

이중 모드 OAM 통신을 위한 간단한 급전 구조를 가진 균일 원형 배열 안테나

Uniform Circular Array Antenna with Simple Feeding Structure for Dual-Mode OAM Communication

유 정 응 · 손 해 원

Jeong-Ung Yoo · Hae-Won Son

요 약

본 논문에서는 OAM(orbital angular momentum) 모드 다중화를 위해 5.2 GHz 대역에서 동작하는 간단한 급전 구조를 가진 균일 원형 배열 안테나를 제안한다. 제안한 안테나는 8개의 방사 패치와 1개의 하이브리드 커플러, 2개의 동심원의 직병렬 급전선으로 구성된 급전 회로를 사용하여 두 종류의 OAM 모드($l=\pm 2$)를 동시에 생성할 수 있다. 2개의 급전선은 각각 반경이 다른 동심원으로 설계되었기 때문에 같은 면에 있어도 서로 교차하지 않아 공간적으로 효율적이며 급전 회로가 설계된 평면에 고차 OAM 모드를 위한 회로를 추가할 수 있는 이점이 있다. 측정된 방사 패턴과 나선형 위상 분포를 통해 두 OAM 모드의 생성을 확인하였으며, 제안한 안테나를 이용한 이중 모드 OAM 전송 테스트는 2개의 OAM 모드 채널 간에 >12.4 dB 이상의 격리도를 얻어 제안한 안테나가 OAM 모드 다중화에 성공적으로 사용될 수 있음을 보여준다.

Abstract

In this paper, we propose a uniform circular array antenna with a simple feeding structure operating in the 5.2 GHz band for orbital angular momentum (OAM) mode multiplexing. The proposed antenna can generate simultaneously two types of OAM modes ($l=\pm 2$) using eight radiating patches and a feed circuit consisting of one hybrid coupler and two concentric series-parallel feedlines. Because the two feedlines are designed concentrically with different radii, they do not intersect each other in the same plane, thus having the advantage of being spatially efficient. The successful creation of the two OAM modes was confirmed through the measured radiation pattern and helical phase distribution. The dual-mode OAM transmission test shows that the proposed antenna can be successfully employed for OAM mode multiplexing by obtaining >12.4 dB of isolation between the two OAM mode channels.

Key words: Microstrip Antenna, Uniform Circular Array, Orbital Angular Momentum, Multiplexing, Parallel-Series Feed

「이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A4A1032234).」

전북대학교 전자정보공학부(Division of Electronics and Information Engineering, Jeonbuk National University)

· Manuscript received November 15, 2021 ; Revised December 15, 2021 ; Accepted January 4, 2022. (ID No. 20211115-007S)

· Corresponding Author: Hae-Won Son (e-mail: hwson@jbnu.ac.kr)

I. 서 론

무선통신의 발달에 따라 무선통신 시스템에서는 급증하는 수많은 데이터들을 고속으로 전송해야 하기 때문에 높은 데이터 전송률을 위한 더 많은 스펙트럼을 요구하고 있다. 그러나 한정된 스펙트럼 자원으로 인해, 스펙트럼 효율성 향상 및 채널 용량을 증가시키는 것이 중요한 과제가 되었다. 최근에 OAM(orbital angular momentum) 모드 다중화가 무선 통신에서 스펙트럼 효율성을 향상시키는 유망한 접근 방식으로 제안되었다. OAM 모드는 전파가 진행 방향에서 나선형 위상 분포를 가지며, 위상은 방위각과 OAM 모드의 차수에 따라 변화한다. OAM 모드는 이론적으로 무한한 모드를 가지고, 각 모드들은 같은 주파수에서 서로 직교 상태이기 때문에 동일한 주파수 대역에서 모드 분할 다중화를 제공하여 채널 용량을 증가시킬 수 있다^{[1],[2]}. OAM파를 생성하기 위해 나선형 파라볼라 안테나, 평면 나선형 위상판(planar SPP), 균일 원형 배열(uniform circular array: UCA) 등 다양한 구조의 안테나가 연구되었다^{[3]~[5]}. 그러나 이 안테나들은 한번 구조가 정해지면 하나의 OAM 모드만을 생산하기 때문에 OAM 모드 다중화를 구현하기 어렵다.

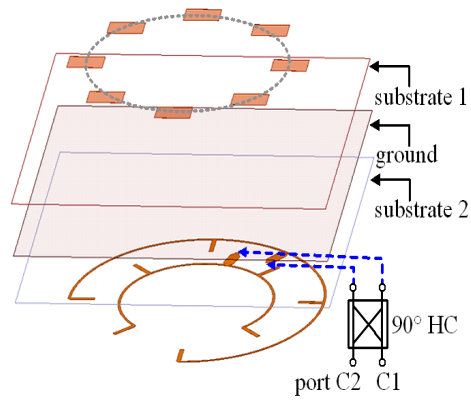
OAM 모드 다중화를 구현하기 위해서, 안테나는 다중 OAM 모드를 동시에 생성해야 한다. 그러나 안테나에서 형성된 빔의 중심축에 널(null)이 존재하는 OAM 모드의 방사 특성에 의해서, 각각의 OAM 모드의 빔 축을 일치시키는 것이 주요한 고려사항이다. OAM 모드 간 빔 축이 서로 불일치한 경우, OAM 송신 및 수신 안테나 사이의 전력 손실, 채널 누화(crosstalk) 등이 발생하여 OAM 시스템의 성능이 빠르게 저하된다^[6]. 앞에서 언급한 방법 중 UCA는 위상 제어에 따라 동일한 빔 축을 갖는 다중 OAM 모드를 생성할 수 있는 안테나로 많이 사용된다. 예를 들어, 두 개의 배열과 두 마이크로스트립 급전 회로를 이용하여 이중 OAM 모드($l=+2, -2$)를 생성하는 UCA가 제안되었으며^[7], 마이크로스트립 급전 회로를 동일 평면에 구현하여 이중 OAM 모드($l=+1, -1$)를 생성하는 UCA가 제안되었다^[8]. 또한, 급전 회로를 로트만(Rotman) 렌즈로 구현하여 9개의 OAM 모드를 동시에 생성하는 UCA가 제안되었다^[9]. 그러나 이 안테나들은 급전 회로가 어렵고,

복잡한 구조를 가진다.

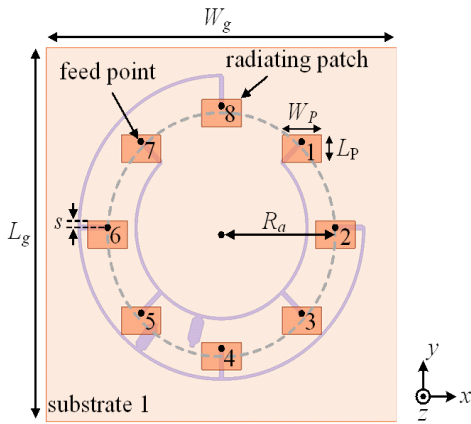
본 논문에서는 OAM 모드 다중화를 위한 간단한 급전 회로를 가지는 UCA 안테나를 제안한다. 제안한 안테나는 단일 배열을 사용하여 OAM 모드 $l=\pm 2$ 를 동시에 생성한다. 급전 회로는 각각 반경이 다른 동심원으로 설계되어 같은 평면에서 서로 교차하지 않아 공간적으로 효율적이며, 급전 회로가 설계된 평면에 고차 OAM 모드를 위한 회로를 추가할 수 있는 장점이 있다.

II. 안테나 구조

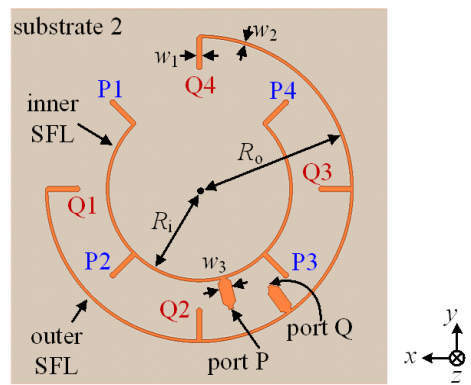
제안한 안테나의 구조는 그림 1에서 보여준다. 안테나는 균일 원형 배열(uniform circular array: UCA) 구조로, 3.2 mm 두께의 기판 1(FR-4, $\epsilon_r=4.5$, $\tan \delta=0.02$)의 한쪽면에 동심원으로 배치된다. UCA는 동일 편파를 갖는 8개의 방사 패치로 구성되며, 방사 패치는 5.2 GHz에서 동작하도록 설계되고, 반경 R_a 인 원의 둘레를 따라 동일한 간격으로 배열되었다. 급전 회로는 두 개의 OAM 모드를 생성하기 위해 방사 패치에 크기는 동일하고 위상이 90°씩 일정하게 증가 또는 감소하는 신호를 제공한다. 급전 회로는 2개의 직병렬 급전선(series-parallel feed line: SFL)과 1개의 90° 하이브리드 커플러(hybrid coupler: HC)로 구성되며, 2개의 SFL은 0.79 mm 두께의 기판 2(Taconic TLX-9, $\epsilon_r=2.5$, $\tan \delta=0.0019$)의 바닥면에 배치되어 외부 90° HC에 연결된다. 내부 및 외부 SFL은 각각 반경이 R_i 와 R_o 으로, UCA 둘레의 안쪽과 바깥쪽에 동심원으로 배치된다. 동심원으로 배치되었기 때문에, 두 SFL은 교차가 발생하지 않아 하나의 평면에서 회로를 구성할 수 있고, OAM 모드의 확장을 위한 추가 회로 배치에 이점이 있다. HC는 별도의 Taconic TLX-9 기판에 제작하여 기판 2의 급전선에 연결하였으나, HC를 기판 2의 급전선과 동일한 면에 설계하거나, 표면 실장 타입의 상용 HC를 기판 2에 부착하여 급전 회로를 하나의 기판에 집적화 할 수 있다. 기판 1과 기판 2는 서로 접지면을 마주하여 적층되며, SFL은 직경 1.3 mm의 프로브를 통해 방사 패치의 급전점과 연결된다. 그림 1(c)에서 내부 SFL은 홀수 번째 방사 패치(1, 3, 5, 7)에 연결되고 외부 SFL은 짝수 번째 방사 패치(2, 4, 6, 8)에 각각 연결된다. 자세한 안테나 설계 파라미터는



(a) 투시도
(a) Perspective view



(b) 상면
(b) Top view



(c) 하면
(c) Bottom view

그림 1. 제안한 이중 모드 OAM 안테나의 구조
Fig. 1. Geometry of the proposed dual-mode OAM antenna.

표 1에 표시하였다.

그림 2는 급전 회로의 등가적인 개요를 보여준다. 신호가 급전되면, 90° HC는 입력 신호를 크기가 동일하고 위상차가 90° 인 2개의 신호로 나누어 내부 및 외부 SFL의 입력 포트 P, Q에 전달한다. 각각의 SFL은 포트 P, Q의 신호를 동일한 크기와 180° 의 연속적인 위상 차이를 가진 신호로 나누어 4개의 출력 포트(P1~P4 또는 Q1~Q4)에 분배하며, 분배된 신호는 프로브를 통해 방사 패치의 급전점에 연결된다. 이것은 각 SFL의 세 접점에서 신호가 균일하게 분배되고 인접한 출력 포트 사이의 지연선의 길이가 반 파장의 정수배($\lambda/2 + n\lambda$, $n=1,2,3,\dots$)를 갖기 때문이다. 입력 포트 P와 Q는 실수 임피던스와 180° 의 위상 차이를 갖기 위해 인접한 출력 포트 사이에서 반 파장의 길이만큼 떨어진 지점에 위치한다. 각 출력 포트의 임피

표 1. 안테나 설계 파라미터

Table 1. Antenna design parameters.

Parameters	Values (mm)	Parameters	Values (mm)
L_g	160	R_i	38.4
W_g	160	R_o	64.3
R_a	51.9	w_1	2.1
L_p	11.7	w_2	1.2
W_p	18	w_3	5.5
s	2.7		

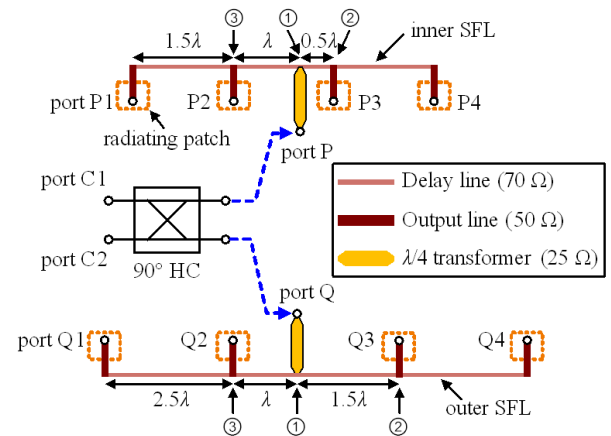


그림 2. 급전 회로의 등가 개요도
Fig. 2. Equivalent schematic of the feeding network.

던스는 지연선으로부터 반 파장 떨어진 위치마다 동일하며, 접점에서 분배되는 신호의 크기가 같아야 하기 때문에 접점 ②와 ③에 대한 입력 임피던스는 25 Ω 이고, 접점 ①에서 12.5 Ω 이 되어, SFL의 입력 임피던스는 $\lambda/4$ 트랜스포머를 이용하여 50 Ω 에 정합되었다. 지연선의 특성 임피던스는 약 70 Ω 이며, 지연선의 길이가 반 파장의 정수배이기 때문에 SFL의 입력 임피던스에는 영향을 미치지 않는다. 내부 및 외부 SFL의 반경이 서로 다르기 때문에 길이가 짧은 내부 SFL의 포트 사이 길이는 1.5 λ , 길이가 긴 외부 SFL에서는 2.5 λ 로 설정하였다.

앞서 설명한 방법을 이용하여 90° HC의 포트 C1에 신호가 급전된 경우를 보면, 출력 포트 P1~P4에 분배되는 신호는 $-180^\circ, 0^\circ, -180^\circ, 0^\circ$ 의 상대적인 위상을 가지며, 포트 Q1~Q4에 분배되는 신호는 $-270^\circ, -90^\circ, -270^\circ, -90^\circ$ 의 상대적인 위상을 가진다. 그러므로 방사 패치 1~8에는 크기는 같고 위상이 각각 $-180^\circ, -270^\circ, 0^\circ, -90^\circ, -180^\circ, -270^\circ, 0^\circ, -90^\circ$ 인 신호가 급전되어 방위각 방향에서 $+90^\circ$ 의 순차적인 위상 편이를 가지므로 안테나는 OAM 모드 $l=+2$ 를 생성한다.

동일한 방법으로, 90° HC의 포트 C2에 신호가 급전되면, 출력 포트 P1~P4에 분배되는 신호는 $-270^\circ, -90^\circ, -270^\circ, -90^\circ$ 의 상대적인 위상을 가지며, 포트 Q1~Q4에 분배되는 신호는 $-180^\circ, 0^\circ, -180^\circ, 0^\circ$ 의 상대적인 위상을 가진다. 그러므로 방사 패치 1~8에는 크기는 같고, 위상이 각각 $-270^\circ, -180^\circ, -90^\circ, 0^\circ, -270^\circ, -180^\circ, -90^\circ, 0^\circ$ 인 신호가 급전되어 방위각 방향에서 -90° 의 순차적인 위상 편이를 가지므로 안테나는 OAM 모드 $l=-2$ 를 생성한다.

III. 모의실험 및 측정 결과

모의실험은 ANSYS HFSS를 이용하여 수행되었으며, 여기에서 90° HC는 반영되지 않는다. 그림 3은 방사 패치(patch 1)의 반사계수와 인접한 패치(patch 1 and 2) 간의 상호 결합을 보여준다. 방사 패치는 400 MHz 이상의 대역폭을 가지며, 인접한 패치 간의 상호 결합은 -21 dB 미만을 가진다. 그림 4는 내부 및 외부 SFL의 각 출력 포트의 전력 분배를 모의실험한 결과이다. 두 SFL은 5.2

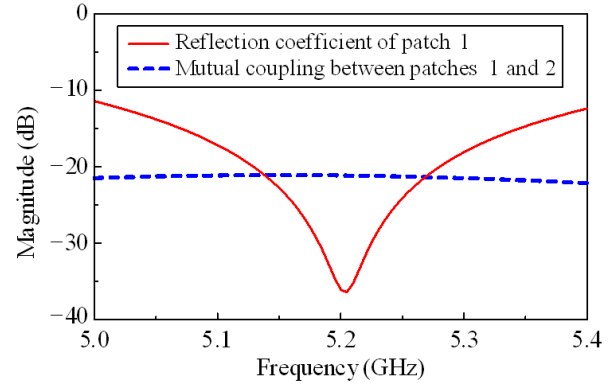
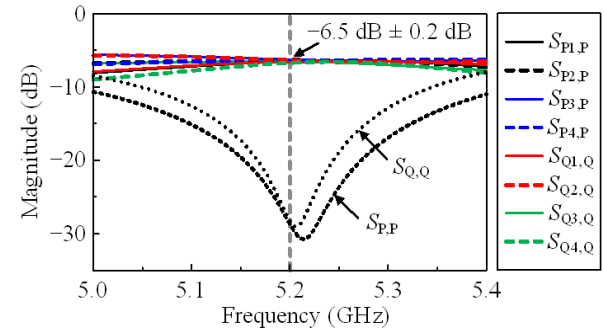


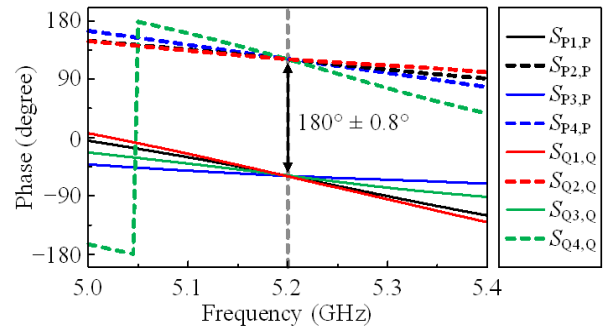
그림 3. 방사 패치(패치 1)의 반사계수와 인접한 패치(패치 1과 2) 사이의 상호 결합 모의실험

Fig. 3. Simulated reflection coefficient of a single patch (patch 1) and mutual coupling between adjacent patches (patch 1 and 2).



(a) 크기

(a) Magnitude



(b) 위상

(b) Phase

그림 4. 두 SFL의 S-파라미터 모의실험

Fig. 4. Simulated S-parameters of two SFLs.

GHz에서 양호한 반사손실을 가진다. 전송 계수는 5.2 GHz에서 -6.5 ± 0.2 dB로 거의 균일한 전력을 분배하며, 인접한 두 출력 포트 간의 위상 차이는 $180^\circ \pm 0.8^\circ$ 이다.

제안한 안테나의 성능을 검증하기 위해 제작 및 측정하였다. 그림 5는 제안한 안테나의 프로토타입을 보여준다. UCA와 SFL이 인쇄된 두 기판이 공통 접지면으로 적층되고, 90° HC가 그림 5(c)와 같이 길이가 같은 두 개의 동축 케이블로 SFL에 연결되었다. 그림 6은 제안한 안테나의 측정된 S -파라미터를 보여준다. 안테나는 두 OAM 모드 모두에 대해 넓은 대역에서 정합이 잘 되었으며, 두

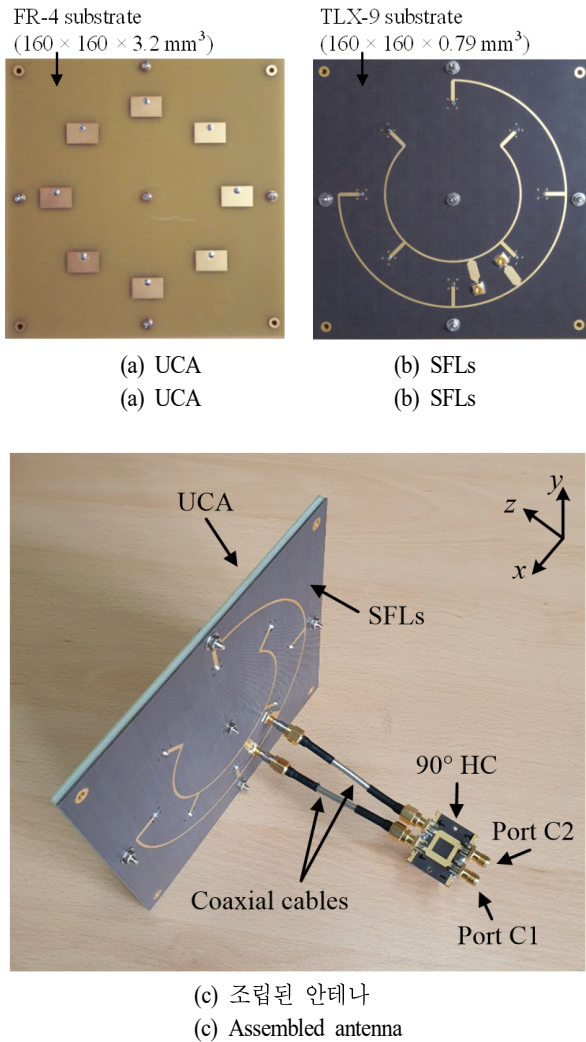


그림 5. 제안한 안테나의 프로토타입
Fig. 5. Prototype of the proposed antenna.

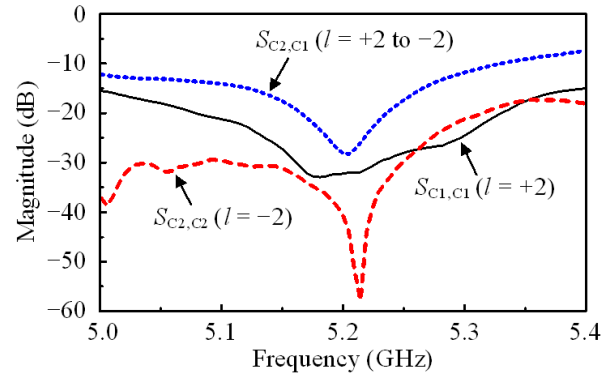
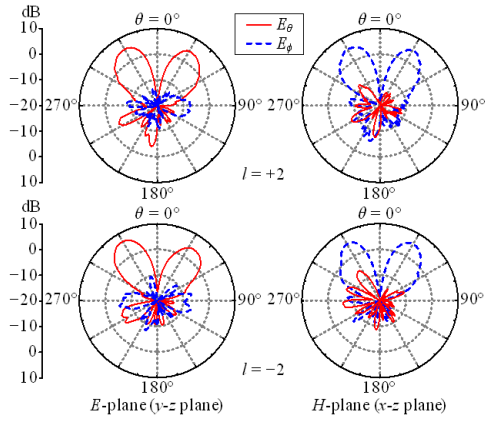


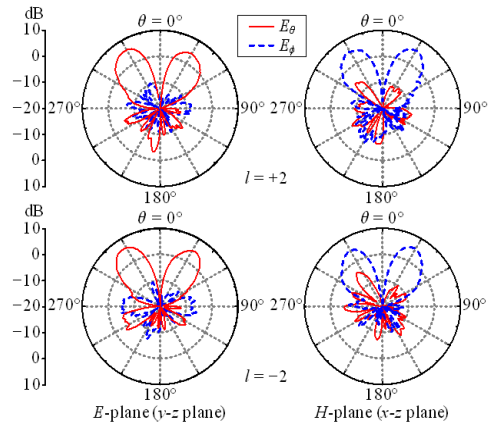
그림 6. 측정된 이중 모드 OAM 안테나의 S -파라미터
Fig. 6. Measured S -parameters of the dual-mode OAM antenna.

포트 사이의 격리도는 5.2 GHz에서 약 -28 dB이다. 제안한 안테나의 측정된 방사패턴은 그림 7에 보여준다. 모든 주파수에서 안테나는 OAM 모드의 전형적인 특징인 보어사이트 방향($\theta=0^\circ$)에서 널을 가지는 방사패턴을 형성한다. 그림 7(b)에서 5.2 GHz에 대한 방사패턴은 좌우 대칭적인 패턴을 보이며 최대 이득은 $l=+2$ 에서 5.9 dBi($\theta=327^\circ$), $l=-2$ 에서 6.1 dBi($\theta=326^\circ$)이다. 반면, 5.1, 5.3 GHz에서의 방사패턴은 약간의 비대칭성을 보인다. 이것은 그림 4에서 알 수 있듯이 급전 회로에서 분배된 신호의 크기가 균일하지 않고 인접한 두 출력 포트 간의 위상 차이가 일정하지 않기 때문이다. 그림 8은 제안한 안테나에 의해 생성된 모드 $l=+2, -2$ 의 위상 분포를 측정한 결과이다. 측정은 안테나로부터 300 mm 떨어진 위치의 $300 \times 300 \text{ mm}^2$ 인 평면에서 수행되었다. 그림에서 위상은 배열 축을 중심으로 한 주기 동안 720° 증가(또는 감소)하였다. 이러한 결과는 두 개의 OAM 모드의 성공적인 생성을 보여준다. 제안한 안테나가 OAM 다중 모드 시스템에서 사용할 수 있음을 검증하기 위해 전송 테스트를 수행하였다. 그림 9는 전송 테스트를 위한 측정 환경을 보여준다. 측정 방법은 두 개의 프로토타입 안테나를 송신 및 수신 안테나로 사용하며, 송신 안테나에서 하나의 OAM 모드를 전송하고, 수신 안테나에서 동일한 OAM 모드와 다른 OAM 모드로 번갈아가며 설정한 뒤 네트워크 분석기를 통해 두 안테나 사이의 전송 계수를 확인하였다. 두 안테나는 지면으

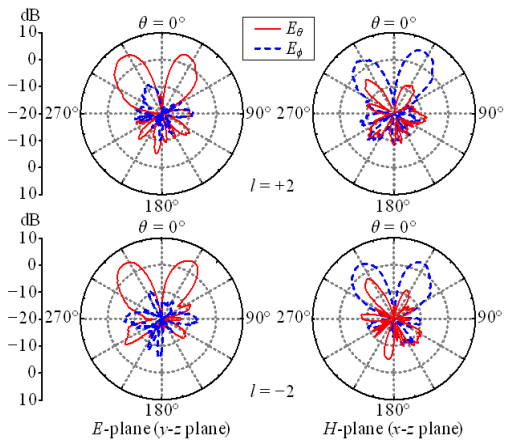
이중 모드 OAM 통신을 위한 간단한 급전 구조를 가진 균일 원형 배열 안테나



(a) 5.1 GHz



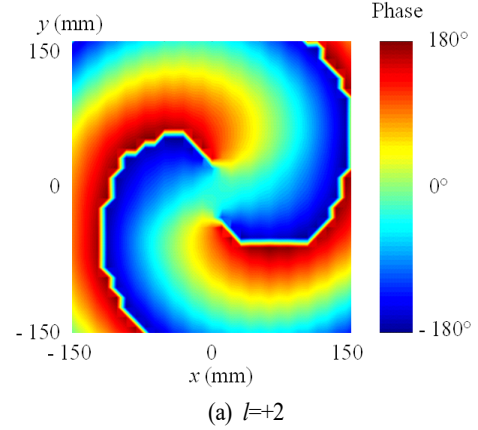
(b) 5.2 GHz



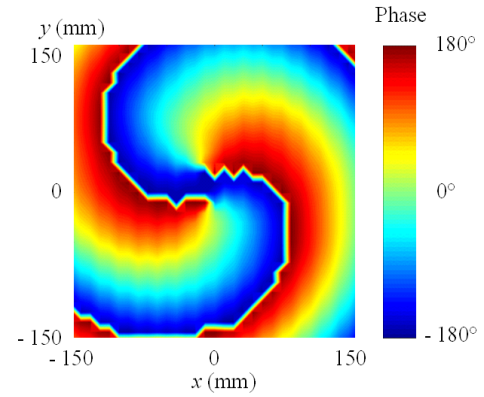
(c) 5.3 GHz

그림 7. 측정된 이중 모드 OAM 안테나의 방사 패턴

Fig. 7. Measured radiation patterns of the dual-mode OAM antenna.



(a) $l=+2$



(b) $l=-2$

그림 8. 5.2 GHz에서 측정된 이중 모드 OAM 안테나의 위상 분포

Fig. 8. Measured phase distribution of the dual-mode OAM antenna at 5.2 GHz.

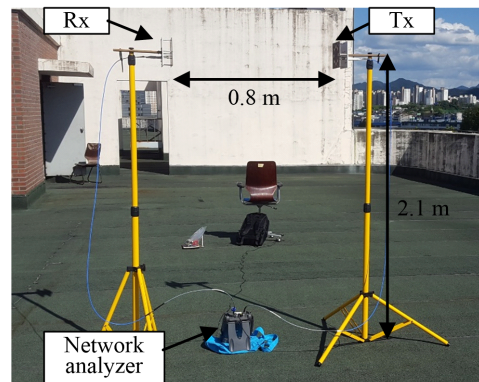


그림 9. 이중 모드 OAM 안테나의 전송 실험 설정

Fig. 9. Experiment setup of dual-mode OAM antennas.

로부터 2.1 m 높이에서 서로 마주보며 0.8 m 평행하게 떨어진 위치에 설치하였다. 측정 결과는 그림 10에서 보여주며, 5.2 GHz에서의 전송 계수는 표 2에 요약하였다. 서로 다른 OAM 모드 사이에는 전력 손실이 발생하여 동일한 OAM 모드의 전송 계수와 비교하면 12.4 dB 이상의 격리도가 형성되었다. 따라서 제안한 안테나를 이용한 이중 모드 OAM 다중화가 성공적으로 달성되었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 OAM 다중화를 위한 간단한 급전 회로를 가지는 이중 모드 UCA 안테나를 제안하였다. 안테나는 단일 배열을 이용하여 $l=\pm 2$ 의 두 OAM 모드를 동시에 생성할 수 있다. 급전 회로는 같은 면에 있어도 서로 교차되지 않아 공간적으로 효율적이며, 급전 회로가 기존에 배치된 평면에 고차 OAM 모드를 위한 회로를 추가할 수 있다. 측정된 방사 패턴과 나선허의 위상 분포는 2개의

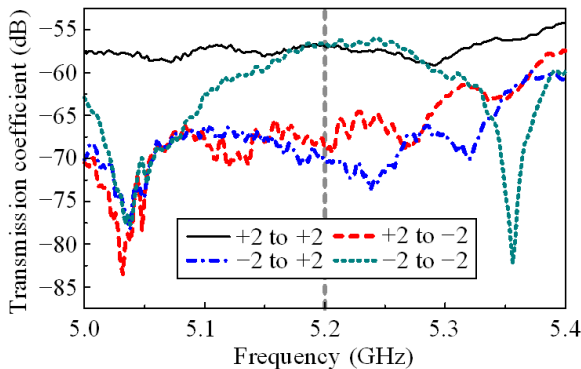


그림 10. 측정된 이중 모드 OAM 안테나의 전송 계수
Fig. 10. Measured transmission coefficients of the dual-mode OAM antennas.

표 2. 5.2 GHz에서 측정된 OAM 모드의 전송 계수
Table 2. Measured transmission coefficients of OAM mode at 5.2 GHz.

		Receiving OAM mode	
		+2	-2
Transmitting OAM mode	+2	-57.0 dB	-69.0 dB
	-2	-70.5 dB	-56.6 dB
Crosstalk		-13.5 dB	-12.4 dB

OAM 모드가 성공적으로 생성되었음을 보여주며 OAM 모드 채널 간의 낮은 누화는 성공적인 이중 모드 OAM 다중화를 증명하였다. 향후 더 많은 OAM 모드의 생성 및 고이득 안테나의 급전부로 활용하여 다중 OAM 모드를 동시에 생성하는 고이득을 가진 안테나로 확장할 계획이다.

References

- [1] Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, H. Huang, N. Ahmed, and C. Bao, et al., "High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing," *Nature Communications*, vol. 5, no. 1, p. 4876, Sep. 2014.
- [2] W. Zhang, S. Zheng, X. Hui, R. Dong, X. Jin, and H. Chi, et al., "Mode division multiplexing communication using microwave orbital angular momentum: An experimental study," *IEEE Transactions Wireless Communications*, vol. 16, no. 2, pp. 1308-1318, Feb. 2017.
- [3] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini, and F. Romanato, "Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: First experimental test," *New Journal of Physics*, vol. 14, no. 3, p. 033001, Mar. 2012.
- [4] L. Cheng, W. Hong, and Z. C. Hao, "Generation of electromagnetic waves with arbitrary orbital angular momentum modes," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, p. 4814, Apr. 2014.
- [5] Q. Bai, A. Tennant, and B. Allen, "Experimental circular phased array for generating OAM radio beams," *Electronics Letters*, vol. 50, no. 20, pp. 1414-1415, Sep. 2014.
- [6] G. Xie, L. Li, Y. Ren, H. Huang, Y. Yan, and N. Ahmed, et al., "Performance metrics and design considerations for a free-space optical orbital-angular-momentum-multiplexed communication link," *Optica*, vol. 2, no. 4, pp. 357-365, 2015.
- [7] Z. G. Guo, G. M. Yang, "Radial uniform circular antenna array for dual-mode OAM communication," *IEEE Antennas*

and *Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 404-407, 2017.

- [8] Z. Zhang, L. Gui, L. Liu, H. Chen, D. Liu, and K. Chen, et al., "A dual-polarized dual-OAM-mode multiplexed antenna system," in *International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology(ICMMT)*, Guangzhou,

May. 2019, pp. 1-3.

- [9] D. Wu, Z. Zhang, G. Fu, X. Shi, L. Yang, and X. Li, "Rotman lens-fed antenna for generating multiple orbital angular momentum(OAM) modes with gain enhancement," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 29891-29900, Feb. 2020.

유 정 응 [전북대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-9018-0951>



2016년 2월: 전북대학교 전자공학부 (공학사)

2018년 2월: 전북대학교 전자정보공학부 (공학석사)

2018년 9월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 박사과정

[주 관심분야] Orbital Angular Momentum

(OAM) 기술, 광대역 안테나, 마이크로파 및 밀리미터파 안테나

손 해 원 [전북대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-7474-3216>



1994년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)

1996년 2월: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)

2001년 2월: 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)

1996년 8월~2003년 11월: 삼성전자(주)

책임연구원

2003년 12월~2007년 3월: 한국전자통신연구원 선임연구원

2007년 4월~현재: 전북대학교 전자정보공학부 교수

[주 관심분야] 안테나 및 전파전파, RF 시스템 등