

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.3.93>

IIBC 2017-3-10

Dithering을 이용한 QE-MMA 적응 등화 알고리즘의 Robustness 성능 개선

A Robustness Performance Improvement of QE-MMA Adaptive Equalization Algorithm based on Dithering

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 채널에서 발생하는 비선형 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 줄이기 위하여 dithering에 의한 QE-MMA 적응 등화 알고리즘의 robustness 성능 개선에 관한 것이다. QE-MMA는 기존 SE-MMA에서 오차 신호의 크기를 power-of-two 연산을 적용하여 탭 계수 갱신시 필요한 승산을 천이로 대체하여 H/W 응용을 용이하도록 등장하였으나, 이로 인한 적응 등화 성능이 열화된다. 이를 개선하기 위하여 제안 방식인 DQE-MMA (Dithere Quantized Error-MMA)에서는 power-of-two 연산의 전 단계에서 일정한 통계 특성을 갖는 dither 신호를 추가한다. 동일한 채널과 신호대 잡음비에서 제안 방식인 DQE-MMA가 기존 QE-MMA보다 개선된 robustness 성능을 얻을 수 있음을 시뮬레이션으로 확인하였다.

Abstract This paper relates with the robustness performance improvement of QE-MMA (Quantized Error-MMA) adaptive equalization algorithm based on the dithering in order to reduce the intersymbol interference by nonlinear distortion occurs at channel. The QE-MMA was appeared for the easiness of H/W implementation in place of multiplication to shifting in the tap coefficient updates applying the power-of-two operation to the magnitude of error signal in currently SE-MMA, it's performance were degraded by this. For improving it's performance, the proposed DQE-MMA adds the dither signal which has constant statistical characteristics in the prestage of power-of-two operation. It was confirmed by simulation that the DQE-MMA gives better robustness performance than current QE-MMA in the same channel and signal to noise ratio.

Key Words : QE-MMA, DQE-MMA, power-of-two arithmetic, residual isi, EMSE

1. 서론

최근 디지털 통신 시스템의 수신기에서 송신 심볼을 추정하는 추정기는 매우 중요한 역할을 하며, 등화기와 결정 장치로 구성되어 있다. 이 중에서 등화기는 채널에

서 발생하는 부호간 간섭과 같은 비선형 찌그러짐을 보상할 수 있는 능력을 가지므로 수신기에서 매우 중요한 역할을 수행한다. 등화는 송신기에 의해 보내진 심볼을 부가 잡음과 부호간 간섭과 같은 비선형 채널 찌그러짐의 영향을 받은 수신 신호에서 이를 최소화할 수 있다

*정희원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2017년 2월 20일, 수정완료 2017년 5월 10일
게재확정일자 2017년 6월 9일

Received: 20 February, 2017 / Revised: 10 May, 2017 /

Accepted: 9 June, 2017

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

[12]

특히 부호간 간섭은 이전 부호가 다음 부호에 영향을 미쳐 수신측에서 부호를 복원할 때 심볼 오류 또는 비트 오류를 일으키는 주된 원인이 되며, 통신 시스템의 성능을 열화시키므로 시스템 설계자들에게 높은 관심이 집중된다. 등화는 채널의 전달 함수를 추정하는 방법에 따라 고정식과 적응식으로 나눌 수 있다. 고정식의 경우 송수신측이 상호 약속된 학습열을 이용하여 추정하지만 이의 전송에 의한 대역폭이 낭비되며 채널이 시변인 경우 많은 문제점이 발생된다. 반면 적응식은 학습열을 일정 주기의 전송에 의해 전달 함수를 추정하지만 이의 전송에 의한 대역폭 낭비와 전송 효율이 급격히 저하된다. 이와 같은 적응식의 문제점을 극복하기 위해 블라인드 적응 방식이 등장하였지만 등화 성능이 고정식에 비해 열화된다. 현재 채널의 진폭과 위상을 동시 보상하여 부호간 간섭과 잡음의 영향을 최소화할 수 있는 알고리즘으로 MMA(Multi-Modulus Algorithm)가 있다. 대역 제한된 채널을 통하여 다량의 정보를 전송하기 위해 높은 스펙트럼 효율을 갖는 QAM 신호 방식이 선호되지만, 이는 nonconstant modulus 특성을 가지므로 MMA 알고리즘으로는 등화 성능의 열화와 연산량 증가라는 문제점을 갖는다. 특히 연산량 증가를 줄이기 위하여 적응을 위한 등화기 탭 계수 갱신시 오차 신호의 부호를 고려하는 SE-MMA, QE-MMA 등이 등장하였다^{[4][5]}. QE-MMA는 SE-MMA에서 오차 신호의 부호를 이용한 탭 계수 갱신시 H/W 응용을 용이토록 고정된 적응 stepsize와 power-of-two 연산을 적용하여 승산을 shift 연산으로 대체하였다^[3]. 이로 인한 성능 열화를 최소화하기 위하여 일정한 통계적 특성을 갖는 dithering 개념을 이용한 DSE-MMA가 등장하였다^{[5][6]}.

본 논문에서는 QE-MMA에 dithering 개념을 조합한 DQE-MMA (Dithered Quantized Error-MMA) 알고리즘을 제안하며, 이의 개선된 적응 등화 특성을 기존 QE-MMA와 비교하여 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

논문의 구성으로 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 기저 대역 통신 시스템과 QE-MMA 및 DQE-MMA 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정과 적응 등화 성능 결과를 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 기저 대역 시스템 모델

그림 1은 적응 등화기를 사용한 일반적인 수신기의 기저 대역 모델을 나타낸 것으로 채널과 수신 필터, 등화 필터 및 결정 장치와 등화 필터의 탭 계수를 계산, 갱신하는 적응 알고리즘의 기능 블록으로 구성되어 있으며, 다음과 같은 가정이 성립된다.

- (1) 송신 필터와 수신 필터는 이상적
- (2) 입력 신호 s_k 는 평균 0인 2차원 정상도일 것
- (3) 미지의 SISO (Single In Single Output) 시스템인 채널 h_k 의 영점은 단위원상에 존재
- (4) 등화기 필터 f_k 는 탭 지연선 및 계수와의 승산기, 가산기로 구성되며 유한 차수이고, 부가 잡음 n_k 는 평균 0, 유한 분산값을 갖는 백색 가우시안 분포

송신측에서 16-QAM 신호 s_k 를 전송하면 대역 제한과 부호간 간섭을 발생시키는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며, 이때 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 가우시안 잡음 n_k 이 부가된다. 수신측에서는 임펄스 응답이 f_k 인 등화기에 인가되며, 이때 등화기의 전달 함수는 채널의 역전달 함수를 갖는다. 이 관계를 만족할 때 송신 신호 s_k 가 받는 채널에 의해 발생된 부호간 간섭은 적응 등화기에 의해 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이는 주파수 영역에서 송신 신호 s_k 의 스펙트럼은 $S(\omega)$, 채널 h_k 의 전달 함수를 $H(\omega)$, 등화 필터 f_k 의 전달 함수를 $F(\omega)$ 이고 결정 장치의 출력 \hat{s}_k 의 스펙트럼을 $\widehat{S}(\omega)$ 라고 하면 잡음의 영향을 무시하면

$$\widehat{S}(\omega) = S(\omega) \cdot H(\omega) \cdot F(\omega) \quad (1)$$

가 된다. 여기서 $F(\omega) \approx \frac{1}{H(\omega)}$ 의 관계가 성립되면 이론적으로 $\widehat{S}(\omega) \approx S(\omega)$ 가 성립되어 수신측에서 신호 복원이 가능케 된다.

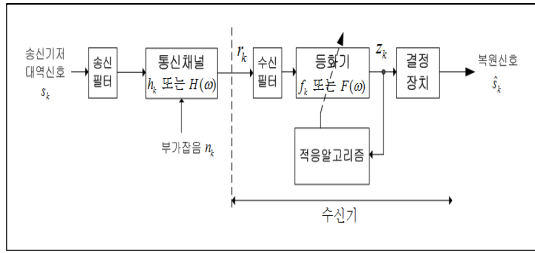


그림 1. 수신기 모델
 Fig. 1. Receiver model

2. QE-MMA 및 DQE-MMA 알고리즘

기존 MMA에서 적응 등화기 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호와 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{e_{kMMA}} &= z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2) \quad (2) \\ f_{k+1} &= f_k - \mu \overline{e_{kMMA}} r_k^* \end{aligned}$$

SE-MMA는 식(2)의 MMA 오차 함수에서 이들의 부호만을 이용하여 등화 필터 계수의 갱신에 사용되기 때문에 붙여진 이름이며, 오차 함수와 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{e_{kSE-MMA}} &= \text{sgn}[z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)] + j \text{sgn}[z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)] \\ f_{k+1} &= f_k - \mu \overline{e_{kSE-MMA}} r_k^* \quad (3) \end{aligned}$$

SE-MMA 알고리즘에서 오차 신호 $\overline{e_{kSE-MMA}}$ 는 MMA 알고리즘의 오차 신호 $\overline{e_{kMMA}}$ 의 부호 또는 극성만을 취하여 얻어진다. 적응 등화와 같은 분야에서 입력 신호에 correlation multiplier를 곱한 후 이를 유한 비트로 양자화하면 적응 알고리즘을 H/W로 응용할 때 복잡도를 줄일 수 있다. QE-MMA 알고리즘은 이와 같은 사실에 기초하여 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.

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

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

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

식(5)에서 B는 양자화 비트수를 나타내며, 기호 $\vdash \cdot \dashv$ 는 \cdot 보다 적은 큰 정수를 나타낸다. 양자화는 입력을 "1"을 갖는 곳에 B비트로 대체하게 되며, 이는 입력 공분산 행렬 $E[r_k r_k^T]$ 이 diagonal일 때 성립한다.

그림 2는 B = 8일 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. 양과 음의 오차 성분에 대해 각각 $-B+2=6$ 개의 레벨이 비선형 크기로 발생됨을 알 수 있으며, 실제 B의 값이 적을수록 H/W에 응용시에는 유리하지만 등화 성능이 열화되므로 적당한 B의 선정이 중요하다.

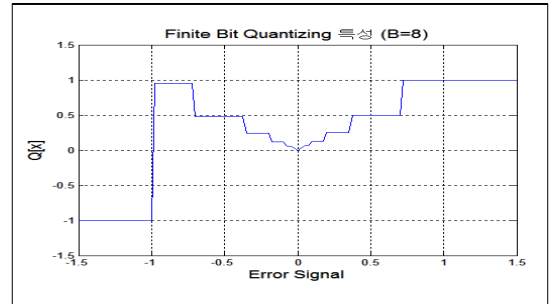


그림 2. 양자화의 입출력 특성
 Fig. 2. Input/Output characteristics of quantizer

DQE-MMA는 dither라고 하는 controlled noise를 양자화 전단계에 추가하여 QE-MMA의 robustness를 개선할 수 있지만, 정상 상태에서 다른 성능 지수는 유사하게 된다. 추가되는 dither에 의해 양자화후 발생하는 잡음은 평균 0의 백색 가우시안 잡음 형태가 되며, 이는 양자화되는 신호와는 독립적이다. DQE-MMA 알고리즘에서 오차 함수와 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \overline{e_{kDQE-MMA}} &= \alpha \cdot \text{sgn}[z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)] + \alpha \cdot d_r + \\ & j \cdot \alpha \cdot \text{sgn}[z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)] + \alpha \cdot d_i \quad (6) \end{aligned}$$

$$f_{k+1} = f_k - \mu Q[\overline{e_{kDQE-MMA}}] r_k^*$$

여기서 d_r, d_i 는 (-1,+1) 사이에 균등 분포하는 dithering 신호이며, α 는 dither gain을 나타내는 상수값이다. 그림 3은 QE-MMA와 DQE-MMA의 내부 구조를 나타낸 것으로 그림 1의 적응 알고리즘부를 상세화시킨 것이다. QE-MMA는 오차 신호의 극성을 얻는 $\text{sgn}(\cdot)$ 와 FBQ의 양자화 레벨과의 승산에 의해 얻어지는 correlation multiplier가 탭 계수 갱신을 위한 입력으로 사용되고 있으며, DQE-MMA는 오차 신호의 극성을 얻기 위해 별도의 dither 신호가 더해짐을 알 수 있다.

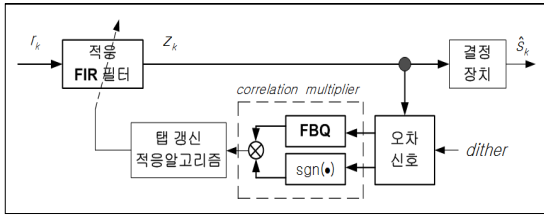


그림 3. DQE-MMA의 내부 구조
Fig. 3. Internal structure of DQE-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

dithering 에 의한 DQE-MMA 적용 등화 알고리즘의 개선된 robustness 성능을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 위한 파라미터로는 동일한 채널에서 신호대 잡음비를 30dB, 양자화 비트수 $B = 8$, 적용 스텝 크기로서 QE-MMA에서 $\mu = 0.03$, DQE-MMA에서는 $\mu = 0.08$ 및 동일한 채널 계수 h_k 를 적용하였다.

그림 4는 시뮬레이션을 위한 전체 신호 처리도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 채널을 통과시키고 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이를 QE-MMA와 DQE-MMA 알고리즘을 적용할 때 등화기 출력 정상도, 잔류 isi, MSE, EMSE 및 SER 성능을 비교하였으며, 이때 발생하는 지연 시간은 무시하였다.

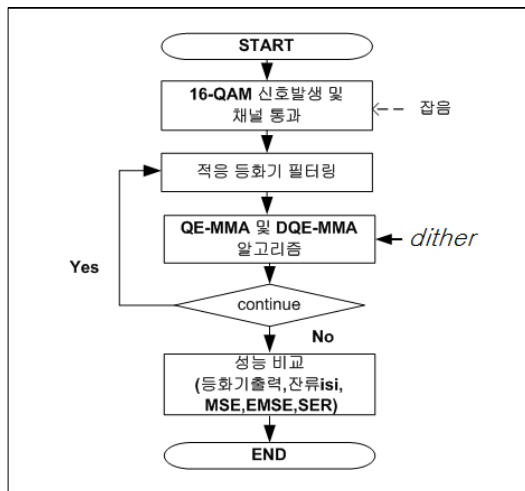


그림 4. 신호 처리도
Fig. 4. Flowdiagram of signal processing

첫 번째 성능을 나타내기 위하여 이들 알고리즘을 적용할 때 정상 상태 이후의 등화기 출력 신호 정상도를 그림 5에 나타내었다. 출력 정상도에서는 신호점 폭이 좁고 신호점간 간격이 클수록 등화 성능이 우수하여 결정 장치에서 복원시 오류 발생 가능성을 줄일 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 DQE-MMA의 신호점 폭이 QE-MMA 보다 좁으며, 신호점간 거리도 멀어짐을 알 수 있어서 등화 성능이 개선됨을 알 수 있다.

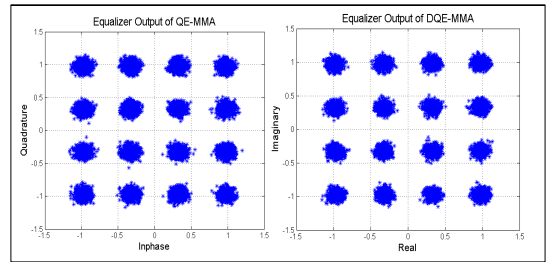


그림 5. 등화기 출력 신호
Fig. 5. Output signal of equalizer

적용 알고리즘들의 수렴 성능을 비교하기 위한 내부 성능 지수로 잔류 isi, MSE, EMSE 성능 곡선을 적용하였다. 그림 6은 반복 횟수에 대한 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간과 그 이후의 잔여량을 알 수 있다. 잔류 isi의 경우 -20dB의 정상 상태에 도달하는 수렴 속도는 QE-MMA가 DQE-MMA 보다 2배 정도 빠르지만 정상 상태 이후의 잔여량에서는 DQE-MMA가 QE-MMA보다 미미하게 우월함을 알 수 있다. 그림 7은 등화기 출력과 결정 장치의 출력간의 진폭 차이의 자승치를 나타내는 MSE 성능을 나타낸 것으로 결정 장치에서 발생하는 timing jitter 양을 의미한다. MSE 성능에서도 정상 상태 도달까지의 수렴 시간과 정상 상태 이후의 흔들림양에서는 잔류 isi 성능과 유사함을 알 수 있다.

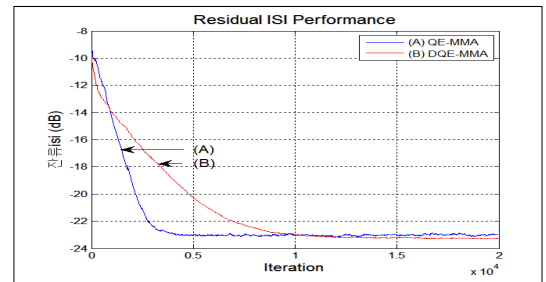


그림 6. 잔류 isi 성능
Fig. 6. Residual isi performance

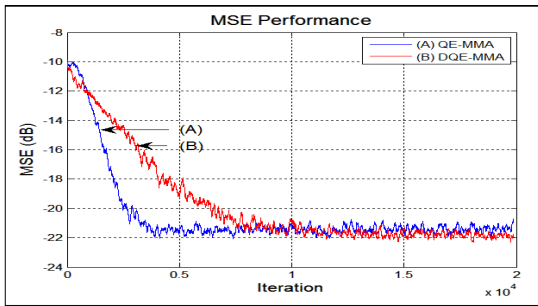


그림 7. MSE 성능
 Fig. 7. MSE performance

그림 8은 DQE-MMA 알고리즘이 채널의 변화 상태에 추적할 수 있는 능력을 나타내는 EMSE (Excess Mean Square Error) 성능을 나타낸 것이다. 채널 추적 능력은 수렴 속도에 의해 결정되므로 QE-MMA가 DQE-MMA보다 우월하지만, 정상 상태에 도달한 이후부터는 이들 알고리즘간에 큰 차이가 없음을 알 수 있다.

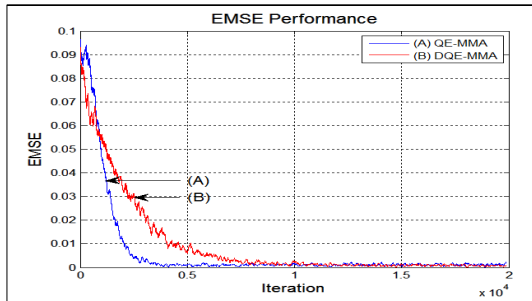


그림 8. EMSE 성능
 Fig. 8. EMSE performance

마지막 성능 지수로는 이들 적응 알고리즘의 외부 부가 잡음에 대한 강인성을 확인하기 위하여 신호대 잡음비에 따른 심볼 오류율 (SER) 성능을 비교하였으며 그림 9에 나타내었다. 이를 위하여 채널에서 부가되는 신호대 잡음비를 0 ~ 30dB 까지 5dB 단위로 변화시키면서 20,000개의 심볼을 6회 시뮬레이션하였으며, 결과 SNR이 낮은 0~10dB 범위에서는 DQE-MMA가 QE-MMA보다 우월하며, SNR이 더욱 증가하여도 DQE-MMA가 QE-MMA 우월하였다. 따라서 dithering에 의해 DQE-MMA가 QE-MMA보다 robustness 성능이 개선됨을 알 수 있다.

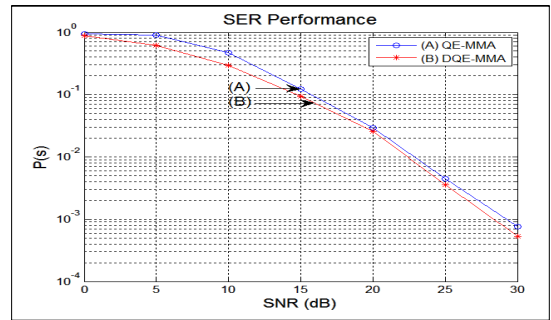


그림 9. SER 성능
 Fig. 9. SER performance

V. 결론

본 논문에서는 채널에서 발생하는 비선형 찌그러짐에 의한 부호간 간섭과 잡음을 최소화시켜 통신 시스템의 throughput을 향상시킬 수 있는 QE-MMA와 dithering을 이용한 DQE-MMA 알고리즘의 등화 성능을 비교하였다. QE-MMA는 SE-MMA 알고리즘에서 H/W 응용의 편리를 위하여 power-of-two 양자화를 사용하지 않으나, DQE-MMA는 양자화 전 단계에서 dither 신호를 부가하여 robustness를 개선시킨다. 이의 개선 등화 능력을 비교하기 위하여 내부 지수인 잔류 isi, MSE 및 EMSE를 사용하였으며, 외부 지수로서 등화기 출력 신호 정상도와 SER을 사용하였다. 모든 내부 성능 지수에서 수렴 속도는 dithering에 의해 늦어지지만, 정상 상태 이후에는 개선된 등화 성능을 얻을 수 있었으며, 외부 성능 지수인 출력 신호 정상도와 SER에서 개선된 성능을 확인하였다. 향후 이와 같은 연구 결과를 더욱 확장시키기 위하여 신호대 잡음비가 낮은 환경에서도 SER 성능 및 수렴 속도를 개선할 수 있는 새로운 알고리즘에 대한 연구가 필요하다.

References

- [1] J. Yang, J. J. Weren, G. A. Dumont, "The Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", 13th Int. Conf. D.S.P. Processing, pp. 127~130, 1997.
 DOI: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.205.855017>
- [2] R.M.Gray, T.G.Stockham, "Dithered Quantizers",

IEEE Trans. on Information Theory, Vol.39, No.3, pp. 805~812, May 1993.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIT.1991.695075>

- [3] Eweda E., "Convergence Analysis and Design of an Adaptive Filter with Finite-Bit Power-of-Two Quantized Error", IEEE Trans. on Circuit and Systems", Vol.39, No.2, pp. 113~115, Feb. 1992. DOI: <https://doi.org/10.1109/82.205815>
- [4] K. Banovic, R. Lee, E.A.Raheem, M.A.S.Khalid, "Computationally-Efficient Method for Blind Adaptive Equalization", 48th Middlewest Symp. on Circuits and Systems, Vol.1. pp. 341~344, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2005.154108>
- [5] D.Brown, P.Schniter, J.C.R.Johnson, "Computationally Efficient Blind Equalization", Proc. Allerton Conf. on Communications, Control and Computing, Monticello, IL, pp. 54~63, Oct. 1997.
- [6] P.Schniter, C.R.Johnson, "Dithered Signed-Error CMA : Robust, Computationally Efficient Blind Adaptive Equalization" IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.47, No.6, pp. 1592~1603, June 1999. DOI: <https://doi.org/10.1109/78.765129>
- [7] S. G. Lim, "Performance Improvement of MMA Adaptive Equalization Algorithm by using the Constellation Reduction in QAM Signal", Jour. on I.I.B.C., Vol.14, No.5, pp.103~109, Sep. 2014.
- [8] S. G. Lim, "The Performance Comparison of CR-CMA and CM-CMA Adaptive Equalization in 16-QAM Signal", Jour. on I.W.I.T., Vol. 11, No. 3, pp.115~120, June 2011.

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>