The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 15, No. 1, pp.131-137, Feb. 28, 2015. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2015.15.1.131
JIIBC 2015-1-17

QAM 시스템에서 오차 신호의 비선형 함수를 이용한 VSS-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 평가

A Performance Evaluation of VSS-MMA Adaptive Equalization Algorithm using the Non-Linear Fuction of Error Signal for QAM System

임승각*

Seung-Gag Lim*

요 약 본 논문은 QAM 신호를 전송하는 시스템에서 시분산 채널에서 발생되는 진폭과 위상 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 경감시키기 위한 적응 등화 알고리즘인 MMA (Multiple Modulus Algorithm)에서 오차 신호의 비선형 함수를 이용하여 등화 성능을 개선할 수 있는 VSS-MMA (Variable Step Size - MMA) 알고리즘에 관한 것이다. 기존 MMA에서는 고정 스텝 크기를 이용하여 적응 등화기의 탭 계수를 얻지만, 제안 VSS-MMA에서는 오차 신호의 비선형성을 기본으로 가변 스텝 크기를 적용하여 탭 계수를 얻을 수 있다. 가변 스텝 크기을 이용하므로서 기존 MMA보다 개선된 등화 성능을 얻을 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였으며, 이를 위한 성능 지수로는 등화기 출력 신호 성상도, 잔류 isi양, 최대 찌그러짐과 MSE, SER을 사용하였다.

Abstract This paper relates with the VSS-MMA (Variable Step Size-Multiple Modulus Algorithm) adaptive equalization algorithm which is possible to improving the equalization performance by use the nonlinear fuction of error signal in the MMA adaptive equalization algorithm that are used for the minimization of the intersymbol interference due to the distortion which occurs in the time dispersive channel for the transmission of QAM signal in the system.. In the conventional MMA, we obtains the tap coefficient of adaptive equalizer using the fixed step size, but in the VSS-MMA, we obtains the tap coefficient of adaptive equalizer using the variable step size based on a nonlinear function of error signal. By adapting the variable step size, it was confirmed that the improved equalization performance were obtained by computer simulation. For this, the equalizer output signal constellation, residual isi, maximum distortion, MSE and SER were used in the performace index.

Key Words : MMA, VSS, residual isi, maximum distortion, dispersion constant

Ⅰ. 서 론

지난 수년 동안 정보 전송 기술의 발전은 비약적이어서 음성급의 소용량 데이터에서 동영상과 음성, 이미지 및 다자 음성등의 다양한 정보원을 포함하는 멀티미디어 전송까지 대역 제한된 채널에서 고속으로 전송 가능케

*정회원, 공주대학교 정보통신공학전공
접수일자 : 2014년 11월 3일, 수정완료 : 2014년 12월 4일
게재확정일자 : 2015년 2월 13일

Received: 3 November, 2014 / Revised: 4 December, 2014 / Accepted: 13 February, 2015
*Corresponding Author : sglim@kongju.ac.kr
Dept. of Information and Communication, Kongju National University, Korea

되었다. 이를 위해 방대한 양의 정보를 압축과 신장 (compression and expansion) 기법, 네트워크 동기화 기술과 고효율 변복조와 OFDMA 및 MIMO 기술등의 적용되고 있다. 그러나 정보 전송에서 통신 채널에 의한 부호간 간섭등의 신호 손상 (impairment)과 잡음이 부가되므로 이를 수신측에서 보상할 수 있는 적응 등화 기술도 매우 중요한 역할을 수행하였다. 또한 디지털 정보 통신 시스템을 구성하는 요소 기술중에서 다른 시스템 기술에 비하여 통신 채널에 대해서는 많은 기술적 개선이 느린 편이다[1]. 유선 채널의 경우 기존의 음성 대역급 PSTN에서 인터넷을 위한 DSL망으로 변화되어 고속 전송을 위한 기반 infra는 구축되었지만, 무선 채널의 경우 다중 경로 전파에 의한 페이딩과 부호간 간섭 영향에 의해 사용가능한 통신 대역폭과 시스템과 단말에서의 처리 능력을 심각하게 제약을 받게 되므로 이를 개선하기 위한 다양한 채널 코딩과 적응 등화 기법이 발달하고 있는 중이다. 채널 코딩의 경우 오류 제어를 위하여 시스템의 전송 대역폭 효율을 열화시키지만, 적응 등화의 경우 대역폭 효율의 열화와 송신 전력의 증가없이 시스템의 서비스 품질을 개선시킬 수 있게 되므로 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행중에 있다. 이와 같은 적응 등화기의 대표적인 알고리즘으로 CMA (Constant Modulus Algorithm), RCA (Reduced Constellation Algorithm), MMA (Multiple Modulus Algorithm)등이 있다[2][3]. CMA는 원하는 수렴 속도를 얻을 수 있지만 그 비용 함수가 진폭만을 표시하므로 진폭만 보상하며 위상에 대해서는 별도의 외부 장치가 필요하게 된다. 반면 RCA는 진폭과 위상을 동시에 보상할 수 있는 능력이 있지만 초기의 수렴 특성이 좋지 않으며 수렴 후 misadjustment에 의한 등화 잡음이 커지는 문제점이 있다. 이들의 상반되는 특성을 결합시켜 이들보다 개선된 능력을 갖는 MMA가 등장하였다[1][7]. 그러나 MMA는 진폭과 위상의 동시 복원이 가능하면서도 낮은 MSE 성능을 얻을 수 있지만 SER 성능이 열화되므로 개선된 적응 등화를 위한 step size를 변화시키는 VSS-MMA (Variable Step Size-MMA)가 등장하였다. VSS 적응 등화기는 초기 수렴시에는 오차 신호도 커질 것이므로 이를 이용하여 step size를 크게 하면 수렴 속도를 빠르게 할 수 있다. 그러나 정상 상태에 도달한 후에는 이를 적게 하여 등화 잡음을 줄일 수 있어 등화 성능을 개선할 수 있으며, 정상 상태 이후에도 오차 신호가 interference에 민감하므로 이로 인한 성능 저하를 방지할 수 있도록 다른 형태의 오차 신호로 변환시켜 step size를 조절하고 있다. 본 논문에서는 주어진 16-QAM 송신 신호와 동일한 통신 채널 및 신호대 잡음비하에서 VSS-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능을 기존 MMA와 비교하였으며, 이를 위한 지수로는 등화기 성능의 분석에 널리 사용되는 등화기 출력 신호 성상도, 잔류 isi와 최대 찌그러짐, MSE 및 채널의 SNR에 따른 SER (Symbol Error Rate)를 사용하였다. 2장에서는 기저 대역 통신 시스템 모델 및 적응 등화 필터의 내부 구조와 논문에서 다루는 VSS 개념을 적용한 MMA 알고리즘에 대해 소개한 후 3 장에서는 시뮬레이션 과정 및 결과를 다루고 마지막 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 기저 대역 통신 시스템 모델

그림 1은 VSS-MMA 알고리즘의 적응 등화기를 적용한 기저 대역 통신 시스템 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서는 정 진폭 또는 constant modulus 특성을 갖는 QAM 신호 s_k를 송신하면 임펄스 응답이 h_k인 채널을 통과하면서 가우시안 잡음 n_k가 부가되어 수신된다. 이때 임펄스 응답 h_k는 주파수 영역에서 진폭 전달 특성이 일정하지 않고, 위상 전달 특성은 비선형 특성을 갖게 되어 위상 지연에 의하여 수신 신호 r_k에는 부호간 간섭에 의한 찌그러짐과 잡음 영향이 부가된다. 수신된 신호 r_k는 응답이 f_k인 등화기에 입력되어 진폭과 위상이 보상된 출력 신호 z_k를 얻은 후 이 신호는 결정 장치를 통과하면서 최종 복원 신호 $\hat{s_k}$를 얻게 된다. 이때 등화기의 응답 f_k는 출력 신호 z_k 또는 $\hat{s_k}$를 이용하여 다음에 설명되어질 VSS-MMA 알고리즘을 적용하여 각각의 비용 함수를 최소화시키도록 적응적으로 변화시킨다. 임펄스 응답 h_k와 등화 필터 f_k의 차수를 N 이라면 이들 간에는 다음의 관계식들이 성립되며, *는 선형 컨볼루션을 나타낸다.

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

그림 2는 그림 1의 FIR 적응 등화 필터의 내부 구조를 나타낸 것이며 지연 소자와 승산기로 구성되어 적응 알고리즘에서 제공되는 step size μ를 이용한 등화 탭 계수를 세팅하여 필터링하도록 되어있다.

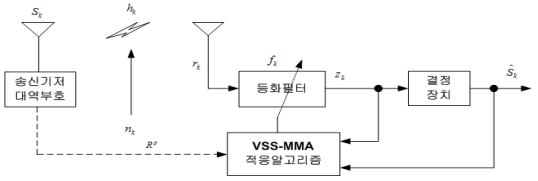


그림 1. 기저 대역 통신 시스템
Fig. 1. Baseband communication system

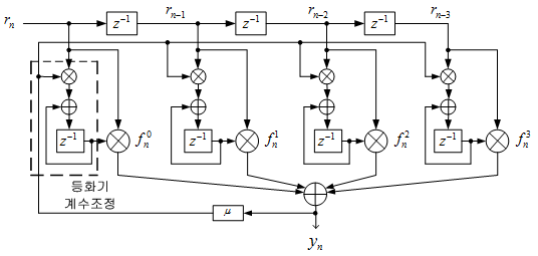


그림 2. FIR 등화 필터의 내부도
Fig. 2. Internal structure of FIR equalization filter

2. VSS-MMA 알고리즘

일반적으로 MMA 알고리즘에서는 CMA의 단일 modulus를 multiple modulus로 확장하여 등화기 출력 전력에 비례하여 signal constellation point의 각 subset에 이들 multiple modulus중 1개를 할당시킨다. MMA의 비용 함수는 2차원이 아닌 1차원의 합으로 구성되어지며, 비용 함수에는 등화기 출력의 실수와 허수부를 고려하므로 채널의 위상 찌그러짐과 constellation 회전 특성을 보상할 수 있다. MMA 알고리즘에서는 다음과 같이 정의되는 비용 함수 J를 최소화하도록 Stochastic Gradient Algorithm을 적용한다.

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

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

여기서 z_{kR}, z_{kI}는 등화 필터의 출력 z_k의 실수와 허수, R_{MMA}^2 는 MMA의 dispersion constant이다. 이를 이용한 MMA의 오차 신호와 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

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

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

여기서 μ는 적응 등화를 위하여 적은 범위를 갖는 고정된 step size를 말한다. VSS-MMA 알고리즘에서는 MMA의 μ값을 적응적으로 변화시킬 수 있는 능력을 갖는다. 적응 등화 알고리즘에서 식(3)의 오차 신호를 직접 이용하여 step size를 제어하는데 있어서 다음의 단점을 갖는다. 첫째로 수렴전에 수렴 속도를 개선시키기 위하여 가변 step size의 step 크기를 크게한다. 이렇게 하면 초기에 큰 오차일수록 수렴 속도가 빨라지지만, 수렴이 진행되면서 오차가 급격히 감소되어도 step size의 크기는 이에 비례하여 급격히 감소되지 않으므로 새로운 문제가 발생될 수 있다. 또한 오차 신호는 interference에 매우 민감하다. 적응 등화 알고리즘이 수렴한 후에도 만약 강한 채널의 interference가 존재하다면 인위적으로 오차 신호는 커질 수 있으므로 이를 막기 위하여 오차 신호를 적절한 변환 과정을 거쳐 비선형 함수를 이용한 step size 제어에 사용하므로서 VSS 알고리즘의 SER 성능 열화를 방지할 수 있다. VSS-MMA 알고리즘에서 식(3)의 고정 step size μ는 다음과 같이 비선형 함수인 지수 함수를 이용하여 변환되어진다.

$$\mu_k = \beta[1 - \exp(-\alpha|\overline{e_k}|)] \quad (4)$$

여기서 β는 proportionality factor이며 가변 step size μ_k 값을 제어하는데 사용된다. $0 \leq 1 - \exp(-\alpha|\overline{e_k}|) \leq 1$의 범위내에서 μ_k값은 $0 \leq \mu_k \leq \beta$의 값을 갖게 되며, 알고리즘의 안정된 동작을 보장하기 위하여 step size는 다음의 조건을 만족시키야 한다.

$$0 \leq \mu_k \leq 0.66 \ \mathrm{tr}(R_k) \quad (5)$$

R_k는 등화기의 입력 신호 r_k의 자동 상관 행렬을 나타낸다. 그림 3은 $\beta = 0.009$, $\alpha = 16, 8, 4, 2$ 일 때 오차 신호 $\overline{e_k}$에 따른 적응 step size μ_k의 분포를 나타낸 것이다. 알고리즘의 초기의 iteration 단계에서 $\overline{e_k}$는 커지

므로 알고리즘이 반복될수록 μ_k는 점진적으로 적어짐을 알 수 있지만, 점진적으로 적어지는 기울기는 α값에 의해 결정되며, variable step size의 변화량은 α의 값이 클수록 심해진다.

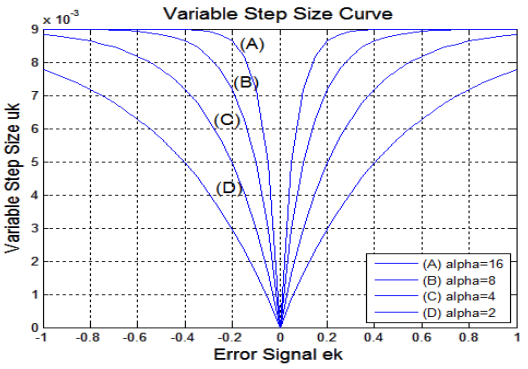


그림 3. VSS에서의 오차 신호와 스텝 변화
Fig. 3. Error signal and step variation in vss

Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션

VSS-MMA 블라인드 적응 등화 알고리즘의 성능을 기존 MMA와 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라메터로는 SNR을 30dB, MMA의 고정 적응 스텝 크기 $\mu = 0.0015$, VSS-MMA에서 $\beta = 0.0009$, $\alpha = 16$을 적용한 15차 FIR 적응 필터로 설정하였다. 16-QAM 신호를 발생시킨 후 부호간 간섭이 발생되는 통신 채널을 통과 및 잡음 신호 n_k를 부가한 후 수신 신호 r_k을 얻었으며 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 그림 4에 나타내었다. 채널에서 발생되는 찌그러짐을 보상하기 위한 필터 계수의 갱신은 MMA와 VSS-MMA 알고리즘인 식(3)과 식(4)를 적용하며, 그림 5는 부호간 간섭을 발생시키는 통신 채널의 주파수 전달 함수를 진폭과 위상으로 구분하여 나타낸 것이다. 진폭 전달 함수의 경우 주파수에 따라 통과되는 이득이 3.5dB 범위 내에서 많은 변동이 있음을 알 수 있으며, 위상은 경우 주파수마다 기울기가 일정치 않아 군지연이 발생됨을 알 수 있다.

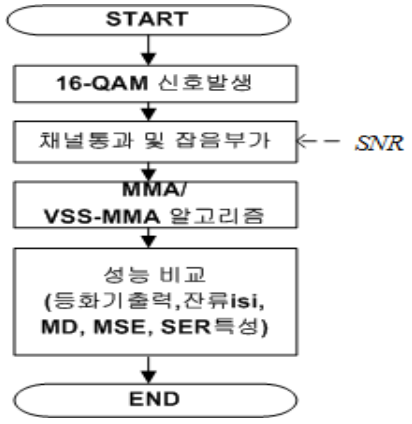
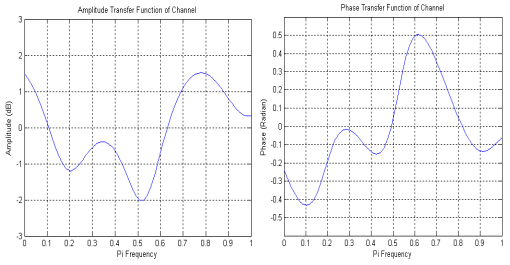


그림 4. 신호 처리도
Fig. 4. Signal processing flowdiagram

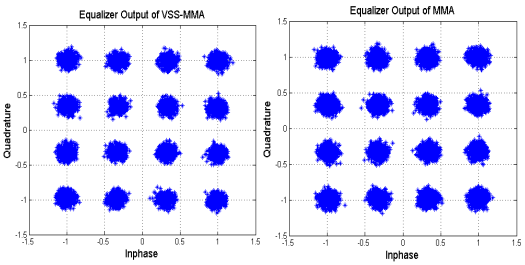


(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 5. 채널의 주파수 전달 함수
Fig. 5. Frequency transfer function of channel

이상의 시뮬레이션 환경을 통하여 MMA와 VSS-MMA 알고리즘을 구현하여 이들의 성능을 비교하였다. 성능 비교를 위한 지수로는 등화기 출력 신호 constellation, 잔류 isi 와 최대 찌그러짐, MSE 및 SER을 사용하였다.

첫 번째 지수로서 그림 6은 부호간 간섭을 제거된 후의 등화기 출력 신호 constellation을 나타낸 것이며, 이 신호가 결정 장치에 입력되어 송신 심볼을 추정, 복원하게 된다. 16개의 심볼점이 구분되어지며 이들이 square 형태로 분포하기 때문에 부호간 간섭에 의한 진폭과 위상 찌그러짐이 보상됨을 알 수 있다. 그림에서 각 신호점들의 폭이 좁고 각 신호점간의 거리가 클수록 등화 성능이 우월한 방식이므로 이들 관점에서 보면 기존 MMA보다 VSS-MMA가 등화 성능이 우월함을 알 수 있다.



(a) MMA (b) VSS-MMA

그림 6. 등화기 출력 신호 성상도
Fig. 6. Signal constellation of equalizer output

두 번째로 성능을 나타내는 지수로는 적응 등화 필터의 수렴 속도를 나타내는 잔류 isi (Residual isi)와 최대 찌그러짐 (Maximum Distortion)과 MSE를 사용하였다. 먼저 잔류 isi는 통신 채널 h_k와 등화 필터 계수 f_k가 완전 보상이 될 때 시간 영역에서는 이들의 convolution 결과는 임펄스 신호가 되지만, 이의 완전 보상은 불가능케 되어 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 크기를 나타낸다. 또한 최대 찌그러짐은 그림 6의 출력 신호 성상도에서 원래의 신호점을 중심으로 그 벌어짐의 정도를 나타내는 폭을 의미하며, 마지막으로 MSE는 이들의 알고리즘에서 등화기 출력과 복원 신호와의 진폭 차이의 자승치를 나타낸 것이다. 그림 7은 두 번째 성능 평가 지수 중 잔류 isi 성능을 16-QAM 신호를 대상으로 20000회 반복 수행시킬 때 이들의 결과를 나타낸 것이다. 잔류 isi양에서 -20dB를 정상 상태로 볼 때 여기에 도달하는 수렴 속도에서는 VSS-MMA가 MMA보다 약간 빠름을 알 수 있으며, 정상 상태 이후 부터의 잔류 isi 양과 그 변동 범위에서도 VSS-MMA가 MMA보다 적게 되어 등화기 탭 계수의 갱신에 의한 misadjustment가 감소되어 등화 잡음이 적어짐을 알 수 있다.

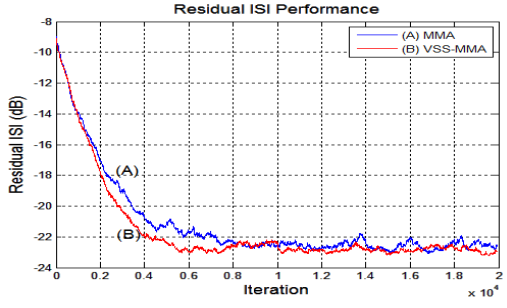


그림 7. 잔류 isi 성능
Fig. 7. Residual isi performance

그림 8과 9는 최대 찌그러짐과 MSE 성능을 나타낸 것이다. 그림 8의 최대 찌그러짐 성능은 그림 6의 성상도에서 송신 신호점을 중심으로 그 폭을 나타내는 것으로 등화 초기의 상태에서 서서히 감소되며 수렴 속도에서는 0.35[Volt]의 정상 상태까지 VSS-MMA가 MMA보다 빠르며 정상 상태 이후부터는 그 양과 변동 범위에서도 VSS-MMA가 MMA보다 적어짐을 알 수 있다. 또한 그림 9의 MSE 성능에서도 최대 찌그러짐과 유사한 등화 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

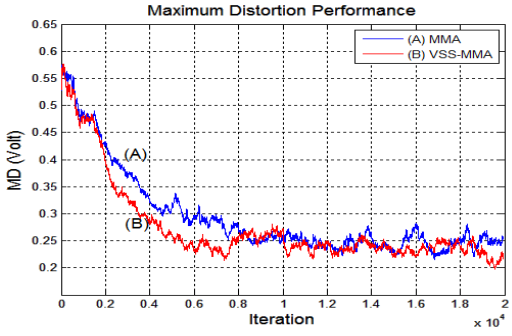


그림 8. 최대 찌그러짐 성능
Fig. 8. Maximum Distortion performance

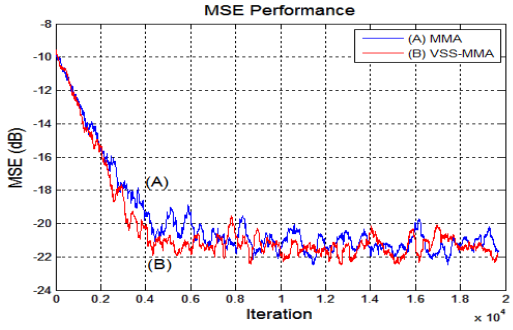


그림 9. MSE 성능
Fig. 9. MSE performance

표 1은 그림 7, 8, 9에서 제시되어진 잔류 isi, 최대 찌그러짐 및 MSE 성능에 대한 정량적인 비교를 위하여 정상 상태 이후 이들의 평균값을 나타낸 것이다. 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE의 지수에서 VSS-MMA가 MMA보다 정량적으로 우월함을 알 수 있으며, 이는 그림 6의 출력 성상도에서 정성적으로 확인할 수 있다.

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

	MMA	VSS-MMA
잔류 isi	0.0059	0.0053
최대 찌그러짐	0.2598	0.2419
MSE	0.0082	0.0077

마지막 성능 비교를 위하여 그림 10은 채널상에서 신호대 잡음비를 0~35[dB] 까지 5[dB] 단위로 변화시키면서 이들 적응 등화 알고리즘을 적용할 때 발생되는 심볼 오류율을 나타낸 것으로서, 각 알고리즘이 간섭과 잡음으로부터의 robustness를 나타낸다. 시뮬레이션 결과 신호대 잡음비가 20[dB] 이상에서는 개선된 SER 성능을 얻을 수 있으며, 신호대 잡음비가 증가할수록 높은 등화 이득 (equalization gain)음 얻을 수 있다.

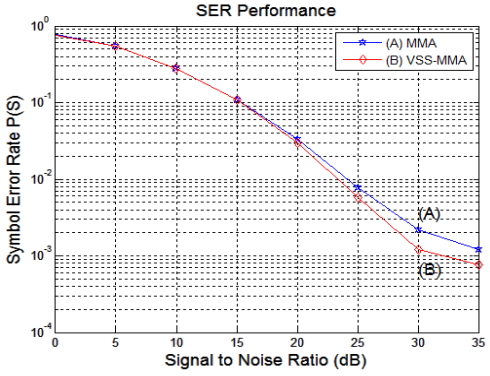


그림 10. SER 성능
Fig. 10. SER performance

V. 결 론

논문에서는 대역 제한과 다중 경로 통신 채널에서 발생되는 장애 요인중 부호간 간섭과 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 수신기에서 사용하는 적응 등화 알고리즘에서 고정 스텝 크기를 사용하는 MMA와 오차 신호의 비선형 함수를 기초로 한 variable step size의 VSS-MMA에 대한 등화 성능을 비교하였다. MMA 알고리즘에서는 적은 값을 갖는 양의 고정된 step size를 이용하여 초기와 정상 상태 관계없이 등화를 수행하는 반면, VSS-MMA 알고리즘에서는 초기 수렴을 위하여 스텝 크기를 크게 한 후 정상 상태에 도달한 이후에는 오차 신호의 비선형 함수를 기초로 하여 이의 크기를 적게 하는 원리이다. 이들의 성능 비교 및 분석을 위해 16-QAM을 대상으로 동일한 채널 계수와 신호대 잡음비를 적용하여 시뮬레이션하였으며, 이를 위한 지수로 등화기 출력 신호 성상도, 잔류 isi 와 최대 찌그러짐과 MSE 및 SER를 적용하였다. 시뮬레이션 결과 VSS-MMA가 MMA보다 잔류 isi, 수렴 속도와 MSE에서 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도와 정상 상태 이후의 개선된 등화 성능을 얻을 수 있었으며, SER 성능에서도 신호대 잡음비가 20[dB] 이상에서도 VSS-MMA가 MMA보다 1~2[dB] 정도의 등화 이득을 얻을 수 있어서 robustness가 개선됨을 알 수 있었다. 그러나 VSS-MMA 알고리즘이 응용되기 위해서는 핵심이 되는 오차 신호를 기초로 하는 variable step size의 값은 lookup table을 이용하여야 하는 문제점이 있다. 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 별도의 대안이 필요하며, 이와 같은 연구 결과를 바탕으로 향 후 고속, 광대역의 실시간 트래픽 전송과 같은 다양한 분야에서 통신 시스템의 throughput을 개선시킬 수 있어서 보다 개선된 성능을 갖는 등화 알고리즘에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

References

[1] D.N.Godard, "Self-recovering Equalization and carrier tracking in two-dimensional data comm. system", IEEE Trans. on Comm., Vol. 28, pp.1867~1875, Nov. 1980.

[2] R.Mitra, T.Choubisa, "A Variable Step Size Square Contour Algorithm Based on a NovelNon-Linear Function of Error Signal", Int. Conf. Com and Signal Processing, pp.336~338, 2011.

[3] Zhang Liyi, Chen Lei, Sun Yunshan, "VariableStep-size CMA Blind Equalization based on Non-linear Function of Error Signal", Int. Conf. Comm. and Mobile Computing, pp.396~399, 2009.

[4] Tyseer, "A Robust Variable Step-Size LMS-Type Algorithm and Analysis and Simulations", IEEE Trans. on Signal Proc., pp.631~639, Vol.45, 1997.

[5] Raymond H., "A Variable Step Size LMS

Algorithm", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, pp.1633~1642, 1992.

[6] K.Banovic, E.A.Raheem, M.A.S.Khalid, "A Novel Radius-Adjusted Approach for Blind Adaptive Equalization", IEEE Signal Processing Letter, Vol.13, No.1, pp.37~41, Jan. 2006

[7] J.Yang, J.J.Werner, G.A.Dumont, "The Multi-modulus Blind Equalization and its Generalized Algorithms", IEEE J.Selected Areas Comm., Vol.20,No.5, pp.997~1015, June 2002.

[8] D.S.Kang, S.G.Lim, "The Performance Comparison of MMA and S-MMA Adaptive Equalization Algo-rithm for QAM Signal", Jour. on I.I.B.C., Vol.13, No.1, pp.19~26, Feb. 2013.

[9] S.Haykin, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, 1991

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>