

QAM 시스템에서 Constellation Matching-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 평가

A Performance Evaluation of Constellation Matching-MMA Adaptive Equalization Algorithm in QAM System

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭과 잡음의 영향을 최소화하여 최적 수신기를 구성하기 위한 적응 등화 알고리즘인 Constellation Matching-MMA의 등화 성능에 관한 것이다. 기존의 적응 등화 알고리즘 MMA에 등화기의 신호점간에 강제로 0점을 삽입하는 개념인 Constellation Matching 기법을 조합시켜 오차 신호를 얻으므로 잔류 isi와 수렴 속도를 개선할 수 있다. 적응 등화의 초기 상태에서는 주로 MMA의 특성을 가지지만, 정상 상태에 진입한 후에는 주로 CM 특성이 적용된다. 등화 성능의 분석을 위하여 등화기 출력 성장도, 잔류 isi, 최대 찌그리짐과 MSE와 SER을 적용하여 기존 MMA와 비교하였다. 컴퓨터 시뮬레이션의 결과 모든 성능에서는 CM-MMA가 MMA보다 우월하였으며, SER에서는 신호대 잡음비가 20dB 이상일 때 CM의 효과를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract This paper relates with the equalization performance of Constellation Matching-MMA (CM-MMA) in order to the consists of optimum receiver for the minimization of intersymbol interference and additive noise effects that is occurs in the nonlinear communication channel. The error signal were obtained that combines the Constellation Matching technique that inserts the zero point between the signal point of equalizer for improving the residual isi and convergence speed compared to the currently used MMA algorithm. In the initial state of adaptive equalization, it depends on the MMA characteristics mainly. And in the steady state, it depends on the CM characteristics mainly. In order to analyzing the equalization performance, the output signal constellation, residual isi, maximum distortion, MSE and SER were applied, then it were compared with the present MMA algorithm. As a result of computer simulation, the CM-MMA has more better performance in the every performance index, and it was also confirmed that the constellation matching effect can be obtained in the greater than 20dB signal to noise ratio.

Key Words : MMA, Constellation Matching, residual isi, MSE, maximum distortion

1. 서론

전송 시스템에서 등화기는 통신 채널에서 발생하는

찌그리짐을 보상하기 위하여 수신측에서 사용되는 디지털 필터를 말한다. 초기의 유선 채널에서 아날로그 신호를 전송할 때 장하 코일을 사용하여 등화를 수행하였고,

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부
접수일자 : 2015년 1월 13일, 수정완료 : 2015년 3월 5일
게재확정일자 : 2015년 4월 10일

Received: 13 January, 2015 / Revised: 5 March, 2015 /
Accepted: 10 April, 2015

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

이후 디지털 신호의 전송으로 패러다임이 변화되면서 신호 처리 소자에 의한 디지털 필터로 대체되었다. 반면 채널의 특성이 시간, 장소에 따라 수시로 변동하는 시변 채널과 건물과 같은 장애물이 존재하는 무선 채널의 경우 수신되어지는 신호의 품질이 유선에 비해 매우 열악해지므로 전체 시스템의 throughput이 열화된다. 그러나 최근 이동 통신과 모바일 인터넷 같은 무선 전송을 통한 다양한 트래픽의 전송 수요가 증가하면서 throughput을 개선하기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 대표적인 기술로서 블라인드 적응 등화를 들 수 있다^{[1][2]}. 이동 통신과 같은 대역폭 제한과 송신 전력 제한 특성을 갖는 채널에서 사용되는 신호 방식으로는 높은 스펙트럼 효율을 갖는 QAM의 사용이 필수적이므로, 적응 등화를 위한 대상 신호로는 이를 많이 사용하고 있다^[7]. 이와 같은 환경에서 사용 가능한 적응 등화기의 가장 중요한 요구 조건으로는 등화 초기 상태 또는 채널의 순단 등의 예측 불가능한 상황에서도 빠른 수렴 속도로 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간을 들 수 있다. 또한 이동 통신의 단말에서는 최소의 송신 전력으로 최소의 심볼 오류율을 얻어야 하므로 높은 등화 이득을 얻을 수 있어야 하며, 이를 위한 적응 등화 알고리즘으로는 CMA (Constant Modulus Algorithm)와 MMA (Multiple Modulus Algorithm)등을 들 수 있다. CMA는 가장 기본적인 알고리즘으로 채널에서 발생하는 진폭만 보상이 가능하며 위상이 불가능한 단점이 있으므로 이를 개선하기 위하여 MMA가 등장되었다^{[3][4]}. MMA는 위상도 진폭과 같이 동시 보상 능력을 갖지만 QAM의 차수가 증가되는 경우 등화 성능에서는 CMA보다 열화되므로 이를 개선기 위하여 다양한 알고리즘이 등장하고 있다. 이들 2가지 알고리즘에서는 적응 등화기로서 FIR을 사용하여 등화 필터의 안정성을 얻을 수 있지만, 적응 규칙에 사용되는 비용 함수의 최적화에는 문제가 있다. 적응 등화기에서 global 특성은 적응 규칙에서 초기화되는 무관하게 정확한 솔루션을 향하여 수렴을 보장하고, local 특성은 적응 규칙이 적당하게 초기화된 경우 수렴율과 예측 정확성을 나타낸다. 그러나 global 과 local 특성을 동시에 만족시킬 수 있는 비용 함수를 고안하는 것은 어려운 문제이다^{[5][6]}. 본 논문에서는 godard의 우수한 global 특성과 local 특성을 개선하기 위하여 1차 모멘트 외에도 constellation shape의 정보를 이용하여, 즉 신호 성상도에 matching시킬 수 있는 constellation matching 개념의 특수 비용 함수를

MMA 알고리즘에 추가시킨 CM-MMA (Constellation Matching-MMA)의 적응 등화 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하고자 한다. 2장에서는 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델과 MMA 적응 등화 알고리즘과 제안 CM-MMA 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션과 결과로서 주어진 통신 채널에서 이들 알고리즘들의 등화 성능을 제시한 후, 4장에서 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 통신 시스템 모델

그림 1은 수신측에서 적응 등화기를 사용한 일반적인 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 전송하면 대역 제한과 다중 경로 전파를 나타내는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 가우시안 잡음 n_k 이 추가된다. 수신측에서는 임펄스 응답이 f_k 인 등화기에 인가되며, 이때 적응 등화기의 전달 함수는 통신 채널의 역 전달 함수를 갖도록 설정된다. 이 과정에서 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하며, 송신 기저 대역 신호가 받는 채널의 찌그러짐에 의한 부호간 간섭은 적응 등화기에 의해 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 이때 적응 알고리즘부에서는 송신 부호의 실수부와 허수부의 constant modulus 인 R_{MMA}^2 및 오차 신호를 이용하게 된다.

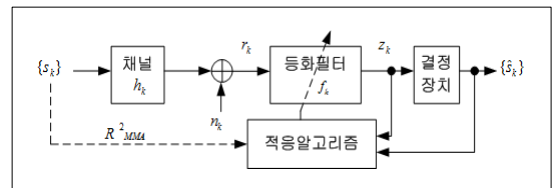


그림 1. 통신 시스템 모델
Fig. 1. Communication system model

2. Multiple Modulus Algorithm

MMA는 CMA의 단일 modulus를 multiple modulus로 확장하여 등화기 출력에 비례하는 signal constellation point의 각 subset에 이들 multiple modulus 중 1개를 할당시킨다. 또한 비용 함수는 2차원이 아닌 1

차원의 합으로 구성되어지며, 비용 함수에서 등화기 출력의 실수와 허수부를 고려하므로 채널 위상 찌그러짐을 보상할 수 있다. 이들은 저차 QAM 신호에 대해서는 비슷한 수렴 특성을 보이지만, 고차 QAM 신호에 대해서는 MMA가 CMA보다 우월한 수렴 특성을 보이면서 정상 상태에서 misadjustment에 의한 등화 잡음이 적게 된다. MMA 적용 등화 알고리즘은 CMA 알고리즘을 개선한 것으로 등화 필터 계수 f_k 에 대한 특정한 비용 함수 J 를 최소화 시키도록 stochastic gradient algorithm을 적용하여 반복시킨다. MMA의 비용 함수와 오차 함수는 식(1)과 같다.

$$J_{MMA} = E\{(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)^2\} \quad (1)$$

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

$$\bar{e}_{kMMA} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)$$

여기서 R_{MMA}^2 를 constant modulus라고 하며 등화기의 출력이 modulus 주위에 위치하도록 계수 f_k 를 갱신 한다. 식(1)에서 z_{kr} , z_{ki} 는 등화기 출력 z_k 의 실수와 허수, s_{kr} , s_{ki} 는 송신 신호 s_k 의 실수와 허수를 각각 나타낸다. 식(1)의 MMA 비용 함수는 1차원적인 CMA 비용 함수를 2 개 더한 형태로 표시되므로 등화기 출력을 복소 평면에서 표시해보면 4개의 점 ($\pm R_{MMA} \pm jR_{MMA}$) 주위로 분포하게 된다. 이들을 이용하여 등화 필터의 계수는 다음과 같이 갱신되어진다. 여기서 μ 는 적용 스텝의 크기를 나타낸다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \bar{e}_{kMMA}^* r_k^* \quad (2)$$

3. Constellation Matching- MMA

논문에서 제안하는 CM-MMA는 기존의 MMA 비용 함수에 CME (Constellation Matching Error) 항을 추가하여 수렴 속도와 정상 상태에서의 성능을 더욱 개선시킬 수 있다. CM-MMA의 비용 함수와 오차 함수는 식(3)과 같이 정의된다.

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

$$R_{MMA}^2 = \frac{E\{|s_{kr}^4|\}}{E\{|s_{kr}^2|\}} = \frac{E\{|s_{ki}^4|\}}{E\{|s_{ki}^2|\}} \quad (3)$$

여기서 $g(x)$ 는 constellation matching error 함수를 나타내며, β 는 진폭과 constellation matching error간을 절충하는 가중치이다. 식(3)의 비용 함수에서 앞의 두 개항은

기존 MMA의 비용 함수를 나타내며, 뒤의 항은 CME를 나타낸다. CME항은 각 신호점에서 0이 되도록 설계되어지며, 이를 위하여 sinusoidal power function이 사용된다. 여기서 β 를 적절하게 선정하면 초기의 과도 상태에서는 MMA 비용 함수가 적용된다. 초기에는 CME항은 등화기 출력에 가장 가까운 신호점이 실제의 신호점과 차이가 존재하는 정확한 오차 정보를 포함하지 않는다. 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 개선시키게 된다. 이와 같은 개념을 이용하여 CM-MMA 등화기에서 필터의 계수는 다음과 같은 gradient 반복식으로 표현된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \nabla J_{CM-MMA}(f)|_{f=f_k} \quad (4)$$

여기서 비용 함수의 gradient는

$$\nabla J_{CM-MMA}(f) = E[(z_k(|z_k|^2 - R_{MMA}^2) + \beta n_k)^* r_k] \quad (5)$$

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

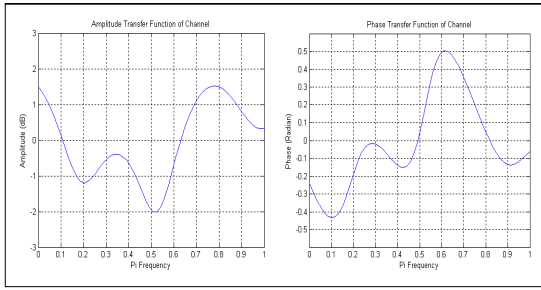
$$n_k = -\frac{\pi}{2d} [\sin(\frac{z_{kr}\pi}{d}) + j \sin(\frac{z_{ki}\pi}{d})]$$

의 관계가 있고, 이들을 조합하면 식(4)는 다음과 같다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \phi_k^* r_k \quad (6)$$

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

CM-MMA 적용 등화 알고리즘의 성능 분석을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 기존 MMA 알고리즘과 비교하였다. 이를 위한 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적용 스텝 크기로 CM-MMA $\mu = 0.000015$, MMA $\mu = 0.0015$, CM-MMA의 가중치 $\beta = 63.66$ 를 적용하였다. 시 분산 통신 채널의 계수 $h_k = [1, 0, 0.2295 - j0.1933, 0, 0, 0.1393 - j0.1435]$ 를 MMA와 CM-MMA에 동일하게 적용하였고, 이의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 그림 3에 나타내었다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 3. 채널의 주파수 전달 함수

Fig. 3. Frequency transfer function of channel

그림 4는 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. 수신 신호는 그림 1의 r_k 가 된 후 이를 CM-MMA와 기존 MMA 알고리즘을 적용하여 성능을 비교하였다.

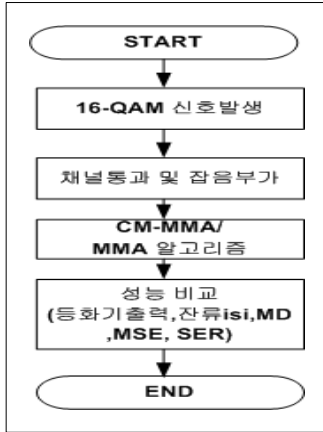


그림 4. 신호 처리도

Fig. 4. Flowdiagram of signal processing

첫 번째 성능을 정량적인 성능 비교를 위하여 이들 알고리즘을 적용할 때 적응 등화기의 출력 신호 성장도를 그림 5에 나타내었다. 출력 성장도에서는 신호점의 크기와 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 되는데, CM-MMA의 신호점이 폭이 기존 MMA보다 적으며, 신호점간의 거리도 CM-MMA가 기존 MMA보다 멀어지므로 error 발생 가능성이 감소하므로 적응 등화 성능이 개선됨을 알 수 있다.

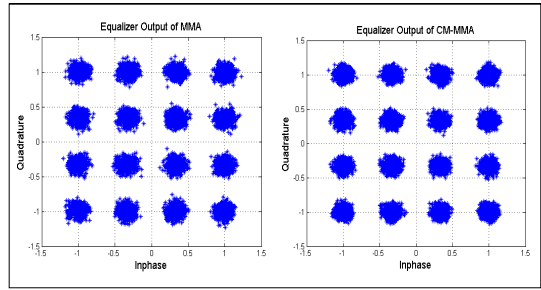


그림 5. 등화기 출력 신호

Fig. 5. Output signal of equalizer

적응 등화기의 수렴 성능을 비교하기 위한 성능 지수로 MSE, 최대 찌그러짐과 잔류 isi의 learning 곡선을 사용하였으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 먼저 반복 iteration에 대한 등화기 출력과 결정장치 출력 사이의 자승 오차로 정의되는 MSE learning 곡선을 그림 6에 나타내었다. MSE 곡선에서 -20dB 를 정상 상태로 정의할 때 MMA는 2931회, CM-MMA는 1137회에서 달성되므로 MSE 수렴 속도에서 CM-MMA가 MMA보다 2.6배 정도 빠르며, 정상 상태 이후에도 탭 계수 갱신에 의한 등화 잡음의 양이 적음을 알 수 있다. 그림 7은 최대 찌그러짐 (MD)성능 곡선을 나타낸 것이다. 정상 상태인 -0.3 [v]이하로 정의할 때 MMA는 3090회, CM-MMA는 1094회에서 달성되므로 MD 수렴 속도에서 CM-MMA가 MMA보다 2.8배 빠르며, 정상 상태 이후에도 더욱 적은 찌그러짐을 갖는다. 그림 8은 블라인드 적응 등화기의 가장 중요한 성능 지수인 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 -20dB 를 정상 상태로 설정할 때 MMA는 2071회, CM-MMA는 1027회에 달성하므로 CM-MMA가 MMA보다 2배 빠른 수렴 속도를 가지며 정상 상태 이후에도 잔류량이 매우 적게 됨을 알 수 있다.

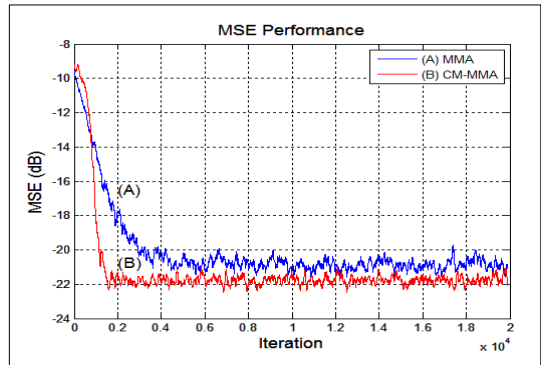


그림 6. MSE 성능

Fig. 6. MSE performance

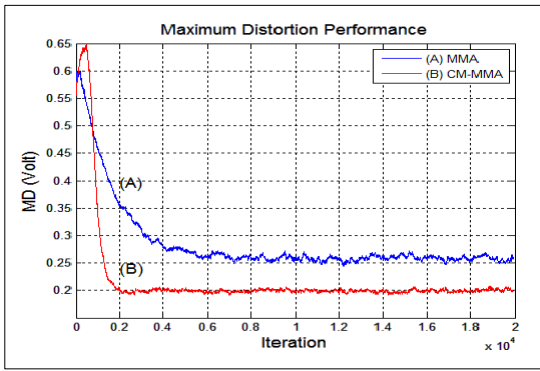


그림 7. MD 성능
 Fig. 7. MD performance

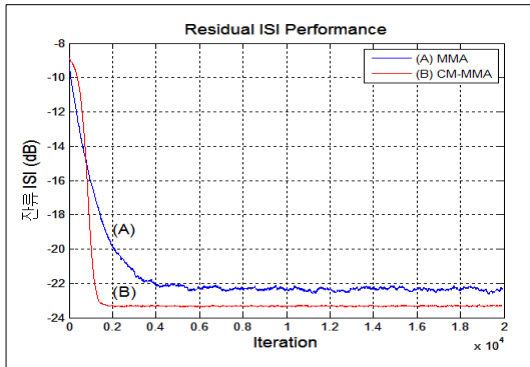


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

표 1은 이들 알고리즘의 성능들을 나타내는 그림 6, 7, 8에 대한 정상 상태 이후의 MSE, MD 및 잔류 isi의 정량적 평균값을 나타낸 것이다. 모든 지수들을 비교할 때 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서 CM-MMA가 MMA보다 빠름을 확인할 수 있었으며, 정상 상태이후에도 CM-MMA가 MMA보다 적은 양으로 안정되게 적응 등화 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 이들 양들의 변화도 적게 되어 등화 잡음이 감소함을 알 수 있다.

표 1. 등화 성능의 통계치
 Table 1. Statistics of equalization performance

	MMA[dB]	CM-MMA[dB]
MSE	-20.79	-21.76
MD	-11.63	-13.95
잔류isi	-22.18	-23.29

마지막 성능 지수로는 이들 적응 등화 알고리즘의 체

널에서 부가되는 잡음에 대한 강인성 (Roburstness)을 알 수 있는 심볼 오류율 (SER) 성능을 비교하였다. 채널에서 부가되는 신호대 잡음비를 0 ~ 35dB 까지 5dB 단위로 변화시키면서 20,000개의 심볼을 5회 montecarlo simulation할 때 적응 등화기를 통과한 후 결정 장치가 심볼을 복원할 때 송신 심볼과의 오류율을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 신호대 잡음비가 낮은 0 ~ 15dB의 범위내에서는 MMA가 CM-MMA보다 우월하며, 20dB에서는 오율 성능이 비슷해지고, 20dB 이상의 신호대 잡음비에서는 CM-MMA가 MMA보다 오율 성능이 월등히 우월해짐을 알 수 있다. constellation matching을 위해서는 요구되는 신호대 잡음비가 최소 20dB가 필요함을 알 수 있으므로 통신 채널의 환경에 따라 적당한 적응 등화를 위한 알고리즘을 선택해야 한다.

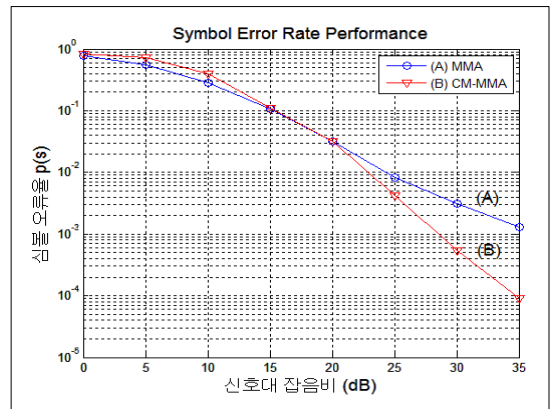


그림 9. SER 성능
 Fig. 9. SER performance

V. 결론

논문은 통신 채널에서 발생하는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭의 영향을 줄일 수 있는 적응 등화 알고리즘에서 constellation matching 개념을 적용하여 기존 MMA 등화기의 global 과 local convergence 수렴 특성을 더욱 개선시킨 CM-MMA 알고리즘에 관한 것이다. 적응 등화기는 찌그러짐을 보상할 수 있는 탭 계수를 갱신하는 global 특성과 성능이 사전에 설정된 특정 레벨에 도달하는 정상 상태 이후부터의 local 특성으로 대별할 수 있으며, 여기에서는 constellation matching에 의한 2가지 convergence 특성의 개선된 성능을 확인하기 위한 등화

기 출력 신호, 수렴 특성을 확인하기 위하여 MSE, 최대 찌그러짐 및 잔류 *ISI*, 통신 채널에서의 강인성을 알 수 있는 SER를 적용하여 MMA와 비교하였으며, 정성적 성능과 정량적 성능에서 CM-MMA가 MMA보다 우월성을 확인하였다. 이와 같은 개선된 성능의 CM-MMA 알고리즘은 최근 급격히 증가되는 모바일 인터넷과 같은 디지털 이동 전송 분야에서 시스템의 throughput을 개선시킬 수 있는 요소 기술로서 중요한 의미를 갖게 될 것으로 기대되어진다.

References

- [1] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980.
- [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.
- [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.
- [4] M. Amin, Lin He, C. Reed, Jr, R. Malkemes, "A Modified Constant Modulus Algorithm for Adaptive Channel Equalization for QAM Signals", IEEE Proc. of 11th Singal Processing, pp.563~566, 2001.
- [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.
- [6] 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.
- [7] S. G. Lim, D. S. Kang, "The Performance Improvement of CMA Blind Adaptive Equalizer using the Constellation Matching Method", Jour. of I.W.I.T., Vol. 10, No. 1, pp.121~127, Feb. 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>