

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2016.16.2.107>

JIIBC 2016-2-13

가변 스텝 크기를 이용한 S-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 개선

Performance Improvement of S-MMA Adaptive Equalization Algorithm based on the Variable Step Size

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문에서는 비선형 전달 특성을 갖는 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 영향을 최소화시킬 수 있는 S-MMA (Sliced-Multi Modulus Algorithm) 등화 알고리즘에 가변 스텝 크기를 적용하여 등화 성능을 개선시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 기존의 MMA 알고리즘에서 정상 상태에서 등화 성능과 misadjustment를 개선하기 위하여 S-MMA가 등장하였으며, 이들 알고리즘에서는 오차 신호의 크기에 따른 고정 스텝 크기로 적응하기 때문에 성능 개선에 한계가 있다. 이와 같은 문제를 극복하기 위하여 제안 알고리즘에서는 오차 신호의 크기에 비례하는 가변 스텝 크기를 적용하며, 개선 효과를 보이기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과 제안 VSS S-MMA 알고리즘이 기존 S-MMA보다 등화 성능이 우월함을 확인하였다.

Abstract This paper proposes the improving the equalization performance using the variable step size in the S-MMA (Sliced-Multi Modulus Algorithm) equalization algorithm in order to minimize the effect of intersymbol interference which occurs at the nonlinear transfer function of communication channel. The S-MMA were showed for the improving the steady state equalization performance and misadjustment compared to the MMA present algorithm, this two algorithm has a limitation of performance improvement due to the adapting the fixed step size according to the error signal amplitude. In order to solving the abovementioned problem, the proposed algorithm was adopting the variable step size proportional to the error signal amplitude and the computer simulation was performed for showing the performance improving. As a result of simulation, the proposed VSS S-MMA algorithm has more superior equalization performance compared to the present S-MMA.

Key Words : S-MMA, Residual isi, Variable Step Size, MSE, MD

1. 서 론

최근 디지털 전송 시스템은 다양한 채널 환경에서도 최소의 심볼 오율을 가지면서 신속, 정확, 안전하게 전송

하는 것을 목표로 한다. 이를 위하여 대역폭 제한된 채널의 가용 대역폭을 효율적으로 이용하는 신호 기법을 사용하며, 이의 대표적인 기법으로 QAM을 들 수 있다. 대역폭의 효율적 이용은 대역 제한과 시분산 채널에 의해

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학
접수일자 : 2016년 1월 12일, 수정완료 : 2016년 3월 15일
게재확정일자 : 2016년 4월 8일

Received: 12 January, 2016 / Revised: 15 March, 2016 /
Accepted: 8 April, 2016

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

발생되는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭과 잡음의 영향을 받게 되므로 이를 최소화시키기 위한 적응 등화기 (adaptive equalizer)에 대한 많은 연구 결과 다양한 알고리즘이 등장하였다^{[1][2]}. 등화기의 개념은 채널의 주파수 전달 함수의 역 특성을 갖는 디지털 필터를 수신측에서 사용하여 비선형 특성인 채널에 의한 찌그러짐을 보상할 수 있으며, 채널 전달 함수의 inverse model에 해당된다. 적응 등화를 위한 초기의 CMA 알고리즘에서는 고차 QAM과 같은 nonconstant modulus 신호를 대상으로 등화를 수행하면 큰 misadjustment를 갖게 된다. 그러나 MMA는 등화기 출력의 dispersion을 최소화하여 CMA의 phase ambiguity 문제를 해결하지만, 전체적인 등화 성능이 열화된다. 이와 같은 성능 열화를 개선하기 위하여 MMA의 결정 장치의 출력인 sliced symbol을 고려한 dispersion constant에 의해 오차 신호를 얻는 S-MMA(Sliced-MMA)가 S.Abrar등에 의해 제안되었다^{[5][6]}. S-MMA에서는 sliced symbol의 적절한 가중치를 이용한 constant를 정의하고, 이를 이용한 오차 신호와 고정 스텝 크기에 의한 등화기 탭 계수를 갱신하게 된다. 이렇게 sliced symbol의 가중치를 이용하므로써 등화기 출력의 실수부와 허수부가 인접 심볼의 실수와 허수부의 절대치의 가중 contour에 매핑시킬 수 있게 된다. 적응 등화에서 오차 신호를 이용하여 스텝 크기를 직접 조절하는 경우 스텝 크기가 적으면 알고리즘의 정상 상태에서 잔여 오차가 적어지게 되지만, 수렴 속도는 늦어지므로, 수렴 속도를 개선하기 위하여는 스텝 크기를 크게 해야 한다. 이와 같은 정상 상태의 잔여 오차와 수렴 속도간의 적절한 고려를 위하여 가변 스텝 크기 (VSS ; Variable Step Size)의 개념이 등장하게 되었다^{[3][4]}. 본 논문에서는 S-MMA 등화 알고리즘에 오차 신호의 크기에 따라 스텝 크기를 조절하는 VSS S-MMA (Variable Step Size Sliced-MMA)의 성능을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 논문의 구성으로 2장에서는 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델과 S-MMA 적응 등화 알고리즘과 제안 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션과 결과로서 주어진 통신 채널과 신호대 잡음비에서 이들 알고리즘들의 등화 성능을 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 시스템 모델

그림 1은 적응 등화기를 사용한 일반적인 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 전송하면 송신 필터를 통과한 후 부호간 간섭의 원인이 되는 대역 제한과 다중 경로 전파를 나타내는 필터의 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며 동시에 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 가우시안 잡음이 부가된다. 수신측에서는 수신 필터를 통과한 후 등화기에 인가되며, 이때 등화기의 전달 함수는 통신 채널의 역 전달 함수를 갖도록 설정된다. 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하며, 송신 기저 대역 신호가 받는 채널에 의한 부호간 간섭은 등화기에 의해 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이때 등화기의 전달 함수를 결정하는 계수 f_k 가 고정되어 있는 경우에는 고정 등화기 (fixed equalizer), 시간에 따라 변화하는 적응 등화기 (adaptive equalizer)가 있다. 시간 영역에서는 채널과 등화기가 직렬 연결된 형태이므로 이들의 종합 임펄스 응답은 다음과 같이 되며, *는 선형 convolution을 나타낸다.

$$h_k * f_k = \delta_k \quad (1)$$

이 과정에서 지연 시간은 무시하였다.

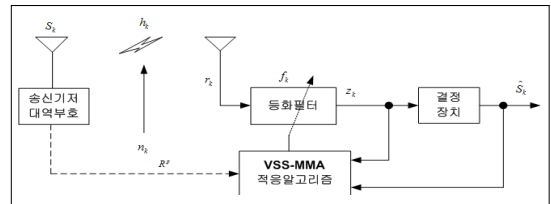


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델

Fig. 1. Baseband communication system model

2. Sliced-Multi Modulus Algorithm

그림 1에서 송신 신호를 s_k , 채널에서 부가되는 잡음을 n_k , 등화기 입력 신호를 r_k , 등화기 출력 신호를 z_k 라고 하고 결정 장치의 출력을 \hat{s}_k 라고 하자. 수신된 신호로부터 실수와 허수로 나누어 2 개의 등화 필터가 사용되며, 이들의 차수를 N 이라고 하자.

$$\begin{aligned} F_R(k) &= [f_{r0}(k) \ f_{r1}(k) \ f_{r2}(k) \ \dots \ f_{rN-1}(k)] \\ F_I(k) &= [f_{i0}(k) \ f_{i1}(k) \ f_{i2}(k) \ \dots \ f_{iN-1}(k)] \\ R_R(k) &= [r_r(k) \ r_r(k-1) \ r_r(k-2) \ \dots \ r_r(k-N+1)] \\ R_I(k) &= [r_i(k) \ r_i(k-1) \ r_i(k-2) \ \dots \ r_i(k-N+1)] \end{aligned}$$

(2)

여기서 $F_R(k)$ 와 $F_I(k)$ 는 등화 필터의 실수부와 허수부를 독립적으로 나타내는 계수를 나타내고, $R_R(k)$ 와 $R_I(k)$ 는 수신 신호의 실수와 허수를 독립적으로 나타내는 regressor vector이다. 이들을 이용하면 실수와 허수부 등화기의 출력 신호는 다음과 같다.

$$z_{Rk} = F_R(k)^T R_R(k), \quad z_{Ik} = F_I(k) R_I(k) \quad (3)$$

J.Yang 등이 제안한 MMA는 스펙트럼 효율을 더욱 높이기 위하여 QAM 신호의 레벨수가 증가할수록 정상 상태에서의 constellation과 비용 함수간의 mismatch가 증가되어 등화기 출력에는 tap 적응 잡음이 발생되어 등화 성능이 열화되며, 이로 인하여 SER 성능이 저하된다. 이를 줄이기 위해서는 적응을 위한 스텝 크기 μ 를 적게 설정해야한다. 이를 보완하기 위하여 S-MMA는 MMA의 구조에서 dispersion constant에 결정 장치의 출력 $\hat{s}_{kr}, \hat{s}_{ki}$ 의 절댓치를 적절하게 가중치를 취하여 오차 신호를 얻을 수 있도록 개선한 것이다. 따라서 동일값을 갖는 $|\hat{s}_{kr}|, |\hat{s}_{ki}|$ 의 심볼군에 대해서는 독립적인 dispersion constant를 할당하는 비용 함수를 설정한다. 기존 MMA의 dispersion constant R_{MMA} 대신 sliced dispersion constant인 $|\hat{s}_{kr}|^c R_{2R}$ 를 이용하여 등화기 출력은 인접한 constant에 mapping되어 해당되는 오차 신호를 얻게 되며, S-MMA의 비용 함수와 적응 알고리즘은 다음과 같다.

$$J_z(k) = J_{Rk} + J_{Ik}, \quad J_{Rk} = E[|z_{Rk}|^2 - |\hat{s}_{kr}|^c R_{2R}], \quad J_{Ik} = E[|z_{Ik}|^2 - |\hat{s}_{ki}|^c R_{2I}]$$

$$R_{2R} = \frac{E[|s_{kr}^4(k)|]}{E[|s_{Rk}(k)|^{2+c}]}, \quad R_{2I} = \frac{E[|s_{ki}^4(k)|]}{E[|s_{Ik}(k)|^{2+c}]}$$

$$e_{KSMMA} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - |\hat{s}_{kr}|^c R_{2R}) + jz_{ki}(|z_{ki}|^2 - |\hat{s}_{ki}|^c R_{2I})$$

$$F(k+1) = F(k) - \mu e_{KSMMA} R^*(k) \quad (4)$$

여기서 c 는 0과 1사이의 값을 갖는 slice constant를, μ 는 고정된 스텝 크기를 각각 나타내며, slice dispersion constant R_{2R}, R_{2I} 를 이용하여 오차 및 등화기 탭 계수를 갱신하도록 stochastic gradient algorithm을 적용한다. S-MMA의 등화기 출력인 z_{kr}, z_{ki} 는 $\text{sign}[z_{kr} \sqrt{|\hat{s}_{kr}|^c R_{2R}}]$ 와 $\text{sign}[z_{ki} \sqrt{|\hat{s}_{ki}|^c R_{2I}}]$ 의 point contour에 존재하도록 탭 계수를 update한다.

3. Variable Step Size 개념

VSS는 식(4)의 S-MMA 알고리즘에서 고정 스텝 μ

값을 적응적으로 변화시킬 수 있는 능력을 갖는다. 적응 등화 알고리즘에서 식(4)의 오차 신호를 직접 이용하여 step size를 제어하는데 있어서 수렴전에 수렴 속도를 개선시키기 위하여 가변 step size의 step 크기를 크게 한다. 이렇게 하면 초기에 큰 오차일수록 수렴 속도가 빨라지지만, 수렴이 진행되면서 오차가 급격히 감소되어도 step size의 크기는 이에 비례하여 급격히 감소되지 않으므로 residual 오차라는 새로운 문제가 발생될 수 있으며, 이는 interference에 매우 민감하다. 적응 등화 알고리즘이 수렴한 후에도 만약 강한 채널의 interference가 존재한다면 인위적으로 오차 신호는 커질 수 있으므로 이를 막기 위하여 오차 신호를 적절한 변환 과정을 거쳐 비선형 함수를 이용한 step size 제어에 사용하는 것이 VSS에 의한 S-MMA의 SER 성능 열화를 방지할 수 있게 된다. 제안 방식인 VSS S-MMA 알고리즘에서 고정 step size μ 는 다음과 같이 비선형 함수인 지수 함수를 이용하여 변환한다.

$$\mu_k = \beta[1 - \exp(-\alpha \overline{e_k})] \quad (5)$$

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

$$0 \leq \mu_k \leq 0.66 \text{ tr}(R_k) \quad (6)$$

R_k 는 등화기의 입력 신호 r_k 의 자동 상관 행렬이다.

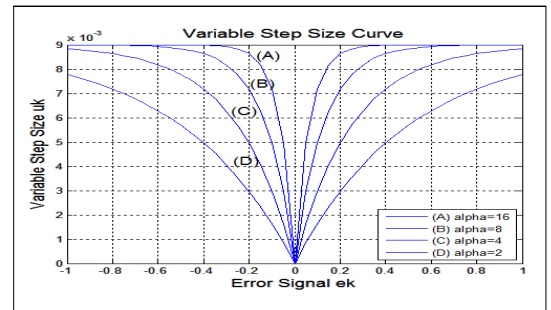


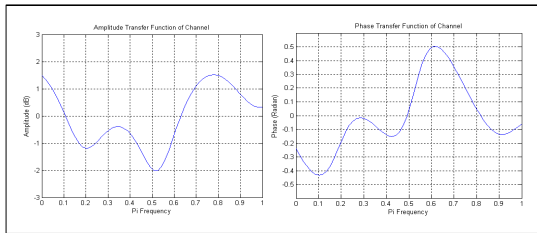
그림 2. VSS의 오차 신호와 스텝 변화
 Fig. 2. Error Signal and Step Variation in VSS

그림 2는 $\beta = 0.009$, $\alpha = 16, 8, 4, 2$ 일 때 오차 신호 $\overline{e_k}$ 에 따른 적응 step size μ_k 의 분포를 나타낸 것이다. 알고리즘의 초기의 iteration 단계에서 $\overline{e_k}$ 는 커지므로 알

고리짐이 반복될수록 μ_k 는 점진적으로 적어짐을 알 수 있지만, 점진적으로 적어지는 기울기는 α 값에 의해 결정되며, variable step size의 변화량은 α 값이 클수록 심해진다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존 S-MMA 알고리즘과 가변 스텝 크기를 갖는 제안 VSS S-MMA 알고리즘의 성능 비교를 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해서는 찌그러짐을 나타내는 통신 채널 모델과 일정한 신호대 잡음비를 갖는 가우시안 잡음 및 가변 스텝 크기를 갖는 VSS S-MMA 알고리즘의 3 가지 모델이 필요하다. 먼저 채널 모델을 그림 3에 진폭과 위상으로 구분하여 나타내었다. 진폭 전달 함수는 최대와 최소 전달 함수가 3.5dB 범위에서 주파수에 따라 이득이 변화하며, 위상 전달 함수는 주파수에 따라 위상의 기울기가 일정하지 않고 있다. 부가되는 가우시안 잡음의 크기를 조절할 수 있는 신호대 잡음비는 30dB로 고정하였으며, 식(5)에서 $\beta = 0.0015$, $\alpha = 1.5$ 및 slice constant $c = 0.4$ 를 적용하였다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 3. 채널의 주파수 전달 함수
Fig. 3. Frequency Transfer Function of Channel

그림 4는 시뮬레이션을 위한 전체 신호 처리 과정을 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 채널을 통과시키고 30dB의 신호대 잡음비가 되도록 가우시안 잡음을 부가시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이를 S-MMA와 가변 스텝 크기를 갖는 제안 VSS S-MMA 알고리즘으로 처리하여 적응 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 등화기 출력, 잔류 isi 및 MD, SER을 계산하였다.

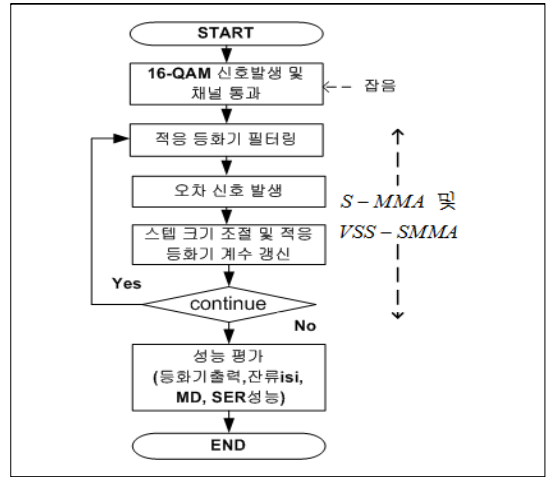


그림 4. 전체 신호 처리도
Fig. 4. Overall signal processing flowdiagram

2개의 적응 등화 알고리즘의 성능을 비교하기 위해서는 알고리즘 내부의 성능으로 등화기 출력 신호의 정상도(constellation), 등화기가 채널의 변동에 신속히 대응할 수 있는 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐(MD : Maximum Distortion)과 MSE가 있으며, 알고리즘 외부의 성능으로 잡음에 대한 강인성을 알 수 있는 SER 성능이 있으며, 이들에 대하여 순차적으로 결과를 제시한다. 그림 5는 내부 성능을 나타내는 첫 번째 지수로서 정상 상태에서 출력 신호 정상도를 나타낸 것이다.

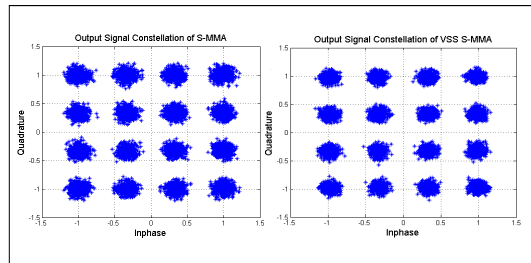


그림 5. 등화기 출력 신호
Fig. 5. Equalizer output signal

등화기 출력 신호에서는 총 16개의 신호점으로 구분되며, 각 신호점들의 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 된다. 그림에서 제안 알고리즘인 VSS S-MMA의 출력이 고정 스텝을 갖는 S-MMA보다 신호점의 폭과 간격에서 우월함을 알 수 있다. 두 번째 성능 비교를 위한 지수로 잔류 isi, MD learning 곡선이 있으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우

중요하다. 잔류 isi는 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화 상태에서 이들의 종합 특성으로 시간 영역에서는 식 (1)과 같은 임펄스 특성을 가져야 한다. 이는 이론적인 관계이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하고 잔류 성분들이 존재하게 되므로 이와 같은 잔여 성분들의 크기를 의미한다. 그림 6은 알고리즘의 iteration에 대한 잔류 isi 성분의 크기를 나타낸 것으로서 iteration이 증가할수록 적은 값으로 수렴해감을 알 수 있으며, -20dB를 정상 상태로 설정할 때 S-MMA는 1036회, 제안 VSS S-MMA 방식은 1688회에 달성하므로 수렴 속도에서는 S-MMA가 1.6배 빠름을 알 수 있지만, 정상 상태 이후의 잔류양에서는 VSS S-MMA가 훨씬 적다.

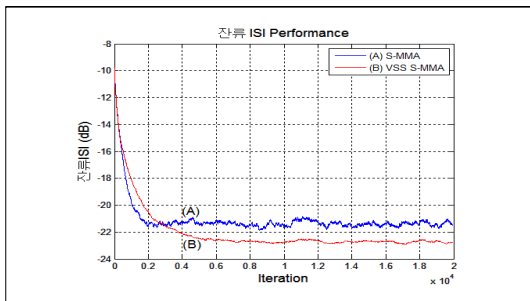


그림 6. 잔류 isi 성능
 Fig. 6. Residual isi performance

MD는 그림 5의 복원 정상도에서 원래의 송신 신호점과 복원 신호점간의 (+)와 (-) 거리를 나타내는 진폭의 jitter를 나타내며, 이들 알고리즘의 성능 곡선을 그림 7에 나타내었다. 이 지수에서도 정상 상태인 -0.35 [v]이하로 정의할 때 S-MMA는 1277회, 제안 VSS S-MMA는 2061회에서 달성되므로 MD 수렴 속도에서도 S-MMA가 제안 방식보다 1.61배 빠르지만, 정상 상태 이후부터 그 양은 훨씬 적어짐을 알 수 있다.

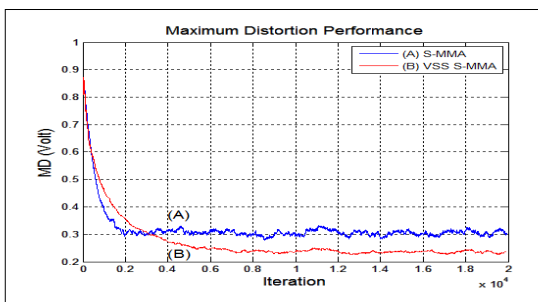


그림 7. MD 성능
 Fig. 7. MD Performance

2가지 성능에서 공통적으로 S-MMA가 VSS S-MMA보다 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서는 빠르지만, 정상 상태 이후의 양에서는 적응 스텝 크기를 적용하는 제안 방식이 훨씬 우월함을 알 수 있다. 마지막으로 알고리즘의 외부 성능으로 잡음에 대한 강인성을 위하여 신호대 잡음비를 변화시킬 때 심볼 오류율을 나타내는 SER 성능을 그림 8에 나타내었다. 그림에서 신호대 잡음비가 커질수록 제안하는 VSS S-MMA가 S-MMA보다 높은 등화 이득을 얻을 수 있어서 강인성이 개선됨을 알 수 있다.

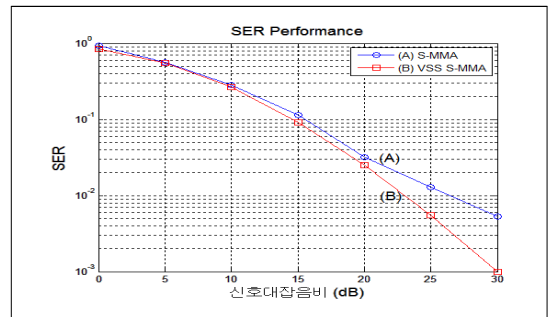


그림 8. SER 성능
 Fig. 8. SER Performance

V. 결론

논문에서는 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 영향을 최소화할 수 있는 S-MMA 등화 알고리즘에서 적응을 위한 고정 스텝 크기를 오차 신호의 비선형을 이용한 가변 스텝 크기의 VSS S-MMA 알고리즘을 제안하였다.

또한 이의 개선된 성능을 확인하기 위하여 등화기 출력 신호의 정상도, 등화기의 수렴 특성을 확인하기 위하여 잔류 isi, MD 및 SER을 적용하였다. 시뮬레이션 결과 등화기 출력의 정상도에서 제안 방식인 VSS S-MMA가 S-MMA보다 신호점의 폭과 거리가 우월한 등화 성능을 확인할 수 있었다. 또한 수렴 특성에서 정상 상태에 도달할 수 있는 수렴 시간과 정상 상태 이후의 잔류양을 알 수 있다. 수렴 시간에서는 S-MMA가 VSS S-MMA보다 1.6배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후부터는 제안 방식이 더욱 적은 잔류양을 얻을 수 있었으며 정량적인 분석 결과에서도 우월함을 확인하였다. 이와 같은 개선된 성능을 갖는 적응 등화 알고리즘은 최근 급격히 증가되는 모바일 인터넷 트래픽과 같은 부호간 간섭이 존재하는 환

경에서 전송 시스템의 성능을 개선시킬 수 있는 기반 기술로서 중요한 의미를 갖게 되며, 향후 VSS 개념을 더욱 확장시켜 다양한 적응 등화 알고리즘에 적용시키기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

References

- [1] Y.Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude Modulation systems", IEEE Trans. Com., COM-23, pp.679~682, June, 1975
- [2] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980
- [3] R.Mitra, T.Choubisa, "A Variable Step Size Square Contour Algorithm Based on a Novel Non-Linear Function of Error Signal", Int. Conf. Com and Signal Processing, pp.336~338, 2011.
- [4] Zhang Liyi, Chen Lei, Sun Yunshan, "Variable Step-size CMA Blind Equalization based on Non-linear Function of Error Signal", Int. Conf. Comm. and Mobile Computing, pp.396~399, 2009.
- [5] S.Abrar, R.A.Axford, "Sliced Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", ETRI Journal, Vol.27, No.3, pp.257~266, June 2005.
- [6] S.G.Lim, "Performance Comparison of S-MMA Adaptive Equalization Algorithm by Slice Weighting Value in 16-QAM Signal", Jour. of IIBC, pp. 55~61, June 2013.
- [7] S.G.Lim, "A Performance Evaluation of VSS-MMA Adaptive Equalization Algorithm using the Non-Linear Function of Error Signal for QAM System", Jour. on I.I.B.C., Vol.15, No.1, pp.131~137, Feb. 2015.

저자 소개

임 승 각(정회원)



- 1983년 : 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년~현재 : 공주대학교 정보통신 공학부 교수

<주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신>