

6G 저궤도 위성통신을 위한 3 차원 레인보우 빔포밍 알고리즘

박주하, 고형석, 신원재
고려대학교 전기전자공학부
{juha, hsko99, wjshin}@korea.ac.kr

3D Rainbow Beamforming Algorithm for 6G LEO Satellite Communications

Juha Park, Hyungseok Ko, and Wonjae Shin
School of Electrical Engineering, Korea University

요약

저궤도 위성통신에서는 높은 경로손실을 극복하기 위한 위상배열 안테나 기반의 아날로그 빔포밍이 필수적이다. 하지만 아날로그 빔포밍 시스템은 Radio Frequency (RF)-chain 개수에 의해 동시 형성 가능한 빔의 개수가 제한되는 한계를 가진다. 또한, 고 전송률 달성을 위해 넓은 대역폭을 사용하여 신호전송을 수행할 경우 주파수에 따라 빔 방향에 편이가 발생하는 빔 편이 (beam-squint) 현상이 발생한다. 본 논문에서는 기존 아날로그 빔포밍 시스템의 동시 형성 빔 개수 제한을 극복하기 위해 빔 편이 현상을 활용하여 각 주파수 성분에 해당하는 빔의 방향을 사전에 정해진 design criterion에 따라 최적화하는 빔포밍 알고리즘을 제안한다.

I. 연구 배경 및 목적

저궤도 위성통신에서는 큰 경로 손실을 비용 효율적으로 극복할 수 있는 아날로그 빔포밍이 중요하며, 이때 동시 형성 가능한 빔의 수가 Radio Frequency (RF)-chain의 개수에 의해 제한되는 한계가 존재한다. 한 위성이 넓은 지역에 분포한 다수 사용자 단말을 서비스 해야 하는 위성 네트워크의 특성을 고려하면, 이러한 한계는 다중 접속의 기술적 어려움을 야기한다. 또한, 신호 주파수에 따라 빔의 방향에 편이가 발생하여 빔포밍 성능 열화를 야기하는 빔 편이 현상 (beam-squint effect)이 존재하기에 안정적인 통신 링크 유지를 위해서는 빔 편이 현상을 반드시 해결해야 하며 기존에는 이러한 현상을 보상하기 위한 연구가 주로 수행되어왔다 [1].

본 논문에서는, 기존 아날로그 빔포밍 시스템의 제한된 동시 형성 빔 개수를 극복하기 위해 빔 편이 현상을 보상하는 것이 아닌 활용한다. 구체적으로, 각 부반송파(subcarrier) 주파수에 해당하는 빔의 방향을 사전에 정해진 주파수-방향 매핑을 기반으로 원하는 방향을 향하도록 최적화하는 주파수-종속적 레인보우 빔포밍 알고리즘을 제안한다.

II. 시스템 모델과 레인보우 빔포밍 최적화

저궤도 위성통신의 3 차원 기하 특성을 고려하여 등 간격 사각형 배열 (Uniform Rectangular Array, URA) 안테나를 가정한다. 각 안테나는 독립적인 위상 천이기(Phase Shifter, PS), 실시간 지연소자(True Time Delay, TTD)와 연결되며, 각 안테나의 위상 천이 값과 시간 지연 값을 최적화하여 주파수-종속적인 레인보우 빔의 형성이 가능하다. 총 M 개의 부반송파를 가정하며 각 부반송파는 $m \in \{1, \dots, M\}$ 으로 표현된다. 이때, 레인보우 빔포밍 최적화 문제를 수학적으로 다음과 같이 표현한다.

$$\underset{\alpha, \mathbf{T}, \Phi}{\text{minimize}} \sum_{m=1}^M \|\mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{T}, \Phi) - \alpha^{(m)} \mathbf{a}^{(m)}(u_{\text{des}}^{(m)}, v_{\text{des}}^{(m)})\|^2 \quad (1)$$

$$\text{subject to } \tau^{(n_x, n_y)} \in [0, \tau^{\max}], \phi^{(n_x, n_y)} \in [0, 2\pi], \forall n_x, n_y \quad (2)$$

$$|\alpha^{(m)}| = 1, \forall m \quad (3)$$

이때, \mathbf{T}, Φ 는 각각 시간 지연값과 위상 천이값을 표현하는 행렬이고 (n_x, n_y) 번째 안테나 소자에 해당하는 값을 각각 $\tau^{(n_x, n_y)}, \phi^{(n_x, n_y)}$ 로 표현하며, 식 (2)에 의해 값의 제한이 존재한다. $\mathbf{w}^{(m)}(\mathbf{T}, \Phi)$ 는 주파수-종속적인

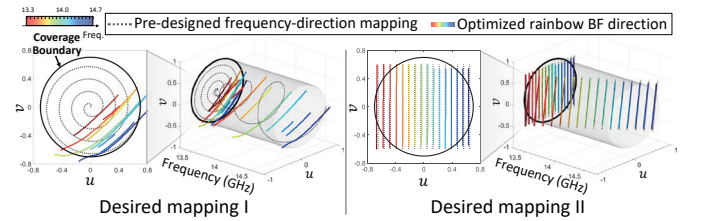


그림 1. 제안하는 최적화 알고리즘으로 얻은 빔포머의 주파수 별 빔 방향

빔포밍 벡터이며, $\alpha^{(m)}$ 는 빔 방향과 이득에 영향을 미치지 않는 unit-modulus coefficient, $\mathbf{a}^{(m)}(u_{\text{des}}^{(m)}, v_{\text{des}}^{(m)})$ 는 $(u_{\text{des}}^{(m)}, v_{\text{des}}^{(m)})$ 방향으로의 조향벡터이다. $(u_{\text{des}}^{(m)}, v_{\text{des}}^{(m)})$ 는 m 번째 부반송파가 향하기를 원하는 방향, 즉 주파수-방향 매핑이며 사전에 디자인 되었다고 가정한다. 해당 최적화 문제는 non-convex 최적화 문제이고, 효율적으로 해결하기 위해 우선 $\alpha^{(m)}$ 값을 임의로 초기화한다. 이후, 목적함수를 수학적으로 변형하여 원래 문제를 각 안테나 소자 별 subproblem으로 분리한다. 이후, 각 안테나 소자 별 최적의 시간지연 및 위상천이 값을 2 차원 완전탐색으로 찾는다. 다음으로, $\alpha^{(m)}$ 의 최적값을 닫힌 형태(closed-form)로 계산한다. 상기한 일련의 과정을 목적함수가 수렴할 때 까지 반복하는 교대 최적화(alternating optimization)로 효율적인 레인보우 빔포밍 파라미터 획득이 가능하다.

III. 시뮬레이션 결과 및 결론

그림 1은 두 가지 주파수-방향 매핑을 기반으로 제안하는 알고리즘을 통해 얻은 주파수-종속적 빔의 방향을 나타낸다. 14 GHz 중심주파수와 1.4 GHz 대역폭을 가정했다. 각 매핑은 순서대로 커버리지 내를 나선형으로, 여러 개의 직선으로 채우는 형태이다. 두 번째 매핑에서 첫 번째 매핑보다 우수한 빔 방향 매칭 성능을 달성했다. 이를 통해, 사전에 디자인 된 주파수-매핑 패턴이 레인보우 빔포밍 성능에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 시뮬레이션 환경에 유연하고 적응적인 주파수-방향 매핑의 설계를 위해 추후 기계학습의 적용이 가능 할 것으로 보인다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 삼성전자미래기술육성센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제번호: SRFC-IT20402-01)

참고 문헌

- [1] L. Dai *et al.*, "Delay-phase precoding for wideband THz massive MIMO," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 21, no. 9, pp. 7271-7286, 2022.