

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.4.83>

JIIBC 2013-4-12

다중 스텝 크기 LMS를 이용한 MSAGF-MMA 적응 블라인드 등화의 성능 개선

Performance Improvement of MSAGF-MMA Adaptive Blind Equalization Using Multiple Step-Size LMS

정영화*

Young-Hwa Jeong

요 약 적응 블라인드 등화는 고속 디지털 데이터 전송시 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 최소화하는데 사용되고 있는 기법이다. 본 논문에서는 기존의 MSAGF-MMA 적응 블라인드 등화 알고리즘에 다중 스텝 크기 LMS를 적용함으로써 MSAGF-MMA 알고리즘의 성능을 더욱 개선시킨 등화 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 결정지향 크기 오차의 범위를 여러 개로 나누어 각각의 범위에 따라 스텝 크기를 달리 적용하는 다중 스텝 크기를 가지는 LMS 알고리즘을 MSAGF-MMA에 적용하였다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 제안한 알고리즘이 MMA나 MSAGF-MMA에 비해 수렴 속도 면에서나 정상상태에서의 잔류 심볼간 간섭 및 잔류 오차, 그리고 앙상블 평균 MSE등에서 크게 향상된 성능을 가짐을 확인하였다.

Abstract An adaptive blind equalization is a technique using to minimize the Inter-symbol Interference occurred on a communication channel in the transmission of the high speed digital data. In this paper, we propose a blind equalization more improving performance of the conventional MSAGF-MMA adaptive blind equalization algorithm by applying a multiple step size. This algorithm apply a LMS algorithm with a several step size according to each region divided by absolute values of decision-directed error to MSAGF-MMA. By computer simulation, it is confirmed that the proposed algorithm has a performance highly enhanced in terms of a convergence speed, a residual ISI and a residual error and an ensemble averaged MSE in a steady status compared with MMA and MSAGF-MMA.

Key Words : MMA, MSAGF-MMA, multiple step size, decision-directed error, ISI

1. 서 론

대부분의 유, 무선 디지털 통신 시스템에서 제한된 대역폭 또는 다중 경로 채널에 의해 야기된 인접 심볼간 간

섭(Inter-symbol Interference)문제가 대두된다. 이 문제를 해결하기 위한 방법 중의 하나로 채널 등화 방법을 사용하는데 시간에 따라 전달 특성이 변하는 채널에는 적응 등화 기법을 사용하고 있다. 특히 전송전에 훈련 열

*정희원, 남서울대학교 정보통신공학과
접수일자 : 2013년 6월 19일, 수정완료 : 2013년 7월 20일
게재확정일자 : 2013년 8월 16일

Received: 19 June, 2013 / Revised: 20 July, 2013 /

Accepted: 16 August, 2013

*Corresponding Author: yhjjeong@nsu.ac.kr

Dept. of Information & Communication, Namseoul University, Korea

(training sequence)을 통해 등화기 계수를 결정하는 데이터 의존 등화(data aided equalization)와는 달리 송신된 신호의 통계적 특성과 수신 신호만을 이용한 비선형 추정기(nonlinear estimator)를 사용하여 오차를 추정하는 적응 블라인드 등화 기법이 널리 이용되고 있다.

적응 블라인드 등화 기법은 어떤 특별한 비용 함수를 최적화시키는 비선형 추정기를 사용하여 추정된 오차 신호를 탭 갱신 식에 사용하느냐에 따라 그 성능이 달라지게 된다. 적응 블라인드 등화 기법은 Sato가 제안한 RCA^[1] 방식을 비롯하여 Godard^[2]가 제안한 CMA 이래로 많은 개선된 연구가 이루어져 왔다. 그중 MCMA^[3]와 MMA^{[4][5]}는 등화와 위상 복원을 동시에 행하는 알고리즘으로서 CMA의 단점을 보완한 알고리즘으로 알려졌다. 그밖에도 적응 블라인드 등화 기법에서 성능은 얼마나 빠른 정상상태로의 수렴 특성을 가지면서 정상상태에서의 오차 값의 변동이 작은가로 평가가 이루어지는데 이들 조건 모두를 만족시키기 위한 알고리즘들로서 이중 모드 블라인드 등화 알고리즘들^{[6][7][8]}이나 가변 스텝 크기(variable step size) LMS를 적용한 알고리즘들^{[9][10][11]} 등이 성능 향상을 위해 연구되어져 왔다.

본 논문에서는 MMA에 비해 더 좋은 성능을 가지는 MSAGF-MMA^[12]과 결정지향 오차의 크기를 이용하여 그 오차 크기 값의 범위에 따라 각각 스텝 크기 μ 값을 다르게 하는 다중 스텝 크기(multiple step size)를 가지는 LMS 알고리즘을 결합한 적응 블라인드 등화 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 다른 알고리즘들과 비교하여 훨씬 더 빠른 수렴속도를 가지면서도 정상상태에서 잔류 심볼간 간섭양 및 MSE 오차 값이 매우 작은 향상된 성능을 가지도록 고안하였다.

본 논문의 구성은 2장에서 MMA를 서술하고, 3장에서는 MSAGF-MMA를 서술한다. 4장에서 제안한 다중 스텝 크기 LMS를 가지는 MSAGF-MMA를 서술한다. 5장에서는 컴퓨터 모의실험 결과를 통하여 다른 적응 블라인드 알고리즘들과 제안한 알고리즘과의 성능을 비교, 분석한다. 마지막으로 6장에서 결론을 맺는다.

II. MMA(Multimodulus Algorithm)

MMA는 RCA와 CMA의 장점을 결합한 알고리즘으로서 CMA와 더불어 널리 사용되고 있는 방법이다. 이

알고리즘은 빠른 수렴속도를 가지며, 또한 CMA(Constant Modulus Algorithm)에서 요구되는 수렴 후 위상 복원 장치(phase-recovery device)를 필요치 않는 장점을 가진다.

MMA의 탭 갱신 알고리즘은 식 (1)과 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{c}_R(n+1) = \mathbf{c}_R(n) - \mu y_R(n)(y_R^2(n) - \gamma_{MMA}^2) \mathbf{r}^*(n) \quad (1)$$

$$\mathbf{c}_I(n+1) = \mathbf{c}_I(n) - \mu y_I(n)(y_I^2(n) - \gamma_{MMA}^2) \mathbf{r}^*(n) \quad (2)$$

여기서 ‘ R ’과 ‘ I ’는 실수 성분과 허수 성분을 각각 나타내며, $\mathbf{c}(n) = [c_0(n) \cdots c_{N-1}(n)]^T$ 는 등화기 계수 벡터, $\mathbf{r}(n) = [r(n) \cdots r(n-N+1)]^T$ 는 입력 신호 벡터, N 은 적응 등화기 계수의 수, 그리고 μ 는 스텝 크기이다. $y_R(n)$ 와 $y_I(n)$ 는 적응 블라인드 등화기 출력 $y(n)$ 의 실수와 허수 성분을 나타내며, 실수 상수 γ_{MMA}^2 는 식 (3)으로 부터 정의된다^[4].

$$\gamma_{MMA}^2 = \frac{E[a_R^4(n)]}{E[a_R^2(n)]} = (12m^2 - 7)/5 \quad (3)$$

여기서 $E[\bullet]$ 는 통계적인 기대값을, m 은 QAM 시스템에서의 심볼 레벨의 수를 나타낸다.

III. MSAGF-MMA(Modified Stop-and-Go Flagged MMA)

MSAGF-MMA^[12]는 MMA과 결정지향(Decision-Directed) 알고리즘에 의한 추정 오차 부호를 각각 비교하여 부호가 서로 같으면 ‘1’, 다르면 ‘0’을 가지는 이진 플래그 $f_{MSAG,R}(n)$ 과 $f_{MSAG,I}(n)$ 를 MMA와 결합한 알고리즘이다. 이 방법은 Stop-and-Go 알고리즘을 MMA에 적용한 것으로 더욱 신뢰성 있는 추정 오차를 탭 갱신에 제공함으로써 수렴 특성과 정상상태에서의 잔류 오차 특성에서의 성능을 향상시켰다.

MSAGF-MMA의 탭 갱신 식은 식 (4)과 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{c}_R(n+1) = \mathbf{c}_R(n) - \mu f_{MSAG,R}(n) e_{MMA,R}(n) \mathbf{r}^*(n) \quad (4)$$

$$\mathbf{c}_I(n+1) = \mathbf{c}_I(n) - \mu f_{MSAG,I}(n) e_{MMA,I}(n) \mathbf{r}^*(n) \quad (5)$$

여기서 이진 플래그 $f_{MSAG,R}(n)$ 과 $f_{MSAG,I}(n)$ 는 다음 식 (6)과 (7)로 정의된다.

$$f_{MSAG,R}(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}(e_{MMA,R}(n)) = \text{sgn}(e_{DD,R}(n)) \\ 0 & \text{if } \text{sgn}(e_{MMA,R}(n)) \neq \text{sgn}(e_{DD,R}(n)) \end{cases} \quad (6)$$

$$f_{MSAG,I}(n) = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}(e_{MMA,I}(n)) = \text{sgn}(e_{DD,I}(n)) \\ 0 & \text{if } \text{sgn}(e_{MMA,I}(n)) \neq \text{sgn}(e_{DD,I}(n)) \end{cases} \quad (7)$$

여기서 $\text{sgn}(\cdot)$ 는 signum 함수를 나타내며, $e_{MMA,R}(n)$ 과 $e_{MMA,I}(n)$ 는 MMA의 오차 신호를 각각 나타낸다. $e_{DD,R}(n)$ 과 $e_{DD,I}(n)$ 는 식 (8)과 (9)와 같이 결정지향(Decision-Directed) 알고리즘의 실수부와 허수부의 오차신호로서 원하는 출력과 등화기 출력과의 차로 얻어진다.

$$e_{DD,R}(n) = y_R(n) - \hat{y}_R(n) \text{sgn}(y_R(n)) \quad (8)$$

$$e_{DD,I}(n) = y_I(n) - \hat{y}_I(n) \text{sgn}(y_I(n)) \quad (9)$$

IV. 제안한 알고리즘

LMS 알고리즘에서 스텝 크기 값은 수렴 속도에 영향을 줄 뿐 아니라 한편으로는 정상상태(steady-state)에서의 잔류 오차에 크게 관계한다. 즉 스텝 크기 값을 크게 하면 수렴 속도는 빠르나 잔류 오차는 커지며, 반대로 스텝 크기 값을 작게 하면 수렴 속도는 느리지며 정상상태에서의 잔류 오차는 상대적으로 작아진다. 이러한 단점을 극복하고 빠른 수렴 속도를 가지면서 동시에 정상상태에서의 작은 잔류 오차를 가지도록 LMS 알고리즘의 탭 갱신식을 변형하였다.

제안한 알고리즘은 MSAGF-MMA^[12]에 단일 스텝 크

기 μ 값을 사용하는 LMS 알고리즘을 사용하는 탭 갱신식 대신에 결정 지향 오차의 크기 값 $|e_{DD}(n)|$ 를 이용하여 정해진 범위에 따라 스텝 크기 $\mu_1, \mu_1 \dots, \mu_k$ 값이 결정되는 다중 스텝 크기 LMS 알고리즘을 갱신식에 적용하였다.

본 논문에서는 결정 지향 오차의 크기를 $\mu(n)$ 값을 결정하는 기준으로 하였으며, 그 오차 크기 값에 따라 여러 범위로 나누어 각 범위에 들어 올 때에 실험에 따라 정해진 스텝 크기 $\mu_1, \mu_1 \dots, \mu_k$ 값을 각각 적용하여 탭 갱신을 수행한다.

$\mu(n)$, 즉 $\mu_1, \mu_1 \dots, \mu_k$ 값은 식 (10)에서와 같은 조건 범위를 통하여 결정된다.

$$\mu(n) = \begin{cases} \mu_1 & \text{if } |e_{DD}(n)| \geq \lambda_1 \\ \mu_2 & \text{if } \lambda_2 \leq |e_{DD}(n)| < \lambda_1 \\ \mu_3 & \text{if } \lambda_3 \leq |e_{DD}(n)| < \lambda_2 \\ \vdots & \vdots \\ \mu_k & \text{if } |e_{DD}(n)| < \lambda_{k-1} \end{cases} \quad (10)$$

여기서 $0 < \lambda_{k-1} < \lambda_{k-2} < \dots < \lambda_1 \leq 1$ 로 한다.

제한한 알고리즘의 탭 갱신 식은 식 (11)과 식 (12)와 같이 정의된다.

$$\mathbf{c}_R(n+1) = \mathbf{c}_R(n) - \mu(n) f_{MSAG,R}(n) e_{MMA,R}(n) \mathbf{r}^*(n) \quad (11)$$

$$\mathbf{c}_I(n+1) = \mathbf{c}_I(n) - \mu(n) f_{MSAG,I}(n) e_{MMA,I}(n) \mathbf{r}^*(n) \quad (12)$$

그림 1은 제안한 알고리즘에 대한 전체 블록도를 나타낸다. 그림에서 $a(n)$ 은 송신 신호를 나타내며, $h(n)$ 은 채널을, $c(n)$ 은 적응 블라인드 등화 필터 계수를, $r(n)$ 은 수신된 신호를 각각 나타내고 있다. 또한 $y(n)$ 은 등화기 출력으로서 $y(n) = y_R(n) + jy_I(n)$ 로 나타낸다. $g_1(\cdot)$ 과 $g_2(\cdot)$ 는 각각 다른 비선형 추정기를 나타내고 있다. $g_1(\cdot)$ 을 통하여 MMA의 오차 신호 $e_{MMA}(n) = e_{MMA,R}(n) + je_{MMA,I}(n)$ 를 얻을 수 있으며, $g_2(\cdot)$ 을 통하여 결정지향 알고리즘의 오차 신호 $e_{DD}(n) = e_{DD,R}(n) + je_{DD,I}(n)$ 를 얻을 수 있다.

V. 컴퓨터 모의실험 및 고찰

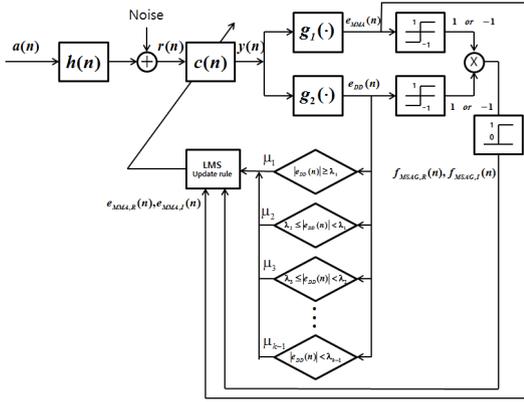


그림 1. 제안한 알고리즘의 전체 블록도
Fig. 1. A block diagram for the proposed algorithm

제안한 적응 블라인드 등화 알고리즘의 성능을 기존 알고리즘과 평가, 비교하기 위한 척도로 등화기 출력에서의 잔류 심볼간 간섭(residual ISI)과 양상불 평균 MSE를 사용하였다. 등화기 출력의 잔류 심볼간 간섭은 다음과 같은 식 (13)으로 정의된다^[13].

$$ISI = \frac{\sum_k [|h(n) \odot c^*(n)|^2] - |h(n) \odot c^*(n)|_{max}^2}{|h(n) \odot c^*(n)|_{max}^2} \quad (13)$$

여기서 \odot 는 컨볼루션 연산을 나타내며, $|h(n) \odot c^*(n)|_{max}^2$ 는 $h(n)$ 와 $c^*(n)$ 에 대한 컨볼루션의 모든 값 가운데 가장 최대 절대값이다.

양상불 평균 MSE는 다음 식 (14)와 같이 정의된다^[14].

$$MSE(n) = E[|y(n) - \hat{a}(n)|^2] \quad (14)$$

여기서 $y(n)$ 은 등화기 출력값, $\hat{a}(n)$ 은 전송된 심볼 $a(n)$ 의 추정값이다.

등화기로는 등화기의 중심 탭이 $1+j0$, 중심 탭을 제외한 모든 탭이 $0+j0$ 으로 초기화된^[15] 15차의 탭 길이를 가지는 횡단(transversal) 필터 구조의 복소 등화기를 적용하였다. 모의실험은 256-QAM 신호를 대상으로 [16]에서 이용한 채널에 대하여 실행하였다. 그림 2에서 256-QAM 신호에 대해 100회의 Monte Carlo 수행을 통

해 얻은 잔류 심볼간 간섭을 dB로 나타내었으며, 이때 SNR=40dB로 하였다. MMA에서 $m = 8$, γ_{MMA}^2 값은 식 (2)에 따라 152.2로 하였으며, 실수와 허수 성분 신호 레벨은 각각 $\pm 1, \pm 3, \pm 5, \pm 7, \dots, \pm 15$ 값을 가지도록 하였다. 스텝 크기 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$ 값들은 실험을 통하여 가능한 한 빠른 수렴 속도와 정상상태에서 작은 잔류 심볼간 간섭을 가지도록 최적 값을 실험을 통하여 정하였다. 본 논문에서는 실험을 통하여 MMA에서 $\mu = 3.0 \times 10^{-8}$ 로, MSAGF-MMA에서 $\mu = 8 \times 10^{-8}$ 로 정하였다. 그리고 제안한 알고리즘에서는 결정지향 오차 크기에 따라 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0.7, \lambda_3 = 0.5, \lambda_4 = 0.3$ 으로 하여 구간을 5개로 나누어 실험하였다. 여러 실험을 통하여 각각의 구간에 따라 제안한 알고리즘 1에서 $\mu_1 = 2.5 \times 10^{-7}, \mu_2 = 2 \times 10^{-7}, \mu_3 = 1 \times 10^{-7}, \mu_4 = 2 \times 10^{-8}, \mu_5 = 1 \times 10^{-9}$, 제안한 알고리즘 2에서 $\mu_1 = 2.5 \times 10^{-7}, \mu_2 = 2 \times 10^{-7}, \mu_3 = 1 \times 10^{-7}, \mu_4 = 5 \times 10^{-8}, \mu_5 = 2 \times 10^{-9}$, 그리고 제안한 알고리즘 3에서 $\mu_1 = 2.5 \times 10^{-7}, \mu_2 = 2 \times 10^{-7}, \mu_3 = 1 \times 10^{-7}, \mu_4 = 3 \times 10^{-8}, \mu_5 = 1 \times 10^{-9}$ 로 정하였다. 그림 2는 각 알고리즘에 대해서 30,000개의 반복횟수 실험을 통해 얻은 양상불 평균한 심볼간 간섭 결과를 비교하여 나타내었다.

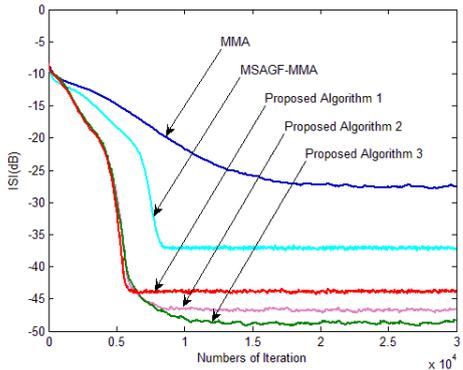


그림 2. 256-QAM 신호에 대한 양상불 평균한 심볼간 간섭 비교

Fig. 2. A comparison of an ensemble averaged ISI for 256-QAM signal

그림 2에서 보이듯이 MMA는 평균적으로 17000회 정도의 반복횟수에서 -26.9dB의 ISI 값을, MSAGF-MMA는 8500회 정도의 반복횟수에서 -37dB 정도의 ISI 값을 가지며 정상상태를 보인다. 이와 비교해서 제안한 알고리즘을 살펴보면 제안한 알고리즘 1은 256-QAM 신호를

등화하는데 6000회 정도의 반복횟수에서 -43.6dB 정도의 ISI 값을, 제안한 알고리즘 2는 8300회 정도의 반복횟수에서 -46.6dB 정도의 ISI 값을, 그리고 제안한 알고리즘 3은 10000회 정도의 반복횟수에서 -48dB 정도의 ISI 값을 가지며 정상상태를 유지함을 보인다. 그림에서 보이듯이 제안한 알고리즘 1의 경우 정상상태에서 MMA 보다도 16.7dB 더 작은 ISI 값을 가지며, MSAGF-MMA 보다는 6.6dB 더 작은 ISI 값을 가짐을 알 수 있다. 제안한 알고리즘 2의 경우 정상상태에서 MMA 보다도 19.7dB 더 작은 ISI 값을 가지며, MSAGF-MMA 보다는 9.6dB 더 작은 ISI 값을 가짐을 알 수 있다. 마지막으로 제안한 알고리즘 3의 경우 정상상태에서 MMA 보다도 21.1dB 더 작은 ISI 값을 가지며, MSAGF-MMA 보다는 11dB 더 작은 ISI 값을 가짐을 알 수 있다. 한편 수렴 속도면에서 보면 제안한 알고리즘 1의 경우 반복횟수 6000회 정도에 정상상태로 들어가게 되는데 이는 MMA 보다 11000회 정도, MSAGF-MMA 보다는 2500회 정도 더 빨리 정상상태에 들어가게 된다. 제안한 알고리즘 2의 경우에는 반복횟수 10300회 정도로 MMA 보다 반복횟수 6700회 정도, MSAGF-MMA 보다는 200회 정도 더 빨리 정상상태에 들어가는 것을 알 수 있다. 제안한 알고리즘 2의 경우는 반복횟수 10000회 정도로 MMA 보다 반복횟수 7000회 정도 빠르게, MSAGF-MMA 보다는 1500회 정도 느리게 정상상태에 들어가는 것을 볼 수 있다. 그림 3에서 보이듯이 오차 크기에 따라 구간을 나누어 스텝 크기를 적절히 달리 정함으로써 급격히 빠른 수렴 속도를 가지도록 하면서 정상상태로의 잔류 심볼간 간섭량의 크기를 조절할 수 있음을 확인하였다.

그림 3에서는 100회의 Monte Carlo 수행을 통해 얻은 앙상블 평균 MSE(Mean Square Error)에 대해 필터링을 거친 결과를 dB로 나타내었다. 그림 3에서 MMA는 17000회 정도의 반복횟수에서 -5.2dB의 평균 MSE 값을 보인다. MSAGF-MMA는 8500회 정도의 반복횟수에서 -12.9dB 정도의 평균 MSE 값을 가지며 정상상태를 보인다. 이와 비교해서 제안한 알고리즘 1에서는 6000회 정도의 반복횟수에서 -14.5dB 정도의 평균 MSE 값을, 제안한 알고리즘 2에서는 8300회 정도의 반복횟수에서 -15.1dB 정도의 평균 MSE 값을, 그리고 제안한 알고리즘 3에서는 10000회 정도의 반복횟수에서 -15.5dB 정도의 평균 MSE 값을 가지면서 정상상태를 유지함을 보인다.

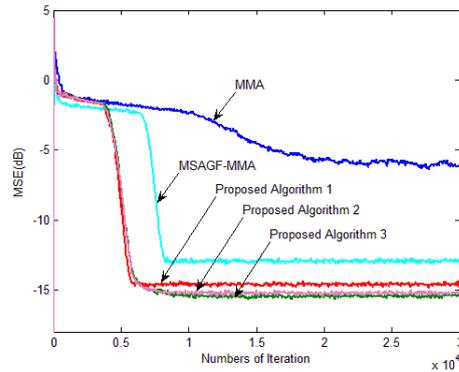


그림 3. 256-QAM 신호에 대한 앙상블 평균 MSE 비교
Fig. 3. A comparison of an ensemble averaged MSE for 256-QAM signal

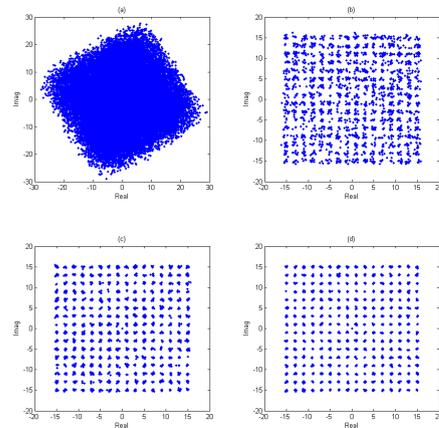


그림 4. 256-QAM 신호에 대한 신호점도
(a) 등화 전 (b) MMA (c) MSAGF-MMA (d) 제안한 알고리즘
Fig. 4. A constellation for 256-QAM signal
(a) Before an equalization (b) MMA (c) MSAGF-MMA (d) Proposed algorithm

그림 4에서는 256-QAM 신호를 채널에 통과하였을 때 등화 전과 등화 후의 신호점을 보인다. 그림 4-(a)는 등화 전의 신호점을 나타낸 것이고, 그림 4-(b)는 MMA의 등화 후 신호점을 나타낸 것이다. 그림 4-(c)는 MSAGF-MMA의 등화 후 신호점을 나타내었고, 그림 4-(d)는 제안한 알고리즘으로서 제안한 알고리즘 1의 등화 후 신호점을 나타내었다. 그림 4에서 제안한 알고리즘이 MMA나 MSAGF-MMA보다 뚜렷한 신호점을 형성함을 확인 할 수 있었으며, 이는 최종적으로 신호를 판단함에 있어 오류를 적게 할 수 있음을 의미한다.

VI. 결론

본 논문에서는 MSAGF-MMA에 결정지향 오차의 크기에 따라 여러 개의 구간을 설정하고 각각의 구간에 결정지향 오차 크기가 들어 왔을 때 구간마다 정해놓은 스텝 크기를 할당한 다중 스텝 크기를 가지는 LMS 알고리즘을 탭 갱신 식에 적용함으로써 성능을 크게 개선한 적응 블라인드 등화 알고리즘을 제안한다. 제안한 알고리즘은 MMA나 MSAGF-MMA보다 훨씬 빠른 수렴속도를 가지며, MMA나 MSAGF-MMA보다 상대적으로 정상상태에서의 잔류 오차 특성을 크게 향상 시키도록 고안되었다. 컴퓨터 모의실험을 통하여 256-QAM 시스템에서 정상상태로의 수렴 속도면에서 제안한 알고리즘 1과 비교했을 때 MMA보다 2.83배 더 빨랐으며, MSAGF-MMA와는 1.38배 더 빨랐다. MSAGF-MMA와 동일한 -37dB의 ISI에 도달하는데 있어서는 2300 반복 횟수정도 빠름을 보인다. 한편 정상상태에서의 ISI 값은 제안한 알고리즘 1이 MMA과 MSAGF-MMA와 비교하여 각각 16.7dB와 6.6dB 정도 더 작았다. 양상불 평균 MSE 값은 제안한 알고리즘 1이 MMA과 MSAGF-MMA와 비교하여 각각 9.3dB와 1.6dB 정도 더 작았다. 이상과 같이 수렴속도와 잔류 심볼간 간섭양 그리고 평균 MSE 값등을 종합하여 볼 때 제안한 알고리즘이 MMA나 MSAG-MMA등의 적응 블라인드 등화 알고리즘의 성능을 크게 개선하였음을 확인할 수 있었으며, 특히 수렴 속도면에서나 잔류 심볼간 간섭양면에서나 어느 쪽에 치우침 없이 뛰어난 성능을 가짐을 확인하였다.

Reference

[1] Y. Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude-Modulation System," *IEEE Trans, Commun.*, vol. COM-23, pp. 679-682, Jun. 1975.

[2] D.N.Golard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Comm. Systems," *IEEE Trans, Commun.*, vol.COM-28, no. 11, pp. 1867-1875, Nov. 1980.

[3] K.N. Oh and Y.O. Chin, "Modified Constant Modulus Algorithm: Blind Equalization and Carrier

Phase Recovery Algorithm," *Proc. 1995 IEEE Int. Conf. Commun.*, Seattle, WA, vol. 1, pp. 498-502, June. 1995.

- [4] J. Yang, J.-J. Werner and G. A. Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization algorithm," in *Proc. Int. Conf Digital Signal Processing*, vol. 1, pp. 127-130, July 1997.
- [5] J. Yang, J.-J. Werner, and G.A. Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization and its Generalized Algorithms," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, vol. 20, no. 5, June 2002, pp. 997-1015.
- [6] V. Weerackody and S. A. Kassam, "Dual-mode type algorithm for blind equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-42, pp.22-28, Jan. 1994.
- [7] R. A. Axford Jr., L. B. Milstein, and J.R. Zeidler, "A Dual-Mode Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals: CADAMA," *Proc. Asilomar-29*, vol.1, pp. 172-176. 1996.
- [8] L. M Garth, J. Yang, and J.-J. Werner, "Blind Equalizations for Dual-Mode CAP-QAM Reception," *IEEE Trans, Commun.*, vol. 49, no. 3, Mar. 2001, pp.455-466.
- [9] K.C. Hung, D. W. Lin, and C.N. Ke, "Variable-step-size multimodulus blind decision-feedback equalization for high-order QAM based on boundary MSE estimation," in *Proc. IEEE int. Conf. Acoust. Speech Signal Processing*, vol. 4, pp. 881-884, May 2004.
- [10] K.-C Hung, D. W. Lin, "A Hybrid Variable Step-Size Adaptive Blind Equalization Algorithm for QAM Signals," in *IEEE GLOBECOM 2005 proceedings.*, vol. 4, pp. 2140-2144, Dec. 2005.
- [11] D. Ashmawy, K. Banovic, E. Abdel-Raheem, M. Youssif, H. Mansour, M. Mohanna, "Joint MCMA and DD blind equalization algorithm with variable-step size," *Proceedings of 2009 IEEE I International Conference on Electro/Information Technology*, pp. 174-177, June. 2009.
- [12] Y.H Jeong, "A New Blind Equalization Algorithm

with A Stop-and-Go Flag," The Journal of Information Technology, KIITI, vol.8, No.3, pp.105-115, Sep. 2005.

[13] O. Shalvi and E. Weinstein, "New Criteria for Blind Deconvolution of Nonminimum Phase Systems (Channels)," *IEEE Trans. Inform. Theory*, pp.313-320, March 1990.

[14] 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.

[15] Z. Ding, et. al., "Ill-Convergence of Godard Blind Equalizers in Data Communication Systems." *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, no.9, pp.1313-1326, Sep, 1991.

[16] 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, pp. 877-887, Sep. 1987.

저자 소개

정영화(정회원)



- 1984년 2월 : 경희대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1986년 2월 : 경희대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사)
- 1998년 2월 : 경희대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학박사)
- 1994년 9월 ~ 현재 : 남서울대학교 정보통신공학과 교수

<주관심분야 : 전력선통신, 적응신호처리, 스마트그리드>

※ 본 연구는 2012학년도 남서울대학교 학술 연구지원비에 의해 연구되었음.