

LEO 위성의 멀티캐스트/브로드캐스트 서비스를 위한 공동 빔 및 전력 최적화: 저복잡도 알고리즘 및 트레이드 오프 분석

김채연, 이기송

동국대학교

chaelsykim@gmail.com, kslee851105@gmail.com

Joint Beam and Power Optimization for Broadcast and Multicast Services in LEO Satellites: Low-Complexity Algorithm and Tradeoff Analysis

Kim Chae Yeon, Lee Kisong

Dongguk Univ.

요약

본 논문은 다중 빔 저궤도 위성 통신 시스템에서 멀티캐스트 및 브로드캐스트 서비스를 위한 빔 배치 및 송신 전력의 공동 최적화 문제를 다룬다. 이를 위해 저복잡도 최적화 기법을 제안하고, 서비스 환경에 따른 성능 트레이드 오프를 분석한다. 빔 배치는 Adam 옵티마이저를 적용하여 빠르고 안정적인 수렴을 확보하였으며, 전력 최적화는 멀티캐스트 환경에서는 fractional programming 기법을 활용해 송신 전력의 해를 수학적으로 도출하고 브로드캐스트 환경에서는 선형계획법으로 해결하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 기법은 기존 방식 대비 시간 복잡도를 크게 줄이면서도 높은 성능을 유지함을 확인하였다. 또한, 네트워크 환경에 따라 멀티캐스트와 브로드캐스트 간 성능이 트레이드오프 관계에 있음을 보여주었으며, 이에 따라 두 서비스는 환경에 적응적으로 선택되어 활용될 수 있음을 검증하였다.

I. 서론

최근 저궤도 위성(Low Earth Orbit, LEO) 통신은 수십 ms 수준의 짧은 지연과 전 지구적 연결성을 바탕으로 차세대 무선 인프라로 주목받고 있다. 하지만 실제 서비스 품질은 선택하는 전송 모드에 따라 크게 좌우된다. 빔별 멀티캐스트는 각 빔의 여유 채널 용량을 활용해 동일 콘텐츠를 빔마다 최적화된 품질로 전송함으로써 평균 전송률과 미디어 품질을 높이는 반면, 브로드캐스트는 모든 빔에 동일 신호를 전송하여 빔 간 간섭을 제거하고 사용자 간 최소 전송률을 균등하게 높인다. 두 서비스의 최적화 목표는 서로 상충하므로, 단일 서비스만으로는 공정성과 효율을 동시에 만족하기 어렵다. 따라서 두 서비스를 동시에 모델링하고 환경 변화에 따라 적응적으로 모드를 선택하는 통합 최적화 기법이 필요하다.

LEO 위성은 시야각이 좁고 공전 속도가 빨라 네트워크 환경이 동적으로 변화한다. 이러한 특성 때문에 실시간으로 동작하며 환경 변화에 빠르게 적응할 수 있는 저복잡도 알고리즘 설계가 필수적이다. 기존 연구^[1]은 빠른 최적화를 위해 딥러닝 기반으로 멀티빔의 위치와 전력을 공동 최적화하는 방식을 제안했으나, 딥러닝의 학습 부담과 모델 복잡도로 인해 실시간 적용에 한계가 있다. 따라서 본 연구는 멀티빔 위치와 전력을 공동 최적화하면서, 수학적 접근으로 연산량을 줄이는 저복잡도 통합 최적화 기법을 제안하고, 이를 통해 두 서비스 간 성능 및 공정성의 트레이드 오프를 분석한다.

II. 본론

그림 1은 다중 빔 LEO 위성 통신 시스템 모델을 나타낸다. 커버리지 영역 내에는 총 N 개의 지상 노드가 존재하며 위성은 동일한 주파수 대역을

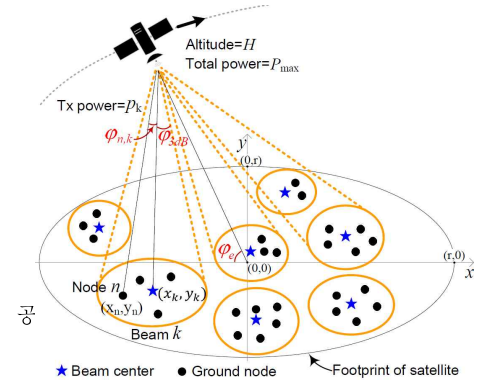


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model.

유하는 K 개의 스팟 빔을 동시에 생성할 수 있다. 각 빔의 위치와 전력을 최적화할 수 있다고 할 때, $k \in \mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\}$ 번째 빔에서 지상 노드 $n \in \mathcal{N} = \{1, 2, \dots, N\}$ 으로의 채널 이득은 빔과 노드 사이의 거리와 각도, 각 빔의 전력할당에 따라 달라진다.

멀티캐스트 서비스는 채널 환경에 맞춰 동일한 콘텐츠를 빔별로 서로 다른 화질로 제공하므로, 빔 간 간섭이 발생한다. 이 서비스의 목표는 각 그룹이 요구하는 최소 서비스 품질을 충족시키면서 전체 시스템의 평균 전송률을 최대화하는 것이다. 구체적으로는 각 빔의 최소 전송률을 구한 뒤, 이 값들의 평균을 최대화하도록 설계한다. 이때 각 노드는 사전에 할당된 단일 빔만을 수신한다고 가정한다.

브로드캐스트 서비스에서는 위성이 모든 스팟 빔을 통해 모든 지상 노드에 동일한 신호를 전송한다. 이 서비스에서는 모든 노드에 균일한 서비스 품질을 제공하는 것이 필수적이므로, 목표는 모든 노드의 SE 중 최솟값을

최대화하는 것이다. 이 시스템 모델들은 비볼록한 함수이므로 빔 위치 최적화와 전력 최적화 두 문제로 분해한 뒤 교대 방식으로 해결하는 저복잡도 반복 알고리즘을 설계하여 지역 최적 해를 도출한다.

첫 번째 하위문제는 빔 위치 최적화이다. 멀티캐스트와 브로드캐스트 모두 빔 위치에 대해 복잡한 비볼록 함수이므로 이를 해결하기에 효율적인 Adam(Adaptive Moment Estimation) 옵티마이저를 사용한다^[2]. Adam은 1차 기울기에 모멘텀과 적응형 학습률을 결합하여 방향성을 유지하고, 기울기 스케일을 자동 보정하므로 빠르고 안정적으로 수렴을 보장한다. 또한, 매 단계마다 기울기를 한 번만 계산하면 되기 때문에 계산량이 적으므로 저복잡도 알고리즘으로 적합하다. Adam 옵티마이저를 적용하기 위해서는 제약 조건이 있는 원래 문제를 비제약 형태로 변환해야 한다. 이를 위해 각 부등식 제약 조건 $g_i(x) \geq 0$ 을 log-barrier 형태 $\ln(g_i(x))$ 로 변환하여 목적 함수에 포함시킨다. Adam 옵티마이저를 사용하여 목적 함수를 적화하여 지역 최적점을 찾고, 가중치를 점진적으로 증가시켜 가중치가 충분히 커질 때까지 이를 반복하여 빔 배치를 최적화한다.

두 번째 하위문제는 전력 최적화이다. 멀티캐스트의 경우 전력에 대해 비볼록한 문제이지만 Quadratic transform(QT)^[3]을 이용하여 볼록한 문제로 변환한다. P_1 을 볼록 문제로 변환할 수 있으므로 볼록 최적화 솔버로 직접 풀 수 있지만, 계산복잡도를 줄이기 위해 \mathbf{p} 에 대한 semi-closed form solution을 찾는다. 그러기 위해 라그랑지안 함수를 만들고 Karush-Kuhn-Tucker(KKT) 조건을 만족하는 최적 \mathbf{p} 값을 구한다.

브로드캐스트의 경우 전력 할당 문제는 볼록 최적화 문제이므로 CVX와 같은 일반적인 볼록 최적화 솔버로 해결할 수 있지만, 계산 복잡도를 더욱 낮추기 위해 선형계획법(LP)으로 변환하여 해결한다. 이 문제는 모든 노드의 스펙트럼 효율(SE) 중 최솟값을 최대화하는 형태인데, SE 식 내부에 존재하는 로그 함수가 단조증가 함수이므로 로그를 제거하여도 원래 문제와 동일한 최적 해를 유지한다. 따라서 로그를 제거하여 전력 변수 \mathbf{p} 에 대한 선형 문제로 변환한 뒤, 선형계획법 솔버를 이용하여 최적화를 수행한다.

표 1. 스펙트럼 효율 및 계산 시간
Table 1. Spectral efficiency and computation time

Algorithm	Broadcast		Multicast	
	SE(bps/Hz)	Time(s)	SE(bps/Hz)	Time(s)
Random search	3.3333	470	2.9785	660
conventional ^[1]	3.1016	1.2231	2.4866	27.45
Proposed	3.3304	0.6877	2.8821	3.9051

시뮬레이션에서는 육각형 형태의 7셀 구조를 고려하여, 각 셀마다 10개의 노드를 무작위로 배치한다. 이에 따라 빔의 개수(K)는 7이며, 전체 노드 수(N)는 총 70개가 된다. 기존 연구에서는 빔 배치를 그라디언트 디센트 방법으로 최적화하고, 전력은 볼록 최적화 솔버로 최적화한다^[1]. 표 1의 실험 결과에 따르면, 제안한 방안이 기존 방안에 비해 계산 시간을 크게 단축하고 더 우수한 성능을 보인다. 그림 2는 도시 간 최소 거리에 따른 SE 변화를 나타내며, 빨간색 영역은 상한선이 R_{\max}^k 와 하한선 R_{\min}^k 사이의 SE 범위를 의미한다. 평균 성능의 관점에서는 거리가 멀어질수록 간섭의 영향이 감소해 멀티캐스트가 브로드캐스트보다 더 나은 성능을 보인다. 또한 멀티캐스트의 R_{\max}^k 가 브로드캐스트보다 높아 특정 빔에서는 더

우수한 품질을 제공할 수 있다. 그러나 공정성의 관점에서 보면 거리와 상관없이 브로드캐스트가 항상 더 높은 공정성을 유지한다.

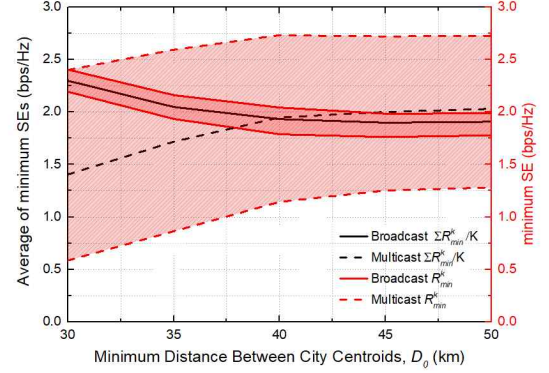


그림 2. SE vs. 도시 간 최소 거리
Fig. 2. SE vs. minimum distance between city centroids.

III. 결론

본 논문은 LEO 위성 통신 시스템에서 빔 배치와 송신 전력을 공동 최적화하기 위한 저복잡도 기법을 제안하였다. 실험 결과 제안한 방법은 기존 방식 대비 계산 시간을 크게 단축하였고 성능 지표는 멀티캐스트, 공정성 지표는 브로드캐스트가 각각 더 우수함을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00343262).

참고 문헌

- [1] H. -H. Choi, G. Park, K. Heo, and K. Lee, "Joint optimization of beam placement and transmit power for multi-beam LEO satellite communication systems," *IEEE Internet Things J.*, vol. 11, no. 8, pp. 14804-14813, Apr. 2024.
- [2] D. P. Kingma and J. Ba, "Adam: A method for stochastic optimization," 2014. [Online]. Available: arXiv:1412.6980.
- [3] K. Shen and W. Yu, "Fractional programming for communication systems-part I: Power control and beamforming," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 66, no. 10, pp. 2616-2630, May 2018.