

사물인터넷 응용에서 CSS 변조 방식을 적용한 LoRa 시스템의 성능 분석

Performance Analysis of LoRa System with CSS Modulation Scheme in IoT Applications

노재성*

서일대학교 정보통신공학과

Jae-sung Roh*

Department of Information and Communication Engineering, Seoil University, Seoul 02192, Korea

[요 약]

사물인터넷은 다양한 사물이 네트워크를 기반으로 연결되어 정보를 처리하는 네트워크 기술이다. 사물을 인터넷에 연결을 위해서는 통신 채널의 특성과 환경이 고려되어야 한다. 최근 제안된 LPWA(low power wide area) 네트워크 기술은 낮은 데이터 전송률과 넓은 통신반경을 지원하며 동시에 매우 낮은 전력으로 동작할 수 있는 특징을 가지고 있어서 사물인터넷의 다양한 응용 분야에 적용될 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 대표적인 LPWA 네트워크 기술 중 LoRa 시스템의 성능을 분석하였다. 특히, 라이시안 페이딩 채널에서 주요 파라미터에 따른 LPWA LoRa 시스템의 오율 성능을 평가하였다. LPWA LoRa 시스템의 성능을 분석한 결과, AWGN(additive white gaussian noise)와 레일리 페이딩을 포함하는 라이시안 페이딩 채널에서 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ , 라이시안 페이딩의 강도 파라미터 K , 확산 계수 SF 가 증가함에 따라서 CSS(chirp spread spectrum) 변조 방식을 적용한 LoRa 시스템의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있었다.

[Abstract]

The Internet of Things is a network technology in which various objects are connected based on a network to process information. In order to connect objects to the Internet, the characteristics and environment of the communication channel must be considered. Recently proposed LPWA (low power wide area) network technology has the advantage of supporting low data transmission rate and wide communication range while operating at very low power, so it can be applied to various applications of the Internet of Things. In this paper, the performance of the LoRa system, one of the representative LPWA network technologies, was analyzed. In particular, the error rate performance of the LPWA LoRa system according to the main parameters in the Rician fading channel was evaluated. As a result of analyzing the performance of the LPWA LoRa system, it was found that the error rate performance of the LoRa system applying the CSS(chirp spread spectrum) modulation method improved as the signal-to-noise power ratio of the received signal, the strength parameter of the Rician fading, and the spreading factor increased in the Rician fading channel including AWGN(additive white gaussian noise) and Rayleigh fading.

Key word : CSS modulation, Internet of Things, LoRa system, low power wide area, Rician fading.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2024.28.6.932>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 28 November 2024; Revised 25 December 2024

Accepted (Publication) 30 December 2024 (31 December 2024)

*Corresponding Author; Jae-sung Roh

Tel: *** - ***** - *****

E-mail: jsroh@seoil.ac.kr

1. 서론

4차 산업혁명과 정보통신기술이 확산됨에 따라 기술이 융합되어 새로운 디지털 서비스를 지원하기 위해 저전력 장거리 네트워크 기술에 대한 수요가 증가하고 있다. 이러한 통신 기술의 진화 과정 중에 사물인터넷은 다양한 사물이 네트워크를 기반으로 연결되어 정보를 수집, 생성, 공유 및 활용되는 네트워크 기술이다. 사물인터넷의 디바이스는 기본적인 통신기능을 중심으로 데이터 수집, 저장, 처리 및 액추에이션 기능을 포함하고 있다. 수집된 데이터는 유선 및 무선 네트워크를 통해 원격지 서버로 데이터를 전송하며, 원격지 서버에서는 수신된 데이터를 기반으로 명령을 수행한다. 현재 사물인터넷 서비스의 수요는 지속적으로 증가하고 있으며 디바이스 또한 급격히 증가하고 있다. 사물인터넷의 디바이스는 센서와 하드웨어로만 구성된 단순 제품에서부터 스마트 기기와 연동되어 사용자에게 어플리케이션을 제공하는 제품, 센서를 통해 수집한 데이터를 서버로 보내 분석하기 위한 제품까지 산업과 생활 분야에 걸쳐 다양한 응용 서비스로 활용되고 있다[1]-[3].

기존 사물인터넷의 네트워크 접속 방식에는 Wi-Fi, 블루투스, 모바일 기술 등이 많이 사용되었으며 이 중에 모바일 기술은 통신 범위가 넓지만 단말의 가격이 비싸다는 단점이 있다. 최근 산업 분야에서 장비의 원격 모니터링을 위해 사물인터넷의 통신 방식 중 Wi-Fi 기술을 사용하는 WLAN(wireless local area network)와 블루투스 기술을 사용하는 WPAN(wireless personal area network) 등이 저전력의 통신 방식으로써 많이 사용되고 있다. 하지만 이러한 통신방식은 통신 가능거리가 짧기 때문에 모니터링 범위가 넓은 경우에는 추가적인 장치의 설치가 수반되기 때문에 설치 및 관리 비용의 증가하게 된다. 이와 같은 단점을 극복하기 위해 저전력 장거리 (LPWA; low power wide area) 네트워크 기술이 각광받고 있으며 이 기술은 저전력 장거리 통신이 가능하기 때문에 광범위한 무선 네트워크 구축이 가능한 장점을 활용한 LPWA 네트워크 기술에 대한 연구와 시스템 성능 분석이 진행되고 있다[4],[5].

LPWA 네트워크 기술은 저 전력 소모로 긴 배터리 수명을 가지며 저렴한 단말 가격과 구축비용으로 많은 수의 디바이스를 넓은 범위에서 안정적인 서비스를 제공할 수 있다. LPWA 네트워크 기술은 환경 정보 모니터링, 화재 경보, 가스 및 수도 검침 서비스 등에 적합하며 전송 지연에 큰 영향이 없고 전송 데이터가 크지 않은 서비스 응용에 적절하다. 사물인터넷을 위한 무선 통신 기술의 수요 변화 예측에 의하면 LPWA 네트워크 기술을 사용한 적용 사례가 지속적으로 증가하여 사물인터넷 연결 기술 중에서 가장 많은 부분을 차지할 것으로 예상된다.

국내의 무선통신 환경은 국토에 산악지역이 많아 사물인터넷을 구현하기가 어려운 경우가 많다. 산악지역은 LOS (line of sight) 환경을 가지는 경우도 있고 나무나 숲에 의해 도심지역보다 환경적인 영향을 많이 받고 있다. 따라서 전파모델에 대한 분석은 다양한 지역의 환경요인을 고려하여 채널 모델을

설정하고 이를 바탕으로 사물인터넷 시스템을 설계하는 것이 필요하다[6],[7].

장거리 통신을 위한 지형은 나라마다 지형의 구조가 다르고 도심지 건물의 높이와 인공 구조물의 차이가 심한 경우가 많으며 도로를 따라 좌우로 건물이 빈틈없이 들어선 환경이 많아서 LOS가 보장되지 않는 경우가 많다. 본 연구에서 분석하는 LoRa 기반의 통신 시스템은 많은 장점을 가지고 있는 반면 LoRa 노드와 LoRa 게이트웨이 사이의 무선 통신 채널에서 발생하는 열악한 통신 환경과 다수의 건물로 구성된 시설물이 존재하는 경우에는 신호의 열화 현상이 급격히 이루어지므로 이러한 상황을 이해하기 위한 LoRa 기반의 통신 시스템의 성능 분석이 필요하다. 따라서 무선 채널에서 발생하는 페이딩 현상을 확률적으로 표현하고 채널 상태의 변화를 모델링하는데 다양한 통계적 분포가 사용되고 있다. 연구에서 채택한 무선 채널 모델인 라이시안 페이딩은 직접 경로 신호 성분과 다중 경로 신호 성분이 동시에 존재하는 환경을 모델링하는 페이딩 유형으로 신호의 해석에 유용하다. 본 논문에서는 LPWA 네트워크 표준을 분석하고 LoRa 기반 통신 시스템의 성능 분석을 위해 채널 환경에 대한 전파모델을 분석한다. 그리고 이러한 채널 모델을 통하여 사물인터넷 서비스 제공을 위한 LoRa 기반 통신 시스템의 오율 성능을 분석하고자 한다.

II. LPWA 네트워크 표준 및 LoRa 시스템

사물인터넷을 위한 LPWA 네트워크 기술은 비 면허 대역 통신기술과 면허 대역 통신기술이 있으며, 비 면허 ISM(industrial scientific medical) 대역을 사용하는 기술은 LoRaWAN과 SigFox 등이 있고 면허 대역을 사용하는 기술은 LTE-M(long term evolution - machines)과 NB-IoT(narrow bandwidth - internet of things) 등이 있다. 특히, 사물인터넷 서비스에 사용되는 기술은 항상 네트워크에 연결되어 있어야 하고 전력 소모가 적어야 한다. 따라서 사물인터넷 디바이스의 대부분이 전력 공급이 없는 환경에서 장시간 동작해야 하며 실시간으로 정보 교환을 해야 하므로 LPWA 네트워크 기술은 사물인터넷 산업의 핵심 기술이다. 그림 1은 LPWA 네트워크 노드, LPWA 네트워크 게이트웨이, 네트워크 서버, 응용 서버로 구성된 LoRa 네트워크의 구조를 나타낸다.

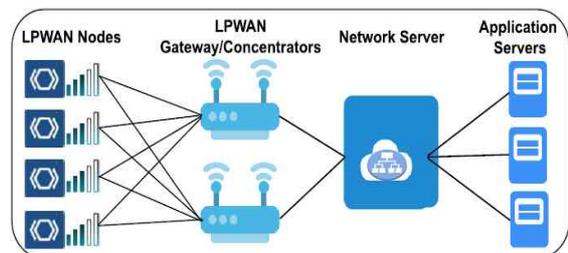


그림 1. LoRa 네트워크의 구조
Fig. 1. Structure of LoRa network.

그림 1에서 LoRa 노드와 LoRa 게이트웨이 간의 통신은 서로 다른 주파수 채널 및 데이터 속도로 전송되며 LoRa 노드는 배터리 수명과 전반적인 네트워크 용량을 최대화하기 위해 LoRa 네트워크 인프라는 데이터 속도 적응 방식을 사용하여 각 노드의 데이터 속도와 출력을 관리한다. LoRa 노드와 LoRa 게이트웨이 간의 연결 단순화로 다수의 LoRa 노드의 수용이 가능하고 최적의 경로로 네트워크에서 LoRa 노드로 데이터 전송이 가능하다. 또한, LoRa 노드가 복수의 LoRa 게이트웨이에 접속이 가능하고 신호 간섭에 강하여 최적의 주파수 활용도를 제공한다[8],[9].

그림 2는 LoRaWAN의 계층 구조를 나타낸다. LPWA 네트워크를 구현하는 방식 중에서 LoRaWAN은 2015년 IBM, Semtech, Microchip, SKT 등의 멤버로 구성된 LoRa Alliance에서 저 전력 장거리 통신을 위해 발표한 기술 표준이다. LoRaWAN은 네트워크에 대한 프로토콜과 네트워크 구조를 정의하며 LoRa 노드의 배터리 수명, 네트워크 용량, 서비스 품질, 보안 기능을 제공한다. LoRa는 LoRaWAN의 물리 계층 기술로 장거리 통신 링크를 지원한다. LoRaWAN의 물리 계층에서는 CSS(chirp spread spectrum) 변조 방식을 사용하여 간섭에 강하면서 비동기식 저 전력 원거리 통신 기능을 제공한다. LoRa 시스템에서는 데이터 전송률보다 훨씬 넓은 주파수 대역을 사용하여 장거리 전송에 필요한 수신감도에 대한 제약을 완화하며 하나의 심벌을 전송 중에 지속적인 반송 주파수의 변화를 통해 확산 효과를 얻게 된다. 이것은 시간에 따라 주파수를 서서히 높이거나 낮추어서 전송하며 사용 주파수 대역을 확산시킨다. 이로 인해 채널의 다중 경로 및 음영지역에서 발생하는 산란, 반사, 굴절 및 손실을 완화시켜 장거리 통신 및 저 전력 통신을 가능하게 한다.

LoRa의 데이터 전송 방식은 3개의 Class를 가지고 있다. Class A는 센서와 같은 단말기에서 데이터를 전송하는 경우에 주로 사용되며 엡 링크 위주의 서비스에 주로 사용된다. Class B는 디바이스가 정해진 주기에 동기화되어 주로 배터리가 탑재된 다운 링크 위주의 서비스에 사용된다. Class C는 디바이스가 항상 송수신이 가능한 상태인 다운 링크가 가능한 상태로 있으며 별도의 전원 공급이 가능한 서비스의 경우에 사용된다. LoRa 노드는 주어진 요구사항에 따라 전송방식을 조정하여 전송방식을 사용한다.

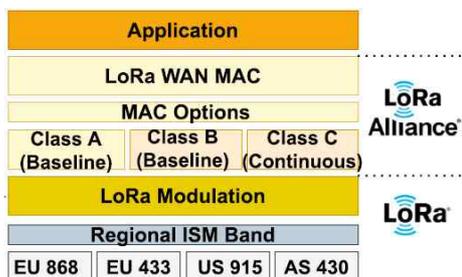


그림 2. LoRaWAN의 계층 구조
Fig. 2. Layer structure of LoRaWAN.

표 1. 사물인터넷을 위해 제안된 LPWA 기술
Table 1. Comparison of LPWA technologies proposed for the Internet of Things.

Parameters	Technology	
	NB-IoT	LoRa WAN
Frequency	700-900 MHz	433, 868, 780, 915 MHz
Bandwidth	180 kHz	7.8 - 500 kHz
Packet Size	16 - 2536 bits	20 - 256 Byte
Multiple Access	OFDMA	Pure-ALOHA
Uplink Modulation	BPSK, QPSK	LoRa CSS
Down Modulation	QPSK	LoRa CSS
Encryption	3GPP 128-256 bit	AES-128
Forward Error Correction	YES	YES

표 1에서는 사물인터넷을 위해 제안된 LPWA 네트워크 기술 중에서 NB-IoT와 LoRaWAN 기술을 주파수, 대역폭, 패킷 크기, 다중접속방식, 상향/하향 링크 변조방식, 암호화, 채널 부호화 방식 적용 여부를 비교하고 있다. LoRaWAN은 NB-IoT에 비해 비 면허 대역을 사용하면서 CSS 변조방식을 사용하여 간섭에 강하고 장거리 전송의 장점을 가진다. 반면 NB-IoT는 LoRa에 비해 높은 최대 전송률 및 넓은 통신반경을 제공하는 장점이 있다[8].

LoRa 시스템에서의 CSS 변조신호는 그림 3과 같이 증가 칩을 사용하며 전송 데이터는 심볼 당 단위 비트의 칩을 두어 칩 신호에 실어 보낸다. LoRa 시스템에서 CSS 신호는 각 신호마다 서로 다른 확산 계수를 적용하여 신호간의 직교성을 제공하며 데이터 전송률을 제어하는 기능이 있다. LoRa 시스템의 데이터 전송률은 아래 식과 같이 나타낼 수 있다[10].

$$R_b = SF \cdot \frac{1}{\left(\frac{2^{SF}}{B}\right)} \text{ [bps]} \tag{1}$$

여기서 B는 대역폭이고 SF는 확산 계수 (spreading factor)를 나타내며 1개의 심볼로 구성된 칩의 개수로서 이것이 많을수록 시스템 성능이 개선된다.

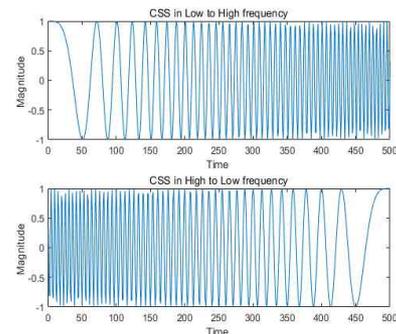


그림 3. LoRa 시스템의 CSS 신호
Fig. 3. CSS signal of LoRa system.

III. 페이딩 채널에서 LoRa 시스템의 성능

LoRa 시스템은 CSS 변조 방식을 채택하고 있으며 CSS 신호는 대역폭이 B인 기저 대역 LoRa 시스템을 고려하면 $T(=1/B)$ 마다 하나의 LoRa 신호 샘플이 전송된다. 샘플링 주기가 T인 LoRa 심볼에 해당하는 LoRa 시스템의 신호 파형 $s_k(nT)$ 는 2^{SF} 개 샘플로 구성되며 다음과 같이 표현된다[11],[12].

$$s_k(nT) = \sqrt{E_S} \omega_k(nT) \quad (2)$$

$$= \sqrt{\left(\frac{E_S}{2^{SF}}\right)} e^{j2\pi[(k+n) \bmod 2^{SF}] \frac{n}{2^{SF}}}$$

여기서 $T(=1/B)$ 는 샘플링 주기, $n = 0, 1, 2, \dots, (2^{SF} - 1)$, SF 는 확산 계수, E_S 는 신호의 에너지, $\omega_k(nT)$ 는 정규 기저 함수이다. 가우시안 잡음 채널을 통과한 수신 신호는 수신기의 상관계 출력 값에 따라서 LoRa 시스템의 CSS 신호를 복조한다.

$$\sum_{n=0}^{2^{SF}-1} r_k(nT) \cdot \omega_i^*(nT) = \begin{cases} \sqrt{E_S} + \phi_i, & i = k \\ \phi_i, & i \neq k \end{cases} \quad (3)$$

여기서 $r_k(\cdot)$ 는 수신된 신호, ϕ_i 는 가우시안 잡음, $\omega_i^*(nT)$ 는 i 번째 기저 함수의 복소수 공액 성분을 나타낸다. 가우시안 잡음 채널에서 CSS 변조 방식을 적용한 LoRa 시스템의 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비와 확산 계수에 의한 오율식은 다음과 같다.

$$P_b(\gamma) = \frac{2^{SF-1}}{2^{2SF}-1} \sum_{q=1}^{2^{SF}-1} \frac{(-1)^{q+1}}{q+1} \left(\frac{2^{SF}-1}{q} \right) \exp\left(\frac{-q}{q+1} \gamma \cdot 2^{SF}\right) \quad (4)$$

여기서 γ 는 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비, SF 는 확산 계수를 의미한다.

무선 채널에서의 페이딩 현상은 무선 신호가 전파되는 동안 시간, 공간, 주파수에 따라 신호 강도와 품질이 변동되는 현상을 나타낸다. 페이딩은 신호의 다중 경로 전파와 이동성으로 인해 발생하며, 다양한 통신 환경에서 성능 저하를 일으킬 수 있다. 다중 경로 전파에서 전파되는 신호는 수신기까지 직진하지 않고 물체나 지면 등에 반사되거나 굴절하여 여러 경로를 따라 전송된다. 각 경로의 신호가 서로 간섭을 일으켜 합성 신호의 세기와 위상이 달라지게 된다. 또한, 무선 채널에서 페이딩은 확률적으로 설명되며 채널 상태를 모델링하는 데 다양한 통계적 분포가 사용되고 있다. 특히, 라이시안 페이딩은 직접 경로 신호와 다중 경로 신호가 동시에 존재하는 환경을 모델링하는 페이딩 유형으로 신호의 주요 강한 신호부분이 직선 경로로 도달하며, 나머지 약한 신호는 다중 경로로 도달하는 특성을 가진다. 이러한 무선 채널에서 수신 신호의 크기는 라이시안 확률 분포를 따르며, 이는 직접 경로와 다중 경로의 신호가 합성된 결과를 나타낸다.

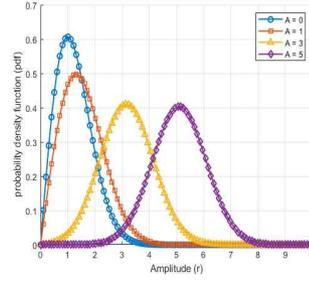


그림 4. 라이시안 페이딩의 확률밀도함수
Fig. 4. Probability density function of Rician fading.

수신된 신호 진폭 r과 LOS 신호 성분의 크기 A에 따른 라이시안 페이딩의 확률밀도함수는 다음과 같다[6],[7].

$$f(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{rA}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

여기서 σ^2 는 가우시안 잡음의 분산이고 $I_0(\cdot)$ 는 0차 변형 베셀 함수이다. 그림 4는 수신된 신호의 진폭과 LOS 신호 성분의 크기에 따른 라이시안 페이딩의 확률밀도 함수를 그림으로 표현한 것이다. LOS 신호 성분의 크기 A가 증가함에 따라서 LOS 성분이 커지며 라이시안 페이딩의 분포가 중심으로 이동하며 피크가 높아지는 것을 알 수 있다. 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ 와 라이시안 페이딩 강도 K에 따른 라이시안 페이딩의 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(\gamma) = \frac{1+K}{\Gamma} \exp\left(-K - \frac{(1+K)\gamma}{\Gamma}\right) I_0\left(2\sqrt{\frac{K(1+K)\gamma}{\Gamma}}\right) \quad (6)$$

여기서 K는 라이시안 페이딩의 강도를 나타내는 파라미터, γ 는 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비, Γ 는 수신 신호의 평균 신호 대 잡음 전력비, $I_0(\cdot)$ 는 0차 변형 베셀 함수를 의미한다.

라이시안 페이딩의 강도는 직접 경로의 신호 강도와 다중 경로의 신호 강도에 따라서 표현되며 라이시안 페이딩의 강도를 나타내는 파라미터 K 값이 클수록 직접 경로의 영향이 크며, K 값이 0에 가까우면 레일리 페이딩으로 수렴하게 된다. 라이시안 페이딩은 LOS 경로가 어느 정도 확보된 환경에서 잘 나타나며 LOS 경로가 없고 다중 경로만 존재하는 환경을 표현하는 레일리 페이딩은 LOS가 차단된 밀집 지역이나 실내 환경에서 흔히 발생한다. 라이시안 페이딩 채널에서 CSS 변조 신호 방식을 적용한 LoRa 시스템의 오율식은 식(4)와 식(6)을 이용하여 다음과 같이 얻어진다.

$$P_f(I) = \int_0^\infty P_b(\gamma) \cdot f(\gamma) d\gamma \quad (7)$$

그림 5는 AWGN 채널에서 CSS 변조 방식을 적용한 LoRa 시스템에서의 오율 성능을 나타낸다. 그림 5에서는 LoRa 시스템

템의 주요 파라미터인 확산 계수 SF 와 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ 에 따른 오율 성능을 비교하고 있다. LoRa 시스템의 CSS 변조 신호에 적용되는 확산 인자 SF 가 클수록 수신 데이터 심볼에 구성된 칩의 개수가 많아지며 이로 인해 신호의 왜곡 또는 손실로부터 강인하게 된다. 특히 수신단은 수신 신호로부터 왜곡 또는 손실된 칩과 그 외에 칩의 비율을 판단하여 복조하기 때문에 칩의 개수에 비례하여 전송 소요시간이 길어지며 데이터의 전송 속도는 늦어진다. 그림 5를 통하여 LoRa 시스템에서 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ 와 확산 계수 SF 가 증가함에 따라서 CSS 변조 신호의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있다.

그림 6은 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 페이딩의 강도에 따른 확산 계수 $SF=4$ 인 LoRa 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 그림 5에서 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 페이딩의 강도 K 와 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ 에 따른 오율 성능을 비교하고 있다. 그림 6을 통하여 라이시안 페이딩의 강도 K 와 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ 가 증가함에 따라서 CSS 변조 방식을 적용한 LoRa 시스템의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있다. K 값이 클수록 직접 경로의 영향이 크기 때문에 LoRa 시스템의 오율 성능은 개선되었고 $K=0$ 인 레일리 페이딩은 직접 경로의 신호 성분은 없고 다중 경로의 신호 성분만 존재하기 때문에 LoRa 시스템의 오율 성능은 $SNR=20 [dB]$ 에서 $BER=10^{-3}$ 정도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 7과 그림 8은 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 페이딩의 강도 K 와 확산 계수 SF 에 따른 LoRa 시스템의 오율 성능을 나타낸다. 그림 7과 그림 8을 통하여 무선 채널에서 라이시안 페이딩의 강도 K 와 확산 계수 SF 가 증가함에 따라서 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ 에 따른 LoRa 시스템의 오율 성능은 향상됨을 알 수 있다. 그림 8에서는 라이시안 페이딩의 강도 $K=8$ 인 무선 채널에서 확산 계수 $SF=6$ 인 LoRa 시스템의 오율 성능은 $SNR=20 [dB]$ 에서 $BER=10^{-6}$ 정도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

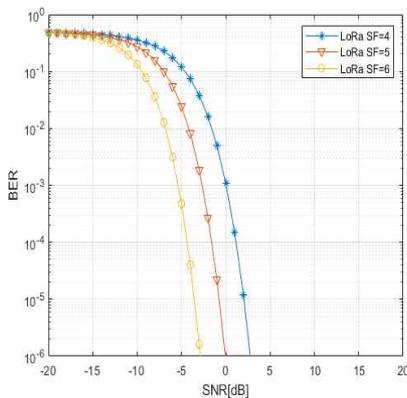


그림 5. AWGN 채널에서 확산 인자에 따른 오율 성능
Fig. 5. Error rate performance as a function of spreading factor in AWGN channel.

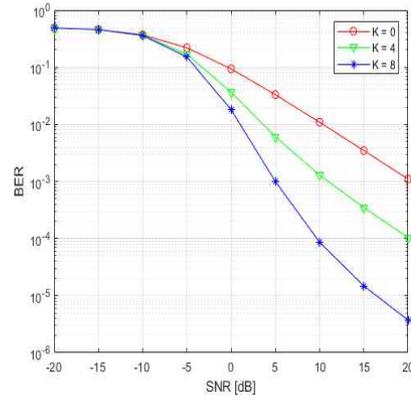


그림 6. 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 페이딩의 강도에 따른 오율 성능 ($SF=4$)
Fig. 6. Error rate performance as a function of the strength of Rician fading in Rician fading channel ($SF=4$).

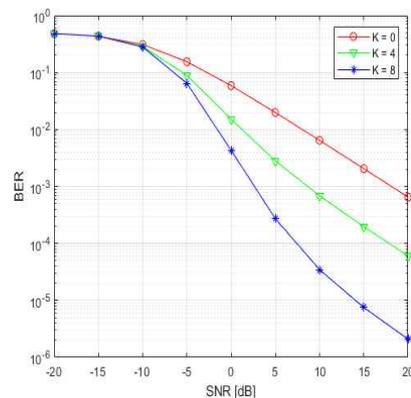


그림 7. 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 페이딩의 강도에 따른 오율 성능 ($SF=5$)
Fig. 7. Error rate performance as a function of the strength of Rician fading in Rician fading channel ($SF=5$).

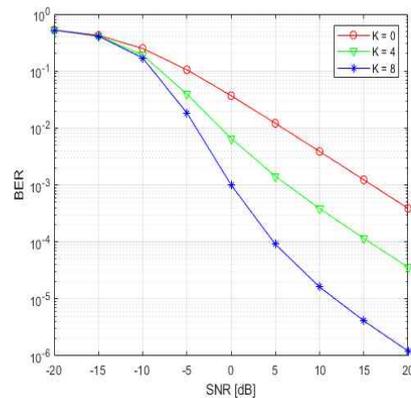


그림 8. 라이시안 페이딩 채널에서 라이시안 페이딩의 강도에 따른 오율 성능 ($SF=6$)
Fig. 8. Error rate performance as a function of the strength of Rician fading in Rician fading channel ($SF=6$).

IV. 결 론

사물인터넷은 다양한 사물이 네트워크에 연결되어 정보를 전송하는 네트워크 기술이다. 현재 사물인터넷 서비스 수요는 지속적으로 증가하고 있으며 디바이스 또한 급격히 증가할 것으로 예상하고 있다. 사물인터넷의 응용 서비스에 적용되는 디바이스는 항상 네트워크에 연결되어 있기 때문에 전력 소모가 크다. 따라서 사물인터넷 디바이스의 대부분이 저전력으로 장시간 동작하고 실시간으로 정보를 교환을 해야 하므로 LPWA 네트워크 기술은 사물인터넷 산업의 핵심 기술이 되고 있다. 본 논문에서는 사물인터넷 응용에 적용이 가능한 LPWA 네트워크의 대표적인 기술 중 LoRa 시스템의 오율 성능을 분석하였다. LoRa 기반 무선통신 시스템은 넓은 통신범위, 낮은 전력소모, 저렴한 구축 비용 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. LoRa 단말 노드와 LoRa 게이트웨이 간의 통신채널에서 열악한 통신 환경과 다수의 건물로 인하여 다중경로 페이딩이 존재하므로 이러한 통신 환경에 대처하기 위한 LoRa 시스템의 성능 분석이 필요하다. 특히, 직접 경로의 신호 강도와 다중 경로의 신호 강도에 따라서 무선 채널 환경을 표현할 수 있는 라이시안 페이딩 채널에서 저전력 광대역 LoRa 시스템의 성능을 분석하고 주요 파라미터에 따른 저전력 광대역 LoRa 시스템의 BER 성능을 평가하였다. 저전력 광대역 LoRa 시스템의 성능을 분석한 결과, AWGN과 레일리 페이딩을 포함하는 라이시안 페이딩 채널에서 수신 신호의 신호 대 잡음 전력비 γ , 라이시안 페이딩의 강도 K , 확산 계수 SF 가 증가함에 따라서 CSS 변조 방식을 적용한 LoRa 시스템의 오율 성능은 개선됨을 알 수 있었다.

Acknowledgments

본 논문은 2024년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되었음.

References

- [1] B.K.Tripathy and J.Anuradha, *Internet of Things (IoT) Technologies, Applications, Challenges, and Solutions*, 1st ed. New York, NY: CRC Press, 2018.
- [2] M. Vaezi, A. Azari, S. R. Khosravirad, M. Shirvanimoghaddam, M. Mahdi Azari, and D. Chasaki, "Cellular wide-area and non-terrestrial IoT: A survey on 5G advances and the road toward 6G," *IEEE Communication Surveys Tutorials*, Vol. 24, No. 2, pp. 1117-1174, 2nd Quart. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3151028>.
- [3] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi, "Long-range communications in unlicensed bands : The rising stars in the IoT and smart city scenarios," *IEEE Wireless Communication*, Vol. 23, No. 5, pp. 60-67, Oct. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7721743>.
- [4] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara, "Low power wide area networks: An overview", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, Vol. 19, pp. 855-873, Jan. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>.
- [5] M. Jouhari, N. Saeed, M. S. Alouini, and E. M. Amhoud, "A survey on scalable LoRaWAN for massive IoT: Recent advances potentials and challenges", *IEEE Communication, Surveys Tutorials*, Vol. 25, No. 3, pp. 1841-1876, 3rd Quart. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2023.3274934>.
- [6] J. G. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 2008.
- [7] M. K. Simon and M. S. Alouini, *Digital Communication Over Fading Channels*, 2nd ed. New York, NY: Wiley, 2005.
- [8] M. Ballerini, T. Polonelli, D. Brunelli, M. Magno, and L. Benini, "NB-IoT versus LoRaWAN: An experimental evaluation for industrial applications", *IEEE Transactions Industrial Informatics*, Vol. 16, No. 12, pp. 7802-7811, Dec. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2987423>
- [9] F. Adelantado, X. Vilajosana, P. Tuset-Peiro, B. Martinez, J. Melia-Segui and T. Watteyne, "Understanding the limits of LoRaWAN", *IEEE Communication Magazine*, Vol. 55, No. 9, pp. 34-40, Sep. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600613>.
- [10] B. Reynders and S. Pollin, "Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication," in *Proceeding Symposium Communication Vehicle Technology*, pp. 1-5, Nov. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCVT.2016.7797659>.
- [11] T. Elshabrawy and J. Robert, "Analysis of BER and coverage performance of LoRa modulation under same spreading factor interference," *IEEE 29th Symposium Persons Indoor Mobile Radio Communication*, pp. 1-6, Sep. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/PIMRC.2018.8581011>.
- [12] P. Demeslay, P. Rostaing, and R. Gautier, "Theoretical performance of LoRa system in multipath and interference channels," *IEEE Internet of Things Journal*, Vol. 9, No. 9, pp. 6830-6843, May, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3114439>.



노재성 (Jae-Sung Roh)

2000년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학박사)

2000년 9월 ~ 현재 : 서일대학교 정보통신공학과 교수

※ 관심분야 : 무선통신 시스템, 사물인터넷 응용