

UCA 기반 OAM 다중모드 전송시스템에 대한 지면 반사의 영향

Ground Reflection Effect on OAM Multi-Mode Transmission System Based on Uniform Circular Arrays

유 정 응 · 손 해 원

Jeong-Ung Yoo · Hae-Won Son

요 약

본 논문에서는 균일원형배열(UCA) 안테나를 이용한 궤도각운동량(OAM) 다중모드 전송시스템의 채널용량에 대하여 지면 반사가 미치는 영향을 수치적으로 분석하였다. 지면 반사는 OAM 다중모드 간 간섭을 유발하고 시스템의 심각한 성능 저하를 가져온다. 전송거리가 증가함에 따라 OAM 다중모드 채널용량은 지면 반사의 영향으로 인하여 매우 작아진다. 지면 반사의 영향을 줄이기 위해서는 UCA의 높이를 높이고, 배열 소자의 지향성을 높이는 것이 필요하다.

Abstract

This paper investigates the ground reflection effect on the channel capacity of an orbital angular momentum (OAM) multi-mode transmission system that uses uniform circular array (UCA) antennas. The ground-reflected signals cause inter-mode interferences between the OAM modes, and lead to system performance degradation. The OAM multi-mode channel capacity severely degrades owing to the ground reflection as the transmission distance increases. Increasing the UCA height above the ground and using highly directive array elements can mitigate the ground reflection effect and increase the channel capacity.

Key words: Orbital Angular Momentum, Ground Reflection Effect, Channel Capacity

I. 서 론

궤도각운동량(Orbital Angular Momentum: OAM)이 광 주파수 영역 밖의 낮은 주파수 영역에서 사용될 수 있다고 알려진 이후, OAM 무선통신시스템의 채널 특성 및 통신 링크에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{[1]~[3]}. 이러한 OAM 채널의 연구는 주로 자유공간에서 직접 전파 경로만을 다루었으나, 실제 채널 환경에서는 지면을 비롯한 다양한 물체에서 반사된 전파경로가 함께 고려되어야

한다. 실제 환경에서 수신된 OAM 신호는 직접파와 반사파의 중첩이다. 반사된 OAM 신호는 궤도의 중심축이 직접파의 궤도 중심축과 일치하지 않으므로 OAM 모드 간 누화(crosstalk)를 일으킨다^[4].

본 논문에서는 균일원형배열(Uniform Circular Array: UCA) 안테나를 이용한 OAM 다중모드 전송시스템의 채널용량에 대하여 지면 반사가 미치는 영향을 수치적으로 분석하고, 기존의 단일모드 전송시스템의 채널용량과 비교하였다. 그 결과, 전송거리가 증가함에 따라 OAM 다중모드 채널

「이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2015R1D1A1A01057407).」

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

· Manuscript received November, 30, 2017 ; Revised January, 18, 2018 ; Accepted January, 23, 2018. (ID No. 20171130-010S)

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

용량은 지면 반사의 영향으로 인해 단일모드 채널용량보다 매우 작아짐을 확인하였다. 이러한 지면 반사의 영향을 줄이기 위해서는 UCA의 높이를 높이고, 배열 소자의 지향성을 높이는 것이 필요함을 수치적으로 확인하였다.

II. OAM 전송시스템

본 논문에서는 그림 1과 같이 지면 위에 설치된 OAM 전송시스템을 고려한다. 송수신 UCA는 중심이 지면으로부터 h 의 높이에, 거리 D 만큼 떨어져 놓여 있다. 배열 소자의 개수는 N 이고, 배열 반경은 R 이다. 소자의 편파는 지면에 대하여 수평편파이고, 빔성형 네트워크(Beam Forming Network: BFN)는 이상적이라고 가정한다². 그림 1(c)에는 송수신 UCA 소자 간 직접경로와 지면 반사경로가 표시되어 있다.

OAM 모드 l_t 를 가지는 전파를 생성하기 위하여 송신 UCA에 입력한 신호를 a_{l_t} 라고 할 때, BFN을 통하여 n 번 소자에 입력되는 신호(a_n)는 식 (1)과 같다.

$$a_n = \frac{1}{\sqrt{N}} a_{l_t} e^{-j2\pi \frac{nl_t}{N}}, n \in \{1, \dots, N\} \quad (1)$$

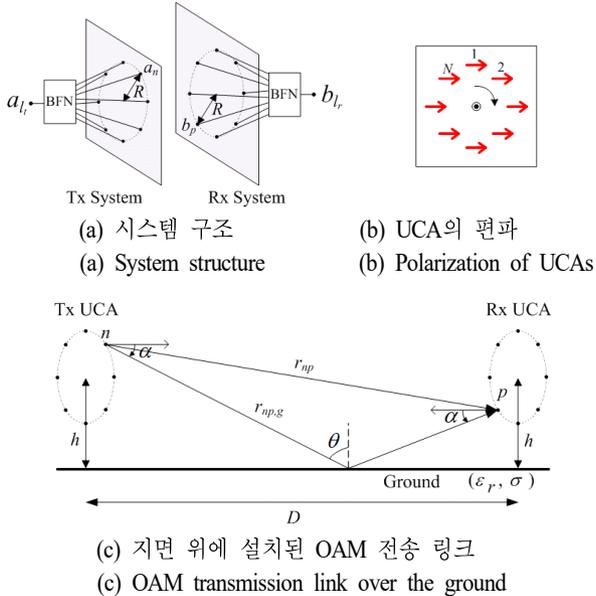


그림 1. OAM 전송시스템
Fig. 1. OAM transmission system.

수신 UCA에서 OAM 모드 l_r 을 가지고 수신된 신호 (b_{l_r})는 식 (2)와 같다. 여기서 b_p 는 송신 UCA로부터 수신 UCA의 p 번 소자에 전달된 신호로서 식 (3)과 같다.

$$b_{l_r} = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{p=1}^N b_p e^{-j2\pi \frac{pl_r}{N}}, p \in \{1, \dots, N\} \quad (2)$$

$$b_p = \sum_{n=1}^N (h_{np} + h_{np,g}) a_n \quad (3)$$

여기서 h_{np} 와 $h_{np,g}$ 는 각각 직접경로와 지면 반사경로에 대한 송신 UCA의 n 번 소자와 수신 UCA의 p 번 소자 간의 전달함수로서, 식 (4) 및 식 (5)와 같다.

$$h_{np} = \sqrt{G_t G_r} \frac{\lambda}{4\pi r_{np}} e^{-jkr_{np}} \quad (4)$$

$$h_{np,g} = \Gamma_s \sqrt{G_t G_r} \frac{\lambda}{4\pi r_{np,g}} e^{-jkr_{np,g}} \quad (5)$$

여기서 r_{np} 와 $r_{np,g}$ 는 각각 직접경로와 지면 반사경로의 전체 길이이며, Γ_s 는 지면의 반사계수이다. G_t 와 G_r 은 송수신 소자의 이득(gain)으로서, 본 논문에서는 식 (6)과 같이 설정하였다⁵.

$$G_t = G_r = G_0 \cos^q(\alpha) \quad (6)$$

여기서 G_0 는 보어사이트(boresight) 방향(그림 1(c)에서 $\alpha = 0$ 방향)의 최대 이득이다. G_0 가 클수록 q 가 증가하고, 높은 지향성(directivity)을 가진다.

송신 UCA에서 OAM 모드 l_t 를 $P_t^{l_t}$ 의 전력으로 송신할 때, 수신 UCA에서 수신한 OAM 모드 l_r 의 수신전력($P_r^{l_r}$)은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{P_r^{l_r}}{P_t^{l_t}} = \left| \frac{b_{l_r}}{a_{l_t}} \right|^2 = \left| \frac{1}{N} \sum_{p=1}^N \sum_{n=1}^N (h_{np} + h_{np,g}) e^{-j2\pi \frac{nl_t + pl_r}{N}} \right|^2 \quad (7)$$

III. 채널용량 해석

OAM 시스템의 채널용량은 샤논(Shannon)의 공식을 이

용하여 식 (8)과 같이 계산한다^[3]. 여기서, Q 는 OAM 모드의 개수이고, P_r^{ii} 와 P_r^{ji} 는 각각 송수신 모드가 서로 같을 때($l_t = l_r$)와 다를 때($l_t \neq l_r$)의 수신전력이다. N_0 는 가우시안 열잡음이다.

$$C = \sum_{i=1}^Q \log_2 \left[1 + P_r^{ii} / \left(N_0 + \sum_{j=1, j \neq i}^Q P_r^{ji} \right) \right] \quad (8)$$

OAM 시스템에 대한 지면 반사의 영향을 해석하기 위하여 다음과 같은 설정을 하였다. OAM 다중모드 채널은 $l = 0, \pm 1$ 로 구성하였으며, 단일모드 채널은 $l = 0$ 으로 두었다. 송수신 UCA는 $N=8$, $R=2\lambda$, $h=2$ m, $G_0=6$ dBi이다. 전송신호의 주파수는 10 GHz이고, 대역폭은 40 MHz이다. 지면의 특성은 비유전율이 $\epsilon_r=15$ 이고, 전도도는 $\sigma=7$ S/m으로 두었다. 그림 2는 자유공간과 지면 위에서, 전송거리(D)에 따른 OAM 다중모드 채널용량과 단일모드 채널용량을 해석한 결과이다. 단일모드 채널용량은 지면 반사에 의한 영향을 거의 받지 않지만, 다중모드 채널용량은 지면 반사에 의해 크게 저하되며, 단일모드 채널용량보다도 작아진다. 이것은 송신된 OAM 모드가 지면 반사로 인하여 다른 모드로 누화되기 때문이다. 지면에서 반사된 OAM 전파의 궤도 중심축은 직접파의 궤도 중심축과 일치하지 않으므로 OAM 모드 간 누화가 발생한다^[4]. 표 1은 OAM 다중모드의 전체 송신전력이 1 W이고, $D=100$ m 일 때, 각 모드 간 수신전력을 해석한 것이다. 자유

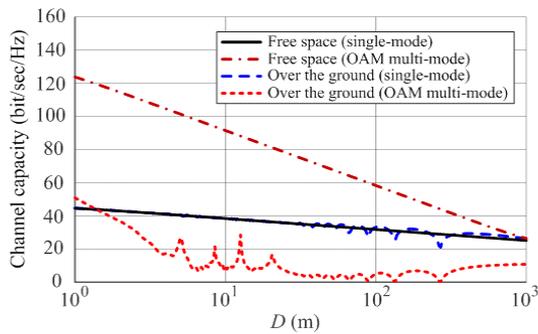


그림 2. 자유공간과 지면 위에서 OAM 다중모드 채널과 단일모드 채널의 채널용량

Fig. 2. Channel capacities of an OAM multi-mode channel and a single-mode channel in free space and over the ground.

표 1. 송수신 OAM 모드 간 수신전력

Table 1. Received power level of each OAM mode

| Mode Rx \ Tx | In free space | | | Over the ground | | |
|-----------------|---------------|-----------|-----------|-----------------|-----------|-----------|
| | $l_t = -1$ | $l_t = 0$ | $l_t = 1$ | $l_t = -1$ | $l_t = 0$ | $l_t = 1$ |
| $l_r = -1$ | -86 dBm | -378 | -372 | -61 | -50 | -62 |
| $l_r = 0$ | -366 | -37 | -367 | -50 | -33 | -50 |
| $l_r = 1$ | -367 | -359 | -86 | -62 | -50 | -61 |

공간에서는 모드 간 누화가 거의 발생하지 않지만, 지면 위에서는 상당한 양의 누화가 발생함을 알 수 있다.

IV. 채널용량의 개선

지면 위에서 OAM 시스템의 채널용량이 작아지는 것을 막기 위해서는 지면 반사파의 간섭을 줄여야 한다. 이를 위하여 본 논문에서는 3가지 방법을 제안하고 분석한다.

4-1 UCA의 높이 증가

그림 3은 UCA의 높이가 $h=2, 6, 10$ m일 때, 다중모드와 단일모드의 채널용량을 비교한 것이다. 다른 변수들은 그림 2의 설정과 같다. h 가 높을수록 지면 반사의 영향이 감소하고, 다중모드 채널용량이 증가함을 알 수 있다. 단일모드 채널용량은 h 에 거의 영향을 받지 않는다.

4-2 UCA의 배열 소자의 최대 이득(지향성) 증가

그림 4는 UCA 소자의 최대 이득(지향성)이 $G_0=6, 12$,

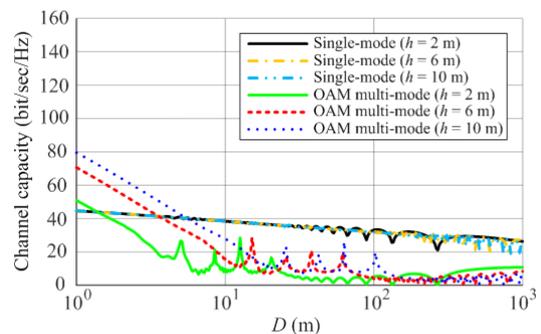


그림 3. 지면 위에서 UCA 높이에 따른 채널용량

Fig. 3. Channel capacity vs the height of UCAs over the ground.

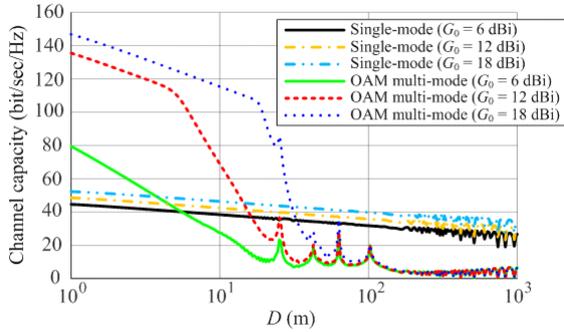


그림 4. 지면 위에서 UCA 소자 이득에 따른 채널용량
Fig. 4. Channel capacity vs the gain of UCA elements over the ground.

18 dBi일 때, 다중모드와 단일모드의 채널용량을 비교한 것이다. 이 때, $h=10$ m이고, 다른 변수들은 그림 3의 설정과 같다. 소자의 지향성을 증가시키면 지면으로 향하는 전파의 크기가 작아지므로, 지면 반사에 의한 모드 간 누화가 감소한다. 이에 따라 다중모드 채널용량이 크게 증가한다. 단일모드 채널용량은 다중모드에 비하여 상대적으로 작은 증가를 보인다.

4-3 UCA의 배열 반경 증가

그림 5는 UCA의 반경이 $R=2\lambda$, 6λ , 10λ 일 때, 다중모드와 단일모드의 채널용량을 비교한 것이다. 이 때,

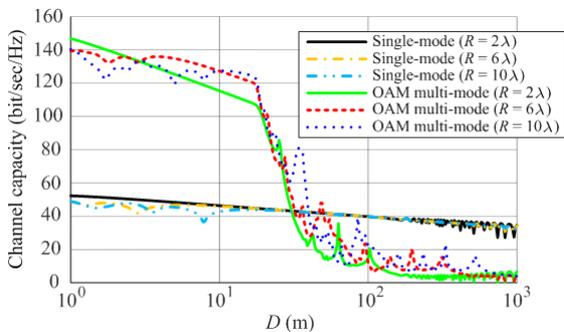


그림 5. 지면 위에서 UCA 반경에 따른 채널용량
Fig. 5. Channel capacity vs the radial size of UCAs over the ground.

$h=10$ m, $G_0=18$ dBi로 두었다. R 이 커질수록 다중모드 채널용량이 증가한다. 단일모드 채널용량은 R 이 증가하더라도 크게 개선되지 않는다.

V. 결 론

본 논문에서는 UCA를 이용한 OAM 다중모드 전송시스템에 대하여 지면 반사가 미치는 영향을 분석하였다. 지면 반사의 효과를 확인하기 위해 OAM 시스템의 채널용량을 분석하였으며, 그 결과 전송거리가 증가함에 따라 OAM 다중모드 채널용량은 지면 반사의 영향으로 인하여 매우 작아짐을 확인하였다. 지면 반사의 영향을 줄이기 위해서는 UCA의 높이와 배열 소자의 지향성을 높이는 것이 필요함을 확인하였다.

References

- [1] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm, K. Palmer, J. Bergman, and T. D. Carozzi, et al., "Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain," *Physics Review Letters*, vol. 99, no. 8, p. 087701, Aug. 2007.
- [2] D. K. Nguyen, O. Pascal, J. Sokoloff, A. Chabory, B. Palacin, and N. Capet, "Antenna gain and link budget for waves carrying orbital angular momentum," *Radio Science*, vol. 50, no. 11, pp. 1165-1175, Nov. 2015.
- [3] A. Cagliero, R. Gaffoglio, "On the spectral efficiency limits of an OAM-based multiplexing scheme," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 16, pp. 900-903, 2017.
- [4] Y. Yan, L. Li, G. Xie, C. Bao, P. Liao, and H. Huang, et al., "Multipath effects in millimetre-wave wireless communication using orbital angular momentum multiplexing," *Scientific Reports*, 6:33482, Sep. 2016.
- [5] C. A. Balanis, *Antenna Theory: Analysis and Design*, New York: John Wiley & Sons, 3rd ed. pp. 54-55, 2005.