

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.2.79>

IIBC 2019-2-11

# QAM 신호 전송에서 CM-MMA와 RMMA 블라인드 등화 알고리즘의 성능 비교

## A Performance Comparison of CM-MMA and RMMA Blind Equalization Algorithm in QAM Signal Transmission

임승각\*

Seung-Gag Lim\*

**요약** 본 논문은 QAM 신호의 전송시 비선형 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 최소화시켜 QoS를 개선할 수 있는 블라인드 등화 알고리즘인 CM-MMA (Constellation Matching-MMA)와 RMMA (Region-based MMA)의 성능 비교에 관한 것이다. 적응을 위한 탭 계수 갱신에서 CM-MMA는 기존 MMA 비용 함수에 sinusoidal power function의 constellation matching error 항을 추가되어 nonconstant modulus 신호의 오차를 이용하며, RMMA는 nonconstant modulus 등화기 출력 constellation를 4-QAM의 constant modulus 신호로 변환한 후 오차를 이용하게 된다. 이와 같은 오차 신호에 의해 이들은 상이한 적응 성능을 가지므로, 논문에서는 이들 알고리즘의 적응 등화 성능을 비교하며 이를 위하여 등화기 출력 정상도, 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 SER을 적용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 RMMA가 CM-MMA 보다 수렴 속도, 잔여량 및 잡음 강인성의 모든 성능에서 우월함을 알 수 있었다.

**Abstract** This paper compare the performance of CM-MMA (Constellation Matching-MMA) and RMMA (Region-based MMA) blind equalization algorithm for improve the QoS by minimizing the intersymbol interference that is occurred in nonlinear communication channel when transmitting the QAM signal. In the tap coefficient update for adaptive, CM-MMA use the error of nonconstant modulus signal adding the current MMA cost function and constellation matching error terms of sinusoidal power function, and the RMMA use the error by transforms the nonconstant modulus signal of equalizer output constellation to 4-QAM constant modulus signal. They has different equalization performance by these error signal, it were compared in this paper by simulation, and performance index such as output signal constellation of equalizer, residual isi, maximum distortion, SER curves are applied for this. As a result of computer simulation, the RMMA has more better performance in the every performance index, convergence speed, residual value, noise robustness compared to CM-MMA.

**Key Words** : MMA, CME, RMMA, residual isi, MSE

### 1. 서론

대역 제한 채널과 다중 경로 페이딩이 존재하는 비선

형 통신 채널에서 한정된 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있는 2차원 QAM 신호는 필수적이지만, 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 영향은 1차원보다 더욱 증가되므

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공  
접수일자 2019년 1월 8일, 수정완료 2019년 2월 23일  
게재확정일자 2019년 4월 5일

Received: 8 January, 2019 / Revised: 23 February, 2019 /

Accepted: 5 April, 2019

\*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

Dept. of Information and Communication, Kongju National University, Korea

로 비트 오류나 심볼 오류, 동기 이탈등의 원인이 되어 전송 시스템의 throughput, 제공 서비스의 QoS 및 최대 가용 전송율의 저하등의 원인이 된다<sup>[1]</sup>. 이를 최소화할 수 있는 방법으로 최근 널리 사용되는 것으로는 수신기에서 적응 등화기를 사용하는 것이다. 적응 등화기는 시스템이 초기화중 채널에서 장애가 발생하거나 채널 특성의 변화에 스스로 적응하면서 채널의 역전달 특성을 추적하여 이에 손상을 최소화할 수 있는 능력을 갖는 등화기로서 통신 시스템의 설계자들이 많은 관심을 갖는 분야이다. 그러나 스스로 적응 능력을 갖지만 학습예에 의존해야 하는 기존 등화 방식보다 적응 등화 성능이 열화되며, 16-QAM 신호와 같은 nonconstant modulus인 경우 성능 열화는 더욱 심해진다<sup>[2][3]</sup>. 블라인드 적응을 위한 알고리즘의 대표적인 방식으로 CMA, RCA 및 MMA등이 있으며 4-QAM과 같은 constant modulus 신호에서 최적의 등화 성능이 얻어지지만 16-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호에서는 열화된 등화 성능을 얻으므로 이를 개선하기 위한 여러 가지의 변형 알고리즘이 등장하였으며 CM-MMA와 RMMA를 들 수 있다<sup>[3][4]</sup>. CM-MMA는 기존 MMA의 비용 함수에 constellation matching이라고 하는 짝수승의 sinusoidal function항을 추가시킨 새로운 비용 함수를 갖게 하여 신호 성상도에 비용 함수를 matching시켜 16-QAM 신호의 전송에서 적응 등화 성능을 개선시키며<sup>[8]</sup>, RMMA는 16개의 신호 성상도를 4개의 신호 영역으로 분할한 후 영역별로 4-QAM의 constant modulus 신호로 변환하여 16-QAM 신호의 전송에서 적응 등화 성능을 개선시킨다<sup>[7]</sup>. 본 논문에서는 16-QAM 신호의 nonconstant modulus 특성을 갖는 경우에 각기 상이한 원리를 적용하여 블라인드 적응 등화 성능을 개선시키기 위해 등장한 이들 CM-MMA와 RMMA 알고리즘의 성능을 시뮬레이션을 통해 직접 비교한다. 논문의 구성으로 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템의 모델 및 이들 알고리즘에 대해 설명한 후, 3장에서는 시뮬레이션을 위한 과정과 결과를 제시하며, 4장에서는 최종 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 통신 시스템 모델

그림 1은 수신측에서 적응 등화기를 사용한 기저 대역

통신 시스템의 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 16-QAM의 기저 대역 신호  $s_k$ 를 전송하면 부호간 간섭을 발생시키는 임펄스 응답  $h_k$ 인 비선형 채널을 통하여 수신측에 전달되며, 이때 채널에서는 주어진 신호대 잡음비의 가우시안 잡음  $n_k$ 이 부가된다. 수신측에서 수신 신호  $r_k$ 는 계수가  $f_k$ 인 등화 필터에 인가되어 부호간 간섭 영향이 최소화된 출력 신호  $z_k$ 는 결정 장치 (decision device)를 통과하면서 최종적으로 송신 신호의 추정치  $\hat{s}_k$ 를 얻는다. 이 과정에서 등화 필터의 계수는 등화기 출력 신호  $z_k$ 와 결정 장치의 출력 신호  $\hat{s}_k$ 의 차이 신호를 이용하여 적응 알고리즘부에서 자동으로 계산되어져 다음 수신 신호  $r_{k+1}$ 의 부호간 간섭양을 최소화하는데 사용된다. 이상적으로 완전 등화가 이루어지는 경우 다음의 관계식이 성립된다.

$$h_k * f_k = \delta_k \tag{1}$$

$$H(\omega) \cdot F(\omega) = 1$$

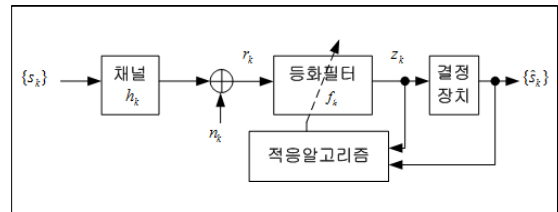


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델  
Fig. 1. Baseband Communication system model

### 2. Constellation Matching-MMA

CM-MMA는 MMA 비용 함수에 CME (Constellation Matching Error) 항을 부가하여 고차 QAM 신호의 2차, 4차 cumulant가 등화기 출력의 2차, 4차 cumulant와 일치시켜 적응 등화시 수렴 속도와 정상 상태 성능을 개선시킬 수 있다. CME는 등화기 출력이 관심있는 신호 성상도에 근접하도록 조정하며 uniform성, 대칭성과 QAM 신호점의 zero/maximum distance에서 zero/maximum penalty 특성을 만족한다. uniform성은 CME 함수는 많은 신호점중에서 특정 신호점에 집중되지 않음을 의미하며, 대칭성은 각 신호점 주위에서 대칭이어야 한다. 또한 신호점의 zero/maximum distance에서 zero/maximum penalty를 할당한다. 즉 등화기 출력이 직접 신호점에 일치될 때 zero penalty가 되며, 등화기 출력이 2개의 인접 심볼간의 중앙이 될 때 maximum penalty가 된다. 즉 등

화기 출력이 원하는 신호점이 되도록 비용 함수를 0으로 조절함을 나타내며, CM-MMA의 비용 함수와 오차 함수는 식(2)과 같이 정의된다.

$$J_{\text{CM-MMA}} = E[(|z_{kr}|^2 - R_{\text{MMA}}^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - R_{\text{MMA}}^2)^2 + \beta(g(z_{kr}) + g(z_{ki}))]$$

$$R_{\text{MMA}}^2 = \frac{E\{|s_{kr}^4|\}}{E\{|s_{kr}^2|\}} = \frac{E\{|s_{ki}^4|\}}{E\{|s_{ki}^2|\}}$$

(2)

여기서  $g(x)$ 는 constellation matching error 함수이며,  $\beta$ 는 진폭과 constellation matching error간을 절충하는 가중치이다. 식(2)의 비용 함수에서 앞의 두 개항은 기존 MMA의 비용 함수를 나타내고, 뒤 항은 CME를 나타내는데 각 신호점  $\pm 1, \pm 3$ 에서 0이 되도록 식(3)의 sinusoidal power function이 사용되며 되며 이를 그림 2에 나타내었다.

$$g(x) = 1 - \sin^{2n}\left(\frac{x\pi}{d}\right) \quad (3)$$

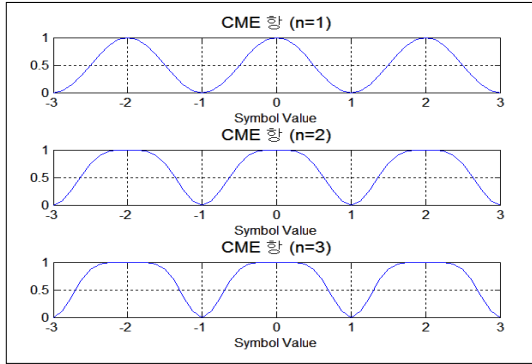


그림 2. CME 함수  
 Fig. 2. CME function

식 (2)에서  $\beta$ 를 적절하게 선정하면 초기의 과도 상태에서는 MMA 비용 함수가 적용된다. 초기에는 CME항은 등화기 출력에 가장 가까운 신호점이 실제의 신호점과 차이가 존재하는 정확한 오차 정보를 포함하지 않는다. 따라서 초기에는 MMA항은 등화기 출력의 dispersion이 최소가 되도록 올바른 방향으로 global 수렴이 일어나도록 한다. 초기 수렴이 끝나면, 등화기의 성능을 결정하는 CME항에 의해 올바른 오차값을 얻을 수 있도록 local 수렴이 일어나므로 개선된 등화 성능을 얻을 수 있게 된다. 이와 같은 개념을 이용하여 CM-MMA 등화기에서 필터의 계수는 다음과 같은 gradient 반복식으로 표현된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \nabla J_{\text{CM-MMA}}(f)|_{f=f_k} \quad (4)$$

여기서 비용 함수의 gradient는

$$\nabla J_{\text{CM-MMA}}(f) = E[(z_k(|z_k|^2 - R_{\text{MMA}}^2) + \beta n_k)^* r_k] \quad (5)$$

$$\phi_k = z_k(|z_k|^2 - R_{\text{MMA}}^2) + \beta n_k$$

$$n_k = -\frac{\pi}{2d}[\sin\left(\frac{z_{kr}\pi}{d}\right) + j\sin\left(\frac{z_{ki}\pi}{d}\right)]$$

의 관계가 있으므로, 이들을 조합하면 식(4)는 다음과 같이 된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \phi_k^* r_k \quad (6)$$

### 3. Region-based MMA

RMMA는 고차 QAM 신호에서 MMA의 nonconstant modulus를 등화에 적용하므로써 성능 저하의 문제점을 해결하기 위하여 Shalvi-Weinstein Algorithm의 등화 안정성과 nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로 변환하는 이중 모드 알고리즘이며 Normalized-CMA에서 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$f_{k+1} = f_k + \frac{\mu}{\delta + \|R_k\|^2} [d_k - z_k] R_k^* \quad (7)$$

$\delta$ 는 매우 작은 양의 정수,  $\|\cdot\|$ 은  $\cdot$ 의 euclidean norm이며  $d_k$ 와  $z_k$ 는 원하는 응답의 추정값을 나타내고 이들은 다음의 관계가 있다.

$$d_k = x_k z_k, \quad x_k = \begin{cases} \frac{(\alpha\sigma_s^2 - |z_k|^2)}{(\alpha\sigma_s^2 - R)} & |z_k|^2 \leq \alpha\sigma_s^2 \\ 0 & \text{기타} \end{cases} \quad (8)$$

$\sigma_s^2 = E[|s_k|^2]$ ,  $R = E[|s_k|^4]/E[|s_k|^2]^2$ ,  $\alpha=2$  또는  $3$ 이 된다. 식(7)의 Normalized-CMA를 MMA로 확장시켜 비용 함수를 적용하면  $d_k - z_k$ 를  $[d_{rk} + jd_{ik}] - [z_{rk} + jz_{ik}]$ 로 대체할 수 있다. 그림 3과 같이 복소 평면을  $M/4$  개의 4-QAM region으로 분할한 후 각 region  $A_k$ 는 4개의 심볼점을 포함하고 있으며, 그 중앙에는  $c_k = c_{rk} + jc_{ik}$ 라는 심볼점이 존재한다. 등화기 출력이 어느 region에 속하며, 그 중앙값을 알 수 있으므로, 식별된 region과 중앙값을 이용하여 다음의 변환이 필요하다. region 중앙값을 복소 평면 원점으로 이동시켜 4-QAM 신호로 취급하고, 변환 신호  $\bar{z}_k = \bar{z}_{rk} + j\bar{z}_{ik}$ 는  $\bar{z}_k = (z_{rk} - c_{rk}) + j(z_{ik} - c_{ik})$ 의 관계가 있으며, 변환된 후 특정 region내 심볼점인  $a_{km} = \pm 1 \pm j1$ 의 4-QAM 신호 형태가 된다. RMMA 알고리즘에서 변환에 의한 순간 비용 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{J} = \frac{1}{8} \sum_{l=1}^{M/4} \alpha_l [ |c_{Rl}| [1 - \overline{z_{Rkl}^2}]^2 + |c_{Il}| [1 - \overline{z_{Ilk}^2}]^2 ] \quad (9)$$

여기서 식별되어진 region  $A_k$ 에서는  $\alpha_l = 1$ 이 되며, 나머지 region에서는  $\alpha_l = 0$ 가 된다. 또한 곱셈 인자인  $|c_{Rl}|, |c_{Il}|$ 는 변환 이전의 region 정보를 제공하게 된다. 식 (9)의 순간 비용 함수에 의한 오차 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{e}_l(k) &= |c_{Rl}| [\overline{d_{Rl}}(k) - \overline{z_{Rl}}(k)] + j |c_{Il}| [\overline{d_{Il}}(k) - \overline{z_{Il}}(k)] \quad (10) \\ \overline{d_{Rl}}(k) &= \overline{x_{Rl}}(k) \overline{z_{Rl}}(k), \quad \overline{d_{Il}}(k) = \overline{x_{Il}}(k) \overline{z_{Il}}(k) \\ \overline{x_{Rl}}(k) &= 1.5 - 0.5 \overline{z_{Rl}^2}(k), \quad \overline{x_{Il}}(k) = 1.5 - 0.5 \overline{z_{Il}^2}(k) \end{aligned}$$

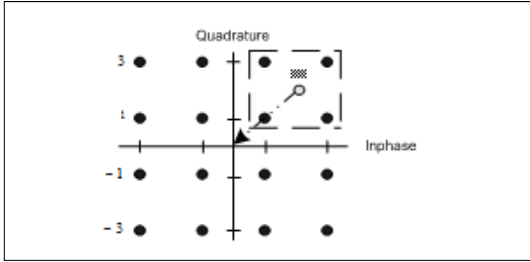


그림 3. RMMA의 신호점 변환  
Fig. 3. Signal point translation of RMMA

### III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

nonconstant modulus 특성을 갖는 16-QAM 신호에 대한 CM-MMA와 RMMA 적응 등화 알고리즘의 성능 분석을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위한 파라미터로 공통적으로 적응 등화 필터는 15차 FIR, SNR= 30dB이고, CM-MMA에서  $\beta = 63.7$ ,  $\mu = 1.5e-5$ , RMMA에서  $\delta = 1e-5$ ,  $\mu = 0.025$ 이다. 그림 4는 찌그러짐과 부호간 간섭을 발생시키는 채널의 임펄스 응답 계수  $h_k$ 를 나타낸 것이다. 송신측에서는 2000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 채널을 통과시키고 원하는 SNR을 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호  $r_k$ 를 얻었다. 이 신호를 이용하여 초기화된 적응 필터를 통과시켜 출력 신호  $z_k$ 를 얻은 후 결정 장치를 이용하여 송신 신호를 복원한  $\hat{s}_k$ 를 얻는다. 적응 등화기의 출력 신호  $z_k$ 를 이용하여 CM-MMA와 RMMA 알고리즘을 이용하여 등화기의 계수  $f_{k+1}$ 를 갱신한다.

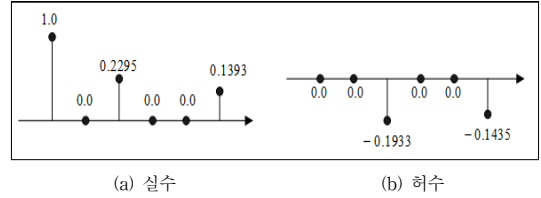
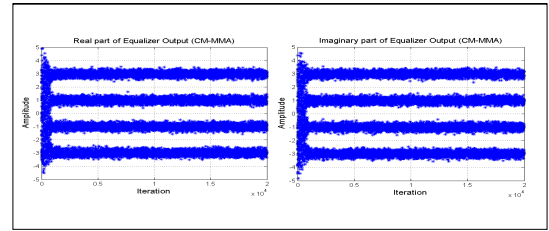
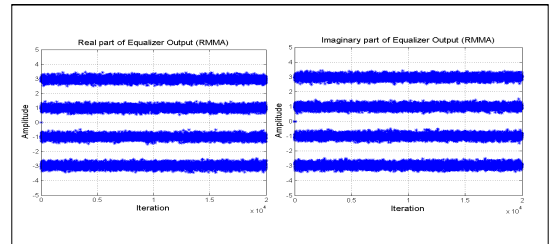


그림 4. 채널의 임펄스 계수  
Fig. 4. Impulse coefficient of channel

이들 알고리즘의 첫 번째 성능 비교를 위하여 적응 등화기 출력 신호의 정상도를 그림 5에 실수와 허수부로 분리하여 나타내었다. 그림에서 각 출력 신호점의 폭이 좁으면서, 신호점간의 간격이 클수록 우수한 등화 성능을 갖는다. 먼저 CM-MMA보다 RMMA가 각 신호점의 폭이 좁으면서, 각 신호점간 거리가 멀어짐을 알 수 있으므로 RMMA가 CM-MMA보다 우월하며, RMMA의 이중 모드 특성에 의해 초기부터 양호한 등화 성능을 갖는다.



(a) CM-MMA



(b) RMMA

그림 5. 등화기 출력 신호 정상도  
Fig. 5. Output signal constellation of equalizer

두 번째 수렴 성능 비교하기 위하여 잔류 isi, 최대 찌그러짐의 learning 곡선을 사용하였고 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 중요하다. 잔류 isi는 시간 영역에서 채널과 등화기의 계수는 완전 등화 상태에서 이론적으로 임펄스 특성을 가져야 하지만, 실제적으로는 이의 특성을 갖지 못하므로 이를 제외한 잔류 성분들의 전력 크기를 나타내며, 최대 찌그러짐은 잔류 성분들의 전압 크기

를 나타낸다. 이들 곡선에서 얻을 수 있는 것은 적응 초기의 과도 과정을 지나 특정한 레벨의 정상 상태 (stable state)에 도달할 때까지의 수렴 속도와 그 이후의 양이다. 특히 수렴 속도는 적응 등화기가 정상적으로 동작하는 중 채널의 상태가 급변하거나 순간적으로 절단되는 환경에서 이에 신속하게 적응하여 정상적인 통신이 이루어지기 위하여 소요되는 시간을 나타낸다. 그림 6은 반복 횟수에 대한 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 -20dB를 정상 상태로 설정할 때 CM-MMA는 1130회, RMMA는 788회에 달성하므로 이들의 수렴 속도는 RMMA가 CM-MMA보다 약 1.4배 정도 빠르며, 정상 상태 이후의 잔류량에도 적게 됨을 알 수 있다. 그림 7은 반복 횟수에 대한 최대 찌그러짐 성능을 나타낸 것으로서 -12dB를 정상 상태로 설정할 때 CM-MMA는 1355회, RMMA는 1158회에 달성하므로 약 1.2배 정도 빠르며, 정상 상태 이후의 잔류량에서도 적게 됨을 알 수 있다.

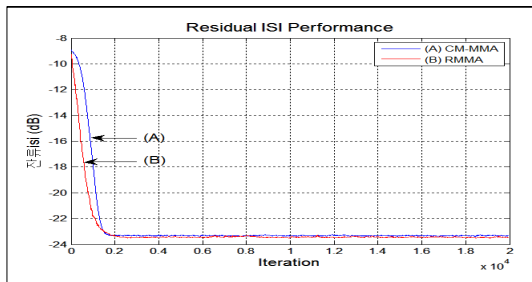


그림 6. 잔류 isi 성능  
 Fig. 6. Residual isi performance

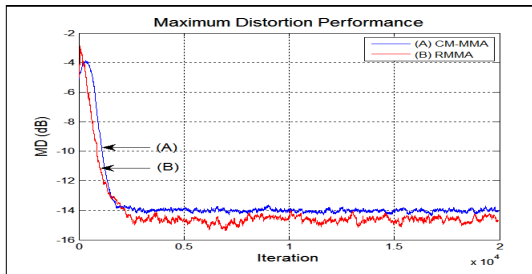


그림 7. 최대 찌그러짐 성능  
 Fig. 7. Maximum Distortion performance

마지막으로 비교를 위한 성능 지표로는 이들 적응 등화 알고리즘이 채널에서 부가되는 잡음에 대한 robustness를 알 수 있는 심볼 오류율 (SER)을 적용하였으며, 이를 그림 8에 나타내었다. 채널에서 부가되는 잡

음에 의한 SNR을 0 ~ 12dB 까지 2dB 단위로 변화시키면서 120,000개의 심볼을 전송하였으며, 이를 복원하여 이를 송신 심볼과 비교하였다. 시뮬레이션 결과 RMMA가 CM-MMA보다 오율 성능이 월등히 우수하여 SNR이 양호하지 않은 통신 채널에서 고품질의 디지털 부호 전송에서 유용하게 사용될 수 있는 알고리즘임을 알 수 있다.

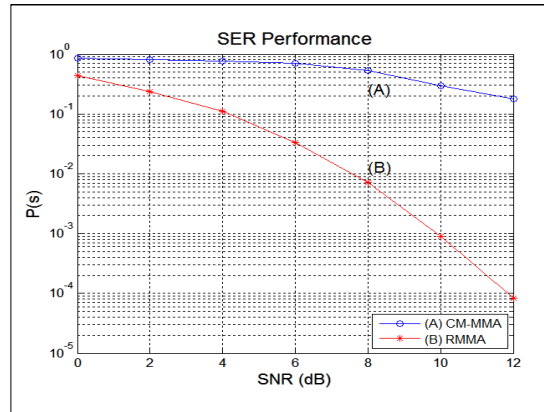


그림 8. SER 성능  
 Fig. 8. SER performance

#### IV. 결론

본 논문에서는 nonconstant modulus 특성을 갖는 고차 QAM 신호를 전송할 때 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 경감시키기 위하여 사용되는 CM-MMA와 RMMA 적응 등화 알고리즘의 성능을 비교하였다. CM-MMA는 기존 MMA의 비용 함수에 sinusoidal power function의 constellation matching error항을 부가시켜 기존 방식의 등화 성능을 개선하며, RMMA는 고차 QAM 신호를 영역 식별에 의해 4-QAM의 constant modulus 신호로 변환하는 비용 함수를 이용하여 등화 성능을 개선시키고 있다. 송신 신호로 16-QAM을 사용하여 동일 채널 환경에서 부호간 간섭을 부가시킨 후 이들 알고리즘을 적용하여 적응 등화 성능을 비교하였다. 이를 위하여 등화기 내부 성능 지표인 출력 신호 성장도, 잔류 isi와 최대 찌그러짐과 등화기 외부 성능 지표로서 알고리즘의 잡음에 대한 robustness를 나타내는 SER을 적용하였다. 내부 성능 지표에서 RMMA가 CM-MMA보다 우월함을 정성적, 정량적으로 확인하였고 외부 성능 지표인 SER에서도 내부 성능 지표와 동일한 결과를 얻었다. 특히 외부 성능

지수에서는 월등한 우월성을 얻을 수 있어서 잡음 지배적인 채널 환경에 적용 가능함을 알 수 있었다. 이와 같은 시뮬레이션 결과 충분한 송신 전력의 사용이 제한되거나 잡음이 지배적인 이동 통신과 같은 환경에서 전송 시스템의 성능을 개선시킬 수 있는 수신기의 요소 기술로서 널리 사용될 것이다.

Adaptive Equalization Algorithm in 16-QAM Signal”, Jour. of I.I.B.C., Vol.15, No.2, pp.99~104, Apr. 2015.

- [8] S.G.Lim, “A Performance Evaluation of Constellation Matching-MMA Adaptive Equalization Algorithm in QAM System”, Jour. of I.I.B.C., Vol.15, No.4, pp.105~110, Apr. 2015.

## References

- [1] J.Yang, J.J.Weren, G.A.Dumont, “The Multimodulus Blind Equalization Algorithm”, 13th Int. Conf. D.S.P. Processing, pp.127~130, 1997.  
DOI : 11.1109/ICDSP.1997.627988
- [2] Lin He, S.A.Kassam, “Convergence Analysis of Blind Equalization Algorithm using Constellation Matching”, IEEE Trans. on Com., Vol.56, No.11, pp.1765~1768, Nov. 2008.  
DOI : 10.1109/TCOM.2008.060370
- [3] Lin He, M.G.Amin, C.Reed, R.C.Malkemes, “A Hybrid Blind Equalization Algorithm for QAM Signals in Wireless Communications”, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.52, No.7, pp.2058~2068, July 2004.  
DOI : 10.1109/TSP.2004.828913
- [4] J.M.Filho, M.T.M.Silva, M.D.Miranda, V.H.Nascimento, “A Region-based Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals”, IEEE/15th workshop on statistical signal processing, pp.685~688, 2009.  
DOI : 10.1109/SSP.2009.5278484
- [5] R.Candido, M.T.M.Silva, M.D.Miranda, “A Statistical Analysis of the dual-mode CMA”, Proc. of IEEE Circuit & System, pp.2510~2513, June 2010.  
DOI : 10.1109/ISCAS.2010.5537119
- [6] S.G.Lim, D.S.Kang, “The Performance Improvement of CMA Blind Adaptive Equalizer using the Constellation Matching Method”, Jour. of I.W.I.T., Vol.10, No.1, pp.121~127, Feb. 2010.
- [7] S.G.Lim, “A Performance Evaluation of RMMA

## 저자 소개

### 임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업.
- 2005년 현재 공주대학교 정보통신공학부 교수.

• 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신