

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.5.103>

IIBC 2014-5-14

QAM 신호에서 Constellation Reduction을 이용한 MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 개선

Performance Improvement of MMA Adaptive Equalization Algorithm by using the Constellation Reduction in QAM Signal

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문은 비선형 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 줄일 수 있는 MMA (Multiple Modulus Algorithm) 적응 등화 알고리즘에서 constellation reduction 개념을 적용하여 등화 성능을 개선하는 CR-MMA (Constellation Reduction-MMA) 에 관한 것이다. MMA 적응 등화기의 탭 계수 갱신시에는 등화기 출력을 이용하여 오차 신호를 얻게 되는데, 이때 송신 신호의 order가 높아질수록 오차 성분이 크게 되어 성능이 저하된다. 그러나 constellation reduction을 이용하면, 고차의 QAM 신호도 4-QAM 신호 성상도로 reduction시켜 오차 신호를 얻으므로 이의 크기가 감소되어 개선된 성능으로 등화가 가능하게 된다. 제안하는 CR-MMA 알고리즘의 성능을 기존의 MMA 알고리즘과 비교하기 위하여 동일한 채널과 잡음 환경하에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 위해 수신측에서의 등화기 출력 신호인 복원된 신호 성상도, 수렴 성능을 나타내는 잔류 isi, MD learning 곡선과 잡음에 대한 강인성을 확인하기 위하여 SER을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 모든 성능 지수에서 CR-MMA가 MMA 보다 우월하였으며, SER 성능에서 잡음에 대한 robustness가 매우 강함을 확인하였다.

Abstract This paper related with the CR-MMA which is possible to improving the equalization performance by applying the concept of constellation reduction in the MMA adaptive equalization algorithm in order to reduce the intersymbol interference that is occurred in the nonlinear communication channel. In the updating process of MMA adaptive equalizer, the error signal is being obtained by using the equalizer output, and the performance will be degraded by the increase the error signal in the high order QAM constellation. But by using the constellation reduction, the high order QAM signal will be changed to the 4-QAM signal constellation and then the error signal will be obtained. By doing so, the error signal will be minimized and it is possible to improve the equalization performance in the high order QAM transmitted signal. The Computer simulation was performed in order to compare the performance of the proposed CR-MMA algorithm and original MMA algorithm in the same communication channel and noise environment. For this, the recovered signal constellation which is the output of equalizer, residual isi and MD (Maximum Distortion) learning curve which is represents the convergence performance and SER which is represents the robustness of noise were used. As a result of simulation, the CR-MMA has more superior to the MMA. And it was confirmed that the CR-MMA has robustness to the noise in the SER performance.

Key Words : MMA, CR-MMA, Residual isi, Constellation Reduction, Maximum Distortion

*정희원, 공주대학교 정보통신공학과
접수일자 : 2014년 8월 11일 수정완료: 2014년 9월 11일
게재확정일자 : 2014년 10월 10일

Received : 6 August, 2014 / Revised :14 September, 2014

Accepted : 10 October, 2014

*Corresponding Author : sglim@kongju.ac.kr

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

I. 서 론

대부분의 디지털 통신 시스템에서 통신 채널의 대역 제한 특성과 다중 경로 전파로에 의해 발생하는 페이딩과 위상 회전과 같은 비선형 특성에 의해 수신 신호가 찌그러지거나 인접 부호에 영향을 미쳐 오류의 원인이 되는 부호간 간섭 영향이 발생하게 된다. 이와 같은 자연적인 장애 현상의 완전한 제거는 불가능하지만, 등화(equalization)라는 기술을 통하여 경감할 수 있다^{[1][2]}. 초기의 등화 기술은 송수신국간에 약속된 학습열을 이용하여 채널 특성을 추정한 후 이의 역특성을 갖도록 수신측의 등화 필터 계수를 설정하였다. 그러나 채널의 특성이 시간에 따라 변화하는 시변 채널의 경우 필터 계수를 수시로 변화시켜야 하는 어려움이 있다. 이후 적응 등화기가 등장하여 시변 채널에서도 이를 추적하면서 등화를 수행할 수 있게 되었으며, 지속적인 연구 결과 블라인드 적응 등화기가 등장하여 학습열에 의한 대역폭 낭비없이도 채널 특성을 보상할 수 있게 되었으며 이의 시초로는 CMA를 들 수 있다^[2]. CMA는 비교적 간단한 알고리즘으로 채널에서 발생하는 진폭 찌그러짐은 보상할 수 있지만, 위상 찌그러짐은 보상이 불가능하므로 PLL을 사용하여 별도로 보완해야 한다. 이의 문제점을 개선하기 위하여 MMA (Multiple Modulus Algorithm)가 등장하였다. 여기서는 채널에 의한 진폭과 위상 찌그러짐에 대한 동시 보상이 가능하지만, 그 성능에서는 CMA보다 열화되는 문제점이 있다. MMA의 이와 같은 단점을 해결하기 위하여 다양한 방식의 변형된 MMA 알고리즘이 등장하고 있는 실정이다^{[3][4]}. 논문에서는 송신 신호가 16-QAM일 때 등화 필터 계수를 얻기 위한 오차 신호에서 constellation reduction 개념을 적용하므로써 기존 MMA보다 개선된 등화 성능을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인한다. 이를 위하여 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 기저 대역 통신 모델과 MMA와 constellation reduction 개념과 이를 적용한 CR-MMA 알고리즘에 대해 설명한다. 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 환경과 파라미터 값의 정의 및 적응 등화기의 성능 지수인 복원 정상도, 잔류 ISI와 MD, SER에 대한 시뮬레이션 결과를 제시하고, 마지막으로 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 등화기를 사용하는 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 MMA 또는 CR-MMA 적응 등화기를 사용한 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 전송하면 송신 필터를 통과한 후 부호간 간섭 영향을 발생하는 필터인 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며, 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 잡음 n_k 가 부가된다. 수신측에서는 수신 필터를 통과한 후 등화기에 인가되며, 이때 계수가 f_k 인 등화기의 전달 함수 $F(\omega)$ 는 통신 채널의 역함수를 갖도록 설정된다^[5]. 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하며, 적응 등화기의 출력 z_k 를 이용하여 오차 신호를 발생한 후 이를 이용하여 새로운 등화기 탭 계수를 update 하면서, 이는 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 완전 등화 상태에서 채널의 임펄스 응답 h_k 와 등화기의 디지털 필터 계수 f_k 의 선형 convolution 결과는 임펄스가 되며, 단 지연 시간은 무시한다.

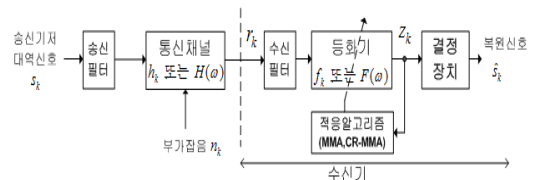


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델

Fig. 1. Baseband communication system model

2. Multiple Modulus Algorithm

그림 1에서 송신 신호 s_k 는 통신 채널 h_k 를 통과하면서 찌그러짐이 발생된 후 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음 신호 n_k 가 부가된 후 수신 신호 r_k 를 얻는다.

수신 신호는 유한 차수의 계수를 갖는 등화 필터 f_k 를 통과하면서 채널 찌그러짐을 보상한 후 결정 장치를 통과시켜 복원 신호 \hat{s}_k 를 얻게 된다. 적응 등화를 위한 필터 계수 갱신에서 등화기의 출력 신호 z_k 와 송신 신호의 dispersion constant R_{MMA}^2 의 차이로 정의되는 오차

신호를 이용한다. 출력 신호 z_k 는 그림 2의 영-오차 윤곽선 상에서 일정한 moduli의 단일 정사각형이 되도록 조정되며 이 moduli와 실제 출력 신호 z_k 와의 오차 신호 e_k 는 실수부 e_r 와 허수부 e_i 로 나뉘어 진폭과 위상 정보를 갖게 된다.

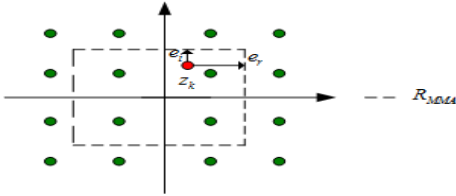


그림 2. MMA의 영-오차 윤곽선
 Fig. 2. Zero-error contour of MMA

MMA 적응 등화 알고리즘에서는 다음과 같이 정의되는 비용 함수 J 를 최소화시키도록 반복하면서 등화기 탭 계수를 갱신한다.

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

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

여기서 z_{kr}, z_{ki} 은 z_k 의 실수와 허수를, s_{kr}, s_{ki} 은 s_k 의 실수와 허수를 각각 나타낸다. 식(1)의 비용 함수는 1차원 CMA 비용 함수를 2개 더한 형태로 표시됨을 알 수 있으며 오차 신호와 등화 필터 계수의 갱신식은 다음과 같이 된다^[3].

$$e_{kMMA} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + jz_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2) \quad (2)$$

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

식(2)의 필터 계수 갱신을 위한 FIR 적응 필터의 내부 구조를 그림 3에 나타내었으며, 쉬프트 레지스터와 승산기 및 가산기로 구성되어 있다.

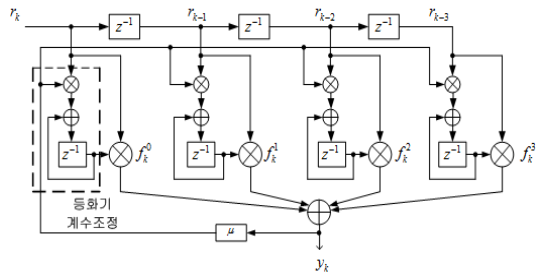


그림 3. 적응 FIR 필터의 내부 구조
 Fig. 3. Internal structure of adaptive FIR filter

3. Constellation Reduction과 CR-MMA

constellation reduction은 16개의 QAM 신호점들을 $\pm 1 \pm j$ 의 4개 신호점으로 축소하는 개념을 말한다. 이와 유사하게 16-QAM 신호를 대상으로 RCA (Reduced Constellation Algorithm)에서는 식(1)의 $\pm R_{RCA}^2 \pm jR_{RCA}^2$ 의 4개 신호점으로 축소하는 차이점을 갖는다^{[6][8]}.

constellation reduction에서는 modulus를 R_{RCA}^2 를 1로 줄여서 모든 신호점은 작은 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. 송신 신호가 16-QAM인 경우 등화기의 출력을 Z_k 라하면 이들은 다음의 식으로 reduction된다.

$$\widehat{Z}_{Rk} = Z_{Rk} - 2 \text{sign}(Z_{Rk}), \widehat{Z}_{Ik} = Z_{Ik} - 2 \text{sign}(Z_{Ik}) \quad (3)$$

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

여기서 z_{Rk}, z_{Ik} 는 z_k 의 실수와 허수부를 나타낸다. 이들을 이용하면 CR-MMA의 비용 함수와 오차 신호 및 필터 계수의 갱신식은 다음과 같이 된다^{[8][10]}.

$$J = E[(|z_{kr}|^2 - \widehat{R}_R^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - \widehat{R}_I^2)^2] \quad (4)$$

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

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

이와 같은 알고리즘을 고려하여 그림 4는 CR-MMA 등화기의 내부 구성도를 나타낸 것이다. 수신되는 데이터 벡터를 저장하는 버퍼를 내부에 두고 등화기의 출력 z_k 를 식(3)을 적용하여 constellation reduction시킨 후 modulus를 이용하여 오차 신호를 발생시킨 후 step 크기를 곱하여 이전 등화기 계수 f_k 에서 변동량을 뺀 후 새로운 등화기 계수 f_{k+1} 를 얻도록 되어있다^{[5][6]}.

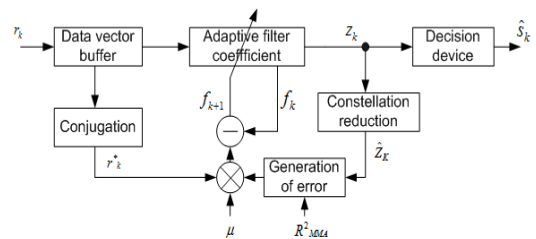
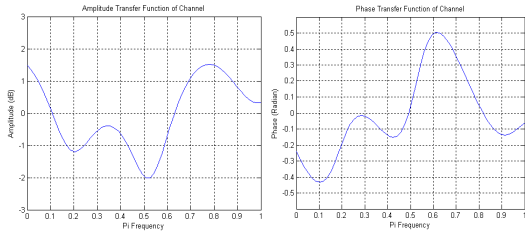


그림 4. CR-MMA의 내부 구조
 Fig. 4. Internal structure of CR-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존 MMA 와 CR-MMA 알고리즘의 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝의 크기를 모두 $\mu = 0.0018$, 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 5는 부호간 간섭을 발생시키는 시분산 통신 채널의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 나타낸 것이다. 진폭 전달 함수는 최대와 최소 전달 함수가 3.5dB 범위에서 주파수에 따라 이득이 변동함을 알 수 있으며, 위상 전달 함수는 주파수에 따라 위상의 변화량이 불규칙적으로 변화하는 비선형 특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이들의 찌그러짐 특성에 의하여 수신 신호는 부호간 간섭이 발생된다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수
 그림 5. 채널의 주파수 전달 함수
 Fig. 5. Frequency transfer function of channel

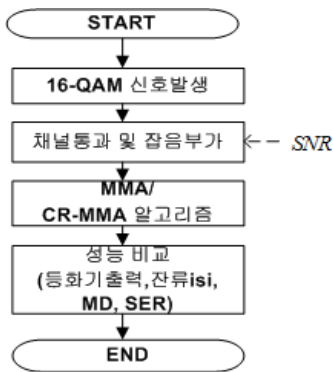
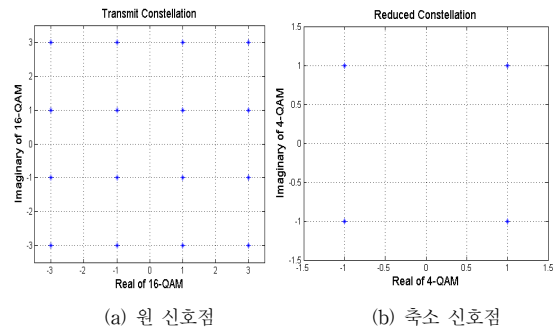


그림 6. 신호 처리 흐름도
 Fig. 6. Flowdiagram of signal processing

그림 6은 전체 신호 흐름 과정을 나타낸 것으로 송신 측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 통신 채널을 통과시키며 30dB의 신호대 잡음 전력비를 갖도록 잡음을 부가시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이와 같은 수신 신호는 MMA와 CR-MMA 알고리즘으로 처

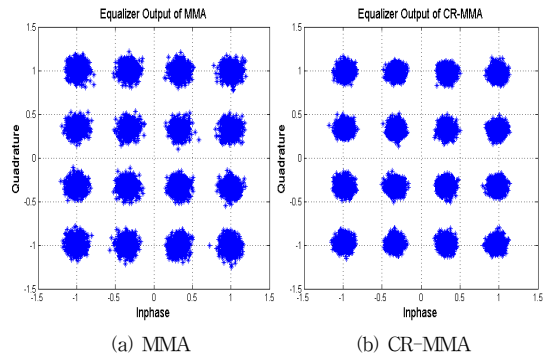
리한 후, 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 등화기 출력 z_k 의 정상도, 잔류 isi 와 MD 및 SER을 계산하였다.

그림 7은 CR-MMA 알고리즘에서 오차 신호를 얻기 위하여 16-QAM 신호를 식 (3)을 적용하여 4-QAM 신호로 constellation reduction한 결과를 나타낸 것이다. 16개의 신호점들이 4개의 constant modulus를 갖는 신호로 변환됨을 알 수 있으며, 이를 이용하여 오차 신호를 발생하면 비용 함수가 최소가 되도록 적응 등화기의 탭 계수를 갱신한다.



(a) 원 신호점 (b) 축소 신호점
 그림 7. 신호점의 축소
 Fig. 7. Reduction of constellation

첫 번째 성능 비교를 위하여 이들 2 가지 알고리즘을 적용할 때 적응 등화기의 출력 신호 정상도를 그림 8에 나타내었다. 출력 정상도에서는 신호점의 크기와 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 된다. 그림에서 CR-MMA의 정상도들이 MMA보다 신호점의 폭이 좁으며, 신호점간의 간격이 크므로 결정 장치에서 “1”과 “0”를 판별할 때 오류 발생 가능성이 저하되므로 성능의 우월함을 알 수 있다.



(a) MMA (b) CR-MMA
 그림 8. 등화기 출력 신호 정상도
 Fig. 8. Output signal constellation of equalizer

2 번째 성능 비교를 위한 지수로 잔류 isi와 MD learning 곡선을 사용하였으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 이들 곡선에서 얻을 수 있는 정보로는 초기의 과도 과정을 지나 정상 상태 (steady state)에 도달할 때까지의 수렴 속도와 그들의 양이다. 특히 수렴 속도는 적응 등화기가 정상적으로 동작 중에 채널 상태의 급변 또는 순간적으로 절단되는 경우 이로부터 신속하게 복원하여 적응하기 위한 소요 시간을 나타내며 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{잔류isi}_{\text{dB}} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_i |h(k)*f(k)|^2 - |h(k)*f(k)|_{\text{max}}^2}{|h(k)*f(k)|_{\text{max}}^2} \right]$$

$$\text{MD} = \frac{\sum_i |h(k)*f(k)| - |h(k)*f(k)|_{\text{max}}}{|h(k)*f(k)|_{\text{max}}}$$

(5)

먼저 잔류 isi는 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화 상태에서는 이들의 종합 특성으로 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 되므로 이 잔여 성분들의 전력 크기를 의미한다. 그림 9는 블라인드 적응 등화기의 가장 중요한 성능 지수인 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 -20dB를 정상 상태로 설정할 때 MMA는 2071회, CR-MMA는 829회에 달성하므로, 수렴 속도에서는 CR-MMA가 MMA보다 2.5배 빠르며, 수렴후의 양에서도 CR-MMA가 훨씬 적응을 알 수 있다. 또한 수렴후에서 잔류 양들의 변화도 MMA보다 CR-MMA가 적게 되어 misadjustment에 의한 등화 잡음이 감소됨을 확인할 수 있다. 이는 등화기가 통신 채널의 역특성에 근접하게 보상할 수 있음을 나타내며, 등화 잡음이 감소되므로서 디지털 전송시 발생하는 지터 (jitter)도 감소됨을 의미한다.

잔여 isi 성분들의 크기를 전압으로 나타내는 MD 성능을 그림 10에 나타내었다. 이들의 진폭 차이가 -3[V] 이하를 정상 상태로 정의할 때 MMA는 3125회, CR-MMA는 1261회가 필요케 되어 수렴 속도에서도 CR-MMA가 MMA보다 2.5배 빠르며, 수렴후의 양에서는 CR-MMA가 적게 되어 수렴 특성과 정상 상태 이후의 성능이 개선됨을 알 수 있다.

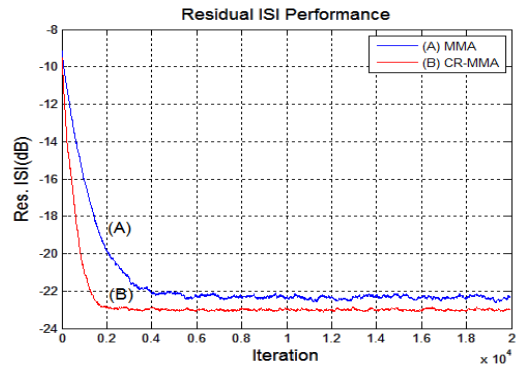


그림 9. 잔류 isi 성능
 Fig. 9. Residual isi performance

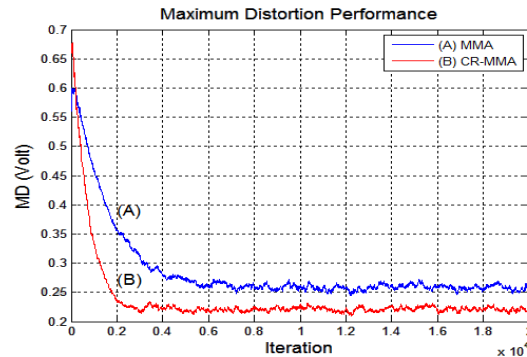


그림 10. MD 성능
 Fig. 10. MD performance

표 1은 그림 7, 8, 9의 도해적인 성능에 대한 정상 상태 이후의 정량적인 평균과 분산을 나타낸 것이다. 모든 지수의 평균과 분산값에서 constellation reduction을 이용하는 CR-MMA가 MMA보다 우월함을 알 수 있다.

표 1. 성능 지수의 통계치

Table 1. Statistics of Performance Index

	MMA	CR-MMA
잔류isi	평균: 0.0061	평균: 0.0051
	분산: 2.2117e-6	분산: 2.1170e-7
MD	평균: 0.2680	평균: 0.2232
	분산: 5.3323e-4	분산: 9.6158e-5

마지막으로 통신 채널에서 부가되는 잡음에 대한 강인성을 알아보기 위하여 신호대 잡음비를 0에서 15dB까지 3dB 단위로 변화시킬때의 SER (Symbol Error Rate) 성능을 그림 11에 나타내었다. CR-MMA가 MMA보다 SER 성능이 월등히 우월하여 매우 높은 등화 이득을 얻

을 수 있으며, 신호대 잡음비가 적을수록 우월함을 알 수 있다.

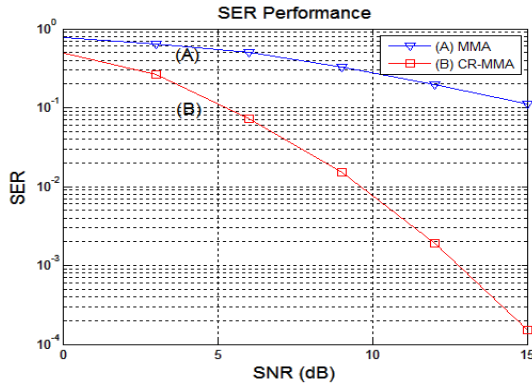


그림 11. SER 성능
Fig. 11. SER performance

그림 12는 그림 5의 채널 특성과 CR-MMA와 MMA 알고리즘을 적용하여 적응 등화할 때 얻어지는 종합 주파수 전달 특성을 진폭과 위상으로 나누어 나타낸 것이다. 진폭 종합 특성에서는 CR-MMA가 MMA보다 미소하게 평탄해지며, 위상 종합 특성에서는 거의 차이가 없을 정도로 선형으로 보상하고 있음을 알 수 있다.

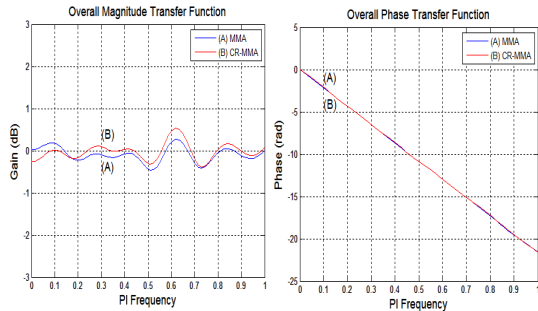


그림 12. 종합 주파수 전달 함수
Fig. 12. Overall frequency transfer function

그림 13은 그림 12의 선형화된 위상 전달 함수에서의 군지연을 나타낸 것이다. 채널에서는 통과 주파수 범위 내에 대하여 각 지연 시간이 $-2\sim 2$ 초의 범위내에서 불규칙적인 지연 시간이 등화기를 통과한 후에는 전체적인 지연 시간이 모든 신호들에 대하여 MMA와 CR-MMA 적응 등화기를 통과시킬 때 통과 주파수 범위내에서 지연 시간이 0.8993초, 0.9108초의 거의 상수와 같이 일정해 되어 군지연에 의한 위상 왜곡을 보상할 수 있다.

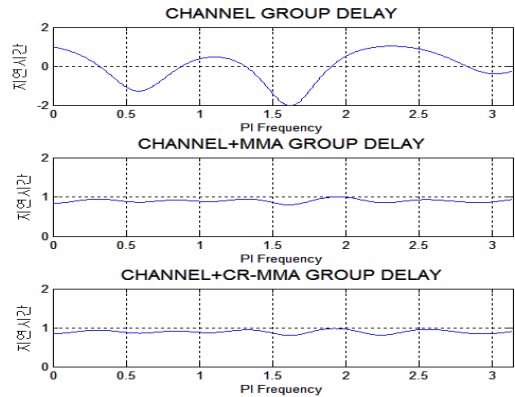


그림 13. 군지연 시간
Fig. 13. Group delay time

V. 결론

논문에서는 MMA와 CR-MMA 블라인드 적응 등화 알고리즘의 성능을 비교하였다. 기존의 MMA 알고리즘이 스펙트럼 효율의 개선을 위한 고차 QAM 신호에서 성능이 열화되는 단점을 가지므로, 등화기의 탭 계수 갱신 시 요구되는 오차 신호를 발생할 때 고차 QAM 신호를 저차의 4-QAM 신호로 constellation reduction함으로써 개선된 성능을 얻을 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 성능 지수에서 잔류 ISI와 MD에서 정상 상태 이후부터는 적은 양을 가지며, 또한 정상 상태에 도달하는 시간에서도 CR-MMA가 MMA보다 2.5배 빠름을 확인할 수 있었으며, 채널에서 부가되는 잡음에 의한 robustness를 확인하기 위한 SER 성능에서는 월등히 우월하여 높은 등화 이득을 얻을 수 있었다. 기존 MMA 비용 함수를 constellation reduction된 신호를 이용하는 함수로 개량함으로써 우수한 성능의 등화가 가능케 되며 채널의 순간 변동이나 순단과 같은 비정상적인 통신 환경에서 빠른 수렴 속도로 적응할 수 있게 되고 우월한 SER 성능에서 송신 전력을 더욱 줄이면서도 원하는 오류율을 얻을 수 있는 전송 기법이 될 것이다. 향후 수렴 속도뿐만 아니라 정상 상태에서 더욱 성능을 개선시킬 수 있는 알고리즘에 대한 지속적인 연구가 필요할 것으로 기대한다.

References

- [1] W. Rao, "Amplitude Transformation-Based Blind Equalization Part 2 : Suitable for High-Order QAM Signal", *Procedia Environmental Sciences* 10, pp. 1282~1286, 2011.
- [2] Y.Sato, "A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude modulation systems", *IEEE Trans. on Comm.*, pp.679~682, June 1975.
- [3] J.Yang, J.J.Werner and G.A.Dumont, "The multi-modulus blind equalization and Its Generalized algorithm", *IEEE Jour. on Selected Areas in Comm.*, Vol.20, No. 3, pp.997~1015, June 2002.
- [4] J.T.Yuan, T.C.Lin, "Equalization and Carrier Recovery of CMA and MMA in Blind Adaptive Receivers", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 58, No. 6, pp.3206~3217, June 2010.
- [5] W.Rao, K.M.Yuan, Y.C.Guo et al., "A simple constant modulus algorithm for blind equalization suitable for 16-QAM signal", *9th Int. Conf. on signal processing*, Vol.2, pp.1963~1966, 2008.
- [6] W. Rao, G. Y. Cai, "New constant modulus blind equalization algorithm based on variable segment error function", *Jour. of System Simulation*, Vol. 9, No. 12, pp.2686~2689, 2006.
- [7] T.Thaiupathump, L. He, S. A. Kassam, "Square contour algorithm for blind equalization of QAM signals", *Jour. of Signal Processing* 86, pp.3357~3370, 2006.
- [8] S.G.Lim, "The Performance Evaluation of Parallel and Single Structure MCMA-MDD Adaptive Equalizer for 16-QAM Signal", *Jour. on I.W.I.T.*, Vol.12, No. 4, August 2012.
- [10] J.S.Yoon, S.G.Lim, "The Performance of Dual Structure CR-CMA Adaptive Equalizer for 16-QAM Signal", *Jour. of I.W.I.T.*, Vol.12, No.5, pp.107~114, Oct. 2012.
- [11] K.N.Oh, "An Algorithm for Variable Step-Size Improving Steady-State Performance of Blind Equalization", *Jour. of K.I.I.T.*, Vol.9, No.10, pp.43~48, Oct. 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>

※ 본 연구는 2013년 공주대학교 학술 연구 지원 사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음