기 D 와 파장 λ 와의 관계식이 존재한다. 해당 관계식은 $R = 2D^2/\lambda$ 로 정의된다. 결론적으로 OAM을 생성하고자 하는 UCA의 지름을 D 라고 할 수 있고 D 가 크면 클수록 원전계 조건을 달성하기 위한 최소거리가 커진다. 즉, [2]에서 제시한 수식은 UCA의 D 로 결정되는 R 보다 먼 거리에서만 유효한 수식으로 해석될 수 있으며 R 보다 가까운 UCA의 근접 영역에서는 OAM 전자기파를 다른 방법으로 분석해야만 한다.

본 논문에서는 근접 및 원전계 영역과 관계없이 임의의 3차원 공간에서의 UCA 기반 OAM 전자기파를 해석하는 방법에 대해 제안하고자 한다. 먼저 UCA는 극소 다이폴 모델들의 조합으로 모델링 한다. 극소 다이폴 모델링이란 임의의 안테나의 전류 분포를 미소 다이폴 모델들의 조합으로 표현하는 것이다 [3]. 본 논문에서는 UCA의 각 소자 위치에 미소 극소 다이폴을 배치하고 여기에 해당하는 미소 전류분포의 방사문제를 직접 해석하여 근접 및 원전계 영역에서 모두 사용할 수 있는 전류분포를 효율적으로 해석할 수 있다.

II. 극소 다이폴 모델링을 이용한UCA 기반OAM 전자기파 해석 방법

먼저 UCA를 극소 다이폴 모델을 통해 나타내야 한다. 본 논문에서는 그림 1과 같이 총 30개의 소자로 구성된 UCA를 고려한다. 해당 UCA의 동작 주파수는 2GHz로 가정하고 지름 D 를 대략 1.2m로 가정하였다. 이 경우, 해당 UCA가 원전계로 동작하는 최소거리 R 은 대략 19.19m로 계산될 수 있다($R = 2D^2/\lambda$). 각 UCA의 소자에는 y 편파의 전자기파를 발생시킬 수 있는 미소 다이폴 모멘트를 배치하였다. 특정 모드 l 로 동작하는 OAM 전자기파를 방사하기 위해서는 UCA의 소자별 다이폴 모멘트의 복소 전류계수 값을 설정해야 한다.

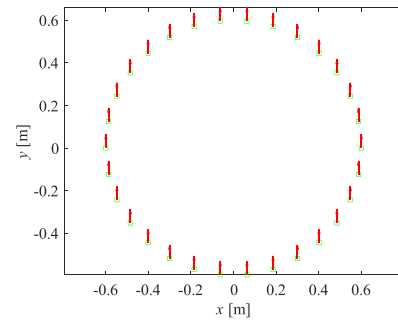


그림 1. 30개 소자로 이루어진 UCA.

즉, 그림 1과 같이 원점을 기준으로 하는 UCA의 n 번째 소자가 $+x$ 축 기준으로 형성된 방위각을 ϕ_n 이라고 하자. 이때 n 번째 소자의 복소 전류 계수는 $e^{il\phi_n}$ 로 설정하면 해당 UCA는 모드 l 을 만들어내는 극소 다이폴 모델이 된다.

극소 다이폴 전류들의 배열로 이루어진 극소 다이폴 모델이 주어졌을 때 해당 모델을 이용한 전자기파 방사 해석 방법에 대해 설명하기 위해서 극소 다이폴의 총 개수는 N 으로 가정하였다. 즉, 그림 1의 UCA는 $N = 30$ 이며, 중첩의 원리에 의해 극소 다이폴 전류분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\bar{J}_{ID}(\bar{r}) = \sum_{n=1}^N \bar{p}_n \delta(\bar{r} - \bar{r}_n) \quad (1)$$

여기서 \bar{p}_n 은 각 n 번째 극소 다이폴의 복소 전류 벡터로 극소 다이폴 모델이 OAM 전자기파를 방사하기 위해 위상 e^{ikr_n} 을 조절하여 \bar{p}_n 을 설정한다. 또한, \bar{r} 은 특정 관측점의 거리 벡터를 나타내며 \bar{r}_n 은 n 번째 극소 다이폴의 위치벡터를 나타낸다.

이러한 \bar{J}_{ID} 는 특정 모드 벡터 자기 포텐셜 및 그린함수 개념을 활용하여 그 전개분포를 구할 수 있다. 이러한 방법은 극소 다이폴 모델에 포함된 델타함수로 인해 복잡한 적분 수식이 간단하게 정리될 수 있게 되며 극소 다이폴 전류분포에 의한 방사 전계는 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 또한, (2)를 통해 특정 관측벡터 \bar{r} 상의 OAM 전자기파의 방사 전개분포 (근접 전계 및 원전계)를 쉽게 구할 수 있다.

$$\bar{E}(\bar{r}) = \sum_{n=1}^N \frac{i}{4\pi\omega\epsilon} \left[k^2 \left((\bar{n}_n \times \bar{p}_n) \times \bar{n}_n \right) \frac{e^{ikr_n}}{r_n} + (3\bar{n}_n(\bar{n}_n \cdot \bar{p}_n) - \bar{p}_n) \left(\frac{-ike^{ikr_n}}{r_n^2} + \frac{e^{ikr_n}}{r_n^3} \right) \right] \quad (2)$$

여기서 $e^{-i\omega t}$ 의 time-convention을 가정하였고 ω 는 각주파수, ϵ 은 유전율, k 는 파수(wave-number) 이다. $r_n = |\bar{r} - \bar{r}_n|$ 으로 관측 위치와 n 번째 극소 다이폴 사이의 거리를 나타낸다. 또한 \bar{n}_n 은 (3)과 같이 정의된다.

$$\bar{n}_n = \frac{\bar{r} - \bar{r}_n}{r_n} \quad (3)$$

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

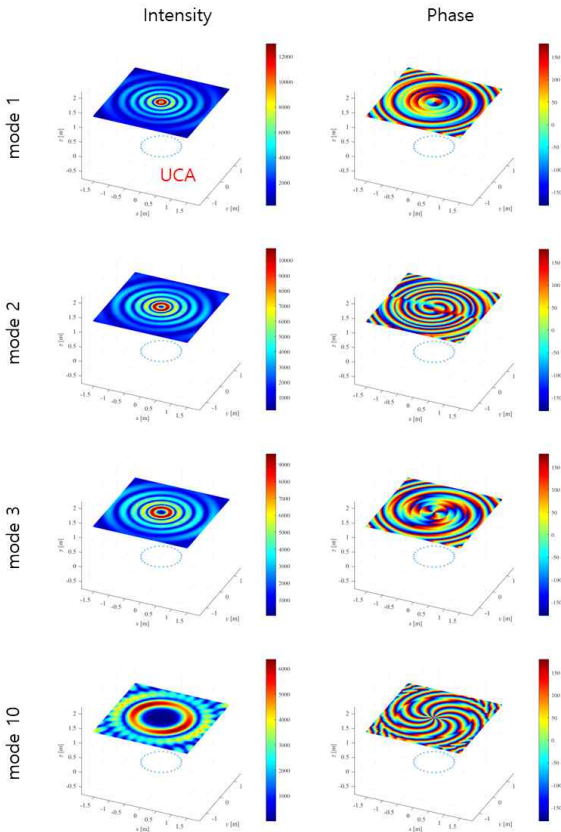


그림 2. UCA의 모드별 OAM 전자기파 방사 결과

그림 2에서는 (2)를 이용하여 모드 1, 2, 3, 10에 대한 근접영역에서 그림 1의 UCA가 방사하는 y 편파의 전기장의 크기 및 위상 결과를 나타낸다. 나타낸 전기장은 x 및 y 축에 대해 $-1.5\text{m} \sim 1.5\text{m}$ 까지 나타내었고 z 축은 UCA를 기준으로 1.5m 떨어진 영역에 대해 해석하였다. z 축이 1.5m 인 경우 UCA가 원전계로 동작하는 최소거리 R 이내에 존재하므로 [2]에서 제시한 수식을 사용하는 경우 정확한 분석을 할 수 없다. 반면에 본 논문에서 제안한 (2)는 원전계 가정 없이 나타낸 엄밀한 수식이므로 근접 영역에서의 OAM 전자기파를 정확하게 분석할 수 있다.

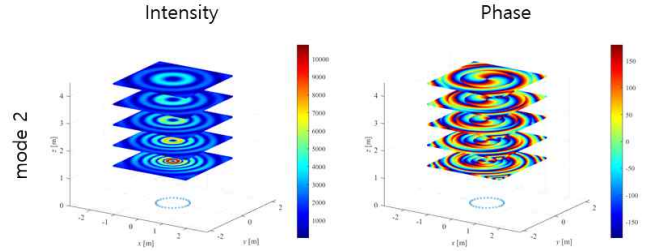


그림 3. UCA의 다양한 관측영역에 대한 OAM 전자기파 방사 결과 또한, 그림 3에서는 모드 2를 고정하고 z 축이 1.5m , 3m , 4.5m 인 공간에 놓인 다양한 관측영역에 대해 그림 1 구조의 UCA가 방사하는 y 편파의 전기장의 크기 및 위상 결과를 도시하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 근접 및 원거리 영역 모두에 해당하는 임의의 3차원 방사 공간에서의 UCA 기반 OAM 전자기파를 해석하는 방법에 대해 제안하였다. 제안한 결과는 극소 다이폴 모델링 기반의 해석 방법으로 매우 빠르면서도 정확하게 UCA 기반 OAM 전자기파를 분석할 수 있는 방법이다. 해당 방법에 대해 2GHz에서 동작하는 30개 소자로 구성된 UCA를 예로 들어 근접 영역에서 다양한 경우의 OAM 전자기파 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 삼성전자 미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 SRFC-TB1803-01).

참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] D Liu, L Gui, K Chen et al., "Theoretical analysis and comparison of OAM waves generated by three kinds of antenna array," *Digital Communications and Networks*, vol. 7, no. x1, pp. 16-28, 2021.
- [3] S. J. Yang, Y. D. Kim, "An accurate near-field focusing of array antenna based on near-field active element pattern and infinitesimal dipole modeling," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143771-143781, Oct. 2021.