
인지무선네트워크를 위한 스펙트럼 마켓에서 평형상태 계산

변상선

부산가톨릭대학교

Computation of an Equilibrium in Spectrum Markets for Cognitive Radio Networks

Sang-Seon Byun

Catholic University of Pusan

E-mail : ssbyun@cup.ac.kr

요 약

최근 약 10년 동안, 인지무선환경에서 1차사용자와 2차사용자간의 스펙트럼 공유를 시장 (market) 논리와 접목시키는 연구들이 활발하게 진행되어 왔다. 즉, 1차사용자가 자신이 소유하고 있는 주파수 자원을 2차사용자에게 금전적 보상을 받고 대여하는 형태를 고려하는 것이다. 그리고, 이에 대한 시장의 평형 (market equilibrium)을 이론적으로 제시하는 것이 그 연구들의 주요 목표이다. 우리는 이 논문에서, 1차사용자들은 2차사용자들에게 자신들의 유휴 채널의 사용권을 대여 또는 판매하는데, 1차사용자들은 허용가능한 간섭의 양을 정해놓고, 2차사용자가 그 간섭의 양을 초과하게 되면 금전적인 보상을 받는 시장 모델을 고려한다. 그리고, 각 2차사용자는 자신들이 1차사용자들에게 지급할 수 있는 예산에는 제한이 있는 상황도 추가 고려한다. 2차사용자의 재화는 자유공간상에서 획득 가능한 전송률이고 1차사용자의 재화는 금전적인 순이익 (net profit)이다. 우리는 이러한 인지무선네트워크 시장을 확장된 Fischer 마켓으로 모델링하고, Eisenberg-Gale convex program을 통해 마켓 균형을 찾는 방법을 제안한다.

ABSTRACT

In this paper, we investigate a market equilibrium in multi-channel sharing cognitive radio networks (CRNs): it is assumed that every subchannel is orthogonally licensed to a single primary user (PU), and can be shared with multiple secondary users (SUs). We model this sharing as a spectrum market where PUs offer SUs their subchannels with limiting the interference from SUs; the SUs purchase the right to transmit over the subchannels while observing the interference limits set by the PUs and their budget constraints. The utility function of SU is defined as least achievable transmission rate, and that of PU is given by the net profit. We define a market equilibrium in the context of extended Fisher model, and show that the equilibrium is yielded by solving an optimization problem, Eisenberg-Gale convex program.

키워드

인지무선네트워크, 마켓균형, Eisenberg-Gale Convex Program

1. 서 론

미시경제학의 마켓기반 스펙트럼 공유기법을 도입하여 인지무선환경의 1차사용자와 2차사용자간의 합리적인 스펙트럼 공유를 유도하는 방법에 대해서 많은 연구가 이루어져왔다.

일반적인 마켓기반의 스펙트럼 공유기법에서는 스펙트럼과 간섭 (interference)이 거래 가능한 자원으로 정의된다 [1-3]. 즉, 1차사용자가 자신들이 소유하고 있는 스펙트럼을 2차사용자에게 대여하고 받게 되는 간섭의 양에 따라 일종의 사용료를 징수하는 것이다. 2차사용자는 1차사용자

를 더 많이 간섭할수록 더 많은 사용료를 지불하여야 한다. 따라서, 자신의 전송 파워를 조절함으로써 필요이상으로 1차사용자를 간섭하지 않도록 해야 한다. 그리고, 1차사용자와 2차사용자는 각각, 자원 (즉, 스펙트럼의 개수와 허용가능한 간섭의 양)과 예산에 제약을 갖는다.

1차사용자의 재화함수(utility function)는 2차사용자로부터 견어들이는 금전적 이득으로, 2차사용자의 재화는 간섭이 없는 공간 (free space)에서 얻을 수 있는 최대 전송율로 각각 정의된다. 그러면, 1차사용자가 가지고 있는 재화와 2차사용자가 가지고 있는 모든 예산을 소비하고, 1차사용자 2차사용자 모두가 최대의 재화를 획득할 수 있는 마켓평형 (market equilibrium)이 정의되고, 이 마켓평형은 Eisenberg-Gale convex program [4]으로 정의되는 최적화 문제를 품으로써 얻어진다. 이 상태에서 2차사용자들의 재화는 waek Pareto 측면에서 최대화가 되고, 이 convex program의 Lagrangian dual variable이 마켓평형을 이루는 재화들의 가격 (market-clearing price) 이 된다.

이 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. 2장에서 스펙트럼 마켓모델과 마켓평형에 대해서 정의하고, 3장에서는 마켓평형을 계산하기 위한 Eisenberg-Gale convex program에 대해서 정의한다. 4장에서는 간단한 수치실험 결과에 대해서 논하고, 5장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 스펙트럼 마켓모델과 마켓평형

마켓모델을 정의하기 전에 다음과 같은 주요 기호들을 정의한다.

I : 전송을 하고자 하는 2차사용자들의 집합

L : 1차사용자들의 집합, $|L| = m$

J : 스펙트럼의 집합

u_i : 2차사용자 i 의 재화함수

$p_i = [p_{i1}, \dots, p_{im}]$

p_{ij} : 2차사용자 i 가 스펙트럼 j 에 사용하는 전송 파워

J_i : 1차사용자 l 에게 할당된 스펙트럼의 집합

v_l : 1차사용자 l 의 재화함수

π_{lj} : 1차사용자 l 이 스펙트럼 j 에 매긴 가격

$\pi_l = [\pi_{lj}, \dots, \pi_{lm}]$

$y_l = [y_{l1}, \dots, y_{lm}]$

y_{lj} : 1차사용자 l 이 스펙트럼 j 에 설정한 tolerable한 간섭의 양

그리고, 마켓평형은 아래와 같이 정의된다. 우선 2차사용자의 재화함수인 u_i 는 아래와 같이 정의된다.

$$u_i = \sum_{j \in J} B_j \log_2 \left(1 + \frac{p_{ij} G_{ij}}{N_0} \right) \quad (1)$$

1. 각 2차사용자 i 마다 p_i 는 u_i 를 최대화하는데 다음의 식을 만족한다. e_i 는 2차사용자 i 의 예산이다.

$$\sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \pi_{lj} p_{ij} G_{ij}^l \leq e_i \quad (2)$$

2. 각 1차사용자 l 의 y_l 은 v_l 은 최대화하는데 다음의 식을 만족한다.

$$\sum_{j \in J} y_{lj} \leq Y_l \quad (3)$$

3. 각 스펙트럼 j 는 다음을 만족한다.

$$\sum_{l \in L} \sum_{j \in J} \pi_{lj} y_{lj} = \sum_{i \in I} e_i \quad (4)$$

$$4. \sum_{l \in L} y_{lj} = \sum_{i \in I} \sum_{n \in L} p_{ij} G_{ij}^l \quad (5)$$

즉, 마켓평형 상태에서는 모든 판매자 (1차사용자)와 구매자 (2차사용자)의 재화함수가 최대화되고, 판매자와 구매자가 가지고 있는 자원과 예산이 모두 소모된다. 이를 market-clearing 평형이라고 한다.

III. The Convex Program

2장에서 정의된 마켓평형은 아래와 같이 정의된 Eisenberg-Gale convex program을 풀게 되면 찾을 수 있다.

$$\text{maximize } \sum_{i \in I} e_i \ln(f_i) \quad (6)$$

$$\text{subject to (3) and } \sum_{i \in I} p_{ij} G_{ij}^l \leq y_{lj} \quad (7)$$

그리고, 각 1차사용자 l 을 위한 선형프로그램 (linear program)은 다음과 같다.

$$\text{maximize } \sum_{j \in J} \eta_j y_{lj} \quad (8)$$

$$\text{subject to } \sum_{j \in J} y_{lj} \leq Y \quad (9)$$

η_l 은 위 convex program의 Lagrangian dual variable 이고, 이는 마켓평형을 가져오는 가격이 된다.

IV. 수치실험

이 논문에서 사용된 방법으로 얻어진 마켓평형을 평가하기 위해 아래와 같은 인지무선환경을 가정한다.

- 네트워크 크기: 500m × 500m의 정사각형

- 에 임의로 1차사용자와 2차사용자를 배치
- 주파수 대역: 54-786MHz의 TV 주파수대역
 - 주파수 대역은 여러개의 채널로 나누어지는데 각 채널이 가급적 같은 전송율을 갖도록 나누어진다.
 - 위 convex program을 풀기 위해 Interior Point Optimizer (IPOPT) [5]를 사용한다.
 - ϵ : (0, 0.1] 구간에서 임의로 설정
 - Y_i : 모든 1차사용자에 대해 $8e-08$
 - Thermal noise: $1e-10$
 - 1차사용자들의 전송과워: 0.1W

이러한 환경에서, 모든 2차사용자들의 금전적 제한 조건 (식 (2))이 만족되면서 위 convex program의 최적값을 구했을 때, 모든 부채널의 가격변화 (가격은 1차사용자들이 개별적으로 정함)에 따른 2차사용자들의 간섭의 요구량의 변화 (모든 2차사용자들의 간섭 요구량의 합의 변화)를 측정한다. 이 측정을 위해, 3개의 2차사용자와 2개의 1차사용자, 그리고, 8개의 부채널을 가정하고, 각 1차사용자의 간섭허용치, 즉, $Y_i=8e-08$ 로 한다. 측정 결과는 그림 1에 표현되어 있다.

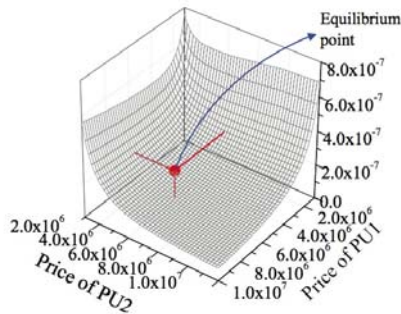


그림 1. 스펙트럼의 가격변화에 따른 간섭요구량의 변화와 마켓균형

위 그림 1에 표현되어 있듯이, 모든 1차사용자에 대해 부채널의 가격이 올라갈수록 2차사용자들의 간섭요구량이 줄어드는 것을 관찰할 수 있고, 마켓평형은 전체 간섭의 요구량의 합이 정확히 $2 \times Y_i$ (즉, $1.6e-07$)에서 얻어짐을 알 수 있다. 즉, 2차사용자들의 재화가 최대화 되고, 1차사용자 제공하는 간섭의 제공량과 2차사용자의 간섭요구량이 같아지며, 2차사용자가 가지고 있는 모든 비용을 소모한다 (즉, market-clearing equilibrium).

V. 결 론

이 논문에서는 Eisenberg-Gale convex program을 통해 스펙트럼 시장의 마켓균형을 찾는 방법을 연구한다. 이 마켓균형은 1차사용자뿐

만아니라 2차사용자의 재화함수를 최대화하고 1차사용자가 제공하는 스펙트럼과 2차사용자의 예산을 모두 소비한다 (market-clearing equilibrium).

참고문헌

- [1] A. Ghosh and S. Saker, "Quality-sensitive price competition in secondary market spectrum oligopoly-single location game," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 24, pp. 1894-1907, 2016.
- [2] H. Xu, J. Jin, and B. Li, "A secondary market for spectrum," *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1-5, 2010.
- [3] S. Zhong, H. Yao, and Y. Fang, "MICOR: a market for incentive-compatible cooperative relay in cognitive radio networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, pp. 5350-5367, 2015.
- [4] K. Jain, V. Vazirani, and Y. Ye, "Market equilibria for homothetic, quasi-concave utilities and economics of scale in production," *Proc. ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms (SODA)*, pp. 63-71, 2005.
- [5] A. Wachter and L. T. Biegler, "On the implementation of a primal-dual interior point filter line search algorithm for large-scale nonlinear programming," *Mathematical Programming*, vol. 106, pp. 25-57, 2006.