

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2016.16.2.101>

IIBC 2016-2-12

## Selective Updating에 의한 SE-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 개선

### Performance Improvement of SE-MMA Adaptive Equalization algorithm by Selective Updating

임승각\*

Seung-Gag Lim \*

**요약** 본 논문에서는 nonconstant modulus 특성을 갖는 16-QAM 신호 전송 시 채널에서 발생하는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 줄일 수 있는 SE-MMA (Signed Error-Multiple Modulus Algorithm)에 selective updating 개념을 적용한 SU-SE-MMA (Selective Updating-SE-MMA) 알고리즘을 제안한다. SE-MMA는 기존 적응 방식인 MMA에서 연산량의 간소화를 위하여 등장하였으며, 등화 성능에서 수렴 속도는 MMA보다 빨라지만 정상 상태에서 잔여량이 증가되는 문제점이 있다. SU-SE-MMA는 등화 출력이 특정 송신 신호점을 중심으로 특정 한계치보다 큰 경우에만 탭 갱신을 수행하며, 한계치보다 적은 경우에는 탭 갱신을 수행하지 않으므로 연산량을 더욱 줄일 수 있게 된다. SE-MMA에 비교하여 SU-SE-MMA의 개선된 등화기 출력 신호 정상도, 잔류 isi양, MD 및 SER과 같은 적응 등화 성능을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다. 시뮬레이션의 결과 출력 신호 정상도, 잔류 isi 및 MD에서는 제안 방식인 SU-SE-MMA가 SE-MMA보다 우월하였지만 잡음에 대한 robustness를 나타내는 SER 성능에서는 동등함을 알 수 있었다.

**Abstract** This paper proposes the SU-SE-MMA algorithm which applying the concept of selective updating to the SE-MMA that is possible to reduce the intersymbol interference due to distortion occurred at the channel when transmit the nonconstant modulus 16-QAM signal. The SE-MMA emerged for the simplifying the computational operation from the current MMA adaptation algorithm, then it's has the fast convergence speed and has a problem of increase the residual component in the steady state. The SU-SE-MMA performs the selectively tap updating when the distance of equalizer output and specified transmit signal point is greater than the given threshold value and tap updating does not occurred in the small distance. By this selective updating process, it is possible to more reduction in the computational operation in the propose algorithm. The improved adaptive equalization performance of SU-SE-MMA like as the equalizer output signal constellation, residual isi, MD, SER were confirmed by computer simulation compared to SE-MMA. As a result of simulation, the AV-SE-MMA has better performance in output signal constellation, residual isi and MD compared to the SE-MMA, but it was confirmed that the AV-SE-MMA has similar in the SER performance that means the robustness to the noise.

**Key Words** : SE-MMA, MMA, residual isi, selective updating, MD, dispersion constant

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학  
접수일자 : 2016년 1월 12일, 수정완료 : 2016년 3월 12일  
게재확정일자 : 2016년 4월 8일

Received: 12 January, 2016 / Revised: 12 March, 2016 /  
Accepted: 8 April, 2016

\*Corresponding Author: [sglim@kongju.ac.kr](mailto:sglim@kongju.ac.kr)

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

## I. 서 론

최근 디지털 통신 시스템을 이용한 정보 전송의 수요가 급증하고 있으며, 잡음에 대한 강인성과 다중 사용자에 대한 대역폭 효율과 응용 측면에서 과거의 아날로그 방식에 비해 우월성을 갖는다. 이를 위하여 전송을 위한 신호 방식으로 bits-per-hertz의 대역폭 효율이 높은 QAM 신호 방식이 선호되고 있으며, 수신측에서는 채널에서 발생하는 비선형 찌그러짐과 부호간 간섭 영향을 줄일 수 있는 적응 등화기의 사용을 필수적이다<sup>[1]</sup>. 적응 등화기는 수신된 신호에서 찌그러짐과 부호간 간섭을 최소화하여 정보를 판별하는데 오류율을 최소화시키기 위한 디지털 필터로서 이를 매 순간 변화시킬 수 있는 능력을 갖는다. 적응 등화를 위하여 송신국과 수신국이 사전에 알고 있는 학습열을 이용하는 채널의 전달 특성을 추정하지만, 이로 인한 사용 가능한 대역폭이 낭비되므로 최근 학습열에 의존하지 않는 blind 적응 등화 방식이 등장하였다<sup>[1][2]</sup>. 그러나 blind 방식은 기존의 학습열 의존 방식에 비하여 등화 성능이 열화되는 문제점이 있으므로 이를 개선시킬 수 있는 다양한 알고리즘에 대하여 등장하고 있으며, 디지털 텔레비전과 케이블 영상 분배 시스템과 같은 대량의 정보를 처리하는 수신기에서 전체 연산량의 80% 이상을 blind 적응을 위하여 소요되므로 연산량을 줄이면서 등화 성능을 개선시킬 수 있는 방식에 대해 관심이 높아지고 있다<sup>[3][4]</sup>. 대표적으로 MMA (Multimodulus Algorithm)는 진폭과 위상의 동시 보상 능력 및 신뢰할 수 있는 초기 수렴 특성 보장이라는 장점을 갖지만 기존 방식인 CMA 보다 연산량이 증가되며 적응 등화 필터의 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호를 얻을 때 고정된 modulus를 이용하므로 대역폭 효율이 높은 신호에서는 오차 신호가 커져서 등화 성능이 열화되는 단점이 있다. 그러나 SE-MMA에서는 MMA의 오차 신호의 polarity만을 이용하여 탭 계수를 갱신하므로 알고리즘의 연산량이 감소되지만, 이로 인하여 등화 성능은 열화되는 단점이 있다<sup>[5][7]</sup>. 논문에서는 SE-MMA에서 selective updating에 의한 적응 등화 개념을 조합하여 기존 SE-MMA의 장점을 그대로 살리면서 열화되는 등화 성능을 개선하기 위한 SU-SE-MMA (Selective Updating SE-MMA) 알고리즘을 제안하며, 이의 개선된 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인한다. 주어진 16-QAM 송신 신호와 동일한 통신 채널 및 신호대 잡음

비하에서 제안 알고리즘의 성능을 기존 SE-MMA와 비교하였다. 2장에서는 기본적인 SE-MMA 알고리즘, selective updating 개념에 대하여 소개한 후 3 장에서는 시뮬레이션 과정 및 결과를 다루고, 마지막 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 기저 대역 통신 시스템

그림 1은 적응 등화기를 적용한 기저 대역 통신 시스템 모델을 나타낸 것이다. 송신측 source로부터의 신호는 constellation mapping 과정을 통해 대역폭 효율이 높은 고차의 16-QAM 같은 신호  $s_k$ 로 변환, 송신하면 찌그러짐과 부호간 간섭을 발생시키는 임펄스 응답이  $h_k$ 인 채널을 통과하면서 잡음  $n_k$ 가 부가된다. 수신된 신호  $r_k$ 는 응답이  $f_k$ 인 등화기에 입력되어 진폭과 위상이 보상된 출력 신호  $z_k$ 를 얻은 후 이 신호는 결정 장치를 통과하면서 최종 복원 신호  $\hat{s}_k$ 를 얻어 sink에 전달하게 된다. 이때 등화기의 응답  $f_k$ 는 등화기 출력 신호  $z_k$  또는  $\hat{s}_k$ 를 이용하여 SE-MMA 또는 제안 SU-SE-MMA 알고리즘에 의한 비용 함수를 최소화시키도록 적응적으로 변화시킨다. 임펄스 응답  $h_k$ 와 등화 필터  $f_k$ 의 차수를  $N$  이 라면 이들 간에는 다음의 관계식들이 성립되며, \*는 선형 컨볼루션을 나타낸다.

$$\begin{aligned} h_k &= [h_0 \quad h_1 \quad h_2 \quad \dots \quad h_{N-1}] \\ f_k &= [f_0 \quad f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_{N-1}] \\ r_k &= s_k * h_k + n_k, \quad z_k = r_k * f_k \end{aligned} \quad (1)$$

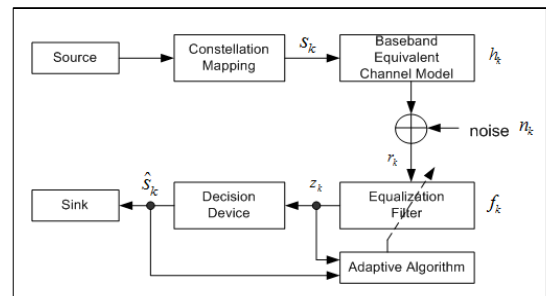


그림 1. 기저 대역 통신 시스템

Fig. 1. Baseband communication system

## 2. SE-MMA 알고리즘

SE-MMA는 MMA 등화 알고리즘에서 탭 계수 갱신을 위해 필요한 오차 신호의 극성만을 이용토록 개량한 것이므로, 먼저 MMA 적응 등화 알고리즘에서는 다음과 같이 정의되는 비용 함수  $J$ 를 최소화시키도록 SGA (Stochastic Gradient Algorithm)를 적용하여 반복시킨다.

$$J = E[(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)^2] \quad (2)$$

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

여기서  $z_{kr}, z_{ki}$ 은  $z_k$ 의 실수와 허수,  $s_{kr}, s_{ki}$ 은  $s_k$ 의 실수와 허수를 각각 나타내며,  $R_{MMA}^2$ 는 MMA의 dispersion constant를 의미한다. 식(2)의 비용 함수는 1차원 CMA 비용 함수를 2개 더한 형태이며 MMA의 오차 함수와 등화 필터 계수 갱신식은 다음과 같이 된다.

$$e_{kMMA} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + jz_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2) \quad (3)$$

$$f_{k+1} = f_k - \mu e_{kMMA} r_k^*$$

SE-MMA는 식(3)의 MMA 오차 함수에서 오차 신호  $e_{kMMA}$ 의 부호만을 이용하여 등화 필터 계수의 갱신에 사용되기 때문에 붙여진 이름이며, 오차 신호와 탭 갱신식을 쓰면 다음과 같다.

$$e_{kSE-MMA} = \text{sgn}[z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)] + j \text{sgn}[z_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)]$$

$$f_{k+1} = f_k - \mu e_{kSE-MMA} r_k^* \quad (4)$$

여기서  $\text{sgn}$ 은 signum 함수를 나타내며, MMA 또는 SE-MMA 알고리즘에서는 등화 필터의 출력  $z_k$ 는 복소 평면에서 4개의 점  $\pm R_{MMA} \pm j R_{MMA}$  주위로 존재하도록 탭 계수를 갱신하게 된다. SE-MMA는 적응 상수가 고정될 때 탭 갱신을 위한 오차 함수를 곱하는 과정을 단순히 부호만을 고려하므로 알고리즘의 연산량을 줄일 수 있게 되어 수렴 속도를 개선시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 2는 SE-MMA의 내부 구성도를 나타낸 것이다.

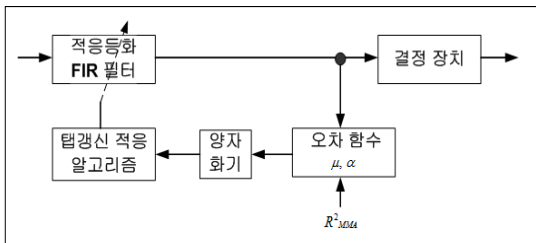


그림 2. SE-MMA의 구조  
 Fig. 2. Structure of SE-MMA

## 3. Selective Updating 개념

Selective Updating은 수신측에서 송신 QAM 신호의 정상도내의 신호점을 주위로 원형의 반지름  $R$ 인 경계 영역을 설정한다. 등화기 출력이 특정 신호점의 영역밖에 존재하는 경우에는 적응을 위한 탭 갱신을 수행하며, 영역내에 존재하는 경우에는 갱신을 수행하지 않도록 선택적으로 동작하는 개념이다. 등화기 출력이 경계 영역밖에 존재하는 경우 높은 MSE를 갖는 적응 단계로 간주하며, 경계 영역내에 존재하는 경우 낮은 MSE의 정상 상태 단계로 고려한다. 이를 적용시킨 SU-SE-MMA 알고리즘을 수식으로 전개하면 다음과 같다.

$$R_k = |s_k - z_k| \quad (5)$$

$$f_{k+1} = f_k - \mu \phi(R_k, z_k) r_k^*$$

$$\phi(R_k, z_k) = \begin{cases} \text{sgn}[z_k(|z_k|^2 - R_{MMA}^2)], & \text{when } R_k \geq R \\ 0, & \text{when } R_k < R \end{cases}$$

MSE가 충분히 낮은 경우 등화기 출력 제곱의 radius는 MSE가 될 것이므로 이는 최소치의 상한값을 의미한다.

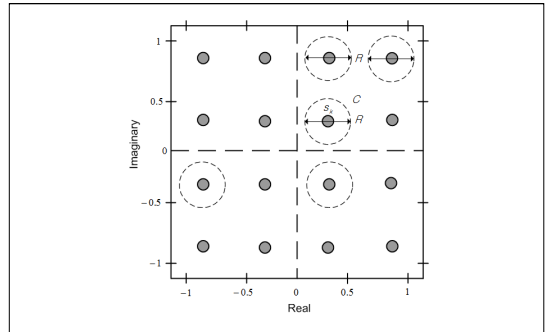


그림 3. 선택적 갱신 영역  
 Fig. 3. Selective updating region

## III. 컴퓨터 시뮬레이션

selective updating을 적용한 SU-SE-MMA 등화 알고리즘의 성능 개선 효과를 기존 SE-MMA와 비교, 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 SNR을 30dB, 적응 스텝 크기  $\mu = 0.00013$  로 동일하며, SU-SE-MMA에서 경계 영역의 지름  $R = 0.12$ , 적응 필터의 차수는 15차 FIR로 설정하였다. 16-QAM 신호를 발생시킨 후 부호간 간섭이 발생하는 통신 채널을 통과 및 잡음 신호  $n_k$ 를 부가

한 후 수신 신호  $r_k$ 을 얻은 후, 이들 알고리즘을 적용하여 성능을 비교하였으며, 이를 그림 4에 나타내었으며, 표 1은 채널의 임펄스 응답 계수이다.

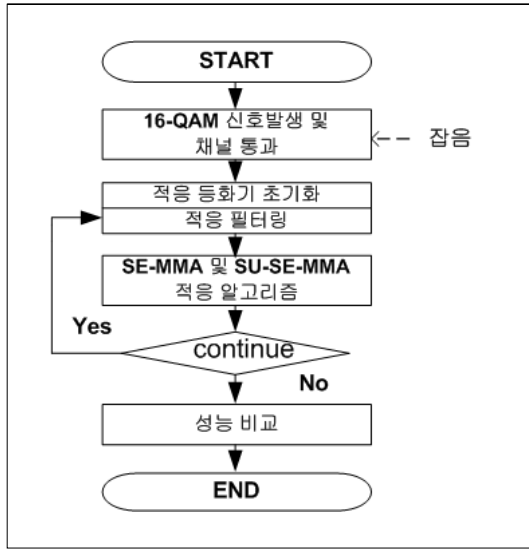
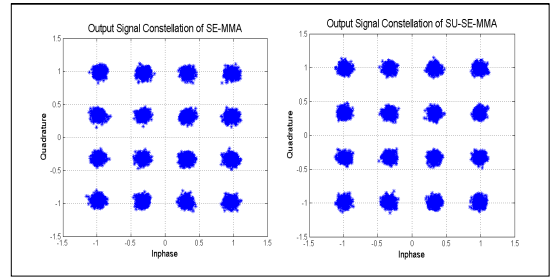


그림 4. 신호 처리 흐름도  
Fig. 4. Signal processing flowdiagram

표 1. 채널의 임펄스 응답 계수  
Table 1. Impulse coefficient of channel

$h(0)$	$-0.005-j0.004$	$h(1)$	$0.009+j0.03$
$h(2)$	$-0.024-j0.104$	$h(3)$	$0.854+j0.520$
$h(4)$	$-0.218+j0.273$	$h(5)$	$0.049-j0.074$
$h(6)$	$-0.016+j0.020$		

이상의 환경을 통하여 SE-MMA와 SU-SE-MMA 알고리즘의 적응 등화 성능을 비교하였다. 성능 비교를 위한 지수로는 등화기 출력 신호 constellation, 잔류 isi와 최대 찌그러짐 및 MSE와 SER을 사용하였다. 첫 번째 지수로서 그림 5는 정상 상태에서의 부호간 간섭을 제거된 등화기 출력 신호 constellation을 나타낸 것이다. 2가지 알고리즘 모두 16개의 심볼점에 대하여 명확하게 구분되어지므로 채널에서 발생한 진폭과 위상 찌그러짐에 의한 부호간 간섭이 상당히 보상됨을 알 수 있다. 그러나 각 신호점의 폭과 신호점간 거리가 좁고 멀수록 등화 성능이 우월한 알고리즘이 되며, 그림에서 SU-SE-MMA가 SE-MMA보다 미미하게 우월함을 알 수 있다.



(a) SE-MMA (b) SU-SE-MMA

그림 5. 등화기 출력 신호 성상도  
Fig. 5. Signal constellation of equalizer output

두 번째로 적응 등화기의 성능을 나타내는 지수로는 잔류 isi (Residual isi)와 MD 및 MSE를 사용하였으며 적응 등화기의 중요한 성능을 나타내며 그림 6, 7, 8에 나타내었다. 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간과 정상 상태 이후의 잔여량을 알 수 있으며, 잔류 isi와 MD는 통신 채널  $h_k$ 와 등화 필터 계수  $f_k$ 가 완전 보상이 될 때 시간 영역에서는 이들의 convolution 결과는 이론적으로는 임펄스 신호가 된다. 그러나 시간 영역에서 이의 완전 보상은 불가능케 되어 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 크기를 나타내므로 이들의 누적 전력과 진폭압을 나타낸다. 또한 MSE는 이들 알고리즘에 의한 등화기 출력과 복원 신호와의 진폭 차이의 자승치를 나타낸 것으로 신호점 주위에서의 진폭 흔들림을 나타낸다. 이들의 성능 지수에서 공통적으로 selective updating에 의한 SU-SE-MMA 알고리즘이 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에서는 미미하게 늦어지지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 더욱 감소됨을 알 수 있다.

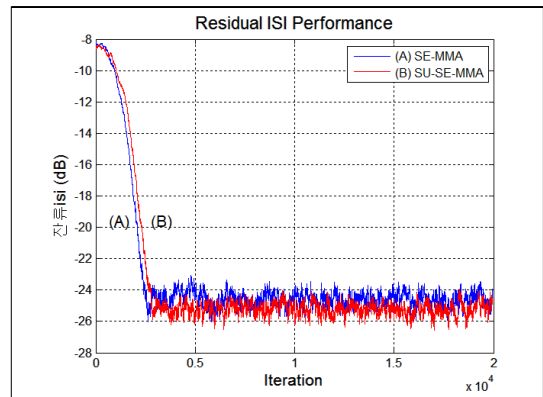


그림 6. 잔류 isi 성능  
Fig. 6. Residual isi performance

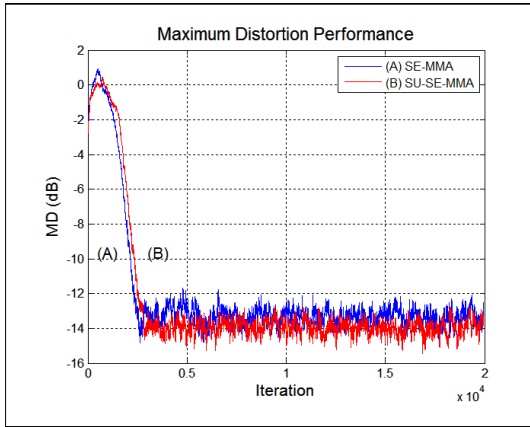


그림 7. MD 성능  
 Fig. 7. MD performance

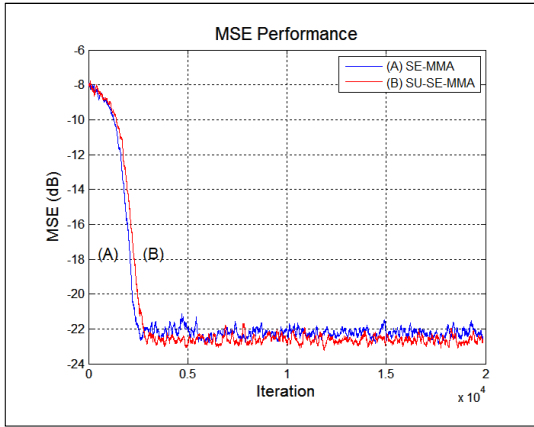


그림 8. MSE 성능  
 Fig. 8. MSE performance

표 2는 그림 6, 7, 8에서 얻어지는 잔류 isi 및 MD, MSE에 대한 정상 상태 이후의 정량적인 통계치를 나타낸 것으로, 모든 성능 지수에서 SU-SE-MMA가 SE-MMA보다 우월함을 알 수 있다.

표 2. 성능 지수의 통계치  
 Table 2. Statistics of performance index

	SE-MMA		SU-SE-MMA	
	평균	분산	평균	분산
잔류 isi	0.0035	1.3268e-7	0.0030	8.4099e-8
	0.2162	1.34e-4	0.2014	1.0484e-4
MD	0.0060	1.9190e-7	0.0055	1.7538e-7

마지막 성능 비교를 위한 지수로서 채널에서 부가되는 잡음에 대한 강인성을 나타내는 SNR에 대한 심볼 오류율을 나타내는 SER 성능을 그림 9에 나타냈다. 그림에서는 SNR을 변화시키면서 SE-MMA와 SU-SE-MMA 적응 등화 알고리즘의 오류율을 나타내었으며, 이들 2가지 알고리즘이 0~20dB의 범위에서는 유사하게 분포하며, 그 이상의 SNR에서는 SU-SE-MMA가 SE-MMA보다 우수하므로 selective updating에 의한 적응 방식에서는 비교적 높은 SNR이 요구되어진다.

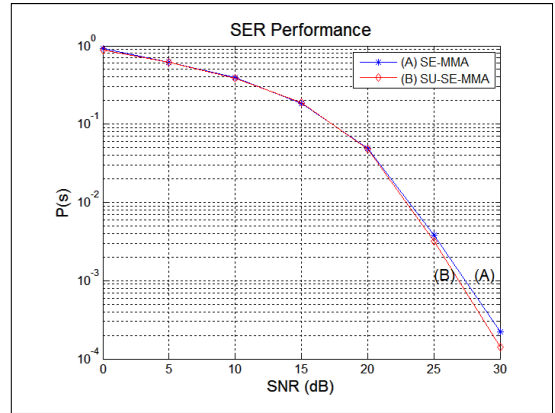


그림 9. SER 성능  
 Fig. 9. SER performance

## V. 결론

본 논문에서는 실시간 응용을 위하여 MMA 적응 등화 알고리즘을 단순화시킨 SE-MMA의 성능 열화를 개선할 수 있는 SU-SE-MMA를 제안하였다. SU-SE-MMA는 등화기 출력이 송신 신호점을 기준으로 일정 영역외에 존재하는 경우에만 updating을 수행하는 적응 개념을 SE-MMA에 적용시킨 것이다. 이들은 동일한 채널 환경하에서 각 알고리즘의 수렴 특성을 나타내는 내부 지수인 잔류 isi, MD, MSE와 외부의 성능 지수인 등화기 출력 신호의 정상도, 잡음에 대한 강인성을 나타내는 SER을 비교하였다. 내부 성능에서 SU-SE-MMA의 정상 상태 도달을 위한 수렴 속도가 SE-MMA보다 약 1.2 배 정도 늦어지지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 더욱 적어짐을 정성적, 정량적으로 확인하였다. 또한 외부 성능에서 등화기 출력 신호의 정상도에서도 SU-SE-MMA가 우월하였고 SER 성능에서 SNR이 낮은 경우에

는 유사하였으며, 25dB 이상에서 우월함을 알 수 있었다. selective updating을 위해서는 높은 신호대 잡음비가 요구되며, 이 환경에서는 알고리즘의 단순화에 의한 성능 열화를 개선시킬 수 있음을 확인하였다. 본 연구는 방대한 실시간 데이터 전송과 같은 응용에서 부호간 간섭의 영향에 의한 통신 시스템의 throughput을 개선시키는 적응 알고리즘으로 SU-SE-MMA가 적합하다.

## References

- [1] S.A. Sheikh, P. Fan, "Joint Blind Equalization & Carrier Phase Recovery based on Adaptively Varying Modulus Algorithm", Int. Multitopic Conf., IEEE INMIC 2005, pp.1~6, 2005.
- [2] W.S. Yuan, L. Feng, "A Computationally Efficient Multi-Modulus Blind Equalization Algorithm", 2nd Int. Conf. on ICIME, pp.685~687, 2010
- [3] K.Banovic, R.Lee et al., "Computationally-Efficient Method for Blind Adaptive Equalization", 48<sup>th</sup> Mid. West Symp. on Cir. & Sys., Vol.1, pp.341~344, 2005.
- [4] G. Im, C. Park, H.Won, "A blind equalization with the sign algorithm for broadband access", IEEE Com. Letter, Vol. 5, No.2, Feb. 2001
- [5] M. Ghosh, "A sign-error algorithm for blind equalization of real signals", ICASP, pp.3365~3368, May 1998.
- [6] D. L. Duttweiler, "Adaptive filter performance with nonlinearities in the correlation multiplier", IEEE Tran. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol.30, pp.578~586, Aug. 1982
- [7] S.G. Lim, D.S. Kang, "Performance of SE-MMA Blind Adaptive Equalization Algorithm in QAM System", Journal of I.I.B.C., Vol.13, No.3, pp.63~69, June 2013.

## 저자 소개

### 임 승 각(정회원)



- 1983년 : 송실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년~현재 : 공주대학교 정보통신 공학부 교수.

<주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신>