

시변 채널에서의 채널 변화에 강인한 LLR 기반 결정 게이트 DFE 기법 연구

박영목, 이남윤
포항공과대학교

{ympark1999, nylee}@postech.ac.kr

LLR-Gated DFE for Robust Equalization in Time-Varying Channels

Youngmok Park, Namyoon Lee
POSTECH

요 약

시변 채널 환경에 결정 피드백 등화기(DFE)는 결정 기반 모드에서의 오류 전파로 인해 성능 저하를 겪는다. 본 논문에서는 심볼 결정의 신뢰도를 기반으로 필터 계수의 갱신 여부를 제어하는 LLR 기반 DFE 구조를 제안한다. 제안된 기법은 등화 출력으로부터 계산된 LLR의 절댓값이 미리 설정된 임계값 이상일 때에만 계수 갱신을 수행함으로써, 신뢰도가 낮은 결정으로 인한 잘못된 업데이트를 억제한다. 시뮬레이션을 통해 제안 기법은 기존 DFE에 비해 우수한 등화 성능을 나타냄을 확인하였다.

I. 서론

고속 철도 및 차량 간 통신 등 고속 이동 환경에서의 통신 시스템은 중요한 연구 주제로 주목받고 있다. 이러한 환경에서는 채널 응답이 시간에 따라 빠르게 변하므로, 시변성이 통신 성능에 큰 영향을 미친다. 시변 채널에서는 다중경로 지연과 도플러 확산이 동시에 존재하며, 시불변 채널을 가정한 기존 통신 기법은 성능 저하를 피하기 어렵다. 이러한 특성에 대응하기 위해 널리 사용되는 방식 중 하나가 직교 주파수 분할 다중화(orthogonal frequency division multiplexing, OFDM)이다. OFDM은 제한된 대역폭을 다수의 부반송파로 세분화해 스펙트럼 효율을 높이고, 사이클릭 프리픽스(CP)를 통해 다중 경로 지연으로 인한 심볼 간 간섭(inter-symbol-interference, ISI)을 완화할 수 있는 구조를 갖는다. 그러나 도플러 확산이 큰 시변 채널에서는 부반송파 간 직교성이 무너지며 부반송파 간 간섭(inter-carrier interference, ICI)이 발생하고, 긴 지연 확산을 처리하기 위한 CP 오버헤드는 전송 효율을 저하시킨다 [1].

이에 본 연구에서는 시변 채널 환경으로 인한 OFDM의 제약을 고려하여 대안적 접근으로 단일 반송파 기반의 결정 피드백 등화기(decision feedback equalizer, DFE)를 적용하고자 한다. DFE는 수신된 심볼 결정을 활용하여 후방 간섭을 제거하는 구조로, 시변 채널에서도 적응적으로 동작할 수 있는 간결한 구조를 갖는다 [2]. 하지만 결정 기반 구조 특성상 오류 전파에 취약하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 이를 보완하기 위해, 심볼 결정의 신뢰도를 정량화하고, 신뢰도가 충분히 높은 경우에만 계수 갱신을 수행하는 LLR 기반 DFE 기법을 제안한다.

II. 본론

본 논문에서는 아래와 같이 시변 채널 모델을 고려한다:

$$y[n] = \sum_{k=0}^{L-1} h[n, k]s[n-k] + v[n]. \quad (1)$$

시간 인덱스 n 에서의 채널 임펄스 응답은 $h[n, k]$ 로 표현되며, 이는 총 L 개의 지연 성분(tap)을 갖는 선형

시변 채널로 모델링된다. $v[n]$ 은 평균 0, 분산 σ^2 을 갖는 복소 백색 가우시안 잡음(AWGN)이다. 이러한 시변 채널 환경에서 등화를 위해 DFE를 고려하였다.

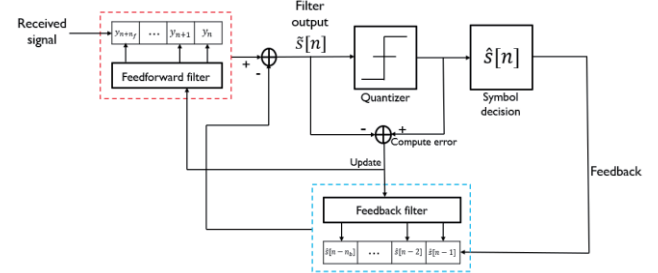


그림 1. DFE 구조

그림 1은 DFE의 구조를 나타낸다. 수신 신호들은 피드포워드 필터(feedforward filter)를 통해 채널 전방 간섭(precursor ISI)을 보정한 뒤 피드백 필터(feedback filter)를 통해 후방 간섭(postcursor ISI)을 제거한다. 이를 통해 출력되는 신호 $\hat{s}[n]$ 은 양자화기(quantizer)를 거쳐 최종 심볼 $\hat{s}[n]$ 으로 결정된다. 이후 결정된 심볼은 피드백 필터의 입력으로 사용되어 다시 후방 간섭을 제거하는데 활용된다.

DFE 필터 계수는 일반적으로 LMS(least mean square) 알고리즘을 통해 순차적으로 갱신된다. LMS 알고리즘은 평균 제곱 오차를 최소화하는 방향으로 필터 계수를 조정하며, 이는 MMSE(minimum mean square error) 해를 실시간으로 근사하는 방식으로 이해할 수 있다. 즉, 이상적인 경우 오차의 앙상블 평균을 기반으로 최적 계수를 계산하는 MMSE 해와 달리, LMS는 각 시간 인덱스에서의 오차 $e[n] = \hat{s}[n] - s[n]$ 을 즉시 활용하여 다음과 같이 계수를 반복적으로 갱신한다:

$$w[n+1] = w[n] + \mu u[n]e^*[n]. \quad (2)$$

여기서 $u[n]$ 은 필터의 입력 벡터이며, μ 는 LMS의 필터 계수 갱신 폭을 조절하는 스텝 사이즈(stepsize)이다.

데이터 송수신 과정에서 DFE의 필터 계수는 두 단계에 걸쳐 학습된다. 먼저, 송수신단이 모두 알고 있는 과일릿 심볼 시퀀스를 이용하는 훈련 모드(training mode)에서는 필터 출력 신호 $\hat{s}[n]$ 과 실제 송신 심볼 $s[n]$ 의 차이인

오차 $e[n]$ 를 기반으로 필터 계수를 안정적으로 학습할 수 있다.

훈련 모드 종료 이후, 실패 데이터 구간에서는 송신 심볼을 알 수 없기 때문에 수신단에서 결정된 심볼 $\hat{s}[n]$ 을 정답으로 가정하는 결정 기반 모드(decision-directed mode)로 전환된다. 이 모드에서는 채널 변화에도 적응적으로 필터 계수 갱신이 가능하지만, 결정된 심볼이 부정확할 경우 잘못된 오차가 누적되어 에러 전파(error propagation) 현상이 발생할 수 있다. 이러한 에러 전파로 인해 필터 계수가 잘못된 방향으로 학습되는 문제를 방지하기 위해, 본 논문에서는 결정 신뢰도 기반의 계수 업데이트 제어 기법을 제안한다. 구체적으로, 각 심볼 결정에 대해 로그 우도 비(log likelihood ratio, LLR)를 계산하고, 이 LLR의 절댓값이 일정 임계값 이상일 때에만 필터 계수를 갱신한다. 이를 통해 신뢰도가 낮은 결정으로 인한 오류가 필터 계수에 반영되는 것을 차단하여, 결정 기반 모드에서도 보다 안정적인 계수 학습이 가능해진다.

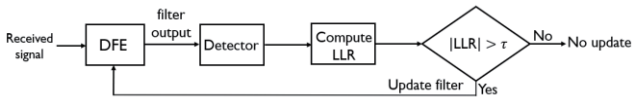


그림 1. LLR 값을 기반으로 필터 계수의 업데이트 여부를 제어하는 결정 기반 등화 구조

LLR은 수신된 심볼에 대해 특정 비트 b 의 값이 1 또는 0일 조건부 확률의 비를 로그 스케일로 표현한 신뢰도 척도이다. 일반적으로 χ 를 전체 심볼 집합이라 할 때, $\chi_b^{(1)}$ 와 $\chi_b^{(0)}$ 는 각각 비트 b 가 1 또는 0인 심볼들의 부분 집합으로 정의된다. 이때, 비트 b 에 대한 LLR은 다음과 같이 계산된다:

$$LLR_b = \log \left(\frac{\sum_{x \in \chi_b^{(1)}} \exp \left(-\frac{|y-x|^2}{\sigma'^2} \right)}{\sum_{x \in \chi_b^{(0)}} \exp \left(-\frac{|y-x|^2}{\sigma'^2} \right)} \right). \quad (3)$$

LLR_b 의 부호는 비트 결정 방향, 즉 $b=1$ 또는 $b=0$ 중 어떤 쪽이 더 가능성이 높은지 나타내며, 절댓값 $|LLR_b|$ 는 두 확률의 비율 차이의 크기, 즉 결정에 대한 신뢰도의 지표가 된다. (3)에서 σ'^2 는 단순한 AWGN의 분산이 아니라 등화 출력 오차 $e[n]$ 에 대한 유효 잡음 분산을 의미한다. 실제 등화 출력은 AWGN 뿐 아니라 잔류 ISI(residual ISI), 채널 시변성에 따른 필터 오차, 결정 오차 등의 영향을 받기 때문에, 그 분포는 일반적인 가우시안이 아닌 혼합 가우시안 특성을 나타낸다. 이러한 오차 분포를 정확하게 모델링하려면 계산 복잡도가 크게 증가하고, 폐형식의 LLR 계산이 어려워지는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 DFE의 저복잡도 특성을 유지하기 위해, $e[n]$ 을 평균 0, 분산 σ'^2 을 갖는 복소 가우시안 잡음으로 근사하고, 계산이 간단한 폐형식 LLR을 적용하였다. 이때 σ'^2 는 등화 오차의 통계적 특성을 기반으로 추정하며, 훈련 구간에서는 평균 제곱 오차(MSE)를 이용해 초기화하고, 결정 기반 구간에서는 최근 W 개의 오차 샘플에 대한 슬라이딩 윈도우 평균으로 갱신하였다.

이를 통해 DFE에서 출력되어 양자화를 거쳐 결정된 심볼에 대한 LLR을 계산하여, LLR의 절댓값이 클수록 해당 심볼 결정의 신뢰도가 높다고 판단하였다. 따라서 LLR의 절댓값이 미리 설정된 신뢰도 임계값(reliability threshold) τ 이상인 경우에 필터 계수를 갱신하도록 하였다. 따라서 신뢰도가 낮은 결정으로 인한 잘못된

업데이트를 억제하고, 결정 기반 모드에서도 안정적인 등화 성능을 유지할 수 있도록 하였다.

제안 기법의 성능을 확인하기 위해, 시변 채널 환경에서 시뮬레이션을 수행하였다. 일반적인 LMS 기반 DFE와 제안한 LLR-gated DFE를 비교하여 등화 성능을 평가하였다. QPSK 변조를 사용하였으며, 3개의 지연 성분을 갖는 Rayleigh 시변 채널은 AR 모델 기반으로 100 심볼마다 갱신되었다. DFE는 피드포워드 1탭, 피드백 2탭 구조이며, 스텝사이즈는 신호 전력에 따라 정규화된 LMS 계수로 설정하였다. 훈련 심볼 수는 150개이며 이후는 결정 기반 모드로 동작하였다. 제안 기법에서는 신뢰도 임계값 $\tau = 4.6$ 을 기준으로, 해당 값을 초과하는 심볼에 대해서만 계수 갱신을 수행하였다. 전송 심볼 길이 150, 450, 850에 대해 반복 실험을 수행하고, BER 성능을 비교하였다.

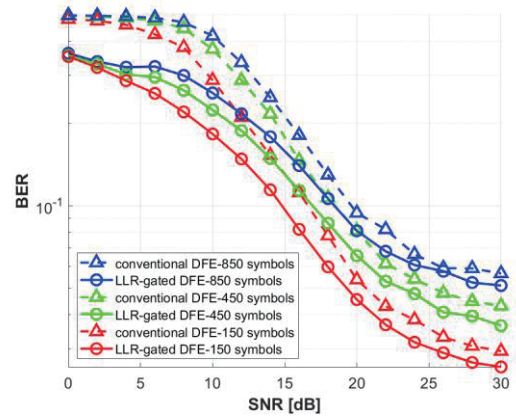


그림 3. BER 시뮬레이션 결과

전송 프레임 길이가 길수록 두 방식 모두 오류 전파로 인하여 등화 성능이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 그러나 제안된 기법이 결정 신뢰도가 낮은 경우에는 계수 갱신을 억제함으로써, 오류 전파에 더 강한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 시변 채널 환경에서의 DFE 오류 전파 문제를 완화하기 위해 LLR 기반의 신뢰도 제어 기법을 갖는 DFE 구조를 제안하였다. 제안된 방식은 등화기에서 결정 심볼로부터 계산된 LLR의 절댓값을 결정 신뢰도의 지표로 활용하여, 신뢰도가 충분히 높은 경우에만 필터 계수 갱신을 수행함으로써 잘못된 심볼 결정에 따른 오류 전파를 억제한다. 시뮬레이션을 통해 제안한 LLR-gated DFE가 기존 DFE 대비 우수한 BER 성능을 나타냈으며, 특히 신뢰도 기반 갱신 제어가 결정 기반 모드에서의 등화 안정성을 향상 효과를 확인하였다.

참고 문헌

- [1] A. Gorokhov and J. . -P. Linnartz, "Robust OFDM receivers for dispersive time-varying channels: equalization and channel acquisition," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, no. 4, pp. 572-583, April 2004.
- [2] D. George, R. Bowen and J. Storey, "An Adaptive Decision Feedback Equalizer," in *IEEE Transactions on Communication Technology*, vol. 19, no. 3, pp. 281-293, June 1971.