

블라인드 등화 알고리즘의 초기 수렴 자동 검출 기법

Initial Convergence Detection of Blind Equalization Algorithm Automatically

최익현*, 김철민**, 최수철***, 오길남****

Ik Hyun Choi*, Chul Min Kim**, Soo Chul Choi***, Kil Nam Oh****

Abstract - MCMA(modified constant modulus algorithm) accomplishes blind equalization and carrier phase recovery simultaneously. But, the error level of MCMA is not zero when the equalizer converges completely. Because the MCMA uses a special signal point instead of a original signal point. MCMA-DD(decision-directed) improves the steady-state performance but the performance of equalizer is decided by switching time between the MCMA and the DD. In this paper, according to the residual ISI(intersymbol interference) of the equalizer output, the most suitable switching time is decided automatically.

Key Words : blind equalization, dual-mode algorithm, automatic convergence detection

1. 서론

블라인드 등화(blind equalization)는 전송 채널의 임펄스 응답을 알지 못할 때 소스의 통계적 특성과 채널의 출력만을 이용하여 채널에 의해 왜곡된 신호 소스를 복원하기 위해 적용된다[1]. MCMA(modified constant modulus algorithm)[2]는 등화기 출력의 실수 및 허수 성분으로 구분하여 위상정보를 포함하게 되므로 등화기 출력이 원 송신 데이터의 각 심벌 주위에 군집들을 형성하고, 등화가 진행되면서 이 군집들을 심벌 주위의 보다 작은 구간으로 모이게 함을 의미한다. 결국 MCMA는 등화와 함께 위상을 복원하여 위상 회전이 복원된 신호점에 수렴하게 한다. 그러나 MCMA의 비용 함수는 원래의 데이터 심벌점 대신 새로운 신호점을 사용하기 때문에 수렴 후 정상상태에서 평균 제곱 오차(mean squared error: MSE)가 시스템 성능에 요구되는 만큼 충분히 작아지지 않는다.

MCMA의 정상상태 성능을 개선하기 위해, MCMA가 일단 수렴한 이후에는 판정의거(decision directed: DD) 알고리즘에 의해 등화기를 수렴시킴으로써 정상상태에서의 MSE를 줄이는 방법이 흔히 사용된다[3]. 그러나 이와 같은 MCMA-DD 방법에서는 MCMA에서 DD로 전환하는 시점을 정하는 것이 성능을 좌우하는 민감한 요소로 작용한다. 즉 MCMA가 수렴한 후의 잔류 심벌간 간섭이 충분히 낮은 레벨을 가질 때에 DD로 전환하는 것이 요구되며, 그렇지 않을 경우 DD 알고리즘은 등화기의 발산을 초래한다.

본 논문에서는 블라인드 등화 알고리즘의 초기 수렴 특성

을 충분히 활용하면서, 동시에 정상상태에서의 오차 성능을 개선하기 위해, 초기 수렴을 자동으로 검출하는 기법을 제안한다. 2.에서는 MCMA와 MCMA-DD 알고리즘의 개념과 문제점을 소개하고, 3.에서는 제안 알고리즘 및 실험 결과를 기술하며, 4.에서 결론을 요약한다.

2. MCMA, MCMA-DD 알고리즘

2.1 MCMA

MCMA는 위상 복원과 채널 등화를 동시에 달성하기 위해 CMA에서 사용된 비용함수를 등화기 출력의 실수(동상)성분과 허수(직교)성분에 대한 비용 함수의 형태로 변형하여 다음과 같이 정의한다.

$$J(k) = J_R(k) + J_I(k) \quad (1)$$

여기에서 $J_R(k)$ 및 $J_I(k)$ 는 각각 등화기 출력 $y(k) = y_R(k) + jy_I(k)$ 의 실수 및 허수 성분에 대한 비용 함수이며, CMA의 비용함수와 유사한 형태로서 아래와 같이 정의된다.

$$J_R(k) = E[(|y_R(k)|^p - R_{p,R})^2] \quad (2)$$

$$J_I(k) = E[(|y_I(k)|^p - R_{p,I})^2] \quad (3)$$

여기서 p 는 2이고, $R_{p,R}$ 과 $R_{p,I}$ 는 채널 입력 데이터 $a(k) = a_R(k) + ja_I(k)$ 의 실수 및 허수 성분을 서로 독립인 i. i. d(independent identically distribution) 열로 가정하면, $a(k)$ 의 실수 및 허수 성분에 대해 각각 다음과 같이 정의되는 실 상수이다.

$$R_{p,R} = \frac{E[|a_R(k)|^{2p}]}{E[|a_R(k)|^p]} \quad (4)$$

*光州大學校 電子工學科 碩士課程

**光州大學校 情報通信學科 碩士課程

***光州大學校 電子工學科 教授

****光州大學校 情報通信學科 教授

$$R_{p,I} = \frac{E[|a_I(k)|^{2p}]}{E[|a_I(k)|^p]} \quad (5)$$

등화기를 최적화하기 위한 기법으로 CMA 에서와 마찬가지로 LMS 알고리즘을 적용하여 $w(k)$ 에 대해 비용함수를 최소로 하도록 하면, 탭 계수 갱신 식은

$$\begin{aligned} w(k+1) &= w(k) - \mu \cdot \hat{\nabla} J(k) \\ &= w(k) - \mu \cdot e(k) \cdot X^*(k) \end{aligned} \quad (6)$$

가 되며, 여기서 오차 신호 $e(k) = e_R(k) + je_I(k)$ 는 다음으로 주어진다.

$$e_R(k) = y_R(k)|y_R(k)|^{p-2}(|y_R(k)|^p - R_{p,R}) \quad (7)$$

$$e_I(k) = y_I(k)|y_I(k)|^{p-2}(|y_I(k)|^p - R_{p,I}) \quad (8)$$

이와 같이 MCMA의 비용 함수는 원래의 데이터 심벌점 대신 새로운 신호점을 사용하여 오차 신호를 발생시킨 비용 함수(cost function)가 통계적으로 최소가 되는 관점에서 등화기를 수렴시킨다. 그 결과 MCMA는 수렴 후 정상상태에서 평균 제곱 오차(mean squared error: MSE)가 시스템 성능에 요구되는 만큼 충분히 작아지지 않는다.

2.1 MCMA-DD

MCMA의 정상상태 성능을 개선하기 위해, MCMA가 일단 수렴한 이후에는 판정의거(decision directed: DD) 알고리즘에 의해 등화기를 수렴시킴으로써 정상상태에서의 MSE를 줄이는 방법이 제안 되었다.

판정의거 알고리즘은 등화기 출력의 눈 모형이 완전히 닫힌 등화 초기에 적용하는 경우 수렴을 보장하지 못하지만, 눈 모형이 열린 상태에서 적용 시에는 출력 오차가 최소평균자승오차(MMSE)에 수렴할 수 있다. 따라서 판정 의거 알고리즘을 사용하기 위해서는 먼저 등화 초기에 MCMA 알고리즘을 적용하여 눈 모형을 어느 정도 열린 이후에는 등화기가 판정의거 모드에서 동작함으로써 출력 오차를 줄이고 정상상태 특성을 개선할 수 있다.

MCMA-DD 알고리즘의 오차신호는 다음과 같다.

$$e_R(k) = \begin{cases} y_R(k) - \text{dec}(y_R(k)) & \text{if } y_R(k) \in C_R \\ y_R(k)(y_R^2(k) - R_{p,R}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

$$e_I(k) = \begin{cases} y_I(k) - \text{dec}(y_I(k)) & \text{if } y_I(k) \in C_I \\ y_I(k)(y_I^2(k) - R_{p,I}) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

위 오차 신호에서 C_R 과 C_I 는 등화기 출력의 신뢰 구간을 표시한다.

이와 같은 이중모드 알고리즘은 등화기 출력이 신뢰구간 내에 있는 경우 또는 등화기 출력이 송신된 데이터 심벌점에 해당하는 점에서는 오차 신호가 0이 되도록 추정 값을 발생 시킴으로써 보다 빠른 수렴 속도와 보다 적은 심벌간 간섭 혹은 정상 상태에서의 최소평균자승오차(MMSE)에 달성할 수 있지만 신뢰구간을 매우 작게 선택하면 이중모드 알고리즘은 MCMA 만으로 되며, 반대로 매우 크게 하면 판정의거 알고리즘만으로 등화가 이루어져 등화기의 발산을 초래한다.

다음 장에서 블라인드 등화 알고리즘의 초기 수렴 특성을

충분히 활용하면서, 동시에 정상상태에서의 오차 성능을 개선하기 위한, 초기 수렴을 자동으로 검출하는 기법을 제안한다.

3. 제안 알고리즘 및 실험결과

3.1 MCMA

제안 방법은 초기 수렴 검출을 위해 등화기 출력 단에서 잔류 심벌간 간섭(ISI)

$$isi(k) = \frac{\sum_{k=1}^n |s(k)|^2 - |s(k)|_{\max}^2}{|s(k)|_{\max}^2} \quad (11)$$

양을 이용한다. 여기에서 $s(k) = h(k) * w(k)$ 는 전체시스템 임펄스 응답으로서, 채널 임펄스 응답 $h(k)$ 와 등화기 임펄스 응답 $w(k)$ 의 convolution이고, $|s(k)|_{\max}$ 는 $s(k)$ 중 최대 절대 값을 갖는 성분이다. 잔류 심벌간 간섭 양을 보고 감소하면 변수dec(decrease)을 1씩 증가시키고 잔류 심벌간 간섭(ISI) 양이 증가하면 변수inc(increase)를 1씩 증가시킨다. 이때 잔류 심벌간 간섭(ISI) 값의 급격한 변동을 완화시키기 위해 L 심벌 길이의 블록 단위로 ISI의 변화(dec-inc)량을 계산한다. 첫 번째 L 심벌 길이의 블록 단위의 변화량과 그 다음 번째 L 심벌 길이의 블록 단위의 변화량을 비교 수렴검출 여부를 판단하여 두 모드 전환을 자동으로 결정한다. 여기에서 L 심벌 길이를 결정하는 것이 대단히 중요한 문제이다. 이러한 부분도 등화기 출력의 잔류 심벌간 간섭(ISI)양을 이용해서 다음과 같이 L 구간을 증·감시킨다.

$$\begin{cases} L = L/\eta & (\text{dec} - \text{inc}) \leq \beta \\ L = L \times \eta & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

여기에서 β 값은 0보다 큰 정수이며, 경험적으로 정해진다. η 는 $0 < \eta \leq 2$ 값을 갖는다. 그림 1. 는 제안 알고리즘의 블록 다이어그램이다.

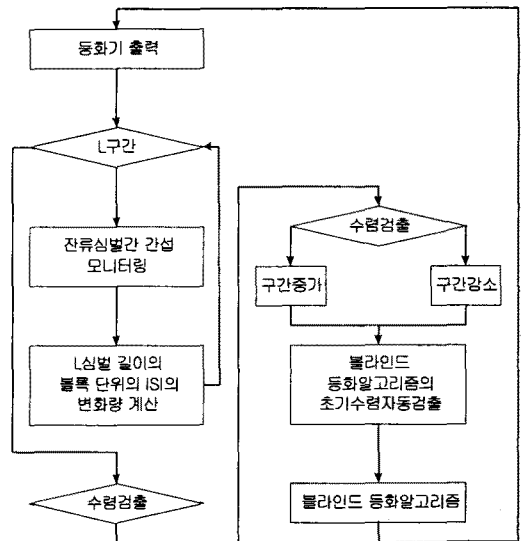


그림 1. 제안 알고리즘의 블록 다이어그램

제안한 기법은 블라인드 등화 알고리즘의 수렴 검출에 적용되며, 두 가지 또는 그 이상의 동작 모드를 갖는 등화기에서 동작 모드의 전환을 위한 최적 시점을 결정하는 데에 적용 가능하다.

3.2 실험결과

제안한 알고리즘의 성능을 모의실험을 통하여 MCMA와 MCMA-DD을 비교하였다. 성능 비교 기준으로는 등화된 신호에 잔류하는 심벌간 간섭 양을 사용하였다. 시험에 사용한 채널은 6-탭 지연 라인 모델[4]로 하였으며, 채널 조건에서 등화기 탭 수 23을 적용하였다. 그림 2., 그림 3. 및 그림 4.는 각각 16-QAM, 64-QAM 및 256-QAM 신호에 대한 등화기의 학습 곡선으로, 등화기의 수렴 특성과 정상상태 성능을 나타낸다. 그림에 나타낸 학습 곡선은 100회의 독립적인 수행으로부터 구한 잔류 ISI를 앙상블 평균한 것이다.

먼저, 그림 2.는 16-QAM 신호에 대해 신호 대 잡음비 $E_b/N_0 = 15\text{dB}$ 조건에서 얻어진 학습 곡선이다.

그림 3.은 64-QAM 신호에 대한 실험결과를 나타낸다. 신호 대 잡음비 $E_b/N_0 = 30\text{dB}$ 조건으로 적용하였다.

그림 4.는 256-QAM 신호에 대한 실험 결과를 나타낸다. 신호 대 잡음비 $E_b/N_0 = 30\text{dB}$ 조건으로 적용하였다.

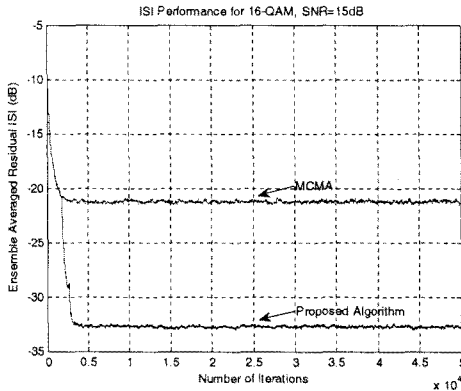


그림 2. 16-QAM에 대한 잔류 심벌간 간섭 비교

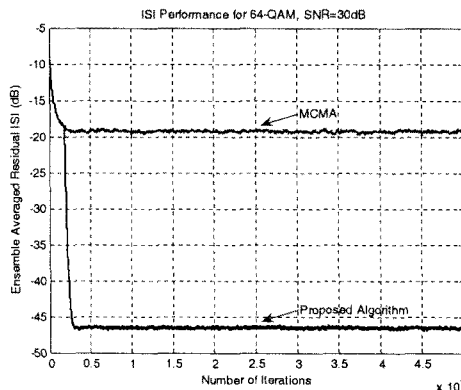


그림 3. 64-QAM에 대한 잔류 심벌간 간섭 비교

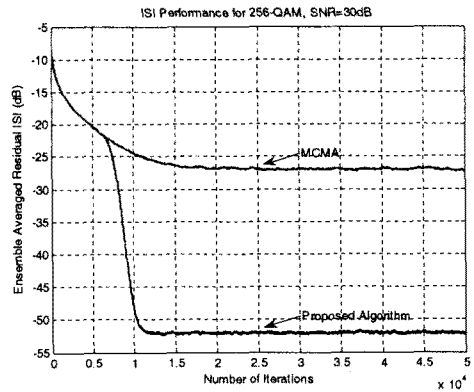


그림 4. 256-QAM에 대한 잔류 심벌간 간섭 비교

4. 장 결론

제안한 기법은 블라인드 등화 알고리즘의 수렴 검출에 적용되며, 두 가지 또는 그 이상의 동작 모드를 갖는 등화기에서 동작 모드의 전환을 위한 최적 시점을 결정하는 데에 적용 가능하다.

참 고 문 헌

- [1] Simone Fiori, Blind deconvolution by simple adaptive activation function neuron, *Neurocomputing*, vol. 48, pp. 763-778, 2002
- [2] K. N. Oh and Y.O. chin, "Modified Constant Modulus Algorithm: Blind Equalization and Carrier Phase Recovery Algorithm," in Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Commun., Seattle, WA, June 1995, vol. 1, pp. 498-502
- [3] O. Macchi and E. Eweda, "Competitive Adaptation: Neural Network Learning Algorithms Based on Fitting Statistical Mixtures," Ph.D. Dissertation, School of Comput. Sci., Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, PA., Apr. 1991
- [4] G. Picchi and G. Prati, "Blind equalization and carrier recovery using a "Stop-and-Go" decision-directed algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-35, no. 9, Sep. 1987, pp. 877-887