

LEO 위성 통신을 위한 시공간 빔포밍 기법

임정빈, 이남윤*

포항공과대학교, *고려대학교

jungbinyim@postech.ac.kr, *namyoon@korea.ac.kr

Space-Time Beamforming Technique for LEO Satellite Communications

Yim Jungbin, Lee Namyoon*

POSTECH, *Korea Univ.

요약

많은 위성으로 구성된 low Earth orbit (LEO) 위성 네트워크는 비슷한 고도의 여러 위성들이 한 커버리지 영역 내의 여러 사용자와 통신하는 경우가 발생하지만 사용자들과 위성들 사이의 방향이 비슷하거나 동일하게 되어 조향 벡터를 구분할 수 없게 된다. 따라서, 사용자와 위성 사이의 방향 정보만으로 빔포밍을 할 경우 높은 간섭으로 인해 전송률 관점에서 성능이 저하된다. 본 논문은 비슷한 위치에 있는 LEO 위성들과 이 위성들의 커버리지 안에 존재하는 사용자들과의 통신 성능을 향상시키기 위해 도플러 정보까지 함께 활용하는 시공간 빔포밍 기법을 제안하였다.

I. 서론

위성 네트워크는 지리적으로 지상 기지국을 설치할 수 없어 통신 서비스를 받을 수 없는 사막, 해양, 그리고 공중과 같은 지역에서도 무선으로 통신 서비스를 제공할 수 있는 차세대 기술로 많은 관심을 받고 있다. 위성 통신 시스템 중에서, 기존의 geostationary orbit (GEO) 위성과 다르게 저비용 고효율 통신을 가능하게 하는 low Earth orbit (LEO) 위성 네트워크의 관심이 최근 증가하고 있다. 이로 인해 최근에는 SpaceX, OneWeb, 그리고 Kuiper 와 같은 기업들이 이를 실제로 구현하기 위해 많은 위성들을 저궤도로 띄우고 있으며 이미 SpaceX 의 LEO 위성군인 starlink 는 그 숫자가 수천개에 달한다 [1], [2].

하지만 많은 위성으로 구성된 LEO 위성 네트워크는 다른 궤도에 있는 위성일지라도 같은 영역의 커버리지를 얻기 위해 동시에 빔을 조향하는 경우가 발생한다. 같은 커버리지 영역 내의 사용자들은 이 커버리지 영역을 조향하고 있는 위성들과 방향이 크게 차이 나지 않아 위성의 빔포밍을 위한 조향 방향이 사용자별로 구분하기 어렵다. 따라서, 각 위성별로 원하는 사용자에게 보내는 신호가 다른 사용자들에게 간섭으로 작용해 기본적으로 먼 거리에서 통신하고 소형 위성을 주로 이용하는 LEO 위성 네트워크에서 요구하는 신호 대 간섭 및 잡음비를 달성하기 어려울 수 있다. 이를 해결하기 위해, 우리는 사용자와 위성 사이의 방향 정보뿐만 아니라 도플러 정보를 동시에 활용하는 시공간 빔포밍 기법을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 그림 1 에서와 같이 여러 궤도에 있는 위성이 한 영역을 커버하는 상황을 고려한다. 이때, 여러

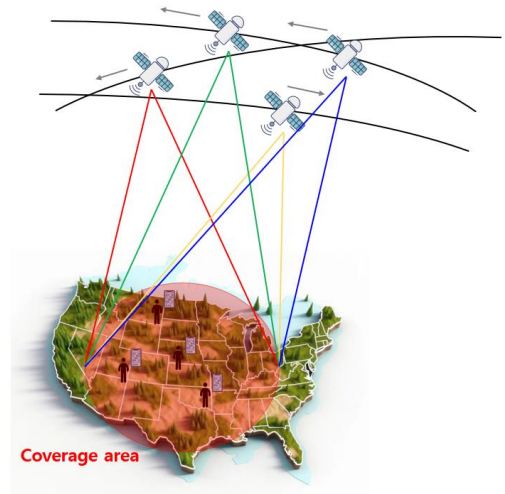


그림 1. 여러 위성이 한 영역을 커버하는 LEO 위성 네트워크의 예시

위성들이 동시에 조향하여 커버하는 영역에 존재하는 사용자들은 각자 하나의 위성으로부터 신호를 받는 것으로 가정한다. 이와 같은 환경에서, 사용자들은 실제 신호를 받고자하는 위성과 그 외의 위성과의 방향이 비슷하거나 최악의 경우에는 같아질 수 있다. 따라서, 같은 방향으로 조향하는 빔포밍으로 인해 간섭이 매우 커져 통신 성능의 저하가 크게 발생한다. 이때는 시간별로 하나의 위성이 한 사용자에게 신호를 송신하고 이를 시간에 따라 반복하는 시분할 다중접속 기법을 주로 이용한다. 하지만, 같은 궤도에 있는 위성들은 같은 방향과 속력으로 궤도를 돌지만 사용자들이 느끼는 상대 속도는 모두 다르다. 또한, 다른 궤도에 있는 위성도 속력과 방향이 모두 다르기 때문에 사용자들이 느끼는

상대 속도가 모두 다르게 된다. 그러므로, 사용자들이 위성들로부터 수신한 신호의 도플러 천이는 모두 다르게 되며 이러한 정보를 같이 활용하고자 한다.

위성들은 $N = N_x \times N_y$ 개로 이루어진 uniform planar array (UPA)가 탑재되어있다고 가정한다. 위성과 사용자의 수를 K 라고 했을 때, i 번째 위성에서 j 번째 사용자 사이의 채널은 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$\mathbf{h}_{ij} = \mathbf{a}_h(\theta, \phi) \otimes \mathbf{a}_v(\theta, \phi) \otimes \mathbf{b}(f_{ij}). \quad (1)$$

위 식에서 θ 와 ϕ 는 천정각과 방위각을 나타내며 $\mathbf{a}_h(\theta, \phi)$ 과 $\mathbf{a}_v(\theta, \phi)$ 는 수평 방향과 수직 방향의 공간상의 조향 벡터이다. 이때, 천정각 θ 에 의해 위성의 위치가 정해지지만 실제 사용자로부터 위성의 각도는 θ 가 아닌 $\theta + \beta$ 가 되며 β 는 다음과 같이 계산된다:

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{R_E \sin \theta}{\sqrt{R_E^2 + R_S^2 - 2R_E R_S \cos \theta}} \right). \quad (2)$$

이때, R_E 는 지구의 반지름을 의미하며 R_S 는 위성이 위치하는 궤도의 구의 반지름을 나타낸다. 따라서, 이러한 조향 벡터들은 다음과 같이 $N_x \times 1$ 크기와 $N_y \times 1$ 크기의 벡터로 나타낼 수 있다:

$\mathbf{a}_h(\theta, \phi)$

$$= [1 \quad e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin(\theta+\beta)\cos\phi} \quad \dots \quad e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N_x-1)d\sin(\theta+\beta)\cos\phi}]^T, \quad (3)$$

$\mathbf{a}_v(\theta, \phi)$

$$= [1 \quad e^{j\frac{2\pi}{\lambda}d\sin(\theta+\beta)\sin\phi} \quad \dots \quad e^{j\frac{2\pi}{\lambda}(N_y-1)d\sin(\theta+\beta)\sin\phi}]^T. \quad (4)$$

위 식에서 d 는 안테나 사이의 거리를 의미하며 수평 방향과 수직 방향의 거리가 모두 일정하다고 가정한다. 또한, λ 는 신호의 파장이고 T 는 전치 연산자이다. 이때, 사용자들은 각 위성들을 바라보는 방향이 모두 같은 것으로 가정한다. 따라서, 채널 \mathbf{h}_{ij} 에 대해서 공간상의 조향 벡터는 모두 동일하다. 하지만, 식 (1)에서 $\mathbf{b}(f_{ij})$ 는 인덱스 i 와 j 에 대해서 모두 다르며 시간상의 조향 벡터를 의미한다. 이러한 시간상의 조향 벡터는 다음과 같이 $M \times 1$ 크기의 벡터로 나타낼 수 있다:

$$\mathbf{b}(f_{ij}) = [1 \quad e^{j2\pi f_{ij}\tau} \quad \dots \quad e^{j2\pi(M-1)f_{ij}\tau}]^T. \quad (5)$$

식 (5)에서 f_{ij} 는 i 번째 위성에서 j 번째 사용자 사이의 도플러 주파수를 나타내며 M 과 τ 는 시간상의 조향 벡터를 만들기 위해 송신되는 신호의 수와 반복되는 송신 신호 사이의 시간 간격을 의미한다. 따라서, 우리는 사용자들이 위성과 모두 동일한 방향에 있다고 하더라도 시간상의 조향 벡터인 $\mathbf{b}(f_{ij})$ 를 통해 채널을 구분할 수 있으며 이러한 구분된 채널을 간섭 제거 빔포밍 (zero forcing beamforming)을 통해 전송률을 높일 수 있다. 하지만 이러한 채널 행렬의 풀 랭크를 얻기 위해서는 K 보다 M 이 커야하며 반대의 경우에는 간섭이 완전히 제거되지 않아 최대의 성능을 얻을 수 없게 된다. 그러므로, 에르고딕 가중합 전송률 관점에서 K 와 M 에 따른 성능을 분석하고자 한다. 에르고딕 가중합 전송률은 다음과 같다:

$$R = \mathbb{E} \left[\sum_{k=1}^K \frac{1}{M} \log_2(1 + \text{SINR}_k) \right]. \quad (6)$$

위 식에서 \mathbb{E} 는 기댓값을 구하는 연산자이고 SINR_k 는 k 번째 사용자의 신호 대 간섭 및 잡음비를 나타내며 다음과 같이 계산된다:

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{h}_{kk}^T \mathbf{w}_k|^2}{\sum_{l \neq k} |\mathbf{h}_{lk}^T \mathbf{w}_l|^2 + \sigma^2}. \quad (7)$$

위 식에서 \mathbf{w}_k 는 k 번째 위성의 송신 빔포밍 가중치이며 σ^2 은 잡음의 분산이다. 또한, P 는 송신 파워이며 G 는 송신 안테나 이득을 G_t 라고 했을 때, 다음과 같이 경로 손실과 송신 안테나 이득의 곱으로 정의한다:

$$G = G_t \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2. \quad (8)$$

이때, R 은 위성과 사용자 간의 거리이다.

그림 2 는 K 와 M 에 따른 에르고딕 가중합 전송률을 나타내는 실험 결과이다. 이때, 각 위성과 사용자 사이의 도플러 천이와 τ 를 곱한 정규화된 도플러 주파수는 -0.5 와 0.5 사이에서 무작위로 설정하였다. M 이 1 일 때는 $\mathbf{b}(f_{ij})$ 가 1 이므로 서로 다른 어떠한 두 채널도 구분할 수 없다. 따라서, 위성과 사용자가 증가하더라도 늘어나는 간섭으로 인해 가중합 전송률이 계속해서 떨어지게 된다. 반면, M 이 2 이상일 때는 시간상의 조향 벡터로 인해 채널이 구분되기 시작한다. 그러므로, 간섭 제거 빔포밍을 통해 완벽히 간섭이 제거되어 여러 번 신호가 반복 송신되더라도 가중치 전송률이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 채널 행렬이 풀 랭크를 얻지 못하는 $M < K$ 인 경우에는 다시 간섭을 완벽히 제거하지 못해 성능이 점점 저하된다. 결론적으로, 만약 시간상의 조향 벡터인 $\mathbf{b}(f_{ij})$ 을 고려하지 않는다면 $M = K = 1$ 인 경우의 전송률만을 얻을 수 있다. 위성과 사용자의 수가 증가하더라도 매우 큰 간섭으로 인해 가중합 전송률은 오히려 떨어진다. 따라서, 같은 신호를 여러 번 송신하더라도 이로 인해 얻을 수 있는 시간상의 조향 벡터 덕분에 기존의 공간상의 조향 벡터만을 이용한 빔포밍보다 높은 가중합 전송률을 달성할 수 있다.

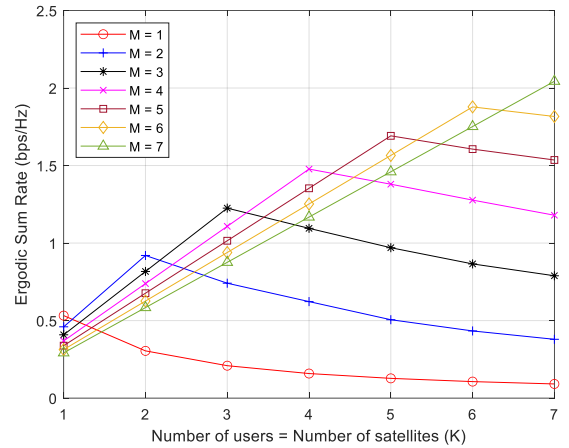


그림 2. K 와 M 에 따른 에르고딕 가중합 전송률

III. 결론

본 논문에서는 반복된 송신 신호를 통해 얻을 수 있는 시간상의 조향 벡터를 공간상의 조향 벡터와 함께 이용하여 기존 방식보다 더 높은 가중합 전송률을 달성할 수 있는 시공간 빔포밍 기법을 제안하였다. 이러한 빔포밍 기법은 새로운 다중 접속 방식으로써 같은 커버리지 영역에 위치하는 사용자들에게 동시에 통신 서비스를 제공할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Lin, Xingqin, et al. "On the path to 6G: Embracing the next wave of low Earth orbit satellite access." *IEEE Communications Magazine* 59.12 (2021): 36-42.
- [2] Del Portillo, Inigo, Bruce G. Cameron, and Edward F. Crawley. "A technical comparison of three low earth orbit satellite constellation systems to provide global broadband." *Acta astronautica* 159 (2019): 123-135.