

논문 2011-5-4

병렬 구조를 갖는 MCMA 등화기의 성능 개선

Performance Improvement of MCMA Equalizer with Parallel Structure

윤재선*, 임승각**

Jae-Sun Yoon, Seung-Gag Lim

요약 디지털 통신 시스템에서 채널에서 발생하는 ISI(Inter-Symbol Interference)를 줄이기 위해 사용되는 적응 등화기의 알고리즘으로 MCMA(Constant Modulus Algorithm)가 있다. MCMA는 비교적 간단한 연산량을 갖지만 어느 정도 적당한 수렴율과 정상 상태의 MSE(mean square error)를 가지므로 본 논문에서는 이를 개선기 위해 병렬 구조를 갖는 등화 방식을 제안 하며, MCMA(Modified Constant Modulus Algorithm)과 MDD(Modified Decision Directed Algorithm)으로 구성이 되어 있다. 제안 방식에서는 4-QAM 좌표와 16-QAM 좌표의 관계를 이용한, 새로운 비용 함수를 정의 하고, 만약 수신된 신호에 오프셋이 발생할 때, MCMA의 성능이 저하되므로 이를 극복하기 위해서 본 논문에서는 MDD(Modified Decision Direct) 알고리즘과 결합한 병렬형 구조를 적용함으로써 기존의 MCMA 보다 빠른 수렴 속도와 낮은 MSE를 갖는 개선된 성능을 얻을 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다.

Abstract In digital communication system that the Modified Constant Modulus Algorithm (MCMA) reduced the use of the adaptive equalization algorithm to combat the Inter-symbol Interference (ISI). MCMA is relatively brief operation. The major point of MCMA that it only achieves moderate convergence rate and steady state mean square error (MSE). In this paper suggest, MCMA equalization improve the performance with parallel structure. It combines Modified Constant Modulus Algorithm(MCMA) and Modified Decision Directed(MDD) algorithm. By exploiting the inherent structural relationship between the 4-QAM signal's coordinates and 16-QAM signal's coordinates, another style of cost function for Modified Constant Modulus Algorithm(MCMA) is defined and If it happen to offset of received signals and MCMA is poor performance in order to overcome this because the paper combines apply for MCMA and MDD(Modified Decision Direct) alrogthm. By computer simulation, we confirmed that the proposed PMCMA-MDD algorithm has the fater convergence rate and steady mean square error than the conventional MCMA.

Key Words : Inter-Symbol Interference, Mean Square Error, Constant Modulus Algorithm, Decision Directed

1. 서 론

통신 시스템에서는 대역 제한 채널 및 다중 경로 채널에 의한 심벌간 간섭(ISI : InterSymbol Interface) 영향을

피할 수 없다. 무선 채널에서는 공간 상태의 시변 (time vary) 특성과 다중 경로 (multipath)에 의한 페이딩, 건축물과 인공 구조물 등의 장애물과 이동 환경에서 발생하는 Doppler shift등이 존재하며, 유선 채널에서는 제한된 통과 특성을 갖는 대역 제한 특성으로 인하여 인접 부호간 간섭을 일으키게 된다. 이를 경감하기위하여 수신기에서는 채널에서 발생하는 찌그러짐을 경감하기위하여 적응 등화기를 사용하게 된다.^[8]

*준회원, 공주대학교 정보통신공학부

**정회원, 공주대학교 정보통신공학부(교신저자)

접수일자 2011.9.14, 수정일자 2011.10.10

게재확정일자 2011.10.14

적응 등화기는 통신 채널의 역 주파수 전달 함수를 갖는 디지털 필터를 말하며, 채널과 등화기의 종합 특성은 주파수 영역에서 평탄하게 되어 채널에 의한 영향을 보상할 수 있다.^{[1][2]}

CMA (Constant Modulus Algorithm)는 적응 등화기의 대표적인 알고리즘으로 간단한 연산에 의한 보상이 가능하지만 사용 변수의 변화에 따른 수렴 속도와 MSE (Mean Square Error)등 성능의 급격한 변화, Local Convergence 보장과 위상 보상 불가능 등의 문제점이 있다. 이를 개선하기 위하여 MCMA (Modified CMA)가 등장하여 수렴 속도와 MSE는 개선하였지만 Local Convergence 와 위상 보상 문제를 해결하지 못하고 있다. 이를 해결하기 위해 MCMA와 MDD를 병렬 구조로 갖는 병렬 PMCMA-MDD (Paralled Modified Constant Modulus-Modified Decision Device)를 제안하여 이의 개선된 성능과 위상 복원 결과를 얻을 수 있게 된다.

PMCMA-MDD는 coordinate change를 이용하여 4-QAM과 16-QAM의 좌표를 적용한 새로운 비용 함수를 정의하였으며, 이를 이용하여 위상 offset을 보상하므로 MCMA보다 빠른 수렴 속도와 적은 MSE양을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인 하였다. 2장에서는 기본적인 CMA에 대해 간략하게 설명한 후 MCMA 와 MDD 및 이들의 조합 구조에 대하여 설명한 후 위상 offset을 보정을 할 수 있는 원리를 설명하였다. 3장에서는 16-QAM 신호를 발생시켜 채널을 통과시켜 신호 대 잡음비 30dB와 40dB로 고정시킬 때의 컴퓨터 시뮬레이션 과정 및 결과에 대해 설명한 후 4 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. CMA

그림 1은 CMA 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템의 기저 대역 수신부를 나타낸 것이다.

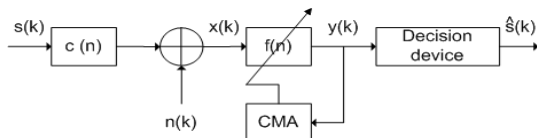


그림 1. CMA 등화기 구조
Fig. 1. Structure of the CMA Equalizer

여기서 $s(k)$ 는 전송된 심볼(symbol), $c(n)$ 는 채널 임펄스 응답, $n(k)$ 는 채널에서 부가 되는 잡음, $x(k)$ 는 등화기 입력, $\hat{s}(k)$ 는 연관정 장치, 등화기 계수 벡터는 $f(k) = [f_0(k), f_1(k), \dots, f_{N-1}(k)]^T$ 이의 계수 입력 벡터는 $x(k) = [x(k), x(k-1), \dots, x(k-N+1)]^T$ 이고, $y(k)$ 를 등화기 출력을 나타내며, 다음의 관계식과 같다.

$$y(k) = f^T(k)x(k) \quad (1)$$

여기서 CMA 비용 함수를 J_{CMA} , 오류 함수를 $e(k)$ 라면

$$J_{CMA}(f) = E[e(k)^2] \quad (2)$$

$$e(k) = |y(k)|^2 - R^2 \quad (3)$$

가 되고 R^2 는 다음과 같이 정의되는 constant modulus 값이다.

$$R^2 = \frac{E[|S(k)|]^4}{E[|S(k)|]^2} \quad (4)$$

가중치 벡터 $f(k+1)$ 의 갱신식은,

$$f(k+1) = f(k) - \mu x^*(k)y(k)(|y(k)|^2 - R^2) \quad (5)$$

가 되며, 여기서 μ 는 스텝 사이즈이다.

2. MCMA(Modified Constant Modulus Algorithm)

CMA가 심벌간 간섭과 위상 오차를 동시에 제거하기 위해서는 CMA의 비용함수가 위상 성분을 포함해야 한다. 등화와 동시에 위상 복원을 수행하기 변형된 CMA(Modified CMA : MCMA)^{[2][3]} 제안되었다.

$$Y = [X_r - 2\text{sign}(X_r)] + j[X_i - 2\text{sign}(X_i)] \quad (6)$$

여기서 X_r 와 X_i 는 X 의 각각 실수 부분과 허수 부분 이고, 전송된 신호의 원래의 coordinate로 가정을 한다.

위와 같이 coordinate change를 통하여, 모든 신호들은 똑같은 단위원(圓)의 위치에 나타나게 되며, 원래 CMA의 비용함수 식 (2),(3)은 다음과 같은 새로운 형태로 오류함수 $e'(k)$ 표시한다.

$$e'(k) = |[y_r(k) - 2\text{sign}(y_r(k))] + j[y_i(k) - 2\text{sign}(y_i(k))]| - R'^2 \quad (7)$$

여기서 $y_r(k)$ 와 $y_i(k)$ 는 $y(k)$ 의 각 실수 부분과 허수 부분이고, 상수인 R'^2 를 정의한다.

$$R'^2 = E[|[a_r(k) - 2\text{sign}(a_r(k))] + j[a_i(k) - 2\text{sign}(a_i(k))]|^4] / E[|[a_r(k) - 2\text{sign}(a_r(k))]|^2 + |j[a_i(k) - 2\text{sign}(a_i(k))]|^2] \quad (8)$$

비용 함수로 $J'(f)$ 로 표현 한다.

$$J'(f) = E[e'(k)]^2 \quad (9)$$

SGA(Stochastic Gradient Algorithm)를 이용하여 등화기 가중치 벡터 $f_c(k+1)$ 를 갱신한다.

$$f_c(k+1) = f_c(k) - \mu x^*(k)[y(k) - 2\text{sign}(y_r(k)) - j2\text{sign}(y_i(k))] \quad (10)$$

위의 수식 중에 (1),(7),(8),(9),(10)은 MCMA를 구성한다^[3], 그림 3에서 좌표 B점이 좌표 A점으로 확장되는 것을 보이고 위상의 변화가 나타나지 않는 것으로 보아 MCMA는 매우 효율적인 방법임을 알 수 있다. 그러나 그림 4를 보면 좌표 A점이 A1점으로 이동한 것을 볼 수 있고, 좌표 B점도 B1점으로 변화 하였다. 그렇기 때문에 전송된 신호가 좋지 위상이 변화 하여 좋지 않은 신호로 나타난다는 것을 볼 수 있다. 그렇지만, MCMA의 신호가 위상 변화 없이 깨끗한 신호를 검출 할 수 있다는 것을 볼 수 있다.

3. MDD (Modified decision-directed)

그림 2에서 위상의 변환이 없이 coordinate change된

좌표 B점(1,i)에서 원래의 좌표 A점(3,3i)으로 복원하여 판정 의거를 수행하여 등화기의 탭 계수 갱신에 사용하기 위한 추정 오차를 발생시키며 다음의 식과 같은 오류함수 $e'_D(k)$ 를 갖는다^{[5][6]}.

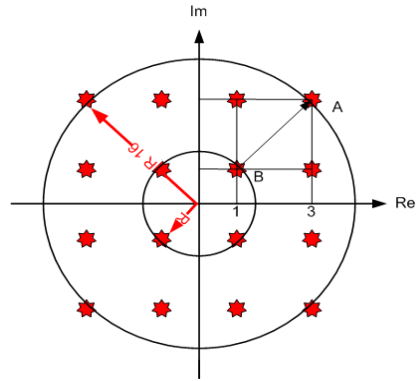


그림 2. 위상 변화 없는 MCMA
Fig. 2. MCMA with no phase rotaitons

$$e'_D(k) = [y_r(k) - 2\text{sign}(y_r(k))] + j[y_i(k) - 2\text{sign}(y_i(k)) - \hat{s}(k)] \quad (11)$$

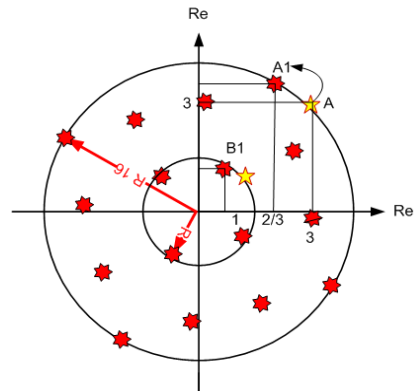


그림 3. 위상이 변환 MCMA
Fig. 3. MCMA with phase rotaitons

MDD의 비용 함수 J'_D 는

$$J'_D(f_D) = E[e'_D(k)]^2 \quad (12)$$

가 되며 이를 이용한 등화기의 가중치 벡터 $f(k+1)$ 은 다음과 같다.

$$f_D(k+1) = f_D(k) - \mu_D x^*(k) e'_D(k) \quad (13)$$

4. PMCMA-MDD 알고리즘

3과 4절에서 설명되어진 MCMA와 MDD를 병렬 구조로 적용한 적응 등화기의 구조를 그림 4에 나타내었다.

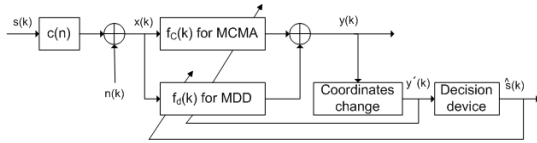


그림 4. PMCMA-MDD 구조
Fig. 4. Structure of PMCMA-MDD equalizer

각각의 부분의 계수 벡터를 정의 하면,

$$f_c(k) = [f_{c,0}(k), \dots, f_{c,N-1}(k)]^T$$

$$f_d(k) = [f_{d,0}(k), \dots, f_{d,N-1}(k)]^T$$

이다.

그리고 등화기의 출력 신호를 표현 하면,

$$y(k) = x^T(k) f_c(k) + x^T(k) f_d(k) \quad (14)$$

가 된다. 먼저 MCMA부분은 $y(k)$ 를 $y'(k)$ 얻기 위해서는 coordinate change 장치를 통과 시킨 후 $f_c(k)$ 를 갱신 시키면,

$$f_c(k+1) = f_d(k) - \mu_c x^*(k) e'(k) y'(k) \quad (15)$$

여기서 μ_c 는 MCMA 부분의 스텝 크기이다. 다음으로 MDD 부분의 등화기 출력 신호를 나타내면,

$$\tilde{y}(k) = x^T(k) f_c(k+1) + x^T(k) f_d(k) \quad (16)$$

각각의 $\tilde{y}'(k)$ 와 $y'(k)$ 를 얻기 위해서는 $y(k)$ 와 $\tilde{y}(k)$ 를 coordinates change에서 변환을 시키며, 판정의 거에 의해서 $\tilde{s}(k)$ 에서 $\hat{s}(k)$ 을 얻을 수 있다.

$$\tilde{s}(k) = \hat{s}(k) \quad (17)$$

판정의거에 의해서 $\hat{s}(k)$ 정확한 출력이 나온다면,

MDD 부분은 그림 5에서 보았듯이 $(\pm 1, \pm j)$ 범위에서 보다 $(\pm 3, \pm 3j)$ 이어서 더 정확한 출력이 나온다는 것을 볼 수 있으며 MDD의 탭 가중치 벡터의 갱신식은 다음과 같다.

$$f_d(k+1) = f_d(k) - \mu_d x^*(k) e'_D(k) \quad (18)$$

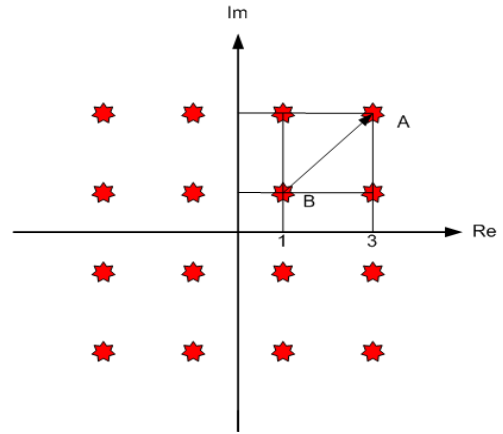


그림 5. MDD의 coordinate change
Fig. 5. Coordinates change of MDD

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 제안된 PMCMA-MDD의 성능이 기존 MCMA 보다 우월함을 보이기 위해 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위해 송신측에서 16-QAM을 발생 시킨 후 다음과 같은 임펄스 응답을 갖는 채널을 통과 시킨 후 SNR이 30dB와 40dB가 되도록 잡음을 부과하는 수신 신호 $x(k)$ 를 얻었고, 성능을 비교를 한다. 이 신호를 이용하여 그림 1의 등화기 입력 신호로 사용하였고, 이때 적응 등화기의 알고리즘으로는 CMA, CMA-DD, MCMA, MCMA-DD, PMCMA-MDD의 5가지를 적용하였으며, 이때 적용된 스텝 크기는 $\mu_c = 0.00025$ 와 $\mu_d = 0.0095$ 이다. 스텝 크기에서 첨자 c와 d는 CMA와 DD를 나타내며, 신호를 통과하는 채널 임펄스 응답은 $c(n)$ 은 다음과 같다.

$$c(n) = [-0.005 - 0.004j, 0.009 - 0.3j, -0.0024 - 0.104j, 0.854 + 0.52j, -0.218 + 0.273j, 0.049 - 0.074j, -0.16 + 0.2j]^T$$

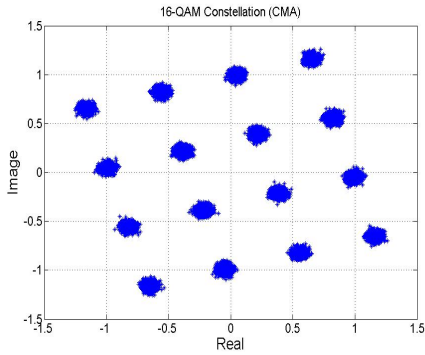


그림 6. CMA 신호 성상도
Fig. 6. Constellation by CMA signal

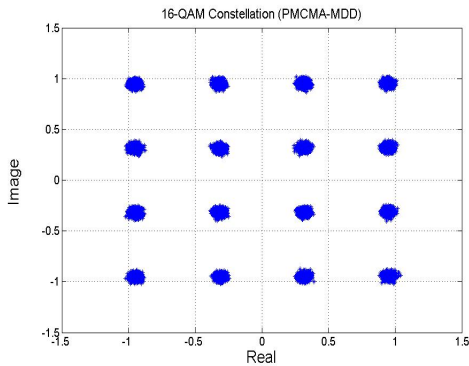


그림 7. PMCMA-MDD에 의한 신호 성상도
Fig. 7. Constellation by PMCMA-MDD signal

다음의 그림 6과 7은 CMA와 PMCMA-MDD를 적용할 때, 등화기 출력 신호 $y(k)$ 의 16-QAM 신호 성상도를 나타낸 것이다. 그림 6에서 CMA는 오차 신호가 위상 정보를 포함 하지 않기 때문에 등화 후 수렴된 신호점은 채널 특성과 반송파 주파수 옵셋에 의해 위상 오차를 갖는 형태가 된다. 그러나, 그림 7 PMCMA-MDD는 비용 함수가 등화기의 출력의 위상 성분을 포함하기 때문에 원 송신 데이터의 각 심벌 주위에 군집들을 형성하고, 등화가 진행이 되면서 이 군집들을 심벌 주위의 보다 작은 구간으로 모이게 한다. 결국 이 등화기는 함께 복하여 위상 회전이 복원된 신호점에 수렴하는 steady state가 된다. 그래서 PMCMA-MDD는 진폭 및 위상 복원이 되는 것으로 보아 CMA 보다 우월한 보상이 이루어짐을 알 수 있으며, 성능을 확인하기 위한 지수로는 잔류 ISI(Residual ISI)를 사용 한다. 잔류 ISI는 통신 채널의 필터 계수 h_k 와 적응 등화기의 계수 w_k 라면 다음과

같이 정의되며 적응 등화기가 채널 찌그러짐을 제거하고 남은 잔류량을 나타낸 것으로 널리 사용되므로 본 논문에서도 이를 사용하였다.

$$\text{잔류ISI}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_i |h_k \odot w_k|^2 - |h_k \odot w_{k_{\text{max}}}|^2}{|h_k \odot w_{k_{\text{max}}}|^2} \right]$$

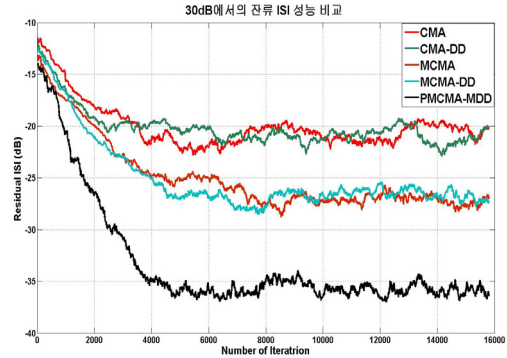


그림 8. 30dB에서의 잔류 ISI 성능 비교
Fig. 8. Residual ISI performance comparisons of 30dB

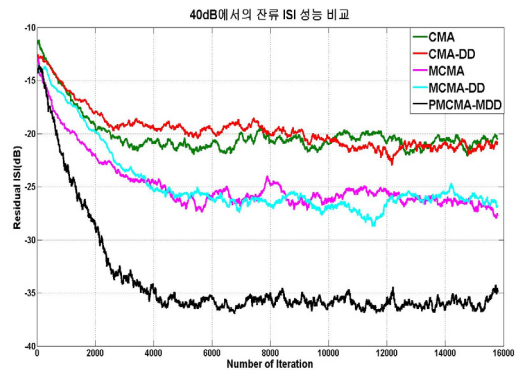


그림 9. 40dB에서의 잔류 ISI 성능 비교
Fig. 9. Residual ISI performance comparisons of 40dB

그림 8와 그림 9는 제안된 PMCMA-MDD가 기존의 CMA와 CMA-DD, MCMA 그리고 MCMA-DD 알고리즘 보다 우월한 성능을 보이기 위해 잔류 ISI를 반복 횟수 (Iteration)에 대하여 나타낸 것이다. 이를 위해 16000개의 16-QAM 신호를 발생시키면서 10회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행하였다. SNR이 30dB인 그림 8에서 초

기 수렴 속도 측면에서는 정상 상태(-18dB)에 도달 할 때까지는 PMCMA-MDD에서는 750회, MCMA-DD에서는 1210회, MCMA에서는 1250회, CMA-DD에서는 2000회, 그리고 CMA에서는 1600회가 필요하게 되어 제안 방식인 PMCMA-MDD가 CMA 보다 약 2.1배의 빠른 수렴 속도를 가짐을 알 수 있었다. 또한 잔류 ISI 양 측면에서는 CMA는 정상 상태에서 ISI가 크다. 동시에 PMCMA-MDD는 정상 상태에서 CMA에 비해 17dB이상 개선이 되고, MCMA-DD는 12dB, MCMA는 9dB, 그리고 CMA-DD보다는 4dB이상 개선을 하였다. 그리고 SNR 40dB인 그림 9.에서 초기 수렴 속도 측면에서는 정상 상태까지 비교를 하면 CMA에서는 1520회 CMA-DD는 1910회 MCMA는 610회 MCMA-DD는 1420회 그리고 PMCMA-MDD는 500회가 되어 제안방식인 PMCMA-MDD가 CMA보다 3배 정도의 빠른 수렴 속도를 가짐을 알 수 있어, CMA 정상 상태에서는 ISI가 크다. 동시에 PMCMA-MDD는 정상 상태에서 CMA에 비해 18dB이상 개선이 되고, MCMA-DD는 9dB, MCMA는 8dB, 그리고 CMA-DD보다는 3dB이상 개선을 하였다. 위의 결과 SNR=30dB 보다 40dB일 때, 다른 방식 비해 PMCMA-MDD가 정상 상태까지의 수렴 속도가 더 개선되지만, 정상 상태에서의 잔류 ISI양은 다른 등화기 성능 차이가 없어서 SNR에는 큰 영향이 없는 다른 방식보다 매우 성능이 우수하다는 것을 나타낸다.

IV. 결론

본 논문은 디지털 부호를 전송 할 때 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭 영향을 제거하고 부가잡음의 영향을 최소화시키기 위하여 사용되는 적응등화기의 성능 개선에 관한 것으로서 기존 방식인 CMA를 개선한 PMCMA-MDD 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 성능 비교를 위하여 16-QAM 신호를 발생한 후 채널을 통과시켜 수신 신호를 획득하였으며, 각 알고리즘의 동일 한 스텝 크기 및 SNR을 적용하여 시뮬레이션을 수행하여 성능을 평가 하였다. 시뮬레이션 결과를 통하여 제안한 방식인 PMCMA-MDD가 SNR이 30dB, 40dB 인 경우 CMA 방식 보다 2.1~3배 정도의 빠른 수렴 속도를 가지며, 잔류 ISI양에서도 17~18dB정도 개선됨을 알 수 있다. 현재 적응 등화를 위한 여러 가지 알고리즘 중

에서 연산량이 가장 적은 특징을 갖는 MCMA 알고리즘의 특성을 더욱 개선하므로서 고속 무선망을 통한 광대역 정보를 전송할 때 발생하는 찌그러짐을 빠른 속도로 보상할 수 있을 것으로 기대 되고, 공간 상태의 시변 특성과 다중 경로의 경우 성능 개선에 기여 할 것이다.

참고 문헌

- [1] A.L.Sayed, Fundamentals of Adaptive Filtering, Wiley-Interscience, 2003
- [2] Wei Rao, Kang-min Yuan, Ye-cai Guo and Chao Yang, "A simple constant modulus algorithm for blind equalization suitable for 16-QAM signal", the 9th international conference on signal processing, vol. 2, pp.1963-1966, 2008.
- [3] F. C. C. De Castro, M. C. F. De Castro and D. S.Arantes, "Concurrent blind deconvolution for channel equalization," in ICC'2001, Vol. 2, pp. 366-371, Helsinki, Finland, June 11-15, 2001.
- [4] Wei Rao, Wen-qau Tan, Da-she Li, Guo-xing Dai "Concurrent Blind Equalization Suitable for 16-QAM", IEEE Trans. Commun., Nov. 2009.
- [5] C. R. Johnson Jr., P. Schniter, I. T. Endres, et al., "Blind equalization Using the Constant Modulus Criterion: A Review," Proceedings of the IEEE, vol. 86, No. 10, pp. 1927-1949, 1998.
- [6] 임승각, 강대수, "Constellation Matching 기법을 이용한 CMA 블라인드 적응 등화기의 성능 개선", 한국인터넷 방송통신학회 논문지, pp.121~127,
- [7] 임승각, "16-QAM 신호에 대한 CR-CMA와 CM-CMA의 적응 등화 성능 비교", 한국 인터넷 방송통신학회 논문지.

저자 소개

윤 재 선(준회원)



- 2002년 관동대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 2006년 홍익대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 2009년 공주대학교 정보통신공학과 박사 과정
- 2009년~현재 공주대학교 정보통신공

학과 박사 과정

<주관심분야 : 적응필터, 이동통신, 재난통신>

임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2003년~현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수.

<주관심분야 : 통신/방송 시스템, 이동통신>