

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2021.21.2.67>
JIIBC 2021-2-10

Nonconstant Modulus 신호에 대한 DSE-MMA와 QE-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 비교

A Performance Comparison of DSE-MMA and QE-MMA Adaptive Equalization Algorithm in Nonconstant Modulus Signal

임승각*, 유시영**

Seung-Gag Lim*, Si-Yeong Ryoo**

요약 본 논문에서는 MMA 적응 등화 알고리즘의 연산량을 간략화시킨 DSE-MMA (Dithered Signed-Error MMA)와 QE-MMA (Quantized-Error MMA)의 적응 등화 성능을 비교하였다. DSE-MMA 알고리즘에서는 적응 등화기의 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호와의 승산 부분에서 극성만을 고려하며 dithered signal을 이용하여 잡음에 대한 robustness를 개선하지만, QE-MMA 알고리즘에서는 오차 신호의 비선형 power-of-two 양자화 연산을 수행한 후 이의 극성만을 이용하므로 H/W 응용을 쉽게 한다. 이들 알고리즘을 동일 채널의 환경에 적용하여 등화기 출력 신호 정상도, 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE 및 알고리즘의 외부 잡음에 대한 강인성을 나타내는 SER을 비교하였다. 시뮬레이션 결과 SER의 제외한 나머지 성능에서 QE-MMA가 DSE-MMA보다 우월하며, SER에서는 dither 신호에 의하여 DSE-MMA가 우월함을 알 수 있었다.

Abstract This paper compare the adaptive equalization performance of the DSE-MMA (Dithered Signed-Error MMA) and QE-MMA (Quantized-Error MMA) which has a simplifies the computational operation of currently used MMA algorithm. The DSE-MMA possible to improve the robustness to noise by using the dithered signal consider the polarity of error signal in the multiplication part. In QE-MMA, it use the polarity of error signal after performing the nonlinear power-of-two quantizing operation for easiness of H/W implementation. The same channel environment was applied, and it's performance of the output signal constellation, the residual isi and maximum distortion and MSE that means the convergence characteristics, the SER that means the robustness of external noise of algorithm were compared and evaluated. As a result of computer simulation, the QE-MMA has more good in constellation, residual isi, maximum distortion, MSE performance than DSE-MMA. In SER, the DSE-MMA has more robust due to dither signal than QE-MMA.

Key Words : QE-MMA, DSE-MMA, power-of-two quantizing, residual isi, maximum distortion

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
**정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2021년 1월 22일, 수정완료 2021년 3월 3일
게재확정일자 2021년 4월 9일

Received: 22 January, 2021 / Revised: 3 March, 2021 /
Accepted: 9 April, 2021

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

I. 서 론

최근 3G 또는 4G 이동 통신과 같은 무선 통신망을 통한 다양한 멀티미디어 응용과 서비스에 대한 수요 증가와 차세대 무선/이동 통신망은 유비쿼터스 컴퓨팅과 같은 개인화된 이동 통신을 향하여 진화될 것으로 예상된다. 이런 흐름은 음성 대역급 데이터의 전송만을 지원하는 전화 지향 서비스에서 동영상과 같은 다양한 멀티미디어 콘텐츠의 초고속, 광대역 데이터 전송으로 변화가 이루어질 것을 암시하고 있다. 대역 제한된 무선 채널을 통하여 광대역 데이터 전송을 위해서는 나름대로 높은 압축율을 갖는 부호화 기술 뿐만 아니라 이를 효율적으로 전송하기 위한 전송 기술을 필요로 한다^[1].

부호화 기술은 고려하지 않더라도 전송 기술로는 무선/이동 멀티미디어 데이터를 전송하는 시스템에서 대역폭 제한 및 부호간 간섭같은 채널 손상에 관한 문제점을 해결하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있으며, OFDM과 적응 등화기를 들 수 있다. 적응 등화기는 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 수신측에서 보상하여 전송 시스템의 throughput를 높힐 수 있는 디지털 필터로서, 이를 위해서는 채널의 전달 함수를 추정하는 과정과 추정된 함수의 역함수를 구하는 과정이 필요하다. 이때 채널의 전달 함수 추정을 위하여 학습열을 사용한다^{[2][3]}. 그러나 학습열에 의한 대역폭 낭비와 전송 효율 저하 및 이의 사용이 부적합한 환경에서는 학습열 의존 적응 등화가 불가능하므로, 이에 의존하지 않는 blind 적응 등화 방식이 널리 사용되고 있다. 이와 같은 blind 방식에서는 송신 신호의 constant modulus에 의존하는 등화 방식으로서 학습열 의존 방식에 비해 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간과 채널 추적 능력이 느리고, 정상 상태 이후 부호간 간섭 잔여량이 커지며, 스펙트럼 효율이 높은 nonconstant modulus 신호에서 등화 성능이 저하되는 단점을 가지므로 이를 위한 다양한 알고리즘이 연구되고 있다^{[2][5]}. blind 등화를 위한 적응 알고리즘은 CMA, MMA등이 있으며, CMA는 비교적 간단한 연산량으로 수신 신호의 진폭만 보상하지만, 위상 보상이 불가능해져 별도의 위상 보정 장치를 사용해야 한다. 반면 MMA는 진폭과 위상의 동시 보상을 할 수 있는 능력을 갖지만, CMA보다 알고리즘 연산량이 증대되며 스펙트럼 효율이 높은 nonconstant modulus 특성을 갖는 신호에서 등화 성능이 저하되는 문제점이 있다. MMA의 단점 중에서 알고리즘 연산량을 단순화시켜 실시간 응용을 목적으로 DSE-MMA와 QE-MMA가 등장하였다^{[2][3][6]}.

DSE-MMA는 탭 계수 갱신을 위하여 사용되는 오차 신호 극성과 dither signal을 이용하며, QE-MMA는 오차 신호 극성과 비선형 power-of-two 양자화 연산을 이용하여 승산을 대체한다. 논문에서는 이들 두 알고리즘의 적응 등화 능력을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하며, 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 시스템 모델을 설명한 후 3 장에서는 DSE-MMA와 QE-MMA 알고리즘을 다룬다. 4 장에서는 시뮬레이션의 과정 및 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 시스템 모델

그림 1은 nonconstant modulus의 2차원 신호를 적용한 시스템의 송신부와 수신부를 나타낸 것이다. 그림에서 Tx 와 Rx filter 및 스펙트럼 이동을 나타내는 변조와 복조 ($\cos \omega_c t$, $\sin \omega_c t$)는 이상적으로 가정하여 생략하였으며, 송신측에서 16-QAM의 nonconstant modulus를 갖는 신호 s_k 를 송신하면 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통과하면서 부호간 간섭이 발생되며, 이에 가우시안 잡음 n_k 가 부가되어 수신된다.

$$r_k = s_k * h_k + n_k \quad (1)$$

식 (1)에서 *는 convolution을 나타내며, r_k 는 응답이 f_k 인 복소 등화기에 입력되어 채널에 의한 부호간 간섭이 보상된 z_k 를 얻는다. 이 출력 신호는 결정 장치(decision device)를 통과하면서 송신 신호 s_k 의 추정치인 \hat{s}_k 를 얻게 된다.

$$z_k = r_k * f_k = (s_k * h_k + n_k) * f_k \approx s_k * h_k * f_k \quad (2)$$

식(2)에서 $z_k \approx s_k$ 가 되기 위한 등화기의 응답 f_k 와 채널의 응답 h_k 간에는 다음의 관계가 성립되어야 한다.

$$f_k * h_k = \delta_k \quad (3)$$

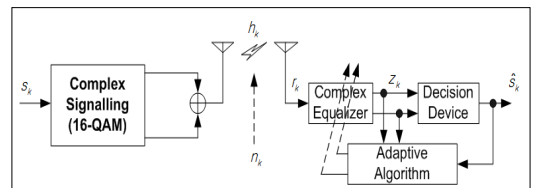


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model

2. DSE-MMA 알고리즘

DSE-MMA 알고리즘은 SE-MMA에 dither 신호를 추가하여 잡음에 대한 robustness를 개선한 등화 알고리즘을 말한다. SE-MMA 알고리즘에서 적응 등화를 위한 필터 계수 갱신은 등화기 출력 신호 z_k 와 송신 신호의 dispersion constant R_{SE-MMA}^2 를 이용하며 다음과 같이 정의한다.

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

s_{kr}, s_{ki} 은 s_k 의 실수와 허수를 각각 나타낸다. SE-MMA는 기존 MMA 오차 함수에서 이들의 부호만을 이용하여 등화 필터 계수의 갱신에 사용되기 때문에 붙여진 이름이며, 이의 오차 함수와 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$e_{kSE-MMA} = \overline{\text{sgn}[z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{SE-MMA}^2)] + \text{jsgn}[z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{SE-MMA}^2)]} \quad (5)$$

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

여기서 sgn은 signum 함수를 나타내며, SE-MMA 알고리즘에서는 등화 필터의 출력 z_k 는 복소 평면에서 4개의 점 $\pm R_{SE-MMA} \pm j R_{SE-MMA}$ 주위로 존재하도록 탭 계수를 갱신하게 된다. SE-MMA는 적응 상수가 고정될 때 탭 갱신을 위한 오차 함수를 곱하는 과정을 단순히 부호만을 고려하게 되어 알고리즘의 연산량을 줄일 수 있게 되어 수렴 속도를 개선시킬 수 있는 장점이 있지만, sign 값을 얻기 위해 양자화 과정으로 생각할 수 있으므로, 이로 인한 성능이 기존 MMA보다 열화된다. DSE-MMA 알고리즘은 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호를 얻기 위한 양자화 이전에 랜덤인 dithering 신호를 추가하여 양자화로 인한 손실되는 정보를 보존 가능하며 R.M.Gray등에 의해 제안되었다. 부가 잡음이라는 관점에서 dithering은 양자화될 신호와는 무관하게 백색, 평균 0인 양자화 잡음을 만드는 것으로도 볼 수 있다. 그와 같은 양자화 잡음은 적은 스텝 크기로 인하여 평균적으로 제거되어질 것이므로 평균적으로 unsigned 방식과 동일한 결과를 얻을 수 있다. 이때 추가되는 dithering 신호는 PBE (Pefrect Blind Equalization) 조건인

- source의 정규화된 kurtosis $k_s = E[|s_n|^4]/\sigma_s^4$ 는 가우시안 프로세스보다 적은 sub-gaussian process 일 것
- identical, independent distribution, 평균 0인

source의 $E[s_n^2] = 0$ 일 것

을 만족시키기 위하여 [-1~1] 사이의 균등 분포하는 랜덤 변수이어야 한다. 그림 2는 DSE-MMA의 개념도를 나타낸 것으로 오차 함수를 발생하는 블록에서 dither signal을 추가한 후 양자화를 수행한 후 이를 이용하여 탭 계수 갱신을 위하여 사용한다.

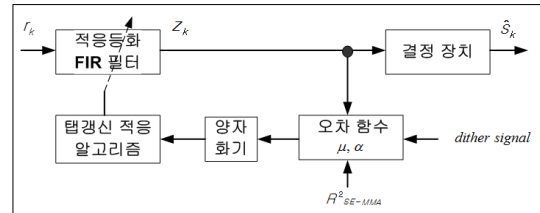


그림 2. DSE-MMA 개념
 Fig. 2. Concept of DSE-MMA

DSE-MMA의 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$f(n+1) = f(n) - \mu \cdot \alpha \cdot \text{csgn}(y_n^* (R_{kSE-MMA} - |y_n|^2) + \alpha d_n) r_n \quad (6)$$

여기서 α 는 dither amplitude를 나타내며 robustness와 정상 상태에서 MSE간의 절충점이 되도록 설정하여 $\alpha > 2(R_{SE-MMA}^2/3)^{1.5}$ 가 되며, $d_n = d_n^{(R)} + j d_n^{(I)}$ 로 표현되는 (-1,1)의 범위내에서 uniform 분포하는 dither process의 실수부와 허수부의 조합이다.

3. QE-MMA

DSE-MMA에서 오차 신호 $\overline{e_{kSE-MMA}}$ 는 MMA 알고리즘의 오차 신호의 부호 또는 극성만을 취하여 얻어짐을 식 (6)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. 이런 사실에 기초하여 power-of-two 양자화 알고리즘이 널리 사용하며, 탭 계수 갱신은 shift와 가산 연산만으로 수행되므로 이를 SE-MMA 알고리즘에 적용한 것이 QE-MMA 알고리즘이다. QE-MMA 알고리즘에서 탭 계수 갱신은 다음과 같다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu Q[\overline{e_{kSE-MMA}}] r_k^* \quad (7)$$

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

$$Q(x) = \begin{cases} \text{sgn}(x), & |x| \geq 1 \\ 2^{-\log_2|x|-1} \text{sgn}(x), & 2^{-B+2} \leq |x| < 1 \\ 2^{-B+1} \text{sgn}(x), & |x| < 2^{-B+2} \end{cases} \quad (8)$$

식 (8)에서 B는 양자화 비트수를 나타내며, 기호 \cdot 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 3은 B=4일 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.

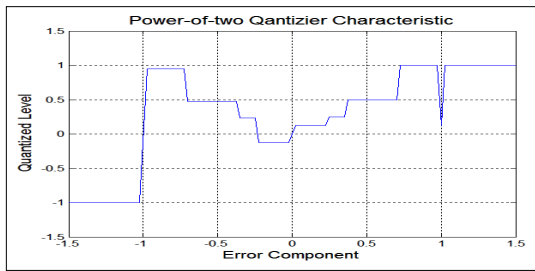


그림 3. 양자화의 입출력 특성
Fig. 3. Input/Output characteristics of quantizer

III. 컴퓨터 시뮬레이션

DSE-MMA와 QE-MMA 적응 알고리즘의 등화 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위해 채널 계수 $h_k = 1, 0, 0.2295-j0.1933, 0, 0, 0.1393-j0.1435$ 를 동일하게 적용하였으며 신호대

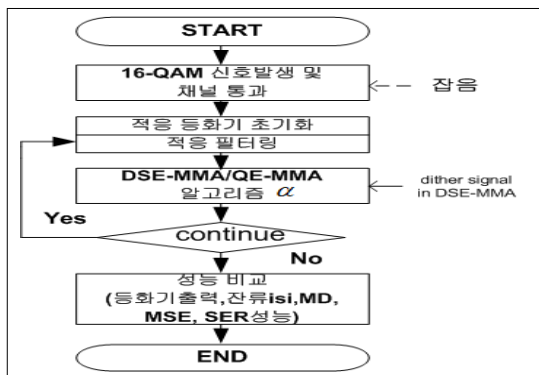


그림 4. 전체 신호 처리도
Fig. 4. Overall signal processing flowgram

잡음비는 30dB, 적응을 위한 스텝 크기 μ 로 DSE-MMA는 0.0015, QE-MMA는 0.03, 양자화 비트수 B=8이었으며, 적응 등화기 차수는 모두 15를 사용하였으며 그림 4는 전체 신호 처리 과정을 나타낸 것이다.

그림 5는 정상 상태에서 적응 등화기의 첫 번째 성능 지수인 등화기 출력 신호의 성상도를 나타낸 것이다. 성상도에서 송신 신호점 16개를 명확하게 알 수 있으며, 각 신호점간의 거리 d가 커져 심볼을 결정할 때 오류 발생 가능성을 줄일 수 있으며, 각 신호점의 폭 w가 좁을수록 등화 능력이 우수한 알고리즘이 된다. 그림에서 전체적으로 QE-MMA가 DSE-MMA보다 이와 같은 관점에서 정성적으로 우월함을 알 수 있다.

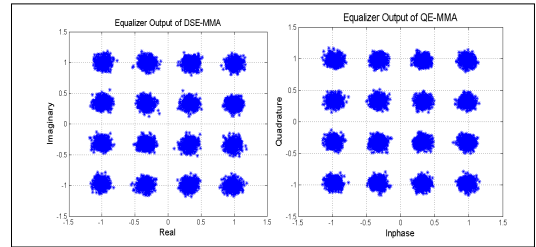


그림 5. 등화기 출력 신호 성상도
Fig. 5. Equalizer Output signal constellation

적응 등화기의 성능을 나타내는 내부 지수로 잔류 isi (residual isi)와 최대 찌그러짐 (maximum distortion)과 MSE를 사용하였다. 그림 6의 잔류 isi 성능에서 -20dB의 정상 상태에 도달하는 수렴 속도 측면에서 QE-MMA가 DSE-MMA보다 약 1.4배 정도 빠름을 알 수 있어서 채널의 순시 변동에 빠르게 적응할 수 있는 능력을 가진다.

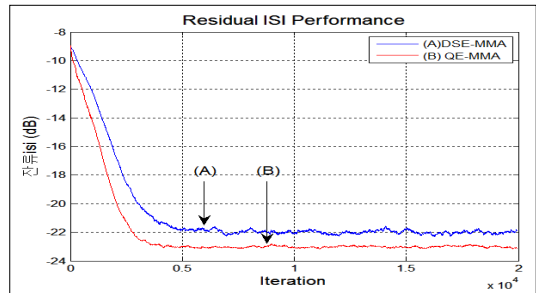


그림 6. 잔류 isi 성능
Fig. 6. Residual isi performance

그림 7과 8은 최대 찌그러짐과 MSE 성능을 나타낸 것이다. 최대 찌그러짐에서 -10dB와 MSE에서 -20dB의 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도와 정상 상태 이후

의 그 잔여량에서도 QE-MMA가 DSE-MMA보다 우월함을 정성적으로 확인할 수 있다.

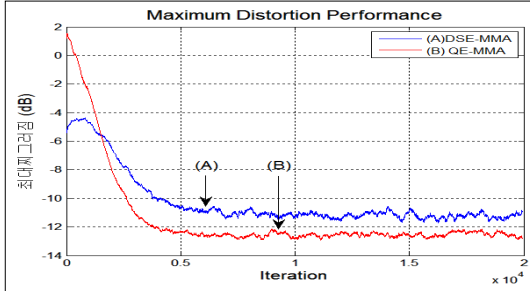


그림 7. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 7. Maximum distortion performance

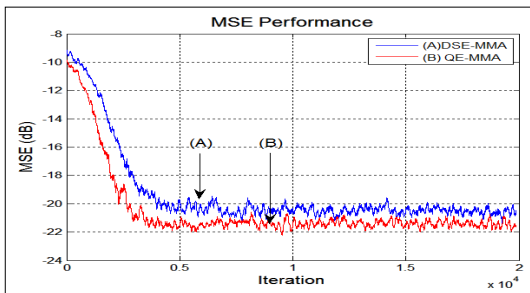


그림 8. MSE 성능
 Fig. 8. MSE performance

그림 9는 이들 알고리즘의 잡음에 대한 강인성을 알 수 있는 SER 성능을 나타낸 것으로 신호대 잡음비를 0~35 dB 까지 5dB 단위로 변화시키면서 20,000개의 송신 신호를 5회 반복한 결과이다. 신호대 잡음비가 20dB를 기준으로 낮아질 때는 DSE-MMA가 QE-MMA보다 강인하지만, 그 이상에서는 반대가 되어 잡음에 대한 강인성에서는 DSE-MMA가 QE-MMA보다 우월함을 알 수 있다.

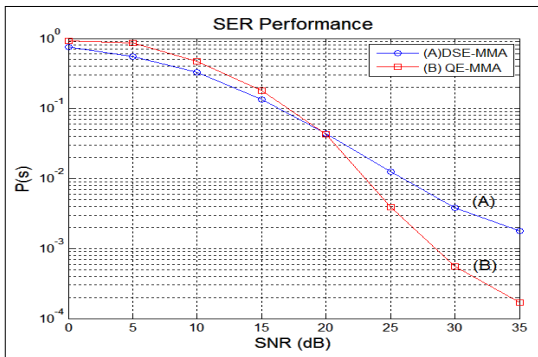


그림 9. SER 성능
 Fig. 9. SER Performance

IV. 결론

논문에서는 nonconstant modulus 신호인 16-QAM를 송신할 때 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 최소화하기 위하여 사용되는 MMA 적응 등화 알고리즘의 연산량을 경감시킨 DSE-MMA와 QE-MMA의 성능을 비교하였다. DSE-MMA는 탭 계수 갱신시 오차 신호의 극성과 dither signal을 이용하며, QE-MMA는 오차 신호 극성과 비선형 power-of-two 양자화 연산을 이용하여 승산을 대체한다. 이들 알고리즘의 등화 성능을 등화기 출력 정상도와 잔류 isi, 최대 찌그러짐, MSE 및 SER을 적용하여 비교하였으며, 시뮬레이션 결과 내부 성능인 정상도와 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 MSE에서 수렴 속도와 정상 상태 이후의 잔여량에서는 QE-MMA가 DSE-MMA보다 훨씬 우월하였다. 그러나 외부 성능 지수인 SER에서는 신호대 잡음비가 20dB 미만에서는 DSE-MMA가 우월하였으며, 그 이상의 신호대 잡음비에서는 QE-MMA가 우월하여 잡음에 대한 robustness에서는 DSE-MMA가 dither signal에 의하여 강인함을 확인하였다.

References

- [1] R.M.Gray, T.G.Stockham, "Dithered Quantizers", IEEE Trans. on Infor. Theory, Vol.39, No.3, pp.805~812, May 1993.
DOI : <https://doi.org/10.1109/18.256489>
- [2] K.Banovic, R.Lee et.al., "Computationally-Efficient Methods for Blind Adaptive Equalization", Circuit & Systems 2005, 48th middle-east sympo., pp.341~344, Oct. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MWSCAS.2005.1594108>
- [3] P.Schniter, C.R.Johnson, "Dithered Signed-Error CMA : Robust, Computationally Efficient Blind Adaptive Equalization", IEEE Trans. on S.P., Vol. 47, No.6, pp.1592~1603, June 1999.
DOI : <https://doi.org/10.1109/78.765129>
- [4] 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 : <https://doi.org/10.1109/82.160173>
- [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 : <https://doi.org/10.1109/ICASSP.1984.1172672>
- [6] Wen si-yuan, Liu Feng, "A Computationally Efficient

Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", 2nd
IEEE Int. conf. of Infor. Eng. and Management,
pp.685~687, 2010.

DOI : <https://doi.org/10.1109/ICIME.2010.5478261>

- [7] D.L.Duttweiler, "Adaptive filter performance with nonlinearities in the correlation multiplier", IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol-ASSP-30, pp.578~586, Aug. 1982.

DOI : <https://doi.org/10.1109/TASSP.1982.1163933>

- [8] A.Tawfik, E.Abdel-Raheem, E.Agathoklis, "A modified dithered signed-error constant modulus algorithm for blind adaptive equalizer", Proc. of 7th IEEE Int. Conf. on Electronics, Circuits and Systems, Jounal, Lebanon, pp.688~691, Dec. 2000.

DOI : <https://doi.org/10.1109/ICECS.2000.912971>

저 자 소 개

임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2021년 현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수.

- 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신

유 시 영(정회원)



- 1988년 단국대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1990년 한양대학교 전자공학과 석사 졸업
- 2002년 한양대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2021년 현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수

- 주관심 분야 : 신호처리, 자동제어