

LTE D2D 디스커버리에서 무작위 자원 선택 방법에 대한 성능 분석

박경원*, 김준영*, 정병국*, 이광복°, 최성현**

Performance Analysis of Random Resource Selection in LTE D2D Discovery

Kyungwon Park*, Joonyoung Kim*, Byeong Kook Jeong*, Kwang Bok Lee°, Sunghyun Choi**

요약

LTE D2D는 근접한 단말끼리의 직접적인 정보 교환을 통해 셀룰러 시스템의 데이터 트래픽 부하를 해결하는 핵심 기술이다. 특히 D2D 디스커버리는 LTE D2D를 위한 첫 단계로서 단말이 각자의 상태 정보를 주변 단말에게 브로드캐스트 하여 자신을 알리는 과정이다. 디스커버리 메시지 전송의 안정성을 평가하기 위해 시뮬레이션 기반의 성능 평가가 수행되었지만, 한정적인 상황에서 이루어진 경우가 많아 본 논문에서는 일반적인 환경에서 이를 평가할 수 있는 수학적 분석을 제안한다. 제안하는 분석은 확률 기하 이론을 바탕으로 수행되며, 자원 충돌과 인밴드 방사에 의한 간섭의 효과를 모두 고려한다. 우리는 디스커버리 메시지의 수신 성공 확률을 송수신 단말 간의 거리의 함수로 유도하고, 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 분석의 정확도를 확인한다.

Key Words : LTE D2D, D2D Discovery, Random Resource Selection, Discovery Reception Probability, Stochastic Geometry

ABSTRACT

Long Term Evolution device-to-device (LTE D2D) is a key technology to mitigate data traffic load in a cellular system. It facilitates direct data exchange between neighboring users, which is preceded by D2D discovery. Each device advertises its presence to neighboring devices by broadcasting its discovery message. In this paper, we develop a mathematical analysis to assess the probability that discovery messages are successfully transmitted at the D2D discovery stage. We make use of stochastic geometry for modeling spatial statistics of nodes in a two dimensional space. It reflects signal to noise plus interference ratio (SINR) degradation due to resource collision and in-band emission, which leads to the discovery message reception probability being modeled as a function of the distance between the transmitter and the receiver. Numerical results verify that the newly developed analysis accurately estimates discovery message reception probabilities of nodes at the D2D discovery stage.

* 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2014R1A2A2A01003637).

• First Author : Department of ECE, INMC, Seoul National University, parkkwml@snu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Department of ECE, INMC, Seoul National University, klee@snu.ac.kr, 종신회원

* Department of ECE, INMC, Seoul National University, {kimjymcl, jeongbkmcl}@snu.ac.kr, 학생회원

** Department of ECE, INMC, Seoul National University, schoi@snu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-07-139, Received July 7, 2016; Revised November 23, 2016; Accepted February 6, 2017

I. 서 론

D2D 기술은 기지국의 경우 없이 인접한 단말들끼리 서로 통신하는 기술을 의미하며, 이동통신 기술의 발달로 인해 모바일 단말 사용 용도가 기존의 통화 기능에서 데이터 사용 중심으로 바뀜에 따라 늘어난 데이터 트래픽을 효율적으로 처리하고자 제안된 기술이다.^[1-3] 특히 기지국의 도움을 받는 LTE 기반의 D2D 기술은 비면허 (unlicensed) 대역을 사용하지 않고 면허 (licensed) 대역을 사용하는 기술로 3GPP (Third Generation Partnership Project)에서 ProSe (Proximity-based Service)라고 정의되어 오랜 표준화 작업 끝에 2015년에 Release 12를 통해 마무리 되었다. 그리고 현재는 Release 13, 14를 통하여 공공 안전성을 위해 D2D 단말 간 릴레이 기술이 포함된 eProSe (enhancements to ProSe), eD2D (enhanced D2D) 등이 표준화 진행 중이다.^[4]

LTE D2D의 단말 간 통신에서 기지국 또는 망의 경우는 없지만 이들의 개입이 없는 것은 아니다. 3GPP의 LTE D2D는 자원 할당 측면에서 기지국의 관리를 받는다. LTE D2D는 크게 디스커버리와 통신이라는 두 가지 과정으로 구분되고 통신에 앞서 디스커버리가 필요하지만 디스커버리는 광고 등을 포함한 상용 목적에, 통신은 재난 통신을 위한 공용 목적으로 사용된다. 또한 이러한 목적의 차이 때문에 디스커버리는 커버리지 내에서만 사용되며 통신은 공공안정성을 위해 커버리지 안팎 모두에서 사용된다는 점이 차이점이라 할 수 있다.

디스커버리 메시지 전송을 위해 기지국은 RRC (Radio Resource Control) 시그널링을 통하여 디스커버리 풀을 설정한다. 메시지 크기와 전송 형식이 고정되어 있어 D2D 통신에서처럼 제어 목적의 SA (Scheduling Assignment)와 같은 채널을 필요로 하지 않는다.^[5] 한 번의 디스커버리 메시지 전송을 위해서 필요한 자원을 디스커버리 자원이라고 하며, 디스커버리 자원은 2 RB 쌍 (Resource Block pair)으로 구성된다. 디스커버리 풀은 디스커버리 주기 단위로 할당되며 디스커버리 송신 단말은 메시지를 이 주기에 따라 반복 전송한다. 디스커버리 풀 내의 자원이 각 단말에게 할당되는 방식으로는 Type 1과 Type 2B가 정의되어 있다. 본래 표준화 과정에서는 Type 2에서 2A와 2B 방식이 존재하였으나 이 중 2A는 채택되지 않았다. Type 1은 디스커버리 주기에서 각 단말이 무작위로 디스커버리 자원을 디스커버리 풀 내에서 선택하는 것이고, Type 2B는 기지국의 지시에 따라 자원

을 선택하는 것을 의미한다.

현재까지 이루어진 표준화 과정이나 논문에서는 각 방식에 대한 성능을 분석하는데 있어 주로 시스템 레벨에서의 시뮬레이션이 시행되었고, 이를 토대로 각 방식에 대한 평가가 이루어졌다.^[6] 그러나 이러한 시뮬레이션 기반의 평가는 시간적인 제약을 받을 수밖에 없고, 특정 시나리오에 한정적이라는 단점을 지니고 있기 때문에 일반적인 상황에서 빠르고 정확하게 성능을 평가할 틀이 필요하다. 이에 본 논문에서는 LTE D2D 디스커버리 자원 선택 방식 중 무작위 자원 선택 방법인 Type 1에 대한 성능 분석을 확률 기하 (Stochastic geometry)를 이용하여 이끌어 낸다.

본 논문에서는 임의의 디스커버리 송신 단말이 임의의 수신 단말에게 디스커버리를 성공적으로 보낼 확률을 수학적으로 분석한다. LTE D2D 시스템이 기본적으로 반이중 (half duplex) 통신이기 때문에 같은 시간 슬롯에서 자원을 선택하여 디스커버리를 보내는 단말들끼리의 통신이 불가능하고, 또한 무작위로 디스커버리 자원을 선택하기 때문에 디스커버리 풀 내에서 같은 자원을 선택한 단말이 여럿일 때 디스커버리 송신 단말들의 주변 단말들에게 큰 간섭을 일으키는 자원 충돌 문제가 존재할 수 있다.

본 논문에서는 앞서 언급한 문제 외에도 인밴드 방사 (In-band emission)에 의한 간섭 문제도 분석에 고려한다. 본래 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기반 시스템에서는 사용하는 RB에서 다른 RB로의 간섭이 이론적으로 존재하지 않는다. 하지만 실제 시스템에서는 이러한 RB 간 직교성 (orthogonality)이 깨지면서 사용 외 RB로의 파워의 유출이 존재하며 이를 인밴드 방사라고 한다.^[7]

셀룰러 시스템에서는 이를 파워 컨트롤을 통해 해결해 왔지만, LTE D2D 시스템에서는 송신 단말이 기본적으로 자신의 메시지를 주변 단말들에게 같은 파워로 브로드캐스팅하기 때문에 수신 단말들의 거리 차이에 의한 근거리/원거리 문제 (Near/Far problem)와 장애물에 의한 신호의 전달 방해 문제를 파워 컨트롤을 통해 해결하는 것이 불가능하다. 우리는 인밴드 방사를 고려한 분석과 고려하지 않은 분석을 비교하여 인밴드 방사가 LTE D2D 디스커버리에서 끼치는 영향을 살펴볼 것이다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 가정하는 시스템 모델과 함께 고려하는 디스커버리 메시지 전송 방식에 대해 소개한다. 그 뒤 자원 충돌 문제와 인밴드 방사 문제를 고려하여 무작위 자원 선택 방법에서 어떠한 아이디어를 통하여 분석을 이끌어 내는

지를 보여준다. 3장에서는 시물레이션을 통해 성능 분석을 하고 4장에서 결론을 맺는다.

II. 무작위 자원 선택 방법에 대한 D2D 디스커버리 성능 분석

2.1 시스템 모델

단말들의 분포가 무작위이고 이들에 대한 성능을 평균적으로 분석하기 위해 우리는 단말들이 그림 1과 같이 이차원 공간 (two dimensional space)에서 hPPP (homogeneous Poisson Point Process)를 따라 분포한다고 가정한다. 또한 단말의 밀도를 λ 로 표현하면, 단말들의 위치 분포는 $\Phi \sim \text{PPP}(\lambda)$ 와 같이 나타낼 수 있고, 각 단말의 위치는 $\mathbf{x}_i = (x_i, y_i)$, 임의의 두 단말 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 사이의 거리는 l_{ij} 로 표기될 것이다. 단말 사이의 거리에 따른 경로 손실은 $l_{ij}^{-\alpha}$ 로써 여기서 α 는 경로 감쇠 지수 (pathloss exponent)이다.

신호 전파 모델은 레일리 다중경로 페이딩 (Rayleigh multipath fading)을 가정하며 파워는 지수 파워 페이딩 (exponential power fading) h 를 따른다.

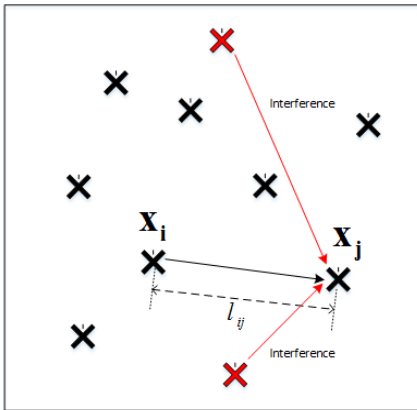


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

2.2 고려하는 디스커버리 메시지 전송 방식

이 절에서는 우리가 고려하는 디스커버리 메시지 전송 방식인 Type 1에 대하여 설명한다. 디스커버리 풀은 디스커버리 주기마다 반복되며 그림 2와 같이 주어진다. 이 때 N_F 와 N_T 는 각각 주파수와 시간 축에서의 디스커버리 자원 개수를 의미한다. 따라서 주어진 자원의 총 개수는 $N_F N_T$ 개가 된다.

Type 1 방식에서는 디스커버리 주기마다 모든 디

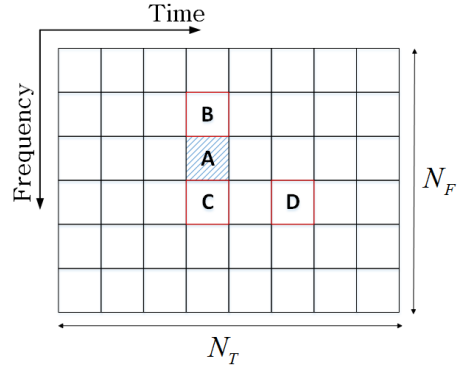


그림 2. 디스커버리 풀
Fig. 2. Discovery pool

스커버리 단말들이 디스커버리 풀 내에서 자원을 무작위로 선택한 뒤, 그 자원 내에서 디스커버리 메시지를 전송한다. 그리고 다른 디스커버리 단말의 메시지를 수신하기 위해 자신이 선택한 디스커버리 자원 이외의 자원을 관찰한다. 그러나 반이중 통신의 특성 상, 어떠한 디스커버리 단말이라도 자신의 디스커버리 메시지를 전송함과 동시에 다른 디스커버리 단말의 메시지를 수신 받는 것이 불가능하다. 그러므로 디스커버리 단말은 자신이 메시지 전송을 위해 선택한 자원과는 다른 시간 슬롯 내의 자원을 선택한 디스커버리 단말의 메시지만 수신이 가능한 것이다.

예를 들어 임의의 세 디스커버리 단말의 위치를 각각 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{x}_k$ 라 하고 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j, \mathbf{x}_k$ 사이의 거리는 디스커버리 메시지 수신에 가능하도록 충분히 짧다고 가정하자. 그리고 그림 2의 디스커버리 풀 내에서 자원 A, B, D를 각각 선택한 뒤 해당 자원에서 디스커버리 메시지를 전송한다고 가정하자. 이 때 같은 시간 슬롯 내에 존재하는 자원인 A, B를 사용하는 디스커버리 단말 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 는 서로가 송신한 디스커버리 메시지를 원천적으로 수신 불가능하다. 그러나 \mathbf{x}_k 는 자원 A, B와는 다른 시간 슬롯 내에 존재하는 자원인 D를 사용하므로 $\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j$ 모두 자원 D를 관찰 가능하고, 자원 D를 사용하는 디스커버리 단말인 \mathbf{x}_k 의 디스커버리 메시지를 수신할 수 있다.

2.3 제안하는 디스커버리 자원 충돌 고려 방법

그림 1과 같이 임의의 디스커버리 송신 단말의 위치를 \mathbf{x}_i 라 하고 이를 수신할 임의의 디스커버리 수신 단말의 위치를 \mathbf{x}_j 라 하자. 그리고 일반성을 잃지 않고 디스커버리 송신 단말이 선택한 자원을 그림 2에서의 A라고 가정하자.

이 때 이차원 공간에서 자원 A를 디스커버리 자원으로 선택한 단말들이 있다면 이 단말들 때문에 자원 충돌 현상이 발생한다. 각 단말이 무작위로 자원을 선택했을 때 자원 A를 선택하는 확률은 $p = \frac{1}{N_F N_T}$ 이며 이러한 단말들의 위치를 밀도 λp 인 hPPP로 볼 수 있고, 그림 1에서와 같이 이들은 \mathbf{x}_j 에게 간섭으로 작용할 것이다. 이는 hPPP에서 얽음 (thinning)이나 중첩 (superposition)에 의한 변환을 시행할 경우 변환된 점들의 위치 분포 또한 밀도가 바뀐 hPPP이기 때문이다. 그러므로 우리는 자원 충돌을 일으키는 단말들의 위치를 $\Phi_C \sim \text{PPP}(\lambda p)$ 와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 아래첨자 C는 자원 충돌을 의미한다.

2.4 제안하는 인밴드 방사 고려 방법

[8]에서는 디스커버리 메시지 전송에 사용되는 자원의 주변 RB에 미치는 인밴드 방사에 대해 설명한다. 그림 3은 인밴드 방사 모델링을 나타내며 일반적인 인밴드 방사 항 (general in-band emission term)이 전송 자원에서 RB index가 멀어짐에 따라 감소하다가 어느 부분부터는 일정함을 관찰할 수 있다.

우리는 그림 3에서 나타난 인밴드 방사 모델링 중 일반적인 항만 고려할 것이다. 일반적인 인밴드 방사 항 외에 캐리어 누출 (carrier leakage), IQ 이미지 (IQ image)에 의한 인밴드 방사 항도 있지만 우리는 분석적 편의를 위해 이를 무시한다.

3절에서와 같이 임의의 디스커버리 송신 단말이 자원 A를 선택하여 디스커버리를 전송할 시에 자원 A에 영향을 미치는 인밴드 방사의 영향을 모델링 할 것이다.

이차원 공간에서 자원 A를 중심으로 양 옆으로 대칭된 RB index를 가진 디스커버리 자원을 사용하는 단말들은 디스커버리 수신 단말 \mathbf{x}_j 와의 거리가 동일할 경우 동일한 인밴드 방사 영향을 미친다. 각 단말이 자원 A로부터 주파수 축으로 동일하게 떨어진 자원 두 개 중 하나를 선택하는 확률은 $q = \frac{2}{N_F N_T} = 2p$ 이며 이러한 단말들의 위치를 밀도 λq 인 hPPP로 볼 수 있다. 예를 들어 그림 2에서 자원 B와 C 중 하나를 선택하는 단말들이 있다면, 이 단말들은 자원 A를 관찰하는 디스커버리 수신 단말 \mathbf{x}_j 에 정해진 거리에서 동일한 영향을 끼친다. 우리는 인밴드 방사를 야기하는 단말들의 위치를 $\Phi_J \sim \text{PPP}(\lambda q)$ 와 같이 나타낼 수 있다.

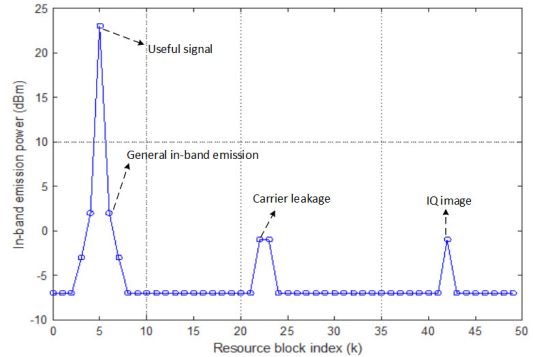


그림 3. 인밴드 방사 모델
Fig. 3. In-band emission model

2.5 디스커버리 메시지 수신 성공 확률

앞 절에서의 내용을 바탕으로 임의의 디스커버리 송신 단말 \mathbf{x}_i 에서 임의의 수신 단말 \mathbf{x}_j 로의 디스커버리 메시지 수신 성공 확률을 분석한다.

(식 1)은 디스커버리 메시지 수신 확률을 나타낸다.

$$P_r = P_{E_d} \cdot \Pr(E_s | E_d) + P_{E_d^c} \cdot \Pr(E_s | E_d^c) = \frac{N_T - 1}{N_T} \cdot \Pr(SINR > T | E_d) \tag{1}$$

여기서 P_r 은 디스커버리 메시지 수신 확률, E_s 는 임의의 디스커버리 송신 단말의 메시지를 임의의 수신 단말이 성공적으로 수신 받을 사건을 의미한다. 또한 E_d 는 임의의 디스커버리 송신 단말과 수신 단말이 서로 다른 시간 슬롯의 자원을 사용할 사건을 의미하며 P_{E_d} 는 그 확률을 의미한다. 마지막으로 T 는 SINR threshold를 뜻한다.

디스커버리 메시지 수신 확률을 사건 E_d 와 관련된 조건부 확률로 나눈 이유는 디스커버리 송신 단말과 수신 단말이 서로 다른 시간 슬롯의 자원을 선택하는 것이 성공적인 메시지 전달에 있어 필요조건이기 때문이다. 만약 디스커버리 송신 단말과 수신 단말이 같은 시간 슬롯에서 자원을 선택한다면 수신 단말이 송신 단말과 같은 시간에 자신의 디스커버리 메시지를 전송하므로 반이중 통신의 특성 상 수신 단말은 송신 단말의 신호를 받을 수 없다. 이 때문에 (식 1)에서 E_d^c 에 대한 조건부 확률인 $\Pr(E_s | E_d^c)$ 값이 0이 되어 사라진다.

또한 시간 슬롯이 총 N_T 만큼 존재하므로 임의의 디스커버리 송신 단말과 수신 단말이 시간 슬롯을 각

각 선택할 총 경우의 수는 N_T^2 이며 이 중 서로 다른 시간 슬롯의 자원을 선택할 경우의 수는 $N_T(N_T-1)$

이다. 그러므로 P_{E_i} 의 값이 $\frac{N_T-1}{N_T}$ 가 된다.

그리고 송신 단말과 수신 단말이 다른 시간 슬롯의 자원을 사용할 때, 수신 신호 대 간섭 및 잡음비 (SINR, Signal-to-Interference plus Noise Ratio)가 특정 한계치 (threshold) 값을 넘었을 때를 기준으로 메시지의 수신 성공 여부가 결정된다.

그러므로 (식 1)의 SINR 관련 항은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} & \Pr(SINR > T | E_d) \\ &= E_I \left[\Pr \left(\frac{Phl_{ij}^{-\alpha}}{\sigma^2 + I} > T \right) \right] \\ &= E_{I_C, I_I} \left[\Pr \left(\frac{Phl_{ij}^{-\alpha}}{\sigma^2 + I_C + I_I} > T \right) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

(식 2)에서 P 는 디스커버리 송신 단말의 송신 파워, σ^2 는 디스커버리 신호가 겪는 가우시안 잡음 (Gaussian noise)의 분산이다. 또한 I 는 수신 단말 \mathbf{x}_j 에 끼치는 총 간섭, I_C 와 I_I 는 (식 3)과 (식 4)에서처럼 각각 자원 충돌과 인밴드 방사에 의한 간섭, 그리고 l_j 는 $\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|$ 를 나타낸다. (식 4)에서 ϕ_j^i 와 P_i 는 각각 디스커버리 송신 단말이 사용하는 자원으로부터 i 번째 RB를 사용하는 단말들의 위치 분포와 그에 해당하는 인밴드 방사 파워이다.

$$I_C = \sum_{\mathbf{x} \in \Phi_C} Ph_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha} \quad (3)$$

$$I_I = \sum_i \left(\sum_{\mathbf{x} \in \phi_i} P_i h_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha} \right) \quad (4)$$

신호가 레일리 페이딩을 겪으므로 파워는 $h \sim \exp(1)$ 을 따른다. 그리고 자원 충돌과 인밴드 방사를 야기하는 단말들의 위치 분포는 독립 (independent)이므로 (식 2)는 아래와 같이 표현 가능하다.

$$\begin{aligned} & E_{I_C, I_I} \left[\Pr \left(\frac{Phl_{ij}^{-\alpha}}{\sigma^2 + I_C + I_I} > T \right) \right] \\ &= E_{I_C, I_I} \left[\Pr \left(h > T \cdot \frac{\sigma^2 + I_C + I_I}{Pl_{ij}^{-\alpha}} \right) \right] \\ &= E_{I_C, I_I} \left[\exp \left(-T \cdot \frac{\sigma^2 + I_C + I_I}{Pl_{ij}^{-\alpha}} \right) \right] \\ &= \exp \left(-T \cdot \frac{\sigma^2}{Pl_{ij}^{-\alpha}} \right) \cdot E_{I_C} \left[\exp \left(-\frac{TI_C}{Pl_{ij}^{-\alpha}} \right) \right] \\ &\quad \cdot E_{I_I} \left[\exp \left(-\frac{TI_I}{Pl_{ij}^{-\alpha}} \right) \right] \\ &= \exp(-s\sigma^2) \cdot E_{I_C} [\exp(-sI_C)] \cdot E_{I_I} [\exp(-sI_I)] \end{aligned} \quad (5)$$

서술의 편리를 위하여 $s = \frac{T}{Pl_{ij}^{-\alpha}}$ 로 표기한다. (식 5)에 (식 3)을 대입하여 I_C 관련 항을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & E_{I_C} [\exp(-sI_C)] \\ &= E_{\Phi_C, h_{\mathbf{x}}} \left[\exp \left(-s \sum_{\mathbf{x} \in \Phi_C} Ph_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha} \right) \right] \\ &= E_{\Phi_C, h_{\mathbf{x}}} \left[\prod_{\mathbf{x} \in \Phi_C} \exp(-sPh_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha}) \right] \\ &= E_{\Phi_C} \left[\prod_{\mathbf{x} \in \Phi_C} E_{h_{\mathbf{x}}} [\exp(-sPh_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha})] \right] \\ &= E_{\Phi_C} \left[\prod_{\mathbf{x} \in \Phi_C} \frac{1}{1 + sPl_j^{-\alpha}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

(식 6)의 세 번째 항에서 네 번째 항으로 넘어가는 과정은 각 페이딩 파라미터 간의 독립성 (independence) 때문에 성립한다. 만약

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{1 + sPl_j^{-\alpha}} \text{라 두면 } f(\mathbf{x}) : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1] \text{이므로}$$

(식 6)의 마지막 항은 PGFL (Probability Generating Functional)에 의해 다음과 같이 변환 가능하다.^[9]

$$\begin{aligned} & E_{\Phi_C} \left[\prod_{\mathbf{x} \in \Phi_C} f(\mathbf{x}) \right] \\ &= \exp \left(-\lambda p \int_{\mathbb{R}^2} (1 - f(\mathbf{x})) d\mathbf{x} \right) \\ &= \exp \left(-\lambda p \int_{\mathbb{R}^2} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{sP\|\mathbf{x} - \mathbf{x}_j\|^{-\alpha}}} \right) d\mathbf{x} \right) \\ &= \exp \left(-\lambda p \int_{\mathbb{R}^2} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{sP\|\mathbf{x}\|^{-\alpha}}} \right) d\mathbf{x} \right) \\ &= \exp \left(-\lambda p \cdot 2\pi \int_0^\infty \left(\frac{1}{1 + r^\alpha/sP} \right) dr \right) \\ &= \exp \left(-\lambda p (2\pi) (sP)^{\frac{2}{\alpha}} \frac{\pi}{\alpha} \csc \left(\frac{2\pi}{\alpha} \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

(식 7)의 마지막 과정은 [10]에 의해 마무리 된다. 마찬가지로 (식 5)에 (식 4)를 대입하여 I_j 관련 항을 구할 수 있고 이는 아래와 같다.

$$\begin{aligned}
 & E_{I_j}[\exp(-sI_j)] \\
 &= E_{\phi_j, h_{\mathbf{x}}} \left[\exp\left(-s \sum_i \left(\sum_{\mathbf{x} \in \phi_j^i} P_i h_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha} \right)\right) \right] \\
 &= \prod_i E_{\phi_j^i} \left(\prod_{\mathbf{x} \in \phi_j^i} E_{h_{\mathbf{x}}} [\exp(-s P_i h_{\mathbf{x}} l_j^{-\alpha})] \right) \\
 &= \prod_i \left(E_{\phi_j^i} \left[\prod_{\mathbf{x} \in \phi_j^i} f(\mathbf{x}) \right] \right) \\
 &= \prod_i \left(\exp\left(-\lambda q(2\pi)(sP_i) \frac{2}{\alpha} \pi csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)\right) \right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

(식 7)과 (식 8을) (식 5)에 대입한 뒤, 이 결과를 다시 (식 1)에 넣으면 아래 (식 9)와 같이 디스커버리 메시지 수신 확률이 정리된다.

$$\begin{aligned}
 P_r &= \frac{N_T - 1}{N_T} \cdot \Pr(SINR > T | E_d) \\
 &= \frac{N_T - 1}{N_T} \cdot \exp(-s\sigma^2) \\
 &\quad \cdot E_{I_c}[\exp(-sI_c)] \cdot E_{I_j}[\exp(-sI_j)] \\
 &= \frac{N_T - 1}{N_T} \cdot \exp\left(-\frac{T\sigma^2}{Pl_{ij}^{-\alpha}}\right) \\
 &\quad \cdot \exp\left(-\lambda \frac{2\pi}{N_F N_T} l_{ij}^2 T \frac{2}{\alpha} \pi csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)\right) \\
 &\quad \cdot \prod_i \exp\left(-\lambda \frac{2(2\pi)}{N_F N_T} l_{ij}^2 \left(\frac{P_i}{P}\right) T \frac{2}{\alpha} \pi csc\left(\frac{2\pi}{\alpha}\right)\right)
 \end{aligned} \tag{9}$$

III. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 앞 장에서의 분석 결과를 시스템 레벨 시뮬레이션과 비교하고 그 결과에 대해 기술한다. 시뮬레이션 툴로는 MATLAB을 사용하였고, 시뮬레이션 환경은 표 1과 같다.

hPPP 환경을 시뮬레이션 상에서 구현하기 위하여 $1500 \times 1500 m^2$ 공간에 단말의 개수를 일정한 밀도를 가진 푸아송 분포 (Poisson distribution)로 반복하여 결과 값을 뽑아내었고 각 디스커버리 송신 단말은 표준에서 정의된 최대 송신 파워인 23dBm을 사용한다고 가정하였다. 또한 D2D 디스커버리 자원의 크기가 2 RB 씩이므로 주파수 축으로의 자원 개수를 22개로 지정하였다. SINR threshold는 4dB로 가정하였다.

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation environment

Parameter	Value
Transmit power	23 dBm
Noise power per RB	-121.44 dBm
SINR threshold	4 dB
Fast fading	Rayleigh distribution
UE density	$0.5 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4} m^{-2}$
N_F	22
N_T	16

그림 4는 단말의 밀도를 $1 \times 10^{-4} (m^{-2})$ 로 고정시킨 상태에서 인밴드 방식을 고려했을 때와 고려하지 않았을 때의 분석의 차이를 보여준다. 디스커버리 메시지 수신 성공 확률을 디스커버리 송신 단말과 수신 단말 사이의 거리의 함수로 나타내었고, 시뮬레이션에서 송신 단말과 수신 단말 사이의 거리가 연속적인 (continuous) 형태로 나타나는 않으므로 거리를 동일 크기의 구간별로 쪼개어 각 구간 안에서 디스커버리 메시지 수신 성공 확률의 평균을 구하였다. 단말 사이의 거리가 멀어짐에 따라 디스커버리 메시지 수신 성공 확률이 줄어들 뿐만 아니라 인밴드 방식에 의한 신호 간 간섭이 디스커버리 메시지 수신 성공 확률에 무시할 수 없을 정도의 상당한 영향을 끼침을 알 수 있다.

그림 5는 단말들의 밀도를 0.5×10^{-4} 부터 $2 \times 10^{-4} (m^{-2})$ 까지 올림에 따라 디스커버리 메시지 수신 성공 확률의 변화를 보여준다. 단말들의 밀도가 증가하면서 상대적으로 부족해지는 디스커버리 풀 용량 때문에 디스커버리 메시지 수신 성공 확률이 감소

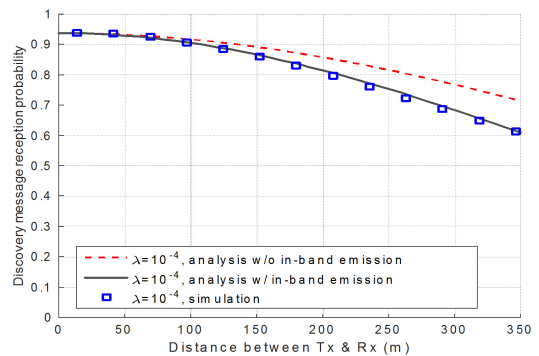


그림 4. 인밴드 방식을 고려한 분석과 고려하지 않은 분석에 대한 비교 ($\lambda = 10^{-4}$)
Fig. 4. Comparison of analysis with considering in-band emission and without considering in-band emission ($\lambda = 10^{-4}$)

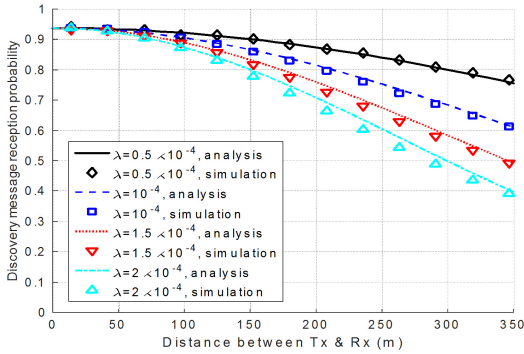


그림 5. 단말의 밀도 변화에 따른 디스커버리 메시지 수신 성공 확률
 Fig. 5. Discovery message reception probability with respect to the density of UEs

함을 확인할 수 있다. 또한 분석에 의한 결과와 시스템 레벨 시뮬레이션을 통한 결과와의 차이가 단말들의 밀도가 커짐에 따라 소폭 증가하는데, 이는 단말들의 밀도가 커질수록 디스커버리 자원을 조밀하게 사용하게 되어 인밴드 방사에 의한 영향을 근사시킨 효과가 크게 드러난 것으로 보인다. 인밴드 방사를 포함한 분석에서는 일반적인 항 (general in-band emission term)을 일부만 고려하였고 캐리어 누출이나 IQ 이미지 등을 무시하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 D2D 디스커버리에서 단말들이 디스커버리 풀 내에서 자원을 무작위로 선택하는 방법인 Type 1에 대한 성능 분석을 이끌어 내었다. 디스커버리 풀 내에서 자원 충돌뿐만 아니라 인밴드 방사와 같은 간섭의 영향을 고려하여 분석의 정확도를 높였고 이를 고려하였을 때와 고려하지 않았을 때를 각각 비교하여 제안하는 분석이 실제에도 쓰일 수 있을 정도로 정확함을 확인하였다. 시스템 레벨 시뮬레이션은 상당한 시간을 요구하는데 분석으로부터의 결과는 닫힌 형태 (closed form)로 도출되어 다양한 환경에서의 실제 성능을 빠른 시간 안에 확인할 수 있다.

디스커버리 메시지 수신 성공 확률을 통하여 디스커버리 수신 단말이 주변의 다른 단말들의 디스커버리 메시지를 평균적으로 얼마만큼 받았는지 분석할 수 있다. 또한 D2D 디스커버리뿐만 아니라 통신에서도 이 분석을 기반으로 성능 분석을 이끌어낼 수 있는데, D2D 통신은 SA를 전송하고 데이터 메시지를 전송하는 방식으로 이루어져 있어 이를 보완할 추가적인 분석이 필요하다. 그러므로 우리는 이후 연구에서

일반적인 D2D 통신 환경에서의 성능 분석을 이끌어내고자 한다.

References

- [1] G. Fodor, E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, N. Reider, G. Miklós, and Z. Turanyi, "Design aspects of network assisted device-to-device communications," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 3, pp. 170-177, Mar. 2012.
- [2] H. N. Lee, H. M. Kim, and S. K. Kim, "Sector-based device discovery scheme for D2D communication in LTE-Advanced networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 8, pp. 1521-1531, Aug. 2015.
- [3] X. Li, O. S. Shin, and Y. Shin, "Resource allocation and power control for device-to-device communication in LTE-Advanced based on user area information," *J. KICS*, vol. 40, no. 1, pp. 32-42, Jan. 2015.
- [4] 3GPP TS 23.303, *Proximity-based services (ProSe); Stage 2*, ver. 12.8.0, Mar. 2016.
- [5] S. M. Oh, C. Lee, M. Yun, J. Shin, and A. S. Park, "Resource allocation scheme for D2D communications in multi-cell environments," *J. KICS*, vol. 39, no. 10, pp. 601-609, Oct. 2014.
- [6] M. Simsek, A. Merwaday, N. Correal, and I. Güvenç, "Device-to-device discovery based on 3GPP system level simulations," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, pp. 555-560, Atlanta, GA, Dec. 2013.
- [7] 3GPP TR 36.843, *Study on LTE device to device proximity services; Radio aspects*, ver. 12.0.1, Mar. 2014.
- [8] D. Li and Y. Liu, "In-band emission in LTE-A D2D: Impact and addressing schemes," in *Proc. IEEE VTC, 2015-Spring*, pp. 1-5, Glasgow, Scotland, May 2015.
- [9] F. Baccelli and B. Błaszczyszyn, *Stochastic Geometry and Wireless Networks: Volume I Theory*, Now publishers, 2010.
- [10] I. S. Gradshteyn and I. M. Ryzhik, *Tables of Integrals, Series, and Products*, 7th Ed., Academic Press, 2007.

박 경 원 (Kyungwon Park)



2014년 : 한국과학기술원 전기
전자공학과 졸업
2016년 : 서울대학교 전기정보
공학부 석사
2016년~현재 : KT 플랫폼사업
기획실
<관심분야> D2D, V2X, MIMO,
IoT

이 광 복 (Kwang Bok Lee)



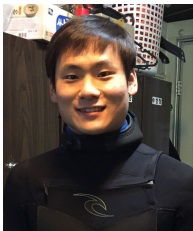
1982년 : University of Toronto
전자공학 학사
1986년 : University of Toronto
전자공학 석사
1990년 : McMaster University
통신 박사
1990년~1996년 : 미국 모토로라
Senior Staff Engineer

1996년~현재 : 서울대학교 전기정보공학부 교수
2007년~2009년 : 서울대학교 뉴미디어통신공동연구소
소장

2011년~2015년 : 서울대학교 전기정보공학부 학부장
2011년~현재 : IEEE Fellow (석학회원)

2012년~2013년 : IEEE ComSoc, Board member
2012년~현재 : IEEE ComSoc, 아태지역 위원장, 고문
2013년~2016년 : 한국통신학회 부회장, 감사
2016년~현재 : 한국공학한림원, 정회원
2016년~현재 : 한국연구재단 기초연구본부 본부장
<관심분야> 무선통신, MIMO, WLAN, Compressive
Sensing, IoT

김 준 영 (Joonyoung Kim)



2012년 : 한국과학기술원 전기
전자공학과 졸업
2012년~현재 : 서울대학교 전기
컴퓨터공학부 석박사통합과
정
<관심분야> 딥러닝, 머신러닝,
Crowdsourcing

정 병 국 (Byeong Kook Jeong)



1999년 : 서울대학교 전기공학
부 학사
2001년 : 서울대학교 전기컴퓨
터공학부 석사
2003년~현재 : LG전자 System
IC센터
2016년~현재 : 서울대학교 전기
정보공학부 박사 과정

<관심분야> 통신시스템, 방송시스템, IoT

최 성 현 (Sunghyun Choi)



1992년 : 한국과학기술원 전기
전자공학과 공학사
1994년 : 한국과학기술원 전기
전자공학과 공학석사
1999년 : University of Michigan
전기컴퓨터공학과 박사
1999년~2002년 : 미국 Philips

Research 선임연구원

2002년~현재 : 서울대학교 전기정보공학부 교수

2014년~현재 : IEEE Fellow (석학회원)

<관심분야> 무선 통신 네트워크, 멀티미디어 통신
네트워크, IoT