

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.2.99>

IIBC 2015-2-14

## 16-QAM 신호에서 RMMA 적응 등화 알고리즘의 성능 평가

### A Performance Evaluation of RMMA Adaptive Equalization Algorithm in 16-QAM Signal

임승각\*

Seung-Gag Lim\*

**요약** 본 논문에서는 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭 영향을 최소화시키기 위한 MMA 적응 등화 알고리즘의 성능을 개선시키기 위한 RMMA (Region based Multiple Modulus Algorithm) 알고리즘을 제안한다. RMMA 알고리즘에서는 적응을 위한 오차 신호를 얻기 위하여 등화기 출력 constellation을 4개의 영역으로 분할한 후 각 영역별로 4-QAM 신호로 매핑하므로써 nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로의 변환 효과를 얻으며, 이로 인하여 더욱 적은 오차 신호를 얻을 수 있게 된다. 논문에서는 제안 알고리즘인 RMMA의 적응 등화 성능을 평가하기 위하여 기존 방식인 MMA와 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 잔류 isi와 MD에서 수렴 속도와 잔류양에서 개선되었으며, 특히 SER에서 기존 MMA보다 월등함을 알 수 있었다.

**Abstract** This paper proposes the RMMA (Region based Multiple Modulus Algorithm) algorithm that is possible to improving the performance of MMA adaptive equalization algorithm in order to the reduction of intersymbol interference occurs at the communication channel. In RMMA algorithm, the output constellation of equalizer are divided by 4 different regions in order to get the error signal for adapting the channel characteristic, and the small error signal is obtained by mapping each region to 4-QAM signal. The conversion effect of constant modulus from nonconstant modulus signal was obtained. In this paper, the adaptive equalization performance of proposed RMMA were evaluated comared to the present MMA. As a result of computer simulation, the convergence speed and residual quantity were improved in residual isi and MD. Especially the superiorities of robustness was confirm in SER performance compared to present MMA.

**Key Words :** RMMA, residual isi, misadjustment, intersymbol interference, MSE

## 1. 서 론

유선과 무선의 bandwidth-efficient 전송에서 수신기에서 start-up은 AGC 회로의 셋팅, timing recovery와

적응 필터의 수렴이라는 3가지 과정을 통해 수행된다. 많은 응용에서 start-up은 수신기에서 이상적인 참조 신호로 학습열을 사용하는 것이다. 그러나 무선 이동 전송과 같이 학습열 사용이 불가능하거나 비효율적인 경우에는

\*정희원, 공주대학교 정보통신공학부  
접수일자 : 2015년 1월 13일, 수정완료 : 2015년 3월 2일  
게재확정일자 : 2015년 4월 10일

Received: 13 January, 2015 / Revised: 2 March, 2015 /  
Accepted: 10 April, 2015

\*Corresponding Author: [sglim@kongju.ac.kr](mailto:sglim@kongju.ac.kr)  
Dept. of Information and Communication, Kongju National  
University, Korea

blind로 수행된다. blind start-up의 가장 중요한 과정은 적응 등화기의 수렴이며, 이를 블라인드 등화라고 한다. 이상적인 참조 신호없이 수신기는 어떤 데이터가 송신되었는지 결정을 해야 하는데, 통상적으로 입력 신호에 slicer라고 하는 decision device를 사용하여 결정하고 있다. 이와 같은 결정은 수신 데이터에는 통신 링크에 의해 발생하는 찌그리짐에 의한 부호간 간섭의 영향이 포함되어 있으므로 매우 신뢰할 수 없는 잘못된 결정을 할 수 있다. 이와 같은 오판 가능성을 줄이기 위하여 blind algorithm이 등장하였으며, 대표적으로 CMA와 RCA 및 이들의 결합형인 MMA를 들 수 있다. 이들은 실제 데이터 전송의 응용에서 널리 사용되고 있으나, 고속 광대역의 전송율을 갖는 통신 시스템에서 서비스 품질 (QoS)의 요구와 throughput을 만족시킬 수 있도록 보다 단순하고 신뢰할 수 있는 등화 성능을 갖는 개선된 알고리즘이 요구되고 있다<sup>[1]</sup>. RCA는 단순하지만 신뢰할 수 없으며, CMA는 신뢰할 수 있지만 연산이 RCA보다 증가하며, MMA는 RCA보다 신뢰할 수 있으며, CMA보다 연산량을 줄일 수 있다. RCA와 CMA같은 blind algorithm은 blind 수렴 시간 동안 modulus 라는 통계적인 양만을 이용하기 때문에 데이터 신호의 통계적 특성에 관한 정보를 완전히 이용하지 못한다<sup>[2][3]</sup>. 반면 MMA는 초기 수렴을 달성하는데 multiple moduli를 사용하고 데이터 신호의 통계적 특성 정보를 더욱 이용하므로 매우 유연하며 nonsquare 또는 QAM 신호와 같은 2차원 전송 시스템의 응용이 용이하다. 대부분의 blind equalization algorithm에서 비용 함수를 최소화하며, 이의 최소값(잔류값)은 신뢰성과 해당 blind algorithm의 수렴 속도에 큰 영향을 끼친다. 예로 CMA, RCA, MMA에서 이 최소값은 전송 시스템의 대역폭 효율이 클수록 증가 (QAM 신호의 차수가 증가)되면서, misadjustment에 의한 등화 잡음이 발생되어 해당 알고리즘의 성능이 감소된다<sup>[5][6][8]</sup>.

본 논문에서는 MMA에서 QAM의 차수가 증가하는 nonconstant modulus 신호라도 4-QAM의 constant modulus 신호와 같이 비용 함수에 의한 오차 신호를 이용하도록 적응 등화 알고리즘을 개량한 RMMA (Region based MMA)의 등화 성능을 기존 MMA와 비교하며<sup>[4]</sup>, 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델과 제안 알고리즘에서 Region based 개념과 이를 적용한 RMMA 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션과 결과로서 주어진 통

신 채널과 신호대 잡음비에서 RMMA와 MMA 알고리즘들의 등화 성능을 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 적응 등화기를 사용한 일반적인 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 정보원 (source)로부터 발생된 데이터는 constellation mapping 과정을 통해 2차원 16-QAM 신호  $s(k)$ 를 발생한다. 이 신호는 송신 필터를 통과한 후 대역 제한과 다중 경로 전파를 나타내는 필터 모델인 임펄스 응답이  $h(k)$ 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 가우시안 잡음  $n(k)$ 가 부가된다. 수신측에 수신된 신호  $r(k)$ 는 임펄스 응답이  $f(k)$ 인 적응 등화기에 인가된다. 이때 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하며, 송신 신호가 받는 채널의 찌그리짐에 의한 부호간 간섭은 등화기에 의해 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치  $\hat{s}(k)$ 를 얻게 된다.

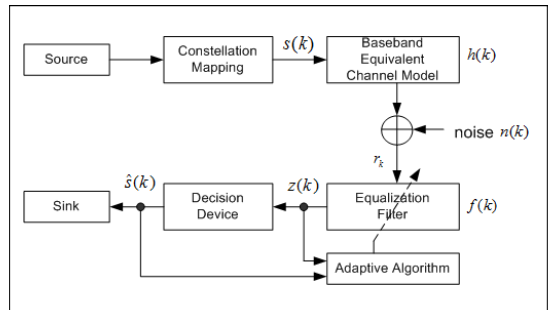


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델  
Fig. 1. Baseband communication system model

### 2. Region based 개념

RMMA는 기존의 MMA에서 regional grouping 과정을 통해 축소된 신호점에 의한 오차 신호를 얻을 수 있는 새로운 비용 함수를 갖는 적응 등화 알고리즘을 말한다. 이를 위하여 16-QAM 신호의 성상도를 그림 2에 나타내었다. 그림에서는 총 16개의 백색 심볼점이 있으며 4개의 심볼점을 묶어서 4개의 region으로 분할하고 있다. 각 region의 중앙값으로  $c$ 가 할당되어 있다.

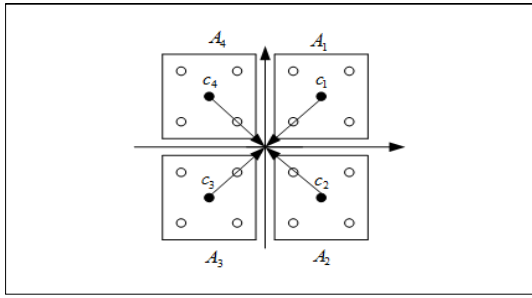


그림 2. Region based 개념  
 Fig. 2. Concept of region based

만약 등화기 출력이 region  $A_1$ 에 속한다면 그 중앙값인  $c_1$ 이 화살표 방향으로 사분 평면의 원점으로 이동시켜 constant modulus 신호인 4-QAM 형태로 변환시킨 후 오차 신호를 얻어 등화기 계수를 갱신하게 된다. 기존 MMA에서 고차 QAM 신호의 경우 nonconstant modulus에 해당하므로 오차 신호가 커지지만, RMMA에서는 이와 같은 region 기반으로 constant modulus화한 후 다음에 설명되어질 알고리즘에 의한 오차 신호를 얻기 때문에 오차 신호의 값이 적어지게 되며, 이로 인한 등화 성능이 개선되는 것이다.

### 3. RMMA 알고리즘

RMMA는 2가지의 모드로 동작하게 된다. 첫째는 발산을 방지하기 위하여 입력 regressor 벡터  $R(k)$ 의 euclidean norm의 자승치에 반비례하는 시변 step size를 갖는 Normalized-MMA 개념으로 동작하며, 두 번째는 송신 신호의 추정치를 이용하지 않고 등화기 출력에 비례하는 오차에 의해 탭 계수를 갱신하게 된다.

먼저 발산을 방지하기 위하여 Normalized-CMA에서 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$f(k+1) = f(k) + \frac{\mu}{\delta + \|R(k)\|^2} [d(k) - z(k)] R^*(k) \quad (1)$$

여기서  $\delta$ 는 매우 작은 양의 정수,  $\|\cdot\|$ 은  $\cdot$ 의 euclidean norm이고  $d(k)$ 와  $z(k)$ 는 원하는 응답의 추정값을 나타내며 이들은 다음의 관계가 성립된다.

$$d(k) = x(k)z(k) \quad (2)$$

$$x(k) = \begin{cases} \frac{(\beta\sigma_s^2 - |z(k)|^2)}{(\beta\sigma_s^2 - R)} & |z(k)|^2 \leq \beta\sigma_s^2 \\ 0 & \text{기타} \end{cases}$$

여기서  $\sigma_s^2 = E[|s(k)|^2]$ ,  $R = E[|s(k)|^4]/E[|s(k)|^2]^2$ ,  $\beta = 2$  or  $3$ 로 정의된다. 2 가지의 추정치인  $d(k)$ ,  $z(k)$ 는 동일한

부호일 때 consistency가 성립되며, 이때 correction 항인  $x(k)$ 는 양의 값이 된다. 식 (1)의 Normalized-CMA를 MMA로 더욱 확장시켜 multimodulus 비용 함수를 적용하면  $d(k) - z(k)$ 를  $[d_R(k) + j d_I(k)] - [z_R(k) + j z_I(k)]$ 로 대체할 수 있다. 그림 2와 같이 복소 평면을  $M/4$  개의 4-QAM region으로 분할한 후 각 region  $A_k$ 는 4개의 심볼점을 포함하고 있으며, 그 중앙에는  $c(k) = c_R(k) + j c_I(k)$ 라는 심볼점이 존재한다. 등화기 출력이 어느 region에 속하며, 그 중앙값은 얼마인지를 알 수 있으며, 식별된 region과 중앙값을 이용하여 마치 constant modulus 신호인 것처럼 다음과 같은 translation이 필요하다. 식별된 region의 중앙값이 복소 평면의 원점으로 이동시켜 마치 4-QAM 신호로 취급하고, translated된 출력 신호  $\bar{z}(k) = \bar{z}_R(k) + j \bar{z}_I(k)$ 는  $\bar{z}(k) = (z_R(k) - c_R(k)) + j (z_I(k) - c_I(k))$ 의 관계가 있으며, translated 된 후 region  $A_k$ 내의 심볼점을 나타내는  $a_{k,m} = \pm 1 \pm j 1$ 의 4-QAM 신호 형태가 된다. 또한 region  $A_k$ 의 위치 정보를 translation에 의해 잃더라도 비용 함수는 복소 평면상에서  $A_k$ 의 위치 정보가 필요하게 되며, RMMA 알고리즘에서 translation에 의한 순간 비용 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{J} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{M/4} \alpha_i [|c_{Ri}| [1 - z_{Ri}^2(k)]^2 + |c_{Ii}| [1 - z_{Ii}^2(k)]^2] \quad (3)$$

여기서 식별되어진 region  $A_k$ 에서는  $\alpha_i = 1$ 이 되며, 나머지 region에서는  $\alpha_i = 0$ 가 된다. 또한 곱셈 인자인  $|c_{Ri}|, |c_{Ii}|$ 는 translated 이전의 region 정보를 제공하게 된다. 식 (3)의 순간 비용 함수의 gradient는 다음과 같다.

$$\nabla \bar{J} = \sum_{i=1}^{M/4} \alpha_i e_i(k) R^*(k) \quad (4)$$

$$e_i(k) = |c_{Ri}| [\bar{d}_{Ri}(k) - \bar{z}_{Ri}(k)] + j |c_{Ii}| [\bar{d}_{Ii}(k) - \bar{z}_{Ii}(k)] \quad (5)$$

$$\bar{d}_{Ri}(k) = \bar{x}_{Ri}(k) \bar{z}_{Ri}(k), \quad \bar{d}_{Ii}(k) = \bar{x}_{Ii}(k) \bar{z}_{Ii}(k) \quad (6)$$

$$\bar{x}_{Ri}(k) = 1.5 - 0.5 z_{Ri}^2(k), \quad \bar{x}_{Ii}(k) = 1.5 - 0.5 z_{Ii}^2(k) \quad (7)$$

최종적으로 RMMA 알고리즘에서의 탭 계수 갱신식은 식 (1), (4), (5), (6), (7)을 조합하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f(k+1) = f(k) + \frac{\mu}{\delta + \|R(k)\|^2} \bar{e}_i(k) R^*(k) \quad (8)$$

여기서  $\delta$ 는 regularization factor로 양의 매우 작은 상수이며, RMMA 알고리즘에서 안정성을 보장하기 위한 적응 스텝 크기  $\mu$ 는 다음의 범위가 되어야 한다.

$$0 < \mu < 2/|c_k| \leq 2/|c_{\max}| \quad (9)$$

그림 3은 식 (5)에서 주어진 RMMA 알고리즘에서의 오차 신호를 나타낸 것이다. 등화기 출력이 송신 신호인 1, 0.333 일 때 오차 값이 0 으로 최소값이 됨을 알 수 있다.

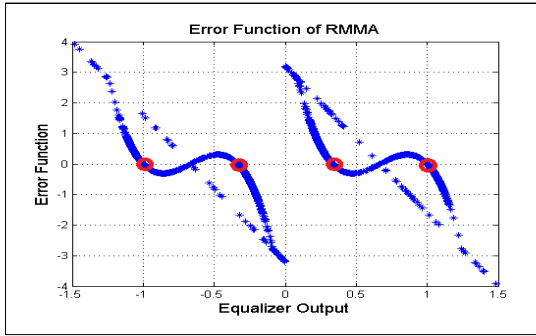


그림 3. RMMA의 오차 함수  
Fig. 3. Error function of RMMA

### III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안 RMMA 알고리즘의 성능을 기존 MMA 알고리즘과 비교, 평가하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝의 크기로 MMA  $\mu = 0.0015$ , RMMA  $\mu = 0.015$  및 norm값에 반비례하도록 시변이며, 등화 필터로는 15차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 4는 통신 채널의 실수부와 허수부 계수를 나타낸 것이다. 그림 5는 시뮬레이션을 위하여 RMMA 알고리즘부를 포함한 전체 신호 흐름도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20,000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 통신 채널을 통과 시키고, 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 백색 가우시안 잡음을 부가시켜 수신 신호를 얻었다. 수신 신호는 그림 2의  $r(k)$ 가 된 후 이를 제안 알고리즘으로 처리하여 적응 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 복원 정상도, 잔류 isi 및 MD, MSE 및 SER을 얻는 데 사용하였다. 16-QAM 신호를 사용하므로 4개의 region으로 구분하여 중앙값은  $\pm 2 \pm j2$ 로 설정하였으며, 등화기 출력이 속하는 region은  $\pm 1 \pm j1$ 의 4-QAM constellation으로 translation 된다.

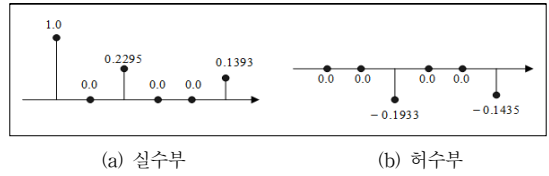


그림 4. 채널 계수  
Fig. 4. Channel coefficient

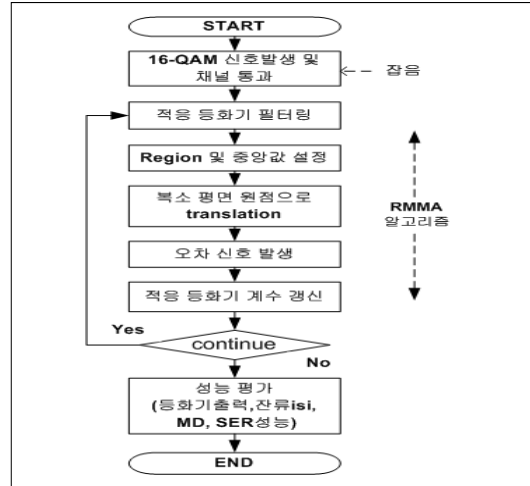


그림 5. 신호 처리도  
Fig. 5. Flowdiagram of signal processing

제안 알고리즘의 성능 비교를 위하여 첫 번째 지수인 적응 등화기의 출력 신호 정상도를 그림 6에 나타내었다. 출력 정상도는 적응 등화 알고리즘의 신호점 clustering 능력을 나타내며, 신호점의 개수와 각 신호점의 폭과 거리를 알 수 있다. 신호점의 폭이 좁고 신호점간의 거리가 클수록 성능이 우월하게 되며, 그림에서 제안 RMMA 알고리즘이 기존 MMA 알고리즘보다 신호점의 폭이 좁고 신호점간 거리가 멀어지므로 정성적인 등화 성능이 우월함을 알 수 있다.

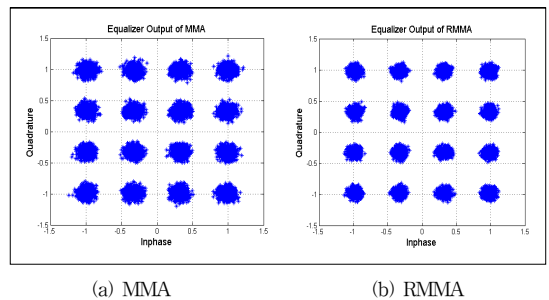


그림 6. 출력 신호 정상도  
Fig. 6. Output signal constellation

두번째 성능 비교를 위한 지수로는 적응 등화기가 초기의 과도 과정을 지나 정상 상태에 도달할 때까지의 수렴 속도와 그 양을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐 성능이다. 이 중에서 수렴 속도는 적응 등화기가 정상적으로 동작중에 채널의 상태가 급변하거나 순간적으로 단절되는 비정상적인 상태에 신속하게 적응할 수 있는 능력을 나타낸다. 먼저 그림 7의 반복 iteration에 대한 잔류 isi 성능에서 실험적으로 -20dB의 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서 MMA는 1,966회, RMMA는 1,307회가 소요되므로, 수렴 속도에서는 RMMA가 1.5배 정도 빠름을 알 수 있으며, 정상 상태 이후의 잔류량에서는 대략 2dB 정도 개선되는 우월한 성능을 가짐을 알 수 있다.

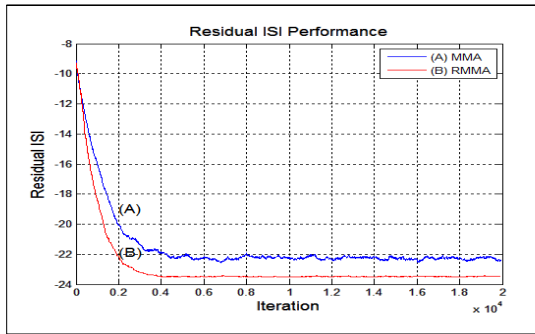


그림 7. 잔류 isi 성능  
 Fig. 7. Residual isi performance

그림 8의 반복 iteration에 대한 MD 성능에서도 실험적으로 0.3Volt의 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서 MMA는 3,161회, RMMA는 1,679회가 소요되므로, 수렴 속도에서도 RMMA가 1.9배 빠름을 알 수 있으며, 정상 상태 이후에도 대략 0.07Volt 정도 개선된다.

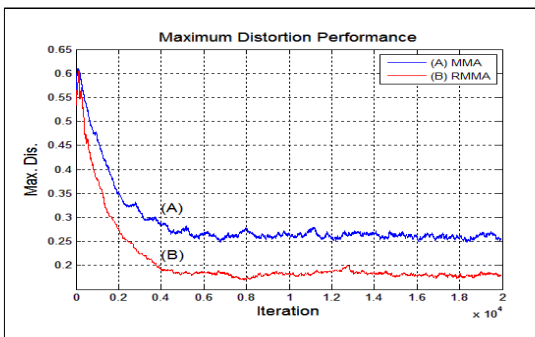


그림 8. MD 성능  
 Fig. 8. MD performance

마지막 성능 지수인 외부 잡음에 대한 등화 알고리즘의 강인성을 나타내는 신호대 잡음비에 대한 SER 분포를 그림 9에 나타내었다. 신호대 잡음비는 0dB에서 2dB 단위로 10dB까지 변화시키면서 20,000개의 심볼은 10회 랜덤하게 발생시켜 오류율을 계산한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 전체적으로 RMMA 알고리즘이 MMA 알고리즘보다 높은 등화 이득을 얻을 수 있으며, 매우 강인함을 확인하였다. 즉 RMMA는 등화 출력이 속하는 region을 설정 및 이를 이용한 오차 신호를 발생과 비용 함수의 최소치를 구하기 위하여 Normalized MMA 알고리즘을 적용하므로써 MMA의 취약점인 외부 잡음에 대한 강인성을 개선시킬 수 있음을 알 수 있다.

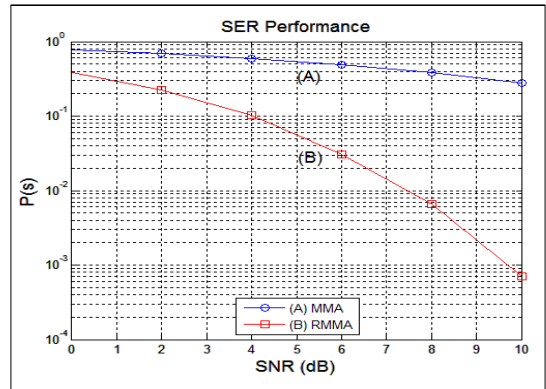


그림 9. SER 성능  
 Fig. 9. SER performance

## V. 결론

본 논문은 진폭과 위상의 동시 보상이 가능한 기존 MMA 적응 등화 알고리즘의 성능을 더욱 개선시킬 수 있는 RMMA에 관한 것이다. 16-QAM과 같은 고차의 nonconstant modulus 특성을 갖는 신호의 전송시 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 영향을 줄이기 위하여 RMMA는 등화 출력이 존재하는 region을 이용한 4-QAM constellation으로 constant modulus화하여 적은 오차 신호를 이용한 적응 등화기 계수를 갱신하며, 기존의 MMA보다 misadjustment에 의한 등화 잡음을 줄이면서 잔류 isi와 MD 및 외부 잡음에 의한 강인성을 갖고 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 잔류 isi와 MD에서 RMMA가 MMA보다 1.5배 및 1.9배 빠른 수

럼 속도 및 정상 상태에서도 개선된 등화 성능을 가짐을 알 수 있었다. 또한 외부 잡음에 대한 강인성을 알 수 있는 SER 성능에서는 MMA보다 상당한 등화 이득을 얻을 수 있음이 확인되어, 잡음이 지배적인 통신 채널 환경에서도 연산량의 큰 증가없이 효율적인 전송을 위한 적응 등화 알고리즘으로 널리 사용될 것으로 기대되어진다.

## References

- [1] Y.Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude Modulation systems", IEEE Trans. Com., COM-23, pp.679~682, June, 1975.
- [2] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980.
- [3] M.D.Miranda, M.T.M.Silva, V.H.Nascimento, "Avoiding Divergence in the Constant Modulus Algorithm", Proc. of ICASSP, pp.3565~3568, 2008.
- [4] J.M.Filho, M.T.M.Silva, M.D.Miranda et. al, "A Region-based Algorithm for Blind Equalization of QAM Signal", IEEE/15th workshop on statistical signal processing, pp.685~688, 2009.
- [5] R.Candido, M.T.M.Silva, M.D.Miranda et. al, "A statistical analysis of the dual-mode CMA", Proc. of IEEE Circuit & System, pp.2510~2513, June. 2010.
- [6] S.A.Sheikh, P.Fan, "A New Multimodulus Blind Equalizer for Dense QAM Constellation", Wireless, Mobile and Networks, Int. conf. of ICWMMN2006, pp.1~4, 2006
- [7] R.A.Kenedy, Ding Z., "Blind Adaptive Equalizers for QAM Communication Systems Based on Convex Cost Function", Optical Engineering, Vol. 31, pp.1189~1199, June, 1992.
- [8] D.S.Kang, S.G.Lim, "The Performance Comparison of MMA and S-MMA Adaptive Equalization Algorithm for QAM Signal", Jour. of I.W.I.T., Vol.13, No.1, pp.19~26, Feb. 2013.
- [9] R.Hamzehyan, R.Dianat, N.C.Shirazi, "New Variable

Step-Size Blind Equalization Based on Modified Constant Modulus Algorithm", Int. Jour. of Machine Learning and Computing, Vol. 2, No.1, pp.30~34, Feb. 2012

## 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>