

# 측정 데이터 기반의 임펄스 잡음 환경에서 OFDM-QPSK 시스템의 성능

## Performance of OFDM-QPSK System in Impulsive Noise Environment Based on Measurement Data

노재성  
서울대학교 정보통신공학과

**Jae-sung Roh**  
Department of Information & Communication Engineering, Seoul University, Seoul, 02192, Korea

### [요 약]

사물 인터넷 패러다임에 의해 가능해진 거대한 정보 교환은 즉시 사용 가능한 인프라로 전선을 이용할 가능성이 높아지고 있다. 사전에 설치된 배선 네트워크 인프라를 사용하는 이점은 전력선 통신을 광대역 통신을 위한 경쟁력있는 기술로 만들었다. 따라서 기존의 전력선 통신 채널을 고속 데이터 전송 및 인터넷 서비스를 위한 효과적인 수단으로 사용하는 것에 대한 관심이 높아지고 있다. 전력선 통신 시스템에 영향을 미치는 주요 잡음의 유형 중 하나는 임펄스 잡음이며 본 논문은 임펄스 잡음이 OFDM-QPSK 시스템의 성능에 미치는 영향을 해석하였다. 임펄스 잡음의 성능 분석을 위하여 3가지 환경에서 측정된 데이터를 사용하였다. 분석을 통해 OFDM-QPSK 시스템이 대부분의 임펄스 잡음 사례에서 QPSK 시스템보다 우수한 것으로 나타났다. 또한 RS 부호화된 OFDM-QPSK 시스템은 3 가지 경우의 임펄스 잡음 환경에서 우수한 BER 성능을 달성할 수 있었다.

### [Abstract]

The giant information exchange enabled by the Internet of Things paradigm will likely exploit electrical lines as a ready-to-use infrastructure. The advantage of using the pre-installed infrastructure of wiring networks makes power line communication a competitive technology for broad-band communications. Therefore, there has been a growing interest towards the use of existing power line communication channels as an effective means for transmitting high speed data and Internet service. One of the main noise types affecting power line communication systems is the impulsive noise, and the focus of this work is on the impact of this impulsive noise on the performance of OFDM-QPSK systems. For the performance analysis of impulsive noise, data measured in three environments were used. Through the analysis, it is shown that OFDM-QPSK system outperforms QPSK system for most of the impulsive noise cases. Also, RS-coded OFDM-QPSK system can achieve good BER performance under 3 cases impulsive noise environment.

**Key word** : Power line communication, OFDM-QPSK system, Impulsive noise, BER.

<https://doi.org/10.12673/jant.2020.24.6.587>



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 16 November 2020; Revised 23 November 2020  
Accepted (Publication) 21 December 2020 (30 December 2020)

**Corresponding Author; Jae-sung Roh**

Tel: +82-2-490-7206  
E-mail: jsroh@seoil.ac.kr

# 1. 서론

전력선 통신(PLC; power line communication)은 기존에 설치된 전력시설을 활용하기 때문에 구축 비용 및 기간이 적게 들어 새로운 통신망을 구축하는 것보다는 효율적인 특징이 있다. 앞으로 다가올 스마트 네트워크 시대에는 가장 적합한 솔루션으로 부상할 것으로 예상된다. 대부분의 건물에는 최소한 하나 이상의 전원 콘센트가 설치되어 있기 때문에 어떠한 통신기술보다 설치가 용이하며 간단한 장점이 있다. 전력선을 통해 들어온 통신신호는 배전용 변압기 주변에 설치된 라우터와 건물 내에 설치된 모뎀을 통해 전력신호와 통신신호를 분리하여 통신 서비스를 이용할 수 있다. 이러한 전력선 통신은 별도의 배전공사 없이 차세대 통신 네트워크를 구성할 수 있으며, 가정에 이미 시설되어 있는 전력선을 사용해 네트워크를 구현할 수 있는 장점이 있다. 사물인터넷 장치와 같은 지능형 무선 네트워크 장치들의 증가로 인하여 전력선을 전원공급 이외의 통신선로로서 활용하는 전력선통신이 여러 분야에서 연구되고 있지만, 전력선이라는 열악한 채널환경을 극복하기 위하여 다양한 통신방식이 적용되고 있으며, 통신 목적에 따라서 제어, 대용량 데이터 전송, 멀티미디어와 같은 용도에 따라 통신규격 역시 다양한 방향으로 적용되고 있다 [1]-[6].

전력선 통신 네트워크는 응용 사례에 따라 홈 네트워크 응용과 최종 단의 액세스 네트워크 응용으로 나눌 수 있으며 전력선 통신 네트워크의 응용 사례는 다양한 표준의 개발로 인해 최근에 증가하고 있다. 최근에는 전력선 통신 기술이 광대역화되어 가입자망 및 홈 네트워크의 효율적인 대안으로 많은 프로젝트들이 추진되고 있다. 표 1에서는 전력선 통신을 주파수 대역과 데이터 속도에 따른 전력선 통신 서비스의 분류를 나타내고 있다. 전력선 통신 네트워크에서는 이용 형태에 따라 옥내 전력선 통신과 옥외 전력선 통신으로 구분할 수 있다. 그러나 전력선을 통한 통신 네트워크에는 감쇠, 다중 경로 효과 및 잡음 등의 문제가 존재하고 있으며 기존연구에 의하면 전력선 채널의 잡음은 비가산 백색 가우시안 잡음(N-AWGN; non-additive white gaussian noise)의 특징을 가진다[7]-[10].

전력선 통신 채널의 경우 선로에 연결된 전기기기로부터 발생하는 임펄스 잡음이 신뢰도 높은 통신이나 데이터 전송 속도를 높이는 것을 방해하는 주된 원인 중의 하나이다. 관찰되는 임펄스 잡음은 시간에 따라 그 특성이 가변하고 연결된 기기에 따라 주기적이거나 비주기적인 특징이 있다.

표 1. 전력선 통신의 분류

Table 1. Classification of power line communication.

	Frequency Band	Data Speed	Service
Narrow-band PLC	9 kHz - 450 kHz	< 1 Mbps	InHome : Control, Voice Access : Remote metering
Broad-band PLC	1.7 MHz - 30 MHz	>10 M bps	InHome : Data network Access : Subscriber network

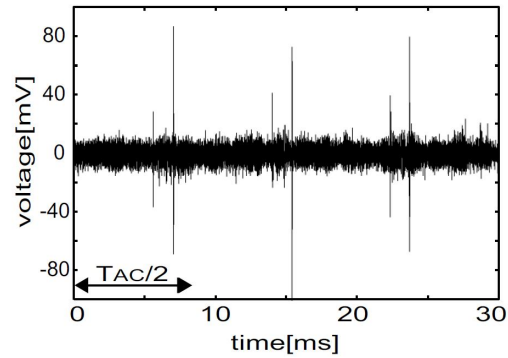


그림 1. 전력선에서 측정된 임펄스 잡음의 특성  
Fig. 1. Characteristics of impulsive noise measured in power line.

전력선에서 측정된 임펄스 잡음의 특성은 그림 1과 같으며 전력선 통신 선로에서의 임펄스 잡음 특성을 실제 통신 선로에서 측정을 통하여 관찰된 내용이다. 이 잡음은 실험실 환경에서 커풀러, 아날로그 증폭기, 저역통과필터, 그리고 아날로그 디지털 변환기를 통과한 통신 선로에서 유입되는 잡음을 나타낸다. 측정된 임펄스 잡음은 시간에 따라 변하며 또한 주파수에 따라서도 크기가 크게 차이가 나고 있다.

본 논문에서는 임펄스 잡음이 존재하는 전력선 통신 채널에서 디지털 통신 시스템의 수신 성능 향상을 위한 연구로서 전력선 통신 선로에서 측정된 데이터 기반 임펄스 잡음의 특성을 통하여 전력선 통신 시스템의 수신 성능을 분석하고, OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 전송 방식을 사용하는 전력선 통신 시스템에서 임펄스 잡음 특성을 고려한 전력선 통신 시스템의 성능을 비교 분석한다.

## II. 전력선 통신채널에서 부호화된 OFDM 시스템의 성능 분석

### 2-1 전력선 통신 채널 모델

전력선은 각종 가전제품과 사무기기로부터 발생하는 잡음들이 직접 유입되며, 또한 부하가 전력선에 연결되는 시간과 공간에 따라 전송 특성이 수시로 변하는 특성을 가진다. 이와 같은 열악한 전력선 통신채널 환경을 극복하고 통신의 에러 극복 능력을 향상시키기 위해서는 기존의 협대역 채널모델을 그대로 적용하기에는 부적합한 면이 많다. 따라서 광대역 주파수를 갖는 전력선 채널에 대한 모델링 기법이 요구되며 광대역 채널을 위한 효율적인 전력선 통신시스템을 개발하기 위해서는 광대역 전력선 채널의 측정과 모델링에 근거한 연구가 필요하다.

전력선 채널에서 전송채널의 특성을 결정하는 요소는 잡음, 신호의 감쇠, 임피던스 부정합 등이다. 전력선 자체는 통신전용의 선로가 아닌 전력공급용 선로이기 때문에 통신에 장애가 되

는 잡음에는 매우 취약한 구조를 가진다. 그러므로 전력선 통신에서는 안정적인 통신능을 유지하기 위해서는 잡음에 견딜 수 있는 기술적 방안들이 요구된다.

전력선 통신채널에서의 임펄스 잡음은 보통 버스트적인 특징을 가지며 실험적인 데이터에서 산출된 값을 기초로 수학적 수식으로 표현한 경험적 모델링 방법으로 시뮬레이션을 수행하게 된다. 임펄스 잡음을 모델링하기 위해선 임펄스 잡음의 여러 가지 특성을 잘 파악해야 하며 임펄스 잡음은 높은 잡음전력과 낮은 발생확률을 가진 신호의 발생으로 볼 수 있다. 일반적으로 AWGN 잡음 구간과 비교해 상대적으로 짧은 임펄스 잡음 발생 구간으로 모델링되며 이러한 임펄스 잡음 분포의 선형적인 조합으로 임펄스 잡음이 구성된다. 따라서 전력선 통신채널에서의 전체잡음은 다음과 같다[11],[12].

$$n(t) = n_{AWGN}(t) + n_{Impulsive}(t) \tag{1}$$

여기서 우변의 첫째 항인 잡음 성분은 평균이 0인 AWGN 잡음이며, 둘째 항은 임펄스 잡음 성분을 의미한다. 임펄스 잡음은 큰 크기의 잡음 전력과 낮은 발생확률을 가진 신호로 표현할 수 있다.

$$n_{Impulsive}(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k h(t - \tau_k) \tag{2}$$

여기서  $b_k$ 와  $\tau_k$ 는 각각 임펄스 잡음의 랜덤한 크기와 랜덤한 발생시간을 나타낸다. 전체 잡음 중에서 임펄스 잡음의 발생빈도 확률 ( $\xi$ )이  $\xi \leq 1$ 인 경우, 전체 잡음의 확률밀도함수는 다음과 같은 통계적인 함수로 표현할 수 있다.

$$f_n(x) = (1 - \xi) f_{AWGN}(x) + \xi f_{Impulsive}(x) \tag{3}$$

**2-2 OFDM 시스템 모델**

전력선 통신의 전송기술은 주파수 대역과 전송속도에 따라 협대역 전력선 통신과 광대역 전력선 통신으로 분류할 수 있다. 광대역 전력선 통신은 OFDM 방식을 적용하고 있으며 OFDM 방식은 심볼 사이의 간섭 문제를 효과적으로 회피할 수 있고 주파수 선택적인 감쇠로 인한 시스템의 성능 열화를 극복할 수 있는 장점이 있다. OFDM 방식은 여러 개의 반송파를 사용하는 다수 반송파 전송의 일종으로 반송파의 수만큼 각 채널에서의 전송주기가 증가하게 되며 대역제한 필터와 발진기 뱅크에 의한 다수 반송파의 기저대역 변·복조의 원리가 적용되어 배열화된 N 개의 데이터 심볼은 해당 반송파에 의해 변조되고 그 결과가 더해져 하나의 OFDM 심볼을 구성하게 된다. 최종적으로 AWGN과 임펄스 잡음 채널을 통과해 수신된 신호는 기저대역으로 변환되는 복조과정이 수행된다.

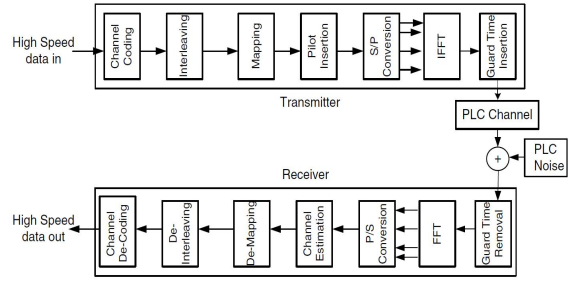


그림 2. OFDM 전송 시스템의 블록도  
Fig. 2. Block diagram of OFDM transmission system.

그림 2는 일반적인 OFDM 전송 시스템의 블록도를 나타낸다. 송신데이터를 정확히 복조하기 위해서는 모든 반송파와 상호 직교해야 하며, 각 부채널로 전송되는 신호는 시간영역에서 심볼 주기 길이의 구형과 윈도우를 곱한 형태이므로 각 부채널에서의 스펙트럼은 sinc함수로 표현된다. 따라서 인접 반송파의 간격을 심볼 주기 역수의 정수배로 설정하면 모든 반송파 사이의 직교조건이 만족되어 수신단에서 왜곡 없이 복조할 수 있다. 이와 같은 OFDM 신호의 이산 시간 기저대역 신호는 데이터를 IFFT(inverse fast Fourier transformation)한 결과와 같으며 수신단에서는 FFT를 수행하여 복조를 이루게 된다. 완벽한 동기화를 가정한 OFDM 시스템의 수신신호는 다음과 같다.

$$r_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N-1} a_n e^{\frac{j2\pi nk}{N}} + n_k + i_k \tag{4}$$

여기서  $a_n$ 는 QPSK 심볼이고 N은 OFDM 방식에서 반송파의 수이다. 전송된 심볼  $\{a_n\}_{n=0}^{N-1}$ 은 N 포인트 이산 푸리에 변환(DFT; discrete Fourier transform)을 수행하여 수신된 시퀀스  $\{r_n\}_{n=0}^{N-1}$ 로 복구된다. 이산 푸리에 변환으로 수신된 신호는 다음과 같다.

$$R_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N-1} r_n e^{\frac{-j2\pi nk}{N}} \tag{5}$$

DFT를 수행한 후의  $R_k$ 에서 임펄스 잡음 성분  $I_k$ 는 다음과 같다.

$$I_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^{N-1} i_n e^{\frac{-j2\pi nk}{N}} \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1 \tag{6}$$

여기서  $i_n$ 은 수신된 임펄스 잡음 성분으로 OFDM 시스템의 DFT 연산으로 인해 임펄스 잡음은 하나의 심볼에만 영향을 미치지 않으며 임펄스 잡음의 영향은 N 개의 데이터 심볼에 퍼지

게 된다. 따라서 OFDM 시스템에서 전체 잡음은 다음과 같다.

$$(N_T)_{OFDM} = N_A + p_i N_I \tag{7}$$

여기서  $N_A$ 는 AWGN 성분,  $N_I$ 는 임펄스 잡음 성분,  $p_i$ 는 평균 임펄스 잡음 비율이다. 임펄스 잡음의 발생이 포아송 프로세스를 따른다고 가정하면 임펄스 잡음 발생 이벤트는 다음의 확률 분포를 따른다.

$$P_k(t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^k}{k!} \quad k = 0, 1, 2, \dots \tag{8}$$

주어진 시간  $T$ 에서 임펄스 잡음의 지속 시간  $T_{Noise}$ 와의 관계는 그림 3에 나타내었다. 평균 임펄스 잡음 비율  $p_i$ 는 임펄스 잡음이 포아송 분포에 따라서 발생한다고 가정한 경우  $p_i = \lambda T_{Noise}$ 가 된다. 결과적으로 OFDM 전송 시스템에서 신호 대 잡음비는 다음과 같다.

$$\left( \frac{E_b}{N_T} \right)_{OFDM} = \frac{E_b}{N_A + \lambda T_{noise} N_I} = \frac{E_b/N_A}{1 + \lambda T_{noise} \mu} \tag{9}$$

여기서  $\mu$ 는 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비이다.

최소거리  $d_{min} = n - k + 1$ 를 가지는  $RS(n, k)$  부호는  $t_{cc} = (n - k) / 2$ 개의 심볼 에러를 정정할 수 있다.  $RS(n, k)$  부호화를 거친 전력선 통신 시스템의 오류식은 다음과 같다.

$$P_b \approx \frac{1}{n} \sum_{i=t_{cc}+1}^n i \binom{n}{i} p_e^i (1 - p_e)^{n-i} \tag{10}$$

여기서  $\binom{n}{i} = \frac{n!}{(n-i)!i!}$  이고  $p_e$ 는 전력선 통신 채널에서의 오류율이다.

표 2에서는 3가지 환경에서 측정된 데이터를 기반으로 임펄스 잡음의 시나리오별 파라미터를 나타낸다[7]-[10]. 심한 임펄스 잡음의 경우는 산업 지역의 변전소에서 측정된 경우이고 중간 임펄스 잡음의 경우는 주거 지역의 변전소에서 측정된 경우이다. 그리고 약한 임펄스 잡음의 경우는 아파트 주변에서 측정된 경우이다.

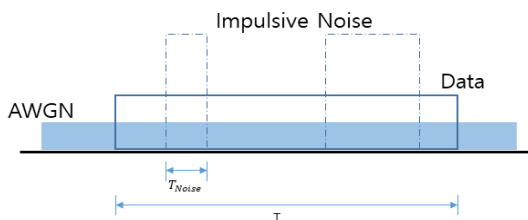


그림 3. 임펄스 잡음과 AWGN의 지속 시간  
Fig. 3. Duration time of impulsive noise and AWGN.

표 2. 임펄스 잡음 파라미터

Table 2. Impulsive noise parameters.

Impulsive Noise Case	$\lambda^{-1}$	$T_{noise}$
Case 1 : Heavy Ch.	0.0196 sec	0.0641 ms
Case 2 : Medium Ch.	0.9600 sec	0.0607 ms
Case 3 : Weak Ch.	8.1967 sec	0.1107 ms

### III. 성능 분석

전력선 통신 시스템의 성능해석을 위해서는 전력선 통신 채널모델에 대한 분석이 필요하다. 따라서 본 논문에서 임펄스 잡음을 모델링하기 위해 임펄스 잡음의 여러 가지 특성 파라미터를 적용하였다. 그림 4 ~ 그림 7은 3가지 환경에서 측정된 임펄스 잡음 파라미터를 적용한 전력선 통신 채널에서 QPSK 신호의 성능을 분석한 결과이다.

그림 4는 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비가 5 dB인 경우로 3가지 환경에서 QPSK 신호의 BER (bit error rate) 성능을 구하였다. 3가지 환경에서 측정된 임펄스 잡음은 심한 경우 (Case 1), 중간 경우 (Case 2), 약한 경우 (Case 3)를 나타내고 있다. 채널 환경이 Case 1에서 Case 3으로 변함에 따라서 BER 성능은 개선되었으며 특히, Case 1 환경에서는 신호 전력 대 잡음 전력비 14 dB에서 BER 성능  $10^{-6}$  을 얻을 수 있었다. 또한, Case 2와 Case 3 환경에서는 신호 전력 대 잡음 전력비 13 dB부터 BER 성능  $10^{-8}$  이하를 얻을 수 있었다.

그림 5는 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비가 10 dB인 경우로 3가지 환경에서 QPSK 신호의 BER 성능을 구하였다. 채널 환경이 Case 1에서 Case 3으로 변함에 따라서 BER 성능은 개선되었으며 특히, Case 2 환경에서는 신호 전력 대 잡음 전력비 14 dB에서 BER 성능  $10^{-6}$  을 얻을 수 있었다. 그림 4와 그림 5를 비교해 보면 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비가 증가함에 따라서 QPSK 신호의 BER 성능은 열화됨을 확인할 수 있었다.

그림 6은 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비가 15 dB인 경우로 3가지 환경에서 QPSK 신호의 BER 성능을 구하였다. 채널 환경이 Case 1에서 Case 3으로 변함에 따라서 BER 성능은 개선되었으며 특히, Case 3 환경에서는 신호 전력 대 잡음 전력비 14 dB에서 BER 성능  $10^{-6}$  을 얻을 수 있었다. 그림에서 임펄스 잡음의 영향이 AWGN 잡음에 비하여 크기 때문에 신호 전력 대 잡음 전력비 14 dB에서도 BER 성능  $10^{-6}$  이하를 얻을 수 없었다.

그림 7은 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비가 15 dB인 경우로 Case 3 환경에서 QPSK 신호, OFDM-QPSK 신호, RS 부호화된 OFDM-QPSK 신호의 BER 성능을 구하였다. 그림 6에서 Case 3 환경에서는 BER 성능  $10^{-6}$  이하를 얻을 수 없었으나 OFDM 전송 방식을 적용하여 신호 전력 대 잡음 전력비 12 dB에서 BER 성능  $10^{-8}$  을 얻을 수 있었다.

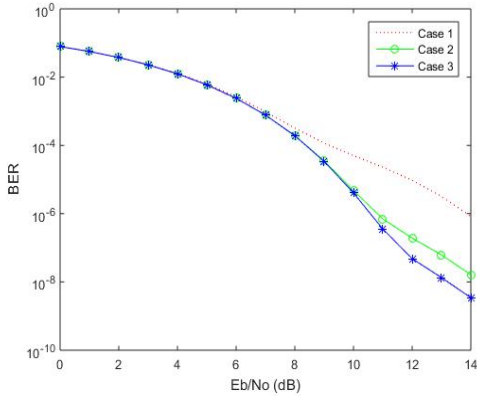


그림 4. 3가지 임펄스 잡음 환경에서 QPSK 시스템의 BER 성능 ( $\mu = 5 \text{ dB}$ )  
 Fig. 4. BER performance of QPSK system under three cases of impulsive noise environment ( $\mu = 5 \text{ dB}$ ).

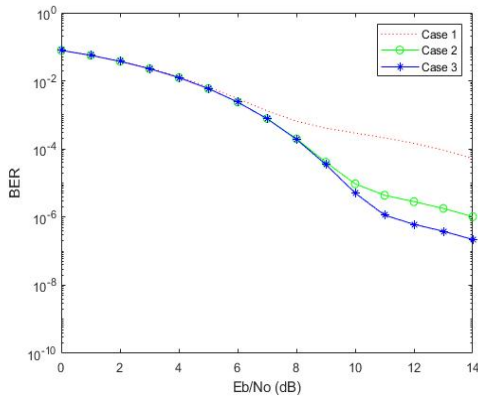


그림 5. 3가지 임펄스 잡음 환경에서 QPSK 시스템의 BER 성능 ( $\mu = 10 \text{ dB}$ )  
 Fig. 5. BER performance of QPSK system under three cases of impulsive noise environment ( $\mu = 10 \text{ dB}$ ).

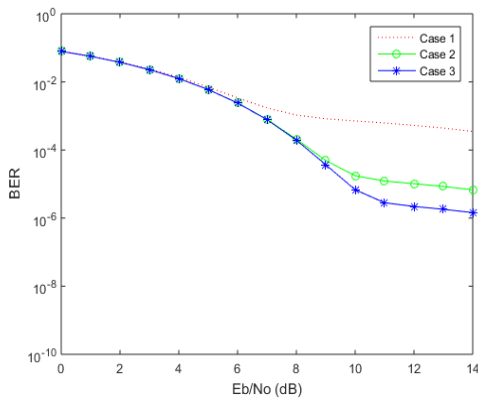


그림 6. 3가지 임펄스 잡음 환경에서 QPSK 시스템의 BER 성능 ( $\mu = 15 \text{ dB}$ )  
 Fig. 6. BER performance of QPSK system under three cases of impulsive noise environment ( $\mu = 15 \text{ dB}$ ).

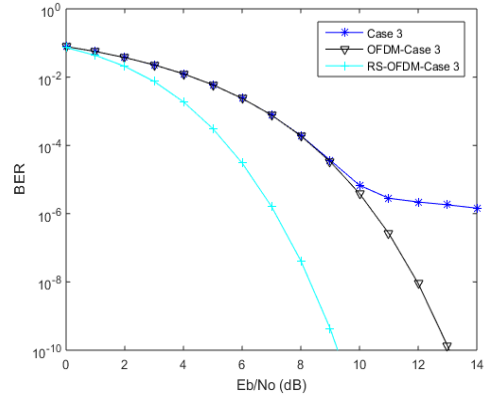


그림 7. 약한 임펄스 잡음 환경에서 부호화된 OFDM-QPSK 시스템의 BER 성능 ( $\mu = 15 \text{ dB}$ )  
 Fig. 7. BER performance of Coded OFDM-QPSK system under weak impulsive noise environment ( $\mu = 15 \text{ dB}$ ).

따라서 OFDM-QPSK 시스템이 QPSK 시스템에 비해 임펄스 잡음에 강함을 알 수 있었다. 또한 RS 부호화를 적용하여 BER 성능  $10^{-6}$  를 기준으로 약 3 dB 정도의 부호화 이득을 얻을 수 있었다. 따라서 전력선 통신 시스템에서 OFDM 전송과 RS(31, 27) 부호화를 통하여 임펄스 잡음 환경에서 BER 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

#### IV. 결론

전력선 통신 시스템의 성능을 해석하기 위해서는 전력선 통신 채널의 모델링과 임펄스 잡음의 여러 가지 특성 파라미터에 대한 분석이 필요하다. 임펄스 잡음은 버스트적인 특징을 가지며 AWGN 잡음과 비교해서 상대적으로 짧은 임펄스 잡음 발생 구간과 높은 잡음전력으로 모델링할 수 있다. 측정된 데이터 기반 임펄스 잡음 환경에서 BER 성능을 분석한 결과, 임펄스 잡음 대 AWGN 잡음의 전력비가 증가함에 따라서 QPSK 신호의 BER 성능은 열화됨을 확인할 수 있었으며 3가지 환경에서 측정된 데이터 기반의 임펄스 잡음 환경에서 시나리오별 파라미터에 따른 OFDM-QPSK 신호의 BER 성능을 구하였다. BER 성능 분석을 통하여 OFDM-QPSK 시스템이 QPSK 시스템에 비해 임펄스 잡음에 강함을 알 수 있었으며 전력선 통신 시스템에서 OFDM 전송과 부호화를 통하여 임펄스 잡음 환경에서 BER 성능을 개선할 수 있음을 알 수 있었다.

#### Acknowledgments

본 논문은 2020년도 서일대학교 학술연구비에 의해 연구되

있음.

## References

- [1] J. Anatory and N. Theethayi, *Broadband power-line communication systems*, 1st ed. Southampton, SO: WIT Press, 2010.
- [2] S. Tsuzuki, "High-speed power-line communication and its application to a localization system," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics Communications and Computer Sciences*, Vol. 89, No. 11, pp. 3006-3012, 2006.
- [3] H. Hrasnica, A. Haidine, and R. Lehnert, *Broadband Power Line Communications : Network Design*, 1st ed. New Jersey, NJ: John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [4] S. Galli and L. Oleg, "Recent developments in the standardization of power line communications," *IEEE Transactions on Communications Magazine*, Vol. 46, No. 7, pp. 64-71, July 2008.
- [5] L. Dib, V. Fernandes, M. Filomeno, and M. V. Ribeiro, "Hybrid PLC/wireless communication for smart grids and internet of things applications," *IEEE Internet Things Journal*, Vol. 5, No. 2, pp. 655-667, 2018.
- [6] K. M. Rabie, B. Adebisi, H. Gacanin, G. Nauryzbayev, and A. Ikpehai, "Performance evaluation of multi-hop relaying over non-Gaussian PLC channels," *Journal of Communications and Networks*, Vol. 19, pp. 531-538, Oct. 2017.
- [7] M. Zimmermann and K. Dostert, "Analysis and modeling of impulsive noise in broadband power line communications," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 44, No. 1, pp. 249-258, 2002.
- [8] V. Degardin, M. Lienard, A. Zeddami, F. Gauthier, and P. Degauque, "Classification and characterization of impulsive noise on indoor power line used for data communications," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol. 48, No. 4, pp. 913-918, 2002.
- [9] M. Zimmermann and K. Dostert, "A multipath model for power line channel," *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 50, No. 4, pp. 553-559, April 2002.
- [10] Q. Shan, I. Glover, R. Atkinson, S. Bhatti, I. Portugues, P. Moore, R. Rutherford, R. Watson, M. Fatima Q. Lima, and B. Soza, "Estimation of impulsive noise in an electricity substation," *IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 53, No 3, pp. 653-663, 2011.
- [11] J. G. Proakis, *Digital Communications*, 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill, 1993.
- [12] B. Sklar, *Digital Communications*, 2nd ed. New York, NY: Pearson, 2001.



**노재성 (Jae-Sung Roh)**

2000년 8월 : 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학박사)  
2000년 9월 ~ 현재 : 서일대학교 정보통신공학과 교수  
※관심분야 : 무선 임베디드 통신 시스템, IoT S/W