

# 무선 네트워크에서 효율적인 전력 제어 게임을 위한 적응 자원 할당 기법

학생회원 왕진수\*, 박재철\*, 정회원 황성현\*\*, 김창주\*\*, 종신회원 김윤희\*

## Adaptive Resource Allocation for Efficient Power Control Game in Wireless Networks

Jin Soo Wang\*, Jae Cheol Park\* *Student Members*,  
Sung Hyun Hwang\*\*, Chang Joo Kim\*\* *Regular Members*, Yun Hee Kim\* *Lifelong Member*

### 요약

본 논문에서는 여러 무선 링크가 존재하는 무선 네트워크에서 좀 더 낮은 송신 전력으로 각 링크가 요구하는 전송률을 만족시키는 분산 자원 할당 기법을 고려한다. 이 때 해결하고자 하는 문제는 분산 전력 제어 게임이 안정적으로 수렴하도록 간섭 환경에 따라 무선 자원을 공유하는 링크 수와 그에 따라 자원 크기를 바꾸는 것이다. 제안하는 기법은 링크 사이의 자원 공유 수준을 정의하고 자원 공유 수준 정보를 교환하여 자원을 공유할 링크와 자원 크기를 분산적으로 결정함으로써 중앙 집권적인 최적 자원 할당보다 교환 정보와 복잡도를 줄인다. 제안 기법은 자원을 항상 공유하거나 직교하게 이용하는 경우보다 송신 전력이 적게 필요하면서 최적 자원 할당과 비슷한 성능을 보인다.

Key Words : Resource Allocation, Distributed Power Control, Game Theory, Ad hoc Networks

### ABSTRACT

We consider distributed resource allocation among the links in a wireless network to minimize the total transmit power of the network while meeting the target rate required by each link. The problem to be solved is how to change the amount of wireless resource allocated and the number of links sharing the resource according to the interference environment so that the following distributed power control game converges to a stable point. To provide a distributed method with less complexity and lower information exchange than the centralized optimal method, we define the resource sharing level among the links from which the size of resource allocated and the links sharing the resource are determined distributively. It is shown that the performance of the proposed method is better than that of the conventional methods, orthogonal resource allocation only and resource sharing only, as well as it approaches to that of the optimal method.

### I. 서론

무선 통신 시스템에서 무선 노드의 배터리 수명

을 늘리고 주파수 재사용 효율을 높이는 중요한 기술 가운데 하나가 전력 제어이다<sup>[1][2]</sup>. 전력 제어는 주로 CDMA 기반 셀룰러 시스템에서 단말 사이의

\* 본 논문은 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 IT 핵심기술개발사업 [2005-S-002-04, Development of cognitive radio technology for efficient spectrum utilization]와 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 [No. R01-2008-000-20029-0] 받아 수행된 연구 결과입니다.

\* 경희대학교 전자전파공학과 (delta310@khu.ac.kr, jcpark@khu.ac.kr, yheekim@khu.ac.kr)

\*\* 한국전자통신연구원 인지무선연구팀 (shwang@etri.re.kr)

논문번호 : KICS-2008-12-558, 접수일자 : 2008년 12월 17일, 최종논문접수일자 : 2009년 2월 9일

간섭을 줄이거나 페이딩을 극복하는 중앙집권적 방식에 대한 연구가 이루어졌다<sup>[2][3]</sup>. 최근에는 중앙집권적 제어 방식 대신 분산 제어 방식이 고려되면서 단말이 스스로 송신 전력을 결정할 수 있도록 게임 이론을 적용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[4-12]</sup>. 특히, 셀룰러 시스템의 상향 링크에서 다양한 요구 사항을 만족하는 분산 전력 제어 게임을 설계할 수 있음을 보인 후<sup>[4-9]</sup>, 그 연구 결과가 중앙제어장치가 없는 ad-hoc 네트워크에도 빠르게 적용되고 있다<sup>[10-12]</sup>.

본 논문에서는 여러 송수신 노드가 존재하는 분산 네트워크에서의 기존 연구에서처럼<sup>[1][10][12]</sup> 최소한의 전력 소모로 링크별 요구 전송률을 만족시키는 전력 제어 게임을 고려한다. 그러나, 신호 대비 간섭 세기가 매우 적은 환경만을 고려한 기존 연구와는<sup>[1][10][12]</sup> 다르게 무선 링크 사이의 간섭 세기가 큰 경우도 함께 고려한다. 이러한 환경에서 무선 링크들이 자원을 공유하면서 전력 제어 게임을 수행할 경우 게임이 올바른 균형점으로 수렴이 안 되거나 요구 전송률을 만족하지 못 하는 상황이 발생한다. 이러한 문제를 해결할 수 있도록 제안 기법은 전력 제어 게임이 수렴할 수 있는 간섭이 적은 링크들만이 자원을 공유하고 간섭이 센 링크는 자원을 직교하게 나누는 방법을 제공한다.

이와 비슷한 문제를 해결하는 방법으로 경쟁적 무선 접속 방식에서는 접속 확률을 바꾸는 방법<sup>[13]</sup> 자원 예약 방식에서는 중앙집권적으로 TDMA 시간 슬롯을 스케줄링하는 방법<sup>[14]</sup> 고려하였다. 본 논문에서는 [14]에서와 같이 링크마다 TDMA 기반 시간 슬롯을 다르게 배정하지만, 기존 연구와 다르게 1)특정 시간 프레임에서 링크들의 요구 전송률을 만족시키면서 2)중앙집권적이 아니라 분산적으로 자원 할당과 전력 제어를 수행한다. 구체적으로 제안 기법은 해당 프레임에서 데이터를 전송할 링크 사이에 공유 수준을 결정하고, 공유 수준에 따라 같은 자원 (부채널)을 공유할 링크 수와 그 부채널 크기를 다르게 할당한다. 이 때 부채널을 공유하는 링크 사이에 전력 제어 게임을 수행하여 각 링크의 요구 전송률을 만족시키도록 한다. 제안 기법의 성능은 링크들이 자원을 모두 공유할 경우, 서로 직교하게 자원을 사용할 경우, 그리고 간섭 환경에 따라 최적으로 자원을 공유 또는 직교하게 이용하는 경우에 대해 비교한다.

이후 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 협대역 무선 네트워크 모형을 기반으로 자원 할당 문

제를 정의하고, III장에서는 문제를 풀기 위한 시간 자원 할당과 전력 제어 방법을 제안한다. IV장에서는 제안한 알고리즘의 성능을 다른 방식과 비교하고, V장에서 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모형 및 문제 정의

그림 1은  $K$  무선 링크가 있는 무선 네트워크를 보인 것이다. 한 링크는 단일 송신 노드와 수신 노드로 구성되고,  $G_{jk}$ 는 링크  $j$ 의 송신 노드로부터 링크  $k$ 의 수신 노드까지의 채널 이득을 나타낸다. 채널 이득은 채널의 경로 손실, 페이딩, 안테나 이득, 다중 안테나 빔 형성 이득 등을 포괄적으로 포함한다. 한편, 모든 노드에서의 열잡음 전력은  $\sigma^2$ 로 동일하다고 둔다.

링크  $k$ 가 요구하는 데이터 전송 프레임마다 지원해야 하는 데이터 전송률은  $r_k^0$ 이고, 송신 노드의 최대 송신 전력은  $P_{k,max}$ 로 두자. 본 논문의 목표는 각 링크가 요구하는 전송률  $r_k^0$ 을 만족시키면서 네트워크가 소모하는 총 송신 전력을 최소화하는 것이다. 이를 수식화하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^K p_k w_{s_k} \quad \text{subject to} \quad (1) \\ i) r_k \geq r_k^0 \\ ii) 0 \leq p_k \leq P_{k,max} \end{aligned}$$

여기서,  $p_k$ 와  $s_k$ 는 링크  $k$ 의 송신 전력과 할당된 부채널 인덱스,  $w_{s_k} (\leq 1)$ 는 데이터 프레임에서 부채널이 차지하는 시간 비율,  $r_k$ 는 그에 따른 최종 전송률이다.

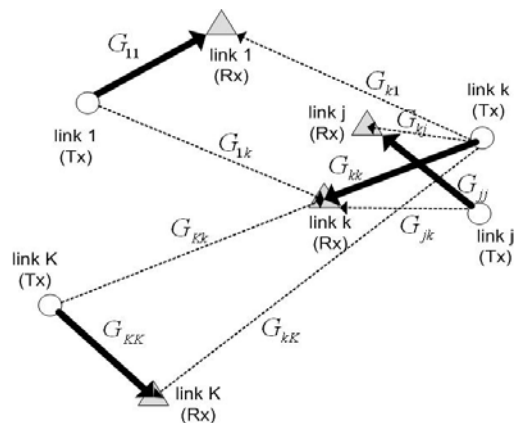


그림 1. 무선 네트워크 모형.

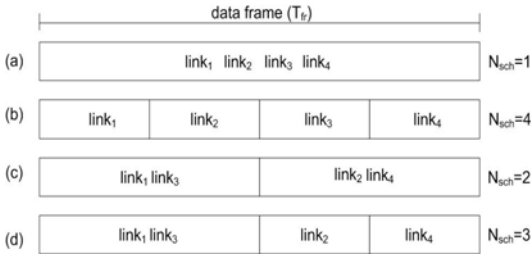


그림 2.  $K=4$ 일 때 자원 할당에 따른 프레임 구성 예.

링크마다 공정성을 위해 데이터 전송 프레임에서 각 링크가 이용 가능한 자원 크기는 동등하다고 가정한다. 즉, 부채널을 점유하는 링크가 하나일 때 부채널의 시간 비율은  $1/K$ 이고, 부채널을 점유하는 링크 수가  $S$ 일 때 해당 부채널의 시간 비율은  $S/K$ 이다. 그림 2는  $K=4$ 이고 링크가 이용 가능한 자원 크기가 같을 때 링크들의 자원 공유 상황에 따른 프레임 구성 예를 보인 것이다. 그림 2(a)는 모든 링크가 데이터 프레임을 공유하는 공유 자원 할당으로 부채널 수  $N_{sch}$ 가 1이고 부채널 시간 비율은  $w_s = 1$ 이다. 그림 2(b)는 모든 링크가 다른 부채널을 사용하는 직교 자원 할당으로  $N_{sch}=4$ 이고  $w_s = 1/4$ 이다. 그림 2(c)와 2(d)는 일부 링크만이 부채널을 공유하는 혼합 자원 할당의 한 예이다.

식 (1)을 만족하기 위한 각 링크의 송신 전력은 다음 조건을 만족하여야 한다.

$$w_{s_k} \log_2(1 + p_k \Gamma_{k,s_k}) \geq r_k^o, \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (2)$$

여기서,  $\Gamma_{k,s_k}$ 는 링크  $k$ 가 부채널  $s_k$ 를 이용할 때 송신 전력을 제외한 정규 신호대간섭잡음비로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\Gamma_{k,s_k} = \frac{G_{kk}}{\sum_{j \in K(s_k) \setminus k} p_j G_{jk} + \sigma^2}, \quad (3)$$

여기서,  $K(s)$ 는 부채널  $s$ 를 공유하는 링크 색인 집합이고,  $K(s) \setminus k$ 는 집합  $K(s)$ 에서 원소  $k$ 를 뺀 집합을 나타낸다.

부채널을 공유하는 링크 수가 하나일 경우 송신 전력은 간단하게 다음으로 주어진다.

$$p_k = (2^{r_k^o/w_{s_k}} - 1) \frac{\sigma^2}{G_{kk}} \quad (4)$$

그러나 부채널  $s$ 를 공유하는 링크가  $\{k_1, k_2, \dots, k_S\}$ 일 때, 식 (2)를 만족하는 최소 전력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} p_{k_1} \\ p_{k_2} \\ \vdots \\ p_{k_S} \end{bmatrix} = \sigma^2 \begin{bmatrix} G_{k_1 k_1}/a_{k_1} - G_{k_2 k_1} & \dots & -G_{k_S k_1} \\ -G_{k_1 k_2} & G_{k_2 k_2}/a_{k_2} & \dots & -G_{k_S k_2} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ -G_{k_1 k_S} & -G_{k_2 k_S} & \dots & G_{k_S k_S}/a_{k_S} \end{bmatrix}^{-1} \quad (5)$$

여기서,  $a_k = 2^{r_k^o/w_{s_k}} - 1$ 는 목표 전송률과 부채널 시간 비율  $w_s$ 로 결정된다.

자원 할당에 있어서 부채널 시간 비율  $w_s$ 가 작아지면 송신 전력이 지수적으로 증가하고 링크 사이의 자원 공유를 허용하여 부채널 시간 비율을 늘리면 간섭으로 인해 식 (5)를 만족하는 송신 전력이 증가하게 된다. 따라서, 링크 사이의 간섭 환경에 따라 송신 전력을 최소로 하는 공유 가능한 링크 집합과 그에 따른 프레임 구조가 다르게 됨을 볼 수 있다. 이러한 최적의 프레임 구조와 공유 링크를 결정하기 위해서는  $\{j_k^o\}_{k=1}^K$ 와  $\{G_{jk}, k=1, \dots, K, j=1, \dots, K\}$  정보를 모두 알아야 하고, 가능한 모든 부채널 구조와 링크 조합에 대해 송신 전력이 최소가 되는 경우를 찾아야 한다. 따라서, 모든 링크는 전송률과 채널 이득 정보를 모두 교환해야 하므로 링크 수 증가에 따라 정보 교환 양이 지나치게 커지고 최적의 조합을 찾는 복잡도 또한 지수적으로 증가하게 된다.

### III. 제안하는 자원 할당 기법

본 장에서는 최적 자원 할당 알고리즘에 근접한 성능을 제공하는 준최적 자원 할당 방법을 제공한다. 먼저 제안 기법에서는 교환 정보 양을 줄이고 프레임 구성이 용이하도록 자원을 공유하는 링크 수를 2의 거듭제곱으로 제한한다. 즉, 그림 2의 경우 한 부채널을 공유하는 링크 수는 1, 2, 4만이 가능하다. 이 때, 링크와 링크 사이의 공유 가능 수준을 0부터  $L_{\max} = \lfloor \log_2 K \rfloor$ 까지  $L_{\max} + 1$  단계로 나눈다. 여기서, 공유 수준  $l$ 은  $K_l = 2^l$  링크가 부채널을 공유할 수 있음을 뜻한다.

링크와 링크 사이의 공유 수준은 각 링크의 수신 노드에서 결정한다. 링크  $k$ 의 수신 노드가 본 링크  $j$ 와의 공유 수준  $l_{jk}$ 는 다음 식을 만족하는 최대  $l$ 로 정의한다.

$$\alpha_l \log_2 \left( 1 + \frac{G_{kk}}{G_{jk}(K_l - 1)} \right) \geq r_k^o \quad (6)$$

여기서,  $\alpha_l = (2^l/K)$ 은 공유 수준  $l$ 에 대응하는 부채널 시간 비율이고,  $SINR_k = G_{kk}/G_{jk}(K_l - 1)$ 은 부채널을 공유하는  $K_l$  노드의 간섭 세기가 링크  $j$ 와 같다는 가정 하에 공유 수준  $l$ 에서 예측한 최대 신호대간섭비이다. 즉, 공유 수준이 높아짐에 따라 부채널 크기 증가로 얻는 이득과 간섭 세기의 증가로 받는 손해 관계를 반영하여 요구 전송률을 만족하기 위해 허용 가능한 링크 수를 결정한다.

수신 노드는 계산한 다른 링크와의 공유 수준  $\{l_{jk}\}_{j=1, j \neq k}^K$ 를 송신 노드에게 방송한다. 송신 노드는 수신 노드가 방송하는  $\{l_{jk}\}$  정보를 이용하여 공유 수준 행렬  $L = [L_{kj}]$ 을 만든다. 공유 수준 행렬의 대각 원소는  $L_{kk} = L_{\max}$ 로, 대각 밖 원소는  $L_{kj} = \min(l_{kp}, l_{jk})$ 으로 정의한다. 즉, 자기 자신과는 항상 공유할 수 있고 다른 링크와는 주는 간섭과 받는 간섭을 모두 고려해서 공유 수준을 결정하는 것이다. 이러한 공유 수준 행렬을 이용한 프레임 구성 방법은 다음과 같다.

**프레임 구성 알고리즘**

- (1) 공유 수준  $l$ 을 최댓값으로 ( $l \leftarrow L_{\max}$ ), 부채널 색인을 1로 ( $s \leftarrow 1$ ), 부채널 시작 시간을 0으로 ( $p \leftarrow 0$ ), 부채널 자원 비율은  $\alpha_l = (2^l/K)$ 로 초기화한다.
- (2) 공유 수준 행렬을 이용하여 각 행마다 (링크마다) 공유 수준이  $l$  이상인 원소 수가  $2^l$  이상인 행을 찾는다.
- (3) 찾은 행의 수가  $2^l$  이상이면, 찾은 행에 대한 링크 집합에서 모든 링크 사이의 공유 수준이  $l$  이상인 링크를  $2^l$ 개 찾아 공유 링크 집합  $K(s) = \{k_1, k_2, \dots, k_{2^l}\}$ 을 만든다. 즉, 공유 링크 집합의 원소  $k_i, k_j$ 는  $l_{k_i k_j} \geq l$ 를 만족한다.
- (4) (2)에서 찾은 행의 수가  $2^l$ 보다 작거나 (3)에서 공유 링크 집합 원소 수가  $2^l$ 보다 크거나 같으며 (5)로, 그렇지 않으면 (7)로 이동한다.
- (5) 부채널  $s$ 의 시간 비율은  $w_s = \alpha_l$ , 시간 점유 구간은  $[p, p + w_s) \times T_{fr}$ 으로 설정하고, 공유 링크 집합  $K(s)$ 에 해당 부채널을 할당한 뒤

포인터를 갱신한다 ( $p \leftarrow p + w_s$ ). 또한, 공유 수준 행렬에서  $K(s)$ 에 원소에 해당하는 행과 열을 모두 0으로, 부채널 색인을  $s \leftarrow s + 1$ 로 갱신한다.

- (6) 공유 수준 행렬이 모두 0이 될 때까지 (2)-(5) 과정을 반복한다.
- (7) 공유 수준을 한 단계 낮추고 ( $l \leftarrow l - 1$ ), 공유 수준 행렬이 모두 0이 될 때까지 (2)-(6)을 반복 수행한다.

네트워크 내에 중앙 제어 노드가 있을 경우 중앙 제어 노드가 프레임 구성 알고리즘을 수행한 후 다른 송신 노드에게 통보할 수 있다. 그러나, 중앙 제어 노드가 없는 분산 네트워크에서는 모든 송신 노드가 동일한 기준으로 프레임 구성 알고리즘을 수행한다. 이 때, 송신 노드들은 동일한 정보로 동일한 과정을 거쳐 같은 프레임 구성 결과를 얻을 수 있다. 프레임 구성 결과 부채널  $s$ 를 공유하는 링크 집합  $K(s)$ 의 원소 수가 1보다 크면, 공유하는 링크끼리 전력 제어 게임을 수행한다. 전력 제어 게임은 각 링크끼리 요구 전송률을 만족시키면서 전력 소모를 줄일 수 있도록 다음의 유틸리티 함수를 이용한다.

$$U_k(p_k, \mathbf{p}_{-k}) = w_s \log_2(1 + p_k \Gamma_{k,s}) - c_k p_k, \quad \text{for } k \in K(s) \quad (7)$$

여기서,  $K(s)$ 는 게임 참가자 집합이고,  $p_k$ 는 참가자  $k$ 의 전략,  $\mathbf{p}_{-k} = \{p_j, j \in K(s) \setminus k\}$ 는 다른 참가자의 전략,  $c_k = (\log_e 2) w_s \Gamma_{k,s} 2^{-r_k^o/w_s}$ 는 요구 전송률에서 유틸리티 함수가 최대가 되도록 송신 전력에 대한 비용 계수이다.

그림 3은 단일 부채널에서 ( $w_s = 1$ ) 유틸리티 함수를 신호대간섭잡음비  $p_k \Gamma_{k,1}$ 에 따라 보인 것으로, 그림에서 볼 수 있듯이 전송률을 만족시키는  $p_k \Gamma_{k,1}$  값에서 유틸리티 함수가 최대가 됨을 볼 수 있다. 즉, 다른 게임 참가자의 전략이 주어졌을 때 유틸리티 함수는 송신 전력에 대한 오목 (concave) 함수이고 최대값이 하나이며 최대값은 전송률을 만족시키는 송신 전력이다. 기존 연구에 의하면<sup>[5][7]</sup> 위와 같은 특성을 갖는 유틸리티 함수를 적용할 경우 각 노드의 유틸리티 함수를 최대로 하도록 하는 전력 집합  $\mathbf{p}_k = \{p_j, k \in K(s)\}$ 는 모두 Nash 균형이 되고, 각 링크가 자신의 유틸리티 함수가 최대가 되도록

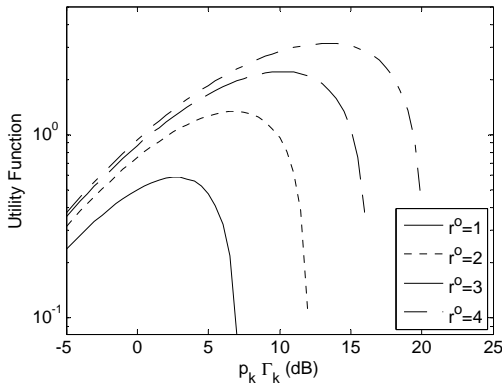


그림 3. 요구 전송률에 따른 유틸리티 함수.

비동기적으로 전력값을 결정하면 Nash 균형에 도달할 수 있다.

이러한 적응 자원 할당 방법을 구현하기 위한 채널 측정과 정보 교환은 비이콘 (Beacon) 신호를 이용한다. 수신 노드는 비이콘 신호를 측정하여 공유 채널 이득  $\{G_{jk}, j=1, \dots, K\}$ 를 측정한다. 이 때 데이터를 전송하려는 송신 노드들은 요구 전송률  $r_k^o$  정보를 비이콘 신호에 포함시킨다. 각 송신 노드에 대응하는 수신 노드는 다른 데이터 요청 송신 노드에 대한 공유 수준  $\{l_{jk}\}$ 을 계산하고 응답 신호에 포함하여 송신 노드에 전송한다. 송신 노드는 모든 응답 수신 노드가 전달하는 링크간 공유 수준 정보를 이용하여 프레임의 구성한 뒤, 자원을 공유하는 링크 사이에 전력 제어를 수행한다.

#### IV. 모의실험 결과

제안하는 자원 할당 방법의 성능은 그림 4와 같은 100mx100m 크기의 네 모듈로 구성된 네트워크에서 살펴본다. 그림 4는  $K=8$ 이고 모듈마다 송수신 노드쌍이 2일 때 송수신 링크 위치 예를 보인 것이다. 링크는 모듈 내에서만 형성되며 매 실험마다 각 모듈에서 송수신 노드 위치를 균일하게 발생시켰다. 각 노드의 최대 송신 전력은 1m 위치에서  $P_{\max} = 10^{-3} W$ 이고, 경로 손실 지수는 3이며, 실험 수행 횟수는 5000번이다.

표 1은 각 모듈별로 링크가 하나씩 있을 때 ( $K=4$ ), 각 링크의 요구 전송률을 만족하는 데 소모한 평균 송신 전력을 보인 것이다. 공유 자원 할당은 링크가 모두 부채널을 공유하면서 전력 제어 게임을 수행한 경우, 직교 자원 할당은 링크가 서로 직교하게 자원을 할당 받아 전력 제어를 한 경우, 최적 적

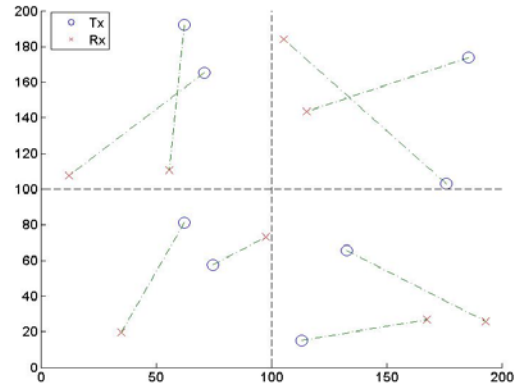


그림 4. 무선 네트워크에서 송수신 링크 위치 예.

용 자원 할당은 간섭 환경에 따라 II장의 최적 프레임 구성과 링크 할당과 전력 할당을 수행한 결과이며, 제안 적응 자원 할당은 III장의 제안 기법을 적용한 결과이다. 본 실험 조건에서는 간섭이 센 노드가 발생할 확률이 높기 때문에 자원을 공유하는 것보다 직교하게 자원을 할당하는 것이 전력을 줄이는 것을 볼 수 있다. 제안하는 방법은 송수신 노드 쌍의 위치에 따라 적응적으로 공유와 직교 자원 할당을 수행함으로써 직교 자원 할당보다 전력 소모를 줄일 수 있음을 볼 수 있다. 한편, 제안 기법은 최적 기법보다 전력 소모가 늘어나나, 정보 교환 양 또는 복잡도가 줄어드는 장점이 있다. 즉, 최적 자원 할당 기법은 모든 채널 이득 정보를 알고 가능한 자원 할당에 대해 송신 전력을 모두 계산하여야 하므로 복잡도가  $O(2^K)$  수준인 반면, 제안 기법은 공유 수준 정보만을 이용하고 공유 수준에 따라 순차적으로 부채널을 할당함으로써 복잡도를  $O(\log_2 K)$  수준으로 낮출 수 있다.

그림 5-6은 표 1과 같은 조건에서 적응 자원 할당 결과를 가능 프레임 구성 후부에 따라 나누어 본 것이다. 가로축은 프레임 구성하는 부채널 수이다. 요구 전송률이 작으면 최소 필요 송신 전력이 작기 때문에 간섭 또한 적어지므로, 모든 링크가 부채널을 공유하는 것이 전력 소모가 적다. 따라서, 부채널 수가 1인 확률이 높다. 반면, 요구 전송률이 커지면 최

표 1.  $K=4$ 일 때 자원 할당 기법에 따른 평균 송신 전력.

방법	평균 송신 전력 (dB)		
	$r_k^o=0.5$	$r_k^o=2$	$r_k^o=3$
공유 자원 할당	-46.8	-33.3	-31.4
직교 자원 할당	-83.4	-64.3	-51.9
제안 적응 자원 할당	-85.1	-67.7	-53.1
최적 적응 자원 할당	-85.2	-70.0	-55.8

소 필요 송신 전력이 함께 커지고 간섭 세기 또한 커지므로 직교 자원 할당이 유리해진다. 따라서, 부채널 수가 큰 프레임을 구성할 확률이 커진다. 한편, 부채널 수에 따른 전력 소모를 비교하면 부채널 수가 클수록 전력 소모가 증가함을 볼 수 있다.

그림 7-8은 모듈마다 링크 수가 1일 때와 ( $K=4$ ) 2일 때 ( $K=8$ ), 링크별 최종 전송률 평균과 송신 전력 평균을 보인 것이다. 고려한 자원 할당 기법은 모두 요구 전송률  $r_k^o=1$  bps/Hz를 만족함을 볼 수 있다. 그러나, 각 링크가 소모하는 평균 전력은 최적 적응 자원 할당, 제안 적응 자원 할당, 그리고 직교 자원 할당 순으로 증가한다. 또한,  $K=4$ 인 경우보다  $K=8$ 일 때 제안 기법과 최적 기법과의 성능 차이가 커진 것을 볼 수 있다. 이는 링크 수가 커질수록 가능한 공유 링크 집합 후보가 증가하는 데, 최적 기법은 후보 가운데 가장 좋은 집합을 선택하고 제안 기법은 공유 수준이 같은 경우 임의의 공유 링크 집합 후보를 선택하기 때문이다. 따라서, 복잡도 증가를 최소화하면서 최적의 성능에 더욱 근접할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요하다.

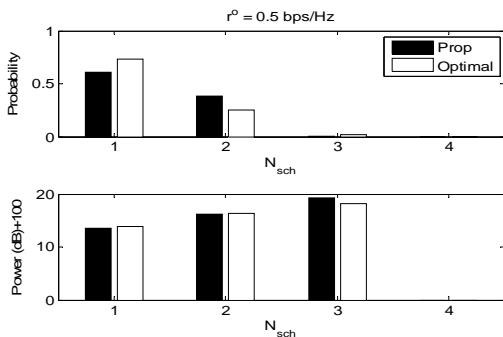


그림 5.  $K=4$ 이고  $r_k^o=0.5$  bps/Hz일 때 특정 프레임 구조 선택 확률과 후보 프레임별 평균 송신 전력.

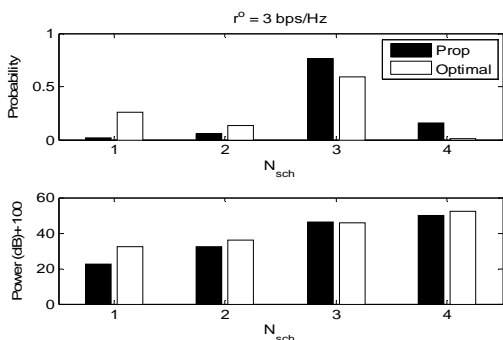


그림 6.  $K=4$ 이고  $r_k^o=3$  bps/Hz일 때 특정 프레임 구조 선택 확률과 후보 프레임별 평균 송신 전력.

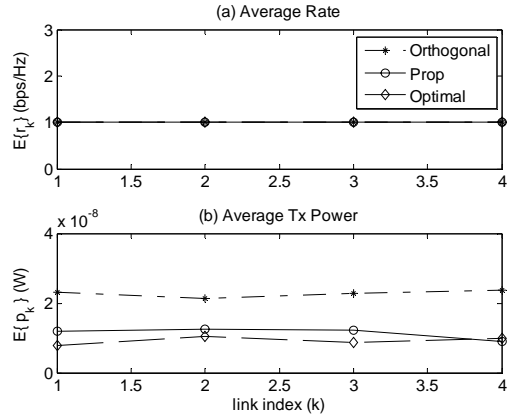


그림 7.  $K=4$ 이고  $r_k^o=1$  bps/Hz일 때 링크별 평균 전송률과 평균 송신 전력.

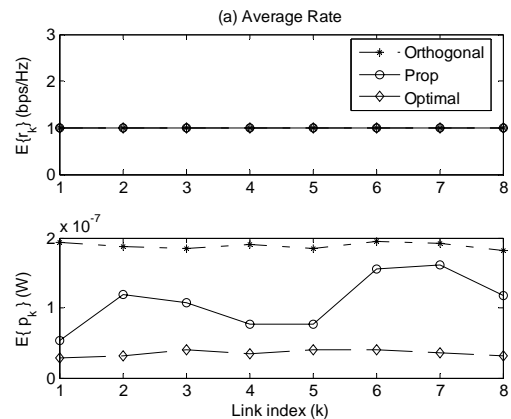


그림 8.  $K=8$ 이고  $r_k^o=1$  bps/Hz일 때 링크별 평균 전송률과 평균 송신 전력.

## V. 결론

본 논문에서는 무선 네트워크에서 각 링크의 요구 전송률을 만족시키면서 총 송신 전력을 줄이는 적응 자원 할당 방법을 제안하였다. 제안하는 방법은 무선 링크 사이의 잠재적 간섭 영향을 고려하여 링크 사이에 자원을 공유하거나 직교하게 나누어 사용하도록 하며, 링크가 자원을 공유할 경우 게임 이론을 기반으로 전력을 제어하는 것이다. 제안 방법은 최적 적응 자원 할당보다 성능이 크게 나빠지지 않으면서 기존의 자원을 공유만 하거나 또는 직교하게만 사용하는 경우보다 향상된 성능을 보였다.

본 논문에서의 실험 조건은 링크 사이의 간섭이 비교적 센 환경에서 수행하였는데 그 결과 제안 기법은 모든 링크가 자원을 공유하는 경우보다 전력 소모가 크게 줄어든 반면 직교 자원 할당에 견주어

전력 소모가 조금 줄어드는 것을 볼 수 있다. 반대로, 간섭이 적은 환경이라면 제안 기법이 직교 자원 할당보다 전력 소모가 훨씬 줄어들고 공유 자원 할당과 비슷해 질 것을 예상할 수 있다. 그러므로, 제안한 방식은 중앙 제어 장치가 없는 ad-hoc 네트워크에서 링크 스스로가 전력 소모가 줄어드는 방향으로 간섭 환경에 적응하는 데 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

[1] P. Gupta and R.P. Kumar, "The capacity of wireless networks," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 46, pp. 388-404, Mar. 2000.

[2] A. Goldsmith, *Wireless communications*, Cambridge University Press, Singapore, 2005.

[3] S. Grandhi, R. Vijayan, D. Goodman, and J. Zander, "Centralized power control in cellular radio systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, pp. 641-646, Nov. 1996.

[4] D.J. Goodman and N.B. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Personal Commun.*, vol. 7, pp. 48 - 54, Apr. 2000.

[5] C.U. Saraydar, N.B. Mandayam, and D.J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, pp. 291-303, Feb. 2002.

[6] C.W. Sung and W.S. Wong, "A noncooperative power control game for multirate CDMA data networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 2, no. 1, pp. 186-194, Jan. 2003.

[7] F. Meshkati, H.V. Poor, S.C. Schwartz, and N.B. Mandayam, "An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 11, pp. 1885 - 1894, Nov. 2005.

[8] F. Meshkati, H.V. Poor, and S.C. Schwartz, "Energy-Efficient resource allocation in wireless networks," *IEEE Sig. Process. Mag.*, no. 5, pp. 58-68, May 2007.

[9] V. Kawadia and P.R. Kumar, "Principles and protocols for power control in wireless ad-hoc networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, pp. 76-88, Jan. 2005.

[10] A.B. MacKenzie and S.B. Wicker, "Game theory and the design of self-configuring,

adaptive wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 126 - 131, Nov. 2001.

[11] M. Hayajneh and C.T. Abdallah, "Distributed joint rate and power control game-theoretic algorithms for wireless data," *IEEE Commun. Letters*, vol. 8, no. 8, pp. 511-513, Aug. 2004.

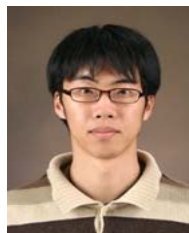
[12] D. Hoang and R.A. Iltis, "Noncooperative eigencoding for MIMO ad hoc networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 56, no. 2, pp. 865-869, Feb. 2008.

[13] J. Monks, V. Bharghavan, and W. Hwu, "A power controlled multiple access protocol for wireless packet networks," *Proc. IEEE INFOCOM*, Apr. 2001.

[14] T. Elbatt and A. Ephremides, "Joint scheduling and power control for wireless ad hoc networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 3, no. 1, pp. 74-85, Jan. 2004.

왕 진 수 (Jin Soo Wang)

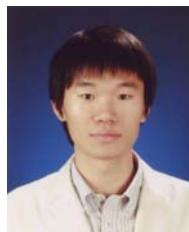
학생회원



2008년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사  
2009년 2월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정  
<관심분야> 이동/무선 통신, 협력 다양성 기술, 무선 자원 할당 기술

박 재 철 (Jae Cheol Park)

학생회원



2008년 2월 경희대학교 전자정보학부 공학사  
2009년 2월~현재 경희대학교 전자전파공학과 석사과정  
<관심분야> 이동/무선 통신, 통신 이론, 적응 전송 및 다양성 기술, MIMO-OFDM 기술

황 성 현 (Sung Hyun Hwang) 정회원



1996년 2월 성균관대학교 전자  
공학과 공학사

1998년 2월 성균관대학교 전자  
공학과 공학석사

2001년 2월 성균관대학교 전기  
전자 및 컴퓨터공학부 공학  
박사

2001년 1월~2005년 9월 삼성전자 SOC연구소 책임  
연구원

2005년 10월~현재 한국전자통신연구원 인지무선연  
구팀 선임연구원

<관심분야> 무선인지기술, 이동통신시스템, 디지털  
모뎀 설계, 동기 및 채널 등화 알고리즘

김 창 주 (Chang Joo Kim) 정회원



1980년 2월 한국항공대학교 전  
자공학과 공학사

1988년 2월 한국과학기술원 전  
기 및 전자공학과 공학석사

1993년 2월 한국과학기술원전기  
및 전자공학과 공학박사

1979년 12월~1983년 3월 ADD

연구원

1983년 3월~현재 ETRI 전파기술연구그룹장

<관심분야> 전파자원이용기술, 전자파환경기술, 안테  
나기술, Cognitive Radio, 이동통신 및 방송기술 등

김 윤 희 (Yun Hee Kim) 종신회원



1995년 2월 한국과학기술원 전  
기및전자공학과 공학사

1997년 2월 한국과학기술원 전  
기및전자공학과 공학석사

2000년 1월~2000년 4월 UCSD  
방문 연구원

2000년 8월 한국과학기술원 전

자전산학과 박사

2000년 9월~2004년 8월 한국전자통신연구원 선임  
연구원

2004년 9월~현재 경희대학교 전자정보학부 조교수

2006년 1월~현재 IEEE 선임회원, 한국통신학회 논  
문지 편집위원

<관심분야> 이동/무선 통신, 통신이론, 통계학적 신  
호처리, 부호및정보이론