논문 13-38C-11-14

한국통신학회논문지(J-KICS) '13-11 Vol.38C No.11
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2013.38C.11.1074

밀리미터파 대역에서 지향성 안테나 사용에 의한 도청공격 대응 효율성의 수학적 분석

김 미 정◆°, 김 정 녀*

Mathematical Analysis for Efficiency of Eavesdropping Attack Using Directional Antenna in mmWave Band

Meejoung Kim◆°, Jeong Nyeo Kim*

요 약

본 논문은 밀리미터파 대역에서 발생할 수 있는 도청공격에 대한 지향성 안테나의 보호 효과를 수학적으로 모델화하고 분석하였다. 원 홉 통신에서 지향성 안테나의 사용으로 인한 노출영역의 분석에 기반을 두고 한 장치가 도청장치에 의해 탐지될 확률을 분석하였다. 지향성 안테나 사용이 도청공격의 대응에 얼마나 효율적인지를 표현하기 위하여 상대도청율이라는 개념을 도입하였다. 분석 결과는 도청장치의 목적장치 탐지확률을 최대화하는 네트워크 내의 최적의 장치 수가 존재하며, 그 수는 안테나 각 등 여러 모수에 따라 달라짐을 보여준다, 또한 대부분의 경우에서 지향성 안테나의 사용이 전방향 안테나의 사용에 비해 도청공격으로부터 장치를 보호해 줌을 알 수 있다.

Key Words : Eavesdropping Attack, Directional Antenna, Millimeter Wave, IEEE 802.15.3c

ABSTRACT

This paper analyzes the benefit of using directional antennas against eavesdropping attack in millimeter wave (mmWave)-based networks. All devices are equipped with a directional antenna or an omni-directional antenna in a single-hop communications. The probability of a device being detected by an eavesdropper is analyzed based on the exposure region of a device. The relative detection rate is introduced to represent the benefit of using directional antenna. Numerical results show that there exists an optimal number of devices that maximizes the detection probability and it varies according to the parameters such as antenna beamwidth. It shows that the use of directional antenna enables to protect the devices from the detection by an eavesdropper for almost the whole situation in mmWave band communication.

Ⅰ. 서 론

밀리미터파 대역의 높은 주파수와 같은 고유한 특성은 수 기가급의 높은 전송률을 요구하는 무선응용을 지원할 수 있다는 장점과 함께 다른 주파수 대역에 비해 심각하게 짧은 전파도달거리를 갖는다는 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 지향성 안테나의 사용이 고려되었다. 지향성 안테나는 전송 방향을 한곳에 집중함으로써 더 긴 전송거리를 확보할 수 있고, 좁은 안테나 빔은 자원을 공간적으로 재사용할 수

※ 본 연구는 2010년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단 (No. 2010-0022282), 미래창조과학부의 R&D 재원[12-921-06-001, MTM기반 단말 및 차세대 무선랜 보안 기술 개발], 고려대학교 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

◆° First Author and Corresponding Author : 고려대학교 공과대학 정보통신기술연구소, meejkim@korea.ac.kr, 정회원

* 한국전자통신연구원, jnkim@etri.re.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2013-08-363, 접수일자 : 2013년 8월 28일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 17일

있게 한다.

지향성 안테나의 사용을 고려한 보안문제는 [1,2]에서, 밀리미터파 기술에 대한 분석은 [3]-[5]에서 다루어졌다. 무선 네크워크 통신에서 지향성 안테나 사용이 보안에 미치는 영향이 주로 연구되었으며 공격 장치에 의한 탐지확률이 중요한 평가요소로 고려되었다.

도청공격은 소극적 도청 (passive eavesdropping)과 적극적 도청(active eavesdropping)으로 구별한다. 소극적 도청은 단순히 브로드캐스팅된 신호를 들음으로 다른 장치를 탐지하는 반면, 적극적 도청은 도청장치가 스스로 우호적인 장치로 변장하여 다른 장치들에게 그들이 필요한 정보를 요구함으로써 그들이 필요한 정보를 적극적으로 수집하는 것이다.

본 논문에서는 밀리미터파 대역에서 수동적 도청공격을 고려한다. 노출영역이라는 개념을 도입하여 도청장치들의 그들의 도청목적장치 탐지확률을 분석하였다. 네트워크 영역에 대한 노출영역의 비율을 확률밀도함수를 이용하여 계산하였으며, 원 홉 통신에서 지향성 안테나와 전방향 안테나의 사용을 고려하였다.

본 연구는 밀리미터파 대역에서 보안문제를 수학적 이론에 기반을 두고 분석한 것으로, 보안문제에서 수학적 분석을 기반으로 한 새로운 연구의 시도라고 할 수 있다.

Ⅱ. 도청공격의 수학적 모델

본 논문에서는 IEEE 802.15.3c기반의 경로손실모델 ([4])과 cone plus circle 2D 지향성 안테나 모델을 사용한다.

한 피코넷을 $L\times L$크기의 방이라 하고 N개의 장치들이 이 피코넷에 랜덤하게 분포되어 있다고 하자. 도청장치는 이 N개의 장치들 중의 한 장치이며 어느 장치가 도청장치인지는 알 수 없다고 가정한다. 본 논문은 모든 장치에 지향성 안테나가 탑재된 경우(case 1: dd)와 모든 장치에 전방향 안테나가 탑재된 경우(case 2: oo)에 대하여 한 장치가 도청장치에 의해 탐지될 확률을 분석하고 비교한다. 지향성 안테나가 탑재된 경우에 안테나 각은 모두 같으며, 각 장치의 안테나 방향은 랜덤하게 결정되고 그 방향에 고정되어 있다고 가정한다.

도청장치는 그들의 목적장치를 안테나의 메인로브와 사이드로브 방향으로 탐지할 수 있다. 그러므로 한 장치가 다른 장치에게 노출되는 영역을 다음과 같이 정의한다.

정의 1. 노출영역(exposure region: ER)은 한 장치가 다른 장치로부터 송신된 신호를 탐지할 수 있는 영역이다.

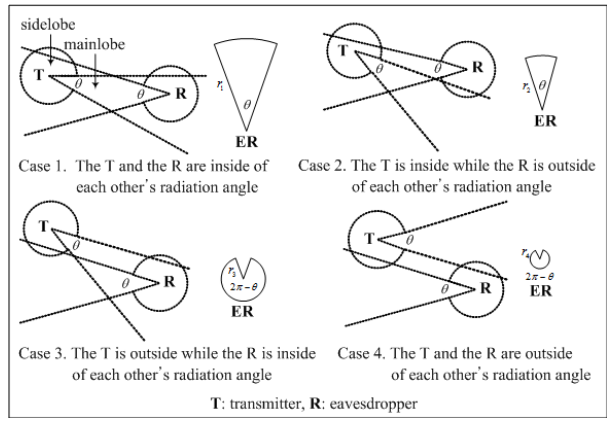

그림 1. 장치들의 위치에 따른 4가지 ER 반경
Fig. 1. Four different ER radii for directional antenna pairs

$$
\begin{aligned}
P_{\mathrm{ER,d}} &= \left[\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2\int_0^{r_1} f(x)dx+\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)\sum_{i=2}^{3}\int_0^{r_i} f(x)dx+\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^2\int_0^{r_4} f(x)dx\right] \\
&\quad -\left[\begin{array}{l}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^3\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)\left\{\coprod_{i=1,2}\int_0^{r_i} f(x)dx+\coprod_{i=1,3}\int_0^{r_i} f(x)dx\right\}+\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^2\left\{\coprod_{i=1,4}\int_0^{r_i} f(x)dx+\coprod_{i=2,3}\int_0^{r_i} f(x)dx\right\} \\ +\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^3\left\{\coprod_{i=2,4}\int_0^{r_i} f(x)dx+\coprod_{i=3,4}\int_0^{r_i} f(x)dx\right.\end{array}\right] \\
&\quad +\left[\begin{array}{l}\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^4\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^2\coprod_{i=1,2,3}\int_0^{r_i} f(x)dx+\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^3\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^3\left\{\coprod_{i=1,2,4}\int_0^{r_i} f(x)dx+\coprod_{i=1,3,4}\int_0^{r_i} f(x)dx\right\} \\ +\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^2\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^4\coprod_{i=2,3,4}\int_0^{r_i} f(x)dx\end{array}\right] \\
&\quad -\left(\frac{\theta}{2\pi}\right)^4\left(1-\frac{\theta}{2\pi}\right)^4\prod_{i=1}^{4}\int_0^{r_i} f(x)dx. \qquad (4)
\end{aligned}
$$

$$
P_{\mathrm{ER,o}} = \int_0^{\min(r_{\mathrm{ER,o}},\sqrt{2}L)} f(x)dx
$$

한 송수신장치 쌍은 그들의 안테나 방향에 따라 다음과 같은 4가지의 노출영역 반경을 가진다[4].

$$r_{\mathrm{ER},1}=(\kappa G_{\mathrm{TM}}G_{\mathrm{RM}}P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{R}})^{1/n},$$
$$r_{\mathrm{ER},2}=(\kappa G_{\mathrm{TS}}G_{\mathrm{RM}}P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{R}})^{1/n},$$
$$r_{\mathrm{ER},3}=(\kappa G_{\mathrm{TM}}G_{\mathrm{RS}}P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{R}})^{1/n},$$
$$r_{\mathrm{ER},4}=(\kappa G_{\mathrm{TS}}G_{\mathrm{RS}}P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{R}})^{1/n}, \quad (1)$$

$G_{\mathrm{TM}}(G_{\mathrm{TS}}), G_{\mathrm{RM}}(G_{\mathrm{RS}}), P_{\mathrm{T}}, P_{\mathrm{R}}, \kappa, n$은 각각 송신장치의 메인로브 (사이드로브) 이득($G_{.\mathrm{M}}=2\pi\eta/\theta$, $G_{.\mathrm{S}}=2\pi(1-\eta)/(2\pi-\theta)$), 수신장치의 메인로브(사이드로브) 이득, 전송전력, 수신전력, $10\log_{10}(\lambda/4\pi)^2$에 비례하는 상수, 그리고 경로손실 지수이다. θ, η, λ는 각각 안테나 각, 안테나 방사 효율도, 신호파의 길이이다. 만일 전방향 안테나를 고려한다면 노출영역의 반경은 다음과 같다.

$$r_{\mathrm{ER},o}=(\kappa G_0^2 P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{R}})^{1/n}. \ (G_0\text{는 안테나 이득}) \quad (2)$$

X와 $f(x)$를 각각 피코넷에 분포한 장치들 간의 거리를 나타내는 변수와 그의 확률밀도함수, $P_{\mathrm{ER,d}}$ ($P_{\mathrm{ER,o}}$)을 case 1(case2)의 경우에 한 피코넷에서 한 장치의 ER의 비율이라 하자. 그러면 $f(x)$는 식(3)으로 주어지며 $P_{\mathrm{ER,d}}(P_{\mathrm{ER,o}})$는 식(4)로 계산된다.

$$f(x)=\begin{cases}\dfrac{2x}{L^2}\left(\dfrac{x^2}{L}-4\dfrac{x}{L}+\pi\right) & \text{if } 0\le x\le L \\ \dfrac{2x}{L^2}\left\{4\sqrt{\dfrac{x^2}{L^2}-1}-\left(\dfrac{x^2}{L^2}+2-\pi\right)\right. & \\ \left.-4\tan^{-1}\sqrt{\dfrac{x^2}{L^2}-1}\right\} & \\ \text{if } L<x\le\sqrt{2}L. & \end{cases} \quad (3)$$

$E(K_{\mathrm{ER,d}}^N)(E(K_{\mathrm{ER,o}}^N))$와 $P_{\mathrm{dd}}(P_{\mathrm{oo}})$을 각각 case 1(case 2)의 경우에 ER에 위치해 있는 장치의 평균 수와 도청장치의 한 목적장치 탐지확률(a device detection probability)이라 하자. 이는 다음과 같이 계산된다.

$$E(K_{\mathrm{ER,d}}^N)=(N-1)P_{\mathrm{ER,d}}, E(K_{\mathrm{ER,o}}^N)=(N-1)P_{\mathrm{ER,o}}, \quad (5)$$
$$P_{\mathrm{dd}}=P_{\mathrm{ER,d}}E(K_{\mathrm{ER,d}}^N)p_{\mathrm{t}}(1-p_{\mathrm{t}})^{E(K_{\mathrm{ER,d}}^N)-1},$$
$$P_{\mathrm{oo}}=P_{\mathrm{ER,o}}E(K_{\mathrm{ER,o}}^N)p_{\mathrm{t}}(1-p_{\mathrm{t}})^{E(K_{\mathrm{ER,o}}^N)-1}, \quad (6)$$

식 (6)에서 p_{t}는 한 장치의 전송확률이다.

도청공격의 대응에서 지향성 안테나 사용의 효율성을 알아보기 위한 측도를 다음과 같이 정의한다.

정의2. 상대도청율(relative eavesdropping rate)

$$R_{\mathrm{dr}}=P_{\mathrm{dd}}/P_{\mathrm{oo}}.$$

Ⅲ. 분석 결과

분석결과는 매틀랩 7.7을 사용하여 얻었으며 IEEE 802.15.3c에 기반하여 다음의 모수들을 사용하였다. $n=2, P_{\mathrm{T}}=10\ \mathrm{mW}, W=1728\ \mathrm{MHz}, N_0=-91.9\ \mathrm{dB}, L=10\ \mathrm{m}$. $\theta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, \eta=1, p_{\mathrm{t}}=0.5$를 고려하였다.

그림2는 탐지확률을 비교한 것이다. P_{dd}의 경우 탐지 확률이 최대가 되는 네트워크 내의 장치수가 존재함을 보여주고 있으며, 그 값은 안테나 각에 따라 다름을 보여준다. P_{oo}의 경우 장치수가 증가함에 따라 감소하다가 $N\ge 50$인 경우 0이 됨을 볼 수 있다. 이는 충돌에 기인한다고 볼 수 있다. 그림3은 상대 도청율을 비교한 것이다. $P_{\mathrm{oo}}\le 10^{-3}$는 도청장치가 거의 아무 장치도 탐지할 수 없음을 의미하기 때문에 상대도청율은 의미가 없다고 판단하였다. 따라서 이 경우에는 0으로 설정하였다. $R_{\mathrm{dr}}>1$인 경우조차도 그림 2에 나타난 바와 같이 그 값은 작은 P_{oo} ($P_{\mathrm{oo}}\approx 10^{-3}$)에 의해 얻은 값이다. 그러므로 이런 경우 또한 큰 의미는 없다고 본다. 예를 들면, R_{dr}의 최대값인 9.99856 ($\theta=60^\circ, N=35$)은 $P_{\mathrm{dd}}=0.01363$와 $P_{\mathrm{oo}}=0.00136$로부터 얻었다. R_{dr}의 값이 작으므로 이 값으로 얻은 R_{dr}이 의미가 없다고 보는 것은 타당하다고 할 수 있다. 이를 제외하면 나머지 R_{dr}의 값들은 1보다 작다. 이는 지향성 안테나의 사용이 도청공격의 대응에 효과가 있음을 의미한다.

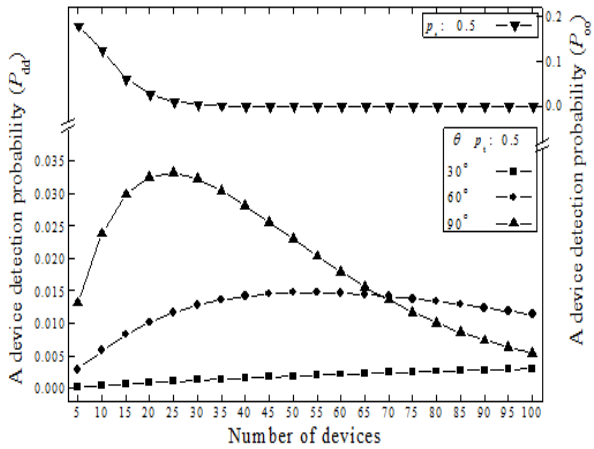

그림 2. 탐지확률 비교
Fig. 2 Comparison of the device detection probabilities

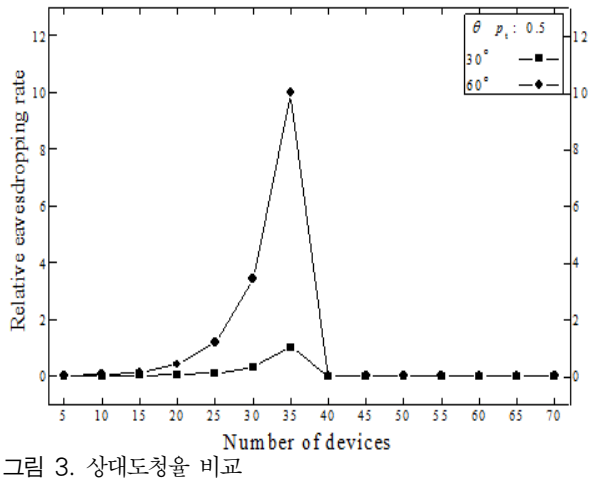

그림 3. 상대도청율 비교
Fig. 3. Comparison of the relative detection rates

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 밀리미터파 대역의 도청공격에서 지향성 안테나 사용의 효과를 수학적으로 모델화하여 분석하였다. 분석결과는 지향성 안테나의 사용이 도청공격 대응에 효율적이며 탐지확률이 최대가 되는 피코넷 내의 장치수가 존재함을 보여준다. 본 연구는 밀리미터파가 장애물에 민감하다는 특성, 전파거리가 짧은 특성 등을 고려하여 그 연구가 확장될 것이다.

References

[1] K. Pongaliur and L. Xiao, “Maintaining source privacy under eavesdropping and node compromise attacks,” in *Proc. IEEE INFOCOM*, pp. 1656 - 1664, Shanghai, China, Apr. 2011.

[2] X. Zhou, R. K. Ganti, and J. G. Andrews, “Secure wireless network connectivity with multi-antenna transmission,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 425-430, Feb. 2011.

[3] M. Kim and W. Lee, “Analysis of neighbor discovery process with directional antenna for IEEE 802.15.3c,” *J. KICS*, vol. 37B, no. 1, pp. 9-14, Jan. 2012.

[4] M. Kim, Y. S. Kim, and W. Lee, “Performance analysis of directional CSMA/CA for IEEE 802.15.3c under saturation environments,” *ETRI J.*, vol. 34, no. 1, pp. 24 - 34, Feb. 2012.

[5] M. Kim, S.-E. Hong, and J. Kim, “Analysis of directional communication via relaying devices in mmWave WPANs,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 5, pp. 342 - 345, Mar. 2012.

김 미 정 (Meejoung Kim)

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

김 정 녀 (Jeong Nyeo Kim)

1987년 2월 전남대학교 전자통계학과(학사)
1996년, OSF/RI 공동연구 파견(미국)
2004년 2월 충남대학교 컴퓨터공학과(석사, 박사)
2005년, Univ. of Califirnia, Irvine, Post-Doc.
현재 한국전자통신연구원 모바일보안연구실장 책임연구원
<관심분야> 모바일 보안, 시스템 네트워크보안, 보안 OS