

도플러와 빔편이 현상 활용한 대규모 군집 저궤도 위성 탐색 기법

박주하, 고흥석, 신원재

고려대학교 전기전자공학부

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

One-Shot Satellite Acquisition for 6G LEO Mega Constellations: Harnessing Doppler and Beam Squint Effects

Juha Park, Hyungseok Ko, and Wonjae Shin

School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

저궤도 위성 통신에서는 극심한 경로 손실을 극복하기 위해 배열안테나 기반의 고 이득 펜슬 빔포밍이 필수적이며, 이를 위해서는 정확한 위성 위치 획득이 요구된다. 기존의 위성 위치 획득 기술은 순차적 수신 빔 스위핑에 의존하기에 큰 오버헤드를 초래한다. 특히, 저궤도 위성 통신에서는 빈번한 핸드오버와 데이터 전송 중에도 지속적인 위성 위치 획득이 필요하기에 이러한 오버헤드 문제가 악화되며 반드시 해결해야 한다. 본 논문에서는 기존에는 저궤도 위성 통신 시스템의 성능 악화 요소로 여겨져왔던 도플러 현상과 빔 편이 현상을 바라보는 관점을 전환하고 두 효과를 역으로 활용함으로써 효율적으로 위성 위치를 획득하는 기법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해, 제안하는 기법이 단일 타임슬롯만으로 다수의 위성 위치를 동시에 추정할 수 있어 기존 기법 대비 획기적인 오버헤드 개선이 가능함을 확인한다.

I. 연구 배경 및 목적

최근 재사용 가능한 로켓 개발과 이에 따른 위성 발사 비용 저감으로 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 위성 통신이 큰 주목을 받고 있다. 수 천, 수 만 대의 위성을 사용하는 대규모 군집 저궤도 위성(LEO Mega Constellation)을 통해 기하급수적으로 증가하는 사물 인터넷(Internet of Things, IoT) 등 지상 단말들에 서비스를 제공하는 초연결성(massive connectivity)을 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 저궤도 위성통신에서는 극심한 경로 손실을 극복하기 위해 배열안테나 기반의 고 이득 아날로그 빔포밍(Beamforming, BF)이 필수 불가결한 요소 기술이다. 이때, 정밀한 위성의 위치 획득이 필요하다. 위성의 위치 탐색은 초기 접속 단계 뿐 아니라, 핸드오버나 의도치 않은 연결 손실(link failure)가 발생했을 시에도 필요하다. 기존에는 수신 빔 방향을 시간에 따라 순차적으로 전환하는 빔 스위핑으로 위성에서 송신된 파일럿 신호를 수신하고 수신 전력을 통해 위성의 위치를 추정했다. 하지만, 이 경우 순차적으로 시야각(Field of View, FoV) 내 모든 각도를 탐색해야 하기에 오버헤드가 큰 발생한다. 따라서, 유연한 seamless 위성 통신을 위해서는 보다 효율적인 위성 획득 기술이 필요하다.

저궤도 위성통신에서는 총알 속도(소총 기준 약 900 m/s)의 약 8배에 달하는 위성의 빠른 이동속력(약 7,500 m/s) 때문에 극심한 도플러 천이가 발생한다. 이에 더불어, 높은 경로 손실 극복을 위해 배열 안테나 기반의 아날로그 빔포밍을 사용할 시 신호 주파수에 따라 빔의 방향이 틀어져 빔포밍 성능의 열화를 야기하는 빔 편이 현상(beam-squint effect)이 발생한다 [1]. 기존 연구들은 도플러 천이와 빔편이 현상을 보상 혹은 제어함으로써 성능 열화를 최소화 하는 데 초점을 맞춰왔다.

본 논문에서는, 기존에는 성능 악화 요인으로 여겨져왔던 도플러 천이와 빔 편이를 바라보는 관점을 보상의 대상에서 활용의 대상으로 전환한다. 구체적으로, 두 현상을 활용하여 단일 타임슬롯만으로 다수의 위성 위치를 동시에 획득할 수 있는 기술을 제안한다. 이를 위해, 신호의 지연을 부과하는 실시간 지연(True Time Delay, TTD) 소자와 위상 천이기(Phase Shifter, PS)를 동시에 활용하는 JPTA (Joint Phase-Time Array)를 사용하여 빔 편이 현상으로 인한 빔 각도의 편이를 design criterion에 따라

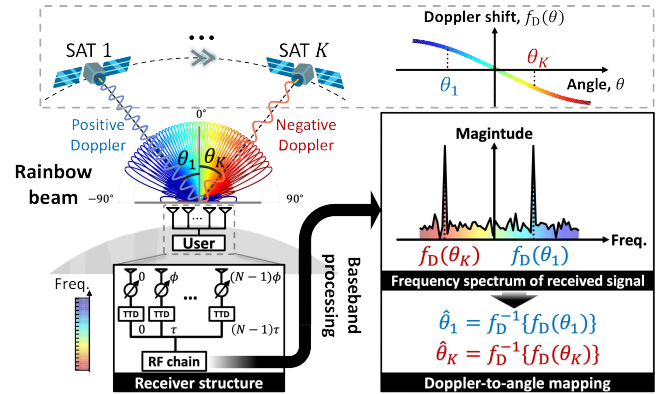


그림 1 제안하는 레인보우 빔포밍 기반 원샷 위성 획득 시스템

최적화한다 [2]. 이때, 다수의 위성에서 서로 다른 도플러 천이를 겪고 다른 각도로 수신되는 신호를 동시에 증폭할 수 있도록 도플러 천이 주파수와 그에 따른 주파수-종속적 빔 방향을 매칭시킨다. 이후, 증폭 수신된 신호를 통해 위성 각도를 추정할 수 있는 다양한 알고리즘을 소개한다.

II. 시스템 모델

그림 1과 같이 균일 선형 배열 안테나(Uniform Linear Array, ULA) 구조의 단일 Radio Frequency (RF)-chain 사용자 단말을 고려한다. 이때, 각 안테나 소자는 각각 1 개의 PS, TTD와 연결 되어 있으며, n 번째 안테나에 해당하는 위상 천이 값과 시간 지연 값은 각각 $(n-1)\phi$, $(n-1)\tau$ 이다. 중심주파수는 f_c 이다. 사용자 단말과 연결 가능한 위성의 최소 고도 각(minimum elevation angle)은 β 이며, 사용자 단말의 시야각 (FoV)은 $\Psi = [-\pi/2 + \beta, \pi/2 - \beta]$ 로 정의한다. 시야각 내 K 대의 위성이 single-tone 파일럿 신호를 f_p 주파수로 송신하고 지상 단말에서 동시에 수신된다. 사용자 단말 기준 k 번째 위성의 각도는 θ_k 이며, 특정 타임슬롯에서 사용자 단말이 수신한 신호의 Analog-to-Digital Converter (ADC)의 출력은 다음과 같이 모델링 된다.

$$y[l] = \sum_{k=1}^K g_k \mathbf{w}^H(f_p + f_D(\theta_k), \tau, \phi) \mathbf{a}(f_p + f_D(\theta_k), \theta_k) \times x_k e^{j2\pi f_D(\theta_k)l/f_s} + z[l] \quad (1)$$

이때, $g_k, \mathbf{a}(f, \theta), x_k, f_D(\theta_k), f_s, z[l]$ 은 각각 복소 채널 이득, 주파수-종속적 수신 안테나 조향 벡터, 파일럿 심볼, 도플러 주파수, 샘플링 주파수, 백색 가우시안 잡음이다. 잡음의 평균 전력은 σ^2 이다. $l \in \{1, \dots, L\}$ 은 샘플 인덱스, $\mathbf{w}(f, \tau, \phi) = [1, e^{j(\phi - 2\pi f\tau)}, \dots, e^{j(N-1)(\phi - 2\pi f\tau)}]^H$ 는 JPTA 수신 빔포밍 벡터이다.

III. 빔포밍 설계 및 위성 각도 추정 알고리즘

우선, 위성의 각도에 상관없이 다중 위성으로부터 수신되는 신호를 동시에 증폭할 수 있는 빔포머를 설계해야한다. 이 문제는 모든 $\theta \in \Psi$ 에 대해 최대 빔포밍 이득을 달성, 즉

$$|\mathbf{w}^H(f_p + f_D(\theta_k), \tau, \phi) \mathbf{a}(f_p + f_D(\theta_k), \theta_k)|^2 / N = N, \theta \in \Psi \quad (2)$$

을 만족하는 τ, ϕ 값을 찾는 문제로 귀결된다. 이는 무한히 많은 equality constraints를 포함하는 feasibility problem이다. 수학적 근사를 통해 해당 문제의 닫힌 형태의 빔포머 해를 구할 수 있으며, 자세한 유도과정과 해는 논문의 분량 제한 상 생략한다.

이후, 증폭된 신호를 통해 위성의 각도를 추정해야 한다. 그림 1에서와 같이, 위성의 각도에 따라 수신 신호가 겪는 도플러 천이가 상이하므로 도플러 주파수를 추정함으로써 각도를 추정할 수 있다. 이를 위해, Fast Fourier Transform (FFT)를 통해 낮은 복잡도로 수신 신호의 주파수 스펙트럼을 구한 뒤 peak detection을 통해 다수 위성의 도플러 천이를 찾아내고, 도플러-위성 각도 매핑을 통해 위성 각도의 추정이 가능하다. 하지만, FFT 결과의 각 bin 간의 resolution이 f_s/L 로 제한되기에 높은 정밀도의 달성을 위해서는 매우 많은 수의 샘플이 필요하다. FFT 기반 추정보다 높은 추정 정밀도를 위해서, 최대 우도 추정기(Maximum Likelihood Estimator, MLE)를 활용할 수 있다. 하지만 이 경우 우도 함수를 최대화하는 각도를 완전 탐색 혹은 gradient descent등의 기법을 통해 수치해석적으로 찾아야 하기에 복잡도가 높아질 수 있는 단점이 있다. 마지막으로, MLE보다 낮은 복잡도로 FFT 기반 추정보다 높은 추정 정밀도를 달성할 수 있는 root-Multiple Signal Classification (root-MUSIC) 알고리즘을 사용할 수 있다. 이 경우, 단일 타임슬롯 수신신호의 공분산 행렬이 rank-1으로 제한되어 신호와 잡음 부공간을 통한 다중 위성 각도 추정이 어렵기에 spatial smoothing과 같이 rank-deficient 문제를 해결할 수 있는 추가적인 신호처리 과정이 필요하다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 결론

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 레인보우 빔포밍 기반 위성 획득 기술의 성능을 평가한다. 64개의 안테나 소자를 고려하였다. 그림 2는 단일 위성, 단일 타임슬롯 상황에서 제안하는 기술의 성능을 다양한 알고리즘에 대해 평가한 결과이다. CRB (Cramer-Rao Bound)는 추정이론적 성능 한계이며, MLE, root-MUSIC, FFT 순서로 높은 정밀도를 보이며 추정 정확도와 알고리즘 복잡도 간의 trade-off를 보여준다.

그림 3은 다중 위성, 다중 타임슬롯의 추정 성능을 기존 빔 스위핑 기반

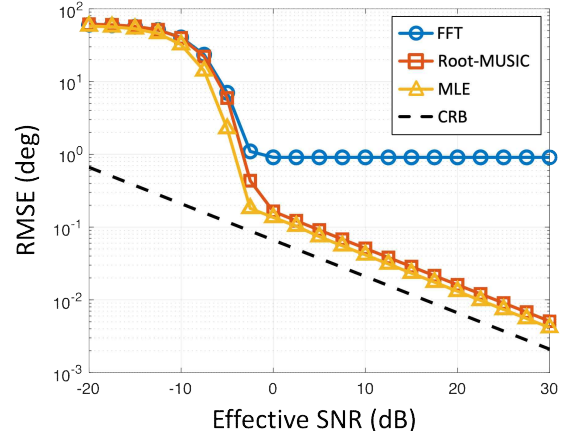


그림 2. 단일 위성, 단일 타임슬롯 추정 성능 결과

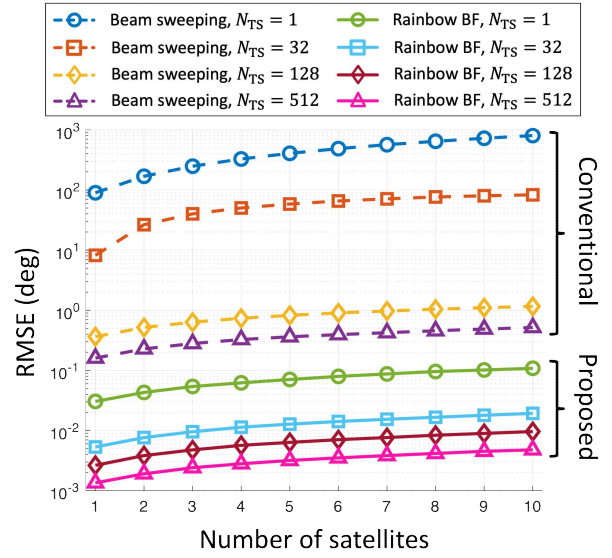


그림 3. 다중 위성, 다중 타임슬롯 추정 성능 결과. N_{TS} 는 총 타임슬롯 개수를 의미함.

추정 성능과 비교한 것이다. 제안하는 기술의 경우 root-MUSIC이 사용되었다. 제안하는 레인보우 빔포밍이 단일 타임슬롯만으로도 다중 위성 탐지를 성공적으로 수행하며 심지어 512개의 타임슬롯을 사용한 기존 빔 스위핑보다 항상 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

결론적으로, 제안하는 기술이 위성 위치 획득으로 인한 오버헤드를 기존 기술 대비 획기적으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 본 논문에서 제안하는 기술이 6G 대규모 군집 저궤도 위성 네트워크의 통신 안정성 개선에 중요한 기술적 주춧돌이 될 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 삼성전자미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호 SRFC-IT2402-01)

참고 문헌

- [1] L. Dai *et al.*, "Delay-phase precoding for wideband THz massive MIMO," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 9, pp. 7271-7286, Sep, 2022.
- [2] V. V. Ratnam *et al.*, "Joint phase-time arrays: A paradigm for frequency-dependent analog beamforming in 6G," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 73364-73377, Jul, 2022.