

M-ary QAM 신호를 적용한 다단계 MCMA 블라인드 등화 기법

정희원 김성미*, 조주필*, 백흥기**

Multi-level MCMA Blind Equalization Technique using M-ary QAM signal

Sung Mi Kim*, Cho Ju Phil*, Heung Ki Haik** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 M-ary QAM를 시스템에 적용할 때 발생하는 문제점을 보완하기 위한 방법을 제시한다. 기존의 CMA는 크게 두 가지의 문제점을 가지는데 첫째, M의 크기가 4를 초과할 경우에는 수렴 성능이 저조하여 등화기의 성능이 떨어지며 둘째, 수렴 후 위상이 왜곡되는 점이다. 이를 보완하기 위하여 16-QAM 변조 방식을 적용한 신호의 등화시 변조된 신호에 따라 일정한 구간을 정한 다음 이에 따라 등화하는 방식을 달리함으로써 심볼간 간섭을 줄이고 등화 성능을 높이도록 하였다. 모의 실험에서는 residual ISI를 이용하여 성능이 향상됨을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, the method which compensates the problem occurred in case M-ary QAM is applied to system is proposed. The conventional CMA has two problems, First, when M is larger than 4, it has a poor performance of equalizer due to a degradation of convergence property. Second, the phase of conventional CMA is distorted after convergence. To compensate these problems, we set the proper interval according to modulated signal when the signal using 16-QAM modulation method is equalized and use a different equalizing method for each interval. Using this method, the ISI is reduced and the performance of equalizing is improved. Also, the computer simulation using residual ISI shows an improved performance.

1. 서론

무선 통신과 같이 심볼간 간섭(intersymbol interference; ISI)이 심한 환경에서 한정된 대역폭으로 효과적인 통신 시스템을 운영하기 위해서는 통신 시스템의 송신단 부분에 적응 등화기가 필수적으로 요구된다. 등화 방법중 훈련 신호를 이용하는

등화 기법은 효과적인 성능을 보이며 광범위하게 사용되고 있으나 몇 가지 단점을 가지고 있다. 구조

적으로 송신단에서 복잡성이 증가할 수 있으며, 원하는 데이터와는 관계없는 신호를 필요로 함으로써 경제적으로 부담을 줄 수 있다. 이러한 점은 특히 대량의 데이터를 송신해야 하는 경우에는 더 큰 부담으로 작용할 수 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 들어 훈련 신호를 사용하지 않는 블라인드 등화기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 블라인드 등화기가 갖는 장점으로는 첫째, 통신 시스템 작동중 오류로 인해 도중에 송신이 중단되었

* 전북대학교 전기전자회로 합성연구소

** 전북대학교 공과대학 전자정보공학부

논문번호 : 00210-0615, 접수일자 : 2000년 6월 15일

을 경우 처음부터 훈련 신호를 다시 보내주어야 하는 점을 극복할 수 있으며 둘째, 일대일(point-to-point) 통신 시스템이 아닌 다중 시스템인 경우 다른 접속자가 발생할 경우 다시 훈련 신호를 보내주지 않아도 되고 셋째, 훈련 신호를 사용함으로써 발생하는 경제적 손실을 줄일 수 있으며 넷째, 기존의 적응 등화기가 신호열을 정확히 알고있어야 하는 반면, 블라인드 등화기는 신호의 통계적 확률 분포치만을 이용하기 때문에 원하는 응답을 필요로 하지 않는다는 점을 들 수 있다.

Bussgang에 의해 처음 제안된 블라인드 개념을 바탕으로 1975년경 Sato^{[1][2]}가 처음으로 블라인드 알고리즘을 제안하였다. Sato에 의해 제안된 알고리즘은 일차원 신호를 위한 방법으로 PAM 신호를 위한 것이었다. 이러한 초기의 블라인드 알고리즘을 이차원 성상도를 위한 QAM 신호에 적용한 방법이 1980년경 Godard^{[1][2]}에 제안되었으며 Godard 알고리즘 중 특별한 경우가 CMA이다.

본 논문에서는 M -ary QAM 변조 방식을 적용한 이차원 신호 등화시 M 이 4이상일 때 등화 성능이 떨어지는 단점을 보완하기 위하여 CMA를 수정한 방법을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 등화시 발생하는 위상 뒤러짐을 복원하기 위하여 신호의 in-phase 부분과 quadrature 부분을 각기 따로 적용하는 기존의 방법을 이용하였다. 그 후에 각각의 성상점을 중심으로 일정한 구간을 정한 다음 구간별로 등화 방식을 달리하는 방법을 적용하는 등화 방법을 제안하였다.

II. MCMA 알고리즘

2.1 CMA

블라인드 알고리즘은 Bussgang에 의해 처음 제안된 블라인드 개념을 바탕으로 Sato와 Godard에 의해 발전되었다. 그림 1은 블라인드 등화기의 기본 블럭도를 나타낸 것으로 채널을 통과한 신호는 블라인드 알고리즘을 통하여 등화된다.

Sato 알고리즘은 PAM 신호에 대한 블라인드 알고리즘으로 등화기의 탭 가중치를 조절하는데 있어 오차 신호의 형성시 신호의 부호만을 사용한다. 일차원 신호를 위한 Sato 알고리즘과는 달리 Godard 알고리즘은 이차원의 신호 성상도를 갖는 신호를 위한 방법으로 제안되었다. Godard는 이 알고리즘에서 채널 등화와 반송파의 위상 복원을 동시에 행하는 방법을 제시하였다. 이에 따른 접근 방식은 대부

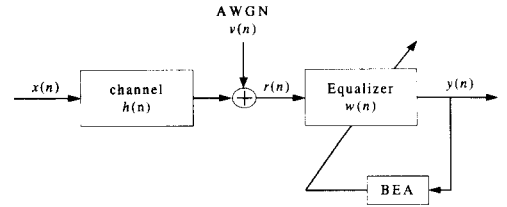


그림 1. 블라인드 등화 시스템의 기본 모델

분의 블라인드 알고리즘과 마찬가지로 비용함수의 변형에 의한 것으로 신호열의 성장도와 반송파 위상에 새로운 신호열을 잡아보는 것으로 신호열의 앙상블 평균을 이용한 상수를 비용함수에 적용하는 방법이다. 이 때 상용된 비용함수는 식 (1)과 같다.

$$J(n) = E[(|y(n)|^p - R_p)^2] \quad (1)$$

여기서 p 는 양의 정수를 나타내며 R_p 는 양수의 최소값으로 등화가 완전히 이루어진 후, 비용함수를 최소화하는 방향으로 설정되며 식 (2)와 같다.

$$R_p = \frac{E[x(n)^{2p}]}{E[x(n)^2]^p} \quad (2)$$

CMA는 Godard 알고리즘 중 특수한 경우로 $p=2$ 인 경우를 나타내며 이 때의 비용함수 $J(n)$ 과 상수값 R_2 는 식 (3),(4)와 같다.

$$J(n) = E[(|y(n)|^2 - R_2)^2] \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{E[x(n)^4]}{E[x(n)^2]^2} \quad (4)$$

참고로 16-QAM 신호의 성상도에서 R_2 가 그림 2에 나타나 있다.

CMA 알고리즘의 탭 갱신은 LMS 알고리즘을 이용하여 이루어지며 식 (5)와 같다.

$$w(n+1) = w(n) + \mu e^*(n) x(n) \quad (5)$$

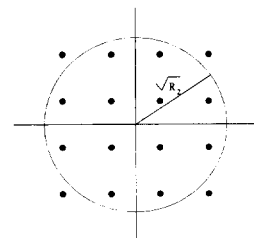


그림 2. 16-QAM 신호에서의 R_2

여기서 μ 는 등화기의 스텝 크기를 나타내고 $x(n)$ 은 채널의 입력값, $e(n)$ 은 오차 신호를 나타내며 식 (6)과 같이 주어진다. 또한 등화기의 출력값은 $y(n)=x(n)*u(n)$ 으로 나타낼 수 있다.

$$e(n) = y(n)[R_2 - |y(n)|^2] \quad (6)$$

이와 같이 비용함수를 변형시킨 CMA는 초기 알고리즘 중 가장 수렴 속도가 빠른 알고리즘으로 알려져 있다. 그러나 비용함수의 변형으로 인한 국부 최소점의 존재로 초기 수렴후의 정상 상태에서의 평균 자승 오차가 상당히 크고 기존의 CMA만으로는 위상의 뒤를림을 완전히 복원할 수 없다는 단점이 있다. 또한 M 의 크기가 4를 초과하는 경우, 즉 정상점의 레벨이 다중인 경우에는 수렴 성능이 떨어진다는 단점이 있다. 이는 여러 개의 레벨에 비해 인수들을 조정하는 상수값이 하나이어서 그 평균적 위치로 수렴하기 때문이다. 이러한 문제점들을 보상하기 위해 여러 가지 수정된 CMA들이 제안되고 있다^{[6]~[9]}.

2.2 MCMA(modified CMA)

기존의 MCMA 방법중 하나로 위상 복원을 위해 신호를 in-phase와 quadrature로 나누어 등화하는 방법이 있다^[4]. 이 방법을 적용한 경우의 비용함수 또한 두 가지로 나누어지며 식 (7)~(9)로 나타낼 수 있다.

$$J(n) = J_I(n) + J_Q(n) \quad (7)$$

$$J_I(n) = E[(|y_I(n)|^2 - R_{2I})^2] \quad (8)$$

$$J_Q(n) = E[(|y_Q(n)|^2 - R_{2Q})^2] \quad (9)$$

등화기를 출력한 값을 $y(n)$ 이라 할 때, $y_I(n)$ 과 $y_Q(n)$ 은 각각 in-phase와 quadrature 부분을 나타낸다. 이에 따라 두 경우의 R_2 를 나타내면 식 (10)과 같다.

$$R_{2I} = \frac{E[x_I(n)^4]}{E[x_I(n)^2]^2}, \quad R_{2Q} = \frac{E[x_Q(n)^4]}{E[x_Q(n)^2]^2} \quad (10)$$

마찬가지로 오차 신호도 다음과 같이 in-phase 부분과 quadrature 부분으로 나눌 수 있다.

$$e(n) = e_I(n) + je_Q(n) \quad (11)$$

$$e_I(n) = y_I(n)[R_{2I} - |y_I(n)|^2] \quad (12)$$

$$e_Q(n) = y_Q(n)[R_{2Q} - |y_Q(n)|^2] \quad (13)$$

III. 제안한 알고리즘

지금까지의 알고리즘은 M-ary QAM 신호에 단일 레벨일 때의 CMA만을 적용하여 등화한 경우이다. 그러나 신호의 정상점이 다중 레벨을 지나는 경우에는 CMA의 등화 성능이 떨어진다.

이 절에서는 이러한 단점을 극복하기 위한 MCMA 방법을 제안한다. 이 방법은 상수 R_2 를 정상점의 레벨에 따라 바꾸어줌으로써 등화 성능을 향상시키도록 하였다. 정상점간의 레벨을 나타내면 그림 3과 같다.

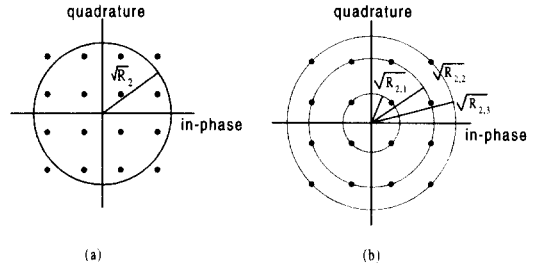


그림 3. 16-QAM에서의 신호 정상도와 상수값 (a) 단일레벨, (b) 다중레벨

그림 4에서 볼 수 있듯이 각각의 정상점을 중심으로 일정한 구간을 정한 다음 그 구간안에 속해 있는 등화기의 출력값은 그에 해당하는 정상점으로 등화가 되도록 하였다. 그 외의 구간에 해당하는 등화기의 출력값은 일반적인 단일 레벨의 CMA 방식에 따라 등화가 되도록 하였다. 이 때의 R_2 의 값을 살펴보면 식 (14),(15)와 같다.

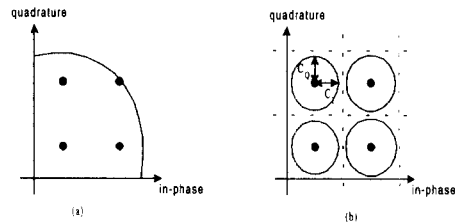


그림 4. 제안한 알고리즘의 16-QAM에서의 상수값 (a) 단일레벨, (b) 다중레벨

$$R_{2I} = |\hat{a}_I(n)|^2 \quad \text{for } y_I(n) \in C_I \quad (14)$$

$$R_{2Q} = |\hat{a}_Q(n)|^2 \quad \text{for } y_Q(n) \in C_I \quad (15)$$

여기서 \hat{a}_I 와 \hat{a}_Q 는 다중 레벨의 경우에 등화시 등화기의 출력 $y_I(n)$ 과 $y_Q(n)$ 에서 가장 가까운 정상점을 나타낸다. 그리고 C_I 와 C_Q 는 상수 R_2 값의 교환지점을 구분하는 인자로 두 인접 구간 사이의 거리를 나타내는 것이며 최대 크기는 두 인접한 정상점 사이의 거리의 절반으로 식 (16)과 같다. 여기서 $C_I = C_Q = 0$ 이면 단일레벨만을 적용한 기존의 CMA 방식과 같아진다.

$$0 \leq C_I \leq 1, \quad 0 \leq C_Q \leq 1 \quad (16)$$

이에 따른 오차 신호는 식 (17),(18)과 같다.

$$e_I(n) = y_I(n) \{y_I^2(n) - \hat{a}_I^2(n)\} \quad (17)$$

$$e_Q(n) = y_Q(n) \{y_Q^2(n) - \hat{a}_Q^2(n)\} \quad (18)$$

따라서 단일레벨과 다중레벨의 경우를 종합적으로 적용해 보면 식 (19)~(28)이 나타낼 수 있다.

$$J(n) = J_I(n) + J_Q(n) \quad (19)$$

$$J_I(n) = E[\{y_I(n)^2 - R_{2I}\}^2] \quad (20)$$

$$J_Q(n) = E[\{y_Q(n)^2 - R_{2Q}\}^2] \quad (21)$$

$$R_{2I} = \begin{cases} |\hat{a}_I(n)|^2 & \text{for } y_I(n) \in C_I \\ \frac{E[x_I^4(n)]}{E[x_I^2(n)]} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

$$R_{2Q} = \begin{cases} |\hat{a}_Q(n)|^2 & \text{for } y_Q(n) \in C_Q \\ \frac{E[x_Q^4(n)]}{E[x_Q^2(n)]} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

$$e(n) = e_I(n) + je_Q(n) \quad (24)$$

$$e_I(n) = \begin{cases} y_I(n) \{y_I^2(n) - \hat{a}_I^2(n)\}, & \text{for } y_I(n) \in C_I \\ y_I(n) \{y_I^2(n) - R_{2I}\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (25)$$

$$e_Q(n) = \begin{cases} y_Q(n) \{y_Q^2(n) - \hat{a}_Q^2(n)\}, & \text{for } y_Q(n) \in C_Q \\ y_Q(n) \{y_Q^2(n) - R_{2Q}\}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (26)$$

$$w(n+1) = w - 4\mu e^*(n) x(n) \quad (27)$$

IV. 모의 실험 및 결과

본 절에서는 제안한 알고리즘과 앞에서 언급하였던 여러 알고리즘을 모의 실험을 통하여 성능을 비교하였다. 실험에 사용된 입력 신호는 16-QAM을 거쳐 변조된 신호이고 iid(independently and identically distributed) 심볼이라고 가정한다. 등화기의 탭 수는 여러 번의 실험 과정을 거쳐 실험상 가장 좋은 성능을 나타내는 크기로 정하여 탭 수가 31탭 인 선형 트랜스버설 필터를 이용하였다. 실험에 사용된 스텝 크기는 1×10^{-4} 을 적용하였고 SNR은 등화기의 신호 입력시 30dB가 되도록 하였다.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{E[x(n) * h(n)]^2}{\sigma_v^2} \quad (29)$$

여기서 $h(n)$ 은 전송된 채널의 임펄스 응답과 동일하며 σ_v^2 은 부가 잡음의 분산을 나타내는 것으로 1로 되고 각 알고리즘의 등화 성능을 측정하기 위하여 각각의 경우마다 앙상블 평균을 취한 residual ISI를 이용하였으며 식 (30)과 같이 정의된다.

$$ISI = \frac{\sum_n |h(n) * w(n)|^2 - |h(n) * w(n)|_{\max}^2}{|h(n) * w(n)|_{\max}^2} \quad (30)$$

여기서 $|h(n) * w(n)|_{\max}^2$ 는 채널의 임펄스 응답 $h(n)$ 과 등화기의 탭 계수 $w(n)$ 의 컨볼루션으로 이루어진 값 중 가장 최대값을 나타낸다. 이 때 식 (30)의 ISI가 0이 되면 등화가 완벽하게 이루어진 것으로 볼 수 있다. 그림 11에서는 구간의 변화에 따른 제안한 알고리즘의 residual ISI의 값을 측정하기 하기 위한 실험의 결과를 나타낸 것이다. 결과 그림에서 볼 수 있듯이 C가 0.3 이하일 때에는 초기 수렴시 residual ISI는 안정적이나 수렴 후의 성능이 만족스럽지 못한 것을 알 수 있다. 그리고 C가 0.9이상일 경우에는 초기 수렴시 residual ISI가 다른 결과에 비해 좋지 않으나 과도 상태 이후에는 ISI 제거 능력이 좋은 것을 볼 수 있으며 실험 치중 가장 안정한 값을 나타내는 것은 0.7일 때이다. 이러한 실험 결과에 따라 제안한 알고리즘에 대한 실험에서 $C_I = C_Q = 0.7$ 로 하여 실험하였다. 그리고 이중 모드 블라인드 등화, 즉 CMA-DD 알고리즘의 실험시에는 MCMA의 경우와 같은 인자를 사용하였으며 여기서 사용된 Z_I 와 Z_Q 는 모두 0.5

를 적용하였다⁵⁾.

본 실험에 사용된 채널에 대한 임펄스 응답은 표 1과 같다. 각각의 채널은 null의 정도에 따라 다른 특성을 보이고 있으며 null의 깊이가 깊을수록 채널을 통과한 수신 성분의 등화가 어렵다.

표 1. 실험에 사용된 채널

Channel 1	$h_1(n) = [0.18, -0.505 + j0.451, 0.433 - j0.541, 0.108 - j0.126]$
Channel 2	$h_2(n) = [0.1632 + j0.2056, -0.9491 + j0.1523, 1, 0.2393 + j0.0077]$
Channel 3	$h_3(n) = [0.4152 - j0.7648, 1, 0.2731 - j0.3278, -0.0984 - j0.7485, 0.743 + j0.1748]$
Channel 4	$h_4(n) = [1 - j0.4, 1.5 + j1.8, 1, 1.2 - j1.3, 0.8 + j1.6]$
Channel 5	$h_5(n) = [2 - j0.4, 1.5 + j1.8, 1, 1.2 - j1.3, 0.8 + j1.6]$

그림 5에서는 채널 1을 적용한 신호의 경우 각각의 알고리즘에 관한 등화 성능을 정상도로 나타낸 것으로 정상점을 중심으로 분포된 수신 신호를 기준으로 판단할 때 기존의 다른 알고리즘에 비해서 등화 성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 그림 6은 채널 1을 적용한 경우 각 알고리즘의 residual ISI를 측정하여 기존의 다른 알고리즘과 비교할 때 약 8dB 정도가 향상된 것을 볼 수 있다. 또한 그림 7과 같이 SNR이 낮은 경우에도 앞의 경우와 마찬가지로 결과를 볼 수 있다. 또한 DD 모드만을 적용한 경우의 다중레벨 MCMA의 알고리즘이 수렴 상태가 불안정한 반면 제안한 알고리즘은 비교적 안정한 상태라는 것을 볼 수 있다. 그림 8~10은 Sato 알고리즘, 이중 모드 CMA와 제안한 알고리즘에 서로 다른 4개의 채널을 적용하여 실험한 결과를 나타낸다. 각 채널별로 실험 결과값을 살펴보면, 채널 1과 채널 2의 경우에는 비교한 다른 알고리즘에 비해 성능이 최소 8dB 이상 향상된 것을 볼 수 있다. 그러나 채널 3, 4의 경우에 Sato 알고리즘과 비교시에는 ISI 제거 능력이 좋으나 이중모드 CMA의 경우에는 거의 같은 값을 나타낸다.

그림 12는 채널의 변화가 빠르고 null이 깊은 경우의 채널 환경을 적용하여 각각의 알고리즘에 대해 실험한 결과이다. 초기 수렴 상태에서 ISI 제거 능력이 다른 알고리즘에 비해 떨어지거나 수렴 후에는 성능이 비교적 좋은 것을 볼 수 있다.

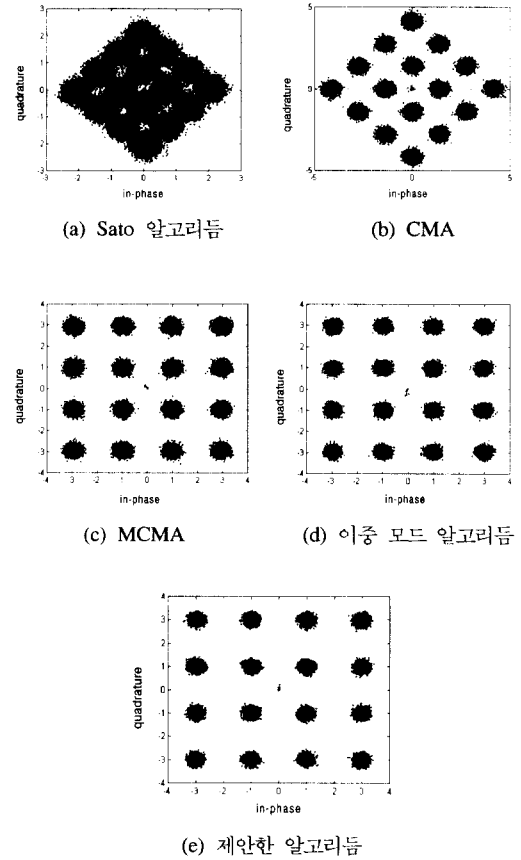


그림 5. 각각의 알고리즘에 16-QAM을 적용한 경우의 정상도: 채널 1

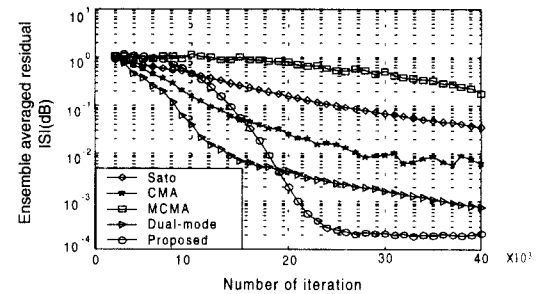


그림 6. 각 알고리즘별 residual ISI(dB): 채널 1, SNR 30dB

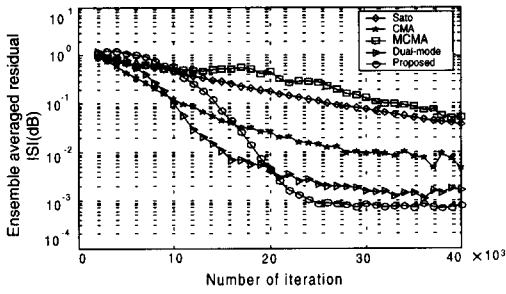


그림 7. 각 알고리즘별 residual ISI(dB); 채널 1, SNR 25dB

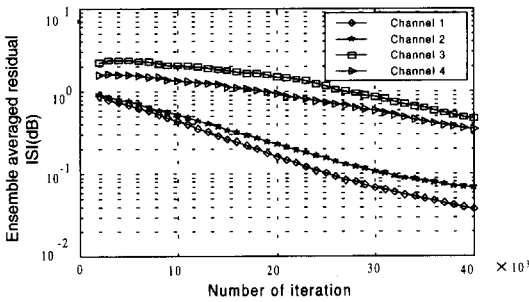


그림 8. Sato 알고리즘의 채널별 residual ISI(dB); SNR 30dB

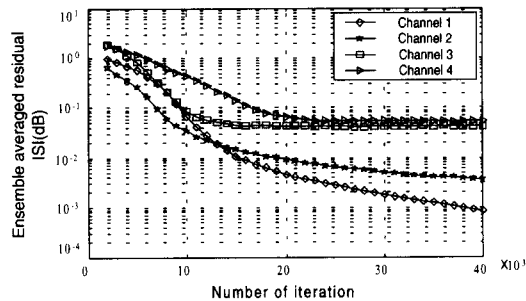


그림 9. 이중 모드 CMA의 채널별 residual ISI(dB); SNR 30dB

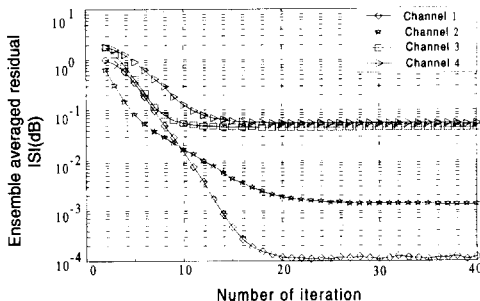


그림 10. 제안한 알고리즘의 각 채널별 residual ISI(dB); SNR 30dB

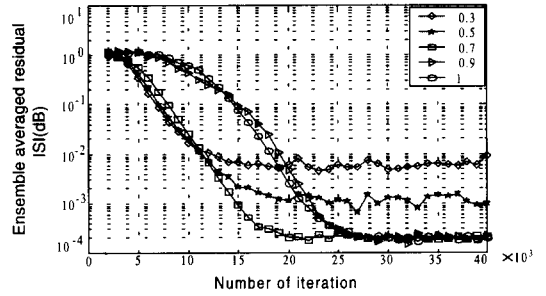


그림 11. 제안한 알고리즘에 서로 다른 C_L, C_Q 을 적용한 경우의 residual ISI(dB) : 채널 1, SNR 30dB

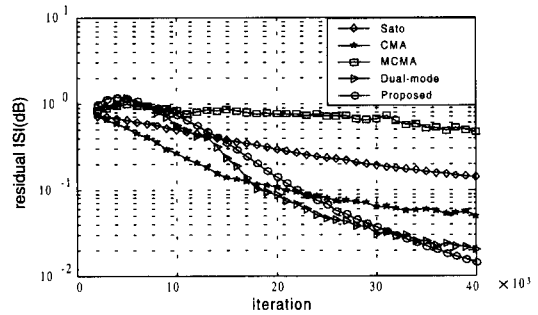


그림 12. 각 알고리즘별 residual ISI(dB); 채널 4, SNR 30dB

V. 결론

본 논문에서는 M -ary QAM 신호와 같이 여러개의 반지름을 갖는 다중레벨에서 기존의 CMA가 갖는 단점을 보완하기 위하여 수정된 방법을 제안하였다.

실험 결과를 비교해 보면, 기존의 블라인드 방식들과 이중 모드 블라인드 등화 기법들과 제안한 알고리즘을 비교하여 보았을 때 제안한 알고리즘의 등화 성능이 향상되었음을 볼 수 있다. 또 residual ISI 측면에서 비교해 볼 때 다른 알고리즘에 비하여 수렴 속도가 빠름을 볼 수 있으며 DD 모드만을 적용한 CMA의 경우와 비교하여 보았을 때도 초기 수렴 성능이 안정함을 볼 수 있다. 그림 12에서 볼 수 있듯이 각기 다른 신호를 적용했을 때의 실험 결과를 살펴볼 경우, 기존의 다른 블라인드 등화 알고리즘에 비하여 제안한 알고리즘이 채널의 변화에 덜 민감한 것을 볼 수 있다. 위의 실험 결과를 토대로 살펴보면 CMA 블라인드 기법을 이용한 등화시 수렴 속도 측면이나 성능 향상을 위해 제안한 알고리즘을 이용할 수 있을 것이다. 하지만 null이 깊은

채널 환경에서는 초기 수렴 상태가 불안정하는 등 수렴 성능이 뚜렷한 향상을 보이지는 못하였다. 따라서 등화 초기시 수렴 상태가 좀 더 안정하고 실제 무선 채널 환경에서 통화 품질은 보장할 수 있는 블라인드 등화 기법에 대한 연구가 더 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

[1] J. G. Proakis, *Digital Communication*. 3e., New York. NY. McGraw-Hall, 1995.

[2] S. H. Qureshi, "Adaptive equalization," *Proc. IEEE*, vol. 73, no. 9, Sep. 1985.

[3] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory*. 3e., Prentice-Hall International. Inc.

[4] K. N. Oh and Y. O. Chin, "New blind equalization techniques based on constant modulus algorithm," *Proc. IEEE. Globecom'95*, vol. 2, pp. 865-869, 1995.

[5] J. C. Lin and L. S. Lee, "A modified blind equalization techniques based on a constant modulus algorithm," *Proc. IEEE ICC'98*, vol. 1, pp. 344-348, 1998.

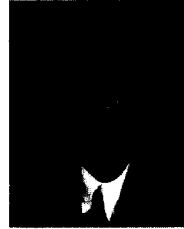
[6] F. R. Cavalcanti, "A predictive constant modulus algorithm for blind equalization in QAM systems," *Proc. IEEE ICC'97*, vol. 2, pp. 1080-1084, 1997.

[7] J. R. Treichler and B. G. Agee, "A new approach to multipath correction of constant modulus signals," *IEEE Trans. ASSP*, vol. 31, pp. 459-472, Apr. 1983

[8] R. A. Kennedy and Z. Ding, "Blind adaptive equalizers for quadrature amplitude modulated communication systems based on convex cost function," *Optical Engineering*, vol. 31, pp. 1189-1199, June 1992.

[9] J. J. Werner, J. Y. Yang, and D. D. Harman, "Blind equalization for broad-band access," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 37, no. 4, pp. 87-93, Apr. 1999.

김 성 미(Sung-mi Kim)



1998년 2월 : 전북대학교
전자공학과 졸업
2000년 2월 : 전북대학교
전자공학과 석사
2000년 3월~현재 : 전북대학교
전기전자회로
합성연구소

<주관심 분야> 통신신호처리, VLSI 설계 등

조 주 필(Ju-phil Cho)



1992년 2월 : 전북대학교
정보 통신공학과 졸업
1994년 2월 : 전북대학교
전자공학과 석사
1994년 3월~현재 : 전북대학교
전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 적응신호처리, OFDM, VLSI 설계 등

백 흥 기(Heung-ki Haik)

정회원



1987년 2월 : 서울대학교
전자공학과 졸업
1979년 2월 : 서울대학교
전자공학과 석사
1987년 3월 : 서울대학교
전자공학과 박사

1981년 6월~현재: 전북대학교 교수

<주관심 분야> 적응신호처리, 비선형 신호처리, 통신신호처리 등