

밀리미터파 대역에서의 랜덤 접속 기반 무선 인접 장치 탐색 성능 분석

신국희*, 최상원*, 권태수^o

Performance Evaluation of Random Access Based Wireless Neighbor Discovery over mmWave Spectrum

Guk-Hui Shin*, Sang Won Choi*, Taesoo Kwon^o

요약

매우 많은 스마트 장치가 연결되어 있는 5세대(5G, 5th generation) 이동통신 환경에서 무선 인접 장치 탐색 기술은 상호 인접성 기반의 다양한 서비스를 제공하기 위한 근간 기술로 최근 주목을 받고 있다. 특히 5G 서비스 주파수 중 하나인 밀리미터파 대역에서의 인접 장치 탐색은 고용량 전송률을 지원하는 새로운 근접 위치 기반 서비스 출현을 이끌 수 있을 것으로 기대된다. 이에 따라, 밀리미터파 대역에서 장치 탐색의 네트워크 차원 성능 분석은 새로운 근접 위치 기반 서비스 설계를 위한 기반 연구가 될 수 있다. 하지만 기존의 밀리미터파 네트워크 차원 성능 분석은 주로 다중셀 네트워크와 같은 단대단 통신 성능이 분석되었으며, 인접 장치 탐색 성능에 대한 연구는 부족하다. 이러한 점에서 본 논문에서는 밀리미터파 대역의 전파 전달 속성을 반영함으로써 네트워크 차원의 무선 장치 탐색 성능을 분석한다. 이를 위해 기존 확률 기하 기반의 결과들을 활용한 무선 인접 장치 탐색을 위한 간소화된 시스템 모델을 정립하고, 밀리미터파 대역 고유 특징인 방해물 효과, 빔포밍 효과가 장치 탐색 성능에 미치는 영향을 분석하고, 6GHz 이하 대역의 성능과 비교한다.

Key Words : mmWave, peer discovery, neighbor discovery, D2D communication, system level simulation

ABSTRACT

In the 5G (5th generation) mobile communications, where a large number of smart devices are connected, the wireless neighbor discovery has attracted an attention as a basic technology for providing various services based on mutual proximity. In particular, the neighbor discovery over millimeter wave (mmWave), which is a spectrum for 5G services, is expected to lead to the emergence of new proximity based services that support a high data rate. In this regard, the network-level performance evaluation of neighbor discovery over mmWave spectrums can become a basis for new service designs. However, conventional network-level performance evaluations in mmWave has been primarily done for unicast communications such as multicell networks, and there is a lack of research on the neighbor discovery in mmWave. In this sense, this paper evaluates the network-wide performances

※ 이 성과는 2018년도 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016R1C1B1006616).

• First Author : (ORCID:0000-0001-8007-5763) Seoul National University of Science and Technology, Department of Computer Science and Engineering, saguri1004@seoultech.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6624-4863) Seoul National University of Science and Technology, Department of Computer Science and Engineering, tskwon@seoultech.ac.kr, 중신회원

* (ORCID:0000-0002-5464-5766) Korea Railroad Research Institute, Train Control & Communication Research Team, swchoi@krii.re.kr, 정회원

논문번호 : 201810-333-A-RE, Received October 15, 2018; Revised December 5, 2018; Accepted December 11, 2018

of the wireless neighbor discovery through reflecting the propagation properties of mmWave. To this end, this study builds a simplified system model through applying stochastic geometry based results, analyzes the performance impacts of blockages and beamforming that are inherent properties of mmWave, and compares the performances with those over a below 6GHz.

I. 서 론

최근 몇 년간 기하급수적 스마트장치 수의 증가와 사물인터넷(IoT, Internet of Things) 시대의 도래로 다수 장치 간 직접통신(D2D, Device-to-Device)에 대한 관심이 점차 고조되고 있다. 그 중 인접 장치 간 탐색은 D2D 네트워크나 센서 네트워크에서 송수신 장치 간의 상호 식별뿐만 아니라, 근접 위치 인접성 기반 서비스(ProSe, Proximity based service) 제공을 위한 근간 기술로 사용된다. 특히 무수히 많은 스마트장치가 연결되는 5G(5th Generation) 이동통신에서, 근접 위치 기반 서비스는 현재 고려되고 있는 공공안전 서비스, 인접성 기반 소셜 네트워크 서비스뿐만 아니라 수많은 사물인터넷을 활용한 인접성 기반 서비스들이 출현할 것으로 예상된다. 한편 5G의 표준주파수 중 하나인 밀리미터파 대역은 광대역 확보에 용이하여 대용량의 멀티미디어 서비스나 자율 주행을 위한 차량 간 통신에 응용될 수 있다는 점에서 차세대 인접성 기반의 서비스를 위한 주파수 대역으로 주목받고 있다. 밀리미터파 대역은 기존 인접성 기반 서비스에서 주로 사용되던 6GHz 이하 대역과는 차별되는 고유한 특징을 갖고 있다. 1) 신호의 경로감쇄가 크고, 방해물의 영향이 크다는 점. 2) 파장이 짧아, 다수의 안테나를 이용해 신호 이득을 높일 수 있어 앞선 경로감쇄를 보상해줄 수 있는 이점이 있다. 따라서 밀리미터파 대역에서 인접 장치 탐색은 앞서 언급한 밀리미터파 고유 주파수 특성이 반영된 무선 네트워크 차원의 성능 분석이 요구된다. 지난 몇 년간 네트워크 성능 분석 방법 중에서 주목 받고 있는 확률 기하(stochastic geometry) 이론 기반의 네트워크 차원 성능 분석은 주요 변수간 상관관계를 수학적으로 표현할 수 있는 장점을 제공한다. 하지만 밀리미터파 대역에서 확률 기하 이론 기반 성능 결과는 6GHz 이하 대역 대비 변수간 관계의 복잡성으로 인해 상대적으로 복잡한 수학적식을 가지고 있다. 이에 따라 매개변수간의 상관관계를 명확히 도출하기 어려운 한계를 가진다. 또한 대부분의 밀리미터파 대역의 네트워크 차원의 성능 분석은 이동통신 환경을 중심으로 분석되었으며, 장치 탐색을 위한 시스템 모델이나 정량화된 성

능 결과가 부족하다. 따라서 본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 장치 탐색 성능 분석을 위해 확률 기하 기반의 간소화된 시스템 모델을 정립하고 해당 모델에 기반한 시스템 차원 시뮬레이션을 수행하여 탐색 성능 속성을 분석한다.

기존 LTE D2D 통신 기술은 3GPP(Third generation partnership project)에서 ProSe를 위한 표준화가 진행되었으며, 이 중 장치 간 탐색은 ProSe direct discovery로 표준화가 진행되었다.^[1] 현재까지 대부분 연구는 [1]의 모델을 기반으로 6GHz 이하 대역에서의 시스템 차원 시뮬레이션 및 수학적 근사화를 통해 분석되어왔다.^[2-5] [2]의 연구에서는 장치 탐색 동작 매개변수간의 영향을 분석하기 위해, 간단한 수학적식으로 이를 모델링하고, 적은 자원을 활용해 탐색 성능을 향상 시키는 프로토콜을 제안했다. [3]의 연구에서는 탐색 성능 분석을 위한 채널을 확률 기하를 통해 모델링 하였다. 특히 잡음과 Rayleigh 페이딩을 사용하여, 닫힌 형태(closed form)의 수학적식을 보였지만 매개 변수가 탐색 성능에 미치는 영향을 명확히 표현하지 못한 한계가 있다. [4]의 연구에서는 확률 기하를 통해 6GHz 이하 대역에서의 장치 탐색 시스템 모델을 설계하여, 경로 감쇄, 페이딩, 음영효과 등 각종 무선 채널 매개 변수들이 장치 탐색 성능에 미치는 영향에 대하여 분석하고, 이들 무선 채널 매개 변수들과 장치 탐색 성능 간의 상관관계를 닫힌 형태의 근사화된 식으로 정량화하였다. [5]의 연구에서는 경로감쇄 지수(pathloss exponent)가 4인 경우에 대해 보다 정확한 성능 근사화 수학적식과, [4]의 연구에서 도출하였던 동작변수들로 구성된 방정식의 근 형태의 최적 송신 확률이 아닌 Lambert W 함수를 이용하여 닫힌 형태의 부 최적해를 도출하였다.

한편, 밀리미터파 대역의 연구는 5G 기술의 등장과 함께 본격적으로 연구되고 있으며, 최근에는 셀룰러 시스템뿐만 아니라 D2D 통신 기술에서도 활발히 연구가 진행 중이다.^[6,7] [6]의 연구는 밀리미터파 대역 셀룰러 통신 성능 분석을 위하여, 밀리미터파 대역의 고유 특징에 따른 확률 기하 모델링 방안을 제시했다. 특히 간소화된 방해물 모델과 안테나 모델을 제시함으로써 밀리미터파 대역의 확률 기하 분석의 근간을

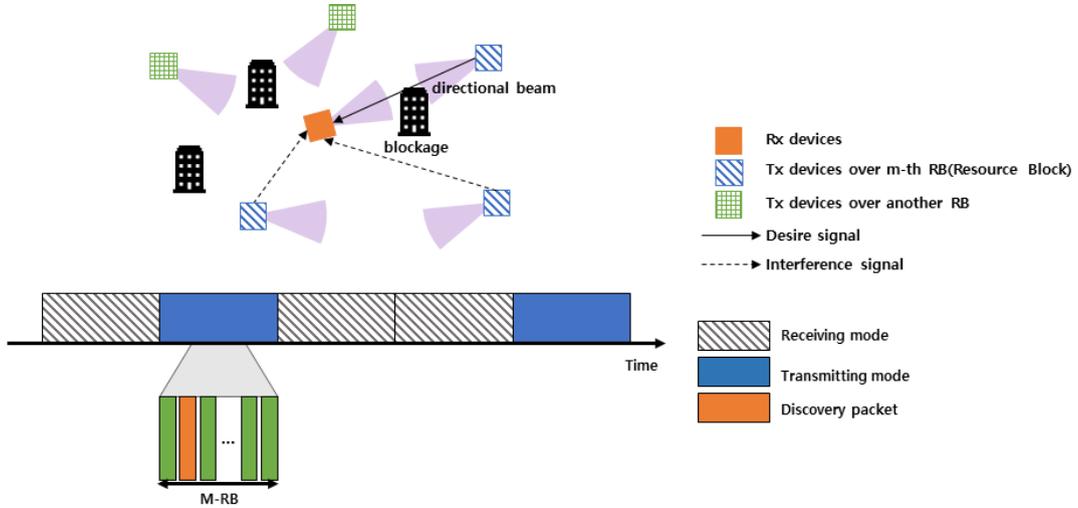


그림 1. 무선 인접 장치 탐색 모델
Fig. 1. Wireless neighbor discovery model.

제공했다. [7]은 군집화 된 밀리미터파 대역의 D2D 통신 성능을 분석한 연구로서 밀리미터파 대역의 채널 모델을 반영하여 평균 주파수 효율 측면에서 성능을 분석하였다. 특히 확률 기하를 통해 커버리지 확률과 주파수 효율을 정량화하고 이를 단편 형태의 식으로 근사화 하였다. 하지만 Rayleigh 페이딩 채널 모델에 한정되는 한계를 가진다.

본 논문의 주요 결과는 다음과 같다. 1) 밀리미터파 인접 장치 탐색 성능 분석을 위한 시스템 모델을 정립한다. 이를 위해 기존 확률 기하 기반 성능 분석 결과들에 근거하여 밀리미터파 대역의 고유 특징인 방해물 효과와 빔포밍 효과를 반영한다. 2) 시스템 차원 시뮬레이션을 통해 밀리미터파 장치 탐색 성능을 분석한다. 특히 밀리미터파 고유 특징을 나타내는 매개변수가 탐색 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 확인한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 밀리미터파 대역에서 네트워크 차원의 성능 분석을 위한 시스템 모델을 기술 한다. III장에서는 밀리미터파 대역의 장치 탐색 모델을 정립하고 특히 6GHz 이하 대역과 비교하여, 밀리미터파 대역에서 고려되는 동작 변수들이 탐색 성능에 미치는 영향을 요약 기술한다. IV장에서는 앞선 장에서 언급한 동작변수에 따른 탐색 성능을 구체적으로 분석 하고, 마지막 V장에서는 결론을 기술한다.

II. 밀리미터파 대역에서 네트워크 차원 성능 분석 시스템 모델

2.1 시스템 모델 및 프로토콜

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서의 랜덤 접속 기반 무선 인접 장치 탐색 시스템 모델과 동작 프로토콜을 그림 1과 같이 고려한다. 그림 1은 6GHz 이하 대역을 고려한 [4]의 시스템 모델을 기반으로 수정된 모델로써, 무선 장치들이 2차원 공간상에 균일 포아송 점 과정(PPP, Poisson point process)에 따라 분포하고, 각 장치는 ρ 의 확률로 탐색 메시지를 직교하는 리소스 블록 M 개 중 하나를 임의로 선택하여 전송한다. 송신 메시지는 [4]의 모델과는 달리 밀리미터파 대역 전파 특성인 방해물 효과와 다중 안테나를 통한 송수신 신호이득이 반영되어 수신 장치로 전달된다. 탐색 메시지를 전송하지 않는 나머지 $1 - \rho$ 의 확률을 가진 수신 장치들은 송신 장치로부터 수신한 탐색 메시지의 SINR(signal to interference plus noise ratio)이 임계값 ξ 보다 크면 해당 송신 메시지를 보낸 장치 탐색에 성공했다고 가정한다.

2.2 채널 모델 및 안테나 모델

밀리미터파 대역은 6GHz 이하 대역과 달리 신호의 직진성이 강하고, 방해물에 의한 회절, 투과, 반사가 잘 일어나지 않아 방해물에 의해 채널 환경이 크게 달라진다. 그러므로 밀리미터파 대역에서는 송수신 장치 간 방해물 환경에 따라 LoS(Line of Sight), NLoS(Non Line of Sight)의 채널이 구분되어 고려되

어야 한다. 따라서 수신 모드에 있는 장치 x_i 가 탐색 메시지를 송신 하는 장치 y_j 로 받는 송신 메시지의 전력 $P_{i,j}$ 은 다음과 같다⁶⁾.

$$P_{i,j} = \begin{cases} P_0 A_L B_{i,j} |h_{i,j}|^2 \|y_j - x_i\|^{-\alpha_L} & (\text{LoS}) \\ P_0 A_N B_{i,j} |h_{i,j}|^2 \|y_j - x_i\|^{-\alpha_N} & (\text{NLoS}) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 P_0 는 장치의 송신전력, A_L , A_N 은 각각 LoS와 NLoS 환경에서 단위 거리(1km)당 경로감쇄를 나타낸다. $h_{i,j}$ 는 송수신 장치 간 Nakagami- m 페이딩 이득을 나타내며, Nakagami- m 페이딩 변수는 채널

환경 LoS와 NLoS를 각각 구분하여 적용한다. 경로감쇄 지수(α)는 채널 송수신간에 방해물에 의한 채널효과를 반영하여 결정하며, 송수신 장치 간 채널 환경을 확률로 결정하는 모델인 [6]에서 제안한 식 (2)의 일반화된 LoS Ball 모델을 고려한다.

$$p_{\text{LoS}}(d) = p_l \mathbf{1}(d < r_b). \quad (2)$$

위 모델은 방해물 매개변수 r_b , p_l 을 통해 손쉽게 방해물에 의한 채널 효과를 표현할 수 있고, 성능 분석에 용이한 장점이 있다. 또한 대부분의 실제 환경에서 3GPP UMi 모델 대비 커버리지 확률을 잘 추정하는 것으로 알려져 있다⁶⁾. $p_{\text{LoS}}(d)$ 는 송수신 장치 거리 d 에 따른 확률로써, 1에 가까울수록 LoS가 될 개연성이 큰 것을 의미한다. 여기서 $\mathbf{1}(d < r_b)$ 는 지시 함수로 송수신 장치의 거리 d 가 LoS ball 반경 r_b 보다 작으면 1을, 그렇지 않으면 0을 나타낸다. 따라서 송수신 장치 간의 거리가 r_b 보다 같거나 크다면 송수신 장치 사이의 채널은 NLoS로 결정되며, 그 외의 경우 [0, 1]의 균등 랜덤 변수를 나타내는 p_l 의 확률로 결정된다. $B_{i,j}$ 는 무선 장치 간 빔포밍을 통한 송수신 이득으로, 밀리미터파 대역은 파장이 짧아 다수의 안테나를 이용한 빔포밍 기술을 통해 신호이득을 높여 경로감쇄에 따른 성능 저하를 극복 한다. 본 논문에서 각 무선 장치들은 균일 평면 정사각 배열(uniform planar square array) 안테나를 고려하여 [8]에서 제안한 섹터화된 안테나 모델을 적용한다. 이 모델은 안테나 수에 따라서 메인 로브(main lobe) 이득(G), 사이드 로브(side lobe) 이득(g), 빔폭(θ)이 결정되며, 그 관계를 표 1에 나타내었다. 단, $N=1$ 인 경우에는 표 1의 관계를 따르지 않으며 이 때 θ 는 2π 로 G , g 는 모두 1

표 1. 안테나 매개변수[8]
Table 1. Antenna parameters[8].

Notation	Description	Definition
N	The number of antenna elements	N
θ	Half-power beamwidth	$\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{N}}$
G	Main lobe gain	N
g	Side lobe gain	$\frac{\sqrt{N} - \frac{\sqrt{3}}{2\pi} N \sin(\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{N}})}{\sqrt{N} - \frac{\sqrt{3}}{2\pi} \sin(\frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{N}})}$

표 2. 송수신 장치 간 빔포밍 이득과 확률
Table 2. Beamforming gains between transceivers and their probability.

case	1	2	3	4
$B_{i,j}$	$G^{tx} G^{rx}$	$G^{tx} g^{rx}$	$g^{tx} G^{rx}$	$g^{tx} g^{rx}$
ν_i	$\frac{\theta^{tx}}{2\pi} \cdot \frac{\theta^{rx}}{2\pi}$	$\frac{\theta^{tx}}{2\pi} \cdot \frac{(2\pi - \theta^{rx})}{2\pi}$	$\frac{(2\pi - \theta^{tx})}{2\pi} \cdot \frac{\theta^{rx}}{2\pi}$	$\frac{(2\pi - \theta^{tx})}{2\pi} \cdot \frac{(2\pi - \theta^{rx})}{2\pi}$

인 전 방향(omni-direction)으로 이득 없이 신호가 전달되는 안테나 모델을 고려한다. 한편, 송수신 장치 간의 빔 매칭은 균일 확률 변수를 통해 결정 하는 [6]의 모델을 따르며, 송수신 장치 사이의 빔포밍 이득($B_{i,j}$)과 확률(ν_i)은 표 2와 같다. 표 2와 같이 송수신 장치는 각각의 메인 로브와 사이드 로브를 결정하여, 총 4가지의 경우로 빔포밍 이득이 결정된다.

III. 밀리미터파 인접 장치 탐색 성능 모델 : 6GHz 이하 대역 vs 밀리미터파 대역

II장에서와 같이 밀리미터파 장치 탐색 모델에서 무선 장치는 밀도 λ 에 따라 균일 PPP로 공간에 분포되어 있고, 장치 탐색 동작에 따라 송수신 장치를 결정 한 뒤, 수신 장치는 탐색 동작을 수행한다. 수신 장치 x_i 가 송신 장치 y_i 의 신호를 탐색할 때, 탐색 성공 여부는 y_i 로부터 수신한 전력의 SINR로 결정하며, SINR이 임계값 ξ 를 넘었을 때 탐색에 성공하게 된다. 이 때 SINR(Ξ)은 다음과 같이 정의된다.

$$\Xi \triangleq \frac{P_0 h \Gamma(G, g, \theta) L(r_b, p_b, d)}{I_L + I_N + \tilde{\sigma}^2}. \quad (3)$$

밀리미터파 장치 탐색 성능은 장치 탐색에 성공한 평균 탐색 성공 장치의 수 $E\{S\}$ 로 평가하며, (3)의 SINR식에 따라서 $E\{S\}$ 는 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 E\{S\} &= E\{\mathbf{1}(Z_i=0)\sum\mathbf{1}(Z_i=1)\mathbf{1}(\Xi_i(h, G, g, \theta, r_b, p_l, d_i) > \xi)\} \\
 &= \rho(1-\rho)E\{\sum\mathbf{1}(\Xi(h, G, g, \theta, r_b, p_l, d) > \xi)\} \\
 &= \rho(1-\rho)E\left\{\sum\mathbf{1}\left(\frac{P_0 h \Gamma(G, g, \theta) L(r_b, p_l, d)}{I_L + I_N + \sigma^2} > \xi\right)\right\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 Z_i 는 장치의 탐색 상태를 나타내는 표현으로 $Z_i=0$ 이면 수신 모드를 $Z_i=1$ 이면 송신 모드를 나타낸다. I_L 과 I_N 은 각각 LoS 채널환경과 NLoS 채널환경에 있는 장치로부터 받는 간섭전력을, σ^2 은 잡음전력을 나타내며, $\mathbf{1}(\cdot)$ 은 지시 함수를 나타낸다. $\Gamma(G, \theta, g)$ 는 송수신 장치 간의 빔포밍 이득으로 2.2의 안테나 모델에 의해서 결정된다. 장치 탐색 시스템에서는 메인 로브뿐만 아니라 사이드 로브 송수신 빔을 통해서도 메시지를 송수신하는 상호방송을 고려하므로, 밀리미터파 단대단 통신에서 송수신 장치 간의 빔매칭이 이루어져, 오직 메인 로브를 통한 상호 통신을 고려했던 것과 구분된다. $L(r_b, p_l, d)$ 은 경로감쇄 함수로 LoS ball 모델을 통해 방해물의 밀도를 확률적으로 모델링한다. 송수신 장치 간 채널 환경은 탐색하고자 하는 메시지의 신호뿐만 아니라 간섭 신호에도 영향을 미치므로, 탐색 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소가 된다. 따라서 송신확률 ρ 의 설계는 6GHz 이하 대역에서의 장치 탐색 모델이 송신전력, 장치의 밀도에 의존적이었다면, 밀리미터파 대역의 탐색 모델에

서는 밀리미터파 시스템 속성인 안테나 이득, 빔폭, 방해물 밀도 또한 송신확률 설계에 반영 되어야 한다.

본 장에서 정립한 모델을 토대로 탐색 성능 측면에서 밀리미터파 시스템 속성들을 요약하고, 6GHz 이하 대역과 비교하여 표 3에 나타내었다. 방해물 요소는 전체 밀리미터파 송수신 장치 간의 채널 환경을 결정하고, 결정된 채널 환경이 탐색 대상의 신호와 간섭 신호에 영향을 주게 되므로, 탐색 성능에 가장 큰 영향을 미친다. 빔포밍 요소는 사이드 로브를 통해서도 탐색 신호를 송수신 하는 상호 방송환경이므로, 전체 성능은 빔폭이 넓을수록 비교적 좋은 성능을 보이며, 빔 이득이 클수록 멀리까지 신호 전달이 가능해지기 때문에 상대적으로 멀리 있는 장치 탐색 성공이 증가하게 된다. 보다 상세한 장치 탐색 성능 분석은 IV장에 기술하였다.

IV. 밀리미터파 환경에서의 무선 인접 장치 탐색 동작의 시뮬레이션 기반 네트워크 차원 성능 분석

앞선 장에서 제안한 간소화된 시스템 모델을 통해 밀리미터파 대역에서 랜덤 접속 기반 무선 인접 장치 탐색의 네트워크 차원 성능을 시스템 차원 시뮬레이션을 통해 살펴본다. 특히, 6GHz이하 대역과 차별화된 특징인 방해물 효과, 빔포밍 효과가 탐색성능에 미치는 영향을 분석한다. 또한 [4]의 연구와 마찬가지로 매개변수가 잡음의 영향이 무시되는 간섭 제한 환경과 잡음의 영향을 무시할 수 없는 환경에 따라 구분하여 성능을 확인한다. 성능분석에 사용되는 매개변수는 특별한 언급이 없는 한 표 4를 따른다.

표 3. 밀리미터파 및 6GHz 이하 대역 간 무선 인접 장치 탐색 속성 비교
Table 3. Comparison of neighbor discovery properties over mmWave and sub 6GHz.

		Sub 6GHz [4]	MmWave
Channel effect	pathloss	Single path loss exponent (only NLoS)	Double path loss exponents for LoS or NLoS
	blockage	Only NLoS (Rayleigh fading) Simple and homogeneous impact	Distinction of LoS and NLoS E.g., generalized LoS ball model described by LoS ball radius (r_b) and probability (p_l) $E\{S\}$ depending on r_b and p_l
Antenna elements	beamwidth	Omni-directional ($\theta = 2\pi$)	Sectorized beam model $E\{S\}$ increasing with θ , but saturated
	beam gain	Flat gain ($G = g = 1$)	Combination of transmit and receiving beam gains between transmitters and receivers $E\{S\}$ in NLoS increasing with $\gamma = G/g$
Transmission probability		Design of transmission probability: depending on λ and P_0	Design of transmission probability : depending on r_b, p_l as well as λ, P_0 (also, considering θ and G)

표 4. 시스템 모델 매개변수 설명 및 설정 값
Table 4. Description and values of system model parameters.

Notation	Description	Value
P_0	Transmission power	23dBm
λ	Avg. number of devices per 1 km ²	400km ⁻²
M	The number of resource block	10
ξ	SINR Threshold	0 dBm
A_L, A_N	Pathloss at 1km (LoS, NLoS)	-124.343, -157.043 dBm
α_L, α_N	Pathloss exponent (LoS, NLoS)	2.1, 3.19
H_L, H_N	Nakagami-m variable (LoS, NLoS)	1, 3
γ	Main lobe gain to side lobe gain ratio	G/g
σ^2	Noise power (360KHz)	-118.44 dBm

4.1 방해물 효과에 따른 장치 탐색 성능

방해물 효과에 따른 탐색 성능을 확인하기 위해 빔폭 $\theta = 2\pi$ 인 빔포밍 신호이득이 없는 방송메시지를 간섭 제한 환경과, 잡음의 영향이 유효한 환경에서 채널상태에 따른 탐색 성능을 보인다. 여기서 채널상태는 채널을 결정하는 변수 r_b 와 p_l 을 통해 조절한다. 그림 2는 LoS ball 반경 r_b 가 탐색 성능 $E\{S\}$ 에 미치는 영향을 보여준다. r_b 가 증가하면 송수신 장치 간 LoS 채널 환경에 놓인 장치들의 수가 증가하는 것으로, 탐색대상의 신호가 LoS 채널이 될 뿐만 아니라, 간섭 대

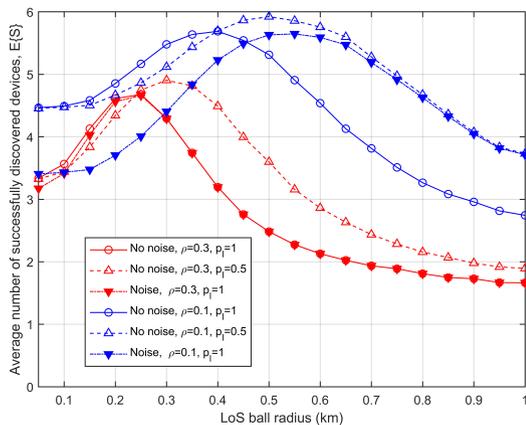


그림 2. LoS ball 반경에 따른 장치 탐색 성능
Fig. 2. Device discovery performance according to LoS ball radius.

상의 신호 또한 LoS 채널이 되는 개연성이 높아지게 된다. 따라서 r_b 가 점차적으로 커질 때 송수신 장치 간 LoS 채널에 있는 장치의 수가 증가하고, $E\{S\}$ 는 증가하게 된다. 하지만 간섭에 영향을 주는 장치의 수 또한 함께 증가하기 때문에 간섭 신호의 영향이 커지게 되면 $E\{S\}$ 는 점차 감소하게 된다. 만약 r_b 가 충분히 커지게 되면, 모든 장치가 LoS 채널 환경에 놓일 때의 성능으로 수렴하게 된다. 이는 밀리미터파 대역에서 장치 탐색 성능은 채널 환경에 매우 의존적이며, 특히 LoS 채널로부터 영향을 받는 간섭이 전체 성능에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. 따라서 밀리미터파 대역 장치 탐색 동작은 건물의 밀도 및 분포 등 실제 동작 하는 채널 환경에 맞추어 주의 깊게 설계되어야 함을 시사한다.

그림 3과 4는 $\theta = 2\pi$ 인 송수신 빔포밍 신호이득이 없는 환경에서 잡음의 영향이 무시되는 간섭 제한 환경과 잡음의 영향이 무시될 수 없는 환경에서 채널 상태에 따른 탐색 성능을 보여 준다. 그림 3에서 6GHz 이하 대역에서 장치 탐색 성능 결과와 마찬가지로, ρ 가 0으로 수렴할 때, 네트워크 내에서 탐색메시지는 상호 간의 충돌 없이 전달이 가능한 것을 의미한다.^[4] 하지만 이는 네트워크 전체 장치 중 충돌 혹은 간섭만 없다면 매우 먼 장치도 탐색한다는 의미로 실제 환경에서 불가능한 환경이므로, 잡음이 영향을 포함한 환경이 고려되어야 한다. 그림 4는 잡음의 영향을 받는 환경에서 전체 송수신 채널 환경이 LoS인 경우를 제외하고, $E\{S\}$ 가 최대를 보이는 최적 송신 확률($\hat{\rho}$)이 존재함을 보여준다. 이 때 $\hat{\rho}$ 은 LoS ball 모델 내에서 p_l 의 값이 증가할 때, 전체적으로 증가하다 다시 감소

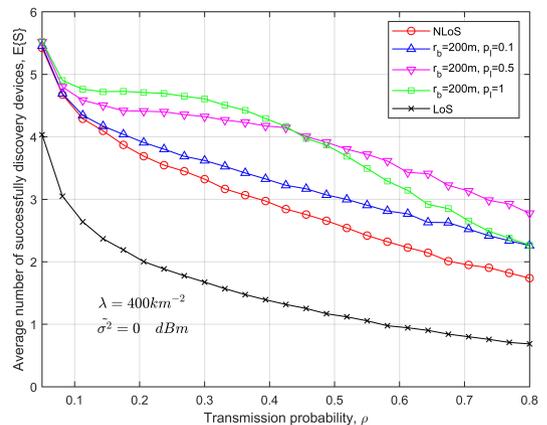


그림 3. 간섭 제한 환경에서 채널 상태별 장치 탐색 성능
Fig. 3. Device discovery performances in interference limited channel environment by each channel state.

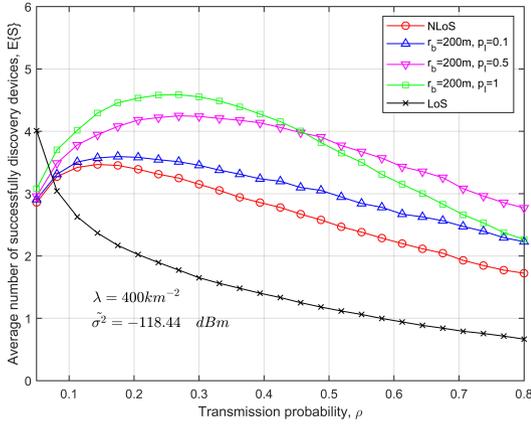


그림 4. 잡음이 있는 환경에서 채널 상태별 장치 탐색 성능
Fig. 4. Device discovery performances in nonzero noise environment by each channel state.

하는 것을 알 수 있다. 이는 p_i 가 1에 가까워질수록 LoS 환경에 놓인 간섭의 영향이 탐색 신호 보다 커지는 지점이 생김으로, 특정 p_i 값 이후에는 탐색 성능은 다소 줄어드는 경향을 보인다. 하지만 이 때 p_i 에 의한 간섭은 r_b 에 의해 LoS 환경에 놓인 장치로부터 간섭의 최대량이 한정되게 된다. 만약 r_b 가 충분히 크다면 전체 환경이 LoS이 환경으로 점차 수렴하게 되고, 이 때 α_L 이 작을수록 잡음의 영향이 없는 간섭 제한 환경에 가까워지는 경향을 보이게 된다. 따라서 6GHz 이하 대역과 달리 밀리미터파 대역에서 송신 확률 설계는 방해물 효과에 의한 채널 환경을 고려하여 설계될 필요가 있다.

4.2 안테나 수에 따른 장치 탐색 성능

그림 5, 6에서 볼 수 있듯이 안테나 수가 증가할수록 탐색된 장치 중 NLoS 채널 환경에 있는 장치의 수가 증가하고, 이와 함께 전체 탐색 성능은 향상됨을 알 수 있다. 이는 안테나 수의 증가에 따라 θ 는 좁아지고, 메인 로브 이득과 사이드 로브 이득의 비 γ 는 증가하게 되므로, N 이 증가함에 따라 증가된 빔포밍 이득을 통해 LoS 반경을 벗어나 먼 곳에서 송신하는 NLoS 채널 환경에 놓인 장치의 탐색이 가능해지고, 채널 환경이 좋지 않던 장치도 빔포밍 이득을 통해 탐색이 가능해지기 때문이다. 반면, LoS 채널에 놓인 장치의 탐색 성능은 미미하게 감소하지만 큰 차이를 보이지는 않는다. 이는 메인 로브와 사이드 로브를 통해 모두 장치 탐색을 할 수 있는 상호 방송이 고려되므로, 사이드 로브를 통해서도 충분히 LoS 채널에 놓인 장치 탐색에 성공할 수 있음을 의미한다. 따라서 상대

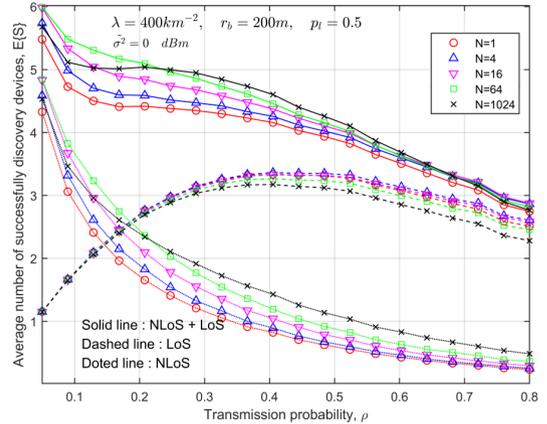


그림 5. 간섭 제한 환경에서 안테나 수에 따른 장치 탐색 성능
Fig. 5. Device discovery performances in interference limited environment by number of antenna elements.

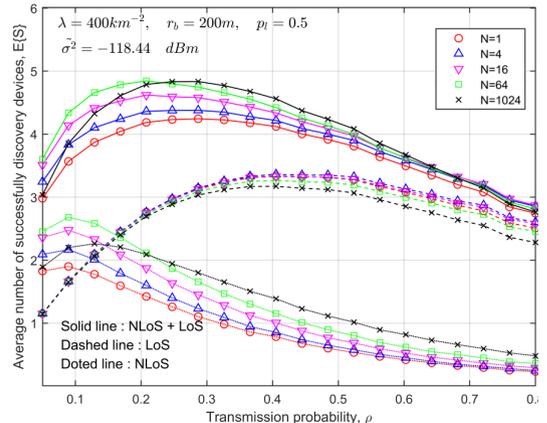


그림 6. 잡음이 있는 환경에서 안테나 수에 따른 장치 탐색 성능
Fig. 6. Device discovery performances in nonzero noise channel environment by number of antenna elements.

적으로 근거리에서 놓인 장치의 탐색은 안테나 수의 증가에 따라 성능에 큰 영향을 미치지 않으며, 원거리 혹은 채널 상태가 좋지 않은 장치의 탐색은 빔 이득 개선을 통해 성능을 향상시킬 수 있다.

4.3 안테나 개별 설계변수에 따른 장치 탐색 성능

그림 7은 γ 별 θ 에 따른 장치 탐색 성능을 나타내었다. 잡음의 영향이 없는 환경에서는 γ 에 무관하게 θ 가 증가함에 따라 $E(S)$ 는 증가 하다 감소하는 경향을 보인다. 이는 θ 가 넓어질수록 메인 로브를 통해 수신되는 탐색 메시지와 함께 메인 로브를 통한 간섭도 함께 증가하기 때문이다. 하지만 그림 7에서 $\gamma=30$ dB 일 때, 단봉함수의 형태를 보이지 않음은 향후 연

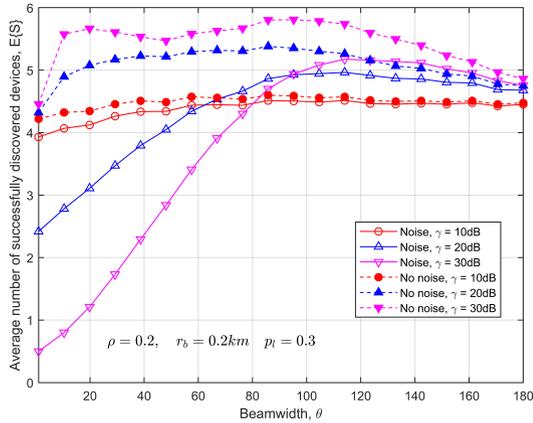


그림 7. 빔 이득 비 별 빔폭에 따른 장치 탐색 성능
 Fig. 7. Device discovery performance according to beamwidth by main & side lobe gain ratio.

구로 남겨둔다. 잡음의 영향이 있는 환경에서는 γ 가 클수록 θ 가 좁을 때 오히려 탐색 성능이 떨어지며, θ 가 증가할수록 탐색 성능이 향상되는 것을 확인 할 수 있다. 이는 사이드 로브로 들어오게 되는 탐색 신호가 잡음보다 작아 탐색에 실패하게 되고, θ 가 증가할수록 메인 로브를 통해 장치 탐색이 이루어짐에 따라 탐색 성능은 증가 된다. 이는 셀룰러 통신과 같은 단대 단 통신에서 θ 를 좁혀 간섭의 영향을 줄이는 것과 달리 장치 탐색은 θ 를 넓혀 다소 간섭이 있더라도 메인 로브를 통해 가능한 넓은 영역에 탐색 메시지를 송수신함으로써 탐색 성능을 개선할 수 있음을 시사한다.

V. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 인접 장치 탐색 성능 분석을 위해 확률 기하 기반의 간소화된 시스템 모델을 정립하고, 시스템 차원 시뮬레이션을 통하여 평균 탐색 성공 성능을 분석하였다. 정립한 시스템 모델은 밀리미터파 주파수 고유 특성을 반영하여 6GHz 이하 대역과 구분되는 특징인 방해물에 의한 채널 효과, 안테나 효과를 확률 기하 기반의 간소화된 모델을 통해 이를 반영하였다. 시뮬레이션 결과 탐색 성능은 밀리미터파 고유 특성인 채널환경, 안테나 빔 이득과, 빔폭에 의존적인 것을 알 수 있었다. 특히 채널환경의 경우 탐색 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소로써, 동작이 수행되는 건물, 차량 등과 같은 방해물의 분포에 따라 최적 송신 확률을 다르게 설계할 필요가 있다. 안테나 효과 중 빔 이득의 경우, 빔 이득이 증가함에 따라 NLoS 채널 환경에 놓은 장치를 더 많

이 찾을 수 있어, 탐색 성능이 향상됨을 알 수 있었다. 빔폭의 경우, 밀리미터파 셀룰러 통신과 달리 빔폭을 넓혀 다소 간섭이 있더라도 메인 로브를 통해 가능한 넓은 영역에 탐색 메시지를 송수신하는 것이 탐색 성능에 개선에 유리함을 알 수 있었다.

References

- [1] 3GPP TS 23.303 ver.15.1.0, *Proximity-based services(Prose)*; Stage 2, Jun. 2018.
- [2] Z.-J. Yang, J.-C. Huang, C.-T. Chou, H.-Y. Hsieh, C.-W. Hsu, P.-C. Y, and C.-C. A. Hsu, "Peer discovery for device-to-device (D2D) communication in LTE-A networks," in *Proc. 2013 IEEE Globecom Workshops*, pp. 665-670, Atlanta, GA, Dec. 2013.
- [3] F. Baccelli, N. Khude, R. Laroia, J. Li, and T. Richardson, "On the design of device-to-device autonomous discovery," in *Proc. Int. Conf. COMSNETS*, pp. 1-9, Bangalore, India, Jan. 2012.
- [4] T. Kwon and J.-W. Choi, "Spatial performance analysis and design principles for wireless peer discovery," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 4507-4519, Aug. 2014.
- [5] T. Kwon, "Derivation of transmission probability for performance improvement of wireless peer discovery," *J. KICS*, vol. 42, no. 11, pp. 2105-2108, Nov. 2017.
- [6] J. G. Andrews, T. Bai, M. N. Kulkarni, A. Alkhateeb, A. K. Gupta, and R. W. Heath, "Modeling and analyzing millimeter wave cellular systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 1, pp. 403-430, Jan. 2017.
- [7] M. Afshang, H. S. Dhillon, and P. H. J. Chong, "Modeling and performance analysis of clustered device-to-device networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 7, pp. 4957-4972, Jul. 2016.
- [8] Y. Wang, K. Venugopal, A. F. Molisch, and R. W. Heath, "MmWave vehicle to infrastructure communication: analysis of urban microcellular networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 67, no. 8, pp. 7086-7100, Aug. 2018.

신 국 희 (Guk-Hui Shin)



2017년 2월 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 졸업
2017년 3월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 석사과정
<관심분야> 5G, mmWave, 무선네트워크, 차세대이동통신

최 상 원 (Sang Won Choi)



2002년 2월 : 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업
2004년 3월 : KAIST 전자전산학과 전기 및 전자공학전공 석사
2010년 1월 : KAIST 전기 및 전자공학과 박사

2010년 2월~2014년 3월 : 삼성전자 무선사업부 책임연구원

2014년 4월~현재 : 한국철도기술연구원 열차제어통신연구팀 선임연구원

<관심분야> 차세대 이동통신 시스템, 통신 신호처리, 특수 목적 통신, 공공 안전망, 단말 알고리즘 개발, ICT 융합기술 연구개발

권 태 수 (Taesoo Kwon)



2001년 2월 : KAIST 전자전산학과 졸업
2003년 2월 : KAIST 전자전산학과 석사
2007년 2월 : KAIST 전자전산학과 박사
2007년 1월~2011년 2월 : 삼성종합기술원 전문연구원

2011년 1월~2011년 11월 : Stanford University Visiting Scholar

2011년 12월~2012년 8월 : University of British Columbia Postdoctoral Fellow

2012년 9월~2013년 1월 : KAIST 연구부교수

2013년 3월~2015년 8월 : 한국전자통신연구원 선임연구원

2015년 9월~현재 : 서울과학기술대학교 컴퓨터공학과 조교수

<관심분야> 통신네트워크, 최적화, 확률기하, 데이터과학