군집 저궤도 위성 시스템 기반 분산 배열 안테나 구조를 활용한 협력 빔포밍 기술

이선호, 성재협, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

dltjsgh0614@korea.ac.kr, jaehyup@korea.ac.kr, wjshin@korea.ac.kr

Cooperative Beamforming in LEO Satellite Constellation Networks with Distributed Arrays

Sunho Lee, Jaehyup Seong, and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea University

요 약

저궤도 위성 통신은 6G 시대의 글로벌 커버리지를 실현할 핵심 기술로 주목받지만, 높은 고도에 위치한 그 특성상 경로 손실로 인한 성능 저하 문제가 존재한다. 이를 보완하기 위해 대규모 배열 안테나를 탑재한 위성의 활용이 고려되지만, 중량 증가 및 발사 비용으로 인해 현실적인 제약이 크다. 본 논문에서는 이러한 한계를 극복하기 위해, 군집 저궤도 위성 기반 분산형 배열 안테나 구조를 활용한 협력 빔포밍 기술을 제안한다. 특히 위성 궤도와 지구 곡률을 반영한 현실적인 채널 모델을 설계하고, 제안된 구조가 단일 대규모 배열 안테나와 유사한 빔을 형성할 수 있음을 보인다.

Ⅰ. 연구배경 및 목적

6G 이동통신 시스템은 5G가 제공하는 초연결성, 초고속, 초저지연의 세 가지 핵심 요소에 더해, 초공간성, 초신뢰성을 포함한 통신 체계로의 발전이 요구된다 [1]. 이에 따라, 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성통신이 차세대 6G 시대에 요구되는 글로벌 커버리지와 초연결성을 실현할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있다 [2], [3], [4]. 그러나 300-2000 km 고도에 위치한 저궤도 위성은 경로 손실이 크며, 특히 안테나 이득이 낮은 사용자 단말에서는 통신 품질이 크게 저하된다. 이를 보완하기 위해 대규모 배열 안테나를 탑재한 저궤도 위성을 활용하는 방안이 고려되지만, 이는 위성의 중량 증가와 발사 비용으로 인해 현실적인 제약이 크다 [5], [6]. 실제로 Solaris Mobile 프로젝트의 실패는 이러한 기술적 한계를 단적으로 보여준다. 최근 Starlink의 Falcon 9과 같은 재사용 발사체 기술의 발전으로, 위성의 소형화와 대량 발사가 가능해지며 분산형 안테나 구조, 즉 다수의 위성이 협력하는 방식이 새로운 대안으로 주목받고 있다. 본 논문에서는 각 저궤도 위성이 소규모 배열 안테나만을 탑재한 상황에서 서로 협력하여 빔포밍을 수행하는 구조를 제안한다. 특히, 기존 연구들에서 간과된 위성 궤도 및 지구 곡률의 영향을 반영한 현실적인 채널 모델을 새롭게 제안하고, 이를 통해 협력 구조가 단일 대규모 배열 안테나 기반 구조에 준하는 성능을 낼 수 있음을 보인다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 제안하는 위성 궤도, 지구 곡률의 영향이 반영된 채널 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이, N_t개의 위상 배열 안테나로 구성된 uniform planner array (UPA)를 탑재한 L기의 저궤도 위성들이, 단일 안테나를 장착한 지상의 사용자에게 서비스를 제공하는 상황을 고려한다. 각 저궤도 위성은 지구의 중심을 향하고 있다고 가정한다. 이러한 상황에서 위성-지상 사용자간 채널 벡터를 모델링하기 위해, 지구 중심을 원점으로 하는 구면 좌표계(spherical polar coordinate)를 도입하여, 저궤도 위성과 사용자에 대한 위치 벡터를 정의한다. 이에 따라, 지구 지표면에 위치한 k 번째 사용자의 위치벡터 $\mathbf{p}_{\mathrm{U},k}$는 지구의 반지름 R_{E}와 구면 좌표계에서의 방위각(azimuth angle) $\phi_{\mathrm{U},k}$과 고도각(elevation angle) $\theta_{\mathrm{U},k}$을 통해

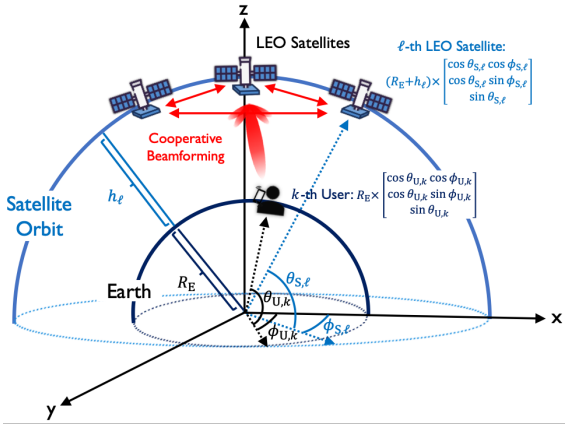

그림 1. 제안하는 군집 저궤도 위성을 활용한 분산 배열 안테나 기반 협력 빔포밍 구조

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{p}_{\mathrm{U},k} = R_{\mathrm{E}} \times [\cos(\theta_{\mathrm{U},k})\cos(\phi_{\mathrm{U},k}), \cos(\theta_{\mathrm{U},k})\sin(\phi_{\mathrm{U},k}), \sin(\theta_{\mathrm{U},k})]^{\mathrm{T}} \quad (1)$$

동일한 방식으로, ℓ 번째 저궤도 위성의 위치벡터 $\mathbf{p}_{\mathrm{S},\ell}$는 지구 반지름 R_{E}, 고도 h_ℓ, 구면 좌표계에서의 방위각 $\phi_{\mathrm{S},\ell}$과 고도각 $\theta_{\mathrm{S},\ell}$을 통해 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{p}_{\mathrm{S},\ell} = (R_{\mathrm{E}} + h_\ell)[\cos(\theta_{\mathrm{S},\ell})\cos(\phi_{\mathrm{S},\ell}), \cos(\theta_{\mathrm{S},\ell})\sin(\phi_{\mathrm{S},\ell}), \sin(\theta_{\mathrm{S},\ell})]^{\mathrm{T}} \quad (2)$$

이후, ℓ 번째 저궤도 위성에서의 국소 좌표계를 도입하여 얻어지는 UPA의 중심에서 $[n_x^{(\ell)}, n_y^{(\ell)}]$ 번째 안테나까지의 상대벡터를 $\mathbf{z}_\ell^{[n_x n_y]}$라 할 때, 해당 안테나 요소에 대한 위치벡터는 $\mathbf{p}_{\mathrm{S},\ell} - \mathbf{z}_\ell^{[n_x n_y]}$와 같이 유도된다. 이를 기반으로, ℓ 번째 저궤도 위성의 $[n_x^{(\ell)}, n_y^{(\ell)}]$ 번째 안테나 요소와 k 번째 사용자의 거리를 위치벡터 간 차이에 대한 유클리드 거리(Euclidean distance)를 계산하고, 이를 빛의 속도 c로 나누어 신호 지연(time delay)을 얻을 수 있다. 이러한 절차를 통해 ℓ 번째 저궤도 위성의 모든 안테나 요소에 대한 신호 지연을 계산함으로써, ℓ 번째 저궤도 위성과 k 번째 사용자간의 array

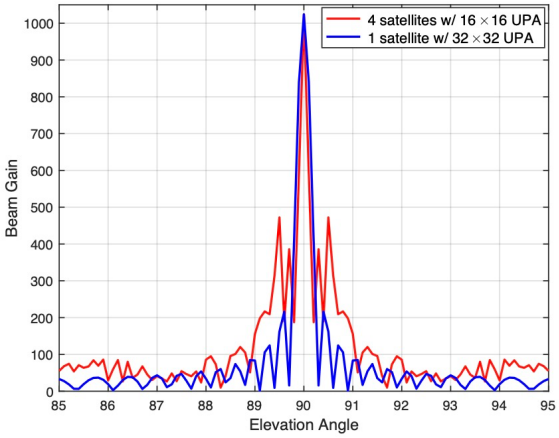

그림 2. 제안 기법과 단일 대규모 배열 안테나 기반 기법 간 빔 패턴 비교

response vector인 $\mathbf{a}_{k,\ell}$를 도출할 수 있다. 결론적으로, k번째 사용자의 array response vector는 $\mathbf{a}_k(\theta_{\mathrm{U},k},\phi_{\mathrm{U},k}) = [\mathbf{a}_{k,1}^{\mathrm{T}},\cdots,\mathbf{a}_{k,L}^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$로 표현된다.

Ⅲ. 실험결과 및 결론

위성 궤도 및 지구 곡률의 영향이 반영되어 설계 된 현실적인 위성 채널 모델에서, 그림 2와 같이 $\theta_{\mathrm{U},k} = 90^\circ, \phi_{\mathrm{U},k} = 0^\circ$에 위치한 단일 사용자를 서비스 할 때, $85^\circ \le \theta \le 95^\circ$와 $\phi = 0^\circ$ 범위에서의 빔 이득(Beam gain) 값, $\left|\mathbf{a}_k^{\mathrm{H}}(\theta_{\mathrm{U},k},\phi_{\mathrm{U},k})\mathbf{a}_k(\theta,\phi)\right|^2$을 비교하였다. 256개의 위상 배열 안테나를 탑재한 저궤도 위성 4기를 활용한 경우와 1024개의 위상 배열 안테나를 탑재한 저궤도 위성 1기를 활용한 경우를 비교하였다. 두 경우 모두 저궤도 위성의 고도는 525 km로 설정하였다.

실험 결과, 위성 궤도 및 지구 곡률의 영향이 고려된 현실적인 채널 모델에서, 다중 저궤도 위성이 협력하여 빔을 형성하는 구조가 단일 대규모 배열 안테나 기반 구조와 유사하게 고 이득 빔을 형성할 수 있음을 확인하였다. 이는 군집 저궤도 위성 간 협력 빔포밍 기술이 사용자 밀도가 높은 3차원 환경에서 고속 전송률 요구를 안정적으로 충족할 수 있는 현실적인 기술임을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (RS-2025-00562095)과 정보통신기획평가원(RS-2024-00359235, RS-2024-00436887, RS-2022-0-00704, RS-2021-0-00260)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

[1] A. Kaushik *et al.*, "Toward integrated sensing and communications for 6G: Key enabling technologies, standardization, and challenges," *IEEE Commun. Standards Mag.*, vol. 58, no. 2, pp. 52-59, 2024.

[2] M. A. Jamshed *et al.*, "A tutorial on non-terrestrial networks: Towards global and ubiquitous 6G connectivity," *Foundations and Trends in Networking*, vol. 14, no. 3, pp. 160-253, 2025.

[3] M. Toka *et al.*, "RIS-empowered LEO satellite networks for 6G: Promising usage scenarios and future directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 11, pp. 128-135, 2024.

[4] H. Lee *et al.*, "Towards 6G hyper-connectivity: Vision, challenges, and key enabling technologies," *Journal of Communications and Networks*, vol. 25, no. 3, pp. 344-354, 2023.

[5] J. C. M. Duncan *et al.*, "Harnessing the power of swarm satellite networks with wideband distributed beamforming," in Proc. *IEEE Intern. Symp. on Pers., Ind. and Mob. Radio Commun.*, 2023, pp. 1-6.

[6] H. Al-Hraishawi, H. Chougrani, S. Kisseleff, E. Lagunas, and S. Chatzinotas, "A survey on nongeostationary satellite systems: The communication perspective," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 25, no. 1, pp. 101-132, 2023.