

전력선 채널 Impulsive Noise에 의한 OFDM Demodulator 출력 SNR 열화에 관한 연구

*오휘명, *최성수, *김영선, *김관호, **황금찬
*한국전기연구원, **연세대학교

A Study for SNR Degradation of OFDM Demodulator Output by Impulsive Noise in Power Line Communication Channel

*Hui-Myoung Oh, *Sungsoo Choi, *Young Sun Kim, *Kwan-Ho Kim, **Keum-Chan Whang
*KERI(Korea Electrotechnology Research Institute), **Yonsei University

Abstract - 전력선 통신 채널에는 특징적으로 충격 잡음이 존재하며, 전력선 통신 시스템의 성능 열화에도 많은 영향을 준다. 이는 일반적인 배경 잡음에 비해 많게는 수십 dB 이상의 레벨을 가지면서, 임의의 시간적으로 발생함으로써 추정 및 제어 또한 어렵기 때문이며, 전력선 통신 시스템이 Mbps급으로 고속화 되면서 주파수 대역이 확장되고, 확장된 대역상에 다중 반송파를 이용하여 대용량의 데이터를 전송하는 변복조 기법들이 적용됨에 따라, 시간 영역에서 비교적 짧은 시간 동안 존재하는 충격 잡음이 주파수 영역에서 사용 주파수 전체 대역상에 영향을 줌으로써 시스템 전체 성능 저하의 큰 요인이 되고 있다. 본 논문에서는 이러한 충격 잡음이 고속 전력선 통신 시스템에서 사용되는 OFDM(또는 DMT) 방식 수신기의 복조기 출력단 SNR에 미치는 영향을 분석 및 단순화하고, 시뮬레이션을 통해 검증한다.

1. 서 론

전력선 통신의 신호 전달 매체로 사용되는 전력선에는 일반적인 열잡음에 의한 배경 잡음 외에도 다양한 종류의 잡음이 존재하는데, 대표적으로 외부 통신 신호 등에서 유입되는 협대역 잡음과 전력기들의 개폐동작에 의한 충격 잡음(Impulsive Noise)이 있다[1]. 이중 충격 잡음은 전력선 통신 채널에서 나타나는 중요한 특징 중 하나로서, 임펄스(Impulse) 신호와 유사하게 시간 영역에서는 아주 짧은 시간 동안 불연속적으로 발생했다가 사라지며, 주파수 영역에서는 순간적으로 광대역상에 전체적으로 영향을 준다[2]. 이러한 충격 잡음은 그 신호 전력값이 일반적인 배경 잡음 보다 많게는 수십 dB 이상 크고, 또한 임의의 시간적으로 발생함에 따라 그에 대한 추정 및 제어가 어렵기 때문에 전력선 통신 시스템의 성능 열화의 주요한 요인이 되고 있다.

최근 전력선 통신 시스템은 디지털 통신기술의 발달과 함께 고속화, 광대역화, 대용량화 개발이 진행되고 있다. 사용 주파수 대역을 광대역화 하여 대용량의 데이터를 분산시키고 다중화 하여 시스템의 고속화를 이루는 대표적인 방식으로서 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템은 주파수 선택적 페이딩 환경에서 강점을 보이며 각각의 부반송파 마다 다른 디지털 변조방식을 적용하여 채널 특성에 따라 정보량을 변화시키면서 대용량전송을 가능하게 하기 때문에 이미 고속 전력선 통신 시스템에 적용되고 있다. 그러나 여전히 충격잡음과 같은 환경하에서도 안정된 성능을 제공할 수 있도록 하는 방안 모색이 필요한 실정이다.

본 논문에서는 대표적인 충격 잡음 모델로부터 발생시킨 충격 잡음이 OFDM 복조기 성능 열화에 미치는 영향을 복조기 출력단 SNR(Signal-to-Noise Ratio) 분석을 통해 확인하고, 근사적으로 단순화 모델링하고자 한다. 충격 잡음 모델로부터 OFDM 복조기 출력 신호의 확률적 특성을 근사적으로 유도하고, 시뮬레이션 결과와 비교함으로써 성능 열화 정도 및 근사화 방식의 타당성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 충격 잡음 모델

전력선 통신 분야에서 충격 잡음에 대한 모델은 Middleton[2]에 의해서 제안된 Class A 모델이 일반적으로 사용된다. 이 모델은 일반적인 통신 시스템에서 고려되는 열잡음 모델, 즉 AWGN(Additive White Gaussian Noise)에 해당하는 가우시안 랜덤 변수를 기반으로 하여 배경 잡음을 구성하고, 임의의 시간적으로 발생하는 충격 잡음은 이러한 배경잡음의 전력스펙트럼 밀도가 순간적으로 커지는 형태로 구성된다. 이러한 충격 잡음의 임의의 시간적 발생은 시간영역에서 Poisson 분포를 이용해 모델링되며, 채널 조건에 따라 Poisson 분포의 변수에 해당하는 A 값과 충격 잡음의 크기 변수에 해당하는 Γ 값의 변경을 통해 다양하게 변화시킬 수 있다. 결과적으로 Middleton에 의해 제안된 Class A 모델의 충격 잡음 모델은, Poisson 분포에 따라 결정된 어떠한 한 시점에서

AWGN 잡음의 분산 즉 전력스펙트럼 밀도가 변화되어 발생하는 잡음 형태를 기술하고 있다. 이러한 충격 잡음 모델에서 전체 충격잡음 모델의 확률밀도함수는 식 (1)과 같이 표현된다[2].

$$p_z(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A} A^m}{m!} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_m}} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_m^2}\right) \quad (1)$$

$$\sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{(m/A) + \Gamma}{1 + \Gamma} \quad (2)$$

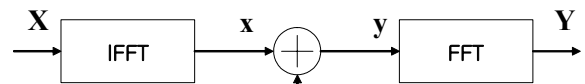
여기서, A 는 충격 지수(impulsive index)라고 정의하고, $\Gamma = \sigma_c^2/\sigma_i^2$ 는 가우시안잡음 대 충격잡음 전력비이며, σ_c^2 와 σ_i^2 는 각각 가우시안 잡음의 분산과 충격잡음의 분산이다. 이러한 충격 잡음의 평균 m_z 은 0이고, 분산 σ^2 은 $\sigma^2 = \sigma_c^2 + \sigma_i^2$ 이 된다.

2.2 OFDM 시스템 모델

본 논문에서 다루는 OFDM 시스템 모델은 송신단에서 OFDM 변조에 해당하는 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 모듈과 충격 잡음 채널, 그리고 수신단에서의 OFDM 복조에 해당하는 FFT 모듈로 그림 1과 같이 구성된다. 이렇게 모델링된 시스템 상에서 채널의 complex 입력 신호 x, y 사이의 관계는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$y_n^R + jy_n^I = x_n^R + jx_n^I + z_n^R + jz_n^I, \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (3)$$

여기서, N 은 FFT 및 IFFT 샘플 개수이다.



<그림 1> 충격 잡음 채널하의 OFDM 시스템 모델

결과적으로, IFFT 입력 X_k 가 실수 값을 가지는 정보비트라고 하면, OFDM demodulator 출력, 즉 FFT 출력 Y_k 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다[3].

$$Y_k = X_k + Re\left\{\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} (z_n^R + jz_n^I) \exp\left(-j\frac{2\pi nk}{N}\right)\right\} \\ = X_k + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \left(z_n^R \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + z_n^I \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right)\right) \quad (4)$$

2.3 근사화 방법

(4)에서 실수 및 허수 잡음은 모두 동일하게 서로 독립적으로 발생하는 하지만, (1)의 분포를 따르기 때문에 Y_k 에 대한 확률밀도함수를 구하기 위해서는 상당히 복잡한 수식계산이 필요하게 된다[3][4]. 본 논문에서는 이러한 문제를 간단화하기 위한 근사화 방법을 제시하고자 한다.

(4)에서, Y_k 는 (1)의 분포를 따르는 랜덤 변수들에 가중치를 곱한 합이기 때문에, 중심극한정리에 의해 N 이 커짐에 따라 가우시안 분포에 근접하게 된다. 따라서 Y_k 는 아래 식 (5), (6)과 같이 평균과 분산만 구하면 근사적으로 (7)과 같은 확률밀도 함수를 구할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned}
 m_{Y_k} &= E[Y_k] \\
 &= X_k + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} \left(E[z_n^R] \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + E[z_n^I] \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right) \\
 &= X_k
 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
 \sigma_{Y_k} &= E[(Y_k - X_k)^2] \\
 &= E \left[\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(z_n^R \cos\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + z_n^I \sin\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right) \right. \\
 &\quad \left. \cdot \sum_{n'=0}^{N-1} \left(z_{n'}^R \cos\left(\frac{2\pi n'k}{N}\right) + z_{n'}^I \sin\left(\frac{2\pi n'k}{N}\right) \right) \right] \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(E[(z_n^R)^2] \cos^2\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + E[(z_n^I)^2] \sin^2\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right) \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left(\sigma^2 \cos^2\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) + \sigma^2 \sin^2\left(\frac{2\pi nk}{N}\right) \right) \\
 &= \sigma^2
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$p_{Y_k}(y) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left(-\frac{(y-X_k)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

2.4 SNR과 BER 성능

2.3에서 OFDM demodulator 출력값 Y_k 가 간단히 근사화됨으로써, Y_k 에 대한 SNR 역시 일반적인 가우시안 잡음하에서와 같이 간단히 계산된다.

$$SNR(dB) = 10 \log \frac{P_{signal}}{P_{noise}} = 10 \log \frac{X_k^2/T}{\sigma^2 \cdot 2W} = 10 \log \left(\frac{E_b}{N_0} \cdot \frac{1}{TW} \right) \quad (8)$$

여기서, $\sigma^2 = N_0/2$ 이며 양측파대(double side band) 전력 스펙트럼 밀도에 해당한다. N 개의 정보비트를 N 개의 OFDM 부반송파에 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 변조방식을 통해 실어 전송하는 것을 가정하면, 단위시간 T 와 점유대역 W 의 곱은 1이 된다. 따라서 (9)와 같은 관계식을 얻게 된다.

$$SNR [dB] = 10 \log \left(\frac{X_k^2}{2\sigma^2} \right) = 10 \log \left(\frac{E_b}{N_0} \right) = \frac{E_b}{N_0} [dB] \quad (9)$$

결과적으로 비트오율(BER)성능은 편의상 $X_k = \pm 1$ 로 했을 때, 식 (10)과 같이 가우시안 잡음 환경하에서의 코히어런트 BSPK 시스템의 비트 오율성능에서 잡음의 분산이 σ_G^2 에서 $\sigma^2 = \sigma_G^2 + \sigma_I^2$ 로 증가된 것으로 근사화되게 된다.

$$BER_{IV} \approx Q \left(\sqrt{\frac{1}{\sigma^2}} \right) = Q \left(\sqrt{\frac{1}{\sigma_G^2 + \sigma_I^2}} \right) \quad (10)$$

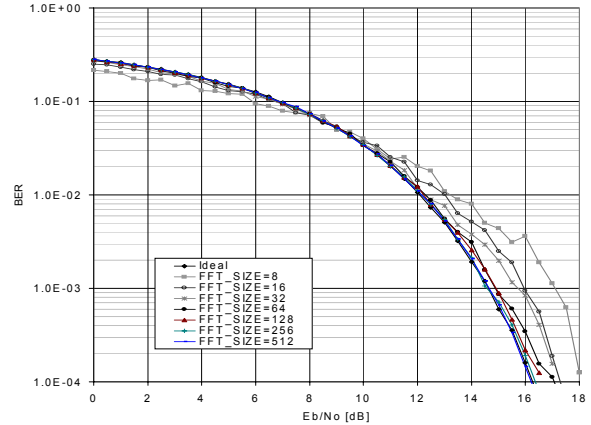
$$Q(a) = \int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (11)$$

2.5 시뮬레이션 결과

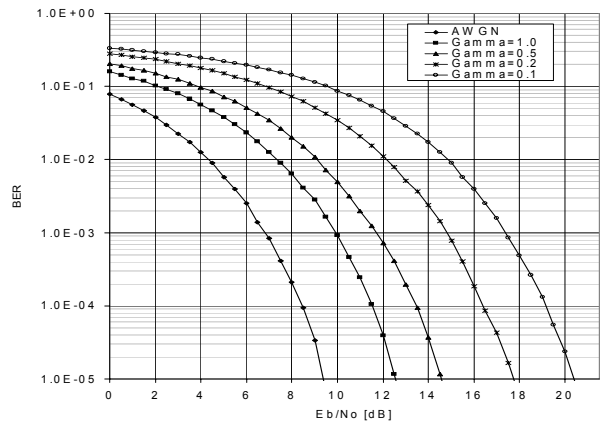
그림 2는 2.3에서 제시한 근사화 방법을 이용하여 $A=0.1$, $\Gamma=0.2$ 인 충격 잡음 하에서 OFDM 입출력 샘플 수 N 값의 변화에 따른 성능을 모의실험한 결과이다. 이로부터 N 이 증가함에 따라 BER 성능은 식 (7)로서 모델링 된 이상적 결과에 수렴함을 알 수 있고, 결과적으로 본 논문에서 제시된 근사화 방법의 적절성이 검증되었다. 그림 2에서, N 값이 너무 작을 경우, 충격 잡음의 임의 발생에 의한 영향으로 시스템의 성능도 임의적으로 변화되는 특성이 나타났으며, N 값이 증가되면 수신단 FFT 과정에 의해 충격잡음의 영향이 전체 OFDM 심볼 상으로 분산되고 평균화 되어 단순히 가우시안 잡음의 전력밀도만 증가한 것과 같은 결과를 보임을 알 수 있다.

<표 1> Γ 변화에 따른 σ_I^2 , σ^2 및 E_b/N_0 요구량 증가

Γ	σ_I^2	σ^2	E_b/N_0 요구량 증가[dB]
1.0	σ_G^2	$2\sigma_G^2$	≈ 3.01
0.5	$2\sigma_G^2$	$3\sigma_G^2$	≈ 4.77
0.2	$5\sigma_G^2$	$6\sigma_G^2$	≈ 7.78
0.1	$10\sigma_G^2$	$11\sigma_G^2$	≈ 10.41



<그림 2> FFT/IFFT 입출력 샘플 수에 따른 근사화 성능



<그림 3> 가우시안잡음 대 충격 잡음 전력비(Γ) 변화에 따른 BER 성능

그림 3은, 충격 잡음 지수와 OFDM 입출력 샘플 수를 $A=0.1$, $N=256$ 으로 고정하고, 가우시안잡음 대 충격 잡음 전력비(Γ)의 변화에 따른 BER 성능 변화를 모의실험한 결과이다. 제시된 근사화 방법을 기반으로 Γ 의 변화에 따른 σ_I^2 와 σ^2 , 그리고 동일 BER 성능을 위한 SNR로서의 E_b/N_0 의 요구값 변화를 이상적으로 계산한 표 1의 결과와 비교하면, 모의실험 결과와 제시된 근사화 방법에 의한 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는, 충격 잡음이 OFDM 시스템에 미치는 영향을 단순화 시킴으로써 AWGN 환경에서 잡음 전력밀도만 상승하는 것처럼 등가적으로 근사적으로 해석할 수 있음을 확인하였다. 충격 잡음을 기술하는 두 가지 주요 파라미터인 충격 잡음 지수와 가우시안잡음 대 충격 잡음 전력비는 제시된 근사 모델에서 단순히 E_b/N_0 요구량 증가로서 나타나고, 이를 통해 충격 잡음 환경 하에서 OFDM 시스템의 성능 열화 정도를 용이하게 계산할 수 있음이 확인되었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 오희명 외, "전력선 통신 채널 Data Base 구축을 위한 기본 연구", 대한전기학회 논문지, 52D권 2호, pp. 107-111, 2003.
- [2] D. Middleton, "Statistical-physical model of electromagnetic interference," *IEEE Trans. Electromagnetics Compatibility*, vol. EMC-19, pp. 106-126, Aug. 1977.
- [3] H.M. Oh, et al., "Mitigation of Performance Degradation by Impulsive Noise in LDPC Coded OFDM System," *Proceedings of ISPLC2006*, pp. 326-331, Mar. 2006.
- [4] 오희명 외, "충격 잡음 채널 환경에서 LDPC 부호화 OFDM 시스템의 성능 열화에 관한 연구", 한국통신학회 하계학술대회 논문집, vol. 33, pp. 646-649, Jul. 2006.