

LTE 자원 할당 문제에서의 형가리안 알고리즘 적용에 관한 연구

정인지, 안정섭

고려대학교

ioxosr@korea.ac.kr, jsahn@korea.ac.kr

Application of the Hungarian Algorithm for Resource Allocation in LTE systems

Inji Jeong, Jeongseob Ahn

Korea University

요약

LTE(Long Term Evolution) 시스템에서는 제한된 무선 자원을 다수의 사용자에게 효율적으로 할당하는 것이 중요한 문제로 다뤄진다. 기존 연구들에서는 자원 할당 문제를 최적화하기 위한 다양한 알고리즘이 제안되어 왔으며, 그중 형가리안 알고리즘은 전역 최적 해를 보장하는 선형 할당 문제 해결 기법으로 알려져 있다. 본 연구에서는 LTE 환경에서의 자원 할당 문제를 Assignment Problem으로 모델링하고, 형가리안 알고리즘의 동작 원리와 적용 과정을 중심으로 분석하였다. 사용자별 SINR을 기반으로 효율 행렬을 구성하고, Python 기반 시뮬레이션을 통해 형가리안 알고리즘을 적용한 자원 할당 결과를 확인하고 기존의 다른 알고리즘과 성능을 비교하였다. 본 연구는 형가리안 알고리즘을 LTE 자원 할당 문제에 적용하는 과정을 단계적으로 정리함으로써, 이동통신 시스템 자원 관리 알고리즘에 대한 이해를 높이고 향후 관련 연구를 위한 기초 자료를 제공하는 데 목적이 있다.

I. 서론

LTE 시스템에서 자원 할당 문제는 다수의 사용자와 제한된 무선 자원 (Resource Block) 간의 효율적인 매칭 문제로 정의할 수 있다. 기존의 Round Robin, Proportional Fair 방식은 구현이 간단하지만, 사용자 채널 상태(CQI)를 충분히 반영하지 못하거나 전체 시스템 처리율의 최적성을 보장하지 못한다는 한계를 가진다. 한편, 자원 할당 문제를 최적화 문제로 모델링하려는 접근으로 Auction 알고리즘 및 ϵ -Complementary Slackness 기반 Auction 알고리즘이 제안되어 왔으며, 이들은 형가리안 알고리즘의 전역 최적 해를 근사적으로 구현하기 위한 방법으로 활용된다. 본 연구에서는 LTE 자원 할당 문제를 이분 그래프 기반의 할당 최적화 문제로 모델링하였다. 각 사용자는 하나의 RB를 할당받고, 각 RB는 하나의 사용자에게만 할당된다는 제약 조건은 형가리안 알고리즘의 기본 가정과 일치한다. 형가리안 알고리즘은 전체 비용 행렬에 대해 전역 최적해를 보장하는 알고리즘으로, 채널 상태 기반의 가중치를 비용 함수로 정의할 경우 시스템의 효율을 극대화할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 본 연구에서는 기존 휴리스틱 방식 대비 성능 개선 가능성을 검증하기 위해 형가리안 알고리즘을 적용하였다. 또한 알고리즘 간 성능을 비교·분석함으로써 형가리안 알고리즘 기반 접근의 타당성을 검증하고자 한다.

II. 본론

1. LTE 자원 할당 문제

LTE 시스템에서 기지국은 다수의 사용자에게 제한된 RB를 배정해야 하며, 각 사용자와 RB 간의 신호 품질은 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)로 표현된다. SINR이 높을수록 해당 자원을 사용할 때 얻을 수 있는 데이터 전송 효율이 높아진다. 따라서 전체 시스템의 성능을 극대화하기 위해서는 사용자 - 채널 간의 조합을 최적으로 선택해야 한다.

2. 형가리안 알고리즘

형가리안 알고리즘은 선형 할당 문제를 해결하기 위한 대표적인 최적화 기법으로, 행렬이 주어졌을 때 전체 비용의 합이 최소가 되도록 매칭을 찾는다. 형가리안 알고리즘은 계산 복잡도로 인해 실시간 시스템 적용에는 제약이 있으나, 자원 할당 문제에 대한 최적 기준 성능(upper bound)을 제공하는 알고리즘으로 널리 사용된다. 본 연구에서는 SINR 값을 효율 행렬로 변환하여, 형가리안 알고리즘을 통해 사용자와 무선 채널 간의 최적 매칭을 계산한다.

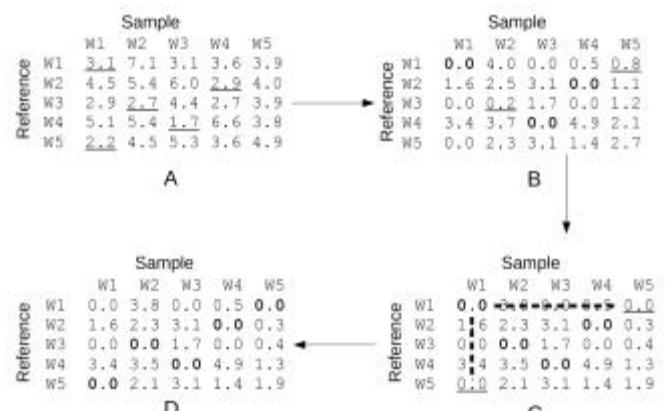


그림 1. 형가리안 알고리즘의 단계별 작동 원리 [1]

3. LTE 자원 할당 문제에 대한 수학적 모델링

사용자와 RB 간 행렬을 구성할 때에 사용자 i 와 RB j 의 $SINR(i, j)$ 또는 전송률 R_{ij} 를 기반으로 행렬을 구성하였다. LTE 자원 할당에 대해 총 전송 효율(SINR)을 최대화하는 것이 목적이지만, 형가리안 알고리즘은 최소 비용 문제를 해결할 때 사용하므로 $cost_{i,j} = -SINR_{i,j}$ 로 변환하여 사용하였다. LTE downlink 환경에서 사용자 수와 자원 블록 수가 동

일한 경우를 가정하여 구성한 사용자 - RB 간 SINR 기반 효율 행렬에서 각 행은 사용자, 각 열은 자원 블록을 의미하며, 행렬의 각 원소는 해당 사용자가 특정 자원 블록을 할당받았을 때의 SINR 값을 나타낸다. 본 연구에서는 이 효율 행렬을 헝가리안 알고리즘의 입력으로 사용하여 최적의 사용자 - RB 매칭을 수행하였다.

	RB 1	RB 2	RB 3	RB 4
사용자 1	12.4	8.7	10.9	6.3
사용자 2	7.8	14.1	9.6	11.2
사용자 3	10.5	9.2	13.8	8.6
사용자 4	6.9	11.7	7.4	15.0

표 1. 효율 행렬 구성 예시

4. LTE 시스템에서의 헝가리안 알고리즘 구현

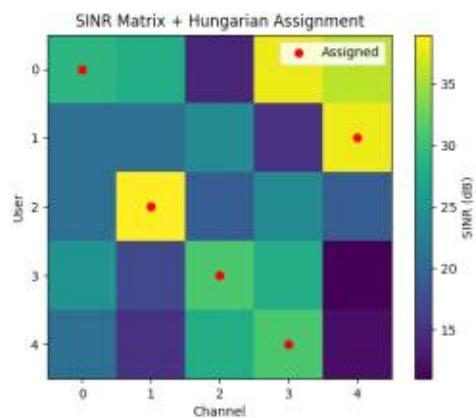


그림 2. 헝가리안 알고리즘을 통한 사용자-채널 매칭 결과

5. 기존 알고리즘과의 성능 비교

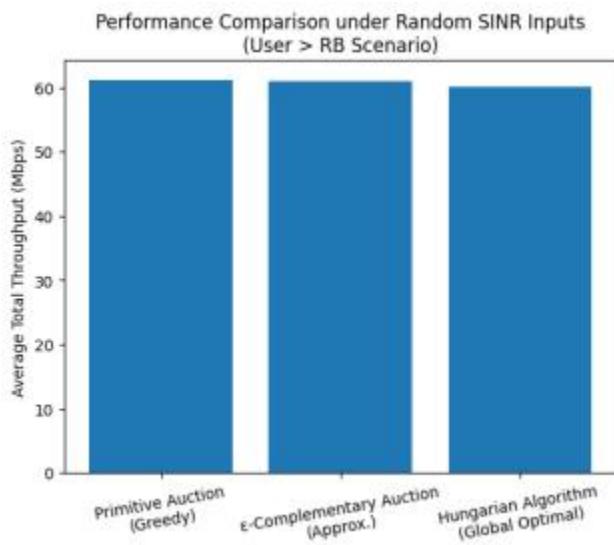


그림 3. 기존 알고리즘과 성능 비교 그래프

비교 대상 알고리즘으로는 기존에 사용되는 원시적 Auction 알고리즘과 Complementary Slackness 기반 알고리즘을 고려하였다. Python 환경에서 각 알고리즘을 구현하고, 동일한 SINR 조건에서의 자원 할당 결과를 비교함으로써 헝가리안 알고리즘의 성능을 정량적으로 평가하였다.

4. 실험 결과 및 분석

또한 시각화를 통해 사용자 - 채널 매칭 결과를 분석한 결과, 헝가리안 알고리즘이 간섭을 최소화하면서도 전역 최적해를 안정적으로 도출함을 확인할 수 있었다. 그림 3은 랜덤 SINR 환경에서 사용자 수가 자원 블록 수보다 많은 과부화 시나리오를 가정하여 Primitive Auction, ϵ -Complementary Auction, 그리고 헝가리안 알고리즘의 총 전송률 성능을 비교한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션 결과, Primitive Auction 알고리즘은 RB 단위의 국소적인 전송률 최대화를 수행함으로써 가장 높은 총 전송률을 보였으나, 사용자 간 공정성을 고려하지 않는 한계를 가진다. 반면, 헝가리안 알고리즘은 1:1 매칭 제약으로 인해 총 전송률 관점에서는 상대적으로 낮은 성능을 보였으며, 이는 알고리즘 구조적 특성에 기인한 결과이다.

III. 결론

헝가리안 알고리즘은 계산 복잡도와 실시간 처리 제약으로 인해 3GPP 표준 기반의 상용 LTE 시스템 스케줄러에 그대로 적용되지는 않는다. 그러나 학술 연구 분야에서는 여전히 자원 할당 문제에 대한 가장 강력한 전역 최적 기준 성능을 제공하는 알고리즘으로 널리 활용되고 있다. 본 연구에서도 헝가리안 알고리즘을 기준으로 다양한 자원 할당 기법의 성능을 비교·분석함으로써, 제안 접근법의 타당성을 검증하고자 하였다. 특히 LTE/5G 환경에서 Uplink RB 연속성 제약, Downlink RB 효율 최적 배분, CoMP 기반 간섭 최소화, MIMO 사용자 - 안테나 매칭 문제 등 [2]-[5] 다양한 자원 배정 시나리오에서 헝가리안 알고리즘 또는 이를 기반으로 한 기법들이 활용되어 왔다는 점은, 본 연구의 접근 방식이 충분한 학문적 타당성을 가진다는 것을 뒷받침한다. 비록 헝가리안 알고리즘이 계산 복잡도 문제로 인해 상용 LTE 스케줄러에 직접 적용되기는 어렵지만, 본 연구는 이론적 기준선으로서의 학문적 가치와 향후 5G·6G 자원 할당 알고리즘 연구에 있어 중요한 참고 모델이 될 수 있음을 시사한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 고려대학교 진리장학(ACESS)의 연구 결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] F. Fogolari and G. Esposito, "Optimal Relabeling of Water Molecules and Single-Molecule Entropy Estimation," 2021.
- [2] S. H. Ali and V. C. M. Leung, "Dynamic resource allocation in OFDMA-based wireless networks using the Hungarian algorithm," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 8, no. 6, pp. 2817 - 2826, Jun. 2009.
- [3] N. Baldo and M. Miozzo, "An optimal resource block allocation for LTE downlink using assignment algorithms," IEEE International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS), pp. 327 - 331, 2011.
- [4] M. Rahman and H. Yanikomeroglu, "Enhancing cell-edge performance: A downlink dynamic interference avoidance scheme," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 4, pp. 1419 - 1429, Apr. 2010.
- [5] A. Maatouk and M. Assaad, "Optimal resource allocation for downlink OFDMA systems using assignment algorithms," IEEE International Conference on Communications (ICC), pp. 1 - 6, 2010.