

모노스태틱 저궤도 위성 ISAC 네트워크를 위한 공동 서브어레이 분할 및 빔포밍 최적화: 계층 분할 다중화 프레임워크

김경수, 최지환
한국과학기술원 항공우주공학과

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

Joint Subarray Partitioning and Beamforming for Monostatic LEO Satellite ISAC Networks: A Layer Division Multiplexing Framework

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

요약

저궤도(Low Earth orbit, LEO) 위성은 지상망 대비 광범위한 커버리지를 바탕으로 글로벌 유비쿼터스 통합 센싱 및 통신(Integrated sensing and communication, ISAC) 서비스를 제공하기 위한 핵심 플랫폼으로 큰 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 이를 위해 계층 분할 다중화 기반의 모노스태틱 저궤도 위성 ISAC 시스템을 제안하고, 해당 시스템에서 발생할 수 있는 문제점과 이를 해결하기 위한 최적화 기법들을 제시한다.

I. 연구배경 및 목적

뉴 스페이스 시대의 도래 이후, 저궤도(Low Earth orbit, LEO) 위성 통신은 저지연 특성과 광범위한 커버리지를 바탕으로 전통적인 브로드캐스팅 서비스를 넘어 콘텐츠 중심의 멀티캐스트 및 유니캐스트 서비스를 제공할 것으로 큰 기대를 받고 있다. 또한 저궤도 위성은 6 세대 핵심 기술인 통합 센싱 및 통신(Integrated sensing and communication, ISAC)을 전 지구적으로 제공할 수 있는 유력한 수단으로 주목받고 있다. 이러한 목표를 달성하기 위해서는 지상 센싱 수신기에 의존하지 않고 단일 위성 플랫폼에서 송·수신이 모두 이루어지는 모노스태틱 구조가 필요하나, 다음과 같은 해결과제가 존재한다. 동일한 시간/주파수 자원 내에서 멀티캐스트, 유니캐스트, 센싱 서비스를 동시에 제공해야 하므로 효과적인 간섭관리 및 다중접속 기술이 필수이며, 서비스 별 상이한 수요를 함께 고려해야 한다. 또한 제한된 모노스태틱 구조 내에서 어떤 안테나 어레이를 송신과 수신에 할당해야 할지 결정해야 한다.

II. 시스템 모델 및 제안하는 저궤도 위성 ISAC 시스템

이를 위해 본 논문에서는 그림 1과 같이 계층 분할 다중화(Layer division multiplexing, LDM) 기반의 모노스태틱 저궤도 위성 ISAC 시스템을 제안한다. LDM 구조에서는 멀티캐스트, 유니캐스트, 센싱 신호를 서로 다른 빔포밍 벡터로 중첩해 비직교 전송을 함으로써 주파수 효율을 높이며, 수신기는 순차적 간섭 제거 기법(Sequential interference cancellation, SIC)을 활용하여 신호를 복호화할 수 있다. 다만 저궤도 위성 환경에서는 짧은 채널 코히어런스 시간으로 인해 정확한 채널 상태 정보 획득이 어려우므로, 본 시스템은 통계적 채널 상태 정보만을 활용하는 통계적 SIC를 적용한다. 또한 모노스태틱 구조에서 위성의 넓은 커버리지로 인해 발생하는 상이한 서비스 수요를 효과적으로 만족하기 위해 서브어레이 분할과 빔포밍 벡터를 공동으로 최적화하는 ISAC 수요 매칭 프레임워크를 제안한다. \mathcal{E} 와 \mathcal{S} 를 각각 이진 서브어레이 분할 변수 집합과 빔포밍 벡터 집합으로 두고, $\bar{\mathcal{E}}$ 와 $\bar{\mathcal{S}}$ 를 각각 이진 제약과 전력 제약을 나타내는 집합으로 정의하면, ISAC 수요 매칭을

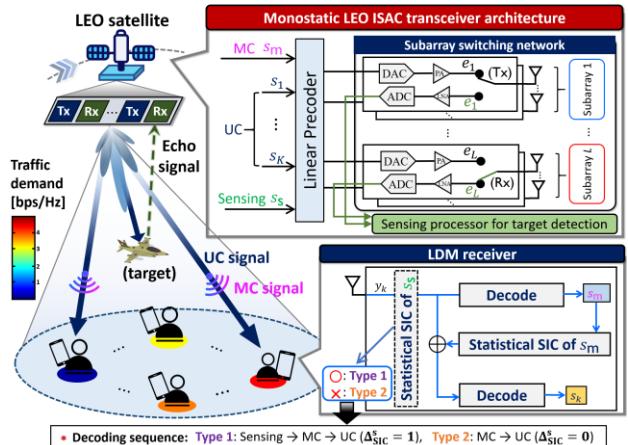


그림 1. 제안하는 모노스태틱 LDM-ISAC 시스템.

위한 최적화 문제는 다음과 같이 설계될 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_0 : \min_{\mathcal{S}, \mathcal{E}} & f_{\text{IsacDM}}(\mathcal{S}, \mathcal{E}) \\ \text{s.t. } & \mathcal{S} \subseteq \bar{\mathcal{S}}, \\ & \mathcal{E} \subseteq \bar{\mathcal{E}}. \end{aligned} \quad (1) \quad (2)$$

문제 \mathcal{P}_0 에서 목적함수는 멀티캐스트, 유니캐스트, 센싱 서비스의 수요와 달성가능한 성능 간 오차로 정의될 수 있다. \mathcal{P}_0 는 최적화 변수들이 서로 복잡하게 얹혀 있고 비볼록(non-convex)이므로, 고대 최적화 방식으로 단일 변수 기반의 서브 문제로 분해한 뒤, 반복적으로 서브 문제를 최적화함으로써 해를 구할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 전 지구적 ISAC 서비스를 제공하기 위한 모노스태틱 계층 분할 다중화 기반 저궤도 위성 ISAC 시스템과, 상이한 ISAC 수요를 효과적으로 수용하기 위한 수요 매칭 프레임워크를 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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