

다중 인덱스 변조 기반 RIS-OAM 시스템의 성능 분석

이혜영, 신수용*

국립금오공과대학교, *국립금오공과대학교 IT융복합공학과

lhy413@kumoh.ac.kr, *wdragon@kumoh.ac.kr

Performance Analysis of Integrated RIS-OAM System with Multi Index Modulation

Hye Yeong Lee, Soo Young Shin*

Kumoh National Institute of Technology

요약

궤도 각 운동량 (orbital angular momentum)과 재구성 가능한 지능형 반사 표면 reconfigurable intelligent surface, RIS)을 결합 시 OAM의 성능 저하를 개선할 수 있다. 주파수 및 에너지 효율 증대를 위해 두 개 이상의 통신 자원의 인덱스 정보를 활용한 다중 인덱스 변조(multi-index modulation, MIM) 기술과 결합된 RIS-OAM 시스템이 제안한다. 본 논문에서는 주파수 효율 개선을 위해 RIS-OAM-MIM 시스템 방식을 제안하고 성능 분석을 수행한다.

I. 서 론

차세대 무선 통신은 이전 무선 통신 기술 대비 높은 전송 용량과 높은 에너지 효율을 가진 기술들을 요구한다. 그중 하나가 인덱스 변조 (index modulation, IM)로, 이는 통신 자원의 활성 (on)-비활성 (off) 상태에 따라 추가적인 정보 비트를 전송할 수 있는 기술이다. 전송 용량 증대를 위해 단일 통신 자원의 인덱스 변조를 확장하여 두 개 이상의 다른 통신 자원을 활용한 다중 인덱스 (multi IM, MIM)의 중요성이 커지고 있다 [1].

궤도 각운동량 (orbital angular momentum, OAM)은 나선형 위상을 가지는 빔 형태로, line-of-sight (LoS) 환경에 강인하여 mmWave와 테라 헤르츠의 주파수 대역을 위한 통신 기술로 주목받고 있다. 나선형 위상의 회전수에 따라 서로 직교한 빔인 OAM 모드(mode)를 생성할 수 있으며, 각 모드마다 다중 신호를 동시에 전송하는 다중화 기술로 주파수 효율을 향상시킨다 [2]. 하지만 OAM 기술은 non-LoS (NLoS) 환경과 안테나의 오정렬 상태 등에 따른 성능 저하를 해결해야 하는 과제를 가진다.

재구성 가능한 지능형 표면 (reconfigurable intelligent surface, RIS)은 전파 특성을 이용한 반사 표면을 통해 신호의 방향성을 변경할 수 있는 장점을 가진 6G의 주요 후보 기술이다. RIS는 송수신기 사이의 장애물이 있는 환경을 해결할 수 있어 OAM과 같은 기술들과 통합하여 NLoS 환경에 따른 성능 저하를 개선할 수 있다 [3].

본 논문에서는 주파수 효율 증대를 위해 다중 인덱스 변조 기반 RIS-OAM 시스템 (MIM-RIS-OAM)을 제안하고 성능 분석을 하고자 한다. OAM-IM은 생성 가능한 전체 OAM 모드 중 일부 모드 조합의 활성화 상태를 인덱스 정보로 이용하는 기술이다 [4]. RIS-IM은 RIS를 이루는 반사 소자(reflect element)를 그룹으로 나누어 그룹의 활성화 상태를 인덱스 정보로 이용한 기술이다 [5]. 두 개의 기술을 결합한 방식을 제안하고, RIS-OAM-MIM의 채널 모델을 제시하고, 모의실험을 통한 성능 비교를 수행하고자 한다.

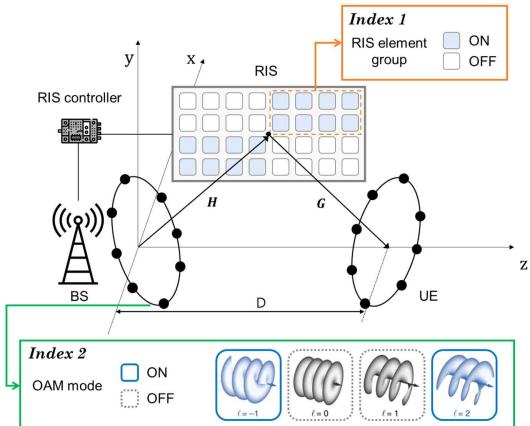


그림 1 다중 인덱스 변조 기반 RIS-OAM 시스템

II. 시스템 모델

그림 1은 제안하는 다중 인덱스 변조 기반 RIS-OAM 시스템을 나타낸다. 제안하는 시스템은 기지국 (base station, BS)에서 단말 (user equipment, UE)로 신호를 전송할 때, OAM 빔 생성 방식 중 UCA (uniform circular array) 안테나를 고려한다. 일반적으로 UCA 안테나에서 생성할 수 있는 OAM 모드의 수 L 는 안테나 소자의 개수 N 에 따라 결정되며, $|l| \leq N/2$ 를 따른다 [2]. 본 논문에서는 송수신 안테나 소자 개수를 N_t 과 N_r 으로 정의하고, 채널 용량 성능 최대화를 위해 $N = N_t = N_r$ 을 고려한다. 전체 OAM 모드의 수 L 중에 인덱스 변조를 통해 활성화시킬 OAM 모드의 수를 L_A 으로 가정한다. RIS에서는 전체 반사 소자의 수를 Q 라고 할 때, 이를 소자 그룹 K 개로 나눈다면 각 그룹은 P 개의 반사소자를 포함하도록 가정한다 ($Q = KP$). 전체 소자 그룹의 수 K 중에 인덱스 변조를 통해 활성화시킬 서브 그룹의 수는 K_A 로 가정한다. 따라서 RIS-OAM-MIM 시스템의 총 전송 가능한 비트의 수는 다음과 같다.

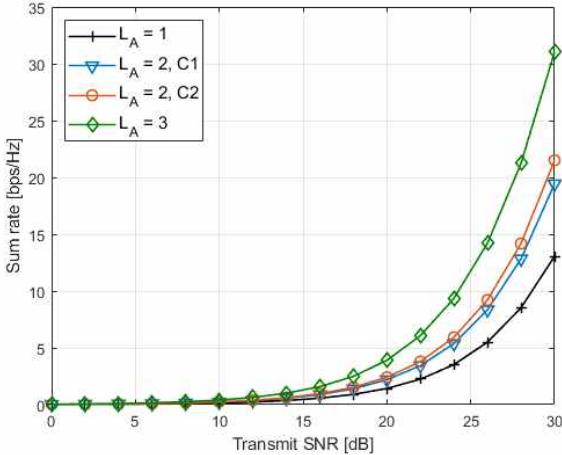


그림 2 시뮬레이션 결과

$$\eta = L_A \log_2 M + \lfloor \log_2(L, L_A) \rfloor + \lfloor \log_2(K, K_A) \rfloor, \quad (1)$$

여기서 M 은 변조 차수를 의미하고, (\cdot, \cdot) 는 이항 계수를 의미한다. RIS-OAM-MIM의 수신 신호 행렬 \mathbf{y} 는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{G}_k \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{i,k} \mathbf{x} + \mathbf{w}, \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{H}_{i,k}$ 는 i 번째 모드 조합을 활성화 시킨 BS와 k 번째 서브 그룹 조합의 RIS 간 채널 행렬, \mathbf{G}_k 는 k 번째 서브 그룹 조합의 RIS와 UE 간 채널 행렬, $\boldsymbol{\Theta}$ 는 반사계수를 의미한다. \mathbf{w} 는 AWGN 잡음을 의미한다. 채널 행렬은 참조 논문을 바탕으로 계산할 수 있다 [3-5]. RIS-OAM-MIM에서 채널 용량의 upper bound는 다음과 같이 표현 가능하다 [6].

$$R = \log_2 F + \frac{1}{F} \sum_{f=1}^F \log_2 \left(\left| \frac{1}{\sigma_f^2} \Psi_f \right| \right), \quad (3)$$

여기서 $F = 2^\eta$ 이고, $\Psi_f = \sigma_f^2 \mathbf{I}_N + \frac{1}{N} \mathbf{G}_k \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_{i,k} \mathbf{H}_{i,k}^H \boldsymbol{\Theta}^H \mathbf{G}_k^H$ 이며, σ_f^2 는 잡음 분산, \mathbf{I}_N 은 $N \times N$ 단위행렬을 의미한다.

III. 모의실험 결과

제안하는 시스템의 모의실험 결과는 그림 2와 같다. 전체 OAM 모드는 $L=4$, 활성 OAM 모드 수는 $L_A = 1, 2, 3$ 로 결과를 비교하였으며, 모드 조합 ζ_{L_A} 에서 $L_A = 2$ 인 경우는 모드 조합이 여러 가지가 나오며, 그중에 $\zeta_{2,c1} = \{(0,1), (0,2), (1,3), (2,3)\}$ 와 $\zeta_{2,c2} = \{(0,1), (0,2), (0,3), (1,2)\}$ 을 이용하였다. 심볼 변조 차수는 QAM($M=4$)을 이용하였다. RIS의 소자 수 $Q=256$ 과 두 개의 서브 그룹 $K=2$ 중 하나의 서브 그룹 $K_A=1$ 만 활성화시킨다고 가정한다. 다른 값들은 [2]의 실험 파라미터를 이용하여 고려하였다.

결과를 살펴보면 OAM 활성화된 모드 개수 L_A 가 많을수록 채널 용량이 증대됨을 확인하였으며, $L_A = 2$ 인 경우 모드 조합에 따라 성능이 다름을 확인하였다. 낮은 차수의 OAM 모드 위주로 구성된 C2 조합이 고르게 분포된 C1 조합보다 높은 채널 용량을 가진다.

IV. 결론

본 논문에서는 차세대 무선 통신에서 주파수 효율 증대를 위해 제안된 RIS-OAM 시스템에 MIM을 결합한 시스템 모델을 제안하였으며, 활성화된 모드 수에 따른 성능을 비교 분석하였다. 모드 수가 증가할수록 OAM의 다중화에 따른 전송 신호가 많아져 신호가 증대됨을 확인하였다. 또한, 같은 모드 수를 활성화시켜도 모드 조합에 따라 성능이 다름을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2022R1I1A1A01066178, 50%)과 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT 혁신인재4.0의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2025-RS-2022-00156394, 50%)

참고 문헌

- [1] Tusha, Seda Doğan, et al. "Multidimensional index modulation for 5G and beyond wireless networks." *Proceedings of the IEEE*, 109.2, 170-199, 2020
- [2] Edfors, Ove, and Anders J. Johansson. "Is orbital angular momentum (OAM) based radio communication an unexploited area?" *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 60.2, 1126-1131, 2011
- [3] Lee, Hye Yeong, and Soo Young Shin. "Reconfigurable intelligent surface assisted multi-user orbital angular momentum communications." *13th International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 1597-1600, 2022
- [4] Basar, Ertugrul, "Orbital angular momentum with index modulation." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17.3, 2029-2037, 2018
- [5] Asmoro, Krisma, and Soo Young Shin. "RIS grouping based index modulation for 6G telecommunications." *IEEE Wireless Communications Letters*, 11.11, 2410-2414, 2022
- [6] Lee, Hye Yeong, Man Hee Lee, and Soo Young Shin. "Phase Offset Aided Index Modulation for UCA-Based OAM Communication," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 154864-154876, 2024