

공중 통신망의 비반복적 최적화 기법에 관하여

류현수, 양현종

포항공과대학교

{hslyu4, hyunyang}@postech.ac.kr

On the Non-Iterative Optimization for Aerial Communications

Hyeonsu Lyu, Hyun Jong Yang

POSTECH

요약

이 논문에서는 기존 공중 통신망 최적화에서 중점적으로 채택되고 있는 좌표 하강법의 한계점을 극복하는 새로운 계층적 최적화 기법을 제안한다. 좌표 하강법은 볼록 최적화 문제에서는 지역 최적해로 수렴하는 것이 잘 알려져 있지만 공중 통신망의 경로 및 사용자 연결 최적화 문제와 같이 이산 최적화 문제를 해결하는 경우에는 비정상해로 수렴한다. 이 논문에서는 i) 고정된 경로에서 네트워크 스냅샷을 최적화하는 문제와 ii) 경로를 최적화하는 문제로 분해하여 좌표 하강법의 단점을 극복하면서 전역 최적해를 찾는 방식을 제안한다. 실험을 통해 통신망의 셀 반경이 증가할수록 좌표 하강법의 성능을 크게 넘어서는 것을 보임으로써 제안하는 방식의 우수성을 보였다.

I. 서론

공중 통신망은 6G 네트워크를 달성하기 위한 주요 도구로 논의되고 있다. 특히 ITU-R의 6G usage scenario [1]에서 제안된 massive communication와 ubiquitous connectivity를 달성하기 위해 공중 통신망의 수요에 따라 적응적으로 서비스 제공이 가능한 유연한 커버리지가 필요하다.

공중 네트워크에 대한 연구가 확산되었음에도 불구하고, 서비스 스케줄링과 서비스 품질 요구 사항 등 실제 필드에서 사용되는 종단 간 요구 사항에 관한 물리 계층 최적화 기법은 아직 미흡한 실정이다. 이는 실제 요구 사항을 고려할 때 공중 통신망을 최적화하는 것이 매우 복잡해지기 때문이다. 통신 스케줄링은 사용자 연결, 주파수 자원 할당 및 전력 제어 변수와 함께 여러 시간 단계에서 위치 변수 및 물리 계층 변수와 영키게 된다.

대부분의 연구는 좌표 하강 최적화 기법 (coordinate descent method)를 도입하여 이를 해결한다. 이는 미분 가능한 문제에서 지역 최적해로 수렴하지만, 정수 혼합 문제(mixed-integer problem)에서는 비정상적인 해에서 반복 최적화가 갇히는 문제가 발생한다.

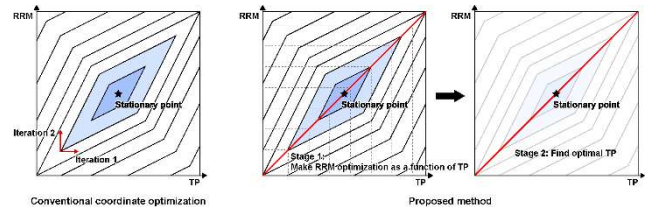


그림 1. Coordinate descent optimization 과 제안하는 기법의 비교.

이는 경로 계획과 통신 자원 최적화를 동시에 수행할 때 흥미로운 상호 작용을 발생시킨다. 그림 1은 이러한 반복 최적화 기법이 해가 아닌 지점에서 수렴하는 것을 보여준다. 이는 많은 공중 통신망 최적화 연구에서 유틸리티를 잠재적으로 잘못된 방식으로 최적화하고 있다는 것을 시사한다 [2, 3].

본 논문에서는 그림 1의 Stage 1과 같이 계층적으로 주어진 경로에서 최적화된 자원 해를 먼저 찾고, Stage 2에서와 같이 최적화된 경로 해를 다시 찾는 방식으로 전역 최적해에 가까운 해를 찾는 방식을 연구한다.

II. 본론

드론 기지국의 물리 계층 최적화는 통신 문제는 경로 Q , 사용자 연결 A , 가용 주파수 B 및 전력 P 를 고려하여

일반적으로 다음과 같이 설계된다.

$$\max_{\mathbf{Q}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}} f(\mathbf{Q}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}) \quad (1)$$

$$(\mathbf{Q}, \mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}) \in \mathcal{C} \quad (2)$$

이 때, $f(\cdot)$ 은 네트워크 유틸리티, \mathcal{C} 는 가능해를 포함하는 도메인을 나타낸다. 이는 일반성을 잃지 않고 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\max_{\mathbf{Q}} \max_{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}} f(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P} | \mathbf{Q}) \quad (3)$$

$$\mathbf{Q} \in \mathcal{C}_1, (\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}) \in \mathcal{C}_2 \quad (4)$$

(3)의 하위 계층 문제 $\max_{\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}} f(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P} | \mathbf{Q})$ 는 경로를 고려하지 않는 일반적인 통신 문제로 고전적인 네트워크 스냅샷 최적화 기법으로 해결 가능하다. 이 해를 $g(\mathbf{Q})$ 로 두면, $\max_{\mathbf{Q}} g(\mathbf{Q})$ 는 경로 \mathbf{Q} 의 특성에 따라 이산 시간 최적화 또는 연속 시간 최적화 기법을 통해 해결할 수 있다.

위에서 제안한 방법을 사용하여 단일 드론으로 구성된 하향 링크 최적화 기법의 성능을 검증하였다. \mathbf{Q} 와 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{P}$ 를 좌표 하강법으로 최적화하는 경우와 제안한 방법을 [4]에서 제안한 통신 최적화 문제에 적용했을 때 표 1과 같은 성능을 보인다.

표 2. Coordinate descent optimization 과 제안하는 기법의 비교. r 은 서비스 품질 (QoS) 제약 조건의 크기를 나타냄.

Map width (m)	Coordinate $r = 5$	Ours $r = 5$	Coordinate $r = 10$	Ours $r = 10$
600	73.967	74.829	73.212	74.371
1500	42.135	49.645	39.041	47.769

놀랍게도, 공중 통신망의 셀 크기가 커질수록 좋은 최적해를 제공하는 것으로 알려진 좌표 하강법의 성능이 크게 감소하는 것을 관찰할 수 있다.

III. 결론

이 논문에서는 공중 통신망을 최적화할 때 사용되는 좌표 하강법의 한계점과 이를 극복하기 위한 새로운 비반복적 최적화 방식을 제안하였다. 제안하는 방법은 좌표 하강법의 한계를 넘어 네트워크의 초기 상태에 더욱 강건한 최적화 방식을 제공할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported in part by the IITP(Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation), grant funded by MSIT(Ministry of Science and ICT) (RS-2024-00229541), in part by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2024-00250191), and in part by the MSIT, Korea, under the ITRC(Information Technology Research Center) support program(IITP-2024-2021-0-02048) supervised by the IITP.

참고 문헌

- [1] ITU-R WP5D, "M.2160: framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond," ITU Radiocommunication Sector (ITU-R), ITU-R recommendations, Nov. 2023. [Online]. Available: <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.2160/en>
- [2] S. Zhang and N. Ansari, "3D drone base station placement and resource allocation with FSO-based backhaul in hotspots," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 69, no. 3, pp. 3322–3329, 2020.
- [3] W. Du, T. Wang, H. Zhang, Y. Dong, and Y. Li, "Joint resource allocation and trajectory optimization for completion time minimization for energy-constrained UAV communications," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 72, no. 4, pp. 4568–4579, 2023.
- [4] H. Lyu, J. Jang, H. Lee, and H. J. Yang, "Non-iterative Optimization of Trajectory and Radio Resource for Aerial Network". arXiv. 2024. (<https://arxiv.org/abs/2405.01314>)