

D2D Utility Maximization in the Cellular System: Non Cooperative Game Theoretic Approach

Changyoon Oh*

Abstract

We investigate the D2D utility maximization in the cellular system. We focus on the non cooperative game theoretic approach to maximize the individual utility. Cellular system's perspective, interference from the D2D links must be limited to protect the cellular users. To accommodate this interference issue, utility function is first defined to control the individual D2D user's transmit power. More specifically, utility function includes the pricing which limits the individual D2D user's transmit power. Then, non cooperative power game is formulated to maximize the individual utility. Distributed algorithm is proposed to maximize the individual utility, while limiting the interference. Convergence of the proposed distributed algorithm is verified through computer simulation. Also the effect of pricing factor to SIR and interference is provided to show the performance of the proposed distributed algorithm.

▶ Keyword: D2D Communication, Interference, Utility, Power, Game Theory

I. Introduction

단말간 직접통신을 운용하는 것은 주파수 자원을 효율적으로 활용하는 방법중 하나이다. 따라서, 그동안의 연구는 셀룰라 시스템을 기반으로 기존 방식들을 확장하여 단말간 직접통신(Device to Device (D2D) Communication)을 지원하는 접근 방식을 선택하였다. 일례로, 이미 완료된 LTE(Long Term Evolution) 기술 표준 [1-2]에서는 기지국이 사용하는 상향링크 주파수 자원을 단말간 직접통신이 가능하도록 표준관점에서의 연구를 진행하였다. 단말간 직접 통신을 하는 D2D 링크에서는 단말이 기지국에 데이터를 전송하는 과정에서 발생하는 주파수 자원의 사용이 없기 때문에 주파수 자원활용 측면에서 효율적이다. 반면, 기존의 셀룰라 시스템에서 사용하던 주파수를 재사용함으로써 발생하는 간섭문제가 셀룰라 시스템에 해결해야 할 또 다른 문제를 발생시킨다. 셀룰라 링크에게 할당된 주파수는 우선적으로 셀룰라 시스템에 접속하는 단말들에게 할당되어야 한다. 여기서 할당된다는 의미는 셀룰라 시스템에 접속하는 단말이 일정수준이상의 간섭영향없이 통신운용이 가능함을 의미한다. 이러한 셀룰라 단말의 접

속 우선권을 보장하기 위해서는, D2D 통신을 운용하는 과정에서 발생하는 간섭량을 제한할 필요가 있다. 본 연구에서는 D2D 링크를 운용함에 따라 셀룰라 링크에 주는 간섭을 고려하면서, 기지국의 도움없이 D2D 단말들의 Utility 최적화 방안을 살펴보기로 한다. 특히, 비협력적 게임 이론 기법을 적용하여, 셀룰라 링크에 주는 간섭을 제한하면서 동시에 개별 D2D 단말들의 Utility를 최적화하도록 하는 알고리즘을 제안하고자 한다.

II. Preliminaries

1. Related works

셀룰라 시스템에게 할당된 주파수중에서 상향링크 주파수 자원을 D2D 시스템이 사용하는 연구가 진행되었다 [1-4].

• First Author: Changyoon Oh, Corresponding Author: Changyoon Oh
*Changyoon Oh (changyoonoh@inha.ac.kr), Dept. of Information & Communications Engineering, Inha Technical College.
• Received: 2019. 06. 12, Revised: 2019. 07. 15, Accepted: 2019. 07. 19.

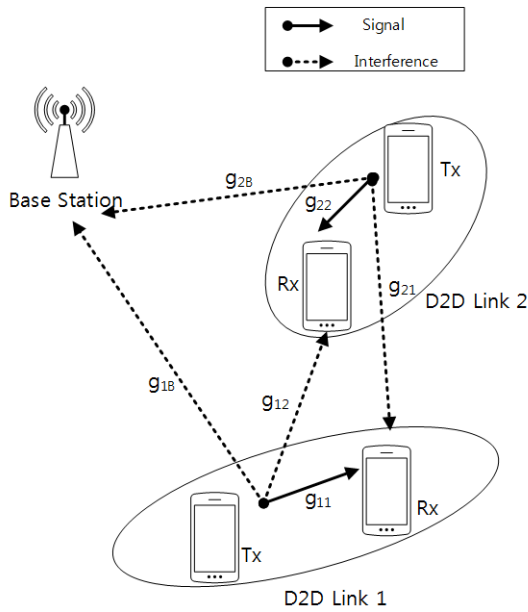


Fig. 1. System Model

주파수 재사용 (Frequency Reuse) 은 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하도록 하는 유용한 방법이지만, 이에 따른 단점도 존재한다. 일례로, 주파수 재사용은 주파수 사용에 우선권을 가진 통신시스템에 간섭을 일으키게 된다. 주파수 재사용은 자원 재활용 측면의 장점과 함께 간섭문제를 수반하기 때문에, 실제 적용뿐만 아니라 연구 분야로도 중요한 주제이다. 주파수 재사용은 전력제어 관점에서 접근할 수 있다. 일례로, 셀룰라시스템인 LTE 시스템의 상향링크 제어채널을 재사용하면서 발생하는 간섭문제를 전력제어 측면에서 해결하고자 하였다[1]. Device discovery 관점에서도 접근이 가능하다. D2D 단말을 초기 운용시 주변 탐색 과정을 거치게 되는데, LTE 규격 특히, Device discovery 관점에서 D2D 링크의 주파수 재사용을 다루고 있다 [2].

Fig. 1 에서는 셀룰라 링크와 D2D 링크가 주파수 자원을 공유하는 과정에서 신호(Signal)와 간섭(Interference)을 도시하고 있다. 신호는 실선으로, 간섭은 점선으로 표시하였다. 주파수 재사용을 효율적으로 하고자 하면 간섭을 효과적으로 처리할 수 있는 간섭제어 기술이 필요하다. 대표적인 간섭 제어 기술은 전력제어, RF 신호처리, 빔포밍(Beamforming)을 포함하고 있다. 송신 단말의 송신전력을 간섭환경을 고려하여 적용하면 간섭 문제를 완화할 수 있다[3]. 통신표준관점에서 보면 통신 기술은 표준 이슈와 구현이슈로 구분할 수 있다. 통신 표준 규격에서는 기지국과 단말 제조사들이 개발과정에서 필수로 지켜야하는 통신 프로토콜들을 다루고 있다. 표준 이슈는 아니지만, 셀룰라 시스템의 주파수 자원을 공유하기 위하여 D2D 단말이 다루어야 하는 구현이슈들도 있다 [4]. 구현이슈 중에서 가장 대표적인 기술은 기지국이 단말들에게 데이터를 전송할 수 있는 자원을 할당해주는 스케줄링(scheduling)이다 [5-7]. 표준규격에서는 스케줄에 관해서는 구체적으로 언급하지 않는다. 일반적으로, 통신사업자가 자체적으로 통신시스템에 최적화되도록 스케줄러를 개발하여 운용한다.

통신표준규격에서는 RF Measurement를 통해 시스템 간 간섭을 규제하고 있는데, 이러한 RF Measurement 는 인접 주파수를 운용하는 통신시스템에 주는 간섭을 RF 측정관점에서 설명하고 있다 [8-9]. 안테나의 수를 확장하고, 신호처리 기법을 적용하는 다중안테나를 활용한 빔포밍 기술을 적용하여 간섭문제를 해결할 수도 있다[10]. Cognitive Radio에서도 주파수 재사용으로 인한 간섭문제 해결이 주요 이슈인데, 우선권을 가지는 단말에게 주는 간섭량에 상한선을 두고, 주파수 자원을 활용하는 방안을 연구하는 것도 가능하며[11], 다중안테나를 활용하여 주파수 자원을 활용하는 것도 간섭제어의 또 다른 방법이다[12]. 유사한 연구 방향으로 D2D 링크가 발생하는 간섭영향을 제한하는 방안이 연구되었다 [13-14]. 구체적으로, D2D 링크들이 서로 멀리 위치한 경우에 대하여 자원 활용을 극대화하는 방안을 연구하였으며 [13], 이를 보다 일반적인 시나리오인 D2D 링크간 서로 가깝게 위치하여 서로 간섭의 영향을 주는 환경을 고려함과 동시에 기지국에 간섭영향을 많이 주는 정도에 따라 D2D 링크에 Incentive를 주는 방안 [14]도 있다. 기지국의 관여는 D2D 링크에서 최적화 계산에도움이 된다. 하지만, 기지국의 이러한 최적화 계산을 위해서는 기지국 신호측정과 시그널링은 필수적으로 수반되어야 한다. [15]에서는 기지국의 신호측정 및 시그널링을 최소화하는 방법을 제안하였다. 하지만, 유틸리티 최적화를 위하여 여전히 기지국은 최적화 알고리즘에 개입하여야 하며, 이는 기지국에게는 부담이다. 본 논문에서는 기지국의 개입없이 D2D 단말 자체적으로 개별 D2D 단말들의 Link Utility 최적화하고자 한다. 특히, 단말들간의 협력없이 게임이론적으로 방법으로 접근하여 문제를 개별 Utility를 최적화하고자 한다. 먼저, 개별 Utility를 정의한다. 특히, Pricing을 활용해 기지국의 간섭을 제어할 수 있도록 하고, 동시에 단말 자체적으로 Utility를 최적화 하도록 하여 기지국의 개입없이 최적화 문제를 해결하고자 한다. 제안하는 비협력적인 방법은 기지국으로 부터의 시그널이 필요하지 않으므로, 구현이 용이하다. 목적은 단말간 비협력 알고리즘을 적용하여 복잡도 측면을 완화하여, 구현의 용이성을 고려하면서 D2D 링크의 자원 활용 최적화 문제를 다루기 위함이다.

III. Utility Maximization With A Pricing Factor

3.1 System Model

셀룰라 단말이 사용중인 상향링크 주파수 자원을 재사용하여 D2D 링크는 데이터를 전송한다. 셀룰라 링크의 상향링크 주파수 재사용은 셀룰라 상향링크 수신단인 기지국에 간섭영향을 주게 되고, 셀룰라 단말의 서비스 품질을 일정수준 이상으로 유지하기 위해서는 D2D 단말로부터의 간섭량을 일정수준 이하로 제한할 필요가 있다. 이를 위하여, [14] 에서는 기지국이 D2D 송신 단말로부터 받는 간섭량을 식 (1)과 같이 제한하고 있다.

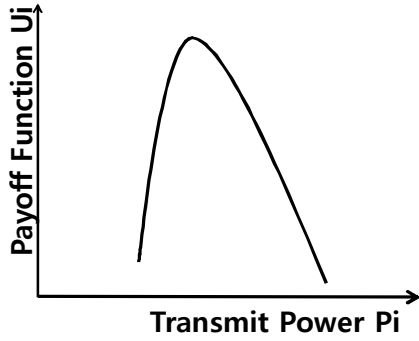


Fig. 2. Payoff Function

$$\sum_{i=1} p_i g_{iB} \leq I_{\max} \quad (1)$$

식 (1)에서, p_i, g_{iB} 는 각각 i 번째 D2D 링크 송신 단말의 전송전력, i 번째 D2D 링크 송신단말과 기지국 사이의 채널이득이며, I_{\max} 는 기지국이 D2D 단말들로부터 허용 가능한 최대 간섭 수준이다. D2D 링크는 D2D 송신 단말과 D2D 수신 단말로 구성된다. 일례로, i 번째 D2D 송신 단말은 p_i 의 송신전력으로 전송한다. i 번째 D2D 링크에서 송신 단말과 수신 단말간의 채널이득은 g_{ii} 이며, i 번째 D2D 수신 단말은 i 번째 D2D 송신 단말로부터 $p_i g_{ii}$ 의 신호세기를 수신한다. 하지만, i 번째 D2D 송신 단말은 인접한 D2D 링크와 기지국에 간섭을 준다. j 번째 D2D 링크 수신 단말은 i 번째 D2D 송신 단말로부터 $p_i g_{ji}$ 의 간섭세기를 수신한다. 또한, 기지국은 i 번째 D2D 송신 단말로부터 $p_i g_{iB}$ 의 간섭세기를 수신한다.

i 번째 D2D 링크의 수신 단말에서의 신호대 간섭비는 식 (2)와 같다.

$$SIR_i = \frac{p_i g_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N} \quad (2)$$

식 (2)에서, $p_j g_{ji}$ 는 i 번째 D2D 링크의 수신 단말이 j 번째 D2D 링크의 송신 단말로부터 받는 간섭량이다. N 은 열잡음을 포함한 인접셀 간섭이다.

3.2 Payoff Function With A Pricing Factor

각각의 D2D 링크에서 송신 단말의 전송전력 값으로 전송전력 벡터를 식 (3)과 같이 정의한다.

$$P = [p_1, p_2, \dots, p_K] \quad (3)$$

식 (3)에서 전송전력 벡터 P 를 구성하는 p_i 는 i 번째 D2D 링크 송신 단말의 전송전력이다.

i 번째 D2D 링크의 Payoff Function은 식 (4)와 같이 정의한다.

$$U_i(p_i, p_i) = \log(1 + SIR_i) - c_i p_i \quad (4)$$

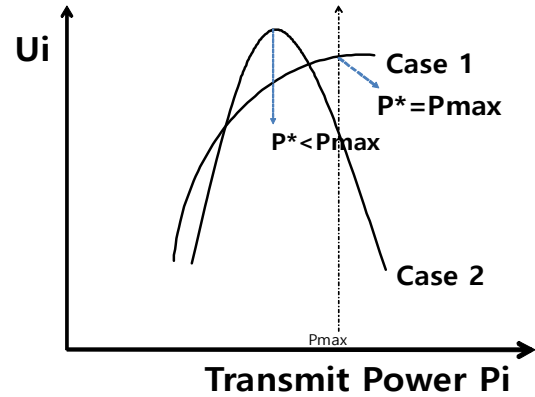


Fig. 3. Optimum Transmit Power For Different Payoff Function

Fig. 2는 식 (4)에서 정의한 Payoff Function의 예시를 보여주고 있다. Fig. 2는 전송전력값이 증가함에 따라 Payoff Function이 증가하다가 감소하는 볼록함수 형태를 가진다. 이는 식 (4)에서 확인할 수 있다. 식 (4)에서 로그함수는 전송전력값의 증가에 따라 그 기울기가 점진적으로 감소하지만, pricing Factor와 전송전력값의 곱은 일정한 기울기로 증가하므로 Fig. 2와 같은 형태를 가지게 된다. 식 (4)에서 p_i 는 전송전력 벡터 P 에서 p_i 를 제외한 전송전력 벡터이며, Payoff function 또는 Utility Function은 p_i 와 p_i 의 함수이다. Payoff Function은 각각의 단말이 소정의 신호대 간섭비(SIR)를 이용하여 전송할 수 있는 전송용량(Throughput)에서 전송전력값의 차를 의미한다. 일례로, $c_i = g_{iB}$ 인 경우에는 식 (5)와 같다.

$$U_i(p_i, p_i) = \log(1 + SIR_i) - p_i g_{iB} \quad (5)$$

즉, Payoff Function은 각각의 단말이 소정의 신호대 간섭비(SIR)를 이용하여 전송할 수 있는 전송용량(Throughput)에서 기지국이 i 번째 D2D 송신 단말로부터 받는 간섭량의 차를 의미하게 된다. 식 (5)는 다음의 두 가지 기능을 포함하고 있다. 첫째, 식 (1)에서처럼 기지국이 받는 총간섭량을 제한하는 것을 개별단말의 Payoff Function에 넘겨주어 개별단말 스스로 기지국에게 주는 간섭을 고려하도록 하고 있다. 둘째, 채널 환경이 좋은 D2D 단말이 Payoff Function을 높일 수 있는 불공평함(Unfairness)를 해결할 수 있다 [16].

$U_i(p_i, p_i)$ 는 p_i 를 생략하고 $U_i(p_i)$ 로도 사용하기로 한다.

즉,

$$U_i(p_i, p_i) \equiv U_i(p_i) \quad (6)$$

3.3 Non Cooperative Game Problem Formulation

각각의 개별 D2D 단말은 자기 자신의 Payoff Function 을 최적화하기 위한 자신의 전송 전력값을 선택한다. 비협력적 게임(Non Cooperative Game)을 식 (7)과 같이 정의한다.

$$G = [N, P_i, u_i] \quad (7)$$

식 (7)에서 N, P_i, u_i 은 각각 게임에 참여하는 Player Set, Strategy Set, Payoff Function을 의미한다. $N = [D_1, \dots, D_K]$, $p_i = [0, p_{\max}]$, 이다. 일반적인 게임이론 문제 [17]를 정의할 때, payoff function을 사용하지만, 본 논문에서는 Payoff Function과 Utility Function을 동일하게 사용하도록 한다. 위에서 언급한 비협력적 게임은 식 (8)과 같이 수식화 할 수 있다.

$$\max u_i(p_i) \quad \text{for all } i \in [c, D_1, \dots, D_K] \quad (8)$$

식 (8) 과 같은 비협력적 게임에서는 다른 단말의 전송전력이 고정되었을 때, 각각의 단말 i 는 자신의 Payoff Function 이 최대가 되도록 전송전력 p_i 를 결정하게 된다. 이 때의 전송 전력값은 Fig 2.에서 최대값에 해당되는 전송전력 p_i 이며, 이는 Payoff Function 의 전송전력에 대한 일차미분값이 0 이 되도록 하는 값이다. 즉,

$$\frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} = 0 \quad (9)$$

Fig. 2 에서의 Payoff Function 의 전송전력에 대한 변화율이 0 이 되는 전송전력값 즉 1차 미분값을 0 이 되도록 하는 전송전력값을 p_i^* 로 정의하고, 이를 수식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$p_i^* = \frac{1}{c_i} - \frac{1}{g_{ii}} \left(\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N \right) \quad (10)$$

식 (10)는 식 (9)을 만족하도록 하는 전송전력값이다. 또한, 전송전력 p_i 의 범위가 $0 \leq p_i \leq p_{\max}$ 이므로, p_i^* 의 범위도 $0 \leq p_i^* \leq p_{\max}$ 이 된다. 따라서, Pricing Factor c_i 는 식 (11) 범위 안에서 선택하도록 한다.

$$\frac{1}{p_{\max} + \frac{1}{g_{ii}} \left(\sum_{j \neq i} p_{\max} g_{ji} + N \right)} \leq c_i \leq \frac{g_{ii}}{N} \quad (11)$$

Fig. 3 에서는 Pricing Factor c_i 의 값에 따라 전송전력 구간 범위 내에서 Payoff Function 은 두 가지 경우가 존재함을 예시로 보여주고 있다. 구체적인 설명을 위하여, Fig. 2 에서와

같이 식 (4)의 Payoff Function은 항상 오목함수임을 알 수 있다. 하지만, 최대 전송전력값의 범위에 따라 전송전력 구간 내에서 Payoff Function 은 오목함수가 될 수도 있지만, 증가함수가 될 수도 있다. 첫 번째 경우 (Case 1)는 전송전력 구간 $0 \leq p_i \leq p_{\max}$ 에서 Payoff Function 이 증가함수인 경우이다. 이러한 경우는 단말은 Payoff Function을 최대로 하기 위하여 $p_i^* = p_{\max}$ 를 선택하게 된다. 반면, 두 번째 경우 (Case 2)에서는 전송전력 구간 $0 \leq p_i \leq p_{\max}$ 에서 Payoff Function 이 오목함수인 경우이다. 이러한 경우, 단말은 식 (10)를 만족하는 p_i^* 값에서 전송전력을 선택하게 된다.

3.4 Nash Equilibrium

Payoff Function이 준오목함수(Quasiconcave Function) 일 경우 나쉬 평형이 존재한다 [16-18]. 즉,

$$\frac{\partial^2 U_i(p_i)}{\partial p_i^2} < 0 \quad \text{를 만족하면 나쉬평형(Nash Equilibrium)}$$

이 존재한다.

다음의 Proposition 에서는 식 (7)에서 구성한 비협력적 게임이 나쉬평형이 존재함을 설명하고 있다.

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

증명)

식 (4)의 Payoff Function 을 전송전력에 관하여 미분을 취하면 식 (12)와 같다.

$$\frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} = \frac{g_{ii}}{p_i g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N} - c_i \quad (12)$$

특히, 식 (4)의 이차 미분값은 식 (13)과 같다.

$$\frac{\partial^2 U_i(p_i)}{\partial p_i^2} = - \frac{g_{ii}^2}{(p_i g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N)^2} < 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 U_i(p_i)}{\partial p_i^2} < 0 \quad \text{이므로 오목함수 임이 확인이 가능하다.}$$

따라서, 나쉬평형이 존재한다. ■

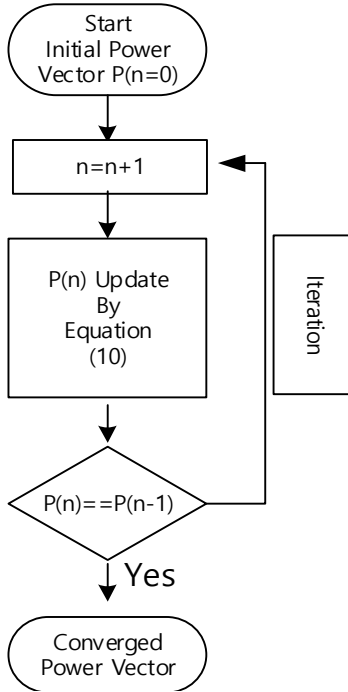


Fig. 4. Proposed Pricing Algorithm

3.5 Proposed Pricing Algorithm For Non Cooperative Game

Step 1. 전송전력벡터 초기값 설정, $n = 0$
예) $P = (0, 0, \dots, 0)$

Step 2. $p_i^*(n+1) = \frac{1}{c_i} - \frac{1}{g_{ii}} \left(\sum_{j \neq i} p_j(n) g_{ji} + N \right)$
for all i

Step 3. $n = n + 1$

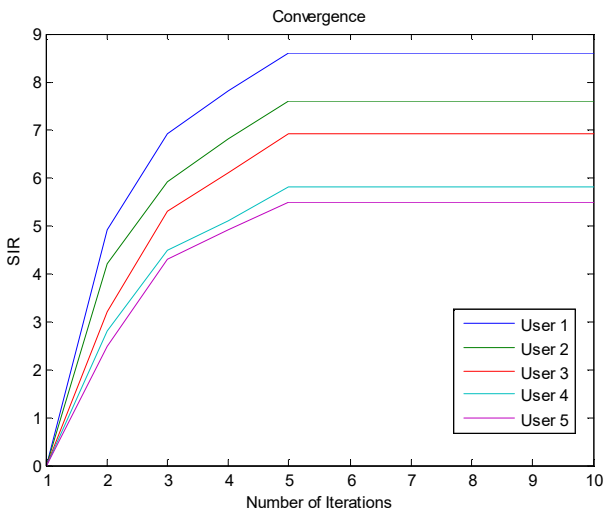


Fig. 5. Convergence of Proposed Pricing Algorithm

Step 4. Step 2 와 Step 3를 반복

Step 1. 전송전력 초기값은 모든 단말에 0 으로 설정한다

하지만, 전송전력 초기값을 임의의 값으로 설정해도 알고리즘은 수렴한다. 본 논문에서는 $P = (0, 0, \dots, 0)$ 을 전송전력 초기값으로 사용하였다.

Step 2. 각 단말들의 전송전력값을 기반으로 하여 식 (12)를 적용하여 개별 단말들의 전송전력값을 업데이트 한다. n 번째 반복의 전송전력 벡터 $p_1(n), p_2(n), \dots$ 들로부터 식 (10)을 적용하여 $n+1$ 번째의 전송전력벡터 $p_1(n+1), p_2(n+1), \dots$ 를 구한다. 식 (10)를 적용하여 $p_i(n+1)$ 를 구하는 과정에서는 $p_i(n)$ 를 제외한 나머지 단말들의 전송전력값들 $p_1(n), p_{i-1}(n), \dots, p_{i+1}(n)$ 이 적용된다. 즉, $n+1$ 제 반복 과정에서 i 번째 단말의 전송전력인 $p_i(n+1)$ 를 업데이트하는 과정은 n 번째 반복과정에서 구한 단말들의 전송전력값 중에서 $p_i(n)$ 를 제외한 나머지 단말들의 전송전력값들 $p_1(n), p_{i-1}(n), \dots, p_{i+1}(n)$ 를 식 (10)에 적용하여 자신의 Payoff Function이 최대가 되도록 전송전력값을 결정한다.

Step.2와 Step. 3의 과정은 모든 단말들의 전송전력값이 수렴할 때까지 반복한다. 즉, 모든 단말 i 에 대하여 $p_i(n) = p_i(n-1)$ 를 만족할 때까지 반복한다.

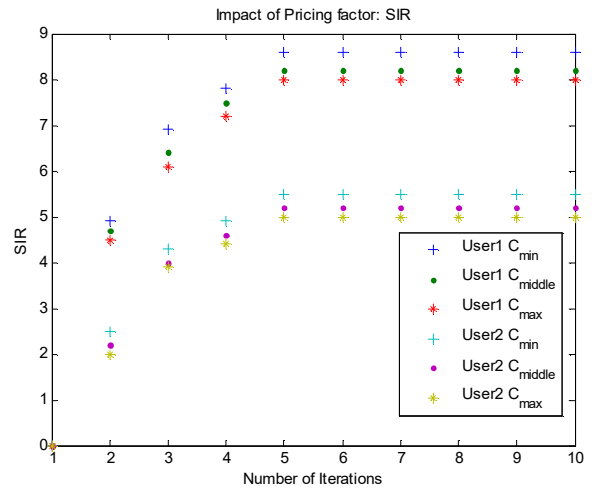


Fig. 6 Impact Of Pricing Factor: SIR Perspective

IV. Numerical Results

송신기와 수신기 사이의 채널 이득은 $\frac{r}{d^\alpha}$ 이며, 여기서 r 은 Variance $8dB$ 를 가지는 Log Normal fading 이며, d 는 송신

기와 수신기 사이의 거리이다. 간섭값은 $N=10^{-12}$ 이다. 5개의 D2D 링크가 존재하는 환경에서 실험을 진행하였다. 특히, 5개의 D2D 링크는 셀룰라시스템 기지국을 중심으로 반경 100m 이내에서 Random 으로 Drop 되며, D2D 링크의 최대 거리는 10m 로 설정하였다. 송신단말의 최대 전력값은 20 dBm 으로 설정하였다. 실험 결과는 Random Drop을 1000 회 반복하여 수행하였으며, 반복한 결과의 평균값에 해당하는 Sample을 Fig. 5, Fig 6, Fig. 7 에서 보여주고 있다.

Fig. 5 는 제안하는 알고리즘의 수렴도를 보여주는 실험결과이다. 알고리즘이 얼마나 빠르게 수렴하는지는 알고리즘을 실시간으로 적용할 때 중요한 요소가 된다. Fig. 5 에서 가로축은 알고리즘의 반복횟수이며, 세로축은 SIR의 크기를 나타낸다. 송신단과 수신단 사이의 채널환경에 관계없이, 알고리즘은 대부분의 경우 5회 이하에서 수렴함을 확인하였다. 알고리즘에 의해 단말들의 전송전력이 소정의 값을 수렴하게 되면, 각각의 단말의 전송전력값에 해당하는 SIR에 수렴하게 된다.

Fig. 6은 Pricing Factor에 따라 개별 D2D 단말의 SIR의 변화에 대한 실험결과이다. 개별단말의 전송전력이 수렴하면 수렴된 전송 전력값들은 SIR 값들을 결정하게 된다. SIR 값들에 의해 개별 단말들의 전송용량이 결정되기 때문에 SIR 값들이 변하는 과정을 살펴보면 Pricing Factor의 영향을 확인할 수 있다. Pricing Factor의 증가는 식 (9)를 만족하도록 하는 전송 전력값을 Fig. 3의 그래프 상에서 좌측으로 이동시키게 되며, 즉 최적의 전송전력값이 작아지게 된다. 이는 SIR가 감소함을 의미한다. Pricing factor의 증가는 그 값의 크기가 미미하지만, SIR 값이 감소하는 사실이 모든 D2D 링크에서 확인되었다.

Fig. 7 각각의 D2D 링크에서 Pricing Factor 값에 따른 간섭값의 변화를 분석하였다. 적용한 Pricing Factor는 각각

Pricing Factor는 각각 Algorithm 1($c_i = c_{min}$), Algorithm 2 ($c_{middle} = \frac{c_{min} + c_{max}}{2}$), Algorithm 3 ($c_i = c_{max}$) 이다. 특히, Fig. 7 에서는 Pricing Factor가 증가함에 따라 간

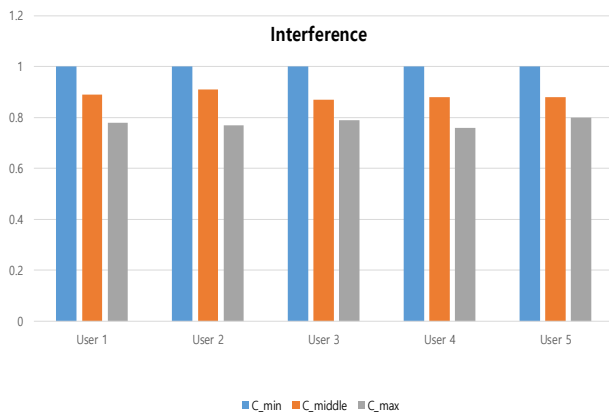


Fig. 7 Impact of Pricing Factor: Interference Perspective

섭값의 감소비용을 쉽게 확인하기 위해 가장 작은 Pricing

Factor에 대한 결과값으로 균등화하였다. 정확한 간섭값 수치는 Table 1 에 표시하였다. 기지국이 영향을 받게 되는 간섭값은 D2D 송신 단말의 전송전력값에 의해 결정되며, Pricing Factor를 증가할수록 알고리즘에 의해 수렴하는 전송전력값은 작아지게 되며, 따라서 간섭값은 작아지게 된다.

Pricing Factor의 증가에 따른 간섭의 감소를 확인하기 위하여 가장 작은 Pricing Factor를 가지는 Algorithm 1($c_i = c_{min}$)의 간섭값을 기준으로 다른 Pricing Factor Algorithm 2 ($c_{middle} = \frac{c_{min} + c_{max}}{2}$), Algorithm 3 ($c_i = c_{max}$)의 상대적인 간섭비를 살펴보았다. 즉, Algorithm 1($c_i = c_{min}$)을 적용시에 발생하는 간섭값을 1이라고 볼 때, $c_{middle} = \frac{c_{min} + c_{max}}{2}$ 와 $c_i = c_{max}$ 를 적용한 알고리즘이 발생하는 간섭값을 살펴보았다. Pricing Factor가 증가함에 따라 간섭값은 점차적으로 감소함을 확인할 수 있다. Fig. 3에서 확인할 수 있는 것처럼 Pricing Factor가 커질수록 알고리즘이 선택하는 최적의 전송 전력값은 작아진다. 결과적으로 수렴하는 전송전력값도 작아지게 된다. 따라서, 기지국에 영향을 주는 간섭값도 이에 비례해 작아지게 된다.

Table 1. Interference Level For Different Pricing Factor (Unit: dBm)

	User 1	User2	User 3	User 4	User 5
c_min	-33.1	-39.4	-42.3	-45.3	-51.2
c_middle	-33.6	-39.0	-42.9	-45.9	-51.7
c_max	-34.2	-38.7	-43.5	-46.5	-52.4

V. Conclusions

본 연구에서는 셀룰라 시스템에게 주는 간섭량을 제한하고자 비협력적 게임이론 기법을 적용하여 D2D 단말들의 Utility를 최적화하는 방안을 연구하였다. 먼저 실험을 통하여 제안하는 비협력적 게임이론 기법이 5회 이하의 알고리즘 반복횟수를 통하여 소정의 전송 전력값에 수렴함을 확인하였다. 또한, Pricing Factor를 증가함에 따라 수렴하는 SIR 값이 작아짐을 확인하였다. 개별 단말의 Payoff Function은 전송전력을 증가시킬수록 Payoff Function 값이 작아지도록 Pricing Factor를 도입하였다. 이는 개별단말이 자신의 Utility를 최적화하고자 전송전력을 지속적으로 상승하는 것을 억제하는 기능을 가진다. 결과적으로 Pricing Factor는 셀룰라 시스템의 간섭을 억제하는데 효과적임을 알 수 있다. Pricing Factor를 증가시키면 수렴하는 SIR 값은 감소한다. 이는 개별 단말의 전송용량을 감소시킨다. 마지막으로, Pricing Factor를 증가시킴으로 셀룰라 시스템이 D2D 링크로부터 받게되는 간섭량이 작아짐을 확인하였다. Pricing Factor의 증가는 수렴하는 개별 D2D 단말의 전

송전력을 작게 하는 기능을 가진다. 이는 셀룰라 시스템 관점에서는 간섭이 감소하는 효과를 가진다. 본 논문을 통해 셀룰라 시스템이 D2D 링크에 직접적인 개입 없이도 Pricing Factor만을 적용하여 셀룰라 시스템의 간섭량을 조절할 수 있음을 실험을 통하여 확인하였다. 주목할만한 점은 기지국의 간섭량은 모든 D2D 송신단말의 간섭량의 합이며, 간섭량은 가장 큰 간섭을 주는 D2D 송신단말에 의해 결정된다는 점이다. 이러한 점을 고려할 때, 개별 D2D 단말별로 서로 다른 Pricing Factor를 적용하는 것이 간섭량을 줄이는 효율적인 방법이 되며, [14]에서 다루고 있는 최적화 문제를 기지국의 간섭량과 D2D 단말의 Utility 최적화를 동시에 적용하는 방법이 효과적이다. 하지만, 실질적인 적용을 위한 복잡도를 고려할 경우, 기지국의 도움없이 개별단말 자체적으로 간섭량을 고려하면서 전송전력값을 결정하는 방법이 필요하다. 향후에는 기지국의 도움을 받지 않으면서 셀룰라 시스템이 받는 간섭량에 따라 개별 단말별로 서로 다른 Pricing Factor 값을 적용하는 추가적인 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] U. N. Kar, "An overview of device-to-device communication in cellular networks," *ICT Express*, vol. 4, Issue 4, Pages 203-208, December 2018.
- [2] R. Ngah, "Device discovery for D2D communication in in-band cellular networks using sphere decoder like (SDL) algorithm," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, (2018) 2018:74 April 2018.
- [3] K. Zhang, "Power Control in D2D Network Based on Game Theory," *International Conference on Intelligence Science ICIS 2017* pp 104-112, September. 2017.
- [4] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Mikand Z. Turnyi, "Design aspects of network assisted device-to-device communications," *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 170-177, March 2012.
- [5] D. Singh, "Radio Resource Scheduling in 3GPP LTE: A Review," *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, Vol. 4, Issue 6, June 2013.
- [6] M. Han, "Opportunistic resource scheduling for D2D communication in OFDMA networks," *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 73, pp. 319-334, November 2014.
- [7] M. Han, "Opportunistic scheduling and incentive mechanism for OFDMA networks with D2D relaying," *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 91, pp. 772-787, November 2015.
- [8] Keysight Technologies, "Performing LTE and LTE-Advanced RF Measurements with the E7515A UXM Wireless Test Set," Application Note, Keysight Technologies, March 2015.
- [9] N. Mahmud, "Vulnerabilities of LTE and LTE-Advanced Communication," White Paper, Rohde Schwarz, July 2014.
- [10] B. Schulz, "LTE Transmission Modes and Beamforming," White Paper, Rohde Schwarz, July 2015.
- [11] Y. Ma, D. I. Kim, Z. Wu, "Optimization of OFDMA-based cellular cognitive radio networks", *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 8, pp. 2265-2276, Aug. 2010.
- [12] S.-J. Kim, G. B. Giannakis, "Optimal resource allocation for MIMO ad hoc cognitive radio networks", *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 5, pp. 3117-3131, May 2011.
- [13] X. Kang, R. Zhang, M. Motani, "Price-based resource allocation for spectrum-sharing femtocell networks: A Stackelberg game approach", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 30, no. 3, pp. 538-549, Apr. 2012.
- [14] Y. Liu, R. Wang, "Interference Constraint Pricing for D2D Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 16, No. 1, pp. 475-486, January 2017.
- [15] C. Oh, "D2D Utility Maximization in the Cellular System: Distributed Algorithm," *Journal of the Korea Society of Computer and Information* vol.24, no. 3, pp. 57-64, March 2019.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] E. Chong, "An Introduction to Optimization," 4th Edition, Wiley, Jan. 2013.

Authors



Changyoon Oh received the B.S. degree in Electrical Engineering from Yonsei University, Korea in 1999 and M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from Pennsylvania State University, U.S.A in 2001, 2005, respectively. Dr. Oh joined

the faculty of the Department of Information & Communications Engineering at Inha Technical College, Incheon, Korea in 2011. He is currently an associate Professor in the Department of Information & Communications Engineering at Inha Technical College. He is interested in Physical Layer Issue and wireless standard.