

# Power Control for D2D Communication in the Cellular System: The Impact of Channel Estimation Error

Changyoon Oh\*

## Abstract

In this paper, we investigate the impact of channel estimation error on the D2D power control algorithm. In the previous work, D2D power control algorithm has been proposed under the assumption that the channel between the transmitter and the corresponding receiver is perfectly estimated. In reality, the channel estimation error is more often the case. The first question is that the power control algorithm designed for perfect channel estimation is still valid under the channel estimation error environment? The second question is, if it is not valid, what could be the possible remedy for the channel estimation error? In this paper, to answer the first question, we investigate the impact of the channel estimation error on the power control algorithm. We first review the D2D power control algorithm designed for perfect channel estimation. Then, we model the channel estimation error. Finally, we summarize the main results observed from the analysis of the simulation.

▶ Keyword: D2D Communication, Channel estimation, Interference, Power Control

## I. Introduction

단말간 직접통신(Device to Device(D2D) Communication) 이 셀룰라 시스템의 상향링크 주파수 자원을 활용하는 연구방안은 통신표준 관점[1-2]과 알고리즘 관점[3-4]에서 연구가 진행되어 왔다. D2D 통신에 많은 연구가 집중되는 이유는 D2D를 적용이 가지는 장점들 때문에 관련연구가 집중되는데, D2D 통신의 주요 장점을 정리하면 다음과 같다. 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, 수신단에서의 채널추정에러가 단말들의 전송전력을 최적화 하기 위해 제안된 전력제어 기법에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

## II. Preliminaries

### 1. Related works

셀룰라 시스템의 상향링크 주파수 자원을 재사용한 D2D 전력제어와 이에 따른 간섭 영향 연구가 진행되어 왔다[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

---

• First Author: Changyoon Oh, Corresponding Author: Changyoon Oh  
\*Changyoon Oh (changyoonoh@inhac.ac.kr), Dept. of Information & Communications Engineering, Inha Technical College.  
• Received: 2018. 07. 24, Revised: 2018. 08. 10, Accepted: 2018. 08. 16.  
• This work was published in part in the Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference, July 2018.

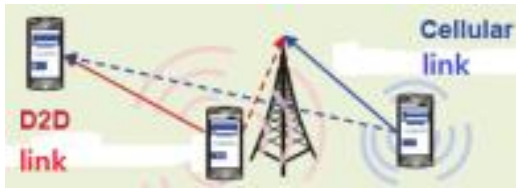


Fig. 1. Coexistence Scenario [2]

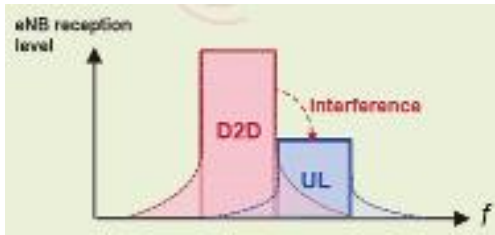


Fig. 2. Interference Level [2]

셀룰라 링크와 주파수를 공유하는 과정에서 발생하는 간섭 영향을 자세히 다루고 있다.

Fig. 1 은 D2D 링크와 셀룰라 링크가 주파수를 공유하여 이용하는 과정에서 링크간에 간섭영향을 주고 받는 상황을 도시한다. 실선은 시그널을 나타내며, 점선은 간섭을 표시한다.

D2D 링크에서의 송수신은 셀룰라 링크에게는 간섭이며, 셀룰라 링크에서의 송수신은 D2D 링크에게는 간섭이다.

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.

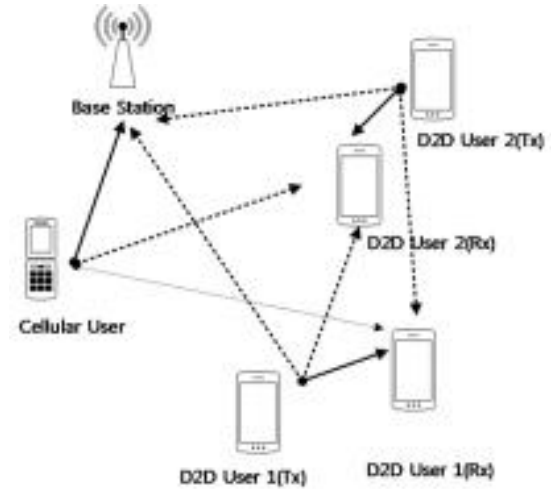


Fig. 3. System Model

[9]에서는 셀룰라 시스템의 상향링크 주파수 자원을 사용하는 D2D 단말간에서 on-off 전력제어 방안을 제안하였다. 제안하는 방안은 간섭량을 효율적으로 제어할 수 있는 장점이 있지만, on-off 전력제어는 필요에 따라 전송을 중지하는 방식이기 때문에 실시간으로 데이터를 전송해야하는 경우 on-off 전력제어 방식 사용이 어렵다는 단점이 있다.

[10]에서는 실시간 전송이 필요한 D2D 단말의 전송전력에 작용이 가능한 방안을 제안하였다. 반복적 기법(Iterative Algorithm)을 적용하여, 전력제어 방안이 빠르게 전력 최적화 값에 수렴함을 실험결과로 보여주었다. 하지만, 제안하는 반복적 기법은 송신단과 수신단의 채널 추정치 완벽함을 가정하였다. 수신단에서 채널 추정을 수행시 채널추정오차가 존재하는 것이 일반적이다. 이러한 경우, 첫 번째 궁금한 점은 “[10]에서 제안한 전력제어 기법의 성능이 채널추정오차 환경에서도 여전히 유효한가?” 이다. 이러한 궁금점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 채널 추정오차가 전력제어 기법 [10]에 미치는 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석해 보고자 한다. 먼저 [10]에서의 전력제어 기법을 살펴보고, 채널 추정오차를 모델링 한다. 마지막으로, 실험 결과의 주요 내용을 정리하고자 한다.

### III. The Proposed Scheme

#### 3.1 System Model and Problem Formulation

이번 장에서는 채널추정오차가 없는 것을 가정하고 제안되었던 power control algorithm [10]을 증명과정 없이 요약 정리하기로 한다. 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 통

신을 하는  $i$ 번째 D2D 송신단말  $D_i$  ( $i = 1, 2, \dots$ )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.

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

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

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

$$SIR_{D_k} = \frac{p_c g_{cD_k}}{p_c g_{cD_k} + \sum_{l \neq k} p_{D_l} g_{D_l D_k} + N} \quad (2)$$

$k$ 번째 D2D 단말은  $l$ 번째 D2D 단말( $l \neq k$ )이  $p_{D_l}$  로 송신한 전력으로부터 수신단에서  $p_{D_l} g_{D_l D_k}$  만큼의 간섭을 받으며, 셀룰라 단말이  $p_c$  로 송신한 전력으로부터 수신단에서  $p_c g_{cD_k}$  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.

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

$$\text{s.t. } \frac{p_c g_{cB}}{\sum_l p_{D_l} g_{D_l B} + N} \geq Req\_SIR_c \quad (4)$$

$$\text{s.t. } \frac{p_c g_{cD_k}}{p_c g_{cD_k} + \sum_{l \neq k} p_{D_l} g_{D_l D_k} + N} \geq Req\_SIR_{D_k} \quad (5)$$

$Req\_SIR_c$ ,  $Req\_SIR_{D_k}$  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 만족하

기 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.

$$p_c \geq Req\_SIR_c \frac{\sum_l p_{D_l} g_{lB} + N}{g_{cB}} \quad (6)$$

$$p_{D_k} \geq Req\_SIR_{D_k} \frac{p_c g_{cB} + \sum_{l \neq k} p_{D_l} g_{D_l D_k} + N}{g_{D_k D_k}} \quad (7)$$

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

$$I_c(P_D) = Req\_SIR_c \frac{\sum_l p_{D_l} g_{lB} + N}{g_{cB}} \quad (8)$$

$$I_{D_k}(p_c, P_D) = Req\_SIR_{D_k} \frac{p_c g_{cD_k} + \sum_{l \neq k} p_{D_l} g_{D_l D_k} + N}{g_{D_k D_k}} \quad (9)$$

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  $P_D = [p_{D_1}, p_{D_2}, \dots]$ 는  $k$ 번째 D2D 단말의 송신전력  $p_{D_k}$ 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 Algorithm 은 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.

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

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

$$P(n+1) = I(P(n)) \quad (11)$$

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.

[11]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 [10]에서 제안된 Iterative Algorithm 이 수식 (11)에서의 간섭함수가 Standard Interference Function 임을 증명 없이 정리한다.

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

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

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

### 3.4 Optimum Power Control Algorithm for Perfect Channel Estimation

채널추정예러가 없는 환경에서의 Iterative Algorithm의

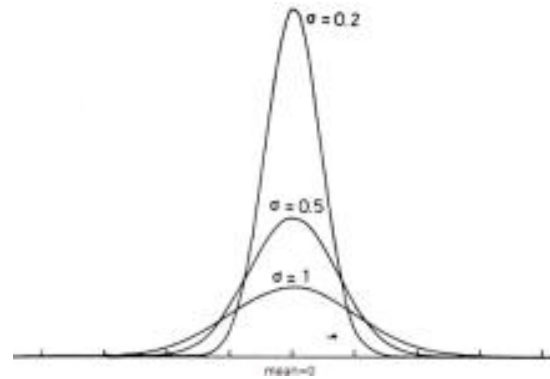


Fig. 4. An Example of Gaussian Distribution

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

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

즉,

$$p_c = I_c(P_D)$$

$$p_{D_i} = I_{D_i}(p_c, P_D)$$

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 1 개의 셀룰라 단말과 1개의 D2D 단말에 적용하였을 경우, 송신 전력의 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 수

렴점에 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.

## IV. The Impact of channel estimation error

### 4.1 Modeling of Channel Estimation Error

수신단에서 채널 추정을 하는 과정에서 채널추정에러가 발생하는 것을 고려하여, 가우시안 채널추정에러(Gaussian Channel Estimation Error) [12]를 적용하기로 한다. 수신단에서 추정된 채널의 경로손실이득(Pathloss gain)을 다음과 같이 정의한다.

$$\hat{g}=g+e \quad (12)$$

$$\frac{E(\hat{g}-g)^2}{g^2}=\sigma_g^2 \quad (13)$$

수식 (12)에서 수신단에서 추정된 채널의 경로손실이득  $\hat{g}$ 는 실제 채널의 경로손실이득  $g$  을 기준으로 가우시안 채널추정 에러  $e$  가 더해진다. 수식 (13)에서 가우시안 채널 추정 에러  $e$  는  $e=\hat{g}-g$  이며,  $E(e^2)$ 를  $g^2$ 으로 균등화(Normalization) 한 값이  $\sigma_g^2$  이다. 따라서, 추정된 채널의 경로손실 이득  $\hat{g}$  는 가우시안 채널 추정에러  $e$  값의 부호에 따라  $g$  보다 커질수도 있으며, 작아질 수도 있다. 수식 (12)에서 수신단에서 추정된 채널의 경로손실이득  $\hat{g}$ 는 실제 채널의 경로손실이득  $g$  을 기준으로 가우시안 채널추정 에러  $e$  가 더해진다. 수식 (13)에서 가우시안 채널 추정 에러  $e$ 는  $e=\hat{g}-g$  이며,  $E(e^2)$ 를  $g^2$ 으로 균등화(Normalization) 한 값이  $\sigma_g^2$  이다. 따라서, 추정된 채널의 경로손실 이득  $\hat{g}$  는 가우시안 채널 추정에러  $e$  값의 부호에 따라  $g$  보다 커질수도 있으며, 작아질 수도 있다.  $\sigma_g^2$  값이 클 수록 평균 0을 중심으로 대칭인 벨모양(bell shape)의 좌우 분포가 더 넓게 퍼지는 통계적 특성을 가지는 가우시안 에러  $e$  값을 가지게 된다.

Fig. 4. 에서와 같이 채널 추정에러는 통계적으로 + 무한대 또는 - 무한대의 값을 가질 수 있다. 시스템 서비스 품질 요구 사항이 Req\_SIR을 만족하지 못하는 경우가 확률적으로 발생할 수 있다. 따라서, 채널 추정에러가 서비스 품질 요구사항인 Req\_SIR를 얼마나 만족시키는지 분석함에 있어서 확률적으로 접근할 필요가 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Probability}(\text{SIR}>\text{Req\_SIR}) \quad (14)$$

채널 추정에러가 존재하지 않는 경우, [10]에서의 power control algorithm을 적용시, Probability(SIR>Req\_SIR)의 그래프는 Fig. 5 와 같다. Target\_SIR 값의 변화 (가로축)에 따른 Probability(SIR>Req\_SIR)를 보여주고 있다. 특히, 여기서 가로축의 Target\_SIR 값이란 [10]에서의 power control algorithm에서 Req\_SIR 에 대입되는 값이다. 즉, power control algorithm 이 목표로 하도록 설정되는 SIR 값이다. 채널 추정에러가 존재하지 않는 경우, [10]에서의 power control algorithm 은 설정된 Req\_SIR 값을 향해 수렴하도록 동작한다. 예를 들어, Target SIR 값을 Req\_SIR 보다 작은 값인 SIR\_smaller (SIR\_smaller < Req\_SIR) 로 설정하였다면 power control algorithm 은 설정된 SIR\_smaller 값에 수렴할 것이며, SIR\_smaller < Req\_SIR 이기 때문에 항상 Probability(SIR>Req\_SIR) =0 이 된다. 다른 예로 Target SIR 값을 Req\_SIR 값보다 큰 값인 SIR\_bigger (SIR\_bigger > Req\_SIR) 로 설정하였다면 power control algorithm 은 SIR\_bigger 값에 수렴할 것이며, SIR\_bigger > Req\_SIR 이기 때문에 항상 Probability(SIR>Req\_SIR) =1 이 된다. 다음장에서는 채널 추정에러를 고려하는 환경에서 Probability(SIR>Req\_SIR) 와 Target\_SIR 값의 관계를 분석해 보고자 한다.

### 4.2 Simulation Result

[10]에서의 power control algorithm 은 채널 추정 에러가 없음을 가정하고 제안되었다. 채널 추정에러가 존재하는 환경에서 [10]의 power control algorithm을 적용할 경우, 요구하는 서비스 품질인 신호대 간섭비(SIR)을 만족하지 못하는 경우가 빈번하게 발생할 수 있다. 문제점을 확인하기 위하여 앞서 정의한 수식 (13),(14)의 채널추정에러 환경에서 [10]에서의 power control algorithm을 적용해 보았다. 실험 환경조건은 다음과 같다. 간섭  $N=10^{-12}$  이며, 셀룰라 단말의 요구 SIR과 D2D 단말의 요구 SIR 은 각각  $\text{Req\_SIR}_c=7$ ,  $\text{Req\_SIR}_D=7$ 이다. 송신기와 수신기 사이의 채널 이득은  $\frac{r}{d^4}$  이며, 여기서  $r$ 은 variance  $8\text{dB}$  를 가지는 log normal fading 이며,  $d$ 는 송신기와 수신기 사이의 거리이다. D2D 송신 단말과 수신단말을 나타낸다.

채널추정에러를 고려하여 [10]에서의 power control algorithm을 적용한 실험 결과인, Probability(SIR>Req\_SIR) vs. Target\_SIR 의 관계는 Fig. 6. 와 같다. Fig. 6. 는  $\sigma_g^2=0.001,0.01,0.05$ 에서의 Probability(SIR>Req\_SIR) vs. Target\_SIR 을 나타내고 있다. 채널 추정에러  $e$  는 양(+ )의 값을 가질 수도 있지만, 음(-)의 값을 가질 수도 있다. 채널 추정에러  $e$  가 음의 값일 경우(채널 추정을 실제 채널보다 더 안좋은 조건으로 추정된 경우), 실제 채널  $g$  보다 추정된 채널값  $\hat{g}=g+e$  는  $e$  만큼 채널이 작은 것을 가정하고, [10]에서의 power control algorithm을 적용하기 때문에 타겟으로 하는 SIR 값, Req\_SIR 값보다 같거나 큰 SIR 값을 얻게 된다.

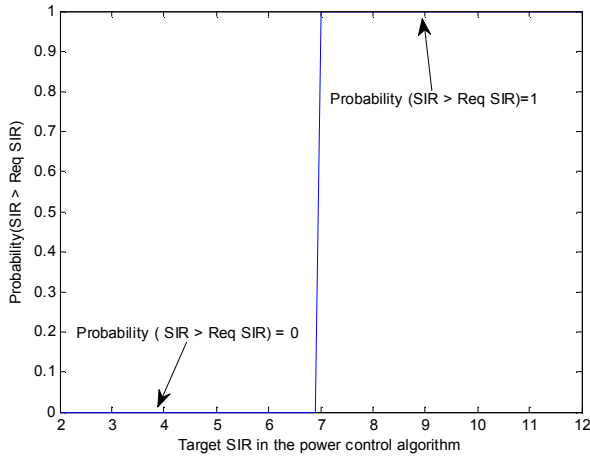


Fig. 5. Probability (SIR > Req\_SIR) for perfect channel estimation

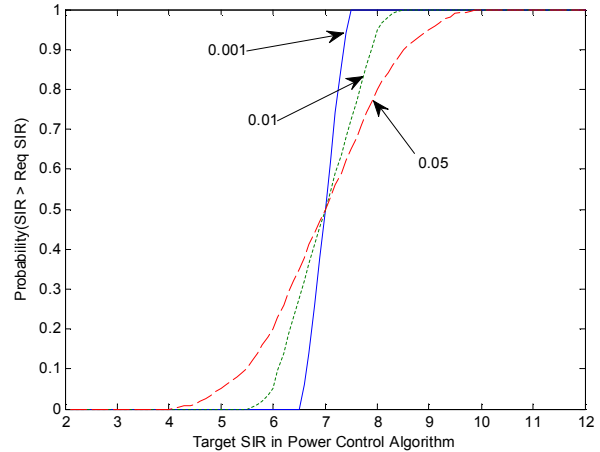


Fig. 6. Probability (SIR > Req\_SIR) with consideration of channel estimation error

반면, 채널 추정에러  $e$  가 양의 값일 경우(채널 추정을 실제 채널보다 더 좋은 조건으로 추정된 경우), 실제 채널  $g$  보다 추정된 채널값  $\hat{g}=g+e$  는  $e$  만큼 채널이 큰 것으로 가정하고, 기존의 power control algorithm을 적용하며, 실제 얻게 되는 SIR 값은 타겟으로 하는 SIR 값, Req\_SIR 값보다 같거나 작게 된다.

Fig. 6. 의 실험결과에서 가장 먼저 확인되는 점은 채널추정 에러가 존재할 경우, Probability(SIR>Req\_SIR) vs. Target\_SIR 의 관계는 Fig. 5.에서의 unit function 의 모양을 보이지 않으며, 확률적 분포를 가지게 된다는 점이다. 특히 주목할만한 점은  $\sigma_g^2$  값이 커질수록 동일한 Probability(SIR>Req\_SIR) 값을 얻기 위하여, 더 큰 Target\_SIR 값을 필요로 한다는 것이다. 그 이유를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 4.에서 보는바와 같이  $\sigma_g^2$  값이 커질수록 더 큰 양의  $e$  값이 발생할 확률이 많아진다. 양의 채널 추정에러 만큼 채널추정값이 달라지게 되므로, 채널추정에러만큼을 상쇄하기 위하여 Target\_SIR 값은 더 커져야 된다. Target\_SIR 값을 크게 할수록 SIR >Req\_SIR를 만족하는 경우인 즉, Probability(SIR>Req\_SIR) 값은 더 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 6. 의 실험결과에서 두 번째로 확인되는 점은 채널추정에러  $\sigma_g^2$  의 값에 관계없이 [10]에서의 power control algorithm 에 Target\_SIR 값에 Req\_SIR 값을 적용하게 되면 Probability(SIR>Req\_SIR)=0.5 이라는 점이다. 그 이유를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 4.에서 보는바와 같이 가우시안 분포를 가지는 채널추정에러가  $\sigma_g^2$  값에 관계없이 Probability( $e>0$ )=0.5 Probability( $e<0$ )=0.5 이기 때문이다.

### V. Conclusions

본 연구에서는 [10]에서 제안되었던 D2D 단말의 Power control algorithm을 채널추정 에러 환경에 적용하는 과정에서 발생하는 문제점을 분석하였다. Power control algorithm [10]은 수렴도가 5회 이하로 매우 빠르게 수렴하는 장점이 있다. 하지만, 이러한 장점은 채널 추정에러가 없다는 가정에서 유지된다. 현실적으로 채널추정 에러는 존재한다. 본 논문에서는 채널 추정 에러가 power control algorithm 에 미치는 영향을 정확히 분석하기 위하여 1) 채널추정에러를 가우시안 채널 추정에러로 모델링하였다. 채널 추정에러가 확률적 분포를 가지기 때문에 채널추정에러를 고려한 power control algorithm 적용 후 얻게 되는 SIR 값 역시 확률적 분포를 가지게 된다. 2) 확률적 분포의 정확한 분석을 위하여 요구하는 서비스 품질을 확률적으로 측정되도록 Probability(SIR>Req\_SIR) vs. Target\_SIR 관계를 분석하였다. Target\_SIR 은 power control algorithm 이 타겟으로 하는 SIR 값으로 채널 추정에러가 없는 경우 Target\_SIR 값은 서비스가 요구하는 SIR 값인 Req\_SIR 값을 따르면 된다. 실험 결과에서 확인하였듯이, Target\_SIR 값을 높여줄수록 서비스가 요구하는 SIR 값을 만족할 확률은 커진다. 따라서, 채널 추정에러가 존재하는 환경에서는 채널 추정에러를 고려하여 Target\_SIR 값을 높여줄 필요가 있다. 하지만, Target\_SIR 값을 계속 올려준다고 서비스가 요구하는 SIR 값이 선형적으로 증가하지 않는다는 점을 확인하였다.

향후 연구에서는 채널추정 에러의 영향 분석을 기반으로 [10]에서의 power control algorithm을 채널 추정 에러 환경에서 적용이 가능하도록 하는 방안 도출이 필요하다.

## 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, 2015.
- [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 LTE and 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] C. Oh, "D2D Power Control in the Cellular System: Iterative Algorithm and Convergence," Journal of the Korea Society of Computer and Information Vol.22, No. 9, pp. 41-47, September 2017.
- [11] R. Yates, "A framework for uplink power control in cellular radio systems," IEEE Journal on Selected Areas in Communications 13(7):1341 - 1347 October 1995.
- [12] A Maaref, "On the effects of Gaussian channel estimation errors on the capacity of adaptive transmission with space-time block coding," IEEE International Conference on Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, pp. 187-193, 2005.

## 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.