

상이한 ISAC 수요 매칭을 위한 셀프리 저궤도 위성 네트워크의 빔포밍-시공간 필터 공동 설계

김경수, 최지환

한국과학기술원 항공우주공학과

shtk125@kaist.ac.kr, jhch@kaist.ac.kr

Joint Beamforming and Space-Time Filter Design for Cell-Free LEO Satellite Networks with Uneven ISAC Demand Matching

Kyeongsoo Kim, Jihwan Choi
Dept. of Aerospace Eng., KAIST

요약

저궤도 (Low Earth orbit, LEO) 위성 시스템은 글로벌 유니쿼터스 통합 센싱 및 통신 (Integrated sensing and communication, ISAC) 서비스를 제공하기 위한 핵심 기술로 부상하고 있다. 그러나 LEO 위성 기반 ISAC 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 높은 이동성과 넓은 커버리지로 인해 발생하는 잦은 핸드오버와 상이한 ISAC 수요를 충분히 고려한 시스템 설계가 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 셀프리 LEO 위성 기반 ISAC 수요 매칭 프레임워크를 제안하며, 해당 프레임워크에서는 전송 빔포밍과 시공간 필터를 공동으로 최적화하여 ISAC 수요와 제공 가능한 성능 간의 차이를 최소화한다. 수치해석 시뮬레이션을 통해, 제안한 프레임워크가 상이한 ISAC 수요를 충족하는 데 있어 기존 전송 프레임워크보다 우수한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

I. 연구배경 및 목적

뉴 스페이스 시대에서, 저궤도(Low Earth orbit, LEO) 위성 통신은 6G 무선 네트워크에서 글로벌한 연결성을 실현하는 핵심 기술로 주목받고 있다 [1]. 자율주행과 같은 첨단 응용 분야에서는 높은 수준의 통신 성능과 정밀한 센싱 정확도를 동시에 요구하며, 이로 인해 두 기능 간의 주파수 자원 충돌이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 통합 센싱 및 통신(Integrated sensing and communication, ISAC)기술은 IMT-2030 에서 6G 시스템의 핵심 활용 시나리오로 채택되었으며, 이는 제한된 시간/주파수 자원 내에서 파형, 자원할당, 신호 처리의 공동 설계를 단일 하드웨어 플랫폼에서 가능하게 한다. 이러한 맥락에서, 지상 기반 ISAC 시스템에 비해 더 유연하고 전 지구적인 ISAC 서비스를 제공할 수 있는 LEO 위성 기반의 ISAC 시스템이 큰 관심을 받고 있다 [2]. 하지만 해당 시스템을 효과적으로 운용하기 위해서는 두 가지 핵심 과제를 고려해야 한다. 첫 번째는 시변하는 위성 링크로 인해 발생하는 잦은 핸드오버 문제로, 이는 전체적인 ISAC 성능의 심각한 저하를 초래할 수 있다. 두 번째는 LEO 위성의 넓은 커버리지로 인해 발생하는 상이한 ISAC 수요이며, 특히 전력 제약이 존재하는 LEO 위성 시스템에서는 이러한 수요의 이질성을 충분히 고려하지 않을 경우, 자원의 비효율적 분배와 낮은 ISAC 서비스 품질로 이어질 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 셀프리 LEO 위성 기반의 ISAC 수요 매칭 프레임워크를 제안한다. 제안된 프레임워크는 여러 LEO 위성이 협력적으로 ISAC 서비스를 제공하며, 위성 링크가 위성의 위치에 엄격하게 제한되지 않기 때문에 핸드오버로 인한 성능 저하를 완화할 수 있다. 또한, 강한 클러터 신호로부터 타겟 신호를 효과적으로 분리하기 위해 센싱 수신기에서 시공간 필터가 적용된다. 제안한 프레임워크는 상이한 ISAC 수요를 효과적으로 충족하기 위하여, 전송 빔포밍 벡터와 시공간 필터를 공동으로 최적화하며, 이를 통해 전력 제약이 존재하는 LEO 위성 시스템 내에서 ISAC 수요와 달성 가능한 성능 간의 차이를 최소화할 수 있다.

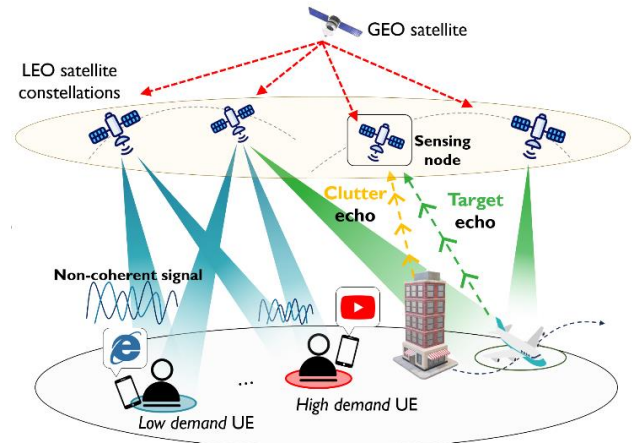


그림 1. 제안된 셀프리 저궤도 위성 ISAC 네트워크

II. 시스템 모델 및 최적화 문제

본 논문에서는 그림 1 과 같이 L 개의 LEO 위성이 ISAC 서비스를 협력적으로 제공하는 비동기 셀프리 시스템을 고려한다. 구체적으로 $L-1$ 개의 위성은 단일 안테나를 가진 K 명의 유저들과 하나의 이동 타겟에 ISAC 신호를 전송하며, 나머지 한 위성은 바이스태틱(bistatic) 모드로 에코 신호를 수신하여 자기 간섭을 방지한다. ISAC 신호를 전송하는 LEO 위성 집합은 $\mathcal{L} \triangleq \{1, \dots, L-1\}$ 로 나타내며, L 번째 위성은 센싱 신호를 수신한다. 유저 집합은 $\mathcal{K} \triangleq \{0, 1, \dots, K\}$ 로 표현되며, 여기서 유저 인덱스 0 은 이동 타겟을 나타낸다. 모든 위성은 $N_t = N_t^x \times N_t^y$ 유니폼 평면 배열 안테나를 가지며, N_t^x 와 N_t^y 는 각각 x 축 및 y 축 방향의 안테나 개수를 나타낸다. 또한 $Q \triangleq \{1, \dots, Q\}$ 로 정의되는 클러터 집합을 고려한다. 모든 LEO 위성은 벡터 링크를 통해 정지궤도 위성과의 연결되며, 이를 통해 중앙 신호 처리가 가능하다고 가정한다. m 번째 타임슬롯에서 l 번째 저궤도 위성은 신호 벡터 $\mathbf{x}_l[m] = \mathbf{W}_l \mathbf{s}_l[m]$ 를 송신하는데, $\mathbf{W}_l \triangleq [\mathbf{w}_{l,0}, \dots, \mathbf{w}_{l,K}]$ 는 ISAC 빔포밍 행렬이며, $\mathbf{s}_l[m] \triangleq [s_{l,0}[m], \dots, s_{l,K}[m]]$ 는

$\mathbb{E}\{\mathbf{s}_l[m]\mathbf{s}_l^H[m]\} = \delta_{l,l'}\mathbf{I}_{K+1}$ 를 만족하는 심볼 벡터이다. 유저는 평균 채널을 기반으로 순차적 간섭 제거를 통해 신호를 복호화 하며, 센싱 위성은 시공간 필터 \mathbf{f} 를 통해 에코 신호를 수신한다. 이때, 유저 k 와 센싱 타겟의 신호 대 간섭 및 잡음 비(Signal-to-interference-plus-noise ratio, SINR)은 각각

$$\gamma_k^{\text{NC}} \triangleq \frac{\sum_{l \in \mathcal{L}} v_{l,k} |\mathbf{a}_{l,k}^H \mathbf{w}_{l,k}|^2}{\sum_{l \in \mathcal{L}} \frac{\beta_{l,k}}{\kappa_{l,k}+1} |\mathbf{a}_{l,k}^H \mathbf{w}_{l,k}|^2 + \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{K} \setminus \{k\}} \beta_{l,k} |\mathbf{a}_{l,k}^H \mathbf{w}_{l,j}|^2 + \sigma_k^2}, \quad (1)$$

$$\gamma^{\text{Sen}} \triangleq \frac{|\mathbf{f}^H \sum_{l \in \mathcal{L}} \mathbf{G}_{l,0,L}^{\text{DTS}} \bar{\mathbf{S}}_l \mathbf{w}_l|^2}{|\mathbf{f}^H \sum_{l \in \mathcal{L}} \sum_{j \in \mathcal{Q}} \mathbf{G}_{l,j,L}^{\text{TS}} \bar{\mathbf{S}}_l \mathbf{w}_l|^2 + \sigma_{\text{Sen}}^2} \quad (2)$$

로 유도할 수 있으며, 식 (1)에서 $\mathbf{a}_{l,k}$ 는 배열 응답 벡터이며 $\beta_{l,k}$ 와 $\kappa_{l,k}$ 는 각각 large-scale 감쇄 계수와 라이시안 K-factor 를 의미한다. 계수 $v_{l,k}$ 는 $v_{l,k} \triangleq \frac{\beta_{l,k} \kappa_{l,k}}{\kappa_{l,k}+1}$ 로 정의된다.

식 (2)에서 $\mathbf{G}_{l,0,L}^{\text{DTS}}$ 와 $\mathbf{G}_{l,j,L}^{\text{TS}}$ 는 각각 도플러-시간 지연된 타겟 채널 행렬과 시간 지연된 클러스터 채널 행렬을 나타내며, [3]과 같이 모델링된다. $\bar{\mathbf{S}}_l \triangleq \bar{\mathbf{S}}_l^T \otimes \mathbf{I}_{N_t}$ 로 정의되며, 여기서 $\mathbf{S}_l \triangleq [\mathbf{s}_l[1], \dots, \mathbf{s}_l[M]]$ 는 전송 신호 행렬이며, $\mathbf{w}_l \triangleq \text{vec}(\mathbf{W}_l)$ 는 l 번째 위성의 전송 신호 벡터이다. 이 경우, 유저 k 의 주파수 효율은 다음과 같다.

$$R_k = \log_2(1 + \gamma_k^{\text{NC}}), \quad k = 1, \dots, K. \quad (3)$$

제안된 ISAC 수요 매칭 프레임워크는 전송 빔포밍과 시공간 필터의 공동 최적화를 통해 ISAC 수요와 달성 가능한 성능 간의 차이를 최소화하는 것을 목표로 한다. 전송 빔포밍 집합을 $\mathcal{S} \triangleq \{\mathbf{w}_{l,k}, \forall l \in \mathcal{L}, k \in \mathcal{K}\}$ 로 정의할 때, 목적함수는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$f_{\text{ISACDM}}(\mathcal{S}, \mathbf{f}) \triangleq \sum_{k=1}^K |D_k - R_k|^2 + |D_0 - \gamma^{\text{Sen}}|^2. \quad (4)$$

여기서 D_k 는 k 번째 유저의 통신 트래픽 수요를 의미하며, D_0 는 타겟 센싱 수요를 나타낸다. 이 때, ISAC 수요 매칭을 위한 최적화 문제는 다음과 같이 설계된다.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_0 : \min_{\mathcal{S}, \mathbf{f}} f_{\text{ISACDM}}(\mathcal{S}, \mathbf{f}) \\ \text{s.t. } \sum_{k \in \mathcal{K}} \|\mathbf{w}_{l,k}\|^2 \leq P, \quad l \in \mathcal{L}. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 제약 조건 (5)는 각 위성의 전력이 P 로 제한됨을 의미한다. 문제 \mathcal{P}_0 는 최적화 변수들이 서로 얽혀 있는 non-convex 문제로, 최적 해를 도출할 수 있는 일반적인 방법이 존재하지 않는다. 이를 해결하기 위해, 먼저 센싱 SINR 을 최대화하는 최적의 시공간 필터 \mathbf{f} 를 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건을 통해 \mathcal{S} 에 대한 함수로 유도한다. 이후, 해당 결과를 활용하여 \mathcal{P}_0 를 \mathcal{S} 에 대한 최적화 문제로 변환하고, 순차적 근사 기법(Successive convex approximation, SCA)을 통해 convex 문제로 근사한 뒤 최적 해를 도출할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션을 위해 고도 500km 에 위치한 $L = 5$ 개의 저궤도 위성을 고려하며, 각 위성은 $N_t = 8 \times 8$ 개의 안테나가 탑재된다. 또한 $K = 4$ 명의 유저, 하나의 타겟, 그리고 하나의 클러스터가 $1000 \times 1000 \text{ km}^2$ 영역 내에 무작위로 배치된다. ISAC 수요 벡터는 $[D_0 \ D_1 \ D_2 \ D_3 \ D_4] = [5 \text{ dB}, 4, 4, 3, 2 \text{ bps/Hz}]$ 를 고려하며, 최대 전송 파워는 $P = 50 \text{ dBW}$ 로 설정된다. 성능 비교를 위해, 두 가지 ISAC 전송 프레임워크인 ISAC MMF (Max-min fairness)와 ISAC Sumrate 를 벤치마크로 고려한다. ISAC MMF 방식은 통신 또는 센싱 SINR 의 최소값을 최대화하는 것을 목표로 하며, ISAC Sumrate 방식은 모든 유저 및 타겟의 합산 전송률을 최대화하는데 중점을 둔다. 이때 타겟의 전송률은 확장성을 고려하여 $\log_2(1 + \gamma^{\text{Sen}})$ 로 계산된다. 두 벤치마크 모두 제안한 최적화방식을 통해 동일하게 최적화된다.

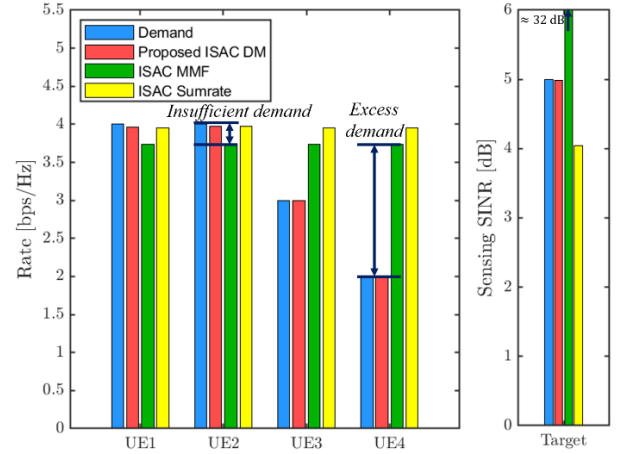


그림 2. ISAC 수요 매칭 성능 비교

그림 2 는 제안한 ISAC 수요 매칭 프레임워크가 다른 벤치마크들보다 상이한 ISAC 수요를 더 효과적으로 충족함을 보여준다. 이는 본 프레임워크가 사용자와 센싱 타겟의 상이한 수요를 명시적으로 반영하여, 제한된 전력 자원 하에서도 자원을 효율적으로 할당할 수 있도록 설계되었기 때문이다. 반면, 벤치마크 방식들은 수요에 대한 고려가 없어, 수요가 낮은 서비스에 대한 과도한 자원을 할당함으로써 심각한 수요 불일치를 초래하고, ISAC 서비스 전반의 품질을 저하시킨다.

IV. 결론

본 논문에서는 6G 를 위한 셀프리 LEO 위성 기반 ISAC 수요 매칭 프레임워크를 제안하였다. 본 프레임워크에서는 여러 대의 LEO 위성이 비동기 및 bistatic 방식으로 협력하여 ISAC 시스템을 지원한다. 또한 강한 클러스터 간섭을 완화하기 위해 센싱 수신기에 시공간 필터가 적용되었다. 한정된 자원 하에서 상이한 ISAC 수요를 충족하기 위해, 전송 빔포밍과 시공간 필터를 효과적으로 최적화하는 알고리즘을 개발하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 프레임워크의 우수성을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 우주항공청의 재원으로 지원을 받아 수행된 것임(과제번호: 2022M1A3C2069728).

참 고 문 헌

- [1] L. You, K. -X. Li, J. Wang, X. Gao, X. -G. Xia and B. Ottersten, "Massive MIMO Transmission for LEO Satellite Communications," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 8, pp. 1851–1865, Aug. 2020.
- [2] L. You et al., "Ubiquitous Integrated Sensing and Communications for Massive MIMO LEO Satellite Systems," in IEEE Internet of Things Magazine, vol. 7, no. 4, pp. 30–35, July 2024.
- [3] R. Liu, M. Li and Q. Liu, "Joint Space-Time Adaptive Processing and Beamforming Design for Cell-Free ISAC Systems," ICASSP 2025 - 2025 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Hyderabad, India, 2025, pp. 1–5.