

D2D Tx-Rx Pair Assignment Using Duality Concept

Changyoon Oh*

Abstract

In this paper, we consider the D2D Transmitter(Tx) and Receiver(Rx) pair assignment problem in the cellular system. Sharing the resource of the cellular system, D2D users may cause interference to the cellular system, though it is beneficial to improve the D2D user Capacity. Therefore, to protect the cellular users, D2D transmit power should be carefully controlled. Previously, optimal Tx-Rx assignment to minimize the total transmit power of users was investigated. Accordingly, the iterative algorithm to find the optimum Tx-Rx assignment was obtained. In this work, we consider the case where Tx group users becomes Rx group users, and Rx group users become Tx group users. We prove that the Tx-Rx assignment problem has the duality property. We present the numerical examples that show the duality between U-link and D-link.

▶ Keyword: D2D, Assignment, Power Control, Duality

I. Introduction

단말 간 직접통신 (D2D 통신)이 셀룰라 시스템의 자원을 이용 하는 관련 연구가 진행 중이다 [1-3]. D2D 통신에 많은 연구가 집중되는 이유는 D2D를 적용함에 따른 다음과 같은 장점에서 찾을 수 있다. 첫째, 단말이 직접 목적지 단말에 데이터를 전송함에 따라, 기지국을 통해서 목적지 단말에 데이터를 전송함에 발생하는 두 번의 링크자원 소모를 절약할 수 있다. 둘째, 송수신하는 단말이 서로 가까운 거리에 위치할 때, 송신과정에서 발생하는 전력소모량을 절약할 수 있다. 셋째, 단말이 기지국에서 멀리 떨어져 위치하는 경우, 즉 셀 가장자리에 위치하고 있을 경우, D2D 통신을 위한 별도의 주파수 자원의 할당 없이 셀룰라에서 사용하는 주파수 자원을 재사용하여 주파수 효율을 높여줄 수 있다. 본 연구에서는 전송전력 최적화를 위하여 D2D 송신그룹과 D2D 수신그룹에서 최적의 송수신 단말쌍을 찾는 방법을 살펴보고자 한다.

II. Preliminaries

1. Related works

셀룰라 시스템의 주파수 자원을 재사용하여 D2D 전력제어를 하는 연구가 많이 진행되고 있다 [1-3]. 구체적으로, 셀룰라 시스템 주파수 자원을 활용한 D2D 통신 분야의 기술동향을 기술분야 별로 구분해 주파수 활용방법, Usage Scenario, 향후 연구가능한 기술분야를 상세히 다루었다 [1]. LTE-Advanced 규격에서 D2D 통신이 어떻게 적용되어 있는지 Device discovery 관점에서 설명하였다[2]. 셀룰라 자원을 재사용하는 과정에서 셀룰라 단말에게 영향을 주는 간섭을 제어하고자 하는 알고리즘을 설명하였다 [3]. 간섭을 제어하는 기술은 송신전력을 조절하는 전력 제어[4], 수신신호를 제어하는 신호처리[5], 방향성 안테나를 사용하는 빔포밍[6] 등을 예로 들 수 있다. D2D 단말을 셀룰라 상향 링크 자원을 공유하도록 하는 실질적인 구현입장에서 구현이슈를 설명하였다 [7]. 기지국이 단말들에게 주파수자원을 할당해주는 스케줄링(scheduling) [8-14]이 대표적인 구현이슈에 해당된다. 이에 통신사업자들은 국제통신표준규격에 제약을 받지 않고, 통신사업자별 시스템 특성에 맞는 자체적인 스케줄러를 개발해

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

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

Received: 2019. 03. 29, Revised: 2019. 04. 24, Accepted: 2019. 04. 25.

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

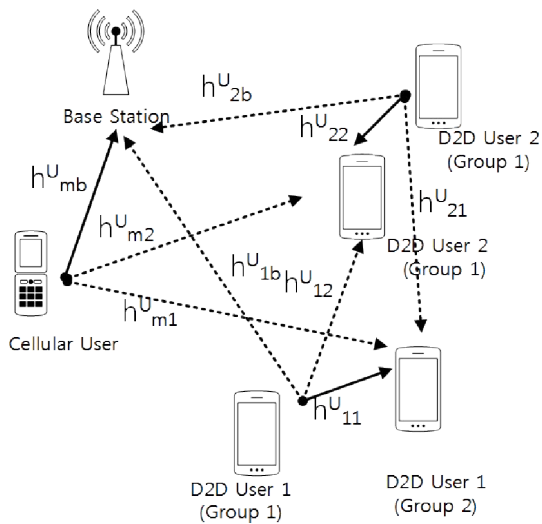


Fig. 1. System Model U-Link

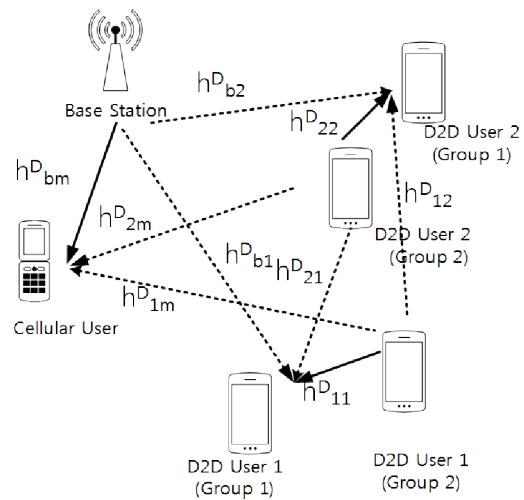


Fig. 2. System Model D-Link

율적인 주파수자원 할당에 적용하고 있다. 본 논문에서는 전송 전력 최적화를 위하여 송신 단말과 수신단말을 할당하는 방향으로 접근하고자 한다. D2D 단말을 송신단말그룹과 수신단말그룹으로 나눈다. 일례로, 스마트그리드 응용 분야에서 D2D 송신단말은 전력사용량을 다수개의 D2D 수신단말중 하나의 D2D 수신단말에 전송하기만 하면 된다. 즉, 송신 단말과 수신단말이 이미 정해진 것이 아니라, 송신단말 그룹에 속한 하나의 D2D 단말은 수신단말 그룹 중 하나의 단말을 선택해서 데이터를 전송하면 된다. 따라서, D2D 단말을 송신단말그룹과 수신단말 그룹으로 구분하고, 전송전력 관점에서 송신단말과 수신단말을 효율적으로 pairing 하도록 할 수만 있다면, 전체 단말의 전송전력을 최적화하는데 효율적일 것이다. 전송전력 최적화를 위하여 D2D Tx-Rx pairing 하고자 반복적 알고리즘을 제안하였다 [15]. 구체적으로, D2D 송신그룹과 D2D 수신그룹이 셀룰라 자원을 공유하는 환경에서 단말들의 전송전력 문제를 송신단말과 수신단말 쌍을 선택하는 문제로 접근하여 고찰하였다. 특히, 일반적인 최적화 문제의 해법을 설명하고, 복잡도를 완화하면서 전송전력 최적화할 수 있는 반복 알고리즘(Iterative Algorithm)을 제안하였다.

그렇다면, 반대의 시나리오 즉, 송신단말그룹이 수신단말그룹이 되고, 수신단말그룹이 송신단말그룹이 되는 경우에는 전송전력의 최적화를 위해서는 송신단말과 수신단말을 다시 pairing 해야 하는가? 본 논문에서는 이에 대한 해법을 알아보려고 한다. 다. 기지국의 관여로 인해 D2D 링크에서 최적화 계산이 필요하기도 하지만, 기지국에서도 Incentive 최적화 계산이 필요하게 되고, 기지국에게는 부담이다. 본 논문에서는 [11-12]에서 고려한 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. The Proposed Scheme

하나의 기지국, 그리고 기지국과 통신을 하는 셀룰라 단말이 존재한다. D2D 단말들은 2개의 그룹, Group 1 과 Group 2로 구분한다. 각각의 Group 에는 M 개의 D2D 단말이 존재한다. 셀룰라 단말이 송신하고, 기지국이 수신하는 시간 구간 동안에 Group 1에 속하는 단말들은 송신모드로 Group 2에 속하는 단말들은 수신모드이다. 이를 U-Link 라고 정의하자. 반대로, 기지국이 송신하고, 셀룰라 단말이 수신하는 시간구간동안에 Group 2에 속하는 단말들은 송신모드이고, Group 1에 속하는 단말들은 수신모드이다. 이를 D-Link 라고 정의하자.

연구의 목적은 U-Link 와 D-Link 각각에서 에너지 최적화가 되도록 하는 Group 1 단말과 Group 2 단말을 링크로 연결하는 단말쌍을 찾는 것이다. 이미 U-Link에서 에너지 최적화를 위한 Group 1 단말과 Group 2 단말의 단말쌍은 [9]에서 그 해법을 찾았다. 본 논문에서는 U-Link에서 적용가능한 해법이 어떤 조건에서 D-Link에서 적용가능한지 살펴보고자 한다. 또한, U-Link 와 D-Link 에서의 전송전력 최적화 문제를 정의하고, Duality Property가 존재함을 증명하도록 한다.

3.1 System Model and Problem Formulation (U-link)

Fig. 1 에서와 같이 U-Link 에서는 셀룰라 단말이 송신모드이고 기지국이 수신모드이다. Fig. 1에서 신호(Signal)는 실선으로 표시하였으며, 간섭(Interference)은 점선으로 표시하였다. Group 1 에 포함되는 M 개의 D2D 단말이 송신모드이며, Group 2 에 포함되는 M개의 D2D 단말이 수신모드이다. Group 1 에 포함되는 하나의 D2D 단말은 Group 2 에 포함되는 하나의 D2D 단말에게만 전송한다. Group 2 에 포함되는 하나의 D2D 단말은 Group 1에 포함되는 하나의 D2D 단말로 부

터만 수신한다. 이 때, Group 1의 i 번째 D2D 단말이 선택한 Group 2의 D2D 단말을 $a(i)$ 라고 정의하고, 이렇게 정의된 각각의 M 개의 D2D 단말을 하나의 벡터로 다음과 같이 정의한다.

$$a(i) \in (1, 2, \dots, M) \quad (1.1)$$

$$a = [a(1), \dots, a(M)] \quad (1.2)$$

U-Link에서 Group 1의 i 번째 D2D 단말의 전송전력을 p_i^U 라고 정의한다. 셀룰라 단말의 전송전력과 수신단인 기지국 사이의 채널이득을 각각 $p_m^U h_{mb}^U$ 로 정의한다. i 번째 D2D 단말의 전송신호에 대한 수신단 D2D 단말 $a(i)$ 에서의 신호대 간섭비(SIR)는 다음과 같다.

$$SIR_{a(i)} = \frac{p_i^U h_{ia(i)}^U}{p_m^U h_{ma(i)}^U + \sum_{j \neq i} p_j^U h_{ja(i)}^U + N} \quad (2)$$

여기서, N 는 열잡음을 포함한 간섭이다.

$h_{ma(i)}^U$, $h_{ia(i)}^U$, $h_{ja(i)}^U$ 는 각각 셀룰라 단말에서 D2D 수신단말 $a(i)$ 까지의 채널이득, Group 1의 i 번째 D2D 단말에서 Group 2의 D2D 수신단말 $a(i)$ 까지의 채널이득, Group 1의 j 번째 D2D 단말에서 Group 2의 D2D 수신단말 $a(i)$ 까지의 채널이득이다.

또한, 셀룰라 단말의 기지국에서의 신호대 간섭비는 다음과 같다.

$$SIR_m = \frac{p_m^U h_{mb}^U}{\sum_{j=1}^M p_j^U h_{jb}^U + N} \quad (3)$$

본 논문에서 고려하는 최적화 문제는 각각의 D2D 단말이 요구하는 신호대 간섭비를 만족하도록 하면서 모든 D2D 단말의 전송전력의 합을 최소화하도록 $a = [a(1), \dots, a(M)]$ 를 선택하고, 이 때의 U-Link 에서의 전송 전력벡터 $P^U = [p_m^U, p_1^U, \dots, p_M^U]$ 을 구하는 것이다. 이를 수식화 하면 다음과 같다.

$$\min p_m^U + \sum_{i=1}^M p_i^U \quad (4)$$

$$s.t. SIR_{a(i)} = \frac{p_i^U h_{ia(i)}^U}{p_m^U h_{ma(i)}^U + \sum_{j \neq i} p_j^U h_{ja(i)}^U + N} \geq \gamma_D \quad (5)$$

$$s.t. SIR_m = \frac{p_m^U h_{mb}^U}{\sum_{j=1}^M p_j^U h_{jb}^U + N} \geq \gamma_m \quad (6)$$

$$a(i) \in [1, 2, \dots, M] \quad (7)$$

γ_m, γ_D 는 각각 셀룰라 송신 단말의 수신단인 기지국에서 요구되는 신호대 간섭비, D2D 송신단말의 수신단에서 요구되는 신호대 간섭비를 나타낸다.

Group 1의 i ($1 \leq i \leq M$) 번째 단말이 송신단말이고, 이 때 수신 단말이 Group 2 의 i ($1 \leq i \leq M$) 번째 단말일 때, 식 (5),(6)를 만족하는 식 (4)의 최적화 해법을 살펴보도록 한다. 식 (4)의 최적화 해법은 식 (5),(6)이 등호가 성립할 때 이다. 등호가 성립할 때의 식 (5),(6)을 하나의 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Lambda = H^U P^U \quad (8)$$

여기서,

$$P^U = [p_m^U, p_1^U, \dots, p_M^U]^T \quad (9)$$

$$\Lambda = [N\gamma_m, N\gamma_D, \dots, N\gamma_D]^T \quad (10)$$

$$H^U = \begin{bmatrix} h_{mb}^U & -\gamma_m h_{1b}^U & \dots & -\gamma_m h_{Mb}^U \\ -\gamma_D h_{m1}^U & h_{11}^U & \dots & -\gamma_D h_{M1}^U \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_D h_{mM}^U & -\gamma_D h_{1M}^U & \dots & h_{MM}^U \end{bmatrix} \quad (11)$$

3.2 System Model and Problem Formulation (D-link)

Fig. 2 의 D-Link에서 Group 2의 i 번째 D2D 단말의 전송전력을 p_i^D 라고 정의한다. 기지국의 전송전력과 수신단인 셀룰라 단말 사이의 채널이득을 각각 $p_b h_{bm}^D$ 로 정의한다. i 번째 D2D 단말의 전송신호에 대한 수신단 D2D 단말 $a(i)$ 에서의 신호대 간섭비(SIR)는 다음과 같다.

$$SIR_{a(i)} = \frac{p_i^D h_{ia(i)}^D}{p_b^D h_{ba(i)}^D + \sum_{j \neq i} p_j^D h_{ja(i)}^D + N} \quad (12)$$

여기서, N 는 열잡음을 포함한 간섭이다.

$h_{ba(i)}^D$, $h_{ia(i)}^D$, $h_{ja(i)}^D$ 는 각각 기지국에서 D2D 수신단말 $a(i)$ 까지의 채널이득, Group 2의 i 번째 D2D 단말에서 Group 1의 D2D 수신단말 $a(i)$ 까지의 채널이득, Group 2의 j 번째 D2D 단말에서 Group 1의 D2D 수신단말 $a(i)$ 까지의 채널이득이다. 셀룰라 단말에서의 신호대 간섭비는 다음과 같다.

$$SIR_b = \frac{p_b^D h_{bm}^D}{\sum_{j=1}^M p_j^D h_{jm}^D + N} \quad (13)$$

본 논문에서 고려하는 최적화 문제는 각각의 D2D 단말이 요구하는 신호대 간섭비를 만족하도록 하면서 모든 D2D 단말의 전송전력의 합을 최적화하도록 $a = [a(1), \dots, a(M)]$ 를 선택하고, 이 때의 D-Link 에서의 전송 전력벡터 $P^D = [p_b^D, p_1^D, \dots, p_M^D]$ 을 구하는 것이다. 이를 수식화하면 다음과 같다.

$$\min p_b^D + \sum_{i=1}^M p_i^D \quad (14)$$

$$s.t. SIR_{a(i)} = \frac{p_i^D h_{ia(i)}^D}{p_b^D h_{ia(i)}^D + \sum_{j \neq i} p_j^D h_{ja(i)}^D + N} \geq \gamma_D \quad (15)$$

$$s.t. SIR_b = \frac{p_b^D h_{bm}^D}{\sum_{j=1}^M p_j^D h_{jm}^D + N} \geq \gamma_m \quad (16)$$

$$a(i) \in [1, 2, \dots, M] \quad (17)$$

Group 2의 i ($1 \leq i \leq M$) 번째 단말이 송신단말이고, 이 때 수신 단말이 Group 1의 i ($1 \leq i \leq M$) 번째 단말일 때, 식 (15), (16)를 만족하는 식 (14)의 최적화 해법을 살펴해보도록 한다. 식 (4)의 최적화 해법은 식 (15), (16)이 등호가 성립할 때 이

$$\Lambda = H^D P^D \quad (18)$$

여기서,

$$P^D = [p_b^D, p_1^D, \dots, p_M^D]^T \quad (19)$$

$$\Lambda = [N\gamma_m, N\gamma_D, \dots, N\gamma_D]^T \quad (20)$$

$$H^D = \begin{bmatrix} h_{mb}^D & -\gamma_m h_{1m}^D & \dots & -\gamma_m h_{Mm}^D \\ -\gamma_D h_{m1}^D & h_{11}^D & \dots & -\gamma_D h_{M1}^D \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma_D h_{mM}^D & -\gamma_D h_{M1}^D & \dots & h_{MM}^D \end{bmatrix} \quad (21)$$

3.3 U-link and D-link Duality of the optimum transmit power

U-Link 와 D-Link에서 송수신 단말쌍이 고정된 경우, 예를 들어 group 1의 a 단말이 송신모드이고 group 2의 b 단말이 수신모드인 U-Link 와 group 1의 a 단말이 수신모드이고 group 2의 b 단말이 송신모드인 D-Link 인 경우, U-Link 와 D-Link 에서의 전송전력의 합을 살펴보기로 한다. 특히, 모든

사용자의 요구하는 신호대 간섭비가 같은 경우, 즉, $\gamma_m = \gamma_D$ 일 때, U-Link 와 D-Link 에서의 전송전력의 합은 항상 동일함을 Proposition 1을 통해 확인할 수 있다.

Proposition 1. 모든 단말들의 요구하는 신호대 간섭비가 같은 경우, 즉, $\gamma = \gamma_m = \gamma_D$ 일 때, a 단말이 송신(Tx), b 단말이 수신(Rx)인 송수신 단말쌍 (a,b) 인 U-link 에서의 최적화된 전송전력의 합은 b 단말이 송신(Tx), a 단말이 수신(Rx)인 송수신 단말쌍 (b,a) 인 D-link 에서의 최적화된 전송전력의 합과 같다.

증명) Group 1의 i 번째 단말과 Group 2의 i 번째 단말이 하나의 송수신 단말쌍을 구성한다고 가정하자. U-Link에서 셀룰라 단말은 송신 모드이고, 기지국은 수신 모드이다. Group 1 단말들은 송신모드이며, Group 2 단말들은 수신모드이다. U-Link 에서의 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Lambda = H^U P^U \quad (22)$$

여기서, 단말들의 SIR 값과 노이즈값의 곱 벡터 $\Lambda = [N\gamma_m, N\gamma_D, \dots, N\gamma_D]^T$ 이며, 특히, 모든 사용자의 신호대 간섭비가 같은 경우에는 $\gamma = \gamma_m = \gamma_D$ 이므로,

$$\Lambda = [N\gamma, N\gamma, \dots, N\gamma]^T \quad (23)$$

셀룰라 단말과 Group 1 송신단말들의 전송전력 벡터는 다음과 같다.

$$P^U = [p_m^U, p_1^U, \dots, p_M^U]^T \quad (24)$$

H^U 는 U-Link 의 채널 행렬로 다음과 같다. 특히, 모든 사용자의 요구하는 신호대 간섭비가 같은 경우에는 $\gamma = \gamma_m = \gamma_D$ 이므로,

$$H^U = \begin{bmatrix} h_{mb}^U & -\gamma h_{1b}^U & \dots & -\gamma h_{Mb}^U \\ -\gamma h_{m1}^U & h_{11}^U & \dots & -\gamma h_{M1}^U \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma h_{mM}^U & -\gamma h_{1M}^U & \dots & h_{MM}^U \end{bmatrix} \quad (25)$$

U-Link 의 전송전력 벡터 $P^U = [p_m^U, p_1^U, \dots, p_M^U]^T$ 는 H^U 의 역행렬을 적용하여 구할 수 있다.

$$P^U = (H^U)^{-1} \Lambda \quad (26)$$

H^U 의 역행렬인 $(H^U)^{-1}$ 은 X 와 같은 방법으로 구할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같이 놓을 수 있다.

$$(H^U)^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1(M+1)} \\ a_{21} & & & a_{2(M+1)} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{(M+1)1} & a_{(M+1)M} & a_{(M+1)(M+1)} & \end{bmatrix} \quad (27)$$

U-Link 에서의 전송전력의 합 $p_m^U + \sum_{i=1}^M p_i^U$ 은 P^U 에 $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]$ 를 곱한 $\mathbf{1}^T P^U$ 이다. 즉,

$$p_m^U + \sum_{i=1}^M p_i^U = \mathbf{1}^T P^U = \mathbf{1}^T (H^U)^{-1} \Lambda \quad (28)$$

$\Lambda = [N\gamma, N\gamma, \dots, N\gamma]^T$ 벡터내의 값들이 모두 동일하므로,

U-Link 에서의 전송전력의 합은 $(H^U)^{-1}$ 행렬의 모든 항을 더한 값에 $N\gamma$ 를 곱한 것과 같다. 즉,

$$p_m^U + \sum_{i=1}^M p_i^U = N\gamma \sum_{i=1}^{M+1} \sum_{j=1}^{M+1} a_{ij} \quad (29)$$

다음은 D-Link 의 경우를 살펴보기로 한다. D-Link에서는 기지국은 송신 모드이고 셀룰라 단말은 수신 모드이다. Group 2 단말들이 송신모드이며, Group 1 단말들이 수신모드이다. U-Link 와 동일한 단말쌍에서 송신모드와 수신모드만 역할이 서로 바뀌게 되므로, Group 2의 i 번째 단말이 Group 1 의 i 번째 단말에게 전송하는 단말쌍이 되며, D-Link 에서의 행렬식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\Lambda = H^D P^D \quad (30)$$

U-Link 와 마찬가지로 단말들의 SIR 값과 노이즈값의 곱 벡터 $\Lambda = [N\gamma_m, N\gamma_D, \dots, N\gamma_D]^T$ 이며, 특히, 모든 사용자의 신호대 간섭비가 같은 경우에는 $\gamma = \gamma_m = \gamma_D$ 이므로, $\Lambda = [N\gamma, N\gamma, \dots, N\gamma]^T$ 이다. 기지국과 Group 2 송신단말들의 전송전력 벡터는 다음과 같다.

$$P^D = [p_b^D, p_1^D, \dots, p_M^D]^T \quad (31)$$

H^D 는 D-Link 의 채널 행렬로 다음과 같다. 특히, 모든 사용자의 신호대 간섭비가 같은 경우에는 $\gamma = \gamma_m = \gamma_D$ 이므로,

$$H^D = \begin{bmatrix} h_{mb}^D & -\gamma h_{1m}^D & \cdots & -\gamma h_{Mm}^D \\ -\gamma h_{m1}^D & h_{11}^D & \cdots & -\gamma h_{M1}^D \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\gamma h_{mM}^D & -\gamma h_{M1}^D & h_{MM}^D & \end{bmatrix} \quad (32)$$

여기서, 송수신 채널이 서로 reciprocal 이기 때문에

$$h_{ji}^D = h_{ij}^U \quad (33)$$

$$h_{mb}^U = h_{bm}^D \quad (34)$$

이며, 따라서, 식 x 와 식 y 는 서로 T 행렬관계이다.

$$H^D = (H^U)^T \quad (35)$$

D-Link 의 전송전력 벡터 $P^D = [p_b^D, p_1^D, \dots, p_M^D]^T$ 는 H^D 의 역행렬을 적용하여 구할 수 있다.

$$P^D = (H^D)^{-1} \Lambda \quad (36)$$

여기서, 송수신 채널이 서로 reciprocal 이기 때문에 $h_{ji}^D = h_{ij}^U$ 이 성립하며, 이러한 경우에 참고문헌 x 에 의하여 다음이 성립한다.

$$H^D = (H^U)^T \quad (37)$$

이를 적용하면,

$$(H^D)^{-1} = ((H^U)^T)^{-1} = ((H^U)^{-1})^T \quad (38)$$

따라서,

$$(H^D)^{-1} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & \cdots & a_{(M+1)1} \\ a_{12} & & & a_{(M+1)2} \\ \vdots & & & \vdots \\ a_{1(M+1)} & a_{(M+1)M} & a_{(M+1)(M+1)} & \end{bmatrix} \quad (39)$$

D-Link 에서의 전송전력의 합 $p_b^D + \sum_{i=1}^M p_i^D$ 은 P^D 에 $\mathbf{1} = [1, \dots, 1]$ 를 곱한 $\mathbf{1}^T P^D$ 이다. 즉,

$$\mathbf{1}^T P^D = \mathbf{1}^T (H^D)^{-1} \Lambda \quad (40)$$

$\Lambda = [N\gamma, N\gamma, \dots, N\gamma]^T$ 벡터내의 값들이 모두 동일하므로, D-Link 에서의 전송전력의 합은 $(H^D)^{-1}$ 행렬의 모든 항을 더한 값에 $N\gamma$ 를 곱한 것과 같다. 즉,

$$p_b^D + \sum_{i=1}^M p_i^D = N\gamma \sum_{i=1}^{M+1} \sum_{j=1}^{M+1} a_{ij} \quad (41)$$

식 (29), (41) 에 의하여,

$$p_m^U + \sum_{i=1}^M p_i^U = N\gamma \sum_{i=1}^{M+1} \sum_{j=1}^{M+1} a_{ij} = p_b^D + \sum_{i=1}^M p_i^D \quad (42)$$

따라서, U-Link 에서의 전송전력의 합과 D-Link 에서의 전송전력의 합은 동일하다. ■

Proposition 2. 최적화된 전송전력을 가지는 U-Link 에서의 송수신 단말쌍들은 최적화된 전송전력을 가지는 D-Link에서의 송수신 단말쌍들과 동일하다.

증명) Proposition 1에 의하여 동일한 송수신 단말쌍에서 U-Link 에서의 전송전력의 합과 D-Link 에서의 전송전력의 합은 동일하다. 즉, 임의의 송수신 단말쌍 $Set X$ 에 대하여

U-Link 에서의 전송전력의 합을 $powersum(Set X)_U$ 라고 정의하자. D-Link 에서의 전송전력의 합을 $powersum(Set X)_D$ 라고 정의하자. 식 (42)에 의하여,

$$powersum(Set X)_U = powersum(Set X)_D \quad (43)$$

U-Link에서 최적화된 전송전력을 가지는 송수신 단말쌍을 $Set(optU)$ 라고 하자. 마찬가지로, D-Link에서 최적화된 전송전력을 가지는 송수신 단말쌍을 $Set(optD)$ 라고 하자. 또한,

$$Set(optU) \neq Set(optD) \quad (44)$$

라고 가정하자.

$Set(optU)$ 는 U-link에서 최적화된 전송전력을 가지는 송수신 단말쌍이므로,

$$powersum(Set(optU))_U < powersum(Set(optD))_U \quad (45)$$

$Set(optD)$ 는 D-link에서 최적화된 전송전력을 가지는 송수신 단말쌍이므로, 식 (43)에 의하여,

$$powersum(Set(optU))_U = powersum(Set(optU))_D \quad (46)$$

$$powersum(Set(optD))_U = powersum(Set(optD))_D \quad (47)$$

(48)

식 (47)을 식 (45) 에 대입하면,

$$powersum(Set(optU))_U < powersum(Set(optD))_U$$

따라서, U-Link에서 전송전력 최적화를 만족하는 송수신 단말쌍들은 D-Link에서도 전송전력 최적화를 만족시킨다. ■

IV. Numerical Results

간섭 $N = 10^{-12}$ 이며, 셀룰라 단말의 요구 신호대 간섭비(SIR) 과 D2D 단말의 요구 SIR 은 각각 γ_m, γ_D 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 Link 의 개수를 2개에서 7개로 증가시켜 가면서 U-Link와 D-Link에서의 최적의 전송전력의 합의 변화를 살펴보았다.

Fig. 3 은 $\gamma_m = \gamma_D = 7$ 인 경우, 링크수의 증가에 따른 U-Link와 D-Link의 전송전력의 합을 나타낸 결과이다. 동등한 비교를 위하여 전송전력의 합은 2-link의 U-link의 전송전력의 합으로 균등화(Normalization) 하였다. γ_m 와 γ_D 의 값이 동일한 경우에는 Proposition 2에서 증명을 통하여 확인하였듯이, U-Link와 D-Link의 최적화된 전송전력의 합은 항상 동일함을 실험을 통하여 확인하였다. 또한, D2D Link의 개수가 증가할수록 최적화된 전송전력의 합은 증가한다. 이는 D2D Link 의 개수가 증가할수록 Link 간의 간섭이 증가하고, 요구하는 신호대 간섭비인 $\gamma_m = \gamma_D = 7$ 를 만족시키기 위하여 전송전력이 증가하기 때문이다.

Fig 4 는 $\gamma_m = 7, \gamma_D = 5$ 인 경우, 즉, $\gamma_m \neq \gamma_D$ 인 경우, 링크수의 증가에 따른 U-Link와 D-Link의 최적화된 전송전력의 합을 나타낸 결과이다. $\gamma_m \neq \gamma_D$ 인 경우에는 일반적으로 U-Link와 D-Link의 최적화된 전송전력의 합은 동일할 필요는 없으며, 실험을 통하여 $\gamma_m \neq \gamma_D$ 인 경우에 대하여 U-Link와 D-Link의 전송전력의 합은 다름을 확인하였다. 또한, D2D Link의 개수가 증가할수록 최적화된 전송전력의 합은 증가한다. 특히, 특정한 D2D Link의 개수에서는 U-Link의 최적화된 전송전력의 합이 D-Link의 최적화된 전송전력의 합보다 크며, 또 다른 D2D Link의 개수에서는 D-Link의 최적화된 전송전력의 합이 U-Link의 최적화된 전송전력의 합보다 큰 것을 확인할 수 있었다. 이는 D2D 단말간의 분포에 따라 Link 간의 간섭 환경이 달라지고 이에 따라 D-Link의 전송전력의 합이 더 작을 수도 있고, U-Link의 전송전력의 합이 더 작을 수도 있게 된다.

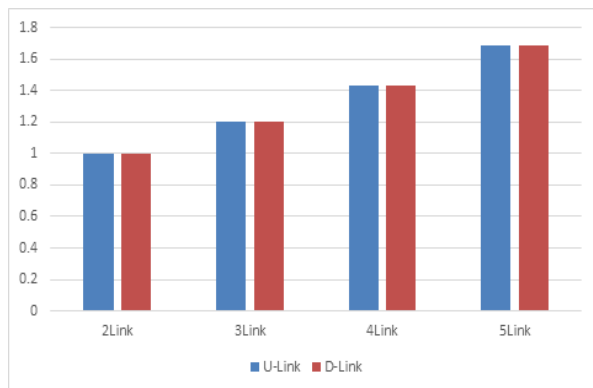


Fig. 3. total transmit power for same SIR

V. Conclusions

본 연구에서는 D2D 송신단말그룹이 수신단말그룹이 되고, 수신단말그룹이 송신단말그룹이 되는 경우에는 전송전력의 최적화를 위해서는 송신단말과 수신단말을 다시 pairing 해야 하는가? 에 대한 해답을 살펴보고, 해답은 다음과 같다. 셀룰라링크의 품질요구사항인 신호대 간섭비와 D2D 링크의 신호대 간섭비가 동일하다면, 송신단말과 수신단말을 다시 pairing 하지 않고 그대로 사용해도 된다. 이를 확인하기 위하여, U-Link 와 D-Link 는 전송전력의 합 관점에서 Duality 관계가 있음을 수식적으로 증명하였다. 즉, U-link 에서의 모든 단말의 전송전력의 합은 D-link 에서의 모든 단말의 전송전력의 합은 동일함을 증명하였다. U-link와 D-link가 전송전력의 합의 관점에서 Duality 관계를 가질 경우, U-link (또는 D-link) 에서의 전송전력을 최적화하는 송수신 단말쌍을 구하면 이를 D-link (또는 U-link)에 바로 적용할 수 있다는 점에서 효율적이다. U-Link 와 D-Link 간의 Duality 관계를 실험적으로 확인하기 위하여, link 의 개수를 증가시켜 가면서 소모되는 전송전력의 합을 추적해 보았다. 모든 단말들의 신호대 간섭비가 동일할 경우, U-Link의 D-Link의 전송전력의 합은 항상 동일함을 확인하였다. 반면, 단말들의 신호대 간섭비가 다른 경우에는 U-link와 D-link의 duality 관계는 성립하지 않음을 확인하였다.

IV. Conclusions

본 연구에서는 D2D 송신단말그룹이 수신단말그룹이 되고, 수신단말그룹이 송신단말그룹이 되는 경우에는 전송전력의 최적화를 위해서는 송신단말과 수신단말을 다시 pairing 해야 하는가? 에 대한 해답을 살펴보고, 해답은 다음과 같다. 셀룰라링크의 품질요구사항인 신호대 간섭비와 D2D 링크의 신호대

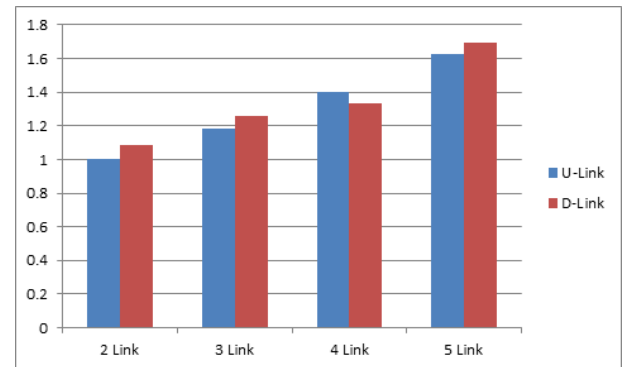


Fig. 4. total transmit power for different SIR

간섭비가 동일하다면, 송신단말과 수신단말을 다시 pairing 하지 않고 그대로 사용해도 된다. 이를 확인하기 위하여, U-Link 와 D-Link 는 전송전력의 합 관점에서 Duality 관계가 있음을 수식적으로 증명하였다. 즉, U-link 에서의 모든 단말의 전송전력의 합은 D-link 에서의 모든 단말의 전송전력의 합은 동일함을 증명하였다. U-link와 D-link가 전송전력의 합의 관점에서 Duality 관계를 가질 경우, U-link (또는 D-link) 에서의 전송전력을 최적화하는 송수신 단말쌍을 구하면 이를 D-link (또는 U-link)에 바로 적용할 수 있다는 점에서 효율적이다. U-Link 와 D-Link 간의 Duality 관계를 실험적으로 확인하기 위하여, link 의 개수를 증가시켜 가면서 소모되는 전송전력의 합을 추적해 보았다. 모든 단말들의 신호대 간섭비가 동일할 경우, U-Link의 D-Link의 전송전력의 합은 항상 동일함을 확인하였다. 반면, 단말들의 신호대 간섭비가 다른 경우에는 U-link와 D-link의 duality 관계는 성립하지 않음을 확인하였다.

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] N. Mahmud, "Vulnerabilities of LTE and LTE-Advanced Communication," White Paper, Rohde Schwarz, July 2014.
- [5] B. Schulz, "LTE Transmission Modes and Beamforming," White Paper, Rohde Schwarz, July 2015.

- [6] 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.
- [7] Keysight Technologies, "Performing LTE and LTE-Advanced RF Measurements with the E7515A UXM Wireless Test Set," Application Note, Keysight Technologies, March 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] 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] M. Han, "Opportunistic resource scheduling for D2D communication in OFDMA networks," *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 73, pp. 319-334, November 2014.
- [14] M. Han, "Opportunistic scheduling and incentive mechanism for OFDMA networks with D2D relaying," *Computer Networks*, Elsevier, Vol. 91, pp. 772-787, November 2015.
- [15] C. Oh, "Energy D2D Tx-Rx assignment in the Cellular System," *Journal of the Korea Society of Computer and Information* vol.22, no. 8, pp. 41-47, August 2017.

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.