

대규모 MU-MIMO 시스템을 위한 효율적인 사용자 선택 및 프리코딩 기법

이형택
이화여자대학교

htlee@ewha.ac.kr

Efficient User Selection and Precoding for Large-Scale MU-MIMO Systems

Lee Hyeongtaek
Ewha Womans University

요약

본 논문은 6G 등 차세대 대규모 MU-MIMO 시스템에서 발생하는 사용자 간 간섭 문제를 해결하기 위한 사용자 선택 및 프리코딩 기법의 중요성과 기술적 난제에 대해 고찰합니다. 기존의 ZF 기반 greedy 사용자 선택 기법은 시스템의 주파수 효율을 높이는 데 효과적이나, 사용자 수가 증가함에 따라 기하급수적으로 늘어나는 행렬 연산 복잡도로 인해 실제 하드웨어 구현에 한계가 있음을 지적합니다. 따라서 초연결 및 초저지연 통신 환경을 성공적으로 실현하기 위해서는 알고리즘의 연산 구조를 개선하여 계산 비용을 획기적으로 절감하는 연구가 필수적임을 강조합니다.

I. 서론

6G를 포함한 차세대 무선 통신 시스템에서 강화된 연결성은 현재 5G 시스템보다 10 배에서 100 배 더 높은 연결 밀도를 지원하는 것을 목표로 하는 핵심 과제이다. 이러한 대규모 사용자 지원을 위해 안테나의 수를 획기적으로 늘리는 대규모 다중 입출력(large-scale MIMO) 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. 하지만 기지국이 다수의 사용자에게 동시에 데이터를 전송할 때 필연적으로 사용자 간 간섭(Inter-User Interference) 문제가 발생하며, 이는 사용자 수가 증가할수록 더욱 심화된다. 이러한 간섭을 완화하고 신뢰할 수 있는 다중 사용자 통신 성능을 보장하기 위해서는 적절한 사용자 선택(user selection) 및 프리코딩(precoding) 기술의 개발이 필수적이다 [1].

기존 연구들에서는 사용자 간 간섭을 효과적으로 줄이고 높은 주파수 효율을 달성하기 위해 zero-forcing (ZF)과 같은 선형 프리코딩 기법을 채택해 왔다 [2]. 그러나 단순히 안테나 수를 늘리거나 기존의 프리코딩 방식을 적용하는 것만으로는 연산 복잡도와 하드웨어 구현의 제약이라는 현실적인 장벽에 부딪히게 된다. 본 논문에서는 대규모 MU-MIMO 환경에서 발생하는 간섭 문제와 이를 해결하기 위한 사용자 선택 알고리즘의 일반적인 구조, 그리고 이에 따른 계산 복잡도 문제에 대해 고찰한다.

II. 본론

본 논문에서는 N 개의 안테나를 갖춘 기지국이 K 명의 단일 안테나 사용자에게 데이터를 전송하는 하향링크 MU-MIMO 무선 통신 시나리오를 고려한다. 시스템의

성능은 주로 합계 주파수 효율(sum-spectral efficiency)을 통해 평가되며, 이는 신호 대 간섭 및 잡음비를 기반으로 계산된다. 따라서 전체 시스템의 효율을 극대화하기 위해서는 채널 상태 정보를 바탕으로 최적의 프리코딩 벡터를 설계하여 사용자 간 간섭을 최소화하는 것이 중요하다. 기지국의 안테나 수가 사용자 수보다 훨씬 많은 경우, ZF나 MMSE(minimum mean-square error)와 같은 선형 프리코딩 방식은 비교적 간단한 연산으로 준수한 성능을 제공하는 것으로 알려져 있다. 하지만 사용자 수가 증가하여 안테나 수에 근접하게 되면, 선형 프리코딩만으로는 심각한 사용자 간 간섭 문제를 해결하기 어려워지며, 이는 전체 주파수 효율의 저하로 이어진다.

이러한 문제를 해결하기 위한 효과적인 대안은 제한된 무선 자원을 효율적으로 활용하기 위해 전체 사용자 중 통신 품질을 극대화할 수 있는 일부 사용자 집합만을 선별하여 서비스를 제공하는 사용자 선택 기법이다. 대표적으로 greedy 사용자 선택 알고리즘은 현재 선택된 사용자 집합에 새로운 사용자를 추가했을 때 시스템의 합계 주파수 효율이 증가하는지 여부를 판단하여, 순차적으로 최적의 사용자를 찾아내는 방식을 취한다.

사용자 선택과 프리코딩을 결합한 방식은 성능 면에서 우수함을 보이지만, 알고리즘이 수행되는 과정에서 막대한 계산 복잡도를 요구한다는 치명적인 단점이 존재한다. 예를 들어, greedy 사용자 선택 과정의 매 단계마다 후보 사용자들에 대한 새로운 프리코딩 행렬을 계산해야 한다. ZF 프리코딩을 적용할 경우, 채널 행렬의 그램(Gram) 행렬을 계산하고 이에 대한 역행렬을 구하는 과정이 필수적으로 수반된다.

일반적인 역행렬 연산은 행렬 크기의 세제곱에 비례하는 연산량을 요구하며, 역행렬과 유효 채널 행렬을 곱하는 과정에서도 추가적인 연산이 발생한다 [3]. 사용자 수가 수십에서 수백 명에 이르는 대규모 MIMO

시스템에서는 이러한 반복적인 행렬 연산 비용이 기하급수적으로 증가하게 된다. 시뮬레이션 결과에 따르면, 기존의 방식대로 사용자 선택을 수행할 경우 수천만 번 이상의 곱셈-누적(MAC) 연산이 필요할 수 있으며, 이는 초저지연을 요구하는 5G 및 6G 통신 규격을 만족시키는 하드웨어를 구현하는 데 있어 실질적인 걸림돌로 작용한다. 따라서 대규모 시스템의 실제 구현을 위해서는 성능 저하 없이 연산 효율성을 극대화할 수 있는 알고리즘 구조에 관한 연구가 시급하다.

III. 결론

본 논문에서는 대규모 MU-MIMO 하향링크 시스템에서 주파수 효율을 극대화하기 위한 사용자 선택 및 프리코딩 기술의 중요성과 그에 따른 계산 복잡도 문제를 살펴보았다. ZF 프리코딩과 결합된 greedy 사용자 선택 기법은 시스템의 전송 용량을 증가시키는 데 효과적이지만, 사용자 수가 증가함에 따라 급증하는 연산량은 실제 하드웨어 구현에 있어 큰 제약 사항이 된다. 특히 매 반복 단계에서 수행되는 고비용의 행렬 역변환 및 행렬 곱셈 연산은 전체 시스템의 지연 시간을 증가시키는 주된 원인으로 지목된다.

따라서 향후 대규모 연결을 지향하는 B5G/6G 환경을 성공적으로 구현하기 위해서는 단순히 이론적인 용량을 증가시키는 것을 넘어, 알고리즘의 연산 구조를 근본적으로 개선하여 계산 비용을 획기적으로 줄이는 연구가 지속적으로 이루어져야 한다. 이는 제한된 하드웨어 자원 내에서 대규모 다중 사용자 간의 간섭을 효율적으로 제어하고, 초고속 및 초연결 통신 서비스를 안정적으로 제공하는 데 기여할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] V. Boljanovic, S. Sarkar, and D. Cabric, "Joint user association and beam scheduling with interference management in dense millimeter-wave networks," *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 23, no. 12, pp. 13 392- 13 405, 2024.
- [2] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 528- 541, Mar. 2006.
- [3] R. Hunger, "Floating point operations in matrix-vector calculus," *Technical University of Munich, Tech. Rep.* 2007.