

다중 저궤도 위성 시스템의 합 전송률 최대화를 위한 협력 MIMO 빔포밍

조상원, 박석환
전북대학교

tkddnjs9803@jbnu.ac.kr, seokhwan@jbnu.ac.kr

Cooperative MIMO Beamforming for Sum-Rate Maximization in Multi-LEO Satellite System

Jo Sangwon, Park Seok-Hwan
Jeonbuk National Univ.

요약

본 논문은 다중 저궤도 위성 통신 시스템에서의 하향링크 전송을 고려한다. 위성 간 링크를 통해 위성들이 중첩된 커버리지 영역의 사용자 단말기를 공동으로 서비스하는 협력 전송을 가정하며, 순간 채널 상태 정보 획득의 한계를 극복하기 위해 통계적 채널 상태 정보를 활용한다. Ergodic 전송률 계산의 복잡성을 줄이기 위해 상한식을 도출하고, 합 전송률을 최대화하기 위한 weighted minimum mean squared error (WMMSE) 기반의 반복 최적화 알고리즘을 설계한다.

I. 서론

위성 통신 시스템은 광범위한 지역에 서비스를 제공할 수 있으며, 통신 인프라가 부족한 지역에서도 안정적인 연결을 제공함으로써 기존 지상파 무선 통신 네트워크를 보완하고 확장할 수 있다 [1]. 특히, 저궤도 위성은 낮은 전파 지연, 경로 손실, 배치 비용 등의 측면에서 정지궤도 위성에 비해 상당한 이점을 제공한다. 그러나 전파 지연 및 도플러 효과와 같은 채널 장애로 인해 순간 채널 상태 정보의 정확한 획득이 어렵다는 단점이 존재한다. 기존 연구의 대부분은 단일 위성 시스템에서의 통신을 가정하거나 [1], 다중 위성 시스템에서의 비협력 통신을 고려하였다 [2].

본 논문에서는 다중 저궤도 위성 통신시스템을 고려하며, 위성 간 링크(ISL: inter-satellite link)를 통해 위성 간 정보 교환이 가능하다고 가정하여 협력 기반의 하향링크 통신 시스템을 고려한다. 또한, 순간 채널 상태 정보 대신 통계적 채널 상태 정보를 활용하며, 이를 기반으로 ergodic 합 전송률을 최대화하기 위한 프리코딩 벡터 최적화 문제를 다룬다. 복잡한 ergodic 전송률의 샘플 평균 계산을 피하기 위해 상한식을 구해 최적화 문제를 재구성한다. 최적화 문제의 비 컨벡스 구조를 해결하기 위해 weighted minimum mean squared error (WMMSE) [3] 기반의 반복 최적화 알고리즘을 제안한다. 마지막으로, 제안 기법의 성능을 모의실험을 통해 순간 채널 상태 정보 기반 방식 및 비협력 통신 방식과 비교하여 성능을 확인한다.

II. 시스템 모델

각각 M 개의 안테나를 탑재한 S 개의 저궤도 위성이, 각각 N 개의 안테나를 가진 K 개의 UT에게 신호를 전송하는 하향링크 통신 환경을 고려한다. 위성들은 위성 간 링크(ISL: inter-satellite link)를 통해 정보를 상호

교환할 수 있으며, 서비스 영역이 중첩된 지역에 위치한 UT에게 협력적으로 신호를 전송 가능하다고 가정한다. 위성과 UT의 집합을 $\mathcal{S} = \{1, \dots, S\}$, $\mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 으로 각각 정의하며, 위성 s 에서 서비스하는 UT의 집합을 \mathcal{K}_s 로 정의한다. UT k 의 수신신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_k = \sum_{s \in \mathcal{S}} \mathbf{H}_{k,s} \mathbf{x}_s + \mathbf{z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x} + \mathbf{z}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}. \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{H}_{k,s} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 는 위성 s 와 UT k 간의 채널 행렬, $\mathbf{H}_k = [\mathbf{H}_{k,1} \dots \mathbf{H}_{k,S}] \in \mathbb{C}^{N \times MS}$ 는 전체 위성과 UT k 간의 채널 행렬, $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^H \dots \mathbf{x}_S^H]^T \in \mathbb{C}^{MS \times 1}$ 는 모든 위성의 송신 신호 벡터 그리고 $\mathbf{z}_k \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_z^2 \mathbf{I})$ 는 잡음 신호 벡터를 나타낸다.

채널 행렬 $\mathbf{H}_{k,s}$ 는 다음의 식으로 주어진다.

$$\mathbf{H}_{k,s} = \mathbf{d}_{k,s} \mathbf{g}_{k,s}^H = \sqrt{\frac{\beta_{k,s} \kappa_{k,s}}{\kappa_{k,s} + 1}} \mathbf{d}_{k,s,0} \mathbf{g}_{k,s}^H + \sqrt{\frac{\beta_{k,s}}{\kappa_{k,s} + 1}} \hat{\mathbf{d}}_{k,s} \mathbf{g}_{k,s}^H \quad (2)$$

$\mathbf{d}_{k,s} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, $\mathbf{g}_{k,s} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 각각 UT k 와 위성 s 에서의 안테나 배열 응답 벡터, $\beta_{k,s} = \mathbb{E}[\|\mathbf{d}_{k,s}\|^2]$ 는 평균 채널 전력, $\kappa_{k,s}$ 는 Rician factor, $\mathbf{d}_{k,s,0} \mathbf{g}_{k,s}^H$ 는 Line-of-Sight (LoS), $\hat{\mathbf{d}}_{k,s} \mathbf{g}_{k,s}^H$ 는 Non-Line-of-Sight (NLoS)이고, $\hat{\mathbf{d}}_{k,s}$ 는 $\hat{\mathbf{d}}_{k,s} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \Sigma_{k,s})$ 의 분포를 따른다. 각 위성은 통계적 채널 상태 정보 $\{\beta_{k,s}, \kappa_{k,s}, \mathbf{g}_{k,s}, \mathbf{d}_{k,s,0}, \Sigma_{k,s}\}$ 를 획득하고 ISL을 통해 다른 위성들과 공유한다. 전체 위성의 채널 행렬 \mathbf{H}_k 는 $\mathbf{H}_k = \mathbf{D}_k \mathbf{G}_k^H$ 으로 표현 가능하고, 여기서 $\mathbf{D}_k = [\mathbf{d}_{k,1} \dots \mathbf{d}_{k,S}] \in \mathbb{C}^{N \times S}$, $\mathbf{G}_k = \text{blkdiag}(\{\mathbf{g}_{k,s}\}_{s \in \mathcal{S}}) \in \mathbb{C}^{MS \times S}$ 이다.

위성은 데이터 신호 m_1, \dots, m_K 공유하여 다음과 같이 선형 프리코딩을 수행한다.

$$\mathbf{x}_s = \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbf{q}_{k,s} m_k \quad (3)$$

$\mathbf{q}_{k,s} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 위성 s 와 UT k 간의 프리코딩 벡터이다. 프리코딩 벡터는 다음의 전력 제한 조건을 만족해야 한다.

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} \text{tr}(\mathbf{E}_s^H \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \mathbf{E}_s) \leq P \quad (4)$$

$\mathbf{q}_k = [\mathbf{q}_{k,1}^H \dots \mathbf{q}_{k,S}^H]^H \in \mathbb{C}^{MS \times 1}$, P 는 각 위성의 송신 전력이며, $\mathbf{E}_s \in \mathbb{C}^{MS \times N}$ 는 $N(s-1)+1$ 행과 Ns 행 사이의 N 차 단위행렬, 나머지 부분은 0으로 채워진 행렬이다. UT k 의 ergodic 전송률 R_k 는 다음과 같이 주어진다.

$$R_k = \mathbb{E}_{\{\mathbf{d}_{k,s}\}_{s \in \mathcal{S}}} \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I} + (\mathbf{I} N_k(\mathbf{q}))^{-1} \mathbf{H}_k \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \mathbf{H}_k^H \right) \right] \quad (5)$$

$\mathbf{I} N_k(\mathbf{q}) = \sigma_z^2 \mathbf{I} + \sum_{l \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \mathbf{H}_k \mathbf{q}_l \mathbf{q}_l^H \mathbf{H}_k^H$ 이다.

III. 통계적 채널 상태 정보 기반의 최적화

Ergodic 합 전송률을 최대화하기 위해서 프리코딩 벡터 \mathbf{q}_k 를 최적화하는 문제는 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{q}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \mathbb{E}_{\{\mathbf{d}_{k,s}\}_{s \in \mathcal{S}}} \left[\log_2 \det \left(\mathbf{I} + (\mathbf{I} N_k(\mathbf{q}))^{-1} \mathbf{H}_k \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \mathbf{H}_k^H \right) \right] \quad (6a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k \in \mathcal{K}} \text{tr}(\mathbf{E}_s^H \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \mathbf{E}_s) \leq P, \quad (6b)$$

$$\mathbf{q}_{k,s} = \mathbf{0}, \text{ if } k \notin \mathcal{K}_s, s \in \mathcal{S}. \quad (6c)$$

제한 조건 (6c)는 각 위성 s 에서 서비스 가능한 UT들에게만 전력이 할당된다는 것을 의미한다.

Ergodic 전송률의 샘플 평균 계산이 복잡하기 때문에, 이를 해결하기 위해서 ergodic 전송률의 상한식을 도출하여 최적화 문제를 근사화 하는 것을 제안한다.

Jensen's inequality를 통해서 ergodic 전송률 (5)의 상한식은 다음과 같이 구해진다 [4].

$$\hat{R}_k = \log_2 \det \left(\mathbf{I} + (\mathbf{I} N_k^{\text{ub}}(\mathbf{q}))^{-1} \hat{\mathbf{H}}_k \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \hat{\mathbf{H}}_k^H \right) \quad (7)$$

통계적 채널 상태 정보 기반의 채널 행렬 $\hat{\mathbf{H}}_k$ 를 $\hat{\mathbf{H}}_k = (\mathbf{G}_k \hat{\mathbf{D}}_k \mathbf{G}_k^H)^{\frac{1}{2}}$ 로 정의하며, $\hat{\mathbf{D}}_k = \mathbb{E}[\mathbf{D}_k^H \mathbf{D}_k]$ 이고 $\mathbf{I} N_k^{\text{ub}}(\mathbf{q}) = \sigma_z^2 \mathbf{I} + \sum_{l \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \hat{\mathbf{H}}_k \mathbf{q}_l \mathbf{q}_l^H \hat{\mathbf{H}}_k^H$ 이다.

Ergodic 전송률의 상한식을 사용하여 합 전송률을 최대화하는 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{q}} \sum_{k \in \mathcal{K}} \log_2 \det \left(\mathbf{I} + (\mathbf{I} N_k^{\text{ub}}(\mathbf{q}))^{-1} \hat{\mathbf{H}}_k \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \hat{\mathbf{H}}_k^H \right) \quad (8a)$$

$$\text{s.t.} \sum_{k \in \mathcal{K}} \text{tr}(\mathbf{E}_s^H \mathbf{q}_k \mathbf{q}_k^H \mathbf{E}_s) \leq P, \quad (8b)$$

$$\mathbf{q}_{k,s} = \mathbf{0}, \text{ if } k \notin \mathcal{K}_s, s \in \mathcal{S}. \quad (8c)$$

상기 문제는 여전히 비 컨벡스 문제이지만, WMMSE 기반의 반복적 알고리즘 적용을 통해 부 최적해를 효율적으로 찾을 수 있다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

제안하는 방법(sCSI-based UB, Cooperative)의 성능을 확인하기 위해 ergodic 전송률 기반 방식(sCSI-based Ergodic, Cooperative)과 완벽한 순간 채널 상태 정보를 가정한 방식(Perfect iCSI, Cooperative)과 비교한다. 또한, 협력 통신과 비 협력 통신(Perfect iCSI, Non-cooperative)의 성능 차이를 비교한다.

600km 고도에 위치한 위성은 각각 최대 nadir 각도 30° 를 가지며, 서비스 영역이 서로 중첩되도록 배치되어 있다. UT 들은 각 위성의 서비스 영역에 하나 이상 포함되도록 무작위로 배치된다. 송신 전력 대비 합 전송률의 성능을 관찰하기 위해 $S=4$, $M=25$, $K=8$, $N=16$, $\kappa_{k,s}=10$ dB를 가정한다. 송신 전력은 0 dBW부터 30 dBW까지 변화시키며 성능을 관찰한다.

그림 1의 그래프는 전송 전력의 증가에 따른 평균 합 전송률의 변화를 보여준다. 통계적 채널 상태 정보를 기반으로 하는 기법들이 완벽한 순간 채널 상태 정보와 근사한 성능을 얻는 것을 관찰할 수 있으며, 비 협력 통신에 비해 큰 이득을 얻는 것을 관찰할 수 있다.

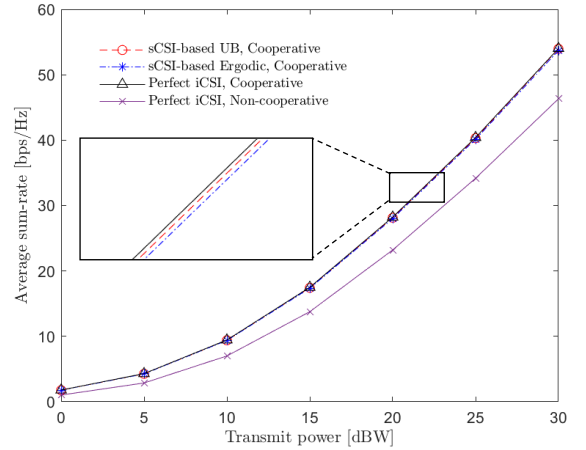


그림 1. 전송 전력 대비 합 전송률의 성능 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(교육부, 과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 (No. RS-2019-NR040079, RS-2023-00238977)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] L. You, K.-X. Li, W. Gao, X.-G. Xia and B. Ottersten, "Massive MIMO transmission for satellite communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 38, no. 8, pp. 1851-1865, Aug. 2020.
- [2] Z. Xiang, X. Gao, K.-X. Li and X.-G. Xia, "Massive MIMO downlink transmission for multiple LEO satellite communication," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 6, pp. 3352-3364, Jun. 2024.
- [3] S. S. Christensen, R. Agarwal, E. De Carvalho and J. M. Cioffi, "Weighted sum-rate maximization using weighted MMSE for MIMO-BC beamforming design," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 12, pp. 4792-4799, DEC. 2008.
- [4] C. Sun, X. Gao, M. Matthaiou, Z. Ding and C. Xiao, "Beam division multiple access transmission for massive MIMO communications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 63, no. 6, pp. 2170-2184, Jun. 2015.