

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2017.17.2.105>

JIIBC 2017-2-16

Nonconstant modulus 신호의 적응 등화를 위한 SE-MMA와 QE-MMA 알고리즘 성능 비교

Performance Comparison of SE-MMA and QE-MMA for Adaptive Equalization in Nonconstant modulus signal

임승각*

Lim Seung Gag*

요약 본 논문은 16-QAM과 같은 스펙트럼 효율적인 nonconstant modulus 신호 전송에서 채널에 의한 부호간 간섭을 보상하기 위한 SE-MMA (Signed Error-Multiple Modulus Algorithm)와 QE-MMA (Quantized Error-Multiple Modulus Algorithm) 적응 등화 알고리즘의 성능을 비교하였다. 기존 MMA 적응 등화기의 탭 계수 갱신 오차 신호가 필요하게 되는데, SE-MMA는 연산량을 줄이기 위해 오차 신호의 극성만을 이용하며, QE-MMA는 오차 신호의 극성에 유한 비트의 2의 승수 양자화 성분까지 고려하게 되므로 이로 인하여 서로 상이한 등화 성능을 갖게 된다. 이들의 성능을 비교하기 위하여 동일한 채널과 환경에서 등화기 출력 정상도, 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE, SER을 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 결과 모든 성능 지수에서 QE-MMA가 SE-MMA보다 우월함을 확인하였다.

Abstract This paper compares the SE-MMA (Signed Error-MMA) and QE-MMA (Quantized Error-MMA) adaptive equalization algorithm in order to compensates the intersymbol interference due to channel in the transmission of spectral efficient nonconstant modulus signal such as 16-QAM. In the currently MMA adaptive equalizer, the error signal is needed for the updating the tap coefficient. The SE-MMA uses the polarity of error signal for reduce the computational operation in that process, so they has different equalization performance. In order to comparing these performance, the computer simulation was performed in the same channel and environment, the output signal constellation of equalizer, residual isi and maximum distortion, MSE, SER were applied. As a result of computer simulation, the QE-MMA have more superior performance than the SE-MMA in every performance index.

Key Words : SE-MMA, QE-MMA, power-of-2 quantizer, nonconstant modulus, MSE

1. 서 론

정보 통신의 보급으로 음성, 문자 및 동영상과 같은 대용량 디지털 정보의 전송 요구가 증대되며, 이의 다양한

이용 형태로 높은 부가 서비스가 등장하고 있다. 디지털 정보는 채널을 통하여 수신측으로 전달되어야 하지만, 대역 제한과 찌그러짐, 다중 경로 페이딩등의 전송 장애 요인이 상존하게 된다. 또한 신호 방식으로 높은 스펙트

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부

접수일자 2016년 12월 30일, 수정완료 2017년 2월 9일

게재확정일자 2017년 4월 7일

Received: 30 December, 2016 / Revised: 9 February, 2017 /

Accepted: 7 April, 2017

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

럼 효율을 갖는 16, 64-QAM등과 같은 방식의 nonconstant modulus 신호 방식을 선호하게 되지만^{[1][3]}, 이들은 장애 요인의 영향도 증대되어 전체 시스템의 throughput과 전송 효율이 열화되는 문제점을 갖는다. 채널에서 발생하는 장애 요인중에서 찌그러짐에 의한 부호간 간섭의 영향이 지배적이므로 이를 극복하기 위한 다양한 기술이 등장하고 있다. 부호간 간섭은 채널의 분산 시간이 입력 신호 심볼 시간보다 큰 경우에 발생되므로, 이를 적절히 제어하기 위하여 최근에는 적응 등화기를 사용하고 있다^[4]. 등화기는 채널 전달 함수의 역함수가 되는 디지털 필터 시스템을 말하며, 적응은 채널의 상태 변화를 추적하여 이를 보상할 수 있는 능력을 말한다. 또한 채널 함수를 추정하기 위하여 학습열을 사용하였지만, 이의 사용에 의한 채널의 대역폭 낭비가 발생되므로 이를 사용하지 않는 블라인드 방식이 등장하였다. 블라인드 방식은 학습열을 사용하지 않는 대신 수신된 신호 열과 송신 신호의 dispersion constant라는 통계적 사전 특성을 이용하여 고차 통계치나 비가우시안 입력열에 유효한 비선형성을 이용하여 비최소 위상 채널 등화가 가능하지만, 고 스펙트럼 효율 특성을 갖는 nonconstant modulus 신호를 전송하는 경우 등화 성능이 열화되는 문제점이 있다. 블라인드 적응 등화를 위하여 좋은 수렴 성능과 채널 추적 능력 및 잡음에 대한 강인성을 들 수 있으며, 이를 위한 대표적인 알고리즘으로 MMA를 들 수 있다^{[1][6]}. MMA는 진폭과 위상의 동시 보상 가능 및 등화 잡음이 적지만, nonconstant modulus 신호에서 성능이 저하되며 기존 CMA보다 연산량이 증가하는 문제점이 있다. 수신기에서 심볼을 2진 binary로 복원하기 위하여 필요한 총 연산의 80% 이상이 블라인드 적응 등화를 위하여 사용된다. MMA의 장점을 살리면서 이와 같은 연산량 문제를 해결하기 위한 SE-MMA와 QE-MMA가 등장하였다^{[2][3][6]}. 블라인드 적응 등화기의 탭 계수 갱신을 위하여 MMA는 오차 신호를 그대로 이용하지만, SE-MMA는 오차의 극성만을 이용하고 QE-MMA는 극성과 유한 비트 power-of-2 양자화 성분을 고려한다.

본 논문에서는 nonconstant modulus 신호인 16-QAM 신호를 송신할 때 수신측의 적응 등화 알고리즘으로 SE-MMA와 QE-MMA를 적용할 때 이의 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 성능 비교를 위한 지수로는 등화기 출력 신호 정상도, 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE, SER을 사용하였고, 정량적으로

수렴 특성 지수에서 정상 상태에 도달하기 위한 iteration 횟수가 사용되었다. 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 통신 시스템의 모델을 설명한 후 3 장에서는 SE-MMA와 QE-MMA 알고리즘에 대해 설명한 후, 4 장에서는 시뮬레이션의 과정과 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 통신 시스템 모델

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

- (1) 송신 필터와 수신 필터는 이상적이다.
- (2) 입력 신호 s_k 는 평균 0인 2차원 정상도를 갖는다.
- (3) 미지의 SISO (Single In Single Output) 시스템인 채널 h_k 는 비최소 위상 선형 시불변으로 전달 함수는 단위원상에 영점이 존재하지 않는다.
- (4) 등화기 필터 f_k 는 탭 지연선 및 계수와의 승산기, 가산기로 구성되며 유한 차수이다.
- (5) 부가 잡음 n_k 는 평균 0, 유한 분산값을 갖는 백색 가우시안 분포한다.

송신측에서 신호 s_k 를 송신하면 임펄스 응답이 h_k 인 통신 채널을 통과하면서 잡음 n_k 이 부가된다. 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 장치에 의해 s_k 의 추정치인 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이 과정에서 채널의 응답이 시간에 따라 변동 또는 순단의 경우 등화기는 이에 적응하면서 $s_k \approx \hat{s}_k$ 가 되도록 z_k 와 \hat{s}_k 를 이용한 modulus의 오차 신호를 이용하여 h_k 의 변동에 따른 f_k 가 $h_k \odot f_k = \delta_k$ (Pefrect Blind Equalization)에 근사치가 되도록 적응 알고리즘을 적용하며, PBE를 위해서는

- (1) 통신 채널을 나타내는 행렬 H 는 full column-rank 일 것
- (2) 부가적인 채널 잡음이 없을 것
- (3) sub-Gaussian source : source의 정규화된 kurtosis

$k_s = E[|s_k|^4]/\sigma_s^4$ 는 가우시안 프로세스보다 적을 것

(4) identical, independent distribution, 평균 0 인

$$E[s_k^2] = 0$$

의 조건이 이루어져야 하지만 두 번째 조건은 상시 만족할 수 없으므로 PBE는 불가능케되며, 이에 근사한 blind equalization은 가능하게 된다.

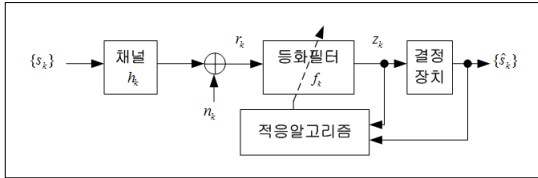


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델
 Fig. 1. Baseband communication system model

2. SE-MMA 알고리즘

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 위한 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 허수를, s_{kr}, s_{ki} 은 s_k 의 실수와 허수를 각각 나타내며, 이의 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.

$$e_{kSE-MMA} = \text{sgn}[z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)] + j\text{sgn}[z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)] \quad (3)$$

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

여기서 sgn은 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.

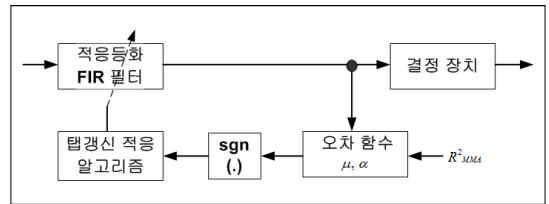


그림 2. SE-MMA 내부 구조
 Fig. 2. Internal structure of SE-MMA

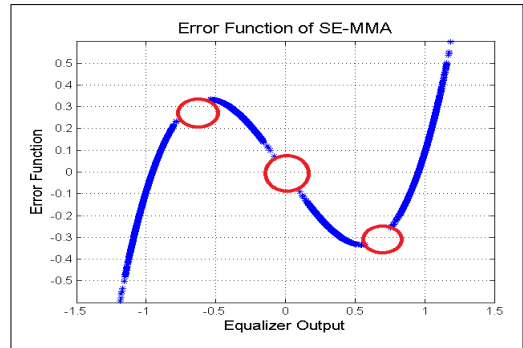


그림 3. SE-MMA 오차 함수
 Fig. 3. Error function of SE-MMA

3. QE-MMA 알고리즘

SE-MMA 알고리즘에서 오차 신호 $e_{kSE-MMA}$ 는 MMA 알고리즘의 오차 신호 e_{kMMA} 의 부호 또는 극성만을 취하여 얻어짐을 식 (3)과 식 (2)에서 다루었다. 적응 등화와 같은 분야에서 입력 신호에 correlation multiplier를 곱한 후 이를 유한 비트로 양자화하면 적응 알고리즘을 H/W로 응용할 때 복잡도를 줄일 수 있다^[3]. 이와 같은 사실에 기초하여 power-of-two 양자화 알고리즘이 널리 사용하며, 탭 계수 갱신은 shift와 가산 연산만으로 수행되므로 이를 SE-MMA 알고리즘에 적용한

것이 QE-MMA 알고리즘이다. QE-MMA 알고리즘에서 탭 계수 갱신은 다음과 같다.

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

$Q[x]$ 는 비선형 power-of-two quantizing 연산자이며 다음과 같이 정의된다.

$$Q(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x), & |x| \geq 1 \\ 2^{\lfloor \log_2|x| \rfloor} \text{sgn}(x), & 2^{-B+2} \leq |x| < 1 \\ 2^{-B+1} \text{sgn}(x), & |x| < 2^{-B+2} \end{cases} \quad (5)$$

식 (5)에서 B 는 양자화 비트수를 나타내며, 기호 $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 \cdot 보다 작은 큰 정수를 나타낸다. 양자화는 입력을 “1”을 갖는 곳에 B 비트로 대체하게 되며, 이는 입력 공분산 행렬 $E[r_k r_k^T]$ 이 diagonal일 때 성립한다. 그림 4는 $B = 4$ 일 때 power-of-two quantizer의 입출력 특성을 나타낸 것으로 오차 성분이 적을수록 양자화 스텝폭이 좁으며, 커질수록 스텝이 커져서 +1과 -1 사이에 복수개의 양자화 레벨에 의한 correlation multiplier를 곱하게 된다. 또한 실제 H/W에 응용되기 위해서는 적당한 B 의 값을 갖도록 선정해야 한다.

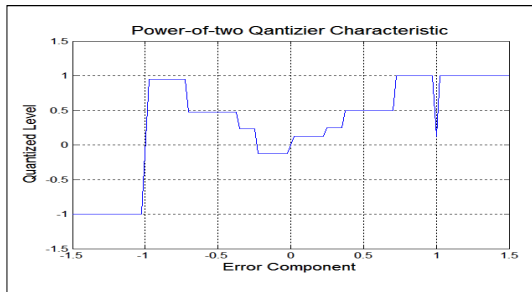


그림 4. 양자화의 입출력 특성
Fig. 4. Input/Output characteristics of quantizer

III. 컴퓨터 시뮬레이션

기존 MMA 적응 등화 알고리즘의 연산량을 줄인 SE-MMA와 QE-MMA 알고리즘의 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 신호대 잡음비는 30dB, SE-MMA와 QE-MMA의 스텝 크기는 각각 $\mu = 0.0013, 0.03$ 및 양자화 비트수 $B = 8$ 과 동일한 채널을 적용하였다. 그림 5는 시뮬레이션을 위한 통신 채널의 임펄스 계수이며, 그림 6은 전체적인 신호 처리 과정을 나타낸 것이다.

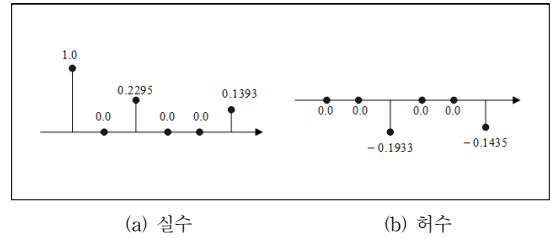


그림 5. 통신 채널의 계수
Fig. 5. Coefficient of communication channel

nonconstant modulus 신호 방식인 16-QAM 신호를 발생시킨 후 그림 6의 채널을 통과시킨 후 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호를 얻는다. 이 신호는 적응 등화기에 입력된 후 등화기의 탭 계수는 SE-MMA 또는 QE-MMA 알고리즘에 의해 갱신되면서 채널에서 발생하는 부호간 간섭 영향을 경감시킨 출력 신호를 얻은 후 이를 결절 장치에 인가하여 송신 신호를 복원토록 한다. 그림 7은 정상 상태에서 적응 등화기의 첫 번째 성능 지수인 등화기 출력 신호의 정상도를 나타낸 것이다. 이들 두 알고리즘의 정상도에서 16개 신호점들을 명확하게 알 수 있지만, 각 신호점간의 거리가 크고 신호점의 폭이 좁을수록 등화 능력이 우수하다.

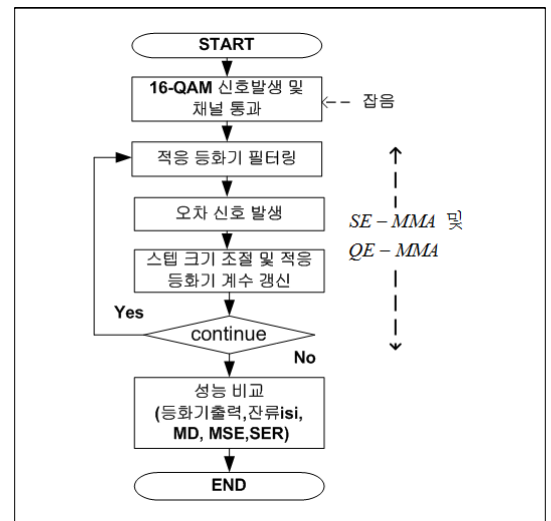


그림 6. 신호 처리 흐름도
Fig. 6. Signal processing flowdiagram

정상도에서는 QE-MMA가 SE-MMA보다 신호점간 거리와 신호점의 폭이 좁게 되어 정성적으로 성능이 우월함을 알 수 있다.

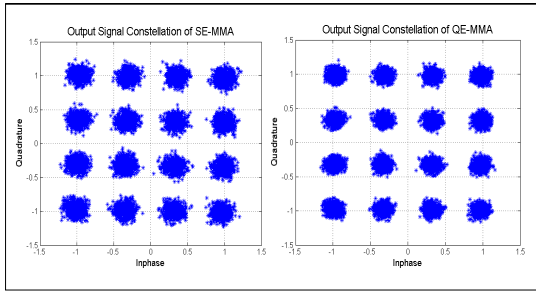


그림 7. 등화기 출력 신호 성상도
 Fig. 7. Equalizer Output signal constellation

적용 등화기의 성능을 나타내는 두 번째 내부 지수로서 잔류 isi와 최대 찌그러짐 및 MSE를 사용하였다. 이들 지수로부터는 정상 상태 이후 적응 등화의 안정성과 채널 상태 변화에 따라 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간의 정보를 알 수 있다. 먼저 잔류 isi는 통신 채널 h_k 와 등화 필터 계수 f_k 가 정상 상태에서 발생하는 잔류 성분의 전력 크기를 의미하며, 최대 찌그러짐은 잔류 성분들의 전압 크기를 나타내고, MSE는 적용 등화기 출력과 결정 장치 출력간의 진폭 차이의 자승치로 정의되며 송신 신호를 기준으로 복원 신호점들의 jitter양을 표시한다. 그림 8은 잔류 isi의 성능을 나타내고 있으며, 적용 등화기의 정상 상태를 -20dB 로 설정할 때 여기에 도달하는 수렴 속도에서 SE-MMA는 832회, QE-MMA는 1906회가 소요되어 SE-MMA가 QE-MMA보다 2.3배 정도 빠르지만 정상 상태 이후에서는 QE-MMA가 SE-MMA보다 약 2dB 정도 우수함을 알 수 있다.

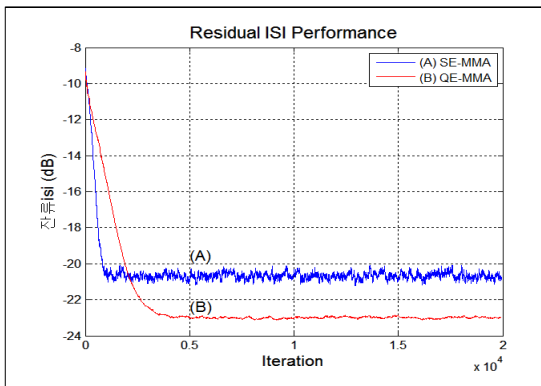


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

그림 9는 최대 찌그러짐의 성능이며, 정상 상태로 0.4

를 설정할 때 SE-MMA는 758회, QE-MMA는 1713회가 소요되어 수렴 속도에서 SE-MMA가 QE-MMA보다 2.3배 빠르고, 그 이후에는 QE-MMA가 SE-MMA보다 0.1 정도 개선되며, 2가지 성능에서 QE-MMA가 SE-MMA보다 탭 계수 갱신에 의한 등화 잡음이 훨씬 적어진다.

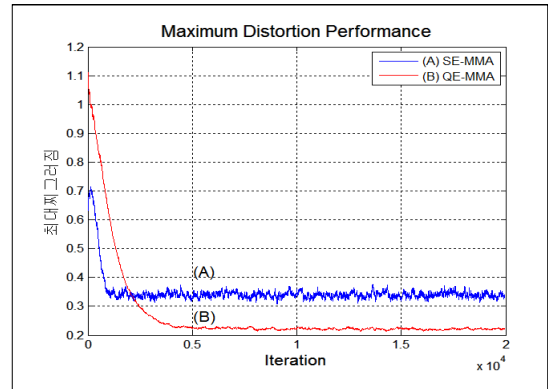


그림 9. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 9. Maximum distortion performance

그림 10은 MSE 성능을 나타낸 것으로 -19dB 의 정상 상태까지 SE-MMA는 958회, QE-MMA는 2039회가 소요되어 수렴 속도에서는 SE-MMA가 QE-MMA보다 2.1배 정도 빠르지만 정상 상태 이후에서는 QE-MMA가 SE-MMA보다 약 1.5dB 개선됨을 알 수 있다. 표 1은 이들 3가지 성능 지수에 대한 정상 상태 이후의 평균값들을 나타낸 것으로, QE-MMA가 SE-MMA보다 우월함을 정량적으로 알 수 있다.

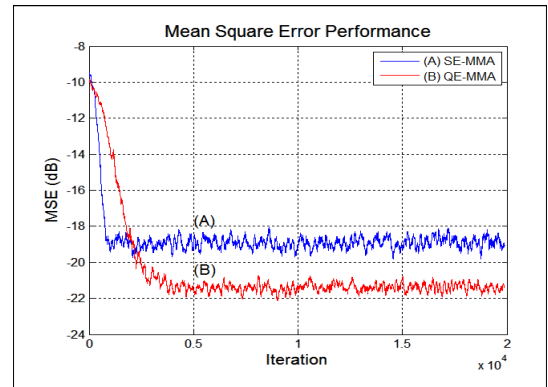


그림 10. MSE 성능
 Fig. 10. MSE performance

표 1. 성능 지수의 평균값

Table 1. Mean value of performance index

| 성능 지수 | SE-MMA | QE-MMA |
|--------|---------|---------|
| 잔류 isi | -20.7dB | -22.8dB |
| 최대찌그러짐 | -9.4dB | -12.8dB |
| MSE | -18.9dB | -21.3dB |

그림 11은 2가지 적응 등화 알고리즘의 잡음에 대한 강인성을 확인할 수 있는 SER 성능을 나타낸 것이다. 신호대 잡음비를 0~35dB까지 5dB 단위로 변화시키면서 20000개의 16-QAM 신호를 발생시켜 5회 반복시킬 때 심볼 오류율을 계산하였다. 시뮬레이션 결과 신호대 잡음비가 낮은 0~10dB범위에서는 SE-MMA가 QE-MMA보다 우월하였지만, 그 이상의 신호대 잡음비에서는 QE-MMA가 SE-MMA보다 우월해져서 25dB 이상에서는 높은 등화 이득을 얻을 수 있어서 잡음에 강함을 알 수 있다.

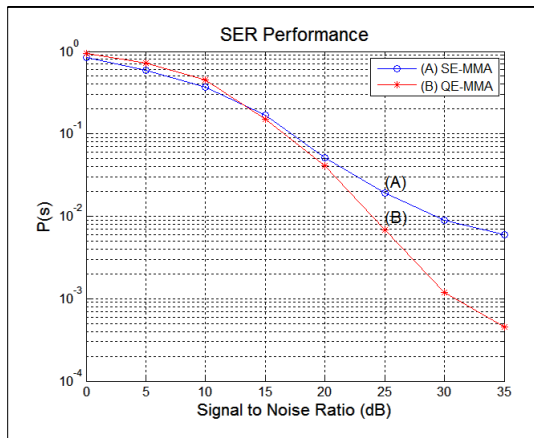


그림 11. SER 성능

Fig. 11. SER performance

V. 결론

논문에서는 16-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호에서 기존 MMA 적응 등화 알고리즘의 연산량을 단순화시킨 SE-MMA과 QE-MMA 알고리즘 성능을 비교하였다. SE-MMA는 적응 탭 계수 갱신 시 오차 신호의 크기 대신 극성을 이용하며, QE-MMA는 극성에 유한 비트 양자화에 의한 correlation multiplier를 적용하였다. 이들 알고리즘의 성능 평가 결과 수렴 속도에서는

SE-MMA가 QE-MMA보다 빠름을 알 수 있었지만, 정상 상태에서 QE-MMA가 SE-MMA보다 잔류 isi에서는 2dB, 최대 찌그러짐에서는 3.4dB, MSE에서는 2.4dB 정도 개선되었으며, 탭 계수의 변동에 따라 발생될 수 있는 misadjustment에 의한 등화 잡음을 상당히 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한 외부 잡음에 대한 강인성을 확인하기 위한 SER 성능에서도 신호대 잡음비가 15dB이상인 환경에서 QE-MMA가 SE-MMA보다 우월함을 알 수 있었다. 그러나 적응 알고리즘의 H/W 구현을 위하여 양자화 비트수의 값이 적어야 한다는 제약점이 있으므로, 실제 이를 적용하기 위해서는 채널 환경에 따른 비트수의 선정이 필요할 것이다.

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.
DOI : <https://doi.org/10.1109/JSAC.2002.1007381>
- [2] K. Banovic, R. Lee, E.A.Raheem, M.A.S.Khalid, "Computationally-Efficient Method for Blind Adaptive Equalization", 48th Midwest Symp. on Circuits and Systems, Vol.1. pp.341~344, 2005.
- [3] E.Eweda, "Convergence analysis and design of adaptive filter with finite power-of-two quantized error", IEEE Trans. on Circuits and Systems 2, Vol. 39, No.2, pp.113~115, Feb. 1992.
DOI : <https://doi.org/10.1109/82.205815>
- [4] E.Eweda, "Analysis and design of a signed regressor LMS algorithm for stationary and nonstationary adaptive filtering with correlated Gaussian data", IEEE Trans. Acous., Speech, Signal Processing, Vol.35, pp.450~454, Apr. 1987.
DOI : <https://doi.org/10.1109/31.62411>
- [5] A.Tawfik, E.Abdel-Raheem, E.Agathoklis, "A modified dithered signed-error constant modulus algorithm for blind adaptive equalizer", Proc. of 7th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems, Jounieh, Lebanon, pp.688~691, Dec. 2000.

- [6] 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.
DOI : <https://doi.org/10.1109/82.160173>
- [7] Wen si-yuan, Liu Feng, "A Computationally Efficient Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", 2nd IEEE conf. of Infor. Eng. and Management, pp.685~687, 2010.
- [8] D.S.Kang, S.G.Lim, "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.
- [9] 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.
- [10] Ali H.Sayed, Fundamental of Adaptive Filtering, John Wiley & Sons, 2003.

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>

※ 이 논문은 2016년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원에 의하여 연구되었음
This work was supported by the research grant of the Kongju National University in 2016