

## 간섭채널에서 에너지 효율적인 전송률 스케줄링을 위한 게임이론적 접근

오 창 윤\*

### Game Theoretic Approach for Energy Efficient Rate Scheduling on the interference channel

Chang-Yoon Oh\*

#### 요 약

게임이론을 적용하여 에너지 효율적인 전송률 스케줄링 방안을 제안한다. 먼저, 개별 단말의 효용함수를 정의하고, 효용함수를 최적화하도록 에너지를 결정하는 비협력적 전송률 게임을 모델링한다. 여기서, 효용함수는 개별 단말이 데이터 전송시 소모하는 전송 에너지이다. 특히, 개별 단말의 효용함수가 Convex 함수임을 이용하여 에너지 효율적인 전송률 스케줄링 문제가 나쉬 평형이 존재함을 증명하고, 이를 기반으로 비협력적 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 또한, 에너지 효율의 개선을 위해서 개별 단말의 효용함수의 합을 최적화하는 협력적 스케줄링 알고리즘도 제안한다. 성능 분석을 위하여 비협력적 알고리즘과 협력적 알고리즘의 수렴도 결과와 에너지 효율성 결과를 제시한다.

▶ Keywords : 스케줄링, 게임이론, 간섭채널

#### Abstract

A game theoretic approach is applied for studying the energy efficient rate scheduling. The individual utility function is defined first. Then, a non cooperative rate game is modeled in which each user decides the transmission rate to maximize its own utility. The utility function considered here is the consumed energy for the individual user's data transmissions. In particular, using the fact that the utility function is convex, we prove the existence of Nash Equilibrium in the energy efficient rate scheduling problem at hand. Accordingly, a non cooperative scheduling algorithm is provided. For better energy efficiency, the sum of the individual user's utility function is optimized.

•제1저자 : 오창윤 •교신저자 : 오창윤

•투고일 : 2014. 5. 16, 심사일 : 2014. 6. 26, 게재확정일 : 2014. 8. 1.

\* 인하공업전문대학 정보통신과(Dept. of Information and Communication Engineering, Inha Technical College)

※ 이 논문은 2014학년도 인하공업전문대학 교내연구비지원에 의하여 연구되었음.

Finally, the convergence analysis and numerical results to show the energy efficiency of the proposed algorithms are provided.

▶ Keywords : Scheduling, Game Theory, Interference Channel

## I. 서론

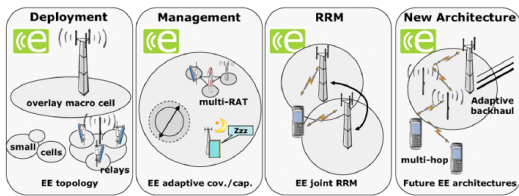


그림 1. 녹색 통신 연구 분야 [2]  
Fig. 1. Green Communication Area

최근 들어, 통신시스템 분야에서도 친환경을 고려한 Green Communications (녹색 통신) 이 화두에 오르고 있다 [1]. 지난 2010년 11월에 개최된 WWRF 25차 회의에서는 Green Radio 기술 개발에 대한 깊이 있는 논의가 이루어졌다. 이는 현재 통신 분야를 제외한 여러 분야에서 논의가 되고 있는 에너지 절감 기술에 대한 관심이 차세대 이동통신에서도 적용되는 추세로 이해할 수 있다. 차세대 이동통신 시스템에서도 친환경 개념의 도입을 통한 Green Cellular Network 개발이 필수적일 것으로 전망한다.

본 연구에서는 에너지 효율성 연구에 대한 필요성에 근거를 두고, 경제학에서 주로 적용되는 게임 이론을 에너지 효율적인 관점에서 단말의 전송률 스케줄링 방안을 제안하고자 한다. 특히, 전송률 스케줄링 문제를 비협력적 게임으로 모델링하고, 이를 기반으로 비협력적 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 또한, 보다 개선된 에너지 효율을 위해서 협력적 스케줄링 알고리즘도 제안한다.

## II. 관련 연구

### 1. 관련연구

#### 1.1 국내 동향

친환경을 측정하는 지표로 주로 사용되어지는 것이 얼마만

큼 적은 양의 탄소를 배출하는가를 나타내는 저탄소이다 [1]. 통신시스템에서 탄소 배출량은 에너지 소모량과 비례하기 때문에 앞서 언급한 친환경 성능지표인 저탄소를 통신시스템에 적용하게 되면 Green Communication은 결국 에너지 소모를 최소화하는 방향으로 통신시스템을 설계하는 것이다. 그림 1은 Green Communication Network을 구축하는 데 있어서 다양한 접근방법들을 요약하고 있다 [2]. 구체적으로, Green Communication Network 구축을 위해 현재 진행 중인 연구 방향은 기지국 측면에서 에너지 소모 절약, 이종망간 네트워크 구축을 통한 에너지 소모 절약, 인지기술을 활용한 에너지 소모 절약 등을 예로 들 수 있다. 기지국에서 데이터를 전송하는 과정에서 송신 신호를 송출시 고출력 증폭기를 사용하게 되는데, 이때 많은 양의 탄소가 배출된다. 따라서, 에너지 소모 측면의

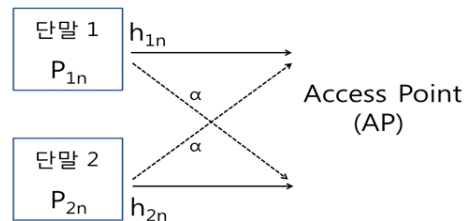


그림 2. 시스템 모델  
Fig. 2. System Model

효율적인 고출력 증폭기를 설계하는 것이 중요한 연구 주제가 된다 [3-4]. 기지국에서 할 수 있는 다른 에너지 소모 감소 방안으로 SON(Self Organized Network) 기술에 대한 연구가 진행중이다. SON 기술을 적용하여 기지국이 커버해야 할 셀 반경을 계산하고, 기지국이 송출해야 할 전력값을 최적화하여 에너지 소모량을 최소화하도록 하는 것이다 [5-6]. 이종망간 네트워크 구축을 통하여 효율적인 셀플래닝이 가능해지며, 이를 통해 기지국이 송출하는 에너지 소모량을 줄일 수 있다 [7-8]. 일반적으로, 셀의 크기가 커질수록 기지국이 송출해야 하는 에너지 사용량은 증가하게 된다. 최근에는 인지기술(Cognitive radio)을 적용하여 에너지 소모량을 줄이는 연구가 진행 중이다 [9-10]. 높은 전송율을 위

해서는 높은 송신 전력이 필요하다. 하지만, 높은 송신 전력을 사용하는 대신 보다 큰 유희 주파수 대역을 찾아 낮은 송신 전력을 사용하여 높은 전송률 전송이 가능하다. 이상에서 언급한 것과 같이 Green Communication을 기지국 측면에서 접근하는 것은 탄소배출량을 대폭 줄일 수 있는 접근법이기는 하나, 기존 시스템을 많이 변경해야 하기 때문에 고비용이 불가피하다. 따라서, 본 논문에서는 Green Communication을 구축하는데, 비용적 측면을 고려하여 단말 입장에서 접근하여 Green Communication을 구축하고자 한다. 특히, 단말의 스케줄링은 소프트웨어 수준의 변경만으로도 개선이 가능한 부분이기 때문에 소모 비용이 시스템을 변경하는 것만큼 크지 않다 [11].

본 연구의 기여(Contributions)는 다음과 같다. 본 연구에서는 게임이론을 에너지 효율적인 전송률 스케줄링에 적용하여 비협력적 게임으로 모델링하였다. 구체적으로, 두 개의 단말간 비협력적 게임이 Nash 균형(Nash Equilibrium)이 존재함을 증명하였으며, 비협력적 스케줄링 알고리즘과 협력적 스케줄링 알고리즘을 제안하였다. 기존 연구들에서 효율적인 자원 할당을 위해 게임이론이 적용된 바는 있으나 [12-13], 단말간 간섭채널에서 전송률 스케줄링을 게임 이론적으로 접근한 연구는 아직 없다. 본 연구에서는 Nash 균형 존재 증명의 어려움으로 인해 비협력적 전송률 게임을 두 개의 단말로 국한 하였으며, 세 개 이상의 단말에 대한 연구는 현재 진행중임을 밝힌다.

### III. 본 론

#### 1. 시스템모델 및 효용함수 정의

그림2 에서와 같이 두 개의 단말이 하나의 AP(Access Point)에 데이터를 전송하는 시스템을 고려한다. 하나의 AP가 두 개의 단말로부터 동일한 채널에서 데이터를 수신하는 과정에서 단말끼리의 간섭이 발생하며, 기존 연구 결과에서의 간섭모델[14]을 적용하기로 한다. 즉,  $\alpha$  ( $0 < \alpha < 1$ ) 은 AP가 단말  $i$  의 데이터를 수신하는 과정에서 단말  $j$  ( $j \neq i$ ) 로 부터 받는 간섭 정도를 나타낸다. 일례로,  $n$  번째 채널에서 단말  $i$  와 단말  $j$  의 송신 전력값이 각각  $p_{in}$ ,  $p_{jn}$  이고, 단말  $i$ , 단말  $j$  ( $j \neq i$ ) 와 AP간의 채널이득값이 각각  $h_{in}$ ,  $h_{jn}$  이라고 한다면, AP는 단말  $i$  의 데이터를 수신하는 과정에서 단말  $j$  ( $j \neq i$ ) 로 부터  $\alpha p_{jn} h_{jn}$  만큼의 간섭을 받게 된다. 단말  $i$  의 신호대 간섭비(SIR)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$SIR = \frac{p_{in} h_{in}}{\alpha p_{jn} h_{jn} + I} \quad (1)$$

여기서,  $I$  는 열잡음과 인접셀 간섭을 포함한 간섭성분이다.  $n$  번째 채널에서 단말  $i$  의 전송률은 다음과 같다.

$$R_{in} = \log_2(1 + k \cdot SIR) \quad (2)$$

$k$  는 SNR 이격도(GAP),  $k = -\frac{\ln(5BER)}{1.5}$  을 나타낸

다 [15]. 본 논문에서는 모델의 간략화를 위해서 두 개의 채널만을 고려하도록 하며 이 경우,  $i$  ( $i=1,2$ ) 는 두 개의 채널에서  $T_i$  만큼의 데이터를 기지국에 전송해야 한다. 즉, 단말  $i$  는 두 개의 채널에서  $R_{i1} + R_{i2} = T_i$  가 되도록  $n=1,2$  번째 채널에서  $R_{in}$  ( $R_{in} \geq 1$ ) 의 데이터를 할당한다.

전력값에 시간을 곱한 값이 에너지이므로 각각의 채널에서의 시간 구간의 길이가 동일할 경우, 에너지 최적화 문제는 각각의 채널에서의 전력값의 합을 최적화하는 문제와 동일시 된다. 따라서, 본 논문에서는 에너지 최적화를 위해서 전력값의 합을 최적화하고자 한다.  $n$  번째 채널에서 두 단말의 전송률이  $(R_{1n}, R_{2n})$  와 같을 때, 최적화된 수신 전력값에 채널이득값의 역수를 곱해서 최적화된 송신 전력값을 구할 수 있다. 구체적으로, [14]로부터 최적화된 수신 전력값을 구하면 다음과 같다.

$$q_1(R_{1n}, R_{2n}) = \quad (3)$$

$$\frac{I}{D(R_{1n}, R_{2n})} \cdot SIR(R_{1n}) \cdot (1 + \alpha \cdot SIR(R_{2n}))$$

$$q_2(R_{2n}, R_{1n}) = \quad (4)$$

$$\frac{I}{D(R_{2n}, R_{1n})} \cdot SIR(R_{2n}) \cdot (1 + \alpha \cdot SIR(R_{1n}))$$

여기서  $q_1(R_{1n}, R_{2n})$  는 간섭 단말인 단말2의  $n$  번째 채널에서의 전송률이  $R_{2n}$  일 때, 단말 1가  $n$  번째 채널에서  $R_{1n}$  의 전송률을 위해서 요구되는 수신전력값을 나타낸다.  $SIR(R_{1n})$  는 전송률  $R_{1n}$  을 위해 요구되는 SIR 이며, 식 (2)로부터 구할 수 있다.  $D(R_{1n}, R_{2n})$  는 다음과 같이 정의된다.

$$D(R_{1n}, R_{2n}) = 1 - \alpha^2 \cdot SIR(R_{1n}) \cdot SIR(R_{2n}) \quad (5)$$

최적화된 수신신호 값이 존재하기 위해서는  $D(R_{1n}, R_{2n}) > 0$  를 만족해야 한다. 최적화 수신전력값인  $q_1(R_{1n}, R_{2n})$ 의 전송률  $(R_{1n}, R_{2n})$ 에 대한 성질을 정리하면 다음과 같다.

**Observation 1.** 1번째 채널에서의 단말  $i$ 의 수신전력 값  $q_i(R_{i1}, R_{j1})$ 은 단말  $i$ 의 전송률  $R_{i1}$ 에 볼록함수(Convex function)이다.

증명)  $\frac{\partial^2 q_i(R_{i1}, R_{j1})}{(\partial R_{i1})^2} > 0$ , 이므로,  $q_i(R_{i1}, R_{j1})$ 는 전송률  $R_{i1}$ 에 대해 볼록함수이다.

**Observation 2.** 2번째 채널에서의 단말  $i$ 의 수신전력 값  $q_i(R_{i2}, R_{j2})$ 은 단말  $i$ 의 전송률  $R_{i1}$ 에 볼록함수(Convex function)이다.

증명)  $q_i(R_{i2}, R_{j2}) = q_i(T_i - R_{i1}, T_j - R_{j1})$ 로부터  $\frac{\partial^2 q_i(T_i - R_{i1}, T_j - R_{j1})}{(\partial R_{i1})^2} > 0$  이므로,  $q_i(R_{i2}, R_{j2})$ 는 전송률  $R_{i1}$ 에 대해 볼록함수이다.

최적화된 송신 전력값은 앞서 얻은 최적화된 수신 전력값에 단말과 기지국간의 채널 이득값을 곱해 구할 수 있으며 다음과 같다.

$$P_{1n} = \frac{q_1(R_{1n}, R_{2n})}{h_{1n}} \quad (6)$$

$$P_{2n} = \frac{q_2(R_{2n}, R_{1n})}{h_{2n}} \quad (7)$$

즉, 단말  $i$ 의 1번째 채널과 2번째 채널에서 소모되는 에너지는 다음과 같다.

$$P_{i1} + P_{i2} = \frac{q_i(R_{i1}, R_{j1})}{h_{i1}} + \frac{q_i(R_{i2}, R_{j2})}{h_{i2}} \quad (8)$$

다음은 개별 단말의 효용함수(Utility Function)를 정의하

기로 한다. 효용함수는 개별 단말이 두 개의 채널에서 소모하는 에너지에 음의 부호를 붙인값이며, 다음과 같이 정의된다.

$$u_i = u_i(R_{i1}, R_{j1}) = - \left[ \frac{q_i(R_{i1}, R_{j1})}{h_{i1}} + \frac{q_i(R_{i2}, R_{j2})}{h_{i2}} \right] \quad (9)$$

특히, 효용함수  $u_i(R_{i1}, R_{j1})$ 에서 1번째 채널에서의 전송률  $(R_{i1}, R_{j1})$ 의 함수로만 표현된 이유는 2번째 채널에서의 전송률  $(R_{i2}, R_{j2})$ 은 1번째 채널에서의 전송률  $(R_{i1}, R_{j1})$ 이 정해지면 총 필요전송률로부터 역산이 가능하기 때문이다. 즉,

$$R_{i2} = T_i - R_{i1} \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

## 2. 비협력적 전송률 게임 (Non Cooperative Rate Game)

앞장에서 정의한 개별 단말의 효용함수로부터  $G = [N, \bar{R}, u_i]$  와 같이 비협력적 전송률 게임(NRG, Non-Cooperative Rate Game) [12-13]을 정의한다. 여기서  $N = 1, 2$ ,  $\bar{R}$ ,  $u_i$ 는 각각 사용자 지표(Index), 게임전략셋, 개별 단말의 효용함수를 의미한다. 게임전략셋  $\bar{R} = [R_{11}, R_{21}]$ 는 1번째 채널에서의 각 단말의 전송률이다. 효용함수는 게임 전략셋인 두 단말의 전송률의 함수이다. 비협력적 전송률 게임에서는 단말 상호간의 협력 없이 각각의 단말 자신이 소모하는 에너지를 최소화 하도록 또는 효용함수를 최대화 하도록 단말의 전송률을 결정한다. 즉, 단말  $i = 1, 2$ 는 상대 단말  $j = 2, 1$   $j \neq i$ 의 전송률이  $R_{j1}$ 와 같을 때, 자신의 효용함수  $u_i = u_i(R_{i1}, R_{j1})$ 가 최대가 되도록 전송률  $R_{i1}$ 을 결정한다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\arg_{R_{i1}} \max u_i(R_{i1}, R_{j1}) \quad (11)$$

다음의 Definition 에서는 전송률 게임에서 나쉬평형에 대해 설명하고 있다. 즉, 나쉬 평형에서는 단말  $i$ 는 상대방 단말  $j$  ( $j \neq i$ )이 전송률을 변경하지 않는 상태에서 단말  $i$ 는 자신의 최적의 전송률을 변경하지 않는다.

**Definition 1.** 전송률 벡터  $\bar{R} = [R_{11}, R_{21}]$ 가

$u_i(R_{i1}, R_{j1}) \geq u_i(\widehat{R}_{i1}, R_{j1})$  ( $i = 1, 2, i \neq j$ ) 를 만족할 경우, 전송률 벡터  $R = (R_{i1}, R_{j1})$  는 NRG  $G = [N, \overline{R}, u_i]$  의 나쉬평형이다.

[12-13]에 의하면 효용함수  $u_i(R_{i1}, R_{j1})$  가 준오목함수 (quasiconcave function) 일 경우 나쉬 평형이 존재한다. 즉,

$$\frac{\partial^2 u_i}{(\partial R_i)^2} \geq 0 \text{ 를 만족하면 나쉬평형이 존재한다.}$$

위에서 정의한 Definition 1을 본 논문에서의 비협력적 전송률 게임에 적용하면 다음과 같다.

**Proposition 1.** NRG  $G = [N, \overline{R}, u_i]$ 에서 나쉬평형이 존재한다.

증명) 효용함수  $u_i = u_i(R_{i1}, R_{j1})$  는  $q_i(R_{i1}, R_{j1})$  와  $q_i(R_{i2}, R_{j2})$  의 합에 음의 부호를 곱한 값이다. 즉,

$$u_i = u_i(R_{i1}, R_{j1}) = - \left[ \frac{q_i(R_{i1}, R_{j1})}{h_i} + \frac{q_i(R_{i2}, R_{j2})}{h_i} \right]$$

Observation 1 과 Observation 2 에 의하여  $q_i(R_{i1}, R_{j1})$  와  $q_i(R_{i2}, R_{j2})$  이  $R_{i1}$  에 대하여 볼록함수이므로, 볼록함수에 채널상수  $h_{in}$  를 곱한  $\frac{q_i(R_{i1}, R_{j1})}{h_{i2}}$  와  $\frac{q_i(R_{i2}, R_{j2})}{h_{i2}}$  도 볼록함수이며, 볼록함수의 합인  $\frac{q_i(R_{i1}, R_{j1})}{h_{i1}} + \frac{q_i(R_{i2}, R_{j2})}{h_{i2}}$  역시 볼록함수이다 [12]. 따라서, 볼록함수(Convex Function)에 음의 부호를 곱한  $u_i = u_i(R_{i1}, R_{j1})$  는 오목함수(Concave Function)이며, Definition 1에 의하여 NRG  $G = [N, \overline{R}, u_i]$ 에서 나쉬평형이 존재한다.

### 3. 비협력적 알고리즘

앞 장에서는 비협력적 전송률 게임인 NRG에서 나쉬평형이 존재함을 보였다. 비협력적 전송률 게임에서는 각각의 단말은 자신의 효용함수가 최대가 되도록 단말 자신의 전송률 값을 결정한다. 여기서, 상대방 단말의 전송률은 변경없이 고정된다. 즉, 단말  $i$  는 상대방 단말  $j$  ( $j \neq i$ ) 이 전송률을 변경하지 않는 상태에서 단말  $i$  의 효용함수  $u_i = u_i(R_{i1}, R_{j1})$  가 최대가 되도록

전송률  $R_{i1}$  를 결정한다. 이 때 결정된 전송률을  $R_{i1}^*$  라고 하자. 마찬가지로, 단말  $j$  는 상대방 단말  $i$  ( $i \neq j$ ) 이 전송률  $R_{i1}^*$  을 변경하지 않고 유지한 상태에서 단말  $j$  의 효용함수  $u_j = u_j(R_{j1}, R_{i1})$  가 최대가 되도록 전송률  $R_{j1}$  를 결정한다. 이 때 결정된 전송률을  $R_{j1}^*$  라고 하자. 이와 같은 과정은 두 단말의 전송률이 나쉬 평형에 도달할 때까지 반복한다.

### 3.1 비협력적 알고리즘

비협력 알고리즘의 PSEUDO CODE 는 다음과 같다.

( $R_{21}$  의 임의의 초기값  $R_{21}^*$  선정)

for iteration

(선정된  $R_{21}^*$  상태에서 최적의  $R_{11}$  값,  $R_{11}^*$  선정)

$$R_{11}^* = \arg_{R_{11}} \max u_1(R_{11}, R_{21}^*)$$

(선정된  $R_{11}^*$  상태에서 최적의  $R_{21}$  값,  $R_{21}^*$  선정)

$$R_{21}^* = \arg_{R_{21}} \max u_2(R_{21}, R_{11}^*)$$

iteration++

end

앞서 언급한 알고리즘은 두 단말의 전송률 ( $R_{11}^*, R_{21}^*$ ) 이 나쉬 평형을 이룰 때까지 반복한다. 여기서, 효용함수의 최대 값, 즉  $\arg_{R_{i1}} \max u_i(R_{i1}, R_{j1}^*)$  은  $\frac{\partial u_i}{\partial R_{i1}} = 0$  가 되도록 하는  $R_{i1}$  이다.

### 4. 협력적 전략

비협력적 전송률 게임에서는 개별 단말의 효용함수만을 최적화 하도록 개별 단말의 전송률을 결정하였다. 즉, 상대방 단말의 전송률이 결정된 상태에서 자신이 소모하는 전력값을 최소화하도록 전송률을 결정한다. 협력적 전략에서는 두 단말들의 효용함수의 합을 최적화 하도록 개별 단말의 전송률을 결정한다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\arg_{R_{i1}} \max (u_i(R_{i1}, R_{j1}) + u_j(R_{j1}, R_{i1})) \quad (12)$$

비협력적 알고리즘이 개별 단말의 에너지를 최적화하는 방안인데 반해, 협력적 전략은 전체 단말의 에너지를 최적화하

는 방안이다. 협력적 전략에서의 최적화된 전송률을 구하기 위해서 두 단말의 효용함수의 합의 특성을 살펴보기로 한다.

**Observation 3.** 두 단말의 효용함수의 합은 1번째 채널에서의 단말  $i$ 의 전송률  $R_{i1}$ 에 볼록함수 (Convex function) 이다.

증명)  $\frac{\partial^2 u_i(R_{i1}, R_{j1})}{(\partial R_{i1})^2} + \frac{\partial^2 u_j(R_{j1}, R_{i1})}{(\partial R_{i1})^2} > 0$ , 이므로,  $u_i(R_{i1}, R_{j1}) + u_j(R_{j1}, R_{i1})$ 는 전송률  $R_{i1}$ 에 대해 볼록함수이다.

두 단말의 효용함수의 합의 최대값, 즉  $\arg_{R_{i1}} \max (u_i(R_{i1}, R_{j1}) + u_j(R_{j1}, R_{i1}))$ 은  $\frac{\partial u_i(R_{i1}, R_{j1})}{\partial R_{i1}} + \frac{\partial u_j(R_{j1}, R_{i1})}{\partial R_{i1}} = 0$ 를 만족하는  $R_{i1}$ 를 찾는 것이다.

Observation 3의 특성을 기반으로 다음과 같은 협력적 전략 기반의 알고리즘을 제안한다.

4.1 협력적 알고리즘

협력적 알고리즘의 PSEUDO CODE는 다음과 같다.

( $R_{21}$ 의 임의의 초기값  $R_{21}^*$  선정)  
for iteration

(선정된  $R_{21}^*$  상태에서 최적의  $R_{11}$  값,  $R_{11}^*$  선정)

$R_{11}^* = \arg_{R_{11}} \max (u_1(R_{11}, R_{21}) + u_2(R_{21}, R_{11}))$   
(선정된  $R_{11}^*$  상태에서 최적의  $R_{21}$  값,  $R_{21}^*$  선정)

$R_{21}^* = \arg_{R_{21}} \max (u_2(R_{21}, R_{11}) + u_1(R_{11}, R_{21}))$   
iteration++  
end

앞서 언급한 알고리즘은 두 단말의 전송률 ( $R_{11}^*, R_{21}^*$ )이 나쉬평형이 될 때까지 반복한다.

두 단말의 효용함수의 합의 최대값, 즉  $\arg_{R_{i1}} \max u_i(R_{i1}, R_{21}^*)$ 은  $\frac{\partial u_i}{\partial R_{i1}} = 0$ 가 되도록 하는

$R_{i1}$ 이다.

5. 실험 예제

[14]의 실험환경을 참고하여 총 노이즈와 외부셀 간섭량은  $I = 10^{-11}$  WATTS로 설정한다. 식 (2)에서 SIR 인자 값  $k$ 는  $k = 8.13$ 으로 설정하며, 이는  $BER = 10^{-6}$ 에 해당하는 값이다. 다양한 전송률 조합을 포함하도록 하기 위하여 간섭량 비율은  $0 < \alpha \leq 0.1$  범위로 설정한다. 단말  $i$ 와 AP 사이의 채널 이득(channel gain) 값은  $h_{in} = \frac{r_{in}}{d_i^4}$ 로 모델링하며, 여기서  $d_i$ 는 AP와 단말  $i$  사이의 거리이며, 50m와 500m 사이에서 균등분포 함수이다.  $r_{in}$ 는 분산값 (Variance) 8dB을 가지는 로그노말 페이딩의 생성값을 나타낸다.

그림 3는 본 논문이 제안하는 비협력적 알고리즘과 협력적 알고리즘의 수렴도를 간섭비율  $\alpha = 0.01$ 에서 분석한 결과이며, 목적은 알고리즘을 반복함에 따라 얼마나 빠르게 소모에너지가 작아지는가를 알아보기 위함이다. 가로축은 알고리즘의 반복횟수를 나타내며, 세로축은 각각의 반복횟수 단계에서 소모하는 에너지를 최종적으로 수렴한 에너지 값으로 균등화한 값이다. 즉,  $i$ 번 알고리즘을 반복시 얻은 전송률 벡터가 소모하는 에너지가  $E_i$ 이며, 알고리즘이 최종 수렴시 소모하는 에너지가  $E$ 일 때, 세로축은  $\frac{E_i}{E}$ 를 나타낸다. 예를 들어, 알고리즘을 반복하여 수렴시 균등화한 소모 에너지값은  $\frac{E_i}{E} = 1$ 이 된다.

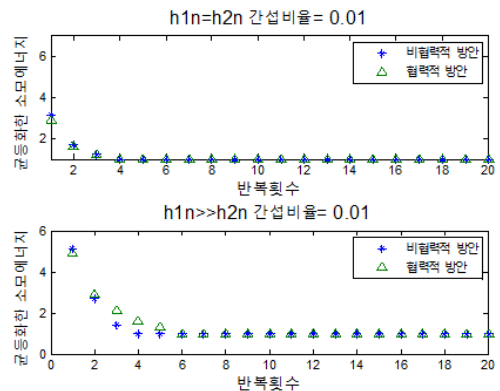


그림 3. 수렴도 분석 (간섭비율=0.01)  
Fig. 3. Convergence Analysis

단말1과 단말2의 채널이득이 균등인 경우 ( $h_{1n} \approx h_{2n}$ ) 와 비균등인 경우 ( $h_{1n} \gg h_{2n}$ ) 알고리즘의 반복횟수가 증가하면서 수렴함을 알 수 있는데, 특히, 단말1과 단말2의 채널이득이 균등인 경우가 보다 빠르게 수렴함을 확인할 수 있다.

그림 4는 간섭비율이  $\alpha = 0.1$ 에서의 비협력적 알고리즘과 협력적 알고리즘의 수렴도 결과이다. 간섭비율이 커짐에 따라 알고리즘이 수렴하는 데 보다 많은 반복횟수를 필요로 함을 알 수 있다. 특히, 비협력적 방안보다는 협력적 방안에서 간섭비율이 알고리즘의 수렴도에 더 큰 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 간섭비율이 커짐에 따라 협력적 알고리즘이 수렴하는데 더 많은 반복횟수를 필요로 한다.

그림 5 두 사용자와 AP(Access Point) 사이의 거리 비율의 변화에 따른 비협력적 알고리즘과 비교한 협력적 알고리즘의 에너지 효율을 나타낸다. 각각의 거리비율에서 100회의 채널을 발생시켜 평균결과를 도출하였으며, 목적은 AP와 단말간 거리의 변화에 따라 비협력적 알고리즘보다 더 많은 복잡도를 요구하는 협력적 알고리즘이 얼마나 에너지 효율적인지를 알고자 함이다. 가로축은 단말1과 단말2와 AP 사이의 거리 비율  $\frac{d_2}{d_1}$ 를 나타내며 세로축은 협력적 알고리즘이 비협력적 알고리즘보다 얼마나 적은 에너지를 소모하는 지를 알려주는 소모에너지 비율  $\frac{E_{CR}}{E_{NRG}} \times 100\%$ 를 나타낸다. 여기서  $E_{CR}$ ,  $E_{NRG}$ 는 각각 협력적 알고리즘과 비협력적 알고리즘에서의 소모에너지를 나타낸다. 간섭비율에 관계없이 두 단말이 AP와의 거리가 비슷한 경우, 즉  $\frac{d_2}{d_1} \approx 1$ 에서는 비협력

알고리즘과 협력적 알고리즘이 소모하는 에너지는 크게 차이가 나지 않는다. 반면, 두 단말이 AP와의 거리가 차이가 큰 경우, 즉,  $\frac{d_2}{d_1} \gg 1$ , 협력적 알고리즘을 사용할 경우 비협력적 알고리즘을 사용하는 것 보다 에너지 효율적임을 알 수 있다. 예를 들어, AP와 단말간

거리비율이  $\frac{d_2}{d_1} = 5$  보다 커지면 협력적 알고리즘은 비협력적 알고리즘이 소모하는 에너지의 93%(간섭비율=0.1), 90%(간섭비율=0.01)를 소모하기 때문에 7%(간섭비율=0.1), 10%(간섭비율=0.01)만큼의 효율을 가진다. 이는 협력적 방안에서 수렴하는 과정에서 많은 복잡도(반복횟수)를 요구한 것에 대한 보상으로 이해할 수 있다. 또한, 간섭비율이 커질수록 비협력적 방안 대비 협력적 방안의 에너지 소모 효율이 더 좋아짐을 알 수 있다.

### IV. 결론

본 논문에서는 에너지 최적화를 위한 두 단말의 전송률 게임이 Nash 평형이 존재함을 증명하였다. 이를 기반으로 에너지 최적화를 위한 전송률 문제를 게임 이론 기법을 적용하여 비협력 알고리즘과 협력적 기반의 알고리즘을 제안하였다. 비협력적 알고리즘에서는 자신의 효용함수만을 최적화하기 때문에 알고리즘의 수렴도가 빠르다. 반면 협력적 알고리즘에서는 두 단말간 협력과정에서 많은 복잡도를 요구하며, 단말 자신의 효용함수와 더불어 간섭을 주는 상대방 단말의 효용함수까지 포함하여 최적화하기 때문에 알고리즘의 수렴도가 비협력적 알고리즘과 비교해 느리고, 에너지 효율적이다. 본 연구에서는 비협력적 전송률 게임을 두 개의 단말로 국한하여 Nash 평형이 존재함을 증명하였다. 세 개 이상의 단말에 대한 연구는 현재 진행중임을 일러둔다.

### 참고문헌

- [1] Z. Hasan et al., "Green Cellular Networks: A Survey, Some Research Issues and Challenges," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 13, no. 4, p534-540, Fourth Quarter 2011.
- [2] E. Calvanese Strinati et al., "Green Communications: An Emerging," p267-301, May, Journal of Green Engineering, 2011.

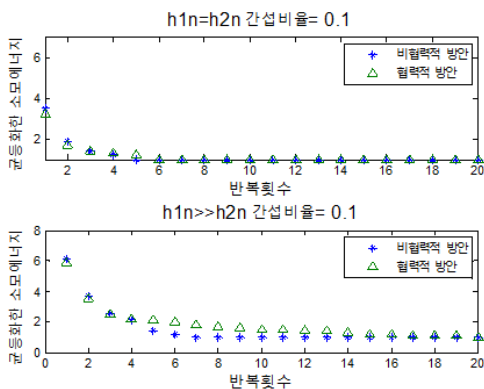


그림 4. 수렴도 분석 (간섭비율=0.1)  
Fig. 4. Convergence Analysis

- [3] Z. Niu, et al., "Cell zooming for cost-efficient green cellular networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no.11, pp.74-79, November 2010.
- [4] M. A Marsan, and M. Meo, "Energy efficient wireless Internet access with cooperative cellular networks," *Computer Networks*, 2010.
- [5] L.C. Schmelz, et. al, "Self-organisation in Wireless Networks Use Cases and their Interrelation," 22nd WWRWF, May 2009.
- [6] K. Samdanis, D. Kutscher, and M. Brunner, "Self-organized energy efficient cellular networks," *Proc. IEEE PIMRC'10*, pp. 1665-1670, 2010.
- [7] D. Calin, H. Claussen, and H. Uzunalioglu, "On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments," *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 1, pp. 26-32, 2010.
- [8] A. J Fehske, F. Richter, and G. P Fettweis, "Energy Efficiency Improvements through Micro Sites in Cellular Mobile Radio Networks," 2nd International Workshop on Green Communications, *Globecom*, pp.1-5, Nov. 30 2009-Dec. 4 2009.
- [9] J. Mitola III, and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Communications*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [10] An He, et. al., "Minimizing Energy Consumption Using Cognitive Radio," *IEEE International Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC)*, 2008, pp.372-377, 7-9 Dec. 2008.
- [11] D. Feng, et al, "A Survey of Energy-Efficient Wireless Communications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 1, First Quarter 2013.
- [12] M. Xiao, N.B. Shroff, and E.K.P. Chong. "A utility-based power-control scheme in wireless cellular systems," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11:210-221, April 2003.
- [13] F. Meshkati, et al. "A game-theoretic approach to energy-efficient power control in multicarrier CDMA systems," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no.6, June 2006.
- [14] C. Oh et al. A., "Downlink Throughput Maximization for Interference Limited Multiuser Systems: TDMA versus CDMA," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 6, no.7, pp.2454 - 2463, July 2007.
- [15] A. J. Goldsmith and S. G. Chua., "Variable-rate variable-power MQAM for fading channels," *IEEE Transactions on Communications*, 45:1218-1230, October 1997.

## 저 자 소개



### 오 창 윤

1999: 연세대학교  
전기공학과 공학사.  
2001: 펜실베니아 주립대  
전자공학과 공학석사.  
2005: 펜실베니아 주립대  
전자공학과 공학박사  
현 재: 인하공업전문대학  
정보통신과 조교수  
관심분야: Interference  
Management  
Email : changyoonoh@inhac.ac.kr