

IEEE 802.15.3c 기반에서 지향성 안테나를 사용했을 때의 이웃장치 탐지과정 분석

정회원 김 미 정*, 이 우 용**

Analysis of Neighbor Discovery Process with Directional Antenna for IEEE 802.15.3c

Meejoung Kim^{*}, Wooyong Lee^{**} *Regular Members*

요 약

밀리미터파 대역에서의 이웃장치 탐지는 이 대역의 통신에서의 필수 선제조건이므로 아주 중요하고 또한 긴급한 문제이다. 본 논문에서는 모든 장치에 지향성 안테나가 탑재되어 있는 경우 밀리미터파 대역 개인영역 무선네트워크에서 지향성 안테나의 효과를 기반으로 한 동기식, direct, two-way 지향성 이웃장치 탐지과정을 분석한다. 주어진 시간동안 발견되는 장치의 비율과 한 방향에서 머무르는 최적의 시간 등과 같은 측도를 수학적으로 표현하였다. IEEE 802.15.3c 표준을 기반으로 한 분석결과는 지향성 안테나를 사용하는 경우의 이웃장치 탐지의 효율성을 보여 준다. 본 연구는 밀리미터파 대역에서 이웃장치 탐지에 관한 이론적 기반을 제공할 것으로 보인다.

Key Words : Directional Neighbor Discovery, Sensing Region, IEEE 802.15.3c, Millimeter Wave, WPANs

ABSTRACT

The neighbor discovery using directional antennas in mmWave band is a prerequisite for communications and this issue is crucial and urgent. In this paper, the synchronized, direct, two-way directional neighbor discovery process is analyzed mathematically for mmWave WPANs. The analysis is based on the values which are derived from the effect of using directional antennas. The neighbor discovery probability for a given amount of time is considered and several performance measures such as the optimal sojourn time are derived in closed forms. Numerical results are obtained using parameters based on the IEEE 802.15.3c. The mathematical analysis provides the theoretical basis for the directional neighbor discovery process.

I. 서 론

이웃장치 탐지(Neighbor Discovery: ND)는 무선네트워크의 자기조직화(self-organization)에서 최우선적으로 이루어져야 하며 가장 중요한 단계이다. 대부분의 라우팅 프로토콜, 매체접근제어(Medium Access Control: MAC), 그리고 여러 다른 위상제어 알고리즘에서 원 홉 떨어진 이웃 장치에 대한 정보를 아는 것

은 기본적으로 중요하다.

ND 문제는 다음과 같은 이유로 어려움이 있다. (i) ND 알고리즘은 충돌에 잘 대처해야 한다. (ii) 실제 환경에서 장치들은 이웃장치의 수를 알 수 없기 때문에 언제 ND 과정을 끝내야 하는지 알 수 없다. (iii) 비동기 시스템에서 장치들은 각각 다른 시점에서 ND 과정을 시작하므로 다른 장치들이 전송하는 것을 알아채지 못할 수 있다.

※ 본 연구는 지식경제부 IT 연구개발사업인 "비/저활용 대역 소출력 무선기기용 전송기술 개발" 및 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (No. 2011-0026694).

* 고려대학교 공과대학 정보통신기술연구소(meejkim@korea.ac.kr) (°: 교신저자), ** 한국전자통신연구원(wylee@etri.re.kr), 논문번호: KICS2011-09-428, 접수일자: 2011년 9월 30일, 최종논문접수일자: 2012년 1월 2일

ND 프로토콜은 크게 자기광고(self-advertising) 패킷에 응답하는 방법과 매체에 접근하는 방법의 두 가지 다른 형태로 분류된다^[4]. 첫 번째 방법은 one-way ND와 two-way handshake-based ND, 두 번째 방법에서는 동기식 ND와 비동기식 ND로 더 세분된다. 또한 ND는 direct discovery와 gossip-based discovery로 구분할 수도 있다. 한 장치가 익명의 한 이웃장치로부터 정보를 받으면 그 장치는 그 이웃장치의 신원과 수신신호의 Angle-Of-Arrival(AOA) 정보를 기록한다. 만일 충돌이 일어나면 그 장치는 그 이웃장치를 탐지하지 못한다. 자기광고 패킷에는 송신전력과 수신장치의 신호대잡음비(Signal-to-Interference - Noise Ratio: SINR)와 같은 송수신에 필요한 정보가 포함되어 있다. 대부분의 현존하는 ND 알고리즘은 동기식으로 작동한다.

통신을 위하여 장치는 전방향 안테나가 탑재되었던 지향성 안테나가 탑재되었던 ND 과정을 수행한다^{[1][3][5]}. 지향성 안테나는 전방향 안테나에 비해 공간재활용(spatial reuse), 전송거리 확대, 그리고 용량증가와 같은 많은 장점이 있어서 무선통신에 폭넓게 사용될 수 있다. 특히, 수기가급 데이터 전송률을 지원하는 60 GHz 밀리미터파(millimeter-Wave: mmWave) 대역에서는 지향성 안테나를 사용함으로써 강우감쇄와 같은 이 대역의 특성으로 인하여 나타나는 단점을 보완해줄 수 있다. 그러나 지향성 안테나를 사용하는 경우의 ND는 장치가 그들의 안테나 방향을 제어해야 하므로 전방향 안테나의 경우보다 어렵고 복잡하다.

지향성 ND과정의 분석모델에 관해서 여러 연구가 있다. 대부분의 ND는 2차원 공간에서 분석되었으며, [6]는 3차원 공간에서 분석되었다. [7]에서는 60 GHz 대역에서 one-way, 동기식, 그리고 direct ND와 gossip-based ND 모두를 고려하였다. 지향성 안테나를 사용하는 모든 시스템에서의 전형적인 지향성 이웃장치 탐지(directional Neighbor Discovery: D-ND) 모델은 [5]에서 제안되었다.

본 논문에서는 IEEE 802.15.3c에 기반하여 무선통신에서의 D-ND 과정을 분석한다. 본 분석은 장치들 사이의 거리에 대한 확률밀도함수 및 지향성 안테나를 사용하는 경우에 한 장치의 감지영역이라는 개념을 도입하여 분석함으로써 기존의 분석과 차별화하였다. D-ND의 효율성은 장치들이 얼마나 자주 송수신하는지 뿐만 아니라 대역폭이나 안테나의 방사 효율도에도 의존한다. 이러한 관점에서 본 논문에서는 이웃장치 탐지에서의 최적의 모수를 고려한다. 분석의 목적은 주어진 시간 안에 이웃장치 탐지확률을 최대

화하는 것이다. 또한 한 장치가 원 홉 떨어진 모든 장치를 찾기 위해 자기광고 패킷을 몇 번 전송해야 하는지, 얼마나 자주 전송해야 하는지를 구체적으로 계산한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 D-ND 과정과 안테나 모델에 알아본다. 3장에서는 배타영역에 대해 알아보고 D-ND를 분석한다. 4장에서는 분석 결과를 살펴보고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

II. IEEE 802.15.3c MAC과 안테나 모델

802.15.3c의 기본 토폴로지는 피코넷이며 슈퍼프레임은 비컨(beacon) 구간, 경쟁구간인 Contention Access Period(CAP), 그리고 예약기반 데이터 전송구간인 Channel Time Allocation Period(CTAP)로 구성된다. IEEE 802.15.3c 에서의 ND 과정은 연결과정에 포함되며 CAP 구간에서 일어난다^[8].

ND 과정은 다음과 같다. 각 장치는 원 홉 떨어진 그들의 이웃장치들을 찾기 위해 안테나 방향으로 자기광고 패킷을 연속적으로 전송한다. 자기광고 패킷을 수신한 장치는 응답메시지를 전송한다. 자기광고 패킷이나 응답메시지를 수신한 장치는 AOA 기술을 이용하여 그의 이웃장치들의 방향을 추정하고 그 정보를 그의 이웃정보 리스트에 기록한다. 모든 장치들은 그의 이웃장치들에 관한 모든 정보를 piconet coordinator(PNC)에게 보낸다. PNC는 수신한 정보를 이용하여 피코넷의 위상정보를 업데이트 및 유지한다.

안테나 모델로는 flat-top model과 cone plus sphere model이 있다. 본 연구에서는 2차원에서의 cone plus circle model을 고려한다. 이 경우 메인로브와 사이드로브에서의 안테나 이득(gain)은 각각 $G_m = 2\pi\eta/\theta$ 와 $G_s = 2\pi(1-\eta)$ 로 주어진다. η 와 θ 는 각각 안테나의 방사 효율도와 메인로브의 안테나 각이다. IEEE 802.15.3c의 채널 경로손실모델을 사용한다^[9].

III. 이웃장치 탐지과정 분석

3.1 감지영역과 배타영역

ND과정이 CAP 구간에서 일어나므로 지향성 CSMA/CA(Directional CSMA/CA: D-CSMA)를 고려한다. D-CSMA/CA 과정에서 송신장치는 자신의 백오프 카운터를 줄이기 위해서 다른 송신장치들의 전송을 감지하는 영역인 감지영역(Sensing Region: SR), 수신장치 입장에서는 성공적인 수신을 위한 배

타영역(Exclusive Region: ER) 을 고려한다^[10]. ER의 형태와 반경은 그림 1에 도시하였다. 배타영역에 대한 자세한 설명은 [11]에 나타나 있다. 전송을 위해 요구되는 신호세기, 감지를 위한 신호 세기, 그리고 수신장치에 간섭을 일으키는 신호세기는 모두 다르다. 일반적으로 감지영역이 가장 크고 전송영역이 가장 작은 것으로 알려져 있으나 본 논문에서는 감지와 간섭을 일으키는 신호세기가 같다고 가정한다. SR_t 과 ER_r 을 각각 송신장치의 감지영역과 수신장치의 배타영역이라 하자. $r_{j,i}$ 를 자기광고 패킷을 송신하는 장치 DEV j 와 DEV j 의 자기광고 패킷이 아닌 다른 자기광고 패킷을 수신하는 수신장치 DEV i 사이의 거리라 하자. 모든 송수신 쌍은 ND과 빔포밍에 의해 서로 안테나 빔이 맞추어져 있다고 하자. 본 논문에서는 감지와 간섭을 일으키는 신호세기가 같다고 가정한다. 모든 장치의 메인로브 이득 G_{TM} 사이드로브 이득 G_{TS} 그리고 송신전력 P_T 가 같다고 가정하면, [11]에서 ER_r 반경을 다음과 같이 계산하였다. (단위: m)

$$r_1 = \left\{ \frac{\kappa G_{TM} G_P P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha}, \quad r_2 = \left\{ \frac{\kappa G_{TM} G_{RS} P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha},$$

$$r_3 = \left\{ \frac{\kappa G_{TS} G_P P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha}, \quad r_4 = \left\{ \frac{\kappa G_{TM} G_{RS} P_T}{N_0 W} \right\}^{1/\alpha}. \quad (1)$$

3.2 지향성 이웃장치 탐지과정 분석

본 연구에서는 D-ND 과정을 수학적으로 분석한다. 피코넷은 $L \times L$ 의 방이라 가정하고 이 방에 N 개의 장치들이 랜덤하게 분포되어 있고 각 장치에는 지향성 안테나가 탑재되어 있다고 가정한다. 이 분석에서는 동기식, two-way ND 과정을 고려한다. 즉, 시간은 slotted되어 있고 DEV i 가 자기광고 패킷을 보내고 이웃장치들 중 한 장치가 그 패킷을 수신했다면 그 수신장치는 응답 메시지를 보낸다고 가정한다. 자기광고 패킷이전 응답메시지전 각 장치는 D-CSMA/CA에서 No-ACK 모드로 동작한다고 가정한다. 한 장치에 여

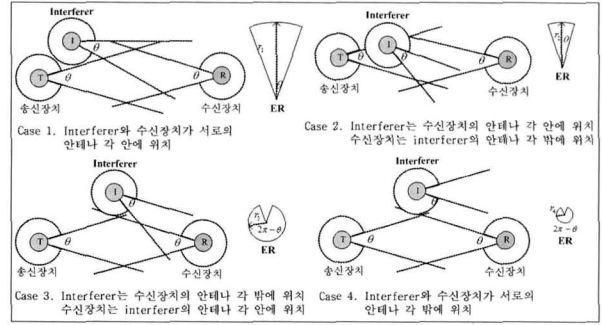


그림 1. 장치들의 위치에 따른 4가지 ER 반경
Fig. 1. Four different ER radii for directional antenna pairs

러 개의 자기광고 패킷(또는 응답메시지)이 동시에 수신되면 충돌이 일어난 것으로 간주하여 이 수신장치(송신장치)는 어떤 송신장치(수신 장치)도 발견하지 못한 것으로 간주한다. 랜덤하게 분포된 두 장치 간의 거리의 확률밀도함수는 다음과 같이 주어진다^[12].

$$f(x) = \begin{cases} 2 \frac{x}{L} \left(\frac{x^2}{L} - 4 \frac{x}{L} + \pi \right) \frac{1}{L} & \text{if } 0 \leq x \leq L \\ 2 \frac{x}{L} \left[4 \sqrt{\frac{x^2}{L^2} - 1} - \left(\frac{x^2}{L^2} + 2 - \pi \right) \right] \frac{1}{L} & \text{if } L < x \leq \sqrt{2}L \\ -4 \tan^{-1} \sqrt{\frac{x^2}{L^2} - 1} & \end{cases} \quad (2)$$

그림 1에 도시된 반경 r_i 은 피코넷의 최대거리보다 클 수 있으므로 $\min(r_i, \sqrt{2}L)$ 를 r_i 로 재설정한다. SR_t 의 피코넷에 대한 비율 P_{SR_t} 은 식 (3)에 나타나 있다. $K_{SR_t}^N$ 와 $K_{ER_r}^N$ 을 각각 피코넷 안에 N 개의 송신장치가 송신하려고 할 때 한 송신장치의 백오프 카운터에 영향을 주는 송신장치의 수와 수신장치에 간섭을 일으키는 송신장치의 수라 하면 이들은 다음과 같다.

$$E(K_{SR_t}^N) = E(K_{ER_r}^N) = (N-1)P_{SR_t}. \quad (4)$$

동기화된 경우를 고려하고 있으므로 각 장치는 각 타

$$P_{SR_t} = \left[\left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \int_0^{r_1} f(x) dx + \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \int_0^{r_4} f(x) dx + \left(\frac{\theta}{2\pi} \right) \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right) \sum_{i=2}^3 \int_0^{r_i} f(x) dx \right]$$

$$- \left[\left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^3 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right) \left\{ \prod_{i=1,2} \int_0^{r_i} f(x) dx + \prod_{i=1,3} \int_0^{r_i} f(x) dx \right\} + \left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left\{ \prod_{i=1,4} \int_0^{r_i} f(x) dx + \prod_{i=2,3} \int_0^{r_i} f(x) dx \right\} \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left\{ \prod_{i=2,4} \int_0^{r_i} f(x) dx + \prod_{i=3,4} \int_0^{r_i} f(x) dx \right\} \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \prod_{i=1,2,3} \int_0^{r_i} f(x) dx + \left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^3 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^3 \left\{ \prod_{i=1,2,4} \int_0^{r_i} f(x) dx + \prod_{i=1,3,4} \int_0^{r_i} f(x) dx \right\} \right]$$

$$+ \left[\left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^2 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \prod_{i=2,3,4} \int_0^{r_i} f(x) dx \right]$$

$$- \left[\left(\frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \left(1 - \frac{\theta}{2\pi} \right)^4 \prod_{i=1}^4 \int_0^{r_i} f(x) dx \right]. \quad (3)$$

입슬릿 시작 시에 전송상태이거나 들음/수신상태이다. p_{tx} 와 p_t 를 각각 한 장치가 어떤 타임슬릿에서 전송할 패킷이 있는 확률과 실제로 전송할 확률이라고 하자. 그러면 DEV i 를 포함하여 $\{1 + E(K_{SR_i}^N)\} p_{tx}$ 의 장치들이 채널 경쟁을 할 것이며 확률적으로 $\{1 + E(K_{SR_i}^N)\} p_{tx} / W_0$ 장치들이 동시에 패킷을 전송할 것이다. 여기서 W_0 는 No-ACK 모드에서 경쟁윈도우(Contention Window: CW)이다.

$P_{i,j}$ 와 $P_{j,i}$ 를 각각 DEV i 가 전송한 하나의 자기광고 패킷을 DEV j 가 제대로 수신할 확률과 이런 상황에서 DEV i 가 DEV j 의 응답메시지를 제대로 수신할 확률이라고 하면 이들은 다음과 같다.

$$P_{i,j} = P_{tx,range} p_t (1 - p_t)^{E(K_{SR_i}^N)},$$

$$P_{j,i} = p_t (1 - p_t)^{E(K_{SR_i}^N)}. \quad (5)$$

여기서 $P_{tx,range}$ 는 전체 피코넷의 크기에 대한 DEV i 의 전송 영역의 비율로서 다음과 같이 주어진다.

$$P_{tx,range} = \left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2 \int_0^{r_1} f(x) dx + \left(\frac{\theta}{2\pi}\right) \left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right) \cdot \sum_{i=2,3} \int_0^{r_i} f(x) dx + \left(1 - \frac{\theta}{2\pi}\right)^2 \int_0^{r_4} f(x) dx. \quad (6)$$

τ 를 자기광고 패킷과 응답 메시지를 성공적으로 수신했을 때 걸리는 평균 타임슬릿이라 하자. τ 는 백오프 카운터가 0인 상태에서 필요한 타임슬릿과 자기광고 패킷 및 응답메시지를 전송하는데 필요한 타임슬릿의 합이며, 이는 $\tau \cdot T_{slot}$ 시간에 해당된다. 여기서 T_{slot} 은 $pBackoffSlot$ 이다. $P_{ND:i,j}$ 와 $P_{ND:i,j}(t)$ 를 각각 τ 및 $t\tau$ 동안 DEV i 가 DEV j 를 발견할 확률이라 하면 이들은 다음과 같다.

$$P_{ND:i,j} = P_{i,j} P_{j,i} = P_{tx,range} p_t^2 (1 - p_t)^{2E(K_{SR_i}^N)},$$

$$P_{ND:i,j}(t) = 1 - (1 - P_{ND:i,j})^t. \quad (7)$$

이 연구의 한 목적은 한 장치가 주어진 시간에 그의 이웃 장치를 찾는 확률을 최대화하는 최적의 p_t 를 찾는 것이다. 그러므로 DEV i 와 DEV j 가 서로의 전송 영역 내에 있다는 조건하에서 다음과 같은 최적화 정식을 고려할 수 있다.

(OPT) $\max P_{ND:i,j}(t)$

$P_{ND:i,j}(t)$ 을 최대화하는 것이 $P_{ND:i,j}$ 을 최대화하는 것과 동치임에 주목하자.

정리 1. (OPT)의 해는 다음과 같이 주어진다.

$$P_{ND:i,j} = \begin{cases} P_{tx,range} A^2 (1 - A)^{2E(K_{SR_i}^N)} \text{ 만일 } \frac{W_0}{1 + E(K_{SR_i}^N)^2} \geq 1 \\ P_{tx,range} B^2 (1 - B)^{2E(K_{SR_i}^N)} \text{ 만일 } \frac{W_0}{1 + E(K_{SR_i}^N)^2} < 1 \end{cases}$$

여기서 $A = \{1 + E(K_{SR_i}^N)\} / W_0$, $B = 1 / \{1 + E(K_{SR_i}^N)\}$ 이다. 증명. $P_{ND:i,j}$ 을 p_{tx} 에 대해 증가함수이며, $p_{tx} = W_0 / \{1 + E(K_{SR_i}^N)\}^2 \geq 1$ 인 경우 $p_{tx} = W_0 / \{1 + E(K_{SR_i}^N)\}^2$ 에서, $p_{tx} = W_0 / \{1 + E(K_{SR_i}^N)\}^2 < 1$ 인 경우 그 p_{tx} 에서 최대값을 갖는다.

이제 장치가 한 방향에 머무르는 시간을 살펴보자. 한 장치가 한 방향에 있는 그의 모든 원 홉 장치들을 찾기 위해 그 장치는 안테나 방향을 일정한 시간동안 그 방향에 고정하고 있어야 한다. $T_{d,stay}$ 를 통신 중이 아닌 장치(idle 장치)의 안테나가 한 방향에 고정되어 있는 시간, 즉 그 방향에 체류하는 체류시간이라 하자. 그러면 한 idle 장치가 모든 방향에서 한 번씩 체류하는데 걸리는 시간은 $2\pi T_{d,stay}$ 이다. 반면, 만일 한 장치가 패킷을 전송하려고 한다면 그 장치는 전송이 끝난 후에야 안테나 방향을 돌릴 것이다. 일반성을 잃지 않고, 한 패킷이 전송되는데 필요한 평균 타임슬릿이 $T_{tx} = \tau/2$ 라 하자. 그러면 전송할 패킷을 가진 한 장치가 모든 방향에서 한 번씩 체류하는데 필요한 타임슬릿은 $(2\pi/\theta - 1) T_{d,stay} + T_{tx}$ 이다. 그러므로 한 장치가 모든 방향에서 한 번씩 체류하는데 걸리는 평균 총 타임슬릿은 다음과 같다.

$$\frac{2\pi}{\theta} T_{d,stay} (1 - p_{tx}) + \left\{ \left(\frac{2\pi}{\theta} - 1 \right) T_{d,stay} + T_{tx} \right\} p_{tx} \quad (8)$$

원 홉에 있는 모든 이웃장치를 찾기 위해 DEV i 가 자기광고 패킷을 $\theta(N-1)/2\pi P_{ND:i,j}$ 번 전송할 때 장치들은 모든 방향에서 최소 한 번씩은 체류해야한다. 이 때 필요한 최소의 시간은 $\theta(N-1)\tau/2\pi P_{ND:i,j}$ 타임슬릿이다. 그러므로 이 시간동안 메인로브에 있는 장치들은 적어도 한번 모든 방향으로 한 번씩 체류해야 한다. 이러한 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{2\pi}{\theta} T_{d,stay} (1 - p_{tx}) + \left\{ \left(\frac{2\pi}{\theta} - 1 \right) T_{d,stay} + T_{tx} \right\} p_{tx} \quad (9)$$

$$\leq \frac{\theta(N-1)\tau}{2\pi P_{ND:i,j}}$$

즉, 이 식이 만족되지 않으면 $\theta(N-1)\tau/2\pi P_{ND:i,j}$

타임슬롯 동안 찾지 못하게 되는 원 흡에 있는 이웃장치가 존재한다. P_{dis} 를 안테나의 메인로브와 사이드로브에 있는 원 흡에 있는 이웃장치 중에 탐지된 장치의 확률이라 하자. 그러면 (9)로부터 다음 정리를 유추할 수 있다.

정리 2. $T_{d,stay}$ 가

$$\frac{\theta\{\theta(N-1)\tau - 2\pi P_{ND:i,j} T_{tx} p_{tx}\}}{2\pi P_{ND:i,j} (2\pi - p_{tx} \theta)} \geq T_{d,stay} \quad (10)$$

을 만족하면 P_{dis} 는 1이고, 만족하지 않으면 P_{dis} 는

$$P_{dis} = \frac{\theta(N-1)\tau}{2\pi P_{ND:i,j} \{T_{d,stay} (2\pi/\theta - p_{tx}) + T_{tx} p_{tx}\}} \text{다.}$$

IV. 실험 결과

D-ND의 분석실험은 매텔랩 7.7을 이용하였으며 IEEE 802.15.3c 표준에 기반하여 다음과 같은 값들이 사용되었다: $\kappa = -68$ dB, $pBackoffSlot(T_{slot}) = 6.5 \mu s$, $N_0 = -114$ dB, $W = 2160$ MHz, $P_T = 10$ mW, $P_R = -55$ dB. (이 값은 1.65 Gbps 전송률에 대한 수신감도이다) 방사효율도로는 $\eta = 0.9$ 와 1를 사용하였다. 경로손실지수는 안테나 각이 작을 때는 ($10^\circ - 120^\circ$) 1.73, 안테나 각이 클 때는 (180°) 1.53을 사용하였다. 이러한 값들을 사용하여 60 GHz에서 계산한 전송 거리는 $\theta = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 이고 $\eta = 0.9$ 일 때 각각 7.42, 3.33, 2.08, 0.64 m, $\eta = 1$ 일 때 각각 8.3831, 3.76, 2.35, 1.37 m이다. 이 값을 피코넷의 가로 및 세로 길이 L 로 사용하였다. τ 와 q 는 각각 9 타임슬롯과 1로 주었다.

그림 2는 θ 와 η 에 따른 $P_{ND:i,j}$ 과 $1/P_{ND:i,j}$ 을 비교한 것이다. $\eta = 0.9$ 일 때는 θ 에 상관없이 N 이 증가함에 따라 $P_{ND:i,j}$ 는 감소함을 알 수 있다. θ 가 증가함에 따라 작은 N 에 대해서는 $P_{ND:i,j}$ 이 증가하는 반면, 큰 N 에 대해서는 감소함을 알 수 있다. 이는 큰 θ 와 작은 N 에서는 충돌을 일으키지 않고 전송영역에 있는 더 많은 장치들을 찾을 수 있지만, 큰 θ 와 N 에서는 충돌이 일어나기 때문이다. 반면에 $\eta = 1$ 이고 θ 가 작은 경우, N 이 증가하면 어떤 특정한 N 까지는 $P_{ND:i,j}$ 가 약간 증가하다가 그 이후로는 감소한다. 이는 확률적으로 N 이 어느 정도까지 크지 않으면 각 장치들은 서로의 CSMA/CA에 영향을 미치지 않기 때문이다. 반면에 θ 가 크면 $P_{ND:i,j}$ 는 N 이 증가하면 감소한다. $\eta = 1$ 인 경우는 한 장치의 메인로브가 아닌 곳에 위치한 장치들은 더 이상 이웃장치 탐지에 방해

를 주지 않는다. N 이 증가하면 한 이웃장치를 찾는 데 더 많은 시간이 필요하다는 것은 명백하다. 그림 3은 $\eta = 0.9$ 일 때 θ 에 따른 최적의 p_{tx} 와 그 최적값에 대한 $P_{ND:i,j}$ 을 보여준다. N 이 증가함에 따라 $P_{ND:i,j}$ 가 최대가 되기 위해서는 충돌을 줄이기 위해 p_{tx} 는 작아져야 한다. 그림 4에서는 $\eta = 0.9$ 이고 $N = 10$ 일 때

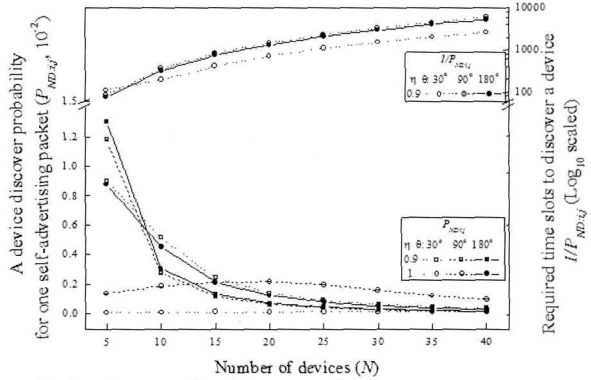


그림 2. $P_{ND:i,j}$ 와 $1/P_{ND:i,j}$ 비교
Fig. 2. Comparison of $P_{ND:i,j}$ and $1/P_{ND:i,j}$

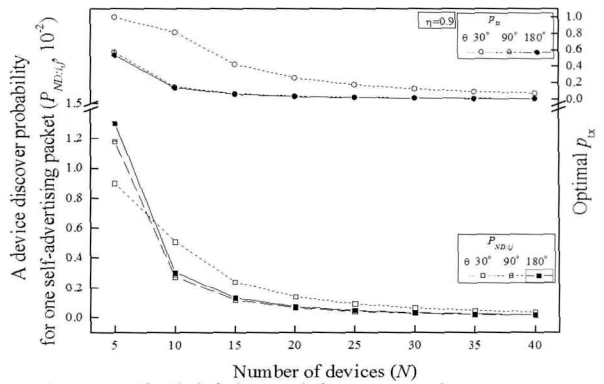


그림 3. p_{tx} 의 최적값과 그 때의 $P_{ND:i,j}$ 비교
Fig. 3. Comparison of optimal values of p_{tx} and $P_{ND:i,j}$

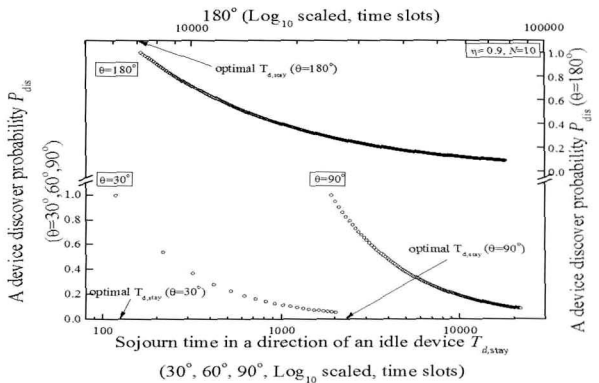


그림 4. P_{dis} 와 $T_{d,stay}$ 최적값 비교
Fig. 4. Comparison of P_{dis} and optimal $T_{d,stay}$

idle 장치의 한 방향에서의 체류시간에 따른 P_{dis} 를 비교하였다. 체류시간이 작으면 P_{dis} 이 큼을 보여주고 있으며, idle 장치는 θ 가 커질수록 이웃장치 탐지를 위해서 더 오랫동안 한 방향에 머물러야 함을 알 수 있다. 모든 이웃장치들을 확률 1로 찾기 위한 체류시간의 최적값 optimal $T_{d,stay}$ 가 존재하는데 θ 에 따라 이 값이 그림에 도시되어 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 IEEE 802.15.3c에 기반하여 밀리미터파대역에서 지향성 이웃장치 탐지과정을 분석하였다. 본 연구는 지향성 이웃장치 탐지과정의 이론적인 근거를 제시하였으며 분석결과는 이 대역의 이웃장치 탐지과정에서 지향성 안테나 사용의 효과를 보여주었다. 본 논문에서는 반사되는 빔에 의한 ND를 고려하지 않았고 장애물의 부재 등의 여러 가정을 하였다. 추후 연구는 좀 더 실제 상황에 알맞도록 가정들을 일 반화해 나갈 것이다.

참 고 문 헌

[1] G. Pei, M. M. Albuquerque, J. H. Kim, D. P. Nast, and P. R. Norris, "A Neighbor Discovery Protocol for Directional Antenna Networks," in *Proc. MILCOM*, 1, pp. 487-492, Oct. 2005.

[2] Z. Zhang, "Performance of Neighbor Discovery Algorithms in Mobile Ad Hoc self-configuring Networks with Directional Antennas," in *Proc. MILCOM*, 5, pp. 3162-3168, Oct. 2005.

[3] X. An and R. Hekmat, "Self-Adaptive Neighbor Discovery in Ad Hoc Networks with Directional Antennas," in *Proc. Mobile and Wireless Commun. Summit*, pp. 1-5, July 2007.

[4] S. Vasudevan, D. Towsley, D. Goeckel, and R. Khalili, "Neighbor Discovery in Wireless Networks and the Coupon Collector's Problem," in *Proc. MobiCom*, pp. 181-192, Sept. 2009.

[5] X. An, "Medium Access Control and Network Layer Design for 60GHz Wireless Personal Area Networks," *dissertation for Ph.D.*, June 2010.

[6] M. Duke, G. Pei, and J. Kim, "Performance of 3-Dimensional Scans with Narrow-Beam Directional Antennas," in *Proc. VTC*, pp. 1-5,

Sept. 2006.

[7] J. Ning, T.-S. Kim, and S. V. Krishnamurthy, "Directional Neighbor Discovery in 60 GHz Indoor Wireless Networks," in *Proc. MSWiM*, pp. 365-373, Oct. 2009.

[8] X. An, R. Hekmat, "Directional MAC Protocol for Millimeter Wave based Wireless Personal Area Networks," in *Proc. VTC*, pp. 1636-1640, May 2008.

[9] S.-K. Yong, IEEE 802.15.3c Channel Modeling Sub-committee Report, IEEE P802.15 Wireless Personal Area Networks, March 2007.

[10] L. X. Cai, L. Cai, and X. Shen, and J. W. Mark, "REX: a Randomized EXclusive Region based Scheduling Scheme for mmWave WPANs with Directional Antenna," *IEEE Trans. on Wireless Commun.*, 9(1), pp. 113-121, 2010.

[11] M. Kim, Y. Kim, and W. Lee, "Performance Analysis of Directional CSMA/CA for IEEE 802.15.3c under Saturation Environments," *ETRI Journal* 2012년 2월 게재 예정.

[12] Math world. Square line picking. Available at <http://mathworld.wolfram.com/SquareLinePicking.html>.

김 미 정 (Meejoung Kim)

정회원



1986년 2월 1988년 2월 고려대학교 수학과(학사, 석사)
1993년12월 Univ. of Minnesota(석사, 박사수료)
1996년 8월 고려대학교 수학과(박사)
2004년 8월~현재 고려대학교 정보통신기술연구소 (교수)

<관심분야> 무선통신시스템, 무선네트워크보안

이 우 용 (Wooyong Lee)

정회원



1989년 2월 고려대학교 전자공학과(학사)
1991년 2월 1997년 2월 KAIST 전자공학과(석사, 박사)
1997년 3월~현재 한국전자통신연구원 책임연구원

<관심분야> 무선통신시스템, WPANs