

선형 이중 경매에 기반한 네트워크 슬라이싱 자원 할당

허수빈, 박세웅*
서울대학교 뉴미디어통신공동연구소

sbhuh@netlab.snu.ac.kr, *sbahk@snu.ac.kr

Resource Sharing in Network Slicing via Linear Double Auction

Huh Subin, Bahk Saewoong*

Department of Electrical and Computer Engineering, INMC, Seoul National Univ.

요 약

본 논문은 서로 비협조적인 네트워크 슬라이스 운영자들 간에 합리적으로 무선 주파수 자원을 할당하기 위한 선형적 이중 경매(linear double auction) 기반 방법론을 제안하였다. 이 방법론은 분산적인 멀티 에이전트 환경을 감안해 설계되었고, 시뮬레이션으로 검증되었다.

I. 서론

서로 독립적인 이해관계를 가진 응용서비스 사용자들에게 효율적이면서도 공정하게 무선 자원을 할당하기 위해서는 비협조적인(non-cooperative) 사용자들, 나아가 네트워크 슬라이싱을 고려해야 한다. 네트워크 슬라이싱에 기반한 응용서비스 지원을 가능케 하려면 네트워크 슬라이스로 대변되는 서로 다른 응용서비스 사용자 집단이 민감한 개인정보(위치 등)를 보호받으면서도 동시에 네트워크 슬라이싱의 도입으로 인해 효용이 증가해야 한다. 이 경우 자원할당은 자원 부족이나 과잉이 자체적으로 해결되는 분산형 기법을 기반으로 해야 한다. 위와 같은 배경에 근거해, 본 논문에서는 셀룰러 네트워크 기반 애플리케이션의 성능 및 이용자의 프라이버시 보장을 위한 네트워크 슬라이싱 자원 공유 기법을 개발하였다.

네트워크 슬라이싱 무선 및 컴퓨팅 자원 할당 문제는 광범위하게 연구된 바 있다. 네트워크 슬라이싱이 산업적 효용을 갖기 위해서는 저지연성을 보장할 수 있어야 하고 [1], 서로 충돌하는 슬라이스 생성 요청을 중재할 수 있어야 하고 [2], 자원 할당 과정에서 이용자마다 상이한 무선 통신 환경을 고려해야 한다 [3, 4]. 그러나, 각 네트워크 슬라이스의 비협조성을 고려하지 않은 방법론은 현실적으로 적용하기 어렵다는 근본적인 한계를 가진다. 이에 대한 해결책으로, 동적 게임(dynamic game)에 기반한 슬라이스 간의 자원할당 방법론에 대한 연구가 진행되었다 [5-7]. 그러나, 일반적인 동적 게임에는 크게 두 가지 한계가 있다. 첫째, 전략으로 나타내어지는 자원 요구량이 노출되어, 다른 네트워크 슬라이스에게 각 지역에서의 이용자 수 등 민감한 정보가 유출될 수 있다. 둘째, 게임 하나가 수렴하는 데에는 여러 iteration 이 소모되어, 1 subframe-1 slot 단위로 수행되어야 하는 실시간 자원 재할당을 실현시키기 어렵다는 문제가 있다.

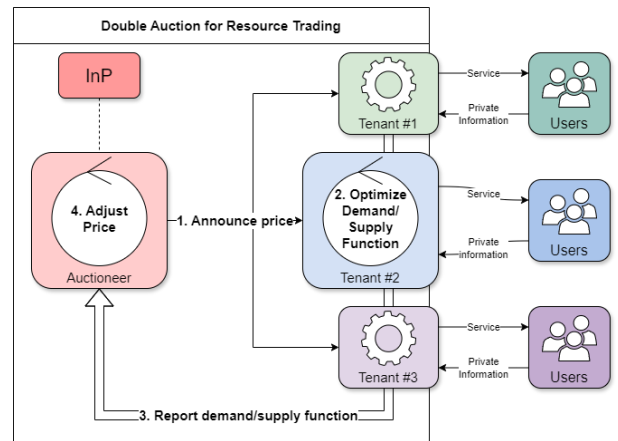


그림 1 네트워크 슬라이싱 자원 할당 과정의 개념도

II. 개요

제시된 문제점들을 극복하기 위해 본 연구에서는 다음과 같이 선형적 이중 경매(linear double auction) 기반 네트워크 슬라이싱 자원 할당 방법론을 [그림 1]과 같이 제안하였다.

무선 네트워크 인프라를 공유하는 응용서비스 이용자들이 각자 서비스 종류별로 네트워크 슬라이스에 귀속되고, 응용서비스 사업자가 네트워크 슬라이스를 운영해 인프라 사업자에게서 대역폭을 할당받는 시나리오를 가정한다. 인프라 사업자는 경매 진행자(auctioneer) 역할을 맡아, 자원의 단위 가격을 결정한다 ①. 가격이 공지되면 각 네트워크 슬라이스에서 전체 손익(payload)을 고려하여 무선 자원을 얼마나 사고 팔지 조정하고 ②, 그 결과에 경매 진행자에게 통보됨에 따라 ③ 가격 역시 재조정된다 ④. 이 과정은 가격이 최적 값으로 수렴할 때까지 반복된다.

Algorithm 1 Double Auction with Linear Demand-Supply

```

1:  $i = 0$ 
2: Initialize the price  $\mathbf{p}(0) \in \mathbb{R}^K$ 
3: while convergence criteria is not met do
4:   Update  $\mathbf{x}_t^n \leftarrow \mathbf{x}_n(i) \quad \forall n \in \mathcal{N}$  as (*)
5:   Update  $\gamma_n \leftarrow \beta_n \mathbf{p}(i) + \mathbf{x}_n(i) - \bar{\mathbf{x}}_t^n$ 
6:   Update  $\mathbf{p}(i+1)$  as (**)
7:   Get feasible  $\mathbf{x}_t^n$  by projecting  $\mathbf{x}_n(i)$  for all  $n$ 
8:    $i \leftarrow i + 1$ 

```

그림 2 자원 할당 알고리즘의 구성

III. 방법

본 연구에서는 [8]의 접근 방식을 바탕으로 경매를 기반으로 한 네트워크 슬라이스 간 자원 공유 방법론을 제안하였다. 구체적인 자원 거래 방식은 이중 경매(double auction)으로, 모든 서비스 제공자가 경매 참가자가 된다. 경매 참가자는 수요(demand) 및 공급(supply)을 자원 가격에 대한 선형 함수로 설계해 경매 진행자(auctioneer)에게 제출하고, 진행자는 총 수요와 총 공급이 균형을 이루는 가격을 자원의 가격으로 채택한다. 제안하는 방법론은 이중 경매를 여러 번 반복해 최적의 가격 및 자원 분배를 달성하는 것으로, 매 회차마다 각 서비스 제공자는 자신의 수요 및 공급 함수를 자신의 수익을 극대화하는 방향으로 조정한다. 방법론에 대한 구체적인 알고리즘은 [그림 2]와 같다.

제안하는 방법론은 컨벡스 최적화를 기반으로, 비교적 적은 컴퓨팅 자원을 소모하여 빠르게 최적해로 수렴한다. 제안하는 방법론은 복잡한 시스템을 심층 신경망으로 근사함으로써 쉽게 대수적인 해를 구할 수 없는 일반적인 시스템 환경에도 일반화될 수 있다.

본 연구에서는 제안하는 방법론이 특정 조건 하에 시스템 전체의 공익(social welfare)을 극대화하는 컨벡스 최적화 문제와 같은 해를 구한다는 것을 증명하였다. 따라서, 이기적으로 행동하며 서로 정보를 공유하지 않는 서비스 제공자를 가정했음에도 제안하는 기법은 모든 정보가 공유되는 협력적인 서비스 제공자를 가정하는 상황과 같은 결과를 얻어, 공익성을 보장한다.

IV. 시뮬레이션 실험

본 연구에서는 위에서 제안한 방법론을 검증하기 위해, 단순하게 구성된 네트워크 환경을 가정하고, 하나의 슬라이스가 판매자가 되고 나머지 둘이 구매자가 되는 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션에서 이용자 수 및 채널 환경은 정적이라고 가정되었다. 따라서 각 네트워크 슬라이스가 서비스를 제공함으로써 벌어들이는 utility 는 오직 할당 받은 bandwidth 의 함수로 나타내어진다.

	Buyer 1	Buyer 2	Seller
Bandwidth Share	10 MHz	10 MHz	20 MHz
Required Bandwidth	20 MHz	20 MHz	10 MHz
Total Bandwidth	40 MHz		

그 결과 [그림 3]과 같이 알고리즘이 수렴하는 것을 확인할 수 있었다.

V. 결론

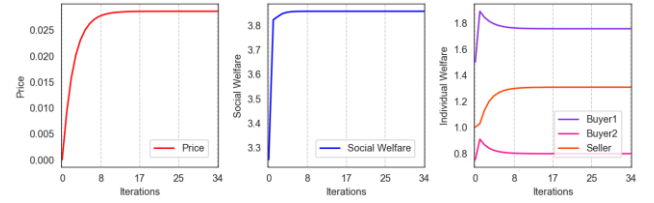


그림 3 알고리즘 실행 결과

본 논문에서는 대역폭 부족이 심할수록 가격이 상승하고, 슬라이스 간에 자원의 구매자/판매자가 갈리고 그 결과 전체 시스템의 손익이 정적 자원할당 대비 상승하는 것을 확인하여 제안하는 방법론의 타당성을 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학 ICT 연구센터육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-2021-0-02048).

참고 문헌

- [1] L. Zanzi, V. Sciancalepore, A. Garcia-Saavedra, H. D. Schotten, and X. Costa-Pérez, "LACO: A Latency-Driven Network Slicing Orchestration in Beyond-5G Networks," *IEEE TWC*, vol. 20, no. 1, pp. 667–682, Jan. 2021.
- [2] V. Sciancalepore, L. Zanzi, X. Costa-Pérez, and A. Capone, "ONETS: Online Network Slice Broker from Theory to Practice," *IEEE TWC*, vol. 21, no. 1, pp. 121–134, Jan. 2022.
- [3] A. Papa, A. Jano, S. Ayya, S. K. O. Ayan, H. M. G. Ursu, and W. Kellerer, "User-Based Quality of Service Aware Multi-Cell Radio Access Network Slicing," *IEEE TNSM*, vol. 19, no. 1, pp. 756–768, Mar. 2022.
- [4] Y. Chen, R. Yao, H. Hassanieh, and R. Mittal, "Channel-Aware 5G RAN Slicing with Customizable Schedulers," in *20th NSDI 23*, Apr. 2023, pp. 1767–1782.
- [5] P. Caballero, A. Banchs, G. de Veciana, X. Costa-Pérez, and A. Azcorra, "Network Slicing for Guaranteed Rate Services: Admission Control and Resource Allocation Games," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 10, pp. 6419–6432, Oct. 2018.
- [6] S. D'Oro, F. Restuccia, T. Melodia, and S. Palazzo, "Low-Complexity Distributed Radio Access Network Slicing: Algorithms and Experimental Results," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 26, no. 6, pp. 2815–2828, Feb. 2018.
- [7] A. Lieto, I. Malanchini, S. Mandelli, E. Moro, and A. Capone, "Strategic Network Slicing Management in Radio Access Networks," *IEEE TMC*, vol. 21, no. 4, pp. 1434–1448, Apr. 2022.
- [8] T. Taniguchi, K. Kawasaki, Y. Fukui, T. Takata, and S. Yano, "Automated Linear Function Submission-Based Double Auction as Bottom-up Real-Time Pricing in a Regional Prosumers' Electricity Network," *Energies*, vol. 8, no. 7, pp. 7381–7406, Jul. 2015.