

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.4.85>

IIBC 2018-4-12

2차원 QAM 시스템에서 CR-MMA 와 CM-MMA 등화 알고리즘의 성능 비교

A Performance Comparison of CR-MMA and CM-MMA Equalization Algorithm in 2-dimensional QAM System

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문에서는 2차원 QAM 시스템에서 전송시 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 최소화하기 위한 적응 등화 알고리즘인 CR-MMA와 CM-MMA의 등화 성능을 비교하였다. 기존 적응 등화 알고리즘 MMA의 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호를 얻을 때 CR-MMA는 nonconstant modulus 특성을 갖는 고차 2차원 QAM 신호를 constant modulus 신호로 변환하는 constellation reduction 개념을 이용하며, CM-MMA는 등화기 출력과 송신 신호점의 2차와 4차 cumulant를 강제로 일치시키기 위한 constellation matching error 개념을 이용한다. 서로 상이한 오차 신호를 얻는 과정을 거쳐 이들은 기존 방식보다 개선된 등화 성능을 얻을 수 있게 되므로, 논문에서는 이들을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 등화 성능을 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 등화기 내부의 성능에서는 CM-MMA가 CR-MMA보다 우월하였지만, 외부 성능에서는 CR-MMA가 CM-MMA보다 우월함을 확인하였다.

Abstract This paper compares the adaptive equalization performance of CR-MMA (Constellation Reduction-MMA) and CM-MMA (Constellation Matching-MMA) in order to minimization of intersymbol interference that is occur in channel for 2-dimensional QAM signal. For obtain the error signal in order to updating the tap coefficient of conventional adaptive equalization algorithm MMA, the CR-MMA converts the constellation reduction concept of high order 2-dimensional QAM nonconstant modulus signal to constant modulus signal and the CM-MMA use the constellation matching error concept in order to force the matching the 2nd and 4th cumulant of equalizer output and transmitted signal constellation. By applying the different method for getting the error signal, these algorithm are possible to obtain the improved equalization performance compared to the conventional MMA algorithm, the improved performance of CR-MMA and CM-MMA were compared by computer simulation in this paper. As a result of simulation, the CM-MMA has more better performance in the equalizer internal performance than CR-MMA, but not in equalizer external performance as in SER.

Key Words : MMA, CR-MMA, CM-MMA, residual isi, maximum distortion

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학전공
접수일자 2018년 6월 20일, 수정완료 2018년 7월 20일
게재확정일자 2018년 8월 10일

Received: 20 June, 2018 / Revised: 20 July, 2018 /

Accepted: 10 August, 2018

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

I. 서 론

홈 네트워크와 같은 무선 전파를 이용한 디지털 정보의 전송시 채널에서 다중 경로에 의한 심한 페이딩과 대역 제한 특성에 의한 부호간 간섭이 발생된다. 이와 같은 채널에 의한 신호의 찌그러짐을 보상하기 위하여 수신기에는 전자적 회로나 신호 처리를 위한 알고리즘이 사용되며, 이의 대표적인 예로 블라인드 적응 등화기를 들 수 있다^[1]. 등화기는 부호간 간섭의 영향을 제거하기 위하여 채널의 전달 특성과 역특성을 갖는 디지털 필터 시스템을 말하며, 이를 위한 방법에서 학습열의 사용없이 점진적으로 역특성에 수렴해가면서 채널의 시변 특성에 적응할 수 있는 능력을 갖는 블라인드 적응 등화 방식이 널리 사용되고 있다. 블라인드 적응 등화기에서 global 특성은 초기 조건과는 무관하게 적응 규칙이 올바른 방향으로 수렴해나감을 보장하고, local 특성은 적응 규칙이 적당하게 초기화된 경우 수렴율과 예측 정확성을 나타낸다. 이와 같은 global 과 local 특성을 동시에 만족시킬 수 있는 비용 함수를 고안하는 것은 어려운 문제이며, 이를 위한 다양한 알고리즘이 등장하고 있다^{[2][3]}. 현재 4-QAM, PAM, QPSK 와 같은 constant modulus 신호를 대상으로 채널의 진폭과 위상을 동시에 보상하여 부호간 간섭을 최소화할 수 있는 블라인드 등화 알고리즘으로는 MMA (Multi Modulus Algorithm)이 있다^{[1][4]}. 그러나 대역 제한된 채널을 통하여 다량의 정보를 전송하기 위해서는 높은 스펙트럼 효율을 갖는 2차원 QAM 신호 방식이 선호되지만, 이는 nonconstant modulus 특성을 가지므로 global과 local 특성은 만족하지만 등화 성능이 열화되는 문제점을 갖는다. 이를 해결하기 위한 방법으로 기존의 MMA 비용 함수를 개선하여 높은 스펙트럼 효율의 신호를 대상으로 CR-MMA와 CM-MMA가 등장하였다^{[5][6]}. 이들 방식은 적응 등화기의 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호를 발생하는 방법이 다르다. CR-MMA는 2차원 16-QAM의 신호를 대상으로 constellation reduction에 의한 진폭 변환을 수행하여 4-QAM과 같은 constant modulus화하는 비용 함수를 가지며, CM-MMA는 등화기 출력과 송신 신호의 2차, 4차 cumulant를 강제로 일치시키기 위한 과정에서 발생하는 constellation matching error를 기존 MMA 비용 함수에 고려한 새로운 비용 함수를 갖는다. 본 논문에서는 적응 등화를 위하여 진폭 변환에 의한 오차와 constellation matching error에 의한

오차의 상이한 비용 함수를 갖는 CR-MMA와 CM-MMA 알고리즘 성능을 동일한 채널 환경에서 시뮬레이션하여 이들 성능을 비교하였다. 이를 위하여 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi, 최대 찌그러짐과 외부 잡음에 대한 알고리즘의 강인성을 나타내는 SER을 지수로 사용하였다. 논문의 구성으로는 2장에서는 등화기를 사용하는 기저 대역 시스템 모델과 CR-MMA 및 CM-MMA 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션 결과와 적응 등화 성능 결과를 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 기저 대역 시스템 모델

그림 1은 수신측에서 적응 등화기를 사용한 일반적인 기저 대역의 대역 모델을 나타낸 것으로 채널과 등화 필터 및 결정 장치와 등화 필터의 탭 계수를 갱신하는 적응 알고리즘부로 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 는 비최소 위상 선형 시불변으로 전달 함수는 단위원상에 영점이 존재
- (4) 등화기 필터 f_k 는 탭 지연선 및 계수와와 승산기, 가산기로 구성되며 유한 차수이고, 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 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며 이때 채널에서는 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. 송신 기저 대역 신호 s_k 가 받는 채널의 찌그러짐에 의한 부호간 간섭은 적응 등화기에 의해 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이 과정을 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 장치의 출력 \hat{s}_k 의 스펙트럼을 $\widehat{S}(f)$ 라고 하면 잡음의 영향을 무시하면

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

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

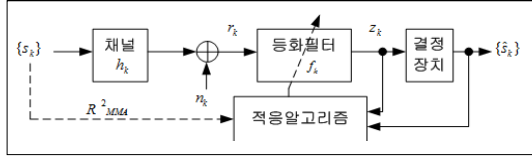


그림 1. 통신 시스템 모델
 Fig. 1. Communication system model

2. Constellation Reduction-MMA

CR-MMA는 기존 MMA 알고리즘에서 오차 신호를 얻기 위한 등화기 출력에서 16개의 nonconstant modulus 신호점을 축소시켜 4개의 constant modulus 신호점인 $\pm 1 \pm j1$ 의 4개 신호점으로 축소하여 사용하는 개념을 말하므로 고차의 16-QAM 신호를 4-QAM 신호로 변환하여 오차 신호를 발생한다. constellation reduction에서는 modulus를 R_{RCA}^2 를 1로 줄여서 모든 신호점은 적은 반경의 단위원에서 4-QAM의 통계적 특성을 이용하는 등화를 수행하므로 오차 함수의 크기를 줄일 수 있게 되어 등화 성능이 개선되며, 특히 고차 QAM 신호에 대해서도 우수한 성능을 얻을 수 있다. constellation reduction을 위하여 송신 신호가 16-QAM인 경우 등화기의 출력을 Z_k 라면 다음의 식이 적용된다.

$$\widehat{Z}_{kr} = Z_{kr} - 2 \text{sign}(Z_{kr}), \widehat{Z}_{ki} = Z_{ki} - 2 \text{sign}(Z_{ki}) \quad (2)$$

$$\widehat{R}_R^2 = \frac{|z_{kr}|^4}{|z_{kr}|^2}, \widehat{R}_I^2 = \frac{|z_{ki}|^4}{|z_{ki}|^2}$$

여기서 z_{Rk}, z_{Ik} 는 그림 1에서 z_k 의 실수와 허수부를 나타낸다. 그림 2는 16-QAM 신호점에서 $1+j1, -3+j1, -3-j3, 1-j3$ 의 4개 신호점이 식 (2)를 적용할 때 4-QAM 신호점에서 $-1-j1$ 으로 축소되는 과정을 나타낸 것이다.

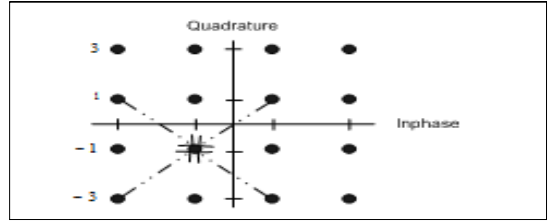


그림 2. 신호점 축소 예
 Fig. 2. Example of constellation reduction

이를 이용하면 CR-MMA의 비용 함수와 오차 신호 및 필터 계수의 갱신식은 다음과 같이 된다.

$$J = E[(|\widehat{z}_{kr}|^2 - \widehat{R}_R^2)^2 + (|\widehat{z}_{ki}|^2 - \widehat{R}_I^2)^2] \quad (3)$$

$$e_{CR-MMA} = \widehat{z}_{kr}(|\widehat{z}_{kr}|^2 - \widehat{R}_R^2) + j\widehat{z}_{ki}(|\widehat{z}_{ki}|^2 - \widehat{R}_I^2)$$

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

그림 3은 식 (3)에서 등화기 출력에 대한 오차 함수를 나타낸 것으로 기존 MMA의 오차 함수와 같이 기함수 형태로 분포하며, 송신 신호점을 중심으로 오차가 분포하며 그렇지 않은 경우 오차가 존재하지 않는다.

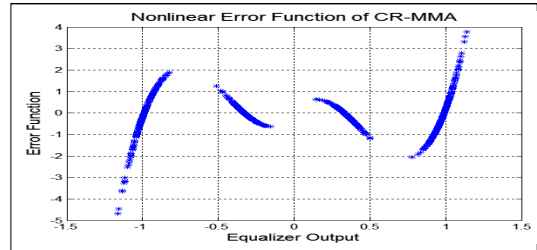


그림 3. CR-MMA의 오차 함수
 Fig. 3. Error function of CR-MMA

3. Constellation Matching-MMA

CM-MMA는 기존의 MMA 비용 함수에 QAM 심볼로부터 uniformity, symmetry, zero/maximum deviation에서 zero/maximum penalty의 속성을 만족하기 위한 CME (Constellation Matching Error) 항을 부가하여 수렴 속도와 정상 상태에서의 성능을 더욱 개선시킬 수 있다. CM-MMA의 비용 함수와 오차 함수는 식(4)와 같이 정의된다.

$$J_{CM-MMA} = E[(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)^2 + \beta(g(z_{kr}) + g(z_{ki}))]$$

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

여기서 $g(x)$ 는 constellation matching error 함수를 나타내며, β 는 진폭과 constellation matching error 간을 절충하는 가중치이다. 식(4)의 비용 함수에서 앞의 두 개항은 기존 MMA의 비용 함수를 나타내며, 뒤의 항은 CME를 나타내고, 각 신호점에서 0이 되도록 sinusoidal power function이 사용된다. 초기에는 CME항은 등화기 출력에 가장 가까운 신호점이 실제의 신호점과 차이가 존재하는 정확한 오차 정보를 포함하지 않으므로 초기에는 MMA 비용 함수가 적용된다. 초기 수렴이 끝나면, 등화기의 성능을 결정하는 CME항에 의해 올바른 오차값을 얻을 수 있도록 하므로 개선된 등화 성능을 얻을 수 있게 된다. 전체적인 수렴 과정에서 MMA항은 등화기 탭 계수가 올바른 방향으로 갱신되도록 global 수렴 특성을 제공하며, 최종적으로 정밀한 local 수렴 영역에 들어서면 CME항에 의하여 잔류 오차와 수렴 속도를 개선시키며 다음과 같은 gradient 반복식으로 표현된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \nabla J_{CM-MMA}(f)|_{f=f_k} \quad (5)$$

여기서 비용 함수의 gradient는

$$\nabla J_{CM-MMA}(f) = E[(z_k(|z_k|^2 - R_{MMA}^2) + \beta n_k)^* r_k] \quad (6)$$

$$\phi_k = z_k(|z_k|^2 - R_{MMA}^2) + \beta n_k$$

$$n_k = -\frac{\pi}{2d} [\sin(\frac{z_{kr}\pi}{d}) + j \sin(\frac{z_{ki}\pi}{d})]$$

의 관계가 있고, 이들을 조합하면 식(4)는 다음과 같다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \phi_k^* r_k \quad (7)$$

그림 4는 CM-MMA의 오차 함수를 나타낸 것이다.

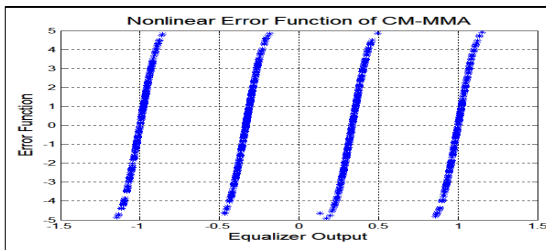
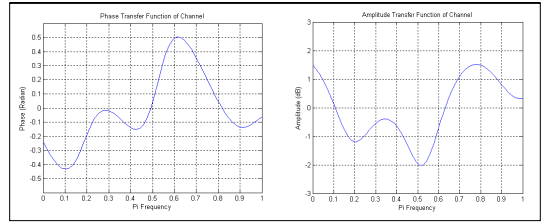


그림 4. CM-MMA의 오차 함수
Fig. 4. Error function of CM-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

CR-MMA 와 CM-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였고, 이를 위한 시뮬레이션 파라미터로는 동일한 채널에서 신호대

잡음비를 30dB, 적응 스텝 크기로서 CR-MMA 알고리즘에서 $\mu = 0.00045$ 이고 CM-MMA에서는 $\mu = 0.000015$, 가중치 $\beta = 63.66$ 이었으며 모두 17차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 5는 채널의 진폭과 위상 전달 함수를 나타낸 것으로 진폭의 경우 주파수에 따라 전달 이득이 크게 변동하며, 위상의 경우 주파수에 따라 기울기가 일정하지 않은 비선형 특성을 가짐을 알 수 있다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 5. 채널의 전달 함수

Fig. 5. Transfer function of channel

그림 6은 시뮬레이션을 위한 전체 신호 흐름도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 3의 채널을 통과시키고 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호를 얻었다. 이는 그림 1의 r_k 가 된 후 이를 CR-MMA와 CM-MMA 알고리즘을 적용하여 등화기 출력 성장도, 잔류 isi, 최대 제그러짐과 SER 성능을 비교하였다.

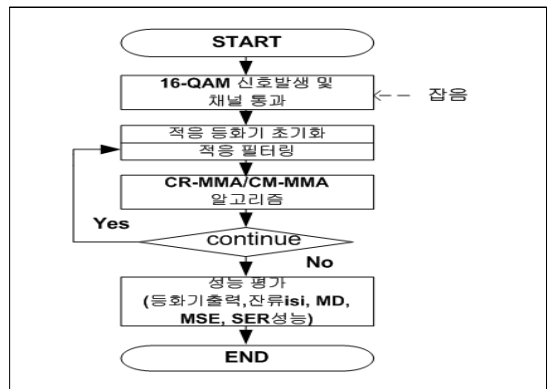


그림 6. 신호 처리도

Fig. 6. Flowdiagram of signal processing

첫 번째 성능을 정량적인 성능 비교를 위하여 이들 알고리즘을 적용할 때 적응 등화기의 출력 신호 성장도를 그림 7에 나타내었다. 출력 성장도에서는 신호점의 폭

(w)이 좁고 신호점간의 간격(d)이 클수록 등화 성능이 우월하게 된다. CR-MMA는 $w=0.375$, $d=0.68$ 이며 CM-MMA는 $w=0.32$, $d=0.68$ 이 되어 신호점의 폭에서 CM-MMA가 CR-MMA보다 우월함을 알 수 있고, 이는 그림에서 정성적으로도 확인할 수 있다.

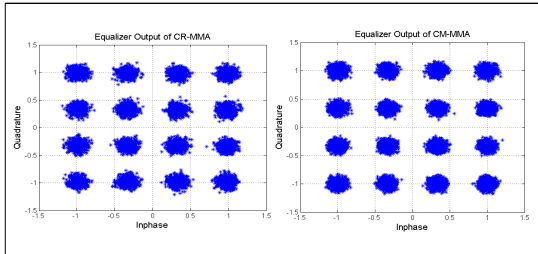


그림 7. 등화기 출력 신호
 Fig. 7. Output signal of equalizer

적용 등화기의 수렴 성능을 비교하기 위한 성능 지수로 잔류 isi, 최대 찌그러짐 learning 곡선을 사용하였으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 이들 성능 지수에서는 정상 상태에 도달하는 수렴 속도와 정상 상태 이후의 잔여량의 크기를 나타낸다. 그림 8은 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로 -20dB의 정상 상태에 도달하는데 CR-MMA는 414회, CM-MMA는 1009회가 소요되어 수렴 속도에서는 CR-MMA가 CM-MMA보다 2.44배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 CM-MMA가 CR-MMA보다 약 2dB 정도 개선됨을 알 수 있다.

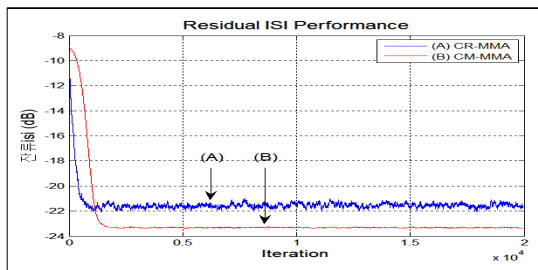


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

그림 9는 최대 찌그러짐 성능을 나타낸 것으로 0.35의 정상 상태에 도달하는데 CR-MMA는 452회, CM-MMA는 956회가 소요되어 수렴 속도에서는 CR-MMA가 CM-MMA보다 2.1배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후의

잔여량에서는 CM-MMA가 CR-MMA보다 0.1정도 개선됨을 알 수 있다.

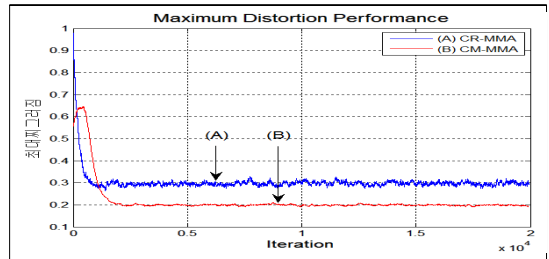


그림 9. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 9. Maximum Distortion performance

마지막 성능 지수로는 외부 부가 잡음에 대한 강인성을 알 수 있는 심볼 오류율 (SER) 성능을 비교하였다. 채널에서 부가되는 신호대 잡음비를 0 ~ 15dB 까지 3dB 단위로 변화시키면서 20,000개의 심볼을 6회 montecarlo simulation할 때의 오류율을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 모든 신호대 잡음비에서 동일한 심볼 오류율을 얻기 위한 신호 대 잡음 전력의 비에서 CR-MMA가 CM-MMA보다 훨씬 적게 됨을 알 수 있다.

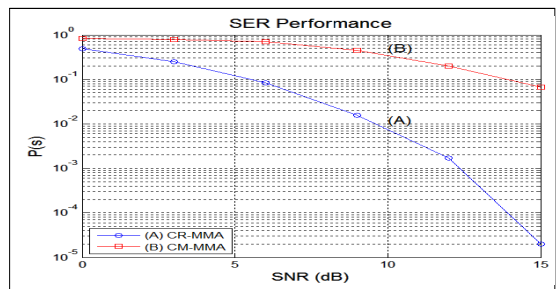


그림 10. SER 성능
 Fig. 10. SER performance

V. 결 론

본 논문에서는 부호간 간섭의 영향을 최소화시켜 통신 시스템의 throughput을 향상시키기 위해 사용되는 블라인드 적응 등화 알고리즘인 CR-MMA와 CM-MMA의 성능을 비교하였다. 블라인드 적응 등화기에서는 송신 신호의 constant modulus 특성을 이용하여 부호간 간섭을 최소화시키지만, 고차의 2차원 QAM 신호 전송시에는 nonconstant modulus 특성을 갖게 되어 등화 성능

이 열화되므로 CR-MMA에서는 constant modulus 특성을 갖도록 constellation reduction을 수행하며, CM-MMA에서는 등화기 출력의 2차, 4차 cumulant를 송신 신호의 cumulant와 매칭시키는 원리를 이용한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 성능 비교 결과 등화기 내부에 관련된 지수인 등화기 출력 신호, 수렴 특성을 확인하기 위하여 잔류 isi 및 최대 찌그러짐에서는 CM-MMA 알고리즘이 CR-MMA보다 성능이 우월함을 확인하였지만, 등화기 외부의 잡음에 대한 강인성을 알 수 있는 SER에서는 CR-MMA가 CM-MMA보다 훨씬 우월함을 우월성을 확인하였다. 따라서 통신 채널의 상황이 잡음 지배적인 경우 CR-MMA가 CM-MMA보다 우수하며, 찌그러짐이 지배적인 경우 CM-MMA가 CR-MMA보다 우수함을 알 수 있었다.

References

- [1] Lin He, M. G. Amin, C. R. Jr, R. C. M alkemes, "A Hybrid Adaptive Blind Equalization Algorithm for QAM Signals in Wireless Communications", Vol. 52, No. 7, pp. 2058~2069, July 2004.
DOI : 10.1109/TSP.2004.828913
- [2] 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 : 10.1109/ICDSP.1997.627988
- [3] J. T. Yuan, K. D. Tsai, "Analysis of the Multi-modulus Blind Equalization Algorithm in QAM communication Systems", IEEE Trans. on Comm., Vol. 53, No. 9, pp.1427~1431, Sept. 2005.
DOI : 10.1109/TCOM.2005.855017
- [4] W. Rao, "Amplitude Transformation-Based Blind Equalization Part 2 : Suitable for High-Order QAM Signal", Procedia Environmental Sciences 10, pp. 1282~1286, 2011.
- [5] Lin He, S. A. Kassam, "Convergence Analysis of Blind Equalization Algorithm using Constellation-Matching", IEEE Trans. on Com., Vol. 56, No. 11, pp.1765~1768, Nov. 2008.

DOI : 10.1109/TCOM.2008.060370

- [6] 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.
- [7] 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>