

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.1.57>

IIBC 2019-1-8

양자화기 비트수에 의한 QE-MMA 적응 등화 알고리즘 성능 평가

A Performance Evaluation of QE-MMA Adaptive Equalization Algorithm by Quantizer Bit Number

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 높은 스펙트럼 효율을 갖는 nonconstant modulus 신호 전송에서 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 보상하기 위한 QE-MMA (Quantized Error-Multiple Modulus Algorithm) 적응 등화 알고리즘에서 양자화기의 비트수에 의한 성능을 평가하였다. 적응 등화기의 탭 계수 갱신시 오차 신호가 필요하게 되는데 QE-MMA는 H/W 응용의 편리성을 위하여 오차 신호의 극성과 유한 비트의 비선형 power-of-two 양자화 성분까지 고려한 correlation multiplier를 이용하게 된다. 이때 양자화기의 비트수에 따라 상이한 적응 등화 성능이 얻어지므로 이들의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 평가하며 이를 위하여 동일 채널에서 등화기 출력 정상도, 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE, SER을 적용하였다. 성능 평가 결과 양자화기 비트수가 클수록 정상 상태에서의 모든 성능 지수에서 개선되며 등화 잡음이 감소하였지만, 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도가 늦어짐을 확인하였다.

Abstract This paper evaluates the QE-MMA (Quantized Error-MMA) adaptive equalization algorithm by the number of quantizer in order to compensate the intersymbol interference due to channel in the transmission of high spectral efficient nonconstant modulus signal. In the adaptive equalizer, the error signal is needed for the updating the tap coefficient, the QE-MMA uses the polarity of error signal and correlation multiplier that considered nonlinear finite bit power-of-two quantizing component in order to convenience of H/W implementation. The different adaptive equalization performance were obtained by the number of quantizer, these performance were evaluated by the computer simulation. For this, the equalizer output signal constellation, residual isi, maximum distortion, MSE, SER were applied as a performance index. As a result of computer simulation, it improved equalization performance and reduced equalization noise were obtained in the steady state by using large quantizer bit numbers, but gives slow in convergence speed for reaching steady state.

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

1. 서론

정보 통신망을 통한 대용량 정보의 고속 전송 요구가

증대되며, 이를 위한 스펙트럼 효율적인 신호 방식과 변조등의 신호 처리 기술이 급격하게 발전하고 있다. 모든 디지털 정보는 대역 제한 및 페이딩이 존재하는 유

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2018년 11월 5일, 수정완료 2018년 12월 27일
게재확정일자 2019년 2월 8일

Received: 5 November, 2018 / Revised: 27 December, 2018 /
Accepted: 8 February, 2019

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

무선의 통신 채널을 통하여 수신측에 정확하게 전송되어야 하지만, 상기의 요인들에 의해 전송되는 신호에는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭 및 잡음이 부가되어 이를 처리하는 통신 시스템의 전송 효율 및 동기 이탈등의 throughput이 열화된다^[1]. 특히 부호간 간섭은 채널의 분산 시간이 송신 신호 심볼 시간보다 큰 경우에 발생되며 고속 전송의 경우 심볼 시간이 적게 되어 상대적으로 이의 영향이 지배적이므로, 이를 적절히 제어하기 위하여 수신측에서 적응 등화기를 사용하고 있다.

블라인드 적응 등화 방식은 학습열 대신 수신된 신호 열과 송신 신호의 dispersion constant라는 통계적 사전 특성을 이용하여 비최소 위상 채널 등화를 적응적으로 수행하지만, 고스펙트럼 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 CMA, MMA를 들 수 있다. MMA는 진폭과 위상의 동시 보상 가능 및 등화 잡음이 적지만, nonconstant modulus 신호에서 성능이 저하되며 기존 CMA보다 연산량이 증가한다. 수신측에서 심볼을 2진 binary로 복원하기 위하여 필요한 총 연산의 80% 이상이 블라인드 적응 등화를 위하여 사용되므로 MMA의 장점을 살리면서 이와 같은 연산량 문제를 해결하기 위한 QE-MMA가 등장하였다^{[2][3]}. 적응 등화기의 탭 계수 갱신을 위하여 오차 신호를 이용하지만, QE-MMA는 오차 신호의 극성과 비선형 유한 비트 power-of-two 양자화 성분의 correlation multiplier를 이용하게 된다^{[6][7]}.

본 논문에서는 nonconstant modulus 신호인 16-QAM 신호를 대상으로 블라인드 적응 등화 알고리즘으로 QE-MMA를 적용할 때 power-of-two 양자화를 위한 비트수를 변화시킬 때 등화 성능에 미치는 영향을 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 논문의 구성으로 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 통신 시스템의 모델을 설명한 후 3 장에서는 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 채널 필터, 등화필터, 적응 알고리즘부와 결정 장치로 구성되어 있다. 그림에서 입력 신호 s_k 는 평균 0인 2차원 정상도를 가지며, 미지의 SISO (Single In Single Output) 시스템인 채널 h_k 는 비최소 위상 선형 시불변으로 전달할 수는 단위원상에 영점이 존재하지 않고 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 발생한 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 $h_k \odot f_k = \delta_k$ (Perfect Blind Equalization)에 근사치가 되도록 적응적으로 변화한다.

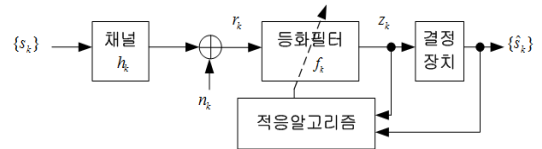


그림 1. 기저 대역 시스템 모델
Fig. 1. Baseband system model

2. QE-MMA 알고리즘

MMA에서 적응 등화기 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호와 계수 갱신식은 다음과 같이 정의된다.

$$e_{kMMA} = z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + jz_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2) \quad (1)$$

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

SE-MMA는 식(1)의 MMA 오차 함수에서 이들의 부호만을 이용하여 등화 필터 계수의 갱신에 사용되기 때문에 붙여진 이름이며, 오차 함수와 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

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

$$f_{k+1} = f_k - \mu \overline{e_{kSE-MMA}} r_k^* \quad (2)$$

SE-MMA 알고리즘에서 오차 신호 $\overline{e_{kSE-MMA}}$ 는 MMA 알고리즘의 오차 신호 $\overline{e_{kMMA}}$ 의 부호 또는 극성만을 취하여 언어짐을 식(1)과 (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]. QE-MMA 알고리즘은 이와 같은 사실에 기초하여 SE-MMA 알고리즘에 power-of-two 양자화 개념 (FBQ : Finite Bit Quantization)을 적용하며, 탭 계수 갱신은 shift와 가산 연산만으로 수행될 수 있다. QE-MMA 알고리즘에서 탭 계수 갱신은 다음과 같다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu Q[\overline{e_{kSE-MMA}}] r_k^* \quad (3)$$

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

$$Q(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x), & |x| \geq 1 \\ 2^{-\log_2|x|} \text{sgn}(x), & 2^{-B+2} \leq |x| < 1 \\ 2^{-B+1} \text{sgn}(x), & |x| < 2^{-B+2} \end{cases} \quad (4)$$

식(4)에서 B 는 양자화 비트수를 나타내며, 기호 $\vdash \cdot \dashv$ 는 \cdot 보다 적은 큰 정수를 나타낸다. 양자화기는 입력을 “1”을 갖는 곳에 B 비트로 대체하게 되며, 이는 입력 공분산 행렬 $E[r_k r_k^T]$ 이 diagonal일 때 성립한다. 그림 2는 $B=8$ 일 때 power-of-two quantizer의 입력/출력 특성을 나타낸 것으로 오차 성분이 적을수록 양자화 스텝폭이 좁으며, 커질수록 스텝이 커져서 +1과 -1 사이에 복수개의 양자화 레벨에 의한 correlation multiplier를 곱하게 된다. 양과 음의 오차 성분에 대해 각각 $-B+2=6$ 개의 레벨이 비선형 크기로 발생됨을 알 수 있으며, 실제 B 의 값이 적을수록 H/W에 응용시에는 유리하지만 등화 성능이 열화되며, B 의 값이 크면 응용시에는 어려워지지만 등화 성능이 개선되므로, 적당한 B 의 선정이 중요하다. 이론적으로 이를 설정하기 위한 기준은 다음과 같다. 여기서 σ_n 은 잡음의 분산치이다.

$$B \leq \log_2 \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_n} \right) \quad (5)$$

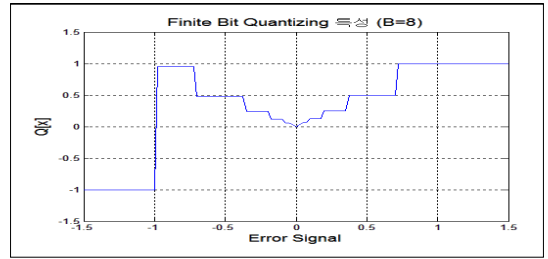


그림 2. 양자화기의 입출력 특성
 Fig. 2. Input/Output characteristics of quantizer

그림 3은 QE-MMA의 내부 구조를 나타낸 것으로 그림 1의 적응 알고리즘부를 상세화시킨 것이다. 오차 신호의 극성을 얻는 $\text{sgn}(\cdot)$ 와 FBQ의 양자화 레벨과의 승산에 의해 얻어지는 correlation multiplier가 탭 계수 갱신을 위한 입력으로 사용되고 있다.

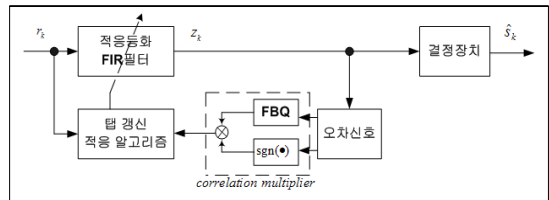


그림 3. QE-MMA의 내부 구조
 Fig. 3. Internal structure of QE-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션

비선형 power-of-two 양자화기를 사용하여 기존 MMA 적응 등화 알고리즘의 연산량을 줄인 QE-MMA 알고리즘에서 양자화기 비트수에 따른 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 동일 채널에서 신호대 잡음비는 30dB, QE-MMA의 스텝 크기는 각각 $\mu=0.03$ 및 양자화기 비트수 $B=6,7,8$ 일 때를 적용하였다. 그림 4는 시뮬레이션을 위한 통신 채널의 임펄스 계수이며, 그림 5는 전체적인 신호 처리 과정을 나타낸 것이다.

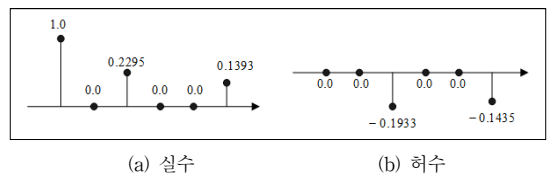


그림 4. 통신 채널의 계수
 Fig. 4. Coefficient of communication channel

nonconstant modulus 신호 방식인 16-QAM 신호를 발생시킨 후 그림 4의 채널을 통과시킨 후 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호를 얻는다. 이 신호는 적응 등화기에 입력된 후 채널에서 발생하는 부호간 간섭 영향을 경감시킨 출력을 얻으며, 이 출력 신호를 이용하여 오차 신호를 발생한 후 이의 극성과 FBQ에 의한 성분을 고려한 correlation multiplier를 얻은 후 QE-MMA 알고리즘에 의해 새로운 등화기 탭 계수는 발생시킨다. 또한 등화기 출력 신호는 결정 장치에 인가하여 송신 신호를 복원토록 한다.

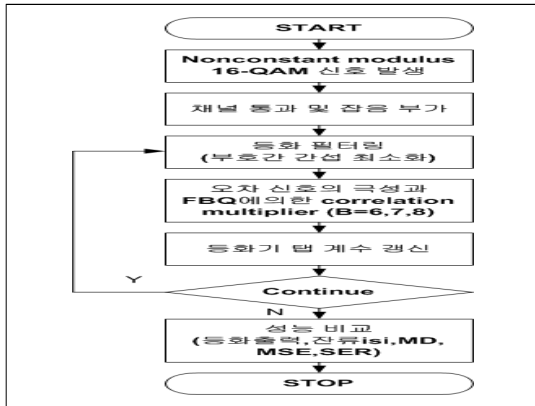
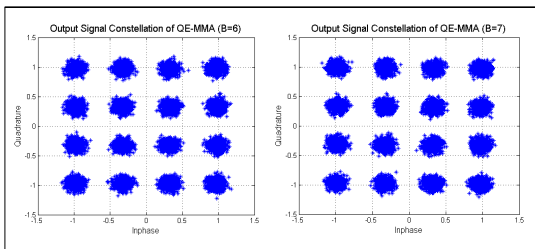
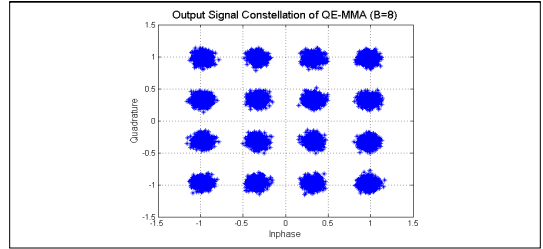


그림 5. 신호 처리도
Fig. 5. Signal processing diagram

그림 6은 정상 상태에서 양자화기 비트수 B를 변화시킬 때 적응 등화기 출력 신호의 성상도를 나타낸 것이다. 이들로부터 16개 신호점을 명확하게 알 수 있지만, 각 신호점간의 거리가 멀고 신호점 폭이 좁을수록 등화 능력이 우수하다. 그림에서 B가 클수록 신호점간 거리가 멀어서 심볼 오율 발생 가능성이 적으며 신호점의 폭이 좁게 되어 정성적으로 성능이 우수함을 알 수 있다.



(a) B = 6 (b) B = 7



(c) B = 8

그림 6. 등화기 출력 신호 성상도
Fig. 6 Equalizer output signal constellation

적응 등화기의 성능을 나타내는 두 번째 내부 지수로 잔류 isi와 최대 찌그러짐 및 MSE를 사용하였다. 이들 지수로부터는 정상 상태 이후 적응 등화의 성능과 채널 상태 변화에 따라 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간을 알 수 있다. 그림 7은 잔류 isi의 성능을 나타내고 있으며, 적응 등화기의 정상 상태를 -20dB로 설정할 때 여기에 도달하는 수렴 속도에서 B = 6일 때 684회, B = 7일 때 1039회, B = 8일 때 1811회가 소요된다. 그림 8은 MD 성능이며, 정상 상태로 0.35를 설정할 때 수렴 속도에서 B = 6일 때 746회, B = 7일 때 1143회, B = 8일 때 1942회가 소요된다. 그림 9는 MSE 성능을 나타내며, 정상 상태를 -20dB로 설정할 때 여기에 도달하는 수렴 속도에서 B = 6일 때 819회, B = 7일 때 1253회, B = 8일 때 2289회가 소요됨을 알 수 있다. 이들 3가지의 내부 성능 지수에서 양자화기 비트수 B가 증가할수록 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도가 느려지지만, 정상 상태 이후부터의 잔류 특성과 jitter를 나타내는 MSE 특성이 개선됨을 알 수 있다. 표 1은 정상 상태 이후부터의 비트수 B에 대한 정량적인 등화 특성치를 나타낸 것으로 모든 지수에서 B가 클수록 우수함을 알 수 있다.

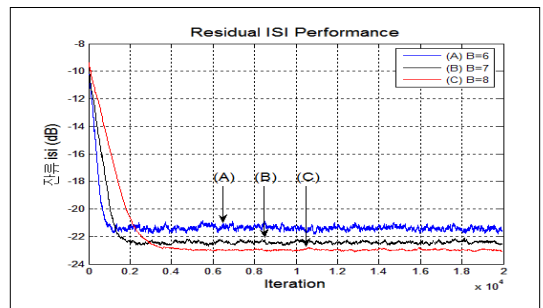


그림 7. 잔류 isi 성능
Fig. 7. Residual isi performance

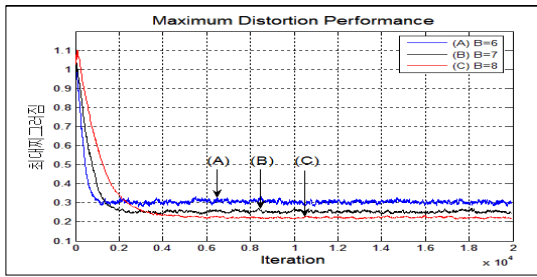


그림 8. MD 성능
 Fig. 8. Maximum Distortion performance

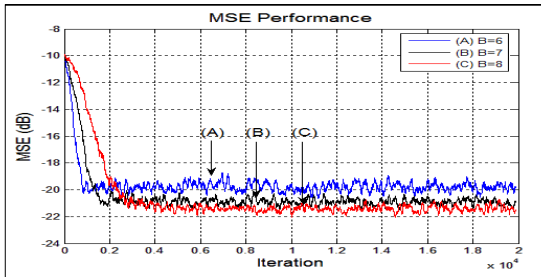


그림 9. MSE 성능
 Fig. 9. MSE performance

한 오류율을 얻을 수 있다. B의 값이 클수록 높은 equalization gain의 양호한 오류율을 얻을 수 있다. 이는 동일한 신호대 잡음비에서 오차 신호를 표현할 때 고려되는 잡음의 영향을 나타내는 정밀도가 증가되어 gain이 비례하여 얻어지는 결과임을 알 수 있다. 그러나 이는 QE-MMA 알고리즘을 H/W로 응용할 때 B의 값과 등화 성능간에는 tradeoff가 존재하므로, 통신 채널의 상태에 따라 B의 값을 적절하게 선택하여야 할 것이다.

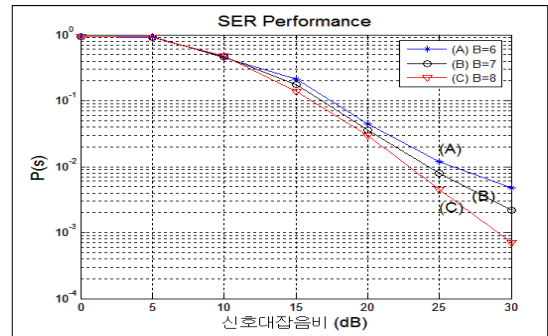


그림 10. SER 성능
 Fig. 10. SER performance

표 1. 성능 지수의 통계값
 Table 1. Statistic value of performance index

양자화기 비트수	성능 지수	평균값	분산값
B = 6	잔류 isi	0.0073	8.4816e-8
	최대찌그러짐	0.3054	7.04e-5
	MSE	0.0105	5.6737e-7
B = 7	잔류 isi	0.0058	1.3096e-7
	최대찌그러짐	0.2557	1.0688e-4
	MSE	0.0082	2.5416e-7
B = 8	잔류 isi	0.0052	3.5881e-7
	최대찌그러짐	0.2295	3.6565e-4
	MSE	0.0073	2.4e-7

그림 10은 QE-MMA 적응 등화 알고리즘에서 FBQ를 위한 양자화기 비트수 B = 6, 7, 8일 때 외부 잡음에 대한 강인성을 확인하기 위하여 신호대 잡음비에 대한 심볼 오류율 (SER : Symbol Error Rate) 성능을 나타낸 것이다. 신호대 잡음비를 0~30dB까지 5dB 단위로 변화시키면서 20000개의 16-QAM 신호를 발생시켜 5회 반복시킬 때의 평균 심볼 오류율을 계산하였다. 시뮬레이션 결과 신호대 잡음비가 낮은 0~10dB범위에서는 B의 값에 따른 차이는 거의 없지만 그 이상에서는 B 값에 따라 상이

V. 결론

논문에서는 16-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호를 전송할 때 진폭과 위상의 동시 등화를 위한 MMA 적응 등화 알고리즘의 연산량을 단순화시켜 H/W 응용을 용이도록 변형시킨 QE-MMA에서 유한 비트의 비선형 power-of-two 양자화기의 양자화 비트수 B에 따른 알고리즘의 적응 등화 성능을 비교하였다. QE-MMA 알고리즘에서는 오차 신호의 극성과 이의 유한 비트 비선형 양자화기에 의한 correlation multiplier를 고려하여 탭 계수 갱신에 적용하고 있다. 이들 알고리즘의 성능 평가 결과 양자화 비트수 B가 클수록 등화가 출력 정상도에서 우월하였으며, 정상 상태에서 잔류 isi, 최대 찌그러짐, MSE에서 잔류양들이 적어서 개선된 성능을 얻을 수 있었다. 또한 탭 계수 적용에 따라 발생하는 misadjustment에 의한 등화 잡음을 상당히 줄일 수 있었으며, 외부 잡음에 대한 강인성에서도 B가 클수록 높은 등화 이득을 얻을 수 있음을 확인하였으나 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도가 늦어짐을 알 수 있었다. 따라서 H/W 응용의 용이성을 위한 QE-MMA 알고리즘을 고려할 때 간

여량과 수렴 속도간의 tradeoff를 고려한 적절한 양자화 기 비트수 B의 값이 선정이 필요하며, 향후 적은 비트수에서도 성능을 개선시킬 수 있는 방식이 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 : 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.
DOI : 10.1109/MWSCAS.2005.1594108
- [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 : 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 : 10.1109/31.62411
- [5] P.Xue, B.Liu, "Adaptive Equalizer using finite-bit power-of-two quantizer", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, Vol.34, pp.1603~1611, Dec. 1986.
DOI : 10.1109/TASSP.1986.1164999
- [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 : 10.1109/82.160173
- [7] S.G.Lim, "A Robustness Performance Improvement of QE-MMA Adaptive Equalization Algorithm based on dithering", Jour. of I.W.I.T., Vol.17, No.3, June 2017.
- [8] 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.

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