

논문 2010-47TC-7-11

OFDMA 셀룰러 네트워크에서 적응적인 Group-wise Subset Reuse 기반 Device-to-device 공유 자원 할당 기법

(A Device-to-device Sharing-Resource Allocation Scheme based on Adaptive Group-wise Subset Reuse in OFDMA Cellular Network)

김 지 은*, 김 낙 명**

(Ji-Eun Kim and Nak-Myeong Kim)

요 약

셀룰러 네트워크 내에서 cellular 링크와 무선 자원을 공유하는 device-to-device(D2D) 링크는 자신이 속한 셀룰러 네트워크에 심각한 간섭을 줄 가능성이 높기 때문에 그것을 방지하기 위해서는 무선 자원 할당의 최적화가 중요하다. 본 논문에서는 D2D 링크가 자신의 간섭을 최소화하면서 효율적으로 cellular 링크와 공존하기 위해서 subset reuse 방법을 기반으로 하는 자원 할당 기법에 대해 제안한다. Cellular 링크와 D2D 링크 주파수 자원 할당의 효율성을 높이기 위하여 셀 상황에 따라 가변적인 subset 크기를 가지는 group-wise subset reuse 방법을 제안한다. 또한, cellular 링크가 같은 주파수 대역을 사용하는 D2D 전송에 의해 간섭을 받는 경우, D2D 링크의 power를 최적화하여 cellular 링크로의 간섭을 최소화하게 된다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 통하여 link SINR에서 성능 이득을 가지며, local traffic이 증가할수록 전체 cell throughput이 높아짐을 보였다.

Abstract

Device-to-device(D2D) links which share resources in a cellular network present a challenge in radio resource management due to the potentially severe interference they may cause to the cellular network. In this paper, a resource allocation scheme based on subset reuse methods is proposed to minimize the interference from the D2D links. We consider an adaptive group-wise subset reuse method to enhance the efficiency of frequency resource allocation for cellular and D2D links. A power optimization scheme is also proposed for D2D links if cellular links are interfered by adjacent D2D transmissions. The computer simulation results show that performance gain is obtained in link SINR, and total cell throughput increases as nearby traffic becomes more dominant.

Keywords : device-to-device(D2D), resource allocation, subset reuse method, power optimization

I. 서 론

차세대 이동통신 시스템에서는 고용량의 데이터 전송 및 다양한 서비스를 제공하기 위한 양질의 통신 환경

구축이 요구된다. 한정된 주파수 자원에 의한 제약이 큰 무선 셀룰러 네트워크 환경에서는 특히 할당된 스펙트럼이 잘 활용되지 못하는 경우에 대한 고찰이 있어왔다. 무선 주파수자원의 활용 효율을 높이기 위하여, IMT-Advanced 시스템에서는 셀룰러 네트워크 내에서 직접적인 device-to-device(D2D) 통신을 허용하는 방안을 제안하고 있다. D2D 사용자들은 셀룰러 네트워크의 제어 하에 cellular 사용자들과 같은 무선 자원을 공유한다. 직교주파수분할 다중접속방식(OFDMA)을 사용하는 셀룰러 네트워크에서의 D2D 통신은 cellular 통신과 subcarrier들의 집합인 sub-channel을 동시에 공유하여

* 학생회원, 이화여자대학교 전자공학과 (Ewha W. University)

** 평생회원, 이화여자대학교 (Ewha W. University)

※ 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략 기술인력양성사업 및 BK21 연구사업의 지원으로 수행된 연구결과임

접수일자: 2010년4월27일, 수정완료일: 2010년7월14일

전송하는 것도 가능하다. 이런 경우에, D2D와 cellular 링크가 같은 주파수 대역을 사용하기 때문에 D2D 전송이 cellular 링크에서의 통신에 방해가 되는 간섭을 주지 않도록 보장하는 것이 중요하다.

최근 D2D 링크로부터의 간섭을 최소화시키기 위한 자원 할당 연구가 활발히 진행되어 왔다. [1]에서는 cellular 링크가 단말(User Equipment(UE))이 요구하는 최소 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR) 아래로 떨어지지 않으면서 같은 스펙트럼 자원을 공유할 수 있는 D2D 네트워크를 만드는 스펙트럼 공유 프로토콜이 제안되었다. 이것은 D2D와 cellular 링크가 같은 스펙트럼을 공유한다는 것에 의의가 있지만, 하나의 셀 내에서 모든 단말이 주파수와 시간 자원을 sub-channel까지 모두 같은 것으로 공유하였다. [2], [3]의 저자는 D2D 링크를 만들어서 셀룰러 네트워크의 multi-user diversity를 높이기 위해, 간섭을 고려한 자원 할당과 power 최적화 기법을 연구하였다. 이 경우에는, 주파수 자원들이 cellular 링크, D2D 링크에 관계없이 무작위로 할당되어 두 링크 사이의 충돌이 많을 가능성이 높았다.

본 논문에서는 OFDMA 셀룰러 네트워크 내에서 cellular와 D2D 링크가 같은 자원을 공유하며 효율적으로 공존하기 위해서, D2D 전송을 위한 공유자원 할당 기법에 대해 제안한다. 셀룰러 네트워크에서 우선권을 가지는 cellular 통신을 위한 조건들이 충족되지 못하여 D2D 통신을 하는 것이 유리할 때, D2D 링크를 생성함으로써 자원 활용도를 높이면서 큰 데이터 전송도 가능하도록 하는데 목적이 있다. 본 논문에서는 sub-channel을 할당하는데 있어서 각 셀마다 셀의 상황에 따라 subset의 크기를 가변적으로 설정하는 group-wise subset reuse 방법을 사용한다고 가정한다. 이 방법은 cellular와 D2D 링크 사이의 충돌을 최소화시키고 D2D가 cellular에게 줄 수 있는 간섭도 최대한 피할 수 있다. 또한, 주파수 할당 후 D2D와 cellular 링크가 같은 sub-channel을 점유하여 서로의 전송에 간섭을 주는 경우에도, 본 논문에서는 D2D 링크의 전송 power를 각 부반송파에서 적응적으로 할당하도록 하는 알고리즘을 제안하여 cellular 링크로의 간섭을 최소화할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본 논문에서 고려된 OFDMA 셀룰러 네트워크 시스템 모델 환경을 구성하고, III장에서는 제안하는 subset reuse 기반 무선 주파수 자원 할당과 D2D 링크 power 최적화

기법을 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통하여 제안하는 아이디어의 SINR과 throughput 성능을 검증 및 분석하며, V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문은 직교주파수분할 다중접속방식(OFDMA)을 기반으로 하는 하나의 셀룰러 네트워크를 배경으로 한다. OFDMA 방식에서, 각 전송주파수들은 sub-channel 또는 resource block(RB)이라고 불리는 부반송파들의 집합으로 매핑 된다. D2D 통신이 존재하는 셀룰러 네트워크 내의 단말들은 기지국으로만 통신을 하는 cellular 단말들과 다른 단말과 직접 통신만 가능한 D2D 단말들로 이루어진다. 이 경우, Cellular 단말들과 D2D 단말들은 서로 자원을 공유하여 사용한다고 가정한다. 본 논문에서는 cellular 단말의 기능과 D2D 단말의 기능을 모두 가진 범용단말 또한 네트워크 안에 존재한다고 가정한다. 차세대 셀룰러 네트워크 시스템에서는 cellular 단말, D2D 단말, 범용 단말들이 모두 존재할 것이지만, 본 논문에서는 셀룰러 네트워크의 모든 단말들이 범용단말이라는 환경을 가정한다. 범용단말들은 cellular 링크와 D2D 링크 모두에 접근이 가능하여 셀룰러 네트워크 내에서 자유롭게 자신의 상태를 cellular 링크 혹은 D2D 링크로 바꾸는 것이 가능하다

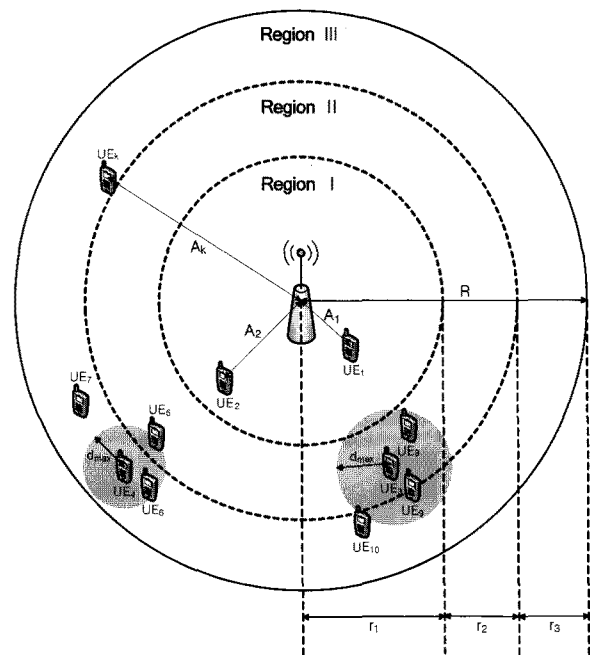


그림 1. 셀룰러 네트워크 시스템 모델
Fig. 1. System model for cellular network.

는 가정이 포함된다. 본 논문의 시스템이 상대적으로 특수한 상황의 환경을 가정하였으나, 차세대 셀룰러 네트워크 시스템 모델을 표현하기에 충분할 것으로 예상된다.

본 논문에서는 효율적인 부반송파 재사용 방법을 위해 셀 안에 기지국으로부터의 거리에 따라 세 개의 서로 다른 구역을 정의한다. 이것은 기지국으로부터 가까운 구역의 단말들이 전송 신호를 더 적은 power로 사용하도록 가정하여 다른 구역에서 주파수 재사용이 가능하도록 만드는데 목적이 있다. 그림 1에서처럼 Region I, II, III는 기지국으로부터의 거리가 각각 $0 \sim r_1$, $r_1 \sim (r_1+r_2)$, $(r_1+r_2) \sim R$ 사이의 구역을 나타낸다. 본 논문의 가정에 따르면 Region I에서 단말들이 사용하는 주파수는 작은 power를 사용하여 셀룰러 통신을 하므로, Region II, III에 있는 단말들이 D2D 통신을 위해 그 주파수 자원을 공유하여 사용할 수 있도록 만들 수 있다.

본 논문에서 각각의 단말들은 기지국으로부터 최대 수신 power와 최대 안테나 이득으로 전송 받을 수 있다고 가정한다. 또한, 단말들은 인지 무선 기능을 가지고 있어서 일시적인 데이터 전송을 위해 사용되지 않는 RB들을 찾아서 사용할 수 있다고 가정한다.

III. Subset Reuse 방법 기반의 공유 자원 할당

1. 적응적인 group-wise subset reuse 기반의 무선 공유 자원 할당

셀룰러 네트워크 내에서 D2D 링크가 cellular 링크로의 간섭을 최소한으로 하면서 같은 자원을 공유하여 존재할 수 있도록 하기 위해, 본 논문은 단말들이 시스템 모델에서 정의한 구역에 따라 다른 subset에서 주파수 자원을 효율적으로 재사용하는 방법을 제안한다. 그림 2는 본 논문에서 제안하는 적응적인 group-wise subset reuse 방법을 도시한 것이다. 이것은 총 n_{total} 개의 RB를 가진 채널을 각각 다른 비율의 subset으로 나누어 할당하는 방법인데, 각 subset에 속한 RB들의 개수는 항상 자연수임을 가정한다. Subset reuse 방법은 모두 control 신호를 보내는데 사용되는 control subset을 가지며, $S_{control}$ 으로 나타낸다. S_1, S_2, S_3 은 각각 subset 1, 2, 3을 의미하고, region I, II, III에 있는 단말들의 cellular 통신에 할당된다고 가정한다. 그리고 global subset S_0 를 정의하여, 셀 안에서 빠른 속도로

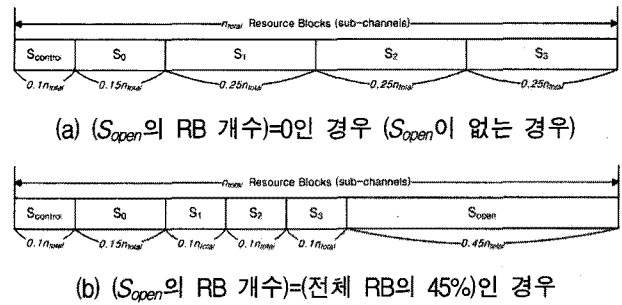


그림 2. 적응적인 group-wise subset reuse 방법
Fig. 2. Adaptive group-wise subset reuse method.

이동하는 mobility가 큰 단말들의 cellular 통신에 global subset의 RB들을 사용할 수 있도록 제안한다. 또한, 단말들의 자유로운 자원 접근을 보장하기 위하여, 어느 구역의 단말이든 S_{open} 에 있는 RB들을 자유로이 사용하는 것이 가능한 open subset, S_{open} 을 설정할 수 있다. 셀 환경에 따라 S_{open} 의 크기를 변화시켜 적응적으로 subset을 나누어 사용할 수 있게 한다. 즉, 셀에서 통화를 요구하는 단말들의 분포에 따라 그림 2에 나타난 것과 같이 S_{open} 의 크기를 가변적으로 사용한다.

그림 2(a)와 같이 call을 요청하는 단말들이 셀 안에서 고르게 분포되어 있는 경우에는, S_{open} 을 없애고 각각의 구역에 있는 단말들이 cellular 링크를 위해 같은 개수의 RB들 중에서 필요한 만큼을 할당 받아 사용할 수 있다. 각 구역에서 사용할 수 있는 RB들의 개수가 미리 결정되므로 특정 구역의 어느 한 지점으로 단말들이 몰릴 경우에는 전송에 필요한 RB를 할당받지 못하는 단말들이 많아진다는 문제가 발생하여 $S_{open}=0$ 이 되는 것이 적절하지 않다.

셀 내의 어느 한 곳으로 단말들이 몰리는 경우, 그림 2(b)와 같이 전체 RB의 개수에서 자유 접근이 가능한 S_{open} 의 비율을 크게 하고, 그에 따라 S_1, S_2, S_3 의 크기는 작게 하는 방법을 사용한다. 이 경우에는 단말들이 자신이 존재하는 구역에 부합하는 subset에서 충분한 RB들을 할당받지 못했을 때 open subset에 있는 RB들을 필요한 만큼 자유롭게 전송에 사용할 수 있게 되며, 트래픽 생성이 집중되는 장소에서도 전송에 필요한 주파수 자원을 할당받지 못하는 단말들이 크게 감소할 것이다.

기지국은 셀에 있는 단말들의 가장 최근 위치를 주기적으로 업데이트하고 S_{open} 의 크기를 결정한다. 단말들은 자신이 위치하고 있는 셀에서 설정한 S_{open} 의 크기의 비율을 알고 있다고 가정한다. 임의의 단말 UE_k 가 call

을 시작하려고 하면, 그 단말은 먼저 $S_{control}$ 에 있는 RB들을 통해서 해당하는 기지국에 call request control 신호를 보낸다. 기지국은 cellular 링크를 위한 RB들을 할당하는 control 신호로 단말의 call 요청에 응답한다. 기지국이 단말에게 응답할 때, 그것은 할당하는 subset에 따라 다른 power로 control 신호를 보낸다. 이 control 신호를 통해서, 단말 UE_k 은 기지국으로부터의 거리, A_k 를 알아낼 수 있다.

$$A_k = \left(\frac{P_{T_{BS}}}{P_{R_{UE_k}} - N} \right)^{\frac{1}{\alpha}}, \quad (1)$$

위 식에서 $P_{T_{BS}}$ 는 기지국의 전송 power, $P_{R_{UE_k}}$ 는 control 신호의 전송에서 UE_k 가 받은 수신 power, N 은 열잡음 power, α 는 경로 손실 지수를 의미한다.

UE_k 는 기지국으로부터 할당받은 RB로 cellular 링크를 만든 후, 계산한 거리에 따른 power로 기지국에게 데이터를 전송한다. 단말이 기지국으로부터 멀수록, 전송을 위해 필요한 power는 더 커질 것이다. 기지국과 단말 사이에 cellular 링크가 존재하기 위해서 기지국은 최소 SINR, β_{BS} 를 가진다. 또한, 각각의 단말들이 요구하는 Quality-of-Service(QoS)도 있어서 이러한 조건들을 만족하면 cellular 링크가 성립된다. 그러나 기지국으로부터 멀리 있는 단말, 특히 셀 경계에 있는 단말은 자원을 먼저 할당받아 사용하고 있는 다른 D2D 단말들에 의한 간섭 때문에 최소 기지국 SINR과 QoS를 만족하지 못하여 cellular 링크를 만들지 못하는 경우가 많다. 만약 링크에 필요한 최소 SINR이나 단말이 요구하는 QoS 같이 cellular 링크를 사용하는데 충분한 조건들을 만족하지 못하거나 단말의 cellular link를 위하여 할당해 줄 충분한 RB가 없다면, 기지국은 단말에게 RB를 할당하지 않고 대신 cellular 링크 성립 불가 신호를 보낸다. 그 신호를 받은 단말들은 D2D 링크를 만들어 그것에 필요한 다른 RB들을 찾는다.

기지국으로부터 cellular 링크 성립 불가 신호를 받은 UE_k 는 D2D 링크를 통해서 직접 다른 단말과 통신하려고 하게 된다. D2D 링크를 위해 필요한 RB들을 찾는 과정은 표 1의 subset 검색 단계에 따라 이루어진다. 각 단말들은 앞서 계산한 기지국으로부터의 거리를 통해 자신이 어느 구역에 속해있는지 이미 인지하고 있으므로 자신의 구역에서 멀리 떨어져있는 구역에

표 1. D2D 링크를 위한 subset 검색 단계
Table 1. The Subset Searching Steps for D2D Links.

UE Location	Step 1	Step 2	Step 3
Region I	S_3, S_{open}	S_2, S_3, S_{open}	S_1, S_2, S_3, S_{open}
Region II	S_1, S_{open}	S_1, S_3, S_{open}	S_1, S_2, S_3, S_{open}
Region III	S_1, S_{open}	S_1, S_2, S_{open}	S_1, S_2, S_3, S_{open}

서 사용하고 있는 subset에서부터 RB를 찾는다. Region I에 있는 단말은 자신으로부터 먼 region III의 S_3 에서부터 RB를 찾고, region III에 있는 단말은 반대로 S_1 에서부터 RB를 찾는다. Region II의 단말은 S_1 에서부터 RB 검색을 시작하는데, 이것은 S_1 의 RB를 사용하는 cellular 단말들이 S_3 의 RB를 사용하는 단말들보다 작은 power로 데이터 전송을 하고 있는 가능성이 많으므로 필요한 만큼의 RB를 찾는 것이 더 쉽기 때문이다. 또한, 매 단계마다 S_{open} 을 포함하여 D2D 링크에 사용할 RB를 찾는데, 그림 2(a)와 같이 S_{open} 이 없는 경우에는 각 단계마다 S_{open} 을 뺀 나머지 subset들의 집합에서 RB를 찾는다.

예를 들어, region III에 있는 UE_k 가 D2D 링크를 위한 RB를 찾는다고 하면, D2D 링크를 위한 RB들을 다음과 같이 먼저 S_1 과 S_{open} 에서 찾을 수 있다.

$$S_{D2D} = \arg \max_{F_1} \left\{ \sum_{F_1} \left(\frac{P_{T_{UE_k},f} A_k^{-\alpha}}{\sum_{L_1} P_{T_{UE_\ell},f} A_\ell^{-\alpha} + N_f} \right) \right\}, \quad (2)$$

where

$$F_1 = \{f : f \in S_{m,n}, \forall m \in (S_1 \cup S_{open})\}, N\{F_1\} = n_{sub}^k, \\ L_1 = \{\ell : \ell \in U_{S_{m,n}}, \ell \neq k, n = 1, open\}, 0 \leq k, \ell \leq n_{UE}.$$

위 식에서 $P_{T_{UE_k},f}$ 는 부반송파 f 에서 UE_k 의 전송 power, N_f 는 부반송파 f 에서의 열잡음 power, $S_{m,n}$ 은 S_n 의 RB m 안에 있는 부반송파들의 집합, $U_{S_{m,n}}$ 은 S_n 의 RB m 을 사용하는 단말들의 집합, $N(A)$ 는 집합 A 에 속해 있는 원소들의 개수, n_{UE} 는 셀에 존재하는 모든 단말들의 개수를 나타낸다. 단말 UE_k 가 데이터를 보는데 필요한 부반송파의 개수, n_{sub}^k 는 수식 (4)와 같이 계산 가능하다.

$$n_{sub}^k = (\# \text{ of subcarriers per RB}) \times n_{RB}^k, \quad (3)$$

$$n_{RB}^k (\text{required \# of RB}) = \frac{\text{required data rate}}{\text{RB Bandwidth} \times \text{Bits per RB}}$$

단계 1에 따라 RB를 찾았는데도 단말이 요구한 RB 만큼 충분하지 않으면, UE_k 는 단계 2의 subset들에서 RB들을 찾게 된다. 단계 2에서 새롭게 할당되는 부반송파들의 집합은 다음과 같다.

$$S_{D2D} = \arg \max_{F_2} \left\{ \sum_{F_2} \left(\frac{P_{T_{UE_k}, f} A_k^{-\alpha}}{\sum_{L_2} P_{T_{UE_l}, f} A_l^{-\alpha} + N_f} \right) \right\}, \quad (4)$$

where

$$F_2 = \{f : f \in S_{m,n}, \forall m \in (S_1 \cup S_2 \cup S_{open})\}, N\{F_2\} = n_{sub}^k,$$

$$L_2 = \{\ell : \ell \in U_{S_{m,n}}, \ell \neq k, n = 1, 2, open\}, 0 \leq k, \ell \leq n_{UE}.$$

단계 2에서도 충분한 RB를 찾지 못하면, 단계 3의 subset에서 RB를 찾는다. 단계 3는 결국 D2D 링크를 위해 사용할 수 있는 모든 subset인 S_1, S_2, S_3, S_{open} 에서 사용가능한 RB를 찾는다. 단계 3에서 새롭게 할당되는 부반송파의 집합도 위와 비슷한 형태가 된다.

$$S_{D2D} = \arg \max_{F_3} \left\{ \sum_{F_3} \left(\frac{P_{T_{UE_k}, f} A_k^{-\alpha}}{\sum_{L_3} P_{T_{UE_l}, f} A_l^{-\alpha} + N_f} \right) \right\}, \quad (5)$$

where

$$F_3 = \{f : f \in S_{m,n}, \forall m \in (S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_{open})\}, N\{F_3\} = n_{sub}^k,$$

$$L_3 = \{\ell : \ell \in U_{S_{m,n}}, \ell \neq k, n = 1, 2, 3, open\}, 0 \leq k, \ell \leq n_{UE}.$$

D2D 링크를 위한 RB를 다 선택하게 되면, UE_k 는 D2D 송신기(Transmitter(Tx))가 되고, 어떤 범위 내에서 D2D 수신기(Receiver(Rx))가 되어줄 다른 단말을 찾게 된다. D2D 수신기를 찾을 범위를 정하기 위해 단말은 D2D 링크의 SINR을 만족하는 범위를 찾는다.

$$\sum_{S_{D2D}} \left(\frac{P_{T_{UE_k}, f} d^{-\alpha}}{N_f} \right) \geq \kappa \beta_{D2D}, \quad (6)$$

d 는 D2D Tx와 Rx 사이의 거리, κ 는 다른 링크로부터의 간섭을 보상하기 위한 단말(D2D Rx)에서의 SINR margin이다. 본 논문에서는 d 의 상한선을 D2D 링크를 정의하기 위한 최대 거리인 d_{max} 라고 정의한다.

$$d_{max} = \left(\frac{\sum_{S_{D2D}} P_{T_{UE_k}, f} d^{-\alpha}}{n_{sub} \kappa \beta_{D2D} N_f} \right)^{\frac{1}{\alpha}}. \quad (7)$$

할당된 RB들을 통해서 단말 UE_k 는 D2D request 신호를 d_{max} 거리 내에 있는 모든 단말들에게 보내고, 가장 먼저 응답이 오는 단말이 D2D Rx가 되어 D2D 링크를 형성하게 된다.

2. D2D 링크의 power 최적화

형성된 D2D 링크가 cellular 링크와 같은 주파수 자원을 사용하지 않는다면 단말은 D2D 링크의 power 제어에 대해 고려할 필요가 없다. 하지만 주위의 D2D 전송으로 인해 간섭을 받고 있는 cellular 링크가 있다면, cellular 링크에 미치는 간섭을 피할 수 있도록 그림 3과 같이 부반송파 f 에서의 D2D 전송 power를 조절해야만 한다. 예를 들어, D2D Tx인 UE_p 가 cellular 단말 UE_q 와 같은 RB를 공유하고 있어서 cellular 링크에 간섭을 주고 있다고 가정한다. UE_p 는 먼저 자신의 D2D 링크가 UE_q cellular 링크로부터의 간섭을 고려해도 데이터 전송이 가능한지를 다음과 같이 확인하게 된다.

$$\sum_{S_{D2D}} \left(\frac{P_{T_{UE_p}, f} d_{max}^{-\alpha}}{P_{T_{UE_q}, f} A_q^{-\alpha} + N_f} \right) \geq \beta_{D2D}, \quad (8)$$

위의 부등식이 성립하면, 즉 D2D 전송이 가능하다면, UE_p 는 cellular 링크에 간섭을 주지 않으면서 전송할 수 있는 power의 상한선을 각 부반송파마다 계산하게 된다.

$$P_{T_{UE_p}, f}^{upper} = P_{T_{UE_p}} - P_{T_{UE_q}, f} A_q^{-\alpha}, f \in S_{D2D}, \quad (9)$$

위 식에서 $P_{T_{UE_p}, f}^{upper}$ 는 부반송파 f 에서 UE_p 전송 power의 상한을 의미한다.

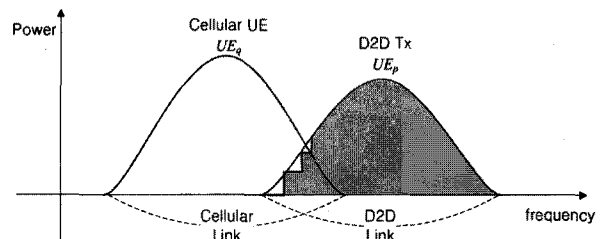


그림 3. D2D 링크의 power control
Fig. 3. Power Control of D2D links.

각 부반송파에서의 전송 power 상한을 이용하여, 단말 UE_p 는 D2D 링크에 할당 받은 RB만큼의 capacity를 최대화하는 방향으로 D2D Tx의 전송 power를 최적화한다. 최적화를 위한 목적함수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\arg \max_{P_{T_{UE_p},f}} \left\{ \sum_{S_{D2D}} \log_2 \left(1 + \frac{P_{T_{UE_p},f} d_{\max}^{-\alpha}}{P_{T_{UE_q},f} A_q^{-\alpha} + N_f} \right) \right\}, \quad (10)$$

$$\text{subject to } 0 \leq P_{T_{UE_p},f} \leq P_{T_{UE_p},f}^{\text{upper}}, \sum_{S_{D2D}} P_{T_{UE_p},f} \leq P_{UE,\max},$$

$P_{UE,\max}$ 는 각 단말마다의 최대 전송 power를 나타낸다. 이 목적 함수는 power들에 대해 공동으로 위로 오픈된 함수이므로, 최적화 문제는 Lagrangian 방법으로 해결할 수 있다^[4]. Lagrangian을 구하면 다음과 같다.

$$L := \sum_{S_{D2D}} \log_2 \left(1 + \frac{P_{T_{UE_p},f} d_{\max}^{-\alpha}}{P_{T_{UE_q},f} A_q^{-\alpha} + N_f} \right) - \lambda \sum_{S_{D2D}} P_{T_{UE_p},f}, \quad (11)$$

λ 는 Lagrangian 승수이다. 전송 power의 상한선을 고려한 power 할당을 구하면,

$$P_{T_{UE_p},f}^* = \min \left(\left(\frac{1}{\lambda} \frac{P_{T_{UE_q},f} A_q^{-\alpha} + N_f}{d_{\max}^{-\alpha}} \right)^+, P_{T_{UE_p},f}^{\text{upper}} \right), \quad (12)$$

위 식에서 λ 는 수식 (17)와 같은 반복 과정을 통해서 power 제약이 상한선과 가장 가까이 만날 수 있도록 선택한다.

$$\lambda = \arg \min_{\lambda} \left(P_{UE,\max} - \sum_{S_{D2D}} P_{T_{UE_p},f} \right). \quad (13)$$

IV. Computer Simulation

본 논문에서는 제안한 공유 자원 할당 기법의 성능을 보기 위해 computer simulation을 실행하여 그 결과를 분석한다. 그림 1과 같이 하나의 cell에서의 상황을 설정하여 그것에 대한 성능분석 결과를 나타낸다. 셀 반지름 R 은 1km이며, r_1, r_2, r_3 는 각각 600m, 200m, 200m로 각 구역의 넓이가 거의 비슷하도록 가정하였다. 본 논문에서는 간단하게 모든 링크에 대해 $P(d) = P(d_0) \cdot d^{-\alpha}$ 의 경로 손실 채널 모델을 가정한다. 여기서 $P(d)$ 는 송신기에서 d 의 거리에서 수신되

표 2. 3GPP LTE에 따른 시뮬레이션 파라미터
Table 2. Simulation Parameter According to 3GPP LTE.

Parameter	Value
채널 대역폭	20MHz
Resource Block(RB) 개수	100
부반송파 개수	1200
RB 대역폭	180kHz
최소 BS SINR(β_{BS})	5dB
최소 D2D SINR(β_{D2D})	3dB
단말의 SINR margin	1.5dB

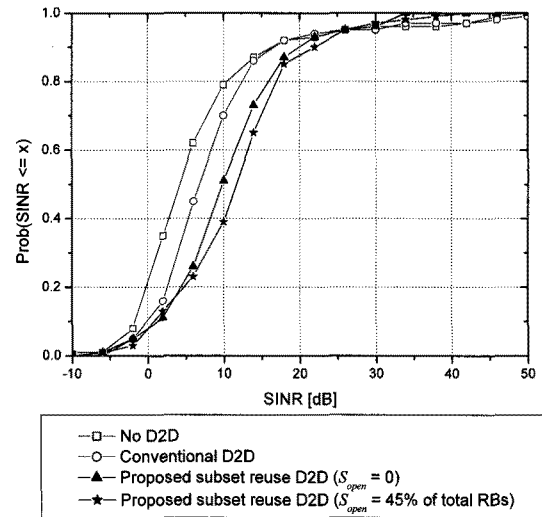


그림 4. 링크 SINR의 누적 분포 함수
Fig. 4. CDF of Link SINR.

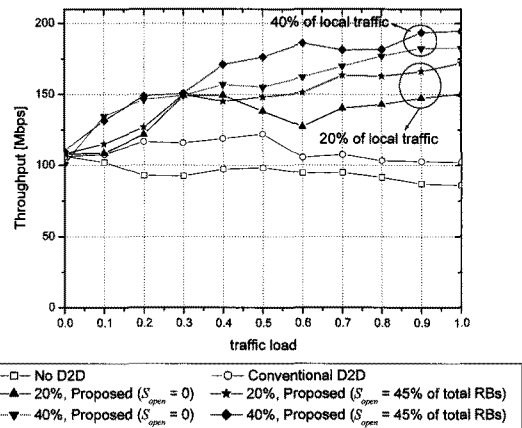


그림 5. 전체 cell throughput
Fig. 5. Total Cell Throughput.

는 power, $P(d_0)$ 는 기준 거리 d_0 에서의 수신 power, α 는 경로 손실 지수로써 값은 4를 가진다고 가정한다.

본 알고리즘의 네트워크 파라미터는 표 2와 같이 3GPP LTE의 값들을 참조하여 사용하였다. 차세대 이동통신 시스템을 나타내는 대표 값으로는 충분하지 않지만, 예시적인 시험 값의 의미로 사용하였다.

본 논문의 simulation에서는 local traffic의 개념을 사용하여 성능 분석에 사용한다. Local traffic의 비율은 셀 안에 있는 전체 500개의 단말 중에서 셀 내 어떤 한 지점의 반경 250m 이내에 모여 있는 단말들의 비율이 얼마나 되는지를 나타낸다고 가정한다. Local traffic의 비율이 높을수록 셀 안에서 어느 한 곳에 트래픽이 더 많이 집중되어 있다는 것을 의미한다. 또한, 셀 throughput은 셀 안에 있는 모든 단말들의 capacity 합계로 정의하는데, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{total} = \sum_k (BW_{RB} \times n_{RB}^k) \times \log_2(1 + SINR_k) \quad (14)$$

위 식에서 BW_{RB} 는 RB 대역폭을, $SINR_k$ 는 단말 UE_k 의 링크 SINR값을 나타낸다.

첫 번째로, 링크 SINR의 누적 분포 함수(CDF)가 그림 4에 나타나 있다. Local traffic이 전체 트래픽의 20%, traffic load는 0.4로 설정한 경우이다. 적응적인 group-wise subset reuse 방법을 사용한 제안된 알고리즘이 subset reuse 방법을 사용하지 않고 RB들을 무작위로 사용하는 기존의 D2D 링크 할당 방법에 비해 성능이 개선되었음을 보인다. 특히, S_{open} 의 크기를 전체 RB 개수의 45%로 하였을 때와 S_{open} 이 없을 때 각각 5dB, 3dB 개선된 성능을 가진다. S_{open} 의 크기를 크게 사용하는 경우, open subset에서의 충돌이 빈번할 가능성에도 불구하고 S_{open} 이 없을 때의 subset reuse 방법보다 더 좋은 성능을 보인다.

두 번째로, 그림 5의 traffic load에 따른 전체 cell throughput은 local traffic의 비율이 20%일 때 제안된 알고리즘에서 평균 50% 정도 throughput이 증가함을 보인다. 전체 단말 중 local traffic이 40%일 때는 cell throughput이 더 증가한다. 이것은 local traffic이 증가할수록 제안된 알고리즘이 더 좋은 성능을 가지는 것을 뜻한다. traffic load가 증가할수록, 제안된 알고리즘의 전체 throughput은 증가하는데 비해 기존의 D2D 할당 알고리즘에서는 감소한다. 이것은 높은 data rate의 통신을 성공하는 단말들이 제안된 알고리즘에서는 직접적인 D2D 링크의 증가로 인해 늘어나게 되지만 기존의 알고리즘에서는 점점 줄어들기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서 D2D 통신이 효율적인 자원 공유를 하면서 존재하기 위한 적응적인 자원 할당 알고리즘을 제안하였다. 자원 할당은 크게 주파수 자원 할당과 power 자원 할당으로 나누어지는데, 주파수 자원 할당 알고리즘은 D2D와 cellular 링크 사이의 간섭을 최대한으로 피하기 위해서 셀 환경에 따라 open subset의 크기를 조절하는 적응적인 group-wise subset reuse 방법에 기반을 두고 있다. D2D 링크를 위한 power는 같은 RB를 사용하는 cellular 링크에 간섭을 주지 않도록 전체 대역폭에서 적응적으로 최적화된다. 제안된 알고리즘이 조직화 되지 않은 기존의 알고리즘보다 link SINR과 전체 cell throughput에서 더 좋은 성능을 가지는 것을 시뮬레이션 결과를 통해 볼 수 있었다. 또한, local traffic이 증가할수록 제안된 알고리즘에서 cell throughput이 증가하였다.

참 고 문 헌

- [1] B. Kaufman and B. Aazhang, "Cellular Networks with an Overlaid Device to Device Network," in Proc. of Signals, Systems and Computers, 42nd Asilomar Conference, pp. 1537-1541, Oct. 2008.
- [2] P. Janis, V. Koivunen, C. Ribeiro, J. Korhonen, K. Doppler, and K. Hugl, "Interference-Aware Resource Allocation for Device-to-Device Radio Underlying Cellular Networks," in Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference, April 2009.
- [3] C. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. Ribeiro, "Power Optimization of device-to-device communication underlying cellular communication," in Proc. of IEEE ICC, 2009.
- [4] Luenberger, David G., Ye, and Yinyu, *Linear and Nonlinear Programming*, Springer Verlag, 2007.
- [5] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, K. Hugl, "Device-to-device communication as an Underlay to LTE-Advanced Network", IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 12, December 2009.

저 자 소 개



김 지 은(학생회원)
2009년 이화여자대학교 전자정보
통신공학전공 학사
2010년 이화여자대학교
전자공학과 석사 과정

<주관심분야 : Resource Allocation, Device-to-device communication, MANET Architecture>



김 낙 명(평생회원)
1980년 서울대학교 전자공학과
학사
1982년 KAIST 석사
1990년 Ph.D. Cornell University

<주관심분야 : Cross-layer optimization, Cognitive Radio Systems, Multi-hop Relay and MANET Architecture, Hybrid Multiple Access Technology, MIMO-OFDM systems>