

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.3.99>

IIBC 2015-3-14

2단 적응 등화기의 직렬 연결에 의한 MMA 알고리즘의 수렴 속도 개선

Convergence Speed Improvement in MMA Algorithm by Serial Connection of Two Stage Adaptive Equalizer

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문에서는 nonconstant modulus 신호를 대상으로 채널의 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 보상하기 위한 MMA (Multiple Modulus Algorithm) 적응 등화기를 가변 적응 스텝 크기를 적용하지 않고 2단의 직렬 연결 형태로 구현하여 수렴 속도를 개선할 수 있는 mMMA (modified MMA)에 대하여 다룬다. 적응 등화기는 유한 차수의 탭 지연선에 의한 단일 디지털 필터로 구현되므로, 논문에서는 이를 2단의 직렬 연결 필터로 구현한 후 각 단계에서는 MMA와 동일한 알고리즘으로 오차 신호를 얻은 후 필터 계수를 갱신하게 된다. 따라서 첫단에는 빠른 수렴 속도를 결정하며, 두 번째단에서는 첫단의 출력에 포함되어 있는 잔류 isi양을 최소화시키도록 탭 계수를 갱신한다. 이때 1단 시스템과 2단 시스템은 동일한 차수의 필터가 되도록 조정하면서 적응 등화 성능을 비교하였으며, 성능 비교를 위한 지수는 등화기 출력 신호 정상도, 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE, 채널의 신호대 잡음비에 따른 SER을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 2단의 FIR 구조를 갖는 mMMA가 1단의 기존 MMA보다 등화 잡음에 의한 정상도를 제외한 모든 성능 지수에서 우월하며, 수렴 속도는 1.5~1.8배 정도 개선됨을 확인하였다.

Abstract This paper deals with the mMMA (modified MMA) which possible to improving the convergence speed that employing the serial connecting form of two stage digital filter instead of signal filter of MMA adaptive equalizer without applying the variable step size for compensates the intersymbol interference by channel distortion in the nonconstant modulus signal. The adaptive equalizer can be implemented by signal digital filter using the finite order tap delay line. In this paper, the equalizer is implemented by the two stage serial form and the filter coefficient are updated by the error signal using the same algorithm of MMA in each stage. The fast convergence speed is determined in the first stage, and the residual isi left at the output of first stage output is minimized in the second stage filter. The same digital filter length was considered in single stage and two stage system and the performance of these systems were compared. The performance index includes the output signal constellation, the residual isi and maximum distortion, MSE that is measure of the convergence characteristics, the SER. As a result of computer simulation, mMMA that has a FIR structure of two stage, has more good performance in every performance index except the constellation diagram due to equalization noise and improves the convergence speed about 1.5~1.8 time than the present MMA that has a FIR structure of single stage.

Key Words : MMA, mMMA, residual isi, constant modulus, maximum distortion

*정희원, 공주대학교 정보통신공학전공
접수일자 : 2015년 3월 3일, 수정완료 : 2015년 5월 4일
게재확정일자 : 2015년 6월 12일

Received: 3 March, 2015 / Revised: 4 May, 2015 /

Accepted: 12 June, 2015

*Corresponding Author : sglim@kongju.ac.kr

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

I. 서 론

디지털 통신 시스템에서 전송 신호는 대역 제한과 다중 경로 특성을 갖는 통신 채널을 통하여 수신측으로 전송된다. 이때 송신 신호와 채널의 임펄스 응답간에는 중첩(convolution)이 발생되며 잡음이 추가된다. 이와 같은 중첩 효과에 의한 발생하는 찌그러짐을 부호간 간섭이라고 한다^[1]. 한정된 주파수 스펙트럼을 효율적으로 사용하기 위해 16차 이상의 nonconstant modulus 신호를 송신측에서 사용하므로, 부호간 간섭의 효과는 더욱 증대되어 통신 시스템의 throughput이 열화되므로 이를 최소화하기 위하여 부분 응답 부호화 방식, 블라인드 적응 등화 기등이 사용된다^{[2][3]}. 전자의 경우 수신측에서 부호 재생시 이들간의 진폭 차이를 더욱 크게 부호화 하므로서 부호간 간섭을 줄일 수 있지만 전송시 높은 전송 전력이 요구되므로 응용 분야에 따라 부적합하다. 그러나 후자의 경우 수신측에서 적응 필터의 사용으로 대역폭의 낭비 없이 부호간 간섭에 의한 throughput 열화를 최소화할 수 있어서 최근의 통신 시스템에서 널리 사용되는 기법이다. 기존 적응 등화기는 송수신국간 상호 약화된 학습 열 방식을 이용하여 채널의 전달 특성을 추정하므로 적응 등화 성능이 우수하지만 대역폭 낭비와 전송 효율 저하라는 문제점이 있으므로, 학습열에 의존하지 않는 블라인드 방식이 등장하여 기존 방식의 문제점을 개선할 수 있지만 등화 성능이 열화되는 단점을 갖게 된다. 이와 같은 블라인드 방식의 단점을 개선하기 위해 다양한 알고리즘이 등장하고 있으며 CMA (Constant Modulus Algorithm), MMA (Multi-Modulus Algorithm)등을 들 수 있으며 주로 단일 구조의 적응 등화 필터인 FIR (Finite Impulse Response) 구조를 적용하고 있다^{[5][7]}. 또한 일반적으로 블라인드 적응 등화기에서 요구되는 특성으로는 채널에 의해 발생하는 부호간 간섭을 줄일 수 있는 능력과 채널의 상태 변화에 의한 추적 능력(tracking capabilities)을 나타내는 수렴 속도가 있다. 본 논문에서는 nonconstant modulus 신호인 16-QAM 신호를 대상으로 가변 스텝 크기를 적용하지 않으면서 MMA 적응 등화 알고리즘을 동일한 차수의 1단 FIR 적응 필터 구조와 2단 직렬 연결 형태의 FIR 구조에 적용할 때 2단 방식이 1단 방식보다 채널 추적 능력을 나타내는 수렴 속도를 개선할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다^[4].

논문의 구성으로 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 통신 시스템의 모델을 설명한 후 3 장에서는 1단 구조 및 2단 구조의 MMA 알고리즘에 대해, 4 장에서는 시뮬레이션의 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 통신 시스템 모델

그림 1은 nonconstant modulus 신호인 16-QAM을 송수신하는 통신 시스템의 모델을 나타낸 것으로 통신 채널, 등화기와 결정 장치로 구성되어 있으며 다음과 같은 가정을 포함하고 있다.

- (1) 송신 필터와 수신 필터는 이상적
- (2) 입력 신호 s_k 는 평균 0인 2차원 정상도
- (3) 미지의 SISO (Single In Single Output) 시스템인 채널 h_k 는 비최소 위상 선형 시불변으로 전달 함수는 단위원상에 영점이 존재하지 않음
- (4) 등화기 필터 f_k 는 탭 지연선으로 구성
- (5) 부가 잡음 n_k 는 평균 0, 유한 분산값을 갖는 백색 가우시안 분포

송신측에서 16-QAM과 같은 nonconstant modulus를 갖는 신호 s_k 를 송신하면 대역 제한과 찌그러짐을 발생하는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통과하면서 부가 잡음 n_k 이 부가되어 수신된다. 수신된 신호 r_k 는 응답이 f_k 인 등화기에 입력되어 채널에 의해 발생된 찌그러짐이 보상된 출력 z_k 를 얻게 된 후, 이는 결정 장치(decision device)에 의해 송신 신호 s_k 의 추정치인 \hat{s}_k 를 얻게 된다. $s_k \approx \hat{s}_k$ 가 되기 위한 등화기의 응답 f_k 는 출력 신호 z_k 와 결정 장치의 출력 \hat{s}_k 를 이용한 modulus에 의존하는 오차 신호에 의한 적응 알고리즘을 적용하여 매 순간 변화된다.

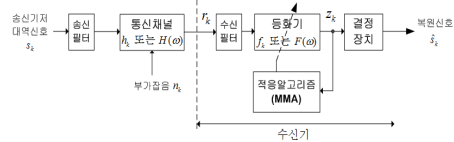


그림 1. 통신 시스템 모델
Fig. 1. Communication system model

2. MMA 알고리즘

CMA는 모든 신호점들이 동일 진폭을 가져야하는 4-QAM과 같은 constant modulus 특성을 이용하므로 등화 성능은 좋은 반면 모든 신호점들을 동일 단일 modulus로 project 시키기 때문에 신호대 잡음비가 낮거나 16-QAM과 같은 스펙트럼 효율적인 nonconstant modulus 신호에서는 성능의 저하 및 1차원의 비용 함수에서 절대치를 고려하므로 위상을 보상하지 못한다. 반면 MMA는 CMA의 단일 modulus를 multiple modulus로 확장하여 등화기 출력 전력에 비례하여 signal constellation point의 각 subset에 multiple modulus 중 1개를 할당시킴으로 CMA의 성능 열화를 개선하며, 비용 함수에서 등화기 출력의 실수와 허수부를 고려하므로 진폭과 위상의 동시 보상이 가능케 된다. 저차 QAM 신호에 대해서는 CMA와 비슷한 수렴 특성을 보이지만, 고차 QAM 신호에 대해서는 MMA가 CMA보다 우월한 수렴 특성을 보이면서 등화 잡음이 적게된다. MMA 적용 등화 알고리즘은 CMA 알고리즘을 개선한 것으로 등화 필터 계수 f_k 에 대한 특정한 비용 함수 J 를 최소화시키도록 이를 stochastic gradient algorithm을 적용하여 반복시킨다. MMA의 비용 함수와 오차 함수는 식(1)과 같다.

$$J_{MMA} = E\left\{(|z_{kr}|^p - R_{MMA}^p)^2 + (|z_{ki}|^p - R_{MMA}^p)^2\right\} \quad (1)$$

$$R_{MMA}^p = \frac{E\{|I_{kr}^{2p}|\}}{E\{|I_{kr}^p|\}} = \frac{E\{|I_{ki}^{2p}|\}}{E\{|I_{ki}^p|\}}$$

$$\bar{e}_{kMMA} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)$$

여기서 R_{MMA}^p 를 constant modulus 또는 p차 dispersion constant라고하며 등화기의 출력이 modulus 주위에 위치하도록 계수 f_k 를 갱신(update)하게 된다. 식(1)에서 p는 정수로서 일반적으로 2의 값을 많이 사용하며 z_{kr} , z_{ki} 는 등화기 출력 z_k 의 실수와 허수, I_{kr} , I_{ki} 는 송신 신호 I_k 의 실수와 허수를 각각 나타낸다. MMA 비용 함수는 1차원적 CMA 비용 함수를 2개 더한 형태이며, 식(1)의 오차 함수를 이용하여 MMA에서 등화 필터의 계수는 다음과 같이 갱신되어지며, μ 는 적응 스텝의 크기를 나타낸다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \bar{e}_{kMMA} r_k^* \quad (2)$$

그림 2는 송신 신호가 16-QAM 인 경우 등화기 출력

에서 MMA 알고리즘의 오차 함수를 각각 나타낸 것이다.

오차 함수는 원점을 중심으로 기함수 형태임을 알 수 있으며 붉은 원은 신호점이 분포하지 않는 영역을 나타낸 것이다.

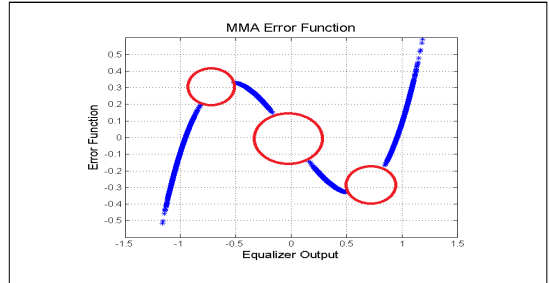
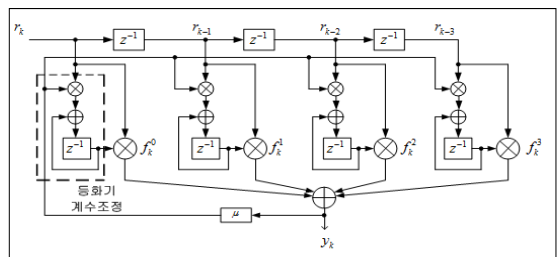


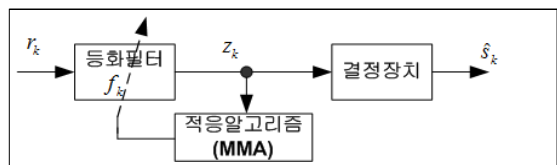
그림 2. MMA의 오차 함수
 Fig. 2. Error function of MMA

3. 1단과 2단 등화기 구조

그림 3은 탭 지연선으로 구성되는 1단 FIR 적응 등화기의 구조를 나타낸 것이다. 1 샘플씩 지연시키는 지연기, 승산기 및 가산기의 조합으로 구성되어 있으며 그림에서는 3개의 delay 요소가 사용되므로 이의 차수 $N = 4$ 인 1단 구조에 해당한다.



(a) 내부 구조



(b) FIR 기호

그림 3. 1단 FIR 등화기의 구조 및 기호
 Fig. 3. Structure & symbol of 1 stage FIR equalizer

그러나 본 논문에서 제안하는 mMMA 구조에서는

그림의 등화 필터가 2 단으로 직렬 연결된 형태이며 각 필터에는 MMA와 동일한 적응 알고리즘이 적용되며 그림 4에 나타내었다. 첫번째 등화 필터 f_{1k} 는 $N_1 < N_2, \mu_1 > \mu_2$ 일 때 빠른 수렴 속도를 얻기 위해 사용되며, 두번째 등화 필터 f_{2k} 는 z_{1k} 에 남아있는 잔류 isi양을 보상하기 위하여 사용된다.

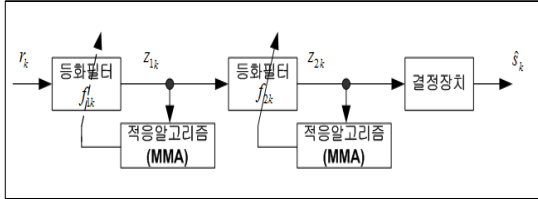


그림 4. 2단 mMMA 의 구조
Fig. 4. Structure of 2 stage mMMA

그림에서 첫째 등화 필터의 차수를 N_1 , 두 번째 등화 필터의 차수를 N_2 라고 하자. 첫 번째 적응 등화 필터의 입력을 r_k 라고 하면 이의 출력이 z_{1k} 이며, 이는 두 번째 필터의 입력이 되어 최종 출력 z_{2k} 를 얻게 된다.

$$z_{2k} = z_{1k} \odot f_{2k} = r_k \odot f_{1k} \odot f_{2k} \quad (3)$$

여기서 첫단과 두 번째단의 필터 계수 f_{1k}, f_{2k} 를 갱신시키기 위한 식은 다음과 같이 된다.

$$\overline{f_{1(k+1)}} = \overline{f_{1(k)}} - \mu_1 \overline{e_{1(k)MMA}}^* \Gamma_k \quad (4)$$

$$\overline{e_{1(k)MMA}} = z_{1(k)r} (|z_{1(k)r}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{1(k)i} (|z_{1(k)i}|^2 - R_{MMA}^2)$$

$$\overline{f_{2(k+1)}} = \overline{f_{2(k)}} - \mu_2 \overline{e_{2(k)MMA}}^* z_{1k}$$

$$\overline{e_{2(k)MMA}} = z_{2(k)r} (|z_{2(k)r}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{2(k)i} (|z_{2(k)i}|^2 - R_{MMA}^2)$$

그림 3의 1단 적응 등화기의 차수와 스텝 크기를 N 과 μ , 그림 4의 2단 적응 등화기 각각의 차수와 스텝 크기를 N_1, N_2 및 μ_1, μ_2 라면 $N = N_1 + N_2 - 1$ 및 $\mu_1 = \mu, \mu_2 < \mu_1$ 이 되도록 설정해야하며, 그림 5는 mMMA의 오차 함수를 나타낸 것이다.

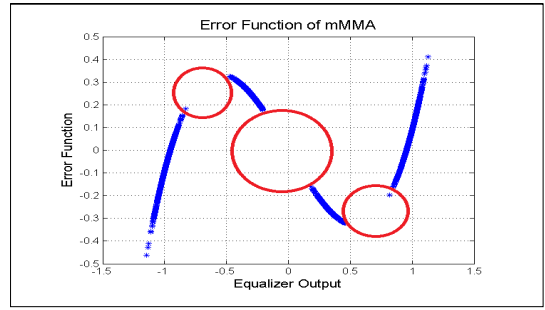


그림 5. mMMA의 오차 함수
Fig. 5. Error Function of mMMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션

1단의 FIR 구조를 갖는 MMA와 2단의 FIR 구조를 갖는 mMMA 적응 등화기의 성능을 비교하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 동일한 채널에서 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝 $\mu = \mu_1 = 0.004, \mu_2 = 0.0004$ 및 차수 $N = 21, N_1 = 9, N_2 = 13$ 으로 설정한 후, 송신 신호로는 16-QAM의 nonconstant modulus를 이용하였다. 송신 신호는 부호간 간섭을 발생시키는 통신 채널을 통과한 후 원하는 신호대 잡음비를 갖는 잡음 n_k 를 추가하여 수신 신호 r_k 을 얻었다. 그림 6은 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 나타낸 것이며, 그림 7은 통신 채널의 진폭과 위상 전달 함수를 나타낸 것이다.

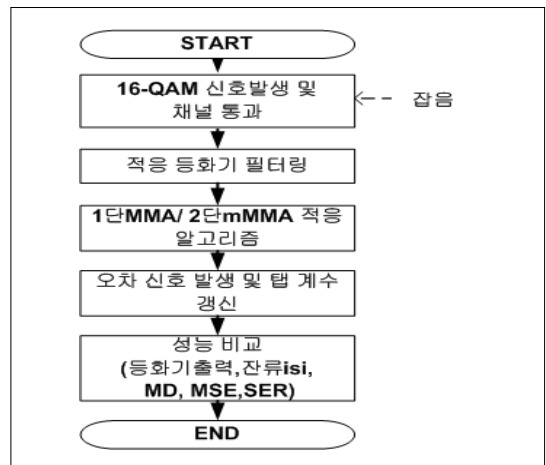


그림 6. 신호 처리 흐름도
Fig. 6. Signal processing flowdiagram

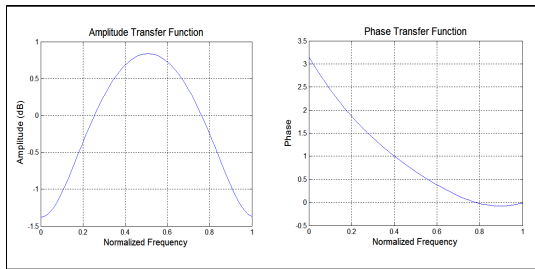


그림 7. 채널의 전달 함수
 Fig. 7. Transfer function of channel

그림 8은 정상 상태에서 적응 등화기의 첫 번째 성능 지수인 등화기 출력 신호의 정상도를 나타낸 것이다. 정상도에서 16개의 신호점을 명확하게 알 수 있으며, 각 신호점간의 거리가 크며 신호점의 폭이 좁을수록 등화 능력이 우수하다. 정상도에서는 1단의 MMA가 2단 직렬 형태인 mMMA보다 신호점간의 거리가 멀고 신호점들의 폭이 좁게 되어 적응 등화 능력이 우월함을 알 수 있다.

즉 mMMA는 MMA보다 정상 상태에서 내부 등화 잡음이 부가되므로 열화된 것으로 나타난다.

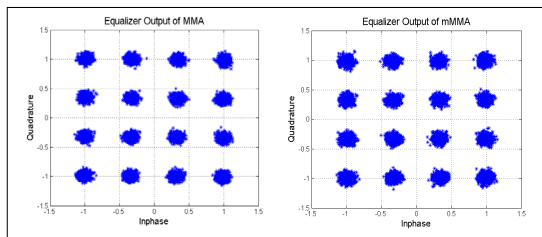


그림 8. 등화기 출력 신호 정상도
 Fig. 8. Equalizer Output signal constellation

적응 등화기의 성능을 나타내는 내부 지수로 잔류 isi (residual isi)와 최대 찌그러짐 (maximum distortion) 및 MSE를 사용하였다. 잔류 isi는 통신 채널 h_k 와 등화 필터 계수 f_k 가 완전 보상 상태에서 발생하는 잔류 성분들의 전력 크기를 나타내며, 최대 찌그러짐은 잔류 성분들의 전압 크기를 나타내고, MSE는 적응 등화기 출력과 결정 장치 출력간의 진폭 차이의 자승치로 정의된다. 이들 성능 곡선에서는 잔여 성분 뿐만 아니라 채널의 순시 변동에 신속한 적응 능력을 나타내는 수렴 시간을 알 수 있다. 그림 9는 잔류 isi의 성능을 나타내고 있으며, 적응 등화기에서 -20dB의 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에

서 MMA는 1614회, mMMA는 1117회가 소요되어 mMMA가 MMA보다 1.5배 정도 빠름을 알 수 있다. 그림 10은 최대 찌그러짐의 성능을 나타낸 것이며, 정상 상태로 0.4Volt로 설정할 때 MMA는 1605회, mMMA는 893회가 소요되어 수렴 속도에서는 mMMA가 MMA보다 1.8배 빠름을 알 수 있다. 그림 11은 MSE 성능을 나타낸 것으로, 정상 상태를 -20dB로 설정할 때 MMA는 1720회, mMMA는 1150회가 소요되어 수렴 속도에서는 mMMA가 MMA보다 1.5배 정도 빠름을 알 수 있다. 그러나 이들 성능 지수에서 mMMA는 정상 상태 이후부터 등화 잡음이 MMA보다 증가함을 알 수 있다.

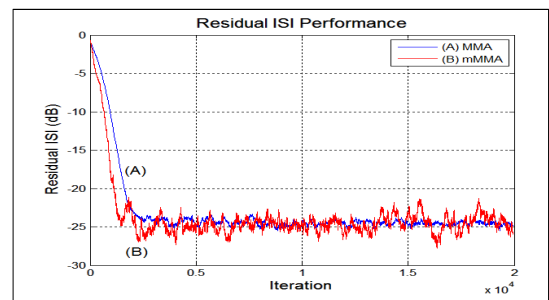


그림 9. 잔류 isi 성능
 Fig. 9. Residual isi performance

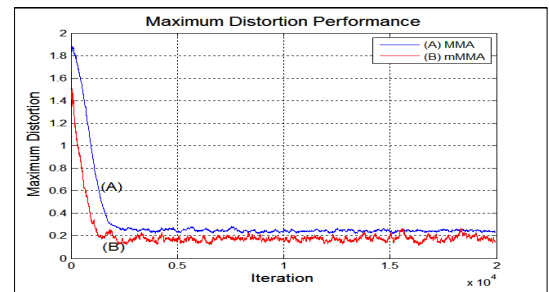


그림 10. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 10. Maximum distortion performance

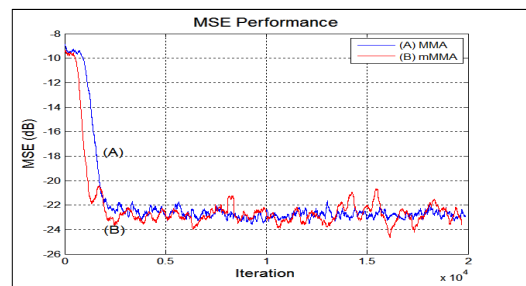


그림 11. MSE 성능
 Fig. 11. MSE performance

그림 12는 1단 FIR 구조의 MMA와 2단 FIR 구조의 mMMA 적응 등화기의 외부 잡음에 대한 강인성을 나타내는 심볼 오류율 성능을 나타낸 것이다. 신호대 잡음비 SNR을 0~30dB 까지 5dB 단위로 변화시키면서 30,000개의 16-QAM 신호에 대하여 5회 반복 시뮬레이션한 심볼 오류율이다. 그림에서 모든 신호대 잡음비에서 mMMA가 MMA보다 더욱 robustness하며, 개선된 수렴 속도에 따른 오류율이 감소됨을 알 수 있다.

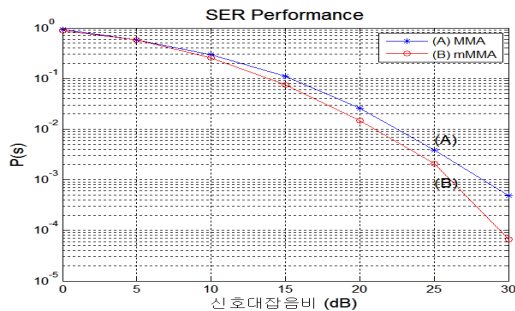


그림 12. SER 성능
Fig. 12. SER performance

V. 결론

논문에서는 16-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호를 대상으로 블라인드 등화를 위한 MMA 알고리즘을 1단의 FIR 구조와 2단의 직렬 연결 FIR 구조를 적용할 때의 등화 성능을 비교하였으며 1단과 2단 FIR 구조에 적용되는 필터 차수는 동일하였다. 2단 구조의 mMMA 등화기에서 첫째단은 수렴 속도를 보상으로 하며, 두번째단은 첫째단 출력에 포함되어 있는 잔류 ISI 성분을 최소화시키도록 구성하였다. 이는 기존 1단 구조의 FIR을 적용하는 기존 MMA 보다 상대적인 적응 스텝의 개념을 적용한 것으로도 볼 수 있다. 적응 등화기 내부의 성능 비교 결과 등화기의 출력 정상도에서는 mMMA가 기존 MMA보다 열악하였지만, 특히 수렴 속도에서는 잔류 ISI, 최대 찌그러짐 및 MSE에서는 mMMA가 MMA보다 1.5~1.8배 정도 빠름을 알 수 있었지만 정상 상태 이후 등화기의 탭 계수 갱신에 의한 등화 잡음의 영향이 약간 증가됨을 알 수 있었다. 또한 등화기 외부의 성능 비교를 위하여 채널에서 부가되는 잡음에 대한 robustness를 위한 SER 성능에서는 mMMA가 MMA보다 우월함을 알 수 있었다. 블라인드 적응 등화기에서 요구되는 조건중

에서 채널에서 빠른 추적성이 요구되는 환경에서 2단 FIR 구조를 갖는 mMMA가 기존의 1단 FIR 구조를 갖는 MMA보다 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] J.Yang, J.J.Werner, G.A.Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization and Its Generalized Algorithms", IEEE Journal on S.A.C., Vol.20, No.3, pp.997~1015, June 2002.
- [2] S.Abrar, R.A.Axford, "Sliced Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", ETRI Journal, Vol.27, No.3, pp.257~266, June 2005.
- [3] M.Abide D., A. Ozen, "A Novel Variable Step Size Adjustment Method Based on Autocorrelation of Error Signal for the Constant Modulus Blind Equalization Algorithm", Radio Engineering, Vol.21, No.1, pp.37~45, April 2012.
- [4] M.Pinchas, "Two Blind Adaptive Equalizers Connected in Series for Equalization Performance Improvement", Jour. of Signal and Information Processing, pp.64~71, April 2013.
- [5] O.Shalvi, E.Weinstein, "New Criteria for Blind Deconvolution of Nonminimum Phase Systems (Channel)", IEEE Trans. on Information Theory, Vol.36, No.2, pp.312~321, 1990.
- [6] M.Lazaro, I.Santamaria, D.Erdogmus et. al., "Stochastic Blind Equalization Based on pdf Fitting Using Parzen Estimator", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.53, No.2, pp.696~704, 2005.
- [7] D.S.Kang, S.G.Lim, "The Performance Comparison of MMA and S-MMA Adaptive Equalization Algorithm for QAM Signal", Jour. on I.W.I.T., Vol.13, No.1, pp. 19~26, Feb. 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

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.

신공학부 교수.

<주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신>