

논문 2012-49TC-2-2

# 셀룰러 네트워크에서 D2D 통신을 고려한 빔 형성 및 스케줄링 기법

( Beamforming and User Scheduling for Device-to-Device Underlying  
Cellular Networks )

박 성 수\*, 방 극 준\*\*, 홍 대 식\*\*\*

( Sungsoo Park, Keukjoon Bang, and Daesik Hong )

## 요 약

본 논문에서는 Device-to-Device (D2D) 통신 시스템이 셀룰러 단말기들과 하향 링크의 주파수 자원을 공유할 때 D2D 통신으로 인한 간섭을 완화하기 위한 빔 형성 및 스케줄링 기법을 제안한다. 유니터리 행렬을 이용한 빔 형성 기법과 양자화된 채널 상태 정보의 되먹임 방식을 사용하는 셀룰러 기지국이 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭이 최소화되도록 전송 가중치 행렬과 셀룰러 단말기를 선택한다. 기지국으로부터 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭을 줄여 D2D 송신 단말기의 전송 전력을 줄임으로써 D2D 통신이 셀룰러 단말기에 미치는 간섭을 최소화한다. 이때 가중치 행렬의 선택을 제한함으로써 발생하는 셀룰러 단말기들의 총 전송률의 저하를 개선하기 위하여 각 코드 벡터가 1개 이상의 유니터리 행렬에 포함되도록 코드북을 구성한다. 모의실험을 통해 제안하는 방식이 D2D 통신으로 인한 간섭을 완화시킬 뿐만 아니라 개선된 코드북을 사용함으로써 셀룰러 단말기의 총 전송률도 향상시킬 수 있음을 보인다.

## Abstract

In this paper, the beamforming and user scheduling scheme for device-to-device (D2D) underlying cellular networks with partial channel state information is investigated. In the proposed scheme, cellular users whose channels are nearly orthogonal to the channel between base station and D2D receiver are selected for unitary beamforming so as to minimize the interference to the D2D receiver. The interference caused by underlying D2D communication can be minimized by reducing the D2D transmitter's transmission power. To enhance the cellular users' throughput further, we also investigate codebook generation method in which each code vector belongs to multiple unitary code matrices. From simulation results, we show that the proposed beamforming and user scheduling scheme mitigates D2D interference to the cellular networks and the codebook generation method improves cellular users' throughput.

**Keywords** : device-to-device (D2D) communication, beamforming, user scheduling

## I. 서 론

최근 인접한 두 통신 단말기가 기지국의 제어를 받아 직접 데이터를 주고받는 device-to-device (D2D) 통신 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다<sup>[1~7]</sup>. D2D 통신 시스템은 기지국을 통해 데이터를 주고받는 셀룰러 방식과 비교하여 셀룰러 네트워크의 주파수 자원을 재사용

\* 학생회원, \*\*\* 평생회원-교신저자, 연세대학교  
(Yonsei University)

\*\* 평생회원, 인덕대학교  
(Induk University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0018938)

접수일자: 2011년11월22일, 수정완료일: 2012년2월17일

하여 직접 링크를 형성함으로써 전체적인 통신 용량을 향상시키는 동시에 D2D 통신 모드를 이용하는 단말기의 데이터 처리율을 향상시킬 수 있다. D2D 통신 시스템은 기지국이 자원을 할당하거나 전송 전력을 제어할 수 있다는 점에서 인지 무선 시스템과 다르다.

D2D 통신 시스템이 셀룰러 네트워크의 주파수 자원을 재사용할 때, 전체 시스템의 신뢰성 및 통신 용량을 향상시키기 위해서는 주파수 재사용에 의해 발생하는 간섭을 효율적으로 제어해야 한다<sup>[1~6]</sup>. 이를 위해 D2D 송신 단말기의 전송 전력을 제어하거나<sup>[1~3]</sup>, overlay, underlay 및 cellular mode 중 하나의 방식을 선택하는 기법<sup>[4]</sup>이 제안되었다. 또한, 효율적인 간섭 제거 기법을 이용하여 D2D 통신 시스템의 신뢰성을 높이거나<sup>[5]</sup>, 지리적인 위치에 따라 주파수 재사용 여부를 결정하는 기법<sup>[6]</sup>이 제안되었다.

기존의 간섭 관리 기법들은 대부분 D2D 통신 시스템이 하나의 셀룰러 단말기와 주파수 자원을 공유할 때의 간섭 문제를 다루었다. 그러나 다중 안테나를 장비한 기지국은 동시에 여러 셀룰러 단말기와 통신을 지원할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 D2D 통신 시스템과 다수의 셀룰러 단말기가 공존할 때 하향 링크에서 발생하는 간섭을 제어하기 위한 빔 형성 및 스케줄링 기법을 제안한다. 제안 기법은 기지국이 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭을 최소한으로 줄여 D2D 송신 단말기가 목표 signal to interference and noise ratio (SINR)을 만족시키기 위해 필요로 하는 전송 전력을 낮춤으로써 셀룰러 단말기에 미치는 간섭을 줄이는 것을 목표로 한다.

## II. 시스템 모델

### 1. D2D 통신 시스템 모델

그림 1은 D2D 통신 시스템이 셀룰러 단말기와 주파수 자원을 공유할 때의 하향 링크 간섭 시나리오를 보여주고 있다. 기지국은  $N$ 개의 다중 안테나를 장비하고 있고,  $K$ 개의 셀룰러 단말기는 단일 안테나를 장비하고 있다고 가정한다. 이때 지리적으로 서로 가까이 위치하는 두 통신 단말기가 데이터를 주고받기 위하여 셀룰러 단말기와 동일한 주파수, 시간 자원을 공유하여 신호를 주고받는 D2D 통신 시스템 모델을 고려한다. D2D 통신 단말기 역시 셀룰러 단말기와 마찬가지로 단일 안테나를 장비하고 있다고 가정한다.

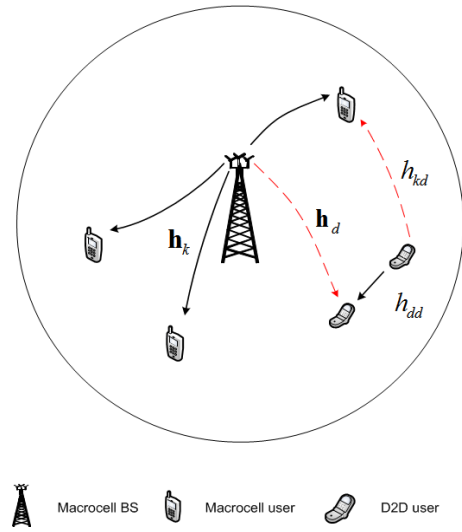


그림 1. D2D 통신 시스템이 셀룰러 단말기와 주파수와 시간 자원을 공유하는 모델

Fig. 1. Device-to-Device Underlaying Cellular Networks.

그림 1에서 살펴보면, D2D 통신 시스템과 셀룰러 네트워크가 하향 링크에서 공존할 때, D2D 송신 단말기에 의해 셀룰러 단말기로 수신되는 간섭 및 기지국에 의해 D2D 수신 단말기로 수신되는 간섭이 발생한다. 이러한 간섭으로 인한 시스템의 성능 저하를 방지하기 위하여, 모든 셀룰러 단말기와 D2D 단말기는 주파수와 시간 축에 관한 스케줄링을 사용한다고 가정한다.

$K > N$ 의 조건을 가정할 때, 기지국은 일반적으로 최대  $N$ 개의 셀룰러 단말기에 독립적인 공간적 채널을 동시에 제공할 수 있다. 따라서 기지국은  $K$ 개의 셀룰러 단말기 중에서 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭을 고려하여  $N_s \leq N$ 개의 셀룰러 단말기를 선택한다고 가정한다.

기지국에서 스케줄링을 수행하기 위해서는 셀룰러 단말기 및 D2D 단말기의 채널 상태 정보를 역방향 되먹임 채널을 통해 수신하여야 한다. 역방향 되먹임 채널을 효율적으로 사용하기 위하여, 기지국은 유니터리 행렬을 이용한 빔 형성 기법과 양자화된 채널 상태 정보의 되먹임 방식을 사용한다<sup>[8][9]</sup>. 유니터리 빔 형성 기법은 직교 빔 가중치 벡터를 이용하기 때문에 빔 사이의 간섭을 최소화할 수 있다.

### 2. 수신 신호 모델

$\mathbb{K}$ 와  $\mathbf{x}_c$ 가 기지국에서 스케줄링된  $N_s$ 개의 셀룰러 단말기들의 집합과 전송 신호 벡터를 나타내고,  $\mathbf{x}_d$ 는 D2D 송신 단말기의 전송 신호를 나타낸다고 가정하면,

셀룰러 단말기  $k$ 의 수신 신호는 다음과 같이 기지국으로부터의 수신 신호와 D2D 송신 단말기로부터의 간섭 신호 및 열잡음으로 구성된다.

$$y_k = \sqrt{cD_k^{-\alpha}} \mathbf{h}_k \mathbf{x}_c + \sqrt{cD_{kd}^{-\alpha}} h_{kd} x_d + n_k, \quad k \in \mathbb{K} \quad (1)$$

여기에서  $n_k$ 는 0과  $N_o$ 를 평균과 분산으로 갖는 열잡음이다.  $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 와  $h_{kd} \in \mathbb{C}$ 는 기지국과 셀룰러 단말기  $k$  사이의 채널 벡터 및 D2D 송신 단말기와 셀룰러 단말기  $k$  사이의 채널을 나타낸다. 각 채널 계수는 분산 1을 갖는 i.i.d.(independent and identical distribution) 블록 레일리 페이딩으로 모델링 한다.

스케줄링 기법을 사용하는 시스템에서 동일 전력 할당 방식을 사용할 경우 water-filling을 기반으로 한 최적의 전력 할당 방식과 유사한 채널 용량을 얻을 수 있으므로<sup>[10-11]</sup>, 본 논문에서는 복잡도가 적은 동일 전력 할당 방식을 고려한다. 기지국의 전송 전력과 셀룰러 단말기  $k$ 의 전송 데이터 심볼을 각각  $P_c$ 와  $s_k$ 라 할 때, 기지국의 전송 신호  $\mathbf{x}_c$ 는 유니터리 빔 형성 기법에 의해 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{x}_c = \sqrt{\frac{P_c}{N_s}} \sum_{u \in \mathbb{K}} \mathbf{w}_u s_u \quad (2)$$

여기에서  $N_s$ 는  $\mathbb{K}$ 에 포함된 셀룰러 단말기의 수이고,  $\mathbf{w}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 셀룰러 단말기  $k$ 의 전송 가중치 벡터를 의미한다. (2)에서 데이터 심볼과 전송 가중치 벡터는  $E[|s_k|^2] = 1$  뿐만 아니라 다음과 같은 직교 특성을 갖는다.

$$|\mathbf{w}_u^\dagger \mathbf{w}_k| = \begin{cases} 1, & k = u \\ 0, & k \neq u \end{cases} \quad (3)$$

위의 식에서  $\dagger$ 는 켈레 전치 벡터 연산을 뜻한다. 또한, D2D 송신 단말기의 전송 전력과 전송 데이터 심볼을 각각  $P_d$ 와  $s_d$ 라 할 때, D2D 송신 단말기의 전송 신호  $x_d$ 는 다음과 같다.

$$x_d = \sqrt{P_d} s_d \quad (4)$$

경로 손실 모델은  $P_a = cD_a^{-\alpha} P_0$ 로 표현되는데, 여기서  $P_0$ 와  $P_a$ 는 각각 송신 전력 및 송신기로부터  $D_a$ 만큼의 거리동안 신호가 전송 되었을 때의 경로 손실에 의

한 수신 전력을 의미한다<sup>[12]</sup>. 그리고  $c$ 와  $\alpha$ 는 각각 경로 손실 상수 및 경로 손실 지수를 의미한다. (1)에서  $D_k$ 와  $D_{kd}$ 는 각각 기지국과 셀룰러 단말기  $k$  사이의 거리 및 D2D 송신 단말기와 셀룰러 단말기  $k$  사이의 거리를 의미한다. (1), (2), (4)로부터, 셀룰러 단말기  $k$ 의 수신 신호  $y_k$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$y_k = \sqrt{cD_k^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s}} \mathbf{h}_k \mathbf{w}_k s_k + \sqrt{cD_k^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s}} \mathbf{h}_k \sum_{\substack{u \in \mathbb{K} \\ u \neq k}} \mathbf{w}_u s_u + \sqrt{cD_{kd}^{-\alpha} P_d} h_{kd} s_d + n_k \quad (5)$$

한편, D2D 수신 단말기에서의 수신 신호는 다음과 같이 D2D 송신 단말기로부터의 수신 신호와 기지국으로부터의 간섭 신호 및 열잡음으로 구성된다.

$$y_d = \sqrt{cD_{dd}^{-\alpha} P_d} h_{dd} s_d + \sum_{u \in \mathbb{K}} \sqrt{cD_d^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s}} \mathbf{h}_d \mathbf{w}_u s_u + n_d \quad (6)$$

여기에서  $n_d$ 는 0과  $N_o$ 를 평균과 분산으로 갖는 열잡음을 의미한다. 그리고  $h_{dd} \in \mathbb{C}$ 와  $\mathbf{h}_d \in \mathbb{C}^{1 \times N}$ 는 D2D 송신 단말기 사이의 채널 및 기지국과 D2D 수신 단말기 사이의 채널 벡터를 의미하며, 각 채널 계수는 분산 1을 갖는 i.i.d. 블록 레일리 페이딩으로 모델링 한다.  $D_{dd}$ 와  $D_d$ 는 각각 D2D 송수신 단말기 사이의 거리 및 기지국과 D2D 수신 단말기 사이의 거리를 의미한다.

### III. D2D 통신을 고려한 빔 형성 및 스케줄링 기법

본 장에서는 양자화된 채널 상태 정보 되먹임 방식을 사용하는 유니터리 행렬 기반의 공간 분할 다중 접속 방식에서 D2D 통신을 고려하여 빔을 형성하고 단말기를 스케줄링 하는 기법을 제안한다. 각 단말기들은 오류 없이 채널 추정을 할 수 있고, 채널 상태 정보는 예러와 지연 없이 기지국으로 되먹임 될 수 있다고 가정한다. 또한 기지국, 셀룰러 단말기, D2D 단말기 모두 동일한 코드북을 알고 있다고 가정한다.

#### 1. 유니터리 행렬 기반의 코드북 구성

일반적으로 유니터리 행렬 기반의 공간 분할 다중 접속 방식에서 코드북은 다음과 같이  $M$ 개의 유니터리 행렬로 구성된다.

$$\mathbf{C} = [\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \dots, \mathbf{C}_M] \quad (7)$$

여기에서 각각의 유니터리 행렬은 다음과 같이  $N$ 개의 정규화된 직교 벡터들로 구성된다.

$$\mathbf{C}_m = [\mathbf{c}_1^m, \mathbf{c}_2^m, \dots, \mathbf{c}_N^m] \quad (8)$$

여기에서  $\mathbf{c}_n^m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는  $m$ 번째 유니터리 행렬의  $n$ 번째 코드 벡터를 나타낸다. (7)과 (8)로부터 코드북의 크기는  $|\mathbf{C}| = NM$  으로 정해진다.

2. D2D 수신 단말기의 양자화된 채널 정보 되먹임  
기지국과 D2D 수신 단말기 사이의 채널 벡터는 다음과 같이 분리될 수 있다.

$$\mathbf{h}_d = \|\mathbf{h}_d\| \bar{\mathbf{h}}_d \quad (9)$$

여기에서  $\bar{\mathbf{h}}_d$ 는 채널 형상 벡터로서  $\mathbf{h}_d / \|\mathbf{h}_d\|$  로 표현된다. 채널 형상 벡터  $\bar{\mathbf{h}}_d$ 와 코드 벡터  $\mathbf{c}_n^m$  사이의 왜곡을 양자화 오류라고 정의하면, 양자화 오류는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m} = 1 - |\bar{\mathbf{h}}_d \mathbf{c}_n^m|^2 \quad (10)$$

D2D 수신 단말기는 기지국으로부터 수신되는 간섭을 줄이기 위하여 다음과 같이 가장 큰 간섭을 일으키는 코드 벡터  $\mathbf{c}_n^m$ 를 선택하여 기지국으로 전송한다.

$$\begin{aligned} \Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m} &= \min_{\substack{1 \leq m \leq M \\ 1 \leq n \leq N}} \Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m} \\ \mathbf{c}_n^m &\leftarrow \arg \min_{\substack{1 \leq m \leq M \\ 1 \leq n \leq N}} \Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m} \end{aligned} \quad (11)$$

기지국은 D2D 수신 단말기로부터 전송받은 되먹임 정보를 바탕으로  $\mathbf{c}_n^m$ 가 포함된 유니터리 행렬  $\mathbf{C}_m$ 을 전송 가중치 행렬로 선택한다. 이때, D2D 수신 단말기에 가장 큰 간섭을 미치는 코드 벡터  $\mathbf{c}_n^m$ 를 제외한 나머지  $N_s = N - 1$ 개의 코드 벡터만 셀룰러 단말기에 데이터를 전송하기 위해 사용한다. 따라서 D2D 수신 단말기의 SINR은 다음과 같이 결정된다.

$$SINR_d = \frac{cD_{dd}^{-\alpha} P_d |h_{dd}|^2}{cD_d^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s} \sum_{n \neq \bar{n}} |\bar{\mathbf{h}}_d \mathbf{c}_n^m|^2 + N_o} \quad (12)$$

여기에서 기지국으로부터의 간섭 신호는 양자화 오류  $\Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m}$ 와 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} \sum_{n \neq \bar{n}} |\bar{\mathbf{h}}_d \mathbf{c}_n^m|^2 &= \|\mathbf{h}_d\|^2 (1 - |\bar{\mathbf{h}}_d \mathbf{c}_n^m|^2) \\ &= \|\mathbf{h}_d\|^2 \Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m} \end{aligned} \quad (13)$$

(12),(13)에 따르면  $\sum_{n \neq \bar{n}} |\bar{\mathbf{h}}_d \mathbf{c}_n^m|^2$ 가 낮아질수록  $SINR_d$ 이 높아지므로, (11)에서와 같이  $\Delta_{\bar{\mathbf{h}}_d, \mathbf{c}_n^m}$ 를 최소화하는 코드 벡터를 선택해 비워둠으로써 D2D 수신 단말기의 SINR을 최대화할 수 있다.

D2D 송신 단말기는 셀룰러 단말기에 미치는 간섭을 줄이기 위하여 전송 전력  $P_d$ 를 다음과 같이 D2D 통신 시스템의 목표 SINR  $\Gamma_d^{target}$ 에 따라 조절한다.

$$P_d = \frac{\Gamma_d^{target} \left( cD_d^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s} \sum_{n \neq \bar{n}} |\bar{\mathbf{h}}_d \mathbf{c}_n^m|^2 + N_o \right)}{cD_{dd}^{-\alpha} |h_{dd}|^2} \quad (14)$$

3. 셀룰러 단말기의 양자화된 채널 정보 되먹임

기지국은 모든 셀룰러 단말기에  $\mathbf{c}_n^m$ 를 알려주고, 각 셀룰러 단말기는 유니터리 행렬  $\mathbf{C}_m$ 에 포함된 코드 벡터 중  $\mathbf{c}_n^m$ 를 제외한 나머지  $N_s$ 개의 코드 벡터  $\mathbf{c}_n^m$  중에서 양자화 오류

$$\Delta_{\bar{\mathbf{h}}_k, \mathbf{c}_n^m} = 1 - |\bar{\mathbf{h}}_k \mathbf{c}_n^m|^2 \quad (15)$$

가 가장 작은 1개의 코드 벡터를 선택하여 기지국으로 전송한다. 이때  $\bar{\mathbf{h}}_k$ 는 채널 형상 벡터로서  $\mathbf{h}_k / \|\mathbf{h}_k\|$ 로 표현된다. (15)에서  $\Delta_{\bar{\mathbf{h}}_k, \mathbf{c}_n^m}$ 가 0이 아닐 경우, 셀룰러 단말기  $k$ 는 기지국으로부터 공간 분할 다중 접속으로 인한 비연접 간섭 신호를 수신하게 된다. 비연접 간섭의 크기는  $\Delta_{\bar{\mathbf{h}}_k, \mathbf{c}_n^m}$ 에 의해 결정되므로<sup>[13]</sup>, 각 셀룰러 단말기는 비연접 간섭의 크기를 줄이기 위하여  $\mathbf{C}_m$ 에 포함된 코드 벡터 중  $\mathbf{c}_n^m$ 를 제외한 나머지 코드 벡터 중에서  $\bar{\mathbf{h}}_k$ 에 가장 근접한 코드 벡터를 선택한 후 기지국으로 되먹임 정보를 전송한다.

$$\begin{aligned} \Delta_{\tilde{h}_k, \tilde{c}_n^m} &= \min_{\substack{1 \leq n \leq N \\ n \neq k}} \Delta_{\tilde{h}_k, \tilde{c}_n^m} \\ \tilde{c}_n^m &\leftarrow \arg \min_{\substack{1 \leq n \leq N \\ n \neq k}} \Delta_{\tilde{h}_k, \tilde{c}_n^m} \end{aligned} \quad (16)$$

여기에서  $\tilde{c}_n^m$ 는 셀룰러 단말기  $k$ 에 의해 선택된 최적의 코드 벡터를 의미한다. 셀룰러 단말기  $k$ 의 전송 가중치 벡터로  $\tilde{c}_n^m$ 가 사용되고  $\tilde{c}_n^m$ 는 사용되지 않을 경우, 셀룰러 단말기  $k$ 의 SINR은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} SINR_k &= \frac{cD_k^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s} |h_k \tilde{c}_n^m|^2}{cD_k^{-\alpha} \frac{P_c}{N_s} \sum_{\substack{n \neq \tilde{n} \\ n \neq k}} |h_k \tilde{c}_n^m|^2 + cD_{kd}^{-\alpha} P_d |h_{kd}|^2 + N_o} \end{aligned} \quad (17)$$

각 셀룰러 단말기는 스케줄링을 위해 코드 벡터  $\tilde{c}_n^m$ 와 함께  $SINR_k$  정보를 기지국으로 전송한다.

4. D2D 통신을 고려한 빔 형성 및 스케줄링 기법  
기지국은 D2D 수신 단말기로부터 수신한 되먹임 데이터  $\tilde{c}_n^m$ 와 셀룰러 단말기로부터 수신한 되먹임 데이터  $\tilde{c}_n^m$ ,  $SINR_k$ 를 바탕으로 빔 형성 및 스케줄링을 수행한다. 이때 D2D 송신 단말기의 전송 전력을 최대한 줄이기 위하여 D2D 수신 단말기에 가장 적은 간섭을 미치는  $\tilde{c}_n^m$ 가 포함된 유니터리 행렬  $C_m$ 을 전송 가중치 행렬로 선택한다. 그리고  $C_m$ 에 포함된 코드 벡터 중  $\tilde{c}_n^m$ 를 제외한 나머지  $N_s$ 개의 코드 벡터 각각에 대해서 가장 큰 SINR을 갖는 셀룰러 단말기를 다음과 같이 선택한다.

$$\begin{aligned} \tilde{\gamma}_{n, \kappa_n^m} &= \max_{1 \leq k \leq K} \tilde{\gamma}_{n, k}^m \\ \kappa_n^m &\leftarrow \arg \max_{1 \leq k \leq K} \tilde{\gamma}_{n, k}^m \end{aligned} \quad (18)$$

여기서  $\tilde{\gamma}_{n, k}^m$ 는  $C_m$ 의  $n$ 번째 코드 벡터  $\tilde{c}_n^m$ 를 선택한 셀룰러 단말기  $k$ 의 SINR을 의미하고,  $\kappa_n^m$ 는  $\tilde{c}_n^m$ 를 선택한 셀룰러 단말기 중에서 가장 큰 SINR을 갖는 단말기의 인덱스를 뜻한다. 따라서 셀룰러 단말기들의 총 전송률과 D2D 단말기의 전송률은 다음과 같이 결정된다.

$$R_m^- = \left[ \sum_{n \neq \tilde{n}} \log_2 \left( 1 + \tilde{\gamma}_{n, \kappa_n^m}^m \right) \right] \quad (19)$$

$$R_d = \log_2(1 + SINR_d) \quad (20)$$

#### IV. 개선된 코드북 구성 기법

제안된 빔 형성 및 스케줄링 기법은 기지국이 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭을 최소한으로 줄여 D2D 송신 단말기에서 필요로 하는 전송 전력을 줄임으로써 결과적으로 셀룰러 단말기에 미치는 간섭을 줄이는 것을 목표로 한다. 하지만, 셀룰러 단말기들의 채널 정보를 바탕으로  $M$ 개의 유니터리 행렬 중 전송 가중치 행렬을 선택하는 대신 D2D 수신 단말기가 결정한 코드 벡터  $\tilde{c}_n^m$ 를 바탕으로  $C_m$ 을 전송 가중치 행렬로 선택하므로, 선택 다이버시티 이득이 줄어 셀룰러 단말기들의 총전송률이 줄어들 수 있다. 이를 극복하기 위하여 본 장에서는 각 코드 벡터가 1개 이상의 유니터리 행렬에 포함되도록 코드북을 구성하는 기법을 적용한다<sup>[14]</sup>.

$N=4$ 인 경우를 예로 들어 설명하면, 먼저 4개의 직교 특성을 갖는 코드 벡터를 생성하여 유니터리 행렬  $C_1 = [c_1^1, c_2^1, c_3^1, c_4^1]$ 를 구성한다. 그 후  $i$ 번째 단계에서는  $C_{i-1}$ 에서 2개의 코드 벡터들로 구성된 2쌍의 코드 벡터 조합을 임의로 선택하여 2개의 직교 부분공간을 생성한다. ( $2 \leq i \leq M$ ) 선택된 각각의 직교 부분공간으로부터  $\mathbb{C}^4$ 에서 새로운 기저를 각각 생성하면, 새롭게 생성된 기저 벡터들은  $\mathbb{C}^4$ 에서 서로 직교 특성을 갖는 새로운 유니터리 행렬이 된다.

예를 들어  $C_1$ 에서 임의로 2쌍의 코드 벡터 조합  $\{c_1^1, c_2^1\}$ 와  $\{c_3^1, c_4^1\}$ 을 선택하고 각 벡터 조합에 의해 형성되는 직교 부분공간으로부터 새로운 기저 벡터  $\{c_3^2, c_4^2\}$ 와  $\{c_1^2, c_2^2\}$ 를 생성하면,  $C_2 = [c_1^2, c_2^2, c_3^2, c_4^2]$ 는 유니터리 행렬이다. 또한  $C_{12} = [c_1^1, c_2^1, c_3^2, c_4^2]$ 와

표 1. 모의실험 매개 변수

Table 1. Simulation Parameters.

매개 변수	값
$\alpha$	4
$l_k, l_d$	500 m
$l_{kd}$	100 m
$l_{dd}$	30 m
$\Gamma_d^{target}$	20 dB

$C_{21} = [c_1^2, c_2^2, c_3^1, c_4^1]$  역시  $\mathbb{C}^4$ 에서 서로 직교 특성을 갖는 유니터리 행렬이 된다. 이와 같은 방식으로 코드북을 구성하면

$$M' = 1 + 3 \left( \frac{|C|}{N} - 1 \right) \quad (21)$$

개의 유니터리 행렬을 생성할 수 있다. 결과적으로 각각의 코드 벡터들이 서로 다른 2~3개의 유니터리 행렬에 포함되므로, D2D 수신 단말기에 의해 선택된 코드 벡터  $c_n^m$  역시 2~3개의 유니터리 행렬  $C_{m_1}, C_{m_2}$ , 혹은  $C_{m_3}$ 에 포함된다. 기지국은 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭을 최소화하는 동시에 셀룰러 단말기들의 총 전송률을 향상시키기 위해  $R_{m_1}, R_{m_2}$ , 혹은  $R_{m_3}$  중에서 가장 높은 총 전송률을 얻을 수 있는 유니터리 행렬을 전송 가중치 행렬로 최종 선택한다.

### V. 실험

본 장에서는 컴퓨터 모의실험을 통해서 제안된 기법의 성능을 검증한다. 모의실험의 매개 변수들은 표 1에 정리되어 있다. 기지국의 전송 전력  $P_c$ 와 열잡음의 분산  $N_0$ 은 셀룰러 단말기에서의 signal to noise ratio (SNR)이 10dB가 되도록 결정하였다. D2D 송신 단말기의 전송 전력  $P_d$ 는 (14)에 따라 D2D 수신 단말기에서 SINR이 20dB가 되도록 결정하였다.

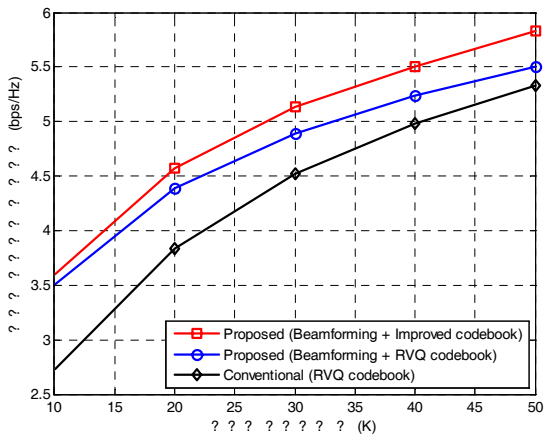


그림 2. 셀룰러 단말기의 수에 따른 총 전송률 변화 ( $M = 4$ )  
 Fig. 2. Sum rate of cellular users for varying number of cellular users ( $M = 4$ ).

그림 2와 3은 각각 셀룰러 단말기의 수  $K$ 와  $M = |C|/N$ 에 따른 셀룰러 단말기들의 총 전송률 변화를 나타낸다. 성능 비교를 위하여 RVQ(Random vector quantization) 코드북<sup>[15]</sup>을 사용하는 기지국에서 D2D 통신 시스템을 고려한 간섭 완화 기법을 적용하지 않고  $N_s = N$ 개의 코드 벡터를 모두 사용하여 빔을 형성하는 경우의 총 전송률도 함께 나타냈다. 공정한 비교를 위하여, 이 경우에도 (14)에 따라 D2D 송신 단말기에서 SINR이 20dB가 되도록 전송 전력을 조절하였다. 또한, 제안된 빔 형성 및 스케줄링 기법을 RVQ 코드북과 함께 사용하는 경우 및 개선된 코드북과 함께 사용하는 경우의 총 전송률을 비교하였다.

그림 2에서, 세 가지 경우 모두 셀룰러 단말기의 수가 늘어날수록 총 전송률이 증가한다. 동일한 RVQ 코드북을 사용할 경우, 제안된 빔 형성 및 스케줄링 기법을 사용하여 D2D 송신 단말기의 전송 전력을 낮춤으로써 셀룰러 단말기의 총 전송률을 향상시킬 수 있다. 또한, 개선된 코드북을 이용하면 기지국이 D2D 수신 단말기에 미치는 간섭의 양은 그대로 유지하면서 기지국이 더 많은 유니터리 행렬 중에서 전송 가중치 행렬을 선택할 수 있으므로, 선택 다이버시티 이득이 증가하여 결과적으로 총 전송률이 증가하게 된다.

그림 3에서, RVQ 코드북을 사용하는 기존의 기법은  $M$ 이 증가함에 따라 총 전송률이 증가하다가 감소하는데, 이는 각 코드 벡터를 선택하는 셀룰러 단말기의 숫자가  $M$ 이 증가함에 따라 평균적으로 감소하기 때문이다. 이에 반해 제안된 빔 형성 및 스케줄링 기법은

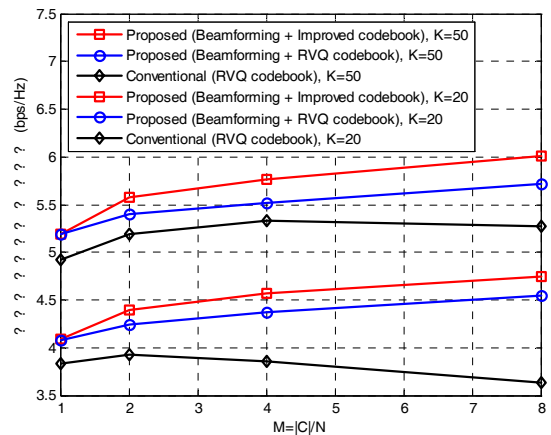


그림 3. M에 따른 총 전송률 변화 ( $K = 20, 50$ )  
 Fig. 3. Sum rate of cellular users for varying  $M$  ( $K = 20, 50$ ).

각 셀룰러 단말기가  $C_m$ 를 구성하는 코드 벡터 중  $c_m^*$ 를 제외한 나머지  $N_s$ 개의 코드 벡터 중에서 한 벡터를 선택하므로  $M$ 이 증가하더라도 총 전송률은 감소하지 않는다. 또한 개선된 코드북을 이용하면 총 전송률을 더욱 향상시킬 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 D2D 통신 시스템이 셀룰러 단말기들과 하향 링크의 주파수 자원을 공유할 때, D2D 통신으로 인한 간섭을 완화하기 위한 빔 형성 및 스케줄링 기법을 제안하였다. 제안 기법은 D2D 수신 단말기가 기지국으로부터 받는 간섭을 최소화하여 D2D 송신기의 전송 전력을 낮춤으로써 셀룰러 단말기들이 받는 간섭을 감소시킨다. 또한 개선된 코드북을 이용함으로써 총 전송률을 더욱 향상시킬 수 있었다. 모의실험을 통해 제안 기법이 D2D 통신으로 인한 간섭을 완화시킬 뿐만 아니라 개선된 코드북을 사용함으로써 셀룰러 단말기의 총 전송률도 향상시킬 수 있음을 보여주었다.

## 참 고 문 헌

- [1] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-advanced networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol.47, no.12, pp.42-49, Dec. 2009.
- [2] C. H. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. Ribeiro, "Power Optimization of Device-to-Device Communication Underlying Cellular Communication," *ICC '09. IEEE*, pp.1-5, 14-18 June 2009.
- [3] C. H. Yu, O. Tirkkonen, K. Doppler, and C. Ribeiro, "On the Performance of Device-to-Device Underlay Communication with Simple Power Control," *VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pp.1-5, 26-29 April 2009.
- [4] K. Doppler, C. H. Yu, C. B. Ribeiro, and P. Janis, "Mode Selection for Device-To-Device Communication Underlying an LTE-Advanced Network," *WCNC, 2010 IEEE*, pp.1-6, 18-21 April 2010.
- [5] H. Min, W. Seo, J. Lee, S. Park, and D. Hong, "Reliability Improvement Using Receive Mode Selection in the Device-to-Device Uplink Period Underlying Cellular Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.10, no.2, pp.413-418, February 2011.
- [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," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol.10, no.12, pp.3995-4000, December 2011.
- [7] 민현기, 서우현, 박성수, 홍대식. "셀룰러 시스템의 간섭에 의한 D2D 시스템의 Outage 확률 분석.", *대한전자공학회, 논문지, 제48권 TC편 제1호*, 55-61쪽, 2011년 1월.
- [8] D. J. Love, R. W. Heath Jr., W. Santipach, and M. L. Honig, "What is the value of limited feedback for MIMO channels?," *Communications Magazine, IEEE*, vol.42, no.10, pp. 54-59, Oct. 2004.
- [9] K. Huang, J. G. Andrews, R. W. Heath, Jr., "Performance of Orthogonal Beamforming for SDMA With Limited Feedback," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol.58, no.1, pp.152-164, Jan. 2009.
- [10] A. J. Goldsmith and P. P. Varaiya, "Capacity of fading channels with channel side information," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol.43, no.6, pp.1986-1992, Nov 1997.
- [11] W. Rhee, J. M. Cioffi, "Increase in capacity of multiuser OFDM system using dynamic subchannel allocation," *VTC 2000-Spring Tokyo. 2000 IEEE 51st*, vol.2, pp.1085-1089 vol.2, 2000.
- [12] Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., Prentice Hall, 2001.
- [13] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-Antenna Downlink Channels with Limited Feedback and User Selection," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol.25, no.7, pp.1478-1491, September 2007.
- [14] M. Trivellato, F. Boccardi, and H. Huang, "Zero-forcing vs unitary beamforming in multiuser MIMO systems with limited feedback," *PIMRC 2008. IEEE*, pp.1-6, 15-18 Sept. 2008.
- [15] N. Jindal, "MIMO Broadcast Channels With Finite-Rate Feedback," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol.52, no.11, pp.5045-5060, Nov. 2006.

저 자 소 개



**박 성 수**(학생회원)  
 2006년 연세대학교 전기전자 공학과 학사 졸업.  
 2008년 연세대학교 전기전자 공학과 석사 졸업.  
 2012년 연세대학교 전기전자 공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 펄토셀, 멀티홉 시스템, MIMO, D2D, CR>



**홍 대 식**(평생회원)-교신저자  
 1990년 Purdue University Electrical Engineering 박사 졸업.  
 1991년~현재 연세대학교 전기 전자공학과 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 통신신호처리, 4G시스템, OFDM, 멀티홉 시스템, CR, M2M>



**방 극 준**(평생회원)  
 1981년~1985년 연세대학교 전자공학과 공학사.  
 1993년~1995년 연세대학교 산업대학원 전자공학과 공학석사.  
 1995년~1999년 연세대학교 대학원 전자공학과 공학박사.

1984년~1991년 삼성전자.  
 1991년~1994년 (주)아리스트 벤처창업.  
 2000년~현재 인덕대학교 방송영상미디어과 부교수

<주관심분야 : 디지털방송 전송방식, 방통융합>