

셀룰러 망에 D2D 통신에서의 스펙트럼 에너지 최적화에 관한 연구 시스템

유시영*¹, 노승환*²

Spectral Efficiency Optimization for D2D Communication Coexisting with Cellular Networks

Siyeong Ryoo*¹, Soonghwan Ro*²

요 약

이 논문에서는 시간과 주파수 자원을 공유하는 셀룰러 네트워크 내에서 NOMA(Nonorthogonal Multiple Access) 기반 D2D (Device-to-Device) 통신 시스템에서의 스펙트럼 효율에 관한 연구이다. 셀룰러 사용자가 점유하는 서브 채널에는 서로 다른 쌍을 구성하는 D2D 그룹이 할당된다. 전력의 제약이 있는 공정성 최적화 문제는 최악의 채널 조건에 실질적으로 영향을 미치는 셀룰러 사용자와 D2D 장치 간의 상호 간섭을 줄이기 위한 문제를 공식화하여 해결방안을 제시하였다. 계산 복잡도가 낮은 솔루션의 경우 선형 등가 시스템의 솔루션과 함께 이분법 방법을 사용할 것을 제안한다. 제안된 알고리즘은 최소한의 총 전송전력을 활용하여 커버리지 영역에 있는 모든 셀룰러 사용자 및 D2D 장치에게 균일하고 좋은 서비스를 제공 할 수 있다. 시뮬레이션 결과 제안된 알고리즘은 다르게 널리 사용되는 서브 채널 할당 및 페어링 기술에서 최악의 사용자의 스펙트럼 효율성이 향상되었다.

Abstract

This paper considers a system consisting of a nonorthogonal multiple access (NOMA)-based device-to-device (D2D) communication system within a cellular network, in which the time and frequency resources are shared by everyone. In particular, D2D groups that constitute different pairs are assigned to the subchannels that the cellular users occupy. A max-min fairness optimization problem with power budget constraints is formulated and solved in this paper to reduce the mutual interference between the cellular users and D2D devices that substantially impacts that with the worst channel condition. For a low computational complexity solution, we propose the use of the bisection method together with the solution of a system of linear equalities. The proposed algorithm can provide uniformly good service to all of the cellular users and D2D devices in the coverage area by utilizing the minimal total transmit power. The simulation results indicate the effectiveness of the proposed algorithm in the improvement of the spectral efficiency of the worst user under the different widely used subchannel assignments and pairing techniques.

Keywords

NOMA; D2D communications; max-min fairness optimization; linear programming

* 공주대학교 정보통신공학부 교수(*² 교신저자)
- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0001-6097-7727>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0001-6091-796X>

· Received: Nov. 03, 2020, Revised: Dec. 09, 2020, Accepted: Dec. 12, 2020
· Corresponding Author: Soonghwan Ro
Dept. of Radio Science Engineering, Kongju University, 1223-24
Cheonandae-ro, Chungnam, 31080, Republic of Korea.
Tel.: +82-41-521-9197, Email: rosh@kongju.ac.kr

1. 서 론

NodeB는 셀룰러 네트워크에서 이동 단말과 코어 네트워크를 연결해주며, D2D(Device-to-Device)통신은 NodeB를 통해 데이터를 재라우팅하지 않으면서, 코어 네트워크의 트래픽을 완화하고 이동성을 향상시킬 수 있는 기술이다[1][2]. 셀룰러 사용자(CU)와 스펙트럼을 공유하면서, D2D 쌍 사이의 낮은 전송 전력으로 짧은 전송거리에서 동작을 하면 스펙트럼 효율(SE, Spectral Efficiency) 및 에너지 효율(EE, Energy Efficiency)을 크게 향상시킬 수 있다. D2D 통신은 P2P(Peer-to-Peer) 서비스를 용이하게 할 수 있으며, 이에 대한 다양한 시나리오를 갖는 많은 연구가 진행되었다. 비 직교 다중화 액세스(NOMA, Nonorthogonal Multiple Access) 기술은 인프라 구조를 관리하는 자원이 없어도 SE와 EE를 상당히 개선할 수 있다[3]. NOMA는 많은 사용자가 전송전력 레벨을 변화시켜서 동일한 채널을 공유할 수 있게 하는 것을 가능하게 한다. 따라서 D2D와 NOMA의 가능성을 고려할 때 효율성을 극대화하기 위해 NOMA가 D2D 통신 시스템과 결합될 수 있는지 여부를 연구하는 것이 필요하다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2장에서는 제안된 시스템 모델과 네트워크의 모든 사용자에 대한 스펙트럼 효율 분석을 제시한다. 3절에서는 제한된 전력 및 서브 채널 할당 제약 조건에 따른 총 송신 전력 최적화 문제를 상세히 설명한다. 이때 최적화 문제의 특징과 함께 지역(Local) 최적을 얻기 위한 해법도 해석된다. 또한 4절에서는 D2D 사용자의 총 전송전력을 최소화하는 것을 목표로 한 페어링 방법을 제안한다. 마지막으로, 5절에서 앞에서 이론 분석을 설명하기 위한 수치 결과를 보여주고, 6절에 결론을 맺는다.

II. 연구 배경

NOMA에 대한 많은 연구가 진행되고 이루어지고 있으며, 다운 링크 NOMA전송의 첫 번째 시나리오는 사용자가 두 개의 단일 안테나를 사용하고, 기지국(BS)에서 다중 송신 안테나를 사용하는 것이다[4]. 이후의 연구에서 전력 부호화 기법을 사용하여 동

일한 서브채널에서 다중 사용자에게 전송하는 다중 안테나 BS가 개발되었다[5][6]. 기존에 NOMA를 사용하는 D2D네트워크에 대한 제안에서는 NOMA 기반 D2D시스템의 사용자를 그룹화하고 여러 D2D 그룹이 서브 채널을 공유하도록 허용하는 개념이 제안되었다. 이와 유사한 연구로 D2D-NOMA 시스템의 총 비율을 최대화하기 위해 네트워크의 모든 D2D 사용자의 SINR요구 사항을 만족하면서 서브 채널과 권한의 공동 할당을 제안되었다[7]. 이러한 개념과 그룹화 방법은 NOMA를 사용하여 각 쌍 사이에서 원하는 신호를 디코딩하기 전에 사용자가 그룹 내에서 페어링 할 수 있도록 하였다[8]. 그러나 서로 결합되지 않은 다중 사용자, 다중 그룹 NOMA 상향 링크 시나리오에서, 특정 기지국에서의 사용자들 간의 간섭은 이웃 송신 사용자의 수에 비례하여 증가한다[2]-[4]. 따라서 클러스터 간섭을 줄이기 위해 빔 포밍을 지원하는 NOMA에 대한 연구가 진행되었다[9].

본 연구에서는 NOMA-D2D 다운 링크 시스템과 업 링크 셀룰러 시스템 간의 공존 모델을 고려하면서 이전에 설명한 중앙 집중식 모델에 대한 연구를 한다[10][11][15]. 이 시나리오는 셀룰러 사용자가 셀룰러 마이크로 셀 네트워크의 동일한 지리적 영역에 있는 팜토셀 네트워크에서 D2D통신을 사용할 때 발생할 수 있다. 빔 포밍(Beam-forming)[9][16]과 같이 셀룰러 시스템에서 사용되는 간섭을 줄이는 방법은 고비용의 하드웨어와 밀도가 높은 네트워크에 불필요하게 복잡성을 증가시키므로 D2D 사용자에게는 적합하지 않다. 본 연구에서는 셀룰러 업 링크 네트워크의 기반이 되는 NOMA-D2D 다운 링크에서 결합 서브 채널 할당(Joint subchannel allocation), 사용자 페어링(User paring) 및 전력 제어를 극복하기 위한 포괄적인 프레임 워크를 제공한다. 그러나 이전의 연구와는 달리, 채널은 고유한 주파수를 갖는 것으로 가정되기 때문에, SIC 수신기에서 수신된 각각의 신호는 경로 손실 및 섀도잉(Shadowing)을 포함하는 별개의 채널 이득을 겪는다. 본 연구에서는 이러한 채널 이득을 이용함으로써 셀룰러 사용자에서 D2D 사용자로의 간섭을 완화하기 위한 효과적인 서브 채널 할당 및 사용자 페어링 방법을 제안하였다. 또한 CU와 DU 모두에 대한

SINR 요구사항을 최소화하면서 네트워크의 모든 장치의 총 송신전력을 최소화하기 위한 방안에 대해서 설명한다.

III. 시스템 모델 및 성능 분석

3.1 시스템 모델 및 가정

본 연구에서의 모델은 N개의 안테나가 장착된 셀룰러 기지국(BS)을 사용하고 L개의 직교 서브 채널(Orthogonal subchannel)을 스케줄링 한다. 또한 동일한 영역에서 전송하는 M개의 다운 링크 D2D 기반 NOMA D2D 그룹이 있다. 모든 D2D 장치(즉, D2D 송신기 및 D2D 사용자)에는 단일 안테나가 있다. 기존의 D2D 통신 쌍(Pair)과 달리 각 D2D 그룹의 사용자는 수신기 측에서 연속 간섭 제거(SIC, Successive Interface Cancellation)가 NOMA와 결합될 수 있도록 쌍(pair)을 이룬다. k_{th} , ($k \in K_m$) D2D 수신기 쌍(DR_m 으로 표시)은 DT_m D2D 송신기로부터 한 쌍의 메시지, S_k 및 S_k' 을 동시에 수신한다. 여기에서 DR_m 은 전체 수신기 쌍의 수 K_m 에 속하는 k_{th} 번째 수신기 쌍을 나타내며, DT_m 은 전체 K_m 에 속하는 k_{th} 번째 송신기 쌍을 나타내고, S_k 와 S_k' 는 송신기에서 수신기로 전송한 메시지 쌍을 각각 나타낸다.

일반적으로 네트워크의 모든 채널은 레일리 분포(Rayleigh distribution) 패턴을 따르지만 D2D 송신기 장치 및 셀룰러 BS 간의 업 링크 채널 및 D2D 수신기 장치 및 D2D 사용자간의 다운 링크 채널의

두 그룹으로 분류된다.

3.2 D2D 및 셀룰러 네트워크 성능 분석

셀룰러 사용자가 업 링크 전송을 하는 동안 $X_{l,n}$ 는 $E\{|X_{l,n}|^2\}=1$ 인 서브 채널 l을 점유하는 셀룰러 사용자 n에 의해 전송된 데이터를 나타낸다. 이 데이터 심볼은 할당받은 전원 레벨 $P_n^{C,1}$ 에 해당하며, 이것은 식 (1)을 만족한다.

$$0 \leq P_{l,n}^C \leq P_{\max,l,n}^C \quad (1)$$

한편, 그룹 m에서 D2D 송신기는 쌍(Pair)으로 신호를 보낸다. 특히, 데이터 심볼 $t_{m,k}^{(1)}$ 와 $t_{m,k}^{(2)}$ 는 그룹 m의 쌍 k의 D2D 사용자1 및 사용자2로 각각 전송 될 것이다. 이들 데이터 심볼들에 대한 송신된 전력 레벨들은 $P_{\max,m,k}^{D,(1)}$ 및 $P_{\max,m,k}^{D,(2)}$ 로 표시되며, 식 (2)와 식 (3)을 만족한다.

$$0 \leq P_{m,k}^{D,(1)} \leq P_{\max,m,k}^{D,(1)} \quad (2)$$

$$0 \leq P_{m,k}^{D,(2)} \leq P_{\max,m,k}^{D,(2)} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서, $P_{\max,m,k}^{D,(1)}$ 및 $P_{\max,m,k}^{D,(2)}$ 는 D2D 송신기 장치가 데이터 송신에 사용할 수 있는 최대 전력을 나타낸다. 이 식으로부터 셀룰러 사용자와 D2D 사용자의 전송 가능한 속도를 계산한다.

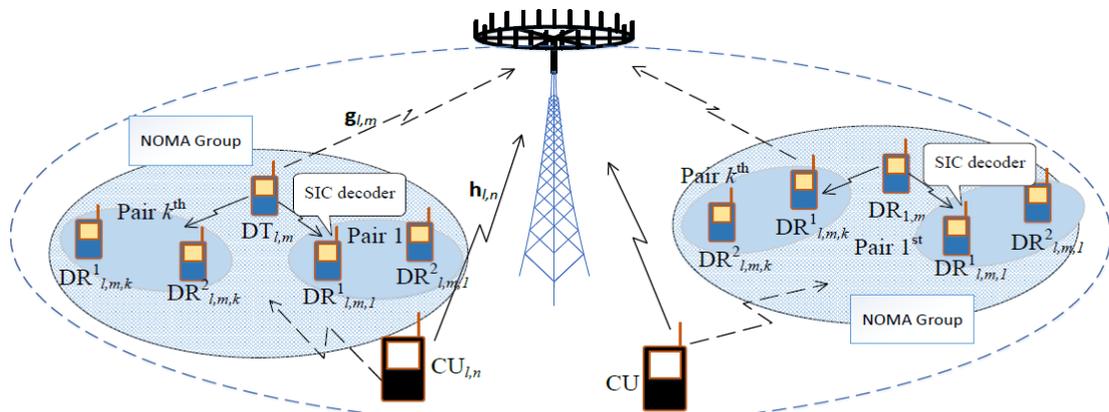


그림 1. 제안된 시스템 모델
Fig. 1. Proposed system model

3.2.1 업 링크 셀룰러 네트워크 전송

BS의 서브 채널 l^{th} 에서 수신된 신호는 y_l^C 으로 표시되고 식 (4)에 의해 주어진다.

$$y_l = \sum_{n=1}^{N_l} \sqrt{P_{l,n}^C} h_{l,n} x_{l,n} + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \eta_{l,m} g_m \times \left(\sqrt{P_{m,k}^{D,(1)}} t_{m,k}^{(1)} + \sqrt{P_{m,k}^{D,(2)}} t_{m,k}^{(2)} \right) + \zeta_l \quad (4)$$

식 (4)에서 $X_{l,n}$ 은 $E|x_{kmb}|^2 = 1$ 이 되는 I^{th} 번째 서브 채널을 사용하는 셀룰러 네트워크 n 에 의해 전송된 업 링크 데이터를 나타낸다. 심볼 $\{t_{m,k}^{(1)}, t_{m,k}^{(2)}\}$ 로 나타내지는 데이터는 m 번째 D2D 디바이스 전송기로부터 그룹 m 의 두 사용자에게 전송된다. ζ_l 은 서브 채널 l 에 있는 BS에서 AWGN (Addictive White Gaussian Noise)이고, $\zeta_l \sim CN(0, \sigma_{UL}^2 I_N)$ 와 같이 분포한다. 여기서 $\eta_{l,m}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_{l,m} = \begin{cases} 1, & \text{if group } m \text{ uses subchannel } l \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

서브 채널 l 을 사용하여 셀룰러 사용자 n 으로부터 원하는 신호를 디코딩하기 위해, 셀룰러 BS는 다음과 같이 검출벡터 $w_{l,n}$ 을 사용한다고 가정한다.

$$\hat{x}_{l,n} = w_{l,n}^H y_l = \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \underbrace{\sqrt{P_{l,n}^C} w_{l,n}^H h_{l,n} x_{l,n}}_{\text{Desired Signal}} + \underbrace{\sum_{n'=1, n' \neq n}^{N_l} \sqrt{P_{l,n'}^C} w_{l,n}^H h_{l,n'} x_{l,n'}}_{\text{Cellular Interference}} \\ & + \underbrace{\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \eta_{l,m} w_{l,n}^H g_m \left(\sqrt{P_{m,k}^{D,(1)}} t_{m,k}^{(1)} + \sqrt{P_{m,k}^{D,(2)}} t_{m,k}^{(2)} \right)}_{\text{D2D Interference}} \\ & + \underbrace{w_{l,n}^H \zeta_l}_{\text{Noise}} \end{aligned}$$

식 (6)에서, 첫 번째 항은 원하는 신호를 나타내고 두 번째 항은 다른 셀룰러 사용자들로부터의 상

$$\gamma_{l,n}^C = \frac{P_{l,n}^C |w_{l,n}^H h_{l,n}|^2}{\sum_{n'=1, n' \neq n}^{N_l} P_{l,n'}^C |w_{l,n}^H h_{l,n'}|^2 + \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \eta_{l,m} |w_{l,n}^H g_m|^2 (P_{m,k}^{D,(1)} + P_{m,k}^{D,(2)}) + \|w_{l,n}\|_2^2 \sigma_{UL}^2} \quad (8)$$

호 간섭을 나타낸다. 마지막 항은 D2D 사용자 및 열잡음에 의한 상호 간섭을 다시 나타낸다. 따라서 1번째 서브 채널을 사용하는 사용자 n 에 대한 주파수 효율은 식 (7)과 같다.

$$R_{l,n}^C = \log_2(1 + \gamma_{l,n}^C) \quad [b/s/Hz] \quad (7)$$

식 (7) $\gamma_{l,n}^C$ 은 셀에서의 신호 대 간섭 및 잡음 (SINR) 비를 나타내며 식 (8)과 같이 표현된다.

3.2.2 다운링크 NOMA-D2D 전송

그룹 m 에서 쌍 k 의 D2D 통신의 경우, 더 작은 채널 이득을 갖는 사용자를 약한 사용자라고 부른다. 보편성을 유지하면서 각 쌍에서 사용자 1이 약하고 사용자 2가 강하다고 가정한다고 하면,

$$|g_{m,k}^{(1)}|^2 \leq |g_{m,k}^{(2)}|^2 \quad (9)$$

쌍을 이루는 D2D 사용자가 신호를 디코딩 할 때 연속적으로 완전한 간섭 제거는 더 강한 사용자에게만 적용된다고 가정한다. 이것은 약한 사용자는 기존의 디코딩 방법을 사용할 것이라는 것을 제안한다. 그런 다음 서브 채널 l 을 사용하여 2명의 D2D 사용자 각각에 대한 수신 신호를 모델링한다. 특히, 사용자 1의 수신된 신호에 대한 공식은 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} y_{m,k}^{D,(1)} &= \underbrace{g_{m,k}^{(1)} \sqrt{P_{m,k}^{D,(1)}} t_{m,k}^{(1)}}_{\text{Desired Signal}} + \underbrace{g_{m,k}^{(1)} \sqrt{P_{m,k}^{D,(2)}} t_{m,k}^{(2)}}_{\text{Intra Pair Interference}} \quad (10) \\ & + \underbrace{\sum_{n=1}^{N_l} \sqrt{P_{l,n}^C} h_{l,n,m,k} x_{l,n}}_{\text{Cellular Interference}} \\ & + \underbrace{\sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m}}^M \sum_{k=1}^{K_{m'}} \eta_{l,m'} g_{m',k}^{(1)} \left(\sqrt{P_{m',k}^{D,(1)}} t_{m',k}^{(1)} + \sqrt{P_{m',k}^{D,(2)}} t_{m',k}^{(2)} \right)}_{\text{Inter Pair Interference}} \\ & + \underbrace{\zeta_{m,k}^{(1)}}_{\text{Noise}} \end{aligned}$$

$$\gamma_{m,k}^{D,(1)} = \frac{P_{m,k}^{D,(1)} |g_{m,k}^{(1)}|^2}{P_{m,k}^{D,(2)} |g_{m,k}^{(1)}|^2 + \sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C |h_{l,n,m,k}^{(1)}|^2 + \sum_{m'=1, m' \neq mk=1}^M \sum_{k'=1}^{K_{m'}} \eta_{l,m'} |g_{m',k'}^{(1)}|^2 (P_{m',k'}^{D,(1)} + P_{m',k'}^{D,(2)}) + \sigma_{DL}^2} \quad (12)$$

$$\gamma_{m,k}^{D,(2)} = \frac{P_{m,k}^{D,(2)} |g_{m,k}^{(2)}|^2}{\sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C |h_{l,n,m,k}^{(2)}|^2 + \sum_{m'=1, m' \neq mk=1}^M \sum_{k'=1}^{K_{m'}} \eta_{l,m'} |g_{m',k'}^{(2)}|^2 (P_{m',k'}^{D,(1)} + P_{m',k'}^{D,(2)}) + \sigma_{DL}^2} \quad (14)$$

식 (10)에서 $\zeta_{m,k}^{(1)} \sim CN(0, \sigma_{DL}^2)$ 이다. (10)에서 첫 번째 항은 원하는 신호를 나타내며 두 번째 항은 쌍 간의(Intra-pair) 간섭을 나타낸다. 세 번째와 네 번째 항은 서브 채널 l 을 사용하는 셀룰러 사용자 및 D2D 송신기 장치의 간섭을 나타내며, 마지막 항은 열잡음을 나타낸다. 이 장치의 스펙트럼 효율은 식 (11)과 같으며, 식 (11)에서 $\gamma_{m,k}^{D,(1)}$ 로 표현된 SINR 값은 식 (12)와 같다.

$$R_{m,k}^{D,(1)} = \log_2(1 + \gamma_{m,k}^{D,(1)}) \quad [b/s/Hz] \quad (11)$$

사용자 1과 대조적으로, 사용자 2는 연속적인 간섭을 완벽하게 제거함으로써 쌍내 간섭을 완화한다. 따라서 그룹 m 에서 쌍 k 의 사용자 2의 스펙트럼 효율은 식 (13)와 같다.

$$R_{m,k}^{D,(2)} = \log_2(1 + \gamma_{m,k}^{D,(2)}) \quad [b/s/Hz] \quad (13)$$

식 (13)에서 $\gamma_{m,k}^{D,(2)}$ 로 나타내는 SINR 값은 식 (14)와 같다.

IV. 전송전력 최소화를 위한 결합 서브채널 할당 및 전력 제어

4.1 문제의 공식화

네트워크에서 모든 D2D 송신기 및 셀룰러 사용자의 총 전송전력 최소화 문제는 식 (15)와 같다.

식 (15)에서 $R_{l,n}^{C,thr}$, $R_{m,k}^{D,(1)}$ 및 $R_{m,k}^{D,(2),thr}$ 은 셀룰러 및 D2D 사용자의 서비스 품질 요구 사항을 [b/s/Hz] 단위로 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} \min \sum_{k=1}^{K_m} (P_{m,k}^{D,(1)} + P_{m,k}^{D,(2)}) + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C \quad (15) \\ \text{subject to } R_{l,n}^C \geq R_{l,n}^{C,thr}, \forall l, n, \\ R_{m,k}^{D,(1)} \geq R_{m,k}^{D,(1),thr}, \forall m, k, \\ R_{m,k}^{D,(2)} \geq R_{m,k}^{D,(2),thr}, \forall m, k, \\ P_{m,k}^{D,(1)} \leq P_{\max, m, k}^{D,(1)}, \forall m, k, \\ P_{m,k}^{D,(2)} \leq P_{\max, m, k}^{D,(2)}, \forall m, k, \\ P_{l,n}^C \leq P_{\max, l, n}^C, \forall l, n \end{aligned}$$

각각의 값을 다음과 같이 설정하면,

$$\gamma_{l,n}^{C,thr} = 2^{R_{l,n}^{C,thr}} - 1 \quad (16)$$

$$\gamma_{m,k}^{D,(1),thr} = 2^{R_{m,k}^{D,(1),thr}} - 1 \quad (17)$$

$$\gamma_{m,k}^{D,(2),thr} = 2^{R_{m,k}^{D,(2),thr}} - 1 \quad (18)$$

최적화 문제 (15)를 서비스 제약 조건에서 SINR 제약 조건으로 식 (19)과 같이 변환 할 수 있다.

$$\begin{aligned} \min \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} (P_{m,k}^{D,(1)} + P_{m,k}^{D,(2)}) + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C \quad (19) \\ \text{subject to } \gamma_{l,n}^C \geq \gamma_{l,n}^{C,thr}, \forall l, n, \\ \gamma_{m,k}^{D,(1)} \geq \gamma_{m,k}^{D,(1),thr}, \forall m, k, \\ \gamma_{m,k}^{D,(2)} \geq \gamma_{m,k}^{D,(2),thr}, \forall m, k, \\ P_{m,k}^{D,(1)} \leq P_{\max, m, k}^{D,(1)}, \forall m, k, \\ P_{m,k}^{D,(2)} \leq P_{\max, m, k}^{D,(2)}, \forall m, k, \\ P_{l,n}^C \leq P_{\max, l, n}^C, \forall l, n \end{aligned}$$

식 (19)은 혼합된 정수형 프로그램이며, 조합 문제이므로 전역 해답을 얻기 위해서는 본질적으로 계산 복잡도가 매우 높다는 것을 알 수 있다. 또한 지금까지 D2D 쌍이 이용 가능하다고 가정했으며, D2D 송신기 장치의 총 송신 전력을 최소화하는 쌍

을 이루는 방안을 제안한다.

$$S_m = \left\{ \sum_{n=1}^{N_l} \sum_{k=1}^{K_m} (|h_{1,n,m,k}^{(1)}| + |h_{1,n,m,k}^{(2)}|), \dots, \right. \\ \left. \sum_{n=1}^{N_L} \sum_{k=1}^{K_m} (|h_{L,n,m,k}^{(1)}| + |h_{L,n,m,k}^{(2)}|) \right\} \quad (20)$$

4.2 서브 채널 할당 알고리즘

모든 셀룰러 사용자가 이미 자신의 서브 채널을 알고 있다는 가정 하에, 본 절에서는 각각의 D2D 그룹에서 서브 채널을 재사용하기 위한 알고리즘을 제안한다. 제안된 서브 채널 할당 알고리즘은 다음의 기준을 만족해야 한다.

- ◆ 채널상의 그룹의 수는 상이한 그룹들 사이의 동일 채널 간섭을 최소화하고 자원 할당의 복잡성을 감소시키기 위해 가능한 한 최소화한다.
- ◆ 디바이스 그룹은 셀룰러 장치의 영향을 최소화하도록 서브 채널에 할당된다. 이 배열은 CU에서 D2D 그룹으로의 간섭을 최소화하기 위해 크고 작은 스케일링 인자를 이용한다.

알고리즘 1은 제안된 서브 채널 할당을 나타낸다. 특히, 각각의 D2D 그룹 m 에 대하여, 서브 채널의 셀룰러 사용자의 D2D 그룹들로부터 전체 채널 이득을 포함시키는 세트 S_m 식을 식 (20)과 같이 계산한다.

알고리즘 1

- 1 입력 : 초기 서브 채널 수 L , 그룹 수 M .
- 2 각 그룹 m 에 대하여, 식 (20)과 같이 세트 S_m 을 계산.
- 3 if $M \leq L$ then {각 주파수 채널 l 에 대하여 하나의 D2D 그룹이 존재하는 경우}
- 4 S_m 에서 최소의 $\sum_{n=1}^{N_L} \sum_{k=1}^{K_m} (|h_{l,n,m,k}^{(1)}| + |h_{l,n,m,k}^{(2)}|)$ 를 갖는 사용 중이 아닌 서브채널을 찾는다.
- 5 else {각 주파수 채널 l 에 대하여 하나 이상의 재사용이 가능한 D2D 그룹이 존재하는 경우}
- 6 if $M \text{ Mod } L = 0$ then 각 서브채널에 M/L 그룹이 존재 : 서브채널을 L 그룹의 서브셋에 할당하기 위해 단계 2, 3, 4, 5를 반복. Otherwise, $L - (M - L[M/L])$ 서브 채널에 $[M/L]$ D2D 그룹이 존재하며, $M - L[M/L]$ 서브 채널에 $[M/L] + 1$ 의 D2D 그룹이 존재.
- 7 end if
- 8 출력 : 모든 D2D 사용자에게 대한 서브채널 할당정보

총 서브 채널 L 과 D2D 그룹 M 의 관계는 두 가지 경우로 나뉠 수 있다. 첫 번째 경우는 $M \leq L$ 이며, 하나의 서브 채널을 점유하는 각 D2D 그룹에 충분한 주파수 자원이 있는 경우이다. D2D 그룹 m 에 대하여, 서브 채널은 다이버시티 이득을 최소화하도록 선택되며, 단계 5에서와 같이 최소값 $\sum_{n=1}^{N_L} \sum_{k=1}^{K_m} (|h_{l,n,m,k}^{(1)}| + |h_{l,n,m,k}^{(2)}|)$ 이 된다. 이 할당은 앞에서 설명한 두 가지 목표를 만족한다. $M > L$ 인 경우 동일한 서브 채널을 공유하는 둘 이상의 D2D 그룹이 있다. M 이 L 의 정수배인 경우, 각 서브 채널은 M/L D2D 그룹에 의해 이용될 것이다. 그렇지 않으면, M/L 은 정수가 아니며, 각 서브 채널은 $[M/L]$ 그룹이 할당된다. 그 후 나머지 $M - L[M/L]$ D2D 그룹은 D2D 사용자의 셀룰러 사용자에게 의해 최소 간섭을 받는 부 채널이 할당된다.

4.3 데이터 전력 제어

주어진 세트의 $\{\eta_{l,m}\}$ 에 대해, 총 송신 전력 최소화 문제 (19)은 식 (21)와 같이 된다.

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} (P_{m,k}^{D,(1)} + P_{m,k}^{D,(2)}) + \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C \quad (21)$$

subject to

$$\begin{aligned} \gamma_{l,n}^C &\geq \gamma_{l,n}^{C,thr}, \forall l, n, \\ \gamma_{m,k}^{D,(1)} &\geq \gamma_{m,k}^{D,(1),thr}, \forall m, k, \\ \gamma_{m,k}^{D,(2)} &\geq \gamma_{m,k}^{D,(2),thr}, \forall m, k, \\ P_{m,k}^{D,(1)} &\leq P_{\max,m,k}^{D,(1)}, \forall m, k, \\ P_{m,k}^{D,(2)} &\leq P_{\max,m,k}^{D,(2)}, \forall m, k, \\ P_{l,n}^C &\leq P_{\max,l,n}^C, \forall l, n \end{aligned}$$

식 (21)는 Theorem 1에서 볼 수 있듯이 볼록 프로그래밍(Convex program)임을 강조한다.

Theorem 1. 최적화 문제 식 (21)은 선형 프로그램이다. 결과적으로 전역 솔루션이 존재하는 경우 일반 내점 도구(interior-point toolbox)를 사용하여 다항식 시간으로 구할 수 있다.

증명 : Theorem 1의 증명은 식(21)가 선형 프로그램임을 증명하는 것이다. 목적 함수는 선형이며, 전력 제약도 선형적으로 실현 가능하게 설정된다. 또한, 셀룰러 사용자들의 SINR 제한은 다음과 같이 다시 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} & \gamma_{l,n}^{C,thr} \sum_{n'=1}^{N_l} P_{l,n'}^C |w_{l,n}^H h_{l,n'}|^2 + \gamma_{l,n}^{C,thr} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \eta_{l,m} \quad (22) \\ & \times |w_{l,n}^H g_m|^2 (P_{m,k}^{D,(1)} + P_{m,k}^{D,(2)}) + \gamma_{l,n}^{C,thr} \|w_{l,n}\|_2^2 \\ & \times \sigma_{UL}^2 - (\gamma_{l,n}^{C,thr} + 1) P_{l,n}^C |w_{l,n}^H h_{l,n}|^2 \leq 0 \end{aligned}$$

이것은 아핀(Affine) 제약이다. D2D 사용자의 SINR 제약 조건도 유사하게 처리되는 아핀이다. 따라서 표준 형식 [12]과 일치하면, 최적화 문제 (21)는 선형 프로그램이다.

Theorem 1은 CVX와 같은 범용 도구(Toolbox)가 식 (21)에 대한 전역적 솔루션을 찾을 수 있다는 유용성을 나타낸다[13]. 그러나 $2 \sum_{m=1}^M K_m + \sum_{l=1}^L N_l$ 최적화 변수와 $2 \sum_{l=1}^L N_l + 4 \sum_{m=1}^M K_m$ 제약 조건에서 내점(interior-point) 방식을 사용하는 도구(Toolbox)는 식 (23)와 차원의 복잡도를 요구한다.

$$O(\max\{F_1, F_2\}) \quad (23)$$

식 (23)에서 F_1 과 F_2 는 식 (24)와 같이 정의된다.

$$F_1 = \left(2 \sum_{m=1}^M K_m + \sum_{l=1}^L N_l \right)^3 \quad (24)$$

$$F_2 = \left(2 \sum_{m=1}^M K_m + \sum_{l=1}^L N_l \right)^2 \left(2 \sum_{l=1}^L N_l + 4 \sum_{m=1}^M K_m \right) \quad (25)$$

이 식은 여전히 네트워크 크기에 따라 기하급수적으로 증가한다. 따라서 본 연구에서는 최적해가 존재하면 모든 SINR 제약 조건이 동일하다는 관찰 하에 식 (21)에 대한 closed-form해를 조사한다. 구체적으로, 셀룰러 사용자들의 $\sum_{l=1}^L N_l$ 개의 SINR 제약들은 아래와 같이 동일하게 된다.

$$\begin{aligned} & \frac{P_{l,n}^C |w_{l,n}^H h_{l,n}|^2}{\gamma_{l,n}^{C,thr}} - \sum_{n'=1, n' \neq n}^{N_l} P_{l,n'}^C |w_{l,n}^H h_{l,n'}|^2 \quad (26) \\ & - \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^{K_m} \eta_{l,m} |w_{l,n}^H g_m|^2 (P_{m,k}^{D,(1)} + P_{m,k}^{D,(2)}) \\ & - \|w_{l,n}\|_2^2 \sigma_{UL}^2 = 0, \forall l, n \end{aligned}$$

마찬가지로 약한 D2D 사용자의 $\sum_{m=1}^M K_m$ SINR 제약 조건은 식 (27)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{P_{m,k}^{D,(1)} |g_{m,k}^{(1)}|^2}{\gamma_{m,k}^{D,(1)}} - P_{m,k}^{D,(2)} |g_{m,k}^{(1)}|^2 - \sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m}}^M \sum_{k=1}^{K_{m'}} \eta_{l,m'} \quad (27) \\ & \times |g_{m',k}^{(1)}|^2 (P_{m',k}^{D,(1)} + P_{m',k}^{D,(2)}) - \sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C |h_{l,n,m,k}^{(1)}|^2 \\ & - \sigma_{DL}^2 = 0, \forall m, k \end{aligned}$$

최적 솔루션에서, 강한 D2D 사용자의 $\sum_{m=1}^M K_m$ SINR 제약 조건은 식 (28)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{P_{m,k}^{D,(2)} |g_{m,k}^{(2)}|^2}{\gamma_{m,k}^{D,(2)}} - \sum_{\substack{m'=1 \\ m' \neq m}}^M \sum_{k=1}^{K_{m'}} \eta_{l,m'} |g_{m',k}^{(2)}|^2 \quad (28) \\ & \times (P_{m',k}^{D,(1)} + P_{m',k}^{D,(2)}) - \sum_{n=1}^{N_l} P_{l,n}^C |h_{l,n,m,k}^{(2)}|^2 \\ & - \sigma_{DL}^2 = 0, \forall m, k \end{aligned}$$

여기서 식 (26), (27), (28)의 선형 방정식을 푸는 것이 행렬 역변환으로 감소되는 것을 알 수 있다. Cholesky 분해법(Decomposition)[14]을 사용함으로써 계산 복잡도는 식 (29)과 같이 줄어들며, 내점 방법보다 덜 복잡하다.

$$O\left(\left(2 \sum_{m=1}^M K_m + \sum_{l=1}^L N_l \right)^2 \right) \quad (29)$$

4.4 채널 모델

네트워크에서 모든 전파 채널은 상호 간섭이 없는 Rayleigh 분포 패턴을 따르며, 공식은 다음과 같다.

$$h_{l,n} \sim CN(0, \beta_{l,n} I_N), \forall n, l \quad (30)$$

$$g_m \sim CN(0, \beta_m I_N), \forall m \quad (31)$$

$$h_{l,n,m,k}^{(i)} \sim CN(0, \beta_{l,n,m,k}^{(i)}), \forall l, n, m, k, i \quad (32)$$

$$g_{m,k}^{(i)} \sim CN(0, \beta_{m,k}^{(i)}), \forall l, m, i \quad (33)$$

여기서 $\beta_{l,n}, \beta_m, \beta_{l,n,m,k}^{(i)}$ 및 $\beta_{m,k}^{(i)}$ 는 경로 손실(Path loss) 및 음영 페이딩(Shadow fading)을 모델링하는 대규모 페이딩 계수(Fading coefficient)를 나타낸다.

이 계수들은 다음과 같이 정의된다.

$$\beta_{l,n} = \xi_{l,n} 10^{\frac{\sigma_{z_{l,n}}}{10}} \quad (34)$$

$$\beta_m = \xi_m 10^{\frac{\sigma_{z_m}}{10}} \quad (35)$$

$$\beta_{l,n,m,k}^{(i)} = \xi_{l,n,m,k}^{(i)} 10^{\frac{\sigma_{z_{l,n,m,k}^{(i)}}}{10}} \quad (36)$$

$$\beta_{m,k}^{(i)} = \xi_{m,k}^{(i)} 10^{\frac{\sigma_{z_{m,k}^{(i)}}}{10}} \quad (37)$$

a 는 음영 페이딩의 표준 편차이며, 7dB로 설정된다. $z_{l,n}, z_m, z_{l,n,m,k}$ 및 $z_{m,k}$ 는 $CN(0, 1)$ 으로 분포된다. 경로 손실 계수 $\xi_{l,n}, \xi_m, \xi_{l,n,m,k}^{(i)}$ 및 $\xi_{m,k}^{(i)}$ 에 대해 식 (38)과 같이 주어지는 이중 기울기 모델(Dual-slope model)을 사용한다.

$$\xi = \begin{cases} -47.85 - 20\log_{10}(d), & \text{if } 0 < d \leq d_c [m] \\ -47.85 - 20\log_{10}(d_c) - 40\log_{10}(d/d_c), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (38)$$

여기서, $\xi [dBm] \in \{\xi_{l,n}, \xi_m, \xi_{l,n,m,k}^{(i)}, \xi_{m,k}^{(i)}\}$ 과 d (미터 단위)는 송신기와 수신기 사이의 거리, 즉, $d \in \{d_{l,n}, d_m, d_{l,n,m,k}^{(i)}, d_{m,k}^{(i)}\}$ 를 나타낸다. BS 대 셀룰러 또는 BS 대 NOMA-D2D 디바이스 통신의 경우 임계 d_c 는 152[m]로 설정되고, $d_c = 25[m]$ NOMA-D2D 통신 또는 셀룰러에서 D2D 장치에 대한 임계값을 나타낸다.

V. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 이전 절의 이론 분석 및 제안된 방법을 검증하고 수치 결과로 논의한다. 특히 본 연구에 각 그룹에서 쌍을 나누고 공통 서브 세트의 서브 채널을 사용하여 알고리즘을 시뮬레이션하는데 중점을 둔다. 우리는 결합 서브 채널의 성능과 4가지 경우의 페어링, DBM(Diversity-Based Method)을 포함하는 제안된 페어링과 DBM을 포함하는 기존 페어링, 제안된 랜덤 채널 할당 페어링과 기존의 랜덤 채널 할당 페어링에 대한 성능을 보인다.

네트워크에 대한 일반 파라미터는 표 1에 나와 있으며, 특정 시뮬레이션에서 사용되는 파라미터는 각 그림에 나타나 있다. 단순하고 확장 가능한 구조로 인해, 기지국은 MRC(Maximum Ratio Combining)를 사용하여 셀룰러 사용자들로부터 송신된 신호들을 디코딩한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Cellular radius	250[m]
Base station height	6[m]
Beamforming technology	MRC
D2D group radius	10[m]
Device and Cellular user's height	1.5[m]
Operating frequency	1.9[GHz]
Max. transmit power of users	23[dBm]
Noise power	-96[dBm]
Number of subchannel	5
Quality of service	1[b/s/Hz]

그림 2는 셀룰러 사용자 기능으로 액세스된 D2D 쌍의 수를 보여준다. 이 그림에서 각 사용자의 서비스 품질을 유지하면서 얼마나 많은 D2D 쌍이 네트워크에 액세스 할 수 있는지를 보여준다. 시간 및 주파수 자원이 공유되므로 액세스된 D2D 쌍의 수는 셀룰러 사용자 수가 증가함에 따라 감소하며, D2D 쌍이 10에서 2로 감소함에 따라 제안된 방법은 가장 느린 것을 알 수 있다. 또한 기존의 페어링 방법은 셀룰러 사용자의 수가 10명일 때 D2D 쌍이 네트워크에 액세스하는 것을 허용하지 않는다. 특히 정의된 페어링 방법이 없으면 셀룰러 사용자가 네 명만 되도 D2D 디바이스는 네트워크에 액세스 할

수 없다. 이것은 본 연구에서 설명된 두 가지 페어링 처리 방법이 페어링 없을 때와 비교했을 때 성능이 우수한 것을 나타내며, 본 연구에서 제안된 페어링 방법이 기존의 페어링 방법보다 우수하다는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 제안된 페어링 방법은 좀 더 많은 D2D 디바이스를 네트워크에 접속할 수 있게 하므로 다른 방법보다 좀 더 효율적이다.

그림 3은 셀룰러 사용자의 수에 따른 D2D 디바이스의 총 전송전력을 보여준다. 총 전송전력은 네트워크가 서브 세트, 예를 들어, 페어링하지 않고 5개의 셀룰러 사용자들만을 서비스하는 경우, 셀룰러 사용자들의 수에 직접 비례한다. 각 방법에 대해 D2D 장치의 전송전력이 포화 상태에 있는 셀룰러 사용자 수의 상한선이 있다. 새로운 D2D 사용자는 네트워크에 접속할 수 없으므로 기존의 결합방법과 제안된 결합방법은 각각 7명과 9명의 사용자다. 만일 D2D 사용자가 접속을 시도한다면 시스템이 서비스 유지 보수 및 모든 사용자의 제한된 전력으로 인해 실행 불가능한 상태로 된다. 10명의 셀룰러 사용자가 있는 네트워크의 경우 D2D 사용자의 최대 전송전력이 기존의 페어링 방법에서 사용할 수 있는 240[mW]보다 높은 270[mW]이므로 제안된 시스템은 더 많은 D2D 사용자를 지원할 수 있다.

그림 4는 D2D 장치의 총 전송전력과 그룹의 수의 관계를 보여주며, 알고리즘 1에서와 같이 DBM과 함께 서브 채널 할당을 결합하는 효과를 보여준다. 첫째로 송신 전력은 그룹의 수에 따라 증가한다. 그러나 DBM과 제안된 페어링 방법을 결합하기 위해서는 그룹 수가 1에서 8로 증가 할 때 총 전송전력이 0.2[mW]에서 1.9[mW]로 천천히 증가해야 한다. 이것은 전력 소비가 0.25[mW]에서 2.4[mW]로 증가하는 기존의 페어링과 DBM을 결합하는 방법과 대조된다. DBM이 없으면 네트워크는 모든 고려된 시나리오에서 대부분의 전력을 소비한다. DBM 없이 제안된 페어링 방법만 사용하면 D2D 장치는 데이터 전송에 10.2[mW]가 필요하지만 기존 페어링 방법은 11.5[mW]가 필요하다. 요약하면 제안된 할당 방법은 페어링이 없는 경우와 비교했을 때 송신 전력을 최대 5배까지 감소시킨다.

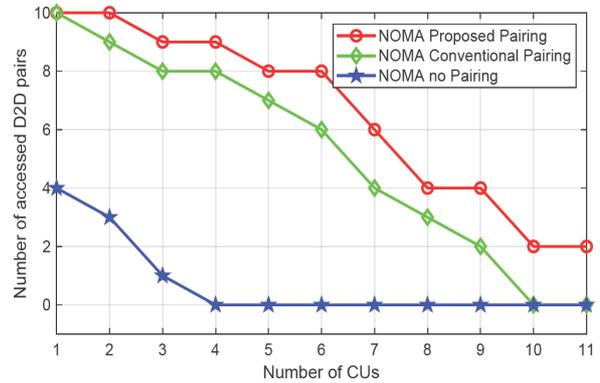


그림 2. 셀룰러 사용자 수에 따른 D2D 쌍의 접속 수
Fig. 2. Number of accessed D2D pairs vs. CUs

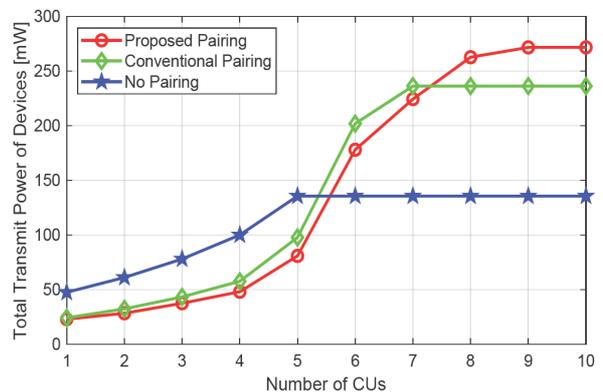


그림 3. 셀룰러 사용자 수에 따른 D2D 디바이스의 총 전송전력
Fig. 3. Total devices transmit power vs. number of CUs

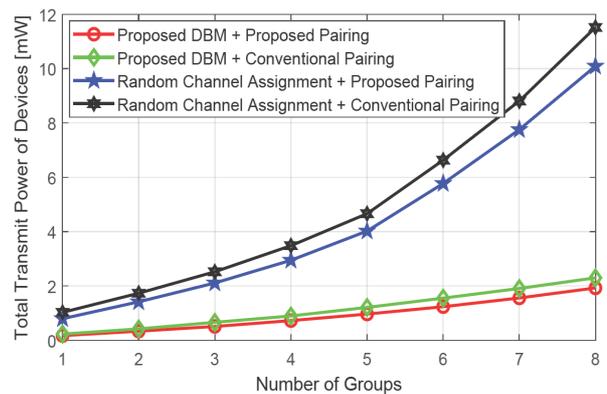


그림 4. D2D 그룹 수에 따른 총 D2D 전송전력
Fig. 4. Total devices transmit power vs. number of groups

그림 5는 D2D 그룹의 수가 증가함에 따라 NOMA-D2D 시스템이 액세스될 확률을 보여준다. 제안된 페어링 방법을 사용하면 그룹 수가 사용 가능한 서브 채널수를 초과하지 않는 한 모든 D2D 장치가 네트워크에 액세스 할 수 있다.

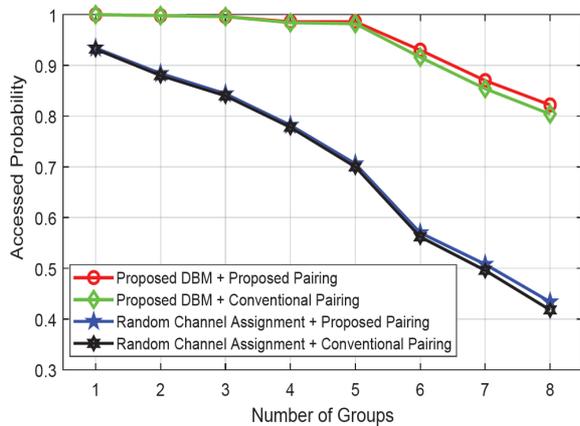


그림 5. D2D 그룹 수에 따른 NOMA-D2D 시스템의 접속 확률

Fig. 5. Accessed probability vs. number of groups

D2D 그룹의 수가 서브 채널의 수보다 크다면, DBM과 제안된 페어링의 조합이 DBM과 기존의 페어링과의 조합보다 약간 좋은 성능을 보인다. 이 그림은 임의로 채널을 할당하는 것이 제안된 DBM 방식보다 성능이 떨어지기 때문에 향상된 채널 할당이 중요하다는 것을 보여준다. DBM을 사용했을 때 액세스 확률은 임의로 채널을 할당할 때보다 최대 39%까지 성능이 향상된다.

VI. 결 론

본 연구에서는 D2D 장치와 셀룰러 사용자가 공유하는 네트워크에 대해서 연구를 하였다. 시뮬레이션 결과 본 연구에서 제안한 DBM(Diversity-Based Method) 방식을 사용했을 때 액세스 확률은 임의로 채널을 할당할 때보다 최대 39%까지 성능을 향상시키며, D2D 쌍은 셀룰러 사용자의 하위 집합과 동일한 리소스를 공유 할 수 있을 뿐만 아니라 NOMA 기술은 스펙트럼 효율을 향상시킨다. 본 연구에서는 네트워크 토폴로지에서 빔 포밍 효율뿐만 아니라 상호 간섭도 고려하면서, D2D 디바이스와 셀룰러 사용자에게 대해 달성 가능한 속도를 계산했다. 그 다음 네트워크에서 모든 사용자에게 대해 매우 큰 제약을 받는 총 전송전력을 최소화하는 방안을 제안했다. 이 문제는 NP 난해(NP hard)한 문제지만 하위 문제(Sub problem)으로 나뉘서 각각의 문제를 복잡성을 낮춰서 효율적으로 해결할 수 있다. 수치

결과는 D2D 장치와 셀룰러 사용자에게 서비스를 제공하는 네트워크 총 전송전력을 줄이는데 있어 페어링 방법과 서브 채널 할당이 중요한 역할을 한다는 것을 보여준다.

References

- [1] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. B. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-Device communication as an underlay to LTE-advanced networks", *IEEE communication Magazine*, Vol. 47, No. 12, pp. 42-49, Dec. 2009
- [2] L. Wang, H. Tang, H. Wu, and G. L. Stüber, "Resource Allocation for D2D Communications Underlay in Rayleigh Fading Channels", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 66, No. 2, pp. 1159-1170, Feb. 2017.
- [3] M. S. Ali, H. Tabassum, and E. Hossain, "Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (noma) systems", *IEEE Access*, Vol. 4, pp. 6325-6343, Aug. 2016.
- [4] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura, "Systemlevel performance evaluation of downlink non-orthogonal multiple access (NOMA)", *24th International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, London, UK, No. 14023675, pp. 611-615, Jun. 2013.
- [5] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Dresden, Germany, pp. 1-5, Jun. 2013.
- [6] P. Parida and S. S. Das, "Power allocation in OFDM based NOMA systems: A DC programming approach", *Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Austin, TX, USA, pp. 1026-1031, Dec. 2014.

- [7] J. Zhao, Y. Liu, K. K. Chai, Y. Chen, and M. El-kashlan, "Joint subchannel and power allocation for NOMA enhanced D2D communications", IEEE Transactions on Communications, Vol. 65, No. 11, pp. 5081-5094, Nov. 2017.
- [8] Y. Pan, C. Pan, Z. Yang, and M. Chen, "Resource allocation for D2D communications underlying a NOMA-based cellular network", IEEE Wireless Communication Letter, Vol. 7, No. 1, pp. 130-133, Oct. 2017.
- [9] A. M. Shipon, H. Ekram, and K. D. In, "Coordinated multipoint transmission in downlink multi-cell NOMA systems: Models and spectral efficiency performance", IEEE Wireless Communications, Vol. 25, No. 2, pp. 24-31, Apr. 2018.
- [10] F. Zhou, Y. Wu, R. Q. Hu, Y. Wang, and K. K. Wong, "Energy-efficient noma enabled heterogeneous cloud radio access networks", IEEE Network, Vol. 32, No. 2, pp. 152-160, Mar. 2018.
- [11] M. A. Sedaghat and R. R. Müller, "On user pairing in noma uplink", IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 17, pp. 3474-3486, May 2018.
- [12] S. Boyd and L. Vandenberghe, "Convex Optimization", Cambridge University Press, 2004.
- [13] CVX Research Inc., "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, academic users", 2015.
- [14] R. Horn and C. Johnson, "Matrix Analysis", Cambridge University Press, 2003.
- [15] N. S. Kim, "Optimum Power Allocation of Cooperative NOMA Systems Based on User Relay", The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 17, No. 5, pp. 25-33, Oct. 2017.
- [16] J. S. Kim and M. H. Lee, "Design of User Clustering and Robust Beam in 5G MIMO-NOMA System Multicell", The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication, Vol. 18 No. 1, pp. 59-69, Feb. 2018.

저자소개

유 시 영 (Siyeong Ryoo)



1988년 3월 : 단국대학교

전자공학과(공학사)

1990년 2월 : 한양대학교

전자공학과(공학석사)

2002년 2월 : 한양대학교

전자공학과(공학박사)

1995년 ~ 현재 : 국립 공주대학교

정보통신공학부 교수

관심분야 : 신호처리, 자동제어

노 승 환 (Soonghwan Ro)



1987년 : 고려대학교 전자공학과
(공학사)

1989년 : 고려대학교 전자공학과
(공학석사)

1993년 : 고려대학교 전자공학과
(공학박사)

2003년 : 영국버밍엄 대학교

초빙연구원

1994년 ~ 현재 : 국립 공주대학교 정보통신공학부 교수

관심분야 : 5G이동통신, 임베디드시