

다중 주파수 대역 위성통신을 위한 최적 위성 빔포밍 설계 기법

이진우, 이남윤
고려대학교

halo123456@korea.ac.kr, namyoon@korea.ac.kr

Multiband Beamforming for Satellite Systems

Jinwoo Lee, Namyoon Lee
Korea Univ.

요약

다중 대역 위성 통신 빔 형성 기법은 고속 데이터 전송 및 다양한 위성 통신 링크를 유지하는 데 필수적인 기술이다. 본 논문에서는 다중대역 위성통신 전송 속도를 최적화 하기 위한 최적 안테나 빔포밍 기술을 제안한다. 제안된 다중 대역 다중 대역 빔 형성 기법은 멀티 빔 형성 효과를 지니고 있다. 실험을 통해 단일 대역 최적 빔 형성 기법 대비 하향링크 전송률이 크게 향상될 수 있음을 보여준다.

I. 서론

최근 기지국 설치가 어려운 산간지역, 바다, 공중 등에서 무선통신을 가능케 하는 스페이스 X의 스타링크(Starlink)와 같은 저궤도 위성(Low Earth Orbit; LEO) 통신이 주목을 받고 있다 [1]. 고속 데이터 전송 및 다양한 위성 통신 링크를 형성하기 위해 S, Ku, K, Ka 등을 포함한 다양한 주파수 대역이 위성통신에서 활용되고 있다. 그러나 한정된 무게와 크기의 위성 요구조건으로 인해 다양한 주파수 대역 별 최적 배열안테나 시스템을 여러 개 사용할 수 없는 한계를 지니고 있다 [2]. 단일 주파수 대역을 사용하는 배열 안테나 빔 형성 최적화 문제 Maximum Ratio Transmission (MRT)을 통해 쉽게 해결할 수 있는 반면, 다중 대역 다중사용자 빔 형성 최적화를 위해서는 새로운 빔포밍 방식의 개발이 필요하다.

본 논문에서는 1) 다중 주파수 대역 및 각도에서의 빔포밍 문제를 동일하게 다루어 다중 대역 및 각도 문제를 단일 대역 문제로 단순화하고, 2) 다중 대역을 활용할 때 빔포밍 문제를 볼록 최적화 문제로 만들어 최적해를 찾는다. 또한, 새로운 빔포밍 방식을 시뮬레이션을 통해 검증하고, 기존 단일 주파수 대역에 최적화된 빔포밍 방식과 비교하여 성능 향상을 확인한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 다중 배열 안테나 위성 통신 시스템을 고려한다. 특히, 위성은 균일한 선형 배열 (Uniform Linear Array; ULA) 안테나를 갖고 있다고 가정한다. 이는 각 안테나들이 동일한 간격을 두고 일직선 상에 배열되어 있음을 의미한다.

또한 위성통신 환경을 가정하기 때문에, 안테나 배열의 크기보다 통신 거리가 매우 큰 원거리장 근사 환경이며, 신호가 모두 line of sight(LOS) 패스를 통해서 들어오는 LOS 채널이다. 따라서, i 번째 사용자가 겪는 채널을 \mathbf{h}_i 라 할 때, 아래와 같이 수식으로 모델된다:

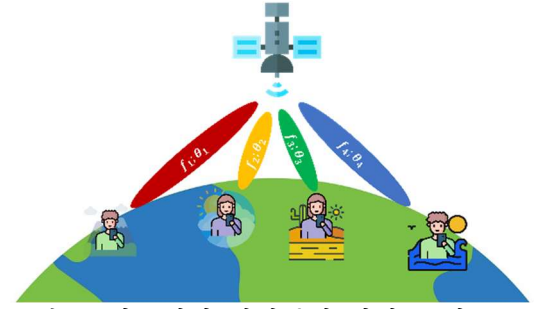


그림 1. 다중대역 위성통신 상황 도식

$$\mathbf{h}_i = \frac{\lambda_i \sqrt{G_r G_t}}{4\pi D_i} \mathbf{a}(\theta_i; f_i) = g_i \mathbf{a}(\theta_i; f_i). \quad (1)$$

수식 (1)에서

$$\mathbf{a}(\theta_i; f_i)^T = \left[1 \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_i} \sin \theta_i} \quad \dots \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_i} (N-1) \sin \theta_i} \right]. \quad (2)$$

는 i 번째 사용자의 ULA 환경에서의 배열 응답 벡터(Array response vector)이고, $\lambda_i, \theta_i, f_i, D_i, N$ 은 순서대로 i 번째 사용자의 통신 파장, 통신 도래각, 통신 주파수, 통신 거리, 안테나의 개수를 의미하고, G_r, G_t 는 각각 수신 및 송신 안테나 이득값을 의미한다.

III. 본론

본 논문의 본론에서는 1) 다중 주파수 대역과 다중 각도 환경에서의 빔포밍 문제가 같음을 증명하고, 2) 빔포밍을 위한 최적화 문제를 정의하고 정의된 제약 조건에서 정의된 최적화 문제를 풀어본다.

III.1. 다중 주파수 대역과 다중 각도

다중 주파수 대역과 다중 각도에서의 빔포밍 문제가 같음을 증명하기 위해서는 배열 응답 벡터의 주파수 요소와 각도 요소가 바뀌었을 때 반대의 요소로 표현할 수 있음을 보이면 된다. 증명 과정은 다음과 같다:

$$\mathbf{a}(\theta'_i; f_i)^T = \left[1 \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda'_i} \sin \theta'_i} \quad \dots \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda'_i} (N-1) \sin \theta'_i} \right] \quad (3)$$

$$= \left[1 \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_i} \frac{\sin \theta'_i}{\sin \theta_i} \sin \theta_i} \quad \dots \quad e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_i} \frac{\sin \theta'_i}{\sin \theta_i} (N-1) \sin \theta_i} \right] \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_i} \sin \theta_i} & \dots & e^{-j\frac{2\pi}{\lambda_i} (N-1) \sin \theta_i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$= \mathbf{a}(\theta_i; f_i'). \quad (6)$$

따라서 다중 주파수 대역 문제와 다중 각도 문제는 서로 치환되어서 풀 수 있다. 따라서 본 논문에서 다중 주파수 대역에서의 최적화 문제를 풀면, 다중 각도와 다중 주파수가 동시에 존재할 때의 빔포밍 문제를 푸는 것과 동일하다.

III.2. 고유 값 분해 기반 빔포밍 최적화

다중 대역 전송률 합을 최대화하기 위한 빔포밍 기법을 제안한다. 다중 대역 전송률의 합은 아래와 같이 표현된다:

$$R = \sum_{i=1}^M \log_2 \left(1 + g_i^2 |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_i; f_i)|^2 SNR \right) \quad (7)$$

$$\approx \sum_{i=1}^M g_i^2 |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_i; f_i)|^2 SNR \quad (8)$$

$$= \sum_{i=1}^M |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_i; f_i)|^2 SNR_i. \quad (9)$$

식 (8)의 근사화는 위성통신은 낮은 SNR 을 갖는 점을 가정하여, $\log_2(1+x) \approx x$ 라는 근사를 사용한 결과이다. 다중 대역 전송률 합을 최적화 하는 문제는 아래 최적화 문제로 귀결된다:

$$\max_{\mathbf{w}} \sum_{i=1}^M |\mathbf{w}^H \mathbf{a}(\theta_i; f_i)|^2 SNR_i \quad (10)$$

$$= \max_{\mathbf{w}} \left\| \mathbf{w}^H \mathbf{A} \right\|_2^2, \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{A} = \sum_{i=1}^M \mathbf{a}(\theta_i; f_i) \mathbf{a}(\theta_i; f_i)^H SNR_i$ 이다. 이때 빔포밍 벡터 \mathbf{w} 의 제한 조건을 추가적으로 고려하면 아래 보록 최적화 기법으로 변환할 수 있다:

$$\max_{\mathbf{w}: \|\mathbf{w}\|_2=1} \left\| \mathbf{w}^H \mathbf{A} \right\|_2^2 = \max_{\mathbf{w}: \|\mathbf{w}\|_2=1} \mathbf{w}^H \mathbf{A} \mathbf{w}. \quad (12)$$

위에 최적화 문제의 최적해는 \mathbf{w} 가 \mathbf{A} 의 고유벡터 중 최대의 고유값의 열에 해당하는 고유벡터가 됨이 자명하다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

시뮬레이션은 제안된 빔포머과 단일 주파수에 맞춘 빔포머 2 가지를 사용해서, 송신 Signal to Noise Ratio(SNR) 대비 주파수 합 효율을 계산한다. 이때, 주파수 대역을 각각 2 개와 4 개 사용할 때, SNR 을 0 부터 1dB 간격으로 20dB 까지 바꿔가며 실험한다. 주파수 대역은 2 개 사용할 때 3GHz, 15GHz 대역을 사용했고, 4 개 사용할 때, 3GHz, 10GHz, 15GHz, 24GHz 대역을 사용했다.

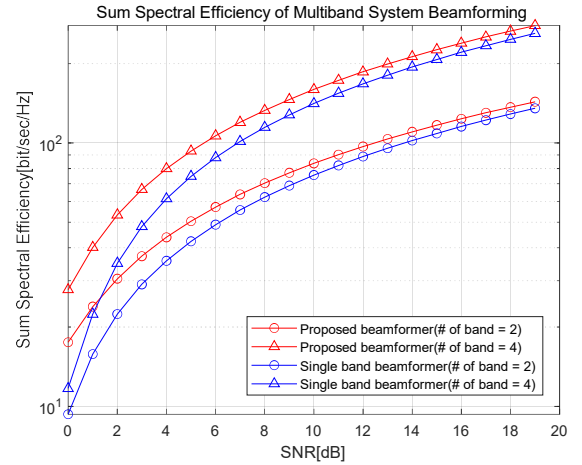


그림 2. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과를 살펴보면, 제안된 빔포밍 기법이 대조군에 비해서 낮은 SNR 영역에서 좋은 성능을 보이는 것이 확인된다. 하지만, 높은 SNR 영역으로 갈수록 성능의 차이가 적어지는데, 이는 앞에서 최적화 문제를 풀 때 (8)에서 사용된 근사로 인한 것으로 예상된다. 제안된 방법의 또 다른 장점은 사용하는 대역의 수가 증가했을 때, 대조군과의 성능 차이가 커진 것으로 확인된다.

V. 결론

본 논문에서는 다중 대역 위성 통신의 전송 속도를 최적화하기 위한 다중 빔 형성 기법을 제안하였다. 제안한 다중 빔 형성 단일 대역 위성 시스템을 위한 빔 형성 기법 대비 하향링크 전송률이 현저히 향상됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. C. McDowell, "The low earth orbit satellite population and impacts of the SpaceX Starlink constellation," *Astrophys. J.*, vol. 892, no. 2, p. L36, Apr. 2020.
- [2] T. K. Y. Lo, "Maximum ratio transmission," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, pp. 1458-1461, Oct. 1999.