

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2020.20.1.95>

JIIBC 2020-1-13

QAM 신호에서 mSE-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 평가

A Performance Evaluation of mSE-MMA Adaptive Equalization Algorithm in QAM Signal

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 부가 잡음, 부호간 간섭 및 페이딩 등 비선형 통신 채널에서 발생하는 찌그러짐을 줄일 수 있는 mSE-MMA (modified Signed Error-Multiple Modulus Algorithm) 적응 등화 알고리즘의 성능 평가에 관한 것이다. SE-MMA 적응 등화 알고리즘은 기존 MMA의 연산량을 줄이기 위하여 등장하였으며, 이로 인하여 등화 성능의 열화되는 문제점이 있다. 이와 같은 SE-MMA의 성능 열화를 개선하기 위하여 mSE-MMA는 적응을 위한 스텝 크기를 등화기의 출력이 송신 신호점을 중심으로 임의 반경내의 존재 여부에 따라 조절하게 된다. 제안 mSE-MMA 알고리즘의 성능을 기존의 SE-MMA 알고리즘과 비교하기 위하여 동일한 채널과 잡음 환경하에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 위한 지수로는 수신측에서의 등화기 출력 신호인 복원된 신호 정상도, 수렴 성능을 나타내는 잔류 isi, MD 및 MSE learning 곡선과 잡음에 대한 강인성을 확인하기 위하여 SER을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 모든 성능 지수에서 mSE-MMA가 SE-MMA 보다 우월하며, 특히 SER 성능에서 잡음에 대한 robustness가 매우 강함을 확인하였다.

Abstract This paper related with the performance evaluation of mSE-MMA (modified Signed Error-Multi Modulus Algorithm) adaptive equalization algorithm which is possible to reduce the distortion that is occurs in nonlinear communication channel like as additive noise, intersymbol interference and fading. The SE-MMA algorithm are emerged in order to reducing the computational load compared to the presently MMA algorithm, it has the degraded equalization performance by this. In order to improve the performance degradation of SE-MMA, the mSE-MMA controls the step size according to the existence of arbitrary radius circle of equalizer output is centered at transmitted symbol point. The performance of proposed mSE-MMA algorithm were compared to present SE-MMA using the same channel and noise environment by computer simulation. For this, the recovered signal constellation which is the output of equalizer, residual isi and MD (Maximum Distortion), MSE learning curve which is represents the convergence performance and SER which is represents the robustness of noise were used as performance index. As a result of simulation, the mSE-MMA has more superior to the SE-MMA in every performance index, and was confirmed that mSE-MMA has robustness to the noise in the SER performance than SE-MMA especially.

Key Words : SE_MMA, MSE_MMA, Residual isi, Constellation Reduction, Maximum Distortion

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자: 2019년 11월 4일, 수정완료: 2020년 1월 4일
게재확정일자: 2020년 2월 7일

Received: 4 November, 2019 / Revised: 4 January, 2020 /
Accepted: 7 February, 2020

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

I. 서 론

대역 제한 채널을 통한 신호를 전송할 때 부가 잡음, 부호간 간섭, 페이딩 및 위상 찌그러짐과 같은 비선형특성의 영향을 받게 된다. 이와 같은 비선형 특성에 의한 부호간 간섭은 전송되는 신호를 심각하게 열화시켜 수신측에서 이를 복원할 때 상당한 성능 저하의 원인이 된다^{[1][2]}. 부호간 간섭을 보상 또는 최소화하기 위한 방법으로 송수신 필터의 파라미터 조정과 부분 응답 부호화 사용 등이 있지만, 실제의 통신 환경에서 파라미터의 조정은 현실적으로 매우 어렵거나 높은 송신 전력이 요구된다. 이외의 다른 대안으로 적응 등화기의 사용을 들 수 있으며, 등화기는 채널의 전달 함수가 $H(\omega)$ 일 때 수신측에서 사용되는 전달 함수가 $1/H(\omega)$ 인 디지털 필터를 말한다^[3]. 초기의 등화기는 송수신국간에 약속된 학습열에 의한 채널 전달 함수를 추정한 후 이의 역특성을 갖도록 등화기의 필터 계수를 설정한 후 데이터 전송을 개시한다. 그러나 시변 채널인 경우 전달 함수가 변동하므로 이에 대응되는 등화기 필터 계수를 변화시키기 위한 학습열 전송이 데이터 전송 중 수시로 이루어져야 한다. 이로 인한 채널 용량을 충분히 활용할 수 없으며, 전송 효율이 저하되므로 이를 개선키 위해 블라인드 적응 등화기가 사용되었다^{[3][4]}. 블라인드 적응 등화를 위한 알고리즘으로는 CMA (Constant Modulus Algorithm)와 MMA (Multiple Modulus Algorithm)이 있다. CMA는 연산량이 적은 반면 채널에 의한 진폭 찌그러짐만을 보상케되어 PLL과 같은 별도의 위상 찌그러짐 보안책이 외부에서 필요하게 된다. 반면 MMA는 연산량이 CMA보다 증가되지만 진폭과 위상 찌그러짐을 동시 보상이 가능하지만, 성능에서는 CMA보다 열화된다. 이와 같이 연산량과 성능간의 tradeoff 조건이 존재하게 되므로, MMA의 연산량을 간소화시키고 동시 보상을 가능케 하는 SE-MMA가 등장하였다^[4]. 이는 기존 MMA의 연산량을 줄여 진폭과 위상의 동시 보상이 가능한 반면 등화 성능이 열화되므로, 등화기의 출력을 송신 심볼점을 중심으로 일정 반경내에 존재할 때 적응 스텝 크기를 가변하여 성능을 더욱 개선할 수 있도록 mSE-MMA 알고리즘이 등장하였다^[5].

본 논문에서는 16-QAM 신호를 대상으로 mSE-MMA 적응 등화 알고리즘이 SE-MMA 보다 개선된 등화 성능을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 이를 위해 2장에서는 블라인드 적응 등화기를 사용하는 기저 대역 통신 모델과 SE-MMA 와 mSE-MMA 알고리즘에 대해 설명한다. 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 환경

과 파라미터 값의 정의 및 적응 등화기의 성능 지수인 복원 정상도, 잔류 isi 와 MD, MSE 및 SER에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고, 마지막으로 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 통신 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 SE-MMA 또는 mSE-MMA 적응 등화기를 사용한 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 발생하면 이는 송신 필터를 통과되어 스펙트럼 제한시킨 후, 찌그러짐에 의해 부호간 간섭을 발생하는 임펄스 응답 계수가 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달된다. 이때 채널에서는 가우시안 잡음 n_k 가 부가되며, 수신측에서는 수신 필터를 통과하여 잡음의 영향을 줄인 후 등화기에 인가된다. 이때 계수가 f_k 인 등화기의 전달 함수 $F(\omega)$ 는 통신 채널의 역함수 $1/H(\omega)$ 를 갖도록 설정된다. 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하여 시뮬레이션에서는 제외하였고, 적응 등화기의 출력 z_k 를 이용하여 오차 신호를 발생한 후 이를 이용하여 새로운 등화기 탭 계수 f_{k+1} 을 update 하며, 이는 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 완전 등화 상태에서 채널의 임펄스 응답 h_k 와 등화기의 디지털 필터 계수 f_k 의 선형 convolution 결과는 시간 영역에서는 임펄스, 주파수 영역에서는 평탄한 전달 특성을 얻을 수 있다. 또한 등화기에 의해 발생하는 지연 시간은 무시한다.

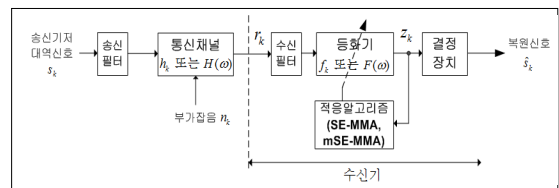


그림 1. 통신 시스템 모델
Fig. 1. Communication system model

2. SE-MMA

그림 1에서 수신 신호는 유한 계수를 갖는 등화 필터 f_k 를 통과하면서 채널 찌그러짐을 보상된 후 결정 장치를 통과시켜 복원 신호 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 적응 등화를 위

한 필터 계수 갱신에서 등화기의 출력 신호 z_k 와 송신 신호의 dispersion constant R_{MMA}^2 와의 차이로 정의되는 오차 신호를 이용한다. MMA 적응 등화 알고리즘에서는 다음과 같이 정의되는 비용 함수 J 를 최소화시키도록 반복하면서 등화기 탭 계수를 갱신한다.

$$J = E[(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)^2] \quad (1)$$

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

여기서 z_{kr}, z_{ki} 은 z_k 의 실수와 허수, s_{kr}, s_{ki} 은 s_k 의 실수와 허수를 각각 나타낸다. 식(1)의 비용 함수는 1차원 CMA 비용 함수를 2개 더한 형태로 표시됨을 알 수 있으며 오차 신호와 등화 필터 계수의 갱신식은 다음과 같다.

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

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

SE-MMA는 식(2)의 MMA 오차 함수에서 이들의 부호만을 이용하여 등화 필터 계수의 갱신에 사용되기 때문에 붙여진 이름이며, 오차 함수를 쓰면 다음과 같다.

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

$$f_{k+1} = f_k - \mu e_{kSE-MMA} r_k^* \quad (3)$$

여기서 sgn 은 signum 함수를 나타내며, 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 고려하게 되어 알고리즘의 연산량을 줄일 수 있게 되어 수렴 속도를 개선시킬 수 있는 장점이 있다. 그림 2는 SE-MMA 알고리즘의 내부 구조를 나타낸 것이며, dispersion constant R_{MMA}^2 와 등화기 출력을 이용하여 오차 신호를 발생한 후 이의 부호를 이용하여 탭 갱신 알고리즘에 이용됨을 알 수 있으며, 그림 3은 SE-MMA의 오차 함수를 나타낸 것이다.

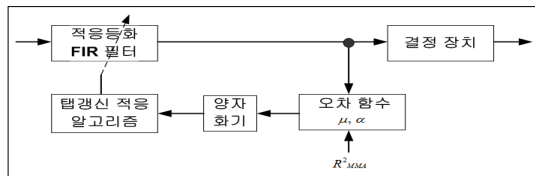


그림 2. SE-MMA 내부 구조
 Fig. 2. Internal structure of SE-MMA

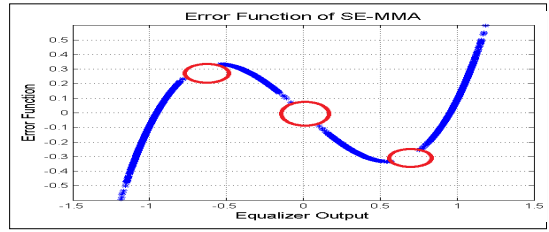


그림 3. SE-MMA 오차 함수
 Fig. 3. Error function of SE-MMA

3. mSE-MMA

mSE-MMA 알고리즘은 식 (3)의 고정된 스텝 크기 μ 를 송신 신호점을 중심으로 일정한 영역내에 등화기 출력의 존재 여부에 따라 이를 가변시키는 원리를 갖는다. 그림 4에서 검은 색의 송신 신호점을 기준으로 등화기 출력 신호점이 직경 D 의 원내에 존재하는 경우 스텝 크기 μ 를 적게 설정하여 등화기 탭 계수를 갱신하며, 직경 D 의 범위를 벗어나면 과도 상태로 판단하여 원래의 고정 스텝 크기 μ 로 탭 계수를 갱신하게 된다.

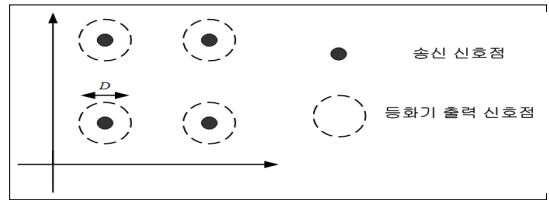


그림 4. mSE-MMA의 원리
 Fig. 4. Principle of mSE-MMA

이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mu_k = \mu_0, \quad \text{when } z_k \notin D$$

$$\mu_k = \mu_1, \quad \text{when } z_k \in D$$

$$\mu_0 > \mu_1 \quad (4)$$

그림 5는 mSE-MMA 알고리즘의 내부 구조를 나타낸 것으로 신호점 비교를 수행한 후 가변 스텝 크기를 이용하여 오차 신호를 발생한 후 탭 계수를 갱신하게 되며, 그림 6은 mSE-MMA의 영 오차 함수를 나타낸 것이며, 그림 3의 SE-MMA의 함수와 비교하면 모두 기함수 형태이며 그 범위가 감소함을 알 수 있다.

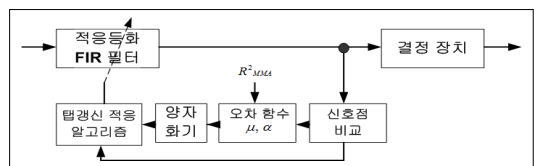


그림 5. mSE-MMA 내부 구조
 Fig. 5. Internal structure of mSE-MMA

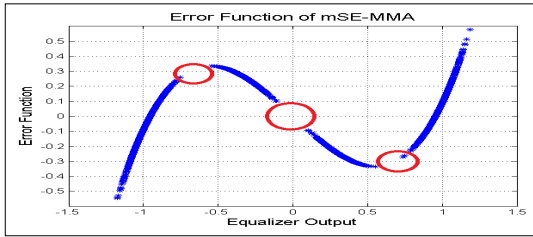
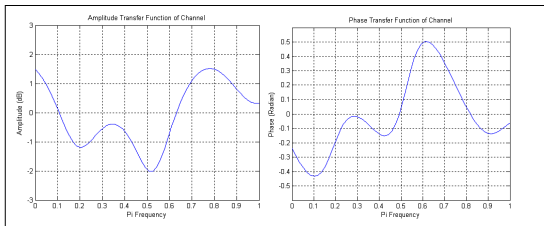


그림 6. mSE-MMA 오차 함수
Fig. 6. Error function of mSE-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

고정된 스텝 방식의 SE-MMA와 적응 스텝 방식의 mSE-MMA 알고리즘 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, SE-MMA에서 고정 스텝의 크기를 $\mu = 0.0013$, mSE-MMA에서 $D=0.25$ 와 $\mu_0 = 0.0013$,

$\mu_1 = 0.00026$ 이었으며, 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터를 공통으로 적용하였다. 그림 7은 부호간 간섭을 발생시키는 통신 채널의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 나타낸 것이며, 이와 같은 찌그러짐 특성에 의하여 수신 신호는 부호간 간섭이 발생된다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 7. 채널의 주파수 전달 함수
Fig. 7. Frequency transfer function of channel

그림 8은 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 7의 통신 채널을 통과한 후, 30dB의 신호대 잡음 전력비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이와 같은 수신 신호는 SE-MMA와 mSE-MMA 알고리즘으로 처리한 후, 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 등화기 출력 z_k 의 정상도, 잔류 isi 와 MD, MSE 및 SER을 계산하였다.

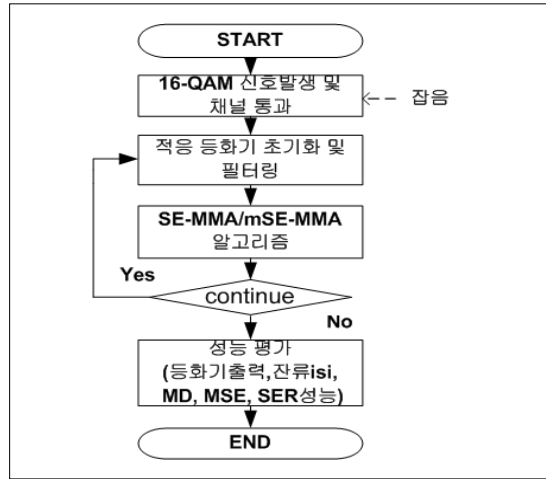


그림 8. 신호 처리 흐름도
Fig. 8. Flowdiagram of signal processing

그림 9는 이들 알고리즘의 첫 번째 성능 비교를 위한 정상 상태에서 적응 등화기의 출력 신호 정상도를 나타낸 것이다. 출력 정상도에서는 신호점의 크기와 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 된다. 그림에서 mSE-MMA의 정상도들이 SE-MMA보다 신호점의 폭이 좁으며, 신호점간의 간격이 크므로 결정 장치에서 “1”과 “0”를 판별할 때 오류 발생 가능성이 저하되므로 적응 등화 성능의 우월함을 알 수 있다.

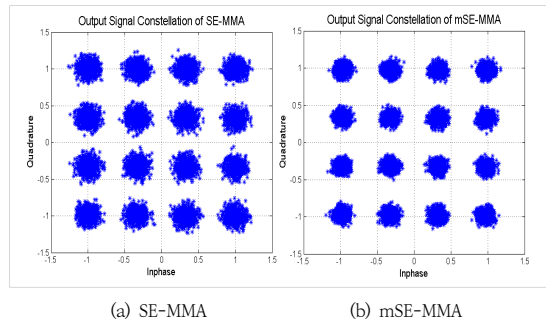


그림 9. 등화기 출력 신호 정상도
Fig. 9. Output signal constellation of equalizer

두번째 성능 비교를 위한 지수로 잔류 isi 와 MD, MSE learning 곡선을 사용하였으며, 이들 곡선에서는 채널의 상태 변화가 있는 경우 초기 과도 과정을 지나 정상 상태에 도달할 때까지의 수렴 속도와 정상 상태에서의 잔류량을 알 수 있다. 특히 수렴 속도는 적응 등화기가 정상적으로 동작 중에 채널 상태의 급변 또는 순간적으로 절

단되는 경우 이로부터 신속하게 복원하여 적응하기 위한 소요 시간을 나타낸다.

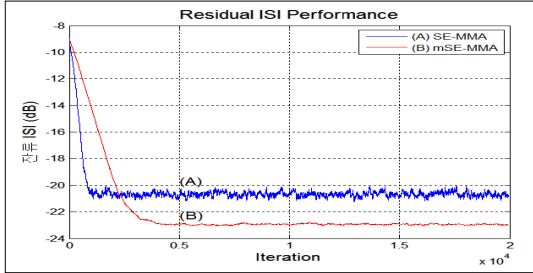


그림 10. 잔류 isi 성능
 Fig. 10. Residual isi performance

그림 10의 잔류 isi 성능은 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화시 이들의 종합 특성은 시간 영역에서는 임펄스 특성이 된다. 이는 이론적이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하고 잔류 성분들이 존재하게 되므로 이들의 전력 크기를 의미한다. 그림에서 -20dB를 정상 상태로 정할 때 SE-MMA는 832회, mSE-MMA는 2108회에 달성하므로, 수렴 속도에서는 SE-MMA가 mSE-MMA보다 약 2.6배 정도 빠르며, 수렴후의 양에서도 mSE-MMA가 SE-MMA보다 약 2dB 정도 훨씬 적어지면서 misadjustment에 의한 등화 잡음이 적게 되어 jitter가 감소됨을 알 수 있다.

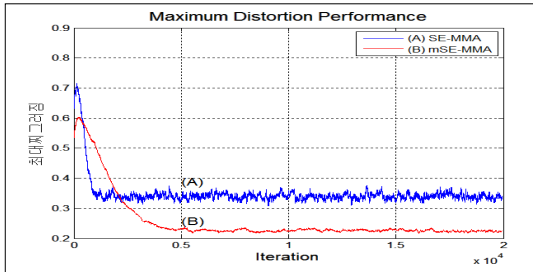


그림 11. 최대 피크그림 성능
 Fig. 11. Maximum distortion performance

그림 11은 잔여 isi 성분들의 크기를 전압으로 나타내는 MD 성능을 나타내었으며, 정상 상태를 0.36[V]로 정의할 때 SE-MMA는 849회, SE-MMA는 1929회가 필요케 되어 수렴 속도에서도 SE-MMA가 mSE-MMA보다 약 2.3배 빠르지만, 정상 상태 이후의 양은 mSE-MMA가 SE-MMA 보다 적게 되어 성능이 개선됨을 알 수 있다.

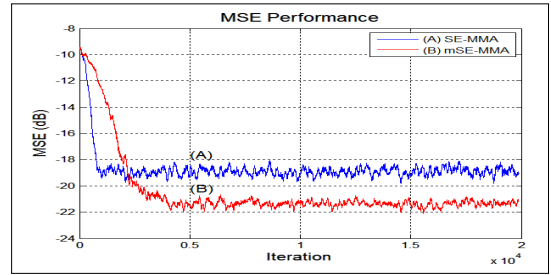


그림 12. MSE 성능
 Fig. 12. MSE performance

그림 12는 등화기 출력과 결정 장치의 출력간에 발생하는 진폭의 차이를 나타내는 평균 자승 오차 (MSE) 성능을 나타낸 것이다. 여기서 정상 상태를 -19dB로 설정할 때 SE-MMA는 864회, mSE-MMA는 2184회가 소요되어 수렴 속도에서 SE-MMA가 약 2.5배 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔류양에서는 약 2dB 정도 mSE-MMA가 SE-MMA보다 개선됨을 알 수 있다.

마지막으로 통신 채널에서 부가되는 잡음에 대한 강인성을 알아보기 위하여 신호대 잡음비를 0에서 30dB까지 2dB 단위로 변화시킬때의 SER 성능을 그림 13에 나타내었다. 전체적으로 mSE-MMA가 SE-MMA보다 성능이 우수하며 개선된 등화 이득을 얻을 수 있어서, 심볼 오류율 10⁻²에서 약 4dB 정도이며, 신호대 잡음비가 증가할수록 우수하여, 등화기 외부의 잡음에 대한 robustness가 크게 개선됨을 알 수 있다.

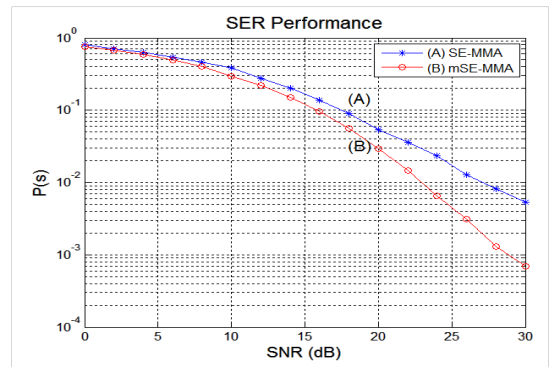


그림 13. SER 성능
 Fig. 13. SER performance

IV. 결론

본 논문은 SE-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능을

개선할 수 있는 mSE-MMA에 관한 것이다. SE-MMA는 기존 MMA 알고리즘의 연산량을 줄여 실시간 응용을 가능케 하기 위하여 등장하였지만, 이로 인하여 성능이 열화된다. mSE-MMA 알고리즘은 SE-MMA와 같이 연산량을 줄이면서도 성능 열화를 방지하기 위하여 적응을 위한 스텝 크기를 변화시킨다. 이를 위하여 송신 신호점을 기준으로 등화기 출력 신호가 일정 반경내에 위치하는 경우 스텝 크기를 더욱 줄여 적응토록 동작하며, 이의 정상 상태 이후 개선된 성능을 적응 등화기 내부 성능 지수인 잔류 isi, MD, MSE 및 외부 성능 지수인 SER을 적용하여 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 내부 성능 지수에서 mSE-MMA가 SE-MMA보다 정상 상태까지 도달하기 위한 수렴 속도는 대략 2.3~2.6배 정도 늦지만, 정상 상태 이후부터의 성능에서는 약 2dB 이상 개선되었으며, 외부 성능 지수에서도 신호대 잡음비가 클수록 높은 등화 이득을 얻을 수 있어서 robustness가 개선됨을 알 수 있었다. SE-MMA 알고리즘에서 송신 신호점과 등화 출력력을 비교하는 기능의 부가만으로 연산량이 크게 증가하지 않으면서 등화 성능을 개선할 수 있는 mSE-MMA 알고리즘의 수렴 속도를 빠르게 할 수 있는 다른 방안에 대한 향후 지속적인 연구가 필요하다.

References

- [1] J.T.Yuan, T.C.Lin, "Equalization and Carrier Recovery of CMA and MMA in Blind Adaptive Receivers", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 58, No. 6, pp.3206~3217, June 2010. doi : 10.1109/TSP.2010.2044255
- [2] J.Yang, J.J.Werner, G.A.Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization Algorithm", 13th Int. Conf. of DSP, Vol.1, pp.127~130, July 1997. doi : 10.1109/ICDSP.1997.627988
- [3] V.Weerackody, S.A.Kassam, K.R.Laker, "A simple hard-limited adaptive algorithm for blind equalization", IEEE Trans. Cir. Sys., Vol.39, No.7, pp.482~487, July 1992. doi : 10.1109/82.160173
- [4] K.Banovic, R.Lee, E.A.Raheem, M.A..S.Khalid, "Computationally-Efficient Methods for Blind Adaptive Equalization", 48th Middlewest Symp. on Circuits and Systems, Vol.1, pp.341~344, 2005. doi : 10.1109/MWSCAS.2005.1594108
- [5] Wen si-yuan, L.Feng, "A Computationally Efficient Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", 2nd IEEE Int. Conf. of Infor. Eng. and Management, pp.685~687, 2010. doi : 10.1109/ICIME.2010.5478261
- [6] W. Rao, G. Y. Cai, "New constant modulus blind

equalization algorithm based on variable segment error function", Jour. of System Simulation, Vol. 9, No. 12, pp.2686~2689, 2006.

- [7] S.G.Lim, D.S.Kang, "Performance of SE-MMA Blind Adaptive Equalization Algorithm in QAM System", Jour. on. I.W.I.T., Vol.13, No.3, pp.63~69, June 2013.
- [8] K.N.Oh, "An Algorithm for Variable Step-Size Improving Steady-State Performance of Blind Equalization", Jour. of K.I.I.T., Vol.9, No.10, pp.43~48, Oct. 2011.

저 자 소 개

임 승 각(정회원)



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

학부 교수.

- 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신