

양자화된 상수 엔벨로프 프리코딩이 적용된 환경에서 LDPC 부호를 통한 성능 향상 연구

김찬기
전북대학교

carisis@jbnu.ac.kr

A Study on the performance improvement using LDPC codes with quantized constant envelope precoding

Chanki Kim
Jeonbuk National University.,

요약

본 논문은 블록 페이딩 환경 내 상수화된 양자 엔벨로프 프리코딩이 적용된 환경에서 위상 별 LLR 추정을 통해 다이버시티 획득이 가능한 LDPC 부호의 적용하는 방법론에 대해 연구하였다. 제안 방법을 통해 기존 연관정 기반 LDPC 부호를 활용하는 경우 대비 낮은 복잡도로 다이버시티 획득이 가능한 복호가 가능하면서도, 기존 최대 결합이 적용된 경우보다 높은 성능을 얻을 수 있음을 실험적으로 보일 수 있었다.

I. 서론

블록 페이딩은 멀티 안테나 환경, OFDM 등 다양한 최신 통신 시스템의 물리 계층을 대표하는 채널 모델로 알려져 있다. 블록 페이딩 채널에서 최적의 오류 정정 성능을 얻기 위해서는, 채널 부호 외에 페이딩에 의한 채널 왜곡을 복원할 수 있는 다양한 다이버시티 획득 방법론을 사용하여야 한다. 대표적으로, 송신자는 프리코딩을 통해 결과적으로 페이딩이 적용되었을 때 변화된 신호의 위상 및 전력 세기가 의도된 변복조 기법에 의한 성좌도 상에 위치하도록 조정할 수 있다. 다만 이와 같은 프리코딩 방법, 순간적인 페이딩 값에 맞는 유연한 전력 및 위상 조정이 요구된다. 특히 전력 조정 과정을 실현하는 고성능 ADC에 의해 송신단의 구현 복잡도 및 전력 소모를 대폭 증가하게 하는 주요 원인으로 작용하며, 이러한 문제를 완화하고자 양자화된 상수 엔벨로프 (QCE) 프리코딩이 제안되었다 [1].

QCE 프리코딩에서는 전력이 일정하며 위상이 다른 다수의 프리코딩 값이 정의되어 있으며 프리코더는 각 심볼 별 위의 목적을 달성할 수 있는 가까운 값에 해당하는 정의된 값으로 신호를 변환 후 송신하게 하게 된다. 여기서 이론적인 최대 다이버시티 획득을 위해서 요구되는 양자화된 프리코딩 값의 최소 수는 획득하기 위해서는 변복조 수준보다 높은 값이 필요하다는 것이 알려져 있다 [2]. 이 경우 하나의 변조 값에 다수의 프리코딩 값이 위치하게 되며, 채널 부호의 복호기는 추가적인 성능 향상을 위해 해당 값을 연관정으로 활용하여 활용할 수 있다.

본 논문에서는 블록 페이딩 및 QCE 프리코딩이 적용된 환경에서 기존 다이버시티 획득이 가능한 Root LDPC 부호 활용 [3]을 통해, 기존 신호 결합 대비 보다 높은 정정 성능을 얻을 수 있음을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장인 본론에서는 블록 페이딩 환경에서 QCE 프리코딩이

적용된 시스템 모델을 소개하고, 제안 LDPC 부호의 적용 방법론, 그리고 이에 대한 성능 분석을 수행한다. 마지막으로 3 장에서는 결론을 통해 논문 내용을 요약한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

본 논문에서는 다음과 시스템 모델을 가정한다. 양의 정수 n, N, M, L 이며, $NM|n$ 을 가정할 때, n 비트 길이의 부호어 \mathbf{c} 혹은 데이터에 N 개의 블록 페이딩이 포함되어 있으며, 부호율이 $R = \frac{1}{N}$ 인 경우, 부호어는 $\mathbf{c} = (\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_N) = (c_{1,1}, \dots, c_{1,\frac{n}{N}}, \dots, c_{N,1}, \dots, c_{N,\frac{n}{N}})$ 과 같이 표현된다. 이후 부호어 내 연속된 M 비트 단위로 균일한 위상차이로 정의된 성좌도 $\mathcal{S}_M = \left\{ e^{\frac{j2\pi(m-1)}{M}}, m \in [M] \right\}$ 를 따르는 2^M -PSK에 의해 $\frac{n}{M}$ 개의 심볼 벡터 $\mathbf{x}' = (\mathbf{x}'_1, \dots, \mathbf{x}'_N) = (x'_{1,1}, \dots, x'_{1,\frac{n}{NM}}, \dots, x'_{N,\frac{n}{NM}})$ 로 변조된다. 변조 과정에서 각 페이딩 내 심볼 별로 페이딩 값에 따라 프리코딩 값인 s_i 이 적용되지 않는 경우 $i \in [\frac{n}{NM}]$ 번째 래일리 블록 페이딩 계수 값인 h_i 에 대해 $y'_{i,j} = h_i x'_{i,j}$ 이 조정된다.

송신단에서는 위와 같은 블록 페이딩에 의한 왜곡을 보정하고자, QCE 프리코딩 집합 $\mathcal{S}_L = \left\{ e^{\frac{j2\pi(l-1)}{L}}, l \in [L] \right\}$ 내 원소 중 하나인 $s_{i,j}$ 를 고르되, 페이딩이 적용된 예측값 $y'_{i,j}$ 을 바탕으로 본래 의도된 값과 $x'_{i,j}$ 가까운 위상 값이 나타나도록 선택하여 변조 후의 위상을 재조정한다. 즉, 변조 값 $x' \in \mathcal{S}_M$ 에 대해 함수 $q_x(y') \in \mathcal{S}_L$ 는 $y' q_x(y')$ 값이 x' 와 가장 가까운 \mathcal{S}_L 내의 원소를 반환한다고 할 때, 프리코딩 이후 값은 $s_{i,j} = x'_{i,j} q_{x'_{i,j}}(y'_{i,j})$ 로 표현된다.

분산이 σ^2 인 이진 가산 가우시안 분포의 샘플값 n 에 대해, 프리코딩이 적용된 후의 변조 값은 $x_{i,j} = x'_{i,j} q_{x'_{i,j}}(y'_{i,j})$ 이며, 수신 값 $y_{i,j}$ 은 다음과 같다.

$$y_{i,j} = h_i x_{i,j} + n = h_i \left(x'_{i,j} q_{x'_{i,j}}(y'_{i,j}) \right) + n$$

그림 1은 위와 같은 QCE 가 적용된 시스템 모델을 묘사한다.

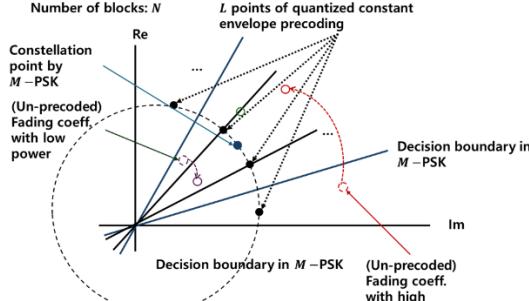


그림 1 QCE 시스템 모델

2. LDPC 부호를 활용한 제안 성능 향상 방법론

앞서 시스템 모델에서 변복조 수준 M 및 프리코딩 수 L 를 설정하는 부분은 QCE의 복잡도와 오류 정정 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 특히 [2]에 따르면, QCE 시스템이 이론적인 최대 다이버시티를 얻기 위해서는 $L > M$ 이 되어야 함이 증명되었다. 이 경우, PSK 내값보다 더욱 많은 프리코딩 값이 존재하며, 실제 프리코딩 이후 결정 영역이 변조에서의 위한 영역보다 작게 할당되게 된다. 여기서 그림 2와 같이, 블록 내 모든 심볼의 분포가 한두개의 프리코딩 결정 영역내에 머무르는 경우, 높은 SNR 혹은 페이딩 계수 값이 되었을 것으로 추정할 수 있고, 반대로 다수의 영역에 걸쳐 있는 경우, 낮은 SNR 값을 알 수 있다. 이러한 특징을 활용하면, 복호기가 단순히 위상만을 바탕으로 연관성을 유도하더라도, 전력에 기반한 값을 얻어낼 수 있다.

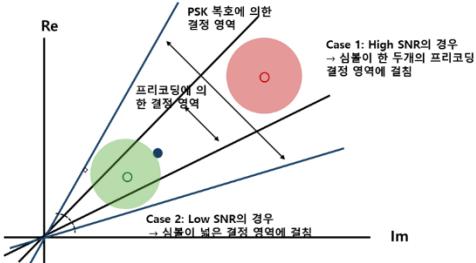


그림 2 제안 전력 추정 방법론

제안 방식에서는 수신기가 PSK 복조시 변복조 수준 M 보다 높은 프리코딩 수 L 에 맞게 영역을 판단하며, 이를 기반으로 특정 블록 및 복조값에서 나타난 프리코딩 영역의 수 P 를 추정한다. 또한 채널 부호로서 다이버시티 획득이 가능한 부호율 $R = \frac{1}{N}$ 의 Root LDPC 부호를 활용하였다. 가우시안 오류만 있었을 때 SNR 값에 기반한 LLR 값을 LLR_n 이라고 가정할 때, LDPC 부호의 연관정시 필요한 LLR 값은 $LLR_b = \frac{LLR_n}{P}$ 로 같이 계산하였다. 다음장에서는 실험을 통해 위의 방법론이 기존 최대 결합(Maximal combining) 방법 대비 더 우수한 성능을 얻을 수 있음을 보이고자 한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 분석

실험은 다음과 같이 구성되었다. $N = 2, M = 2, L = 16$ 인 QCE 시스템에서, 부호 길이 $n = 3008$ 비트, 부호율 $r = \frac{1}{2}$ 인 root LDPC 부호를 활용하였다. 이를 위해, 패리티체크행렬은 아래의 프로토그래프로부터 리프팅하여 4개의 프로토노드가 하나의 페이딩 블록에 대응할 수 있도록 구성하였다.

1	0	0	0	1	3	1	0
0	1	0	0	2	3	3	1
1	3	1	0	1	0	0	0
2	3	3	1	0	1	0	0

기존 QCE 상에서의 최대 결합 및 QCE가 아닌 Soft-decision 방법에서의 성능 비교 결과는 그림 3과 같다.

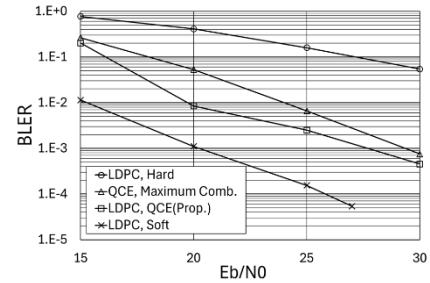


그림 3 제안 및 기존 성능 비교 결과

여기서 LDPC 연관정 및 QCE가 적용된 경우, 기존 QCE 및 최대 결합이 사용된 경우 대비 2~4 dB 수준의 성능 향상을 얻을 수 있었다. 또한, 경판정과는 다르게, 최대 다이버시티에 해당하는 기울기를 얻을 수 있었다.

III. 결론

본논문에서는 QCE 시스템에서 복호 결정 영역에 기반한 LDPC 부호의 연관정 방법을 새로 제안하였다. 제안 방법을 통해 기존 최대 결합을 활용한 방법 대비 더욱 높은 성능을 얻을 수 있었다. 추후 연구로서, LDPC 부호 설계 및 연관정을 개선하여, 완전한 연관정이 적용되는 최적 성능과 근접하는 방법론을 고안하고자 한다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 과학기술정보통신부와 정보통신기획평가원의 SW 중심대학사업의 연구결과로 수행되었음 (2022-0-01067)

참고 문헌

- [1] H. Jedda, A. Mezghani, A. L. Swindlehurst, and J. A. Nossek, "Quantized Constant Envelope Precoding With PSK and QAM Signaling," *IEEE Trans. Wire. Comm.*, Vol. 17, No. 12, Dec. 2018.
- [2] Z. Wu, J. Wu, W.-K. Chen, and Y.-F. Liu, "Diversity order analysis for quantized constant envelope transmission," *IEEE Open Journal of Signal Processing*, Vol. 4, 2023, pp. 21–30
- [3] Y. Fang, G. Bi, and Y. L. Guan, "Design and analysis of root-protograph LDPC codes for non-ergodic block-fading channels," *IEEE Trans. Wire. Comm.*, vol. 14, no. 2, pp.738–749, Feb. 2015.