

다중 저궤도 위성 네트워크에서 협력 빔포커싱을 통한 위치 분할 다중접속 기법

성재협, 조가연, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

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

Cooperative Beam Focusing Enabled Location Division Multiple Access in Multi-LEO Satellite Communications

Jaehyup Seong, Gayeon Cho, and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea University

요약

저궤도 위성 네트워크는 6세대 이동통신 시대의 핵심 인프라로 주목받고 있으며, 전 지구적 커버리지를 확보함과 동시에 낮은 지연과 높은 데이터 처리량을 제공할 수 있는 핵심 기술 중 하나로 평가받고 있다. 그러나 저궤도 위성 네트워크는 저궤도 위성의 높은 고도로 인해 평면파(Planner Wave) 전파 특성이 두드러지며, 이에 따라 사용자 각도 정보만을 활용한 빔 형성에 한계가 존재한다. 본 논문에서는 다수의 저궤도 위성이 협력적으로 신호를 전송하는 구조를 고려하고, 이때 방사되는 신호가 평면파가 아닌 구면파(Spherical Wave) 전파 특성을 형성함을 보인다. 이러한 특성을 기반으로, 빔이 사용자 위치에 따라 신호 전력을 정밀하게 포커싱 시킬 수 있음을 분석한다. 또한, 이를 통해 사용자 각도 정보와 거리 정보를 함께 고려하여, 3차원 저궤도 위성 네트워크 환경에서 지상 및 공중에 위치한 사용자 간 간섭을 효과적으로 제어함으로써 통신 성능을 향상시킬 수 있는 위치 분할 다중접속(Location Division Multiple Access, LDMA) 기술을 제안한다.

1. 연구배경 및 목적

최근 들어 저궤도 위성 네트워크는 6세대 이동통신 시대의 전 지구적 커버리지를 실현할 수 있을 뿐만 아니라, 낮은 지연과 높은 데이터 처리량을 제공할 수 있는 차세대 무선 통신의 핵심 기술로 주목받고 있다 [1], [2], [3]. 특히, 단일 저궤도 위성이 제한된 영역만을 커버하는 기존 구조에서 한발 더 나아가, 다수의 저궤도 위성이 협력하여 통신 서비스를 제공하게 되면 데이터 처리 효율과 서비스 품질을 대폭 향상시킬 수 있음이 보고되고 있다 [4]. 본 논문에서는 다중 저궤도 위성 네트워크의 협력 전송 구조를 기반으로 서비스를 제공할 때 방사되는 신호가 구면파(Spherical Wave) 전파 특성을 형성할 수 있음을 보인다. 이러한 구면파 전파 특성은 빔 형성 과정에서 사용자의 각도 정보뿐 아니라 거리 정보를 함께 고려할 수 있어, 해당 위치에 존재하는 사용자에게 대응되는 빔의 신호 전력을 정밀하게 포커싱 시킬 수 있도록 한다 [5]. 또한, 이러한 특성을 활용하여 사용자의 거리 정보와 각도 정보를 동시에 고려한 빔 형성을 통해, 지상 및 공중에 위치한 사용자가 혼재된 3차원 저궤도 위성 네트워크 환경에서 사용자 간 간섭을 효과적으로 제어할 수 있는 위치 분할 다중접속(Location Division Multiple Access, LDMA) 기술을 제안한다. 이를 통해 기존의 단일 저궤도 위성 통신에서 위성의 높은 고도로 인해 평면파(Planner Wave) 전파 특성이 지배적이었던 환경에서 각도 정보만으로 빔을 형성하던 공간 분할 다중접속(Spatial Division Multiple Access, SDMA) 기술의 한계를 극복할 수 있다.

II. 시스템 모델 및 제안하는 협력 빔포커싱을 통한 위치 분할 다중접속 기법

본 논문에서는 N_t 개의 위성 배열 안테나로 구성된 uniform linear array (ULA)를 탑재한 두 대의 저궤도 위성이, 고도 h 의 동일한 궤도에서 지상 및 공중에 위치한 사용자에게 서비스를 제공하는 상황을 고려한다. 이때, 그림 1과 같이, 두 저궤도 위성이 동일한 궤도면 상에서 이루는 중점을 원점 $(0, 0)$ 으로 하는 좌표계를 도입하고, 이를 바탕으로 저궤도 위성 및 사용자의 위치 벡터를 정의한다. 두 저궤도 위성은 지구의 중심 좌표 $(0, R_E + h)$ 을 기준으로 서로 2α 의 중심각을 이루는 위치에 배치된 상황을 고려하며, 이에 따라 각 저궤도 위성의 위치벡터는

$$\mathbf{p}_{\text{SAT},1} = (R_E + h) \times [\sin\alpha, 1 - \cos\alpha]^T \quad (1)$$

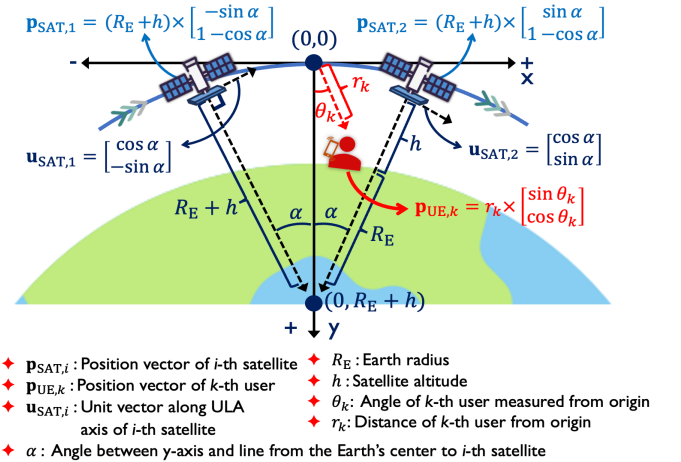


그림 1. 제안하는 다중 저궤도 위성 협력 네트워크의 기하학적 구조.

$$\mathbf{p}_{\text{SAT},2} = (R_E + h) \times [-\sin\alpha, 1 - \cos\alpha]^T \quad (2)$$

로 표현된다. 이때, 각 저궤도 위성은 지구 중심을 향하도록 배향되어 있는 상황을 가정하며, 이에 따라 저궤도 위성에서 지구 중심으로의 방향 벡터를 각각 $(R_E + h) \times [\sin\alpha, \cos\alpha]^T$ 와 $(R_E + h) \times [-\sin\alpha, \cos\alpha]^T$ 로 표현한다. 또한, 각 저궤도 위성의 ULA는 이러한 방향 벡터에 수직인 축을 따르도록 설정한다. 따라서, 각 저궤도 위성에서 지구 중심으로의 방향 벡터에 수직인 축을 해당 위성의 ULA 축으로 정의하고, 해당 축을 따르는 단위 벡터는

$$\mathbf{u}_{\text{SAT},1} = [\cos\alpha, -\sin\alpha]^T \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{\text{SAT},2} = [\cos\alpha, \sin\alpha]^T \quad (4)$$

와 같이 표현된다. 이를 통해, 각 저궤도 위성에서 n 번째 위성 배열 안테나 소자의 위치 벡터는 다음과 같이 표현 될 수 있으며,

$$\mathbf{p}_{\text{SAT},1}^{[n]} = \mathbf{p}_{\text{SAT},1} + (n - 1 - (N_t - 1)/2)d \cdot \mathbf{u}_{\text{SAT},1} \quad (5)$$

$$\mathbf{p}_{\text{SAT},2}^{[n]} = \mathbf{p}_{\text{SAT},2} + (n - 1 - (N_t - 1)/2)d \cdot \mathbf{u}_{\text{SAT},2} \quad (6)$$

여기서 d 는 인접 안테나 간 거리, n 은 안테나 인덱스($n \in \{1, \dots, N_t\}$)이다.

동일한 좌표계에서, 임의의 k 번째 사용자의 위치 벡터는 원점으로부터의 거리인 r_k 와 각도 θ_k 를 이용하여 다음의 식 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$\mathbf{p}_{\text{UE},k} = r_k \times [\sin\theta_k, \cos\theta_k]^T \quad (7)$$

이를 기반으로, 각 저궤도 위성의 n 번째 배열 안테나 소자와 k 번째 사용자 간의 거리를 계산하고, 이를 빛의 속도 c 로 나누어 각 안테나로부터의 신호 지연을 구할 수 있다. 이러한 과정을 통해 모든 안테나 요소로부터의 신호 지연을 고려함으로써, 각 저궤도 위성과의 사용자 간의 array response vector $\mathbf{a}_{k,1}(r_k, \theta_k)$ 와 $\mathbf{a}_{k,2}(r_k, \theta_k)$ 를 도출할 수 있다. 결과적으로, k 번째 사용자에게 대한 array response vector는 $\mathbf{a}_k(r_k, \theta_k) = [\mathbf{a}_{k,1}(r_k, \theta_k)^T, \mathbf{a}_{k,2}(r_k, \theta_k)^T]^T$ 로 표현된다. 한편, 식 (1), (2)를 통해 확인할 수 있듯이 $\mathbf{a}_k(r_k, \theta_k)$ 는 α 의 값에 영향을 받는다. 즉, α 가 커질수록 두 위성의 지구 중심 좌표를 기준으로 이루는 중심각의 크기가 커짐으로써 저궤도 위성 간 간격이 증가하게 되며, 이는 원점을 중심으로 하고 각 위성의 안테나가 포함되는 가상 개구면의 크기를 증가시킨다. 이때, 일정 값 이상으로 α 가 커지면, 방사되는 신호는 평면파가 아닌 구면파 전파 특성을 띄게 된다. 이를 통해 사용자의 위치 (r_k, θ_k) 에 따라 대응되는 빔의 신호 전력을 정밀하게 포커싱 시킬 수 있다. 즉, 다중 저궤도 위성 간 협력을 통한 확장된 가상 개구면의 형성과 빔포커싱은 위치 분할 다중접속 기술의 구현을 가능하게 한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 절에서는 시뮬레이션을 통해 다중 저궤도 위성이 협력 전송을 하는 상황에서 일정 각도 이상으로 α 가 커질 때, 방사되는 신호가 평면파가 아닌 구면파 전파 특성을 띠며, 이를 기반으로 사용자 위치에 따른 빔포커싱을 통한 위치 분할 다중접속 기술의 구현이 가능함을 확인한다. 시뮬레이션은 중심주파수 $f_c = 20 \text{ GHz}$ 에서 수행하였으며, 각 위성의 인접 안테나 간 간격은 반파장 $d = \lambda_c / 2$ 으로 설정하였다. 제안하는 기법의 빔포커싱 성능을 검증하기 위해, 그림 2와 같이 중심각이 $\alpha = 3^\circ$ 인 두 저궤도 위성이 지구 중심을 기준으로 대칭 배치된 구성을 고려하였으며, 이때 각 저궤도 위성의 송신 안테나 수는 $N_t = 32$ 로 설정하였다. 비교군으로는 동일한 총 안테나 수 $N_t = 64$ 를 갖는 단일 저궤도 위성이 원점 $(0, 0)$ 에 위치한 경우를 고려하였다. 두 경우 모두 모두 원점으로부터 거리 $r_k = 600 \text{ km}$, 각도 $\theta_k = 0^\circ$ 에 위치한 사용자를 대상으로 $\mathbf{a}(r_k, \theta_k)^H$ 의 프리코딩 벡터를 기반으로 서비스 할 때, 동일한 각도를 가지되 서로 다른 거리에 대한 위치의 빔 이득 $|\mathbf{a}(r_k, \theta_k)^H \mathbf{a}(r, \theta)|$, ($\theta = 0^\circ$, $0 \leq r \leq 600 \text{ km}$)을 비교하였다. 파란색, 붉은색 그래프는 각각 제안하는 기법과 비교군의 빔이득을 나타낸다.

시뮬레이션 결과, 제안하는 기법은 다중 저궤도 위성 간 협력을 통해 확장된 크기의 가상 개구면을 형성함으로써 생성된, 방사 신호의 구면파 전파 특성을 효과적으로 활용하여, 사용자의 거리 및 각도 정보를 모두 반영한 정밀 빔 포커싱이 가능함을 확인할 수 있다. 이를 통해 동일 각도에 위치하더라도 서로 다른 거리에 존재하는 인접 사용자에게 향하는 간섭 신호를 효과적으로 억제할 수 있다. 반면, 단일 위성을 기반으로 빔을 형성하게 되면 전체적으로 동일한 수의 송신 안테나를 활용하더라도, 위성의 높은 고도에 비해 제한된 개구면의 크기로 인해 신호가 평면파 전파 특성을 띄게 되며, 이로 인해 거리 정보를 반영하지 못하고 동일 각도 상의 모든 사용자에게 강한 신호 간섭을 발생시킨다. 이는 지상 및 공중 등 다양한 고도에 사용자가 분포하는 3차원 위성 네트워크 환경에서 사용자 간 간섭을 효과적으로 제어하지 못함을 의미한다. 제안하는 다중 위성 협력 기반

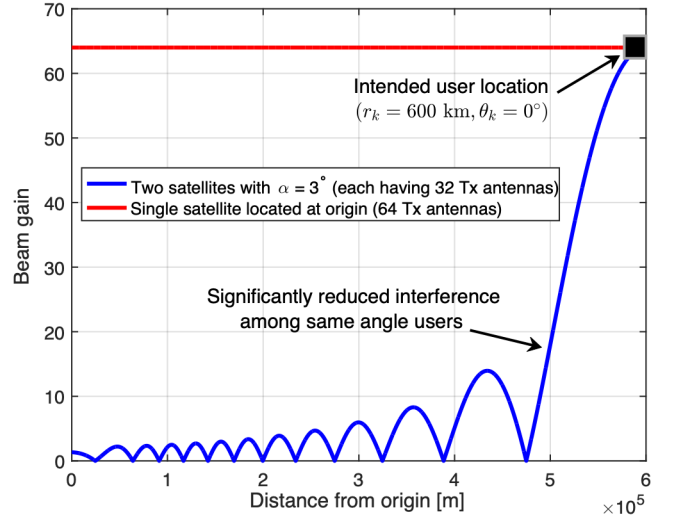


그림 2. $\theta = 0^\circ$ 일 때 원점에서 거리 r 에 따른 빔 이득 분석 결과. 사용자의 위치 벡터는 $\mathbf{p}_{\text{UE},k} = 600 \text{ km} \times [\sin 0^\circ, \cos 0^\circ]^T$ 로 설정.

빔포커싱을 통한 위치 분할 다중접속 기술은 동일 각도 상에 위치한 인접 사용자라도 거리에 따라 빔을 분리하여 형성함으로써, 지상 및 공중 사용자가 혼재된 3차원 위성 네트워크 환경에서 통신 성능을 극대화 할 수 있음을 보인다.

IV. 결론

본 논문에서는 다중 저궤도 위성 네트워크에서 협력 빔포커싱을 활용한 위치 분할 다중접속 기술을 제안하였다. 지구의 곡률과 위성 궤도를 반영한 현실적인 위성 통신 환경을 기반으로 위성-사용자 채널을 모델링하였으며, 위성 간 거리 증가로 인해 형성되는 확장된 가상 개구면의 크기가 빔 포커싱 기반 위치 분할 다중접속 기술 구현을 가능하게 함을 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 제안된 기술은 지상 및 공중 사용자가 혼재된 3차원 위성 네트워크 환경에서 인접 사용자 간 간섭을 효과적으로 제어함으로써, 차세대 저궤도 위성 네트워크의 통신 성능을 극대화할 수 있는 핵심적 기술적 기반이 될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] S. Kim, *et al.*, "Cell-free massive non-terrestrial networks" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 43, no. 1, pp. 201-217, 2025.
- [5] Z. Wu and L. Dai, "Multiple access for near-field communications: SDMA of LDMA?" *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 6, pp. 1918-1935, 2025.