

무선 인접 장치 탐색 성능 개선을 위한 송신확률 도출

권태수*

Derivation of Transmission Probability for Performance Improvement of Wireless Peer Discovery

Taeso Kwon*

요약

본 논문은, 장치들이 균일 포아송 점과정에 따라 분포할 때, 랜덤 접속 기반 무선 인접 장치 탐색 성능을 최대화하기 위한 부최적 송신확률을 Lambert W 함수를 사용하여 명확히 표현한다. 수학적식과 수치 결과를 통해 도출된 부최적 송신확률은 최대 성능에 근접한 성능을 제공함을 검증한다.

Key Words : Peer discovery, neighbor discovery, random access, stochastic geometry.

ABSTRACT

This letter explicitly expresses a suboptimal transmission probability (TxPr) for maximizing the performance of random access based wireless peer discovery, using the Lambert W function, when peers are distributed according to a homogeneous Poisson point process. The mathematical and numerical results demonstrate that the derived TxPr provides the performance close to the maximum performance.

I. 서론

무선 네트워크에서 인접 장치 탐색은 통신 대상을 인지하는 기본 동작으로, 최근에 탐색 기술은 위치기

반 소셜 네트워킹, 마이크로 위치기반 광고, 공공안전, 차량간 통신 등의 인접성 기반 신규 서비스 창출에 기여하고 있다^[1]. 특히 다수 무선 장치 간 탐색 기술은 상호 간섭 영향을 고려한 무선 네트워크 차원에서 연구될 필요가 있으며, 본 논문은 전체 네트워크 차원의 랜덤 접속 기반 무선 인접 장치 탐색 (RA-WPD, random access based wireless peer discovery) 성능의 정량적 개선을 연구한다.

공간상에 분포된 점들의 상호 작용을 정량화하는 확률기하 (stochastic geometry) 이론은 네트워크 차원 탐색 성능의 정량적 분석을 용이하게 하며^[1-3], 특히 [3]의 연구는 일부 장치들이 송신하고 나머지 장치들이 수신하는 반이중 (half duplex) RA-WPD 성능을 정량화하고 경로 감쇄 지수가 4인 경우에 대해 탐색 성능을 최대화하기 위한 부최적 송신확률 값을 도출하였다. 한편, [4]의 연구는 [3]의 결과를 기반으로 임의의 경로 감쇄 지수에 대해 최적 탐색 성능 속성을 규명하고 부최적 송신확률을 도출하였다. 하지만, [3]과 [4]의 부최적 송신확률은 명확한 수학적식이 아닌 동작변수들로 구성된 방정식의 근 형태로만 표현되었고, 해당 근은 특정 상황에서 최적 송신확률과 차이를 보이는 한계를 가진다.

본 논문의 주요 결과는 다음과 같다: (i) RA-WPD 성능 최대화 측면에서 동작변수간 관계를 명확히 표현하고 있는 부최적 송신확률을 도출한다, (ii) 도출된 부최적 송신확률은 최적 송신확률과 동일한 속성을 가짐을 증명하고, 수치결과를 통해 최적 값에 매우 근접함을 검증한다.

II. 무선 인접 장치 탐색 성능 모델

본 논문은 [3]과 유사한 시스템 모델을 고려한다. 무선 장치들은 균일 포아송 점과정 (PPP, Poisson point process)에 따라 분포하고, 각 장치는 ν 의 확률로 자신을 알리는 탐색 메시지를 M 개의 직교 탐색 자원 중 랜덤으로 하나를 선택하여 송신한다. 송신된 탐색 메시지는 경로감쇄지수 4의 경로감쇄, 로그정규음영, Rayleigh 페이딩을 겪는다. $1-\nu$ 의 확률로 수신하는 나머지 장치들은 M 개의 직교 자원에서 전송된 탐색 메시지를 수신한다. 이 때, 각 송신 장치로부터 수신된 탐색 메시지 신호의 SINR (signal to interference plus noise ratio)이 ξ 보다 크면 해당 송신

* 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : SeoulTech Department of Computer Science & Engineering, tskwon@seoultech.ac.kr, 중신회원
논문번호 : KICS2017-10-298, Received October 10, 2017; Revised November 8, 2017; Accepted November 16, 2017

장치가 성공적으로 탐색되었다고 가정한다. 표 1은 시스템 모델 매개변수를 보여준다.

이러한 환경에서, S 로 표기되는 하나의 장치가 성공적으로 발견한 평균 장치의 수 (ADP, average number of discovered peers)는 [3]의 IV-A와 V절의 결과를 활용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S \triangleq (1-\nu)\theta(\nu). \tag{1}$$

단, $\theta(\nu) \triangleq \sqrt{2\pi} \Theta \nu \exp\left(\frac{1}{2} \tau^2 \nu^2\right) Q(\tau \nu)$, $\Theta \triangleq \frac{2}{\pi \sqrt{\xi}}$, $\tau \triangleq \frac{\pi^2 \chi \lambda}{\sqrt{8M^2 \sigma^2}}$, $Q(x) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$, $\chi \triangleq \exp\left(\frac{1}{2} \left(\frac{\log_{10} \chi}{5} - \frac{\chi}{4}\right)^2\right)$ 이다. ν 는 S 를 결정짓는 주요 변수이며, 다음 절에서 ν 의 최적화를 살펴본다.

III. 무선 인접 장치 탐색 성능 개선 송신확률 도출

본 절은 RA-WPD의 ADP 최대화를 위한 부최적 송신확률을 잘 알려진 함수를 사용하여 표현하고, 이는 최적 송신확률의 속성을 잘 반영함을 보인다.

수학식 (1)로부터 ADP를 최대화하는 ν 를 직접 도출하는 것은 어려우므로, [2]와 [3]에서는 ADP의 하한값을 적용하여 부최적 ν 를 도출하였다. [2]와 [3]의 부최적 ν 는 하나의 수학적 식으로 명확히 표현되지 못하고 동작변수들로 구성된 방정식 근의 형태로만 표현되었고, 게다가 이들 근은 특정 상황에서 최적 ν 와는 동떨어지는 한계를 가진다.

본 논문에서는 이러한 기존 방식의 한계를 해결하기 위해, $Q(x) \approx \frac{(1 - \exp(-1.4x)) \exp(-x^2/2)}{1.135 \sqrt{2\pi} x}$ (단, $x \geq 0$)^[5]을 적용하여 다음 근사화를 고려한다.

$$S \approx s(\nu) \triangleq (1-\nu)\vartheta(\nu). \tag{2}$$

단, $\vartheta(\nu) \approx \vartheta(\nu) \triangleq \frac{\Theta}{1.135} (1 - \exp(-1.4\nu\nu))$ 이다.

정리 III-1: $\hat{\nu} \triangleq \arg \max_{0 < \nu < 1} s(\nu)$ 라 할 때 $\hat{\nu}$ 는 유일하고, 이러한 $\hat{\nu}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{\nu} = 1 - \frac{1}{1.4\tau} (W(\exp(1.4\tau + 1)) - 1). \tag{3}$$

단, $W(z)$ 는 Lambert W 함수이다. 한편,

$\lim_{\tau \rightarrow \infty} \hat{\nu} = 0$ 와 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \hat{\nu} = 1/2$ 이 성립한다.

증명:

$$\frac{\partial^2 s(\nu)}{\partial \nu^2} = -\frac{1.4\Theta\tau}{1.135} \exp(-1.4\nu\tau)(2 + 1.4\tau(1-\nu)) < 0$$
 이므로, $s(\nu)$ 는 볼록 (concave) 함수이다. 따라서, $\frac{\partial s(\nu)}{\partial \nu} = 0$ 의 유일 해는 $s(\nu)$ 의 최대값을 제공한다. $\frac{\partial s(\nu)}{\partial \nu} = 0$ 는 $\exp(1.4\nu\tau) = 1 + 1.4(1-\nu)\tau$ 와 동치이고, Lambert W 함수의 정의로부터 (3)이 유도된다. 한편, L'Hôpital 정리와 $\frac{dW(z)}{dz} = \frac{W(z)}{z(1+W(z))}$ 를 적용하면, $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \hat{\nu} = 1 - \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{W(\exp(1.4\tau + 1))}{1 + W(\exp(1.4\tau + 1))} = 0$ 와 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \hat{\nu} = 1 - \frac{W(\exp(1))}{1 + W(\exp(1))} = \frac{1}{2}$ 이 도출된다. ■

$\nu^* \triangleq \arg \max_{0 < \nu < 1} S$ 일 때, 잡음 영향이 무시되는 간섭 제한적 (interference-limited) 상황에서 $\nu^* \rightarrow 0$ 이고, 송신전력이 성능을 한정짓는 커버리지 제한적 (coverage-limited) 상황에서 $\nu^* \rightarrow 1/2$ 임이 알려져 있다

[3]. $\tau \rightarrow \infty$ 은 $\frac{\lambda}{M} \rightarrow \infty$, $1/\sigma^2 \rightarrow \infty$, 혹은 $\frac{\lambda}{M\sqrt{\sigma^2}} \rightarrow \infty$ 으로 간섭 제한적 상황을 의미하고, 반대로 $\tau \rightarrow 0$ 은 커버리지 제한적 상황을 의미한다. $\lim_{\tau \rightarrow \infty} \hat{\nu} = 0$ 와 $\lim_{\tau \rightarrow 0} \hat{\nu} = 1/2$ 이므로 $\hat{\nu}$ 는 간섭 제한적일 경우 간섭 혹은 송신 충돌을 최소화하고, 커버리지 제한적일 경우 수신 기회를 최대화하는 방향으로 송신확률을 제어하는 ν^* 의 속성을 정확히 반영하고 있다.

한편, [2]와 [3]의 부최적 ν 도출을 위한 방정식의 근은 커버리지 제한적 상황에서 ν^* 와 동떨어진 값을 제공한다. 이의 보완을 위해 $\nu^* \leq 1/2$ 에 근거하여^[3], [3]은 근이 1/2보다 클 경우, 1/2로 간주한다. 반면, 본 논문의 정리 III-1의 $\hat{\nu}$ 는 동작변수간 상관관계를 명확히 표현하고 있는 수학적 식 (3) 자체가, ν^* 의 속성을 보존하면서 0보다는 크고 1/2보다는 크지 않은 송신확률 값을 명확히 제공하고 있다.

IV. 탐색 성능 최적화 수치 결과 및 논의

본 절은 II절의 RA-WPD 모델에 기반하여 III절에서 도출된 $\hat{\nu}$ 에 대한 성능을 평가한다. 별도 명기하지 않는 한, 환경 변수는 표 1의 값을 이용한다.

그림 1은 무선 장치들의 밀도와 송신확률에 따른 RA-WPD 성능 S 를 보여준다. 그림 1로부터, 수학적

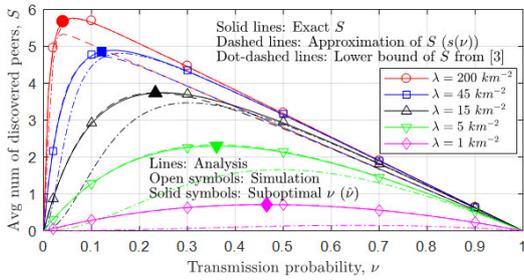


그림 1. 송신확률에 따른 ADP 및 부최적 송신확률
Fig. 1. ADP and suboptimal ν ($\hat{\nu}$) depending on λ .

표 1. 시스템 모델 매개변수 설명 및 설정 값
Table 1. System model parameter description & values

기호	설명	설정 값
S	장치 당 성공적으로 발견한 평균 장치의 수 (ADP)	-
$s(\nu)$	S 의 근사값	-
λ	1km^2 당 평균 무선 장치 수	$0.1\text{-}1000\text{km}^{-2}$
M	직교 탐색 자원의 수	10
ξ	수신 SINR 문턱값	0 dB
$\bar{\chi}$	로그정규음영의 표준편차	7 dB
$1/\sigma^2$	1km 에서의 평균 수신 SNR	22.89 dBm
ν	송신확률	$0 < \nu < 1$
$\nu^*, \hat{\nu}$	S 최대화 최적, 부최적 ν	-

(1)과 시뮬레이션 결과는 정확히 일치하며, 수학적 (3)의 $\hat{\nu}$ 는 S 의 최대값에 매우 근접함을 확인할 수 있다. 또한, 수학적 (2)의 $s(\nu)$ 는 대부분 S 를 잘 근사화하지만, 매우 높은 부하에서는 (예. $\lambda=200$) [3]의 수학적 (10)이 S 에 보다 가깝다. 하지만, $s(\nu)$ 로부터 유도되는 수학적 (3)의 $\hat{\nu}$ 는 여전히 S 의 최대값을 매우 잘 제공하고 있다. 한편, 정리 III-1에서 도출된 바와 같이, λ 가 증가하고 감소함에 따라 $\hat{\nu}$ 는 각각 0과 1/2에 가까워진다는 것을 확인할 수 있다 (예. 각각 $\lambda=1$ 과 $\lambda=200$ 의 경우).

그림 2는, [3]과 [4]의 부최적 ν 를 각각 $\bar{\nu}_3$ 와 $\bar{\nu}_4$ 이라 할 때, 제안된 수학적 (3)의 $\hat{\nu}$ 를, $\bar{\nu}_3$ 및 $\bar{\nu}_4$ 와 비교한다. 이 때, 그림 1 및 [3]과 [4]의 수치결과를 통해 S 는 ν 의 단봉함수 (unimodal function)라고 여겨진다. 따라서, 그림 2의 ν^* 는 S 의 최대화 측면에서 황금분할 탐색 (golden section search) 방법으로 얻어진다. 그림 2-(a)와 같이, $\hat{\nu}$ 는 0과 1/2 사이에 있고 λ 에 대해 미분가능한 형태인 반면, $\bar{\nu}_3$ 는 작은 λ 에 대해 1/2보

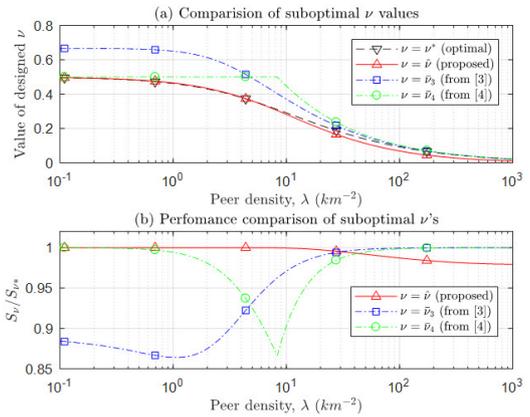


그림 2. 부최적 송신확률 비교
Fig. 2. Comparison of suboptimal ν 's.

다 큰 값을 가지고 $\bar{\nu}_4$ 는 특정 λ 에서 미분불가능하다. 그림 2-(b)는 $\nu=\nu^*$ 에서의 S 대비 부최적 ν 들의 S 값을 비교한다. $\bar{\nu}_3$ 는 $\lambda < 3$ 일 때, $\bar{\nu}_4$ 는 $6 < \lambda < 10$ 일 때, 최적 S 대비 10% 이상 낮은 성능을 보인다. 반면, $\hat{\nu}$ 는 높은 λ 값에서 (예, $\lambda=1000$) $\bar{\nu}_3$ 와 $\bar{\nu}_4$ 보다 낮은 성능을 갖지만, 최적 S 대비 성능 저하 정도는 2.5% 이하이다. 이와 같이, $\hat{\nu}$ 는 동작변수간 관계를 하나의 수학적 식으로 명확히 표현하면서도, 충분히 우수한 성능을 제공한다.

V. 결론

본 논문에서 Lambert W 함수 형태로 도출된 부최적 송신확률은 0과 1/2 사이에서 수신신호와 간섭 영향 간 균형을 이루며, 기존 연구의 부최적 송신확률 대비 최대 탐색 성능에 보다 가깝거나 충분히 우수한 성능을 제공하였다. 향후 임의의 경로감쇄 지수 및 무선 장치들의 보다 일반적 공간 분포를 고려한 송신확률 도출로 연구를 확장해 갈 것이다.

References

- [1] 3GPP TS 23.303 ver.15.0.0, *Proximity-based services (ProSe)*, Jun. 2017.
- [2] K. Park, J. Kim, B. K. Jeong, K. B. Lee, and S. Choi, "Performance analysis of random resource selection in LTE D2D discovery," *J. KICS*, vol. 42, no. 3, pp. 577-584, Mar. 2017.
- [3] T. Kwon and J.-W. Choi, "Spatial perfor-

- mance analysis and design principles for wireless peer discovery,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 4507-4519, Aug. 2014.
- [4] T. Kwon, “Transmission probability design for random access based wireless peer discovery,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 18, no. 9, pp. 1603-1606, Sept. 2014.
- [5] G. K. Karagiannidis and A. S. Lioumpas, “An improved approximation for the Gaussian Q-function,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 644-646, Aug. 2007.