

트랜스포머 기반 무선 자원 할당 연구 동향 조사

유정엽[°], 고영채^{*}

고려대학교 전기전자공학과[°], 고려대학교 전기전자공학부^{*}

A Survey on Transformer Based Wireless Resource Allocation

Jeong-Yeop You[°], Young-Chai Ko^{*}

Department of Electrical Engineering^{°*}

Korea University^{°*}

{youj0305, [koyc](mailto:koyc}@korea.ac.kr)}@korea.ac.kr

요약

6 세대 무선 통신 네트워크는 대규모 연결, 향상된 데이터 전송 속도, 낮은 전력 소모, 전 세 계적인 커버리지 제공 등 더욱 향상된 통신 네트워크를 제공한다. 특히, 기계 학습 기술은 빔 포밍, 전력제어, 채널 추정 및 검출 등과 같은 무선 통신 시스템 문제를 해결하는 데 도입되어 현재 큰 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 트랜스포머 기반 무선 자원 할당의 이론적 토대를 설명하고 해당 문제에 대한 기술 동향 등을 소개하며 향후 연구 방향을 제시한다.

1. 서론

6 세대 (6G) 이동통신 네트워크는 기존 5 세대 (5G) 이동통신에 비해 대규모 연결, 향상된 데이터 전송 속도, 낮은 전력 소모 등의 성능 개선을 목표로 한다. 많은 무선 통신 문제는 이산 변수와 연속 변수를 함께 최적화하는 문제를 포함한다. 대규모 MIMO (Multiple-Input and Multiple-Output) 시스템에서는 RF 체인의 수가 제한적이기 때문에 안테나의 하위 집합을 선택해야 하고, 전력 할당 역시 중요하기 때문에 빔포머를 통하여 공동으로 최적화해야 한다. 이러한 문제를 효과적으로 해결하기 위해 연구되고 있는 기술 중 하나는 트랜스포머 기반 무선 자원 할당이다. 해당 기술은 [1]에서 소개된 트랜스포머를 활용하여 스케줄링, 빔포밍, 전력제어 등을 수행하는 방법으로, 기존에 사용되던 알고리즘의 성능을 근사하면서 계산 시간을 대폭 단축하는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 트랜스포머 기반 무선 자원 할당에 대한 연구 동향을 살펴본다.

2. 본론

트랜스포머 기반 무선 자원 할당을 연구한 다음 논문들은 무선 통신 상황에서 통신 자원을 효율적으로 분배하는 데 목표가 있다. [2]에서는 연속 변수와 이산 변수를 모두 포함하는 무선 시스템을 설계 및 최적화하였다. 특히, 해당 문제를 해결하는 Branch & Bound 혼합 정수 최적화 방법, Greedy Zero-forcing (GZF) 방법과 비슷한 성능을 보이면서도 계산 복잡도를 크게 줄이는 트랜스포머 기반 알고리

즘을 제안하였다. 제안된 방법에서는, [그림 1]과 같이 트랜스포머의 인코더와 디코더에서 채널 상태 정보를 처리한 후, 디코더의 출력값을 토대로 가장 확률이 높은 사용자를 선택한다. 선택된 사용자는 위치 임베딩 (Positional Embedding) 네트워크에 의해 벡터로 변환되며, 선택된 사용자 순서 정보를 포함한다. 해당 출력이 디코더로 피드백되며 인코더 및 위치 임베딩 값으로 새로운 출력을 결정하는 과정이 반복된다. 위 방법을 바탕으로 MIMO 사용자 스케줄링 및 빔포밍을 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션에서는, 각 사용자의 채널 정보가 네트워크에 순차적으로 입력되며, FDD (Frequency Division Duplex) 기반의 massive MIMO 시스템 및 mmWave 전파 환경에서 산란체의 수가 제한되었고, 신호 대 잡음비 (SNR)의 값을 0-20dB로 설정하였다. 또한 MIMO 시스템에서 완전한 채널 정보 획득은 많은 비용이 들기 때문에 코드북을 사용하여 채널 양자화를 진행했다. 시뮬레이션 결과, 트랜스포머를 활용한 제안 모델은 완전한 채널 정보 및 양자화된 채널 정보에서 모두 기존의 Pointer Networks 보다 우수한 성능을 보였고, GZF 및 Pointer Networks 보다 낮은 복잡도를 가졌다.

[3]에서는 홀로그래픽 원리에 기반한 3 차원 빔을 생성하는 홀로그래픽 MIMO (HMIMO)가 제안되었다. 해당 연구에서는 HMIMO 기반 타겟 지향 통신 시스템을 가정하였고, 사용자 요구 사항에 따라 필요한 홀로그래픽 안테나 배열 (HGAs) 그리드 수를 활성화하여 빔포밍을 위한 전력을 할당한다. 이때 SINR, 최대 전력, 커버리지, 그리드 수, 빔포밍 벡터의 이산조건, HMIMO 간 간섭의 최대값 등을 고려하

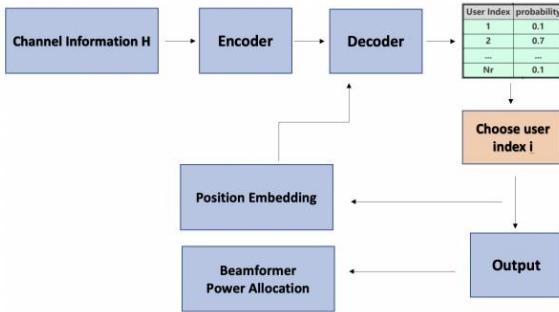


그림 1. 트랜스포머 모델 기반 사용자 선택 방식

여 자원 할당 문제를 최적화하는데, 이 문제는 시간에 따라 랜덤하게 분산되기 때문에 트랜스포머 기반 할당을 활용하였다. 시뮬레이션에서는 [그림 2]와 같이 전력, 방위각 (Azimuth angle), 천정각 (Zenith angle)을 고려하여 트랜스포머 내부의 멀티헤드 어텐션 출력 가중치를 학습 및 테스트하였다. 시뮬레이션 결과, 무작위 전력 할당에 비해 전력을 매우 효율적으로 할당하고, 실제 전력 (Ground truth)과의 차이가 작음을 확인하였다.

[4]에서는 비 직교 다중 접속 (NOMA)을 활용한 다중 반송과 다운링크 시스템에서 전력 및 채널 자원 할당 문제를 해결하기 위해 트랜스포머의 인코더 구조를 활용하여 채널 이득 대 잡음 비율 (CNR)을 처리한다. N 명의 사용자와 K 개의 채널을 포함하는 시스템에서, 각 채널은 B 의 대역폭을 제공하고, n 번째 사용자에게 k 번째 채널을 통해 신호를 전송하기 위해 전력 $P_{n,k}$ 를 할당한다. 수신된 신호는 디코더에서 연속 간섭 제거 (SIC) 기술을 활용하여 복원되고, 주어진 고정 전력 하에서 K 개의 채널에 걸친 N 명의 사용자의 다운링크 데이터 전송 속도의 합을 최대화하는 것이 목표이다. 채널 할당 과정에서 CNR 과 워터-필링 알고리즘을 바탕으로 전력 할당을 진행하는데, 트랜스포머를 활용하여 CNR 값 을 처리한다. 트랜스포머의 임베딩 및 고정 사인파 위치 인코딩 (Sinusoidal positional encoding)을 통하여 CNR 행렬을 처리하였고, 셀프 어텐션 메커니즘을 활용하여 입력 요소들 간의 상호 관계를 분석했다. 이 과정에서 디코더를 사용하지 않음으로써 계산 복잡성 및 비용 측면에서 손실 없이 입력 데이터

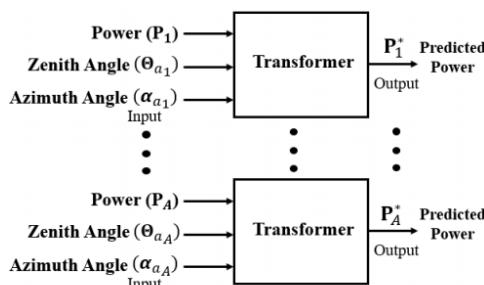


그림 2. 홀로그래픽 베포밍을 위한 트랜스포머 구조

간의 관계를 학습할 수 있다. 채널 할당 문제에 대한 알고리즘을 향상시키기 위하여 손실함수를 활용하였다. 시뮬레이션 결과, 사용자 수 N=6, N=8 시나리오에서 90% 이상의 높은 예측 정확도를 보였고, N=10 와 같은 더 큰 CNR 행렬과 50,000 개의 샘플로 구성된 데이터셋에서도 90% 이상의 모델 정확도를 보일 것으로 예측하였다.

3. 결론

본 논문에서는 무선 자원 할당에서 기존 기술보다 높은 정확도 및 계산 속도를 위한 트랜스포머 기반 기술 연구에 대한 동향을 조사하였다. 본 조사를 통하여 트랜스포머 기반 구조가 탐욕 알고리즘 등과 같은 방식에 비해 작은 계산 복잡도를 가지면서도 비슷한 성능을 낼 수 있는 장점을 가지고 있고, 대규모 데이터셋을 활용할 시에 더 높은 정확도를 보여 좋은 성능을 낼 수 있음을 확인하였다. 이와 같이 트랜스포머 구조의 인코더 및 디코더 구조를 선택적으로 활용 및 변형하여 다양한 무선 자원 할당 통신 시스템에서 더 높은 성능 및 낮은 복잡도를 가지는 효과적인 할당 알고리즘을 연구할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022-0-00704, 초고속 이동체 지원을 위한 3D-NET 핵심 기술 개발)

4. 참고 문헌

- [1] Vaswani, A. (2017). Attention is all you need. *Advances in Neural Information Processing Systems*.
- [2] B. Song, Z. Zhou, C. Li, D. Guo, X. Fu and M. Hong, "Transformer Based Approach for Wireless Resource Allocation Problems Involving Mixed Discrete and Continuous Variables," 2023 IEEE 24th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), Shanghai, China, 2023, pp. 636-640.
- [3] A. Adhikary, A. D. Raha, Y. Qiao, M. S. Munir, K. T. Kim and C. S. Hong, "Transformer-based Communication Resource Allocation for Holographic Beamforming: A Distributed Artificial Intelligence Framework," 2023 24st Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS), Sejong, Korea, Republic of, 2023, pp. 243-246.
- [4] L. L. Dong, "Transformer-Driven Resource Allocation for Enhanced Multi-Carrier NOMA Downlink," 2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Dubai, United Arab Emirates, 2024, pp. 1-6.