

단말 간 직접 통신을 위한 그래프-컬러링 기반 간섭 회피 자원 할당 방법

이창희[°], 오성민^{*}, 박애순^{*}

Interference Avoidance Resource Allocation for Device-to-Device Communication Based on Graph-Coloring

Changhee Lee[°], Sung-Min Oh^{*}, Ae-Soon Park^{*}

요약

본 논문은 단말 간 직접 통신 (D2D: Device-to-Device) 시스템 환경에서 공간 재사용을 통한 성능 향상을 위해 그래프-컬러링 알고리즘을 기반으로 한 간섭 회피 자원 할당 방법을 제안한다. 다수의 D2D 페어가 하나의 D2D 통신 자원을 공유하는 경우, 인접한 D2D 페어로 인해 불가피한 간섭이 발생하게 되므로 간섭을 효율적으로 제어할 수 있는 자원 할당 방법이 필요하다. 따라서 우리는 D2D 페어가 기지국에 제공할 수 있는 피드백 양의 한계를 고려한 실용적인 피드백 정보 및 방법과 피드백 받은 정보를 활용한 그래프 설계 방법을 제안하고, 효과적인 간섭을 회피를 위한 그래프-컬러링 알고리즘을 도입한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 본 논문에서 제안한 자원 할당 방법이 기존의 자원 할당 방법에 비해 D2D 시스템의 총 용량과 스펙트럼 효율 측면에서 성능 이득을 가져오는 것을 확인할 수 있으며 D2D 페어의 통신 불가 확률을 감소시킴을 확인할 수 있다.

Key Words : device-to-device, resource allocation, graph-coloring, interference avoidance

ABSTRACT

In this paper, we propose interference avoidance resource allocation scheme based on graph-coloring algorithm to introduce performance gain using spatial reuse in D2D (Device-to-Device) system. By assigning multiple D2D pairs to a single D2D resource, interference from neighboring D2D pairs is inevitable, which leads to performance degradation. Therefore, we first introduce the feedback information and the method considering the amount of information that can be practically provided by a D2D pair. Then, we propose how to construct a graph, which is corresponding to the D2D system, using the feedback information and adopt a graph-coloring algorithm to efficiently avoid interference. Simulation results show that the proposed resource allocation scheme outperforms traditional resource allocation schemes in both overall sum rate and spectral efficiency of D2D system while reducing the outage probability. Moreover, the outage probability, which indicates a failure rate of D2D communication, can be reduced by adopting the proposed scheme.

* 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음.[14-000-04-001, 초연결 스마트 모바일 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심기술 개발]

° First and Corresponding Author : Wired & Wireless Access Research Department, Electronics and Telecommunications Research Institute (ETRI), ch.lee88@etri.re.kr, 정회원

* Wired & Wireless Access Research Department, ETRI, smoh@etri.re.kr, aspark@etri.re.kr, 정회원

논문번호 : KICS2014-08-329, Received August 28, 2014; Revised October 28, 2014; Accepted November 24, 2014

I. 서 론

Device-to-Device (D2D) 통신은 센터 노드 혹은 기지국을 거치지 않는 직접적인 단말 간 통신으로, 사용자 간 로컬 서비스의 활용을 극대화 시키며 시스템 용량 증대, 셀 커버리지 증가 등의 이점으로 차세대 이동통신 시스템의 하나의 요소로 연구되고 있다¹⁻³. 최근 3GPP (3rd Generation Partnership Project) 표준화 기구에서는 셀룰러 이동통신 시스템에 D2D 통신을 도입하기 위한 논의가 활발히 진행 중이며 LTE Release 12에는 공공 안전 서비스의 제공을 목적으로 한 D2D 통신이 도입될 예정이다^{4,5}.

D2D 통신은 앞서 언급한 것처럼 시스템 용량 증대 및 셀 커버리지 증가 등의 이점을 제공한다. 하지만, D2D 통신은 기존의 셀룰러 네트워크에 새로운 간섭 환경을 제공한다. 따라서 D2D 통신을 통한 이득을 취 하면서 기존의 셀룰러 네트워크의 성능 열하를 막기 위해 D2D 통신으로 인한 간섭을 제어하는 방법이 요구되고 있으며, 최근 D2D 통신으로 인한 간섭을 효과적으로 제어하기 위한 많은 연구가 진행되었다^{6-11,13-15}. 간섭 제어 방법은 크게 기지국이 단말로부터 피드백 받은 정보를 바탕으로 간섭 제어를 수행하는 중앙 집중식 제어 방식과 간섭 제어의 많은 기능을 단말에 분산시켜 단말이 스스로 간섭 제어를 수행하는 분산 제어 방식으로 나눌 수 있다. 특히, 중앙 집중 방식의 간섭 제어의 경우 기지국은 D2D 통신을 위해 최적의 자원 할당 혹은 전력 제어 방식을 적용할 수 있기 때문에 보다 높은 성능의 간섭 제어를 실현할 수 있다. 3GPP에서는 D2D 단말이 기지국이 제어할 수 있는 범위에 존재하는 경우, D2D 통신 링크를 위해 기지국이 D2D 단말에 자원을 할당하고 전력을 제어 하는 중앙 집중식 간섭 제어 방식을 사용하는 것으로 합의하였다⁴. 또한, 간섭 제어 기술로는 전력 제어, 자원 할당, 단말의 모드 선택 등을 통해 효과적으로 간섭을 제어함으로써 셀룰러 통신 및 D2D 통신의 일정 이상의 신뢰도를 보장하면서 시스템 전체의 용량을 증대시키는 많은 중앙 집중식 방법이 제안되었다.

그래프 이론은 기존의 셀룰러 네트워크 시스템에서의 자원 할당 방법 문제에 대한 수학적 모델링 및 솔루션을 제공하기 위해 도입되었다¹². 최근에는 D2D 시스템에서 셀룰러 단말의 자원을 재사용하기 위한 자원 할당 방법을 제공하기 위해 그래프 이론이 적용되었다¹³⁻¹⁵. 논문¹³의 저자들은 그래프-컬러링 알고리즘을 도입하여 하나의 D2D 페어를 하나의 셀룰러 단말이 사용하는 자원에 할당하는 방법을 제안하였다.

양분 그래프 (bipartite graph)의 가중 매칭(weight matching)이론을 도입하여 하나의 D2D 페어를 하나의 셀룰러 단말이 사용하는 자원에 할당하는 방법이 연구되었으며¹⁴, 반복적 알고리즘을 통해 하나 혹은 다수의 D2D 페어를 하나의 셀룰러 단말이 사용하는 자원에 할당하는 낮은 복잡도의 자원 할당 방법이 제안되었다¹⁵. 하지만, 앞서 언급한 논문의 경우 하나의 D2D 페어의 자원 할당 문제에 초점을 맞췄으며, 다수의 D2D 단말의 자원 재사용을 통한 D2D 시스템의 성능 향상을 고려하지 않았다^{13,14}. 또한, 기지국은 D2D 페어들이 추정된 모든 간섭 채널에 대한 정보를 제공받아야 하므로 실질적인 피드백 측면에서 제약이 따른다^{14,15}.

본 논문에서, 우리는 공간 재사용을 통한 D2D 시스템 성능 향상을 위해 기지국이 하나의 자원을 하나 혹은 다수의 D2D 페어에 할당하는 중앙 집중식 자원 할당 방법에 초점을 맞춘다. 공간 재사용을 통해 하나의 자원에 다수의 D2D 페어를 할당하는 경우, D2D 페어 간 불가피한 간섭이 발생할 수 있다. 따라서 우리는 D2D 페어 간 자원 공유로 인해 발생할 수 있는 간섭을 효과적으로 제어함으로써 D2D 시스템의 성능 향상을 성취하기 위해 그래프-컬러링 이론을 도입한다. 본 논문은 D2D 페어가 기지국에 제공할 수 있는 피드백 정보의 양을 고려하여 실제 시스템에 적용할 수 있는 실용적인 피드백 정보 및 방법을 제안하고, 제안한 피드백 정보를 활용하여 간섭 회피를 기반으로 한 그래프 설계 방법과 자원 할당 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해, 우리는 제안한 자원 할당 방법이 기존의 자원 할당 방법에 비해 D2D 시스템 전체적인 성능뿐만 아니라 각각의 D2D 페어 성능을 향상시키는 것을 확인한다.

II. D2D 시스템 모델

본 논문은 셀룰러 업링크 자원 중 D2D 통신을 위해 지정된 D2D 자원 풀(D2D resource pool)¹⁴을 N 개의 D2D 페어에게 할당하는 단일 셀 시나리오를 고려한다. 여기서, D2D 페어는 하나의 D2D Tx(D2D transmitter) 단말과 그 단말과 페어링 관계를 이루는 하나의 D2D Rx(D2D receiver) 단말을 일컫으며, D2D Tx 단말은 할당받은 자원을 통해 자신과 페어링 관계를 이루는 D2D Rx 단말과 D2D 통신을 수행한다. 또한, D2D 자원 풀은 D2D 페어에게 제공할 수 있는 K 개의 자원 블록(resource block)으로 구성되며, 하나의 자원 블록은 하나 혹은 다수의 D2D 페어

가 제공받을 수 있는 주파수·시간 단위의 자원을 의미한다. 할당 가능한 D2D 자원 블록보다 많은 다수의 D2D 페어가 자원을 요청하는 상황에서, 즉, $N > K$ 인 경우, 동일한 자원을 할당받은 D2D 페어 간 간섭이 불가피하게 발생하며 본 논문은 D2D 페어 간 간섭의 영향을 고려한 자원 할당 방법에 초점을 맞춘다. 본 장에서는 자원 재사용을 고려한 자원 할당 방법을 위한 기본적인 D2D 시스템 모델을 기술한다.

D2D 통신을 위한 자원 블록은 셀룰러 단말이 업링크를 위해 사용하는 자원과 주파수·시간에 직교한다. 즉, 기지국이 D2D 페어에게 할당하는 자원은 셀룰러 단말이 사용하는 업링크 자원과 직교하므로, 특정 D2D 페어의 D2D Rx 단말이 겪는 간섭은 그 D2D 페어에게 할당된 자원과 동일한 자원을 사용하는 D2D 페어에 의해서 결정된다. 그림 1은 4 개의 D2D 페어와 2 개의 할당 가능한 D2D 자원 블록을 갖는 D2D 시스템의 예시이다.

이때 n 번째 D2D 페어가 k 번째 D2D 자원 블록을 할당받을 경우, n 번째 D2D 페어의 D2D Rx 단말이 수신하는 신호, y_n ,는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n = \sqrt{P_0}g_{n,n}x_n + \sum_{m \neq n} \alpha_m^k \sqrt{P_0}g_{m,n}x_m + n_n \quad (1)$$

여기서, P_0 는 D2D 페어의 D2D Tx 단말의 송신 전력이며, 본 논문에서는 모든 D2D Tx 단말이 같은 송신 전력으로 D2D 통신을 수행하는 것을 가정한다. 채널 이득 $g_{m,n} = PL_{m,n}h_{m,n}$ 은 n 번째 D2D 페어의 D2D Rx 단말과 m 번째 D2D 페어의 D2D Tx 단말

사이의 pathloss와 small-scale fading을 고려한다. 마지막으로, x_n 은 n 번째 D2D 페어의 D2D Tx 단말의 송신 신호를 의미하며, n_n 은 n 번째 D2D 페어의 D2D Rx 단말의 수신단에 작용하는 N_0 의 분산을 갖는 열잡음을 나타낸다. 따라서 k 번째 D2D 자원 블록을 사용하는 n 번째 D2D 페어의 D2D Rx 단말의 SINR (Signal-to-Interference plus Noise Ratio)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$SINR_n = \frac{P_0g_{n,n}^2}{\sum_{m \neq n} \alpha_m^k P_0g_{m,n}^2 + N_0} \quad (2)$$

우리는 D2D 자원 블록이 특정 D2D 페어에 할당되었는지 여부를 나타내기 위해, 자원 공유 매칭 변수 α_m^k ($1 \leq m \leq N$ 과 $1 \leq k \leq K$)를 도입한다. α_m^k 가 1 인 경우, k 번째 D2D 자원 블록이 m 번째 D2D 페어에 할당되었음을 의미하며 α_m^k 가 0 인 경우 k 번째 D2D 자원 블록이 m 번째 D2D 페어에 할당되지 않았음을 의미한다.

기지국은 D2D 페어의 D2D Rx 단말이 특정 자원을 할당 받았을 경우의 잠재적 성능을 고려하여 자원 공유 매칭 변수를 설정할 수 있으며, 자원 공유 매칭 변수에 대한 아래의 최적화 솔루션을 통해 D2D 시스템의 총 용량을 최대화시키는 D2D 자원 블록을 D2D 페어에게 할당할 수 있다.

$$A_{opt} = \arg \max_A \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \alpha_n^k \log_2(1 + SINR_n) \quad (3)$$

$$s. t. \begin{cases} \sum_{n=1}^N \alpha_n^k \leq N \\ \sum_{k=1}^K \alpha_n^k = 1 \end{cases}$$

여기서 A 는 자원 공유 매칭 변수 α_n^k 을 성분으로 구성된 $N \times K$ 행렬을 나타낸다. 또한, 수식 (3)의 첫 번째 조건은 하나의 D2D 자원 블록에 최대 N 개의 D2D 페어가 할당 될 수 있게 공간(주파수·시간 단위의 자원) 재사용을 보장하며, 두 번째 조건은 하나의 D2D 페어는 오직 하나의 D2D 자원 블록을 할당받는 것을 보장한다.

D2D 시스템의 총 용량을 최대화 시키는 솔루션, A_{opt} ,을 제공하는 수식 (3)은 잘 알려진 NP-hard 문제이며, A_{opt} 는 모든 가능한 α_n^k 에 대한 전역 탐색 방법

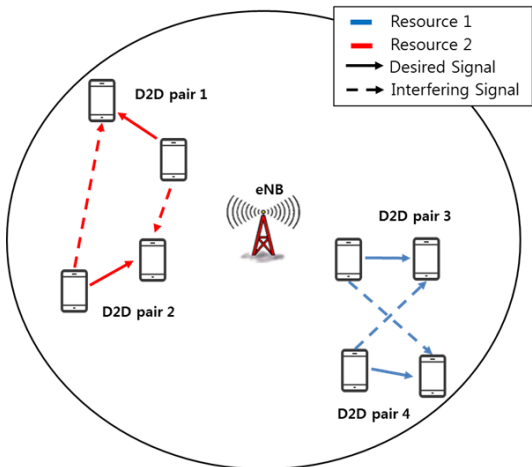


그림 1. D2D 시스템 모델
Fig. 1. D2D System Model

을 통해 제공될 수 있다. 최적화 문제 (3)의 $N > K$ 인 상황에서의 계산 복잡도는 다음과 같이 주어진다.

$$C_{exhaustive} = O\left(\frac{K^N}{K!}\right) \quad (4)$$

수식 (4)는 자원을 할당 받을 수 있는 D2D 페어의 수, N ,가 증가할수록 기하급수적으로 증가하며^[15], 매우 높은 계산 복잡도를 갖는다. 또한, 최적화 솔루션을 제공하기 위해 기지국은 모든 D2D 페어로부터 D2D Rx 단말이 측정하는 원하는 신호 및 모든 간섭 신호에 대한 채널 정보를 피드백 받아야 한다. 따라서 D2D 시스템의 총 용량을 최대화시키는 최적의 자원 할당 방법은 기지국에서의 복잡도와 D2D 페어가 제공해야 하는 피드백 정보의 양을 고려하였을 때 실제 D2D 시스템에 도입하기에는 다소 실용적이지 않다. 따라서 본 논문에서는, D2D 페어가 제공해야 하는 피드백 양과 기지국에서의 복잡도를 고려한 간섭 회피 기반 자원 할당 방법을 제안한다.

III. 그래프-컬러링 이론을 도입한 자원 할당 방법

앞 장에서 언급한 것처럼, D2D 시스템에서 공간 재사용을 이용한 최적의 자원 할당 방법은 기지국에서의 자원 할당 시 발생하는 복잡도 문제와 D2D 페어가 제공해야 할 과도한 피드백 정보의 양이라는 두 가지 측면에 의해 실제 D2D 시스템에 도입하기에 제약이 따른다. 따라서 본 장에서 실제 D2D 시스템에서 지원 가능한 피드백 정보 및 그 절차와, 제공받은 정보를 활용한 기지국에서의 간섭 회피 기반 그래프를 설계방법, 그리고 그래프-컬러링 알고리즘을 도입한 공간 재사용 기반 자원 할당 방법을 살펴본다.

3.1 실용성을 고려한 피드백 방법

기존의 논문들이 제안한 기지국의 간섭 인지 (Interference-Aware) 기반 자원 할당 방법의 경우, 기지국은 D2D 단말로부터 원하는 신호 및 간섭 신호에 대한 채널 정보를 제공 받는 것을 가정한다. 하지만, 우리는 D2D Rx 단말이 수신하는 신호의 채널 정보를 직접 기지국에 피드백하는 대신, 자신에게 강한 간섭을 미치는 인접한 D2D 페어를 선별하고 그 D2D 페어에 해당하는 식별자 정보를 기지국에 제공하는 방법을 제안한다.

D2D Rx 단말은 인접한 D2D 페어의 D2D Tx 단말에 의한 간섭을 측정한다. 그 측정 방법으로는 간섭

신호의 received signal received power 등의 수신 신호 세기를 기반으로 한 측정 방법 혹은 SINR 기반의 채널 정보를 기반으로 한 측정 방법을 사용할 수 있으며, 본 논문에서는 채널 이득 및 채널 정보를 고려한 특정 D2D 페어의 D2D Tx 단말에 의한 간섭 크기를 간섭 영향의 척도로 사용한다.

D2D Rx 단말은 인접한 D2D 페어의 D2D Tx 단말을 고려한 간섭 신호의 크기를 측정 후, 간섭 신호의 크기가 가장 큰 상위 $K-1$ 개의 D2D 페어에 대한 식별자 정보를 이용하여 HIDL (High Interfering D2D List)을 구성하고, 그 리스트를 자신과 페어를 이루는 D2D Tx 단말에게 보고한다. 여기서, 각각의 D2D 페어의 D2D Rx 단말이 작성한 HIDL은 D2D 페어의 식별자 혹은 식별이 가능한 인덱스 정보이기 때문에 그 피드백 되는 정보의 양은 채널 정보에 비해 상당히 작으며, 가장 큰 간섭을 미치는 $K-1$ 개의 D2D 페어에 대한 정보를 제공한다. 전체적인 간섭은 간섭의 세기가 가장 큰 성분이 지배적으로 작용하기 때문에^[6], 기지국은 HIDL의 정보를 활용한 자원 할당 방법을 통해 그 리스트를 제공한 D2D Rx 단말이 겪는 간섭의 영향을 상당히 감소시킬 수 있다.

D2D 통신을 수행하기 위해, D2D 페어의 D2D Tx 단말은 기지국에 D2D Buffer Status Report(BSR)를 통한 자원 할당 요청 시에 자신과 페어를 이루는 D2D Rx 단말로부터 제공받은 HIDL 정보를 함께 보고한다. 기지국은 D2D 페어로부터 피드백 받은 정보를 고려하여 간섭 회피 기반 그래프를 설계하고, 그래프 컬러링 알고리즘을 기반으로 한 자원 할당 알고리즘을

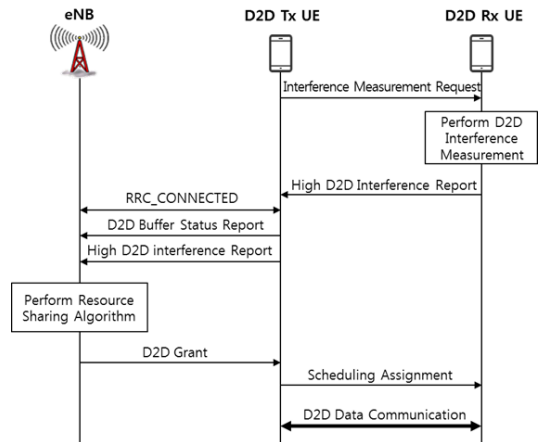


그림 2. D2D 자원 할당을 위한 시그널링 절차
Fig. 2. Signalling Procedure for D2D Resource Assignment

통해 각각의 D2D 페어를 위한 D2D 자원 블록을 선택하고, D2D Grant 메시지를 통해 해당 D2D 페어가 어떤 D2D 자원 블록을 사용하여 D2D 통신을 수행할지에 대한 자원 정보를 할당한다. 마지막으로, 기지국으로부터 D2D Grant 메시지 전달받은 D2D Tx 단말은, Scheduling Assignment 메시지를 통해 자신과 페어를 이루는 D2D Rx 단말에게 D2D 통신을 수행하기 위해 할당받은 D2D 자원 블록 정보를 제공한다. 하나의 D2D 페어가 D2D 통신을 수행하기 위한 자원 할당 방법에 대한 전반적인 시그널링 절차는 그림 2와 같다.

위에서 언급한 절차를 따라 기지국은 D2D 페어로부터 피드백을 제공받으며, 이 정보를 활용하여 그래프 이론적 접근을 통해 D2D 시스템의 자원 할당 방법을 제공한다.

3.2 간섭 회피 기반 그래프 설계

간섭의 영향을 완화시키기 위한 자원 할당 방법을 소개하기에 앞서, D2D Rx 단말이 제공한 HIDL의 강한 간섭원 정보를 고려한 간섭 회피 기반 그래프의 설계 방법을 살펴보자. 우리는 간섭 회피 기반 그래프를 $G=(V,E)$ 라고 정의한다. 여기서, $V=\{v_n\}$, $1 \leq n \leq N$,는 그래프의 꼭짓점을 나타내며, $E=\{e_{n,m}\}$, $n \neq m$, $1 \leq n, m \leq N$,는 서로 다른 두 개의 꼭짓점을 연결하는 모서리를 의미한다. $\Delta(G)$ 는 그래프 G 가 가질 수 있는 최대 자유도를 나타낸다. 여기서, 자유도는 하나의 꼭짓점, v_n ,이 갖는 모서리로 연결된 인접한 꼭짓점의 수를 의미하며, v_n 이 갖는 자유도는 $\sum_{n \neq m} e_{n,m}$ 으로 결정된다. D2D 페어로부터 피드백 된 HIDL 정보를 이용하여 간섭 회피 기반 그래프를 설계하기 위해 다음의 규칙을 적용한다.

- 꼭짓점은 D2D 통신을 위해 자원 할당을 요청한 D2D 페어를 의미한다.
- 모서리는 서로 다른 두 꼭짓점(D2D 페어)을 연결하며, 인접한 D2D 페어가 강한 간섭을 미치는지 여부를 포함하고 있는 각각의 D2D 페어로부터 피드백 된 HIDL 정보를 이용하여 서로 다른 두 D2D 페어가 같은 색으로 칠해질 수 없음을 나타낸다.
- 꼭짓점을 칠하는 각각의 색은 D2D 통신을 위해 할당된 D2D 자원 블록을 의미한다.
- 하나의 꼭짓점이 가질 수 있는 자유도는 최대 $K-1$ 로 제한한다.

앞서 언급한 그래프 설계 규칙을 통해, D2D 시스템에서의 간섭의 영향을 고려한 간섭 회피 기반 자원 할당 방법을 도출할 수 있다. 즉, n 번째 D2D 페어가 제공한 HIDL에 m 번째 D2D 페어가 포함된 경우, 두 D2D 페어를 의미하는 꼭짓점은 모서리 $e_{n,m}$ 으로 연결된다. 따라서 모서리 $e_{n,m}$ 로 연결된 두 꼭짓점 v_n 과 v_m 은 서로에게 큰 간섭을 미치므로, 기지국은 잘 알려진 그래프-컬러링 알고리즘을 통해 두 꼭짓점에 서로 다른 색깔(자원)을 할당하여 간섭을 회피하도록 보장한다. 마지막 규칙을 설명하기에 앞서 아래의 법칙(Lemma)을 소개한다.

Lemma: 그래프, G ,의 모서리가 갖는 최대 자유도, $\Delta(G)$,가 N 인 경우, 그리디 컬러링 알고리즘(greedy coloring algorithm)을 통해 G 는 최대 $N+1$ 개의 색으로 칠해질 수 있다.

Proof: $\chi(G) \leq \Delta(G)+1$ (Proposition 5.1.13. 참고^[17]). 여기서 $\chi(G)$ 는 크로매틱 수(chromatic number)이며, 그래프 G 가 k 개의 색으로 칠해질 수 있는 가장 작은 k 로 정의된다.

III-1 절의 피드백 방법에서 언급한 것처럼 하나의 D2D 페어가 제공하는 HIDL이 포함하는 강한 간섭원으로 작용하는 D2D 페어의 수는 최대 $K-1$ 로 제한된다.

따라서 앞서 언급한 마지막 규칙을 통해 그래프, G ,가 갖는 최대 자유도, $\Delta(G)$,는 $K-1$ 로 제한될 수 있으며, 기지국이 자원을 요청한 모든 D2D 페어에 할당해야 할 자원 블록의 수는 최대 K 개로 제한한다. 즉, D2D 통신을 요청한 N 개의 모든 D2D 페어는 간섭 회피 기반 자원 할당 방법을 통해 최대 K 개의 D2D 자원 블록에 할당될 수 있다.

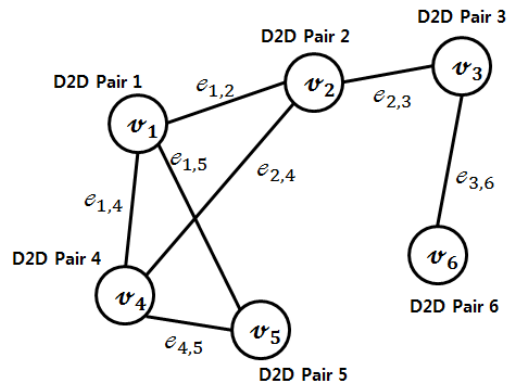


그림 3. 간섭 회피 기반 그래프 설계 예시 (N=6)
Fig. 3. Example of Interference-Avoidance Graph Construction (N=6)

그림 3은 이해를 돕기 위한 $N=6$ 인 D2D 시스템의 그래프 설계 예시이며, D2D 페어 4는 강한 간섭원으로 작용하는 D2D 페어 1, 2, 그리고 5에 대한 식별자 정보를 HIDL을 통해 기지국에 피드백한 경우이다. 간섭 회피 그래프 설계 시, D2D 페어 4는 강한 간섭원으로 작용하는 D2D 페어를 의미하는 꼭짓점 v_1 , v_2 , 그리고 v_5 와 각각 모서리 $e_{1,4}$, $e_{2,4}$, 그리고 $e_{4,5}$ 를 통해 연결되며, 그래프-컬러링 알고리즘을 통해 다른 색깔을 할당받는다. 따라서 그래프-컬러링 기반 자원 할당 방법을 통해, 기지국은 D2D 페어 4에 미치는 D2D 페어 1, 2, 그리고 5의 강한 간섭을 고려하여 다른 D2D 자원 블록을 할당함으로써, 효과적으로 D2D 페어가 겪을 수 있는 심한 간섭을 회피할 수 있다.

3.3 그래프-컬러링 알고리즘

간섭 회피를 기반으로 한 그래프를 설계한 후, 우리는 잘 알려진 그리디 컬러링 알고리즘^[17]을 통해 D2D 통신을 요청하는 다수의 D2D 페어를 위한 자원 할당 방법을 제공한다. 여기서 그리디 컬러링 알고리즘은 그래프의 색을 칠할 때 높은 자유도를 갖는 꼭짓점에 우선순위를 부여하는 방법이다. 본 논문에서 제안한 자원 할당 알고리즘은 그림 4와 같다.

여기서 $HIDL_n$ 은 n 번째 D2D 페어가 제공하는 HIDL을 의미하며, 하나의 꼭짓점에 할당 가능한 자원 블록의 집합은 $C = \{c_1, \dots, c_K\}$ 으로 정의된다.

기지국은 제안한 자원 할당 알고리즘을 통해, 서로

심각한 간섭원으로 작용할 수 있는 D2D 페어들에 서로 다른 D2D 자원 블록을 할당함으로써 D2D 페어들 간 발생할 수 있는 간섭 상황을 효과적으로 회피할 수 있다. 본 논문에서 제안한 알고리즘의 계산 복잡도는 다음과 같다.

$$C_{proposed} = O(KN^2) \tag{5}$$

제안한 알고리즘의 계산 복잡도 (5)는 D2D 페어의 수, N ,의 다항식으로 표현되며, 최적 자원 할당 방법의 계산 복잡도 (4)와 비교해 볼 때 효율적으로 계산 복잡도를 감소시키는 것을 확인할 수 있다.

3.4 D2D 단말의 추가적 기능

본 논문에서 제안하는 자원 할당 방법은 D2D 페어로부터 제공받은 피드백 정보를 활용하여 기지국이 D2D 통신 링크를 위해 자원을 할당하는 단말-지원 중앙 집중식 자원 할당 방식이다. 따라서 본 논문에서 제안하는 공간 재사용을 고려한 간섭 회피 자원 할당 방법을 지원하기 위해, 단말은 몇 가지 추가적인 기능을 필요로 한다. D2D 단말은 인접한 D2D 페어가 제공하는 간섭을 인지하고 간섭 크기에 따른 리스트를 생성하는 기능과 작성한 리스트 정보를 D2D 통신을 위한 자원 요청 시 기지국에 제공하는 기능이 필요하다. 따라서 본 논문에서 제안한 자원 할당 방법을 지원하기 위한 D2D Tx 단말의 기능 흐름도는 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

Phase 1: Graph Construction

- 1) Construct vertices $v_n \in V$
- 2) For $m \neq n$
If $HIDL_n$ contains an identifier of the m -th D2D pair,
Construct an edge $e_{n,m}$ with its value equals to 1
- 3) Update $\Delta(G)$

Phase 2: Greedy Coloring

- 1) Find $V = \{v_n\}$ with $\Delta(G)$
- 2) Initialize $C = \{c_1, \dots, c_K\}$
- 3) For $m \neq n$
If $e_{n,m} = 1$
Remove the element in C which is assigned to v_n
- 4) Assign a resource block $c_k \in C$ to v_n
- 5) Update $V \leftarrow V - \{v_n\}$ and $\Delta(G)$
- 6) Go back to Phase 2-1) until $V = \emptyset$

그림 4. 그리디 컬러링을 기반으로 한 자원 할당 알고리즘 Fig. 4. Resource Allocation Algorithm Based on Greedy Coloring

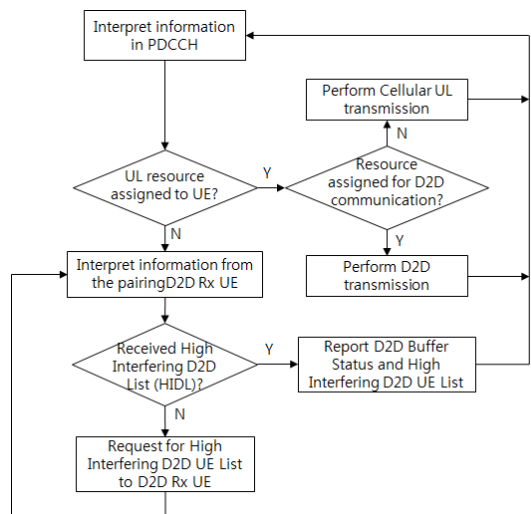


그림 5. D2D 자원 할당을 위한 D2D Tx 단말의 기능도 Fig. 5. Functionality of D2D capable Device for D2D Resource Assignment

IV. 그림과 표

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 그래프-컬러링 이론을 기반으로 제한한 자원 할당 방식의 성능과 그 결과를 기술한다. 우리는 시뮬레이션을 위해 단일 셀 D2D 시스템 상황을 고려한다. N 개의 D2D Tx 단말은 셀 내에서 균등 분포를 따라 랜덤하게 위치하며, 각각의 D2D Tx 단말과 D2D 페어를 이루는 D2D Rx 단말은 일정한 거리, $d = 50m$, 만큼 떨어진 위치에 분포한다. 기지국은 D2D 페어의 D2D 통신을 위해 2 Physical Resource Block (PRB) 크기를 갖는 K 개의 D2D 자원 블록을 할당한다. 본 시뮬레이션에 사용된 기타 파라미터는 표 1과 같으며, 3GPP 표준화 기구에서 정의한 시뮬레이션 파라미터 결정사항을 반영하였다^[4]. 본 논문에서 제한한 자원 할당 방식의 성능을 비교하기 위해 사용된 자원 할당 방법과 그 특징은 다음과 같다.

- **No frequency reuse scheme:** 이 자원 할당 방법은 공간 재사용을 고려하지 않으며, K 개의 D2D 페어를 임의로 선택하여 각각 서로 다른 D2D 자원 블록을 할당하는 방법으로 인접한 D2D 페어에 의한 간섭이 없으며, $N - K$ 개의 D2D 페어는 자원을 할당 받지 못함.
- **Random resource allocation scheme:** 이 자원 할당 방법은 공간 재사용을 고려하며, N 개의 D2D 페어에게 임의로 선택된 D2D 자원 블록을 할당하는 방법으로 간섭에 의한 영향이 고려되지 않음.
- **Proposed resource allocation scheme:** 이 자원 할당 방법은 공간 재사용을 고려하며, 본 논문에서 제안한 그래프 설계를 바탕으로 잘 알려진 그

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation Parameters

Simulation Parameters	Values
Cell radius	2000 m
Center frequency	1.5 GHz
Pathloss Model	Pathloss Model ^[4]
Bandwidth of a resource block	2 PRBs (360 kHz)
Number of resource block (K)	5
Distribution of D2D pairs	Uniform distribution
Distance between D2D Tx and D2D Rx devices (d)	50 m
D2D Tx Power (P_0)	23 dBm
Noise spectral density	-174 dBm/Hz
Noise Figure	9 dB

리디 컬러링 알고리즘^[7]을 통해 N 개의 D2D 페어에 간섭 회피를 고려하여 D2D 자원 블록을 할당함.

그림 6과 그림 7은 각각 D2D 통신을 위해 자원을 요청한 D2D 페어 N 의 증가에 따른 D2D 시스템의 총 용량과 그 스펙트럼 효율의 변화를 나타낸 그래프이다. 공간 재사용을 사용하지 않는 경우 D2D 페어 수의 증가와 관계없이 D2D 자원 블록의 수만큼 자원을 할당 받으며, 자원을 할당받은 D2D 페어는 인접한 D2D 페어에 의한 간섭의 영향이 없다. 따라서 D2D 시스템의 총 용량은 D2D 페어의 수와 관계없이 일정한 값을 갖는다. 랜덤하게 자원을 할당하는 방식과 본 논문에서 제안한 자원 할당 방법은 하나의 D2D 자원 블록을 하나 혹은 다수의 D2D 페어에 할당함으로써 D2D 페어의 수가 증가할수록 D2D 시스템의 총 용량은 증가한다. 따라서 공간 재사용을 활용한 자원 할당 방법은 D2D 통신을 요청한 D2D 페어의 수가 많을수록 D2D 시스템 관점에서 효율적이며, 특정한 시간에 다수의 D2D 페어가 동시에 D2D 통신을 수행할 수

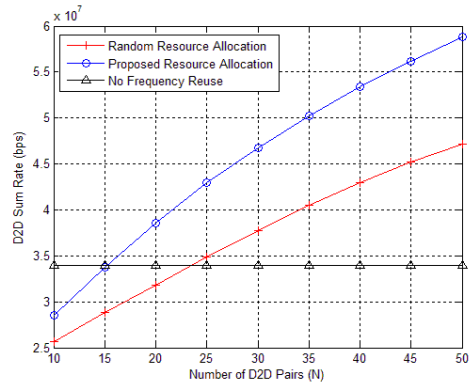


그림 6. D2D 시스템의 총 용량 비교
Fig. 6. Comparison of Sum rate of D2D System

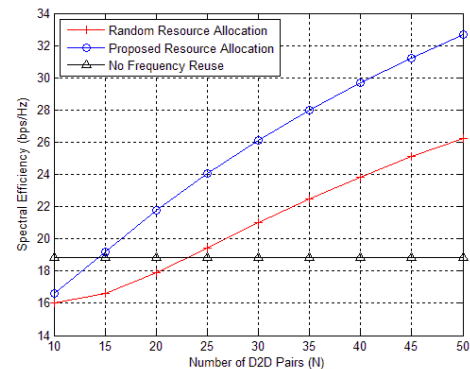


그림 7. D2D 시스템의 스펙트럼 효율 비교
Fig. 7. Comparison of Spectral Efficiency of D2D System

있다는 장점을 갖는다. 그림 6의 결과를 살펴보면, 제안한 자원 할당 방법이 랜덤하게 자원을 할당하는 방법에 비해 D2D 시스템의 총 용량 관점에서 약 25% 이상의 성능 향상을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 제안한 기법은 인접한 D2D 페어에 의한 간섭을 고려하여 D2D 페어에 자원을 할당하기 때문에 상대적으로 간섭의 영향이 강한 인접한 D2D 페어에 서로 다른 자원을 할당할 가능성이 높으며 이는 D2D 시스템의 총 용량 관점에서 성능 이득을 제공한다. 그림 7의 경우 D2D 시스템의 스펙트럼 효율을 나타낸다. D2D 시스템의 스펙트럼 효율 역시 D2D 시스템의 총 용량과 비슷한 양상을 확인할 수 있으며, 제안한 자원 할당 방법은 랜덤 자원 할당 방법 대비 약 25%의 성능 이득을 갖는다.

그림 8은 D2D 시스템에 $N=50$ 개의 D2D 페어가 분포할 때, 각각의 D2D 페어가 제공할 수 있는 용량의 cumulative density function (CDF) 그래프이다. 그래프를 확인해 보면, 제안한 자원 할당 방법을 사용하는 전체 D2D 페어 중 약 70%가 1 Mbps 이상의 D2D 용량을 제공할 수 있는 반면에, 랜덤 자원 할당 방법의 경우 전체 D2D 페어 중 약 40%만이 1 Mbps 이상의 D2D 용량을 제공할 수 있는 것으로 확인된다. 따라서 본 논문에서 제안한 간섭 회피 기반 자원 할당 방법의 경우, 랜덤하게 자원을 할당한 방법에 비해 각각의 D2D 페어 관점에서 상대적으로 더 높은 용량을 제공하는 것을 확인할 수 있다.

D2D 통신에 있어서 시스템 전체의 용량 혹은 D2D 페어 당 용량은 중요한 척도로 통용된다. 하지만, D2D 페어의 용량 관점의 분석은 실제 특정 D2D 페어의 통신 가능 여부의 확인이 불가능하기 때문에 우리는 그림 9과 표 2를 통해 SINR 관점에서 제안한 자

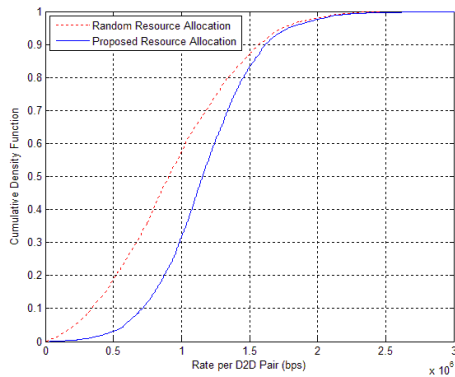


그림 8. D2D Pair의 Rate CDF 성능 비교
Fig. 8. Comparison of Cumulative Density Function of Rate per D2D Pair

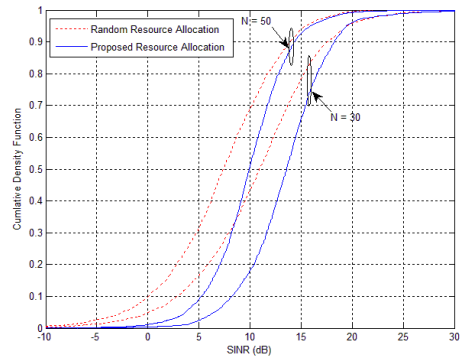


그림 9. SINR의 CDF 성능 비교
Fig. 9. Comparison of Cumulative Density Function of SINR

표 2. 자원 할당 방법에 따른 Outage 확률 비교
Table 2. Comparison of Outage Probability between Resource Allocation Schemes

Scheme	Number of D2D Pairs (N)	Outage Probability (%)		
		SINR Threshold (dB)		
		-5 dB	0 dB	5 dB
Random Resource Allocation	N = 30	1.40	4.97	16.50
	N = 50	2.64	9.68	31.48
Proposed Resource Allocation	N = 30	0.03	0.40	2.47
	N = 50	0.16	1.20	9.04

원 할당 방법의 성능을 분석한다. 그림 9은 D2D 시스템에 $N=30, 50$ 개의 D2D 페어가 각각 분포할 때, 각각의 D2D 페어를 구성하는 D2D Rx 단말의 SINR에 대한 CDF 그래프이다. 본 논문에서 제안한 자원 할당 방법은 강한 간섭의 원인이 되는 인접한 D2D 페어와의 동일한 자원할당을 피하기 때문에 랜덤으로 자원을 할당한 방법에 비해 상대적으로 높은 SINR의 분포를 띤다. 표 2는 $N=30, 50$ 인 경우, 특정 SINR 임계값의 설정 시에 자원 할당 방법에 따른 통신 불능 확률 (outage probability)을 나타낸다. 여기서, 통신 불능 확률은 특정 D2D 페어가 D2D 통신을 보장하는 최소한의 SINR 임계값을 만족하지 못하는 경우로 정의한다. 표에서 확인할 수 있듯이, 랜덤하게 자원을 할당하는 방법의 경우 본 논문에서 제안한 자원 할당 방법에 비해 적게는 1.9 배에서 크게는 3.7 배의 통신 불능 확률을 갖으며, 제안한 자원 할당 방법은 D2D 통신이 가능한 환경을 제공할 확률이 더 높은 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서, 우리는 공간 재사용을 통한 D2D 시스템의 성능 향상을 위해 그래프-컬러링 알고리즘에 기반을 둔 간섭 회피 자원 할당 방법을 제안하였다. 공간 재사용을 통해 하나의 D2D 자원 블록에 다수의 D2D 페어를 할당하는 경우, 불가피한 간섭이 발생하게 되는데, 우리는 D2D 페어가 기지국에 제공할 수 있는 피드백 양의 한계와 기지국에서의 복잡도를 고려한 간섭 회피 기반 자원 할당 방법을 제안하였다. 또한, D2D 페어로부터 피드백 받은 정보를 활용하여, 인접한 D2D 페어의 간섭을 회피하기 위한 그래프 설계 방법 및 그래프-컬러링 알고리즘을 도입하였다. 시뮬레이션 결과, 제안한 간섭 회피 기반 자원 할당 방식은 랜덤 자원 할당 방식에 비해 D2D 시스템 전체적인 용량 및 주파수 효율의 이득뿐만 아니라, 단일 D2D 페어 관점에서도 용량 및 SINR의 향상과 통신 불능 확률의 감소를 제공하는 것을 확인할 수 있었다.

References

- [1] K. Doppler, M. P. Ranne, C. Wijting, C. B. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 12, pp. 42-49, Dec. 2009.
- [2] L. Lei, D. Z. Zhang, C. Lin, and X. M. Shen, "Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 9, no. 3, pp. 96-104, Dec. 2009.
- [3] Y. Hwang, K. W. Sung, and S.-L. Kim, "Feasibility of massive device-to-device communications in cellular networks," *J. KICS*, vol. 37, no. 12, pp. 1091-1101, Dec. 2012.
- [4] 3rd Generation Partnership Project (3GPP) TR 36.843; Technical Specification Group RAN; *Study on LTE Device to Device Proximity Services-Radio Aspects*, Mar. 2014.
- [5] X. Lin, J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Ratasuk, "An overview of 3GPP device-to-device proximity services," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 4, pp. 40-48, Apr. 2014.
- [6] D. Feng, L. Lu, Y. Yuan-Wu, G. Y. Li, G. Feng, and S. Li, "Device-to-device communications underlying cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 8, pp. 3541-3551, Aug. 2013.
- [7] T.-S. Kim, S.-J. Lee, C.-H. Lim, S. Ryu, and C.-H. Cho, "A novel frequency planning and power control scheme for device-to-device communication in OFDMA-TDD based cellular networks using soft frequency reuse," *J. KICS*, vol. 37, no. 10, pp. 885-894, Oct. 2012.
- [8] H. Lee, H. H. Choi, S. Jung, S.-C. Chang, and D.-S. Kwon, "Performance evaluation of device-to-device communications based on system-level simulation in cellular networks," *J. KICS*, vol. 38B, no. 4, pp. 229-239, Apr. 2013.
- [9] H. Min, J. Lee, S. Park, and D. Hong, "Capacity enhancement using an interference limited area for device-to-device uplink underlying cellular networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 3995-4000, Dec. 2011.
- [10] C.-H. Yu, K. Doppler, C. B. Ribeiro, and O. Tirkkonen, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2752-2763, Aug. 2011.
- [11] C. Xu, L. Song, Z. Han, Q. Zhao, X. Wang, X. Cjemg, and B. Jiao, "Efficiency resource allocation for device-to-device underlay communication systems: a reverse iterative combinatorial auction based approach," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 31, no. 9, pp. 348-358, Sept. 2013.
- [12] R. Y. Chang, Z. Tao, J. Zhang, and C. C. J. Kuo, "Multicell OFDMA downlink resource allocation using a graphic framework," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 58, no. 7, pp. 3494-3507, Sept. 2009.
- [13] D. Tsolkas, E. Liotou, N. Passas, and L. Merakos, "A graph-coloring secondary resource allocation for D2D communications in LTE networks," in *Proc. IEEE CAMAD*,

pp. 56-60, Barcelona, Sept. 2014.

- [14] X. Lin, J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Ratasuk, "Graph-based resource allocation for D2D communications underlying cellular networks," in *Proc. IEEE/CIC*, pp. 187-192, Xi'an, China, Aug. 2013.
- [15] R. Zhang, X. Cheng, L. Yang, and B. Jiao, "Interference-aware graph based resource sharing for device-to-device communications underlying cellular networks," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 140-145, Shanghai, China, Apr. 2013.
- [16] V. Mordachev and S. Loyka, "On node density-outage probability tradeoff in wireless networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 27, no. 7, pp. 1120-1131, Sept. 2009.
- [17] D. B. West, *Introduction to Graph Theory*, 2nd Ed., Prentice Hall, 2001.

이 창 희 (Changhee Lee)



2011년 2월 : 고려대학교 전기
전자전파공학부 졸업
2013년 2월 : 고려대학교 전자
전기컴퓨터공학과 석사
2013년 3월~현재 : 한국전자통
신연구원 연구원

<관심분야> 5G 이동통신 시스템, multi-user MIMO, 단말간 직접 통신 시스템

오 성 민 (Sung-Min Oh)



2004년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 졸업
2006년 2월 : 아주대학교 전자
공학과 석사
2011년 8월 : 아주대학교 전자
공학과 박사
2011년 9월~현재 : 한국전자통
신연구원 선임연구원

<관심분야> 5G 이동통신 시스템, 이동통신 프로토
콜, End-to-End QoS Provisioning

박 애 순 (Ae-Soon Park)



1987년 2월 : 충남대학교 전자
계산학과 졸업
1997년 8월 : 충남대학교 전자
공학과 석사
2001년 8월 : 충남대학교 정보
통신학과 박사
1988년 2월~현재 : 한국전자통
신연구원 책임연구원

2001년 9월~2002년 8월 : 충남대학교 겸임교수
2006년 3월~2008년 2월 : UST 교수
2012년 9월~현재 : UST 교수
<관심분야> 5세대 이동통신 시스템, IP 이동성/핸드
오버, 이동통신 프로토콜