

# 5세대 무선네트워크에서의 인접성 인지 기술

## I. 서론

수많은 노드들이 네트워크에 연결되는 사물인터넷 (IoT)의 상용화가 가시화되고 큰 수요가 예상됨에 따라 앞으로의 네트워크 트래픽 상승세는 기존에 비해 크게 증가될 것으로 전망된다. 이러한 상황에서 통신 자원의 재활용을 통해 네트워크 트래픽을 분산시킬 수 있는 D2D (device-to-device) 통신 기술이 크게 부각 되고 있다. D2D 통신은 기존 셀룰러 기반의 시스템과 달리 기지국을 거치지 않고 개별 모바일들이 직접 통신 링크를 형성하므로 네트워킹 소비전력이 감소하고 무선 자원 효율성이 증가하지

만, 각 모바일 기기는 주위의 다른 노드들을 인지해야만 한다. 이러한 관점에서 무선 모바일 기기 주위의 상호작용이 가능한 다른 모바일 기기 및 네트워크

**무선 모바일 기기 주위의 상호작용이 가능한 다른 모바일 기기 및 네트워크 인프라의 존재 여부와 종류를 탐색하는 기술인 인접성 인지 기술은 D2D 서비스를 가능케 하는 핵심 요소이다.**

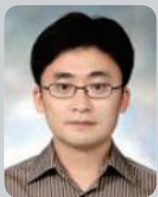
크 인프라의 존재 여부 및 종류를 탐색하는 기술인 인접성 인지 기술은 D2D 서비스를 가능케 하는 핵심 요소이다. 최근에는 인접성 인지 기술을 통해 사용자의 현재 위치를 대략적으로 파악하는 것이 가능하다는 점에 주목하여 많은 사업자들이 인접성 인지 기술을 사용자 실시간 위치기반의 상업 광고와 소셜 네트워크 서비스에 접목하려는 움직임을 보이고 있다. 실제로 2015년의 위치기반 소셜 네트워크 서비스와 모바일 광고 수익은 각각 19억 달러, 57억 달러로 예상되어 인접성 인지 기술의 경제적 가치는 막대하다<sup>[1]</sup>. 또한 통신 기반 시설이 파괴된 국가적 재난 상황에서의 구호, 긴급 통신을 위한 사회 안전망 통신 및 사용자 위급 상황에서의 위치파악을 위한 용도 등의 비 상업적 응용방안 역시 검



한성민  
대구경북과학기술원  
정보통신융합공학전공



권태수  
서울과학기술대학교  
컴퓨터공학과



최지웅  
대구경북과학기술원  
정보통신융합공학전공

토 중이다.

기존의 초보적 인접성 인지기술은 크게 각 노드의 절대적 위치를 확인하여 인접한 노드를 검색하는 위치기반 방법과 무선 비콘 신호를 이용하는 방법으로 나눌 수 있다. 위치기반 방법은 GPS (global positioning system)와 같이 위치 추적이 가능한 외부 기술을 이용하여 노드의 현재 위치를 파악하므로 넓은 커버리지를 제공하지만, 비교적 큰 지연을 가지며 사용자가 실내에 위치할 경우 이용할 수 없을 뿐만 아니라 사용자 이동경로 수집은 사생활 침해의 우려가 있다. 비콘 기반의 방식은 수십 미터 정도의 좁은 커버리지를 가지고 있으나, 전력소모가 GPS기반 방식보다 매우 적으며 실내에서도 활용이 가능한 장점을 가지고 있다. 각각의 방법은 상호보완적인 장단점을 가지고 있으나 인접성 인지기술의 요구사항인 넓은 커버리지, 저전력, 사생활 보호 기능을 모두 만족시키지 못할 뿐만 아니라 특정 어플리케이션과 같은 제한된 환경에서만 동작하기 때문에 D2D 관련 용도로 사용하기에는 부족함이 많다<sup>[1]</sup>.

따라서 Qualcomm, 삼성, LG 등의 주요 업체들을 중심으로 3GPP (3rd generation partnership project)에서는 LTE-Advanced 표준에 기반한 LTE D2D를 위한 각 상황 및 목적에 적합한 인접성 인지기술에 대한 연구가 진행 중이다. 특히 3GPP는 2011년에 인접성 인지 기술을 포함한 D2D 관련 기술을 ProSe (proximity-based service)라는 이름으로 표준화 작업을 시작했으며 Rel-12에 기초적인 D2D 관련 기술들이 반영되었다<sup>[2-3]</sup>. 향후 LTE D2D가 성공적으로 정착될 시, 앞서 언급된 관련 분야와의 활발한 융합이 예측된다.

본 논문에서는 현재까지 발표된 인접성 인지기술을 소개 및 기술별로 분류하고 이와 관련된 최신 연구동향을 소개한다. 특히 수많은 무선 노드들이 무작위로 배치되어 있는 상황에서의 무선 시스템의 성능 분석을 가능하게 하는 확률 기하 이론 (stochastic geometry)을 이용한 연구를 집중적으로 다루도록 한다.

## II. 본 론

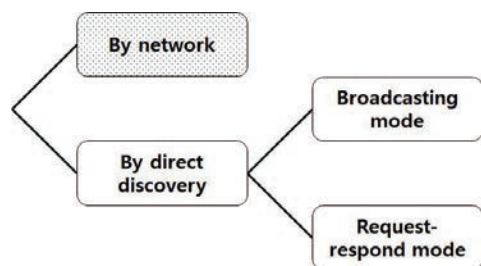
### 1. 인접성 인지 방법 분류

D2D 상황에서의 인접성 인지 및 자원할당 방법은 <그림 1>과 같이 크게 각 노드가 외부의 도움 없이 직접 정보를 교환하는 방식과, 상위 네트워크의 도움을 받아 정보를 교환하는 방식의 두 가지로 나눌 수 있다<sup>[2]</sup>. 상위 네트워크의 도움을 받는 대표적인 서비스는 3GPP의 ProSe가 있으며, 각 노드가 직접 인접 노드를 검색하는 방식에는 Bluetooth low energy (LE)가 있다. Qualcomm의 FlashlinQ의 경우는 두 가지 방식을 절충한 방식으로 볼 수 있다. 각 서비스에서 사용된 인접성 인지 기술은 다음항에서 자세히 설명하도록 하겠다.

각 노드들이 직접 다른 노드를 인지하기 위해서는 discovery 신호를 복호하고 이를 바탕으로 인접 노드를 확인해야 한다. 따라서 직접 인접 노드를 인식하는 방식은 인지되기 원하는 노드가 먼저 discovery 신호를 송신하고 인접노드들이 discovery 신호를 감지하는 broadcasting 시나리오와 인접노드를 인지하기 위해 discovery 신호를 요청하고 요청을 받은 노드가 discovery 신호를 전송하는 request-respond 시나리오로 세분화 가능하다. 각 세부 분류는 <그림 1>에 표시되었다<sup>[2]</sup>.

위의 시나리오들은 응용 분야에 따라서 적용이 가능하다. 예를 들어, 인지기술이 상업 광고 목적으로 쓰일 경우 사업자의 노드는 가능한 여러 사용자 노드에게 발견되기를 원하기 때문에 broadcasting 시나리오가 적합하다.

**인접성 인지는 상위 네트워크의 지원을 받아 수행되거나 또는 지원 없이 수행될 수 있으며, 지원 없이 수행되는 방법은 broadcasting 방법과 request-respond 방식으로 세분화 가능하다.**



<그림 1> 인접성 인지 방법 분류

반면 request-respond 시나리오는 소셜 네트워크 서비스와 같이 특정 노드끼리 통신을 원할 경우에 적합하다. 주로 소모되는 자원의 종류도 각 시나리오별로 차이점을 보인다. Broadcasting의 경우 계속하여 discovery 신호를 송신하여 무선 채널을 점유하는 점이 문제이지만, request-respond 시나리오에서는 주위 다른 노드가 없을시 낭비되는 request신호로 인한 전력 낭비가 주요 문제이다.

### 가. ProSe

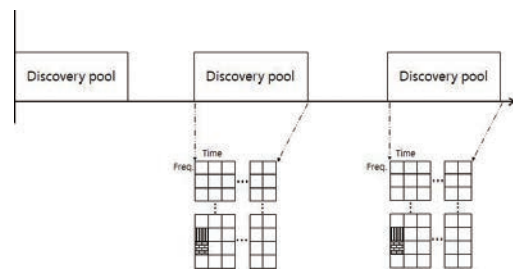
ProSe란 3GPP에서 LTE기반으로 기지국을 거치지 않고 인접한 단말끼리 직접 통신하는 방식을 지칭한다<sup>[4]</sup>. ProSe 기술은 동기화, D2D communication, D2D discovery로 나눌 수 있으며, 여기서 D2D discovery란 통신 전단계의 인접성 인지 과정을 의미하는 것이 아닌 기지국 내 모바일간의 상업용도 통신을 의미한다. 또한 D2D communication은 기지국 내외 모바일들 간의 재난 통신용도의 통신을 의미한다. D2D discovery의 인접성 인지는 기지국의 도움을 받아 진행되므로 기지국 외부 모바일의 인접성은 확인하지 못하고 D2D communication은 모바일 단독으로 통신을 수행해야하는 재난 통신을 가정했기 때문에 인접성 인지 없이 broadcasting 방식의 통신을 수행한다. 본 논문에서는 ProSe의 인접성 인지 기술을 위주로 관련된 통신 기술을 설명하도록 한다.

ProSe는 D2D의 uplink channel을 D2D와 같은 SC-FDMA (single carrier frequency division multiple access)방식으로 이용한다. 이때 기지국의 커버리지 안에 있는 모바일들의 동기화는 기지국이 전송하는 동기 신호에 의해 결정된다. 커버리지 밖의 모바일의 동기를 위해선 D2DSS (D2D synchronization signal)를 PSBCH (physical sidelink broadcast channel)를 통해 임의의 cluster head 모바일이 전송하는 방법을 이용한다. D2D communication의 경우 할당된 PSBCH에 D2DSS 신호를 전달하지만 D2D discovery는 PSBCH가 따로 할당되지 않는다. 이와 같은 동기 관련 채널 및 신호 전송을 위해 기지국은 40 ms 주기로 서브프레임을 할당한다<sup>[5-6]</sup>.

D2D discovery는 각 노드가 broadcasting 하는 방법

으로 진행되며, 무선 자원을 선택하는 방법에 따라 type 1,2로 나뉜다. Type 2의 경우 type 2A 및 type 2B로 세분화된다. Type 1의 경우 기지국에 의해 정해진 주기적 서브프레임 중 단말이 무작위로 하나를 선택하는 방식이고, 기지국의 지시에 따라 서브프레임을 선택하는 방식이 type 2이다. Type 2A는 지정된 서브프레임이 discovery 메시지를 전송할 때마다 달라지며, type 2B는 서브프레임의 위치가 반영구적으로 고정된다. <그림 2>는 D2D discovery type 2B의 discovery 시그널 전송 방법을 보여준다. Type 2B의 경우 discovery 메시지를 분석함으로써 다음 주기의 discovery 신호를 예측 가능하기 때문에 half duplex 단말이 한 주기에서 수신과 송신을 할 수 있도록 해주고, 커버리지를 개선시키는 효과를 기대할 수 있다. 한 번의 discovery 시그널 전송을 위해선 2개의 인접한 RB (resource block)를 이용하고, 재전송을 할 경우 재전송 횟수의 2 배만큼의 RB를 이용하여 전송한다<sup>[5-6]</sup>.

D2D discovery의 용도는 광고, 쿠폰 발행 등의 상업적 목적으로 고정되어 있고 기지국 커버리지 내에서만 동작하기 때문에 별도의 복잡한 자원 할당 과정이 필요 없지만, D2D communication의 경우에는 필수적이다. D2D communication 자원 할당은 커버리지 내에서는 기지국에 의해 진행되고, 밖에서는 사전 약속에 의해 할당된다. 통신 과정은 크게 데이터 전송과 데이터 전송과 관련된 자원 할당, 전송 형식 등을 포함하는 SA (scheduling assignment) 전송으로 나누어진다. SA는 같은 RB를 사용하는 인접한 두 개의 슬롯으로 전송된다. 통신은 크게 커버리지 내 통신인 mode 1과 커버리지 외 통신인 mode 2로 분류 가능하며, mode 1의 경우 SA와 같은 대부분의



<그림 2> D2D discovery type 2B의 전송방법



처리과정이 기지국의 도움을 받기 때문에 충돌이 발생하지 않는다. 하지만 각 모바일들이 자원할당을 진행하는 mode 2의 경우, 충돌이 발생할 가능성이 높아 간섭관리 기술이 필요하다<sup>[5,6]</sup>.

Mode 2 상황에서 전송할 데이터를 가진 단말은 먼저 SA를 다이버시티 효과를 얻을 수 있을 정도로 충분히 떨어진 두 주파수를 이용하여 전송한다. 이러한 SA 전송방식은 인접성 인지의 경우와 유사하게 half duplex 단말이 한 주기에서 높은 확률로 SA 수신과 송신을 같이 할 수 있도록 만든다. 모든 D2D 단말은 계속하여 SA를 감시하고, 수신된 SA가 자신과 관련된 ID정보를 포함할 경우에 수신 정보를 바탕으로 데이터를 수신한다. SA 메시지는 데이터 전송 시 사용될 서브프레임들의 위치와 RB를 포함하고 총  $4n$  개의 서브프레임을 지정 가능하다. 이 때  $n$ 은 총 데이터 풀의 크기에 따라서 결정되는 임의의 자연수이다<sup>[6]</sup>.

#### 나. FlashlinQ

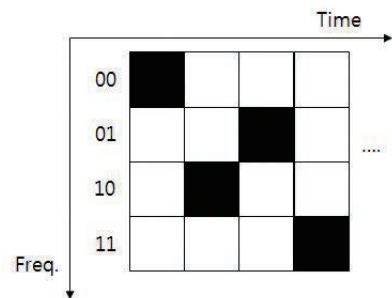
FlashlinQ는 Qualcomm사의 독자 규격 D2D 시스템으로써 인접성 인지 기술 및 자원할당, 링크 관리 등의 기술을 포함한다. FlashlinQ는 면허 대역에서 최대 1 km이 내의 수천 개의 단말 간의 통신을 지원하여 Wi-Fi direct 등의 경쟁 D2D 통신기술에 비해 넓은 커버리지 및 확장성을 제공한다. 타 기술과 비교하여 FlashlinQ만의 두드러지는 특징으로는 외부 셀룰러 기지국을 이용하여 각 노드들 간의 시간 동기화를 할 수 있다는 점과 단일 톤 OFDM (orthogonal frequency division modulation) 신호를 사용한 점이다<sup>[7]</sup>.

FlashlinQ의 모든 노드들은 셀룰러 기지국의 신호를 바탕으로 시간 동기화가 이루어진 상태이다. 따라서 모든 노드들은 동시에 인접 노드를 검색 및 인지할 수 있도록 되어 있어, 각 노드가 다른 모드로 동작하여 발생하는 충돌을 최소화 할 수 있다. 인접 노드 인지가 주기적으로 수행되기 때문에 큰 전력 소모에 대한 우려를 할 수도 있으나, 인접 노드 검색 및 인지 구간은 전체 시간 중 매우 작은 (~2%) 구간만을 차지하므로 인접 노드 인지에 사용되는 전력 소모는 허용 가능한 수치이다<sup>[8]</sup>.

FlashlinQ의 노드는 full-duplex 동작을 가정하지 않으므로 discovery신호의 송수신을 동시에 수행하는 것을 불가능하다. 이러한 충돌을 막기 위해서 인접 노드 검색 구간은 여러 개의 하위 세그먼트들로 나누어져 있고, 각 노드는 지정된 하나의 세그먼트에서만 자신의 정보를 실은 discovery 신호를 송신한다. 지정되지 않은 나머지 구간 동안에는 다른 노드에서 전송된 discovery 신호를 복호하고 인접 노드를 인지하는 동작을 취한다. Discovery 신호를 송신하는 세그먼트는 하나의 세그먼트에 여러 노드들이 discovery신호를 송신하여 충돌이 일어나는 것을 방지하기 위해 최소 에너지가 수신된 세그먼트로 지정되며, 이를 통해 같은 세그먼트를 선택하는 노드간의 물리적 거리를 증가시킬 수 있다<sup>[9-10]</sup>.

인접 인지 구간동안 FlashlinQ의 각 노드들은 자신의 discovery 신호를 단일 톤 OFDM 심볼을 이용하여 전송한다. 즉 정보 전달을 위해서 OFDM 심볼의 전체 톤을 이용하는 것이 아니라, 하나의 톤만을 이용하고 사용되는 톤의 위치는 전달하려는 정보에 의해서 결정된다. 이 방법은  $M$ 진 FSK (frequency shift keying)와 비슷한 방법으로 전체  $M$ 개의 가용 톤이 있을 경우 하나의 OFDM 심볼은  $\log_2 M$  bit를 전송 가능하다. <그림 3>은 단일톤 OFDM 심볼을 이용하여 (00100111...) bit 시퀀스를 전송하는 방법을 보여준다. 먼저 bit를 한 심볼당 보낼 수 있는 단위로 쪼개고 이에 알맞은 톤을 선택한다.

단일 톤 전송방법은 하나의 톤에 전력을 집중할 수 있어 수신부의 SNR (signal to noise power ratio)를 개선할 수 있으며, OFDM 심볼의 문제점인 큰 PAPR (peak to average power ratio)을 낮출 수 있다<sup>[9-10]</sup>.



<그림 3> FlashlinQ discovery 신호 전송방법

여러 노드로부터 수신된 discovery 신호를 복호하기 위해서 같은 노드로부터 송신된 단일 톤 심볼들을 파악해야 한다. 같은 노드로부터 수신된 심볼들의 수신 전력은 비슷하다는 전제하에서 FlashlinQ discovery 신호 복호 과정은 다음과 같다. 먼저 각 시간 슬롯별로 가장 큰 전력을 가지는 톤들을 하나의 노드로부터 수신된 심볼 시퀀스가 가정하고 bit mapping을 진행한다. 이후 bit 시퀀스의 패리티 비트를 체크하여 이상이 없으면 인접 노드의 정보로 확정하고 두 번째로 큰 전력을 가지는 톤들에 대해서 같은 방법을 수행한다. 만일 패리티 비트에 문제가 발생한다면 해당 구간의 수신 신호는 무시하고 다음 슬롯까지 대기한다. 주파수 선택적 페이딩이 발생하여 각 톤별로 전력 순서가 뒤바뀔 경우에는, 각 슬롯 별로 상위 전력을 차지하는 2개 이상의 톤을 선택하여 모든 경우의 수에 대해 bit mapping 및 패리티 비트를 체크하고 이상이 없는 경우에 한해 인접 노드 정보로 확정한다<sup>[9-10]</sup>.

FlashlinQ는 비교적 안정적인 인접성 인지 성공 확률을 제공하지만 외부의 동기화 신호를 바탕으로 동작한다는 점과 외부 잡음 신호의 영향이 비교적 적은 면허대역에서만 동작한다는 점에서 모든 노드가 스스로 동작하는 완벽한 D2D 시스템 구축에는 적합하지 못한 한계를 가지고 있다고 볼 수 있다.

#### 다. iBeacon (Bluetooth LE)

iBeacon은 애플사의 무선 측위를 위한 시스템의 이름으로 기존의 GPS에 비해 매우 작은 오차를 보일뿐만 아니라, 실내에서도 사용가능한 장점을 가지고 있다. iBeacon의 기반 통신기술은 Bluetooth LE이기 때문에 저전력, 저비용 등의 장점을 가지고 있고, 현재 대부분의 모바일 스마트 디바이스에 Bluetooth LE 호환 모듈이 장착되어 있어 향후 무선 측위 시장 선점에 매우 유리한 고지를 점하고 있다<sup>[11]</sup>.

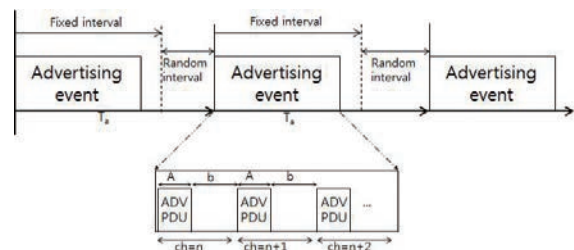
iBeacon기술에서 비콘과 무선 노드의 관계는 쉽게 등대와 배의 관계로 표현가능하다. 비콘은 일종의 등대 역할을 하며 무선 노드에게 자신의 ID 및 수신 전력 정보를 제공하고 무선 노드는 수신 정보를 바탕으로 하여 비콘과 자신사이의 거리를 측정한다. 이때 무선 노드가 여러 개

의 비콘과의 거리 정보를 알 수 있으면 절대 위치를 파악하는 것이 가능하다<sup>[11]</sup>.

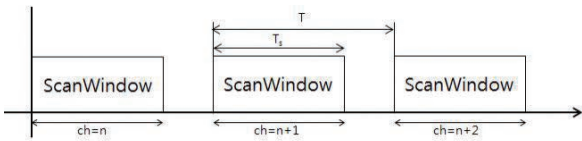
무선 노드와 비콘 사이의 최초 통신 링크를 형성하는 과정은 기반통신기술인 Bluetooth LE의 과정과 동일하므로, 본 논문에서는 Bluetooth LE의 인접 노드 인지 과정에 대해서 기술한다. 기본적으로 Bluetooth LE의 노드들은 인지과정 중에 각 상황 및 역할에 따라 advertising, scanning 그리고 initiating의 3가지 모드 중 하나의 모드로 동작한다<sup>[12-13]</sup>.

〈그림 4〉는 Bluetooth LE advertising 과정을 보여준다. Advertising 모드 노드는 주위 노드들에게 advertising PDU (packet data unit)이라 불리는 discovery 신호를 송신하고 다른 노드들로부터 ack 신호를 수신한다. 이러한 동작은 하나의 채널에서만 수행되지 않고 미리 정의된 여러 advertising 채널들에서 진행된다. 이 때 discovery 신호의 송신 간격  $T_a$ 는 고정된 간격과 무작위로 선택되는 간격의 합으로 표현되고 이는 여러 advertising 노드들 간의 계속되는 충돌을 방지한다<sup>[12-13]</sup>.

Scanning 모드는 advertising 노드에 대한 추가적인 정보를 요청하는데 반해 initiating 모드는 직접적인 링크 형성을 요청한다는 점을 제외하고 두 모드의 동작방식은 discovery신호에 대한 ack신호를 전송하는 점에서 같다고 볼 수 있다. 〈그림 5〉는 scanning 및 initiating 모드의 동작과정을 보여준다. 각 노드는  $T$ 를 주기로 하여  $T_s$  시간동안 각 채널의 신호를 수신하고 ack 신호를 송신한다. 이때 충돌을 방지하기 위해 discovery 신호를 수신한 시점 이후 랜덤 back-off를 진행한 뒤 ack 신호를 전송한다<sup>[12-13]</sup>.



〈그림 4〉 Bluetooth LE advertising 과정



〈그림 5〉 Bluetooth LE scanning/initiating 과정

두 Bluetooth LE 기기가 각각 advertising 모드와 scanning/initiating 모드로 동작할 때 첫 번째 advertising 이벤트 발생 시점부터 ack 신호 수신까지의 시간을 표현하는 인지 레이턴시의 평균값  $\bar{D}$ 은 다음과 같이 간략화 가능하다<sup>[12-13]</sup>.

$$\bar{D} \approx b + \frac{2bT_a}{3T} \quad (1)$$

따라서 Bluetooth LE 표준 내에서 scan window의 길이는 성능에 직접적인 영향을 미치지 않음을 알 수 있으며 성능 향상을 위해선 discovery 신호의 송신 주기를 줄여야 하며, 따라서 더 많은 전력을 소모해야 함을 알 수 있다.

## 2. 인접성 인지 기술 설계

확률기하 (stochastic geometry)는 랜덤 점 과정 (random point process)을 다루는 수학의 한 분야이며 점의 위치에 따라 결정되는 랜덤 특성을 수학적으로 유도하는데 이용된다. 무선 네트워크의 노드의 위치는 많은 경우 2차원 또는 3차원 랜덤 점 과정으로 모델링 가능하고 네트워크 처리량과 같은 성능 지표들은 각 노드간의 거리에 영향을 받기 때문에, 확률기하를 이용한 네트워크 성능 분석 방법이 최근 들어 주목받고 있다<sup>[14]</sup>.

확률기하를 이용한 성능 분석이 가지는 장점은 다음과 같다. 최근의 무선 통신 시스템의 노드 수는 과거에 비해 크게 증가했으므로, 시스템 성능은 SNR보다는 SINR (signal to interference plus noise power ratio)에 의해 제한받는다. 따라서 노드의 기하학적 분포에 근거한 간섭 신호 모델링을 이용하는 확률기하 기반의 분석 결과는 기존의 분석법보다 실제 결과를 잘 반영한다. 또한, 성

능 측정 결과는 수학적 식으로 표현되므로 컴퓨터의 연산 능력에만 의존한 기존의 시뮬레이션에 비해 빠른 시간 내에 결과 도출이 가능하다. 특히 수식이 closed form으로 표현될 경우, 각 파라미터들과 시스템 성능과의 상관 관계를 직관적으로 알 수 있어 시스템 설계에 직접적으로 이용 가능하다. 마지막은 ad-hoc 네트워크, multi-tier 시스템과 같은 불확실성 요소가 많은 시스템의 성능 분석이 가능하다는 점이다<sup>[14]</sup>.

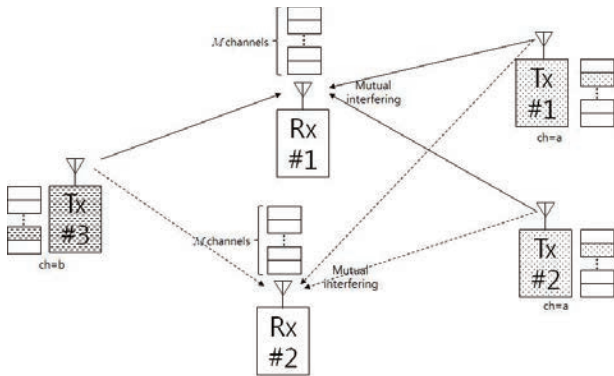
모든 노드들이 서로에 대한 정보를 가지지 않는 극단적인 상황의 경우, random access 기반의 인접성 인지 기술이 고려된다. 이 때 각 노드의 배치는 사업자가 기지국 배치를 조절할 수 있는 셀룰러 시스템과 다르게 완전 무작위이며, 인지 성공 확률은 잡음 신호보다 간섭 신호에 의해 영향을 받으므로 확률기하 바탕의 성능분석은 여러 면에서 유리하다. 본 장에서는 중점 최적화 파라미터별로 확률기하결과 분석에 기반을 둔 random access 인접 노드 인지 설계 사례를 소개한다.

### 가. 평균 인지 성공 노드 수 최대화

네트워크의 모든 노드가 half-duplex 모드로 discovery 신호를 송신하거나 수신할 때, 인지 성공 노드 수는 하나의 수신 노드가 성공적으로 복호할 수 있는 discovery신호의 개수를 의미한다. 따라서 평균 인지 성공 노드 수  $E(S)$ 를 최대화 하는 것은 인접 노드 인지 성능을 최대화 하는 것과 동치이다. 이 때 복호 성공 확률은 수신 SINR이 threshold  $\xi$ 를 넘을 확률로 표현 가능하고, 모든 노드가 같은 송신 전력을 이용하면 SINR은 송신 전력이 아닌 SNR의 영향을 받는다.

〈그림 6〉과 같이 송신노드는  $M$ 개의 채널중 하나를 선택하고, 수신노드는 전체 채널을 사용하여 인접 노드를 탐색할 때 각각의 채널 간 영향은 없으므로 각 채널별 송신노드의 분포는 독립적 점 과정으로 표현가능하다. 따라서  $E(S)$ 는 전체 사용 가능한 채널의 개수  $M$ 에 비례하는 성질을 갖는다.

**무선 네트워크의 노드의 위치는 많은 경우 2차원 또는 3차원 랜덤 점 과정으로 모델링 가능하고 네트워크 처리량과 같은 성능 지표들은 각 노드간의 거리에 영향을 받기 때문에, 확률기하를 이용한 네트워크 성능 분석 방법이 최근 들어 주목받고 있다.**



(그림 6) Bluetooth LE scanning/initiating 과정

무선 채널이 레일리 페이딩, 로그 노말 쉐도잉 그리고 손실 지수가 4인 경로 손실로 이루어져 있을 때, 시간 동기화된 노드 밀도  $\lambda$ 의 네트워크 평균 인지 성공 노드 수는 식 (2)로 표현 가능하다<sup>[15]</sup>.

$$E\{S\} = \frac{\pi^2 \bar{\lambda} \nu (1-\nu) \sqrt{p}}{\sqrt{\xi \sigma^2}} e^{\frac{1}{2} \kappa \nu^2} Q(\sqrt{\kappa} \nu \sqrt{p}) \quad (2)$$

$$\bar{\lambda} = \lambda e^{\frac{1}{2} \left( \frac{\log_{10} \chi}{5} - \frac{\chi}{4} \right)^2}, \kappa = \frac{\pi^4 \bar{\lambda}^2}{8M^2 \sigma^2}$$

이 때  $p, \chi, M, \nu, Q(x)$ 는 각각 송신 전력, 쉐도잉 지수, 사용 가능한 채널의 수, access probability, Q-함수를 의미한다.

식 (2)의 결과에 따르면 인접 노드 인지 성능은  $\chi, \lambda$  그리고  $M$ 의 값이 증가함에 따라 증가하나 그 영향은 잡음 전력  $\sigma^2$ 에 의해 saturation 된다. 또 다른 주목할 만한 점은 우리의 직관과는 다르게 큰 쉐도잉은 실질적인 노드 밀도  $\bar{\lambda}$ 를 증가시키고 이로 인해 인접 노드 인지 성능을 향상시킨다는 점이다.

식 (2)를 바탕으로 계산된  $E\{S\}$ 를 최대화 하는 access probability  $\nu^*$ 는 잡음 전력이 작을수록 0에 가까운 값을 갖게 되고, 사용 채널수가 많아져 충돌 개연성이 작아질수록 0.5에 가까운 값을 가지게 된다<sup>[16]</sup>.

#### 나. 소비 전력 최소화

낮은 소비전력은 이상적인 인접성 인지 기술의 요구

조건중 하나이다. 소비전력은 access probability 뿐만 아니라 송신 전력에 비례하기 때문에 공동 최적화를 통해 최적의  $\hat{\nu}$ 와  $\hat{p}$ 를 구해야 한다. 이를 위해 [17]의 저자는 단위 면적당 소모되는 전력인 ATP ( $=\lambda \nu p$ , area transmit power)를 정의하고 이를 이용해 전체 네트워크에서 인접성 인지에 소모되는 전력을 최소화 할 수 있는 값을 식 (3)과 같이 구하였다.

$$(\hat{\nu}, \hat{p}) = \begin{cases} \left( \frac{1-\eta}{2}, \frac{8\eta}{\kappa(1-\eta)^3} \right), & \text{if } \kappa P_{\max} \geq \frac{8\eta}{\kappa(1-\eta)^3} \\ & \text{, if } \eta \geq \frac{1}{4} \text{ and} \\ & \frac{27\eta}{4(1-\eta)^3} \leq \kappa P_{\max} \leq \frac{8\eta}{\kappa(1-\eta)^3} \\ (\mu, P_{\max}) & \text{or if } \eta < \frac{1}{4} \text{ and} \\ & \frac{8\eta}{1-2\eta} \leq \kappa P_{\max} \leq \frac{8\eta}{\kappa(1-\eta)^3} \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $\mu$ 는  $g(x)=0, 0 < x \leq \frac{1}{2}, 0 < x \leq \frac{2}{3}(1-\eta)$ 을 만족하는 임의의 값이며  $g(x) = x^3 - (1-\eta)x^2 + \frac{\eta}{\kappa P_{\max}}$ 이다.  $\eta$ 는 0과 1사이의 임의의 값이며 최적화 조건 완화 상수이다. 따라서 시스템 성능은 노드 밀도 등의 환경 조건뿐만 아니라  $\eta$ 와 같은 설계 조건에 종속적임을 알 수 있다. 또한 본 최적 파라미터를 이용하면 성능을 유지하면서도 최대 60% 정도까지 전력 사용량을 줄일 수 있음이 시뮬레이션을 통해 검증되었다.

**확률기하 모델은 random access 기반의 인접성 인지 기술 성능 평가에 매우 유용한 툴로 평가받고 있으며, 특히 시스템 최적화 파라미터를 계산하는데 큰 강점을 가지고 있다.**

### III. 결론

본 논문에서 다룬 인접성 인지 기술은 5G 무선 네트워크의 주요 특징 중 하나인 D2D 링크 형성에 필

수적일 뿐만 아니라 위치기반 서비스 등의 새로운 산업 분야를 창출 할 수 있다는 평가를 받고 있다. 하지만 현재 주로 사용되는 셀룰러 기반의 고속 시스템에서의 중요도가 상대적으로 떨어지고, 중앙 노드가 없는 특성상 복잡한 모델링이 필요해, 대부분의 연구결과는 peer-to-peer 또는 충돌기반의 간단한 모델링을 이용하였다.

이러한 면에서 확률기하 모델은 random access기반의



인접성 인지 기술 성능 평가에 매우 유용한 툴로 평가 받고 있으며, 특히 시스템 최적화 파라미터를 계산하는데 큰 강점을 가지고 있다. 앞으로는 discovery probability를 중시하는 통신시스템의 최적화 파라미터뿐만 아니라 위치 분해능 등의 관련 응용에 따라서 차별화된 목표에 따른 연구가 진행될 것으로 예상된다.

### 참고 문헌

- [1] Creating a digital 6th sense with LTE direct, Qualcomm Inc., 2014.
- [2] S. Sun et al., "Recent progress of long-term evolution device-to-device in third-generation partnership project standardization," IET Communications, vol. 9, no. 3, pp. 412-420, Dec. 2015.
- [3] D2D (device to device) 최신 기술 및 시장 동향, 한국방송통신전파진흥원, 2013.
- [4] 황유선 외, 3GPP D2D 기술의 표준화 동향, 정보통신산업진흥원 주간기술동향, 2013.
- [5] 3GPP 릴리스 12 기술규격 분석, 한국정보통신기술협회, 2015.
- [6] X. Lin et al., "An overview of 3GPP device-to-device proximity services," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 4, pp. 40-48, Apr. 2014.
- [7] M. S. Corson et al., "Toward proximity-aware internetworking," IEEE Wireless Communications, vol. 17, no. 6, pp. 26-33, Dec. 2010.
- [8] X. Wu et al., "FlashLinQ: A synchronous distributed scheduler for peer-to-peer Ad Hoc networks," IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 21, no. 4, pp. 1215-1228, Aug. 2013.
- [9] 강진환 외, "차세대 통신 시스템을 위한 D2D 통신: 기술 동향," 전자공학회지, 제 39권 제 3호, pp. 47-55, 2012 3월.
- [10] 양모찬 외, "LTE-Advanced 네트워크에서 D2D 통신 기술 동향," 전자공학회지, 제 39권, 제 11호, pp. 47-55, 2012년 11월.
- [11] M. Kohne and J. Sieck, "Location-based services with iBeacon technology," International Conference on Artificial Intelligence, Modelling and Simulation, Madrid, Spain, pp. 315-321, Nov. 2014.
- [12] J. Liu et al., "Modeling and performance analysis of device discovery in Bluetooth Low Energy networks," IEEE Global Communication Conference, Beijing, China, pp. 1538-1543, Dec. 2012.
- [13] J. Liu et al., "Modeling neighbor discovery in Bluetooth Low Energy networks," IEEE Communications Letters, vol. 16, no. 9, pp. 1439-1441, Sept. 2012.
- [14] M. Haenggi, Stochastic geometry for wireless networks, Cambridge University Press, 2012.
- [15] T. Kwon and J.-W. Choi, "Spatial performance analysis and design principles for wireless peer discovery," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 13, no. 8, pp. 4507-4519, Aug. 2014.
- [16] T. Kwon, "Transmission probability design for random access based wireless peer discovery," IEEE Communications Letters, vol. 18, no. 9, pp. 1603-1606, Sept. 2014.
- [17] T. Kwon, "Green random access for wireless peer discovery," IEEE Communications Letters, vol. 19, no. 2, pp. 183-186, Feb. 2015.



한 성 민

- 2012년 2월 한국기술교육대학교 전자공학 학사
- 2012년 3월~현재 대구경북과학기술원  
정보통신융합공학전공 석박사통합과정

〈관심분야〉  
통신이론, 통신네트워크



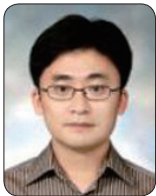


권태수

- 2001년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 학사
- 2003년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 석사
- 2007년 2월 한국과학기술원 전자전산학과 박사
- 2007년 1월~2011년 2월 삼성종합기술원 전문연구원
- 2011년 1월~2011년 11월 Stanford University 박사후연구원
- 2011년 12월~2012년 8월 Univ. of British Columbia 박사후연구원
- 2012년 9월~2013년 1월 한국과학기술원 연구부교수
- 2013년 3월~2015년 8월 한국전자통신연구원 선임연구원
- 2015년 9월~현재 서울과학기술대학교 조교수

〈관심분야〉

통신네트워크, 최적화, 확률기하, 데이터분석



최지웅

- 1998년 2월 서울대학교 전기공학부 학사
- 2000년 2월 서울대학교 전기공학부 석사
- 2004년 8월 서울대학교 전기컴퓨터공학부 박사
- 2004년 9월~2005년 10월 서울대학교 반도체 공동연구소 박사후연구원
- 2005년 10월~2007년 7월 Stanford University 박사후연구원
- 2007년 8월~2010년 10월 Marvell Semiconductor 책임연구원
- 2010년 10월~2014년 8월 대구경북과학기술원 (DGIST) 조교수
- 2014년 9월~현재 대구경북과학기술원 (DGIST) 부교수

〈관심분야〉

통신이론, 통신신호처리, 자기장통신, 뇌-기계 인터페이스