충격 잡음 수신 레벨 제한을 통한 전력선 통신 시스템 성능 열하 완화

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

Mitigation of Performance Degradation by using Received-Signal Level Limiter in Power Line Communication Systems over Impulsive Noise Channel

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

Abstract - 충격 잡음은 전력선 통신 시스템의 성능을 열하시키는 대표적인 채널 특성 중 하나이다. 이는 배경잡음에 비해 많게는 수십 dB 이상의 레벨을 가지며, 임의 시간적으로 발생하기 때문에 추정 및 제어가 어렵다. 최근 전력선 통신 시스템이 고속화 되면서 한정된 주파수 대역상에서 한정된 신호 전력으로 대용량의 데이터를 전송하기 위해서 대역효율을 높이기 위한 변복조 기법과 오류정정 코드가 적용되고 있으나, 충격 잡음에 의해서 그 성능이 현저하게 열하된다. 일반적으로 충격잡음은 수신단에서 레벨 제한에 의해 그 영향 정도를 줄일 수 있다. 본 논문에서는 전력선 통신 시스템의 성능 향상을 위해 제안되고 있는 LDPC 부호화 OFDM 시스템에 대해 충격 잡음 수신 레벨 제한에 의한 성능 열하의 완화 정도에 대해 연구하였으며, 시뮬레이션을 통해 최적 성능을 위한 수신 레벨 제한 지표를 제시하였다.

1. 서 론

전력선 통신의 신호 전달 매체인 전력선에는 다양한 종류의 잡음이 존재하는데, 일반적인 배경잡음과 함께 외부 통신 신호 등에서 유입되는 협대역 잡음 및 전력기기들의 개폐동작에 의한 충격 잡음이 대표적이다[1]. 이중에서도 충격 잡음은 전력선 통신 채널의 중요한 특징 중 하나로서, 임펄스(Impulse) 신호와 유사하게 시간 영역에서는 불연속적이면서 짧은 시간동안 존재하나 주파수 영역에서는 광대역 상에 퍼져 전체 사용 주파수 대역에 영향을 주게 된다. 특히 충격 잡음 전력이 일반적인 배경 잡음 보다 많게는 수십 dB 이상 크기 때문에 전력선 통신 시스템의 성능 열하의 요인이 되고 있다. 이러한 전력선 채널의 충격 잡음에 대해서는 이미 많은 연구가 진행되었음에도 불구하고, 환경에 따라 다양하게 나타나는 충격 잡음을 예측하고 극복하기에는 여전히 어려움이 존재한다.

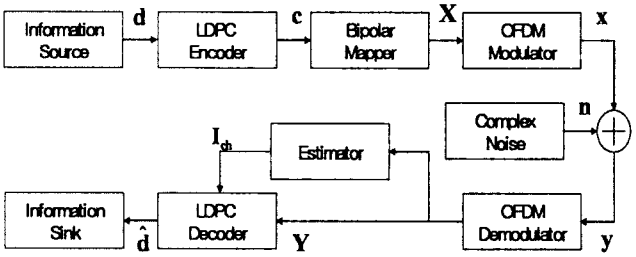
한편, 전력선 통신 시스템은 디지털 통신기술의 발달과 함께 속도 향상 및 시스템 안정화가 이루어져 이미 실용화 단계에 있다. 현재 전세계적으로 고속 전력선 통신 분야에서 상용제품으로 개발되어 있는 모뎀은 옥내 소규모 로컬 네트워크 구성이나 인터넷 공유와 같은 용도 및 라스트 마일(last mile)에 해당하는 엑세스망 구성 등에 사용되고 있다. 최근에는 홈네트워크 분야에서 가전기기들 간의 제어네트워크 구성은 물론 기존의 고속 데이터 전송 및 비디오, 오디오 신호 전송에도 활용될 수 있는 초고속 전력선통신 모뎀 개발이 경쟁적으로 진행되고 있다. 이를 위해 적용되고 있는 방식이 부호화 직교 주파수 분할 다중(Coded OFDM) 시스템이다. 부호화 OFDM 시스템은 한정된 주파수 대역과 송신 전력 제한 환경에서 대용량 데이터를 효과적으로 송신 할 수 있도록 하는 방식으로서, OFDM 변복조는 다중 경로 특성에 의한 주파수 선택적 페이딩 환경에서 강점을 보이며 각각의 부반송파 마다 다른 디지털 변조방식을 적용하여 채널 특성에 따라 정보량을 변화시키면서 대용량전송을 가능하게 하고, 채널부호는 잡음 및 간섭신호에 의해 왜곡된 정보를 정정해 줌으로써 대용량으로 전송된 데이터의 신뢰성을 향상시켜주게 된다. 현재 전력선 통신 모뎀에 채택되어 있는 부호는 리드-솔로몬(Reed-Solomon) 부호와 길쌈(Convolutional) 부호가 결합된 연쇄부호가 일반적이며, 초고속 전력선 통신 모뎀에는 보다 강력한 오류정정 능력을 가진 터보(Turbo) 부호가 채택되고 있고, 최근에는 채널용량에 근접한 성능을 가지는 것으로 알려진 저밀도 패리티 체크(LDPC: Low Density Parity Check) 부호에 대한 적용 가능성이 연구되고 있다[2].

본 논문에서는 초고속 전력선 통신 모뎀을 위한 대안으로서 LDPC 부호화 OFDM 시스템을 고려할 때, 충격 잡음 환경하에서 나타나는 성능 열하 정도를 살펴보고, 시뮬레이션을 통하여 간단한 수신 신호 레벨 제한기를 사용함으로써 얻어지는 성능 열하 완화 정도를 확인하고자 한다. 또한, 이 과정에서 시스템의 성능을 최적화 할 수 있는 수신 신호 레벨 제한 지표를 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 LDPC 부호화 OFDM 시스템

본 논문에서 다룬 LDPC 부호화 OFDM 시스템에서는, 그림 1과 같이 송신부에서 정보원으로부터 입력된 이진 데이터가 LDPC 부호기를 통해 부호화된 후 양극성 변환되어 OFDM 변조되며, 수신부에서 수신된 신호를 OFDM 복조한 후 LDPC 복호함으로써 추정된 정보를 얻게 된다. 채널의 잡음은 배경 잡음과 충격 잡음을 함께 모델링한 컴플렉스 잡음을 고려한다. LDPC 복호를 위해 필요한 채널 정보는 수신단 추정기를 통해 얻어진다.



<그림 1> LDPC 부호화 OFDM 시스템 블록도

2.1.1 LDPC 부호의 부호화 및 복호화

식 (1)은 LDPC 부호의 패리티 체크 행렬에 대한 예이다. LDPC 부호의 부호화는 식 (1)과 같은 패리티 체크 행렬 H로부터 식 (2)를 만족하는 생성 행렬 G를 구하고 식 (3)과 같은 연산을 통해 수행된다. 식 (3)에서 c와 d는 그림 1에 나타난바와 같이 부호화 벡터와 정보 벡터이다.

$$\mathbf{H}=\begin{bmatrix}1&1&1&1&0&0&0&0&0&0\\1&0&0&0&1&1&1&0&0&0\\0&1&0&0&1&0&0&1&1&0\\0&0&1&0&0&1&0&1&0&1\\0&0&0&1&0&0&1&0&1&1\end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{H}=\mathbf{0} \quad (2)$$

$$\mathbf{c}=\mathbf{G}^{\mathrm{T}}\mathbf{d} \quad (3)$$

LDPC 부호의 복호에는 message propagation 알고리즘의 로그 영역 표현인 sum-product 알고리즘이 사용되며, 이는 아래와 같은 과정으로 수행된다[3,4].

Step 0. 초기화

$$\lambda(Y_i)=LLR(Y_i)=\log\left(\frac{P(Y_i\mid c_i=1)}{P(Y_i\mid c_i=0)}\right)=\frac{2Y_i}{\sigma^2} \quad (4)$$

Step 1. 비트-체크 메시지

$$LLR^{(k)}(q_{ij})=\sum_{j'\in M(i)\backslash j}LLR^{(k-1)}(r_{j'i})+\lambda(Y_i) \quad (5)$$

Step 2. 체크-비트 메시지

$$LLR^{(k)}(r_{ji})=(-1)^{|L(j)\backslash i|}\left(\prod_{i'\in L(j)\backslash i}\mathrm{sgn}\left(LLR^{(k)}(q_{i'j})\right)\right)\cdot\Psi\left(\sum_{i'\in L(j)\backslash i}\Psi\left(\left|LLR^{(k)}(q_{i'j})\right|\right)\right) \quad (6)$$

여기서,

$$\mathrm{sgn}(x)=\begin{cases}1, & \text{if } x\geq 0\\ -1, & \text{if } x<0\end{cases} \quad (7)$$

$$\Psi(x)=-\log\left(\tanh\left(\frac{x}{2}\right)\right) \quad (8)$$

Step 3. 비트 결정

$$LLR^{(k)}(q_i)=\sum_{j'\in M(i)}LLR^{(k)}(r_{j'i})+\lambda(Y_i) \quad (9)$$

비트 추정 알고리즘은 아래와 같다.

$$\hat{c}_i^{(k)}=\begin{cases}1, & \text{if } LLR^{(k)}(q_i)\geq 0\\ 0, & \text{if } LLR^{(k)}(q_i)<0\end{cases} \quad (10)$$

Step 4. 반복

반복 회수 $k_{\max}$ 도달 여부, 또는 추정 데이터 $\hat{c}^{(k)}$의 패리티 체크 행렬 H 만족 여부를 판단하여 복호 과정 완료, 또는 k를 $k+1$로 증가시키고 1, 2, 3 과정 반복

여기서, c_i : i번째 부호화 비트

Y_i : i번째 sum-product 복호기 입력 신호

$\lambda(Y_i)$: Y_i에 대한 초기 LLR

$M(i)$: i번째 비트 노드에 연결된 체크 노드 집합

$M(i)|j$: $M(i)$에서 원소 j를 제거한 집합

$L(j)$: j번째 체크 노드에 연결된 비트 노드 집합

$L(j)|i$: $L(j)$에서 원소 i를 제거한 집합

$|Set|$: 집합 Set의 원소 수

$LLR^{(k)}(q_{ij})$: k번째 반복 복호 과정에서 i번째 비트 노드에서 j번째 체크 노드로 전달되는 메시지

$LLR^{(k)}(r_{ji})$: k번째 반복 복호 과정에서 j번째 체크 노드에서 i번째 비트 노드로 전달되는 메시지

2.1.2 양극성 변환과 OFDM 변복조

양극성 변환은 1과 0으로 구성된 이진 비트열에 대해 바이폴라 매핑을 통해 1과 -1로 변환하는 과정으로 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$X_i = \begin{cases} 1 & if\ c_i = 1 \\ -1 & else\ if\ c_i = 0 \end{cases} \tag{11}$$

OFDM 변조 및 복조 과정은 각각 IDFT와 DFT로 간단히 모델링 되며 식 (12)와 (13)으로 표현할 수 있다.

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(j\frac{2\pi}{N}nk\right) \tag{12}$$

$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y_n \exp\left(-j\frac{2\pi}{N}nk\right) \tag{13}$$

2.1.3 충격 잡음 모델

충격 잡음은 전력선 통신 채널의 한 특징으로, 전력선 통신 시스템의 성능 열화를 야기한다. 이러한 전력선 채널의 충격 잡음에 대한 모델로는 Middleton[5]의 Class A 모델이 일반적으로 사용된다. 이 모델은 가우시안 분포를 따르는 배경잡음 환경에서 Poisson 분포를 따르는 m 값에 따라 충격잡음이 발생하는 형태를 가지며, 이때 전체 충격잡음 모델의 확률밀도함수는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$p_z(z) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{e^{-A}A^m}{m!} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_m} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_m^2}\right) \tag{14}$$

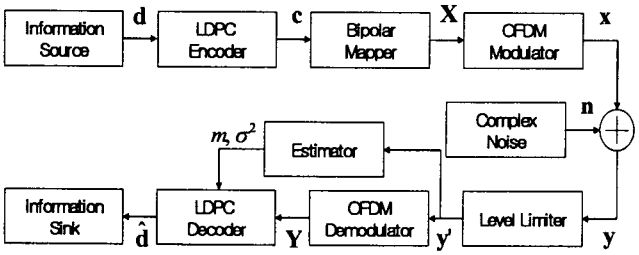
$$\sigma_m^2 = \sigma^2 \frac{(m/A)+\Gamma}{1+\Gamma} \tag{15}$$

여기서, A는 충격 지수(impulsive index)이고, $\Gamma = \sigma_G^2/\sigma_I^2$는 GIR(가우시안잡음 대 충격잡음 전력비)이며, σ_G^2와 σ_I^2는 각각 가우시안 잡음의 분산과 충격잡음의 분산으로서, $\sigma^2 = \sigma_G^2 + \sigma_I^2$이 된다. 이렇게 모델링된 충격잡음 환경에서 채널 입출력 신호 x, y 사이의 관계는 식 (16)과 같이 표현된다.

$$y_n^I + jy_n^Q = x_n^I + jx_n^Q + z_n^I + jz_n^Q \tag{16}$$

2.2 수신 레벨 제한된 LDPC 부호화 OFDM 시스템

충격 잡음에 의해 발생하는 성능 열화를 완화하기 위해 본 논문에서는 수신부 입력단에서의 수신 신호 레벨 제한을 제안한다. 그림 2는 제안된 시스템에 대한 블록도이다. OFDM 복조 전에 식 (17)과 같은 수신 신호 레벨 제한이 이루어지며, 이로써 채널 추정기는 가우시안 잡음 환경에서처럼 평균과 분산만 계산하는 간단한 방식을 사용할 수 있게 된다[4].



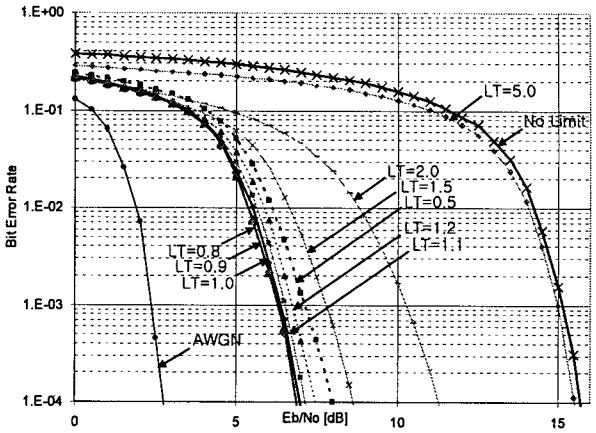
<그림 2> 수신 레벨 제한된 LDPC 부호화 OFDM 시스템 블록도

$$y'_n = \begin{cases} LT, & \text{if } y_n > LT \\ -LT, & \text{if } y_n < -LT \\ y_n, & \text{otherwise} \end{cases} \tag{17}$$

여기서, LT는 레벨 제한기의 임계값이다.

2.3 시뮬레이션 결과

그림 3은 레벨 제한기의 상대 임계값에 따른 비트오율 그래프이다. 시뮬레이션에 사용된 파라미터는, (3,6) 정규 LDPC 부호에 대하여 부호 길이 512, 부호화율 1/2, 반복복호 20회이며, OFDM 변복조에 사용된 DFT/IDFT 크기는 512이고, 충격 잡음에 대해, 충격 지수 A=0.1, GIR Γ=0.1이다. 상대 임계값은, 송신된 신호 레벨을 안다고 가정하였을 때, 그 송신 신호 레벨에 대한 상대적 값이다.



<그림 3> 수신 레벨 제한에 따른 성능 열화 완화

시뮬레이션 결과로부터, 충격 잡음 환경하에서는 수신 레벨 제한 없이 수신할 경우 가우시안 잡음 환경하에서 보다 약 13dB(BER=10^{-4} 기준) 정도의 성능 열화가 나타남을 알 수 있다. 또한 제안된 수신 레벨 제한을 통해 최대 약 9dB(BER=10^{-4} 기준)의 성능 개선 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 레벨 제한 임계값을 다양하게 변화시키면서 시뮬레이션 한 결과, 임계값이 송신 신호 레벨 대비 약 1.0 상황에서 최적의 성능을 보임이 확인되었으며, 이는 송수신간 신호 감쇄가 없다는 가정하에 나타난 결과이므로, 실제 시스템 구현시에는 수신된 신호 내의 원하는 신호 레벨 추정을 통해 원하는 신호 레벨 대비 지표로서 1.0이 적용되어야 한다. 결과적으로, 시스템 성능 열화를 야기하는 충격 잡음에 대한 제한이 송신 신호의 수신까지 제한하지 않아야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는, 전력선 통신 모뎀의 고속화를 위한 대안으로서 LDPC 부호화 OFDM 시스템의 채택을 고려할 경우, 전력선에 존재하는 충격 잡음에 의해 발생하게 되는 성능 열화에 대해 살펴보았다. 충격 잡음 채널은 일반적인 가우시안 잡음 채널과는 다르며, 특히 OFDM 변복조와 함께 적용될 경우, 수신단의 DFT 과정에 의해 충격 잡음이 전체 OFDM 심볼에 퍼지게 되어 시스템 성능이 열화되게 된다. 이러한 성능 열화를 간단한 방법으로 완화시키기 위해, 본 논문에서는 수신 신호 레벨 제한과 간단한 채널 추정기의 사용을 제안하였다. 제안된 시스템에 대한 시뮬레이션 결과로부터 어느 정도의 성능 열화 완화 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 이 과정에서 성능 열화 완화 효과를 최적화하기 위한 지표로서 수신 신호 중 원하는 신호 레벨만큼의 제한 임계값이 제시되었다.

[참 고 문 헌]

[1] 오휘명 외, "전력선 통신 채널 Data Base 구축을 위한 기본 연구", 대한전기학회 논문지, 52D권 2호, pp. 107-111, 2003.

[2] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Information Theory*, pp. 21-28, Jan. 1962.

[3] J. Fan, *Constrained coding and soft iterative decoding*, Kluwer Academic Publishers, 2001.

[4] 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.

[5] D. Middleton, "Statistical-physical model of electromagnetic interference," *IEEE Trans. Electromagnetics Compatibility*, vol. EMC-19, pp. 106-126, Aug. 1977.

[6] H. Futaki and T. Ohtsuki, "Low-density parity-check (LDPC) coded OFDM systems," *Proceedings of VTC2001*, vol. 1, pp. 82-86, 2001