DBpia

論文 95-8-8-22

고차 QAM 신호의 블라인드 등화를 위한 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘

正會員 吳 吉 男*, 陳 庸 玉**

A Simplified Soft Decision-Directed Algorithm with Dual-Variance for Blind Equalization of High-Order QAM Signals

Kil Nam Oh*, Yong Ohk Chin** Regular Members

要 約

블라인드 등화에서 채널 왜곡이 심한 경우 연판정이 경판정에 비해 신뢰성이 좋은 것으로 알려져 있다. 그러나 연판정의거 알고리즘을 고차 QAM 신호에 적용시 계산량이 매우 증가할 뿐만 아니라 수렴 속도가 저하한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 먼저 축소 신호점을 적용하여 계산 복잡성을 단순화한 연판정의거 알고리즘을 유도하고, 이를 이용하여 경판정 또는 연판정을 수행함으로써 수렴 속도와 정상 상태에서의 오차 레벨을 개선한, 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 연판정에 사용된 시그모이드 함수의 평균과 분산을 이중으로 설정함으로써 간단히 구현되며, 등화기 출력의 오차 레벨에 따른 분산값에 의해 경판정 또는 연판정을 수행한다. 시뮬레이션 결과에 의하면 제안한 알고리즘은 16, 64 및 256-QAM 에 적용시 효과적인 것으로 평가할 수 있다.

ABSTRACT

For blind equalization of severely distorted signal soft decisions are more reliable than hard decisions. However, the computational complexity is increased significantly and the speed of convergence also slows down when the soft decision-directed (DD) algorithm is extended to high-order QAM signals. In this paper, in order to solve these problems we design a simplified soft DD algorithm adopting the reduced constellation, and then propose a simplified soft DD algorithm with dual-variance, which leads to performance enhancement of convergence speed and error level in steady-state by performing soft or hard decisions using the simplified algorithm. The proposed algorithm is simply implemented by using dual values of mean and variance of the sigmoid function used in soft decisions, and performs soft or hard decisions according to the variance for error level of the equalizer output. Simulation results confirm the effectiveness of the proposed algorithm on 16, 64 and 256-QAM signals.

*韓國電子通信研究所
Electronics and Telecommunications Research Institute
**慶熙大學校 電子工學科
Dept. of Electronic Engineering, Kyung Hee University
論文番號 : 95185-0520
接受日字 : 1995年 5月 20日

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

심볼간 간섭 (intersymbol interference: ISI)은 다중경로 전파 또는 대역제한된 채널에 의해 발생되며, 디지탈 통신의 성능을 저하시키는 주된 요인이 되고 있다. 심볼간 간섭의 영향을 줄이는 방법으로 적응 채널 등화 기법을 사용하며, 데이타 의존 (data-aided) 등화 기법과 블라인드 (blind) 등화 기법이 있다. 데이타 의존 등화 기법에서는 학습 열 (training sequence)을 이용하여 초기 수렴을 달성한 후, 경판정의거 모드로 전환하여 데이타 수신을 개시한다. 경판정의거 알고리즘에서는 단순한 threshold 판정 회로를 거쳐 입력 심볼에 대한 추정을 발생시키며, 이 추정을 학습 열 대신 사용하여 오차 신호를 형성한다. 블라인드 등화 기법은 학습 열에 의존하지 않고도 송신 신호의 통계적 특성과 수신 신호만을 이용하여 통신 링크의 접속시 또는 갑작스런 중단 후의 재개 시에 초기 수렴을 달성하도록 고안되었다. 이는 주로 학습 열을 사용하는 것이 불가능하거나 비현실적인 상황에서 초기 수렴을 위해 사용되며, 블라인드 등화 알고리즘에 의한 초기 수렴 이후에는 경판정의거 모드로 전환한다.

펄스 진폭 변조 (PAM) 신호를 등화하기 위한 블라인드 알고리즘이 Sato[1]에 의해 처음으로 소개되자, 이를 QAM 신호로 확장한 축소 신호점 알고리즘 (reduced constellation algorithm: RCA)[2],[3]이 제안되었다. 이 두 알고리즘에서는 축소 신호점을 정의하고, 등화기 출력에 가장 근접한 축소 신호점과 등화기 출력과의 차이를 이용하여 추정 오차를 발생시킨다. Picchi 와 Prati[4]는 판정의거 알고리즘에 의해 계산한 추정 오차와 Sato 알고리즘에 의한 추정 오차의 두 부호가 일치하는가를 조사하여 탭 계수 갱신 여부를 결정하는 "Stop-and-Go" 판정의거 알고리즘을 제시하였다. 이상 언급한 알고리즘에서는 등화기 출력으로부터 송신된 심볼을 추정하는 데 있어서 threshold 비선형성에 기초한 경판정을 수행하고 있으나, 경판정은 등화기 출력의 눈 모형이 심하게 닫혀 있는 상황에서는 부정확한 판정으로 되기 쉽다[5].

Godard[6]는 등화와 반송파 복원을 분리해서 수행하는 스킴을 고안하였으며, Godard 알고리즘의 특별한 경우가 Treichler 등[7]에 의해 일정 진폭 신호를 등화하기 위한 알고리즘 (constant modulus algorithm: CMA) 으로 개발되었다. CMA 는 신호점을 등가 constant modulus 로 간주하고 등화기 출력과 가장 근접한, 등가 constant modulus 상의 한 점과 등화기 출력과의 차이를 이용하여 추정 오차를 발생시키며, 특별한 형태의 비선형성을 이용하여 송신된 심볼을 추정한다. 아울러 CMA 의 코스트 함수가 위상 성분도 포함하도록 간단히 변형하여 등화와 함께 위상 복원이 가능한, 변형된 CMA[8]등 보다 효과적인 블라인드 등화 알고리즘도 발표되었다.

또한 연판정을 이용한 블라인드 등화 알고리즘[5],[9]이 제안된 바 있으며, 이 부류의 알고리즘은 연판정의거 (soft decision-directed) 또는 가우시안 군집화 (gaussian clustering) 알고리즘으로 언급되어 있다. Chen 등[10]이 이를 고차 신호로 확장하기 위해 블라인드 다단계 군집화 (multi-stage clustering) 알고리즘을 고안하였다. 연판정 기법은 경판정 기법에 비해 블라인드 수렴 특성이 우수한 것으로 알려져 있다. 그러나 연판정의거 알고리즘을 고차 QAM 신호에 적용시 데이타 심볼 레벨이 증가함에 따라 알고리즘이 상당히 복잡해질 뿐만 아니라, 일반적으로 수렴속도가 늦어진다[10].

본 논문에서는 등화 초기에는 연판정과 경판정을 병용하고 정상 상태에서는 주로 경판정을 이용하며, 계산 복잡성이 극히 단순화되어 고차 QAM 신호를 블라인드 등화하는데 효과적인, 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘을 제안하고자 한다. Ⅱ 장에서 연판정의거 알고리즘에 대해 기술한 후, Ⅲ 장에서는 제안하고자 하는, 이중분산을 사용한 단순화된 연판정의거 알고리즘을 유도한다. Ⅳ 장에서는 다중경로 채널에서 고차 QAM 신호를 대상으로 하여 제안한 알고리즘의 성능 개선을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 보이고, 마지막으로 Ⅴ 장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 연판정의거 알고리즘

블라인드 채널 등화 시스템과 전송 채널을 각각 그림 1(a) 및 1(b) 와 같이 나타내면, 수신 신호 $x(k)$는 다음으로 주어진다.

$$x(k)=\sum_{i=0}^{L-1}h(i)a(k-i)+n(k) \tag{1}$$

여기서 $a(k)$는 독립 일양 분포 (independent,

www.dbpia.co.kr

identically distributed: i.i.d.) 의 입력 데이타 심볼, $h(i)$는 송신기 필터와 다중경로 채널 및 수신기 필터를 포함하는 임펄스 응답, $n(k)$는 평균이 0 인 화이트 가우시안 부가잡음 (AWGN)으로 가정한다. L은 전송 채널의 임펄스 응답 길이를 나타낸다.

등화기의 임펄스 응답을 $\boldsymbol{W}(k)$라 하면 등화기의 출력 $y(k)$는

$$y(k) = \boldsymbol{X}^T(k)\,\boldsymbol{W}(k) \tag{2}$$

가 된다. $\boldsymbol{W}(k)=[w_0(k), w_1(k), \cdots, w_{N-1}(k)]^T$는 등화기의 탭 계수 벡터, $\boldsymbol{X}(k)=[x(k), x(k-1), \cdots, x(k-N+1)]^T$는 등화기의 입력 데이타 벡터이며, N은 등화기의 탭 길이, 윗첨자 T는 벡터의 전치를 나타낸다. 탭 갱신 과정으로 stochastic gradient descent (SGD) 알고리즘을 적용하면 탭 갱신 식은 다음과 같다[11].

$$\begin{aligned}\boldsymbol{W}(k+1) &= \boldsymbol{W}(k)-\mu\cdot\hat{\nabla}J(k)\\ &= \boldsymbol{W}(k)-\mu\cdot e(k)\cdot\boldsymbol{X}^*(k)\end{aligned} \tag{3}$$

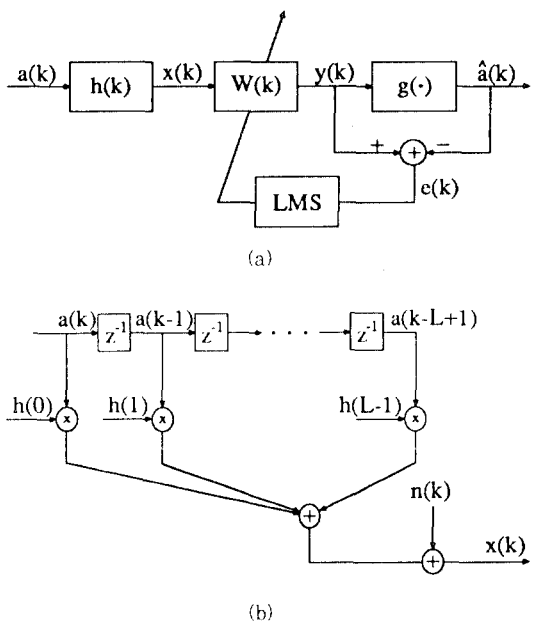

그림 1. (a) 블라인드 채널 등화 시스템의 기저대역 모델, (b) 전송 채널의 등가 이산시간 모델.
Fig. 1. (a) Baseband model of blind channel equalization system, (b) Equivalent discrete-time model of transmission channel.

위 식에서 μ는 스텝 사이즈 파라메타, $J(k)$는 코스트 함수, 그리고 $e(k)$는 오차 신호이다.

오차 신호 $e(k)$는 경판정의거 알고리즘에서는 단순한 threshold 비선형 함수로 선택된다. 2-PAM 의 경우에서 두 심볼을 $\pm a$라 할 때 threshold 비선형 함수의 출력 $g(\cdot)$는 그림 2 와 같다. 이와 같은 경판정에서는 등화기 출력이 두 심볼 값의 경계 근방에 있는 경우에 등화기 출력의 부호에 기초한 판정은 부정확할 가능성이 크다. 그러나 경판정에서는 이와 같이 모호한 상황에서 등화기의 탭 계수를 가장 많이 갱신하게 된다. 따라서 경판정의거 알고리즘은 눈 모형이 닫힌 상태에서는 수렴을 보장하지 못하는 것으로 알려져 있다[12].

한편 등화기가 채널의 이상적인 인버스 필터 (inverse filter)에 근사되었다고 가정하면, 등화기의 출력을 다음과 같이 지연된 입력 심볼 열 $a(k-d)$와 잔류 심볼간 간섭 $v(k)$로 나타낼 수 있다[11].

$$y(k) = a(k-d)+v(k) \tag{4}$$

심볼간 간섭에는 현재의 입력 심볼뿐만 아니라 이전 심볼들에 의한, 랜덤한 수의 심볼간 간섭 영향이 포함된다. 즉, 등화기 출력은 랜덤한 수의 다중경로 신호들이 수신기에서 모두 합해진 것이므로 다중경로 신호의 수가 많으면 중심 극한 정리 (central limit theorem: CLT)에 의해 등화기 출력을 가우시안 분포로 가정할

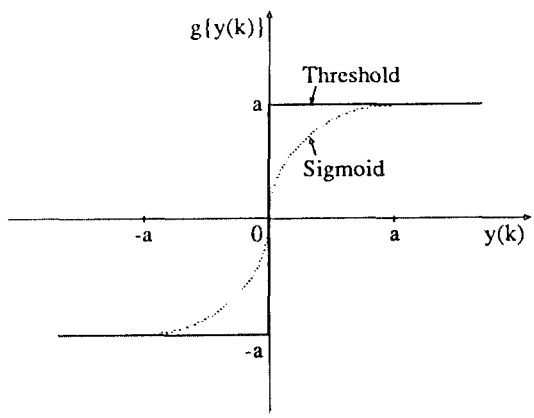

그림 2. Threshold 및 시그모이드 비선형 함수의 출력 $g(\cdot)$.
Fig. 2. Outputs of threshold and sigmoid nonlinearities, $g(\cdot)$.

www.dbpia.co.kr

수 있다[11]. 이것은 등화기 출력이 송신된 심볼에 해당하는 한 점으로 되는 대신 심볼 주위에 군집 (cluster)을 형성하며, 이 군집을 각 데이타 심볼 점에 해당하는 평균과 채널에 의한 왜곡의 정도를 나타내는 분산을 갖는 가우시안 군집으로 모델링할 수 있음을 뜻한다. CLT 를 만족하는 다중경로 신호의 수는 대개 6 이상이면 충분한 것으로 알려져 있다[13].

M-ary QAM 시스템을 가정하면 M개의 심볼을 갖는 가우시안 mixture 에서 $y(k)$에 대한 확률 밀도 함수 (probability density function: p.d.f.)는 다음과 같이 주어진다.

$$f(y(k))=\sum_{i=1}^{M}\frac{p_i}{2\pi\sigma_i^2}\exp\left(-\frac{|y(k)-s_i|^2}{2\sigma_i^2}\right) \quad (5)$$

여기서 s_i 및 σ_i^2는 각각 i번째 심볼에 대한 평균과 분산이며, p_i는 i번째 심볼의 발생 확률로서 i.i.d. 소스에서는 모든 심볼이 균등한 비율로 발생된다고 가정할 수 있다.

이 확률 밀도 함수를 코스트 함수 $J(k)=-E[f(y(k))]$로 정의하면 코스트 함수를 최소로 하는 것은 p.d.f. 를 최대로 하는 것에 해당하며, 이것은 다시 가우시안 분포의 mixture 로 부터 등화기 출력 $y(k)$가 발생될 likelihood 를 최대로 하는 것에 해당한다. 여기서 $E[\cdot]$는 통계적 기대치를 나타낸다. 식 (3)의 SGD 알고리즘으로부터 오차 신호 $e(k)$는 다음과 같이 표현된다.

$$e(k)=\sum_{i=1}^{M}(y(k)-s_i)\exp\left(-\frac{|y(k)-s_i|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

위의 식에서는 각 심볼의 발생 확률이 동일하고 또한 각 군집의 분산도 같다고 가정하였다[9]. 식 (3) 과 (6)을 M-QAM 신호에 대한 가우시안 군집화 알고리즘 또는 연판정의거 알고리즘이라 한다. 가우시안 군집화 알고리즘에서는 매 iteration 마다 p.d.f. 가 최대가 되도록 등화기의 탭 계수를 갱신한다. p.d.f. 를 최대로 하는 것은 등화기 출력을 이와 가장 근사한 심볼에 해당하는 군집의 중심을 향해 이동시키는 것이며, 이것은 등화기의 출력이 정해진 평균과 분산 값을 갖는 가우시안 군집을 형성하며, 궁극적으로는 ISI 를 제거하고 등화를 달성하도록 한다.

2-PAM 의 경우에서 두 심볼을 ±a라 하면 식 (6)의 오차 신호는 다음으로 된다.

$$e(k)=y(k)-a\cdot\frac{\exp(2a\cdot y(k)/\sigma^2)-1}{\exp(2a\cdot y(k)/\sigma^2)+1} \quad (7)$$

여기서 우변의 지수 항은 송신된 심볼 $a(k)$에 대한 추정을 나타낸다. 이를 경판정의거 알고리즘의 오차 신호와 비교해 보면 부호 함수대신 시그모이드 함수를 사용했음을 알 수 있다. 시그모이드 비선형 함수의 출력 $g(\cdot)$는 그림 2 와 같다. 이 시그모이드 함수는 등화기 출력 값에 따라 -1과 1 사이의 값을 가지며, 등화기 출력이 두 심볼의 경계 근방에 있을 때는 0 에 가까운 값을 갖는다. 이와 같이 연판정 함수를 사용함으로써 등화기 출력이 상당히 모호한 경우 오차 신호도 0 에 가깝게 되므로 결과적으로 경판정에 비해 탭 계수를 훨씬 적게 갱신하게 된다. 즉, 판정이 모호한 경우에는 판정에 대한 가중치를 매우 적게 함으로써 부정확한 탭 계수 갱신을 피하는 효과로 인하여 연판정의 블라인드 수렴 특성이 경판정에 비해 보다 우수하다고 할 수 있다.

Ⅲ. 이중분산을 사용한 단순화된 연판정의거 알고리즘

연판정의거 알고리즘은 등화기 출력을 송신된 심볼에 해당하는 평균과 채널 왜곡의 정도에 따른 분산을 갖는 가우시안 군집들로 모델링할 수 있다는 개념에서 출발한다. 이는 연판정을 수행함으로써 채널 왜곡이 심한 상태에서 블라인드 수렴 특성이 우수한 것으로 밝혀져 있다. 그러나 연판정의거 알고리즘을 고차 QAM 신호에 확장시 심볼 레벨이 증가함에 따라 알고리즘의 계산 복잡성이 상당히 증가되고 수렴 속도도 저하되는 등의 문제점이 있다[10]. 이와 같은 문제점을 피하기 위해 본 논문에서는 축소 신호점 (reduced constellation)[2],[3] 개념을 도입, 계산 복잡성을 단순화한 연판정의거 알고리즘을 유도하고, 다음에 이의 성능을 보다 개선한 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘을 제안하고자 한다.

1. 단순화된 연판정의거 알고리즘

본 절에서는 먼저 연판정의거 알고리즘의 계산 복잡성을 단순화하기 위해 축소 신호점을 적용하여 고차 QAM 신호를 4 신호점으로 근사화한다. 또한 4 신호점의 실수와 허수 성분은 서로 독립이므로 이를 분리하여

www.dbpia.co.kr

각각 추정할 수 있다. 즉, 4 신호점을 다시 실수 성분, 허수 성분 각각에 대해 2 신호점으로 단순화한다. 여기에 연판정의거 알고리즘을 적용함으로써 단순화된 연판정의거 알고리즘을 얻을 수 있다. 단순화된 연판정의거 알고리즘에서는 고차 QAM 신호에 대한 등화 문제를 2-PAM 신호에 대한 등화 문제로 근사화하므로 계산 복잡성을 최소로 할뿐만 아니라 블라인드 수렴 특성을 향상시킬 수 있다.

M-QAM 시스템에서 각각의 심볼은 $b(M=2^b)$개의 비트로 이루어진다. 블라인드 등화 문제에서 등화 초기에는 등화기의 탭 계수가 충분히 조정되어 있지 않기 때문에 비선형 추정기가 등화기의 출력으로부터 입력 데이타 심볼을 원래의 b개의 비트로 추정하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 축소 신호점 알고리즘에서는 입력 데이타 심볼을 보다 낮은 레벨의 신호로 간주, 대략적인 등화를 수행한다. 축소 신호점 알고리즘에서 축소 신호점은 $\{\pm R\pm jR\}$로 정의되는 4 점으로 되며, 이때 R은 아래 식과 같이 정의되는 실수로서 입력 데이타 심볼의 constellation에 의해서만 결정된다[3].

$$R=\frac{E[|a_R(k)|^2]}{E[|a_R(k)|]}=\frac{E[|a_I(k)|^2]}{E[|a_I(k)|]} \tag{8}$$

여기서 $a_R(k)$ 및 $a_I(k)$는 각각 데이타 심볼 $a(k)$의 실수 및 허수 성분을 나타낸다.

축소 신호점 알고리즘에 의해 M 신호점을 4 신호점으로 간주하고 이를 다시 실수 성분과 허수 성분으로 분리, 추정하면 M-QAM 신호에 대한 등화 문제는 실수 성분과 허수 성분 각각에 대해 2 신호점 $\{\pm R\}$에 대한 등화 문제로 단순화된다. 여기에 연판정의거 알고리즘을 적용함으로써 결과적으로 등가 2-PAM 의 경우로 단순화된 연판정의거 알고리즘에서 오차 신호 $e(k)=e_R(k)+je_I(k)$는 식 (8)로 부터 실수 성분과 허수 성분 각각에 대해 다음과 같이 표현된다.

$$e_R(k)=y_R(k)-R\cdot\frac{\exp(2R\cdot y_R(k)/\sigma^2)-1}{\exp(2R\cdot y_R(k)/\sigma^2)+1} \tag{9}$$

$$e_I(k)=y_I(k)-R\cdot\frac{\exp(2R\cdot y_I(k)/\sigma^2)-1}{\exp(2R\cdot y_I(k)/\sigma^2)+1} \tag{10}$$

축소 신호점 개념을 도입하여 단순화한 연판정의거 알고리즘에서 분산 값에 따른 시그모이드 비선형 함수의 출력을 그림 3 에 16-QAM 신호에 대해서 나타내었다. 16-QAM 의 경우 R=2.5가 된다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 시그모이드 비선형 함수를 사용한 연판정은 σ^2가 작아질수록 경판정에 가까워지며, σ^2 = 0의 경우 시그모이드 함수는 단순한 threshold 함수로 된다. 등화 초기에는 채널에 의한 왜곡과 부가 잡음이 매우 심하므로 경판정에 의한 오차 추정은 신뢰도가 매우 낮게 된다. 오차 추정의 신뢰도를 높이기 위해서는 연판정에 의한 오차 추정이 바람직하며, 이를 위해서는 분산 값을 크게 할 필요가 있다.

제안한 알고리즘에서는 등화기 출력을 $\pm R$의 평균을 갖는 두 가우시안 군집으로 모델링하므로 이 두 군집을 분리하기 위해서는 분산을 R보다 작게 해야 함을 짐작할 수 있다. 이 값을 R보다 크게 하면 두 군집은 서로 겹치게 되고, 반면 R보다 너무 작게 하면 군집의 퍼짐을 너무 엄격히 조절하게 되어 역시 분리하지 못할 수가 있다. 본 논문에서의 시뮬레이션에 의하면 σ^2 = R에서 최적한 성능을 보이는 것으로 나타났다. 아울러 눈 모형이 점차 열림에 따라 분산 값을 적절하게 변화시켜 가는 것도 수렴 특성을 향상시키는 방법이 된다[5],[9].

2. 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘

앞 절에서는 종래의 연판정의거 알고리즘을 고차 QAM 신호로 확장시 문제가 되는 계산 복잡성과 블라

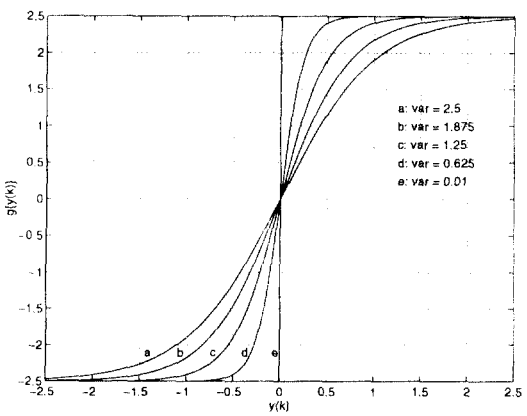

그림 3. 단순화된 연판정의거 알고리즘에서 분산 값에 따른 비선형 함수의 출력.

Fig. 3. Outputs of sigmoid nonlinearities for different variances in simplified soft DD algorithm.

www.dbpia.co.kr

인드 수렴 특성을 개선하기 위해 축소 신호점을 도입하여 단순화된 연판정의거 알고리즘을 제안하였다. 그러나 단순화된 연판정의거 알고리즘에서 사용한 축소 신호점은 채널이 완전히 등화되었을 때 등화기 탭 벡터에 대한 코스트 함수의 평균 gradient가 0이 되도록 형성된 것이므로 등화가 완전히 달성된 후에도 오차 신호는 0으로 되지 않는다. 이로 인하여 축소 신호점을 적용한 연판정의거 알고리즘은 정상 상태에서 오차가 크다는 단점을 갖는다. 본 절에서는 이를 해결하기 위해 등화 초기에는 연판정과 경판정을 병행하여 수신 신호를 대략적으로 등화하고, 눈 모형이 열리기 시작하면 주로 경판정을 수행함으로써 수렴 속도와 정상 상태 오차를 개선할 수 있는, 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘을 제안한다.

제안하고자 하는 이중분산 알고리즘은 연판정에 사용된 시그모이드 함수가 분산 값에 따라 연판정 또는 경판정을 수행한다는 점을 이용하면 이중분산을 통해 간단히 실현된다. 즉, 등화기 출력의 오차 레벨에 따라 분산 값을 달리함으로써 오차 레벨이 큰 경우에는 연판정을, 오차 레벨이 작은 경우에는 경판정을 각각 수행하도록 할 수 있다. 이를 위해 그림 4에서와 같이 등화기 출력의 신호점 영역을 실수 성분과 허수 성분 각각에 대해 심볼점을 포함하는 신뢰 구간 (빗금친 구간)과 그 이외의 구간으로 구분한다. 이중분산 연판정의거 알고리즘에서는 먼저, 등화기 출력이 신뢰 구간 밖에 있을 때 즉, 오차 레벨이 큰 경우에는 경판정에 의한 오차 추정의 신뢰도가 매우 낮기 때문에 오차 추정이 보다 신뢰성 있는 연판정을 이용한다. 연판정에서는 축소 신호점 $\pm R$을 평균으로 하고 분산을 $\sigma^2 = R$로 설정한다.

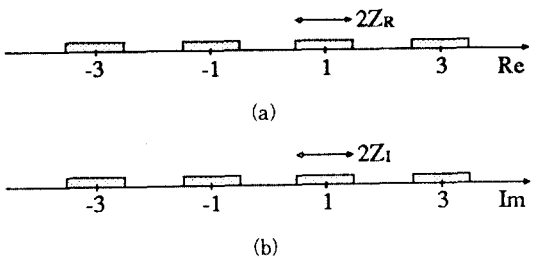

그림 4. 이중분산 연판정 알고리즘의 16-QAM 신호에 대한 신뢰 구간. (a) 실수 성분, (b) 허수 성분.
Fig. 4. Confidence zones in the dual-variance soft DD algorithm for 16-QAM signals. (a) Real part, (b) Imaginary part.

한편, 연판정은 블라인드 수렴 특성이 좋은 반면 정상 상태에서 오차가 크다는 문제점이 있다. 따라서 눈 모형이 어느 정도 열린 후에는 경판정으로 전환하는 것이 바람직하다. 경판정은 왜곡이 심한 채널에서는 부정확한 판정으로 되기 쉽기 때문에 경판정에 의한 오차 추정의 정확성을 보장하기 위해서는 경판정의거 알고리즘의 동작을 보다 신뢰성 있는 구간으로 한정할 필요가 있다. 즉, 등화기 출력이 신뢰 구간에 들 때로 제한한다. 등화기 출력이 신뢰 구간 내에 있는 경우에는 눈 모형이 어느 정도 열렸다고 보아 경판정을 수행한다. 눈 모형이 열린 상태에서는 경판정의거 알고리즘이 수렴을 보장하므로 경판정을 이용함으로써 수렴 속도와 정상 상태 오차를 향상시킬 수 있다. 경판정에서는 등화기 출력에 가장 인접한 심볼 점 $\hat{a}(k)$를 평균으로 하고 분산을 0으로 한다. 분산을 0으로 설정함으로써 연판정의거 알고리즘에 의해 경판정을 수행할 수 있다. 제안 알고리즘에서는 이와 같이 이중분산을 통해 연판정과 경판정을 병행하므로 알고리즘 구현이 매우 간단하다.

결과적으로 제안하고자 하는 이중분산 연판정의거 알고리즘에서 오차 신호 $e(k) = e_R(k) + je_I(k)$는 식 (9), (10) 으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$e_R(k) = y_R(k) - m_R(k) \cdot \frac{\exp(2m_R(k) \cdot y_R(k)/\sigma_R^2(k)) - 1}{\exp(2m_R(k) \cdot y_R(k)/\sigma_R^2(k)) + 1} \tag{11}$$

$$e_I(k) = y_I(k) - m_I(k) \cdot \frac{\exp(2m_I(k) \cdot y_I(k)/\sigma_I^2(k)) - 1}{\exp(2m_I(k) \cdot y_I(k)/\sigma_I^2(k)) + 1} \tag{12}$$

여기서 경판정과 연판정에 각각 사용되는 평균과 분산쌍은 실수 성분에 대해

$$(m_R(k), \sigma_R^2(k)) = \begin{cases} (\hat{a}_R(k), 0) & \text{if } |y_R(k) - \hat{a}_R(k)| < Z_R \\ (R, R) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{13}$$

그리고 허수 성분에 대해

$$(m_I(k), \sigma_I^2(k)) = \begin{cases} (\hat{a}_I(k), 0) & \text{if } |y_I(k) - \hat{a}_I(k)| < Z_I \\ (R, R) & \text{otherwise} \end{cases} \tag{14}$$

가 되며, $\hat{a}(k)$는 threshold 비선형 함수에 의한 입력

www.dbpia.co.kr

심볼의 추정, R은 (8)로 정의되는 축소 신호점을 나타낸다. 여기서 Z_R과 Z_I는 신뢰 구간의 범위를 나타내는 파라메타로서, $0<Z_R, Z_I<1$의 값을 가지며, 이는 연판정에서 경판정으로, 또는 경판정에서 연판정으로 전환할 시점을 결정한다. D를 데이타 심볼점간의 최소 거리라 하면 눈 모형이 열린 상태는 $|y(k)-a(k)|<D/2$로 표현된다[12]. 이는 경판정의거 알고리즘으로 동작하기 위한 신뢰 구간을 $Z_R = Z_I<D/2$로 설정하는 근거가 된다.

이중분산 연판정의거 알고리즘에서 사용한 비선형 함수의 동작을 비교하기 위해 그림 5 에 여러 알고리즘에서 사용된 비선형 함수의 출력을 16-QAM 신호에 대해 나타내었다. 그림 5(a)는 축소 신호점 알고리즘(RCA) 의 경우로서 경판정을 보이고 있으며, 5(b)는 앞 절에서 제안한 단순화된 연판정의거 알고리즘의 경우로서 0 근방에서 RCA 에 비해 완만하게 천이한다. 5(c)는 threshold device 에 의한 경판정을 나타내고 있으며, 5(d)는 본 절에서 제안한 이중분산 연판정의거 알고리즘이 신뢰 구간 내에서는 경판정을, 신뢰 구간 밖에서는 연판정을 결합하고 있음을 보이고 있다.

본 절에서 제안한 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘은 등화 초기 단계에서는 연판정과 경판성을 병행하며, 등화기 출력의 눈 모형이 어느 정도 열린 상태로 되면 이후에는 주로 경판정을 수행함으로써 수렴 속도를 향상시키고 정상 상태 오차를 보다 줄이는 것이 가능하다. 이중분산 알고리즘에서는 수렴을 검출할 필요없이 등화기 출력의 오차 레벨에 따라 분산 값을 달리함으로써 연판정과 경판정을 자동 전환하므로, Chen 등[10]이 제안한 다단계 블라인드 가우시안 군집화 알고리즘에서와 같이 단계를 구분할 필요가 없을 뿐만 아니라, 채널 특성 변화를 추적할 수 있다. 제안한 알고리즘은 채널 특성의 변화에 따라 적절하게 연판정과 경판정을 병행하여 동작하며, 정상 상태의 수렴 특성은 경판정의거 알고리즘을, 등화 초기의 블라인드 수렴 특성은 연판정의거 알고리즘을 따르게 된다.

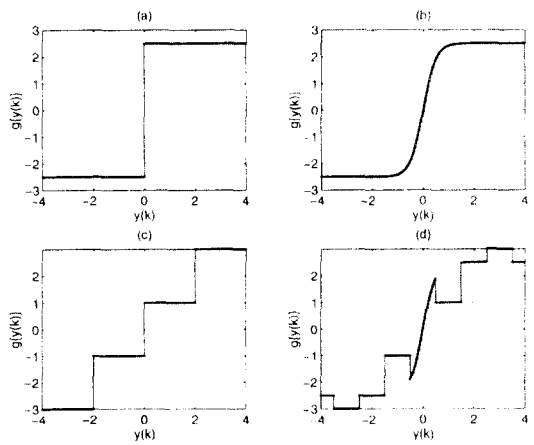

그림 5. 여러 알고리즘에서 사용된 비선형 함수의 출력. (a) 축소 신호점 알고리즘, (b) 단순화된 연판정의거 알고리즘, (c) 경판정의거 알고리즘, (d) 이중분산 연판정의거 알고리즘.

Fig. 5. Outputs of nonlinearities used in different algorithms. (a) RCA, (b) Simplified soft DD algorithm, (c) DD algorithm, (d) Dual-variance soft DD algorithm.

Ⅳ. 시뮬레이션 및 고찰

고차 QAM 신호에 대해 제안한 알고리즘의 성능을 평가하기 위해 16, 64 및 256-QAM 신호를 대상으로 하여 RCA[2],[3], CMA[6],[7]등과 수렴 특성을 비교하였다. 시뮬레이션에서는 탭 지연 라인 (tapped delay line) 모델[14]을 사용하여 두 가지 다중경로 채널을 모델링하였으며, 그 전달 함수는 아래와 같다. 채널 1은 다중경로 전파로 인한 주파수 선택성 채널의 특성을 가지며[15], 채널 2는 대표적인 전화 채널의 특성을 갖는다[4].

$$H_1(z)=0.18+(-0.505+j0.451)z^{-1}+(0.433-j0.5414)z^{-2}+(0.108-j0.126)z^{-3}$$

$$H_2(z)=(-0.005-j0.004)+(0.009+j0.03)z^{-1}+(-0.024-j0.104)z^{-2}+(0.854+j0.52)z^{-3}+(-0.218+j0.273)z^{-4}+(0.049-j0.074)z^{-5}+(-0.016+j0.02)z^{-6}$$

아울러 화이트 가우시안 잡음을 부가하고, 신호대 잡음비 (signal to noise ratio: SNR) 를 다음과 같이 정의하였다.

$$SNR=10\log_{10}\frac{E[|a*h|^2]}{\sigma_n^2}\ [dB]$$

여기서 $*$는 콘볼루션을, σ_n^2는 부가잡음의 분산을 나타낸다. 성능 평가 지표로는 다음으로 정의되는 심볼간 간섭을 사용하였으며, 이 식에 의하면 완전한 등화에 도달

www.dbpia.co.kr

시 ISI = 0이 됨을 알 수 있다.

$$ISI = \frac{\sum |h*w|^2 - |h*w|^2_{\max}}{|h*w|^2_{\max}}$$

첫 번째 시뮬레이션은 16-QAM을 대상으로 하여 채널 1을 적용하였다. 등화기로는 23 차의 복소수 탭 계수를 갖는 transverse 필터 구조를 사용하였으며, 중심 탭은 1로, 중심 탭을 제외한 모든 탭은 0 으로 초기화하였다. 모든 시뮬레이션에서 스텝 사이즈 μ로는 $0 \le \mu \le 2/B^2$[12]의 범위에서 가능한 한 빠른 수렴 속도와 작은 심볼간 간섭을 보이는 것을 절충하여 택하였다. 여기서 상수 B는 $\sqrt{E[x^2(k)]}$로 근사되고, x(k)는 등화기의 입력 데이타 열을 나타낸다.

그림 6에 SNR = 30 dB의 조건에서 16-QAM 신호에 대해 100 회의 Monte Carlo 수행을 통해 얻은 잔류 심볼간 간섭 데이타를 앙상블 평균하여 그 결과를 dB로 나타내었다. 그림 6에 의하면 우선 RCA는 등화 초기의 수렴 속도가 매우 더디다. 이는 충분히 예상할 수 있는 결과로서 등화기 출력의 눈 모형이 닫힌 상태에서는 경판정에 의한 오차 추정이 부정확하여 탭 계수 조정이 잘못되기 때문이다. 아울러 축소 신호점을 적용함으로써 정상 상태에서 오차 레벨이 큼을 알 수 있다. CMA는 특별한 형태의 비선형 함수를 사용하여 오차를 추정함으로써 초기 수렴 속도가 빠르나, 정상 상태에서의 잔류 심볼간 간섭은 RCA 에서와 같은 이유에서 큰 것으로 나타났다. 한편, 이중분산 연판정의거 알고리즘은 등화 초기의 수렴 속도는 CMA 에 비해 느리나, 이후 매우 빠르게 정상 상태에 도달한다. 또한 정상 상태에서의 잔류 ISI가 앞의 두 알고리즘에 비해 약 15 dB 이상 향상되고 있다. 이는 연판정 함수를 사용함으로써 등화 초기의 오차 추정이 보다 정확할 뿐만 아니라, 이중분산을 채용하여 일단 눈 모형이 어느 정도 열리게 되면 경판정의거로 전환하므로 수렴 속도와 잔류 심볼간 간섭을 개선하는 때문이다.

두 번째 시뮬레이션에서는 64-QAM 에 대해 채널 2, 등화기 차수는 12 를 적용하였다. 그림 7에 SNR = 35 dB의 조건에서 100 회의 독립적인 수행을 통해 얻은 잔류 심볼간 간섭 데이타를 평균하여 나타내었다. 세 번째 시뮬레이션에서는 256-QAM에 대해 SNR = 40 dB의 조건에서 앞에서와 같은 성능을 조사하여 그 결과를 그림 8 에 나타내었다.

위의 두 결과에 의하면 RCA 및 CMA는 정상 상태에서의 성능이 그다지 좋지 않다는 것이 공통적인 문제점이다. 반면 이중분산 연판정의거 알고리즘은 이상 언급한 알고리즘들에 비해 수렴 속도와 잔류 심볼간 간섭에서 보다 우수한 성능을 보이고 있다. 특히 정상 상태에서의 잔류 ISI 가 64 및 256-QAM의 두 경우에서 모두 CMA와 RCA에 비해 약 20 dB 이상 작은 것으

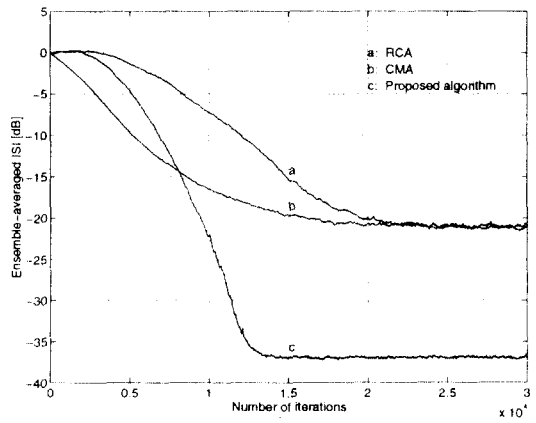

그림 6. 16-QAM 신호에 대한 앙상블 평균한 심볼간 간섭 비교.
Fig. 6. Comparison of ensemble averaged ISI for 16-QAM signals.

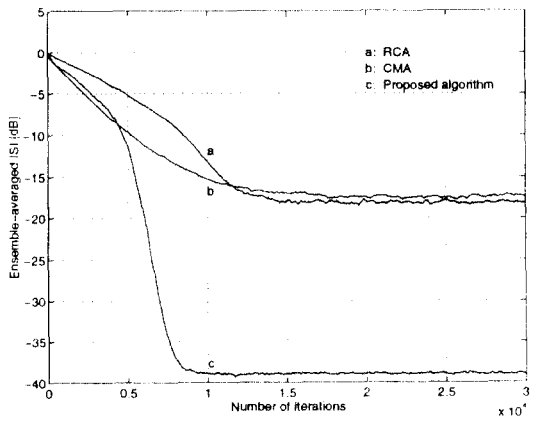

그림 7. 64-QAM 신호에 대한 앙상블 평균한 심볼간 간섭 비교.
Fig. 7. Comparison of ensemble averaged ISI for 64-QAM signals.

www.dbpia.co.kr

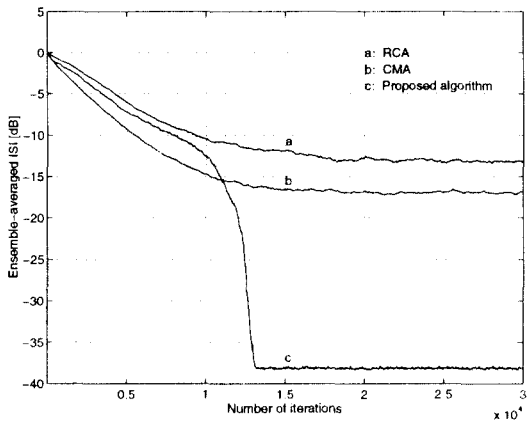

그림 8. 256-QAM 신호에 대한 앙상블 평균한 심볼간 간섭 비교.
Fig. 8. Comparison of ensemble averaged ISI for 256-QAM signals.

로 나타나 있다.

이상으로 다중경로 전파와 부가 화이트 가우시안 잡음 하에서 제안한 알고리즘의 잔류 심볼간 간섭과 수렴 속도를 시뮬레이션을 통해 RCA 및 CMA 와 비교, 고찰하였다. 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘은 RCA 나 CMA 에 비해 블라인드 수렴 특성 및 정상 상태 오차에서 성능을 개선하였다. 이상의 결과로부터 제안한 알고리즘은 고차 QAM 신호의 블라인드 등화에 효과적인 것으로 평가할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 고차 QAM 신호를 효과적으로 블라인드 등화하기 위해 단순화된 이중분산 연판정의거 알고리즘을 제안하였다. 축소 신호점을 적용하여 단순화한 연판정의거 알고리즘을 이용하여 등화 초기에는 연판정과 경판정을 병용함으로써 눈 모형이 닫혀 있는 상황에서 초기 수렴하도록 하며, 초기 수렴 이후에는 주로 경판정의거 알고리즘에 의해 등화기의 탭 계수를 갱신함으로써 수렴 속도와 정상 상태에서의 오차를 향상시킨다. 제안한 알고리즘은 등화기 출력의 오차 레벨에 따른 분산 값에 의해 연판정 또는 경판정을 이용하므로 판정 모드를 전환하기 위해 수렴을 검출할 필요가 없으며, 채널 특성 변화를 추적하는 것이 가능하다. 아울러 연판정의거 알고리즘을 적용시 축소 신호점을 도입하여 고차 QAM 신호의 등화 문제를 2-PAM 신호에 대한 등화 문제로 근사화함으로써 연판정의거 알고리즘을 고차 QAM 신호에 직접 적용시 계산 복잡성이 상당히 증가하고 수렴 속도가 늦어지는 문제를 해결하였다.

참고문헌

1. Y. Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude-Modulation Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-23, pp.679-682, June 1975.
2. D.N. Godard and P.E. Thirion, "Method and Device for Training an Adaptive Equalizer by Means of an Unknown Data Signal in a QAM Transmission System," U.S. Patent 4 227 152, Oct. 7, 1980.
3. A. Benveniste and M. Goursat, "Blind Equalizers," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-32, pp.871-883, Aug. 1984.
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, pp.877-887, Sep. 1987.
5. S.J. Nowlan and G.E. Hinton, "A Soft Decision-Directed LMS Algorithm for Blind Equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-41, pp.275-279, Feb. 1993.
6. D.N. Godard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-28, pp.1867-1875, Nov. 1980.
7. J. R. Treichler and B.G. Agee, "A New Approach to Multipath Correction of Constant Modulus Signals," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-31, pp.459-472, Apr. 1983.
8. K. N. Oh and Y.O. Chin, "Modified Constant Modulus Algorithm: Blind Equalization and Carrier Phase Recovery Algorithm," *Proc. 1995*

www.dbpia.co.kr

IEEE Int. Conf. Commun., vol. 1, pp.498-502, Seattle, WA, June 1995.

9. J. Karaoguz, "A Generalized Decision-Directed Blind Equalization Algorithm Applied to Equalization of Multipath Rayleigh Fading Mobile Communication Channels," Ph.D. Dissertation, North Carolina State Univ., 1992.
10. S. Chen, S. McLaughlin, P.M. Grant and B. Mulgrew, "Reduced-Complexity Multi-Stage Blind Clustering Equaliser," *Proc. 1993 IEEE Int. Conf. Commun.*, vol. 2, pp.1149-1153, Geneva, 1993.
11. S. Haykin, Adaptive Filter Theory, Second Edition, Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall, 1991.
12. O. Macchi and E. Eweda, "Convergence Analysis of Self-Adaptive Equalizers," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. IT-30, pp.161-176, Mar. 1984.
13. W.C. Jakes, Jr., *Microwave Mobile Communications*, New York, N.Y., John Wiley & Sons, 1974.
14. J.G. Proakis, *Digital Communications*, 2nd Ed., New York, N.Y., McGraw-Hill, 1989.
15. D. Hatzinakos and C.L. Nikias, "Estimation of Multipath Channel Response in Frequency Selective Channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. SAC-7, pp.12-19, Jan. 1989.

吳 吉 男(Kil Nam Oh) 정회원

現在 : 韓國電子通信研究所 先任研究員.
한국통신학회 논문지 第20券 第1號 參照.

陳 庸 玉(Yong Ohk Chin) 정회원

現在 : 慶熙大學校 電子工學科 敎授.
한국통신학회 논문지 第20券 第1號 參照.

www.dbpia.co.kr