

고정 빔을 이용한 전처리 기술을 통한 위성통신 시스템 설계

김세용, 박정훈*
연세대학교

sykim@yonsei.ac.kr, *Jhpark@yonsei.ac.kr

Satellite Communication System Design via Fixed-Beam Precoding Technique

Kim Se Yong, Park Jeong Hun*
Yonsei Univ.

요 약

위성 통신 시스템은 대규모 다중입력·다중출력 기술을 통해 높은 데이터 전송률을 달성할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 이를 구현하기 위해서는 지상 사용자의 채널 상태 정보를 얻는 데 많은 추가 자원이 필요하며, 현실적으로 이를 획득하는 것은 매우 어렵다. 이에 본 논문에서는 채널 상태 정보 없이 위성이 미리 정해진 다수의 고정 빔을 형성한 후, 각 빔마다 적합한 사용자를 선택하는 방식을 고려하였다. 또한, 이 방법을 바탕으로 대규모 안테나를 활용해 각 빔의 폭을 좁힘으로써 빔 간 간섭을 효율적으로 감소시킬 수 있음을 제안하였다. 지상 사용자의 위치는 포아송 점 과정을 이용해 모델링하였으며, 제안한 고정 빔 기반 위성 시스템의 성능을 엄밀히 분석하였다. 특히, 사용자 밀도와 빔의 개수 및 안테나의 개수가 증가할 때의 점근적 성능 특성을 상세히 조사하였다. 본 분석 결과는 대규모 안테나를 활용한 고정 빔 위성 시스템 설계에 중요한 설계 지침을 제공한다. 구체적으로, 사용자 밀도가 안테나 개수와 일정한 거듭제곱 비율로 증가하는 경우 고정 빔 방식은 점근적인 환경에서 이상적인 전송률의 일정 비율을 달성할 수 있음을 확인하였다.

I. 서 론

비디오 스트리밍 및 멀티미디어 콘텐츠와 같은 고속 위성 통신 서비스는 주파수 자원의 효율적 활용을 위해 전 주파수 재사용이 필수적이다[1]. 기존 위성 다중 빔 시스템에서는 인접 빔 간의 간섭을 최소화하기 위해 제한적인 주파수 재사용 전략을 사용해 왔다. 최근 이를 극복하기 위해 다중입력·다중출력 기술이 차세대 위성 통신 기술로 주목받고 있으며, 특히 전 주파수 재사용을 가능하게 하는 핵심 기술로 부상하고 있다. 이러한 다중입력·다중출력 기반의 위성 시스템에서는 인접 빔 간의 간섭을 제어하는 전처리 설계가 필수적이며, 이를 위해 정확한 사용자 채널 상태 정보가 요구된다. 그러나 위성과 사용자 사이의 거리가 매우 멀어 정확한 채널 상태 정보를 얻기 어렵고, 불완전한 정보는 시스템 성능 저하로 이어진다[2]. 또한 위성 탑재 하드웨어의 제한적인 계산 능력으로 인해 복잡한 전처리 연산의 구현에도 한계가 있다.

본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고 데이터 전송 성능을 높이기 위해, 위성에서 고정된 빔을 우선 형성한 후 간섭 제어가 용이한 사용자를 선별하는 방식을 제안한다. 기존의 연구[3], [4]들은 주로 저궤도 위성

네트워크에서 위성 위치를 포아송 점 과정으로 모델링하여 분석하였다. 하지만 정지궤도 위성은 지구 자전 속도와 동일하게 움직이기 때문에 사용자 입장에서는 위치가 고정되어 있으므로, 사용자 위치를 포아송 점 과정으로 모델링하는 것이 보다 현실적이다[5]. 본 논문은 이러한 사용자 위치 모델링을 바탕으로 대규모 다중입력·다중출력 환경에서 시스템 성능과 특성을 정량적으로 이해할 수 있는 점근적 스케일링 법칙을 분석하여 제시한다.

II. 본론

본 논문에서는 고정 빔을 이용한 정지궤도 위성 하향링크 통신 시스템을 고려한다. 위성은 균일 평면 배열 안테나를 장착하고 있으며, 전체 안테나 개수는 M^2 개이다. 위성은 단일 빔을 형성하여 각 빔마다 단일 안테나를 가진 K 명의 사용자를 서비스한다. 빔은 반경 r 을 가지는 원형 커버리지 영역에 신호를 전달하며, 각

커버리지 영역 내의 지상 사용자들은 균질한 포아송 점 과정에 따라 밀도 λ 로 공간적으로 분포한다. 따라서 각 커버리지 영역의 평균 사용자 수는 $\lambda\pi r^2$ 명이 된다. 사용자 i 의 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$h_i = \sqrt{L_i}Mv_i \in \mathbb{C}^{M^2 \times 1}.$$

여기서 L_i 는 대규모 페이딩 성분이며, v_i 는 균일 평면 배열 안테나에 따른 벡터이다. 우리는 사용자를 선택하기 위해 커버리지 영역 내의 위치 정보를 기반으로, 빔으로부터 가장 가까운 사용자를 선택하는 방식을 고려한다. 이러한 시스템 모델을 바탕으로, 고정 빔의 성능은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_1 = \mathbb{E}[\log(1 + PL_1M^2f(r, \phi))].$$

여기서 P 는 유효 신호 대 잡음 비이며, $f(r, \phi) = |h_1^H f_1|$ 으로 여기서 f_1 은 첫번째 고정 빔을 나타낸다. 우리는 일반성을 유지한 채 첫번째 고정 빔에 대해 선택된 유저의 인덱스를 1로 나타낸다. 이를 기반으로 유저 1의 성능을 분석하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

정리 1. 임의로 작은 $\epsilon > 0$ 에 대해, $p \in (0, 1)$ 을 만족하면서 $q \in (p + 1 + \frac{\epsilon}{2}, 2 + \frac{\epsilon}{2})$ 로 설정하고, 사용자 밀도가 $\lambda \sim M^q$ 를 따를 때, 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\log M^{2(q-1-\epsilon)} < R_1 < \log M^{2(q-1+\epsilon)}.$$

주어진 정리 1을 통해 정리 2를 유도할 수 있다. 자세한 유도 과정은 [6]을 참고할 수 있다.

정리 2. 임의로 작은 $\epsilon > 0$ 에 대해, $p \in (0, 1)$ 을 만족하면서 $q \in (p + 1 + \frac{\epsilon}{2}, 2 + \frac{\epsilon}{2})$ 로 설정하고, 사용자 밀도가 $\lambda \sim M^q$ 를 따를 때, 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{R_1}{\mathbb{E}[\log(1 + PL_1M^2)]} = q - 1.$$

여기서 $\mathbb{E}[\log(1 + PL_1M^2)]$ 는 빔의 중심과 사용자의 위치가 완벽하게 일치하여 빔 이득이 최대값인 1을 달성했을 때 이상적 에르고딕 전송률을 나타낸다. 이를 위해서는 선택된 사용자의 채널 상태 정보를 완벽히 알고 이를 기반으로 프리코딩 벡터를 채널에 맞게 정렬해야 한다. 하지만 본 연구에서 제안한 위치 기반의 사용자 선택 방식의 고정 빔 프리코딩 기법은 일정 수준의 사용자 밀도 아래에서 이러한 이상적 전송률과 일정한 비율을 달성할 수 있음을 보여주고 있다.

III. 결론

본 논문에서는 대규모 다중입력·다중출력 기반의 고정 빔 통신 시스템에서 위치 기반 사용자 선택과 결합한 고정 빔 프리코딩 방식을 고려하였다. 이를 바탕으로 지상 사용자의 밀도와 안테나의 개수 및 빔의 수가 증가하는 점근적 영역에서 시스템의 성능 분석을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 주요 결과는 사용자 밀도가 안테나 개수와 동일한 비율로 증가할 때 고정 빔 프리코딩 방식이 단일 빔 환경에서 최적의 성능을 달성할 수 있다는 점이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Samsung Research Funding & Incubation Center of Samsung Electronics under Project Number SRFC-IT2402-06.

참 고 문 헌

- [1] Vázquez, Miguel Ángel, et al. "Precoding in multibeam satellite communications: Present and future challenges." IEEE Wireless Communications 23.6 (2016): 88–95.
- [2] J. Park, N. Lee, J. G. Andrews and R. W. Heath, "On the Optimal Feedback Rate in Interference-Limited Multi-Antenna Cellular Systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 15, no. 8, pp. 5748–5762, Aug. 2016, doi: 10.1109/TWC.2016.2569089.
- [3] D. Kim, J. Park and N. Lee, "Coverage Analysis of Dynamic Coordinated Beamforming for LEO Satellite Downlink Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 9, pp. 12239–12255, Sept. 2024, doi: 10.1109/TWC.2024.3389101.
- [4] J. Park, J. Choi and N. Lee, "A Tractable Approach to Coverage Analysis in Downlink Satellite Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 2, pp. 793–807, Feb. 2023, doi: 10.1109/TWC.2022.3198103.
- [5] Na, Dong-Hyoun, et al. "Performance analysis of satellite communication systems with randomly located ground users." IEEE Transactions on Wireless Communications 21.1 (2021): 621–634.
- [6] Kim, Seyong, et al. "Multibeam Satellite Communications with Massive MIMO: Asymptotic Performance Analysis and Design Insights." arXiv preprint arXiv:2407.10461 (2024).