

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.1.83>

IIBC 2016-1-11

LTE-Advanced 환경에서 D2D 통신을 위한 송수신 기법

Transmission and reception scheme for D2D communication in LTE-Advanced environment

서방원*

Bangwon Seo*

요약 본 논문은 LTE-Advanced 시스템에서 셀룰러 상향링크 자원을 재사용하여 단말간 직접 통신(D2D)을 수행하는 방법에 대해서 다룬다. 기존 문헌들은 일반적으로 D2D 송신 단말이 SC-FDMA 기법을 적용하여 데이터를 전송하는 것을 가정한다. 그러나, 기존 방법에서는 단말 신호들 간의 간섭 신호를 제거할 수 있는 방법이 거의 없기 때문에, 셀룰러 상향링크 통신 신호가 D2D 링크에 미치는 간섭이 큰 경우에는 D2D 통신을 적용할 수 없게 된다. 본 논문에서는 이런 경우에도 D2D 통신이 가능하도록 하기 위하여 D2D 송신 단말이 다중반송파 주파수분할 다중접속(MC-CDMA) 기술을 적용하여 데이터를 전송하는 것을 제안한다. 또한, D2D 수신 단말에서는 최소 평균 제곱오차(MMSE) 수신기를 적용함으로써 간섭 신호를 제거하는 것을 제안한다. 모의실험을 통해서 제안하는 방법이 기존 방법보다 더 우수한 BER 성능을 갖는다는 것을 보인다.

Abstract We treat device-to-device direct communication (D2D) by reusing cellular uplink resources in LTE-Advanced systems. Conventional schemes assume that D2D transmitter employs SC-FDMA scheme for the data transmission. In the conventional schemes, however, it is very difficult to reduce the interference between the users, D2D communication cannot be used when the interference caused by cellular uplink signal is high. In this paper, we propose D2D transmission scheme which employs MC-CDMA technology and D2D detection scheme which uses MMSE algorithm to reduce interference from the cellular uplink signal. Therefore, in the proposed scheme the D2D communication becomes possible even in the high interference scenario. Through simulation, we show that the proposed scheme has better BER performance than the conventional scheme.

Key Words : Device-to-device communication (D2D), cellular network, uplink resource, SC-FDMA, MC-CDMA

1. 서론

지금까지의 셀룰러 기반 이동통신은 기지국이 단말들 간의 모든 통신 과정을 제어하고, 단말들이 기지국을 통해서 서로 데이터를 주고받는 방식이었다. 즉, 송신 단말은 먼저 기지국으로 데이터를 전송하고, 기지국이 이 데

이터를 수신 단말에게 전달해 주는 방식이었다. 반면에, 단말 간 직접통신(Device-to-device, D2D) 기술은 기지국의 인프라를 거치지 않고, 송신 단말이 수신 단말에게 직접 데이터를 전송하는 방식을 의미한다^{[1]-[4]}. 대표적인 이동통신 표준화 단체인 3GPP (3rd Generation Partnership Project)에서는 Release 12 규격의 주요 기술

*정희원, 공주대학교 전기전자제어공학부(교신저자)
접수일자: 2016년 1월 15일, 수정완료: 2016년 1월 29일
게재확정일자 2016년 2월 5일

Received: 15 January, 2016 / Revised: 29 January, 2016

Accepted: 5 February, 2016

*Corresponding Author: seobw@kongju.ac.kr

Div. of Electrical, Electronic and Control Engineering, Kongju National University, Korea

중의 하나로 D2D 통신을 선정하고, Prose (Proximity-based Services)라는 이름으로 표준화를 진행하고 있다^[5].

D2D 통신을 통해서 얻을 수 있는 장점은 다음과 같다. 첫째, 기지국의 제어 없이 단말들이 직접 통신을 하기 때문에 기지국의 부하를 크게 줄일 수 있고, 둘째, 근접한 단말들 간에 D2D 통신을 하기 때문에 단말의 전송 전력 과 전송 지연을 줄일 수 있다. 셋째, D2D 통신이 기존의 셀룰러 자원을 재사용하여 데이터를 전송하는 경우에는, 주파수 자원 이용 효율성을 증대시킬 수 있다. 이처럼 D2D 통신이 갖는 많은 장점들 때문에, 최근에 D2D 통신에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다^[1].

D2D 통신이 셀룰러 자원을 공유하는 방법은, 셀룰러 통신의 하향링크 자원을 공유하는 방법과 상향링크 자원을 공유하는 방법이 있다^[4]. 하향링크 자원을 공유하여 D2D 통신을 수행하는 경우에는, D2D 통신 신호가 셀룰러 하향링크 통신에 간섭으로 작용하기 때문에, 셀룰러 통신 단말들의 수신 성능을 크게 저하시키는 단점이 있다. 또한, LTE-Advanced 시스템의 하향링크에서는 동기 신호나 제어 신호들이 주기적으로 전송되고, 레퍼런스 신호는 모든 주파수 대역에서 전송되기 때문에, D2D 통신이 셀룰러 하향링크 자원을 공유하는 것은 쉽지 않은 상황이다.

반면에, LTE-Advanced 시스템의 상향링크에서는 단말들이 특정 시간 또는 특정 주파수 자원만을 사용하여 통신을 하기 때문에, 하향링크에 비해서 자원 이용률이 적고, 셀 내에 있는 단말 수가 적은 경우에는 사용되지 않는 자원이 종종 발생되게 된다. 또한, 셀룰러 상향링크 자원을 공유하여 D2D 통신을 하는 경우에는, D2D 통신 신호가 기지국의 수신 성능에 영향을 주는데, 기지국과 멀리 떨어져 있는 단말들에게만 D2D 통신을 허용하거나 D2D 통신의 최대 전송 전력을 제한함으로써 D2D 신호가 기지국에 미치는 영향을 크게 줄일 수 있다. 이러한 이유로 인해서, 3GPP에서는 D2D 통신이 셀룰러 통신의 상향링크 자원을 공유하는 경우에 대해서만 표준화가 진행되고 있으며, 본 논문에서도 이와 같은 환경에 대해서 다룬다.

D2D 통신에 대한 대부분의 기존 논문들은 셀룰러 통신 모드와 D2D 통신 모드 간의 선택 방법, 셀룰러 통신과 D2D 통신 간의 자원 공유 및 자원 할당 방법, D2D 통신 전송 전력 할당 방법, 주변 단말 디스커버리 방법에 대해서 다루고 있다^{[1]-[3]}. 이러한 논문들은 셀룰러 상

향링크 통신과 마찬가지로 D2D 통신에서도 SC-FDMA 방식을 사용하는 것을 가정하고 있다. LTE-Advanced 시스템의 상향링크에서는 셀 내의 서로 다른 단말들 간에는 서로 다른 주파수 자원을 사용하여 통신을 하기 때문에, 셀 내의 단말들 간에는 간섭이 전혀 존재하지 않는 환경이다. 따라서, 단말들 간의 간섭을 고려할 필요가 없기 때문에 SC-FDMA를 적용해도 문제가 없었고, 수신기에서는 셀 내의 단말들 간의 간섭을 줄이기 위한 알고리즘이 전혀 사용되고 있지 않다.

그러나, D2D 링크가 셀룰러 상향링크 자원을 공유하여 D2D 통신을 하는 경우에는 셀룰러 단말의 상향링크 신호가 D2D 통신에 간섭 신호로 작용하게 된다. 그리고, D2D 통신이 SC-FDMA를 적용하면 D2D 수신기에서 간섭 신호 제거 알고리즘을 적용하는 것이 거의 불가능하고, 셀룰러 상향링크 신호가 미치는 간섭이 큰 경우에는 D2D 링크의 통신 성능이 크게 떨어지게 된다. 이러한 이유로 인해서, 기존의 방법들은 셀룰러 상향링크 신호에 의해서 발생하는 간섭의 세기가 작은 경우에만 D2D 통신을 적용하고 있다.

본 논문에서는 셀룰러 상향링크 신호가 미치는 간섭의 세기가 큰 경우에도 D2D 통신이 가능하도록 하기 위한 방법들을 제안한다. 먼저, D2D 송신 단말은 SC-FDMA 방식을 적용하지 않고 다중반송과 부호분할(MC-CDMA) 전송 기법을 적용해서 데이터를 전송하도록 한다. 이 때, 기지국은 D2D 송신 단말에게 확산 코드를 할당하고, D2D 송신 단말은 확산코드를 곱해서 데이터들을 전송하게 된다. 그리고, D2D 통신의 데이터 전송률을 높이기 위하여 D2D 송신 단말에게 여러 개의 확산코드를 할당할 수 있고, 이들을 이용해서 여러 개의 데이터들을 동시에 전송하도록 할 수 있다. D2D 수신 단말에서는 최소 평균 제곱오차 (Minimum mean square error, MMSE) 검파기를 적용함으로써 셀룰러 상향링크 신호가 미치는 간섭을 제거함으로써 D2D 링크 수신 성능을 크게 개선시키게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 D2D 송신 단말을 위한 전송 기술에 대해서 제안하고, III장에서는 D2D 수신 단말을 위한 수신 기술에 대해서 제안한다. IV장에서는 모의실험을 통해서 제안하는 기술들과 기존 기술들의 성능을 비교한다. V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 제안하는 D2D 통신 전송 기술

그림 1은 셀룰러 상향링크 자원을 공유하여 D2D 통신을 수행하는 환경에서 셀룰러 통신과 D2D 통신 간에 발생하는 간섭 신호를 보여주는 그림이다. BS는 기지국을 나타내고, CUE 3은 셀룰러 상향링크 통신을 수행하는 단말을 나타낸다. DUE 1과 DUE 2는 D2D 통신을 수행하는 단말 쌍을 나타내며, DUE 1과 DUE 2는 각각 D2D 송신 단말과 D2D 수신 단말을 나타낸다. CUE 3은 셀룰러 상향링크 자원을 사용하여 기지국으로 데이터를 전송하고 있으며, I_3 는 CUE 3의 전송 신호가 D2D 수신 단말 DUE 2에게 미치는 간섭 신호를 나타낸다. D2D 송신 단말 DUE 1은 CUE 3이 사용하는 상향링크 자원을 재사용하여 DUE 2에게 데이터를 전송하고 있으며, I_1 은 DUE 2의 신호가 기지국에게 미치는 간섭 신호를 나타낸다.

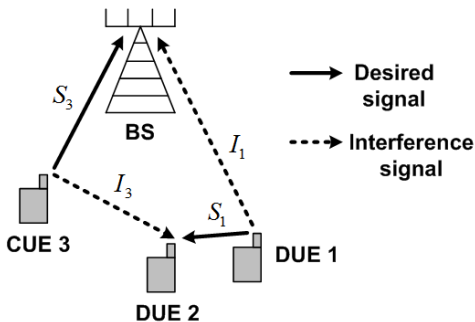


그림 1. D2D 통신에서의 간섭 시나리오
 Fig. 1. Interference scenario in D2D communications

본 논문에서는 기지국이 이웃한 단말들 간의 통신을 셀룰러 통신 모드에서 D2D 통신 모드로 전환시키는 기능과 D2D 링크에 자원을 할당하는 기능을 수행한다고 가정한다. 일반적으로, 기지국은 D2D 신호가 기지국의 수신 성능에 적게 영향을 주거나 또는 전혀 영향을 주지 않는 경우에만 D2D 통신을 허용하게 된다. 따라서, 여기에서는 DUE 1의 신호가 기지국에 미치는 간섭 I_1 은 상대적으로 매우 작아서 고려할 필요가 없다고 가정한다. 반면에, 셀룰러 상향링크 통신을 수행하는 CUE 3 단말의 신호가 DUE 2에 미치는 간섭 신호인 I_3 의 값은 무시할 수 없다고 가정한다.

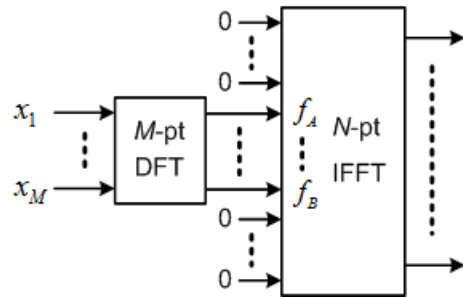


그림 2. LTE-Advanced 시스템에서 SC-FDMA 적용 과정
 Fig. 2. Procedure of applying SC-FDMA in LTE-Advanced

LTE-Advanced 시스템의 상향링크에서는 SC-FDMA 기술을 적용하여 데이터를 전송한다^{[1], [4]}. 그림 2는 SF-FDMA 기술을 적용하는 과정을 보여준다. 데이터 심볼들 x_1, \dots, x_M 에 대해서 길이가 M인 이산 푸리에 변환 (Discrete Fourier Transform, DFT)를 적용하고, 그 후에 길이가 N인 고속 푸리에 역변환 (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT)를 적용하게 된다. 이 때, N은 M보다 큰 수를 나타내고, DFT 결과 값을 IFFT에 매핑하는 부반송파 위치 $f_A, f_A + 1, \dots, f_B$ 가 데이터 전송에 사용되는 주파수 자원을 의미한다. 이 때, M개의 부반송파 이외의 다른 부반송파에는 0을 입력시킨 후, IFFT를 적용하게 된다^{[6]-[7]}.

기존 문헌들에서는 D2D 링크에서도 셀룰러 상향링크 통신과 마찬가지로 SC-FDMA 기법을 적용해서 데이터를 전송하는 경우를 가정한다. 그러나, D2D 송신 단말이 SC-FDMA 기법을 적용하면, D2D 수신 단말에서 셀룰러 상향링크 통신에 의해 발생하는 간섭 신호를 제거하는 것이 매우 어렵게 된다. 그래서, 기존 논문들은 이러한 간섭 신호가 매우 작은 경우에만 D2D 통신을 적용하도록 하고, 이 간섭 신호가 큰 경우에는 셀룰러 상향링크 통신 모드로 전환하도록 한다.

본 논문에서는 셀룰러 상향링크 통신에 의한 간섭 신호가 큰 경우에도 D2D 통신이 가능하도록 하기 위하여, D2D 링크에서 MC-CDMA 기법을 적용하여 데이터를 전송하는 것을 제안한다. 이 때, 기지국은 D2D 송신 단말에게 길이가 M인 확산 코드를 할당하고, D2D 송신 단말은 데이터를 전송할 때 확산코드를 적용해서 전송하게 된다.

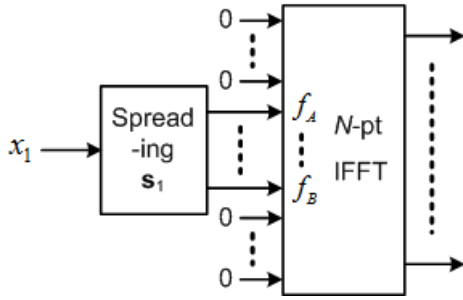


그림 3. MC-CDMA 방식으로 전송 데이터를 만드는 과정
Fig. 3. Procedure of making transmit data by using MC-CDMA

그림 3은 MC-CDMA 방식을 적용하여 전송 데이터를 만드는 과정을 보여준다. 이 그림에서 \mathbf{s}_1 은 확산 코드로서 길이가 $M \times 1$ 인 벡터이다.

그림 2와 그림 3을 비교하면, SC-FDMA 방식에서는 M 개의 데이터를 동시에 전송하지만, MC-CDMA 방식에서는 한 개의 데이터만 전송하게 된다. 따라서, MC-CDMA 방식은 데이터 전송률을 낮춤으로써 간섭 신호가 큰 경우에도 D2D 통신이 가능하도록 만드는 방법이다. 제안하는 MC-CDMA 기반 D2D 통신의 데이터 전송률을 높이기 위해서는 동시에 전송하는 데이터의 개수를 증가시켜야 한다. 이를 위해서, 기지국은 D2D 송신 단말에게 K 개의 확산 코드를 할당해 주고, D2D 송신 단말은 K 개의 데이터를 동시에 전송하도록 한다.

기지국이 DUE 1에게 할당한 K 개의 확산 코드를 $\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_K$ 라고 하자. DUE 1이 i 번째 전송 구간 동안에 K 개의 심볼들 $d_1(i), d_2(i), \dots, d_K(i)$ 를 동시에 전송한다고 하자. 그리고, DUE 1과 DUE 2 간의 주파수 영역 채널 \mathbf{H}_1 이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\mathbf{H}_1 = \text{diag}(H_{1,1}, H_{1,2}, \dots, H_{1,M}) \quad (1)$$

셀룰러 통신 단말 CUE 3의 전송 데이터를 다음과 같이 표현하자.

$$\mathbf{x}_3(i) = [x_{3,1}(i), x_{3,2}(i), \dots, x_{3,M}(i)]^T \quad (2)$$

그리고, CUE 3과 DUE 2 간의 주파수 영역 채널 \mathbf{H}_3 이 다음과 같이 표현된다고 하자.

$$\mathbf{H}_3 = \text{diag}(H_{3,1}, H_{3,2}, \dots, H_{3,M}) \quad (3)$$

그러면, DUE 2의 수신단에서 FFT를 적용한 후에 얻는 주파수 영역 수신 신호 $\mathbf{y}(i)$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}(i) = \sqrt{P_1} \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_1 \mathbf{s}_k d_k(i) + \sqrt{P_3} \mathbf{H}_3 \mathbf{D} \mathbf{x}_3(i) + \mathbf{z}(i) \quad (4)$$

여기에서 P_1 과 P_3 은 DUE 2에서의 수신 전력을 나타내고, $\mathbf{D}(i)$ 는 길이가 $M \times M$ 인 DFT 행렬을 나타낸다. 그리고, $\mathbf{z}(i)$ 는 백색 가우시안 부가 잡음 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)을 나타내며, $\mathbf{z}(i)$ 의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 σ_z^2 인 확률 변수이다.

III. 제안하는 D2D 통신 수신 기술

D2D 수신 단말에서 D2D 링크 데이터 심볼 $d_k(i)$ 를 추정하기 위하여, 최소 평균 제곱오차 (Minimum mean square error, MMSE) 검파기를 적용하는 것을 제안한다. $d_k(i)$ 를 추정하기 위한 검파기를 \mathbf{w}_k 라고 하면, 검파기의 출력에서의 평균 제곱오차 MSE는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} J &= E[\|\mathbf{w}_k^H \mathbf{y}(i) - d_k(i)\|^2] \\ &= E[(\mathbf{w}_k^H \mathbf{y}(i) - d_k(i))(\mathbf{w}_k^H \mathbf{y}(i) - d_k(i))^*] \\ &= \mathbf{w}_k^H \mathbf{R}_y \mathbf{w}_k - \sqrt{P_1} \mathbf{w}_k^H \mathbf{H}_1 \mathbf{s}_k - \sqrt{P_1} \mathbf{s}_k^H \mathbf{H}_1^H \mathbf{w}_k + 1 \end{aligned} \quad (5)$$

이 식에서 \mathbf{R}_y 는 수신 신호 $\mathbf{y}(i)$ 의 공분산 행렬을 나타내며, 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_y &= E[\mathbf{y}(i) \mathbf{y}(i)^H] \\ &= P_1 \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_1 \mathbf{s}_k \mathbf{s}_k^H \mathbf{H}_1^H + P_3 \mathbf{H}_3 \mathbf{H}_3^H + \sigma_z^2 \mathbf{I}_M \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서 \mathbf{I}_M 은 길이가 $M \times M$ 인 단위행렬을 나타낸다. MMSE 검파기를 $\mathbf{w}_{k, \text{MMSE}}$ 라고 하면, $\mathbf{w}_{k, \text{MMSE}}$ 는 다음과 같은 최적화 식에 의해 구할 수 있다.

$$\mathbf{w}_{k,MMSE} = \arg \min_{\mathbf{w}_k} J \quad (7)$$

식 (7)과 식 (5)를 이용해서 최적화 문제를 풀면, $\mathbf{w}_{k,MMSE}$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{w}_{k,MMSE} = \sqrt{P_1} \mathbf{R}_y^{-1} \mathbf{H}_1 \mathbf{s}_k \quad (8)$$

그러면, $d_k(i)$ 에 대한 추정치는 $\hat{d}_k(i) = \mathbf{w}_{k,MMSE}^H \mathbf{y}(i)$ 에 의해서 구할 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과

제안하는 D2D 통신 전송 기술과 수신 기술의 성능을 기존 D2D 기술들과 비교하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 시간 영역에서 채널을 발생시키기 위하여, 탭 길이가 6인 탭 지연 선로 (Tapped delay line) 채널 모델을 사용하였다^[8]. 각 탭의 계수들은 평균이 0이고 분산이 1인 가우시안 확률분포를 갖는 랜덤 변수 모델을 사용해서 발생하였다. DFT 사이즈는 M=12를 사용하였고, FFT 사이즈는 N=1024를 사용하였다. 셀룰러 상향링크 통신을 위한 데이터와 D2D 통신을 위한 데이터는 QPSK 심볼을 사용하였다. D2D 수신 신호의 세기와 셀룰러 상향링크 통신 간섭 신호 간의 비를 신호대 간섭비 (Signal-to-Interference Ratio, SIR)로 정의하였으며, $SIR = P_1/P_3$ 에 의해 주어진다. 따라서, SIR이 크다는 것은 D2D 수신 신호의 세기 P_1 이 셀룰러 상향링크 수신 신호 P_3 보다 크다는 것을 의미한다.

그림 4는 K=1일 때 제안하는 방법과 기존 방법의 BER 성능을 보여 준다. 기존 방법은 D2D 전송을 위해서 SC-FDMA를 적용하는 기법을 의미한다^{[2],[3]}. 이 그림에서 기존 방법의 성능은 'Conv'로 표현된 그래프들이고, 제안하는 방법의 성능은 'Pro'로 표현된 그래프들이다. SIR 값은 0dB, 10dB, 20dB, 30dB를 사용하였다. 이 그림으로부터 제안하는 기법의 성능이 기존 방식보다 훨씬 더 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러나, 제안하는 방법은 한 개의 데이터만 전송하기 때문에, 기존 방법보다 데이터 전송률은 떨어지게 된다.

그림 5는 SIR=20dB인 경우에, 여러 가지 K에 대한 제안하는 방법의 BER 성능을 보여주고 있다. K가 증가함

에 따라 D2D 통신의 데이터 전송률이 증가하게 된

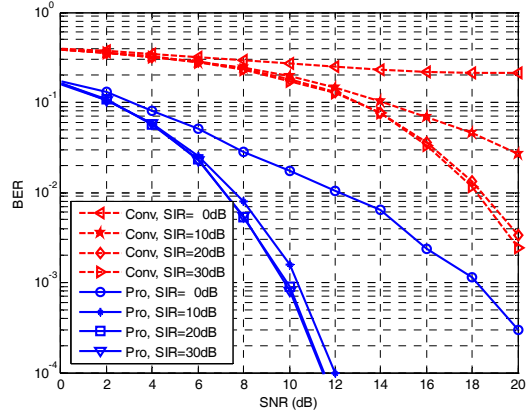


그림 4. 제안하는 방법과 기존 방법의 BER 성능 비교 (K=1)
 Fig. 4. Comparison of BER performance between the proposed scheme and the conventional one (K=1)

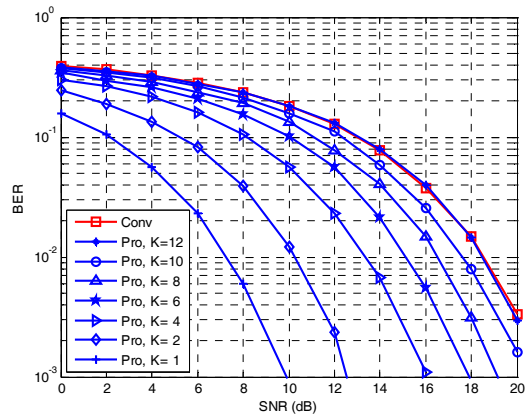


그림 5. K 값에 따른 제안 기법의 BER 성능 (SIR=20dB)
 Fig. 5. BER performance of the proposed scheme according to K (SIR=20dB)

다. 이 그림으로부터 K가 증가함에 따라서 BER 성능이 저하된다는 것을 확인할 수 있다. 따라서, D2D 통신에서 요구하는 데이터 전송률과 BER 성능을 고려하여 적절한 K 값을 선택해서 사용하면 된다. 기존 방법은 SNR이 낮거나 SIR이 낮은 경우에는 D2D 통신이 불가능하지만, 제안하는 방법은 K 값을 작은 값으로 선택해서 데이터 전송률을 적절히 낮춤으로써 D2D 통신이 가능하도록 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 LTE-Advanced 시스템에서 D2D 링크가 셀룰러 상향링크 자원을 재사용하는 경우에, D2D 통신을 위한 전송 기법과 수신 기법에 대해서 다루었다. D2D 송신 단말이 데이터를 전송하기 위하여 MC-CDMA를 적용하는 방법을 제안하였고, D2D 수신 단말이 데이터를 복조하기 위하여 MMSE 수신기를 적용하는 방법을 제안하였다. 제안하는 기법을 통해서, 셀룰러 상향링크 통신에 의해 발생하는 간섭 신호가 큰 경우에도 D2D 통신이 가능하도록 하였다. 모의실험을 통하여 제안하는 방식이 기존 방식보다 더 우수한 BER 성능을 나타낸다는 것을 보였다.

References

- [1] K. Doppler, M. P. Rinne, C. Wijting, C. B. Ribeiro, and K. Hugl, "Device-to-device communication as an underlay to LTE-Advanced network", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 47, No. 12, pp. 42-49, Dec. 2009. DOI: 10.1109/MCOM.2009.5350367
- [2] Y. Wu, J. Wang, L. Qian, and R. Schober, "Optimal power control for energy efficient D2D communication and its distributed implementation", *IEEE Commun. Letters*, Vol. 19, No. 5, pp. 815-818, May 2015. DOI: 10.1109/LCOMM.2015.2407871
- [3] Y. Cheng, Y. Gu, and X. Lin, "Combined power control and link selection in device-to-device enabled cellular systems", *IET Commun.*, Vol. 7, No. 12, pp. 1221-1230, Aug. 2013. DOI: 10.1049/iet-com.2012.0769
- [4] X. Lin, J. G. Andrews, A. Ghosh, and R. Ratasu, "An overview of 3GPP device-to-device proximity services", *IEEE Commun. Mag.*, Vol. 52, No. 4, pp. 40-48, April 2014. DOI: 10.1109/MCOM.2014.6807945

- [5] 3GPP TR 23.703, Study on architecture enhancements to support proximity services (ProSe), Vol. 4.1, June 2013.
- [6] J.-C. Kim, J.-N. Bae, and J.-Y. Kim, "Adaptive Switching Equalization for SC-FDMA system", *The Journal of the Institute of Internet, Broadcasting and Communication (JIIBC)*, Vol. 9, No. 6, pp. 23-28, Dec. 2009.
- [7] J. Park and J. Kim, "Novel soft decision generation technique for performance improvement of 3GPP LTE-Advanced systems with multiple antennas", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society (JKAIS)*, Vol. 15, No. 11, pp. 6838-6844, Nov. 2014. DOI: 10.5762/KAIS.2014.15.11.6838
- [8] F. Gao and A. Nallanathan, "Blind channel estimation for MIMO OFDM systems via nonredundant linear precoding", *IEEE Trans. Signal Process.*, Vol. 55, No. 2, pp. 784-789, Feb. 2004. DOI: 10.1109/TSP.2006.885764

저자 소개

서 방 원(정회원)



- 1997년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학사)
 - 1999년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
 - 2010년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
 - 2004년 11월 ~ 2013년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원
 - 2013년 3월 ~ 현재 : 공주대학교 교수
- <주관심분야 : 이동통신, 단말간 직접통신, MIMO>

※ 이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A2056387)