

군집 저궤도 위성 네트워크에서 비가시선 채널과 위상 불확실성에 강인한 협력 빔포밍

박주하, 성재협*, 신원재
아주대학교 전자공학과, *아주대학교 AI 융합네트워크학과
{qkrwngk8471, *john12234, wjshin}@ajou.ac.kr

A Novel Robust Cooperative Beamforming for LEO Constellation Networks with NLOS Links and Channel Phase Uncertainty

Juha Park, *Jaehyup Seong, and Wonjae Shin
Department of Electrical and Computer Engineering, Ajou Univ.
*Department of AI Convergence Network, Ajou Univ.

요약

본 논문에서는 차세대 군집 저궤도 위성 네트워크를 위해 비가시선(Non-Line-Of-Sight, NLOS) 채널로 인한 극심한 신호 감쇠 영향과 위상 불확실성에 강인한 위성 간 링크(Inter Satellite Link, ISL) 기반 협력 위성 빔포밍 기법을 제안한다. 구체적으로, 위성들의 송신전력 총합을 최소화하는 문제를 설계하고, 이를 Semidefinite Relaxation (SDR) 기법을 이용하여 convex 문제로 완하시킨 후 최적의 빔포밍 벡터를 효율적으로 구한다. 이를 기반으로 제안하는 ISL 기반 협력 위성 빔포밍을 사용하는 경우가 송신전력의 총합과 Outage probability 측면에서 기존의 단일위성 빔포밍 기법보다 우수함을 확인한다.

I. 연구 배경 및 목적

최근 우크라이나에서 민간위성으로 전쟁에 의해 파괴된 통신망을 복구하여 저궤도 위성통신이 전 세계적인 관심을 받은 바 있다. 또한 Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) 등 높은 전송률을 요구하는 어플리케이션이 주목받음에 따라 차세대 위성 네트워크에서는 유연성 뿐 아니라 높은 전송률의 충족이 핵심 과제일 것으로 보인다. 이와 같이 높은 전송률 요구를 충족시키기 위해서는 Ka 밴드(18–40 GHz) 등 높은 주파수 대역의 사용이 불가피하며, 이때 신호의 높은 직진성으로 인해 Line-Of-Sight (LOS) 여부가 채널 상태에 큰 영향을 미친다. 이에 더불어 저궤도 위성통신의 특성 상 위성의 빠른 이동성과 왕복 지연 시간(Round Trip Time, RTT), 대기의 scintillation 등으로 인해 실제 채널과 추정된 채널 간 위상 오차가 발생한다. 본 논문에서는 Non-LOS (NLOS)에 의한 극심한 신호감쇠와 채널 위상 불확실성을 동시에 극복하기 위해 위성 간 링크(Inter Satellite Link, ISL) 기반 협력 위성 빔포밍 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델과 최적화 문제 설계

가. 시스템 모델

시스템 모델은 그림 1과 같이 ISL로 상호 연결된 N_s 개의 저궤도 위성들이 지상 N_u 명의 사용자에 다중 빔으로 협력 빔포밍을 수행하는 상황이며 높은 전송률을 위해 빔 간 동일한 주파수 자원을 공유한다고 가정한다. 이때 사용자 u 의 수신 신호 r_u 는 식 1과 같다. $u \in \{1, 2, \dots, N_u\}$, $s \in \{1, 2, \dots, N_s\}$ 는 각각 사용자, 위성의 인덱스이다.

$$r_u = \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{h}_u^s)^H \mathbf{w}_u^s s_u + \sum_{i \neq u} \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{h}_u^s)^H \mathbf{w}_i^s s_i + n_u, \quad (1)$$

$\mathbf{h}_u^s \in \mathbb{C}^{N_t}$ 는 위성 s 와 사용자 u 간의 채널이며 식 2와 같이 랜덤 벡터로 모델링한다. N_t 는 위성 당 안테나 개수이며 채널에는 자유공간손실, 채도잉(shadowing), 안테나 이득, 대기 감쇠뿐 아니라 고도각(elevation angle)에 따른 LOS 확률과 NLOS로 인한 클러터 손실(clutter loss)의 영향이 포함된다.

$$\mathbf{h}_u^s = \hat{\mathbf{h}}_u^s \odot \mathbf{q}_u^s, \quad (2)$$

$\hat{\mathbf{h}}_u^s$ 는 추정된 채널 벡터이며, $\mathbf{q}_u^s = e^{j\theta_u^s}$ 는 위상 불확실성을 나타내는 랜덤 벡터이다. 여기서 \odot 는 hadamard product를 의미하며 $\theta_u^s \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{sat}^2 \mathbf{I})$ 이다. 이때 σ_{sat} 은 실제 채널의 위상 불확실성이 아닌 위성 측에서 고려하는 위상의 불확실성의 표준편차로, 위성 측에서 임의의 값으로 설정할 수 있다. $\mathbf{w}_u^s \in \mathbb{C}^{N_t}$ 는 사용자 u 에 대한 위성 s 의 빔포밍 벡터이며 각 사용자에 대한 신호 s_u 는 독립적이고 $\mathbb{E}[|s_u|^2] = 1$ 이다. 노이즈는 $n_u \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ 를 따르는 Additive White Gaussian Noise(AWGN)을 가정한다.

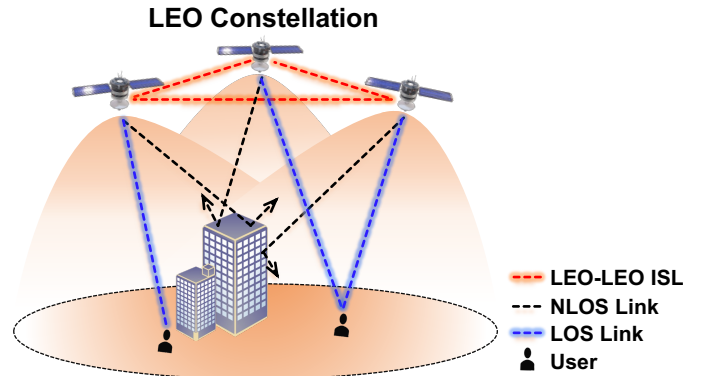


그림 1. ISL 기반 협력 위성 빔포밍 시스템 모델

나. 최적화 문제 설계

이와 같은 시스템 모델에서 문제 \mathcal{P}_1 과 같이 위성들의 송신전력 총합을 최소화하는 문제를 설계할 수 있다. 문제 \mathcal{P}_1 은 non-convex인 Quadratically Constrained Quadratic Programming (QCQP)이다. 식 4의 \mathbb{E}_{θ} 는 위상 불확실성 θ 에 대한 기댓값, 식 5의 $[\cdot]_{nn}$ 은 행렬의 n 번째 대각 원소를 의미한다. 이때 식 3은 목적함수가 위성들의 송신전력 총합임을 나타내며 식 4, 5는 각각 최소 Quality of Service (QoS) 조건, 안테나 당 전력 제한조건이다.

$$\mathcal{P}_1: \quad \underset{\mathbf{w}_u^s \in \mathbb{C}^{N_t}}{\text{minimize}} \quad \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{u=1}^{N_u} \|\mathbf{w}_u^s\|_2^2 \quad (3)$$

$$\text{subject to} \quad \frac{\mathbb{E}_{\theta} \left\{ \left| \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{w}_u^s)^H \mathbf{h}_u^s \right|^2 \right\}}{\mathbb{E}_{\theta} \left\{ \sum_{i \neq u} \left| \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{w}_i^s)^H \mathbf{h}_u^s \right|^2 + N_0 \right\}} \geq \gamma_u \quad (4)$$

$$\left[\sum_{u=1}^{N_u} \mathbf{w}_u^s (\mathbf{w}_u^s)^H \right]_{nn} \leq P_n^s \quad (5)$$

III. SDR 기반 최적화 및 시뮬레이션 결과 분석

가. SDR 기반 최적화

문제 \mathcal{P}_1 에서 수식의 간소화를 위해 $\mathbf{h}_u \triangleq \left[(\mathbf{h}_u^1)^T \dots (\mathbf{h}_u^{N_s})^T \right]^T = \hat{\mathbf{h}}_u \odot \mathbf{q}_u$, $\mathbf{w}_u \triangleq \left[(\mathbf{w}_u^1})^T \dots (\mathbf{w}_u^{N_s})^T \right]^T$ 로 정의한다. 이후 $\left| \sum_{s=1}^{N_s} (\mathbf{w}_u^s)^H \mathbf{h}_u^s \right|^2 = |(\mathbf{w}_u)^H \mathbf{h}_u|^2 = \text{Tr}(\mathbf{h}_u (\mathbf{h}_u)^H \mathbf{w}_u (\mathbf{w}_u)^H)$ 와 $\mathbf{h}_u (\mathbf{h}_u)^H = \hat{\mathbf{h}}_u (\hat{\mathbf{h}}_u)^H \odot \mathbf{q}_u (\mathbf{q}_u)^H$ 임을 이용해 $\mathbf{W}_u \triangleq \mathbf{w}_u (\mathbf{w}_u)^H$, $\hat{\mathbf{H}}_u \triangleq \hat{\mathbf{h}}_u (\hat{\mathbf{h}}_u)^H$, $\mathbf{Q}_u \triangleq \mathbf{q}_u (\mathbf{q}_u)^H$ 로 정의한다. 이는 기존 문

제 \mathcal{P}_1 에서 최적화 변수를 행렬로 바꾸고, 대각합(trace) 연산자의 선형성을 이용하여 목적함수와 제약조건을 각각 linear function, affine constraint 로 변환하기 위한 과정이다. 이때 \mathbf{W}_u 에 대해 convex 조건인 positive semidefinite 제약조건과 non-convex 조건인 rank - 1 제약조건이 발생한다. 이후에 $\mathbf{E}_0\{\mathbf{Q}_u\} \triangleq \mathbf{P}_u$ 로 정의하고 식 4에서 기댓값의 선형성을 이용하여 $\mathbf{E}_0\{\text{Tr}[(\hat{\mathbf{H}}_u \odot \mathbf{Q}_u)\mathbf{W}_u]\} = \text{Tr}[(\hat{\mathbf{H}}_u \odot \mathbf{E}_0\{\mathbf{Q}_u\})\mathbf{W}_u] = \text{Tr}[(\hat{\mathbf{H}}_u \odot \mathbf{P}_u)\mathbf{W}_u]$ 로 정리한다. 최종적으로 non-convex 조건인 rank - 1 제약조건을 무시하면 문제 \mathcal{P}_1 는 문제 \mathcal{P}_2 와 같이 행렬 \mathbf{W}_u 을 최적화 변수로 가지는 Semidefinite Programming (SDP) 문제로 완화(relaxation)된다.

\mathcal{P}_2 :

$$\underset{\mathbf{W}_u \in \mathbb{C}^{(N_t \times N_s) \times (N_t \times N_s)}}{\text{minimize}} \sum_{u=1}^{N_u} \text{Tr}(\mathbf{W}_u) \quad (6)$$

$$\text{subject to } \text{Tr}[(\hat{\mathbf{H}}_u \odot \mathbf{P}_u)(\mathbf{W}_u - \gamma_u \sum_{i \neq u} \mathbf{W}_i)] \geq \gamma_u N_0 \quad (7)$$

$$[\sum_{u=1}^{N_u} \mathbf{W}_u]_{nn} \leq P_n^s \quad (8)$$

$$\mathbf{W}_u \succeq \mathbf{0} \quad (9)$$

문제 \mathcal{P}_1 에서 \mathcal{P}_2 로의 변환과정에서 rank - 1 제약조건을 무시했으므로 문제 \mathcal{P}_2 의 해는 원래 문제인 \mathcal{P}_1 의 해와 상이하다. 따라서 문제 \mathcal{P}_2 의 해를 rank - 1 행렬로 근사하는 과정이 필요하며 이를 위해 $\lambda_{\max} \mathbf{v}\mathbf{v}^H$ 을 근사해로 택한다. λ_{\max} 와 \mathbf{v} 는 최대의 고유값(eigenvalue)과 이에 해당하는 고유벡터(eigenvector)를 의미한다. 이때 빔포밍 벡터는 $\sqrt{\lambda_{\max}} \mathbf{v}$ 가 되며 이 빔포밍 벡터의 성분을 N_t 개 씩 분할하여 각 위성에 분배한다.

나. MATLAB 모의 실험 결과 및 분석

MATLAB과 CVX tool을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안하는 협력 위성 빔포밍 기법($N_s = 5$)과 기존의 단일위성 빔포밍 기법($N_s = 1$)을 송신전력의 총합과 Outage probability 측면에서 비교 및 분석한다 [1]. 이때 실제 채널 위상 불확실성의 표준편차는 5° 로 그 통계적 특성이 알려져 있다고 가정하며, σ_{sat} 은 위성에서 고려하는 위상의 불확실성의 표준편차임에 유의한다.

그림 2는 QoS 제약조건(γ_u) 증가에 따른 송신전력 총합의 변화를 나타낸다. 이때 기존 단일위성 빔포밍 상황에서만 전력 제한 조건이 무시되었다. 이는 기존 기법의 경우 단 한 명의 사용자만 LOS가 확보되지 않더라도 전력 제한 조건 내에서 QoS 제약조건을 만족시키기 어려워, 문제 \mathcal{P}_2 의 해가 없을 확률이 높기 때문이다. 실험 결과 기존 기법과 제안하는 기법에서 40 dB 이상의 매우 큰 송신전력 차이가 발생한다. 이는 제안하는 기법에서 한 위성과 사용자 간 LOS가 확보가 되지 않더라도 다른 위성과 LOS가 확보될 수 있어 훨씬 낮은 전력으로 QoS 제약조건을 만족시킬 수 있기 때문이다. 또한, γ_u 가 22 dB 이상인 구간에서는 위성에서 고려하는 채널 불확실성 σ_{sat} 가 클수록 동일한 γ_u 에 대한 송신전력 총합이 증가하며, 이는 σ_{sat} 을 크게 설정할수록 QoS 제약조건(식 7)이 강해지는 효과가 있고 이 효과는 높은 γ_u 에서 더 크기 때문이다.

그림 3은 QoS 제약조건(γ_u) 증가에 따른 Outage probability 변화를 나타내며 기존 단일위성 상황에서도 전력 제한 조건을 고려함에 유의한다. 실험 결과 기존 기법은 낮은 QoS 조건에서도 95% 이상의 높은 Outage probability를 보였고, 따라서 LOS 확률을 고려했을 때 기존 방법을 이용한 서비스가 불가능함을 알 수 있다. 반면 제안하는 기법에서는 위성 측에서의 채널 위상 불확실성을 각각 $\sigma_{sat} = 0^\circ, 5^\circ$ 로 설정할 경우의 Outage probability는 각각 약 80%, 40%를 유지하다 100%로 수렴한다. 특히 $\sigma_{sat} = 10^\circ$, 즉 실제 채널의 위상 오차보다 크게 설정한 경우 γ_u 가 22 dB 이하인 구간에서 0%에 가까운 Outage probability를 달성한다. 이때 γ_u 가 높은 구간에서 Outage probability가 공통적으로 100%에 수렴하는 것은 전력 제한 조건 내에서 QoS 조건을 만족시킬 수 없어 문제 \mathcal{Q}_1 의 해가 없기 때문이다.

IV. 결론

광대역 위성 네트워크를 위한 빔포밍 기법은 기존에 다수 연구가 되었으나, NLOS에 따른 채널 악화를 고려하지 않아 위성과 사용자 간 직접 링크(direct link)에 적용하기는 어려움이 있다 [2]. 본 논문에서는 NLOS 링크에 의한 극심

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Parameter	Value
Altitude of LEO	500 Km
Downlink band	20 GHz
Path loss environment	Dense urban
Number of beams	7
Number of antennas per one LEO	
Satellite antenna max gain	30 dBi
User antenna max gain	14.6 dBi
3dB angle	4.4°
Per antenna power constraint (P_n^s)	22 dBW (When $N_s = 1$)
	15 dBW (When $N_s = 5$)
Standard deviation of channel phase error	5°

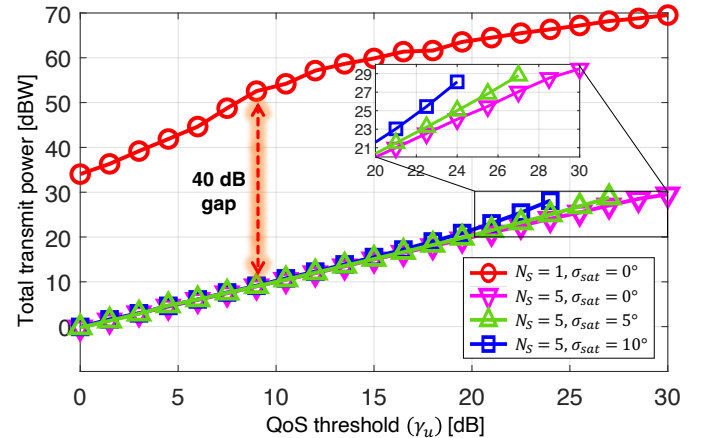


그림 2. QoS 제약조건과 위성측에서 고려하는 채널 위상 불확실성(σ_{sat})에 따른 기존 단일위성 빔포밍 기법과 제안하는 기법의 총 송신 전력 비교

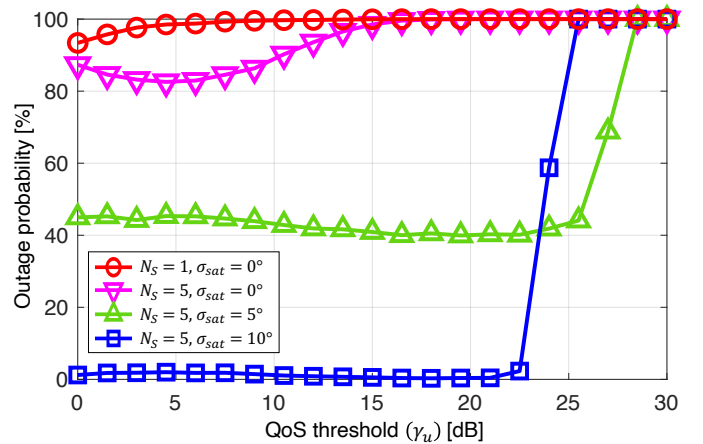


그림 3. QoS 제약조건과 위성측에서 고려하는 채널 위상 불확실성(σ_{sat})에 따른 기존 단일위성 빔포밍 기법과 제안하는 기법의 Outage probability 비교

한 경로손실과 채널 위상 불확실성을 동시에 극복하기 위한 ISL 기반의 협력 위성 빔포밍 기법을 제안했으며, 제안하는 기법이 기존의 방법에 비해 훨씬 낮은 송신전력만으로도 좋은 Outage probability의 달성이 가능함을 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2022R1A2C4002065, No.2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원(No.2018-0-01424)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고문헌

- [1] M. Grant and S. Boyd, CVX: *Matlab Software for Disciplined Convex Programming*, version 2.2. <http://cvxr.com/cvx>. 2020.
- [2] A. Gharanjik, "Transmission Optimization for High Throughput Satellite Systems," *Doctoral Thesis, Dept. Elect. Eng., KTH Royal Institute of Technology*, Stockholm, Sweden, 2016.