

광대역 저궤도 위성 통신에서 빔 편이 현상으로 인한 성능열화 분석 및 해결 방안

박주하, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

{juha, wjshin}@korea.ac.kr

Beam-Squint Effect in Wideband Low Earth Orbit Satellite Communication Systems: Performance Analysis and Promising Solutions

Juha Park and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

전 지구적 커버리지와 초연결성을 달성할 수 있는 저궤도 위성 통신을 이용하여 고전송률을 달성하기 위해서는, 넓은 대역폭의 이용이 필수 불가결하다. 본 논문에서는 광대역 저궤도 위성 통신의 기술적 걸림돌인 빔 편이 현상에 대해 소개하고, 빔 편이 현상이 지상 수신단의 빔포밍 이득에 미치는 영향을 수치적으로 분석한다. 실험 결과, 배열 안테나 소자의 개수가 많을수록, 그리고 대역폭이 넓을수록 빔 편이 현상으로 인한 성능열화가 크게 발생하며 빔 편이 현상이 광대역 저궤도 위성 통신에서 치명적인 성능 저하 요인임을 확인한다. 빔 편이 현상으로 인한 성능 저하를 보상 및 해결할 수 있는 방안에 대해 간략히 소개하며 결론을 맺는다.

I. 연구 배경 및 목적

최근 재사용 가능한 로켓 개발에 따른 위성 발사 비용 저감으로 저궤도 위성 통신이 큰 주목을 받고 있다. 저궤도 위성 통신은 기하급수적으로 증가하는 사물 인터넷(Internet of Things, IoT) 단말들에 서비스를 제공하는 초연결성(massive connectivity)과 기존 지상 네트워크가 서비스하기 어렵던 오지, 사막, 해양 등에도 전지구적 커버리지를 동시에 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 이에 더불어, 최근 virtual reality (VR) 등 높은 전송률을 요구하는 어플리케이션이 각광받음에 따라 고전송률 저궤도 위성 통신 시스템의 구축이 필요성이 대두된다. 하지만 현재 상용화된 저궤도 위성 통신 서비스의 경우 실시간 고화질 비디오 스트리밍이 가능한 수준의 전송률에 그치고 있다. 더욱 높은 전송률을 달성하기 위해서는 광대역의 이용이 필요하다. 광대역 저궤도 위성 통신망 구축을 위해서는 빔 편이 (beam-squint) 현상을 반드시 해결해야 한다. 하지만, 기존 빔 편이 관련 연구는 THz/mmWave 대역 지상 통신에만 국한되어 왔으며, 이 현상이 저궤도 위성 통신, 특히 지상 수신단 측면에서는 연구된 바 없다. 따라서, 본 논문에서는 빔 편이 현상에 대해 소개하고 빔 편이 현상 때문에 발생하는 위성 단말의 성능 열화를 분석하며 해결 방안에 대해 소개한다.

II. 광대역 저궤도 위성 통신에서의 빔 편이 현상

원활한 저궤도 위성 통신 서비스를 위해서는, 위성과 수신단 간의 큰 경로 손실을 극복하기 위해서 수신단에서의 높은 이득의 빔포밍이 필수적이다. 구체적으로, 안테나 소자 간 간격이 d 인 uniform linear array (ULA)의 경우 각도 θ 방향으로 빔을 조향하기 위해, 다음 식(1)과 같은 안테나 소자 간 위상 천이 $\Delta\phi$ (즉, 그림 1에서 $\phi_n = (n-1)\Delta\phi$, $n \in 1, \dots, N$)를 가해줘야 한다.

$$\Delta\phi = -2\pi f_m \frac{d \sin\theta}{c} \quad (1)$$

이때, f_m , c 는 각각 m 번째 부반송파(sub-carrier)의 통과대역 (passband) 주파수, 빛의 속도이다. 따라서, 정확한 빔 조향을 위해서는 주파수-종속적인 위상 천이가 필요하다. 중심 주파수 대비 신호의 대역폭이 충분히 넓지 않은 기존 협대역(narrowband) 시스템 (즉,

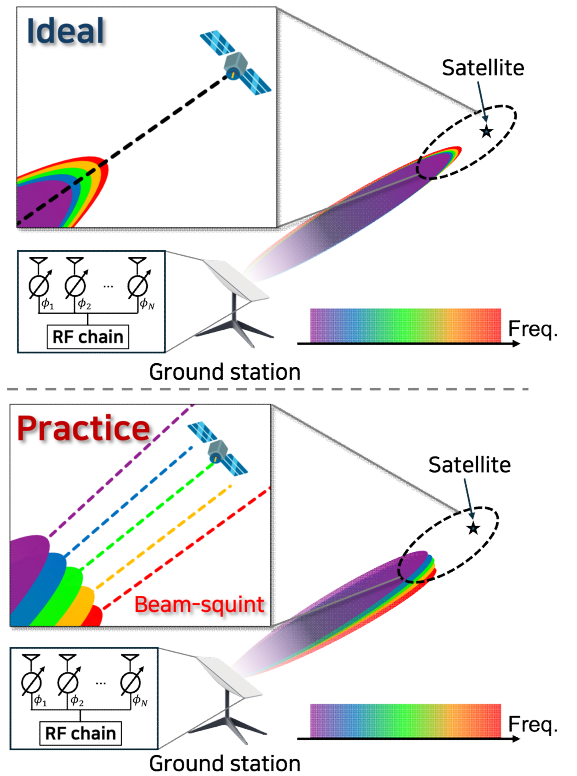


그림 1. 저궤도 위성 통신 수신단에서 발생하는 빔 편이 현상

$f_m \approx f_c$, $\forall m$)의 경우 위상 천이기(phase shifter)를 이용한 위상 배열(phased array) 안테나를 이용하여 효과적인 빔포밍이 가능하다. 하지만 중심 주파수 대비 신호의 대역폭이 충분히 큰 광대역 시스템에서 기존의 위상 배열 안테나를 그대로 사용할 시 중심주파수와 주파수의 차이가 충분히 많이 나는 부반송파의 경우 그림 1과 같이 중심주파수에 해당하는 부반송파와 틀어진 방향을 향하게 되며, 이를 빔 편이 현상으로 칭한다. 이러한 빔 편이 현상은 중심주파수와 대역폭의 비인 fractional bandwidth가 클수록 크게 발생한다. 또한, 안테나 소자 개수가 많을수록 좁은 빔이 형성되기에 성능열화에 큰 영향을 미친다. 저궤도 위성 통신의

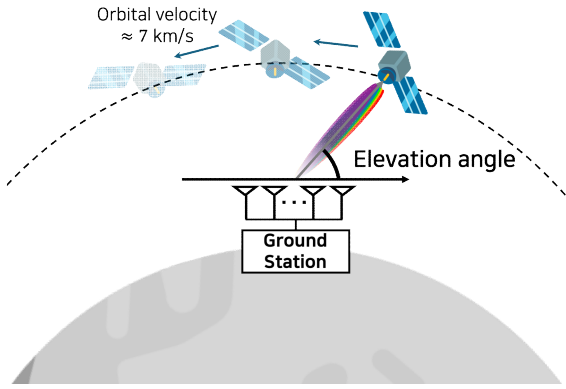


그림 2 빔 편이로 인한 성능 저하 분석 시뮬레이션 상황

경우 충분히 높은 이득을 얻기 위해 다수의 안테나 소자를 사용해야 하며, 멀리 떨어져 있는 위성에 빔을 정확히 조향해야 하기에 빔 편이 현상이 특히 치명적일 수 있다. 다음 장에서 모의실험을 통해 이를 수치적으로 확인한다.

III. 모의 실험 결과 및 성능 저하 보상 방안

빔 편이로 인한 빔포밍 이득 성능 저하를 수치적으로 분석하기 위해, 그림 2와 같은 시뮬레이션 상황을 상정하였다. 위상 천이기 기반의 ULA 안테나가 위성을 향해 빔을 조향하며 위성 궤도의 최대 고도각(maximum elevation angle)은 90°, 지상 수신단의 최소 고도각(minimum elevation angle)은 40°로 설정하였다. 그림 3은 이러한 상황에서 20 GHz의 중심주파수를 사용하여 각각 64, 128개의 안테나 소자를 갖는 배열 안테나에 대하여 모든 부반송파의 빔포밍 이득을 평균 낸 결과이다. 이때 다양한 대역폭과 고도각에 대하여 실험을 수행했다. 실험 결과, 위성이 배열 안테나의 boresight에 위치하는 경우, 즉 고도각 90° 지점에서는 빔 편이 현상이 발생하지 않기에 최대 빔포밍 이득을 달성하며 boresight로부터 멀어질수록 평균 빔포밍 이득의 저하가 크게 발생함을 알 수 있다. 또한, 대역폭이 넓을수록, 안테나의 개수가 많을수록 이득 저하가 크게 발생한다. 또한, 그림 3에서 128개의 안테나 소자와, 2 GHz 대역폭을 사용하는 경우와 같이 일부 구간에서 평균 빔포밍 이득의 fluctuation이 발생함을 알 수 있는데, 이는 일부 부반송파가 형성하는 빔의 null에 위성이 위치하기 때문이다. 따라서 이 경우, 부반송파의 채널 이득이 저하되는 것을 넘어 일부 부반송파를 사용하지 못함을 알 수 있다. 따라서, 빔 편이 현상은 광대역 저궤도 위성 통신 링크의 신뢰성을 저하시키며, 위성의 고도각이 시간에 따라 변화하기에 접속 시간에 따라 불균일한 전송률을 야기할 수 있는 치명적 요인임을 확인하였다.

이러한 성능 저하를 해결하기 위해, 기저대역(baseband)에서의 디지털 신호처리를 통해 빔 편이 현상을 일부 보상할 수 있으나 [1], 이는 일반적으로 다수의 radio frequency (RF) chain을 요구하기에 하드웨어적 부담이 크다. 하드웨어적 측면에서, 모든 위상 천이기를 실시간 지연 선로 (true time delay, TTD)로 대체하면 주파수-종속적인 위상 천이가 가능하기에 빔 편이 현상의 근본적 원인을 해결하여 항상 최대 빔포밍 이득을 달성할 수 있다. 하지만, TTD의 경우 위상 천이기에 비하여 전력 소모와 비용적 부담이 크다. 이에, TTD와 위상 천이기를 조합하여 사용하는 새로운 형태의 하이브리드 배열 안테나, 즉 joint phase time array (JPTA)를 사용하여 비용 효율적으로 빔 편이를 제어할 수 있는 광대역 저궤도 위성 지상국을 설계할 수 있을 것으로 보이며, 후속 연구가 요구된다 [2-3].

IV. 결론

본 논문에서는 광대역 저궤도 위성 통신망 구축을 위해 해결해야 하는 빔 편이 현상에 대해 소개하고, 빔 편이 현상 때문에 발생하는 성능열화를

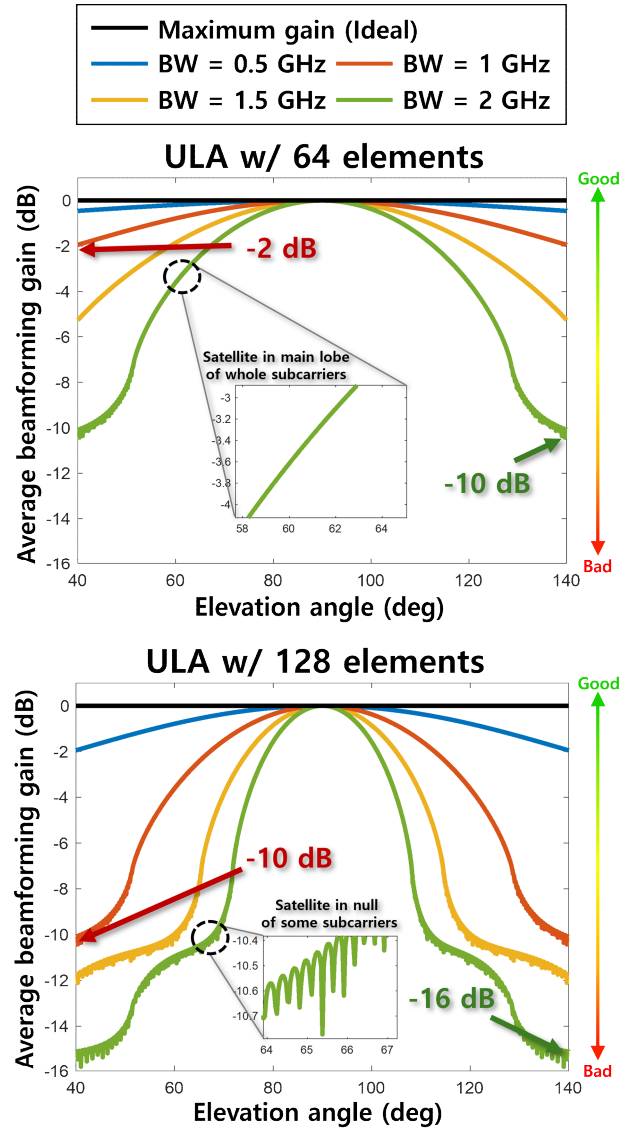


그림 3. 위상 배열 안테나를 사용할 경우 빔 편이 현상으로 인해 발생하는 각 부반송파의 평균 빔포밍 이득 저하 수치적 분석

수치적으로 분석하였다. 본 연구의 결과가 후속 고전송률 저궤도 위성 통신망 구축에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No.2022R1A2C4002065)과 정보통신기획평가원(No.2024-00359235, No.2022-0-00704, No.2021-0-00467, No.2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] L. You *et al.*, "Beam-squint aware integrated sensing and communications for hybrid massive MIMO LEO satellite systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 10, Oct, 2022.
- [2] V. V. Ratnam *et al.*, "Joint phase-time arrays: A paradigm for frequency-dependent analog beamforming in 6G," *IEEE Access*, Jul, 2022.
- [3] L. Dai *et al.*, "Delay-phase precoding for wideband THz massive MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 9, Sep, 2022.