

다중 게이트웨이-저궤도 위성 시스템에서 피더링크 간 간섭 제어를 위한 전송률 분할 다중접속 기반 협력 전송 기법

성재협, 조가연, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

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

Cooperative Rate-Splitting Multiple Access for Robust Feeder-Link Interference Management in Multi-Gateway LEO Satellite Systems

Jaehyup Seong, Gayeon Cho, and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea University

요약

저궤도 위성 네트워크는 6세대 이동통신 시대의 핵심 인프라로 주목받고 있으며, 전 지구적 커버리지 제공과 더불어 낮은 지연 및 높은 데이터 처리량을 동시에 달성할 수 있는 유망한 기술로 평가받고 있다. 최근 모바일 데이터 트래픽의 급증으로 인해 서비스 링크의 전송률 향상이 중요한 과제로 부각되고 있으며, 이에 따라 백홀 링크인 피더링크의 전송률을 증가시키기 위한 방안으로 다중 게이트웨이를 활용한 협력 전송 구조가 활발히 연구되고 있다. 다중 게이트웨이 기반 피더링크에서는 각 게이트웨이가 고지향성 안테나를 통해 위성으로 데이터를 전송하지만, 저궤도 위성의 높은 고도로 인해 빔 간 분리가 제한되면서 심각한 게이트웨이 간 간섭이 발생한다. 본 논문에서는 다중 게이트웨이 환경에서 발생하는 게이트웨이 간 간섭 문제를 효과적으로 완화하기 위해 전송률 분할 다중접속 기반의 협력 전송 기법을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 다양한 다중 게이트웨이 환경에서 기존 전송 기법들 대비 피더링크 데이터 전송률을 대폭 향상시킬 수 있음을 확인한다.

I. 연구배경 및 목적

저궤도 위성 네트워크는 전 지구적 커버리지, 낮은 전송 지연, 그리고 높은 데이터 처리량을 동시에 제공할 수 있는 6세대 이동통신을 위한 핵심 통신 인프라로 주목받고 있다. 특히, 지상 이동통신망의 한계를 보완하고, 산간 지역 및 항공 해상 환경까지 안정적인 연결성을 제공하기 위한 수단으로 저궤도 위성 시스템이 역할이 점차 확대되고 있다. 한편, 모바일 서비스의 고도화로 인한 데이터 트래픽의 자속적인 증가로 인해 사용자 링크의 전송률 향상뿐만 아니라, 위성과 지상 네트워크를 연결하는 백홀 링크인 피더링크의 전송률을 증가시키는 것이 중요한 기술적 과제로 대두되고 있다. 이를 해결하기 위한 방안으로 다수의 지상 게이트웨이가 동일 위성으로 데이터를 전송하는 다중 게이트웨이 기반 협력 전송 구조가 고려되고 있으나, 이러한 구조에서는 저궤도 위성의 높은 고도로 인해 게이트웨이 간 빔 분리가 제한되며, 그 결과 심각한 피더링크 간섭이 발생하는 문제가 존재한다 [1]. 게이트웨이 간 주파수 및 시간 차원을 나누어 사용하는 직교 다중접속(Orthogonal Multiple Access, OMA) 기법은 이러한 간섭 환경에서 피더링크의 무선 자원을 효율적으로 활용하지 못하여 시스템 성능이 제한되는 한계를 기진다. 따라서, 다중 게이트웨이 피더링크 환경에서 간섭을 보다 유연하게 제어할 수 있는 새로운 전송 구조의 필요성이 제기된다. 이를 위해 본 논문에서는 전송률 분할 다중접속(Rate-Splitting Multiple Access, RSMA) 기술을 기반으로 한 다중 게이트웨이 협력 전송 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 메시지를 공통 메시지와 개인 메시지를 분리하여 전송함으로써 게이트웨이 간 간섭을 효과적으로 완화하고, 다양한 채널 조건에서 데이터 전송률을 대폭 향상시킬 수 있음을 보인다.

II. 시스템 모델 및 최적화 문제

본 논문에서는 그림 1과 같이, K 개의 게이트웨이가 N_t 개의 위상 배열 안테나로 구성된 uniform planner array (UPA)를 탑재한 저궤도 위성으로 데이터를 전송하는 상황을 고려한다. 저궤도 위성에는 K 개의 RF chain이 장착되어 있으며, 각 RF chain은 N_t/K 개의 안테나 요소로 구성된 하나의 subarray와 연결된 partially-connected 구조를 따른다. 이러한 구조에서 각 게이트웨이는 저궤도 위성의 서로 다른 subarray에 데이터를 전송하며, 빔 이득을 최대화하기 위해, 각 게이트웨이는 데이터를 전송하고자 하는 subarray의 중심 방향을 향해 송신 빔을 형성하며, subarray는 대응되는

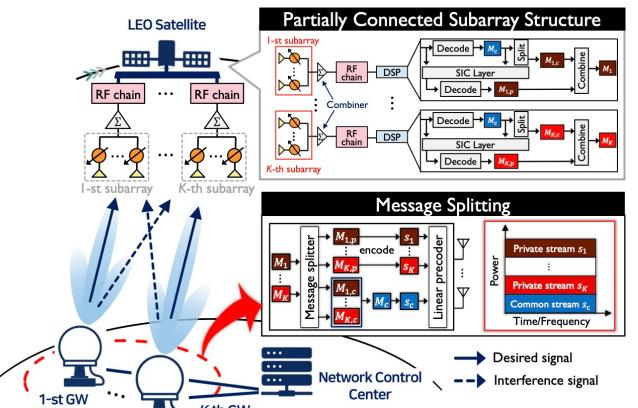


그림 1. 제안하는 전송률 분할 다중접속 기반 협력 전송 기법의 구조도.

게이트웨이와의 채널에 대해 수신 아날로그 빔포밍을 수행한다. 또한, 모든 게이트웨이는 network control center를 통해 상호 연결되어 있으며, 이를 통해 데이터 및 채널상태정보를 공유할 수 있는 협력 전송 환경을 고려한다.

다중 게이트웨이 환경에서 각 게이트웨이는 저궤도 위성에 전송할 메시지를 공통메시지와 개인메시지로 분할한다. 모든 게이트웨이의 공유메시지는 1개의 공통스트림 s_c 로 인코딩되며, 각 게이트웨이의 개인 메시지는 K 개의 개인스트림 s_1, \dots, s_K 로 인코딩된다. 이후, 공통프리코딩 벡터 \mathbf{p}_c 와 개인프리코딩 벡터 \mathbf{p}_k

를 이용하여 신호 $\mathbf{x} = \mathbf{p}_c s_c + \sum_{j=1}^K \mathbf{p}_j s_j \in \mathbb{C}^{K \times 1}$ 을 협력 전송한다. 저궤도 위성의 각 subarray에서 수신 아날로그 빔포밍을 수행하여 구성된 등가 채널은 $\mathbf{z}_k \in \mathbb{C}^{1 \times K}$ 로 정의되며, 그 결과 k 번째 subarray에서 수신된 신호 y_k 는 $y_k = \mathbf{z}_k \mathbf{x} + n_k, \forall k \in \{1, \dots, K\}$, 와 같이 구성된다. n_k 는 $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_{n,k}^2)$ 의 확률 분포를 띠는 잡음이다. 각 subarray는 먼저 공통스트림을 디코딩 한 후, 자신에게 해당하는 공유 메시지를 추출하고, 순차적 간섭제거 기법을 통해 수신 신호에서 공통스트림을 제거한다. 이후 개인스트림을 디코딩 한다. 이에 따라 k 번째 subarray에서의 공통 및 개인 스트림의 주파수 효율성은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$R_{c,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{z}_k \mathbf{p}_c|^2}{\sum_{j=1}^K |\mathbf{z}_k \mathbf{p}_j|^2 + \sigma_n^2} \right) \quad (1)$$

$$R_{p,k} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{z}_k \mathbf{p}_k|^2}{\sum_{j=1, j \neq k}^K |\mathbf{z}_k \mathbf{p}_j|^2 + \sigma_n^2} \right) \quad (2)$$

이를 바탕으로, 다중 게이트웨이 환경에서 피더링크의 합 주파수 효율성을 최대화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 공식화된다.

$$\begin{aligned} P_1 : & \underset{\mathbf{p}_c, \mathbf{p}_k, \dots, \mathbf{p}_k, \mathbf{c}}{\text{maximize}} \sum_{j=1}^K R_{p,j} + C_j \\ \text{s.t.} \quad & R_{c,k} \geq \sum_{j=1}^K C_j, \quad C_k \geq 0 \\ & \mathbf{p}_c^H \mathbf{D}_k \mathbf{p}_c + \sum_{j=1}^K \mathbf{p}_k^H \mathbf{D}_k \mathbf{p}_j \leq P_t. \end{aligned}$$

$\mathbf{c} = [C_1, \dots, C_K]^T$ 는 공통 주파수 효율성에서 각 subarray에 할당된 부분으로 구성된 벡터를 나타낸다. 첫 번째 제약조건은 모든 subarray가 공통스트림을 성공적으로 디코딩할 수 있도록 보장하기 위한 조건이며, 두 번째 제약조건은 subarray별 할당된 공통 주파수 효율성의 비음수성을 보장한다. 세 번째 제약조건은 게이트웨이별 송신 전력 제한을 나타내며, \mathbf{D}_k 는 k 번째 대각 원소만 1이고 나머지는 0인 행렬, P_t 는 각 게이트웨이에 할당된 최대 송신 전력이다. 이와 같이 정의된 최적화 문제 P_1 은 non-convex한 문제로써 이를 직접적으로 해결하는 것은 매우 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 semidefinite relaxation (SDR)을 통해 해당 문제를 convex한 문제로 근사한 후, 효율적인 알고리즘을 통해 해를 도출한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션을 위해 4개의 게이트웨이가 각각 1,024개의 안테나로 구성된 4개의 subarray에 데이터를 전송하는 다중 게이트웨이 피더링크 환경을 고려하였다. 각 게이트웨이는 Starlink 사의 게이트웨이 구조를 참고하여, 50.9 dBi의 안테나 이득을 갖는 직경 2.1 m의 parabolic dish 안테나를 사용하는 것으로 설정하였으며, 게이트웨이별 최대 송신 전력은 1 kW로 설정하였다 [2]. 저궤도 위성은 고도 600 km에 위치한 상황을 고려하였고, 모든 게이트웨이는 지상에 일정한 간격으로 배치되어 있는 것으로 가정하였다. 중심 주파수는 20 GHz의 Ka 대역을 사용하였다. 제안하는 기법의 성능을 평가하기 위해, 비교 기법으로는 공간 분할 다중접속(Spatial Division Multiple Access, SDMA) 기반 협력 전송 기법, 게이트웨이별로 주파수 자원을 분할하여 사용하는 협력 전송 기법(OMA), minimum mean square error (MMSE) 프리코더를 적용한 협력 전송 기법 [1], 그리고 게이트웨이 간 데이터 공유를 수행하지 않는 기법(No data sharing between gateways)을 고려한다.

먼저 그림 2에서는 인접 게이트웨이 간 거리 변화에 따른 게이트웨이 당 평균 주파수 효율성을 비교하였다. 이때, 저궤도 위성의 고도각(Elevation Angle)은 90도로 설정하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 기법은 게이트웨이 간 거리에 관계없이 모든 비교 기법 대비 우수한 주파수 효율성을 달성함을 확인할 수 있다. 특히, 인접 게이트웨이 간 거리가 감소할수록 성능 격차가 더욱 두드러지는데, 이는 가시선(LOS) 성분이 지배적인 피더링크 채널 환경에서 채널 간 상관도가 매우 높은 상황에서도, 제안 기법은 공통 메시지를 활용하여 간섭을 효과적으로 제어할 수 있기 때문이다. 또한, 그림 3에서는 저궤도 위성의 고도각 변화에 따른 성능을 비교하였다. 인접한 게이트웨이 간 거리는 600 m로 설정하였다. 제안하는 기법이 위성 고도각에 관계없이 안정적으로 우수한 성능을 유지함을 확인할 수 있으며, 특히 위성 고도각이 감소할수록 기존 기법들과의 성능 격차가 더욱 확대됨을 확인할 수 있다. 이는 위성 고도각이 낮아짐으로써 채널 간 상관도가 증가하는 상황에서도, 제안 기법은 공통 메시지를 통한 효과적인 간섭 제어가 가능함을 보여준다.

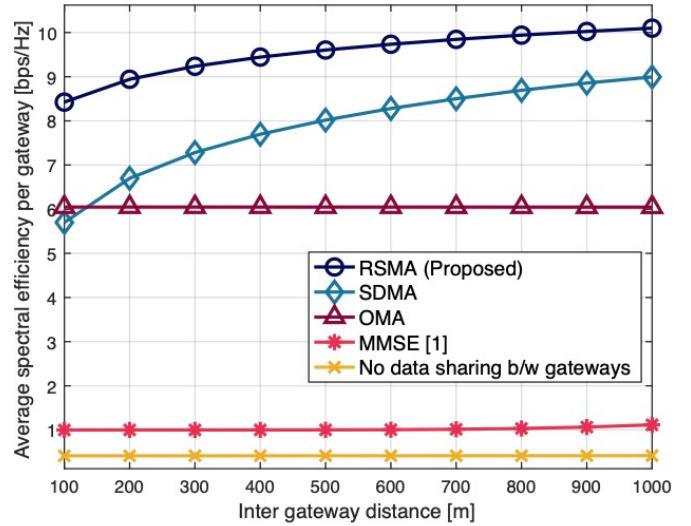


그림 2. 게이트웨이간 거리에 따른 게이트웨이 당 평균 주파수 효율성 비교.

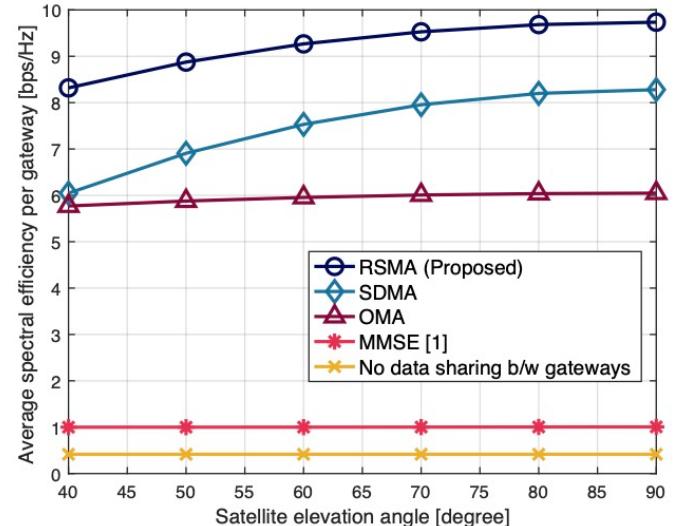


그림 3. 저궤도 위성 고도각에 따른 게이트웨이 당 평균 주파수 효율성 비교.

IV. 결론

본 논문에서는 다중 게이트웨이-저궤도 위성 시스템에서 강인한 게이트웨이 간 간섭 제어를 통해 피더링크 합 주파수 효율성을 최대화하기 위한 전송률 분할 다중접속 기반 협력 전송 기법을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 다양한 피더링크 환경에서 제안 기법이 기존 기법들 대비 피더링크 주파수 효율성을 대폭 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 추후, 제안하는 기법이 다중 게이트웨이 저궤도 위성 시스템에서 피더링크 전송률 극대화를 위한 핵심 기술로써 활용될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(RS-2025-00562095)과 정보통신기획평가원(RS-2025-00436887, RS-2024-00359235, and RS-2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] A. Guidotti, C. Sacchi and A. Vanelli-Coralli, "Feeder Link Precoding for Future Broadcasting Services," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 58, no. 4, pp. 3126-3146, 2022.
- [2] Speedcast, Starlink Community Gateway Brochure, March 2025. Available: https://www.speedcast.com/wp-content/uploads/2022/09/Speedcast_Starlink_Community_Gateway-Brochure.pdf