

# D2D Utility Maximization in the Cellular System: Distributed Algorithm

Changyoon Oh\*

## Abstract

We consider the D2D sum utility maximization in the cellular system. D2D links reuse the uplink resource of cellular system. This reuse may cause severe interference to cellular users. To protect the cellular users, interference limit from the D2D links is required. In this setting, D2D sum utility maximization problem is investigated. Each D2D link has limited transmit power budget. Because optimum solution may require global information between links and computational complexity, we propose the distributed algorithm which only require the local information from each D2D link and simple broadcasting. Simulation results are provided to verify the performance of the proposed algorithm.

▶ Keyword: D2D Communication, Interference, Utility, Distributed Algorithm, Transmit Power

## I. Introduction

통신시스템에서 주파수 자원을 효율적으로 활용하고자 하는 연구는 기존의 셀룰라 시스템 기반에서 확장하여 단말간 직접 통신(Device to Device (D2D) Communication)을 하도록 하는 관점으로 진행하고 있다. 예를 들어, 이미 LTE(Long Term Evolution) 기술 표준 [1-2]에서는 기지국이 사용하는 상향링크 주파수 자원을 D2D 링크가 사용하도록 하는 표준관점에서의 연구를 진행하였다. 단말간 직접 통신을 하는 D2D 링크에서는 단말이 기지국에 데이터를 전송하는 과정에서 발생하는 주파수 자원의 사용이 없기 때문에 주파수 자원활용 측면에서 효율적이다. 하지만, D2D 링크가 셀룰라 시스템의 주파수를 재사용하기 때문에 이는 기존 셀룰라 시스템에는 간섭을 주게 된다. 셀룰라 링크에게 할당된 주파수 사용의 우선권은 셀룰라 시스템에 접속하는 단말들에게 주어진다. 따라서, D2D 통신을 운용하는 과정에서 발생하는 간섭량을 제한할 필요가 있다. 본 연구에서는 D2D 링크를 운용함에 따라 셀룰라 링크에 주는 간섭을 제한하면서, D2D 단말들의 Utility 최적화 방안을 살펴보기로 한다.

## II. Preliminaries

### 1. Related works

주파수 재사용 (Frequency Reuse) 은 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하도록 하는 유용한 방법이다. 하지만, 주파수 재사용은 기존에 주파수를 사용하는 시스템에게 간섭을 일으키게 된다. 간섭문제는 주파수 자원 활용연구에서 주로 다루어지는 주제이다. 예를 들어, 셀룰라 시스템이 사용하는 주파수의 상향링크 자원을 D2D 시스템이 재사용하도록 하는 연구가 [1-4]에서 진행되었다. [1] 에서는 주로 전력제어를 중심으로 다루었는데, 셀룰라시스템 특히 LTE 시스템의 상향링크 제어 채널을 재사용하면서 발생하는 간섭문제를 전력제어 측면에서 해결하고자 하였다. D2D 단말을 초기 운용시 주변 탐색 과정을 거치게 되는데, [2]에서는 LTE 규격 특히, Device discovery 관점에서 D2D 링크의 주파수 재사용을 다루고 있다. Fig. 1 에서는 셀룰라 링크와 D2D 링크가 주파수 자원을 공유하는 과정에서 신호(Signal)와 간섭(Interference)을 도시하고 있다. 신호는 실선으로, 간섭은 점선으로 표시하였다.

• First Author: Changyoon Oh, Corresponding Author: Changyoon Oh

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

• Received: 2019. 01. 24, Revised: 2019. 03. 14, Accepted: 2019. 03. 14.

• This work was published in part in the Proceedings of the Korean Society of Computer Information Conference, January 2019.

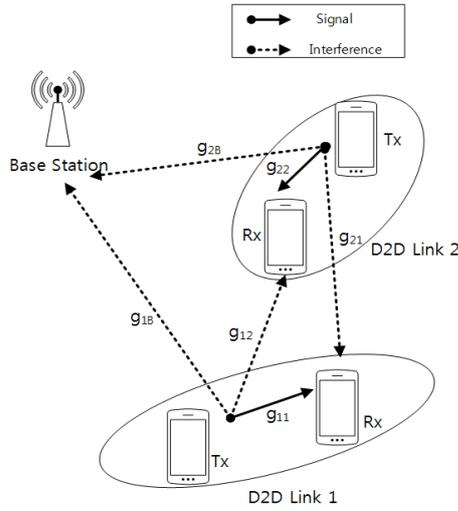


Fig. 1. System Model

간섭 제어 기술은 대표적으로 전력제어, RF 신호처리, 빔포밍(Beamforming)으로 구분할 수 있다. [3]에서는 송신 단말의 송신전력을 효과적으로 조절하여 간섭 문제를 해결하고자 하였다. 표준이슈는 아니지만, 셀룰라 시스템의 주파수 자원을 공유하기 위하여 D2D 단말이 다루어야 하는 구현이슈를 [4]에서는 다루고 있다. 대표적인 구현이슈가 기지국이 단말들에게 데이터를 전송할 수 있는 자원을 할당해주는 스케줄링(scheduling) [5]인데, 스케줄링은 표준규격에서는 구체적으로 명시하지 않으며, 통신사업자가 자체적으로 통신시스템에 최적화되도록 스케줄러를 개발하여 운용하는 게 일반적이다. 표준규격에서는 RF Measurement를 통해 시스템 간 간섭을 규제하고 있는데, [6-7]에서는 인접 주파수를 운용하는 통신시스템에 주는 간섭을 RF 측정관점에서 설명하고 있다. [8]에서는 다중안테나를 활용한 빔포밍 기술을 적용하여 간섭문제를 해결하고자 하였다. Cognitive Radio에서도 주파수 재사용으로 인한 간섭문제 해결이 주요 이슈인데, [9]에서는 우선권을 가지는 단말에게 주는 간섭량에 상한선을 두고, 주파수 자원을 활용하는 방안을 연구하였다. [10]에서는 다중안테나를 활용하여 주파수 자원을 활용하였다. 유사한 연구 방향으로 D2D 링크가 발생하는 간섭 영향을 제한하는 방안이 [11-12]에서 연구되었다. 특히, [11]에서는 D2D 링크들이 서로 멀리 위치한 경우에 대하여 자원 활용을 극대화하는 방안을 연구하였으며, 반면 [12]에서는 보다 일반적인 시나리오인 D2D 링크간 서로 가깝게 위치하여 서로 간섭의 영향을 주는 환경을 고려함과 동시에 기지국에 간섭 영향을 많이 주는 정도에 따라 D2D 링크에 Incentive를 주는 방안을 고려하였다. 특히, 최적화 방안의 복잡도 때문에 복잡도 완화를 위한 대안을 제시하였다. [11-12] 공통점은 최적화 문제를 다루는 과정에서 Pricing 최적화를 도입하였으며, 이로 인해 기지국은 최적화 문제에 직접적으로 관여하고 있다는 점이다. 기지국의 관여로 인해 D2D 링크에서 최적화 계산이 필요하기도 하지만, 기지국에서도 Incentive 최적화 계산이 필요하게 되고, 기지국에게는 부담이다. 본 논문에서는 [11-12]에서 고

려한 기지국의 최적화 문제에 관여하는 것을 최소화하고자 한다. 목적은 복잡도 측면을 완화하여, 구현의 용이성을 고려하면서 D2D 링크의 자원 활용 최적화 문제를 다루기 위함이다. 또한, D2D 링크가 셀룰라 링크 주파수 재사용으로 인해 셀룰라 링크에 주는 간섭 영향을 제한하는 것도 고려하기로 한다.

### III. Sum Utility Maximization with Distributed Algorithm

#### 3.1 System Model and Utility Function

D2D 링크는 셀룰라 단말이 사용중인 상향링크 주파수 자원을 재사용하여 데이터를 전송한다. D2D 링크의 상향링크 주파수 재사용은 셀룰라 상향링크 수신단인 기지국에 간섭영향을 주게 되고, 셀룰라 단말의 서비스 품질을 일정수준 이상으로 유지하기 위해서는 D2D 단말로부터의 간섭량을 일정수준 이하로 제한한다. 이를 위해 기지국이 D2D 송신 단말로부터 받는 간섭량은 다음과 같이 제한한다.

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

$p_i, g_{iB}$ 는 각각  $i$ 번째 D2D 링크 송신 단말의 전송전력,  $i$ 번째 D2D 링크 송신단말과 기지국 사이의 채널이득이다.  $I_{\max}$ 는 기지국이 D2D 단말들로부터 허용가능한 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  $p_i g_{ij}$ 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 다음과 같다.

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

여기서,  $p_j g_{ji}$ 는  $i$ 번째 D2D 링크의 수신 단말이  $j$ 번째 D2D 링크의 송신 단말로부터 받는 간섭량이다.  $N$ 은 열잡음을 포함한 인접셀 간섭이다. 각각의 D2D 링크에서 송신 단말의 전송전력값으로 전송전력 벡터를 다음과 같이 정의한다.

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

$i$ 번째 D2D 링크의 Utility Function은 다음과 같이 정의한다.

$$U_i(p_i, \mathcal{P}_i) = \log(1 + SIR_i) \quad (4)$$

$\mathcal{P}_i$ 는 전송전력 벡터  $P$ 에서  $p_i$ 를 제외한 전송전력 벡터이다. (4)에서 Utility Function은  $p_i$ 와  $\mathcal{P}_i$ 의 함수이다. Utility Function은 각각의 단말이 소정의 신호대 간섭비(SIR)를 이용하여 전송할 수 있는 전송용량(Throughput)으로 해석할 수 있다.

$U_i(p_i, \mathcal{P}_i)$ 는  $\mathcal{P}_i$ 를 생략하고  $U_i(p_i)$ 로도 사용하기로 한다. 즉,

$$U_i(p_i, \mathcal{P}_i) \equiv U_i(p_i) \quad (5)$$

### 3.2 Problem Formulation

각각의 D2D 링크에서는 셀룰라 링크의 상향링크 주파수 자원을 활용하여 개별링크에서의  $U_i(p_i)$ 를 높이고자 전송전력  $p_i$ 를 결정한다. 개별링크 관점에서는  $U_i(p_i)$ 를 크게 하려면 최대 전송전력을 사용하는 것이 바람직하다. 하지만, 이는 인접 D2D 링크 뿐만 아니라, 기지국에게도 많은 간섭을 주게 되므로 링크 전체의 Utility의 합을 감소시키게 된다. 본 논문에서는 모든 단말의 Utility Function의 합을 Distributed algorithm을 통해 최적화하고자 하며, 이를 수식화하면 다음과 같다.

$$\max \sum_i U_i(p_i) \quad \text{for all } i \in [1, \dots, K] \quad (6)$$

$$0 \leq p_i \leq p_{\max} \quad (7)$$

$$\sum_{i=1} p_i g_{iB} \leq I_{\max} \quad (8)$$

식 (6)에서  $i$ 번째 D2D 링크에서의 Utility는 단말  $i$ 번째 D2D 링크 송신 단말의 전송전력뿐만 아니라 다른 D2D 링크 송신 단말들의 전송전력을 변수로 포함하고 있다. 식 (7)은 D2D 링크 개별단말의 전송전력 범위를 나타내며, 최대 전송전력값은  $p_{\max}$ 이다. 식 (8)은 개별 D2D 링크 송신 단말의 송신전력이 셀룰라 기지국에 주는 간섭량으로 셀룰라 단말의 서비스 품질을 유지하기 위하여 최대 간섭량을  $I_{\max}$ 로 제한한다.

식 (6)의 최적화를 위하여, 식 (7),(8)의 제한 조건의 어떠한 부분이 식 (6)를 최적화시킬 수 있는지 확인이 필요하다.

**Proposition 1.** 식 (6)을 최적화하는 전송전력 벡터는 식 (8)에서  $\sum_{i=1} p_i g_{iB} = I_{\max}$ 를 만족시킨다.

증명) 모순(Contradiction)을 사용하여 증명하도록 한다.

식 (6)을 최적화하는 전송전력 벡터  $P^*$ 를 다음과 같이 정의하고,

$$P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_K^*] \quad (9)$$

$\sum_{i=1} p_i g_{iB} = I_{\max}$ 를 만족하지 않는다고 가정하자. 즉,  $\sum_{i=1} p_i^* g_{iB} < I_{\max}$ . 전송전력벡터  $P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_K^*]$ 에 의한 개별 Utility의 합은 다음과 같다.

$$T = \sum_i U_i(p_i^*) \quad (10)$$

이번에는  $\sum_{i=1} p_i g_{iB} = I_{\max}$ 를 만족하는 새로운 전송전력 벡터를 정의하자. 즉,  $P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_K^*]$ 에  $\gamma$  ( $\gamma > 1$ )를 곱하여

$$\sum_{i=1} \gamma p_i^* g_{iB} = I_{\max} \quad (11)$$

를 만족시키는 새로운 전송전력 벡터  $P^{**}$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$P^{**} = [\gamma p_1^*, \gamma p_2^*, \dots, \gamma p_K^*] \quad (12)$$

식 (2)에서 개별 단말들의 전송전력값  $p_i$  대신에  $\gamma p_i^*$ 를 대입하고 식 (12)에 해당하는 신호대 간섭비인  $SIR_i'$  값을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SIR_i' &= \frac{\gamma p_i^* g_{ii}}{\sum_{j \neq i} \gamma p_j^* g_{ji} + N} \\ &> \frac{p_i^* g_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j^* g_{ji} + \frac{N}{\gamma}} \end{aligned}$$

따라서,

$$U_i(\gamma p_i^*) > U_i(p_i^*) \quad (13)$$

다른 D2D 링크에서의 개별 Utility도  $U_j(\gamma p_j^*) > U_j(p_j^*)$ .

그러므로,

$$T = \sum_i U_i(p_i^*) < \sum_i U_i(\gamma p_i^*). \quad (14)$$

따라서, 식 (9)의 전송전력 벡터가 식 (6)을 최적화한다는 가정은 모순이다. 식 (11)가 되도록 새로운 전송전력 벡터 (12)를 적용하면 식 (14)와 같이 개별 Utility의 합을 더 크게 할 수 있다.

증명 끝.

**Proposition 2.** 식 (6)을 최적화하는 전송전력 벡터는 적어도 하나의 단말 (예, 단말  $j$ )에서 최대 전송 전력값  $p_j = p_{\max}$  을 가진다.

증명) 모순(Contradiction)을 사용하여 증명하도록 한다.

식 (6)을 최적화하는 전송전력 벡터를  $P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_K^*]$  라고 하고, 전송 전력벡터를 구성하는 개별 단말의 전송전력 중에서 가장 큰값이  $p^{*j}$  (여기서,  $p_j^* < p_{\max}$ ) 라고 가정하자.

$$\text{따라서, } T = \sum_i U_i(p^{*i})$$

새로운 전송전력 벡터

$$P^{**} = [\gamma p_1^*, \gamma p_2^*, \dots, \gamma p_K^*] \tag{15}$$

를 정의하자. 여기서, 전송전력 벡터  $P^{**}$  는  $P^*$  에

$$\gamma p^{*j} = p_{\max} \tag{16}$$

가 되도록  $\gamma = \frac{p_{\max}}{p_j^*} > 1$  를 곱한 벡터이다. 이 경우, 단말  $j$  의 전송 전력값은 허용가능한 최대값  $p_{\max}$  가 된다.

식 (2) 에서 개별 단말들의 전송 전력값  $p_i$  대신에  $\gamma (\gamma > 1)$  를 곱한  $\gamma p_i$  를 대입하고  $SIR_i'$  값을 구해보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SIR_i' &= \frac{\gamma p_i g_{ii}}{\sum_{j \neq i} \gamma p_j g_{ji} + N} \\ &= \frac{p_i g_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + \frac{N}{\gamma}} \\ &> \frac{p_i g_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N} \end{aligned} \tag{17}$$

즉,  $SIR_i' > SIR_i$

$$\text{따라서, } U_i(p_i^{**}) > U_i(p_i^*). \tag{18}$$

다른 D2D 링크에서의 Utility도  $U_j(p_j^{**}) > U_j(p_j^*)$ .

그러므로,

$$T = \sum_i U_i(p_i^*) < \sum_i U_i(p_i^{**}). \tag{19}$$

따라서, 전송전력 벡터  $P^* = [p_1^*, p_2^*, \dots, p_K^*]$ 가 식 (6)을 최적화한다는 가정은 모순이다. 식 (16)가 되도록 새로운 전송전력 벡터 (15)를 적용하면 식 (19)와 같이 Utility의 값을 더 크게 할 수 있다.

증명 끝.

식 (6)의 최적화 문제를 해결하기 위해서는 Proposition 1 또는 Proposition 2를 만족하는 해법을 찾아야 한다. 이것은 식 (7),(8)의 경계조건에 최적의 전송전력 벡터가 존재하는 boundary value problem [13]에 해당한다. 이를 해결하기 위해서는 Utility인 식 (5)를 구성하는 식 (2)에서의 D2D 링크의 채널정보인  $g_{ji}$  ( $i = 1, \dots, K, j = 1, \dots, K$ )를 모두 알아야 한다. 따라서, 기지국은 모든 D2D 링크의 채널정보를 D2D 단말로부터 수신받아야만 하며, 이는 계산과정의 복잡도뿐만 아니라, 일반적인 D2D 링크의 설치 환경과 맞지 않기에, 본 논문에서는 최소한의 제한적인 정보만을 활용하여 식 (6)의 최적화 문제를 접근하도록 Distributed Algorithm을 제안하기로 한다.

### 3.3 Proposed Distributed Algorithm

Distributed Algorithm을 구현하기 위한 Algorithm 설계 가이드 라인은 다음과 같다.

1. 기지국은 최소한의 정보만을 수신한다.
2. 기지국은 최소한의 정보만을 전송한다.

먼저 설계 가이드 라인을 따르는 Distributed Algorithm을 도출하기 위하여, 개별 D2D 단말의 유틸리티 증가율을 살펴보면 다음과 같다.

$$\frac{\partial U_i(p_i)}{\partial p_i} = \frac{g_{ii}}{p_i g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N} > 0 \tag{20}$$

$$\frac{\partial^2 U_i(p_i)}{\partial p_i^2} < 0 \tag{21}$$

식 (20)은  $g_{ii} > 0, N > 0$  이므로, 전송전력  $p_i \geq 0, p_j \geq 0$

에 대하여 Utility가 항상 증가함수를 의미한다. 식 (21)은  $p_i$ 의 증가에 Utility의 증가율이 감소하는 함수임을 의미한다. 즉, 식 (20), (21)로부터  $i$  번째 D2D 링크의 Utility인  $U_i(p_i)$ 는 전송전력  $p_i$ 에 대하여 증가하는 오목함수임을 알 수 있다. Utility의 증가율인 식 (20)을 Distributed Algorithm에 활용하기 위하여 다음과 같이 기호  $\lambda$  를 사용하여 표현하기로 한다.

$$\lambda_i = \frac{g_{ii}}{p_i g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N} \tag{22}$$

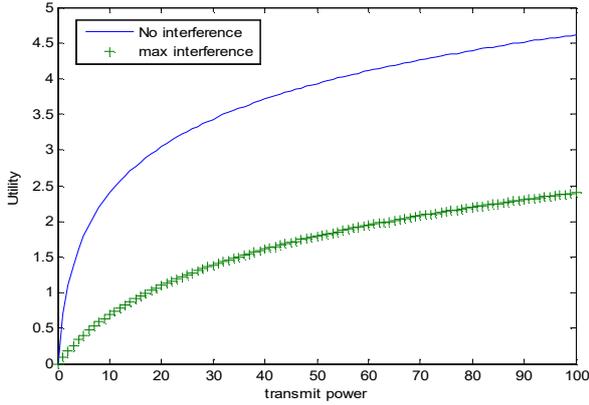


Fig. 2. Utility with different interference levels

식 (22)의 분모는  $i$  번째 D2D 수신 단말이 수신하는 신호 (Signal)과 간섭(Interference) 및 노이즈의 합이며, Pilot 채널을 통해서 D2D 단말은 신호 성분과 간섭성분을 분리하여 각각의 값들을 알아낼 수 있다. 식 (22)의 분자는  $i$  번째 D2D 송신 단말과 수신 단말 사이의 채널이득으로 이 또한 채널 추정을 통하여 계산이 가능하다.

식 (22)에서 전송 전력값의 증가에 따른  $\lambda_i$  특징을 확인 정리하면 다음과 같다.

- 1)  $p_i$  (신호)의 증가는  $\lambda_i$ 를 감소시킨다.
  - 2)  $p_j$  (간섭)의 증가는  $\lambda_i$ 를 감소시킨다.
- 1), 2) 어느 경우에도 전송전력의 증가는  $\lambda_i$ 를 감소시킨다.

Fig. 2는 간섭정도를 다르게 하여, 전송전력  $p_i$ 와  $U_i(p_i)$ 의 관계 그래프를 나타내었다.

1) Fig. 2에서 실선은 간섭이 없는 환경인  $\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} = 0$  일 때의  $U_i(p_i)$ 의 그래프이다.

$\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} = 0$  일 때, 전송율의 변화율은  $p_i$ 에 따라 다음과 같다.

$$\text{전송전력값 } p_i = 0 \text{ 일 때, } \lambda_i = \frac{g_{ii}}{N} \quad (23)$$

$$\text{전송전력값 } p_i = p_{\max} \text{ 일 때, } \lambda_i = \frac{g_{ii}}{p_{\max} g_{ii} + N}$$

$$\lambda^{\max_i} = \frac{g_{ii}}{N} \quad (24)$$

2) Fig. 2에서 + 선은 간섭이 최대인 환경인  $\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} = \sum_{j \neq i} p_{\max} g_{ji}$  일 때의  $U_i(p_i)$ 의 그래프이다.

$\sum_{j \neq i} p_j g_{ji} = 0$  일 때, 전송율의 변화율은  $p_i$ 에 따라 다음과 같다.

$$\text{전송전력값 } p_i = 0 \text{ 일 때, } \lambda_i = \frac{g_{ii}}{\sum_{j \neq i} p_{\max} g_{ji} + N} \quad (25)$$

전송전력값  $p_i = p_{\max}$  일 때,

$$\lambda_i = \frac{g_{ii}}{p_{\max} g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_{\max} g_{ji} + N} \quad (26)$$

Fig. 2에서  $U_i(p_i)$ 의 그래프는 양극단(two extremes)에 해당하는 실선과 + 선 사이에서  $U_i(p_i)$ 의 그래프가 존재하게 된다. 따라서, 전송율의 변화율이 가장 큰 경우는 간섭이 없는 환경인 실선의 그래프에서 전송전력값  $p_i = 0$  일 때인  $\lambda_i = \frac{g_{ii}}{N}$ 이다.

최대 전송율 변화율을 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda_i^{\max} = \frac{g_{ii}}{N} \quad (27)$$

또한, 전송율의 변화율이 가장 작은 경우는 간섭이 가장 많은 환경인 +의 그래프에서 전송전력값  $p_i = p_{\max}$  일 때인

$$\lambda_i = \frac{g_{ii}}{p_{\max} g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_{\max} g_{ji} + N} \text{이다.}$$

마찬가지로, 최소 전송율 변화율을 다음과 같이 정의한다.

$$\lambda^{\min_i} = \frac{g_{ii}}{p_{\max} g_{ii} + \sum_{j \neq i} p_{\max} g_{ji} + N}$$

따라서,  $i$ 번째 D2D 링크에서 Utility 변화율  $\lambda_i$ 은 다음의 구간에서 존재한다.

$$\lambda_i^{\min} \leq \lambda_i \leq \lambda_i^{\max} \quad (28)$$

다른 단말로부터 받는 간섭량과 단말 자신의 전송 전력값을 알고 있으면 식 (22)를 통하여 전송율의 변화율을 알 수 있다.

반대로, 단말로부터 받는 간섭량과 전송율의 변화율을 알면, 단말은 전송 해야할 전송 전력값을 구할 수 있다.

식 (22) 전송 전력에 관하여 정리하면 다음과 같다.

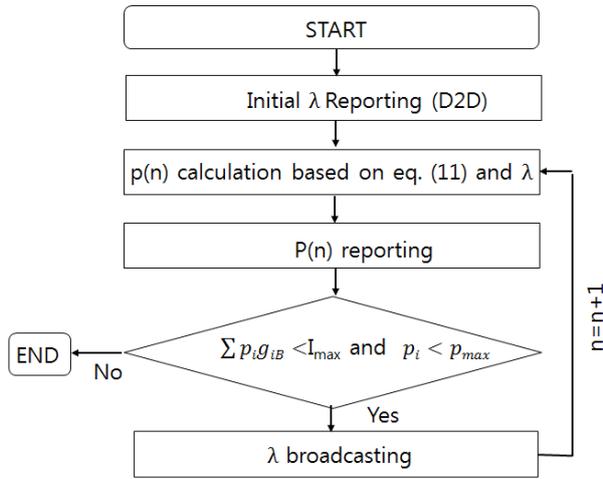


Fig. 3. Proposed Distributed Algorithm

$$p_i = \frac{1}{\lambda_i} - \frac{1}{g_{ii}} \left( \sum_{j \neq i} p_j g_{ji} + N \right) \quad (29)$$

다른 단말들로부터 받는 간섭량은 단말이 측정 가능하기 때문에,  $\lambda_i$  값만 알 수 있으면, 식(26) 값을 계산할 수 있다. 전송율의 변화율은 전송 전력값을 일정크기만큼 높일 때, 전송율의 상승 정도를 나타낸다. 따라서, 전송율의 변화율이 큰 단말의 전송 전력을 높이는 전략이 식 (6)을 크게 할 수 있는 방법이다. 예를 들어, 어떤 전송전력 벡터  $P$ 에서 개별 D2D 단말들의 Utility 변화율을 각각  $\lambda_1, \dots, \lambda_n$  라고 하자. Fig. 2에서와 같이, Utility가 전송전력에 오목함수이므로, 주어진 전송전력 벡터  $P$ 에서 Utility 변화율이 큰 단말에게 더 많은 전송전력값을 증가시켜주는 것이 식 (6) 인 Utility의 값을 크게 하는데 도움이 된다.

제안하는 Distributed Algorithm은 Fig. 3 와 같다.

1)  $\lambda^{\max_i} \lambda^{\min_i}$  Reporting,  $i = 1, 2, \dots, K$

개별 D2D 링크 단말은 기지국에 식 (11),(12)의  $\lambda^{\max_i} \lambda^{\min_i}$  값을 보고한다.

$n = 0$  으로 초기화.

(기지국은 보고받은 모든  $\lambda^{\max_i} \lambda^{\min_i}$  중에서 가장 큰 값을  $\lambda^{\max}$ , 가장 작은 값을  $\lambda^{\min}$  으로 정의한다.)

$$\lambda(n) = \lambda^{\max} - \frac{n}{m} (\lambda^{\max} - \lambda^{\min})$$

2)  $p_i(n)$  Reporting,  $i = 1, 2, \dots, K$

개별 D2D 링크 단말은 기지국에  $p_i(n)$  값을 보고한다.

단,  $p_i(0) = 0$   $i = 1, 2, \dots, K$

$$p_i(n) = \frac{1}{\lambda_i(n)} - \frac{1}{g_{ii}} \left( \sum_{j \neq i} p_j(n-1) g_{ji} + N \right)$$

$$3.1) 0 \leq p_i(n) \leq p_{\max}$$

$$3.2) \sum_{i=1} p_i(n) g_{iB} \leq I_{\max} \quad \text{Check}$$

3.3) 두 개의 제한 조건 (6),(7) 모두를 만족시키면,

$\lambda(n)$  을 모든 D2D 링크 단말에게 Broadcasting 한다.

$$\lambda(n) = \lambda^{\max} - \frac{n}{m} (\lambda^{\max} - \lambda^{\min})$$

3.4) 두 개의 제한조건 중 적어도 하나라도 만족시키지 못하면, 알고리즘을 종료한다.

4.  $n = n + 1$ , 알고리즘 2번으로 반복한다.

## IV. Numerical Results

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. 간섭값은  $N = 10^{-12}$  이다. Figure 4 는 D2D 링크간에 서로 밀집되어 있어, D2D 링크간 간섭의 영향을 주는 환경에서 D2D 링크의 수 증가에 따른 sum utility의 변화를 보여준다. Proposed Algorithm, Max Power Algorithm, Global Optimum Algorithm을 비교 분석하였다. 성능의 upper bound를 보여주기 위하여 모든 링크간 채널 정보를 필요로 하는 Global optimum algorithm의 성능도 포함하였다. D2D 링크가 서로 근접하게 위치하는 경우, D2D 링크간 간섭을 크게 받는다. 따라서, Power control 없이 최대전력을 사용하게 되면, 기지국뿐만 아니라, 인접 D2D 링크에 간섭영향을 주고 이는 Utility를 감소하게 하는 원인이 된다. 특히, D2D 링크의 수가 커질수록 간섭량은 비례하여 커지게 되고, 결국 기지국 간섭량의 최대 한계치를 초과하게 되는 순간부터는 Utility의 값은 0이 된다. 반면, proposed 알고리즘에서는 D2D 링크내의 채널환경이 좋은 D2D 링크에게만 전송 기회를 주며, 채널 환경이 좋지 않은 D2D 링크는 전송하지 않는다. 따라서, D2D 링크의 수가 많아져도 더 많은 송신전력을 사용하도록 허용해 주기 때문에 sum utility가 상승하지는 않는다.

Figure 5 는 D2D 링크끼리 서로 거리를 두고 위치하고 있는 D2D 링크간에 간섭의 영향이 없는 환경에서 D2D 링크의 수 증가에 따른 sum utility의 변화를 보여준다. Max Power algorithm를 사용하는 경우, D2D 링크의 수가 증가할수록

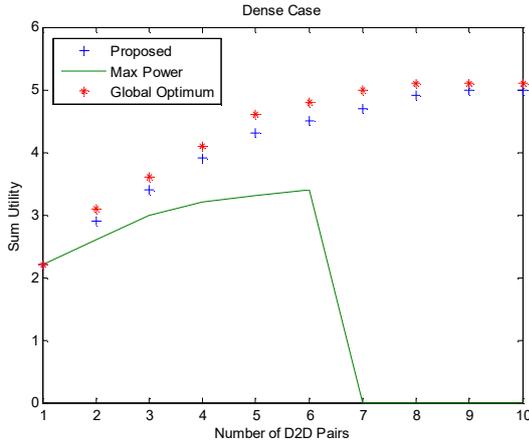


Fig. 4. Performance Comparison-Dense case

sum utility 또한 증가하지만, 일정수준 이상의 D2D 링크의 숫자가 일정수준을 넘어서게 되면, 기지국 간섭량을 초과하여 더 이상의 지원이 불가하다. 반면, Proposed algorithm의 경우 D2D 링크의 수가 증가할수록 지속적으로 sum utility의 값은 커짐을 알 수 있다. 이는 opportunistic scheduling [14,15]의 효과로 볼 수 있는데, 즉, D2D 링크의 숫자가 많아질수록 D2D 링크의 채널이 좋은 단말이 발생할 확률이 많아지게 되므로 sum utility는 증가하게 된다.

#### IV. Conclusions

본 연구에서는 셀룰라 시스템에게 주는 간섭량을 제한하면서 Distributed Algorithm을 적용하여 D2D 단말들의 Utility의 합을 최대화하는 방안을 살펴보았다. 먼저 성능의 Upper bound를 확인하기 위하여 모든 D2D Link의 채널정보를 필요로 하는 Global Optimum Algorithm을 살펴보았다. D2D 통신의 적용환경을 고려할 때, 지역적인 정보만을 활용하는 Distributed Algorithm이 현실적이다. 따라서, 전송전력 정보만을 활용한 Distributed algorithm을 제안하였다. 제안하는 Distributed Algorithm에서는 D2D 단말은 초기에 한번 기지국에 전송율의 변화율을 Report 한다. 이후, 전송전력 정보만을 update 한다. 기지국은 자원을 절약하기 위해 모든 D2D 단말들에게 공통 정보를 Broadcasting 하며, 개별 D2D 단말은 기지국으로부터 수신한 Broadcast 정보인 전송율의 변화율을 전송전력을 결정하는데 적용한다. 실험결과를 통해서, 제안하는 Distributed Algorithm이 많은 정보를 요구하는 Global Optimum Algorithm의 성능에 근접함을 확인하였다. 또한, 단순히 최대전송전력을 적용하는 방법보다 우수한 성능을 보임을 확인하였다. 다만, 제안하는 방법의 문제점은 채널 환경이 우수한 D2D 단말이 자원을 독점하는 unfairness 문제가 발생하므로, 향후에는 Fairness를 고려하는 방안이 필요하다.

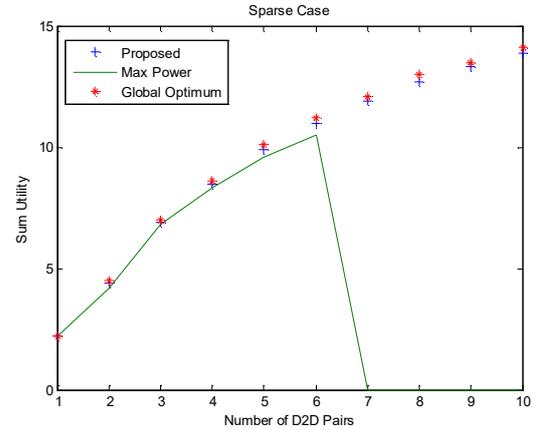


Fig. 5. Performance Comparison-Sparse case

#### 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] 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] Keysight Technologies, "Performing LTE and LTE-Advanced RF Measurements with the E7515A UXM Wireless Test Set," Application Note, Keysight Technologies, March 2015.
- [7] N. Mahmud, "Vulnerabilities of LTE and LTE-Advanced Communication," White Paper, Rohde Schwarz, July 2014.
- [8] B. Schulz, "LTE Transmission Modes and Beamforming," White Paper, Rohde Schwarz, July 2015.
- [9] 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.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] Y. Liu, R. Wang, "Interference Constraint Pricing for D2D Networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, Vol. 16, No. 1, pp. 475-486, January 2017.
- [13] E. Chong, "An Introduction to Optimization," 4th Edition, Wiley, Jan. 2013.
- [14] M. Han, "Opportunistic resource scheduling for D2D communication in OFDMA networks," *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 73, pp. 319-334, November 2014.
- [15] M. Han, "Opportunistic scheduling and incentive mechanism for OFDMA networks with D2D relaying," *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 91, pp. 772-787, November 2015.

### 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.