

OAM-IM 시스템을 위한 저복잡도 검출기

이혜영, 이만희^o, 신수용*

금오공과대학교, 금오공과대학교 IT융복합공학과^o*

lhy413@kumoh.ac.kr, fordmore@kumoh.ac.kr^o, wdragon@kumoh.ac.kr*

Low Complexity Detector for OAM-IM System

Hye Yeong Lee, Man Hee Lee^o, Soo Young Shin*

Kumoh National Institute of Technology

요약

궤도 각운동량 (orbital angular momentum, OAM)의 주파수 효율 증대를 위해 인덱스 변조 기법 (index modulation, IM)을 이용한 OAM-IM 시스템이 제안되었다. OAM-IM 시스템은 OAM 모드의 활성화 상태에 따라 심볼의 성좌도 도메인 이외의 공간 도메인을 활용하여 추가적인 정보 비트를 전송할 수 있다. 본 논문에서는 OAM-IM 시스템의 저복잡도 검출기에 대해 제안하고, 기존 검출기와 성능을 비교하고자 한다.

I. 서론

궤도 각운동량 (orbital angular momentum, OAM)은 전파 방향의 나선형 위상을 이용하는 새로운 무선 전송 기술이다. 전파 위상에서 회전하는 수에 따라 빔은 서로 직교하게 생성할 수 있고, 이를 OAM 모드 (mode)라고 명명한다. 이에 따라 OAM 모드는 여러 직교 채널을 생성할 수 있고, 이러한 모드를 다중화하여 전송함으로써 주파수 효율을 증대시킨다 [1,2].

차세대 무선 통신에서 높은 주파수 효율을 달성하기 위해 또 다른 후보 기술로 인덱스 변조 (index modulation, IM)가 주목받고 있다. 인덱스 변조는 통신 자원을 활용하여 자원의 활성화/비활성 상태에 따라 기존 심볼의 성좌도 도메인 이외의 새로운 도메인을 활용하여 추가적인 정보 비트를 전송하는 기술이다. [3]에서는 OAM 모드의 활성화 상태를 이용한 OAM-IM 연구가 제안되었다. 제안하는 시스템은 안테나 활성화 상태를 활용한 공간 변조의 원리를 모방하였으며, 전체 생성할 수 있는 OAM 모드 중 활성화할 모드의 수의 조합에 따라 전송 가능한 비트 수를 도출하였다. 또한, 모드 당 다른 신호를 전송하는 다중화 방식을 활용하고, 수신기에서는 수신 신호와 수신 가능한 모든 경우의 수를 고려한 MLD (maximum likelihood detector)와 OAM 모드의 특성을 반영한 저복잡도를 가진 LLR (log likelihood ratio) 검출기를 제안하고 성능을 비교하였다.

본 논문에서는 OAM 모드 특성을 반영한 OAM-IM 시스템을 위한 저복잡도 검출기에 대해 제안한다. 제안하는 검출기는 공간 변조를 위해 제안되었던 채널과 수신 신호의 두 벡터 간 코사인 유사도를 활용한 SVD (signal vector based detector) 방식을 이용하였다 [4,5]. OAM-IM 시스템에서 SVD 방식은 OAM 모드 조합 별 채널과 수신 신호의 벡터를 이용하였다. 모의 실험을 통해 기존 MLD와 제안하는 SVD의 BER (bit error rate) 성능 평가를 수행하고자 한다.

II. 시스템 모델

일반적으로 UCA (uniform circular array) 안테나에서 생성 가능한 OAM 모드는 안테나 소자의 개수 N 에 따라 결정되며, $|l| \leq N/2$ 으로 고려된다. 따라서, 본 논문에서는 생성 가능한 전체 OAM 모드의 수를

$L = N$ 으로, 활성화시킬 OAM 모드는 L_A 으로 가정한다. 이때, OAM-IM을 통해 전송 가능한 신호는 다음과 같다.

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

여기서 M 은 변조의 차수를 의미하고, M -ary QAM quadrature amplitude modulation)을 사용하였다. (\cdot, \cdot) 는 binomial coefficient을 의미한다.

OAM-IM의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{h}_l \mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{h}_l (1 \leq l \leq L)$ 은 l 번째 모드에 대한 채널 벡터를 나타내며, OAM의 특성에 따라 free space 채널 모델을 활용한다 [2]. \mathbf{n} 은 AWGN 잡음을 고려하였다. 기존 MLD를 이용한 검출기는 다음과 같이 나타낸다.

$$[k_{ML}, m_{ML}] = \arg \min \| \mathbf{y} - \mathbf{h}_k \mathbf{x}_m \|^2_F, \quad (3)$$

여기서 $k \in \{1, \dots, L\}$, $m \in \{1, \dots, M\}$ 이다.

SVD를 활용한 인덱스 검출기는 모드 정보를 가지는 모든 채널 벡터 $\mathbf{h}_l (1 \leq l \leq L)$ 은 perfect CIS (channel information state)를 가정하고, 그 중 \mathbf{h}_k 는 활성화 모드의 인덱스를 식별한다 [4, 5]. 잡음을 고려하지 않은 간단한 수신 신호 벡터는 $\mathbf{y} = \mathbf{h}_l \mathbf{x}$ 로 채널 벡터와 심볼 벡터의 스칼라 곱으로 표현된다. 따라서 인덱스 검출을 위해 수신 신호 벡터 \mathbf{y} 와 동일한 방향의 채널 벡터를 찾으면 된다. 즉, 수신 신호 벡터 \mathbf{y} 와 가장 작은 끼인각을 갖는 채널 벡터의 인덱스가 활성화 모드 인덱스로 식별할 수 있다. SVD 기반 활성화 모드 검출은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$k_{SVD} = \arg \min \theta_l, l \in \{1, \dots, L\}, \quad (4)$$

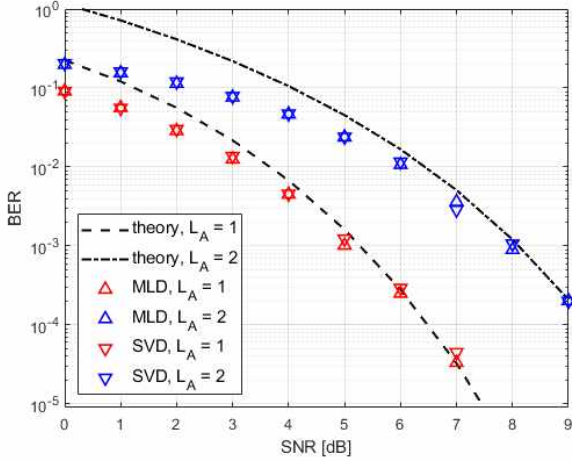


그림 1 모의 실험 결과

$$\theta(l) = \arccos \frac{\|\langle \mathbf{h}_l, \mathbf{y} \rangle\|_F}{\|\mathbf{h}_l\|_F \|\mathbf{y}\|_F}, \quad (5)$$

여기서 $\langle \cdot, \cdot \rangle$ 는 Hilbert space의 내적을 나타내고, $\|\cdot\|_F$ 는 Frobenius 노름을 의미한다. SVD를 이용해 k 번째 모드 조합이 활성화되었다고 검출하고, 성좌도의 심볼을 복호하기 위해 기존 QAM 복조기를 이용한다.

$$m_{SVD} = \operatorname{argmin} \|\mathbf{y} - \mathbf{h}_{k_{SVD}} \mathbf{x}_m\|_F^2, \quad (6)$$

III. 모의실험 결과

제안하는 시스템을 적용한 모의실험 결과는 그림 1과 같다. 전체 OAM mode는 $L = [0123]$ 로, 활성 OAM 모드는 $L_A = 1, 2$ 를 가정하였으며, 모드 조합은 $\zeta = \{(0), (1), (2), (3)\}$ 와 $\zeta = \{(0,1), (0,2), (1,3), (2,3)\}$ 을 이용하였다. 심볼 변조 차수는 $M=4$ 로 QAM을 이용하였다. 본 논문에서 제안하는 성능 비교를 위해 [3]의 MLD 검출기에 따른 이론적 BER bound 결과를 이용하였다. 결과를 살펴보면 제안하는 SVD는 기존 MLD와 유사한 BER 성능을 얻음을 확인하였다. 또한, 이론적 결과는 upper bound로 SNR이 커질수록 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 차세대 무선 통신에서 주파수 효율 증대를 위해 제안된 OAM-IM 시스템의 저복잡도 검출기에 대해 제안하였다. 저복잡도 검출기는 기존 공간 변조의 안테나 인덱스 검출 시 사용되었던 SVD 방식을 이용하였다. SVD 방식은 수신 신호 벡터와 인덱스 변조에 따른 모든 채널 벡터 사이의 가장 작은 끼인각을 찾아 인덱스를 식별할 수 있어 기존 MLD보다 낮은 복잡도로 유사한 BER 성능을 나타냄을 모의 실험을 통해 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2023년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. 2022R111A1A01066178)

참고 문헌

[1] 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 (2011): 1126-1131.

[2] R. Chen, H. Zhou, M. Moretti, X. Wang, and J. Li, "Orbital angular momentum waves: generation, detection, and emerging applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 22.2, (2019): 840-868.

[3] Basar, Ertugrul. "Orbital angular momentum with index modulation." *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 17.3 (2018): 2029-2037.

[4] Wang, Jintao, Shuyun Jia, and Jian Song. "Signal vector based detection scheme for spatial modulation." *IEEE Communications Letters*, 16.1 (2011): 19-21.

[5] Han, Rui, et al. "Variational inference based sparse signal detection for next generation multiple access." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 40.4 (2022): 1114-1127.