

셀룰러 기반 무선 사물인터넷 네트워크에서의 역방향 랜덤접속 성공확률 근사화

박한결*, 권태수^o

Approximation of Success Probability for Uplink Random Access in Cellular-Based Wireless IoT Networks

Han-Kyul Park*, Taesoo Kwon^o

요약

랜덤접속은 LPWA(Low Power Wide Area)와 같은 무선 IoT(Internet-of-Things) 네트워크에서의 핵심 접속 기술로 고려되고 있는 가운데, 본 논문은 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서의 역방향 랜덤접속 성공확률의 근사화 방안을 제시한다. 수치 결과를 통해 제안된 근사화 방안은 원 성능을 잘 따르고 데이터 수집 장치의 밀도와 같은 핵심 네트워크 변수의 설계를 용이하게 함을 입증한다.

Key Words : Cellular-based wireless IoT networks, random access, stochastic geometry, wireless network design, uplink network

ABSTRACT

While a random access is regarded as a key access method for wireless IoT (Internet-of-Things) networks such as LPWA (Low Power Wide Area), this letter proposes the approximation method of success probability for uplink random access in cellular-based wireless IoT networks. The numerical results demonstrate that the proposed approximation

method well traces the original performances and it facilitates the design of a key network parameter such as the density of data collectors.

I. 서론

랜덤접속은 LPWA(Low Power Wide Area)와 같은 IoT(Internet-of-Things)를 지원하는 셀룰러망의 핵심 역방향 접속 기술로서 고려되고 있다. 특히 LPWA의 대표 기술인 LoRa, Sigfox, NB-IoT에서는 수많은 단말들의 설치에 필수적인 저가 무선 장치 구현을 위해 그 동작이 단순한 랜덤접속 기술이 기반 접속 기술로서 간주되어왔다^{1,2}. 뿐만 아니라, 지상 기지국과 함께 중계기, 비행 기지국 등 다양한 데이터 수집 장치의 활용으로 IoT 장치들로부터의 역방향 데이터 수집 성능을 더욱 개선해나가고 있다^{3,4}. 이처럼 무선 IoT 네트워크에 대한 관심이 점점 더 고도화되고 있으며, 수많은 무선 장치들이 존재하는 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서의 상호영향 분석을 위해 시스템 차원 성능 분석이 필요하다. 최근 확률기하 이론에 기반한 무선 장치들의 무선전파 상호영향의 수학적 정량화를 통해 무선 네트워크의 수학적 성능 분석 연구가 이루어지고 있다¹⁻⁵. 이에 따라, 본 논문에서는 특히 임의 경로감쇄 지수 환경에 적용 가능한 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서의 역방향 랜덤접속 성공확률의 근사화 방안을 제시하고, 제안 방안이 주요 매개변수 설계에 응용될 수 있음을 보인다.

[1]의 연구에서는 센서 노드 및 데이터 수집 장치가 프라이머리 점 과정(PPP, Poisson Point Process)에 따라 분포한 환경에서 네트워크의 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio) 확률분포를 적분식이 포함된 수학식으로 표현하고, 이를 응용하여 네트워크의 SINR 요구를 만족하는 데이터 수집 장치의 수 및 센서 노드의 송신 전력의 설계방안을 제시하였다. 하지만, [1]의 연구에서는 경로감쇄 지수가 4인 경우에만 적분식을 제거하여 주요 설계 변수간 상관관계 파악에 용이한 형태의 수학식을 제시하였고, 임의 경로감쇄 지수에 대해서는 여전히 적분식이 남아있다는 한계점을 가진다. [2]에서는 Ginibre 점과정(GPP,

* 이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-9066-784X)Seoul National Univ. of Science and Technology, Dept. of CSE, hkpark15@seoultech.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-6624-4863)Seoul National Univ. of Science and Technology, Dept. of CSE, tskwon@seoultech.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201903-025-A-LU, Received March 22, 2019; Revised May 2, 2019; Accepted May 6, 2019

Ginibre Point Process)을 통해 데이터 수집 장치 및 센서 노드들의 공간적 분포를 상호 연관성을 갖도록 일반화함으로써, 보다 일반화된 센서 네트워크에서의 SINR 확률분포를 수학적 근사화를 진행하였지만, 그 복잡도로 인해 데이터 수집 장치의 수와 같은 동작 변수의 순위순 설계에의 응용은 용이하지 못하다는 한계점을 가진다.

본 논문의 제안 사항은 다음과 같다. (i) 임의 경로 감쇄 지수에 대해 γ 함수와 같은 잘 알려진 형태의 함수를 사용하여 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서의 역방향 랜덤접속 성공확률을 간소한 형태로 근사화한다; (ii) 임의 경로감쇄 지수에 대해 주어진 역방향 SINR 성능을 만족시키기 위해 요구되는 데이터 수집 장치의 수의 설계를 위해 제안 근사화 방안이 유용하게 활용될 수 있음을 보인다.

II. 역방향 랜덤접속 네트워크 모델

그림 1은 본 논문에서 가정하는 셀룰러 기반의 역방향 랜덤접속 무선 IoT 네트워크이며, 직교 자원의 수(RB, Resource Block)가 3개인 경우를 예를 들어 나타내었다. 데이터 수집 장치와 단말은 각각 λ 및 μ 를 갖는 PPP에 따라 상호 독립적으로 분포되며, 각 단말은 송신 확률 ν 에 따라 송신 여부를 결정한다. 이때, 데이터 수집 장치는 기지국, 중계기, 클러스터 헤더 등이 될 수 있으며, 본 논문에서는 단말이 송신하는 데이터를 직접 수신하는 모든 장치를 데이터 수집 장치라 명명한다. 또한 송신 단말은 M 개의 직교 자원 중 임의로 하나를 선택하여 송신한다. 송신된 메시지는 단위 거리당 경로감쇄 A , 링크간의 거리 d , 경로감쇄 지수 α 에 따라 $Ad^{-\alpha}$ 의 경로감쇄를 겪으며, 음영효과를 무시하고 Rayleigh 페이딩을 가정한다. 표 1은 시뮬레이션 매개 변수로, 주로 [6]의 값을 참조로 하였다. 또한 별도의 언급이 없는 한, 본 논문에서 사용

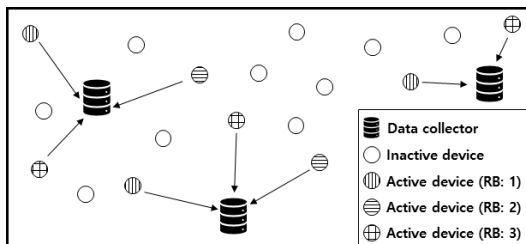


그림 1. 셀룰러 기반의 역방향 랜덤접속 무선 IoT 네트워크
Fig. 1. Cellular-based uplink random access wireless IoT networks

표 1. 시뮬레이션 매개 변수 및 설정 값
Table 1. Simulation parameters & their value

Notation	Description	Value
B	Bandwidth	0.125 MHz
p	User equipment(UE) Transmit power	23 dBm
λ	Number of data collectors	-
μ	Number of UEs	-
ν	Transmit probability	-
M	Number of RBs	10
A	Path loss at a unit distance	1
α	Path loss exponent	-
$\bar{\sigma}$	Noise power per hertz	-174 dBm
σ	Normalized noise power	$\bar{\sigma}/Ap$

되는 변수는 표 1의 표기를 따른다.

이러한 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서, 수신 데이터 수집 장치가 송신 단말로부터 ξ 이상의 SINR을 겪는 메시지를 수신할 확률은 [1]의 III절의 결과를 활용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pr\{\theta > \xi\} = \pi\lambda \int_0^\infty \exp(-\pi(\kappa + \lambda)x - \xi\sigma^2 x^{\alpha/2}) dx, \quad (1)$$

수학식 (1)에서 θ 는 상향링크 수신 SINR이며, $\Delta(\alpha) \triangleq \Gamma(1 - \frac{2}{\alpha})\Gamma(1 + \frac{2}{\alpha}) = \frac{2\pi/\alpha}{\sin(2\pi/\alpha)}$, $\Gamma(x) \triangleq \int_0^\infty t^{x-1} \exp(-t) dt$, $\kappa \triangleq (\frac{\nu\mu}{M})\xi^{2/\alpha} \Delta(\alpha)$ 으로 정의된다.

III. 역방향 랜덤접속 성공확률 근사화 및 응용

수학식 (1)에 기반한 성능은 주요 설계 변수인 λ 와 p 등의 관계를 적분식 형태로 표현하고 있으므로, 해당 매개변수간 상관관계를 명확히 표현하지 못한다. 따라서, 본 절에서는 수학식 (1)을 근사화함으로써 매개변수간 관계를 보다 간소한 형태로 표현한다.

정리 1: 수학식 (1)은 다음과 같이 하한 근사화할 수 있다.

$$\Pr\{\theta > \xi\} > p_{LB} = \frac{\lambda}{\lambda + \kappa} \exp\left(-\frac{\xi\sigma^2}{\pi^{\alpha/2}(\kappa + \lambda)^{\alpha/2}} \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)\right). \quad (2)$$

또한, p_{LB} 를 다음과 같이 두 가지 방법으로 하한 근

사화할 수 있다.

$$P_{LB} > \frac{\lambda}{\lambda + \kappa} \left(1 - \frac{\xi \sigma^2}{\pi^{\alpha/2} (\kappa + \lambda)^{\alpha/2}} \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right) \right), \quad (3)$$

$$P_{LB} > \exp\left(-\frac{\kappa}{\lambda} - \frac{\xi \sigma^2}{\pi^{\alpha/2} (\kappa + \lambda)^{\alpha/2}} \Gamma\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)\right). \quad (4)$$

증명: $1/\pi(\kappa + \lambda)$ 을 평균값으로 갖는 지수분포를 따르는 랜덤 변수 X 를 고려하여 수학적 (1)은

$$\Pr(\Theta > \xi) = \frac{\lambda}{\lambda + \kappa} \mathbb{E}_X[\exp(-\xi \sigma^2 x^{\alpha/2})]$$

으로 표현할 수 있으며, 이는 양센 부등식(Jensen's inequality)을 적용하여 수학적 (2)로 나타낼 수 있다. $|x|$ 가 매우 작은 값을 가질 때, $\exp(-x) = 1 - x$ 으로 표현할 수 있으므로 수학적 (2)는 수학적 (3)으로 표현 가능하다. 또한 $x > 0$ 일 때, $1/(1+x) > \exp(-x)$ 이므로 수학적 (2)는 수학적 (4)로 근사화 가능하다. ■

특히 $\sigma^2 \rightarrow 0$ 인 간섭 제한적 환경에서, 수학적 (4)는 $\exp(-\kappa/\lambda)$ 로 나타낼 수 있으며, κ/λ 가 매우 작은 값을 갖는다면 $\lambda/(\lambda + \kappa) \approx \exp(-\kappa/\lambda)$ 이므로 수학적 (2)-(4)는 유사한 성능을 나타낸다.

따름 정리 1: 효율적인 네트워크 설계를 위해, 수학적 (2)-(4)를 응용하여 네트워크의 SINR 요구를 만족하는 유일한 λ 의 값을 결정할 수 있다.

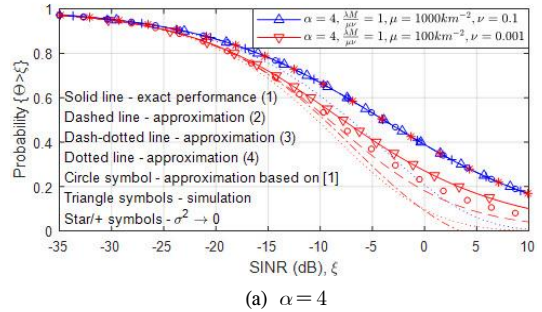
증명: 수학적 (2)-(4)는 모두 λ 에 대해 단조 증가함수이므로 이분법(bisection method)을 활용하여 λ 에 대한 유일 해를 도출할 수 있다. ■

IV. 근사화 성능 수치 결과 및 논의

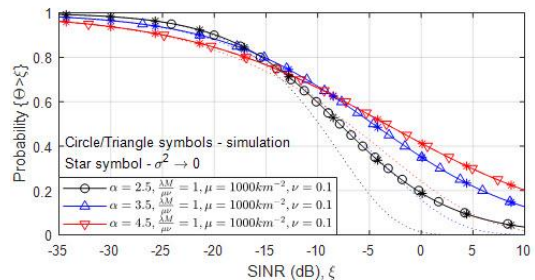
본 절에서는 III절에서 제안한 근사화 성능을, 수학적 (1)로 표현되는 역방향 랜덤접속의 원 성능 및 [1]에서 제안한 기존 근사화 성능과 비교한다. 또한 본 논문에서 제안된 근사화 방안들의 임의 α 에 대한 성능을 확인하고, 제안한 근사화 방안들이 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서의 데이터 수집 장치의 수와 같은 매개변수 설계에 있어 응용될 수 있음을 확인한다.

그림 2과 그림 3에서 실선, 파선, 쇄선 및 점선은 각각 수학적 (1), (2), (3) 및 (4)에 기반한 근사화 방안들의 성능을 나타낸다.

그림 2-(a)는 $\alpha = 4$ 인 환경에서 간섭의 영향이 큰 환경($\mu = 1000km^{-2}, \nu = 0.1$)과 간섭의 영향이 작은 환경($\mu = 100km^{-2}, \nu = 0.001$)으로 구분되며, [1]에서 제



(a) $\alpha = 4$



(b) $\alpha = 2.5, 3.5, 4.5$

그림 2. SINR 근사화 성능
Fig. 2. SINR approximation performances

안한 근사화 성능과 III절에서 제안한 근사화 방안들의 성능을 비교한다. 간섭의 영향에 관계없이 수학적 (1)은 시뮬레이션 결과와 일치하며, 정확한 성능을 나타낸다. 반면에 간섭의 영향이 큰 환경에서 ξ 가 -30dB 이하로 매우 작은 경우, 본 논문에서 제안한 근사화 방안들 모두 정확한 성능을 나타내지만, 수학적 (4) 기반의 근사화 성능은 ξ 가 증가할수록 κ/λ 가 증가하므로 점차 부정확한 성능이 나타난다. 또한 간섭의 영향이 작은 환경에서 III절에서 제안한 근사화 방안들은 [1]의 근사화 방안 대비 부정확한 성능을 나타내지만, [1]의 근사화 방안은 $\alpha = 4$ 인 환경에서만 적용되는 반면, III절에서 제안한 근사화 방안들은 임의의 α 에 대해 적용할 수 있다. 그림 2-(b)는 간섭의 영향이 작은 환경에서 본 논문에서 제안한 근사화 방안 기반의 임의 α 에 대한 SINR 성능을 나타낸다. 수학적 (2), (3) 모두 우수한 근사치를 제공하며, 수학적 (4)의 근사화 방안 또한 낮은 ξ 에 한해 우수한 근사치를 제공함을 확인하였다.

그림 3에서는 이분법을 활용하여 임의의 α 에 따른 ξ 를 만족하는 최소 λ 를 나타내었다. 주어진 α 및 ξ 에 대해, 간섭의 영향이 큰 환경에서 비교적 정확한 근사화가 이루어짐을 알 수 있다. 이에 따라 수많은 무선 단말들이 존재하는 셀룰러 기반의 역방향 랜덤접속

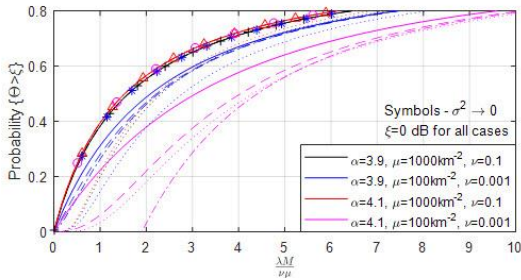


그림 3. SINR 요구조건 만족을 위한 λ 설계
 Fig 3. Design of λ for meeting SINR requirement

무선 IoT 네트워크의 설계에 있어, 제안 근사화 방안들이 응용될 수 있을 것으로 보인다. 또한, 제안 방안들은 매개변수간 상관관계를 보다 간소하게 나타낼 수 있으며, 적분을 필요로 하는 기존 근사화 방안보다 빠른 속도로 설계 변수의 값을 도출 할 수 있다는 장점을 갖는다.

V. 결론

본 논문은 확률기하 이론을 적용하여 셀룰러 기반의 무선 IoT 네트워크에서의 임의 경로감쇠 지수에 대해 역방향 랜덤접속 성공확률의 근사화 방안을 제안하였다. 제안 방안들은 간섭 영향이 클수록 우수한 근사화 성능을 제공하였으며, 특히 이를 통해 매개변수간 상관관계를 기존보다 간소한 형태로 나타내어 데이터 수집 장치의 수와 같은 핵심 네트워크 매개변수들의 설계에 활용할 수 있었다. 향후, 역방향 송신 전력제어와 같은 보다 실제 네트워크 동작을 반영한 연구로 확장해 나갈 것이다.

References

- [1] T. Kwon and J. M. Cioffi, "Random deployment of data collectors for serving randomly-located sensors," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 6, pp. 2556-2565, Jun. 2013.
- [2] H.-B. Kong, P. Wang, D. Niyato, and Y. Cheng, "Modeling and analysis of wireless sensor networks with/without energy harvesting using Ginibre point processes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 16, no. 6, pp. 3700-3713, Jun. 2017.
- [3] D. Malak, H. S. Dhillon, and J. G. Andrews, "Optimizing data aggregation for uplink machine-to-machine communication networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 3, pp. 1274-1290, Mar. 2016.
- [4] G. Hattab and D. Cabric, "Performance analysis of uplink cellular IoT using different deployments of data aggregators," in *Proc. IEEE GLOBECOM '18*, pp. 1-6, Abu Dhabi, United Arab Emirates, Dec. 2018.
- [5] G.-H. Shin and T. Kwon, "Performance approximation of downlink multicell networks based on stochastic geometry," *J. KICS*, vol. 42, no. 5, pp. 989-991, May 2017.
- [6] "LoRaWAN Regional Parameters," LoRa Alliance Inc., San Ramon, CA, Ver. 1.3, Jul. 2018.