

전송률 병목을 완화하는 Flexible RSMA 기반 저궤도 위성 통합 유니-멀티캐스팅 기법

한상민, 이제용, 이병주[†], 신원재
고려대학교 전기전자공학부, 인천대학교 정보통신학과[†]

smhan22@korea.ac.kr, jaeyong712@korea.ac.kr, bjlee@inu.ac.kr[†], wjshin@korea.ac.kr

Flexible Rate-Splitting Multiple Access Framework for Joint Unicast-Multicast Transmission in LEO Systems

Sangmin Han, Jaeyong Lee, Byungju Lee[†], and Wonjae Shin
School of Electrical Engineering, Korea Univ.

Department of Information and Telecommunication Engineering, Incheon National Univ.[†]

요약

저궤도 위성통신시스템에서는 다양한 서비스 요구사항을 효율적으로 충족하기 위해 동일한 시간/주파수 자원을 활용하여 유니/멀티캐스팅 서비스를 동시에 제공하는 통합 유니/멀티캐스팅 전송 기법이 주목받고 있다. 또한, 저궤도 위성의 높은 이동성으로 인해 발생하는 부정확한 채널상태정보에 강인한 전송률 분할 디중첩속기술도 각광받고 있다. 하지만 두 기법은 각각 멀티캐스팅과 공통 스트림에 대해, 달성 가능한 전송률이 낮은 사용자에 의해 전송률이 제한된다는 공통된 한계점이 있다. 본 논문에서는 이러한 한계점을 극복하기 위해, 저궤도 위성통신시스템에서 일부 사용자들에게는 공통, 개인 스트림을 통해, 다른 사용자들에게는 개인 스트림만으로 유니/멀티캐스트 메시지를 전송하는 일반화된 전송률 분할 디중첩속기술 기반 유니/멀티캐스팅 동시 전송 기법을 제안한다.

I. 연구 배경 및 목적

동일한 주파수, 시간 자원을 활용하여 유니캐스트, 멀티캐스트 메시지를 동시에 전송하는 유니/멀티캐스팅 동시 전송 기법(Non-orthogonal unicast and multicast, NOUM)에서의 멀티캐스팅 전송과 전송률 분할 디중첩속기술(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA)에서의 공통 스트림 전송은 달성 가능한 전송률이 낮은 사용자에 의해 전송률 성능이 제한된다는 공통된 제약이 있다. 이 한계점은 넓은 커버리지를 제공하는 저궤도 위성통신시스템에서 RSMA 기반 유니/멀티캐스팅 동시 전송 기법을 적용하는 경우 더욱 심화된다 [1]. 본 논문에서는 저궤도 위성통신시스템에서 일부 사용자에게는 개별 스트림을 통해서만 유니/멀티캐스팅 동시 전송을 수행하여 달성 가능한 전송률의 한계점을 극복하는 RSMA 기반 유니/멀티캐스팅 동시 전송 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델 및 최적화 문제

저궤도 위성은 64개의 안테나로 구성된 uniform planar array (UPA)를 사용하여 반경 100 km 이내에 랜덤하게 위치한 K 명의 사용자에게 서비스를 제공한다. 이때, 각 사용자 별 부정확한 채널상태정보를 알고 있다고 가정하며, 부정확한 채널상태정보는 UPA 조향 벡터에 angle of departure (AOD) 오차를 포함하는 것으로 모델링한다. 각 사용자는 단일 안테나로 신호를 받으며, 0과 1로 구성된 $\alpha = [\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_K]^T$ 를 정의하여 $\alpha_k = 0$ 인 경우 k 번째 사용자는 순차적 간접제어를 통해 공통 스트림을 디코딩하고 이후 개인 스트림을 디코딩한다. 이 경우, 위성에서는 공통 메시지로 분할된 유니캐스트 메시지와 멀티캐스트 메시지를 합쳐 공통 스트림으로 인코딩하며, 개인 메시지로 분할된 유니캐스트 메시지는 개인 스트림으로 인코딩한다. 반대로, $\alpha_k = 1$ 인 경우 위성에서는 유니캐스트 멀티캐스트 메시지를 각 사용자 별 개인 스트림으로만 인코딩하며, 사용자는 공통 스트림은 간접으로 처리하고 개인 스트림만 디코딩한다. 이를 기반으로, 유니캐스트 전송률에 대한 max-min fairness 문제를 다음과 같이 설계한다.

$$P_1 : \underset{\mathbf{P}, \alpha, C_k^{uc}, C_k^{mc}}{\text{maximize}} \quad \min_k ((1 - \alpha_k)C_k^{uc} + R_{p,k}^{uc}) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \min_k (R_{c,k}) \geq \sum_{k \in \mathcal{K}} C_k^{uc} + C^{mc}, \quad (2)$$

$$(1 - \alpha_k)C^{mc} + \alpha_k R_{p,k}^{mc} \geq R_{\text{target}}^{mc}, \quad (3)$$

$$\text{Tr}(\mathbf{P}\mathbf{P}^H) \leq P_t. \quad (4)$$

이때, $\mathbf{P} = [\mathbf{p}_c, \mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_k, \dots, \mathbf{p}_K]$ 는 각각 공통, 개인 스트림 프리코딩 벡터인 \mathbf{p}_c 와 \mathbf{p}_k 로 구성된다. C_k^{uc} 와 C^{mc} 는 0 이상의 값으로, 각각 공통 스트림 내 k 번째 사용자에 대한 유니캐스트, 멀티캐스트 전송률, $R_{c,k}$ 는

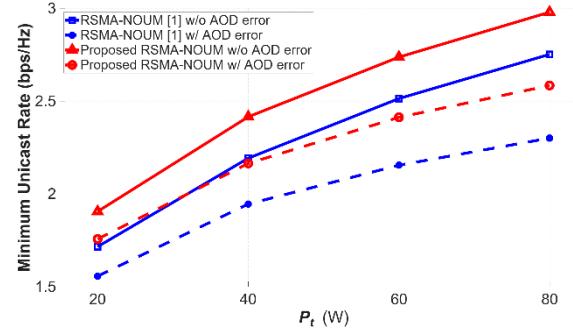


그림 1. AOD 오차 및 총 전력에 따른 유니캐스트 전송률 성능.

각 사용자가 달성 가능한 공통 스트림 전송률이다. 개인 스트림만 디코딩하는 사용자들에 대해 $R_{p,k}^{mc}$, $R_{p,k}^{uc}$ 는 각각 개인 스트림을 통한 유니캐스트, 멀티캐스트 전송률이며, R_{target}^{mc} 는 요구된 멀티캐스트 전송률, P_t 는 위성 내 총 전력이다. 설계된 문제를 풀이하기 위해 α 는 완전탐색을, 다른 최적화 변수에 대해서는 successive convex approximation을 기반으로 최적화를 수행하여 최적해를 도출한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

그림 1은 시뮬레이션 결과로, 성능 비교를 통해 모든 사용자가 공통 스트림을 디코딩하는 기법과 본 논문에서 제안한 기법을 비교한다 [1]. 또한, AOD 오차가 없는 경우, 그리고 AOD 오차가 있는 경우를 모두 비교하며, 오차가 있는 경우 최대 오차 값이 0.05인 균일한 확률 분포로 설정한다. R_{target}^{mc} 는 1 bps/Hz로 설정할 때, 시뮬레이션 수행 결과 유니/멀티캐스팅 동시 전송 환경에서 본 논문에서 제안한 전송률 분할 기법이 기존의 기법보다 더 나은 성능을 보임을 알 수 있으며, 추후에는 시변 통신 환경에서의 적응적 유니/멀티캐스팅 동시 전송 기법 연구가 필요할 것이다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원-대학ICT 연구센터(ITORC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (ITP-2026-RS-2024-00436887).

참고 문헌

- [1] J. Seong, et al., "Rate-Splitting for Joint Unicast and Multicast Transmission in LEO Satellite Networks with Non-Uniform Traffic Demand", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 43, no. 1, pp. 122-138, Jan. 2025.