

## 비협력 게임 이론을 적용한 무선 설계 기술

김윤희 | 홍인기

경희대학교

### 요약

본고에서는 무선 통신 망에서 게임 이론이 적용된 주요 물리 계층 설계 기술을 소개한다. 셀룰러 망과 ad-hoc 망에서 일반적으로 적용할 수 있는 비협력 게임 이론 모형을 제시하고 서로 다른 목적을 위해 제안된 게임 전략과 유틸리티 함수를 소개함으로써 게임 이론으로 다양한 분산 알고리즘을 도출할 수 있음을 보인다.

### 1. 서론

게임 이론은 여러 의사 결정자들이 서로 영향을 미치는 환경에서 상호 영향에 따른 성능을 분석하고 그로부터 합리적인 의사 결정을 유도할 수 있는 수학적 도구이다 [1]. 기본적인 게임 모형은 게임 참가자와, 참가자의 전략 및 전략 공간, 각 참가자가 최대를 하려는 유틸리티 함수로 정의되는 데, 전략과 유틸리티 함수를 어떻게 정의하느냐에 따라 다양한 의사 결정 메커니즘을 얻을 수 있다. 이러한 게임 이론의 주 적용 분야는 경제학, 정치학, 생물학, 사회학 등이었으나 최근에는 공학 및 컴퓨터 과학 분야에도 활발히 적용되고 있다.

무선 통신 분야에서 게임 이론을 도입하기 시작한 시기는 1990년대 말 이후로, 주로 CDMA 셀룰러 시스템의 상향 링크 전력 제어 문제에 적용되었다 [2-12]. 이는 여러 송신기가

신호를 전송하고 서로 간섭을 일으키는 상향 링크 모형이 게임 이론에 잘 부합하기 때문이다. 사실 셀룰러 시스템은 기지국이라는 중앙제어장치가 있기 때문에, 중앙집권적 전력 제어 알고리즘이 지배적이다 [3]. 그러나, 중앙집권적 알고리즘의 복잡도와 제어 메시지 전달 등을 위해 필요한 시그널링 오버헤드를 줄이는 한 방법으로 분산 알고리즘이 제안되면서 [4], 게임 이론을 적용하기에 이르렀다 [2]. 그 이후 점점 다양한 서비스와 시스템이 개발되면서 서로 다른 서비스 품질과 시스템 요구 사항을 만족시키도록 다양한 게임 전략과 유틸리티 함수가 제안되고 연구되고 있다.

한편 셀룰러 망 이후 연구 개발되고 있는 ad-hoc 망은 일반적으로 중앙제어장치가 없는 분산 구조를 갖는다. 따라서, ad-hoc 망에서는 중앙제어장치 없이 망 구성 요소 스스로가 최선의 성능을 낼 수 있는 방향으로 조직화하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [5]. 그러나, 분산 환경에서 성능을 분석하거나 무선 기기들의 행동을 예측하고 다양한 목적에 부응하는 적응 알고리즘을 개발하는 것은 매우 도전적인 문제라 할 수 있다. 최근 이러한 문제들을 해결할 수 있는 효율적인 도구로 게임 이론이 소개되면서 ad-hoc 망의 각 계층에서 게임 이론을 접목한 연구가 활발히 발표되고 있다 [16-20].

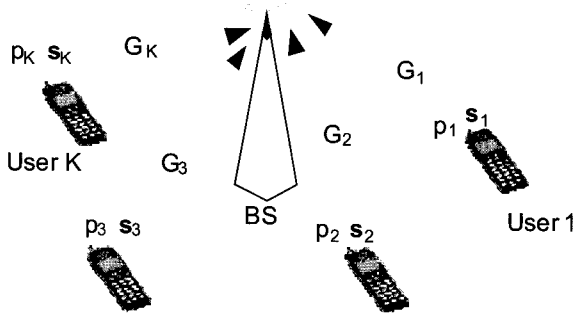
본고에서는 셀룰러 망과 ad-hoc 망의 물리 계층에서 게임 이론을 적용한 무선 설계 기술을 살펴본다. 두 시스템 모형에서 게임 이론을 적용할 때 고려해야 할 차별성을 명시하고, 가장 흔히 고려되는 전략과 여러 유틸리티 함수를 소개

한 뒤 게임 수행 방법과 게임 결과의 수립 가능성을 논의한다.

이후 논문의 구성은 다음과 같다. II 장에서 CDMA기반 셀룰러 망에서 고려한 전력 제어 게임과 부호 선택 게임 모형, III 장에서는 ad-hoc 망에서 고려한 전력 제어 게임과 채널 선택 게임을 소개하고, IV 장에서 결론을 맺는다.

## II. 셀룰러 망에서의 접근 방법

CDMA를 기반으로 한 셀룰러 망에서 상향 링크는 단말의 위치와 송신 전력에 따라 상호간에 미치는 간섭이 크게 다르기 때문에 전력 제어가 성능 향상에 매우 중요한 역할을 한다. 이러한 상호 작용 특성과 중요도 때문에 통신 분야에서 게임 이론이 가장 먼저 적용되었고 다양한 각도에서 연구가 진행되었다. 본 장에서는 CDMA 시스템에서 게임 이론 적용 사례와 연구 결과를 소개하고자 한다.



(그림 1) 셀룰러 망의 상향 링크 시스템 모형

### A. 시스템 모형

(그림 1)은 한 셀에 단말 수가 K인 DS-CDMA시스템의 상향 링크 시스템 모형을 보인 것이다. 모든 단말 신호는 기지국에 같은 시간에 도달하고 채널은 심볼 전송 구간에서 일정한 블록 페이딩 채널을 가정한다. 이 때 확산 이득이 N인 기지국 수신 신호를 칩 레벨로 표본화하면 한 심볼 구간 동안의 수신 신호 벡터는 다음과 같다.

$$r = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} G_k b_k s_k + w \quad (1)$$

여기서,  $p_k, G_k, b_k$ 는 단말  $k$ 의 송신 전력, 채널 이득, 정보 비트를 나타내고  $s_k$ 는 단위 Norm을 갖는 단말  $k$ 의 부호 수열이며,  $w$ 는 잡음 벡터로 평균이 영이고  $E[ww^T] = \sigma^2 I_N$ 이다.

수신단에서 선형 여파를 적용할 때 단말  $k$ 의 여파기 계수 벡터를  $c_k$ 로 하면 단말  $k$ 의 SINR (signal-to-interference-plus-noise ratio)은 다음과 같다.

$$\gamma_k = \frac{p_k G_k (c_k^T s_k)^2}{\sum_{j \neq k} p_j G_j (c_k^T s_j)^2 + (c_k^T s_k)^2 \sigma^2} \quad (2)$$

SINR의 분모를 간섭 함수  $i_k$ 로 정의하면

$$i_k = c_k^T \left( \sum_{j \neq k} p_j G_j s_j s_j^T + \sigma^2 \right) c_k = c_k^T R_k c_k \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서,  $R_k$ 는 단말  $k$ 의 간섭 함수에 대한 상관 행렬이다. 이 때 정합 여파기 (MF)를 쓰면 SINR은

$$\gamma_k^{MF} = \frac{p_k G_k}{s_k^T R_k s_k} \quad (4)$$

MMSE 수신기를 쓰면 SINR은 다음과 같다 [10].

$$\gamma_k^{MF} = p_k G_k s_k^T R_k^{-1} s_k \quad (5)$$

모든 단말은 성능을 높이기 위해 자신의 수신 SINR을 크게 하고자 한다. SINR을 크게 하는 한 방법으로 송신 전력을 높이며 다른 단말에 대한 간섭 함수  $i_k$ 가 커지므로, 망 내 단말 모두의 간섭을 고려하면 무조건 전력을 높이는 것은 바람직하지 못하다. 한편, 한 단말의 부호 수열 선택에 따라 다른 단말에 미치는 간섭이 또한 다르게 된다. 따라서, 전력 및 부호 수열 선택 문제는 게임 이론으로 설명 가능하다.

CDMA 기반 셀룰러 망의 상향 링크에서 고려 가능한 게임 모형  $G = \langle K, \{A_k\}, \{u_k\} \rangle$ 은 게임 참가자가 셀 내 단말들  $K = \{1, 2, \dots, K\}$ 이고, 참가자가 결정할 전략은 송신 전력  $p_k$ , 부호 수열  $s_k$ , 또는 두 전략의 결합 방식이 될 수 있다. 여기서, 송신 전력을 전략으로 선정하면 전략 공간  $A_k$ 는

$$\Pi_k = \{p_k | p_k \in [0, P_{\max}]\} \quad (6)$$

로, 전략이 부호 수열일 때는 전략 공간  $S_k$ 는 다음과 같다.

$$S_k = \{s_k | s_k \in \mathcal{R}^N, \|s_k\| = 1\} \quad (7)$$

전략에 따라 유틸리티 함수  $u_k$ 를 시스템 목적에 맞게 잘 정의함으로써 알맞은 분산 알고리즘과 그에 따른 프로토콜을 설계할 수 있다.

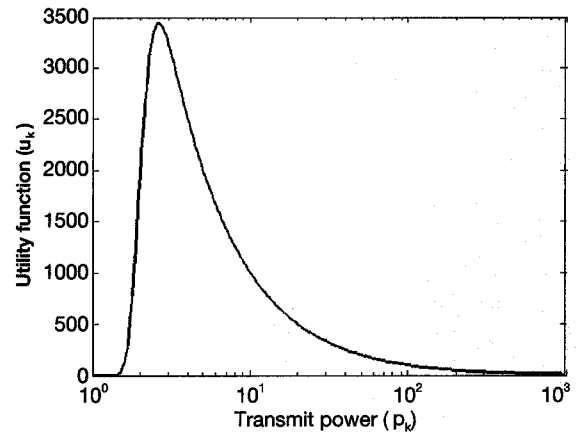
### B. 에너지 효율적 전력 제어 게임

셀룰러 시스템 모형에서 각 단말이 자신의 에너지 효율이 최대가 되도록 송신 전력을 선택하는 비협력 전력 제어 게임이 다수 제안되었다 [2,3,5,8,11,12]. 에너지 효율성을 강조하는 게임에서의 유틸리티 함수는 전송 데이터 양이 많으면 많을수록 유틸리티가 증가하고 대신 전송 전력이 크면 클수록 유틸리티가 적어지는 특징이 있으며 식 (8)이 대표적인 유틸리티 함수 꼴이다.

$$u_k = \frac{T_k}{P_k} \quad (\text{bits/joule}) \quad (8)$$

여기서, 유틸리티 함수의 분자  $T_k$ 는 단위 시간 당 오류 없이 전송되는 유효 정보 비트 수 (goodput)이다. 전송률  $T_k$ 를 이론적인 최대값인 샤논 식으로 쓰면, 대역폭이  $W$ 이고 SINR이  $\gamma_k$ 일 때  $T_k = W \log_2(1 + \gamma_k)$ 로 쓸 수 있다. 실제로 전송률이  $R_k$ 이고 패킷 전송 성공률이  $f(\gamma_k)$ 인 채널 부호화 또는 변조 방식을 적용한 시스템을 고려하면, 전송률은  $T_k = R_k f(\gamma_k)$ 로 쓸 수 있다. 한편 유틸리티 함수의 분모는 전력을 높일수록 배터리 소모가 큰 단점을 반영하기 위해 송신 전력으로 정의한다. 그러면 유틸리티 함수는 단위 에너지 당 전송된 비트 수를 의미한다.

이 때  $T_k = R_k f(\gamma_k)$ 에서  $f(\gamma)$ 는 변조, 부호화 방식 그리고 패킷 크기에 따라 결정되는 함수로 일반적으로 S자 모양의 응답곡선을 갖는다 [3]. 따라서, 다른 단말의 전략이 고정되었을 때 (간섭 성분이 고정) 자신의 전략인 송신 전력에 따른 유틸리티 함수 (8)은 (그림 2)와 같은 모양을 갖는다. 이렇게 다른 전략이 고정되어 있을 때 최대값이 하나인 유틸리티 함수는 각 단말이 최대 응답 전략  $\max_p u_k$ 을 선택함으로써 Nash 균형점에 수렴할 수 있다. 이 때 Nash 균형점은



(그림 2) 간섭이 고정되어 있을 때 에너지 효율적 전력 제어 게임의 유틸리티 함수 예

$f(\gamma) = \gamma'(\gamma)$ 가 되는 SINR  $\gamma^*$ 을 제공하며 그 균형점은 유일하다 [3].

한편 [5]에서 보였듯이 이러한 균형점이 Pareto 최적은 아니기 때문에 Nash 균형을 Pareto 최적이 되도록 유틸리티 함수에 비용함수를 적용할 수 있다 [5]. 즉, 식 (8)과 같은 비협력적 전력제어 게임에서는 각각의 단말이 자신의 유틸리티를 최대화 하기 위하여 자신의 전력만을 조절할 뿐이고, 그로 인하여 발생하는 타 단말기에 대한 간섭과 같은 비용을 고려하지 못하기 때문에 Pareto 최적값에 이르지 못한다. Pareto 최적 값에 이르기 위해서는 각 단말기의 유틸리티를 최대화 하기 보다는 전체 시스템 효율을 최대화 할 수 있도록 하여야 하는데, 이는 결국 전체 단말기들의 유틸리티들의 합이 최대화 되도록 하여야 한다. 높은 전력의 단말기는 자신의 배터리 소모가 클 뿐 아니라 타 단말기에 미치는 간섭값이 크기 때문에 이에 대한 비용함수를 정의하여 유틸리티 함수를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{u}_k = R_k \frac{f(\gamma_k)}{P_k} - c_k p_k \quad \text{for } k=1, \dots, K. \quad (9)$$

여기서,  $c_k$ 는 각 단말이 이기적으로 송신 전력을 높이지 않도록 하는 비용 계수이다. 그러나,  $c_k$  값에 따라 단말 개인과 전체의 이득이 어떻게 바뀌는 지 수치화하기 어렵다는 문제가 있다.

이러한 에너지 효율적 전력 제어 게임은 계층간 최적화 개

념을 도입하여 선형 수신기 벡터  $c_k$  (정합 여파기, 역상관기, MMSE 여파기) 선택 문제와 함께 적용되거나 [8], 전력 제어와 적응 변조 방식을 함께 적용할 때 지연 서비스 품질을 만족하는 전송률  $R_k$  선택 문제로 확장 적용될 수 있다 [12].

### C. 간섭 회피 부호 선택 게임

셀룰러 망에서 게임 이론을 적용한 다른 물리 계층 설계 기술로 부호 선택 문제가 있다 [10]. 이 때 사용한 유틸리티 함수는 다음과 같이 송신 전력과 간섭 함수를 곱한 것의 음수 값이다.

$$u_k = -p_k i_k \quad (10)$$

따라서, 간섭이 감소하거나 송신 전력이 감소하면 유틸리티가 증가한다. 정합 여파기를 사용할 때 유틸리티 함수는  $u_k = -p_k s_k^T R_k s_k$  로 쓸 수 있다. 이 때 부호 선택 게임에서는 각 단말이 다음을 만족하는 부호를 차례로 선택한다.

$$\max_{p_k} u_k \quad \text{subject to} \quad s_k^T s_k = 1 \quad (11)$$

이를 만족하는 부호는 다음을 만족한다.

$$R_k s_k = v_k s_k \quad (12)$$

즉, 각 단말은 간섭 행렬의 고유 벡터 가운데 최소 고유 값에 해당하는 고유 벡터를 선택하면 간섭이 가장 적은 방향으로 선택하는 것이다.

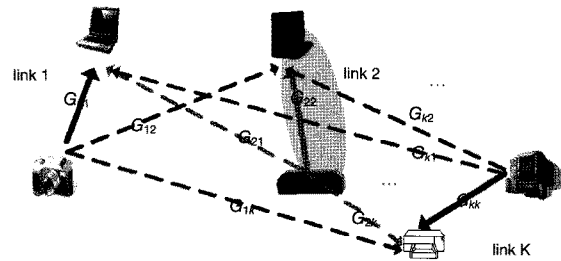
## III. Ad-hoc 망에서의 접근 방법

무선 ad-hoc 망은 노드 (단말) 스스로가 주변 환경에 동적으로 적응하면서 최적화하는 자가 조직적인 특성을 지닌다. 이러한 분산 환경에서 노드들 상호 간의 영향과 성능을 분석하고 스스로가 합리적인 결정에 도달하는 방법으로 게임 이론이 매우 적절하게 적용될 수 있다. 이에, 최근 ad-hoc 망의 물리 계층에서 비협력 게임이 적용된 분야를 소개하고 그 유용성을 살펴본다.

### A. 시스템 모형

분산 ad-hoc 망은 (그림 3)에서 보인 바와 같이 중앙 제어 장치 없이  $K$  노드 쌍이 분산적으로 무선 링크를 형성한다. 여기서,  $G_{jk}$  는 링크  $j$  의 송신 노드로부터 링크  $k$  의 수신 노드로의 채널 이득으로 채널의 경로 손실, 페이딩, 안테나 이득 등을 포함할 수 있다. 각 노드 쌍에서 수신 노드의 잡음 세기는  $\sigma_k^2$  이다. ad-hoc 망이 셀룰러 망의 상향 링크와 다른 가장 큰 차이점은 수신단이 하나가 아니라 송신단마다 개별적으로 존재한다는 것이다.

게임 모형  $G = \langle K, \{A_k\}, \{u_k\} \rangle$  에서 게임 참가자는 결정을 내리는 노드 쌍의 집합  $K = \{1, 2, \dots, K\}$  이고, ad-hoc 망의 물리 계층 전략으로는 송신 노드의 전력  $p_k$ , CDMA의 부호  $s_k$ , 인지 라디오에서 주파수 채널  $w_k$ , MIMO 시스템에서 빔형성 벡터  $v_k$  등과 이들의 조합이 될 수 있다.



(그림 3) 분산 ad-hoc 망 시스템 모형

### B. 전송률 제한 전력 제어 게임

멀티미디어 서비스를 지원하는 ad-hoc 망이 개발되면서 서비스 품질을 보장하도록 전송률 요구 조건을 만족시키면서 전력 소모를 줄이는 전력 제어 게임이 연구되었다 [16-20]. 이러한 전력 제어 게임에서 목표 전송률  $r_k^0$  을 얻을 수 있도록 다음과 같은 유틸리티 함수를 쓸 수 있다.

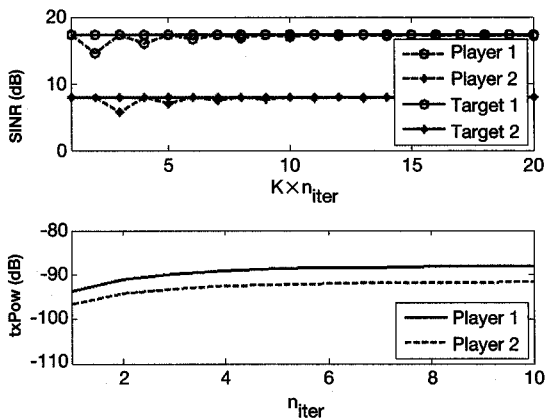
$$u_k = \log_2(1 + p_k \Gamma_k) - c_k p_k, \quad \Gamma_k = \frac{G_{kk}}{\sum_{j=k} p_k G_{jk} + \sigma_k^2}, c_k = \Gamma_k 2^{-r_k^0} \ln 2 \quad (13)$$

여기서,  $p_k \Gamma_k$  는 SINR, 이고  $\Gamma_k$  는 전력으로 정규화된 SINR,  $c_k$  는 목표 전송률에서 유틸리티 값을 최대로 하는 비용 계수이다. 또 다른 유틸리티 함수로 목표 전송률 대신 목표 전

송신을 제공할 수 있는 목표 SINR  $\gamma_k = g(r_k^0)$  를 얻게 하는 다음 식을 적용할 수 있다.

$$u_k = -(\gamma_k - p_k \Gamma_k)^2 \quad (14)$$

유틸리티를 최대화 하는 전략은 식 (13)의 경우  $p_k = (2^{\gamma_k} - 1) / \Gamma_k$  이고 식 (14)의 경우  $p_k = \gamma_k / \Gamma_k$  이다. 전송률  $r_k^0$  를 제공하는 목표 SINR을 사는 채널 용량 식으로 얻으면  $\gamma_k = 2^{\gamma_k} - 1$  이므로 식 (13)과 식 (14)의 유틸리티를 최대화 하는 전략은 같다. 따라서, 두 유틸리티 함수는 전략  $p_k$  에 대해 최대값이 하나이므로 모두 Nash 균형점을 제공하고 각 노드가 최대값을 주는 전략을 반복적으로 선택하면 Nash 균형으로 수렴한다. 한 예로 (그림 4)는 참가자가 2명이고 식 (14)의 유틸리티를 적용한 전력 제어 게임에서 반복적으로 전략을 선택함에 따라 각 노드의 SINR이 목표 SINR에 수렴하는 것과 송신 전력이 Nash 균형점으로 수렴함을 보였다.



(그림 4) K=2일 때 목표 SINR로의 수렴 특성 및 송신 전력 선택

이러한 전송률 제한 전력 제어 게임에서 간섭 특성이 목표 전송률을 만족시키지 못할 때 반복 전력 선택이 발산하는 것을 방지하기 위해 제안된 방법으로 링크 shut-down, 부채널 널링 방식 등이 있다 [19-20].

### C. 간섭 줄임 Potential 게임

CDMA 부호 선택이나 인지 라디오에서의 동적 주파수 채널 선택 문제는 링크 사이의 간섭을 회피하는 기술이다. 2장에서 소개한 수신기가 하나일 때의 CDMA 부호 선택 게임을

수신기가 여럿인 ad-hoc 망에 적용하면 Nash 균형으로의 수렴을 보장할 수 없다. 이러한 경우 Potential 게임을 적용하면 전략이 Nash 균형으로 수렴하는 것을 보장하고 Nash 균형이 시스템 전체의 성능을 좋게 하도록 게임을 설계할 수 있다.

Potential 게임은 한 참가자가 전략을 바꿈으로써 일어나는 유틸리티 함수 값의 변화가 그대로 반영되는 Potential 함수  $P(\cdot)$  를 갖는다. 즉, 다음과 같이 한 참가자의 전략이 바뀔으로써 발생하는 유틸리티 변화가 Potential 함수에 그대로 반영된다.

$$p(a_k, a_{-k}) - P(a'_k, a_{-k}) = u(a_k, a_{-k}) - u(a'_k, a_{-k}) \quad (15)$$

여기서,  $a_k$  와  $a_{-k}$  는 참가자  $k$  의 전략과 참가자  $k$  의 전략을 뺀 나머지 전략들을 나타낸다. 이 경우 각 참가자가 자신의 유틸리티 함수를 최대화 하면 결국 Potential 함수를 최대화 하게 된다. 이는 Potential 함수가 시스템 전체 성능을 반영 하도록 설계하면 각 참가자의 전략 선택이 결국 전체 성능을 좋게 하는 것을 뜻한다. 또한, 이러한 Potential 함수가 존재할 경우 게임 참가자가 최선의 응답으로 전략 선택을 순서대로 진행할 경우 결국 Nash 균형으로 수렴한다 [16].

Potential 게임의 한 예로 인지 라디오 기반 ad-hoc 망에서  $K$  링크가  $F$  주파수 채널 가운데 한 채널을 선택하는 경우를 살펴보자 [18]. 각 링크의 전략은 주파수 채널  $\omega_k$  이고 전략 공간  $A_k = \{1, 2, \dots, F\}$  은 이용 가능한 주파수 채널이다. 다음의 유틸리티 함수를 정의해 보자.

$$u_k = - \sum_{j \neq k, j=1}^K p_j G_{jk} I(\omega_j, \omega_k) - p_k \sum_{j \neq k, j=1}^K G_{kj} I(\omega_k, \omega_j) \quad (16)$$

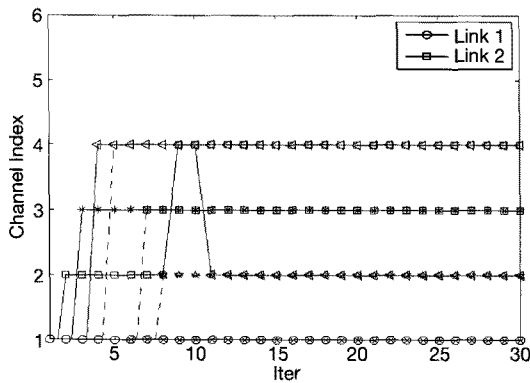
여기서,  $I(\omega_j, \omega_k)$  는 두 링크의 전략으로 결정되는 상호 간섭 함수로, 채널 선택 문제에서  $\omega_j$  와  $\omega_k$  가 같으면 1, 다르 면 0으로 둔다. 유틸리티 함수의 첫 항의 절대값은 링크  $k$  가 다른 링크로부터 받는 간섭 양이고, 둘째 항의 절대값은 링크  $k$  가 다른 링크에게 미치는 간섭 양이다. 따라서, 링크  $k$  는 자신이 받은 간섭 양과 자신이 다른 참가자에게 미치는 간섭 양의 총합이 가장 적은 전략을 선택하게 된다.

이 게임에서 모든 유틸리티 함수의 합으로 정의되는 식 (17)은 Potential 함수의 특징을 갖는다.

$$P(\omega_k, \omega_{-k}) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K u_k = - \sum_{i=1}^K \sum_{j \neq i, j=1}^K p_j G_{ji} I(\omega_j, \omega_i) \quad (17)$$

식 (17)은 식 (14)의 조건을 만족하면서 ad-hoc 망에 있는 모든 링크가 발생시키는 간섭의 합을 나타낸다. 따라서, 유틸리티 함수를 최대로 하는 주파수 채널 선택 결과는 결국 ad-hoc 망의 전체 간섭을 줄이는 주파수 채널이 되는 것이다.

(그림 5)는 링크 수가 8이고 주파수 채널 수가 4일 때 반복적으로 채널 선택 게임을 수행한 한 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 채널 선택 게임이 특정 상태로 수렴하는데 이 점이 Nash 균형이 된다.



(그림 5) 주파수 채널 수가 4, 링크 수가 8일 때 식 (16)을 적용한 채널 선택 게임의 수렴 특성

#### IV. 결 론

본고에서는 CDMA 셀룰러 망과 ad-hoc 망에서 비협력 게임을 적용한 무선 설계 기술을 살펴보았다. 그 결과 분산적으로 전략을 결정하는 환경에서 유틸리티 함수를 시스템 목적에 맞게 그리고 수렴 특성이 좋게 설계하면 게임 이론으로 바람직한 전략을 얻을 수 있음을 볼 수 있었다. 그러나, 본고에서 살펴본 바와 같이 게임 이론의 적용은 대부분 이상적이고 단순화된 무선 시스템 모형에서 이루어졌다. 게임 이론이 실제 무선 통신 망에 적용 구현되기 위해서는 채널 추정 오류, 잡음, 채널의 변화, 단말의 이동성 등 현실적인

무선 통신 환경을 반영한 훨씬 복잡한 시스템 모형에서의 적용 방법을 연구하여야 한다. 또한 게임 이론으로 유도된 알고리즘을 실제 구현할 수 있도록 이에 수반되는 프로토콜을 효율적으로 설계할 필요가 있다.

#### 참 고 문 헌

- [1] P.D. Straffin, *Game Theory and Strategy*. Washington, The Mathematical Association of America, 1993.
- [2] V. Shah, N.B. Mandayam, and D.J. Goodman, "Power control for wireless data based on utility and pricing," in *Proc. 9th IEEE Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Communications*, Boston, MA, Sept. 1998, pp. 1427-1432.
- [3] D.J. Goodman and N.B. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Personal Commun.*, vol. 7, pp. 48-54, Apr. 2000.
- [4] A.B. MacKenzie and S.B. Wicker, "Game theory in communications: motivation explanation, and application to power control," in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 821-826, San Antonio, TX, 2001.
- [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] S. Koskie and Z. Gajic, "A Nash game algorithm for SIR-based power control in 3G wireless CDMA networks," *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 13, pp. 1017-1026, Oct. 2005.
- [8] 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, pp. 1885-1894, Nov. 2005.
- [9] C.W. Sung, K.W. Shum, and K. Leung, "Stability of distributed power and signature sequence control for CDMA systems- a game theoretic framework," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 52, no. 4, pp. 1775-1780, Apr. 2006.
- [10] C. Lacatus and D.C. Popescu, "Adaptive interference avoidance for dynamic wireless systems: a game theoretic approach," *IEEE J. Select Topics Signal Process.*, vol. 1, no. 1, pp. 189-202, June 2007.
- [11] 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.
- [12] F. Meshkati, A.J. Goldsmith, H.V. Poor, S.C. Schwartz, and N.B. Mandayam, "A game-theoretic approach to energy-efficient modulation in CDMA networks with delay QoS constraints," *IEEE J. Select Areas Commun.*, vol. 52, pp. 1069-1077, Aug. 2007.
- [13] S. Grandhi, R. Vijayan, D. Goodman and J. Zander, "Centralized power control in cellular radio system", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 42, pp.641-646, Nov, 1996.
- [14] R. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," *IEEE JSAC*, vol. 13, no. 7, pp. 1341-1347, Sept. 1995.
- [15] A.B. MacKenzie and S.B. Wicker, "Game theory and the design of self-organizing, adaptive wireless networks," *IEEE Commun. Mag.*, Nov. 2001.
- [16] V. Srivastava, J. Neel, A. MacKenzie, R. Menon, L.A. DaSilva, J. Hicks, J.H. Reed, and R. Gilles, "Using game theory to analyze wireless ad hoc networks," *IEEE Commun. Survey Tutorials*, vol. 7, pp. 46-56, 4th Quart. 2005.
- [17] M. Hayajeh 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.
- [18] N. Nie and C. Comaniciu, "Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks," *Mobile Net. and Appli.*, vol. 11, no. 6, pp. 779-797, Dec. 2006.
- [19] 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.
- [20] 박재철, 왕진수, 김윤희, 홍인기, "OFDM 기반 무선 네트워크에서 부채널 널링을 적용한 전송률 제한 전력 제어 게임" JCCI, 광주, 2009년 4월.

약 력



1995년 한국과학기술원 전기및전자공학과 학사  
 1997년 한국과학기술원 전기및전자공학과 석사  
 2000년 한국과학기술원 전기및전자공학과 박사  
 2000년 ~ 2004년 한국전자통신연구원 선임연구원  
 2004년 ~ 현재 경희대학교 전자정보대학 부교수  
 관심분야: 무선 및 이동통신, 통신 신호처리, 통신 이론

김 윤희



1989년 연세대학교 전기공학과 학사  
 1991년 연세대학교 전기공학과 석사  
 1995년 연세대학교 전기공학과 박사  
 1995년 ~ 1999년 SK Telecom 중앙연구원 선임연구원  
 1997년 ~ 1998년 NTT DoCoMo 연구원  
 1999년 ~ 현재 경희대학교 전자정보대학 부교수  
 관심분야: 무선 및 이동통신, 게임이론, Corss-layer 설계

홍 인 기

