

기지국 협력 Device-to-Device 통신 전송 프로토콜 연구

전 상 운*, 최 상 원*, 김 주 엽**, 신 원 용^oTransmission Protocol for Cellular-Aided Device-to-Device
CommunicationSang-Woon Jeon*, Sang Won Choi*, Juyeop Kim**, Won-Yong Shin^o

요 약

본 논문은 기지국 협력이 가능한 Device-to-Device 통신 모델에서의 효율적인 전송 프로토콜에 대해 연구하였다. 두 개의 직접통신 송수신단 쌍이 기지국의 상향링크, 하향링크 통신채널을 활용하여 독립적인 메시지를 전송하는 모델에 대해 고려하였다. 제안기법의 경우, 첫 번째 단계에서 송신단은 메시지를 전송하고 기지국과 수신단은 이를 수신하게 된다. 두 번째 단계에서 기지국은 메시지의 XOR를 수신단에게 전송하여 최종적으로 수신단은 첫 번째 단계에서 수신한 신호와 두 번째 단계에서 수신한 신호를 통하여 자신의 메시지를 복원하게 된다. 기존의 직접 통신의 경우, 자신의 메시지 디코딩에 실패하면 아웃티지가 발생하지만, 제안기법의 경우 첫 번째 단계에서 두 메시지 중 하나만 디코딩이 가능하면 두 번째 단계에서 수신한 메시지의 XOR를 통해 자신의 메시지를 복원 가능하다. 본 논문은 제안기법의 아웃티지 기반 전송율을 분석하고 또한 모의실험을 통하여 제안기법이 기존 기법 대비 아웃티지 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다.

Key Words : D2D Communication, Cellular Networks, Network Coding, Outage Capacity, In-Band Overlay

ABSTRACT

We study an efficient transmission protocol for the cellular-aided device-to-device communication model. In particular, two source-destination pairs communicate with the help of unlink and downlink cellular links. For the proposed scheme, two transmitters send their messages and the base station and two receivers receive at the first phase. Then, at the second phase, the base station sends the XOR of the messages to two receivers and they try to decode their own messages from the received signals after the first and second phases. We analyze the outage-based throughput achievable by the proposed scheme and demonstrate by simulations that the proposed scheme provides an improved outage performance compared to the conventional device-to-device communication schemes.

I. 서 론

최근 셀룰러 망에서의 Device-to-Device (D2D) 기

반 직접통신의 중요성이 증가하면서 스펙트럼 효율 증대, 데이터 분산 등과 같은 관련연구가 수행되고 있다¹⁻¹⁰⁾. 특히 셀룰러 망에서의 효율적인 D2D 직접접

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술연구진흥센터의 정보통신·방송 연구개발사업의 일환으로 수행하였음. [B0101-16-1361, 국가 공공안전서비스를 위한 LTE기반 재난통신 시스템·단말 개발]

• First Author : Andong National University, Dept. of Information and Communication Engineering, swjeon@anu.ac.kr, 종신회원

^o Corresponding Author : Dankook University Dept. of Mobile Systems Engineering, wyshin@dankook.ac.kr, 정희원

* Korea Railroad Research Institute, ICT Convergence Research Team, swchoi@krii.re.kr, 정희원

** Korea Railroad Research Institute, Signaling and Communications Research Team, jykim00@krii.re.kr, 정희원

논문번호 : KICS2016-09-281, Received September 30, 2016; Revised November 22, 2016; Accepted November 23, 2016

신과의 연계 및 공존 방안에 대한 활발한 연구가 수행 중이다. 셀룰러, D2D 공존 환경에 대한 이러한 연구는 크게 다음과 같이 나눌 수 있다.

- Out-Band 셀룰러, D2D 공존 모델
- IN-Band Underlay 셀룰러, D2D 공존 모델
- IN-Band Overlay 셀룰러, D2D 공존 모델

1.1 Out-Band 셀룰러, D2D 공존 모델

먼저 Out-Band 셀룰러, D2D 공존 모델은 셀룰러 통신과 D2D 통신간에 간섭이 없는 직교 채널을 통하여 전송하는 기법에 해당한다^[11]. 즉, 주파수 대역이나 타임 슬롯을 달리하여 셀룰러 통신과 D2D 통신간에 간섭이 원천적으로 발생하지 않는다는 장점이 있다. 현재 LTE-A, Wifi-Direct 표준 등에서 활발히 논의되고 있는 모델로써, 기존의 셀룰러 망에서 셀룰러 사용자간의 직접적인 D2D 통신을 통한 전송을 향상 및 Load Balancing 향상을 주요 목표로 연구가 진행 중이다.

하지만 셀룰러 통신채널과 D2D 통신채널의 직교화는 많은 경우 최적의 전송율을 달성할 수 없는 기법이다. 또한 기존의 셀룰러 망에서 Wifi-Direct 등을 활용하여 D2D 통신을 수행할 경우, 셀룰러 통신과 D2D 통신간의 간섭 문제는 해결이 가능하나 기존 무선랜 기기에서 발생하는 간섭에 대해서는 무방비로 노출되게 된다. 이러한 단점으로 인하여 최근에는 In-Band 모델, 즉 셀룰러 통신과 D2D 통신이 동일한 무선채널을 공유하는 모델에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

1.2 In-Band Underlay 셀룰러, D2D 공존 모델

Out-Band 셀룰러, D2D 공존 모델의 한계를 극복하기 위하여 최근 In-Band 모델, 즉 셀룰러 통신과 D2D 통신이 동일한 무선채널을 공유하는 모델에 대한 연구가 진행 중이다. 대표적인 모델로써 In-Band Underlay 셀룰러, D2D 공존 모델을 들 수 있다. 연구의 주 목표는 D2D 사용자들이 셀룰러 무선자원을 활용하여 통신을 수행할 때 셀룰러 사용자들에게 미치는 간섭의 영향을 최소화하면서 효율적인 D2D 통신을 수행하는데 있다. 이러한 목표를 달성하기 위하여 근거리 D2D 통신을 통하여 셀룰러 망에게 미치는 간섭을 최소화하면서 안정적인 D2D 통신을 수행하고자 하는 연구가 진행되었다^[12-16].

In-Band Underlay 셀룰러, D2D 공존 모델의 경우 셀룰러 통신에 미치는 영향을 어느정도 제어할 수 있고 또한 셀룰러 망이 D2D 통신을 인지할 필요가 없다는 장점이 있다. 하지만 여전히 셀룰러 통신과 D2D

통신간의 간섭문제로 인하여 두 통신 시스템을 안정적으로 구동시키는 데는 한계가 있다.

1.3 In-Band Overlay 셀룰러, D2D 공존 모델

In-Band Underlay 셀룰러, D2D 공존 모델의 한계를 극복하고자 최근 In-Band Overlay 셀룰러, D2D 공존 모델에 대한 연구가 진행 중이다. 즉, 셀룰러 통신과 D2D 통신이 동일한 무선자원을 효율적으로 분배하여 사용하는 모델에 해당한다. 최근 다중채널 환경에서 셀룰러, D2D 사용자간의 효율적인 자원배분을 통하여 전체 시스템 성능을 향상시킬 수 있다는 연구결과가 발표되었다^[17,18]. 또한 단순한 자원 배분을 넘어서 D2D 통신 수행시 기존 셀룰러 망을 활용한 협력기법에 대해서도 연구되고 있다^[19,24,25]. 하지만 이러한 협력전송 기법에 대한 연구는 현재 기술개발의 시작 단계이며 망의 궁극적 한계 용량이 달성 가능한 원천적인 협력 기법에 대한 연구가 필요하다.

II. 셀룰러 협력 D2D 통신 모델

본 논문은 앞서 언급한 In-Band Overlay 셀룰러, D2D 공존 모델을 고려하고자 한다. 이 경우 특정 무선자원 (주파수 혹은 타임 슬롯)이 D2D 통신용으로 할당된 경우를 고려할 수 있으며, 기존의 셀룰러 상향링크, 하향링크를 D2D 통신을 돕는 추가적인 채널로 활용할 수 있다. 이러한 관찰을 바탕으로 본 논문은 단일 기지국이 2개의 D2D 쌍의 통신을 돕는 셀룰러 협력 D2D 통신 모델을 고려하였다. 또한 셀룰러 협력 D2D 통신에 활용할 수 있는 원천 전송기법을 도출하였다.

편의상 다음 표기법을 사용한다. $i = 3 - i$ 를 나타내며, $i, j \in \{1, 2\}$ 에 대해 $F_i = f_i^2$, $G_i = g_i^2$, $H_i = h_i^2$ 로 나타내며, $C(x) = \frac{1}{2} \log_2(1+x)$, $C^+(x) = \max\left(\frac{1}{2} \log_2\left(\frac{1}{2}+x\right), 0\right)$ 를 나타낸다.

2.1 셀룰러 협력 D2D 통신 모델

그림 1과 같은 셀룰러 협력 D2D 통신 모델을 고려하였다. 두 개의 D2D 전송쌍이 기지국의 도움을 받아 통신을 수행하는 모델이다.

두 단계에 의해 통신이 수행됨을 가정하였다. 먼저 단계 1에서 두 개의 송신단이 기지국과 두 개의 수신단으로 신호를 전송한다. 따라서 단계 1에서의 기지국 수신신호 $y^{[1]}$ 와 수신단 $i \in \{1, 2\}$ 의 수신신호 $y_i^{[1]}$ 는

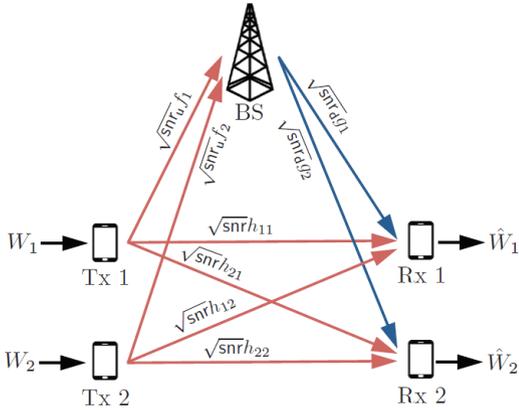


그림 1. 셀룰러 협력 D2D 통신모델
Fig. 1. Cellular-aided D2D system

각각 다음과 같다.

$$y^{[1]} = \sum_{j=1}^2 \sqrt{snr_u} f_j x_j^{[1]} + z^{[1]} \quad (1)$$

$$y_i^{[1]} = \sum_{j=1}^2 \sqrt{snr} h_{ij} x_j^{[1]} + z_i^{[1]} \quad (2)$$

여기서 $x_j^{[1]}$ 는 송신단 $j \in \{1,2\}$ 의 전송신호이며 f_j 는 송신단 j 로부터 기지국까지의 상향링크 채널, h_{ij} 는 송신단 j 로부터 수신단 i 까지의 D2D 채널이다. 또한 snr_u 는 상향링크 채널의 평균 수신전력값, snr 은 D2D 채널의 평균 수신전력값이다.

다음으로 단계 2에서 기지국이 단계1에서 받은 수신신호를 바탕으로 두 개의 수신단으로 신호를 전송한다. 따라서 단계 2에서의 수신단 $i \in \{1,2\}$ 의 수신신호 $y_i^{[2]}$ 는 각각 다음과 같다.

$$y_i^{[2]} = \sqrt{snr_d} g_i x^{[2]} + z_i^{[2]} \quad (3)$$

여기서 $x^{[2]}$ 는 기지국의 전송신호이며 g_i 는 기지국으로부터 수신단 i 까지의 하향링크 채널이다. 또한 snr_d 는 하향링크 채널의 평균 수신전력값이다.

수식 (1), (2), (3)에서 부가잡음 $z^{[1]}, z_i^{[1]}, z_i^{[2]}$ 는 정규분포 $N(0,1)$ 을 따른다고 가정하였으며, 각 전송신호들은 다음과 같은 평균 전력 조건을 만족해야 한다.

$$E[(x_j^{[1]})^2] \leq 1, E[(x^{[2]})^2] \leq 1 \quad (4)$$

본 논문에서는 각각의 채널계수는 독립적이며 평균이 0이고 분산이 1인 연속확률분포를 따른다고 가정하였다. 또한 $\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 와 $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 는 기지국과 송수신단에서 획득 가능하며, $\{h_{ij}\}_{i,j \in \{1,2\}}$ 는 오직 수신단에서만 획득 가능하다고 가정하였다. 즉, 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널은 기존의 셀룰러 망의 채널 피드백 과정을 통해 많은 시스템에서 획득 가능하다. 하지만 D2D 채널의 경우 송신단에서 이를 확보하는게 쉽지 않다. 따라서 본 과제는 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널 정보만을 활용하여 D2D 채널의 불확실성에 의해 발생하는 아웃티지를 향상시키고자 한다. 이를 위해 다음 절에서 아웃티지 기반의 Throughput 성능 지표를 정의하였다.

2.2 성능 지표

본 논문은 각 송신단이 동일한 전송률 R 로 메시지를 전송함을 가정하였다. 이 때 각 송신단은 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널 정보를 기반으로 전송률 R 을 $\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$, $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 에 적응적으로 설정할 수 있다. 하지만 D2D 채널에 대한 정보를 알지 못하기 때문에 아웃티지가 필연적으로 발생한다. 따라서 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널 $\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$, $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 가 주어졌을 때의 아웃티지 확률을

$$\Pr\left(\bigcup_{i \in \{1,2\}} (\widehat{W}_i \neq W_i) \mid \{f_i\}_{i \in \{1,2\}}, \{g_i\}_{i \in \{1,2\}}\right) := P_{out}(\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}, \{g_i\}_{i \in \{1,2\}}) \quad (5)$$

로 표현 가능하다. 여기서 W_i 는 송신단 i 의 메시지, \widehat{W}_i 는 수신단 i 에서 추정된 메시지이며, 아웃티지 확률은 $\{h_{ij}\}_{i,j \in \{1,2\}}$ 의 확률공간에 의해 계산된다. 그러므로 최종 Throughput은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E[T] = E\left[R \left(\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}, \{g_i\}_{i \in \{1,2\}} \right) \cdot \left(1 - P_{out}(\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}, \{g_i\}_{i \in \{1,2\}}) \right) \right] \quad (6)$$

여기서 평균은 $\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$, $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 의 확률공간에 의해 계산된다.

III. 제안 협력 기법

본 장에서는 2장에서 정의한 셀룰러 협력 D2D 모델에서 Throughput을 향상시킬 수 있는 협력 기법을

제안하였다. 제안 기법은 그림 2와 같이 물리계층 네트워크 코딩에 기반한 협력 전송을 제안하였다^{20,21}. 먼저 단계 1에서 각 송신단은 동일한 격자코드에 기반하여 메시지를 전송하고 기지국은 메시지의 XOR 값 $W_1 \oplus W_2$ 를 디코딩한다. 단계 2에서 기지국은 디코딩된 $W_1 \oplus W_2$ 를 각 수신단에 브로드캐스팅한다. 따라서 단계 1, 2를 통하여 각 수신단은 셀룰러 상향링크, 하향링크를 통해 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 획득 가능하다. 최종적으로 단계 1에서 각 수신단이 D2D 링크로부터 W_1 혹은 W_2 둘 중 최소 하나만 디코딩할 수 있으면 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 통해 자신의 메시지를 획득할 수 있다. 따라서 기존의 D2D 통신, 즉 반드시 자신의 메시지를 디코딩해야 하는 상황에 비해 아웃지 확률을 감소시킬 수 있다.

3.1 채널 적응적 전송을 설정

2.2절에서 언급한 바와 같이 전송률 R 은 $\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 와 $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 R 을 셀룰러 상향링크, 하향링크를 통해 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 획득이 가능한 전송율로 적응적으로 설정할 수 있다. 단계 1에서 기지국이 $W_1 \oplus W_2$ 을 디코딩하기 위해서는 전송율 R 이 다음 조건을 만족해야 한다.

$$R \leq C^+(\min(F_1, F_2)snr_u) \tag{7}$$

또한 단계 2에서 각 수신단이 기지국에서 브로드캐스팅한 $W_1 \oplus W_2$ 를 디코딩하려면

Decode and broadcast $W_1 \oplus W_2$

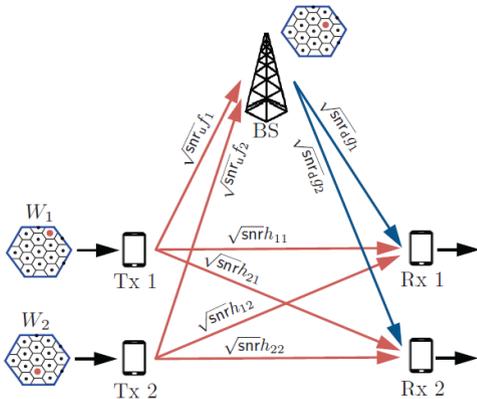


그림 2. 물리계층 네트워크 코딩을 활용한 제안 협력 기법
Fig. 2. Proposed cooperative transmission based on physical layer network coding

$$R \leq C(\min(G_1, G_2)snr_d) \tag{8}$$

을 만족하여야 한다. 따라서 다음 조건을 만족할 때 최종적으로 각 수신단이 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 획득할 수 있다.

$$R \leq \min \left(C^+(\min(F_1, F_2)snr_u), C(\min(G_1, G_2)snr_d) \right) := R_{\oplus} \tag{9}$$

그러므로 전송율 R 을 $R = R_{\oplus}$ 로 설정하게 되면 보조정보 획득이 가능한 최대 전송율을 달성할 수 있다. 하지만 D2D 링크에 비해 셀룰러 링크가 상대적으로 열악한 경우 셀룰러 링크를 통한 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 의 획득을 포기하고 D2D 링크만으로 자신의 메시지를 디코딩하는 것이 좋을 수 있다. 반대로 셀룰러 링크에 비해 D2D 링크가 상대적으로 열악한 경우 셀룰러 링크를 통해 높은 전송율로 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 획득하더라도 D2D 링크로 어떠한 메시지도 디코딩이 불가할 수 있다. 따라서 제안기법은 전송율의 최소값 R_{\min} 과 최대값 R_{\max} 를 정의한 후 전송률 R 을 다음과 같이 적응적으로 설정하였다.

$$R = \begin{cases} R_{\min} & \text{if } R_{\oplus} \leq R_{\min} \\ R_{\oplus} & \text{if } R_{\min} < R_{\oplus} \leq R_{\max} \\ R_{\max} & \text{if } R_{\max} < R_{\oplus} \end{cases} \tag{10}$$

Throughput을 최대화하기 위한 전송율의 최소값 R_{\min} 과 최대값 R_{\max} 를 이론적으로 분석하기는 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 4장에서 모의실험을 통하여 Throughput이 최대화가 되는 R_{\min} 과 R_{\max} 값을 설정하였다.

3.2 Throughput 분석

본 절에서는 앞서 제안한 물리계층 네트워크 코딩 기반 제안 협력 기법의 Throughput 성능을 분석하였다. 제안 기법의 경우 전송율 R 을 수식 (10)에 의해 적응적으로 구성한다. 따라서 3개의 영역으로 나누어 Throughput을 분석할 수 있다.

영역 1 ($R_{\oplus} \leq R_{\min}$): 영역 1에서는 $R = R_{\min}$ 으로 설정되며 각 수신단은 셀룰러 링크를 통하여 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 획득할 수 없다. 따라서 각 수신단이 자신의 메시지를 D2D 링크로부터 디코딩하지 못하는

경우 아웃티지가 발생한다. 즉 영역 1에서의 아웃티지 확률은

$$P_{out,1} = 1 - \Pr\left(\bigcap_{i \in \{1,2\}} \left(R_{\min} \leq \max(R_{tin,i}, R_{ic,i})\right)\right) \quad (11)$$

로 주어지며 $R_{tin,i} = C\left(\frac{H_i snr}{1 + H_i snr}\right)$,

$R_{ic,i} = \min\left(C(H_i snr), C\left(\frac{H_i snr}{1 + H_i snr}\right)\right)$ 를 나타낸다.

즉, $R_{tin,i}$ 는 수신단 i 가 메시지 W_i 를 디코딩할 때의 전송을 제약 조건이고 $R_{ic,i}$ 는 수신단 i 가 메시지 W_i 를 먼저 디코딩하여 간섭영향을 제거한 후 메시지 W_i 를 디코딩할 때의 전송을 제약 조건이다. 수식 (11)을 바탕으로 영역 1에서 달성 가능한 Throughput은

$$R_{\min}(1 - P_{out,1}) \quad (12)$$

과 같다.

영역 2 ($R_{\min} < R_{\oplus} \leq R_{\max}$): 영역 2에서는 $R = R_{\oplus}$ 으로 설정되며 각 수신단은 셀룰러 링크를 통하여 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 획득할 수 있다. 따라서 각 수신단이 D2D 링크로부터 두 메시지를 모두 디코딩하지 못하는 경우 아웃티지가 발생한다. 즉 영역 2에서의 아웃티지 확률은

$$P_{out,2}(R_{\oplus}) = 1 - \Pr\left(\bigcap_{i \in \{1,2\}} (R_{\oplus} \leq \max(R_{tin,i}, R_{id,i}))\right) \quad (13)$$

로 주어지며 $R_{id,i} = C\left(\frac{H_i snr}{1 + H_i snr}\right)$ 를 나타낸다. 즉, $R_{id,i}$ 는 수신단 i 가 메시지 W_i 를 디코딩할 때의 전송을 제약 조건이다. 수식 (13)에서 알 수 있듯이 아웃티지 확률이 R_{\oplus} 의 함수로 주어진다. 따라서 R_{\oplus} 의 확률밀도함수를 $p_{\oplus}(x)$ 로 나타내면 영역 2에서 달성 가능한 Throughput은

$$\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} x(1 - P_{out,2}(x)) \frac{p_{\oplus}(x)}{\Pr(R_{\min} < R_{\oplus} \leq R_{\max})} dx \quad (14)$$

과 같다.

영역 3 ($R_{\max} < R_{\oplus}$): 영역 3에서는 $R = R_{\max}$ 으로 설정되며 각 수신단은 셀룰러 링크를 통하여 보조정보 $W_1 \oplus W_2$ 를 획득할 수 있다. 따라서 각 수신단이 D2D 링크로부터 두 메시지를 모두 디코딩하지 못하는 경우 아웃티지가 발생한다. 즉 영역 3에서의 아웃티지 확률은

$$P_{out,3} = 1 - \Pr\left(\bigcap_{i \in \{1,2\}} (R_{\max} \leq \max(R_{tin,i}, R_{id,i}))\right) \quad (15)$$

로 주어진다. 따라서 영역 3에서 달성 가능한 Throughput은

$$R_{\max}(1 - P_{out,3}) \quad (16)$$

과 같다.

각 영역별 Throughput인 수식 (12), (14), (16)을 바탕으로 최종 Throughput은 다음과 같이 주어진다.

$$E[T] = R_{\min}(1 - P_{out,1}) \int_0^{R_{\min}} p_{\oplus}(x) dx + \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} x(1 - P_{out,2}(x)) p_{\oplus}(x) dx + R_{\max}(1 - P_{out,3}) \int_{R_{\max}}^{\infty} p_{\oplus}(x) dx \quad (17)$$

하지만 대부분의 채널확률분포에서 R_{\oplus} 의 확률밀도함수 $p_{\oplus}(x)$ 를 구하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 4장에서 모의실험을 통해 제안 기법의 Throughput을 구하였다.

IV. 모의실험

본 장에서는 제안된 물리계층 네트워크 코딩 기반 협력 기법에 대한 모의실험을 수행하였다. 모의실험을 위해 셀룰러 채널 ($\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 와 $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$)과 D2D 채널 ($\{h_{ij}\}_{i,j \in \{1,2\}}$)은 평균이 0이며 분산이 1인 독립 정규분포를 따름을 가정하였다.

비교를 위해 셀룰러 상향링크와 하향링크만을 활용하여 D2D 메시지를 전송하는 경우를 고려하였다 (성

능 비교 그래프에서 'Cellular only'로 표기). 즉, 셀룰러 상향링크를 통해 기지국이 메시지 W_1, W_2 를 모두 디코딩한 후 이를 각 수신단에게 전송한다. 이 때 각 송신단과 기지국은 $\{f_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 와 $\{g_i\}_{i \in \{1,2\}}$ 정보를 알고 있기 때문에 아웃티지가 발생하지 않도록 전송율 R 을 정확히 설정할 수 있다.

셀룰러 링크를 활용하지 않는 기존의 D2D 기법에 대한 모의실험 또한 수행하였다 (성능 비교 그래프에서 'D2D only'로 표기). 즉, D2D 채널정보를 송신단에서 알지 못하기 때문에 고정된 전송율 R 로 각 송신단이 전송하며 각 수신단은 D2D 링크를 통해 자신의 메시지를 디코딩하지 못하면 아웃티지가 발생한다.

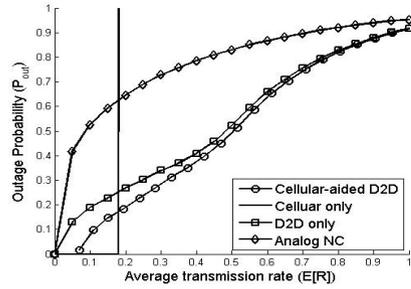
마지막으로 기지국이 단계 1에서 수신한 신호를 디코딩 과정을 거치지 않고 단계 2에서 단순 증폭해서 수신단에게 전달하는 Amplify-Forward에 기반한 전송 기법과의 비교를 수행하였다 (성능 비교 그래프에서 'Analog NC'로 표기).

본 논문은 단계 1과 단계 2의 전송과정에 동일한 시간을 할당하였다. 따라서 셀룰러 링크를 활용하지 않는 D2D only 통신의 경우 시간을 두배로 사용할 수 있다. 그러므로 본 논문에서 제시한 성능은 기지국에서 수신단으로의 하향링크 채널이 충분히 좋은 환경에서 단계 1에 할당된 전송시간이 단계 2보다 큰 경우라고 생각할 수 있다. 엄밀한 성능 비교를 위해서는 셀룰러, D2D 간의 주파수 혹은 시간 자원 할당, 모드 선택, 전력 제어 등을 모두 고려해야 하지만, 본 논문의 초점과 부합되지 않는다고 판단된다. 셀룰러, D2D 간의 주파수 혹은 시간 자원 할당, 모드 선택, 전력 제어 등의 이슈는 추후 고려되어야 할 것이다^{13,14,26,27}.

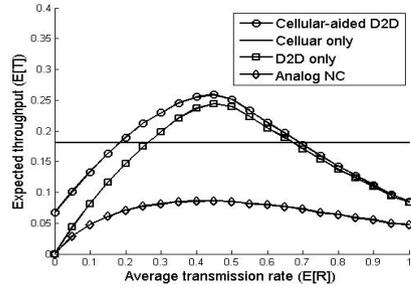
4.1 대칭 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널 환경

먼저 셀룰러 상향링크와 하향링크의 평균 수신전력 값이 동일한 경우, 즉 $snr_u = snr_d$ 인 환경을 고려하였다. 그림 3에서 5는 D2D 채널의 평균 수신전력 값이 10 dB ($snr=10$ dB)인 경우 $snr_u = snr_d$ 을 각각 6 dB, 8 dB, 10 dB로 증가할 때의 아웃티지 확률과 Throughput를 도시하였다.

그림 3 (a), 4 (a), 5 (a)에서 확인 가능하듯이, 평균 전송율 $E[R]$ 이 증가할수록 아웃티지 확률이 증가함을 확인할 수 있다. Cellular only 기법의 경우 상향링크와 하향링크의 전송용량에 맞게 전송율을 정할 수 있으므로, 특정 전송율 이하에서는 아웃티지 확률이 0이며 특정 전송율 이상에서는 아웃티지 확률이 1이 된다. 따라서 Cellular only 기법의 아웃티지 확률이 1



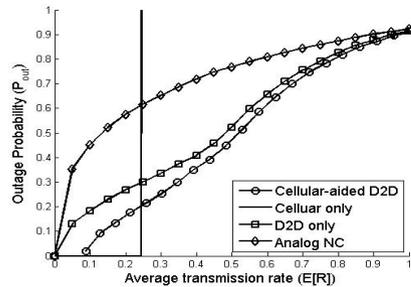
(a)



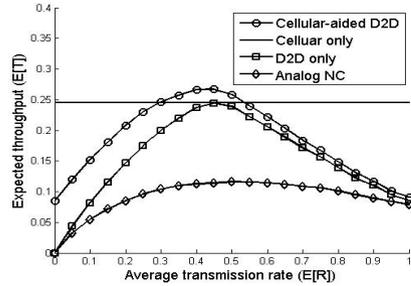
(b)

그림 3. Outage probability (a) and Throughput (b) when $snr=10$ dB, $snr_u = snr_d = 6$ dB

Fig. 3. $snr=10$ dB, $snr_u = snr_d = 6$ dB에서의 아웃티지 확률 (a)과 Throughput (b)



(a)



(b)

그림 4. Outage probability (a) and Throughput (b) when $snr=10$ dB, $snr_u = snr_d = 8$ dB

Fig. 4. $snr=10$ dB, $snr_u = snr_d = 8$ dB에서의 아웃티지 확률 (a)과 Throughput (b)

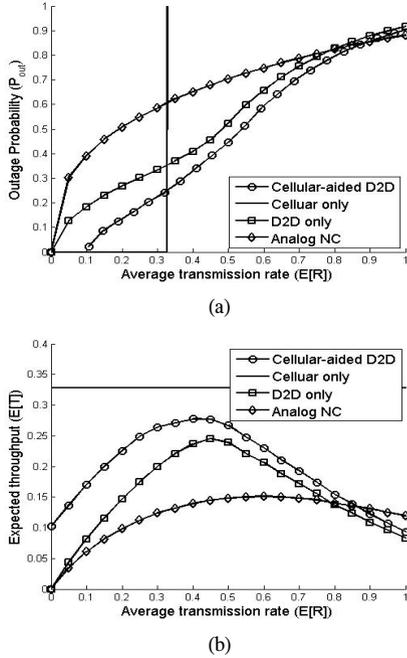


그림 5. Outage probability (a) and Throughput (b) when $snr=10$ dB, $snr_u = snr_d = 10$ dB
 Fig. 5. $snr=10$ dB, $snr_u = snr_d = 10$ dB에서의 아웃티지 확률 (a)과 Throughput (b)

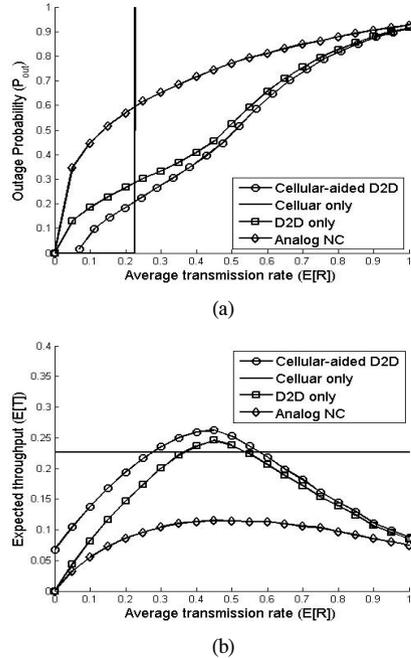


그림 6. Outage probability (a) and Throughput (b) when $snr=10$ dB, $snr_u = 5$ dB, $snr_d = 10$ dB
 Fig. 6. $snr=10$ dB, $snr_u = 5$ dB, $snr_d = 10$ dB에서의 아웃티지 확률 (a)과 Throughput (b)

인 영역에서 다른 기법과의 비교가 의미가 있다. 이 영역에서 살펴보면 제안기법이 기존의 D2D only 기법이나 Analog NC 기법보다 낮은 아웃티지 확률을 달성함을 확인할 수 있다.

그림 3 (b), 4 (b), 5 (b)에서 평균 전송율 $E[R]$ 에 따른 Throughput을 살펴보면 특정 $E[R]$ 에서 각 기법의 Throughput이 최대화됨을 알 수 있다. Cellular only 기법의 경우 Throughput이 특정값으로 정체됨으로 $E[R]$ 에 따른 전송율을 도시킬 때 편의상 직선으로 표기하였다. 그림 3 (b), 4 (b), 5 (b)에서 알 수 있듯이, 제안 기법의 최대 Throughput이 Cellular only 기법과 Analog NC 기법의 최대 Throughput보다 큼을 확인할 수 있다. 하지만 $snr_u = snr_d$ 값이 상대적으로 증가할수록 Cellular only 기법의 Throughput이 제안 기법을 포함한 다른 기법들보다 향상됨을 알 수 있다.

4.2 비대칭 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널 환경

다음으로 셀룰러 상향링크와 하향링크의 평균 수신 전력값이 다른 경우, 즉 $snr_u \neq snr_d$ 인 환경을 고려하였다. 그림 6은 D2D 채널의 평균 수신전력값이 10 dB ($snr=10$ dB)인 경우 $snr_u = 5$ dB, $snr_d = 10$

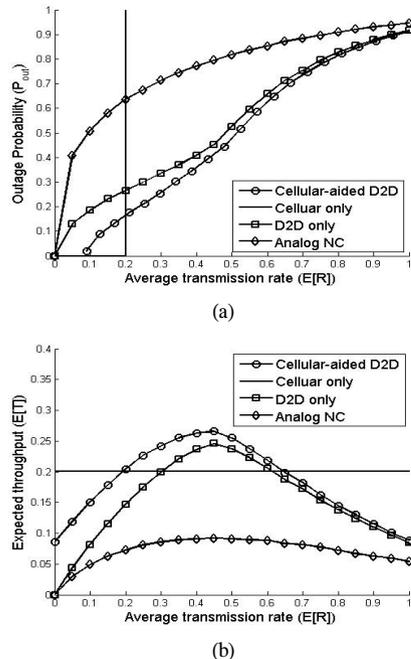


그림 7. Outage probability (a) and Throughput (b) when $snr=10$ dB, $snr_u = 10$ dB, $snr_d = 5$ dB
 Fig. 7. $snr=10$ dB, $snr_u = 10$ dB, $snr_d = 5$ dB에서의 아웃티지 확률 (a)과 Throughput (b)

dB일 때의 아웃티지 확률과 Throughput를 도시하였다. 그림 7은 D2D 채널의 평균 수신전력값이 10 dB ($snr_u=10$ dB)인 경우 $snr_u=10$ dB, $snr_d=5$ dB일 때의 아웃티지 확률과 Throughput를 도시하였다. 그림 6과 7에서 확인할 수 있듯이, 셀룰러 상향링크 혹은 하향링크 중 일부의 무선채널 환경이 열악하더라도 제안 기법의 성능 열화폭이 기존 기법들 대비 적음을 알 수 있다. 이는 제안 기법의 경우 셀룰러 링크와 D2D 링크를 동시에 활용하기 때문에 셀룰러 일부 링크가 열악하더라도 D2D 링크를 통해 메시지를 전달할 수 있기 때문이다. 따라서 제안 기법을 통하여 다양한 통신 채널 확보가 가능하며 안정적인 통신 수행이 가능하다.

4.3 신호대 잡음비에 따른 성능 비교

앞서 모의실험 결과에서 확인할 수 있듯이, 셀룰러 링크와 D2D 링크가 제공하는 Throughput이 상대적으로 비슷한 영역에서 제안 기법이 기존의 Cellular only 기법과 D2D only 기법에 비해 Throughput 이득이 최대화된다는 것을 알 수 있다. 그림 4 (b)에서 알 수 있듯이, $snr=10$ dB를 기준으로 $snr_u = snr_d=8$ dB인 영역에서 Cellular only 기법과 D2D only 기법이 제공하는 Throughput이 거의 동일하다. 좀 더 구체적으로 신호대 잡음비 변화에 따른 제안 기법의 Throughput 이득을 규명하기 위해 $snr=10$ dB로 고정된 상태에서 $snr_u = snr_d$ 의 변화에 따른 제안 기법, Cellular only 기법, D2D only 기법의 성능을 그림 8에 도시하였다. 모의실험시 Throughput이 최대화 되도록 제안 기법의 R_{min} 과 R_{max} 를 설정하였으며 마찬가지로 Throughput이 최대화 되도록 D2D only 기법의 R 을 설정하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이, Cellular only 기법과

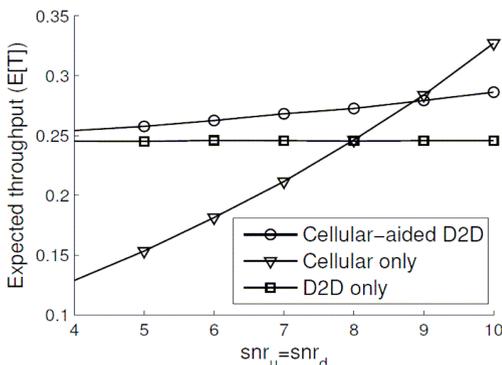


그림 8. Maximum throughput when $snr = 10$ dB
 Fig. 8. $snr = 10$ dB에서의 최대 Throughput

D2D only 기법의 Throughput이 동일한 영역에서 제안 기법의 Throughput 이득이 최대화되며 약 10%의 성능 향상을 달성할 수 있다. 반면 D2D 링크의 채널 이득 snr 이 고정된 상태에서 셀룰러 상향링크, 하향링크 채널이득 snr_u , snr_d 가 증가하게 되면 Cellular only 기법의 Throughput이 제안 기법보다 커지게 된다. 제안 기법의 경우 셀룰러 상향링크, 하향링크를 메시지의 XOR값 $W_1 \oplus W_2$ 를 전송하는데 활용한다. 따라서 D2D 링크를 통해 각 수신단이 W_1 혹은 W_2 를 디코딩하지 못하면 자신의 메시지를 수신할 수 없다. 그러므로 제안기법의 경우, snr , snr_u , snr_d 가 적절한 균형을 이룰 때 성능이 최대화 된다.

V. 결론

본 논문은 기지국 협력이 가능한 D2D 통신 모델에서의 효율적인 전송 프로토콜에 대해 연구하였다. 두 개의 직접통신 송수신단 쌍이 기지국의 상향링크, 하향링크 통신채널을 활용하여 독립적인 메시지를 전송하는 모델에 대해 고려하였다. 제안 물리계층 네트워크 코딩 기반 협력 기법은 D2D 링크와 셀룰러 링크의 협력을 유도하여 안정적 통신 채널 확보가 가능하다. 특히 기존 셀룰러 혹은 D2D 링크만 사용하는 기법에 비해 향상된 Throughput 을 달성 가능하며 동시에 아웃티지 확률을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] V. R. Cadambe and S. A. Jafar, "Interference alignment and degrees of freedom of the K-user interference channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3425-3441, Aug. 2008.
- [2] D. Astely, E. Dahlman, G. Fodor, S. Parkvall, and J. Sachs, "LTE release 12 and beyond," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 7, pp. 154-160, Jul. 2013.
- [3] K. Kim, S.-W. Jeon, and D. K. Kim, "The feasibility of interference alignment for full-duplex MIMO cellular networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 9, pp. 1500-1503, Sept. 2015.
- [4] S.-W. Jeon and C. Suh, "Degrees of freedom

- of uplink-downlink multiantenna cellular networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 62, no. 8, pp. 4589-4603, Aug. 2016.
- [5] S. Hong, J. Brand, J. Choi, M. Jain, J. Mehlman, S. Katti, and P. Levis, “Applications of self-interference cancellation in 5G and beyond,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 114-121, Feb. 2014.
- [6] K. Kim, S.-W. Jeon, J. Yang, and D. K. Kim, “Feasibility of interference alignment for reverse duplex in MIMO cellular networks with one-side base cooperation,” *J. KICS*, vol. 40, no. 2, pp. 273-284, Feb. 2015.
- [7] S.-W. Jeon and B. C. Jung, “Interference neutralization for small-cell wireless networks,” *J. KICS*, vol. 38, no. 12, pp. 1117-1124, Dec. 2013.
- [8] S.-W. Jeon and S.-Y. Chung, “Capacity of a class of linear binary field multisource relay networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 59, no. 10, pp. 6405-6420, Oct. 2013.
- [9] S.-W. Jeon, C.-Y. Wang, and M. Gastpar, “Approximate ergodic capacity of a class of fading two-user two-hop networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 2, pp. 866-880, Feb. 2014.
- [10] T. Gou, S. A. Jafar, C. Wang, S.-W. Jeon, and S.-Y. Chung, “Aligned interference neutralization and the degrees of freedom of the $2 \times 2 \times 2$ interference channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 58, no. 7, pp. 4381-4395, Jul. 2012.
- [11] 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 Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 170-177, Mar. 2012.
- [12] A. Asadi, Q. Wang, and V. Mancuso, “A survey on device-to-device communication in cellular networks,” *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 16, no. 4, pp. 1801-1819, 2014.
- [13] K. Doppler, M. Rinne, C. Wijting, C. B. 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.
- [14] C.-H. Yu, K. Doppler, C. B. 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.
- [15] 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.
- [16] C. Xu, L. Song, Z. Han, Q. Zhao, X. Wang, and B. Jiao, “Interference-aware resource allocation for device-to-device communications as an underlay using sequential second price auction,” in *Proc. IEEE ICC*, Jun. 2012.
- [17] L. Lei, Z. Zhong, C. Lin, and X. Shen, “Operator controlled device-to-device communications in LTE-advanced networks,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 3, pp. 96-104, Jun. 2012.
- [18] B. Zhou, H. Hu, S.-Q. Huang, and H.-H. Chen, “Intracluster device-to-device relay algorithm with optimal resource utilization,” *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 62, no. 5, pp. 2315-2326, Jun. 2013.
- [19] Y. Cao, X. Chen, T. Jiang, and J. Zhang, “SoCast: Social ties based cooperative video multicast,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, May 2014.
- [20] B. Nazer and M. Gastpar, “Compute-and-forward: Harnessing interference through structured codes,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 57, no. 10, pp. 6463-6486, Oct. 2011.
- [21] B. Nazer and M. Gastpar, “Reliable physical layer network coding,” in *Proc. IEEE*, vol. 99, no. 3, pp. 438-460, Mar. 2011.
- [22] S.-W. Jeon, C.-Y. Wang, and M. Gastpar, “Computation over gaussian networks with orthogonal components,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 60, no. 12, pp. 7841-7861, Dec. 2014.
- [23] C.-Y. Wang, S.-W. Jeon, and M. Gastpar,

“Interactive computation of type-threshold functions in collocated gaussian networks,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 61, no. 9, pp. 4765-4775, Sept. 2015.

- [24] M. Yang, S.-W. Jeon, and D. K. Kim, “Linear degrees of freedom of MIMO broadcast channels with reconfigurable antennas in the absence of CSIT,” to appear in *IEEE Trans. Inf. Theory*,
- [25] S. H. Chae, S.-W. Jeon, and S. H. Lim, “Fundamental limits of spectrum sharing full-duplex multicell networks,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 11, pp. 3048-3061, Nov. 2016.
- [26] K. Doppler, C. Yu, C. Ribeiro, and P. Janis, “Mode selection for device-to-device communication underlying an LTE-advanced network,” in *IEEE WCNC*, pp. 1-6, Sydney, Australia, Apr. 2010.
- [27] 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-Spring*, pp. 1-5, Yokohama, Japan, May 2012.

전 상 운 (Sang-Woon Jeon)



2003년 8월 : 연세대학교 전기 전자공학부 공학사
 2006년 2월 : 연세대학교 전기 전자공학부 공학석사
 2011년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학박사
 2011년 8월~2013년 2월 : EPFL 박사후연구원

2013년 3월~현재 : 국립안동대학교 정보통신공학과 조교수

<관심분야> 정보이론, 무선통신

최 상 원 (Sang Won Choi)



1998년 3월~2002년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업

2002년 3월~2004년 3월 : KAIST 전자전산학과 전기 및 전자공학전공 석사

2004년 3월~2010년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사

2010년 2월~2014년 3월 : 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2014년 4월~현재 : 한국철도기술연구원 ICT 융합연구팀 선임연구원

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 통신 신호처리, 특수 목적 통신, 공공 안전망, 단말 알고리즘 개발, ICT융합기술 연구/개발

김 주 엽 (Juyeop Kim)



2000년 3월~2004년 2월 : KAIST 전기 및 전자공학과 졸업

2004년 3월~2010년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사

2010년 3월~2011년 2월 : KAIST Institute IT융합연구소 박사후연구원

2011년 4월~2013년 12월 : 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2014년 1월~현재 : 한국철도기술연구원 ICT융합연구팀 선임연구원

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 사물인터넷, 철도전용 통합무선망, SW 공학, ICT융합기술 연구/개발

신 원 용 (Won-Yong Shin)



2002년 2월 : 연세대학교 기계
전자공학 학사

2004년 2월 : KAIST 전자전산
학과 석사

2008년 8월 : KAIST 전자전산
학부 박사

2009년 5월~2011년 10월 :

Harvard University Postdoctoral Fellow

2011년 10월~2012년 2월: Harvard University
Research Associate

2012년 3월~현재 : 단국대학교 대학원 컴퓨터학과
조교수

<관심분야> 정보이론, 통신이론, 신호처리, 모바일
컴퓨팅, 빅데이터분석, 소셜네트워크분석