

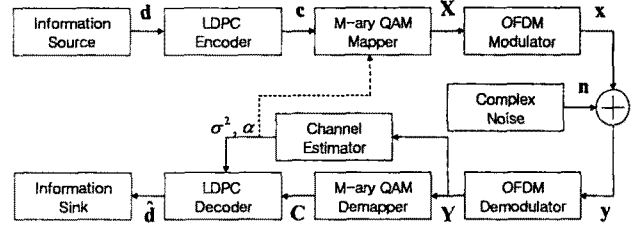
LDPC Coded OFDM 시스템에서 적응형 비트 로딩을 고려한 Sum-Product 복호기 성능에 관한 연구

오취영, 김영선, 이재조
한국전기연구원

**A Study about Performance of Sum-Product Decoder
Considering Adaptive Bit-Loading in LDPC Coded OFDM Systems**

Hui-Myoung Oh, Young Sun Kim, Jae-Jo Lee
KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)

Abstract - 추정된 채널 정보를 바탕으로 적용하는 적응형 비트 로딩 방식은, 전력선 통신 시스템의 고속화 및 대용량 데이터 전송을 위해 최근 대두되고 있는 LDPC(Low Density Parity Check) coded OFDM 시스템에 대해, 한정된 주파수 대역과 신호 전력의 효율적 사용을 제공한다. 그러나 적응형 비트로딩 방식은 한정된 수의 일정 SNR(신호대 잡음 전력비) 구간에 대한 mapping 방식으로 적용되기 때문에 송신 과정에서 추정된 채널 정보를 이용하는 sum-product 복호기가 채널 변화에 민감하게 반응하지 못하는 상황이 발생하며, 결국 송신단에서 채널 추정 결과를 바탕으로 선택된 SNR 범위에 대해서는 실제 수신되는 신호에 대한 SNR과의 차이가 존재하고 시스템의 성능은 그 만큼의 성능 열화로 나타나게 된다. 본 논문에서는 이러한 성능 열화 정도를 시뮬레이션을 통해 확인하였다.



〈그림 1〉 적응형 비트 로딩을 고려한 LDPC 부호화 OFDM 시스템 블록도

1. 서 론

전력선 통신 시스템은 디지털 통신기술의 발달과 함께 속도 향상 및 시스템 안정화가 이루어져 이미 실용화 단계에 있으며, 최근에는 대용량 고속 데이터 전송을 위해 초고속 전력선통신 모델 개발이 경쟁적으로 진행되고 있다. 10Mbps급 이상의 고속 전력선 통신 시스템에는 부호화 직교 주파수 분할 다중(Coded OFDM) 시스템이 적용되어 한정된 주파수 대역과 송신 전력 제한 환경에서 대용량 데이터를 효과적으로 송신 할 수 있도록 하고 있다. 부호화 OFDM 방식 중, OFDM 변복조는 다중 경로 특성에 의한 주파수 선택적 페이딩 환경에서 강점을 보이면서 각각의 부반송파 마다 다른 디지털 변조방식을 적용하도록 하는 적응형 비트 로딩(bit-loading) 방식과 함께 채널 특성에 따라 정보량을 변화시키면서 대용량 전송을 가능하게 하고, 채널부호는 잡음 및 간섭신호에 의해 왜곡된 정보를 정정해 줌으로써 대용량으로 전송된 데이터의 신뢰성을 향상시켜주게 된다. 현재 전력선 통신 모델에 채택되어 있는 채널부호는 리드-솔로몬(Reed-Solomon) 부호와 결합(Convolutional) 부호가 결합된 연쇄 부호가 일반적이며, 초고속 전력선 통신 모델에는 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[1].

전력선 통신의 신호 전달 매체인 전력선은 통신 신호의 전달 과정에서 무선 환경과 유사하게 다중경로 특성과 주파수 선택적 페이딩 특성을 나타낸다. 이로 인해 OFDM 부반송파들이 각각 다른 신호 감쇄량을 갖게 되고 결과적으로 해당 부반송파 대역을 통해 전달할 수 있는 데이터량이 달라지게 된다. 적응형 비트 로딩 방식은 이러한 채널을 통한 정보전달의 최적화 하도록 하는 방식에 해당하지만, 실제 시스템 구현상에서는 어느 정도의 성능을 고려한 신호 감쇄량 범위를 설정하여 사용하기 때문에 기본적으로 준 최적화를 고려하게 된다. 한편, LDPC 부호는 Sum-Product 복호과정에서 채널 정보를 바탕으로 한 로그 우도 비율(LLR: Log Likelihood Ratio) 계산이 필요하기 때문에 채널 추정을 필요로 한다. 그러나 부반송파별로 신호 감쇄가 다른 특성을 갖는 채널상황에서는 각 부반송파에 대한 정확한 신호 감쇄 추정이 어렵게 된다.

본 논문에서는 초고속 전력선 통신 모델을 위한 시스템 설계 방안으로서 LDPC 부호화 OFDM 시스템과 적응형 비트 로딩을 고려할 때, 각 부반송파에 따라 다른 신호 감쇄량에 대한 추정 오차에 의해 나타나게 되는 성능 열화를 시뮬레이션을 통하여 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 적응형 비트 로딩을 고려한 LDPC 부호화 OFDM 시스템 모델

본 논문에서 다룬 적응형 비트 로딩을 고려한 LDPC 부호화 OFDM 시스템 모델은 그림 1과 같이, 송신부에서 정보원으로부터 입력된 이진 데이터가 LDPC 부호기를 통해 부호화된 후 추정된 채널 신호 감쇄량에 따라 일정 성능을 유지하도록 하는 적응형 비트 로딩 알고리즘에 따라 M-ary QAM mapping 된 다음 OFDM 변조되며, 수신부에서 수신된 신호를 OFDM 복조한 후 M-ary QAM demapping한 후 LDPC 복호함으로써 추정된 정보를 얻게 된다. 채널의 잡음은 백색 잡음으로서 AWGN 환경을 고려하며 컴플렉스 형태로 모델링 한다. 적응형 비트 로딩과 LDPC 복호를 위해 필요한 채널 정보는 수신단 추정기를 통해 얻어진다.

2.1.1 잡음 모델

모델링된 잡음 채널 환경에 대한 채널 입력력 신호 x , y 사이의 관계는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$y'_n + jy''_n = x'_n + jx''_n + n'_n + jn''_n \quad (1)$$

여기서 n'_n, n''_n 은 식 (2)와 같은 pdf를 갖는 가우시안 랜덤 변수이다.

$$p(n_n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} e^{-\frac{n_n^2}{2\sigma_n^2}} \quad (2)$$

2.1.3 OFDM 변복조

OFDM 변조 및 복조 과정은 각각 IDFT와 DFT로 간단히 모델링되며 식 (3)과 (4)로 표현할 수 있다.

$$x_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp\left(j \frac{2\pi}{N} nk\right) \quad (3)$$

$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} y_n \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right) \quad (4)$$

식 (4)를 식 (1)에서 (3)을 이용하여 정리하면, LDPC 복호기에 입력되는 신호 Y_k 는 식 (5)와 같이 얻어진다.

$$Y_k = X_k + Re\left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} (n'_n + jn''_n) \exp\left(-j \frac{2\pi}{N} nk\right)\right) \\ = X_k + \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=0}^{N-1} (n'_n \cos\left(\frac{2\pi}{N} nk\right) + n''_n \sin\left(\frac{2\pi}{N} nk\right)) \quad (5)$$

독립된 가우시안 랜덤 변수들의 가중치 합은 새로운 가우시안 랜덤 변수가 되면서 평균과 분산은 각각 평균들의 가중치 합과 분산들의 가중치 제곱의 합으로 나타난다는 사실을 이용하면, Y_k 의 pdf는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$p(Y_k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_n} \exp\left(-\frac{(Y_k - X_k)^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (6)$$

여기서, $m_{n'_n} = m_{n''_n} = 0$, $\sigma_{n'_n}^2 = \sigma_{n''_n}^2 = \sigma_n^2$ 이므로, $m_{Y_k} = X_k$, $\sigma_{Y_k}^2 = \sigma_n^2$ 이 된다.

2.1.1 LDPC 복호화를 위한 초기 LLR

가우시안 잡음 환경하에서 그림 1과 같은 시스템의 LDPC 부호에 대한 Sum-Product 복호과정에 사용되는 초기 LLR은 demapping된 비트 값 C_k 와 가우시안 잡음의 분산 σ_n^2 및 부반송파별 신호 감쇄 지수 α_k 로부터 구

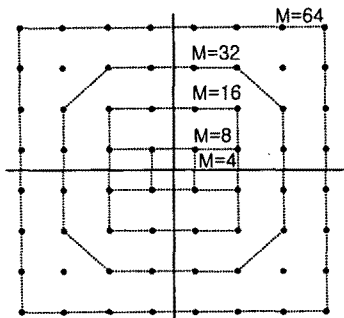
할 수 있다[2]. 식 (6)에서 X_k 는 C_k 와 α_k 의 곱으로 나타낼 수 있고, 결과적으로 각 비트별 초기 LLR은 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda(C_k) = LLR(C_k) = \log\left(\frac{P(Y_k|C_k=1)}{P(Y_k|C_k=-1)}\right) = \frac{2\alpha_k C_k}{\sigma_n^2} \quad (7)$$

2.1.2 적응형 비트 로딩 방식

적응형 비트 로딩 방식은 크게 Margin Adaptive 방식과 Rate Adaptive 방식의 두 부류로 나뉘어진다[3]. Margin Adaptive 방식은 주어진 Bit-Rate에 대해 오류 발생 확률을 최소화하는 형태로 비트 로딩을 하는 알고리즘이며, Rate Adaptive는 시스템 요구사항으로서 주어진 오류 발생 확률에 대해 Bit-Rate를 최대화 하는 형태로 비트 로딩을 하는 알고리즘이다. 최근 고속화를 위한 통신 시스템들은 최적의 Bit-Rate를 얻기 위해 일반적으로 Rate Adaptive 방식의 비트 로딩을 사용한다. 채널 추정을 통해 얻은 신호 감쇄 및 잡음 정보를 바탕으로 최대 Bit-Rate를 얻을 수 있도록 각 부반송파마다 다른 M-ary QAM 변조를 적용한다.

M-ary QAM 변조 방식은 그림 2와 같은 성상도를 갖는 rectangular 형태가 일반적으로 사용된다. 이는 신호의 전송 에너지를 최소화 하는 best M-ary QAM 성상도에 비해서는 약간의 평균 전력 증가가 발생하지만, 실제 시스템에 적용함이 용이하기 때문이다[4].



〈그림 2〉 Rectangular M-ary QAM 성상도

2.2 성능 시뮬레이션

본 논문에서는 적응형 비트 로딩을 적용하는 LDPC 부호화 OFDM 시스템에서 송수신단 사이의 신호 감쇄량 추정에 있어서 나타나는 오차가 성능 열화에 미치는 영향에 대해서만 다루고 있으므로, 다음과 같은 몇 가지 사항을 고려하여 시뮬레이션을 수행하였다.

1. 적응형 M-ary QAM mapper와 demapper는 시뮬레이션의 간단성을 고려하여 BPSK(Binary QAM) mapper와 demapper로 대체함으로써, M이 증가하더라도, BPSK의 +1과 -1 사이의 거리(minimum distance d_{min})를 기준으로 하는 SNR 추정 오차는 M-ary QAM에서 최소 거리를 기준으로 하는 SNR 추정 오차와 시스템 성능 상에 미치는 영향에 있어서 유사한 경향을 얻을 수 있다.

2. 각부반송파에 해당하는 신호 감쇄 α_k (여기서, k는 부반송파 번호)는 다수 개의 OFDM 심볼을 받은 후 추정된 평균값을 사용하게 되므로 수신단에서 추정하여 송신단으로 전달해주는 방식을 취하게 되지만, 송신단 측에서는 신호 감쇄 추정 상에 오차가 없는 것으로 가정함으로써 수신기 상에서 채널 추정 오차가 Sum-Product 복호기에 미치는 영향만을 확인할 수 있다.

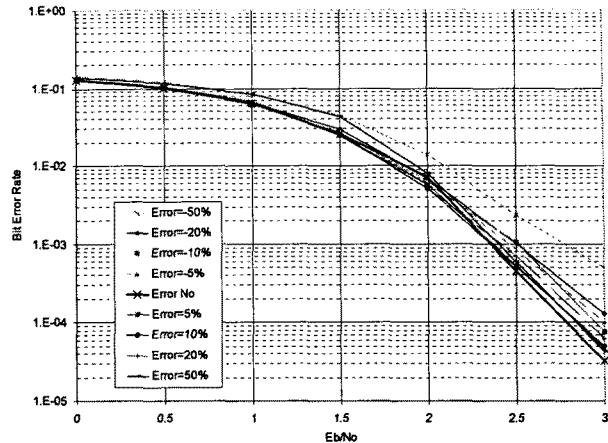
3. 각부반송파에 해당하는 잡음의 분산 σ_n^2 역시 다수 개의 OFDM 심볼 수신을 통해 추정되어야 하나 AWGN 채널을 고려하고 있으므로 모두 동일한 분산값을 사용하고, 각 부반송파의 SNR 변화값은 편이상 신호 감쇄 파라미터 α_k 에 좌우되는 것으로 한다.

2.2.1 시뮬레이션 파라미터

시뮬레이션에 적용된 파라미터는 표 1에 나타내었다. LDPC 부호는 패리티 체크 행렬 내의 1의 분포에 따라 Regular와 Irregular로 분류되는데, 잘 설계된 부호의 경우 후자가 좀 더 좋은 성능을 가지게 되지만[5], 시뮬레이

〈표 1〉 시뮬레이션 파라미터

분류	항목	사항
LDPC 부호부	종류	(3,6) Regular
	부호 길이	512
	부호화율	1/2
	반복복호	20회
OFDM 변복조부	IDFT/DFT 크기	512
채널	잡음 종류	AWGN
적응형 비트 로딩부	BPSK 방식으로 간략화	
채널 추정부	추정 대상	신호 감쇄 α_k
	추정 오차	$\pm 5, 10, 20, 50\%$



〈그림 3〉 부반송파 신호 감쇄 추정 오차에 따른 비트오율 성능

션에서는 간단히 (3,6) Regular LDPC 부호를 이용하였으며, 부호 길이는 512, 부호화율은 1/2이다. Sum-Product 복호기의 반복복호 회수는 20번으로 제한하였다. OFDM 변복조부의 부반송파 개수는 부호 길이와 동일하게 512로 하였으며, 각 부반송파에 대한 신호 감쇄 파라미터는 추정 오차를 변화시키면서 성능 변화를 확인 할 수 있도록 하였다.

2.2.2 시뮬레이션 결과

그림 3은 시뮬레이션을 통해 얻은 LDPC 부호화 OFDM 시스템의 비트오율 그래프이다. 이 결과로부터 신호 감쇄 파라미터에 대한 추정 오차가 증가함에 따라 시스템의 비트오율 성능이 열화됨을 확인할 수 있다. 그러나 추정 오차가 약 10% 이내로 유지된다면 실제 성능 열화 정도는 비트오율 10^{-4} 기준으로 시스템의 SNR 요구량 증가 측면에서 볼 때, 약 0.25dB 이내로 유지되어 큰 성능 열화가 발생하지는 않는 것으로 나타났다. 그러나 실제 시스템에 적용될 경우, 각 부반송파마다 다르게 나타나는 신호 감쇄량과 잡음량, 그리고 추정과정에서 랜덤하게 나타나는 추정 오차 등이 고려됨에 의해 보다 큰 성능 열화가 발생할 것으로 예상된다.

3. 결 론

본 논문에서는, 전력선 통신 모델의 고속화를 위한 시스템 설계 방안으로서 LDPC 부호화 OFDM 시스템과 함께 적응형 비트 로딩 방식을 채택할 경우, 송수신단 사이의 신호 전달 과정에서 나타나는 OFDM 부반송파별 신호 감쇄에 대한 추정 오차가 야기하는 시스템의 비트오율 성능 열화 정도를 확인하였다.

적응형 비트 로딩 방식과 LDPC 부호의 채택은 주어진 채널의 전달 특성 및 잡음 특성에 따라 결정되는 채널 용량 한계에 접근하는 성능을 얻을 수 있음에도, 실제 시스템 구현시 채널 추정 결과를 사용해야 하기 때문에, 채널 추정기에서 발생하는 오차에 민감하게 된다. 본 논문에서는 여러 가지 가정 조건 하에서 적응형 비트 로딩을 위해 사용된 송수신기 사이의 부반송파 신호 감쇄 추정치에 기반을 두고, 이에서 발생할 수 있는 채널 추정 오차가 LDPC 부호의 Sum-Product 복호기의 초기 LLR에 적용되어 전체 시스템 성능이 열화되는 것만을 확인하였지만, 향후 적절한 채널 추정 알고리즘과 적응형 비트 로딩 알고리즘을 적용하고 실측된 가변적인 전력선 채널 환경을 모의하여, 전력선 통신 모델의 고속화 시스템 방안으로서의 적응형 비트 로딩이 적용된 LDPC 부호화 OFDM 시스템의 적절성에 대한 검증이 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Gallager, "Low-density parity-check codes," *IRE Trans. Information Theory*, pp. 21-28, Jan. 1962.
- [2] J. Fan, *Constrained coding and soft iterative decoding*, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [3] S. Morosi, et al., "Turbo-coding and Bit-loading Algorithms for a HomePlug-like DMT PLC System," *Proceedings of IEEE ISPLC 2006*, pp. 227-231, Mar. 2006.
- [4] J. G. Proakis, *Digital Communications*, McGraw-Hill, 1995.
- [5] T. Richardson, A. Shokrollahi, and R. Urbanke, "Design of probably good low-density parity-check codes," *IEEE Trans. Information Theory*, vol. 47, pp. 619-637, Feb. 2001.
- [6] H.M. Oh, et al., "Mitigation of Performance Degradation by Impulsive Noise in LDPC Coded OFDM System," *Proceedings of IEEE ISPLC 2006*, pp. 326-331, Mar. 2006.
- [7] H. Futaki and T. Ohtsuki, "Low-density parity-check (LDPC) coded OFDM systems," *Proceedings of VTC2001*, vol. 1, pp. 82-86, 2001.