

Multi-Stage 자력복구 채널등화 알고리즘

이중현* 황유모* 최병욱**
 명지대학교 정보제어공학과* 한국생산기술연구원**

Multi-Stage Blind Equalization Algorithm

Joong Hyun Lee* Humor Hwang* Byung Wook Choi**
 Department of Information Control Myongji University* Korea Institute of Industrial Technology**

Abstract - We propose two robust blind equalization algorithms based on multi-stage clustering blind equalization algorithm, which are called a complex classification update algorithm(CCUA) and an error compensation algorithm(ECA). The first algorithm is a tap-updating algorithm which each computes classified real and imaginary parts in order to reduce computations and the complexity of implementation as a stage increase. The second one is a algorithm which can achieve faster convergence speed because error of equalizer input make always fixed. Test results confirm that the proposed algorithms with faster convergence and lower complexity outperforms both constant modulus algorithm(CMA) and conventional multi-stage blind clustering algorithm(MSA) in reducing the SER as well as the MSE at the equalizer output.

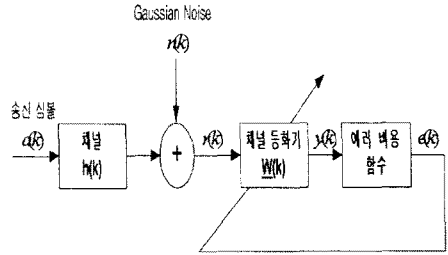


그림 1. 디지털 통신시스템 블록도.

등화기의 탭 계수를 갱신하는 steepest descent 방법을 사용한 것이다.

$$w(k+1) = w(k) + \alpha \frac{\partial \Psi(y(k))}{\partial w(k)} \quad (1)$$

1. 서 론

디지털 통신 채널은 다중 경로 채널을 통해 신호간 간섭(ISI)과 부가 잡음으로 인하여 자주 왜곡된다. 디지털 통신 시스템의 블록도는 그림 1과 같다. 이러한 통신 시스템에서 채널 등화기는 신뢰할 수 있는 데이터 수신을 위해 요구되는데, 최근 maximum a-posteriori probability(MAP)를 이용한 비선형 등화기에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다.^{[1]-[3]}

이러한 MAP 확률 밀도 함수(pdf)를 joint Gaussian pdf에 적용, cluster를 설정하여 각 데이터 심볼이 가질 수 있는 값 중에서 확률을 최대로 하는 값을 추정 결과로 얻는 방법이 제안^[1]되었으며, 이를 이용하여 M-ary-QAM 신호를 항상 QPSK로 계산을 하며, $\sqrt{M} = 2^L$ 인 L-단계의 다단계로 계수 갱신을 하는 알고리즘을 제안^[2]하였지만, 입력 신호를 모든 군집과의 관계를 모두 계산하여 결정하게 되므로 계산량이 너무 많게 된다. 이를 보완하기 위해 계산량을 줄인 알고리즘을 제안^[3]하였지만, BPSK, QPSK일 때의 계산은 줄였으나, M-ary-QAM으로 증가함에 따라 역시 계산되는 양이 증가하고, 복잡해지는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 구현이 용이하면서도, 적은 계산량으로도 빠른 수렴을 얻을 수 있는 두가지 알고리즘을 제안한다.

2. 본 론

2.1 복소 분류 계수 갱신 알고리즘(CCUA)

제안하는 알고리즘은 식 1과 같이 자승 오차 평균을 최소화하는 비용함수의 미분값인 오차함수를 사용하여

여기에서 $w(k)$ 는 등화기의 복소 탭계수 벡터이고, $y(k)$ 는 등화기의 출력이며, α 는 step-size이다.

최근 제안된 multi-stage blind clustering algorithm(MSA)^[2]은 입력 신호가 들어올 때마다 모든 cluster의 중심(center)과 확률적인 계산을 하여 전체에 대한 합으로 등화기의 출력이 결정된다. 그러므로, 계산의 복잡도와 늦은 수렴이 나타나게 된다.

따라서, 입력 신호가 들어왔을 때 실수 부분과 허수 부분으로 나누어 각각이 따로 계산이 된다면, 모든 cluster의 중심과 비교를 할 필요가 없이 인근 두 cluster의 중심만 비교하면 된다. 따라서 계산이 편리하고 간단하기 때문에 수렴면에서 더 빨리 이루어질 수가 있다.

Gaussian pdf를 이용한 cluster의 일반 형성 함수는 다음과 같다.

$$\Psi(y_{k,R}) = \sum_{m=1}^Q \exp\left[-\frac{(y_{k,R} - \mu_m)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

$$\Psi(y_{k,I}) = \sum_{n=1}^Q \exp\left[-\frac{(y_{k,I} - \mu_n)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

여기에서 $y_{k,R}$, $y_{k,I}$ 는 각각 등화기 출력의 실수, 허수 부분이고, μ_m , μ_n 은 각각 cluster의 중심의 실수, 허수 부분이며, σ^2 은 variance를 나타내며, $Q = \sqrt{M}$ 인 정수이다.

식 (1)의 계수 갱신식을 이용한 실수, 허수부분의 계수 갱신식은 식(4) 및 (5)와 같다.

$$w_{iR}(k+1) = w_{iR}(k) + a \frac{\partial \Psi(y_{k,R})}{\partial w_{iR}} \quad (4)$$

$$w_{iI}(k+1) = w_{iI}(k) + a \frac{\partial \Psi(y_{k,I})}{\partial w_{iI}} \quad (5)$$

여기에서 $0 \leq i \leq m-1$ 이고, m 은 등화기의 탭수를 나타낸다.

M-ary-QAM 상황에서는 $\sqrt{M} = 2^L$ 인 L -단계로 나누어 등화를 하도록 했으며, 처음 단계나 두 번째 단계나 항상 QPSK의 형태로 계산이 이루어지도록 하였다.

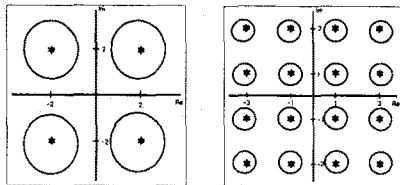
이를 QPSK에 적용했을 때의 계수 갱신 알고리즘은 식 (6) 및 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi(y_{k,R})}{\partial w_{iR}} &= \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left(\left[-\frac{(y_{k,R} - \mu_m)}{\sigma^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \exp\left(-\frac{(y_{k,R} - \mu_m)^2}{2\sigma^2}\right) \right] r_{i,R} \right. \\ &\quad \left. + \left[-\frac{(y_{k,I} - \mu_n)}{\sigma^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \exp\left(-\frac{(y_{k,I} - \mu_n)^2}{2\sigma^2}\right) \right] r_{i,I} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Psi(y_{k,I})}{\partial w_{iI}} &= \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left(\left[-\frac{(y_{k,I} - \mu_n)}{\sigma^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \exp\left(-\frac{(y_{k,I} - \mu_n)^2}{2\sigma^2}\right) \right] r_{i,R} \right. \\ &\quad \left. - \left[-\frac{(y_{k,R} - \mu_m)}{\sigma^2} \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \exp\left(-\frac{(y_{k,R} - \mu_m)^2}{2\sigma^2}\right) \right] r_{i,I} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 $r_{i,R}$, $r_{i,I}$ 는 각각 등화기 입력의 실수, 허수 부분이다.

그림 2은 16-QAM 신호를 2단계를 통해 복구할 때의 cluster과 각 cluster의 중심을 나타낸다.



(a) 첫 번째 단계에서의 4개의 cluster의 중심 (b) 두 번째 단계에서의 16개의 cluster의 중심

그림 2. 16-QAM에서의 cluster의 중심.

2.2 오차 계수 보정 알고리즘(ECA)

보다 더 빠른 수렴을 위해 결정지향(decision-directed:DD)알고리즘의 에러에 간단한 계수 보정 비용 함수를 곱해 계수 갱신을 하는 알고리즘을 제안한다. 일반적으로 확률적 등화기법을 이용하는 알고리즘들은 수식의 복잡도로 인하여 생기는 많은 변수들의 제어

가 잘 되지 않아 오히려 수렴이 늦다거나, 구현에 애로점이 많이 발생한다. 뿐만 아니라, 아무리 알고리즘의 수식을 간소화한다 해도 항상 최소한 인근 두 군집과의 비교는 피할 수 없기 때문에 어느 정도의 복잡함이 없을 수가 없다. 그러한 문제점을 극복하기 위해 등화기 출력의 가장 가까운 데이터 심볼에 결정하게 되는 가장 간단한 채널 등화 알고리즘인 DD알고리즘 에러를 사용했다. 그러나 DD알고리즘은 open-eye 상태일 때만 정확히 동작하게 되므로 DD알고리즘 에러를 보상해줄 비용 함수가 필요하다.

수신 신호가 수렴이 되었을 때 신호들은 Gaussian pdf를 따른다는 central limit theorem에 의거하여 DD알고리즘 에러를 Gaussian pdf의 $Y \sim N(\hat{y}(k), \sigma^2)$ 으로 계산하여 그 값에 DD알고리즘의 에러에 곱함으로써, 매번 모든 군집의 중심과 비교하여 전체를 합함으로써 계수를 갱신하던 복잡한 다단계 군집형태의 알고리즘에서 군집의 중심과 비교할 필요가 없는 다단계 채널 등화 알고리즘이 만들어졌다.

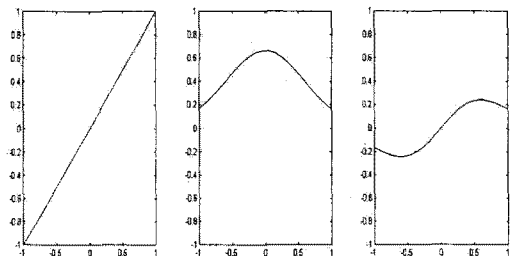
이를 수식을 나타내면 다음과 같다.

$$w(k+1) = w(k) - a e(k) r^*(k) \quad (8)$$

$$e(k) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(y(k) - \hat{y}(k))^2}{2\sigma^2}\right) (y(k) - \hat{y}(k)) \quad (9)$$

여기에서 $y(k)$ 는 등화기의 출력, $\hat{y}(k)$ 는 slicer의 출력이고, $y(k) - \hat{y}(k)$ 는 DD알고리즘의 에러이다.

그림 3은 에러의 입력이 $[-1, 1]$ 일 때 보상 함수로 사용된 Gaussian pdf를 곱해 등화기의 계수 갱신을 위한 등화기 입력의 비용 함수를 나타낸 것이다.



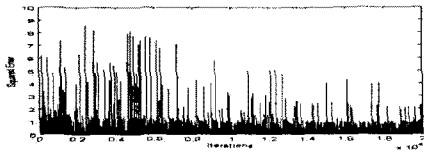
(a) ERROR INPUT (b) GAUSSIAN pdf (c) COST FUNCTION
그림 3. 비용 함수.

비용 함수는 Sigmoid 함수와 비슷하게 동작함으로써 오차가 클 때는 작은 값이 되어 입력 오차의 값의 크기를 유사하게 입력되어 지도록 하는 역할을 한다.

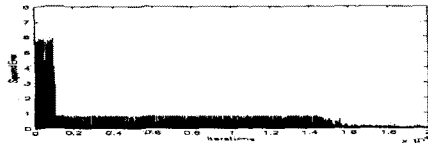
일반적으로, DD알고리즘을 거친 후의 자승 오차는 매우 불규칙적이어서 등화기의 좋은 계수 갱신에 빠른 효과를 기대하기 어렵다. 그러나, 입력되는 오차를 규칙적인 작은 값으로 입력했을 때에는 보다 빠르고 안정적인 등화기의 계수 갱신이 이루어짐을 확인하였다.

그림 4의 (a)는 일반 DD알고리즘의 자승 오차를 나타낸 것이고, (b)는 제안된 알고리즘에서 등화기로 입력되는 오차의 자승 오차이며, (c)는 제안된 알고리즘의 등화기를 거친 후의 DD 모드에서의 자승 오차를 나타낸다.

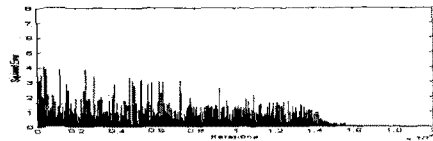
등화기에 입력되는 자승 오차가 일정한 값으로 입력이 됨에 따라 등화기를 거친 후의 자승 오차가 점차 작아져 수렴이 됨을 나타내고 있다.



(a) DD 알고리즘



(b) ECA의 COST FUNCTION



(c) ECA

그림 4. 자승 오차.

3. 시뮬레이션 결과

Signal Processing Worksystem (SPW)를 이용한 시뮬레이션은 16-QAM 신호를 사용했으며 constant modulus 알고리즘(CMA)^[4]과 MSA^[2]와 같이 비교하여 그 성능을 시험했다. 시뮬레이션에 사용한 채널의 응답은 그림 5과 같으며, 10.76MHz의 심볼율을 12배 샘플링으로 하여 Raised Cosine Filter를 사용하여 전송하였다. Roll-off Factor는 0.5로 정했고, 신호대 잡음비는 24dB이며, 등화기의 탭 길이는 23이다.

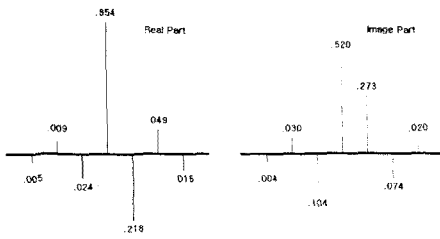
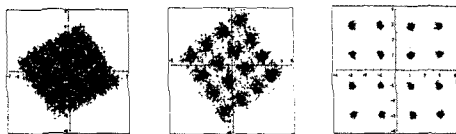
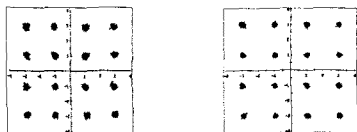


그림 5. 채널 임펄스 응답.



(a) 수신 신호 (b) CMA (c) MSA



(d) CCUA (e) ECA

그림 6. 신호 성좌 분포.

그림 6의 (a)에서 보는 바와 같이 다중 경로 채널을 통과한 수신 신호는 왜곡이 심하며, closed-eye 상태를 알 수 있다. 기존의 MSA나 제안된 알고리즘의 신호 성좌 분포는 유사하나, 그림 7에 나타난 MSE 비교에서는 현격한 차이를 나타낸다.

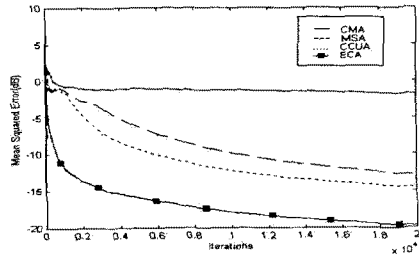


그림 7. MSE 비교.

그림 8은 각 알고리즘들의 SER 비교를 나타낸 것으로 제안된 알고리즘 모두 기존의 알고리즘 보다 더 우수한 성능을 나타낸다.

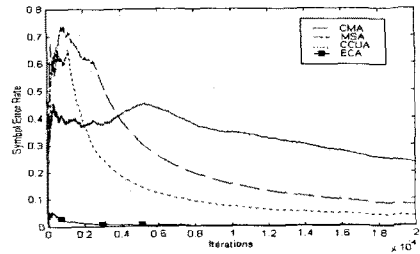


그림 8. SER 비교.

4. 결 론

본 논문에서는 실수 부분과 허수 부분을 나누어 등화기의 계수를 갱신하는 알고리즘과 에러의 오차를 일정하게 만들어주도록 하는 보정 함수를 사용하여 계수 갱신하는 알고리즘을 제안하였다.

제안된 두가지 알고리즘은 기존에 제안된 알고리즘 보다 구현이 용이하며, 복잡성을 많이 낮추었고, 계산량이 적으므로 빠른 수렴이 됨을 시뮬레이션을 통해 증명하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] J. Karaoguz and S.H. Ardalan, "A soft decision-directed blind equalization algorithm applied to equalization of mobile communication channels," in *Proc. ICC'92* (Chicago), Vol.3, pp.343.4.1-343.4.5, 1992.
- [2] S. Chen, S. McLaughlin, P.M. Grant and B. Mulgrew, "Multi-stage blind clustering equalizer," *IEEE Trans. on comm.* Vol.43, No.2/3/4, pp.701-705, February 1995.
- [3] Xu Jinbiao, Ma Fulong, and Wang Yumin, "Soft decision-directed blind equalization," *Proceedings of ICSP'96*, pp.32-35, 1996.
- [4] D. N. Godard, "Self recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication system," *IEEE Trans. Comm.* Vol. COM-35, pp.1867-1875, Nov. 1980.