https://doi.org/10.7840/kics.2024.49.2.203

저궤도 위성 멀티캐스트 서비스를 위한 기하학적 분석 기반 빔 위치 최적화

최 현 호◆

Beam Placement Optimization Based on Geometric Analysis for LEO Satellite Multicast Services

Hyun-Ho Choi◆

요 약

본 논문에서는 저궤도 위성 기반 멀티캐스트 서비스를 위하여 스팟 빔 내 사용자들의 최소 전송률을 최대화하는 빔 센터 위치 최적화 문제를 다룬다. 제안 방식은 저궤도 위성의 높은 이동성을 고려하여 기하학적 분석을 통해 낮은 복잡도로 최적 빔 중심 위치를 계산한다. 모의실험 결과, 제안 방법은 짧은 계산 시간 내에 최적 빔 중심 위치를 찾아 멀티캐스트 사용자들의 최소 전송률을 향상시킨다.

Key Words : Satellite communication, beam placement, beam center position, multicast

ABSTRACT

In this letter, we investigate a beam placement problem to determine the optimal beam center position that maximizes the minimum transmission rate of users within a spot beam for low-Earth-orbit (LEO) satellite-based multicast services. We calculate the optimal beam center position through a geometric analysis with low complexity considering the high mobility of LEO satellites. The simulation results show that the proposed scheme optimally determines the position of the beam center within a short computation time and maximize the minimum rate of multicast users.

Ⅰ. 서 론

최신 멀티 빔 위성 시스템은 디지털 빔포밍 기술을 사용하여 다수의 스팟 빔을 만들고 각 빔을 정교하게 조절할 수 있다. 지상 사용자들에게 높은 전송 효율과 커버리지를 제공하기 위해서는 각 빔의 방향을 효과적으로 제어해야 하는데, 이는 사용자 분포에 맞춰 충분한 빔포밍 이득이 제공되도록 하는 빔 센터 위치 결정 문제로 귀결된다[1].

빔 배치 문제의 간단한 접근으로 처음에는 각 사용자에 대한 유클리드 거리를 최소화는 지점을 빔 중심으로 결정했다[2]. 이를 시작으로, 동일한 또는 다른 주파수 대역에서 위성 시스템 처리량을 향상시키기 위하여 스팟 빔 간의 최적 거리와 위치를 도출하는 문제[3] 및 저궤도 위성 시스템에서 최소한의 빔으로 모든 사용자를 커버하기 위한 빔 위치 분할 문제 등, 관련 몇몇 연구가 진행되었다[4].

위성 통신 환경에서 빔 배치에 관한 다양한 연구가 수행되었지만, 기존 연구들은 모두 유니캐스트 전송을 고려하였다[2-4]. 하지만 위성에서 멀티캐스트 서비스는 미디어 스트리밍, 그룹 통신, 제어 정보 방송 등에 널리 사용되고 있어 멀티캐스트 전송 시 전송 효율을 높이는 빔 배치에 관한 연구가 필요하다. 멀티캐스트 환경에서 빔 배치는 멀티캐스트 그룹 내 모든 사용자 채널을 고려해야 하며, 위성의 빠른 이동에 따른 멀티캐스트 그룹의 동적 변화에 신속하게 적응해야 한다[1].

본 연구에서는 저궤도 위성 기반 멀티캐스트 서비스를 위하여 스팟 빔 내 사용자들의 최소 전송률을 최대화하는 빔 센터 위치를 결정하는 최적화 문제를 다룬다. 저궤도 위성의 제한된 컴퓨팅 자원과 높은 이동성으로 인한 짧은 서비스 시간을 고려하여, 낮은 복잡도로 신속한 최적화를 수행하고자 한다. 이를 위하여 위성 빔기반 멀티캐스트 전송에 대한 시스템 모델링 및 기하학적 분석을 수행한다. 기하학적 분석을 통해 제안 방안은 기존 반복 동작이 필요한 최적화 방식 대비 빠른 속도로 최적 빔 센터 위치를 계산할 수 있다. 모의실험 결과는 제안 방법이 완전 탐색을 통해 구한 최적 빔 센터 위치에 근접하여 빔 센터 위치를 결정하여, 기존 방식 대비 멀

※ 이 성과는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1011901).
◆ First Author : (ORCID:0000-0002-6785-2596) Hankyong National University, School of ICT, Robotics & Mechanical Engineering, hhchoi@hknu.ac.kr, 정교수, 종신회원
논문번호 : 202312-161-B-LU, Received November 30, 2023; Revised December 11, 2023; Accepted December 11, 2023

티캐스트 사용자들의 최소 전송률을 크게 향상시킴을 보여준다.

Ⅱ. 시스템 모델

그림 1은 고려하는 시스템 모델을 보여준다. 위성의 좌표는 $(0,0,H)$, 빔 중심 좌표는 $(x_c, y_c, 0)$으로 나타낼 수 있다. 이 빔 내에는 같은 데이터를 수신하는 N개의 지상 노드(ground node, GN)가 있으며, 각 GN i의 좌표는 $(x_i, y_i, 0)$, $i \in \{1,2,\cdots,N\}$으로 나타낸다. 또한, 빔의 3 dB 각도(즉, 반전력 빔폭), 빔 중심과 GN i의 사이각, 고도각은 그림 1에서 보듯이 각각 θ_{3dB}, θ_i, φ로 표시된다.

위성에서 GN i로의 채널 이득은 다음과 같이 주어진다.

$$g_i = \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 d_i^{-\alpha} G_r q_i \tag{1}$$

여기에서 c는 빛의 속도, f는 반송 주파수, d_i는 위성과 GN i 사이의 거리, G_r은 GN에서의 수신 안테나 이득을 나타낸다. 또한 q_i는 GN i로의 위성의 빔 패턴을 나타내며, $\theta_i \le \theta_{3dB}$일 때, 일반적으로 다음과 같이 모델링 된다[4].

$$q_i = G_t 10^{-0.3(\theta_i/\theta_{3dB})^2} \tag{2}$$

여기에서 G_t은 위성에서의 송신 안테나 이득을 나타내며, θ_i는 다음과 같이 계산된다.

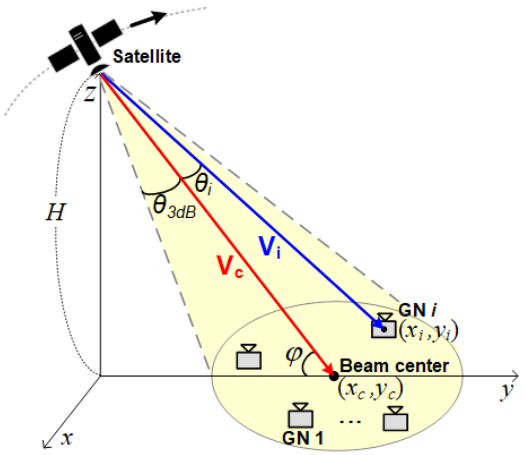


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model.

$$\theta_i = \cos^{-1}\left(\frac{V_i \cdot V_c}{\|V_i\|\|V_c\|}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{x_i x_c + y_i y_c + H^2}{d_i d_c}\right) \tag{3}$$

여기에서 벡터 $V_i = [x_i, y_i, -H]$, $V_c = [x_c, y_c, -H]$, 거리 $d_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + H^2}$, $d_c = \sqrt{x_c^2 + y_c^2 + H^2}$로 주어진다.

따라서 GN i의 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}\Gamma_i &= \frac{g_i P}{\sigma^2 W} = \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \frac{P G_r G_t}{\sigma^2 W} d_i^{-\alpha} 10^{-0.3(\theta_i/\theta_{3dB})^2} \\ &= C d_i^{-\alpha} 10^{-0.3(\theta_i/\theta_{3dB})^2}\end{aligned} \tag{4}$$

여기에서 P는 빔에 할당된 송신 파워, σ^2은 잡음의 전력 스펙트럼 밀도, W는 채널 대역폭을 나타내며, 상수 $C = \left(\frac{c}{4\pi f}\right)^2 \frac{P G_r G_t}{\sigma^2 W}$로 정의된다. Shannon 용량 공식에 의해 GN i의 달성 가능한 전송률은 $R_i = W\log_2(1+\Gamma_i)$로 주어진다. 따라서 고려하는 빔 내에 존재하는 GN들의 최소 전송률을 최대화하는 최적 빔 센터 위치는 다음 최적화 문제로 표현된다.

$$(x_c, y_c)^* = \arg\max \min R_i, \; i \in \{1,2,\cdots,N\} \tag{5}$$

Ⅲ. 기하학적 분석 기반 빔 센터 위치 최적화

기하학적 분석을 위하여 $\frac{\theta_i}{\theta_{3dB}} \approx \frac{d_{c,i}}{d_{3dB}}$의 근사화를 적용한다. 여기에서 $d_{c,i} = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2}$로 빔 센터와 GN i사이의 거리이며, $d_{3dB} = H\tan\theta_{3dB}$로 빔폭에 비례하는 빔의 반경을 나타낸다. 따라서 (4)의 SNR은 다음과 같이 재기술된다.

$$\begin{aligned}\Gamma_i &= C d_i^{-\alpha} 10^{-0.3(d_{c,i}/d_{3dB})^2} \\ &= C d_i^{-\alpha} 10^{-0.3\{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2\}/d_{3dB}^2}\end{aligned} \tag{6}$$

또한, (5)의 최적화 문제는 $\max_{(x_c,y_c)} \min \Gamma_i$로 변환이 가능하다. 이 문제를 풀기 위하여 먼저 임의의 두 GN u와 v를 고려한다. 만약 빔 센터를 GN u에 가깝게 이동하면, $d_{c,u}$는 작아지지만 $d_{c,v}$는 커져, 결국 Γ_u는 증가하지만 Γ_v는 감소하게 된다. 따라서, 두 GN의 최소 전송률을 최대화하려면 빔 센터 (x_c, y_c)는 $\Gamma_u = \Gamma_v$를 만족시켜야 한다.

이 $\Gamma_u = \Gamma_v$ 조건은 다음과 같이 간단히 정리된다.

$$
\begin{aligned}
& d_u^{-\alpha} 10^{-\frac{0.3}{d_{3dB}^2}\{(x_u-x_c)^2+(y_u-y_c)^2\}} \\
& = d_v^{-\alpha} 10^{-\frac{0.3}{d_{3dB}^2}\{(x_v-x_c)^2+(y_v-y_c)^2\}} \\
\Leftrightarrow\ & 2(x_v-x_u)x_c+2(y_v-y_u)y_c \\
& = x_v^2+y_v^2-x_u^2-y_u^2+\frac{0.3}{d_{3dB}^2}\alpha\log_{10}\frac{d_v}{d_u}
\end{aligned} \tag{7}
$$

이는 x_c와 y_c에 관한 1계 선형 식에 해당한다. 이제 또 다른 GN w를 고려하면, $\Gamma_u=\Gamma_w$ 조건으로부터 다음과 같은 또 다른 선형 식을 얻을 수 있다.

$$
\begin{aligned}
& 2(x_w-x_u)x_c+2(y_w-y_u)y_c \\
& = x_w^2+y_w^2-x_u^2-y_u^2+\frac{0.3}{d_{3dB}^2}\alpha\log_{10}\frac{d_w}{d_u}
\end{aligned} \tag{8}
$$

우리는 두 선형 식 (7)과 (8)의 교차점 (x_c, y_c)를 쉽게 계산할 수 있으며, 이 점은 $\Gamma_u=\Gamma_v=\Gamma_w$를 만족시켜 세 GN의 최소 전송률을 최대화하는 최적 빔 센터 위치가 됨을 알 수 있다.

이러한 최적 빔 센터 결정 방법을 $N>3$인 경우로 일반화하면, N개의 GN 중 3개의 GN을 선택하는 각 조합에서 (7)과 (8)을 만족시키는 교차점 (x_c, y_c)을 찾은 후, 각 점에서 구한 최소 SNR 값을 구하여, 가장 큰 최소 SNR을 제공하는 교차점을 최적 빔 센터 위치 $(x_c, y_c)^*$로 결정할 수 있다.

Ⅳ. 모의실험 결과

모의실험을 위하여 H=600 m, θ_{3dB}=1°, φ=45°, P=200 W, α=2, f=20 GHz, G_r=15 dB, G_t=38 dBi, W=50 MHz, σ^2=-174 dBm/Hz를 사용하였다[2-4]. 성능 비교를 위하여 단순히 GN을 분포시키는 셀의 중심을 빔 센터로 정하는 방식, GN들의 무게 중심을 빔 센터로 정하는 방식[2], 완전 탐색을 통해 최적 빔 센터 위치를 찾는 방식을 고려하였다.

그림 2는 고려하는 각 방식에서 빔 중심이 어떻게 결정되는지에 대한 예시를 보여준다. 이를 위해 d_{3dB}인 영역에 세 개의 GN을 설치했다. 제안하는 기하학적 방법에서, 빔 센터는 $\Gamma_1=\Gamma_2$를 만족하는 직선과 $\Gamma_2=\Gamma_3$을 만족하는 직선의 교차점으로 결정된다. 그림 2에서 이점은 완전 탐색으로 찾은 최적 빔 센터와 가까이 위치함을 볼 수 있다. 반면, 기존의 단순한 빔 센터 결정 방식들은 최적 빔 센터 위치로부터 다소 떨어져 있는 것을 볼 수 있다. 또한, 각 점에서 GN들의 최소 전송률 R을 보면, 제안 방식은 완전 탐색 방식이 제공하는 최대 전송률에 근접함을 알 수 있다.

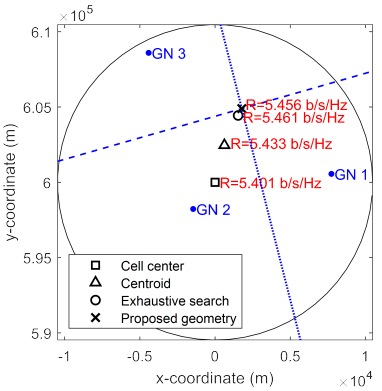
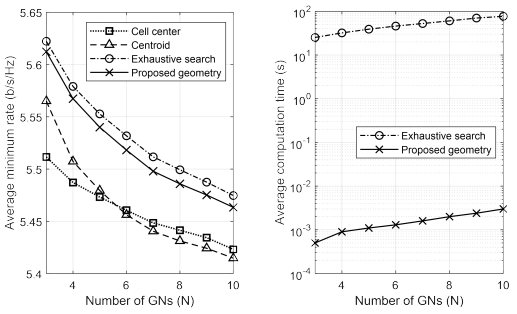


그림 2. 고려하는 방식들의 빔 센터 위치 결정 예
Fig. 2. Example of beam placement in the considered methods.



(a) (b)

그림 3. GN 수(N)에 따른 (a)평균 최소 전송률과 (b)평균 계산 시간
Fig. 3. (a) Average minimum rate and (b) average computation time vs. number of GNs (N).

그림 3은 GN 수(N)에 따른 평균 최소 전송률과 평균 계산 시간을 보여준다. N이 증가함에 따라 최소 전송률은 감소하고, 계산 시간은 증가한다. 제안 기하학적 방법은 완전 탐색에 근접한 전송률을 보이는 반면, 기존 방안들은 낮은 전송률을 보여준다. 한편, 최적화에 걸리는 계산 시간을 비교하면 완전 탐색 방식은 N에 따라 수십 초가 걸리는 반면, 제안 방식은 기하학적 분석을 통해 얻은 선형 방정식을 해를 빠르게 구함으로써 밀리초 대역의 짧은 계산 시간을 갖는다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 저궤도 위성 멀티캐스트 서비스를 위하여 스팟 빔 내 사용자들의 최소 전송률을 최대화하는 빔 센터 위치를 기하학적 분석을 통해 도출하였다. 제안하는 기하학적 분석 기반 방식은 계산 복잡도를 줄이면

서 멀티캐스트 전송률을 크게 향상시킬 수 있다.

References

[1] B. Lee, N. Lee, J.-H. Kim, and W. Shin, "A survey of leo satellite networks for 5g and beyond: Channel modeling, research trends, and open challenges," *J. KICS*, vol. 46, no. 7, pp. 1097-1108, Jul. 2021. (https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.7.1097)

[2] J.-T. Camino, et al., "Linearization of Euclidean norm dependent inequalities applied to multibeam satellites design," *Computational Optimization and Applications*, vol. 73, pp. 679-705, 2019. (https://doi.org/10.1007/s10589-019-00083-z)

[3] M. Takahashi, et al., "Adaptive multi-beam arrangement for improving throughput in an HTS communication system," *IEEE ICC*, pp. 1-6, Jul. 2020. (https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9148622)

[4] J. Tang, D. Bian, G. Li, J. Hu, and J. Cheng, "Optimization method of dynamic beam position for LEO beam-hopping satellite communication systems," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 57578-57588, Apr. 2021. (https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3072104)