SVD 채널 병렬화를 활용한 홀로그래픽 OAM 통신 시스템의 BER 성능 분석

이영석, 정방철
충남대학교
yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

BER Performance Analysis of Holographic OAM Communication Systems Using SVD Channel Parallelization

Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 [2]에서 제안한 홀로그래픽 궤도각운동량(holographic orbital angular momentum: H-OAM) 통신 시스템의 통신 공학적 성능을 비트 당 오류율(bit-error rate: BER) 관점에서 평가하고 분석한다. 구체적으로, 본 논문에서는 특잇값 분해(singular value decomposition: SVD)를 통한 채널 병렬화를 도입하여 [2]에서 고안한 유효 자유도(effective degrees of freedom: eDoF)에 해당하는 고유 모드에 대한 BER 성능을 수학적으로 나타내고, 모의실험을 통해 H-OAM 통신 시스템이 종래의 배열안테나 기반 OAM 통신 시스템 대비 향상된 평균 BER 성능을 보이는 것을 검증한다.

Ⅰ. 서 론

차세대 다중안테나 시스템으로 활용될 것으로 예상되는 홀로그래픽 다중안테나(holographic multiple-input multiple-output: H-MIMO) 시스템은 메타물질을 활용한 연속 개구면 송수신 안테나를 가정하여, 높은 공간 다중화 성능을 보일 것으로 크게 주목받고 있다 [1]. 이와 관련하여, 최근 [2]에서는 메타물질 기반 홀로그래픽 궤도각운동량(holographic orbital angular momentum: H-OAM) 통신 시스템을 제안하고, 전자기적 무선 채널과 정보 이론적 성능을 유도하였다. 구체적으로 [2]에선 전자기적 채널 유도를 통해 모드 간 간섭을 확인하였으며, 실제적인 통신 환경을 고려하여 유의미한 OAM 모드를 계수할 수 있는 유효 자유도(effective degrees of freedom: eDoF)를 고안하였다. 따라서, 본 논문에서는 [2]에서 제안한 H-OAM 시스템에서 eDoF에 대응되는 등가 OAM 채널에 대한 통신 공학적 성능을 평균 비트 당 오류율(bit-error rate: BER) 관점에서 평가하고 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 종래의 균일 원형 배열안테나(uniform circular array-antenna: UCA) 기반 OAM 통신 시스템 대비 H-OAM 시스템의 BER 성능 향상을 검증한다.

Ⅱ. H-OAM 시스템 모델 및 BER 성능 분석

본 논문에서는 [2]의 그림 1과 동일한 시스템 모델을 고려한다. 이때 송수신하고자 하는 OAM 모드 수를 N으로 가정할 때 모드 분할 다중화(mode-division multiplexing: MDM) 기술을 도입하면 H-OAM 시스템은 다음과 같이 수신 신호 벡터 $\mathbf{y}(\in\mathbb{C}^N)$로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}=\mathbf{H}\mathbf{x}+\mathbf{w},$$

여기서 $\mathbf{H}(\in\mathbb{C}^{N\times N})$는 모드 영역에서 정의된 H-OAM 시스템의 전자기적 무선 채널 행렬을 나타내며 각 원소는 [2]와 같다. 또한, $\mathbf{x}(\in\mathbb{C}^N)$와 $\mathbf{w}(\in\mathbb{C}^N)$는 각각 모드 영역에서의 송신 신호 벡터와 부가 잡음 벡터를 나타내며, 본 논문에서 모든 잡음 성분은 각각 독립이고 동일한 $\mathcal{CN}(0,\sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정하였다. [2]에서 y편파로 송신한 OAM 전파는 원형 편파(circular polarization: CP)로 인해 모드 간 간섭이 존재하는 것으로 알려져 있다. 본 논문에서는 H-OAM 시스템의 통신 성능 향상을 위해 특잇값 분해(singular value decomposition: SVD)를 이용한 채널 병렬화를 도입한다. 따라서, H-OAM 시스템의 수신 신호는 다음과 같이 $i(\in\{1,\cdots,N\})$째 고유 모드(eigenmode)에 대한 신호 y_i로 나타낼 수 있다.

$$y_i=\lambda_i x_i+w_i,\quad \forall i,$$

여기서 λ_i는 $\mathbf{H}$의 i째 특잇값을 나타낸다.

따라서, 이진 위상 천이(binary phase shift keying: BPSK) 변조를 가정할 때 H-OAM 시스템에서 i째 고유 모드에 대한 수신 신호의 BER 성능은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_b^i=\mathrm{Q}\left(\sqrt{\frac{2\lambda_i^2P_n}{\sigma^2}}\right),$$

여기서 $\mathrm{Q}(\cdot)$는 Q-함수를 나타내며, P_n은 모드 당 송신 전력을 나타낸다. [2]에서 고안한 eDoF를 도입할 경우, 고유 모드에 대한 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR)가 특정 임계 이상인 고유 모드 수 N_{eff}에 대해 다음과 같이 평균 BER 성능을 도출할 수 있다.

$$P_b^{\text{eff}}=\frac{1}{N_{\text{eff}}}\sum_{i=1}^{N_{\text{eff}}}P_b^i.$$

Ⅲ. 모의실험 결과 및 결론

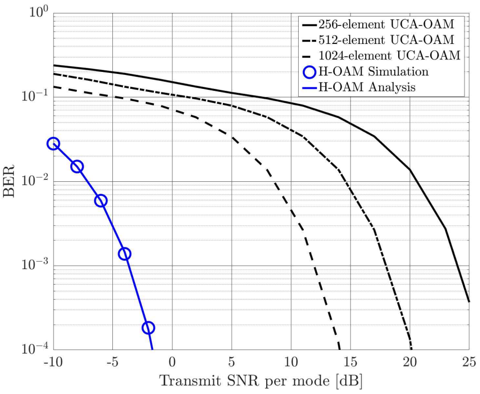

그림 1. H-OAM 시스템의 모드 당 송신 SNR 대비 BER 성능

그림 1은 BPSK 변조를 가정한 H-OAM 통신 시스템의 BER 성능을 모드 당 송신 SNR에 대해 도시한 결과이다. 본 모의실험은 $\{-5,\cdots,-1,0,1,\cdots,5\}$ OAM 모드를 전송할 때 eDoF에 해당하는 고유 모드를 통한 평균 BER 성능을 검증하였다. 이때, eDoF는 [2]에서 정의한 방식을 통해 7로 계산될 수 있으며 송수신기 간 거리는 500m로 고정하였다. 이외의 모든 모의실험 환경은 [2]와 동일하게 설정하였다. H-OAM 시스템은 종래의 UCA 기반 OAM 시스템보다 더 많은 eDoF를 확보할 수 있어 가장 우수한 BER 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 또한, 본 논문에서 분석한 H-OAM 시스템의 BER 성능 분석 결과가 실제 모의실험 결과와 정확히 일치하는 것을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원(2021-0-00486)과 한국연구재단(No. RS-2024-00420013)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] T. Gong *et al.*, “Holographic MIMO communications: Theoretical foundations, enabling technologies, and future directions,” *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 26, no. 1, pp. 196-257, 1st Quart. 2024.

[2] 이영석, 김영담, 정방철, “6G Holographic OAM 통신 시스템의 전자기 정보 이론적 해석,” *한국통신학회* 하계종합학술발표회, pp. 318-319, Jun. 2024.