

해상 네트워크 위치 기반 RSMA를 위한 Stackelberg 전력 할당

권슬현, 양시영, 강준혁

KAIST 전기및전자공학부

{seulhyun, siso1002}@kaist.ac.kr, jhkang@kaist.edu

Stackelberg Power Allocation for Location-Based RSMA in Maritime Networks

Seulhyun Kwon, Siyoung Yang, Joonhyuk Kang

Department of Electrical Engineering, KAIST

요약

해상통신은 장거리 전파 지연과 가시선(Line of sight, LoS)이 지배적인 채널 특성으로 인해 실시간 채널상태 정보(Channel state information at transmitter, CSIT) 확보가 어렵다. 본 논문은 이러한 제약 하에서 선박의 위치 정보만을 활용하여 rate-splitting multiple access (RSMA) 시스템의 전력 할당을 최적화하는 새로운 기법을 제안한다. 전력 할당 문제를 계층적 구조의 Stackelberg 게임으로 모델링하고, 리더와 팔로워가 순차적으로 해를 찾는 방식으로 복잡도를 크게 낮춘다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 실시간 CSIT 없이 저-중 SINR (Signal to interference plus noise ratio) 구간에서 full-CSIT를 가정한 WMMSE-RSMA 방식에 근접한 성능을 달성했으며, 가정한 채널 환경 모두에서 기존의 위치 기반 non-orthogonal multiple access (NOMA) 대비 뚜렷한 성능 우위를 보였다.

I. 서론

해상 통신 링크는 긴 왕복 지연시간과 LoS 지배 채널 특성으로 인해, 실시간 CSIT를 얻기 위한 피드백 오버헤드가 크고 정보의 적시성을 보장하기 어렵다. RSMA는 메시지를 공용 및 개인 스트림으로 분할하고 수신단에서 고정된 순서로 간섭을 제거하여, 불완전한 CSIT 환경에서도 강건한 성능을 발휘하는 기술로 주목받고 있다[1]. 한편, 선박자동식별장치 (AIS)로 수집되는 위치 정보를 활용하는 위치 기반 전송은 LoS 방향으로 빔을 정렬함으로써 피드백 없이도 높은 배열 이득을 얻는 실용적인 접근법이다.

위치 기반 MIMO-NOMA는 각도 및 거리 기반 사용자 페어링과 LoS-MRT 빔으로 충분한 거리 차이가 있을 때 유효한 성능을 보이나, 순간 CSIT 부재시 고정 SIC (Successive interference cancellation)만으로는 일관 성능을 얻기 어렵다[2]. 한편 Stackelberg 계층 최적화는 NOMA 전력 할당에서 낮은 복잡도와 저반복으로도 수렴함을 입증했다[3]. 위치 기반 전송은 실용적이지만 간섭 관리에 한계가 있고, RSMA는 간섭 관리에 강하나 복잡도가 높다는 단점이 있다. 따라서 본 논문은 위치 기반 전송의 실용성과 RSMA의 강건함을 결합하여 실시간 CSIT 확보가 어려운 해상 환경에서도 효율적으로 동작하는 저복잡도 전력 할당 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모델

해안 기지국 (Base station, BS)이 N_t 개의 안테나를 갖는 균일 선형 배열을 통해 k 척의 선박 사용자들에게 다운링크 서비스를 제공하며, 각 사용자는 AIS로 자신의 거리 및 방위각 정보를 BS에 보고한다. k 번째 사용자 채널 h_k 는 다음과 같은 Rician 페이딩 모델을 따른다고 가정한다.

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \bar{\mathbf{h}}_k + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \tilde{\mathbf{h}}_k, \bar{\mathbf{h}}_k = \sqrt{L(d_k)} \mathbf{a}(\theta_k)$$

$\bar{\mathbf{h}}_k$ 는 채널의 LoS 성분, $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 는 NLoS 성분, K 는 Rician K-factor, $\sqrt{L(d_k)}$ 는 거리 d_k 에 따른 경로 손실 항, $\mathbf{a}(\theta_k)$ 는 LOS 스티어링 벡터이다. 개인·공용 스트림을 각각 $s_{p,k}$, s_c 로 두고, 개인 빔 $\mathbf{w}_{p,k}$ 은 각 사용자의 LoS 방향으로, 공용 빔 \mathbf{w}_c 은 개인 빔들의 정규화된 합으로 구성한다. 총 송신 전력 P 는 개인·공용 스트림 전력 비율인 $\rho_{p,k}$ 와 ρ_c 으로 각각 분할되며, $\rho_c + \sum_k \rho_{p,k} = 1$ 의 전력 합 제약조건을 만족한다. 이 때 송신 신호 \mathbf{x} 는 다음과 같고, 이를 활용하여 개인·공용 스트림의 에르고딕 전송률 $R_{p,k}^{\text{erg}}$, R_c^{erg} 을 계산하여 성능 지표로 두었다.

$$\mathbf{x} = \sqrt{P\rho_c} \mathbf{w}_c s_c + \sum_k \sqrt{P\rho_{p,k}} \mathbf{w}_{p,k} s_{p,k}$$

III. 제안 방법

본 논문은 다음의 목적함수 형태로 표현되는 에르고딕 합 전송률을 최대화하는 것을 목표로 한다.

$$\max_{\rho_c, \rho_{p,k}} R_{\text{erg}}(\rho_c, \rho_{p,k}) \quad \text{s.t. } C1: \sum_k \rho_{p,k} = 1 - \rho_c, C2: \rho_{p,k} \geq 0$$

위 최적화 문제를 surrogate를 활용하여 convex 형태로 근사한 후, 리더와 팔로워가 순차적으로 행동하는 계층적 최적화 모델인 Stackelberg 게임 모델로 효율적으로 해를 찾는다. Stackelberg 모델에서 리더는 먼저 팔로워의 최적 반응을 예측하여 자신의 이익을 극대화하는 결정을 내리고, 팔로워는 그 결정 하에서 자신의 최적 결정을 찾는다. 본 논문은 이 구조를 이용해 복잡한 전력 할당 문제를 순차적인 문제로 단순화하여 효율적으로 해결한다.

외부 루프에서 리더는 전체 시스템의 합 전송률을 최대화하는 최적의 공용 전력 비율 ρ_c 에 대해 1차원 golden-section 탐색을 수행한다. 탐색 과정의 각 후보 ρ_c 에 대해 팔로워가 최적 반응했을 때의 합 전송률을 평가하

Parameter	Value
# of BS antennas	10
# of users	2
Distance range (m)	Uniform [0, 10]
Angle range (rad)	Uniform [0, 0.2]
Channel model	Rician channel
Path-loss exponent	2
Carrier frequency (GHz)	3
Wavelength (m)	0.1
Rician K-factor (dB) [4]	∞ (fig.1), 7 (fig.2)
Noise power	10^{-3}
SINR sweep (dB)	0:5:25
Monte-Carlo runs	1000
Follower tolerance	10^{-3}
Leader tolerance	10^{-3}
NOMA split coefficient	0.5

표 1. Simulation parameters

여 탐색 구간을 갱신한다. 내부 루프에서 팔로워는 리더에 의해 결정된 값 하에서 남아있는 전력 $1 - \rho_c$ 을 각 개인 스트림에 최적 분배하기 위해 라그랑주 듀얼 변수를 갱신한다. 이 두 단계는 사전에 정의된 허용 오차를 만족할 때까지 반복되어 최적 전력 분할값에 수렴한다.

이러한 계층적 접근은 복잡한 다변수 최적화 문제를 두 개의 단순한 문제로 분리하여 계산 복잡도를 크게 낮춘다. Full-CSIT WMMSE 방식은 외부 반복마다 $O(N_t^3)$ 복잡도를 유발하여, 안테나 수를 두 배로 늘리면 총 연산량이 여덟 배 증가하는 반면, 제안 기법은 일회성 $O(kN_t)$ 전처리 이후 가벼운 스칼라 갱신만 수행하므로, N_t 가 증가해도 반복당 연산량 증가가 작다. 따라서 원거리 통신 링크 확보를 위한 추가적인 송신 안테나 활용 시 복잡도 측면에서의 이점이 더욱 강조될 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안 기법의 성능을 검증하기 위해 표 1과 같은 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 비교대상은 (i) full-CSIT WMMSE-RSMA와 (ii) 위치 기반 NOMA이다. 그림 1과 2에서 볼 수 있듯이, 제안하는 Stackelberg-RSMA 기법은 LoS-only와 LoS-plus-scattering 채널 환경 모두에서 위치 기반 NOMA 대비 일관되게 우수한 성능을 달성했다. 이러한 성능 향상은 간섭을 유연하게 관리하는 RSMA의 근본적인 장점에서 비롯된다. 또한, 약 15dB까지의 저-중 SINR 영역에서는 실시간 CSIT를 사용하는 WMMSE-RSMA의 성능에 근접함을 확인하였다. 고 SINR 영역에서 성능 차이가 발생하는 것은, 제안 기법이 위치 기반의 고정 빔을 사용하는 반면 WMMSE는 순간 CSIT를 고려하여 빔을 미세 조정하기 때문이다.

V. 결론

본 논문은 실시간 CSIT 확보가 어려운 해상 통신 환경 RSMA 시스템에 적용 가능한 위치 정보 기반 저복잡도 Stackelberg 전력 분할 기법을 제안하였다. 제안 기법은 실시간 채널 정보 없이도 저-중 SINR 구간에서 우수한 성능을 보였으며, 연산 복잡도가 낮아 대규모 배열 안테나를 사용하는 해안 기지국에 실용적인 해법이 될 수 있음을 확인하였다. 향후 연구로는 다수 사용자 환경을 위한 동적 유저 페어링을 통한 실용성 확보 방안, 모빌리티 예측 기반 전력 할당 갱신을 고려할 수 있다.

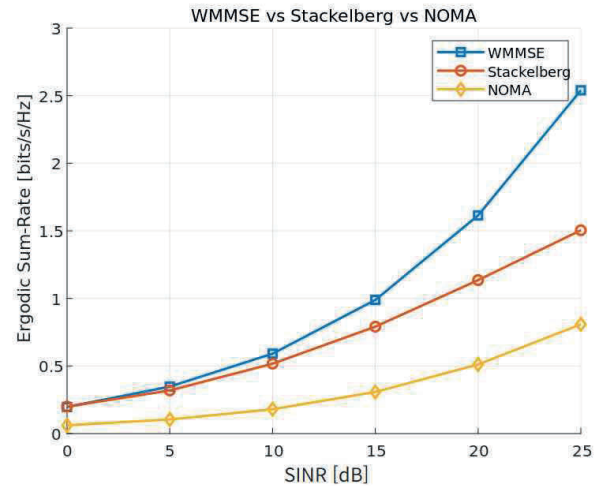


그림 1. LoS-only 채널 환경에서의 SINR 대비 에르고딕 합 전송률

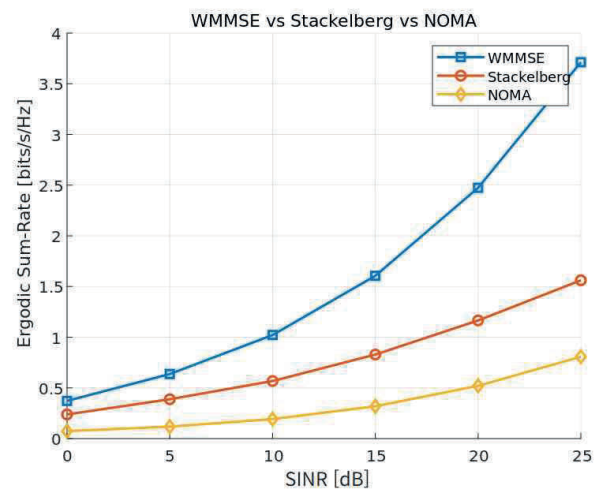


그림 2. LoS 및 산란 채널 환경에서의 SINR 대비 에르고딕 합 전송률

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201787).

참고 문헌

- [1] A. Mishra, Y. Mao, O. Dizdar, and B. Clerckx, "Rate-Splitting Multiple Access for 6G-Part I: Principles, applications and future works," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 10, pp. 2232 - 2236, Oct. 2022.
- [2] J. Wang, Y. Li, C. Ji, Q. Sun, S. Jin, and T. Q. S. Quek, "Location Based MIMO-NOMA: Multiple Access Regions and Low-Complexity User Pairing," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 68, no. 4, pp. 2293 - 2307, Apr. 2020.
- [3] D. Gao, Z. Liang, H. Zhang, O. A. Dobre, and G. K. Karagiannidis, "Stackelberg game-based energy efficient power allocation for heterogeneous NOMA networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Abu Dhabi, UAE, Dec. 2018, pp. 1 - 5.
- [4] C. Li, J. Yu, W. Chen, K. Wang, S. Wang, K. Yang, and X. Wu, "Measurement-based wireless channel analysis and modelling for ship ping environments," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 14, no. 6, pp. 812 - 820, 2020.