

# 셀룰러 네트워크에서 D2D 통신을 고려한 에너지 효율성 분석

정민채\*, 최수용\*

## Analysis of Energy Efficiency Considering Device-to-Device (D2D) Communications in Cellular Networks

Minchae Jung\*, Sooyong Choi\*

### 요약

본 논문은 셀룰러 네트워크에서 D2D (device-to-device) 통신을 고려한 시스템의 에너지 효율적인 모드 선택 기법 (mode selection) 및 파워 할당 기법 (power allocation)을 제안한다. 본 논문에서는 각 단말(device)의 에너지 효율성의 합 측면에서 에너지 효율성 (energy efficiency)을 분석한다. 먼저, 각 단말의 모든 가능한 모드에 대해 에너지 효율을 최대화하는 전송 파워를 계산한다. 제안하는 파워 할당 기법은 시스템 용량 측면에서 최적은 아니지만, 에너지 효율성 측면에서 최적의 성능을 보인다. 제안하는 전송 파워 할당 기법을 기반으로, 모든 가능한 모드에 대해 에너지 효율성을 구한다. 다음 단계로, 모든 가능한 모드 중에서 최대의 에너지 효율성을 갖는 모드를 구하며 동시에 해당 모드의 할당 전송 파워를 도출할 수 있다. 제안 기법은 에너지 효율성 측면에서 최적의 성능을 보이며, 기존 기법에 비해 월등한 성능을 보인다.

**Key Words** : Wideband code division multiple access (WCDMA), device-to-device (D2D), power allocation, mode selection, energy efficiency

### ABSTRACT

This paper proposes an energy-efficient mode selection and power allocation scheme in device-to-device (D2D) communication system as an underlay coexistence with cellular networks. We analyze the energy efficiency which is defined as the summation of the energy efficiencies for all devices. The proposed scheme consists of two steps. First, we calculate the transmission power maximizing the energy efficiency for all possible modes of each device. Although the proposed power cannot maximize the system capacity, we prove that the proposed transmission power is the optimal power which maximizes the energy efficiency. In the second step, we select a mode which has the maximal energy efficiency among all possible mode combinations of the devices. Then we can jointly obtain the transmission power and the mode which can maximize the energy efficiency. The proposed scheme has the optimal performance with respect to the energy efficiency and outperforms the conventional schemes.

### I. 서론

시스템 성능의 향상과 단말의 에너지를 절약하기

위해, 셀룰러 네트워크와 공존하는 D2D 통신 (device-to-device communication) 시스템이 제안되었다<sup>1-7</sup>. 최근 이러한 셀룰러 네트워크와 D2D 통신

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(no.2012R1A1A2041906).

◆ 주저자 : 연세대학교 전기전자공학과, hosaly@yonsei.ac.kr, 정희원

\* 연세대학교 전기전자공학과, csyong@yonsei.ac.kr, 종신희원

논문번호 : KICS2013-06-267, 접수일자 : 2013년 6월 28일, 최종논문접수일자 : 2013년 7월 17일

시스템이 공존하는 시스템 환경은 많은 관심을 받고 있다<sup>[1-7]</sup>.

셀룰러 네트워크와 공존하는 D2D 통신에서 단말은 셀룰러가 사용하는 주파수 스펙트럼의 상향 링크 혹은 하향 링크를 통하여 직접 통신을 진행한다<sup>[1]-[7]</sup>. 하지만 이러한 D2D 통신은 셀룰러 네트워크의 상향 링크 신호 및 하향 링크 신호와 서로 간섭으로 작용하기 때문에, 셀룰러 네트워크와 D2D 통신이 공존하는 환경은 대표적인 간섭 제한적인 (interference-limited) 시스템이다. 따라서 이러한 시스템 환경에서 시스템 용량을 증가시키기 위해서는 효율적인 간섭 조절 기법이 필수적이다<sup>[1]-[6]</sup>. 간섭을 조절하는 기법들 중에서는 모드 선택 기법 (mode selection)<sup>[1]-[3]</sup>, 파워 할당 기법 (power allocation)<sup>[1,4,5]</sup>, 그리고 자원 할당 기법 (resource allocation)<sup>[2,6]</sup> 을 통해 간섭을 효율적으로 관리할 수 있다. 모드 선택 기법은 단말 간 직접 통신하는 DM (D2D mode) 또는 기지국을 통해 통신하는 CM (cellular mode) 중 단말이 모드를 선택하는 방법이다. 셀룰러 네트워크와 D2D 통신이 공존하는 시스템을 기반으로, [1]-[6]에서 제안된 기존 기술에는 몇 가지 한계점이 있다. 첫 번째로, [2]-[6]에서는 다수의 셀룰러 단말과 D2D 단말을 고려하지 않은 단순한 시스템 환경을 고려하였다. 특히, [2]-[5]에서는 한 개의 셀룰러 단말과 한 쌍의 D2D 단말을 고려하였으며, [6]은 다수의 셀룰러 단말과 한 쌍의 D2D 단말을 고려하였다. 좀 더 일반적인 무선 통신 네트워크 환경을 고려하기 위해서는 다수의 셀룰러 단말과 다수의 D2D 단말이 공존하는 환경을 고려해야 한다. 두 번째로, 셀룰러 네트워크와 D2D 통신이 공존하는 환경에서는 시스템 용량이나 총 소모 에너지는 적절한 성능 척도가 될 수 없다. D2D 통신이 기존의 시스템에 적용됨에 따라 얻을 수 있는 대표적인 두 가지 측면이 시스템 용량 상승과 단말의 소모 에너지 감소이기 때문에<sup>[1]-[7]</sup>, 두 관점을 동시에 고려하는 성능 척도가 필수적이다. 그러나 기존 [2]-[6]과 [1]에서 진행한 연구는 각각 시스템 용량만을 최대화 하거나 시스템 내 단말들의 총 소모 에너지를 최소화 하는 것을 성능 척도로 정의하여 기술을 제안하였다.

본 논문에서는 다수의 D2D 쌍과 다수의 셀룰러 단말이 공존하는 시스템 환경을 고려한다. 또한 D2D 통신의 두 가지 이점을 동시에 고려하기 위해서 에너지 효율성 측면에서 시스템을 분석한다. 본 논문에서 고려하는 에너지 효율성은 단말이 소모한

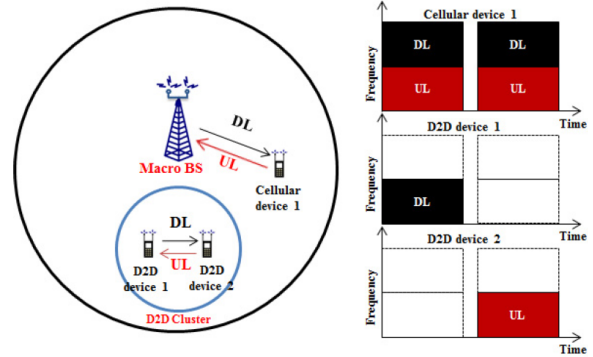


그림 1. D2D 통신과 셀룰러 네트워크가 공존하는 상위의 시스템 모델  
Fig. 1. System model for underlay D2D communication and cellular network

파워 대비 데이터 율로 정의한다. 에너지 효율성은 각 단말의 에너지 효율성을 모두 더한 형태의 에너지 효율성<sup>[8-11]</sup>과 시스템 내 모든 단말이 소모한 파워 대비 전체 셀 용량<sup>[12-14]</sup>으로 나뉜다. 본 논문에서는 전자를 에너지 효율성 합으로, 후자를 시스템 에너지 효율성으로 부른다. 시스템 에너지 효율성 측면에서의 분석은 [15]에 소개 되었으며, 본 논문에서는 에너지 효율성 합 측면에서 분석을 진행한다. 본 논문에서 우리는 에너지 효율성 합은 가시적인 범위 (feasible range) 안에서 송신 파워에 대하여 단조함수 (monotonic function) 특성을 가짐을 증명하였으며, 이러한 특성을 기반으로 에너지 효율성 합을 최적화하는 최적 송신 파워를 도출하였다. 따라서 모든 단말에 대한 모든 조합을 고려하여 에너지 효율성을 각각 도출하여 이를 최대화하는 모드를 선택함으로써 최적의 모드 선택 기법 또한 도출할 수 있다. 이러한 과정을 통해 에너지 효율성 합을 최대화할 수 있는 단말의 송신 파워와 모드를 동시에 도출할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 정의한다. 3장에서는 에너지 효율성을 정의하고 이의 최적화 문제에 대한 분석을 진행하며, 동시에 해당 최적화 문제를 해결할 수 있는 최적의 모드 선택 기법과 파워 할당 기법에 대해 제안한다. 4장에서는 제안한 기법에 대한 성능을 실험 결과를 통해 보이고, 5장의 결론으로 끝을 맺는다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 셀룰러 네트워크가 FDD (frequency division duplexing) 기반의

WCDMA (wideband code division multiple access)로 동작하는 환경을 고려한다. 또한 D2D 통신은 셀룰러 네트워크의 상향 링크 주파수 스펙트럼을 사용하며<sup>[6]</sup> [1]과 [16]과 같이 TDD (time division duplexing)로 동작함을 가정한다.

그림 1에서와 같이, D2D 단말 1은 D2D 단말 2에게 첫 번째 시간 슬롯에 (홀수 번째 시간 슬롯) 하향 링크 신호를 전송한다. 여기에서 D2D 단말 1과 2는 직접 통신을 위한 D2D 쌍이며 전송하는 신호는 셀룰러 네트워크의 상향 링크 신호에 간섭 영향을 준다. 동시에 셀룰러 단말 1의 상향 링크 신호는 D2D 단말 1의 하향 링크 신호에 간섭으로 작용하여 D2D 단말 1의 SINR (signal to interference plus noise ratio)을 감소시킨다. 다음 시간 슬롯에서 (짝수 번째 시간 슬롯), D2D 단말 2는 D2D 단말 1에게 상향 링크 신호를 전송한다. 마찬가지로 D2D 단말 2의 상향 링크 신호는 셀룰러 단말 1에게 간섭으로 작용한다. 본 논문에서는 [1]과 같이, 홀수 번 D2D 단말은 홀수 번째 시간 슬롯에 하향 링크 신호를 전송하며, 짝수 번 D2D 단말은 짝수 번째 시간 슬롯에 상향 링크 신호를 전송함을 가정한다. 또한 D2D 단말 쌍은 두 개의 연이은 숫자를 인덱스로 가진다. 그림 1의 시스템 모델을 기반으로, 홀수 번째 시간 슬롯에서 각 단말의 SINR은 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{d1} = \frac{m_1^t P_{d1}^t \alpha_{d1}^{d2} g_d}{P_{c1}^t \alpha_{c1}^{d2} + n_u} \geq \gamma_d, \quad (1)$$

$$\text{SINR}_{c1} = \frac{P_{c1}^t \alpha_{c1}^{BS} g_c}{m_1^t P_{d1}^t \alpha_{d1}^{BS} + n_b} \geq \gamma_c, \quad (2)$$

여기서  $P_{di}^t$  와  $P_{ci}^t$  는 각각  $i$  번째 D2D 단말과 셀룰러 단말의  $t$  번째 시간 슬롯에서의 전송 파워를 의미한다.  $\alpha_A^B$  는  $A$  에서  $B$ 까지의 링크 이득 (link gain)을 의미하며,  $g_d$  와  $g_c$  는 각각 D2D 통신과 셀룰러 통신의 처리 이득 (processing gain)을 의미하고,  $n_u$  와  $n_b$  는 각각 단말과 기지국에서의 잡음 파워를 의미한다. 또한  $\gamma_d$  와  $\gamma_c$  는 각각 D2D 통신과 셀룰러 통신을 위한 타겟 SINR 값을 의미하며,  $m_i^t$  는 D2D 통신을 위한 TDD 작동 지시자를 의미한다. 예를 들어  $t$  와  $i$  값이 동시에 짝수이거나 동시에 홀수일 경우  $m_i^t = 1$  이며, 그렇지 않을 경우  $m_i^t = 0$ 의 값을 가진다. 짝수 번째 시간 슬롯에서의 각 단말의 SINR은 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{d2} = \frac{m_2^t P_{d2}^t \alpha_{d2}^{d1} g_d}{P_{c1}^t \alpha_{c1}^{d1} + n_u} \geq \gamma_d, \quad (3)$$

$$\text{SINR}_{c1} = \frac{P_{c1}^t \alpha_{c1}^{BS} g_c}{m_2^t P_{d2}^t \alpha_{d2}^{BS} + n_b} \geq \gamma_c. \quad (4)$$

일반적으로 무선 통신 네트워크에는 한 셀 내에 다수의 단말이 존재한다. 따라서 본 논문에서는  $N$  개의 CM 단말과  $M$  개의 DM 단말을 고려한다. 이러한 일반적인 경우에 대한  $i$  번째 단말의  $t$  번째 시간 슬롯에서의 SINR은 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{di}^t = \frac{m_i^t P_{di}^t \alpha_{di}^{d'} g_d}{\sum_{k=1}^N P_{ck}^t \alpha_{ck}^{di} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^M m_l^t P_{dl}^t \alpha_{dl}^{di} + n_u} \geq \gamma_d, \quad (5)$$

$$\text{SINR}_{ci}^t = \frac{P_{ci}^t \alpha_{ci}^{BS} g_c}{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^N P_{ck}^t \alpha_{ck}^{BS} + \sum_{l=1}^M m_l^t P_{dl}^t \alpha_{dl}^{BS} + n_b} \geq \gamma_c, \quad (6)$$

여기서  $i$  와  $i'$  번째 단말은 D2D 단말 쌍을 의미한다. 결과적으로 시스템 용량은 다음과 같다.

$$C_{sr}^t = W \left\{ \sum_{i=1}^M \log_2 (1 + \text{SINR}_{di}^t) + \sum_{j=1}^N \log_2 (1 + \text{SINR}_{cj}^t) \right\}, \quad (7)$$

여기서  $W$  는 셀룰러 네트워크의 상향 링크 대역폭을 의미한다.

### III. 모드 선택 및 파워 할당 기법

본 논문에서는 D2D 통신을 위한 단말과 셀룰러 통신을 위한 단말이 공존하며 D2D 통신은 셀룰러 네트워크의 상향 링크 스펙트럼을 사용하는 환경을 고려한다<sup>[11][6]</sup>. DM 단말 쌍은 거리상으로 가깝게 위치하기 때문에 CM일 경우에 비해서 낮은 전송 파워를 사용한다. 하지만 DM 단말은 CM과 비교하여 절반의 자원을 사용하기 때문에<sup>[1,16]</sup>, 전송 파워와 시스템 용량 모두를 동시에 고려하는 것이 필수적이다. 전송 파워당 채널 용량으로 정의되는 (bps/Watt) 에너지 효율성은 이러한 전송 파워와 시스템 용량을 동시에 고려할 수 있는 효율적인 성능 척도이다<sup>[8][14]</sup>. 에너지 효율성에는 다음과 같이 에너지 효율성 합과 시스템 에너지 효율성이 있으며, 각각은 다음과 같이 수식적으로 표현된다.

$$U_1^t = W \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{m_m^t \log_2(1 + \text{SINR}_{dm}^t)}{P_{dm}^t} + \sum_{n=1}^N \frac{\log_2(1 + \text{SINR}_{cn}^t)}{P_{cn}^t} \right\} \quad (8)$$

$$U_2^t = \frac{C_{sr}^t}{\sum_{m=1}^M m_m^t P_{dm}^t + \sum_{n=1}^N P_{cn}^t} W \left\{ \sum_{i=1}^M \log_2(1 + \text{SINR}_{di}^t) + \sum_{j=1}^N \log_2(1 + \text{SINR}_{cj}^t) \right\} \quad (9)$$

$$= \frac{C_{sr}^t}{\sum_{m=1}^M m_m^t P_{dm}^t + \sum_{n=1}^N P_{cn}^t} W \left\{ \sum_{i=1}^M \log_2(1 + \text{SINR}_{di}^t) + \sum_{j=1}^N \log_2(1 + \text{SINR}_{cj}^t) \right\}$$

본 논문에서는 식 (8)의 에너지 효율성 합 측면에서 성능 척도를 분석하며 이를 utility 1이라 지칭한다.

### 3.1. Utility 1: 에너지 효율성 합

#### 3.1.1. 파워 할당 기법

단말의 전송 파워 측면에서 에너지 효율성을 최대화하기 위해, 다음과 같은 최적화 문제를 고려한다.

$$(P1) \max_{\mathbf{P}'_d, \mathbf{P}'_c} W \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{m_m^t \log_2(1 + \text{SINR}_{dm}^t)}{P_{dm}^t} + \sum_{n=1}^N \frac{\log_2(1 + \text{SINR}_{cn}^t)}{P_{cn}^t} \right\} \quad (10)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq P_{di}^t \leq P_{\max}, 0 \leq P_{cj}^t \leq P_{\max}, \forall i \in \mathfrak{S}, \forall j \in \mathfrak{N}, \quad (11)$$

$$\text{SINR}_{di}^t \geq \gamma_d, \text{SINR}_{cj}^t \geq \gamma_c, \forall i \in \mathfrak{S}, \forall j \in \mathfrak{N}, \quad (12)$$

여기서  $\mathbf{P}'_d = [P'_{d1}, P'_{d2}, \dots, P'_{dM}]$ ,  $\mathbf{P}'_c = [P'_{c1}, P'_{c2}, \dots, P'_{cN}]$ ,  $\mathfrak{S} = [1, 2, \dots, M]$ , 그리고  $\mathfrak{N} = [1, 2, \dots, N]$ 를 의미한다. (P1)의 목적 함수 (objective function)은  $\mathbf{P}'_d$  와  $\mathbf{P}'_c$  에 대해서 오목 함수는 아니지만, 다음의 Theorem 을 통해 쉽게 문제를 해결할 수 있다.

**Theorem 1:** 에너지 효율성은  $\gamma_d, \gamma_c \geq e^{-1} \approx 1.1783$ 일 경우  $\mathbf{P}'_d$  와  $\mathbf{P}'_c$  에 대해 단조 감소 함수 (monotonically decreasing function) 특징을 가진다.

*proof:* 자세한 증명은 VI절에 기술됨.

[17]에 기술된 WCDMA 표준에 따르면, 요구 타킷 SINR은 1.1783 보다 큰 값을 가진다. 이는 타킷 SINR 범위인  $\gamma_d, \gamma_c \geq 1.1783$ 를 만족시키므로 Theorem 1에 의해 최적 송신 파워를 도출할 수 있음을 의미한다. 즉, (P1)의 최적 해는 전송 파워  $\mathbf{P}'_d$  와  $\mathbf{P}'_c$  의 최소값을 통해 얻을 수 있다. 식 (11)과 (12)의 제약 사항 (constraint)을 만족시키는 최소 전송 파워  $\mathbf{P}'_d$  와  $\mathbf{P}'_c$  는 다음과 같은 Theorem을 통해 도출할 수 있다.

**Theorem 2:** 전송 파워  $\mathbf{P}'_d$  와  $\mathbf{P}'_c$  는 모든 단말의 SINR이 타킷 SINR과 모두 동일할 경우 최소값을 가진다.

*proof:* 자세한 증명은 VI절에 기술됨.

표 1. 제안하는 모드 선택 기법과 파워 할당 기법

Table 1. Proposed joint mode selection and power allocation scheme

$L$ : The number of the device pairs to select mode

$H = H_1 H_2 \dots H_L$ : A mode sequence of length  $L$

( $H_i = 0$  if the  $i$ th device is in the CM,

and  $H_i = 1$  if the  $i$ th device is in the DM)

**Input:**  $\alpha, g_d, g_c, n_u, n_b, \gamma_d, \gamma_c, W, L$

0: **Initialization**  $k = 0, \mathbf{P} = \{\}, \mathbf{P}_k = \{\}, \mathbf{P}_{\text{select}} = \{\}, U_k = \{\}$

1: **for**  $H = 00 \dots 0 : 11 \dots 1$

$$2: \text{SINR}_{di}^t = \frac{m_i^t P_{di}^t \alpha_{di}^{d_i} g_d}{\sum_{k=1}^N P_{ck}^t \alpha_{ck}^{d_i} + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq i}}^M m_l^t P_{dl}^t \alpha_{dl}^{d_i} + n_u}$$

$$\text{SINR}_{ci}^t = \frac{P_{ci}^t \alpha_{ci}^{BS} g_c}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_{ck}^t \alpha_{ck}^{BS} + \sum_{l=1}^M m_l^t P_{dl}^t \alpha_{dl}^{BS} + n_b}$$

$$3: U_1^t = W \left\{ \sum_{m=1}^M \frac{m_m^t \log_2(1 + \text{SINR}_{dm}^t)}{P_{dm}^t} + \sum_{n=1}^N \frac{\log_2(1 + \text{SINR}_{cn}^t)}{P_{cn}^t} \right\};$$

$$4: \mathbf{P}^t = \{ [\mathbf{P}'_d, \mathbf{P}'_c] | \text{SINR}_d^t = \gamma_d \mathbf{I}_M, \text{SINR}_c^t = \gamma_c \mathbf{I}_N \};$$

$$5: \mathbf{P} = [\mathbf{P}^{t-1}, \mathbf{P}^t];$$

$$6: \mathbf{P}_k = \mathbf{P}; U_k = U_1^{t-1} (\mathbf{P}^{t-1}) + U_1^t (\mathbf{P}^t);$$

$$7: k = k + 1;$$

8: **end**

$$9: k_{\text{mode}} = \arg \max_k (U_k); \mathbf{P}_{\text{select}} = \mathbf{P}_{k_{\text{mode}}};$$

**Output:**  $k_{\text{mode}}, \mathbf{P}_{\text{select}}$

Theorem 1 과 Theorem 2를 통해 (P1)의 최적 해는  $\forall i \in \mathfrak{S}$  과  $\forall j \in \mathfrak{N}$  에 대해  $\text{SINR}_{di}^t = \gamma_d$  이며 동시에  $\text{SINR}_{cj}^t = \gamma_c$  를 만족할 경우의 전송 파워임을 확인할 수 있다. 즉, 식 (12)의 부등호를 등호화 함으로써, 에너지 효율성을 최대화하는 최적 전송 파워를 구할 수 있다. 결론적으로 제안하는 최적의 전송 파워는 다음과 같다.

$$\mathbf{P}^t = \{ [\mathbf{P}'_d, \mathbf{P}'_c] | \text{SINR}_d^t = \gamma_d \mathbf{I}_M, \text{SINR}_c^t = \gamma_c \mathbf{I}_N \} \quad (13)$$

여기서  $\text{SINR}_d^t = \text{diag}(\text{SINR}_{d1}^t, \dots, \text{SINR}_{dM}^t)$ ,  $\text{SINR}_c^t = \text{diag}(\text{SINR}_{c1}^t, \dots, \text{SINR}_{cN}^t)$  이며  $\mathbf{I}_L$  는  $L \times L$  크기의 identity 행렬을 의미한다. 식 (13)은 [1]에 소개된 단순한 행렬 연산을 통해 쉽게 도출할 수 있다. 결론적으로, 모든 단말이 타킷 SINR을 만족하기 위한 CLPC (closed loop power control)를 진행하고, 타킷 SINR과 동일한 SINR이 되도록 파워를 할당한다면, 에너지 효율성은 최대로 얻을 수 있음을 의미한다. [19]와 [20]에 가정된 바와 같이 본 논문은 식 (11)와 (12)를 만족하는 해가 존재함을 가정하여 실험 및 분석을 진행하였다.

#### 3.1.2. 모드 선택 기법

직접 통신 모드를 위해서는 통신을 위한 두 단말이 같은 셀 내의 적정 거리 내에 존재할 경우에 가능하다. 만약 직접 통신을 위한 두 단말이 지리적으



표 2. 실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameter

Parameter	Value
Macro cell radius (Single cell)	500 m
Maximum distance between D2D	20 m
System bandwidth	Cellular : 5 MHz / D2D : 2.5 MHz
Power constraint	Cellular : 2 Watt / D2D : 2 Watt
Path loss model [17]	Cellular : $128.1 + 37.6 \log_{10}(d[km])$ D2D : $148.1 + 40 \log_{10}(d[km])$
Shadowing standard deviation [17]	Cellular : 10 dB / D2D : 12 dB
Processing gain	Cellular : 18 dB / D2D : 15 dB
Target SINR	Cellular : 1.2 dB / D2D : 1.2 dB
Antenna gain (Omnidirectional)	BS : 14 dBi / Device : 0 dBi
Noise figure	BS : 5 dB / Device : 9 dB
Noise spectral density	-174dBm/Hz

로 가깝게 위치할 경우에도, 두 단말간의 채널 상태가 매우 좋지 못할 경우 DM보다 CM이 유리할 수 있다. 이와 같이, 모드 선택 기법은 성능의 향상을 위해 단말이 DM이나 CM으로 동작할지를 결정하는 기법이다.

제안하는 모드 선택 기법은 모든 가능한 조합의 모드에 대해 전수 조사를 통해 식 (13)을 통한 전송 파워를 계산하고, 이를 기반으로 에너지 효율성을 도출한다. 모든 가능한 조합의 모드 중에서 에너지 효율성 합을 최대화하는 모드를 선택한다. 이와 같은 전수 조사에 기반한 모드 선택 기법과 파워 할당 기법은 표 1에 기술되어 있다.

표 1의 첫 번째 단계에서, 제안하는 기법은 모든 가능한 모드의 조합을 고려한다. 두 번째와 세 번째 단계에서 단말의 전송 파워  $P'$ 에 대한 함수로서 SINR과 에너지 효율성 값을 계산한다. 네 번째 단계로, 식 (13)를 통해 각 단말의 최적 전송 파워를 도출한다. D2D 통신의 경우 TDD로 동작하기 때문에, 연이은 두 시간 슬롯  $t-1$  과  $t$  슬롯에서의 에너지 효율성 계산이 필요하다. 따라서 연이은 두 시간 슬롯  $t-1$  과  $t$  슬롯에서의 최적 전송 파워를 각각 도출하고 각 전송 파워를 적용하였을 경우의 에너지 효율성 값을 도출한다. 연이은 두 시간 슬롯의 에너지 효율성을 더한 값을 성능 척도로 설정한다. 마지막으로, 모든 가능한 경우의 모드에 대해 동일한 과정을 진행하고 성능 척도를 최대화하는 모드 및 전송 파워를 도출할 수 있다.

#### IV. 실험 결과

본 장에서는 제안하는 기법을 기존의 최소 파워 할당 기법<sup>[1]</sup>, forced D2D 기법과 forced cellular 기법과 실험을 통해 비교한다. Forced D2D 기법과

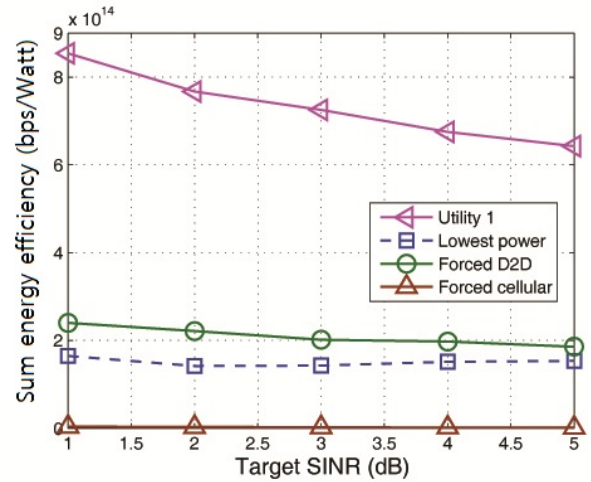


그림 2. 타겟 SINR에 따른 에너지 효율성  
Fig. 2. Sum energy-efficiency versus target SINR

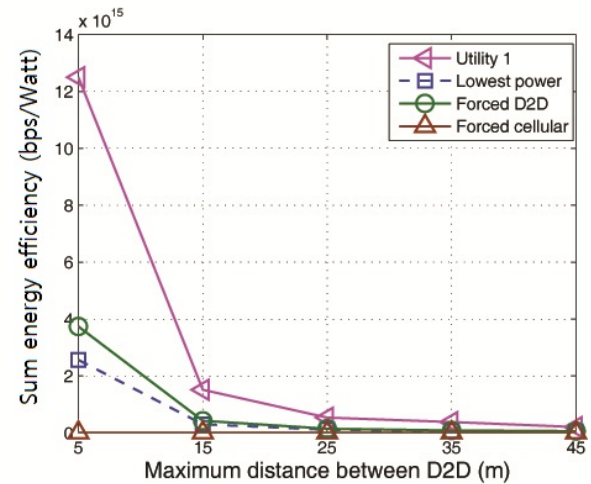


그림 3. D2D간 최대 거리에 따른 에너지 효율성  
Fig. 3. Sum energy-efficiency versus maximum distance between D2D

forced cellular 기법은 각각 모든 단말이 일괄적으로 DM과 CM으로 동작하는 기법을 의미한다. 실험은 단일 셀 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해 진행하였으며 사용한 파라미터는 표 2에 정리되어 있다. 그림 2와 3에서는 모드를 선택할 단말의 수는 셀룰러 단말 수와 동일하다고 가정하였으며, 그림 4에서의 'Ratio of D2D devices to total devices'는 총 단말의 수 대비 모드를 선택할 단말의 비율을 의미한다. 또한 그림 3과 4는 셀룰러와 D2D 단말의 타겟 SINR이 모두 1.2dB인 상태의 실험 결과를 보여준다. 그림 2와 4에서의 직접 통신이 가능한 거리 범위 (Maximum distance between D2D)는 20m로 가정하였다.

그림 2는 제안 기법과 기존 기법들의 에너지 효율성 측면에서 타겟 SINR에 따른 결과를 보여준다.

그림 2를 통해 제안하는 기법은 기존의 기법들과 비교하여 가장 좋은 에너지 효율성을 보임을 확인할 수 있다. 3장에서 증명한 바와 같이 에너지 효율성은 타깃 SINR이 1.1783 이상일 경우 최적의 성능을 보이며 이를 실험을 통해서도 확인할 수 있다.

그림 3은 D2D 사이의 최대 거리에 따른 에너지 효율성을 보여준다. 여기서 D2D 사이의 최대 거리는 직접 통신이 가능한 한계 거리를 의미한다. 해당 값이 증가함에 따라, 모든 기법의 에너지 효율성은 forced cellular 기법에 수렴하지만, 제안하는 기법은 기존 기법에 비해 항상 우수한 에너지 효율성을 보임을 확인할 수 있다.

마지막으로, 그림 4는 모드를 선택할 단말의 비율 증가에 따른 에너지 효율성을 보여준다. 그림 4에 나타난바와 같이, 제안한 기법과 기존 기법의 성능 차이는 비율이 증가함에 따라 증가한다. 특히, 모드를 선택할 단말의 비율이 67%인 경우 forced D2D 기법에 비해 약 5.6배 성능 이득이 있음을 확인할 수 있다.

실험 결과를 통해 제안하는 기법은 기존 기법에 비해 가장 좋은 에너지 효율성을 보임을 확인할 수 있으며, 모드 선택이 필요한 단말의 수가 증가함에 따라 기존 기법과의 성능 차이가 더욱 크게 발생함을 확인할 수 있다. 즉, 모드 선택이 필요한 단말이 많은 환경에서 제안하는 기법은 가장 효율적이며 최적의 에너지 효율성을 보장함을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 셀룰러 네트워크에 D2D 통신이 공존하는 환경에서 에너지 효율성을 위한 파워 할당 기법과 모드 선택 기법을 제안하였다. D2D 통신은 셀 용량의 증대와 단말의 전송 파워를 줄일 수 있는 두 가지 대표적인 이점이 있다<sup>[14][7]</sup>. 따라서 본 논문에서는 해당 이점들을 동시에 고려하기 위해 에너지 효율성 측면에서 분석을 진행하였다<sup>[21]</sup>. 제안하는 기법은 시스템 성능 면에서 최적은 아니지만 에너지 효율성 측면에서 최적의 성능을 보장함을 수식적으로 증명하였으며, 실험 결과를 통해 제안하는 기법이 기존 기법에 비해 가장 좋은 에너지 효율성을 보여줌을 확인하였다.

VI. 부 록

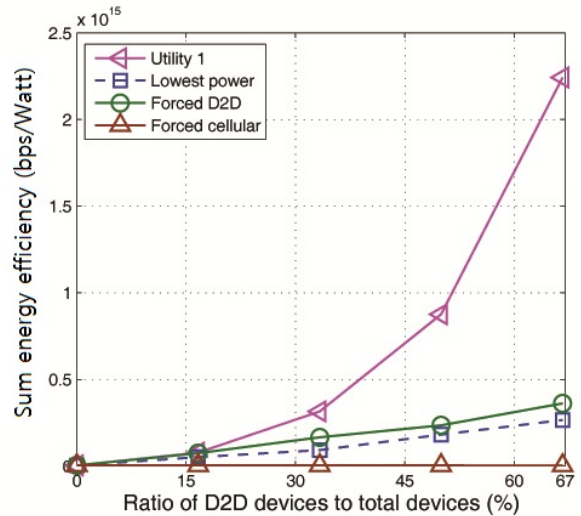


그림 4. 모드를 선택할 단말의 비율에 따른 에너지 효율성  
Fig. 4. Sum energy-efficiency versus ratio of D2D devices to total devices

6.1. Theorem 1 증명

N 개의 상향 링크 단말을 가정하며, 또한 에너지 효율성 U는 전송 파워에 대해 단조 감소 함수임을 먼저 가정한다. 이러한 경우 U의 일계 미분은 전송 파워에 대해 다음과 같이 음의 값을 가진다.

$$\frac{\partial U}{\partial \mathbf{P}} = \left[ \frac{\partial U}{\partial P_1}, \frac{\partial U}{\partial P_2}, \dots, \frac{\partial U}{\partial P_N} \right] \leq 0$$

여기에서 에너지 효율성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 U &= \sum_{j=1}^N \frac{1}{P_j} \log_2 \left( 1 + \frac{P_j \alpha_{Dj} g}{\sum_{k=1, k \neq j}^N P_k \alpha_{k} + n} \right) \\
 &= \underbrace{\frac{1}{P_i} \log_2 \left( 1 + \frac{P_i \alpha_{Di} g}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{k} + n} \right)}_{U_i} \\
 &\quad + \underbrace{\sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{1}{P_j} \log_2 \left( 1 + \frac{P_j \alpha_{Dj} g}{P_i \alpha_i + \sum_{k=1, k \neq i, j}^N P_k \alpha_{k} + n} \right)}_{\beta_1}
 \end{aligned} \tag{14}$$

여기서 P<sub>i</sub>, g, α<sub>Di</sub>, α<sub>i</sub>는 각각 i번째 단말의 전송 파워, 처리 이득 (processing gain), desired 신호에 대한 링크 이득 (link gain) 및 간섭 신호에 대한 링크 이득을 의미하며, n은 간섭 신호 파워를 의미한다. 또한 i번째 단말의 SINR은 다음과 같이 미리 정의된 타깃 값 γ보다 크거나 같아야 한다.

$$\frac{P_i \alpha_{Di} g}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{k} + n} \geq \gamma \text{ for } i = 1, \dots, N.$$

식 (14)의 β<sub>1</sub>은 i ∈ [1, ..., N]인 P<sub>i</sub>에 대해 단조 감소 함수이므로, U<sub>i</sub>의 P<sub>i</sub>에 따른 일계 미분은 다음과 같이 0보다 작거나 같은 값을 가진다.

$$C' = \begin{bmatrix} \frac{\bar{\alpha}_D^{2:N}}{g^{1-N}\gamma^{N-1}} + \frac{\alpha_{D2}\bar{\alpha}_D^{3:N} + \alpha_{D2}\alpha_{D3}\bar{\alpha}_D^{4:N} + \dots + \bar{\alpha}_D^{2:N-1}\alpha_{1N}}{g^{2-N}\gamma^{N-2}} + \frac{\alpha_{D2}\alpha_{D3}\bar{\alpha}_D^{4:N} + \alpha_{D2}\alpha_{D3}\alpha_{D4}\bar{\alpha}_D^{5:N} + \dots + \bar{\alpha}_D^{2:N-2}\alpha_{1(N-1)}\alpha_{1N}}{g^{3-N}\gamma^{N-3}} + \dots + \frac{\bar{\alpha}_D^{2:N}}{g^0\gamma^0} \\ \frac{\alpha_{D1}\bar{\alpha}_D^{3:N}}{g^{1-N}\gamma^{N-1}} + \frac{\alpha_{D1}\bar{\alpha}_D^{3:N} + \alpha_{D1}\alpha_{D2}\bar{\alpha}_D^{4:N} + \dots + \alpha_{D1}\bar{\alpha}_D^{3:N-1}\alpha_{1N}}{g^{2-N}\gamma^{N-2}} + \frac{\alpha_{D1}\alpha_{D2}\bar{\alpha}_D^{4:N} + \alpha_{D1}\alpha_{D2}\alpha_{D3}\bar{\alpha}_D^{5:N} + \dots + \alpha_{D1}\bar{\alpha}_D^{3:N-2}\alpha_{1(N-1)}\alpha_{1N}}{g^{3-N}\gamma^{N-3}} + \dots + \frac{\alpha_{D1}\bar{\alpha}_D^{3:N}}{g^0\gamma^0} \\ \vdots \\ \frac{\bar{\alpha}_D^{1:N-1}}{g^{1-N}\gamma^{N-1}} + \frac{\alpha_{D1}\bar{\alpha}_D^{2:N-1} + \alpha_{D1}\alpha_{D2}\bar{\alpha}_D^{3:N-1} + \dots + \bar{\alpha}_D^{1:N-2}\alpha_{1(N-1)}}{g^{2-N}\gamma^{N-2}} + \frac{\alpha_{D1}\alpha_{D2}\bar{\alpha}_D^{3:N-1} + \alpha_{D1}\alpha_{D2}\alpha_{D3}\bar{\alpha}_D^{4:N-1} + \dots + \bar{\alpha}_D^{1:N-3}\alpha_{1(N-2)}\alpha_{1(N-1)}}{g^{3-N}\gamma^{N-3}} + \dots + \frac{\bar{\alpha}_D^{1:N-1}}{g^0\gamma^0} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial P_i} = \frac{1}{P_i^2} \left\{ \frac{1}{\ln 2} \frac{P_i \alpha_{Di} g}{\left( P_i \alpha_{Di} g + \sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n \right)} - \log_2 \left( 1 + \frac{P_i \alpha_{Di} g}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n} \right) \right\} \leq 0. \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\alpha_{D1}g}{\gamma} & -\alpha_{12} & \dots & -\alpha_{1N} \\ -\alpha_{11} & \frac{\alpha_{D2}g}{\gamma} & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & -\alpha_{1N} \\ -\alpha_{11} & -\alpha_{12} & \dots & \frac{\alpha_{DN}g}{\gamma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_N \end{bmatrix} \geq \mathbf{n}, \quad (18)$$

$\frac{P_i \alpha_{Di} g}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n} \geq \gamma$  이고  $y = \log x$ 는  $x$ 에 대해 단조 증가 함수이므로, 다음의 식이 만족한다.

$$\log_2 \left( 1 + \frac{P_i \alpha_{Di} g}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n} \right) \geq \log_2 (1 + \gamma).$$

따라서  $\frac{P_i \alpha_{Di} g}{\left( P_i \alpha_{Di} g + \sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n \right)} \leq \ln 2 \cdot \log_2 (1 + \gamma)$  일 경우 식 (15)는 항상 성립한다. 식 (15)의 충분 조건 (sufficient condition)은 다음과 같다.

$$\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n \geq P_i \alpha_{Di} g \left( \frac{1}{\ln 2 \cdot \log_2 (1 + \gamma)} - 1 \right).$$

결과적으로,  $U$ 가 전송 파워에 의해 단조 감소 함수인 가정을 만족하기 위한 충분 조건은  $\frac{1}{\ln 2 \cdot \log_2 (1 + \gamma)} \leq 1$  이다.  $\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n$ 와  $P_i \alpha_{Di} g$ 는 항상 양수 값을 갖기 때문에 해당 충분 조건은  $\gamma \geq e-1 \approx 1.7183$ 와 같이 표현될 수 있다.

### 6.2. Theorem 2 증명

$N$ 개의 상향 링크 단말을 가정하고,  $i \in \{1, \dots, N\}$ 에 대하여  $SINR_i$ 를  $i$ 번째 단말의  $SINR$ 로 가정하면 다음과 같다.

$$SINR_i = \frac{P_i \alpha_{Di} g}{\sum_{k=1, k \neq i}^N P_k \alpha_{1k} + n} \geq \gamma, \quad (16)$$

여기서  $\gamma$ 는 타겟  $SINR$ 을 의미한다.  $N$ 개의 상향 링크 단말에 대해 식 (16)은 다음과 같은 행렬로 표현된다.

$$\frac{1}{\gamma} \begin{bmatrix} P_1 \alpha_{D1} g \\ \vdots \\ P_N \alpha_{DN} g \end{bmatrix} \geq \begin{bmatrix} 0 & & 1 \\ & \ddots & \\ 1 & & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_1 \alpha_{11} \\ \vdots \\ P_N \alpha_{1N} \end{bmatrix} + \mathbf{n}, \quad (17)$$

여기서  $\mathbf{n}$ 은  $N \times 1$  크기의 노이즈 벡터이다. 식 (18)을  $\mathbf{C} \cdot \mathbf{P} \geq \mathbf{n}$ 로 표현하면  $\mathbf{C}$ 는 invertible하다고 가정한다.

**Theorem 3:**  $\mathbf{C}^{-1} \mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}}{\det(\mathbf{C})} \mathbf{C}'$ 로 정의되는 행렬  $\mathbf{C}'$ 에 대해 행렬  $\mathbf{C}'$ 의 모든 성분은 항상 양수 값을 가진다.

*proof:* 다음과 같이 기호를 정의하였을 경우,  $\bar{\alpha}^{a:b} \triangleq \alpha_a \cdot \alpha_{a+1} \cdots \alpha_b$ ,  $\mathbf{C}'$ 는 식 (19)와 같이 계산된다. 이러한 경우  $\mathbf{C}'$ 의  $l$ 번째 성분인  $C'_l$ 는 다음과 같다.

$$C'_l = \sum_{h=1}^N \left[ \frac{\prod_{i=1, i \neq l}^N \alpha_{Di}}{g^{h-N} \gamma^{N-h}} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq l}}^h \left( \sum_{\substack{k_j=k_{j-1} \\ k_j \neq l}}^{N-h+j} \frac{\alpha_{1k_j}}{\alpha_{Dk_j}} \right) \right], \quad (20)$$

여기서,

$$\prod_{j=1}^h \left( \sum_{k_j=k_{j-1}}^M \alpha_{k_j} \right) \triangleq \sum_{k_1=k_0}^M \left( \alpha_{k_1} \cdot \sum_{k_2=k_1}^M \left( \alpha_{k_2} \cdots \sum_{k_N=k_{N-1}}^M (\alpha_{k_N}) \right) \right),$$

이고,  $l = 1$ 일 경우  $k_1 = 0$ 이며  $l > 1$ 일 경우  $k_0 = 0$ 이다.  $\alpha_{Di}$ ,  $\alpha_{1i}$ ,  $\gamma$ 와  $g$ 는 모든  $i$ 에 대해 모두 양수이기 때문에 식 (20) 또한 양수임을 확인할 수 있다. 따라서 행렬  $\mathbf{C}'$  내의 모든 성분은 항상 양수이다.

만약  $\mathbf{C}$ 의 determinant 값이 음수일 경우, 식 (18)은 다음과 같다.

$$\mathbf{P} \leq \mathbf{C}^{-1} \mathbf{n} = \frac{\mathbf{n}}{\det(\mathbf{C})} \mathbf{C}'. \quad (21)$$

Theorem 3에 따라 식 (21)은  $\mathbf{P} \leq \frac{\mathbf{n}}{\det(\mathbf{C})} \mathbf{C}' \leq 0$ 와 같이 표현된다. 전송 파워  $\mathbf{P}$ 는 항상 0보다 큰 값을 가져야 식 (11)와 (12)의 제한 조건을 만족시키기 때문에, 식 (21)은 성립할 수 없다. 결론적으로  $\mathbf{C}$ 의

determinant 값은 양수이며, 따라서 식 (18)은 다음과 같이 정리된다.

$$\mathbf{P} \geq \mathbf{C}^{-1} \mathbf{n} = \frac{n}{\det(\mathbf{C})} \mathbf{C}' \geq 0, \quad (22)$$

$$\mathbf{P} \geq \frac{n}{\det(\mathbf{C})} \mathbf{C}'. \quad (23)$$

식 (23)을 통해 전송 파워  $\mathbf{P}$  는  $n\mathbf{C}'/\det(\mathbf{C})$ 의 최소값을 가짐을 확인할 수 있으며, 이는 모든 사용자에 대해 식 (16)의 SINR이 타깃 값  $\gamma$  과 동일할 경우임을 의미한다. 따라서 모든 단말의 SINR이 타깃 SINR과 모두 동일할 경우의 전송 파워가 단말 전송 파워의 최소값임을 의미하며 이를 통해 Theorem 2를 증명할 수 있다.

### References

- [1] 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 *Proc. IEEE WCNC*, pp. 1-6, Sydney, Australia, Apr. 2010.
- [2] C. Yu, K. Doppler, C. Ribeiro, and O. Tirkkonen, "Resource sharing optimization for device-to-device communication underlying cellular networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 8, pp. 2752-2763, Aug. 2011.
- [3] K. Doppler, C. Yu, C. Ribeiro, and P. Janis, "Mode selection for device-to-device communication underlying an LTE-advanced network," in *Proc. IEEE WCNC*, pp. 1-6, Sydney, Australia, Apr. 2010.
- [4] C. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. Ribeiro, "Power optimization of device-to-device communication underlying cellular communication," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Dresden, Germany, June 2009.
- [5] C. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. Ribeiro, "On the performance of device-to-device underlay communication with simple power control," in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [6] 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. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 12, pp. 3995-4000, Dec. 2011.
- [7] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. 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.
- [8] F. Meshkati, H. Poor, S. Schwartz, and N. Mandayam, "An energy-efficient approach to power control and receiver design in wireless data networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1885-1894, Nov. 2005.
- [9] F. Meshkati, H. Poor, S. Schwartz, and R. Balan, "Energy-efficient resource allocation in wireless networks with quality-of-service constraints," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 11, pp. 3406-3414, Nov. 2009.
- [10] G. Miao, N. Himayat, Y. Li, and S. Talwar, "Low-complexity energy-efficient OFDMA," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-5, Dresden, Germany, June 2009.
- [11] G. Miao, N. Himayat, Y. Li, and S. Talwar, "Distributed interference-aware energy-efficient power optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 4, pp. 1323-1333, Apr. 2011.
- [12] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 6, pp. 1089-1098, Aug. 2004.
- [13] G. Miao and J. Zhang, "On optimal energy-efficient multi-user MIMO," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 1-6, Houston, U.S.A., Dec. 2011.
- [14] F. Richter and G. Fettweis, "Cellular mobile network densification utilizing micro base stations," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [15] M. Jung, K. Hwang, and S. Choi, "Joint mode selection and power allocation scheme for



power-efficient device-to-device (D2D) communication,” in *Proc. IEEE VTC*, pp. 1-5, Yokohama, Japan, May 2012.

- [16] P. E. Omiyi and H. Hass, “Maximizing spectral efficiency in 3G with hybrid ad-hoc UTRA TDD/UTRA FDD cellular mobile communications,” in *Proc. IEEE ISSSTA*, pp. 613-617, Sydney, Australia, Sep. 2004.
- [17] Electronic Communications Committee (ECC) within the European Conference of Postal and Telecommunications Administrations (CEPT), “Compatibility study for UMTS operating within the GSM 900 and GSM 1800 frequency bands,” *ECC Report 82*, Roskilde, Denmark, May 2006.
- [18] 3GPP, “Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS,” *3GPP TR 30.03U, version 3.2.0*, 1998.
- [19] B. Kim and J. Lee, “Joint opportunistic subchannel and power scheduling for relay-based OFDMA networks with scheduling at relay stations,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 59, no. 5, pp. 2138-2148, June 2010.
- [20] D. Ng, E. Lo, and R. Schober, “Energy-efficient resource allocation in OFDMA systems with large numbers of base station antennas,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 9, pp. 3292-3304, Sep. 2012.
- [21] D. R. Brown and F. Fazel, “A game theoretic study of energy efficient cooperative wireless networks,” *J. Commun. Networks (JCN)*, vol. 13, no. 3, pp. 266-276, June 2011.

정민채 (Minchae Jung)



2008년 2월 연세대학교 전기  
전자공학과 졸업  
2008년 3월~현재 연세대학교  
전기전자공학과 석박사 통  
합과정  
<관심분야> Massive MIMO,  
Cognitive radio network,  
Body area network, D2D communication

최수용 (Sooyong Choi)



1995년 8월 연세대학교 전자  
공학과 졸업  
1997년 8월 연세대학교 전자  
공학과 석사  
2001년 8월 연세대학교 전자  
공학과 박사  
2002년 3월~2004년 8월  
University of California, San Diego,  
Postgraduate Researcher  
2004년 9월~2005년 7월 Oklahoma State  
University, Research Assistant Professor and  
Researcher  
2005년 9월~현재 연세대학교 전기전자공학과 부교  
수  
<관심분야> Massive MIMO, Interference  
management/coordination /cancellation/mitigation,  
Detection and estimation, Iterative receivers, 무  
선 통신 시스템, Cognitive radios