

QAM 시스템에 선택적으로 NCMA를 적용한 블라인드 등화 알고리즘의 수렴속도 개선

강 윤 석, 안 상 식
고려대학교 전자 및 정보공학부
전화 : (0415) 860-1792 / 팩스 : (0415) 860-1356

Convergence Rate Improvement of the Blind Equalization Algorithm for QAM System using Selective NCMA

Yun-Seok Kang, Sang-Sik Ahn
School of Electronics and Information Engineering, Korea University
E-mail : sahn@tiger.korea.ac.kr

Abstract

Blind equalizers recover the transmitted data using signal's statistical characteristics only. Because of its computational simplicity and fast convergence rate, CMA is widely used in practice. Blind equalizers, however, converge much slowly than conventional equalizers which use the training signals. In order to improve the convergence rate, many modified blind equalization algorithms have been proposed. Among those, Normalized CMA (NCMA) was applied to increase the convergence rate by using the large step size. Unfortunately it can only be applied for the constant modulus signal constellation scheme. In this paper, we propose the Selective NCMA (SNCMA) that improve the convergence rate of blind equalization algorithm by using NCMA for non-constant modulus signalling method such as QAM constellation. We achieved fast start-up convergence rate and reduced steady-state residual error.

I. 서론

전통적으로, ISI를 제거하기 위한 등화는 학습신호를 이용해서 수행되어졌으나, 디지털 통신의 응용분야에서 이러한 학습신호를 이용할 수 없는 환경, 또는 신호의 전송효율을

높이기 위해서 학습신호를 사용하지 않고 신호의 확률적 특성을 이용하는 블라인드 (Blind or Self-Recovering) 등화기의 이용이 대두되었다.

블라인드 등화기는 Sato에 의하여 [1]에서 처음 제안된 후 최근까지 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 다음과 같이 분류할 수 있다. 첫 번째는 Steepest Gradient Descent (SGD) 알고리즘을 이용한 직접 적응 등화의 이용이며, 두 번째로 채널의 특성 파라미터를 측정된 후 등화기의 구현을 위해 수신된 신호의 2차 또는 고차의 신호특성을 이용하는 간접 등화 알고리즘 계열, 세 번째로 Maximum Likelihood에 기초한 알고리즘이다. 이 중 SGD 계열의 알고리즘이 구현의 간단성과 알맞은 성능으로 인해 실제 블라인드 등화 알고리즘으로 널리 이용되고 있다. SGD 계열의 알고리즘 중 대표적으로 Sato계열의 알고리즘들과 Godard[2] 또는 CMA[3] 계열의 알고리즘이 있다. 블라인드 등화 알고리즘은 본질적으로 전통적인 등화기에 비해 수렴속도가 느린 단점을 가지고 있으며 이를 개선하기 위한 많은 알고리즘들이 제안되어 왔으며, Hilal과 Duhamel에 의해 제안된 NCMA[6]는 a posteriori 오차를 상쇄하는 제한조건에서 큰 스텝사이즈를 이용하여 수렴속도를 향상시킬 수 있는 알고리즘이다. 그러나, NCMA는 그림 1(a)와 같은 CM (Constant Modulus) 신호원에 대해서 유도 되었기 때문에 그림 1(b)와 같은 다중레벨을 갖는 고차의 QAM 신호원에 대해서는 적절히 동작하지 못한다. 본 논문에서는 고차의 QAM에서 정상도상의 최외각 심볼들에 대해서 일정한 신뢰구간을 정하여 NCMA로 동작하고 이외의 심볼들에 대해서는 CMA를 적용하여 수렴

속도를 개선할 수 있는 Selective NCMA (SNCMA) 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘을 Dual-Mode CMA (DM-CMA)[5]에도 적용하여 결정지향 모드로 더 빨리 스위칭 됨으로써 수렴특성을 개선할 수 있으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘이 수렴속도와 잔류오차를 상당히 개선할 수 있음을 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘과의 차이점을 비교하기 위하여 기존의 블라인드 적응 알고리즘에 대해 살펴보고, 3장에서 제안한 알고리즘에 대해서 기술하며, 4장에서는 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘의 성능을 확인한다. 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

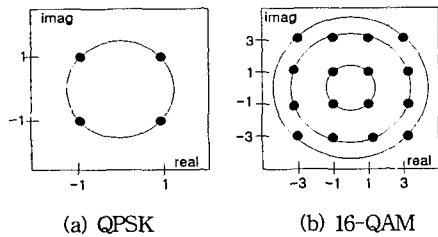


그림 1. (a) CM 신호 (b) NCM 신호

II. 블라인드 적응등화 알고리즘

1. CMA(or Godard) 알고리즘

CMA는 Godard에 의해 [2]에서 제안되었으며 Treichler와 Agee에 의해 [3]에서 독자적으로 연구되었다. Godard 알고리즘은 다중 네트워크에서처럼 학습신호를 사용할 수 없는 환경에서의 필요성으로 제안되었으며, 독립적인 위상복원회로를 결합한 형태를 가지고 있다. 반면, Treichler는 일정한 포락선을 갖는 신호에서의 다중경로에 의한 왜곡을 보상하기 위한 알고리즘으로서 제안되었다. 그림 2의 환경하에서 CMA의 비용함수와 계수 갱신 식은 다음과 같다.

$$J_{CMA} = E\{|y(k)|^2 - R_2\}^2 \quad (2.1)$$

R_2 는 식(2.2)로 정의되는 양의 상수이며,

$$R_2 = E\{|s(k)|^4\} / E\{|s(k)|^2\}^2 \quad (2.2)$$

$s(k)$, $y(k)$ 는 각각 전송된 데이터, 등화기의 출력이다.

$$D(k+1) = D(k) - \mu \cdot R^*(k) \cdot y(k)(|y(k)|^2 - R_2) \quad (2.3)$$

여기서, μ 는 스텝사이즈, $R(k)$ 는 등화기 입력신호, $D(k)$

는 등화기 필터 계수이며, 위상복원을 위해서는 식(2.4)와 같은 DPLL (Digital PLL)이 제안되었다.

$$\phi(k+1) = \phi(k) - \lambda_\phi \cdot \text{Imag}[\hat{s}(k)y^*(k)e^{j\phi(k)}] \quad (2.4)$$

여기서, $\phi(k)$ 는 k 번째 신호의 위상, $\text{Imag}[\]$ 는 허수성분을 취함을 나타내며, λ_ϕ 는 위상복원 회로를 위한 스텝사이즈이다. 일반적으로, 등화기와 위상복원을 결합한 수신기 구조를 고려할 때 주파수오프셋에 의한 영향을 줄이기 위해서, 등화과정 후에 위상복원을 수행한다. 그러나, 고차의 QAM 신호에 대해서는 심볼들의 간격이 조밀하므로 잡음의 영향에 민감하여 심볼의 판정 오차가 발생할 확률이 증가하므로 초기에 판정의 신뢰도가 큰 심볼에 대해서 PLL을 작동시키고 수렴해 감에 따라 모든 신호에 대해 PLL을 이용하는 RC-PLL (Reduced Constellation-PLL)[4]을 이용한다.

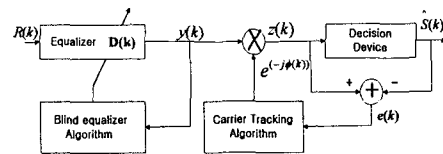


그림 2. 블라인드 등화와 결정지향 반송파 복원

2. Dual-Mode CMA 알고리즘

Weerackody와 Kassam이 제안한 DM-CMA[5]는 등화기 출력의 임의의 기준영역, D_L 을 설정해서 등화기 출력의 전력이 기준영역 안이면 RDE (Radius Directed Equalization)로 동작하고, 기준영역 밖이면 CMA로 동작하는 알고리즘이며, CMA에 비해 수렴속도와 잔류오차를 개선할 수 있다. 계수 갱신식은 식(2.2)를 영역에 따라 다음과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} D(k+1) &= D(k) - \mu \cdot R^*(k) \cdot y(k)(|y(k)|^2 - RL_i), y(k) \in D_L \\ D(k+1) &= D(k) - \mu \cdot R^*(k) \cdot y(k)(|y(k)|^2 - R_2), y(k) \notin D_L \end{aligned} \quad (2.5)$$

여기서, RL_i ($i=1,2,3,\dots,9$ for 64-QAM)는 등화기 출력의 전력 레벨에 가까운 기준 심볼의 전력 값이다.

3. Normalized CMA 알고리즘

NCMA[6]는 블라인드 등화기 본래의 느린 수렴특성을 개선하기 위해 스텝사이즈를 등화기 입력 신호 벡터길이의 자승으로 정규화 하므로써 수렴 속도를 향상시킬 수 있는 알고리즘이며, 다음과 같이 유도된다.

먼저 a posteriori 오차, $e(k)$

$$e(k) = |R(k)^T D(k+1)|^2 - R_C \quad (2.6)$$

를 영으로 하는 스텝사이즈 μ_{opt} 을 구하면,

$$\mu_{opt} = \frac{|y(k)| - \sqrt{R_C}}{\|R(k)\|^2 (|y(k)|^2 - R_C) |y(k)|} \quad (2.7)$$

가 된다. 여기서, $\|R(k)\|^2 = R(k)^T R(k)^*$ 이며, $\sqrt{R_C}$ 는 CM 레벨이다. 위의 식을 식(2.3)에 대입하고 알고리즘의 수렴특성을 조절하기 위해 새로운 스텝사이즈 β 를 사용하면 계수 갱신 식은 다음과 같은 NCMA가 된다.

$$D(k+1) = D(k) - \frac{\beta}{\|R(k)\|^2} R^*(k) y(k) \left(1 - \frac{\sqrt{R_C}}{|y(k)|}\right) \quad (2.8)$$

이제 NCMA가 수렴하기 위해 필요한 β 의 범위를 구하기 위해 $y(k) = R^T(k) D(k)$ 를 이용하면,

$$D(k+1) = \left[I - \frac{\beta}{\|R(k)\|^2} R^*(k) R^T(k) \right] \cdot D(k) + \frac{\beta}{\|R(k)\|^2} R^*(k) \frac{y(k)}{|y(k)|} \sqrt{R_C} \quad (2.9)$$

여기서 I 는 Identity Matrix이며, $R^*(k) R^T(k) / \|R(k)\|^2$ 는 Projection Matrix 이기 때문에 β 는 (0, 2) 사이의 임의의 값에서 수렴하며 $\beta=1$ 일 때 가장 빨리 수렴한다.

III. Selective NCMA(SNCMA) 알고리즘

오차 QAM 같은 다중레벨 신호원에 NCMA를 적용할 경우 식(2.8)의 오차함수 성분 $y(k)(1 - \sqrt{R_C}/|y(k)|)$ 이 영으로 수렴할 수 없고, $\beta=1$ 일 때 식(2.9)의 오른쪽 두 번째항의 성분이 계수 갱신의 횟수에 비례해서 계속 더해지기 때문에 발산하게 된다. 그러므로 $\beta < 1$ 의 값을 이용해야 하며, 이것은 NCMA의 수렴속도를 상대적으로 느리게 한다. 한편 NCMA를 신호의 기준레벨에 따라 식(3.1)과 같은 RDE로 동작시키면,

$$D(k+1) = D(k) - \frac{\beta}{\|R(k)\|^2} R^*(k) y(k) \left(1 - \frac{\sqrt{RL_i}}{|y(k)|}\right) \quad (3.1)$$

$$i = \arg \min_i \{ |y(k)| - \sqrt{RL_i} \}, (i=1, 2, 3, \dots, 9 \text{ for } 64\text{-QAM})$$

초기설정 계수 값이 눈이 열려 있는 (open-eye) 상태가 아닐 경우 수렴을 보장하지 못한다. 그러므로 본 논문에서는 다중레벨 신호원에서 최외각 심볼 중 신뢰할 수 있는 영역에 속한 등화기 출력신호에 대해 큰 스텝사이즈를 이용할 수 있는 NCMA를 적용하여 수렴속도를 개선할 수 있는 선

택적 NCMA (SNCMA) 알고리즘을 제안한다. SNCMA 알고리즘은 그림 3에서와 같이 64-QAM 신호원의 경우 최외각 심볼에 대한 신뢰레벨, T_L 을 설정하고, 등화기 출력 값이 신뢰레벨 이상일 경우, 최외각 심볼에 대해 올바른 결정을 내릴 수 있는 확률이 크므로 신뢰성 있는 NCMA로 적절히 동작할 수 있을 것이다. 이것은 [7]의 알고리즘에 대해서 수렴속도를 개선하기 위해서 Caution Level (CL)을 설정해 등화기 출력이 CL이상이면 큰 스텝사이즈를 이용하고, CL보다 작으면 작은 스텝사이즈를 이용하는 [8]에서 제안된 알고리즘과 비교할 수 있으며, SNCMA의 경우는 신뢰레벨이상의 신호원의 대해서 최적의 스텝사이즈 (가장 큰 스텝사이즈)를 이용할 수 있는 장점이 있다. 제안된 알고리즘을 CMA에 적용할 경우, 계수 갱신식 식(2.3)은 신뢰레벨에 따라 64-QAM 신호원의 경우, 다음과 같이 표현된다.

$$D(k+1) = D(k) - \frac{\beta}{\|R(k)\|^2} R^*(k) y(k) \left(1 - \frac{\sqrt{RL_9}}{|y(k)|}\right), |y(k)| \geq T_L$$

$$D(k+1) = D(k) - \mu \cdot R^*(k) \cdot y(k) (|y(k)|^2 - R_2), |y(k)| < T_L \quad (3.2)$$

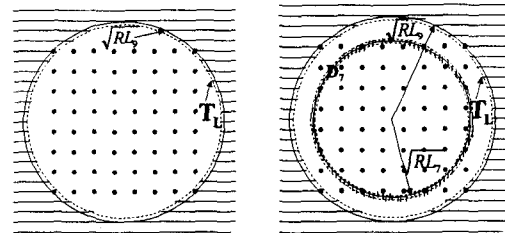
Dual-Mode CMA에 적용할 경우 식(2.5)는

$$D(k+1) = D(k) - \frac{\beta}{\|R(k)\|^2} R^*(k) y(k) \left(1 - \frac{\sqrt{RL_9}}{|y(k)|}\right), |y(k)| \geq T_L$$

$$D(k+1) = D(k) - \mu \cdot R^*(k) \cdot y(k) (|y(k)|^2 - RL_i), |y(k)| < T_L \text{ and } |y(k)| \in D_i$$

$$D(k+1) = D(k) - \mu \cdot R^*(k) \cdot y(k) (|y(k)|^2 - R_2), |y(k)| < T_L \text{ and } |y(k)| \notin D_i \quad (3.3)$$

로 나타낼 수 있다.



(a) CMA에 이용

(b) DM-CMA에 이용

그림 3. 64-QAM 경우의 SNCMA 알고리즘 신뢰구간

IV. 컴퓨터 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 환경은 [9]에서 설정한 환경으로서 신호원은 64-QAM 이며, 채널은 그림 5와 같은 임펄스 응답을 가진다. 등화기의 계수의 개수는 15개를 사용하고, 모든 등화기의 계수의 초기값은 중앙 탭을 '1'로 하고 나머지는 모두 0로 한다. CMA의 R_2 는 58이 되며, 등화기 스텝사이즈는 모두 0.000001, $\beta=1$ 이다. DM-CMA의 결정영역 D_L 은 ((1, 4), (8, 12), (16, 20), (24, 28), (32, 18), (46, 52), (56, 62), (70, 80), (92, 104))로 설정했다. SNCMA의 신뢰레벨, T_L 은 SNR 30dB에서 91, 위상복원 회로로 RC-PLL을 이용하고 위상복원 식의 스텝사이즈는 0.001을 사용했다. 그림 4는 독립적인 시뮬레이션을 200번 수행한 후 평균을 취하여 얻은 수렴곡선이다. SNCMA나 DM-SNCMA 모두 CMA나 DM-CMA에 비해 초기 수렴속도의 향상과 더불어 잔류오차의 레벨이 줄어듦을 관찰할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서 제안한 SNCMA는, 고차의 QAM 같은 NCM 신호원에 대해 적절히 동작할 수 없는 NCMA를 신뢰성 있는 등화기 출력 값을 이용해 선택적으로 적용 하므로써 CMA와 비교해 수렴속도와 잔류오차를 개선할 수 있음을 확인했다. 또한 정상상태에서의 잔류오차가 적은 DM-CMA 알고리즘에도 적용해 초기 수렴속도의 향상과 더불어 잔류오차도 상당히 줄일 수 있으므로 DM-CMA에 적용이 용이하다고 할 수 있다.

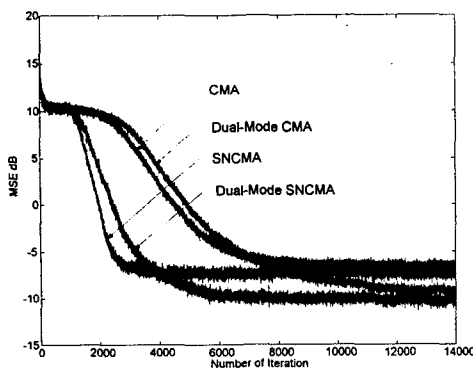


그림 4. 수렴곡선(SNR 30dB, 64-QAM)

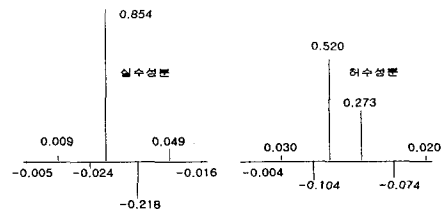


그림 5. 채널 임펄스 응답

참고문헌

- [1] Y. Sato, "A Method of Self Recovering Equalization for Multilevel Amplitude Modulation System," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. COM-23, no. 7, pp. 679-682 June 1975
- [2] D. N. Godard, "Self recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication system," *IEEE Trans. on Comm.*, vol. COM-28, no. 11, pp. 1867-1875, Nov. 1980
- [3] J. R. Treichler, M. G. Agee, "A New Approach to Multipath Correction of Constant Modulus Signals," *IEEE Trans on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, April 1983.
- [4] N.K. Jablin, "Joint Blind Equalization, Carrier Recovery, and Timing Recovery for High-Order QAM Signal Constellation," *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 40, no. 6, pp. 1383-1396, June. 1992
- [5] V. Weerackody and S.A. Kassam, "Dual-Mode Type Algorithms for Blind Equalization," *IEEE Trans. Comm* vol. COM-42, no. 6, pp. 22-28, Jan. 1994
- [6] K.Hilal and P.Duhamel, "A convergence study of the constant modulus algorithm leading to a normalized -CMA and a block-normalized-CMA," Belgium, Aug. 24-27, 1992, pp. 135-138.
- [7] G. Picchi, G. Prati, "Blind Equalization and Carrier Recovery Using a "Stop-and-Go" Decision-Directed Algorithm," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. COM-35, no. 9, Sept. 1987.
- [8] F. J. Ross and D. P. Taylor, "An Enhancement to Blind Equalization Algorithms", *IEEE Tr. on Comm.* Vol. 39, No. 5, May 1991.
- [9] 이영조, 임승주, 이재용, 강창연 "QAM 시스템에서 다단계 반경-지향 알고리즘을 이용한 블라인드 적응 등화", *한국통신학회 제22권 제9호* 1997. 09