

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.3.63>

IIBC 2014-3-9

위상 보상을 위한 개선된 CMA 적응 등화 알고리즘

Adaptive Equalization Algorithm of Improved-CMA for Phase Compensation

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 다중 경로 페이딩과 대역폭 제한 특성을 갖는 채널에서 부호간 간섭을 제거시킬 수 있는 CMA 적응 등화기에서 위상 보상이 가능한 I-CMA (Improved-CMA) 알고리즘에 관한 것이다. 기존 CMA 알고리즘의 오차 신호를 얻기 위한 비용 함수를 개량하여 진폭과 위상의 동시 제거가 가능토록 새로운 비용 함수가 제안되며 이의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션 확인하였다. 알고리즘의 단순성과 등화 후 위상 보상을 위한 별도의 PLL을 제거할 수 있는 장점을 가지며, 이를 위해 수신측에서의 등화기 출력 신호인 복원된 신호 정상도, 수렴 성능을 나타내는 성능 지수인 잔류 isi 및 MD (Maximum Distortion) 특성 곡선과 채널과 등화기의 종합 주파수 특성을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 I-CMA가 복원 정상도에서 진폭과 위상 보상 능력이 CMA보다 우월하였지만, 수렴 시간에서는 동시 위상 보상으로 인하여 CMA보다 늦어짐을 알 수 있었다.

Abstract This paper related with the I-CMA (Improved-CMA) algorithm that is possible to compensates of phase in CMA adaptve equalizer which is used for the elemination of intersymbol interference in the multipath fading and band limit characteristics of channel. The new cost function is proposed for the eliminate the amplitude and phase simulataneous by modifying the cost fuction for get the error signal in present CMA algorithm. It has a merit to the algorithm simplicities and eliminats the PLL device for phase compensation after equalization. For proving this, the recovered signal constellation that is the output of equalizer output signal and the residual isi and Maximum Distortion charateristic learning curve that are presents the convergence performance in the equalizer and the overall frequency transfer function of channel and equalizer were used. As a result of computer simulation, the I-CMA has more good compensation capability of amplitude and phas in the recovered constellation. But the convergence time is slow due to the simultaneously phase compensation.

Key Words : MCMA, residual isi, Adaptive Modulus, Intersymbol interference, MSE

1. 서론

최근 맥내, 사무실 또는 이동 환경에서의 무선 전파를 이용한 인터넷 트래픽이 급증하고 있다. 무선 전파는 다중 경로 (multi path)에 의한 상이한 지연 시간, 감쇠 와

시변 특성과 대역 제한 특성 및 잡음등으로 인하여 수신기에 도달할때는 미약해지면서 부호간 간섭 영향으로 찌그러짐이 발생된다^[1]. 이를 경감시키기 위한 기술적인 대책으로는 다이버시티 수신, 부분 응답 부호화, 개선된 오류 제어 기법과 적응 등화기등을 들 수 있다. 이와 같은

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부
접수일자 2014년 1월 10일, 수정완료 2014년 4월 12일
게재확정일자 2014년 6월 13일

Received: 10 January, 2014 / Revised: 12 April, 2014

Accepted: 13 June, 2014

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

대역폭에서 최소의 경비와 스펙트럼 낭비없이 디지털 전송 시스템의 성능을 개선시킬 수 있는 것이 적응 등화기 (adaptive equalizer)이므로, 최근 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다. 초기의 등화기는 유선 의 아날로그 신호 전송에서 채널의 찌그러짐을 보상기 위하여 코일을 들 수 있으며, 무선 전송에서는 통신 개시 초기에는 송수신 측이 상호 약속된 학습열 (training sequence)을 주고 받 으면서 채널의 전달 함수를 추정한 후, 이의 역 특성이 되는 등화 필터의 계수를 설정하였었다^{[2][3]}. 그러나 시변 (time varying)이라는 환경에서 채널의 상태는 수시로 변 동하므로 전송 중에도 학습열을 수시로 전송하는 적응 등화기가 사용되었다. 그러나 이로 인한 전송 대역폭의 낭비와 전송 효율이 저하되므로 이의 도움없이도 스스로 통신 채널의 상태를 추적하면서 자동으로 이의 역 특성을 계산하여 등화할 수 있는 있는 블라인드 적응 등화기 (blind adaptive equalizer)가 등장하였다. 최초의 블라인드 적응 등화 알고리즘은 Godard가 제안한 CMA (Constant Modulus Algorithm)를 들 수 있다^{[1][4]}. CMA에서는 가장 간단한 연산으로 일정한 modulus를 갖는 PAM, QAM 신호에서 적응 필터의 비용 함수를 최소화 시키도록 채널의 진폭 찌그러짐을 보상할 수 있지만, 위 상 회전에 의한 찌그러짐은 보상이 불가능한 문제점이 있다. 이를 개선하기 위해 CMA의 구조를 실수와 허수부 로 분리한 후 일정한 modulus를 이용하는 MCMA (Modified CMA)를 제안되었지만 실수와 허수의 2중 H/W 구조를 가진다^{[6][7]}. 본 논문에서는 기존 CMA 구조 를 그대로 가지면서 비용 함수만을 개량하여 단점인 위 상 문제를 해결할 수 있는 개선된 CMA (Improved-CMA)를 제안한다. 2장에서는 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델과 CMA 및 I-CMA 블라인드 적응 등화 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션과 결과 이들의 등화 성능을 제시한 후, 4장에서는 결론을 내 리겠다.

II. 본 론

1. 적응 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 적응 등화기를 사용한 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 수신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 전송하면 대역 제한과 다중 경로 전파를 나타내는 모델인 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수

신측에 전달된다. 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 가우시안 잡음이 부가될 것이며, 수신측에서는 적응 등화기에 인가된다. 이때 등화기의 전달 함수는 통신 채널의 역 전달 특성을 갖도록 설정되어 채널에서 부가된 찌그러짐에 의한 부호간 간섭은 보상되어진 후, 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 주파수 영역에서는 채널 임펄스 응답 h_k 의 푸리에 변환치를 $H(\omega)$, 등화기 디지털 필터 계수 f_k 의 푸리에 변환치를 $F(\omega)$ 라면 다음의 관계가 성립된다.

$$H(\omega) \cdot F(\omega) = 1 \quad (1)$$

즉 채널과 등화기의 종합 주파수 특성은 1이 되어 송신 신호가 갖는 모든 주파수 성분을 그대로 통과시키게 되어 수신측에서 송신 신호를 추정할 수 있게 되며, 이 과정에서 발생하는 지연 시간은 무시한다. 이때 등화기 계수인 f_k 는 매 수신 신호 r_k 마다 갱신되어지며, 학습열에 의존하지 않으므로 블라인드 적응 등화 방식에 해당 한다.

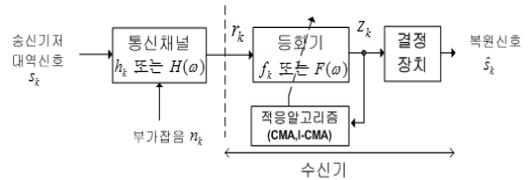


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델

Fig. 1. Baseband communication system model

2. Constant Modulus Algorithm

CMA는 Godard등이 제안한 블라인드 적응 등화기의 최초 알고리즘을 말하며 그림 1에서 송신 신호를 s_k , 채널에서 부가되는 잡음을 n_k , 등화기 입력 신호를 r_k , 등화기 출력 신호를 z_k , 결정 장치의 출력력을 \hat{s}_k 라고 하자.

$$\begin{aligned} F(k) &= [f_{0k} \ f_{1k} \ f_{2k} \ \dots \ f_{(N-1)k}] \\ R(k) &= [r_k \ r_{(k-1)} \ r_{(k-2)} \ \dots \ r_{(k-N+1)}] \end{aligned} \quad (2)$$

$F(k)$ 는 차수가 N 인 등화 필터의 계수를 나타내고, $R(k)$ 는 수신 신호를 나타내며 regressor vector라고도 하며, 등화기의 출력 신호 z_k 는 다음과 같다.

$$z_k = F(k)^T R(k) \quad (3)$$

CMA의 비용 함수 $J_{CMA}(k)$ 는

$$J_{CMA}(k) = E[|z_k|^2 - R^2] = E[e_k^2], \quad R^2 = \frac{E[|s_k|^4]}{E[|s_k|^2]} \quad (4)$$

고 되며, 여기서 e_k 는 오차 함수이고 R^2 은 constant modulus이다.

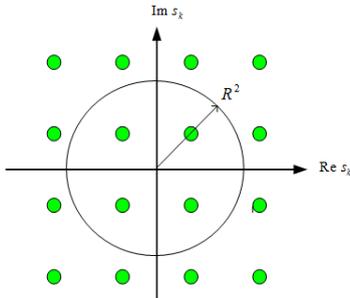


그림 2. CMA 오차 함수
 Fig. 2. Error function of CMA

그림 2는 CMA 오차 함수를 나타낸 것으로 식 (4)의 $J_{CMA}(k)$ 가 최소가 되기 위하여 등화기 출력 $|z_k|^2$ 가 그림 3의 반지름이 R^2 인 원주상에 존재하도록 등화기 계수 f_k 를 갱신하게 된다. 이때 절대치의 자승을 이용하므로 진폭 정보는 보상 가능하지만, 위상 정보는 불가능하게 된다. 이와같은 원리를 이용하여 CMA의 등화기 탭 계수는 다음과 같이 갱신하게 된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu z_k (|z_k|^2 - R^2) R^*(k) \quad (5)$$

3. Improved-Constant Modulus Algorithm

제안 방식인 I-CMA 에서는 등화기 출력 z_k 의 실수부와 허수부를 분리하여 이들에 대한 실수와 허수 비용 함수로 정의한다.

$$\begin{aligned} J_{I-CMA}(k) &= J_R(k) + j J_I(k) \quad (6) \\ J_R(k) &= (z_R(k) - \alpha^2)(z_R(k) - \beta^2) \\ J_I(k) &= (z_I(k) - \alpha^2)(z_I(k) - \beta^2) \end{aligned}$$

실수 비용 함수는 송신 신호 s_k 의 실수부로부터 등화기 출력 z_k 의 실수부와의 가능한 차이의 곱으로 구성하며, 허수 비용 함수는 송신 신호 s_k 의 허수부로부터 등화기 출력 z_k 의 허수부와의 가능한 차이의 곱으로 구성되는 새로운 비용 함수 개념을 적용하며, 그림 3은 $\alpha = 0.6$, $\beta = 0.8$ 일때의 I-CMA의 비용 함수를 나타낸 것이다.

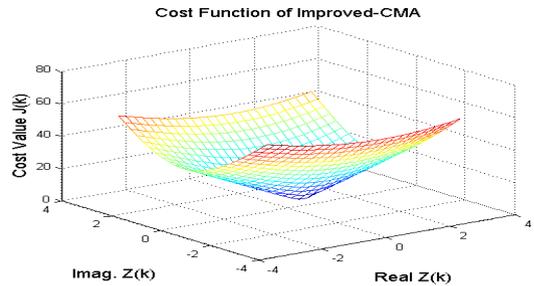


그림 3. I-CMA 비용 함수
 Fig. 3. Cost Function of Improved-CMA

적용 등화 필터의 탭 계수 갱신은 식 (6)의 비용 함수에 최적화시키기 위한 stochastic gradient algorithm을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(k+1) &= f(k) - \mu e(k) R^*(k) \quad (7) \\ e(k) &= e_R(k) + j e_I(k) \\ e_R(k) &= 2z_R(k)^3 - (\alpha^2 + \beta^2)z_R(k) \\ e_I(k) &= 2z_I(k)^3 - (\alpha^2 + \beta^2)z_I(k) \end{aligned}$$

식 (7)에서 알 수 있듯이 오차 함수를 얻기 위하여 CMA에서는 송신 신호의 constant modulus R^2 을 이용하여 얻지만, I-CMA에서는 송신 신호와 등화기 출력과의 실수와 허수 차이인 α , β 를 이용하며, 등화기 출력의 3승치를 이용하는 차이가 있다. 이와 같이 오차 신호를 식 (4)의 CMA에서는 실수값이 되지만, 식 (7)의 I-CMA에서는 복소수값을 갖게 하므로 위상 정보를 포함하게 되지만, 반대로 진폭의 값이 적어지는 단점도 있다. CMA에서는 등화기 출력에 PLL을 사용하여 위상을 보상하지만, 이를 위해서는 일정한 초기 시간이 소요되지만, I-CMA에서는 일정 이득의 증폭기가 필요케되지만, PLL을 사용하는 것보다 초기 시간이 불필요하게 된다.

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존의 CMA와 제안하는 I-CMA 알고리즘의 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적용 스텝의 크기 μ 로 CMA는 0.00001, I-CMA는 0.0003, 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 4는 시 분산 통신 채널의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 나타낸 것이다. 이와 같은 2 가지 특성에 의해 수신된 신호 성상도에는 찌그러짐에 의한 부호간

간섭이 존재하게 될 것이다. 그림 5는 시뮬레이션을 위한 전체 신호 흐름도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 통신 채널을 통과시키고 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 백색 가우시안 잡음을 부가시켜 수신 신호를 얻었다. 수신 신호는 그림 2의 r_k 가 된 후 이를 CMA와 I-CMA 알고리즘으로 처리한 후 이의 성능을 비교한다. 비교를 위한 지수로는 등화기 출력인 수신측 복원 정상도, 잔류 *isi* 및 MD, 채널과 등화기의 종합 진폭과 위상 전달 특성을 사용한다. 그림 6은 송신 신호와 수신 신호의 정상도를 나타낸 것으로서 송신 신호의 경우 총 16개의 심볼이 존재하는 16-QAM, 수신 신호에는 비선형 특성과 부호간 간섭이 존재함을 알 수 있다.

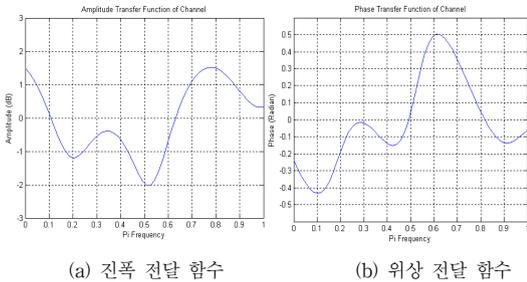


그림 4. 채널의 주파수 전달 함수
Fig. 4. Frequency transfer function of channel

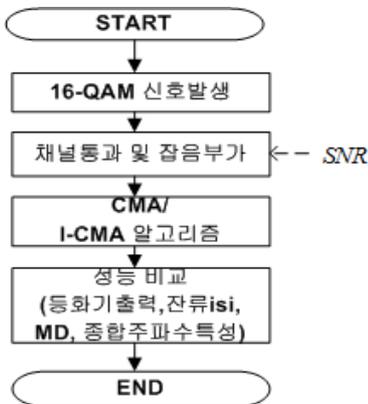


그림 5. 신호 처리도
Fig. 5. Flowdiagram of signal processing

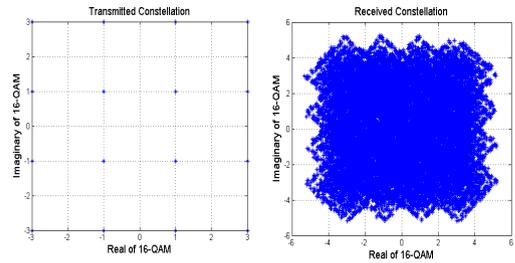


그림 6. 송수신 신호 정상도
Fig. 6. Transmit & Received signal constellation

성능 비교를 위한 첫 번째 지수로는 등화기 출력인 복원 정상도를 그림 7에 나타내었다. 정상도상에서 총 16개의 신호점이 명확히 구분되며, 신호점들의 폭과 신호점간의 거리를 비교하여 정성적인 성능을 평가할 수 있다. 제시된 그림에서 CMA는 위상 보상이 안되어 마름모 모양의 패턴이며, 각 신호점의 폭이 넓으며 신호점간 간격이 좁음을 알 수 있다. 반면 I-CMA는 정확하게 위상 보상이 이루어지며, 신호점의 크기와 신호점간 거리가 넓어져 우수한 성능으로 등화가 이루어짐을 알 수 있다. 단 I-CMA 등화기 출력단에는 이득이 3.9인 증폭기가 사용되었다.

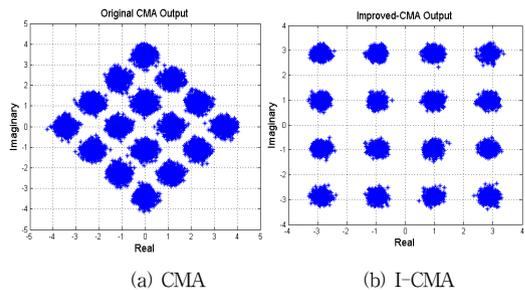


그림 7. 복원 정상도
Fig. 7. Recovered constellation

두 번째 지수로는 적응 등화기의 수렴 특성인 속도와 수렴양을 나타내는 잔류 *isi* 와 MD learning 곡선을 사용하였으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 특히 수렴 속도는 적응 등화기가 정상적으로 동작하는 중에 채널의 상태가 급변하는 경우 이에 신속하게 적응하기 위하여 소요되는 시간을 나타낸다. 잔류 *isi*는 완전 등화 상태에서는 이들은 주파수 영역에서는 식(1)의 관계가 성립되며, 시간 영역에서는 임펄스 특성을 가져야 한다. 이는 이론적인 관계이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하고 잔류 성분들이 존재하게 되

므로 이 잔여 성분들의 크기를 의미한다. 그림 8은 블라인드 적응 등화기의 가장 중요한 성능 지수인 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로 I-CMA가 CMA 보다 수렴 속도에서는 늦어지지만 수렴후에는 그 양이 매우 적게 됨을 알 수 있다. MD는 그림 7의 복원 정상도에서 원래의 송신 신호점과 복원 신호점간의 거리를 나타내며, 이들 알고리즘의 성능 곡선을 그림 9에 나타내었다. MD에서도 I-CMA가 CMA 보다 수렴 속도가 늦어지지만 수렴후에는 매우 적게 됨을 알 수 있다. 즉 위상 복원을 동시에 수행할 수 있는 I-CMA 방식은 상대적으로 수렴 속도가 늦어지게 되지만, 수렴 후에는 양을 상당히 줄일 수 있음을 확인하였다.

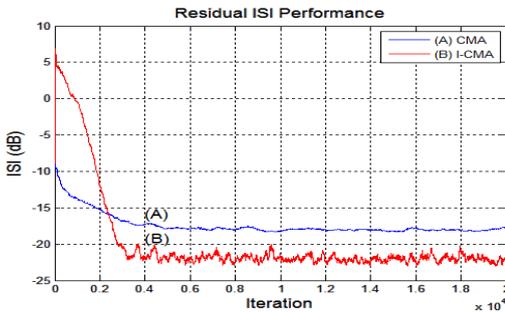


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

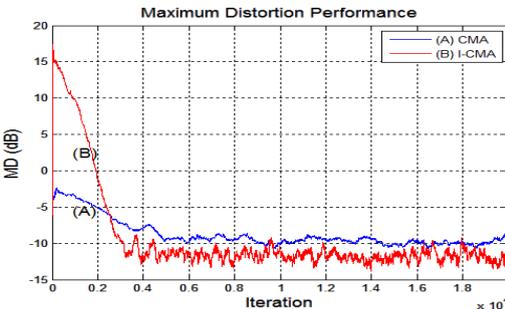


그림 9. MD 성능
 Fig. 9. MD performance

마지막 성능 비교를 위한 지수로서 채널과 등화기의 주파수 영역에서 진폭과 위상의 전체적인 전달 특성을 그림 10과 11에 나타내었다. 그림 10의 진폭 전달 함수에서 모든 주파수 범위에 걸쳐 I-CMA의 전체적인 특성이 CMA의 전체적인 특성보다 훨씬 평탄해짐을 알 수 있다. 이는 그림 7의 복원 정상도에서 신호점의 크기와 폭에서도 우월함이 입증된 결과와 동일하게 된다. 그림 11의 위

상 전달 함수에서도 I-CMA가 모든 주파수 범위에 걸쳐 CMA보다 위상 변화량이 적으면서 그 기울기가 일정하게 되어 선형 위상 특성으로 보상되어짐을 알 수 있다.

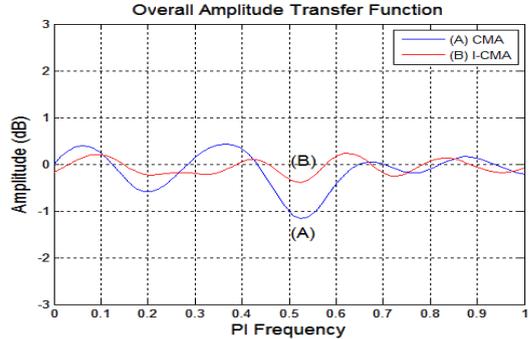


그림 10. 전체 진폭 전달 함수
 Fig. 10. Overall amplitude transfer function

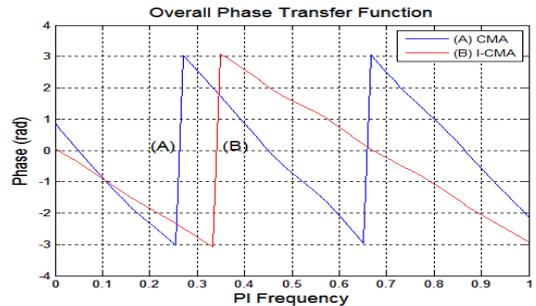


그림 11. 전체 위상 전달 함수
 Fig. 11. Overall phase transfer function

V. 결론

논문은 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 원인이 되는 진폭과 위상 찌그러짐을 동시에 보상할 수 있도록 기존 CMA의 비유 함수를 개선한 Improved-CMA에 대한 것이다. 기존 CMA는 적응 등화를 위한 가장 기본적인 알고리즘으로 송신 신호의 constant modulus 정보를 기반으로 진폭 찌그러짐만을 보상할 수 있으며, 위상 찌그러짐은 동시 보상이 불가능하여 외부에서 별도의 위상 고정 루프 (PLL)를 사용해야 하는 문제점이 있다. 그러나 제안 알고리즘인 I-CMA는 송신 신호의 modulus 정보를 이용하지 않으면서도 진폭과 위상 찌그러짐의 동시 보상이 가능하도록 새로운 비유 함수를 갖는다. 이의 보상 성능을 확인하기 위하여 등화기 출력 신호의 정상

도와 등화기의 수렴 특성을 확인하기 위하여 잔류 isi 및 MD, 채널과 등화기를 2개의 독립된 직렬 연결된 시스템으로 간주할 때 이들의 종합 주파수 전달 특성을 이용하였다. 복원 정상도에서는 I-CMA가 CMA보다 신호점의 크기와 거리에서 우월함을 알 수 있었다. 수렴 특성에서 수렴 시간의 경우 정상 상태에 도달할 때까지 I-CMA가 CMA보다 늦어짐을 알 수 있었으며, 정상 상태 이후의 잔류양에서는 I-CMA가 CMA보다 훨씬 적었다. 채널과 등화기의 종합 주파수 전달 특성에서 I-CMA의 전달 특성이 CMA의 전달 특성보다 개선된 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 진폭과 위상의 동시 보상 능력을 갖는 I-CMA 적응 등화기에서는 수렴 시간이 늦어지는 점과 등화기의 출력이 감소되므로 이를 증폭기를 사용하여야 한다는 문제점을 확인하였다. 이와 같은 문제점을 개선할 수 있는 새로운 CMA 계열의 등화 알고리즘에 대한 연구가 지속적으로 필요케 되어, 급격히 증가되는 모바일 인터넷 트래픽의 전송 효율을 개선시킬 수 있을 것으로 기대된다.

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] C.R.Johnson Jr., P.Schniter et. al., "Blind Equalization using the constant modulus criterion : A Review", Proc. IEEE Vol.86, No.10, pp.1927~1590, Oct. 1998.
- [3] Y.Chen, T.L.Ngoc et. al., "Recursive Least Squares Constant Modulus Algorithm for Blind Adaptive Array", IEEE Trans. on S.P., Vol.52, No.5, pp.1452~1456, May 2004.
- [4] L.M.Garth, "A Dynamic Convergence Analysis of Blind Equalization Algorithms", IEEE Trans. on Comm., Vol.49, No.4, pp.624~634, Apr. 2004.
- [5] S.R.Thakallapalli, S.R.Nelatury, S.S.Rao, "A New Error Function for Fast Phase Recovery of QAM Signals in CMA Blind Equalizers", IEEE Workshop on Statistical Signal Processing, pp.70~73, 2003

- [6] J.R.Treichler, M.G.Larimore, "New Processing Techniques based on the Constant Modulus Adaptive Algorithm", IEEE Trans. on. A.S.S.P., Vol. ASSP-33, No.2, pp.420~431, Apr. 1985.
- [7] J.C.Lin, "Blind equalization techniques based on an improved constant modulus adaptive algorithm", Proc. IEE, Vol.149, No.1, pp.45~50, Feb. 2002
- [8] L.He, M.Amin, "A Dual mode technique for improved blind equalization for QAM signals", IEEE S.P. Letters, Vol.10, No.2, pp.29~31, Feb. 2003
- [9] J.P.Chung, I.J.Kim, "Performance Analysis of Turbo Equalizer in Fading Channel", Jour. of K.I.I.T., Vol. 10, No.1, pp.91~96, Jan. 2012
- [10] S.G.Lim, "The Performance Comparison of the CMA and MMA Algorithm for Blind Adaptive Equalization", Jour. of I.I.B.C., Vol.12, No.2, April 2012.

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