

D2D Power Control in the Cellular System: Iterative Algorithm and Convergence

Changyoon Oh*

Abstract

In this paper, we consider the case where D2D users and the cellular user share the uplink of the cellular system. We propose an iterative power control algorithm that converges to the optimum power value. Each user iteratively updates its transmit power level according to the interference function. Finally, all D2D users and cellular user that participate in the transmission get the optimum transmit power level. We first investigate the interference structure and define the interference function. Then, we show that the considered interference function belongs to the standard interference function that converges the unique transmit power level. Through numerical examples, the convergence of the proposed power control algorithm is examined in the various transmission scenarios.

▶ Keyword: D2D Communication, Interference, Power Control

I. Introduction

셀룰라 시스템의 상향링크 주파수 자원을 활용한 단말간 직접통신(Device to Device(D2D) Communication) 관련 연구는 통신표준 관점[1-2]과 알고리즘 관점[3-4]에서 연구가 진행되어 왔다. D2D 통신에 많은 연구가 집중되는 이유는 D2D를 적용함에 따른 다음과 같은 장점에서 찾을 수 있다. 대표적으로, 단말이 직접 목적지 단말에 데이터를 전송함에 따라, 기지국을 통해서 목적지 단말에 데이터를 전송함에 발생하는 두 번의 링크자원 소모를 절약할 수 있다. 특히, 송수신하는 단말이 서로 가까운 거리에 위치할 때, 송신과정에서 발생하는 전력소모량을 절약할 수 있다. 일례로, 두 단말이 기지국에서 멀리 떨어져 위치하는 경우, 즉 셀 가장자리에 위치하고 있을 경우, D2D통신을 위한 별도의 주파수 자원의 할당 없이 셀룰라에서 사용하는 주파수 자원을 재사용하여 주파수 효율을 높여줄 수 있다. 본 연구에서는 D2D 통신이 셀룰라 통신이 사용하는 상향링크(Uplink) 자원을 공유(share) 하는 환경에서, 단말들의 전송전력을 최적화 하기 위한 전력제어 기법을 제안하도록 한다.

II. Preliminaries

1. Related works

D2D 통신이 셀룰라 시스템의 상향링크 주파수 자원을 재사용하여 전력제어와 이에 따른 간섭 영향 연구가 진행되고 있다 [1-4]. [1]에서는 LTE 셀룰라시스템의 상향링크 제어채널에서 D2D 탐색채널을 재사용하는 과정에서 발생하는 간섭을 효율적으로 관리하고자 하는 전력제어 방안을 연구하였다. [2]에서는 D2D 통신이 LTE-Advanced 규격에서 어떻게 적용되어 있는지 Device discovery 관점에서 설명하고 있다. 특히, D2D 링크가 셀룰라 링크와 주파수를 공유하는 과정에서 발생하는 간섭영향을 자세히 다루고 있다. Fig. 1은 D2D 링크와 셀룰라 링크가 주파수를 공유하여 운용하는 과정에서 링크간에 간섭영향을 주고 받는 상황을 도시하고 있다.

실선은 시그널을 나타내며, 점선은 간섭을 표시한다. D2D 링크에서의 송수신은 셀룰라링크에게는 간섭이며, 셀룰라링크에서의 송수신은 D2D 링크에게는 간섭이다.

*First Author: Changyoon Oh, Corresponding Author: Changyoon Oh

*Changyoon Oh(changyoonoh@inhac.ac.kr), Dept. of Information & Communications Engineering, Inha Technical College

*Received: 2017. 08. 03, Revised: 2017. 08. 24, Accepted: 2017. 09. 04.

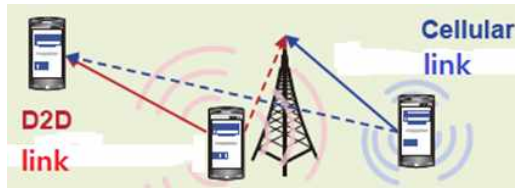


Fig. 1. Coexistence Scenario [3]

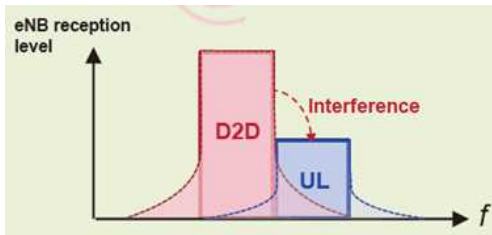


Fig. 2. Interference Level [3]

Fig. 2는 D2D 링크와 셀룰라 링크가 서로 인접한 주파수를 할당받아 운용하는 과정에서 인접한 주파수영역에 간섭영향을 주는 상황이다. 동일한 주파수가 아닌 인접한 주파수를 사용하여 링크를 운용하더라도 적은량의 간섭은 인접한 주파수 영역에 영향을 준다[2]. [3]에서는 셀룰라 상향링크 자원을 재사용하는 과정에서 셀룰라 단말에게 영향을 주는 간섭을 제어하고자 하는 알고리즘적 기술을 설명하고 있다. 간섭을 제어하는 기술은 송신전력을 조절하는 전력제어[5], 수신신호를 제어하는 신호처리[6], 방향성 안테나를 사용하는 빔포밍[7] 등을 예로 들 수 있는데, [3]에서는 송신전력을 제어하는 방법을 제시하고 있다. [4]에서는 D2D 단말을 셀룰라 상향링크 자원을 공유하도록 하는 실질적인 구현입장에서 구현이슈를 설명하고 있다. 기지국이 단말들에게 주파수자원을 할당해주는 스케줄링(scheduling) [8]이 주요한 구현이슈에 해당되는데, 개별 통신사업자들은 통신표준규격에 제약을 받지 않고, 독자적인 스케줄러를 개발해 자체적으로 주파수자원 할당에 적용하고 있다. D2D 통신을 위하여 셀룰라 시스템의 상향링크 자원을 쓰는 것이 선호되는데, 이유는 다음과 같은 근거에서 찾을 수 있다. 첫째, 셀룰라 시스템에서는 하향링크 자원을 사용하는 빈도가 더 높다. 따라서, 사용빈도가 덜한 상향링크 자원을 D2D 통신으로 사용하게 되면, 주파수 효율을 높일 수 있다. 둘째, D2D 통신으로 인해 셀룰라 통신의 단말이 성능 저하 및 강한 간섭을 받아서는 안된다는 점이다. D2D 단말이 상향링크 자원을 사용할 경우, 기지국이 D2D 통신의 제어가 용이하여, D2D 통신이 셀룰라 단말로의 간섭을 용이하게 제어할 수 있게 된다.

본 논문에서는 셀룰라 단말뿐만이 아니라 상향링크 자원을 공유하고 있는 D2D 단말들의 전송전력 최적화 방안을 연구한다. [9]에서는 셀룰라 시스템의 상향링크 주파수 자원을 사용하는 D2D 단말들에서 on-off 전력제어 방안을 제안하였다. 제안하는 방안은 간섭량을 효율적으로 제어할 수 있는 장점이 있

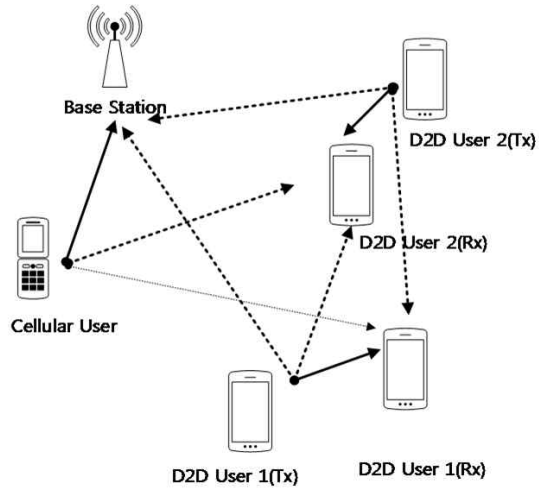


Fig. 3. System Model

지만, on-off 전력제어는 필요에 따라 전송을 중지하는 방식이기 때문에 실시간으로 데이터를 전송해야하는 경우 on-off 전력제어 방식 사용이 어렵다는 단점이 있다. 본 논문에서는 실시간 전송이 필요한 D2D 단말의 전송전력에 작용이 가능한 방안을 제안한다. 제안하는 전송전력 최적화 방안은 반복적 기법(Iterative Algorithm)을 적용한다. 제안하는 반복적 알고리즘을 적용하게 되면, 셀룰라 단말과 D2D 단말들은 최적화된 송신전력값을 얻을 수 있다. 실험예제를 통해서 제안하는 최적화 전송전력 알고리즘의 수렴도 성능을 분석해 본다.

III. The Proposed Scheme

3.1. System Model and Problem Formulation

시스템 모델로 본 논문은 단일셀(Single Cell) 모델을 고려한다. 셀 내에는 두 가지 종류의 단말이 존재한다. 첫째, 기지국과 통신하는 셀룰라 단말은 p_c 의 송신전력으로 기지국에 데이터를 전송하며, 셀룰라 단말과 기지국 사이의 채널이득은 g_{cB} 이다. 둘째, D2D 통신을 하는 i 번째 D2D 송신단말 $D_i (i=1,2,..)$ 은 p_{D_i} 의 송신전력으로 수신단말에게 데이터를 전송하며, i 번째 D2D 송신단말과 i 번째 D2D 수신단말 사이의 채널이득은 $g_{D_i D_i}$ 이다.

모든 단말은 셀룰라 상향링크 주파수 자원을 공유하여 사용하기 때문에 수신단에서 서로간에 간섭을 일으킨다. Fig. 3에서 신호는 실선으로 표시하고, 간섭은 점선으로 표시하였다. 셀룰라 단말의 수신단(기지국)에서의 신호대 간섭비는 수식 (1) 과 같다.

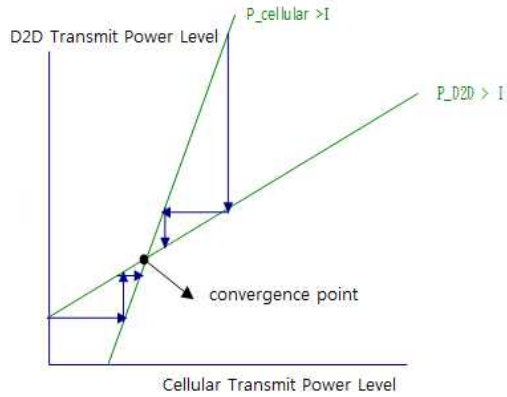


Fig. 4. An Example of Convergence

$$SIR_c = \frac{p_c g_{cB}}{\sum_l p_{Dl} g_{lB} + N} \quad (1)$$

셀룰라 단말은 l 번째 D2D 단말이 p_{Dl} 로 송신한 전력으로부터 수신단인 기지국에서 $p_{Dl} g_{lB}$ 만큼의 간섭을 받게 된다.

k 번째 D2D 단말의 수신단 (k 번째 D2D 수신단말)에서의 신호대 간섭비는 수식 (2)와 같다.

$$SIR_{Dk} = \frac{p_{Dk} g_{DkDk}}{p_c g_{cDk} + \sum_{l \neq k} p_{Dl} g_{lDk} + N} \quad (2)$$

k 번째 D2D 단말은 l 번째 D2D 단말 ($l \neq k$) 이

p_{Dl} 로 송신한 전력으로부터 수신단에서 $p_{Dl} g_{lDk}$ 만큼의 간섭을 받으며, 셀룰라 단말이 p_c 로 송신한 전력으로부터 수신단에서 $p_c g_{cDk}$ 만큼의 간섭을 받는다. 본 논문의 목적은 k 번째 D2D 단말이 각 단말들에게 요구되는 신호대 간섭비(SIR)을 만족하면서 셀룰라 단말과 D2D 단말의 전송전력의 합을 최소화하는 것이다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\min [p_c + \sum_k p_{Dk}] \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{p_c g_{cB}}{\sum_l p_{Dl} g_{lB} + N} \geq Req_SIR_c \quad (4)$$

$$\text{s.t.} \quad \frac{p_{Dk} g_{DkDk}}{p_c g_{cDk} + \sum_{l \neq k} p_{Dl} g_{lDk} + N} \geq Req_SIR_{Dk} \quad (5)$$

Req_SIR_c, Req_SIR_{Dk} 는 각각 셀룰라 송신 단말의 수신단인 기지국에서 요구되는 신호대 간섭비, k 번째 D2D 송신단말의 수신단에서 요구되는 신호대 간섭비를 나타낸다. $N(N > 0)$ 는 열잡음이다.

3.2 Standard Interference Function

수식 (4),(5)에서와 같이 요구하는 신호대 간섭비를 만족하기 위해서는 각각의 단말은 수식 (6),(7)을 만족하도록 송신전력을 결정하게 된다. 수식 (6), (7)은 수식 (4),(5)를 단말 자신의 송신전력에 관하여 나타낸 것이며, 물리적인 의미는 요구하는 신호대 간섭비를 만족하기 위해서 유지해야 되는 송신전력 레벨 수준을 보여준다. 특히, 수식 (6), (7)의 우측항의 표현 형식은 요구되는 신호대 간섭비와 다른 단말들로부터의 간섭을 scaling 한 값의 곱의 형태이다.

$$p_c \geq Req_SIR_c \frac{\sum_l p_{Dl} g_{lB} + N}{g_{cB}} \quad (6)$$

$$p_{Dk} \geq Req_SIR_{Dk} \frac{p_c g_{cB} + \sum_{l \neq k} p_{Dl} g_{lDk} + N}{g_{DkDk}} \quad (7)$$

수식 (6),(7)에서 오른쪽 항을 간섭함수(Interference Function)라고 정의한다 [10].

$$I_c(p_D) = Req_SIR_c \frac{\sum_l p_{Dl} g_{lB} + N}{g_{cB}} \quad (8)$$

$$I_{Dk}(p_c, p_D) = Req_SIR_{Dk} \frac{p_c g_{cDk} + \sum_{l \neq k} p_{Dl} g_{lDk} + N}{g_{DkDk}} \quad (9)$$

간섭함수는 각 단말이 다른 단말들로부터 받게 되는 총 간섭의 양을 해당 단말에게 요구되는 신호대 간섭비와 채널이득의 비로 scaling 한 값을 의미한다. 간섭함수를 구성하는 변수들은 다른 단말들의 송신전력값들의 함수이다. 따라서, k 번째 D2D 단말의 간섭함수에서 $P_D = [p_{D1}, p_{D2}, \dots]$ 는 k 번째 D2D 단말의 송신전력 p_{Dk} 를 제외한 D2D 단말들의 송신전력 벡터이다. 다른 단말들의 전송전력값이 변경되면, 다른 단말들의 전송전력값을 변수로 가지는 간섭함수값이 변경되며, 이에 따른 최적화된 전송전력값이 변경된다. 최적화 문제인 수식 (3)을 최소화하기 위해서는 결국 간섭함수 수식 (8), (9)를 최소화해야 한다. 전송전력값은 결국 단말들 상호간의 전송전력값의 변경에 따라 변경되기 때문에, 수식 (8), (9)의 간섭함수 성질을 분석하고 이를 활용한 최적화 알고리즘을 제안한다.

3.3 Iterative Optimum Algorithm

본 논문에서는 수식 (3)인 전송전력을 최소화하는 방법으로 Iterative Algorithm을 제안한다. 제안하는 Iterative Algorithm은 각각의 단말이 수식 (8),(9)의 간섭함수를 순차적으로 최소화하는 과정을 통해서 최소 전송전력을 얻는다. 먼저

셀룰라 단말과 D2D 단말들의 모두 포함한 벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$P = [p_c, P_D] = [p_c, p_{D1}, p_{D2}, \dots] \tag{10}$$

전송전력값에 따라 각 단말들은 단말자신의 간섭함수값이 결정되며, 최적의 전송전력값으로 간섭함수값을 선택하면 된다. 즉, 제안하는 전력제어 알고리즘을 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$P(n+1) = I(P(n)) \tag{11}$$

수식 (11)은 이전의 전송전력 벡터 $P(n)$ 로부터 간섭함수 벡터 $I(P(n))$ 를 구하며, 각 단말들의 새로운 전송전력 벡터 $P(n+1)$ 는 간섭함수 값으로 선택하는 과정이다. 여기서, 살펴 봐야 할 중요한 문제는 과연 수식 (11)의 반복적 알고리즘이 전송전력 벡터의 수렴점에 도달하느냐는 것이다.

[10]에 의하면 수식 (11)와 같은 반복적 알고리즘이 수렴조건을 만족할 경우, 유일한(unique) 최소 전력값에 수렴한다. 특히, 이러한 수렴조건을 만족하는 간섭함수를 Standard Interference Function 이라고 칭한다. 여기서, Standard Interference Function 이 되기 위한 3가지 조건은 다음과 같다.

조건 1. Positivity $I_c(P_D) > 0$

조건 2. Monotonicity If $P \geq \bar{P}$, then $I(P) \geq I(\bar{P})$

조건 3. Scalability For all $\alpha > 1$, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$

즉, 간섭함수가 위의 3가지 조건을 만족하기만 하면, 간섭함수가 Standard Interference Function 이 되며, 따라서 반복적 알고리즘을 통해 최적화된 전송 전력값을 구할 수 있다.

다음은 본 논문에서 제안하는 Iterative Algorithm이 수식 (11)에서의 간섭함수가 Standard Interference Function 임을 증명한다.

Proposition 1. 간섭함수인 수식 (8), (9)은 Positivity 를 만족한다. 즉, $I_c(P_D) > 0$ 이다.

증명)

수식 (8)에서 $N > 0$ 이므로, P 와 상관없이 $I_c(P_D) > 0$ 이다. 즉,

$$I_c(P_D) = Req_SIR_c \frac{\sum_l p_{Dl} g_{lB} + N}{g_{cB}} > 0$$

마찬가지로, 수식 (9)에서 $N > 0$ 이므로, P 와 상관없이 $I_{Dk}(p_c, P_D) > 0$ 이다.

$$I_{Dk}(p_c, P_D) = Req_SIR_{Dk} \frac{p_c g_{cDk} + \sum_{l \neq k} p_{Dl} g_{lDk} + N}{g_{DkDk}} > 0$$

Proposition 2. 간섭함수인 수식 (8), (9)은 Monotonicity를 만족한다. 즉, If $P \geq \bar{P}$, then $I(P) \geq I(\bar{P})$.

증명)

$$P = [p_c, P_D] = [p_c, p_{D1}, p_{D2}, \dots]$$

$$\bar{P} = [\bar{p}_c, \bar{P}_D] = [\bar{p}_c, \bar{p}_{D1}, \dots, \bar{p}_{D1}, \bar{p}_{D2}, \dots]$$

$P \geq \bar{P}$ 에 의하여 각각의 i, l 에 대하여

$$p_c \geq \bar{p}_c, p_{Di} \geq \bar{p}_{Di} \tag{12}$$

이 성립한다.

$$I_c(P_D) = Req_SIR_c \frac{\sum_l p_{Dl} g_{lB} + N}{g_{cB}}$$

$$I_c(\bar{P}_D) = Req_SIR_c \frac{\sum_l \bar{p}_{Dl} g_{lB} + N}{g_{cB}}$$

에서 $P \geq \bar{P}$ 이면, $I_c(p_c, P_D) \geq I_c(\bar{p}_c, \bar{P}_D)$

마찬가지로, 동일한 방법으로 $P \geq \bar{P}$ 이면,

$$I_c(P_D) \geq I_c(\bar{P}_D) \text{ 이다.}$$

따라서, 모든 단말들에 대하여,

$$P \geq \bar{P}, \text{ 이면, } I(P) \geq I(\bar{P}) \text{ 이다.}$$

Proposition 3. 간섭함수인 수식 (8), (9)은 Scalability를 만족한다. 즉, For all $\alpha > 1$, $\alpha I(P) > I(\alpha P)$.

증명)

$$I_c(\alpha P_D) =$$

$$Req_SIR_c = \frac{\sum_l \alpha p_{Dl} g_{lB} + N}{g_{cB}}$$

$$\alpha I_c(P_D) = \frac{\sum_l \alpha p_{Dl} g_{lB} + \alpha N}{Req_SIR_c}.$$

$I_c(\alpha P_D)$ 의 경우 α ($\alpha > 1$) 값으로 다른 단말들의 전송전력을 scaling 해도 열잡음 N 은 일정하게 유지된다. 반면, $\alpha I_c(P_D)$ 에서는 α ($\alpha > 1$) 값으로 다른 단말들의 전송전력을 scaling 하게되면, 열잡음 N 도 scaling 되어, αN 이 된다. 따라서, $\alpha I_c(P_D) > I_c(\alpha P_D)$.

$\alpha I_{Dk}(p_c P_D) > I_{Dk}(\alpha p_c \alpha P_D)$ 도 동일한 방법으로 증명가능하다. 즉,

$$I_{Dk}(\alpha p_c \alpha P_D) = Req_SIR_{Dk} \frac{\alpha p_c g_{cDk} + \sum_{l \neq k} \alpha p_{Dl} g_{lDk} + N}{g_{DkDk}}$$

$$\alpha I_{Dk}(p_c P_D) = Req_SIR_{Dk} \frac{\alpha p_c g_{cDk} + \sum_{l \neq k} \alpha p_{Dl} g_{lDk} + \alpha N}{g_{DkDk}}$$

따라서, $\alpha I_{Dk}(p_c P_D) > I_{Dk}(\alpha p_c \alpha P_D)$.

3.4 Proposed Optimum Algorithm

제안하는 Iterative Algorithm의 Pseudo code 는 다음과 같다.

Step 1. $n=0$ 에서 초기 전송전력벡터 설정하기

$$P(0) = [0, 0, \dots, 0, 0, \dots]$$

Step 2. n 번째 반복횟수에서 간섭함수 $I(n)$ 구하기

$$I(n) = [I_c(n), I_{D1}(n), I_{D2}(n), \dots]$$

수식 (8), (9) 활용

Step 3. $n+1$ 에서 전력벡터 구하기

$$P(n+1) = I(P(n))$$

Step 2에서 얻어진 간섭함수와 수식 (11)로부터

$P(n+1) = [p_c(n+1), p_{D1}(n+1), p_{D2}(n+1), \dots]$ 을 구한다.

즉,

$$p_c = I_c(P_D)$$

$$p_{Dk} = I_{Dk}(p_c P_D)$$

Step 2와 Step 3를 반복횟수 n 값을 +1씩 증가시키면서 step 2와 step 3 를 전송전력벡터 $P(n)$ 가 수렴할 때 까지 반복한다.

Fig. 4. 는 제안하는 반복적 기법(Iterative Algorithm)을 1개의 셀룰라 단말과 1개의 D2D 단말에 적용하였을 경우, 송신전력이 수렴하는 과정을 도시하고 있다. 각 단말들의 송신전력 초기값은 단말이 전송 허용이 가능한 범위내의 임의의 값이다. 예를들어, 초기값은 0 으로 설정할 수 있으며, 또는 단말이 허용가능한 최대값으로도 설정이 가능하다. 초기값 설정에 관계없이 알고리즘의 반복적 수행과정을 통해 유일한(unique) 전송전력값에 수렴함을 확인할 수 있다. 일례로, 각 단말들이 초기값으로 단말이 허용가능한 최대값으로 출발할 경우, 알고리즘의 반복적 과정은 이전의 전송전력값보다 더 작은 전송전력값을 알고리즘 결과값으로 내보내게 되며, 최종결과값은 수렴점에 도달하게 된다. 단말들이 초기값으로 0에서 출발하는 경우에도 알고리즘의 반복적 과정은 이전의 전송전력값보다 더 큰 전송전력값을 알고리즘 결과값으로 내보내게 되고, 최종 결과값은 앞서 언급한 동일한 수렴점에 도달하게 된다.

3.5 Numerical Examples

간섭 $N=10^{-12}$ 이며, 셀룰라 단말의 요구 SIR과 D2D 단말의 요구 SIR 은 각각 $Req_SIR_c = 7$, $Req_SIR_{Dk} = 7$ 이다.

송신기와 수신기 사이의 채널 이득은 $\frac{r}{d^4}$ 이며, 여기서 r

은 variance 8dB 를 가지는 log normal fading 이며, d 는 송신기와 수신기 사이의 거리이다. D2D 송신 단말과 수신단말을 나타낸다.

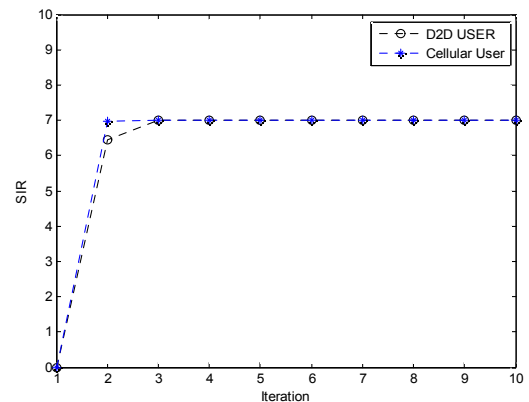


Fig. 5. SIR Convergence (one D2D User Case)

Fig. 5 는 설명한 실험환경에서 1000회 반복한 실험결과 중

에서 하나의 sample을 보여주고 있다. 한 개의 셀룰라 단말과 한 개의 D2D 단말이 전송하는 시나리오에서 Iterative Algorithm을 사용하여 SIR 값이 요구하는 값에 수렴하는 과정이다. SIR 값은 5회 이하의 알고리즘 수행만으로 목표로 하는 SIR 값에 수렴함을 확인하였다.

Fig.6 는 하나의 셀룰라 단말과 세 개의 D2D 단말이 전송하는 시나리오에서 제안하는 Iterative Algorithm을 사용하여 SIR 값이 요구하는 값에 수렴하는 과정이다. 참여하는 D2D 단말의 수가 증가하게 되면 각각의 단말이 받게 되는 간섭량은 증가하게 된다. 이로 인하여 일부 단말들의 첫 번째 SIR 값이 다소 작게 출발하게 되지만, 수렴도 측면에서는 5회 이하에서 SIR 값은 수렴하게 된다.

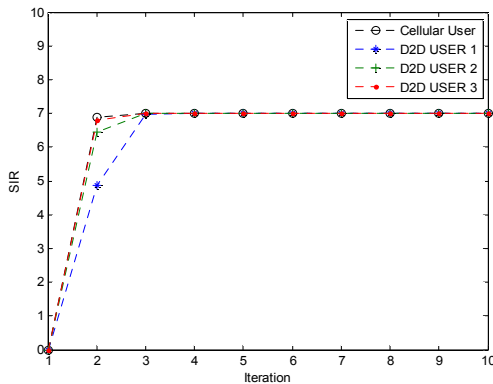


Fig. 6. SIR Convergence (one D2D User Case)

IV. Conclusions

본 연구에서는 D2D 통신이 셀룰라 통신이 사용하는 상향링크(Uplink) 자원을 공유(share)하는 환경에서, 단말들의 전송전력을 최적화하기 위하여 Iterative Algorithm을 제안하였다. 단말들의 전송전력 최적화를 하는 이유는 전송 과정에서 소모하는 배터리 소모량을 최소화 하기 위함이다. 제안하는 반복적 알고리즘은 이러한 전송전력 최적화 방안이다. 특히, 제안하는 알고리즘은 실시간 전송이 필요한 응용분야에서 활용이 가능하다는 장점을 가진다. 제안하는 Iterative Algorithm 이 유일한(Unique) 해법을 가지도록 하는 Standard Interference Function 의 수렴조건을 만족함을 증명하였다. 간섭함수가 3가지 수렴조건을 만족하면, 반복적 알고리즘을 통해 최적화된 전송전력값을 얻을 수 있으며, 얻어진 전송전력값은 유일(Unique)하다. 제안하는 Iterative Algorithm의 수렴도(Convergence)를 검증하기 위하여 참여하는 단말들의 숫자를 다르게 하는 실험조건에서 수렴결과를 확인하였다. 전송에 참여하는 단말들의 숫자에 관계없이 제안하는 알고리즘의 수렴도는 5회 이하의 반복횟수에서 전력값은 수렴함을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] E. Sree Harsha, "LTE-Advanced Cellular Networks for D2D Communications," International Journal of Scientific Engineering and Technology Research," August 2014.
- [2] S. Yasukawa, "D2D Communications in LTE Advanced Release 12," NTT DOCOMO Technical Journal Vol. 17, No. 2.
- [3] N. Lee, X. Lin, J. Andrews, and R.W. Heath, "Power Control for D2D Underlaid Cellular Networks: Modeling, Algorithms and Analysis," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 1, pp 1-13, Jan. 2015.
- [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] Keysight Technologies, "Performing LTE and LTE-Advanced RF Measurements with the E7515A UXM Wireless Test Set," Application Note, Keysight Technologies, March 2015.
- [6] N. Mahmud, "Vulnerabilities of LTEand LTE-Advanced Communication," White Paper, Rohde Schwarz, July 2014.
- [7] B. Schulz, "LTE Transmission Modes and Beamforming," White Paper, Rohde Schwarz, July 2015.
- [8] D. Singh, "Radio Resource Scheduling in 3GPP LTE: A Review," International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), Vol. 4, Issue 6, June 2013.
- [9] N. Lee, X. Lin, J. Andrews, and R.W. Heath, "Power Control for D2D Underlaid Cellular Networks: Modeling, Algorithms and Analysis," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 33, no. 1, pp 1-13, Jan. 2015.
- [10] R. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13 Issue 7, pp. 1341-1347, September 2006.

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.