

사업자간 무선 인프라 공유를 위한 계층적 자원 할당 방법

김지환^o, 모정훈^{*}, 정송

한국과학기술원 전기 및 전자공학과, 연세대학교 정보산업공학과^{*}

A hierarchical resource allocation scheme for inter-provider wireless infrastructure sharing

Jihwan Kim^o, *Jeonghoon Mo and Song Chong

Department of Electronics Engineering, KAIST,

^{*}Department of Industrial and Information Engineering, Yonsei University

kimji@netsys.kaist.ac.kr, j.mo@yonsei.ac.kr, songchong@kaist.edu

요 약

공통의 무선 인프라를 여러 망 사업자가 서로 공유하여 각 사업자의 사용자에게 서비스를 제공할 수 있는 환경에서 본 연구는 사업자간 공유가 계약에 기반하여 이루어지면서 동시에 사업자의 사용자들에게 무선 자원의 시변 특성을 효율적으로 이용하여 자원 할당하는 방법에 대해 논의한다. 사업자간 계약 기반 공유는 무선 인프라를 점유하는 시간을 기준으로 세우고 이를 평균적으로 만족하게 한다. 이를 통해 사업자 별 할당된 자원을 그 사업자의 사용자에게 할당 해주는 계층적 자원 할당 구조를 가진다. 우리는 사업자간 공유와 자원의 효율성을 고려하는 자원 할당 문제를 수식화하고 GPD (greedy primal-dual)에 기반하여 최적의 해를 찾는 알고리즘을 제안한다. 마지막으로 제안한 알고리즘의 성능은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서론

무선 네트워크 분야에서 무선 채널의 시변 특성을 적극적으로 이용하여 기회적 스케줄링을[1] 하거나 간섭 관리, 협력 통신 등을 통해 무선 자원을 좀 더 효율적으로 사용하고자 하는 연구가 많이 있다. 이런 연구 대부분은 사업자의 개념 없이 단일 사업자 환경으로 고려된다. 하지만 우리는 무선 자원을 통해 사용자들에게 서비스를 제공하고 이윤을 얻고자 하는 사업자가 여럿 있다 가정하고 이들이 AP (access point), BS (base station) 등과 같이 셀을 구성하는 무선 인프라를 공유하여 각각의 사용자들에게 서비스를 제공할 수 있는 환경을 고려한다. 여기서 공유란 단순히 사용 허가 정도의 공유가 아니라 사업자 간 계약에 기반하여 사업자 단계에서 무선 인프라의 공유가 이루어지고 공유에 의해 할당된 자원을 다시 각 사업자로부터 서비스 받는 사용자들이 사용하는 형태를 의미한다.

사업자들이 무선 인프라를 공유하여 사용하는 환경은 여러 가지가 있을 수 있다. 먼저 실제 무선 인프라를 소유하지 않고 계약을 통해 무선 인프라를 가진 사업자의 망의 일정 부분을 빌려 사용자에게 VoIP, 스트리밍, 게임 등 다양한 응용 서비스를 제공하는 가상 망 사업자가 예가 된다[2]. 이 때 무선

인프라를 소유한 사업자 입장에서는 계약에 기반하여 가상 망 사업자와 혹은 가상 망 사업자간 무선 인프라를 공유하여 사용할 수 있도록 망을 운용해야 할 필요가 있다. 두 번째로 무선 인프라를 가진 사업자들 여럿이 더 넓은 무선 인프라 커버리지를 얻기 위해 서로 협력하여 하나의 망처럼 사용하고 자 하는 경우이다. 현재 미국의 망 사업자 Boingo는 적은 비용으로 넓은 AP 커버리지를 갖기 위해서 개인이 설치한 AP를 계약 아래 Boingo의 AP처럼 사용할 수 있게 하고 있다[3]. 이 때 AP를 협력한 개인들은 Boingo의 다른 AP를 할인된 가격으로 이용할 수 있게 하여 협력에 대한 기여도를 고려한다. 유사하게 사업자가 서로의 무선 인프라를 공유할 때 사업자들의 기여도가 고려되지 않는다면 더 높은 기여도를 가진 사업자 입장에서 이런 협력은 이루어질 수 없다. 따라서 사업자간에 기여도 혹은 다른 표현으로 사업자간 계약에 기반하여 무선 인프라를 공유할 방법이 필요하다.

본 연구에서 우리는 무선 인프라를 여러 사업자들이 계약에 기반하여 공유할 뿐만 아니라 공유로 할당되는 사업자 별 무선 자원을 실제 사업자의 사용자들에게 할당할 때 무선 자원의 시변 특성까지 효율적으로 이용하는 계층적 자원할당 방법을 제시 하도록 한다. 이를 위해 우리는 문제를 수식화하고 Stolyar의 GPD 알고리즘을[4] 통해 최적의 해를 찾는 알고리즘을 제안한 뒤 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한다.

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었습니다. (UD060048AD)

2. 시스템 모델

2.1. 시스템 묘사

우리는 AP 나 BS 와 같은 무선 인프라 하나로 형성되는 셀 하나만 고려한다. 무선 인프라는 TDMA (time division multiple access) 방식을 가정한다. 셀에 속한 사용자들의 집합은 $S = \{1, \dots, S\}$ 로 무선 인프라를 공유하는 사업자들의 집합은 $G = \{1, \dots, G\}$ 로 표시한다. 각 사용자는 적어도 하나의 사업자로부터 서비스 받고 동시에 여러 사업자로부터 서비스 받는 않는다. 사업자 g 가 서비스 하는 사용자들의 집합을 S_g , 사용자 s 의 사업자를 $g(s)$ 로 표시한다. 각 사용자와 무선 인프라는 서로 주고받을 충분한 데이터가 항상 있다고 하자. 그러면 자원할당은 각 타임 슬롯에 어떤 사용자를 서비스 받는지 스케줄링 문제가 된다.

무선 채널은 시변하는 특성을 가지고 $r_s(t)$, $R_s(t)$ 은 각각 타임 슬롯 t 에서 사용자 s 의 순간 전송률과 t 까지 평균 전송률을 의미한다. θ_s 는 전체 시간 중 사용자 s 가 서비스 받은 시간 비율을 의미한다.

2.2. 사업자간 공유를 위한 문제 수식화

사업자간 무선 인프라의 공유는 다른 외부요인에 영향을 받지 않고 오직 사업자간의 계약에만 의존하도록 한다. 이런 계약 관계는 가중치 w_g 로 나타낸다. 예를 들어, C 의 자원을 두 사업자 A, B 가 계약에 의해 w_A, w_B 의 가중치를 가지고 공유한다면 사업자 A 는 $Cw_A/(w_A + w_B)$, B 는 $Cw_B/(w_A + w_B)$ 의 자원을 미리 갖도록 하고 이렇게 사업자 별로 할당된 자원을 각각의 사업자가 서비스하는 사용자들에게 분배를 하도록 한다. 이와 같이 자원을 계층적으로 할당하여 사업자간 자원을 공유할 수 있도록 한다.

무선 채널은 전송률이 전송 거리에 따라 달라지는 특성이 있고 같은 전송 거리라 하여도 시간에 따라 변하는 특성이 있기 때문에 A, B 가 같은 무선 인프라를 공유하더라도 공통의 C 라는 용량을 정의하기 힘들다. 따라서 우리는 무선 자원의 용량 대신에 사업자가 무선 인프라를 점유하는 시간을 공유의 기준으로 삼는다. 이렇게 시간을 기준으로 삼는다면 사업자가 서비스해야 하는 사용자들의 수나 분포, 채널 상태에 무관하게 오직 미리 정해진 사업자들간 계약에 의해서만 공유가 이루어질 수 있게 할 수 있다. 시간과 유사하게 주파수 대역을 기준을 할 수 있지만 다양한 사업자 수와 계약 관계를 다루기에는 한계가 있다.

그러면 시간을 무선 인프라 공유의 기준으로 할 때 계약에 의해 사업자 $g \in G$ 가 가져야 하는 무선 인프라 점유율은

$$\theta_g^* = \frac{w_g}{\sum_{g \in G} w_g}, \quad (1)$$

로 정의할 수 있다.

계약에 의해 정해지는 사업자의 목표 점유율을 만족시키는 방법은 그림 1-1.처럼 주기적으로 사업자에게 시간 할당하는 방법과 그림 1-2.처럼 비주기적이지만 평균적으로 만족시키는 방법이 있다. 우리는 좀 더 복잡하지만 임의의 시간에 특정 사업자로 제한이 없어 무선 자원의 시변 특성을 더 잘 이용할 수 있는 후자의 방법으로 자원 할당 방법을 찾도록 한다.

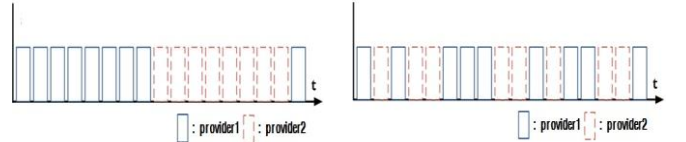


그림 1-1. 사업자간 주기적 시간 공유

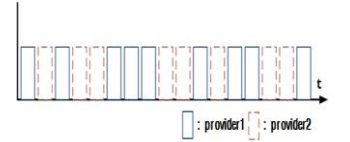


그림 1-2. 사업자간 비주기적 시간 공유

이를 위해 기존 (식 2), (식 3)로 구성된 시변하는 무선 자원을 효율적으로 사용하는 방법을 찾는 문제에 사업자간 공유 조건인 (식 4)을 추가하여 아래와 같이 문제를 수식화한다.

$$\mathbf{P} : \max \sum_{g \in G} \sum_{s \in S_g} U_s(R_s) \quad (2)$$

$$\text{s.t. } R \in \Lambda, \quad (3)$$

$$\sum_{s \in S_g} \theta_s = \theta_g^*, \quad \forall g \in G. \quad (4)$$

여기서 Λ 는 달성할 수 있는 모든 평균 전송률 벡터의 집합이고 $U_s(\cdot)$ 는 사용자 s 의 효용함수로 일반적으로 많이 사용하는

$$U_s(R_s) = \begin{cases} R_s^{1-\alpha}/(1-\alpha), & \text{if } \alpha \neq 1, \\ \log R_s, & \text{if } \alpha = 1, \end{cases} \quad (5)$$

로 정의한다[5]. $\alpha \geq 0$ 는 자원의 효율성과 사용자간 공평성을 조절할 수 있는 변수로 무선 스케줄링 문제에서 $\alpha = 1$ 인 경우 잘 알려진 PF (proportional fair) 스케줄링 알고리즘이 도출된다[1]. (식 4)는 각 사업자에 속한 사용자들이 서비스 받은 시간의 합, 즉 각 사업자의 무선 인프라 점유율이 (식 1)에서 미리 계약에 의해 정해진 값과 동일하도록 만든다.

3. 자원 할당 알고리즘

문제 \mathbf{P} 를 풀기 위해 가상의 큐의 개념을 도입하여 제한 조건을 만족하면서 기존 효용 함수를 최대화하는 Stolyar 의 GPD 알고리즘을[4] 이용한다.

매 타임 슬롯 t 마다 (식 6)을 통해 이번 타임 슬롯을 할당할 사용자 $s^*(t)$ 를 선택한다.

$$s^*(t) = \arg \max_{s \in S} \frac{r_s(t)}{[R_s(t-1)]^\alpha} + \beta(q_{g(s)}^{\min}(t-1) - q_{g(s)}^{\max}(t-1)). \quad (6)$$

모든 사용자 $s \in S$ 의 평균 전송률을 (식 7)을 통해서, 모든 사업자 $g \in G$ 의 목표 점유율을 맞추기 위한 가상의 큐 q_g^{\min}, q_g^{\max} 를 (식 8), (식 9)를 통해서 업데이트한다.

$$R_s(t) = \begin{cases} (1-\beta)R_s(t-1) + \beta r_s(t), & \text{if } s = s^*(t), \\ (1-\beta)R_s(t-1), & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (7)$$

$$q_g^{\min}(t) = \begin{cases} [q_g^{\min}(t-1) - 1]^+ + \theta_g^*, & \text{if } g = g(s^*(t)), \\ q_g^{\min}(t-1) + \theta_g^*, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (8)$$

$$q_g^{\max}(t) = \begin{cases} [q_g^{\max}(t-1) - \theta_g^*]^+ + 1, & \text{if } g = g(s^*(t)), \\ [q_g^{\max}(t-1) - \theta_g^*]^+, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

가상의 큐 q_g^{\min} 는 사업자 g 의 점유율이 목표 값 θ_g^* 에 못 미치는 것을 방지하고 q_g^{\max} 는 반대로 너무 점유율이 높아지는 것을 억제 하는 역할을 한다. 이를 통해 사업자간 계약 기반 공유를 하면서 사용자의 효용함수를 최대화 하는 문제 **P** 의 최적의 해를 찾을 수 있다[4].

4. 시뮬레이션

우리는 시뮬레이션을 통해서 제안하는 계층적 자원 할당 알고리즘이 사업자 간 공유를 만족시키고 동시에 사용자들의 효용함수도 최대화 하는 것을 보이기 위해 다른 스케줄링 방법 WPF, RR+PF 과 비교하여 각 사업자의 사용한 시간 비율 및 사업자 별 사용자들의 평균 전송률의 합을 살펴볼 것이다. 우리의 시뮬레이션 환경은 표에 요약한다.

사용자 분포	Uniform
셀 반지름	500 (m)
채널 모델	Path loss + fast fading + slow fading
Path loss model	16.5+37.6 log(distance (m)) (dB)
전송 파워	10 W
사업자 수	변수 G_n
사업자 별 사용자 수	변수 $ms_n = [N_1, N_2, \dots, N_G]$
사업자 가중치	변수 $w = [w_1, w_2, \dots, w_G]$

표 1. 시뮬레이션 환경

- WPF: 계층적 공유 없이 사용자들에게 weighted PF 스케줄링 방법으로[1] 자원할당을 하되 사용자의 가중치를 사용자가 속한 사업자의 가중치로 사용.
- RR+PF: 계층적 할당으로 그림 1-1.과 같이 사업자에게 시간을 Round-Robin 방법으로 주기적으로 할당하고 주어진 시간에서 사용자를 PF 스케줄링.
- OPP+PF: 계층적 할당으로 그림 1-2. 와 같이 사업자에게 시간을 비주기적으로 할당하나 평균적으로 목표 점유율 만족하고 사용자는 PF 스케줄링.

그림 2.를 확인하면 계층적 공유를 하는 OPP+RR, OPP+PF 가 사업자 간에 자원 공유, 즉 시간 비율이 가중치의 비인 2:1:2:1 을 만족하는 것을 확인할 수 있다. 반면 계층적 공유를 하지 않는 WPF 의 경우에는 사업자 간에 자원 공유가 만족하질 않고 있다. 즉, 사업자 간 공유를 만족시키기 위해서 계층적 공유가 필요함을 알 수 있다. 또한 제안하는 OPP+PF 방법이 그림 3.을 보면 사업자 간에 자원 할당을 만족하는 동시에 사업자에게 자원할당을 기회적으로

함으로써 주기적으로 할당하는 RR+PF 에 비해 이득을 얻고 있는 것을 확인할 수 있다.

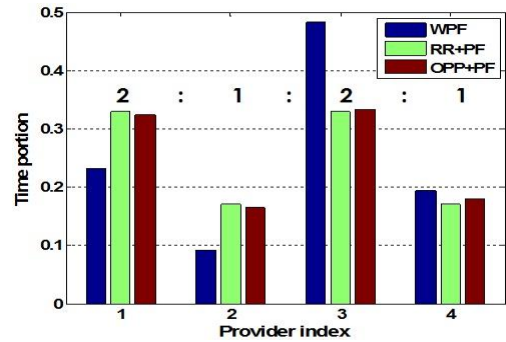


그림 2. 표 1.과 $G_n = 4, ms_n = [10, 10, 20, 20], w = [2, 1, 2, 1]$ 환경에서 각 사업자의 무선 인프라 점유율

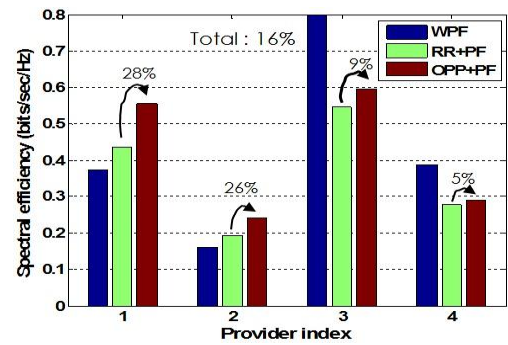


그림 3. 표 1.과 $G_n = 4, ms_n = [10, 10, 20, 20], w = [2, 1, 2, 1]$ 환경에서 각 사업자의 사용자들의 평균 전송률 합

5. 결론

우리는 여러 사업자들이 계약에 기반하여 설정된 무선 인프라의 점유율을 지키면서 동시에 시변 특성을 이용하여 사용자들의 효용함수를 최대화하는 스케줄링 기법을 제안하였다. 시뮬레이션을 통해서 사업자간 공유를 위해서 계층적 자원 공유가 필요하다는 것을 확인하였고 제안하는 방법이 이런 계층적 자원 공유에서도 무선 채널의 시변 특성을 적극적으로 이용하여 효율성도 높이고 있음을 확인하였다.

6.참고 문헌

- [1] X. Liu, E. Chong and N. Shroff, "A framework for opportunistic scheduling in wireless networks," *Computer Networks*, vol. 41, no. 4, pp. 451-474, Mar. 2003.
- [2] N. M. K. Chowdhury and R. Boutaba, "A survey of network virtualization," *Computer Networks*, vol. 54, no. 5, pp. 862-876, April, 2010.
- [3] Boingo, <http://www.boingo.com>
- [4] A. L. Stolyar, "Greedy primal-dual algorithm for dynamic resource allocation in complex networks," *Queueing System*, vol. 54, no. 3, pp. 203-220, 2006.
- [5] J. Mo and J. Walrand, "Fair end-to-end window-based congestion control," *IEEE/ACM Trans. on Netw.*, vol. 8, no. 5, pp.556-567, 2000.