

## 셀룰러 네트워크에서 언더레이 기반의 단말간 직접통신을 위한 스케줄링 방법

반태원\*

### Scheduling Scheme for Underlay-based D2D Direct Communications in Cellular Networks

Tae-Won Ban\*

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

#### 요 약

최근, 단말간 직접 통신에 대한 관심이 높아지면서 이에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 셀룰러 이동통신 네트워크에서 단말간 직접 통신을 지원할 수 있는 알고리즘에 대하여 연구하였다. 먼저, 셀룰러 이동통신 네트워크에서 상향 링크 주파수 자원을 활용하여 이동통신 서비스와 단말간 직접 통신을 동시에 제공할 경우 이론적으로 최대의 전송율을 얻을 수 있는 최적 방식을 제시하였다. 그리고, 최적 방식 대비 복잡도를 획기적으로 절감할 수 있는 스케줄링 알고리즘을 제안하고, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 성능을 분석하였다.

#### ABSTRACT

Recently, device-to-device (D2D) direct communication is attracting much interest and many researches have been conducted. In this paper, we investigated an algorithm to support the D2D direct communication in cellular mobile communication networks. We investigated the optimal D2D scheduling algorithm which can achieve the maximal sum-rate in cellular uplink frequency. We also proposed a simple scheduling algorithm which can considerably reduce the computational complexity, compared to the optimal scheme. Finally, we analyzed the performance of the proposed scheme based on computer simulations.

**키워드** : 단말간 직접 통신, 스케줄링, 계산 복잡도

**Key word** : Device-to-device direct communication, scheduling, computational complexity

Received 08 October 2015, Revised 26 October 2015, Accepted 09 November 2015

\* Corresponding Author Tae-Won Ban(E-mail:twban35@gnu.ac.kr, Tel:+82-55-772-9177)

Department of Information and Communication Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.12.2800>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서론

단말간(Device-to-device:D2D) 직접 통신 (Direct communication) 은 기지국이나 중계기와 같은 추가적인 장비 투자 없이 통신 서비스의 영역을 쉽게 확장할 수 있다. 기존의 통신 장비들이 동작하지 않는 재난과 같은 비상 상황에서 이런 D2D 직접 통신은 인명 구조에 중요한 역할을 할 수 있다[1]. 따라서, 미국의 연방 통신 위원회(FCC)에서는 공공안전망에서 반드시 D2D 통신을 지원하도록 규정하고 있다[2]. 또한, D2D 통신은 일반적인 셀룰러 이동통신과 달리 송신기와 수신기 사이의 거리가 상대적으로 가깝기 때문에 높은 전송 속도의 데이터 서비스 제공이 가능하고, 단말의 전력 소모를 획기적으로 감소시킬 수 있다. D2D 통신의 이러한 장점들로 인하여, 최근 단말간 직접 통신에 대한 관심이 증가하고 있으며, 관련 연구가 활발히 진행되고 있다[3-9]. 3<sup>rd</sup> generation partnership project(3GPP)에서는 4세대 이동통신 시스템인 long term evolution (LTE) 기반의 D2D 직접 통신 표준화를 진행하고 있으며[4], 제한된 주파수 자원을 활용하여 D2D 통신과 기존의 셀룰러 이동통신 서비스를 동시에 제공하는 언더레이 방식에 대한 이론적 연구가 활발히 이루어지고 있다[5-9]. 대부분의 기존 논문들은 D2D 네트워크에서의 자원 할당 및 간섭 제어와 같은 이론적 연구에 집중하고 있으며, 셀룰러 네트워크에서 활용 가능한 실용적인 스케줄링 알고리즘에 대한 연구는 부족하다.

따라서, 본 논문에서는 셀룰러 네트워크에서의 D2D 통신을 지원할 수 있는 간단한 실용적인 스케줄링 알고리즘을 제안하고 전송율의 합을 시뮬레이션을 통해서 분석한다. II장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 모델과 채널 모델을 설명하고, III장에서는 셀룰러 네트워크에서의 D2D 통신을 위한 스케줄링 알고리즘을 제안한다. IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안 방식의 성능을 분석하고 최적 방식의 성능과 비교한다. 마지막으로, V장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 및 채널 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하고 있는 셀룰러 네트워크에서 언더레이 기반의 D2D 통신 네트워크를 나타낸

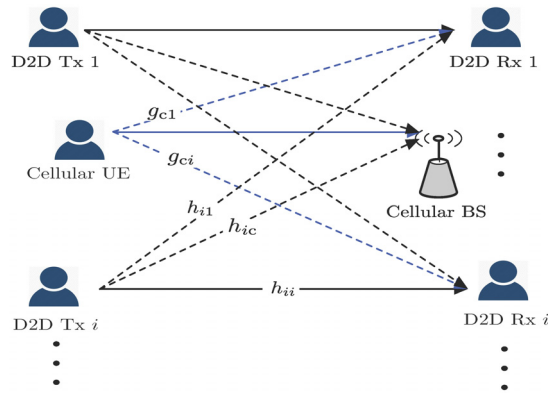


Fig. 1 Device-to-device direct communication in cellular network

다. 모든 단말들은 일반적인 셀룰러 이동통신 서비스를 정상적으로 제공받기 위하여 셀룰러 기지국과 연결이 설정되어 있으며, 이동통신 기지국은 자신의 서비스 영역 내에서 이루어지는 D2D 통신과 관련된 모든 동작을 제어한다. 그리고, 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하기 위하여 D2D 통신과 셀룰러 이동통신은 동일 주파수 자원을 공유한다. D2D 통신은 주파수 분할 이중화를 채택하고 있는 이동통신 네트워크의 상향 링크 주파수 또는 하향 링크 주파수를 이용할 수 있다. 일반적으로 이동통신 네트워크에서는 상-하향 링크에서 발생하는 트래픽의 비대칭성으로 인하여 하향 링크 대비 상향 링크 주파수의 이용률이 낮다. 따라서, D2D 통신은 주파수 분할 이중화 이동통신 네트워크에서 상향 링크 주파수를 활용하는 것이 바람직하다. 본 논문에서는  $N$ 개의 D2D 통신 링크가 존재하는 것으로 가정한다. 즉, D2D 송신기와 수신기가 각각  $N$ 개씩 존재한다.  $h_{ij}$ 는 D2D 송신기  $i$ 와 D2D 수신기  $j$ 사이의 채널 이득을 나타내며 평균 0과 분산 1을 가지는 복소 정규 분포를 따르는 것으로 가정한다.  $h_{ic}$ 는 D2D 송신기  $i$ 와 셀룰러 이동통신 기지국 사이의 채널 이득을 나타내며 역시 평균 0과 분산 1을 가지는 복소 정규 분포를 따르는 것으로 가정한다. 또한,  $g_{ci}$ 는 이동통신 네트워크 상향 링크를 통해서 기지국으로 데이터를 전송하는 셀룰러 단말과 D2D 단말  $i$ 사이의 채널 이득을 나타내며,  $h_{ij}$ 와 동일하게 평균 0과 분산 1을 가지는 복소 정규 분포를 따르는 것으로 가정한다. 우리는 각 D2D 링크의 전송

- 
- 1: Select D2D pairs satisfying  $\rho^d |h_{ic}|^2 \leq I_{th}$  and define them as an eligible set  $\mathcal{E}$ .
  - 2: Rank the D2D pairs in  $\mathcal{E}$  in a descending order according to  $|h_{\mathcal{E}(i)\mathcal{E}(i)}|^2$  ( $1 \leq i \leq |\mathcal{E}|$ ) and define it as  $\hat{\mathcal{E}}$ .
  - 3: **for**  $k = 1$  to  $|\hat{\mathcal{E}}|$  **do**
  - 4:  $C_{prop}(k) = \sum_{i=1}^k \log_2 \left( 1 + \frac{\rho |h_{\hat{\mathcal{E}}(i)\hat{\mathcal{E}}(i)}|^2}{\sum_{j=1, j \neq i}^k \rho |h_{\hat{\mathcal{E}}(j)\hat{\mathcal{E}}(i)}|^2 + \rho |g_{c\hat{\mathcal{E}}(i)}|^2 + 1} \right)$
  - 5:  $I_{prop}(k) = \sum_{i=1}^k \rho |h_{iC}|^2$
  - 6: **end for**
  - 7:  $C_{prop}^* = \max_{1 \leq k \leq |\mathcal{E}|} C_{prop}(k)$   
s.t.  $I_{prop}(k) \leq I_{th}$
- 

**Fig. 2** Proposed simple D2D link scheduling scheme

여부를 수학적으로 표현하기 위하여 0과  $(2^N - 1)$  사이의 십진수 정수  $n$  ( $0 \leq n \leq 2^N - 1$ )을 정의한다.  $n$ 은  $N$ 자리의 이진수를 변환 가능하다. 이 이진수의  $i$ 번째 자리수  $b_i(n)$ 은  $i$ 번째 D2D 링크에서 데이터 전송이 이루어지는 경우는 1로 표시하며, 그렇지 않은 경우에는 0으로 표시한다. 특정 정수  $n$ 이 주어질 때,  $i$ 번째 D2D 링크 수신단에서의 수신 SINR은 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_i(n) = \frac{b_i(n)P|h_{ii}|^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^N b_k(n)P|h_{ki}|^2 + P|g_{ci}|^2 + N_0} \quad (1)$$

식 (1)에서  $P$ 는 송신 단말의 송신 전력을 나타내고,  $N_0$ 는 수신단에서의 열 잡음 전력을 나타낸다. 식 (1)의 분모와 분자를  $N_0$ 로 나누면 다음의 식 (2)를 얻을 수 있다.

$$\gamma_i(n) = \frac{b_i(n)\rho|h_{ii}|^2}{\sum_{k=1, k \neq i}^N b_k(n)\rho|h_{ki}|^2 + \rho|g_{ci}|^2 + 1} \quad (2)$$

여기서,  $\rho = \frac{P}{N_0}$ 는 송신 단말의 송신 신호 전력대 잡음 비율 (SNR)을 나타낸다. 식 (2)를 활용하여 D2D 네트워크의 전체 전송율의 합은 다음과 같이 계산된다.

$$C(n) = \sum_{i=1}^N \log_2(1 + \gamma_i(n)) \quad (3)$$

한편, D2D 통신으로 인하여 셀룰러 기지국에 야기되는 전체 간섭의 양은 다음과 같이 계산된다.

$$I(n) = \sum_{i=1}^N b_i(n)P|h_{ic}|^2 \quad (4)$$

언더레이 기반의 D2D 통신 네트워크는 D2D 통신과 일반 셀룰러 통신이 동일한 주파수 자원을 공유함으로써 주파수 효율성은 획기적으로 개선될 수 있지만, D2D 통신으로 인하여 식 (5)와 같이 셀룰러 기지국에 추가적으로 간섭이 발생하여 기존의 이동통신 서비스 품질이 저하될 수 있다. 따라서, 기존의 이동통신 서비스 품질을 보호하기 위하여 다음과 같이 간섭을 일정 수준 이하로 유지하여야만 한다.

$$I(n) \leq I_{th} \quad (5)$$

### III. 제안하는 셀룰러 네트워크에서의 D2D 링크 스케줄링 기법

셀룰러 이동통신 기지국은 다음과 같이 식 (4)를 만족하면서 식 (3)에서 계산된 전체 전송율의 합을 최대화시키는 최적의 D2D 링크 조합을 선택할 수 있다.

$$R_{opt} = \max_{1 \leq n \leq 2^N - 1} C(n) \quad (6)$$

s.t.  $I(n) \leq I_{th}$

그러나, 위의 식 (6)는 전체  $(2^N - 1)$ 개의 조합에 대한 전송율의 합중에서 최대값을 찾아야 하므로,  $N$ 값이 증가할수록 계산 복잡도가  $(2^N - 1)$ 으로 기하급수적으로 증가하게 된다. 따라서, 본 논문에서는 보다 간단한 D2D 링크 스케줄링 기법을 제안하며, 제안된 알고리즘은 그림 2에 자세히 설명되어 있다. 제안된 방식에서는 식 (6)를 만족하는 D2D 링크들을 모아서 다음과 같이 집합  $\mathcal{e}$ 으로 정의한다.

$$\mathcal{e} = \{i | \rho |h_{ic}|^2 \leq I_{th}\} \quad (7)$$

1) 모든 D2D 링크들이 데이터를 전송하지 않는 경우를 제외한다.

그리고,  $\varepsilon$ 에 포함된 D2D 링크를 채널 이득의 크기에 따라서 다음과 같이 내림 차순으로 정리하여 새로운  $\hat{\varepsilon}$ 로 정의한다.

$$|h_{\hat{\varepsilon}(1)\hat{\varepsilon}(1)}|^2 \geq |h_{\hat{\varepsilon}(2)\hat{\varepsilon}(2)}|^2 \geq \dots \quad (8)$$

$\hat{\varepsilon}$ 의 첫 번째 D2D 링크부터 차례대로  $k(1 \leq k \leq |\varepsilon|)$  번째 D2D 링크까지 추가할 경우 얻을 수 있는 전송률의 합  $C_{\text{prop}}(k)$ 와 그때 셀룰러 기지국에 야기되는 간섭량  $I_{\text{prop}}(k)$ 을 계산한다. 그중에서 간섭 조건  $I_{\text{prop}}(k) \leq I_{\text{th}}$ 을 만족하면서 전송률의 합을 최대화 시키는  $k$ 를 다음과 같이 찾는다.

$$k^* = \underset{1 \leq k \leq |\varepsilon|}{\text{arg max}} C_{\text{prop}}(k) \quad (9)$$

*s.t.*  $I_{\text{prop}}(k) \leq I_{\text{th}}$

최종적으로  $\{\hat{\varepsilon}(1), \dots, \hat{\varepsilon}(k^*)\}$ 의  $k^*$ 개의 D2D 링크들이 동시에 데이터를 전송한다.

#### IV. 성능 분석

그림 3은  $N$ 이 5 또는 15일 때, 최적 방식과 제안 방식의 평균 전송률의 합을 나타낸다. 모든 채널 계수들은 independent and identically distributed (i.i.d.) 인 것으로 가정하였으며,  $I_{\text{th}} = 3\text{dB}$ 로 가정하였다. 그림 3에서 확인할 수 있듯이, 두 방식 모두  $N$ 이 클수록 사용자 선택 이득으로 인하여 전송률의 합은 증가한다. 반면에, 송신 단말의 SNR이 증가할수록 전송률의 합이 증가하다가 감소하는 경향을 나타낸다. 이는, SNR이 일정 수준 이상으로 지나치게 증가할 경우, 셀룰러 이동통신 기지국에 야기되는 간섭이 증가하여 D2D 링크가  $\varepsilon$ 에 포함될 확률이 낮아지기 때문이다. 제안 방식은  $N$ 값에 관계없이 낮은 SNR 영역과 높은 SNR 영역에서는 최적 방식과 거의 동일한 성능을 나타내며 중간 SNR 영역에서는 최적 방식 대비 성능 저하가 나타나게 된다. 그러나, 그 성능 저하가 미미한 반면, 제안 방식은 최적 방식 대비 계산량을 획기적으로 감소시킬 수 있다. 제안 방식의 계산량 절감 효과는 그림 4에서 확인할 수 있다. 그림 4는 그림 3과 동일한 환경에서 최적 방식에서 필

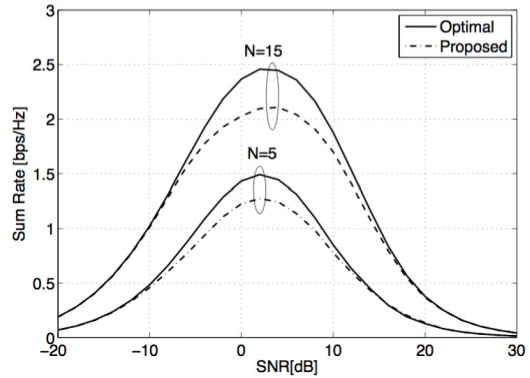


Fig. 3 Average sum-rate for the optimal and proposed schemes ( $N=5$  or  $15$ ,  $I_{\text{th}} = 3\text{dB}$ )

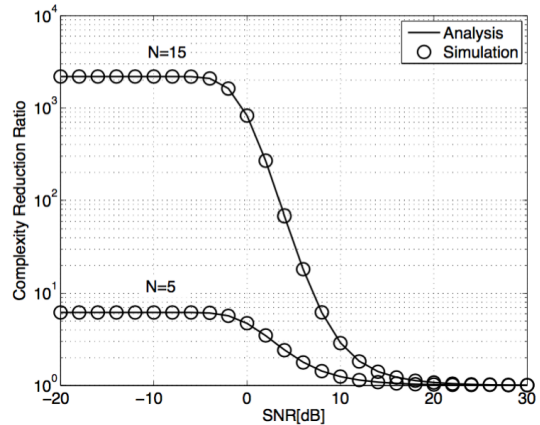


Fig. 4 The complexity reduction ratio of the proposed scheme to the optimal scheme ( $N=5$  or  $15$ ,  $I_{\text{th}} = 3\text{dB}$ )

요한 계산량 대비 제안 방식의 계산량 비율을 나타낸다. 그림에서 확인할 수 있듯이  $N$  값이 클수록 또는 SNR이 낮을수록 제안 방식의 계산량 절감 효과가 커짐을 알 수 있다.

#### V. 결론

본 논문에서는 셀룰러 이동통신 서비스와 D2D 통신이 공존하는 네트워크에서 D2D 링크의 효율적인 스케줄링 방법에 대하여 연구하였다. 제한된 주파수 자원의 효율적 활용을 위하여 D2D 통신은 셀룰러 이동통신 서비스와 상향 링크 주파수 자원을 공유한다. 그러나, 기

존의 셀룰러 이동통신 서비스의 품질을 보장하기 위하여 셀룰러 기지국에 야기되는 전체 간섭량을 일정 수준 이하로 유지하여야 한다. 최적의 링크 스케줄링 기법은 모든 가능한 조합을 고려함으로써 최대의 전송율을 얻을 수 있지만 D2D 링크의 수가 증가할수록 계산량이 기하급수적으로 증가한다.

반면에, 제안된 스케줄링 기법은 채널 이득에 따라서 D2D 링크들을 정렬한 후 순차적으로 전송율과 간섭량을 계산함으로써 계산량을 획기적으로 줄일 수 있다. 성능 분석 결과, 제안된 방식은 SNR이 낮거나 높을 경우 최적 방식과 동일한 성능을 보이며, 중간 SNR 영역에서는 최적 방식 대비 미미한 성능 저하를 나타낸다. 그러나, 제안 방식은 최적 방식 대비 계산량을 획기적으로 절감할 수 있다. 구체적으로,  $N$ 이 15이고 SNR이 0dB일 경우 제안 방식의 계산량은 최적 방식의 약 1/1,000에 불과하다.

### ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Institute for Information & communications Technology Promotion (IITP) grant funded by the Korea government (MSIP) (No.&#160;B0101-15-1272, Development of Device Collaborative Giga-Level Smart Cloudlet Technology).

### REFERENCES

- [1] 3GPP TR 22.803 v12.2.0, Feasibility study for Proximity Services (ProSe) (Release 12).
- [2] FCC “Third Report and Order and Fourth Further Notice of Proposed Rulemaking” pertaining to Docket Numbers: WT Docket No. 06-150, PS Docket No. 06-229 and WP Docket No. 07-100.
- [3] G.Fodor,E.Dahlman,G.Mildh,S.Parkvall,N.Reider,G.Miklos, and Z. Turanyi, “Design aspects of network assisted device-to-device communications,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 50, no. 3, pp. 170-177, March 2011.
- [4] 3GPP work programme. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org/DynaReport/GanttChart-Level-2.htm#bm580059>
- [5] S. Hakola, T. Chen, J. Lehtomaki, and T. Koskela, “Device-to-device (D2D) communication in cellular network-Performance analysis of optimum and practical communication mode selection,” in *IEEE WCNC*, April 2010, pp. 1-6.
- [6] R. Zhang, X. Cheng, L. Yang, and B. Jiao, “Interference-aware graph based resource sharing for device-to-device communications underlying cellular networks,” in *IEEE WCNC*, April 2013, pp. 140-145.
- [7] J. Wang, D. Zhu, C. Zhao, James C. F. Li, and M. Lei, “Resource sharing of underlying device-to-device and uplink cellular communications,” *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1148-1151, June 2013.
- [8] S. Shalmashi, G. Miao, and S. B. Slimane, “Interference management for multiple device-to-device communications underlying cellular networks,” in *IEEE PIMRC*, Sept 2013, pp. 223-227.
- [9] J. Wang, D. Zhu, C. Zhao, J. C. F. Li, and M. Lei, “Resource sharing of underlying device-to-device and uplink cellular communications,” *IEEE Communications Letters*, vol. 17, no. 6, pp. 1148-1151, June 2013.



반태원(Tae-Won Ban)

1998년 2월 경북대학교 전자공학과 학사  
2000년 2월 경북대학교 전자공학과 석사  
2010년 2월 KAIST 전기전자공학과 박사  
2000년 2월 ~ 2012년 8월 KT 네트워크부문  
2012년 9월 ~ 현재 경상대학교 정보통신공학과 조교수  
※관심분야 : 이동통신, 자원관리, 간섭관리, 협력 및 중계통신, 인지통신, 주파수 공유, 차세대 이동통신 시스템