

## 변형된 CMA의 수렴상수 갱신 방법의 성능 비교

오길남<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>광주대학교 광통신공학과

### Performance Comparison of Step-Size Update Methods for Modified CMA

Kil Nam Oh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Dept. of Optical Communications Engineering, Gwangju University

**요 약** 변형된 CMA는 CMA에 비해 고차 신호점을 등화 시 보다 적은 수의, 균등한 간격을 갖는 모듈러스를 이용함으로써 정상상태 성능 개선과 고차 신호점에서의 확장이 용이하다. 본 논문에서는 변형된 CMA에 가변 수렴상수를 적용하여 정상상태 성능을 더욱 개선하여 다른 경관정 알고리즘으로의 전환 없이도 충분히 만족스러운 성능을 달성할 수 있음을 보인다. 새로운 두 가지 수렴상수 가변 방법을 제안하고, 이를 적용한 변형된 CMA의 성능 개선을 모의실험을 통해 CMA와 고정 수렴상수의 변형된 CMA에 대해 확인하였다.

**Abstract** Compared to the constant modulus algorithm (CMA), the modified CMA (MCMA) is easy not only to improve the steady-state performance but also to be expanded to higher-order constellations by using fewer moduli with evenly spaced. In this paper, it is shown that the MCMA is sufficient to achieve satisfactory steady-state performance by applying a variable step-size to the MCMA without switching to an hard decision-directed algorithm. Two new methods varying the step-size are proposed, and the performance improvement of the MCMA with the new methods of variable step-size is presented as compared to the CMA and the fixed step-size MCMA through computer simulations.

**Key Words** : Modified CMA, Variable step-size, Carrier phase rotation, QAM

#### 1. 서론

다중경로 전파 채널에 의해 왜곡된 수신 신호로부터 원래 송신된 신호를 복원하기 위해 등화(equalization)가 사용된다. 이때 미지의 채널 조건에서 수신 신호에 관한 통계적 특성만을 이용하여 신호의 왜곡을 제거하는 기법이 블라인드 등화(blind equalization)이다. 블라인드 등화 기법으로 잘 알려진 constant modulus algorithm(CMA)은 FSK(frequency shifting keying)나 PSK(phase shift keying)와 같이 신호가 일정 모듈러스(constant modulus: CM) 특성을 가지는 경우, 채널에 의해 훼손된 CM 특성을 복원함으로써 신호의 왜곡을 제거할 수 있다.

CMA[1]는 하나의 CM을 가지는 신호를 등화하는데 최적하지만 QAM(quadrature amplitude modulation)과 같

이 다중 모듈러스(multiple modulus: MM)를 가지는 신호에 대해서도 잘 적응된다. 그림 1에 보인 바와 같이 64-QAM 신호는 본래 9개의 다중 모듈러스를 가진다. 그러나 CMA에서는 그림에서 굵은 선으로 나타낸 하나의 CM을 기준신호로 사용한다. 즉 특별하게 정해지는 하나의 CM을 기준신호로 사용하여 비용함수를 정의한다.

그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 CMA는 QAM 신호에 대해서, 특히 신호가 고차레벨인 경우에, 실제 신호 점과 기준신호와의 불일치로 인하여 등화기 탭 계수의 심한 오조정을 보인다. 이는 CMA가 하나의 CM을 기준신호로 사용하여 눈모형을 열리게 하는 능력을 가지는 것에 대한 대가이다. 따라서 CMA에 의해 눈모형이 어느 정도 열린 후에는 다른 알고리즘으로 전환하여 정상상태 오차 레벨을 줄이는 것이 일반적이다[2]. 정상상태 오차

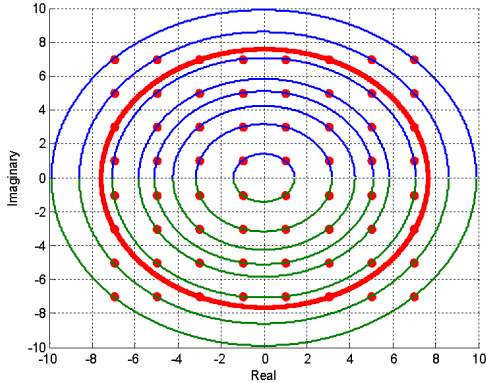
\*교신저자 : 오길남(knoh@gwangju.ac.kr)

접수일 11년 07월 25일

수정일 11년 08월 29일

게재확정일 11년 09월 08일

레벨을 줄이는 다른 방법으로는 알고리즘의 수렴상수를 작게 하는 것이 가능하나, 이는 수렴 속도의 저하를 가져온다.



[그림 1] 64-QAM 신호점의 9개의 다중 모듈러스와 하나의 일정 모듈러스

[Fig. 1] Nine multiple moduli and a constant modulus for 64-QAM signal constellation.

이러한 수렴 특성과 함께 CMA는 비용함수(cost function)가 신호의 위상 정보를 포함하지 않게 정해지므로 phase blind 특성을 가진다. 그로 인해 등화기 출력 신호점은 채널에 의한 위상 회전 문제를 겪는다[3].

이상 언급한 CMA가 갖는 문제점을 개선하는 여러 가지 알고리즘과 등화 기법이 소개되었다. 특히 변형된 CMA(modified CMA: MCMA)가 제안되었으며[4], MCMA에서는 이차원 신호를 실수 성분과 허수 성분으로 분리하여 두 일차원 신호로 다룸으로써 등화와 함께 위상 복원을 달성하였다[5]. 그러나 MCMA도 CMA와 마찬가지로 일정 모듈러스를 기준 신호로 사용하는 점에서 정상상태 성능은 여전히 만족스럽지 못하다[5]. 따라서 MCMA의 블라인드 수렴 특성을 저해하지 않으면서 정상상태 오차 성능을 개선하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 다른 알고리즘과 결합하거나, 초기 수렴 이후에 다른 알고리즘으로 전환하지 않으면서 MCMA의 정상상태 성능을 효과적으로 개선하기 위한 방법으로, 수렴상수 가변 방법을 제안한다. 특히 MCMA의 수렴상수를 가변하는 두 가지 방법을 소개하고, 가변 수렴상수를 적용한 MCMA의 성능을 비교, 분석한다. 2장에서 MCMA를 간단히 소개하고, 3장에서 두 가지 수렴상수 가변 방법과 이를 적용한 MCMA를 기술한다. 4장에서 가변 수렴상수를 적용한 MCMA의 성능을 모의실험을 통해 평가하고, 5장에서 결론을 언급한다.

## 2. 변형된 CMA (MCMA)

복소 채널  $h_i$ 를 거쳐 등화기에 수신된 신호  $x_n$ 은

$$x_n = \sum_{i=0}^{L-1} h_i a_{n-i} e^{j\phi_n} + \eta_n \quad (1)$$

으로 주어진다. 즉 수신 신호  $x_n = x_{n,R} + jx_{n,I}$ 은 길이가  $L$ 인 채널의 임펄스 응답  $h_i, i = 0, 1, \dots, L-1$ ,와 송신 신호  $a_n = a_{n,R} + ja_{n,I}$ 의 컨볼루션 합에 잡음  $\eta_n$ 이 부가된 형태가 된다. 식 (1)에서는 채널에 의한 위상 회전  $e^{j\phi_n}$ 을 고려하였다. 등화기 출력 신호  $y_n$ 은

$$y_n = y_{n,R} + jy_{n,I} = X_n^T W_n \quad (2)$$

이 된다. 여기서  $X_n = [x_n, x_{n-1}, \dots, x_{n-N+1}]^T$ 은 탭 길이가  $N$ 인 등화기의 입력 데이터 벡터,  $W_n = [w_{n,0}, w_{n,1}, \dots, w_{n,N-1}]^T$ 는 등화기의 탭 계수 벡터이다.

MCMA[3-5]에서는 QAM 신호를 두 일차원 신호로 분리하고 각각에 대해 등화 과정을 진행한다. MCMA에서 비용함수는 (3)과 같이 등화기 출력 신호의 실수 성분에 대한 비용함수  $J_{n,R}$ 과 허수 성분에 대한 비용함수  $J_{n,I}$ 의 합으로 표현된다.

$$J_n = J_{n,R} + J_{n,I} \quad (3)$$

그러면  $J_{n,R}$ 과  $J_{n,I}$ 는 각각 다음으로 주어진다.

$$J_{n,R} = E[(y_{n,R}^2 - R_{2,R})^2] \quad (4)$$

$$J_{n,I} = E[(y_{n,I}^2 - R_{2,I})^2] \quad (5)$$

여기서 일정 모듈러스  $R_{2,R}$ 과  $R_{2,I}$ 는 각각 아래와 같이 정의된다.

$$R_{2,R} = \frac{E[a_{n,R}^4]}{E[a_{n,R}^2]} \quad (6)$$

$$R_{2,I} = \frac{E[a_{n,I}^4]}{E[a_{n,I}^2]} \quad (7)$$

등화기 출력  $y_n$ 이 송신 신호  $a_n$ 의 지연된 값에 근사 되도록 등화기를 적용하기 위해 SGD(stochastic gradient descent) 알고리즘을 적용하면, MCMA에서 등화기의 탭 계수는 다음 식으로 갱신된다.

$$W_{n+1} = W_n - \mu e_n X_n^* \quad (8)$$

여기서  $\mu$ 는 고정 수렴상수,  $e_n = e_{n,R} + j e_{n,I}$ 은 오차 신호로

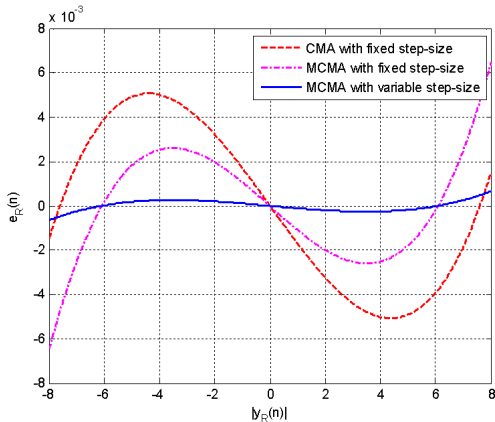
$$e_{n,R} = y_{n,R}(y_{n,R}^2 - R_{2,R}) \quad (9)$$

$$e_{n,I} = y_{n,I}(y_{n,I}^2 - R_{2,I}) \quad (10)$$

가 된다.  $X_n^*$ 은  $X_n$ 의 복소 공액(complex conjugate)을 나타낸다.

### 3. 가변 수렴상수 MCMA

MCMA의 탭 계수 갱신에 사용된 일정 모듈러스와 수렴상수는 알고리즘의 정상상태 성능에 영향을 미친다[6, 7]. 특히 신호가 다수의 레벨을 가지는 경우 오차신호가 매우 커지게 되어 정상상태에서 초과 평균제곱오차(excess mean square error)가 큰 수준에 이르게 된다. 이를 줄이기 위해서는 알고리즘의 수렴상수를 작은 범위로 제한해야 하므로 등화기가 더딘 수렴 속도를 갖는 것이 불가피하다. 그러므로 수렴상수는 잔류 오차와 수렴 속도를 절충해서 정해져야 한다.



[그림 2] CMA와 MCMA의 64-QAM 신호점에 대한 오차신호의 행적

[Fig. 2] Behavior of error signals of CMA and MCMA for 64-QAM signal constellation.

그림 2에 64-QAM 신호에 대해 나타난 오차신호의 행적에서 보는 바와 같이, 고정 수렴상수를 갖는 CMA와 MCMA는 큰 변동 범위에서 진동함을 알 수 있다. 한편

가변 수렴상수를 적용한 MCMA의 오차신호는 매우 작은 수렴상수의 효과에 의해 오차신호의 변동 범위가 크게 줄어든다. 그러므로 가변 수렴상수는 빠른 수렴과 동시에 작은 MSE의 기능을 갖는다[8, 9]. 아래에서 MCMA의 초기 수렴 특성을 유지하면서 정상상태 MSE를 효과적으로 줄이는 두 가지 수렴상수 가변 방법을 제안하고, 4장에서 그 성능을 비교한다.

#### 3.1 신뢰구간을 이용한 수렴상수 가변 알고리즘

등화가 진행되면 등화기 출력은 송신 심벌점을 중심으로 하는 군집을 형성하며, 등화기가 정상상태에 도달할수록 군집은 보다 뚜렷해진다. 등화기의 출력이 심벌점 주위의 한정된 신뢰구간(confidence zone)에 들면 등화기가 정상상태에 수렴하고 있다고 판단하여 수렴상수를 가변함으로써 정상상태 MSE를 줄일 수 있다.

제안하는 신뢰구간을 이용한 수렴상수 가변 알고리즘에서는 등화기 출력의 실수와 허수 성분 각각에 대한 일차원 정상도 상에서 등화기 출력이 심벌점을 포함하는 일정한 구간 즉 신뢰구간에 들어가는 경우와 그렇지 않은 경우로 나누어, 신뢰구간 내에 드는 경우 수렴상수를 가변하고, 그렇지 않으면 그대로 유지한다.

이때 신호의 실수와 허수 성분은 서로 통계적 독립이므로 실수 성분과 허수 성분 각각에 대해 수렴상수를 달리 적용하는 것이 타당하다. 그러면 제안 방식에서 탭 계수 벡터의 실수 성분에 대한 가변 수렴상수  $\mu_{n,R}$ 과 허수 성분에 대한 가변 수렴상수  $\mu_{n,I}$ 는 각각 다음으로 갱신된다.

$$\mu_{n+1,R} = \mu_{n,R} - \lambda(\log_{10} n) \mu_{n,R}, \text{ if } |\varepsilon_{n,R}| < C_R \quad (11)$$

$$\mu_{n+1,I} = \mu_{n,I} - \lambda(\log_{10} n) \mu_{n,I}, \text{ if } |\varepsilon_{n,I}| < C_I \quad (12)$$

여기서  $C_R$ 과  $C_I$ 는 각각 신호의 실수와 허수 성분에 대한 신뢰구간 값이다.  $\varepsilon_{n,R}$ 과  $\varepsilon_{n,I}$ 는 각각 등화기 출력의 실수와 허수 성분과 그에 대한 추정 심벌점과의 차이를 나타내며, 다음과 같이 계산된다.

$$\varepsilon_{n,R} = y_{n,R} - \hat{a}_{n,R} \quad (13)$$

$$\varepsilon_{n,I} = y_{n,I} - \hat{a}_{n,I} \quad (14)$$

여기서  $\hat{a}_{n,R}$ 과  $\hat{a}_{n,I}$ 는 각각 송신 심벌의 실수와 허수 성분에 대한 추정 심벌점이다. 따라서 등화기 탭 계수 벡터는 다음 식에 의해 갱신된다.

$$W_{n+1} = W_n - (\mu_{n,R}e_{n,R} + j\mu_{n,I}e_{n,I})X_n^* \quad (15)$$

이때  $e_{n,R}$ 과  $e_{n,I}$ 는 각각 (9)와 (10)으로 주어진다.

식 (11)과 (12)에서, 수렴상수는 현재 등화기 출력의 실수와 허수 성분이 각각 신뢰구간에 들 때에 한하여 현재 수렴상수에서 일정 비율만큼 감소된다. 여기서 일정 비율은 현재의 수렴상수에 수렴상수 갱신의 속도를 조절하기 위한 forgetting factor  $\lambda$ 와  $\log_{10}n$ 을 곱한 것으로 정해진다.  $n$ 은 현재의 iteration 수를 나타낸다. 신뢰구간 범위는, 모의실험에 의하면, 64-QAM에서는  $C_R = C_I = 0.0625$ , 256-QAM에서는  $C_R = C_I = 0.125$ 로 설정하는 것이 가장 좋은 성능을 보였다. 이것은 실험 결과로서, 이를 결정하는 방법은 추후 연구과제이다. 신뢰구간을 이용한 수렴상수 가변 방법은 구현 단순성이 장점이다.

### 3.2 오차 제어를 이용한 수렴상수 가변 알고리즘

등화기가 정상상태에 수렴하고 있는가를 판단하는 다른 방법으로, 등화기 출력 신호의 오차를 이용할 수 있다. 즉 오차가 감소하는 추세이면 등화기가 정상상태에 수렴하고 있는 것으로 판단하여 수렴상수를 가변함으로써 정상상태 성능을 더욱 개선할 수 있다.

제안 방법에서는 MCMA의 정상상태 성능을 개선하기 위해 추정 오차를 이용한다. 즉 등화기 출력 신호의 모듈러스와 신호점의 일정 모듈러스의 차의 제곱을 관찰하고 이것의 추세를 파악하여, 오차가 개선되고 있으면 수렴상수를 가변하고 그렇지 않으면 그대로 유지한다. 그러면 신호와 탭 계수 벡터의 실수와 허수 성분에 대한 가변 수렴상수는 각각 다음으로 주어진다.

$$\mu_{n+1,R} = \mu_{n,R} - \lambda(\log_{10}n)\mu_{n,R}, \text{ if } \epsilon_{n,R} < \epsilon_{n,R}^{MA} \quad (16)$$

$$\mu_{n+1,I} = \mu_{n,I} - \lambda(\log_{10}n)\mu_{n,I}, \text{ if } \epsilon_{n,I} < \epsilon_{n,I}^{MA} \quad (17)$$

여기서  $\epsilon_{n,R}$ 과  $\epsilon_{n,I}$ 는 각각 등화기 출력의 실수와 허수 성분에 대한 오차 제곱 값으로 다음으로 주어진다.

$$\epsilon_{n,R} = (y_{n,R}^2 - R_{2,R})^2 \quad (18)$$

$$\epsilon_{n,I} = (y_{n,I}^2 - R_{2,I})^2 \quad (19)$$

식 (16)과 (17)에서  $\epsilon_{n,R}^{MA}$ 과  $\epsilon_{n,I}^{MA}$ 는 오차 제곱 즉  $\epsilon_{n,R}$ 과

$\epsilon_{n,I}$ 에 대한 이동 평균(moving average: MA)으로, 실수와 허수 성분에 대해 각각 아래와 같이 정의된다.

$$\epsilon_{n,R}^{MA} = \frac{1}{M} \sum_{i=n-M+1}^n \epsilon_{i,R} \quad (20)$$

$$\epsilon_{n,I}^{MA} = \frac{1}{M} \sum_{i=n-M+1}^n \epsilon_{i,I} \quad (21)$$

그러면 가변 수렴상수 (16)과 (17)을 이용하여 등화기 탭 계수 벡터는 (15)와 같이 갱신된다.

제안한 오차 제어를 이용한 수렴상수 가변 방법에서는, 식 (16)과 (17)에 따라 등화기 출력의 실수와 허수 성분으로부터 구한 오차 제곱이 그 오차 제곱의 이동평균보다 작으면 수렴상수를 일정 비율만큼 가변하고 그렇지 않으면 유지한다.

식 (20)과 (21)로 주어진 이동평균은 윈도우 길이  $M$ 을 가진다. 모의실험에서는  $M=2$ 에서 최선의 성능을 보였다. 다음 4장에서, 제안한 두 수렴상수 가변 방법을 적용한 MCMA의 성능을 비교한다.

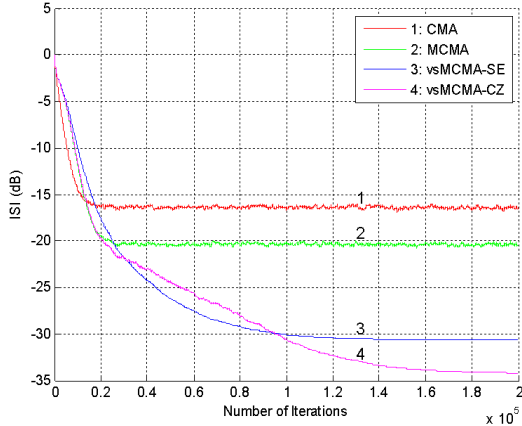
## 4. 모의실험 및 분석

제안한 두 수렴상수 가변 방법의 성능을 비교하기 위해 64-QAM과 256-QAM에 대해 잔류 ISI(intersymbol interference) 성능과 심벌 오류 확률(symbol error rate: SER)을 평가하였다. 제안한 두 가지 가변 수렴상수를 적용한 MCMA와 고정 수렴상수를 갖는 MCMA, 그리고 CMA를 성능 평가에 포함하였다. 모의실험을 위해 위상 회전을 발생시키는 다중경로 채널[10]을 사용하였으며, CMA는 SER을 구하기 전에 위상 복원 회로를 거쳤으나 MCMA 계열은 등화와 동시에 위상 복원이 이루어지므로 위상 복원 회로가 불필요하였다.

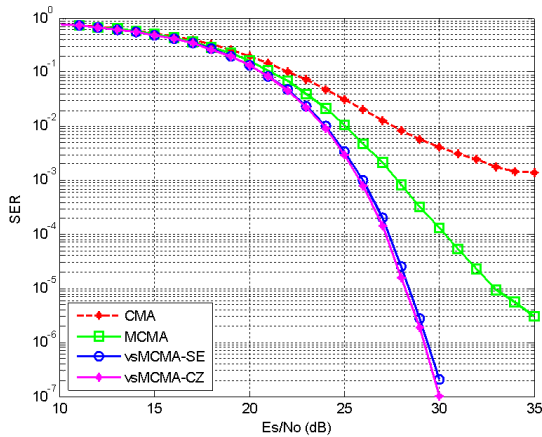
먼저 64-QAM에 대하여  $E_s/N_0 = 35\text{dB}$ 에서의 잔류 ISI 성능과 SER 성능을 각각 그림 3과 4에 나타내었다. 잔류 ISI 성능에서, 고정 수렴상수 MCMA가 CMA를 약 4dB 정도 개선하였고, 다시 고정 수렴상수 MCMA를 가변 수렴상수 MCMA가 10~14dB 정도 개선하였다. 신뢰구간을 이용한 가변 수렴상수를 적용한 MCMA(vsMCMA-CZ)가 오차 제어를 이용한 가변 수렴상수 MCMA(vsMCMA-SE)를 다소 개선하였으며, 가장 우수한 성능을 보였다.

SER 성능에서는 uncoded SER 성능을 평가하였다. 그림 4에서  $10^{-3}$ 의 SER을 얻는데 요구되는  $E_s/N_0$ 가

CMA는 35dB, 고정 수렴상수 MCMA는 28dB, 제안한 가변 수렴상수 MCMA는 두 방식 모두 26dB 정도를 보이고 있다. 또한 CMA와 고정 수렴상수 MCMA는 가변 수렴상수 MCMA와는 달리  $E_s/N_0$ 가 증가하여도 SER은 크게 개선되지 않는다.



[그림 3] 64-QAM 신호점에 대한 잔류 심벌간 간섭 성능,  $E_s/N_0 = 35\text{dB}$   
 [Fig. 3] Residual ISI performance for 64-QAM signal constellation,  $E_s/N_0 = 35\text{dB}$ .



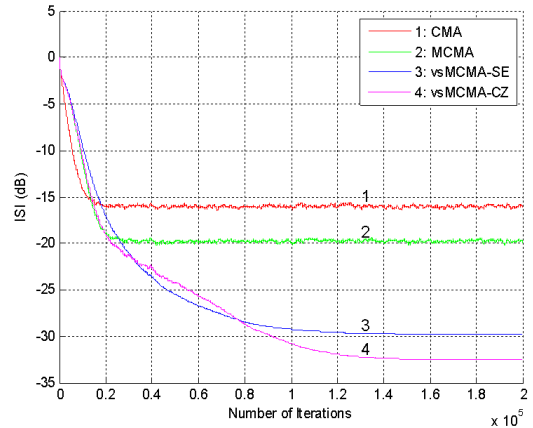
[그림 4] 64-QAM 신호점에 대한 심벌 오류 확률  
 [Fig. 4] SER for 64-QAM signal constellation.

다음, 256-QAM에 대해  $E_s/N_0 = 40\text{dB}$ 에서의 잔류 ISI와 SER 성능을 각각 그림 5와 6에 제시하였다. 64-QAM에서와 마찬가지로 고정 수렴상수 MCMA가 CMA를 약 4dB 정도 개선하였고, 다시 고정 수렴상수 MCMA를 가변 수렴상수 MCMA가 10 ~ 12.5dB 정도 개선하였다. 가변 수렴상수를 적용한 MCMA에서는 신뢰

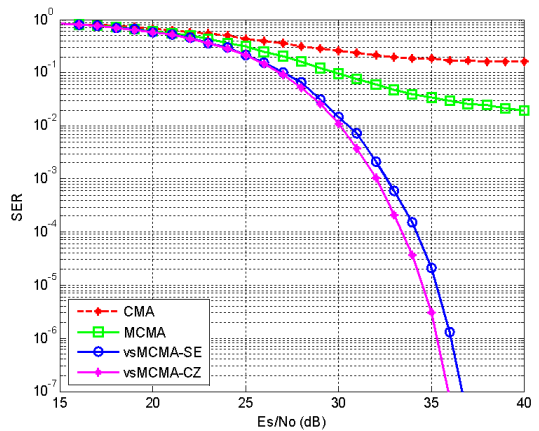
구간 방식(vsMCMA-CZ)이 오차 제곱 방식(vsMCMA-SE)에 비해 다소 우수한 성능을 보였다.

SER 성능에서는, CMA와 고정 수렴상수 MCMA는  $E_s/N_0 = 40\text{dB}$  이상에서 각각  $10^{-1}$ 과  $10^{-2}$  정도의 SER에 머무는 오차 마루(error floor) 현상을 보였다. 그러나 제안한 가변 수렴상수 MCMA는  $E_s/N_0$ 가 증가함에 따라 SER이 급격히 개선되었다.

실험 결과 제안한 가변 수렴상수를 적용한 MCMA는 정상상태에서의 잔류 ISI 성능과 SER 성능에서 CMA와 고정 수렴상수 MCMA의 성능을 크게 개선하였으며, 제안한 두 수렴상수 가변 방법 간의 성능 차이는 두드러지지 않은 것으로 나타났다.



[그림 5] 256-QAM 신호점에 대한 잔류 심벌간 간섭 성능,  $E_s/N_0 = 40\text{dB}$   
 [Fig. 5] Residual ISI performance for 256-QAM signal constellation,  $E_s/N_0 = 40\text{dB}$ .



[그림 6] 256-QAM 신호점에 대한 심벌 오류 확률  
 [Fig. 6] SER for 256-QAM signal constellation.

## 5. 결론

변형된 CMA의 정상상태 성능을 개선하는 두 가지 수렴상수 가변 방법을 제안하였다. 다중경로 채널에서 64-QAM과 256-QAM 신호점에 대한 잔류 ISI와 SER 성능 검증에서 제안한 수렴상수 가변 알고리즘을 적용한 MCMA는 고정 수렴상수 MCMA와 CMA의 성능을 크게 개선하였다. 제안 방법은 정상상태 성능을 개선하기 위해 초기 수렴 후 다른 경관정 알고리즘으로 전환하지 않고도 만족스러운 정상상태 성능을 달성하였다. 제안 알고리즘은 고차 QAM 신호에 대한 블라인드 등화에 적합하므로 64-QAM과 256-QAM의 응용 분야인 CATV용 케이블 모뎀 등에 활용 가능할 것이다.

## References

- [1] C.A.R. Fernandes, G. Favier, and J.C.M. Mota, "Decision directed adaptive blind equalization based on the constant modulus algorithm," *Signal, Image and Video Processing*, vol. 1, no. 4, pp. 333-346, 2007.
- [2] B.Q. Ali and A. Zerguine, "A generalized dual mode blind equalization scheme with carrier recovery," in *Proc. EUSIPCO*, Antalya, Turkey, Sept. 2005.
- [3] D. Ashmawy, K. Banovic, E. Abdel-Raheem, M. Youssif, H. Mansour, and M. Mohanna, "Joint MCMA and DD blind equalization algorithm with variable-step size," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electro/Information Technology*, pp. 174-177, 2009.
- [4] J.-C. Lin, "Blind equalisation technique based on an improved constant modulus adaptive algorithm," in *IEE Proc. Commun.*, vol. 149, no. 1, pp. 45-50, Feb. 2002.
- [5] K.N. Oh and Y.O. Chin, "Modified constant modulus algorithm: Blind equalization and carrier phase recovery algorithm," in *Proc. IEEE ICC*, vol. 1, pp. 498-502, Seattle, June 1995.
- [6] W. Xue, X. Yang, and Z. Zhang, "A variable step size algorithm for blind equalization of QAM signals," in *Proc. Progress in Electromagnetics Research Symposium*, Cambridge, USA, pp. 271-275, 2010.
- [7] V. Zarzoso and P. Comon, "Optimal step-size constant modulus algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 56, no. 1, pp. 10-13, Jan. 2008.
- [8] J. Jusak, Z.M. Hussain, and R. Harris, "A high performance blind adaptive filtering algorithm," in *Proc. 2nd WSEAS ICECS*, 2003.
- [9] S. Haykin, *Adaptive filter theory*, 4th Ed., Prentice Hall,

New Jersey, 2002.

- [10] 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, Sept. 1987.

오길남(Kil Nam Oh)

[정회원]



- 1982년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학사)
- 1984년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 경희대학교 전자공학과 (공학박사)
- 1984년 3월 ~ 2000년 2월 : 한국전자통신연구원 책임연구원
- 2000년 3월 ~ 현재 : 광주대학교 광통신공학과 교수, 학과장

<관심분야>

블라인드등화, 통신신호처리, OFDM