

# 저궤도 위성 ISAC 시스템을 위한 사용자-표적 위치 기반 적응형 빔포밍 설계

김해정, 박주하, 신원재

고려대학교 전기전자공학과

haejung, juha, wjshin@korea.ac.kr

## Geometry-Aware Adaptive Beamforming for LEO Satellite ISAC System

Haejung Kim, Juha Park, Wonjae Shin

Korea Univ.

### 요약

본 논문은 저궤도 위성 ISAC 시스템의 자기 간섭 해결을 위해 바이스테틱 구조를 도입하고, RSMA를 통해 레이더 SNR 보장 및 사용자 최소 전송률 최대화를 도모한다. 특히, 타겟과 사용자의 기하학적 관계를 기반으로 연산 복잡도를 획기적으로 낮춘 적응형 SROCR 빔포밍 기법을 제안하여, 기존 대비 낮은 복잡도로 동등한 성능을 달성함을 확인한다.

### I. 연구 배경 및 목적

6G 및 차세대 네트워크에서 저궤도(LEO, Leo Earth Orbit) 위성은 전 지구적 커버리지 확보를 위한 핵심 인프라로 부상하고 있으며, 한정된 주파수와 하드웨어 자원을 효율적으로 활용하기 위해 통신-센싱 통합시스템(ISAC, Integrated Sensing and Communication) 기술이 주목받고 있다. 그러나 위성 기반 ISAC 시스템은 극심한 경로 손실, 제한된 전력 및 같은 기술적 난제를 극복해야 한다. 특히 기존 지상망에서 주로 고려되는 모노스테틱(Monostatic) 구조는 송신 전력에 높은 위성 특성상 2-path 에코 신호 경로 손실 및 자기 간섭(Self-Interference) 제거가 현실적으로 매우 어려워 구현에 제약이 따른다. 이에 본 논문에서는 송신 위성상과 레이더 수신단이 분리된 바이스테틱(Bistatic) 구조를 채택하여 자기 간섭 문제를 원천적으로 배제하고, 업링크 통신과의 간섭을 완화한다.

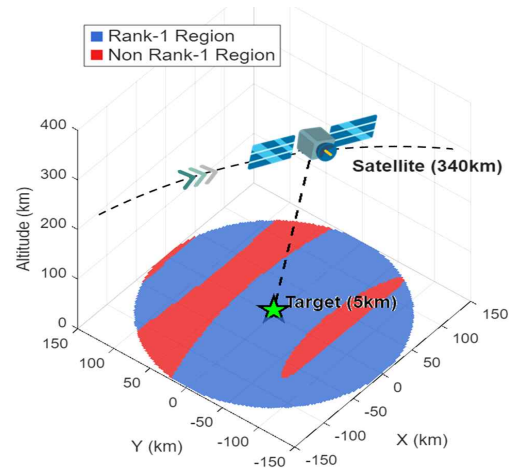


그림 2. 타겟-유저의 배치에 따른 랭크 예측

### II. 프리코더 최적화 기법 및 시뮬레이션 결과

시스템 모델은 그림 1과 같이 저궤도 위성이 통신 서비스와 동시에 레이더 타겟 추적을 수행하는 상황이다. 프리코더 최적화를 위해 레이더 SNR을 보장함과 동시에, 전송률 분할 다중접속(RSMA, Rate-Splitting Multiple Access) 기술을 활용하여 기능 간/내 간섭을 효율적으로 제어하

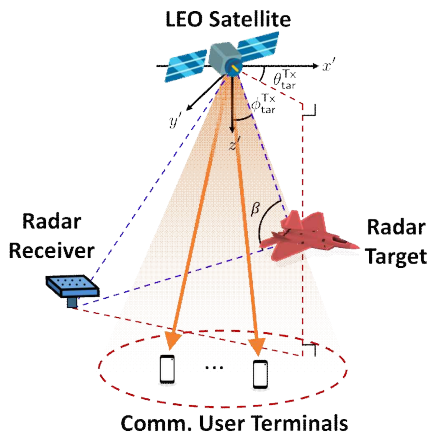


그림 1. 시스템 모델과 기하학적 상황

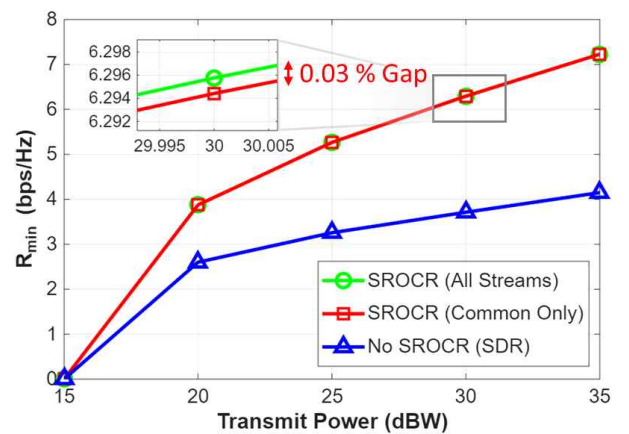


그림 3. SROCR 적용 범위에 따른 전송률 비교

고 최소 전송률을 최대화(Max-Min Fairness)하는 최적화 문제를 설계한다. 나아가, 위성 채널의 위상 상관도를 기반으로 연산 복잡도를 획기적으로 낮춘 적응형 SROCR(Sequential Rank-One Constraint Relaxation) 빔포밍 기법을 제안한다. 구체적으로, 기존 전통적인 SDR (Semidefinite Relaxation) 기반 빔포밍 기법은 rank-1 해의 도출 여부에 따라 성능의 편차가 극심하며 이는 통신 안정성을 저하시키는 치명적 요인이다. 이를

극복하기 위해 해를 rank-1 행렬로 강제하는 SROCR 기법을 적용하게 되면 연산 복잡도가 크게 증가하는 단점이 있다. 따라서 최적 해의 rank-1 여부를 미리 파악하고 적응적으로 알고리즘 복잡도를 제어하는 기술을 개발한다.

레이더 SNR을 보장하며 통신성능을 최대화하는 최소-전송률 최대화(Max-Min Fairness, MMF) 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$P_1 : \max_{\mathbf{P}, R_t, C_k} R_t \quad (1a)$$

$$\text{s.t. } E_{\Delta\theta, \Delta\phi} \left[ \frac{|\alpha|^2 \mathbf{a}^H \mathbf{P} \mathbf{P}^H \mathbf{a}}{\sigma_R^2} \right] \geq SNR_{th} \quad (1b)$$

$$R_k + C_k \geq R_t, \forall k \quad (1c)$$

$$R_{c,k} \geq \sum_{j=1}^K C_k, \forall k \quad (1d)$$

$$C_k \geq 0, \forall k \quad (1e)$$

위 문제는 비볼록(Non-convex) 전송률 수식을 포함하므로, 이를 해결하기 위해 1차 테일러 근사와 SDR(Semidefinite Relaxation) 기법을 적용하여 목적함수와 제약조건을 볼록(Convex) 형태로 변환한다. 이때, 완화된 해의 랭크(Rank) 특성을 이론적으로 규명하기 위해 라그랑주(Lagrangian) 함수를 도입한다.

$$\begin{aligned} L = & -R_t + \sum_k \lambda_{1,k} \left\{ R_t - \frac{1}{\ln 2} (e_k - f_k) - C_k \right\} \\ & + \sum_k \lambda_{2,k} \left\{ \sum_k C_k - \frac{1}{\ln 2} (c_k - d_k) \right\} \\ & + \sum_k \lambda_{3,k} \left\{ e^{e_k} - \sum_j \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_j] - \delta_{\text{SIC}} \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_j \mathbf{P}_R] \right\} \\ & + \sum_k \lambda_{4,k} \left\{ e^{c_k} - \sum_j \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_j) \mathbf{P}_j] - \delta_{\text{SIC}} \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_R] \right\} \\ & + \sum_k \lambda_{5,k} \left\{ \sum_{j \neq k} \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_j] + \delta_{\text{SIC}} \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_R] - e^{d_k^{[n-1]}} (f_k - f_k^{[n-1]} + 1) \right\} \\ & + \sum_k \lambda_{6,k} \left\{ \sum_j \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_j] + \delta_{\text{SIC}} \text{Tr}[(\mathbf{Q} \cdot \mathbf{A}_k) \mathbf{P}_R] - e^{d_k^{[n-1]}} (d_k - d_k^{[n-1]} + 1) \right\} \\ & + \sum_k \lambda_{7,k} C_k + \psi \gamma - \text{Tr}(\mathbf{A}_{\text{tar}} \sum_k \mathbf{P}_k) + \mu \text{Tr}(\sum_k \mathbf{P}_k) - \mathbf{P}_t - \sum_k \text{Tr}[\mathbf{Z}_j \mathbf{P}_j] \end{aligned} \quad (7)$$

KKT(Karush-Kuhn-Tucker) 조건의 상보적 여유성(Complementary Slackness)에 의해 최적해는 다음을 만족해야 한다.

$$\mathbf{Z}_j \mathbf{P}_j = 0 \quad (8)$$

위 식에 따르면 프리코더 행렬  $\mathbf{P}_j$ 의 열벡터는  $\mathbf{Z}_j$ 의 (Null Space)에 존재해야 하므로,  $\mathbf{P}_j$ 의 랭크는  $\mathbf{Z}_j$ 의 영공간 차원, 즉  $\mathbf{Z}_j$ 의 랭크에 의해 결정된다.

$$\text{rank}(\mathbf{P}) \leq N_t - \text{rank}(\mathbf{Z}) \quad (9)$$

그림 2는 사용자 위치에 따른 공통 메시지 프리코더의 최적 랭크 분포를 3차원 공간상에 도식화한 결과이다. 파란색으로 표시된 영역은 위성 안테나의 주엽(Main Lobe)이 형성되는 구간으로, 해당 위치에 사용자가 존재할 경우 타겟과 사용자 채널 간의 위상 정렬(Phase Alignment)이 양호하여 Rank-1 해가 도출된다. 반면, 빨간색으로 표시된 부엽(Side Lobe) 영역에서는 타겟 방향과 사용자 채널 간의 위상 불일치 또는 반전(Phase

Inversion)이 발생하여, 최적화된 공통 스트림이 Rank-2 이상의 값을 가짐을 알 수 있다. 따라서 공통 스트림의 랭크 특성은 단순히 사용자 수에 의존하는 것이 아니라, 위성-타겟-사용자 간의 기하학적 배치 및 안테나 빔 패턴의 특성에 따라 결정됨을 확인할 수 있다. 그림 4는 제안하는 빔포밍 최적화 기법의 유효성을 검증하기 위해, 모든 스트림에 SROCR를 적용한 경우와 제안하는 방식인 공통 스트림에만 SROCR를 적용한 경우의 성능을 최소 전송률을 지표로 비교한 결과이다. 기존 방식은 매 반복마다 K개의 프라이빗 스트림과 공통 스트림, 레이다 스트림에 대해 고유값 분해를 수행해야 하므로 연산 복잡도를 가진다. 여기서 는 SROCR 반복 횟수이다. 반면, 제안하는 기법은 오직 공통 스트림 하나에 대해서만 부분적으로 EVD를 수행하므로 복잡도들로 대폭 낮출 수 있으며, 이는 사용자 수 K의 증가에 영향을 받지 않는 확장성을 제공한다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 알고리즘은 모든 스트림에 SROCR를 적용하여 연산 부하가 큰 기존 방식과 비교했을 때 성능 열화 없이 최소 전송률로 수렴함을 확인할 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 저궤도 위성 기반 통신-레이다 통합 시스템을 위해 연산 효율성을 고려한 공통 스트림 기반의 저복잡도 SROCR 빔포밍 기법을 제안했다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 기법이 기존 방식 대비 현저히 낮은 연산 복잡도에도 동등한 수준의 최소 전송률을 달성함을 확인했다.

### ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2022R1A2C4002065, No.2021R1A4A1030775)과 정보통신기획평가원(No.2022-0-00704, No.2021-0-00260, No.2023-2018-0-01424)의 지원을 받아 수행된 연구임. ITRC 중견

### 참고 문헌

- [1] J. Park *et al.*, "A Bistatic ISAC Framework for LEO Satellite Systems: A Rate-Splitting Approach," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 61, no. 6, pp. 17282-17301, Dec. 2025