

6G 저궤도 위성통신을 위한 3차원 주파수-중속적 하이브리드 레인보우 빔포밍 기법

고형석, 박주하, 윤영선, 신원재
고려대학교

{hsko99,juha,yos3280,wjshin}@korea.ac.kr

A 3D Frequency-Dependent Hybrid Rainbow Beamforming for 6G LEO Satellite Networks

Hyungseok Ko, Juha Park, Youngsun Yoon, Wonjae Shin
Korea Univ.

요약

저궤도 위성통신은 긴 전파 거리로 인한 심각한 경로 손실을 극복하기 위해 신호를 특정 방향으로 집중시키는 고이득 빔포밍 기술의 도입이 필수적이다. 그러나 한정된 자원 하에서 주로 사용되는 기존 빔 호핑 방식은 간헐적 서비스로 인해 대규모 접속 시 심각한 전송률 병목을 유발하며, 광대역 빔 편이(Beam-squint) 현상 또한 성능 저하의 주원인으로 작용해 왔다. 본 논문에서는 이러한 빔 편이 현상을 역이용하여, 다중 RF 체인과 JPTA (Joint Phase-Time Array) 구조를 통해 전체 커버리지를 동시에 서비스하는 3차원 하이브리드 레인보우 빔포밍 기법을 제안한다. 제안된 기법은 아날로그와 디지털 빔포머 간 교대 최적화 프레임워크를 적용하여 소수의 RF 체인만으로도 완전 디지털 빔포밍에 근접한 성능을 구현한다. 시뮬레이션 결과, 기존 빔 호핑 대비 약 1.97배의 상향링크 전송률 향상을 확인하며 6G 위성통신의 전송 효율을 획기적으로 개선함을 확인하였다.

I. 연구 배경 및 목적

저궤도 위성 통신은 심각한 경로 손실을 극복하기 위해 하이브리드 빔포밍 기반의 빔 호핑 방식을 주로 채택하고 있으나, 이는 제한된 RF 자원으로 인해 특정 시점에 일부 지역만 순차적으로 서비스한다는 한계가 있다. 이로 인해 다수의 사용자가 동시에 상향링크 전송에 참여하지 못하고 가용한 전력 자원이 낭비되어, 결과적으로 심각한 전송률 병목 현상이 발생한다[1].

본 논문에서는 이를 해결하기 위해 광대역 통신의 빔 편이(Beam-squint) 현상을 역이용하여, 주파수 대역별로 빔 조향 방향을 의도적으로 분산시키는 하이브리드 레인보우 빔포밍 기술을 제안한다. 이를 통해 광범위한 영역을 동시에 서비스하여 기존 빔 호핑 시스템의 상향링크 처리량 한계를 효과적으로 극복하고자 한다.

II. 시스템 모델 및 하이브리드 레인보우 빔포밍 최적화

$N_x \times N_y$ 개의 안테나 소자로 구성된 URA (Uniform Rectangular Array)를 탑재한 저궤도 위성을 가정한다 [1]. 위성 수신단은 각 안테나 소자에 위상 천이기(PS, Phase Shifter)와 시간 지연기(TTD, True Time Delay)가 결합되어 있으며, 다수의 RF 체인이 모든 안테나 소자에 연결된 하이브리드 빔포밍 구조를 통해 높은 설계 자유도를 확보한다. 지상 사용자와 위성 간 채널은 주파수 중속적인 배열 응답 벡터를 포함하며, 경로 손실 및 라이시안(Rician) 페이딩 환경을 반영한다.

빔포머 최적화의 핵심 목표는 아날로그 및 디지털 빔포머를 공동 설계하여, 주파수별 목표 조향각인 $(u_{des}^{(m)}, v_{des}^{(m)})$ 으로 형성되는 이상적인 레인보우 빔포머와의 평균 제곱 오차(Mean Squared Error, MSE)를 최소화하는 최적화 문제로 귀결된다.

변수들이 서로 비선형적으로 결합된 비볼록(Non-convex) 문제이므로, 본 논문에서는 연산 효율성을 극대화하기 위해 일부 변수를 고정하고 나머지를 순차적으로 개선하는 교대 최적화(Alternating Optimization,

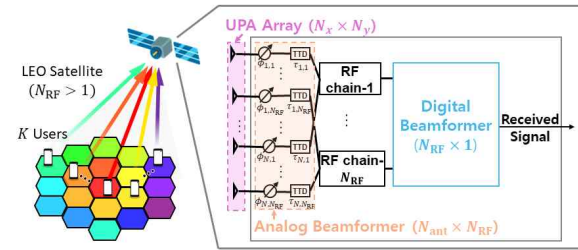


그림 1. 제안하는 하이브리드 레인보우 빔포밍 시스템 모델

Fig 1. Proposed hybrid rainbow beamforming system

AO) 프레임워크를 활용한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

시뮬레이션을 통해 8×8 URA 안테나와 14 GHz 중심 주파수, 1.4 GHz 대역폭을 가진 광대역 환경에서 소수의 RF 체인만으로도 Fully-digital 빔포밍에 근접한 이득 성능을 보여, 하드웨어 제약이 큰 위성 환경에서도 높은 설계 자유도를 확보할 수 있음을 입증하였다. 이를 통해, 기존 위성 통신 시스템의 고질적인 업링크 병목 현상을 해결할 수 있음을 확인했다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 삼성전자미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제 번호: SRFC-IT20402-01)

참고 문헌

- [1] J. Park *et al.*, "Embracing Beam-Squint Effects for Wideband LEO Satellite Communications: A 3D Rainbow Beamforming Approach," *arXiv preprint arXiv:2512.18600* (2025).