

근거리장 모델링을 활용한 RIS 기반 저궤도 위성 시스템의 Squint-Free 빔포밍

이정재, 성재협*, 홍송남, 신원재*
한양대학교, 고려대학교*

lyjcje7466@hanyang.ac.kr, Jaehyup@korea.ac.kr*, snhong@hanyang.ac.kr, wjshin@korea.ac.kr*

Squint-Free Beamforming in LEO Satellite Systems via Near-Field Propagation-Enabled RIS

Jeongjae Lee, Jaehyup Seong*, Songnam Hong, Wonjae Shin*
Hanyang University, Korea University*

요약

저궤도 위성 통신에서 고 전송률 달성을 위해 광대역 빔포밍을 하는 경우 발생하는 빔 편이(Beam Squint) 문제를 해결하기 위해, 기존에는 실제 시간 지연(TTD, True Time Delay)기반 빔 편이 제거에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만, 이러한 능동 소자 기반 빔 편이 제거 방법은 복잡한 하드웨어 구현 및 높은 전력 소모를 야기한다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 능동 소자 없이 빔 편이를 제거할 수 있는 근거리장 모델링을 활용한 지능형 반사 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface) 빔포밍 구조를 제안한다.

I. 연구 배경 및 목적

저궤도 위성 통신은 향후 6G 네트워크에서 전 지구적 연결성을 실현할 핵심 기술로 주목받고 있다. 하지만, 위성 탑재체의 크기·무게·전력(SWaP) 제약으로 인해 단일 RF 체인 기반의 위상 배열(Phased Array) 구조가 주로 사용되는데, 이 구조는 하드웨어 효율성이 높지만 광대역(mmmWave 및 sub-THz) 시스템에서 주파수별 빔 방향이 달라지는 빔 편이(Beam Squint) 현상이 발생한다 [1]. 기존의 실제 시간 지연(TTD, True Time Delay) 기반 방식은 이를 보상할 수 있으나, 복잡한 제어 회로와 높은 소비 전력을 야기한다.

본 논문에서는, 단일 송신 피드 안테나(FA, Feed Antenna)와 근접 배치된 수동 지능형 반사 표면(RIS, Reconfigurable Intelligent Surface)간의 근거리장 채널 모델링 특성을 활용하여, TTD 소자 없이 전 주파수 대역에서 수동적으로 빔 편이를 제거할 수 있는 이른바 스쿼트 프리(Squint-Free) 빔포밍을 실현한다.

II. 시스템 모델 및 제안 Squint-Free 빔포밍 최적화

저궤도 위성 송신기는 FA와 초 근접 배치된 수동 및 반사 RIS로 구성되고, 총 N 개의 RIS 요소들은 중심 주파수의 반파장 간격의 균일 선형 배열(ULA, Uniform Linear Array)을 이루고 있다 가정한다. FA에서 RIS로 입사된 신호는 RIS에서 위상이 변화되어 지상의 특정 사용자의 방향으로 빔을 형성하며 반사된다. 총 L 개의 부 반송파를 가정하며 각 부 반송파는 $l \in \{1, \dots, L\}$ 으로 표현된다. 이때, 지상의 특정 사용자 방향에 대한 평균 정규화 빔포밍 이득을 목적 함수로 이를 최대화 하는 최적화 문제는 다음과 같이 표현한다.

$$\max_{\mathbf{v}, r_{FA}, \theta_{FA}} \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L G(f_l, \theta_U, \mathbf{v}, r_{FA}, \theta_{FA}) \leq 1. \quad (1)$$

이때, 함수 $G(\cdot)$ 는 정규화 빔포밍 이득을 나타내고, f_l 는 l 번째 부 반송파의 주파수, θ_U 는 지상 사용자 방향(즉, RIS에서의 반사각)을 나타낸다. 특히, $\mathbf{v}, r_{FA}, \theta_{FA}$ 는 각각 RIS 반사 벡터(즉, 총 N 개의 RIS 요소들의 위상 변화 값), FA와 RIS의 중심간 거리 및 입사각이며 문제 (1)의 목적 변수들이다. 이를 효율적으로 풀기 위해, 우선 중심 주파수에서 최대 빔포밍 이득을 얻도록 RIS 반사 벡터 \mathbf{v} 를 최적화한다. 이후, 부 반송파에서 FA와 RIS 간 거리 및 입사각에 따른 빔포밍 이득 및 빔 편이에 대한 분석을 해석적으로 도출한다. 이로부터, 스쿼트 제거를 위한 FA와 RIS의 중심간 거리 및 각도 조건을 제시한다. 먼저, 모든 부 반송파의 주엽 빔포밍 이득을 최대화 하기 위해, 비선형 근거리장 빔 편이를 선형화 하기 위한 거리 조건을 도출한다. 이때, 조향 벡터의 위상을 선형화 하기 위한 최소 거리인 Rayleigh 거리보다는 훨씬 가깝고, 이 Rayleigh 거리에 대역

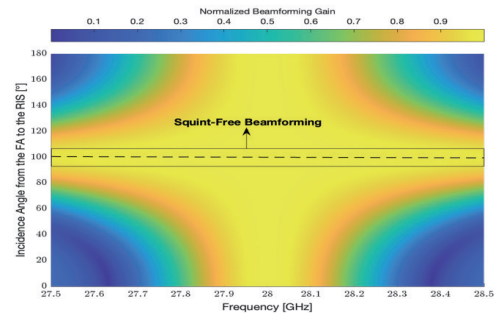


그림 1. 지상 사용자 방향에 대한 제안 빔포밍의 입사각 및 주파수 별 빔포밍 이득

폭에 대한 중심 주파수의 비를 곱한 만큼 훨씬 줄어든 거리가 새로운 임계 값이 되어 근거리장 빔 편이를 선형화 함과 동시에 두 개체간 경로 손실을 최소화한다. 다음으로, 선형화 된 빔 편이로부터 닫힌 해로 유도되는 모든 부 반송파의 주엽 빔 방향들이 지상 사용자에 대한 반사각으로 수렴하게 하는 특정 입사각 조건을 도출한다. 이때, 입사각과 반사각의 합이 180° 가 되어야 한다. 상기의 과정을 통해 제안한 빔포밍 구조는 완전 수동 Squint-Free 빔포밍을 달성한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

128개의 RIS 요소, 28GHz 중심 주파수, 1GHz 대역폭, 1,024개의 부 반송파 기반의 저궤도 위성 환경 및 지상 사용자에 대한 반사각은 $\theta_U = 80^\circ$ 이다. 그림 1은 거리 조건을 만족할 때, 지상 사용자 반사각에 대한 제안 빔포밍 구조의 입사각 및 주파수 별 빔 이득을 나타낸다. 제안한 빔포밍 구조는 분석으로부터 도출한 입사각 조건을 만족할 때(즉, $\theta_{FA} = 180^\circ - \theta_U = 100^\circ$), 모든 부 반송파는 최대 빔포밍 이득을 지상 사용자의 반사각에 대해서 만족함을 확인할 수 있다. 결론적으로, 제안한 빔포밍 구조는 저 전력, 저 복잡도 구조로 저궤도 위성 통신의 빔 편이 문제를 효과적으로 해결하며, 향후 등 간격 평면 배열 및 다중 사용자 확장 등의 활용 가능성이 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 Beyond-G 글로벌혁신센터 (과제번호 RS-2024-00409492) 및 삼성전자미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 SRFC-IT2402-01).

참고 문헌

[1] S. Sekimori et al, "Deep Q-Learning-Driven Frequency Prism Beamforming with Delay-Adjustable IRS in LEO Satellite Networks," IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, pp. 1-1, 2025.