

저궤도 위성통신을 위한 빔포밍 기술 연구 동향

신예진, 최희주, 이충녕, 채승호*

한국공학대학교

{syy4622, babybird, lc9902130509, shchae}@tukorea.ac.kr

Research Trends on Beamforming Techniques for LEO Satellite Communication

Yejin Shin, Heeju Choi, Chungnyeong Lee, Seong Ho Chae*

Tech University of Korea

요약

6G 이동통신 시스템에서 전 세계적인 커버리지와 안정적인 무선 서비스를 제공하기 위한 방안으로 위성통신이 많은 관심을 받고 있으며, 특히 최근 저궤도(Low Earth Orbit: LEO) 위성 통신에 빔포밍(Beamforming) 기술 적용 연구가 활발히 수행되고 있다. 본 논문은 LEO 위성통신에서 제안된 다양한 빔포밍 기법들을 아날로그, 디지털, 하이브리드로 분류하여 비교 분석하고 최신 연구 동향을 살펴본다.

I. 서론

6G 이동통신에서 전 세계적인 커버리지와 안정적인 무선 서비스를 제공하기 위한 방안으로 위성통신이 많은 관심을 받고 있다[1]. 특히, 저궤도 위성(LEO: Low Earth Orbit)이 다른 궤도 위성군(정지궤도, 중궤도) 대비 상대적으로 작은 전파 지연과 경로 손실 등의 이점으로 많은 관심을 받고 있으며, 저궤도 위성통신의 핸드오버, 채널추정, 커버리지 분석 등 다양한 연구들이 활발히 수행되고 있다[2],[3]. 최근, LEO 위성 통신에서의 다양한 빔포밍(Beamforming) 기법들이 제안되었다[4]-[9]. 본 논문에서는 제안된 LEO 위성을 위한 빔포밍 기술들을 아날로그, 디지털, 하이브리드 빔포밍 기법으로 분류하여 비교 분석하고, 최신 연구 동향을 살펴본다.

II. 본론

그림 1은 LEO 위성통신에서 고려하고 있는 아날로그 빔포밍, 디지털 빔포밍, 하이브리드 빔포밍 개요를 보여준다. 빔포밍 수행을 위해서는 각 안테나에 대해 제어 가능한 RF(Radio Frequency) Chain이 필요하며, 매칭 형태에 따라 크게 3가지 형태로 구분된다. 아날로그 빔포밍은 여러 개의 안테나가 하나의 RF Chain에 연결되는 반면, 디지털 빔포밍은 하나의 RF chain에 하나의 안테나가 각각 연결된다. 아날로그 빔포밍은 위상 천이기(Phase Shifter)를 통해 신호의 위상만을 조절할 수 있지만, 디지털 빔포밍은 기저대역에서 신호의 위상과 진폭을 디지털 신호 처리하여 조절하는 방식이다. 이에 따라 아날로그 빔포밍은 특정 방향으로만 단일 빔 (beam)이 집중되고 디지털 빔포밍은 다중 빔이 동시에 여러 방향으로 집중된다. 따라서 아날로그 빔포밍은 시스템 구현이 간단하고 낮은 전력 소비와 비용이 적게 드는 반면, 디지털 빔포밍은 시스템 구현이 복잡하고 높은 전력 소비와 비용이 많이 든다[10]. 하이브리드 빔포밍은 이런 아날로그 빔포밍과 디지털 빔포밍을 결합한 기술로써 기저대역에서 채널 상태 정보를 기반으로 디지털 신호 처리 후 RF Chain을 거쳐 빔이 형성되는 방식이다. 따라서 하이브리드 빔포밍은 디지털 빔포밍과 아날로그 빔포밍의 이득을 가지면서 효율적인 빔포밍을 가능하게 한다.

본 논문에서는 제안된 LEO 위성통신을 위한 빔포밍 기법들을 아날로그 빔포밍, 디지털 빔포밍, 하이브리드 빔포밍으로 구분하여 비교 분석하

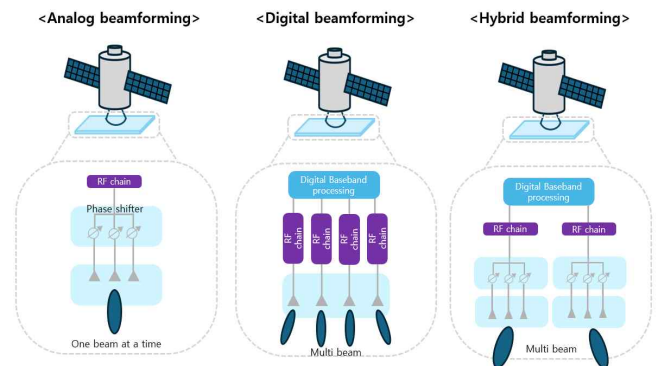


그림 1. LEO 위성에서의 빔포밍 시스템 구성

고, 최신 연구 동향을 살펴본다.

A. LEO 위성통신을 위한 아날로그 빔포밍 기법 [4], [5]

최근, 아날로그 빔포밍 수행을 위한 동적 빔 코드북(Dynamic Beam Codebook) 설계 연구가 수행되었다[4]. DFT(Discrete Fourier Transform) 타입의 빔 코드북은 미리 정의되어 있어 지속적으로 이동하는 위성 and 지상의 사용자들로 인해 빔 간 핸드오버가 빈번히 발생한다. 문헌 [4]에서는 특정 지역의 해상도 조절이 가능한 코드북 설계를 통해, LEO 위성이 특정 사용자 서비스 동안 안정된 빔포밍 이득을 유지할 수 있음을 보였다. 문헌 [5]에서는 저해상도 위상 천이기를 사용한 LEO 위성 아날로그 빔포밍 연구가 수행되었다. 저해상도의 위상 천이기는 PAAs(Phased-Array Antennas)에서 스폿 빔(Spot Beam) 생성시 발생하는 전력 소비를 크게 경감시킬수 있다. 문헌 [5]에서는 원하는 방향으로 신호를 최대화하기 위해 Desired Angle Mask Gain 문제를 정의하였고, 저해상도의 ICPM(Iterative Coordinated Phase Matching)알고리즘을 사용하여 최적값을 찾았다. 결과적으로 제안된 방법이 기존의 고해상도 위상 천이기 사용 방법들 대비 비슷한 성능을 가짐을 보여주었다. 아날로그 빔포밍은 다양한 이점에도 불구하고 위상 조절만 가능함에 따라 제어 유연하지 않았다. 따라서, 다음 절에서 위상 및 진폭을 동시에 조절 가능한 디지털 빔포밍 기술 연구 동향을 살펴본다.

B. LEO 위성통신을 위한 디지털 빔포밍 기법 [6], [7]

최근, MU-MIMO(Multiuser Multiple-Input Multiple-Output) 시스템에서 각 사용자 수신 전력을 최대화하고 CCI(Co-Channel Interference)를 최소화하는 SLNR(Signal-to-Leakage-and-Noise Ratio) 기반 디지털 빔포밍 알고리즘이 제안되었다[6]. 문헌 [6]는 제안된 빔포밍 알고리즘을 송신기에서 채널 상태 정보 기반 MMSE(Minimum Mean Square Error) 빔포밍, ZF(Zero-Forcing) 빔포밍, 사용자 위치 기반 MB(Multi-Beam) 빔포밍에 대비 사용자의 SINR 및 스펙트럼 효율의 누적분포함수가 높은 우수한 성능을 보여주었다. 문헌 [7]에서는 LEO 위성통신에서 FFT(Fast Fourier Transform) 기반 디지털 빔포밍의 전력 소비와 칩 면적(Chip Area)이 분석되었다. 문헌 [7]은 빔포밍 구현 방법으로 전력과 칩 면적을 줄이는 FFT 아키텍처를 사용하였으며, 한 개의 입력 샘플을 처리하는 롤(Rolled) 방식의 전통적 FFT, 여러 개의 샘플을 동시에 처리하는 Fully Unrolled 방식 FFT, 4비트 양자화된 TF(Twiddle Factor) FFT의 LUT(Look Up Table)을 추정하고 비교하였다. 이를 여러 위성 시나리오에 적용해 각 FFT 아키텍처의 성능 평가를 통해 4비트 양자화된 FFT 아키텍처가 더 적은 면적을 차지하고 더 적은 전력을 소비하는 것을 보여주었다. 디지털 빔포밍은 디지털 신호 처리를 통해 진폭을 조절할 수 있지만, RF Chain과 안테나가 각각 연결되어야 하는 시스템 복잡성과 비용 문제가 있다. 다음 절에서는 하이브리드 빔포밍 기술에 대한 연구 동향을 살펴본다.

C. LEO 위성통신을 위한 하이브리드 빔포밍 기법 [8], [9]

최근, Massive MIMO 시스템서 안테나 수가 증가함에 따라 RF Chain의 수를 일치시켜야 하는 시스템의 복잡성을 극복하고자, LEO 위성에서 하이브리드 빔포밍을 수행하는 연구가 진행되었다[8]. 위성통신에서는 채널 상태 정보 획득에 있어 TDD(Time Division Duplex) 시스템에서의 채널 상호성 수립 문제와 FDD(Frequency Devision Duplex) 시스템에서 높은 오버헤드 문제가 있다. 문헌 [8]은 DL(Deep Learning) 기반으로 상향 링크(Up Link) 채널 상태 정보를 통해 하향 링크(Down Link) 채널 상태 정보를 예측하는 SatCP방법과 예측한 하향 링크 채널 상태 정보를 통해 해당 빔포머를 얻는 SatHB방법을 제안하였다. SatCP 방법은 NMSE(Normalized Mean-Square Error)값이 낮아 예측 정확도가 높고, SatHB는 획득 가능한 전송률 합 성능이 우수함을 보여주었다. 문헌 [9]에서는 빔 호핑(Beam Hopping) 기간 동안 전체 빔 위치의 총 전송률을 최대화하기 위한 빔포밍과 일루미네이션 패턴의 결합 최적화 방법을 제안하였다. 하이브리드 빔포밍의 Joint BIP(Beamforming and Illumination Pattern)문제에서 Non-Convex 문제를 해결하기 위해 하이브리드 빔포밍을 디지털 빔포밍으로 대체하여 무작위 탐색과 FP(Fractional Programming) 방법을 이용해 최적의 일루미네이션 패턴을 도출하였다. 설계된 일루미네이션 패턴을 기반으로 SM-HBF 방법을 이용해 아날로그 빔포머와 함께 디지털 빔포머를 최적화하였고, 제안된 방법의 총 전송률 성능의 우수성을 보였다.

III. 결론

본 논문에서는 LEO 위성을 위한 빔포밍 연구들을 아날로그, 디지털, 하이브리드 빔포밍으로 분류하여 최신 연구 동향을 비교 분석하였다. 향후, 다계층 위성군(중궤도, 정지궤도 위성) 및 지상 기지국 통합 환경에서 커버리지 및 빔포밍 이득 최적화를 위한 빔포밍 연구와 지연 시간에 따른 불안정한 채널 정보 기반 빔포밍에 대한 추가 연구가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (21-106-A00-007, 우주계층 지능통신망 특화 연구실)

참고 문헌

- [1] G. Kim, S. Lee, H. Lim, B. C. Jung, and S. H. Chae, "Coverage Probability Analysis of LEO Satellite Communication Systems With Directional Beamforming," in *Proc. 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 243-247, Jul. 2023.
- [2] S. H. Chae, H. Lim, H. Lee, and B. C. Jung, "Performance analysis of dense low earth orbit satellite communication networks with stochastic geometry," *Journal of Commun. and Netw.*, vol. 25, no. 2, pp. 208-221, Apr. 2023.
- [3] M. J. Kang, J. H. Lee, and S. H. Chae, "Channel estimation with DnCNN in massive MISO LEO satellite systems," in *Proc. 2023 Fourteenth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN)*, pp. 825-827, Jul. 2023.
- [4] J. Palacios, N. González-Prelcic, C. Mosquera and T. Shimizu, "A dynamic codebook design for analog beamforming in MIMO LEO satellite communications," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Commun. (ICC)*, 2022.
- [5] T. Shi, R. Liu, S. Sun, S. Kang and Y. Zheng, "Angle-based multicast analog beamforming with low resolution phase shifters for LEO satellite communications," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 28, no. 2, pp. 352-356, Feb. 2024.
- [6] M. R. Dakkak, D. G. Riviello, A. Guidotti and A. Vanelli-Coralli, "Evaluation of MU-MIMO digital beamforming algorithms in B5G/6G LEO satellite systems," in *Proc. 11th Advanced Satellite Multimedia Systems Conf. and the 17th Signal Processing for Space Commun. Wkshop*, 2022.
- [7] R. Palisetty et al., "Area-power analysis of FFT based digital beamforming for GEO, MEO, and LEO scenarios," in *Proc. IEEE 95th Vehi. Tech. Conf (VTC)*, 2022.
- [8] Y. Zhang, A. Liu, P. Li and S. Jiang, "Deep learning (DL)-based channel prediction and hybrid beamforming for LEO satellite massive MIMO system," *IEEE Int. of Things Journal*, vol. 9, no. 23, pp. 23705-23715, Dec. 2022.
- [9] J. Wang, C. Qi and S. Yu, "Hybrid beamforming design for beam-hopping LEO satellite communications," in *Proc. IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, 2023.
- [10] I. Ahmed et al., "A survey on hybrid beamforming techniques in 5G: Architecture and system model perspectives," *IEEE Commun. Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3060-3097, Fourthquarter 2018.