

저궤도 위성 네트워크의 다중그룹 멀티캐스트 전송을 위한 강인한 전송률 분할 기반 프리코더 설계

조가연, 성재협, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

{gayeoncho, jaehyup, wjshin}@korea.ac.kr

RSMA-Enabled Robust Multigroup Multicast Transmission for LEO Satellite Networks: A Generalized Power Iteration Approach

Gayeon Cho, Jaehyup Seong, and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea University

요약

차세대 6G 네트워크의 핵심 인프라로 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 통신이 부상함에 따라, 위성의 제한된 주파수 및 시간 자원을 효율적으로 사용하여 위성의 광역 커버리지에 고품질의 데이터 서비스를 제공할 수 있는 다중그룹 멀티캐스트(Multigroup Multicast) 기술의 중요성이 증대되고 있다. 하지만, LEO 위성의 긴 전파 지연과 높은 이동성은 송신단에서의 정확한 채널 상태 정보(Channel State Information at Transmitter, CSIT) 획득을 어렵게 하며, 이는 네트워크 내 간섭 제어 성능을 저해하는 주요 요인이 된다. 본 논문에서는 위성 통신의 치명적인 성능 병목인 불완전한 CSIT 및 사용자 과부하 환경에서도 고품질의 데이터 서비스 제공을 보장하기 위해, 전송률 분할 다중 접속(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA) 기술 기반의 다중그룹 멀티캐스트 빔포밍 기법을 제안한다. 특히, 위성 탑재체의 제한된 연산 자원을 고려하여, 급변하는 채널 환경에서 실시간으로 최적의 빔포밍 벡터를 설계할 수 있는 Generalized Power Iteration (GPI) 기반의 저복잡도 고성능 최적화 알고리즘을 제안한다. 또한, 다양한 위성 통신 시나리오에 대한 시뮬레이션을 통해, 제안하는 기법이 기존 다중 접속 기법 대비 우수한 주파수 효율성 성능을 달성함을 검증한다.

I. 연구 배경 및 목적

저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 통신에서 동일한 콘텐츠를 다수의 사용자에게 전송하는 다중그룹 멀티캐스트(Multigroup Multicast) 전송 기술은 주파수 효율성을 극대화할 수 있는 방안으로 주목받고 있다. 하지만 LEO 위성은 지상망 대비 긴 전파 지연과 위성의 빠른 이동성으로 인해 송신단에서 완전한 채널 상태 정보(Channel State Information at Transmitter, CSIT)를 획득하는 데 어려움이 따른다. 이러한 CSIT 오차는 그룹 간 간섭 문제를 유발하지만, 기존의 공간 분할 다중접속(Spatial Division Multiple Access, SDMA)은 정확한 CSIT 및 송신단에서의 안테나가 사용자 수 보다 충분히 많을 때 효과적으로 작동하기 때문에, 저궤도 위성 통신환경에 적용되기에 한계가 있다 [1]. 본 논문에서는 이를 해결하기 위해 메시지를 공통(Common) 및 개별(Private) 메시지로 분할하여 전송함으로써 불완전한 CSIT 및 사용자 과부하 환경에서 강인한 성능을 가지는 전송률 분할 다중접속(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA) 기반의 다중그룹 멀티캐스트 기술을 제안한다. 또한, 급변하는 채널 환경에 실시간으로 대응하여 효과적인 빔포밍 벡터를 설계하기 위해, Generalized Power Iteration(GPI) 기반의 저복잡도 고성능 알고리즘을 개발하고, 시뮬레이션을 통해 그 우수한 성능을 검증한다.

II. 시스템 모델 및 최적화

본 논문에서는 N_t 개의 안테나를 가진 위성이 총 K 명의 단일 안테나 사용자를 M 개의 그룹으로 그룹화한 멀티캐스트 그룹을 서비스하는 상황을 고려한다. 각 사용자는 M 개의 멀티캐스트 그룹($1 \leq M \leq K$) 중 오직 하나의 그룹에만 속하며($g_i \cap g_j = \emptyset$), m 번째 멀티캐스트 그룹 g_m 에 속한 사용자들에 대해 대응되는 멀티캐스트 메시지는 W_m 이다. 또한, 멀티캐스트 그룹 간의 간섭을 효율적으로 관리하기 위해 RSMA를 적용하여, 위성은 각 그룹의 메시지 W_m 을 공통 부분 $W_{m,c}$ 과 개별 부분 $W_{m,p}$ 으로 분할하고, 모든 그룹의 공통 부분 $W_{1,c}, \dots, W_{M,c}$ 을 하나로 결합하여 네트워크 내 모든 사용자가 디코딩 가능하도록 공통 스트림 s_c 로 인코딩한다. 각 그룹의 개별

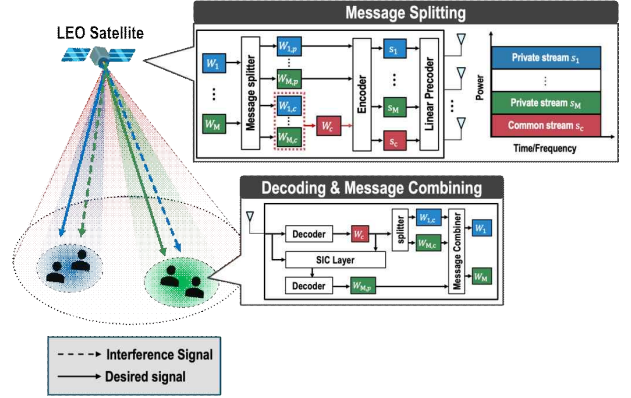


그림 1. 다중그룹 멀티캐스트 시스템 모델

부분 $W_{m,p}$ 은 해당 그룹에 속하는 사용자만이 디코딩 가능하도록 개별 스트림 s_m 으로 인코딩된다. 데이터 스트림은 공통 프리코딩 벡터 \mathbf{f}_c 와 m 번째 그룹의 개별 프리코딩 벡터 \mathbf{f}_m 로 구성된 선형 프리코딩 행렬을 통해 $\mathbf{x} = \mathbf{f}_c s_c + \sum_{m=1}^M \mathbf{f}_m s_m$ 와 같이 중첩되어 위성 채널 \mathbf{h}_k 을 통해 송신된다. 여기서, $\mathbf{s} = [s_c, s_1, \dots, s_M]^T$ 는 데이터 스트림 벡터이다. 즉, k 번째 사용자가 수신하는 신호 y_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_c s_c + \mathbf{h}_k^H \mathbf{p}_{\mu(k)} s_{\mu(k)} + \mathbf{h}_k^H \sum_{m=1, m \neq \mu(k)}^M \mathbf{p}_m s_m + n_k \quad (1)$$

이때, $\mu(k)$ 는 k 번째 사용자가 속한 그룹의 인덱스를 나타내며, n_k 는 $CN(0, \sigma_n^2)$ 의 확률 분포를 따르는 잡음을 나타낸다. 저궤도 위성이 높은 고도 및 빠른 이동속도로 인한 채널 피드백 오류로 인해 불완전한 채널상태정보를 알고 있는 상황을 고려하여, 채널 \mathbf{h}_k 를 $\mathbf{h}_k = \hat{\mathbf{h}}_k + \mathbf{e}_k$ 와 같이 모델링한다.

채널 추정 오차 벡터 \mathbf{e}_k 는 $CN(0, \sigma_{e,k}^2 \mathbf{I})$ 의 가우시안 분포를 따르며, 채널 추정 오차의 분산은 $\sigma_{e,k}^2 = \frac{N_t}{P\alpha}$ 으로 정의된다. $\alpha \in [0, 1]$ 은 CSIT 품질 지수를 나타내며, $\alpha = 1$ 은 완전한 CSIT 상황을 α 가 작을수록 불완전한 CSIT 상황을 의미한다 [1]. 신호 y_k 를 수신한 각 사용자는 모든 개별 스트림은 잡음으로 간주한 채, 먼저 공통 스트림 s_c 를 디코딩한다. 공통 스트림 s_c 를 디코딩한 후, 수신기에서는 순차적간섭제어(Successive Interference Cancellation, SIC)를 통해 수신 신호로부터 디코딩된 공통 스트림을 제거한다. 이후 k 번째 사용자는 다른 그룹의 개별 스트림에 의한 간섭을 잡음으로 처리하여, 자신이 속한 그룹의 개별 스트림 $s_{\mu(k)}$ 을 디코딩한다. 불완전한 CSIT 하에서 강인한 RSMA 프리코더를 설계하기 위해 평균 주파수 효율성 $E[R_{c,k}]$ 와 $E[R_{\mu(k),k}]$ 를 정의하고, generalized mutual information의 개념을 통해 하한을 정의한다. 본 논문의 목표는 저궤도 위성 환경에서 다중그룹 멀티캐스트 시스템의 총 주파수 효율성을 최대화하는 것이며, 이를 위한 최적화 문제는 다음과 같이 정식화된다.

$$P_1: \max_{\mathbf{f}_c, \mathbf{f}_1, \dots, \mathbf{f}_M} \left\{ \min_{k \in K} \bar{R}_{c,k} + \sum_{m=1}^M \min_{k \in g_m} \bar{R}_{\mu(k),k} \right\} \quad (2)$$

$$\text{s.t. } \|\mathbf{f}_c\|^2 + \sum_{m=1}^M \|\mathbf{f}_m\|^2 \leq 1. \quad (2a)$$

식 (2)는 시스템의 총 주파수 효율성을 최대화하기 위한 목적함수이며, 식 (2a)는 위성의 사용 가능한 총 송신 전력에 대한 제약 조건이다. 상기 최적화 문제 P_1 는 공통 메시지 및 개별 메시지의 주파수 효율성 식을 포함하고 있어 비볼록(non-convex)한 특성을 가진다. 또한, 주파수 효율성에 대해 최소 함수를 포함하고 있어 비평활(non-smooth)한 특성을 가지기 때문에 최적의 해를 찾기는 매우 어렵다. 이를 해결하기 위해, 프리코딩 벡터들을 하나의 고차원 벡터로 통합하여 주파수 효율성을 레일리 몫(Rayleigh Quotient) 형태로 표현할 수 있다. Rayleigh Quotient는 벡터의 크기(scale)에 영향을 받지 않는 특성으로 인해 프리코딩 벡터의 크기를 정규화해도 목적 함수의 값은 영향을 받지 않는다. 이와 함께 주파수 효율성에 대해 최소 함수로 인한 비평활(non-smooth)한 특성을 LogSumExp 기법을 적용하여 평활(smooth)한 형태로 근사화함으로써, P_1 의 최적화 문제는 제약 조건이 없는 비제약 문제로 재구성할 수 있다. 재구성된 문제에 대해 KKT 조건을 만족하는 해를 찾기 위해 목적함수의 1차 최적성 조건(First-order optimality condition)을 유도하면, 식 (3)과 같이 고유벡터에 의존적인 비선형 고유값 문제(Nonlinear Eigenvalue Problem, NEPv)로 해석 가능한 형태의 방정식을 도출할 수 있다.

$$\mathbf{B}_{\text{KKT}}^{-1}(\bar{\mathbf{f}}) \mathbf{A}_{\text{KKT}}(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{f}} = \lambda(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{f}}, \quad (3)$$

재구성된 문제의 최적해는 NEPv의 leading eigenvector를 찾는 것과 동치이므로 GPI 기반 알고리즘을 통해 반복적으로 프리코딩 벡터 $\bar{\mathbf{f}}$ 를 갱신함으로써 효율적으로 해를 찾을 수 있다 [2].

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 7개의 안테나를 가진 저궤도 위성이 단일 안테나를 가진 사용자 14명으로 구성된 7개의 다중그룹을 서비스하는 상황을 고려하였으며, ingle-feed-per-beam 구조를 가지는 채널 모델을 기반으로 시뮬레이션을 진행하였다 [2]. 그룹 당 사용자 수는 2명씩 균일하게 분포되어 있는 상황을 가정하였다. 그림 2를 통해 CSIT 품질 지수에 따른 사용자별 평균 주파수 효율성을 비교하였다. 신호 대 잡음 비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)는 30 dB로 설정하였다. 모든 CSIT 품질 지수에서 RSMA가 SDMA보다 우수한 주파수 효율성 성능을 보이며, α 가 감소할수록 불완전한 CSIT에서 RSMA의 간섭 관리를 통해 RSMA와 SDMA간의 성능 격차가 증가함을 보임을 확인하였다.

IV. 결론

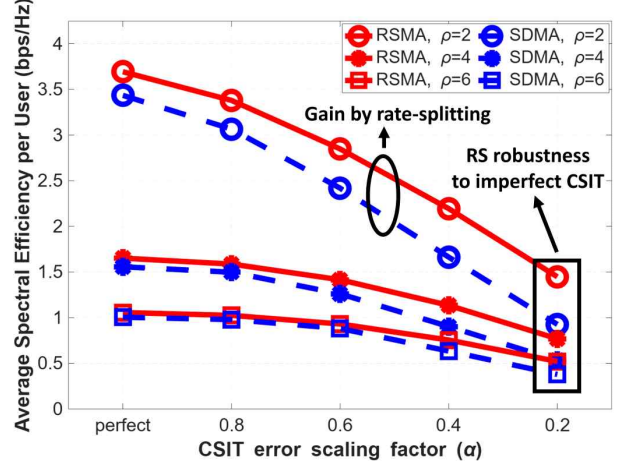


그림 2. CSIT 품질 지수 α 및 그룹 당 사용자 수 ρ 에 따른 사용자별 평균 주파수 효율성 비교

본 논문에서는 불완전한 CSIT 환경의 RSMA 기반 다중그룹 멀티캐스트 시스템에서 GPI 알고리즘을 통한 효율적인 빔포밍 설계 방안을 제시하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 RSMA 방식은 기존 SDMA 방식 대비 우수한 주파수 효율성 향상을 달성하였으며, 특히 CSIT 품질이 저하될수록 RSMA의 이점이 두드러졌다. 개발한 기술이 추후 급증하는 모바일 데이터 트래픽과 광범위한 연결성 수요에 대응하기 위한 핵심기술로서 활용될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-00562095)과 정보통신기획평가원(RS-2025-00436887)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] L. Yin *et al.*, "Rate-Splitting Multiple Access for Multigroup Multicast and Multibeam Satellite Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 69, no. 2, pp. 976-990, 2021.
- [2] J. Park *et al.*, "Rate-Splitting Multiple Access for Downlink MIMO: A Generalized Power Iteration Approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 1588-1603, 2023.