

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.1.55>
JIIBC 2021-1-8

QE-MMA 적응 등화 알고리즘에서 양자화기 비트수와 Stepsize에 의한 성능 평가

A Performance Evaluation of QE-MMA Adaptive Equalization Algorithm based on Quantizer-bit Number and Step size

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 시분산 채널에서 발생하는 비선형 찌그러짐에 의한 부호간 간섭을 줄일 수 있는 QE-MMA 적응 등화 알고리즘에서 양자화 비트수와 stepsize에 의한 성능 평가에 관한 것이다. QE-MMA는 송신 신호 고차 통계치와 오차 신호 부호만을 이용하는 SE-MMA에서 오차 신호의 크기를 power-of-two 연산을 적용하여 탭 계수 갱신 시 필요한 승산과 가산을 천이와 가산만으로 대체하여 H/W 응용을 용이하도록 제안되었다. 그러나 QE-MMA에서 오차의 부호를 얻기 위한 오차 신호의 발생 시 stepsize와 양자화기 비트수에 의해 적응 등화 성능이 상이하게 되며, 이를 시뮬레이션으로 확인하였다. 시뮬레이션 결과 QE-MMA 적응 알고리즘의 성능에서 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도는 stepsize에 의해 결정되며 정상 상태 이후의 잔여량은 양자화 비트수에 의해 결정됨을 확인하였다.

Abstract This paper relates with the performance evaluation of QE-MMA (Quantized Error-MMA) adaptive equalization algorithm based on the stepsize and quantizer bit number in order to reduce the intersymbol interference due to nonlinear distortion occurred in the time dispersive channel. The QE-MMA was proposed using the power-of-two arithmetic for the H/W implementation easiness substitutes the multiplication and addition into the shift and addition in the tap coefficient updates process that modifies the SE-MMA which use the high-order statistics of transmitted signal and sign of error signal. But it has different adaptive equalization performance by the step size and quantizer bit number for obtain the sign of error in the generation of error signal in QE-MMA, and it was confirmed by computer simulation. As a simulation, it was confirmed that the convergence speed for reaching steady state depend on stepsize and the residual quantities after steady state depend on the quantizer bit number in the QE-MMA adaptive equalization algorithm performance.

Key Words : QE-MMA, power-of-two arithmetic, residual isi, maximum distortion, MSE

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2020년 11월 3일, 수정완료 2021년 1월 3일
게재확정일자 2021년 2월 5일

Received: 3 November, 2020 / Revised: 3 January, 2021 /
Accepted: 5 February, 2021

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

I. 서 론

최근 정보 통신의 응용이 다양화되면서 디지털 전송의 수요가 증가되는 추세이다. 디지털 전송은 잡음에 대한 강인성, 다중 사용자에 대한 대역폭의 효율 사용이라는 점에서 기존 아날로그 전송보다 장점을 가진다. 그러나 채널을 통한 고속 데이터 전송은 찌그러짐, 잡음과 페이딩과 같은 비이상적인 장애 요인으로 인한 부호간 간섭이 발생되므로, 이를 극복하는 것이 수신기의 능력을 결정하는 중요한 요인이 된다. 이와 같은 부호간 간섭에 의한 수신기의 성능 열화를 최소화하기 위하여 적응 등화기 (adaptive equalizer)를 사용하며, 이는 통신 시스템의 설계에서 중요한 부분이 된다^{[1][2]}. 적응 등화기는 채널의 전달 특성과 역특성을 갖는 디지털 필터 시스템을 말하며, 채널의 시변 특성에 대응기 위해 학습열의 도움으로 점진적으로 역특성에 수렴해가는 능력을 갖는다. 그러나 학습열의 전송에 의한 채널 대역폭의 낭비와 전송 효율이 저하되므로 학습열 도움 없이 채널의 시변 특성에 적응할 수 있는 블라인드 등화 방식이 등장하였다. 블라인드 방식은 대역폭 낭비와 전송 효율을 개선할 수 있지만 학습열 기반의 적응 방식보다 등화 능력이 열화된 다^{[2][3]}. 그러나 유무선의 대역폭 제한 채널에서 스펙트럼 효율적인 신호 방식의 사용은 필수적이지만, 스펙트럼 효율이 높은 16-QAM, 64-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호에서 블라인드 등화 능력이 더욱 열화된다. 현재 4-QAM, QPSK와 같은 constant modulus 신호에서 채널의 진폭과 위상을 동시에 보상하여 부호간 간섭을 최소화할 수 있는 적응 등화 알고리즘으로는 MMA(Multi-Modulus Algorithm)가 있다. 그러나 nonconstant modulus 신호를 대상으로 MMA의 열화되는 등화 특성을 보완키 위한 SCA, RMMA, CM-MMA, CR-MMA등이 등장하였지만 알고리즘이 복잡해지는 문제점이 있다. 이와 같은 알고리즘의 복잡성을 개선키 위한 SE-MMA (Signed Error-MMA)가 제안되었다^{[2][4][5]}. SE-MMA에서 오차 신호의 크기를 power-of-two 연산을 적용하여 H/W 응용을 용이하게 하는 QE-MMA (Quantized-Error MMA)가 등장하였다^{[5][7]}. 탭 계수 갱신을 위한 오차를 얻기 위해 SE-MMA에서는 승산과 가산을 QE-MMA의 power-of-two 연산에서는 천이와 가산으로 대체할 수 있다. 이를 위해서는 유한 비트의 양자화 과정이 필요하게 되며, 이를 이용한 오차 신호의 극성과 유한 stepsize에 의해 탭 계수를 갱신한다. 논문은 QE-MMA 알고리즘에서 오차 신호를

이용한 극성을 얻기 위한 양자화기 비트수와 얻어진 극성을 이용한 탭 계수 갱신을 위한 stepsize에 따른 알고리즘의 적응 등화 성능을 평가하였으며, 이를 위한 지수로는 잔류ISI, MSE 및 SER을 적용하였다.

논문의 구성으로 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 기저 대역 통신 시스템과 QE-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 수신측에서 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템의 모델을 나타낸 것으로 채널과 등화 필터 및 결정 장치와 등화 필터 탭 계수를 계산 및 갱신하는 적응 알고리즘의 기능 블록으로 구성되며, 다음과 같이 가정하자.

- (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) 부가 잡음 n_k 는 평균 0, 유한 분산값을 갖는 백색 가우시안 분포

송신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 전송하면 대역 제한과 부호간 간섭을 발생시키는 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 인가되어 대역 제한과 부호간 간섭의 영향을 최소화한다. 이때 적응 등화기의 전달 함수는 채널의 역전달 함수에 근사하게 된다. 이들을 최소화한 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이는 주파수 영역에서 관찰하면 송신 신호 s_k 의 스펙트럼은 $S(f)$, 채널 h_k 의 전달 함수를 $H(f)$, 등화 필터 f_k 의 전달 함수를 $F(f)$ 이고 결정 장치 출력 \hat{s}_k 의 스펙트럼을 $\hat{S}(f)$ 라고 하면 잡음의 영향을 무시하면

$$\hat{S}(f) = S(f) \cdot H(f) \cdot F(f) \quad (1)$$

가 된다. 여기서 $F(f) \approx \frac{1}{H(f)}$ 의 관계가 성립되면 이론적으로 $\hat{S}(f) = S(f)$ 가 성립되어 수신측에서 신호의 복원이 가능케 된다.

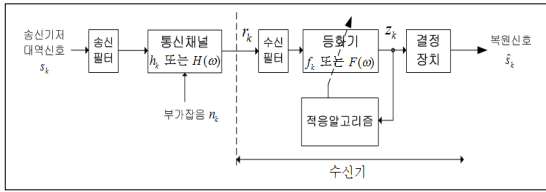


그림 1. 통신 시스템 모델
 Fig. 1. Communication system model

2. QE-MMA

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

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

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

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.

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

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

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 있으므로, 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.

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

식(5)에서 N 은 양자화 비트수를 나타내며, 기호 $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 \cdot 보다 작은 큰 정수를 나타낸다. 양자화는 입력을 "1"을 갖는 곳에 N 비트로 대체하게 되며, 이는 입력 공분산 행렬 $E[r_k r_k^T]$ 이 diagonal일 때 성립한다. 양자화 비트수 N 의 값이 클수록 QE-MMA의 등화 성능은 개선되지만 H/W 응용시에는 어렵게 되므로 이

들 간의 적절한 tradeoff가 필요하게 된다. 이론적으로 이를 설정하기 위한 기준은 다음과 같으며, σ_n 은 잡음의 분산치이다.

$$N \leq \log_2 \left(\frac{\sqrt{2\pi}}{\sigma_n} \right) \quad (6)$$

그림 2는 QE-MMA의 내부 구조를 나타낸 것으로 그림 1의 적응 알고리즘부를 상세화시킨 것이다. 오차 신호의 극성을 얻는 $\text{sgn}(\cdot)$ 과 FBQ의 양자화 레벨과의 승산에 의해 얻어지는 correlation multiplier가 탭 계수 갱신을 위한 입력으로 사용되고 있으며, 그림 3은 QE-MMA의 오차 함수를 나타낸 것으로 원점을 중심으로 기함수로 분포함을 알 수 있다.

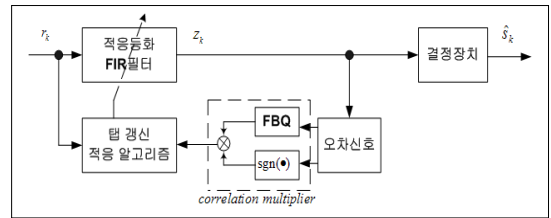


그림 2. QE-MMA의 내부 구조
 Fig. 2. Internal structure of QE-MMA

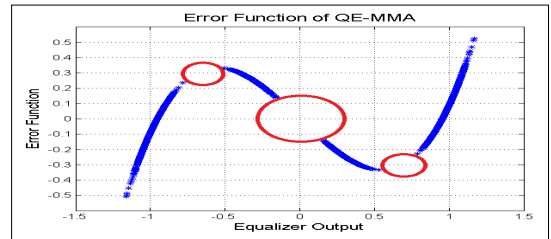


그림 3. QE-MMA의 오차 함수
 Fig. 3. Error function of QE-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

QE-MMA 적응 등화 알고리즘에서 stepsize μ 와 양자화 비트수 N 에 따른 등화 성능을 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 위한 파라미터로는 동일한 채널에서 신호대 잡음비를 30dB, 적응을 위한 stepsize $\mu = 0.03, 0.01$, 양자화 비트수 $N = 6, 8$ 을 적용하였다. 그림 4는 통신 채널 계수 h_k 를 실수부와 허수부로 분리하여 나타낸 것이다.

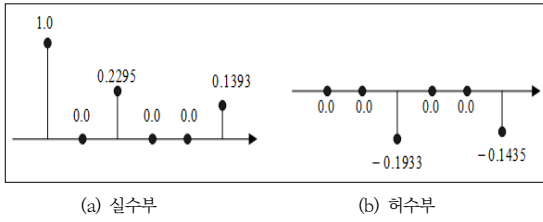


그림 4. 채널 계수
Fig. 4. Channel coefficient

시뮬레이션을 위해 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 채널을 통과시키고 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이를 상이한 μ , N 의 QE-MMA 알고리즘을 적용하여 등화기 출력 정상도, 잔류 isi, MSE 및 SER 성능을 비교하였으며, 이때 알고리즘에서 발생하는 지연 시간은 무시하였다.

첫 번째 성능을 나타내기 위하여 이들 알고리즘을 적용할 때 등화기 출력 신호 정상도를 그림 5에 나타내었다. 출력 정상도에서는 신호점 폭이 좁고 신호점간 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 된다. 그림에서 알 수 있듯이 N 의 값이 크고 stepsize가 적을수록 신호점 폭이 좁고 신호점간 거리도 멀어짐을 알 수 있어서 등화 성능이 개선됨을 알 수 있다.

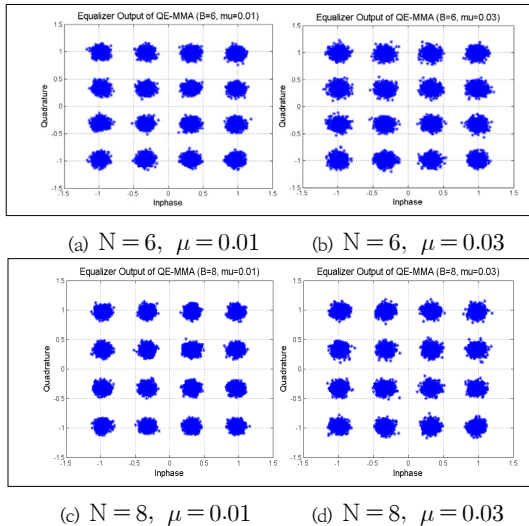


그림 5. 등화기 출력 신호 정상도
Fig. 5. Signal constellation of equalizer output

적용 등화기의 수렴 성능을 비교하기 위한 내부 성능 지수로 잔류 isi, MSE 성능 곡선을 적용하였다. 이들 성

능에서는 채널의 시변 특성 또는 순단과 같은 이상적인 상태 변화에 대응할 수 있는 능력을 알 수 있으며, 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도와 그 이후의 잔여량을 의미한다. 잔류 isi는 채널의 임펄스 응답과 적응 등화 필터의 임펄스 응답간의 종합 특성은 이론적으로 시간 영역에서 임펄스가 되어야 하지만 이상적이지 못한 나머지 잔류량을 나타낸다. 또한 MSE는 등화기 출력에서 송신 신호점을 중심으로 양과 음의 자승 오차 성분을 나타내며 이에 의해 결정 장치에서 “1” 또는 “0”를 판별하는 경우 jitter 또는 진폭의 흔들림을 나타낸다. 그림 6은 반복 회수에 대한 잔류 isi 성능을 나타낸 것이다. -20dB의 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서는 양자화 비트 수 N 이 적을수록 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 N 이 클수록 적어짐을 알 수 있다.

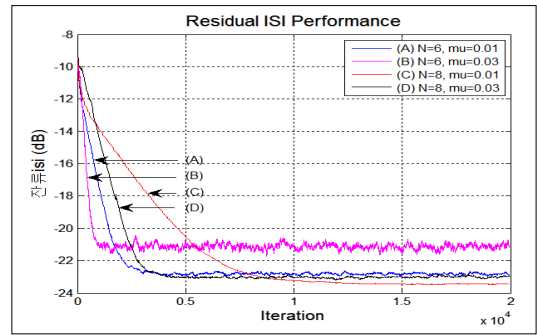


그림 6. 잔류 isi 성능
Fig. 6. Residual isi performance

그림 7은 반복 회수에 대한 MSE 성능을 나타낸 것이며, -19dB의 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서는 양자화 비트수 N 이 적을수록 빠르지만, 정상 상태 이후의 MSE양에서는 N 이 클수록 개선됨을 알 수 있다. 또한 동일한 N 에서 stepsize가 클수록 수렴 속도가 개선됨을 알 수 있다.

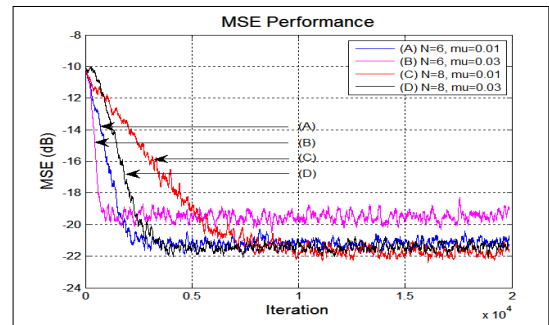


그림 7. MSE 성능
Fig. 7. MSE performance

마지막 성능 지수로는 QE-MMA 알고리즘의 양자화 비트수 N 와 stepsize의 변화에 의한 robustness를 확인하기 위하여 신호대 잡음비에 따른 심볼 오류율 (SER) 성능을 비교하였으며 그림 8에 나타내었다. 이를 위하여 채널에서 부가되는 신호대 잡음비를 0 ~ 30dB 까지 5dB 단위로 변화시키면서 20,000개의 심볼을 6회 simulation하였다. 시뮬레이션 결과 stepsize가 적게 하거나 양자화 비트수 N 을 크게 하므로서 SER 성능이 개선되어짐을 알 수 있었다. 또한 SNR이 15dB 이하에서는 stepsize가 SER 성능에 큰 영향을 미치며, SNR이 양호한 15dB 이상에서는 은 경우 stepsize와 양자화 비트수가 동시에 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

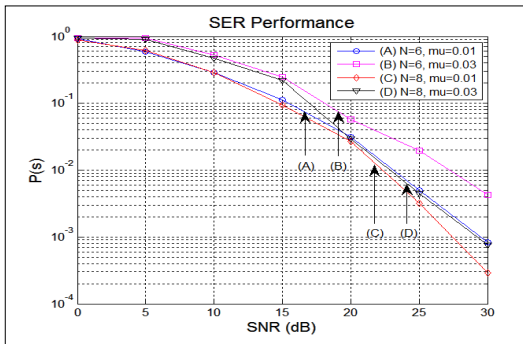


그림 8. SER 성능
 Fig. 8. SER performance

IV. 결 론

본 논문에서는 채널에서 발생되는 부호간 간섭을 최소화시켜 통신 시스템의 throughput을 향상시키기 위한 QE-MMA 적응 등화 알고리즘에서 양자화 비트수 N 과 stepsize에 따른 등화 성능을 비교하였다. QE-MMA는 SE-MMA의 용이한 H/W 응용을 위해 power-of-two 양자화기와 고정 stepsize를 갖는 구조이며, 이들에 따라 상이한 성능을 갖게 된다. 이를 위해 등화기 내부 지수인 잔류 isi, MSE를 사용하였으며, 외부 지수로서 등화기 출력 신호 성장도와 SER를 사용하였다. 시뮬레이션 결과 내부 성능 지수에서는 정해진 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에서는 양자화 비트수 N 이 적을수록 stepsize와는 무관하게 빠름을 알 수 있었으며, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 양자화 비트수 N 이 클수록 우월한 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다. 또한 외부 성능 지수인 SER 성능에서 SNR이 15dB 이하인 경우 stepsize가 큰 영향을

미치지만, 그 이상에서는 양자화 비트수 N 과 stepsize가 동시에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.

본 연구는 기존 MMA 등화 알고리즘의 연산량을 줄이면서 H/W 응용의 용이성을 위한 QE-MMA에서 채널의 환경에 의한 내부 양자화 비트수 및 stepsize의 적절한 선정에 따른 등화 성능의 열화를 방지할 수 있는 기준을 제시하는데 유용성이 있을 것으로 사료된다. 이와 같은 연구 결과를 더욱 확장시켜 어떠한 채널 환경에서도 이들을 적절하게 조합시켜 연산량의 감축 및 이에 따른 등화 성능의 열화 방지를 위한 알고리즘의 개발에 대한 지속적인 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/ICDSP.1997.627988>
- [2] W.S.Yuan, L.Feng, "A Computationally Efficient Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", Int. Conf. on Information Management and Engineering, pp.685~687, 2010. DOI : <https://doi.org/10.1109/ICIME.2010.5478261>
- [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] V.Weerackody, S.A.Kassam, K.R.Laker, "A simple hard-limited adaptive algorithm for blind equalization", IEEE Trans. on Circuits and System 2, Vol.39, No.7, pp.482~487. July 1992. DOI : <https://doi.org/10.1109/82.160173>
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Eweda E., "Comment on "Convergence Analysis and Design of an Adaptive Filter with Finite-Bit Power-of-Two Quantized Error"", Express Letters of IEEE Tran. on Circuit and Systems-2 : Analog and Digital Signal Processing, Vol.42, No.7, pp.498~500, July 1995.
- [8] S. G. Lim, "Performance of SE-MMA Blind Adaptive Equalization Algorithm in QAM System", Jour. on I.I.B.C., Vol.13, No.3, pp.63~69, June 2013.

저 자 소 개

임 승 각(정회원)



- 1983년 : 송실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2021년 현재 : 공주대학교 정보통신

공학부 교수.

- 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신