

채널추정기를 이용한 등화기 결정오류 정정 알고리즘에 관한 연구

김선웅

한국폴리텍대학교 남인천캠퍼스 스마트전자과

A Study on The Correction of The Channel Equalizer Decision Error Using Channel Estimator

Seon-Woong Kim

Division of Smart Electronics, Korea PolyTechnic

요약 대역이 제한되거나 채널분산이 존재하는 매체를 통해 메시지를 전송하는 과정은 불가피하게 신호왜곡과 잡음유입을 수반하며 결과적으로 심볼간 간섭과 부가잡음에 의해 전송품질이 열화 되어 수신심볼 오류를 증가시키게 된다. 적응 등화기의 역할은 전송 메시지를 복원하기 위해 등화기 수신단에 입력되는 수신신호로부터 채널왜곡 성분과 잡음을 제거하는 일이다. 이를 위해 일반적으로 선형필터부와 심볼 결정기의 조합으로 구성되는 등화기에 관한 연구가 많이 이루어져 왔고 전방향 오류정정부호화와 결합하여 디지털 정보통신 분야에 필수적인 전송효율 제고에 핵심적인 역할을 하고 있다. 본 논문에서는 등화기 출력인 메시지 심볼에 잔존하는 심볼오류를 추가적으로 정정할 새로운 알고리즘을 제안하였는데 일반적으로 등화기 성능개선 알고리즘들이 등화 초기 수렴속도나 정상상태오차를 개선하는 방향으로 진행되어 오고 있는 반면, 본 논문에서는 등화기 결정심볼과 전송채널 추정값을 이용하여 등화기 입력신호를 재구성하고 실제 입력신호와와의 오차신호를 구한 후 이에 대한 통계적 특성을 분석해 직접적으로 오류정정을 수행하는 새로운 알고리즘을 제안하였다.

Abstract The process of transmitting messages through a medium with a limited bandwidth or channel dispersion inevitably involves signal distortion and noise influxes, resulting in the degradation of transmission quality due to the inter-symbol interference and additional noise, which increases the error rate of the received symbols. The main role of the equalizer is to remove the channel distortion and noise from the received signal to recover the transmitted messages. A number of studies on the equalizer composed of a combination of linear filter and error control coding have shown that they played a key role in enhancing the transmission efficiency, which is essential for digital communication. This paper proposes a new algorithm to correct the residual symbol errors in the message signal. In general, equalizer performance improvement algorithms were developed to improve the initial convergence speed or steady-state error. In this paper, however, the equalizer input signal was reconstructed using the equalizer decision symbols and the channel estimates to directly correct the decision errors by analyzing the statistical characteristics of the difference signal between the actual received signal and the reconstructed signal.

Keywords : Channel Estimator, Channel Equalizer, Error Correction, ISI, Limited Bandwidth

1. 서론

결정궤환형 등화기(decision feedback equalizer)는 FIR필터를 이용한 등화기와 함께 사용되어 높은 성능개선을 이루어 왔다[1-3]. 대부분의 상용 시스템에서 흔히

볼 수 있는 이 방식은 비교적 작은 차수의 FIR필터와 상대적으로 긴 차수의 결정궤환형 필터로 구성되어 심볼간 간섭을 효과적으로 제거하고 있다. 등화기의 성능을 높이기 위한 방안으로 잡음환경에 더 강인하고 수렴속도가 높으며 정상상태 오차가 작은 알고리즘들이 개발되어 오

*Corresponding Author : Seon-Woong Kim(Korea PolyTechnic)

Tel: +82-32-450-0475 email: kimsw@kopo.ac.kr

Received July 3, 2017

Revised July 27, 2017

Accepted August 17, 2017

Published August 31, 2017

고 있는데 RLS(Recursive Least Squares) 또는 칼만필터(Kalman Filter)도 이러한 이유로 채택되고 있다[4-5]. 또한 특별한 경우, 예를 들어 입력신호의 공분산 행렬의 고유치분포가 큰, 수렴하기 악조건인 경우에 대해서는 변환기법등을 사용하여 조건을 극복하는 방법 등도 연구되고 있다[6-7]. 그러나 어느 등화기법의 경우이든지 주어진 채널에 대한 등화과정에서 최적해는 Wiener 방정식에 의해 결정된다고 볼 수 있으므로 최적해에 도달하기 위한 기존의 연구들은 결론적으로 정확한 필터계수 추정에 목적을 가진다고 볼 수 있다[11-13]. 이러한 과정을 거쳐 충분한 정도로 최적해에 근접한 해를 얻게 되면 그 이후부터는 성능개선이나 심볼오류 감소측면에서 더 이상 두드러진 차이를 얻어내기 어렵다. 본 논문에서는 기존의 알고리즘과 달리 등화가 이루어진 이후에도 잔존하는 심볼결정오류를 검출하고 교정하는 방안을 제안하였다. 구조적으로 기존의 최적해 알고리즘을 그대로 채용하여 심볼결정을 수행하는 한편 이를 바탕으로 채널추정을 병행하고 이 때 추정된 채널의 전달함수와 등화한 심볼열을 이용하여 등화기 수신신호를 재구성하는 형태이다. 이 재구성된 수신신호와 실제 수신신호와의 차이를 통계적으로 분석하여 오류를 검출하고 교정까지 수행하는 것이 제안의 내용이다.

2. 등화기 결정오류정정 알고리즘

2.1 제안한 알고리즘의 구조

Fig. 1 에 결정오류를 정정하기 위해 제안한 알고리즘의 블록도를 나타내었다. 여기서 사용된 등화기는 DFE(8,24)로서 전방향 8탭 그리고 결정궤환 24탭의 일반 상용 케이블모뎀에서 사용되는 형태와 동일하다. Fig.

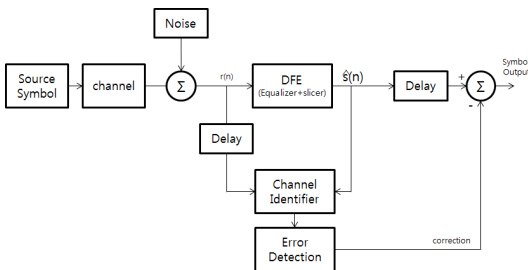


Fig. 1. Block Diagram of DFE decision error correction algorithm

1에서 볼 수 있듯이 수신심볼열은 등화기로 입력되기도 하지만 일정시간 시지연을 거쳐 채널추정기로도 입력된다. 채널 등화기로 입력된 수신심볼열은 등화과정을 거쳐 채널의 왜곡을 최대한 상쇄시킨 후 심볼결정기를 거쳐 순차적으로 출력된다.

이렇게 얻은 심볼결정기 출력은 다시 채널추정기로 입력되는데 이 심볼열을 이용하여 수신 심볼열을 재구성 하도록 설계하였다. 채널추정기의 추정오차는 입력신호인 심볼결정기 출력에 잔류하는 심볼오류에 의해 영향을 받게 되는데 심각하게 많은 양의 오류가 발생하는 경우가 아니면 일정수준의 채널추정 성능을 얻을 수 있다.

2.2 Blind Adaptive Decision Feedback Equalizer

등화기의 입력신호를 r_k 이라하고, 전체 결정궤환형 적응등화기의 출력을 y_k , 그리고 심볼 결정기출력을 x_k 라하면, 등화기 출력 y_k 는 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(k) = \sum_{i=0}^7 c_i(k)r(k-i) - \sum_{j=1}^{24} b_{j-1}(k)x(k-j) \quad (1)$$

여기서, $c_i(k)$ 는 시간 k 에서 전방향등화기 탭계수이고, $b_j(k)$ 는 시간 k 에서 결정궤환형 등화기 탭계수이다. 등화기 탭의 계수갱신은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} c_i(k+1) &= c_i(k) + \mu e(k)r(k-i) \\ b_j(k+1) &= b_j(k) - \mu e(k)x(k-j) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $e(k)$ 는 심볼결정기 출력과 심볼추정치 $y(k)$ 의 차이신호이다. 결정궤환형 등화기의 전방향등화기 부분은 일반적인 FIR필터와 동일한 구조로 채널왜곡에 대한 일차적인 등화를 수행한다. 후단인 결정궤환형 등화기부분은 과거 심볼결정이 통계적으로 높은 신뢰도를 가지고 있다는 가정 하에 심볼추정에 개입한다. 만약 심볼결정에 오류가 발생하면 잘못된 심볼결정값을 기준값으로 삼고 계수갱신을 하게 되므로 등화성능을 열화시키는 요인이 된다[8-9]. 잘못된 계수 갱신은 심볼결정치가 DFE의 탭에서 사라질 때까지 계속되며, 이로 인해 이후 심볼결정에 오류를 발생시킬 수도 있는데 이를 오류전파

(Error Propagation)라 한다. DFE를 도입하면 전송채널의 임펄스 응답이 상당히 긴 경우에도 좋은 성능을 얻을 수 있지만 이처럼 반대의 상황도 전개될 수 있는 단점도 가진다[10].

2.3 채널추정기

본 논문에서는 채널에 추가되는 잡음이 강하고 채널의 특성이 시변하는 경우에도 안정하게 채널을 추정할 수 있도록 칼만필터링을 적용하였다. 칼만필터의 상태공간 방정식을 채널추정기법에 적용하는 과정에서 앞 절에서 논의했던 결정계환형 적응등화기의 심볼결정기 출력을 사용하는 부분에 대해 기술하고 수렴속도나 정상상태 오차면에서 성능에 대한 결과를 관찰하는 과정을 거치고자 한다[14].

전송채널의 임펄스 응답을 $\mathbf{h}(n)$ 라고 하고 채널잡음을 $w(n)$ 이라 하면 채널의 출력 $y(n)$ 은 식 (3) 및 식(4)와 같이 나타낼 수 있다[15].

$$y(n) = \mathbf{S}^T(n)\mathbf{h}(n) + w(n) \quad (3)$$

$$\mathbf{h}(n+1) = \Phi(n+1,n)\mathbf{h}(n) + \mathbf{v}(n) \quad (4)$$

본 칼만 채널추정기에서는 결정된 심볼열 벡터를 관측 행렬로 사용하고 있다. 채널의 출력 $y(n)$ 을 나타내는 식에서 $\mathbf{S}^T(n)$ 는 채널로 입력되는 심볼열이고 $\mathbf{v}(n)$ 은 상태변수의 예측오차 분산인데 유선망인 HFC망에서의 채널응답의 시변속도는 상대적으로 작을 것이므로 분산값을 작게 설정하였다. 심볼열이 입력되면 식 (3)에 의해 FIR필터 계수들과 선형결합한 결과를 출력하는데 이 값과 채널을 통해 전달받은 값을 비교하여 계수갱신과정을 수행한다. 채널추정기 성능에 관해 시뮬레이션을 수행하는데 있어 실험할 채널의 기저대역등가모형을 식 (5)에 나타내었다.

$$\mathbf{H}(z) = 0.67 + 0.18z^{-1} - 0.21z^{-2} - 0.02z^{-3} + 0.14z^{-4} - 0.12z^{-5} + 0.01z^{-6} \quad (5)$$

전송 심볼열은 16QAM(Quadrature Amplitude Modulation)의 심볼집합을 사용하였으며 채널왜곡된 수신신호를 얻기 위해 이 심볼열을 식 (5)의 전달함수로 필터링한 후 백색가우시안 잡음을 추가하였다. 채널추정 결과에 대한 파형과 채널의 임펄스응답 추정과정을 Fig.2 와 Fig. 3에 각각 나타내었다.

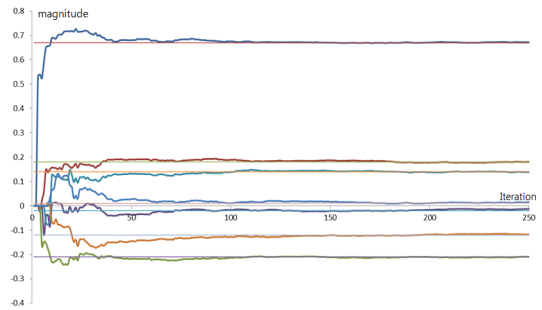


Fig. 2. Received signal and channel estimator output (in the case of noise variance = 0.05)

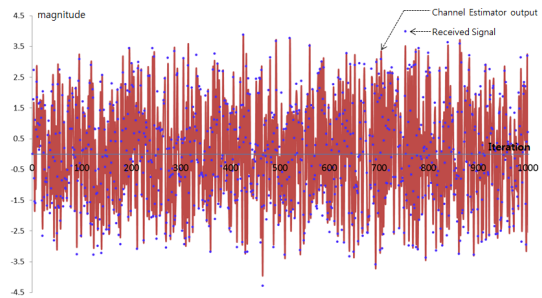


Fig. 3. Estimation result for the channel $H(z)$ of equation (5) using Kalman channel estimator(in the case of noise variance = 0.05)

2.4 오류검출과 교정

Fig. 1에서 볼 수 있듯이 수신심볼열 $r(n)$ 은 등화기로 입력되기도 하지만 일정시간 시지연을 거쳐 채널추정기로도 입력된다. 이와 함께 등화기 출력 심볼열을 이용하여 수신 심볼열 $r(n)$ 을 재구성 하도록 설계하였다. Fig. 1의 블록도에서 각각의 단계에서의 신호 흐름을 구체화하고 오류가 정정되는 과정에 대한 설명을 위하여 다음 그림 Fig. 4에 제안한 알고리즘에 대한 신호처리 블록도를 나타내었다.

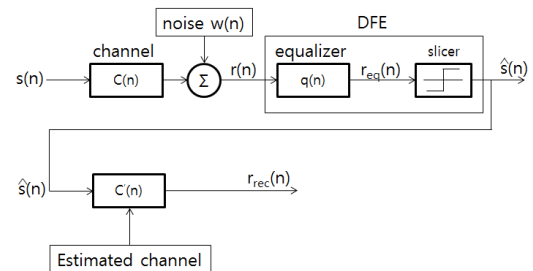


Fig. 4. Signal flow diagram of proposed algorithm

여기서, 각각의 신호에 대한 설명은 다음과 같다.

$s(n)$ 은 소스 심볼열,

$r(n)$ 은 수신기에 도달한 수신신호,

$c(n)$ 은 전송채널 기저대역 등가 임펄스응답,

$w(n)$ 은 채널의 가산성 백색 잡음,

$q(n)$ 은 정상상태 등화기 임펄스응답,

$r_{eq}(n)$ 은 등화기 출력 신호,

$c'(n)$ 은 채널추정기의 임펄스응답,

$v(n)$ 은 채널추정기의 추정오차로 등가 잡음,

$r_{rec}(n)$ 은 채널추정기의 출력,

$\hat{s}(n)$ 은 심볼결정기 출력.

수신신호 $r(n)$ 은 소스심볼열과 채널의 컨볼루션에 잡음을 더한 형태이므로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 이 수신 신호는 등화기에 입력되어 등화 과정을 거치게 되는데 등화 후의 신호를 $r_{eq}(n)$ 라 하면 이 신호는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r(n) = s(n) * c(n) + w(n) \quad (6)$$

$$r_{eq}(n) = \{s(n) * c(n) + w(n)\} * q(n) \quad (7)$$

$$= s(n) * c(n) * q(n) + w(n) * q(n)$$

여기서, $*$ 는 컨볼루션 연산을 의미한다.

만약, 위 식 (7)에서 완벽하게 등화가 이루어졌다면 $c(n) * q(n)$ 항은 일정한 지지면만 가진 임펄스 응답이 되므로 등화기 출력 신호는 정확한 소스 심볼열 $s(n)$ 과 잡음의 합으로 이루어져 있다고 볼 수 있다. 이를 다시 정리하면 식 (8)과 같다.

$$r_{eq}(n) = s(n-d) + w(n) * q(n) \quad (8)$$

여기서, d 는 등화과정에서 발생하는 심볼 단위의 시간 지연이다.

위 식을 통해 완전하게 등화된 수신 신호는 소스심볼을 완전히 보존하고 있음을 알 수 있으며 한편, 등화 후의 심볼열에 추가되는 잡음은 채널에서 유입된 백색잡음과 등화기 전달함수가 선형결합된 형태로 변형된다. 등화기 출력은 심볼 결정기로 입력되어 결정과정을 거치게 되는데 이 때 이 잡음성분에 의해 결정오류를 일으키게

된다. 결정기를 간단히 슬라이스 개념으로 보고 식 (9)와 같이 결정 결과를 분류해 볼 수 있다.

$$\hat{s}(n) = \text{Slice} \{s(n-d) + w'(n)\}, \quad (9)$$

여기서, $w'(n) = w(n) * q(n)$

$$= \begin{cases} s(n) + 2, & \text{오류} \\ s(n) & \\ s(n) - 2, & \text{오류} \end{cases}$$

여기서 QAM 신호의 심볼은 $\{\dots -5, -3, -1, +1, +3, +5, \dots\}$ 의 이산적인 값만을 취하므로 오류가 발생한다면 대부분 가장 인접한 심볼로 오인된다고 가정하였다. 이렇게 얻은 최종적인 심볼들을 다시 채널추정기에 입력시켜 수신신호를 재구성하면 다음과 같은 식(10)을 얻을 수 있다.

$$r_{rec}(n) = \hat{s}(n) * c'(n) \quad (10)$$

$$= \{s(n) + \sum_k \varepsilon_k \delta(n-k)\} * c'(n)$$

$$= s(n) * c'(n) + \sum_k \varepsilon_k c'(n-k),$$

여기서, $\varepsilon_k \in \{-2, 0, 2\}$

여기서, $c'(n)$ 는 추정된 채널의 임펄스응답이며, ε_k 는 결정오류로 ± 1 QAM 레벨 차이인 ± 2 로만 한정하였다. 이는 결정오류의 분포통계를 가우시안으로 가정했기 때문이다. 이제 실제 수신신호와 복원한 수신신호의 차 신호 $d(n)$ 를 구하면 다음과 같은 관계식 식(11)을 얻을 수 있다.

$$d(n) = r(n) - r_{rec}(n) \quad (11)$$

$$= s(n) * \{c(n) - c'(n)\}$$

$$+ w(n) - \sum_k \varepsilon_k c'(n-k)$$

$$\approx w(n) - \sum_k \varepsilon_k c'(n-k)$$

여기서, 채널추정 오차 $c(n) - c'(n) \approx 0$ 을 가정하였다. 칼만 채널추정기가 등화기로부터 오류가 없는 결정 심볼열을 받는다면, 이 심볼열들은 채널추정치 벡터와 컨볼루션되어 등화기로 입력되는 $r(n)$ 중 채널잡음 $w(n)$ 을 제외한 신호왜곡부분을 정확하게 복원할 것이

다. 또한 복원된 신호 $r_{rec}(n)$ 에는 백색잡음 항이 없으므로 차신호 $d(n)$ 은 채널의 가산성 백색잡음 수준이어야 한다. 그러나 만약 채널추정기에 결정오류가 발생한 심볼이 섞여 들어온다면 원래의 백색잡음 분산보다 상당히 큰 잡음레벨을 보이는 샘플이 발견될 확률이 높아질 것이다. 식 (11)에서 알 수 있듯이 이 차이 신호 $d(n)$ 은 그 형태면에서 백색 잡음과 채널추정기의 채널추정치 임펄스 응답이 혼합된 형태를 가지므로 이를 검출하기 위해서 $d(n)$ 과 $c'(n)$ 의 상관도 계산을 매 심볼마다 수행해 준다. Fig. 5에 심볼결정에 오류가 발생했을 때의 차신호 $d(n)$ 의 파형변화를 나타내었다.

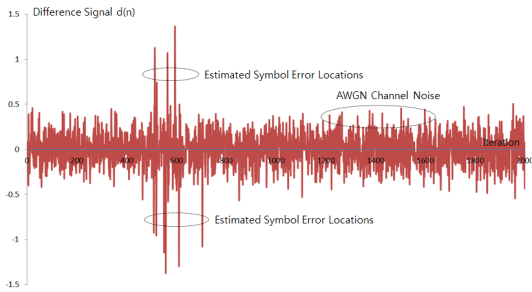


Fig. 5. Waveform of difference signal $d(n)$

심볼결정오류가 발생한 위치에서 발생하는 피크치를 이용하여 위치를 확인하고 상관도를 이용한 오류 판정 방법을 적용하여 오류를 검출한다. 물론 상관도만으로 오류의 발생여부를 판정하는 방법 역시 완전한 보장을 할 수 있는 방식은 아니지만 가장 적절한 방식으로써 활용할 수 있다는 판단을 하고 있다. 오류검출을 위한 판별식을 식 (12)에 나타내었다.

$$R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n) = \alpha(n) \cdot \hat{x}(n) \quad (12)$$

여기서, $\alpha(n)$ 는 칼만 채널추정기의 이노베이션프로세스이고 $\hat{x}(n)$ 는 상태변수벡터이다. 심볼오류 발생을 검출하는 오류판정조건을 다음에 나타내었다.

- 실수축 심볼오류 판정조건 -

$$\begin{aligned} \text{Re}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} * \text{Im}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} &> 0, \\ \text{Re}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} &< 0, \quad \text{음의 심볼오류} \\ \text{Re}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} &> 0, \quad \text{양의 심볼오류} \end{aligned}$$

- 허수축 심볼오류 판정조건 -

$$\begin{aligned} \text{Re}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} * \text{Im}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} &< 0, \\ \text{Im}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} &< 0, \quad \text{음의 심볼오류} \\ \text{Im}\{R_{x_n, \alpha_n}^{\wedge}(n)\} &> 0, \quad \text{양의 심볼오류} \end{aligned}$$

오류판정과정을 통해 심볼오류가 발견된 경우, 일반적으로 심볼결정 오류는 1레벨 만큼 발생하는 확률이 가장 높은 것으로 가정하고 해당 심볼의 QAM레벨을 1레벨 만큼 더해주거나 빼주어서 오류를 교정한다.

3. 등화기 결정오류정정 알고리즘 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션의 조건

본 논문에서 제안한 오류정정 알고리즘 성능을 검증하기 위하여 시뮬레이션에서 사용한 소스 심볼열은 256QAM의 형식에 맞추어 발생시켰으며 전송채널의 저대역 등가모델은 식 (13)과 같다.

$$h(n) = \{0.005 - 0.004i, 0.009 + 0.030i, -0.024 - 0.104i, 0.854 + 0.520i, 0.348 - 0.273i, 0.049 - 0.074i, -0.016 + 0.02i\} \quad (13)$$

시뮬레이션에 사용된 총 심볼의 수는 DOCSIS(Data Over Cable Service Interface Specification) 케이블모뎀의 초당심볼수(5.056941Mps)와 동일하게 5×10^6 개를 사용하였다. 비트수로 환산하면 약 0.4억개 비트에 해당한다. 또한 전방향오류정 적용과 미적용으로 각각의 비트오율을 분석하여 제안한 알고리즘의 효용성에 관한 결론을 도출하였다.

3.2 시뮬레이션 결과

기존 방식대로 결정에환형 등화기를 사용한 후, RS(204,188) t=8 전방향 오류정정 알고리즘을 적용한 최종 심볼오류 결과와 본 논문에서 제시한 알고리즘을 적용하여 얻은 결과를 Table 1에 나타내었다. 등화기단에서 발생한 심볼오류의 개수와 제안한 알고리즘을 적용하여 등화기단의 오류정정을 수행한 후 잔류하는 심볼오류 개수를 비교해보면 약 40% 가량의 개선효과를 얻을

수 있음을 알 수 있다. 심볼오류의 개수를 줄여주는 효과와 더불어 연접한 심볼오류 다발에서 일정량의 오류를 정정함으로써 후단의 전방향오류정정의 효과를 더 높일 수 있는 추가적인 개선효과도 얻을 수 있었다.

Table 1. Performance comparison of the conventional equalization algorithm and the proposed algorithm

SNR (dB)	Resultant Symbol Errors				BER(with FEC)	
	Conventional Equalizer	Proposed Algorithm	Conventional Equalizer with FEC	Proposed Equalizer with FEC	Conventional Equalizer BER	Proposed Equalizer BER
35	0	0	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
34	0	0	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
33	0	0	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
32	0	0	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
31.8	1	0	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
32.6	8	4	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
32.4	31	18	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
32.2	85	44	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
31.0	209	119	0	0	1.00.E-10	1.00.E-10
31.8	468	299	0	0	1.00.E-09	1.00.E-10
31.6	1116	769	0	0	1.00.E-08	1.00.E-10
31.4	2199	1504	11	0	8.35.E-08	1.00.E-10
31.2	4169	2943	10	0	2.59.E-07	1.00.E-10
30.0	7986	5745	10	0	7.59.E-07	1.00.E-10
29.8	13796	10273	32	0	2.43.E-06	1.00.E-10
29.6	23494	17829	289	9	2.19.E-05	6.83.E-07
29.4	39164	30023	1197	57	9.09.E-05	4.33.E-06
29.2	62111	47823	5122	749	3.89.E-04	5.69.E-05
29.0	96174	74043	18746	4303	1.42.E-03	3.27.E-04

본 논문에서 적용한 전방향 오류정정 부호화기는 RS(204,188)로서 204개의 심볼 다발을 한 블록으로 하며, 한 블록 내부에서 발생한 심볼오류를 8개 까지 정정할 수 있다. 신호대 잡음비 30dB에서 기존 등화기는 7986개의 심볼오류가 발생하였는데 이는 약 600개 정도의 심볼마다 한 번 꼴로 심볼오류가 발생했음을 의미한다. 만약 모든 오류심볼들이 이렇게 균일하고 넓게 퍼져 있으면 이론적으로는 모두 정정이 가능하지만 결정제한형 등화기의 특성상 한 번 결정오류가 발생했을 때 다음 심볼결정에도 영향을 미치는 구조이기 때문에 구간에 따라 오류가 연접할 개연성이 있게 된다.

특히, 이러한 경우에 연접된 오류중 일부를 정정해 줌으로써 상당한 개선효과를 얻을 수 있게 된다.

Table 1에서 신호대잡음비 30dB에서의 기존 등화기 심볼오류는 총 7986개 인데, 제안한 알고리즘을 적용하면 5745개로 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이어, 전방향 오류정정까지 수행할 경우 기존 등화기에는 아직 10개의

오류가 잔존하는 반면 제안한 알고리즘은 잔류수가 0개 임을 관찰할 수 있는데 이는 비슷한 수량의 오류가 발생하더라도 제안한 알고리즘이 오류 연접성을 완화시켜 오류정정에 바람직한 영향을 주고 있음을 시사한다고 볼 수 있다.

본 논문에서는 심볼 한 개의 오류가 평균 3개 비트의 오류를 발생시키는 것으로 가정하고 시뮬레이션 결과를 분석하였고 Fig 6에 신호대잡음비에 따른 비트오율 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

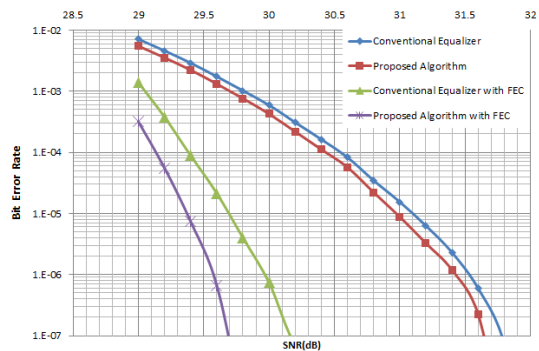


Fig. 6. BER improvement according to proposed algorithm adoption

비트오율을 기준으로 분석해보면 기존의 방식과 제안한 방식이 오류가 전혀 없는 상태에 도달했을 때의 신호대잡음비의 차이는 약 1dB정도인 것으로 나타났다. 이 결과는 데이터 전송에 오류를 일으키지 않고 수신할 수 있게 하는 채널의 전송품질에 대한 제약을 최고 1dB가량 완화 시킨 결과로서 채널의 전송품질이 신호대 잡음비 30dB의 잡음상황이라면, 기존의 등화기는 약 7.6E-7 정도의 비트오류를 일으키지만 제안한 알고리즘을 적용한 등화기는 비트오류가 전혀 없는 결과를 가져옴을 관찰할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 채널왜곡과 가산성 백색 가우시안 잡음이 혼합된 디지털 전송채널에서 직접적인 심볼오류정정이 가능한 등화기 알고리즘을 제안 하였다. 기존의 등화기 연구에서는 채널왜곡에 의해 발생된 심볼간 간섭현상을 제거할 목적으로 수신단의 디지털 필터 계수를 최

적화하는 기법, 초기 수렴속도를 높이기 위한 등화기법, 수렴속도와 정상상태 오차를 모두 향상시킬 수 있는 이중모드 등화기법 등 등화기 출력신호의 품질을 향상시키는 형태로 많은 연구가 이루어져 온 반면 본 논문에서는 기존의 등화기법을 수용하면서 직접 심볼오류를 정정할 수 있는 등화 알고리즘을 제안 하였다. 시뮬레이션에서는 일반 상용 케이블모뎀의 전송방식인 256QAM 시스템을 채택하였고 상용 전송속도인 약 5MSPS로 1초간 받아들이 수 있는 데이터량인 5백만개의 심볼열을 사용하여 알고리즘의 성능을 시험하였으며 시뮬레이션 결과 제안한 등화기는 주어진 동일한 조건에서 기존의 등화기보다 약 1 dB 가량의 신호대잡음비 이득을 얻을 수 있었다.

References

- [1] Godard, D. N., "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems," IEEE Trans. on Communications, vol. 28, no. 11, pp. 1867-1875, 1980.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOM.1980.1094608>
- [2] B. Jellonek, D. Boss, K. D. Kammeyer, "Generalized eigen vector algorithm for blind equalization" EURASIP Signal Processing, pp. 237-264, 1997.
- [3] O Shalvi, E Weinstein, "New criteria for blind deconvolution of nonminimum phase systems (channels)," IEEE Transactions Information Theory, vol. 36, no. 2, pp. 312-321, 1990.
DOI: <https://doi.org/10.1109/18.52478>
- [4] Nandi, A.K., Anfinsen, S. N., "Blind equalization with recursive filter structures," Elsevier, signal Processing, vol. 80, no.10, pp. 2151-2167, 2000.
- [5] L. Tong, D. Liu, "Blind predictive decision-feedback equalization via the constant modulus algorithm" Proceedings of the ICASSP'97, Munich, Germany, pp. 3901-3904, Apr. 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1997.604755>
- [6] K. Itoh, T. Shimamura, H. Yashima, J. Suzuki, "IIR Adaptive Equalizer Using Channel Estimator," Proc. Singapore Int. Conf. Communication Systems/Int. Symp. Information Theory and Its Applications, pp. 755-759, 1992.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCS.1992.255162>
- [7] Mi-Kyung Oh, Yeong-Hyeon Kwon, Dong-Jo Park, "Novel Blind Adaptive Equalization over Doubly-Selective Fading Channels," IEICE Transactions vol. 89-B, no. 12, pp. 3463-3466, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1093/ietcom/e89-b.12.3463>
- [8] Ibrahim Shaahin Varnosfaderani, Mohamad Faarzan Sabahi, Mohammad Ataei, "Joint blind equalization and detection in chaotic communication systems using simulation-based methods," AEU-International Journal of Electronics and Communications, Vol. 69, Issue 10, pp. 1445-1452, 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aecue.2015.06.013>
- [9] Zhili Zhou, Yiji Zahn, Xiukai Ruan, Qibo Cai, Guihua Cui, Guijun Zhu, "A double-DD blind equalizer for Polmux QAM optical coherent systems," Optic Communications, vol. 382, pp. 342-347, 2017.
- [10] Ali W. Azim, Shafayat Abrar, Azzedine Zerguine, Asoke K. Nandi, "Performance analysis of a family of adaptive blind equalization algorithms for square-QAM," Digital Signal Processing Vol. 48, pp.163-177, 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dsp.2015.09.002>
- [11] Rajan Narasimha, Nirmal Warke, Naresh R. Shanbhag, "Impact of DFE Error Propagation on FEC-Based High-Speed I/O Links," GLOBECOM 2009.
- [12] J. Ashley, B. M. M. Blaum, and C. Melas, "Performance and error propagation of two DFE channels," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 33, no. 5, pp. 2773-2775, 1997.
DOI: <https://doi.org/10.1109/20.617726>
- [13] S.A. Sheikh and P. Fan, "Improved square contour algorithm for blind equalization of QAM signals," in Proc. INMIC, December 2006, pp. 116-119, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1109/INMIC.2006.358147>
- [14] X. Li and T. F. Wong, "Turbo equalization with nonlinear Kalman filtering for time-varying frequency-selective fading channels," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 6, pp. 691-700, 2007.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2007.05352>
- [15] M. Kumar, K. Yurtseven and A. Rahrooh, "Design and performance analysis of an adaptive FIR Kalman equalizer," Journal of the Franklm Institute, vol. 330, pp. 929-938, 1993.

김 선 응(Seon-Woong Kim)

[정회원]



- 1995년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 (전자공학석사)
- 2012년 2월 : 서울시립대학교 전자공학과 (전자공학박사)
- 1995년 3월 ~ 2001년 2월 : 전자 부품연구원 선임연구원
- 2001년 2월 ~ 2014년 1월 : 벤처 기업 및 KT그룹사 연구원
- 2014년 2월 ~ 현재 : 한국폴리텍대학교 스마트전자과 교수

<관심분야>

신호처리, 디지털통신, 오류제어