

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2013.13.6.115>

JIIBC 2013-6-15

QAM 시스템에서 DSE-MMA 블라인드 등화 알고리즘의 성능 평가

Performance Evaluation of DSE-MMA Blind Equalization Algorithm in QAM System

강대수*

Dae-Soo Kang

요약 본 논문은 송신 부호가 대역 제한, 위상 찌그러짐이 존재하는 비선형 통신 채널을 통과할 때 발생하는 부호간 간섭을 보상하기 위한 블라인드 등화 알고리즘인 SE-MMA (Signed-Error MMA)의 robustness 성능을 개선할 수 있는 DSE-MMA (Dithered Sign-Error MMA)에 관한 것이다. SE-MMA는 등화기의 탭 계수 갱신을 위하여 곱셈 대신 1 bit 양자화를 사용하므로 알고리즘의 연산량을 줄일 수 있어 H/W 응용에 유리하지만, 양자화 과정에서 발생하는 정보 손실에 의하여 전체적인 블라인드 등화 성능 알고리즘이 MMA보다 열화되는 단점이 있다. DSE-MMA는 SE-MMA의 단점 중에서 robustness를 나타내는 SER 성능을 개선키 위하여 양자화 전에 dither 신호를 이용하는 Dithered Signed-Error 개념을 MMA에 적용하였으며, SE-MMA 와 MMA 알고리즘이 갖는 부호간 간섭에 의한 진폭과 위상 찌그러짐을 동시 보상 능력을 갖는다. 논문에서 DSE-MMA 블라인드 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 지수로 는 등화기 출력 신호, 잔류 isi, MD (Maximum Distortion), MSE 와 SER를 사용하였으며, 이들 성능 지수를 적용할때 SE-MMA 알고리즘과 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 DSE-MMA가 SE-MMA 보다 robustness 와 정상 상태 이후 성능 지수의 양에서 개선됨을 알 수 있었지만, 초기 상태에서 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에서는 늦어짐을 확인하였다.

Abstract This paper related with the DSE-MMA (Dithered Sign-Error MMA) that is the simplification of computational arithmetic number in blind equalization algorithm in order to compensates the intersymbol interference which occurs the passing the nonlinear communication channel in the presence of the band limit and phase distortion. The SE-MMA algorithm has a merit of H/W implementation for the possible to reduction of computational arithmetic number using the 1 bit quantizer in stead of multiplication in the updating the equalizer tap weight. But it degrades the overall blind equalization algorithm performance by the information loss at the quantization process compare to the MMA. The DSE-MMA which implements the dithered signed-error concepts by using the dither signal before quantization are added to MMA, then the improved SNR performance which represents the robustness of equalization algorithm are obtained. It has a concurrently compensation capability of the amplitude and phase distortion due to intersymbol interference like as the SE-MMA and MMA algorithm. The paper uses the equalizer output signal, residual isi, MD, MSE learning curve and SER curve for the performance index of blind equalization algorithm, and the computer simulation were performed in order to compare the SE-MMA and DSE-MMA applying the same performance index. As a result of simulation, the DSE-MMA can improving the robustness and the value of every performance index after steady state than the SE-MMA, and confirmed that the DSE-MMA has slow convergence speed which meaning the reaching the steady state from initial state of adaptive equalization filter.

Key Words : MMA, SE-MMA, DSE-MMA, residual isi, maximum distortion

*정회원, 공주대학교 정보통신공학전공
접수일자 2013년 10월 30일, 수정완료 2013년 11월 21일
게재확정일자 2013년 12월 13일

Received: 30 October, 2013 / Revised: 21 November, 2013 /
Accepted: 13 December, 2013

*Corresponding Author: dskang@kongju.ac.kr
Dept. of Information and Communication, Kongju National
University, Korea

I. 서 론

디지털 전송을 통한 정보의 이용 형태가 다양화되면서 이를 통한 다양한 정보 서비스가 제공되고 있으며, 이의 영향이 국가 사회의 근간이 되고 있다. 이와 같은 상황에서 한정된 채널을 통해 다양한 정보원들을 고속, 광대역으로 전송하기 위한 기술이 개발되고 있는 실정이다. 특히 대역폭 효율적인 디지털 전송에서 고차 신호 방식을 사용하며 이를 위하여 16 또는 64-QAM이 사용되고 있다. 그러나 한정된 대역폭, 진폭과 위상 찌그러짐에 의한 부호간 간섭의 영향은 고차 방식에서는 더욱 심각한 전송 장애 요인이 되고 있으므로 수신기를 설계할 때 이의 영향을 최소화할 수 있는 대안이 필요하게 되며, 수신기는 start-up이라는 training이 필요하게 된다. 이 start-up은 gain control, recovery timing 과 적응 필터의 수렴이라는 3 단계로 구성된다. 수많은 응용에서 start-up 과정은 수신기에서 이상적으로 참조하는 training sequence를 이용하게 된다. 그러나 sequence의 사용이 불가능하거나 바람직하지 않은 경우 start-up 과정은 블라인드 (blind)로 수행하며 blind start-up 과정에서 가장 중요한 것은 적응 필터의 수렴이며, 이를 blind equalization이라고 한다. blind 등화를 위한 대표적인 알고리즘으로는 CMA (Constant Modulus Algorithm), MMA (Multiple Modulus Algorithm)과 SCA (Square Contour Algorithm)등을 들 수 있다^{[1][2][3]}. 이들은 constant modulus 특성을 갖는 송신 신호를 대상으로 채널에 의한 부호간 간섭을 경감시키면서 신호를 복원할 수 있지만, CMA는 진폭 복원은 가능하지만 위상 복원이 불가능하다. 반면 MMA는 진폭과 위상의 동시 복원이 가능하지만 등화 성능의 열화를 들 수 있으며, SCA는 이들 2 가지 방식의 복합으로 연산량이 증가되어 실시간 응용이 어려운 점등이 있다. 이와 같은 장단점을 고려할 때 MMA의 알고리즘을 개량시킨 SE-MMA (Signed Error MMA)가 등장하여 연산량을 줄이면서도 MMA의 등화 성능을 크게 열화시키지 않도록 하였다^{[4][6]}. 그러나 등화 성능 중에서도 실제 응용을 목적으로 할 때 등화기의 강인성 (Roburstness)를 나타내는 채널의 신호대 잡음비에 의한 SER (Symbol Error Rate) 분포에서 SE-MMA 보다 더욱 개선된 성능을 갖는 DSE-MMA (Dither Sign Error MMA)가 등장하였다^[5]. 이 방식에서는 특정한 dither 신호를 탭 계

수 갱신을 위한 양자화 과정에서 부가하므로써 SE-MMA의 Roburstness 열화를 방지할 수 있다^[7]. 논문에서는 이와 같은 DSE-MMA 의 등화 성능을 SE-MMA 와 비교하여 개선 효과를 정량적으로 분석하며, 대상 신호로는 이동 인터넷 전송에서 많이 사용되는 16-QAM 신호를 이용하였다. 2 장에서는 SE-MMA와 dither 신호 및 DSE-MMA 알고리즘에 대하여 설명한 후 3 장에서는 이들의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교하기 위한 과정과 결과를 제시한 후 마지막으로 4 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 고정 등화기를 사용한 일반적인 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 16-QAM 신호 s_k 를 전송하면 대역 제한과 다중 경로 전파 특성을 갖는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 수신되며, 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 잡음 n_k 가 부가된다. 수신측의 결정 장치에서 "1"과 "0"를 판정할 때 False Alarm 과 Missing Error Probability를 최소화하기 위한 최적 검출기를 구현하기 위하여 등화기에 인가된다. 이때 등화기의 탭 계수가 f_k 인 등화기의 전달 함수 $F(\omega)$ 는 통신 채널의 역함수를 갖도록 설정되면 채널에 의한 부호간 간섭은 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다.

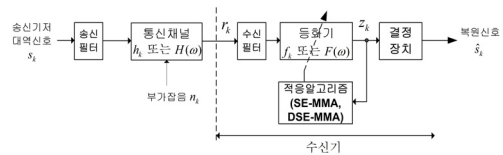


그림 1. 통신 시스템 모델
Fig. 1. Communication system model

2. Multiple Modulus Algorithm와 SE-MMA

그림 1에서 송신 신호 s_k 는 통신 채널 h_k 를 통과하면서 부호간 간섭의 원인이 되는 찌그러짐이 발생된 후 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음 신호 n_k 가 부가

된 후 수신 신호 r_k 를 얻는다.

$$r_k = s_k * h_k + n_k \quad (1)$$

수신 신호는 유한 차수의 계수를 갖는 등화 필터 f_k 를 통과하면서 채널 찌그러짐을 보정한 후 결정 장치 (decision device)를 통과시켜 복원 신호 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이때 등화 필터의 계수 f_k 는 적응적으로 변화시키며, 이를 위해 MMA 또는 SE-MMA 적응 알고리즘이 적용된다. 적응 등화를 위한 필터 계수 갱신을 위하여 등화기의 출력 신호 z_k 와 송신 신호의 dispersion constant R_{MMA}^2 를 이용한다. 등화 필터의 출력 신호 z_k 는 영-오차 윤곽선상에서 일정한 moduli의 단일 정사각형이 되도록 조정되며 이 moduli와 실제 출력 신호 z_k 와의 오차 신호 e_k 는 실수부 e_r 와 허수부 e_i 로 나뉘어 진폭과 위상을 갖게 된다^[2]. MMA 적응 등화 알고리즘에서는 다음과 같이 정의되는 비용 함수 J 를 최소화시키도록 SGA (Stochastic Gradient Algorithm)을 적용하여 반복시킨다.

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

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

여기서 z_{kr}, z_{ki} 은 z_k 의 실수와 허수를, 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 형태로 표시되며 오차 함수와 등화 필터 계수의 갱신식은 다음과 같이 된다.

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

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

반면 SE-MMA는 식(3)의 MMA 오차 함수에서 이들의 부호만을 이용하여 등화 필터 계수의 갱신에 사용되기 때문에 붙여진 이름이며, 이의 오차 함수는 다음과 같다^{[4][5]}.

$$\overline{e_{kSE-MMA}} = \text{sgn}[z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)] + j \text{sgn}[z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)] \quad (4)$$

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

여기서 sgn은 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 고려하게 되어 알고리즘의 연산량을 줄일 수 있게 되어 수렴 속도를 개선시킬 수 있는 장점이 있지만, sign 값을 얻기 위하여는 양자화 (Quantization) 과정으로 생각할 수 있으므로, 이로 인한 성능이 MMA보다 열화된다.

3. Dither 신호와 DSE-MMA

dithering은 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호를 얻기 위한 양자화 이전에 랜덤 신호를 부가하여 양자화로 인한 손실되는 정보를 보존케 하는 방법으로서 R.M.Gray 등에 의해 제안되었다. 부가 잡음이라는 관점에서 dithering은 양자화될 신호와는 무관하게 백색, 평균 0인 양자화 잡음을 만드는 것으로도 볼 수 있다. 그와 같은 양자화 잡음은 적은 스텝 크기로 인하여 평균적으로 제거되어질 것이므로 평균적으로 unsigned 방식과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 이때 부가되는 dithering 신호는 source의 정규화된 kurtosis $k_s = E[|s_n|^4]/\sigma_s^4$ 는 가우시안 프로세스보다 적은 sub-gaussian process 이며 identical, independent distribution, 평균 0인 source의 $E[s_n^2] = 0$ 이어야 하며, 이를 만족시키기 위하여 $[-1, 1]$ 사이에서 균등 분포 (uniform distribution)하는 랜덤 변수이어야 한다. 그림 2는 이와 같은 SE-MMA와 DSE-MMA의 탭 계수 갱신을 위한 개념도를 나타낸 것이다. 그림에서 DSE-MMA는 오차 함수를 발생하는 블록에서 dither signal을 부가한 후 양자화를 수행하며, 이 dither signal 부가없이 직접 양자화를 수행하면 SE-MMA가 된다.

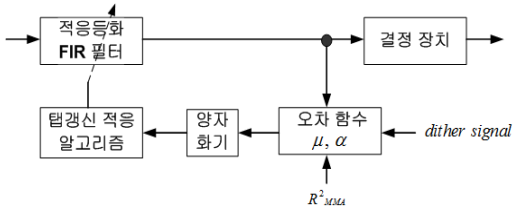


그림 2. SE-MMA와 DSE-MMA 개념
Fig. 2. Concept of SE-MMA and DSE-MMA

그림에서 양자화기는 1비트로서 크기는 무시하고 부호만을 취하는 비선형 연산자이므로, SE-MMA에서는 이로 인한 정보 손실로 인하여 원하지 않는 동작 결과를 얻을 수 있게 된다. 반면 DSE-MMA에서는 양자화 전에 dither라는 랜덤 신호를 부가하므로 양자화에 의한 정보 손실을 보상할 수 있다. DSE-MMA의 탭 계수 갱신식은

$$f(n+1) = f(n) - \mu \cdot \alpha \cdot \text{sgn}(y_n^*(R_{MMA} - |y_n|^2) + \alpha d_n) r_n \quad (5)$$

여기서 α 는 dither amplitude를 나타내며 MMA와 같은 Roburstness와 정상 상태 MSE 간의 절충점이 되도록 설정하여 $\alpha > 2(R_{MMA}^2/3)^{1.5}$ 가 되며, $d_n = d_n^{(R)} + j d_n^{(I)}$ 로 표현되는 $(-1,1)$ 의 범위내에서 uniform 분포하는 dither process의 실수부와 허수부의 조합이다. 이와 같이 dithering을 취하므로써 Roburstness 성능은 SE-MMA보다 개선되지만 정상 상태에서 MSE 성능이 열화되고 수렴 속도가 늦어지므로 등화기 출력의 radius를 이용하여 적응 스텝 크기를 적용하는 새로운 방안등이 등장하였다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

SE-MMA 와 DSE-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝의 크기를 모두 $\mu = 0.0015$, dither amplitude $\alpha = 0.2513$ 및 적응 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 3은 부호간 간섭을 발생시키는 시분산 통신 채널의 임펄스 응답을 실수부 허수부로 나누어 나타낸 것이다

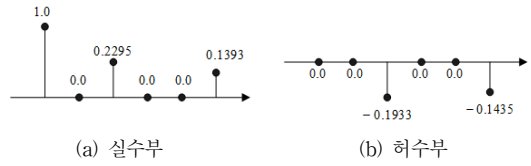


그림 3. 채널의 임펄스 응답
Fig. 3. Impulse Response of Channel

그림 4는 시뮬레이션을 위한 전체 신호의 흐름도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생하였다. 이후 그림 3의 통신 채널을 통과시킨 후 30dB의 신호대 잡음비를 갖도록 가우시안 잡음을 부가시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 수신 신호는 이를 SE-MMA와 DSE-MMA 알고리즘으로 처리하여 적응 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 등화기 출력 z_k 의 성상도, 잔류 isi 및 MD, MSE 및 SER을 계산하였다.

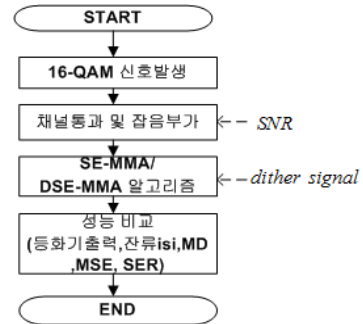


그림 4. 신호 처리 흐름도
Fig. 4. Flowdiagram of Signal Processing

그림 5는 DSE-MMA에서 사용되는 dither 신호의 히스토그램을 나타낸 것이다. 그림에서 $-1 \sim 1$ 사이의 값을 갖는 uniform 분포하는 random 변수가 사용됨을 알 수 있다.

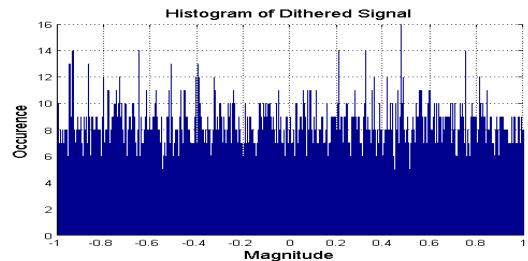


그림 5. dithered 신호의 히스토그램
Fig. 5. Histogram of dithered signal

첫 번째 성능을 정량적인 성능 비교를 위하여 이들 2 가지 알고리즘을 적용할 때 정상 상태에서의 적응 등화기의 출력 신호 성상도를 그림 6에 나타내었다. 출력 성상도에서는 신호점의 크기와 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 된다. 그림에서 DSE-MMA 알고리즘에 의한 성상도들이 SE-MMA 성상도보다 신호점의 크기와 폭이 좁고, 신호점간의 간격이 크므로 성능의 우월함을 알 수 있다.

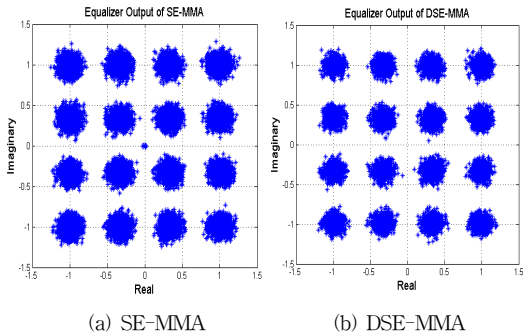


그림 6. 등화기 출력 신호 성상도
Fig. 6. Output Signal Constellation of Equalizer

2 번째 성능 비교를 위한 지수로 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE learning 곡선을 사용하였으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 이들은 채널의 환경이 급격히 변화더라도 정상 상태 (steady state)에 도달하기 위한 수렴 속도와 그들의 양을 나타내기 때문이다.

먼저 잔류 isi는 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화 상태에서는 이들의 종합 특성으로 시간 영역에서는 임펄스 특성을 가져야 한다. 이는 이론적인 관계이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하고 잔류 성분들이 존재하게 되므로 이 잔여 성분들의 크기를 의미한다. 그림 7은 블라인드 적응 등화기의 가장 중요한 성능 지수인 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 -20dB를 정상 상태로 설정할 때 SE-MMA는 724회, DSE-MMA는 3035회에 달성하므로, 수렴 속도에서는 SE-MMA가 DSE-MMA보다 4.2배 빠르지만, 정상 상태 이후의 양에서는 DSE-MMA가 SE-MMA보다 우월함을 알 수 있다.

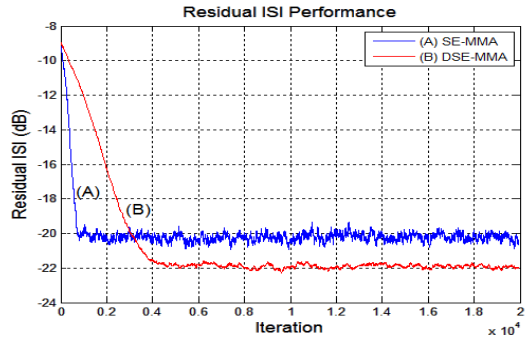


그림 7. 잔류 isi 성능
Fig. 7. Residual isi Performance

또한 수렴후에서 잔류 양들의 변화도 SE-MMA보다 MMA가 적게 되어 misadjustment에 의한 등화 잡음이 감소됨을 확인할 수 있다. 또한 최대 찌그러짐 (MD : Maximum Distortion)은 그림 6의 신호 성상도에서 원래의 송신 신호점과 복원 신호점간의 거리를 나타내며, 이들의 성능 곡선을 그림 8에 나타내었다. 이 지수도 정상 상태인 -0.38 [v]이하로 정의할 때 SE-MMA는 713회, DSE-MMA는 2810회에서 달성되므로 MD 수렴 속도에서 SE-MMA가 DSE-MMA 보다 4배 빠르지만 수렴후의 그 양에서는 DSE-MMA가 우월함을 알 수 있다.

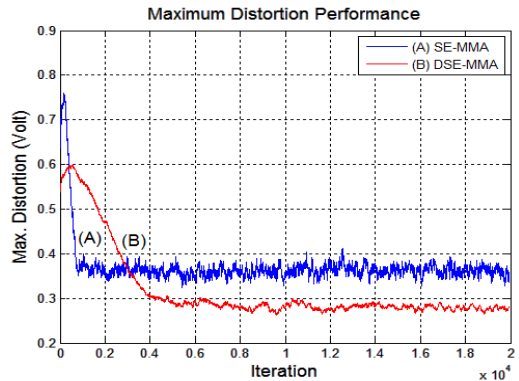


그림 8. MD 성능
Fig. 8. MD Performance

복원 신호와 송신 신호와의 진폭 차이를 나타내는 MSE 성능을 그림 9에 나타내었다. 결정 장치의 출력과 등화기 출력간의 차이로 정의되며 정상 상태를 -18dB 이하로 정의할 때 SE-MMA는 702회, DSE-MMA는 3026회가 필요케 되어 수렴 속도에서는 SE-MMA가 DSE-MMA 보다 4.3배 빠르지만, 수렴 후의 양에서는

DSE-MMA가 적게 됨을 알 수 있다.

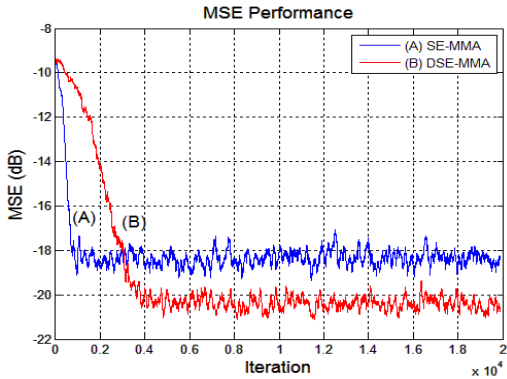


그림 9. MSE 성능
Fig. 9. MSE Performance

표 1은 그림 7, 8, 9에 대한 정상 상태 이후의 정상적인 값을 나타낸 것이다. 대부분의 모든 지표들을 비교할 때 dithered 방식을 적용하므로써 수렴 속도에서는 느려지지만, 정상 상태 이후에는 그 양이 개선됨을 알 수 있다.

표 1. 성능 지수의 통계치
Table 1. Statistics of Performance Index

	SE-MMA	DSE-MMA
잔류isi	-20.2146dB	-21.8201dB
MD	-8.8261dB	-10.8603dB
MSE	-18.3484dB	-20.3124dB

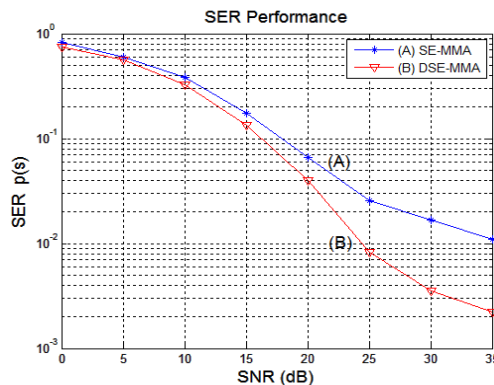


그림 10. SER 성능
Fig. 10. SER Performance

마지막으로 통신 채널에서 부가되는 잡음에 대한 강인성을 알아보기 위하여 신호대 잡음비를 0에서 35dB

까지 5dB 단위로 변화시킬때 SER (Symbol Error Rate) 성능을 그림 10에 나타내었다. 전체적으로 DSE-MMA가 SE-MMA 보다 SER 성능이 우수하여 robustness가 강건함을 알 수 있으며, 신호대 잡음비가 증가될수록 등화 이득이 증가함을 알 수 있다.

V. 결론

논문에서는 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 영향을 최소화하기 위한 기존 MMA 적응 등화 알고리즘의 과 연산량을 경감시킨 SE-MMA 알고리즘과 이의 robustness 성능을 개선시킨 DSE-MMA 알고리즘의 성능을 비교하였다. SE-MMA는 적응 등화기의 탭 갱신을 위한 오차 신호의 극성만을 이용하지만, DSE-MMA는 dithered 신호를 더한 후 이의 극성을 이용하는 원리를 응용한 방식이다. 이때 부가되는 dither 신호는 uniform 분포하는 랜덤 변수를 이용하여 오차 신호의 극성 발생시 손실되는 정보를 줄일 수 있는 dithering 양자화 개념에 기초하며, 이로 인하여 SE-MMA의 저하되는 성능 지수 중 robustness 성능 (SER 성능)을 개선할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이외에도 잔류 isi, MD 및 MSE 성능에서는 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도가 SE-MMA보다 대략 4배 정도 늦어지지만, 정상 상태에 도달한 후에는 그 양들이 SE-MMA보다 -1 ~ -2dB 정도 개선되며 그 변화량도 감소됨을 알 수 있었다. 이와 같은 SE-MMA와 DSE-MMA 블라인드 등화 알고리즘이 갖는 성능 특성을 이용하여 채널의 순단과 같은 비정상적인 통신 채널 환경에서는 수렴 속도가 빠른 SE-MMA 알고리즘을 사용하고, 유선이나 맥내 무선 채널과 같이 순단 현상이 적은 환경에서는 정상 상태에서 등화 성능이 좋은 DSE-MMA 알고리즘을 적용하면 무선 채널 환경에서 개선된 정보 전송 성능을 얻을 수 있게 될 것으로 기대된다.

References

[1] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication

- systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980.
- [2] J. Yang, J.J.Werner and G.A.Dumont, "The multimodulus blind equalization algorithm", 13th Int. conf. of DSP, Vol.1, pp.127~130, 2-4 July 1997.
- [3] V.Weerackody, S.A.Kassam, K.R.Laker, "A simple hard-limited adaptive algorithm for blind equalization", IEEE Trans. on Circuits and System, Vol.39, No.7, pp.482~487, July 1992.
- [4] Wen si-yuan, Liu Feng, "A Computationally Efficient Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", 2nd IEEE Int. conf. of Infor. Eng. and Management, pp.685~687, 2010.
- [5] R.M.Gray, T.G.Stockham, "Dithered Quantizers", IEEE Trans. on Inf. Theory, Vol. 39, No.3, pp. 805~812, May 1993.
- [6] D.S.Kang, S.G.Lim, "Performance of SE-MMA blind adaptive equalization algorithm in QAM system", Jour. on JIIBC., Vol.13, No.3, pp.63~69, June. 2013.
- [7] P.Schniter, C.R.Johnson, "Dithered Signed-Error CMA : Roburst, Computationally Efficient Blind Adaptive Equalization", IEEE Trans. on S. P., Vol.47, No.6, pp.1592~1603, June 1999
- [8] J.P.Chung, I.J.Kim, "Performance Analysis of Turbo Equalizer in Fading Channel", Jour. of K.I.I.T., Vol. 10, No.1, pp.91~96, Jan. 2012

저자 소개

강 대 수(정회원)



- 1983년 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1992년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 ~ 현재 : 공주대학교정보통신 공학부 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 이동통신, 인지신호처리>