

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2018.18.1.85>

IIBC 2018-1-12

2차원 QAM 신호에서 CR-MMA와 FC-MMA 적응 등화 알고리즘의 성능 비교

A Performance Comparison of CR-MMA and FC-MMA Adaptive Equalization Algorithm in 2 dimensional QAM Signal

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문에서는 2차원 16-QAM 신호 전송시 채널에서 발생하는 찌그러짐을 보상하기 위한 CR-MMA (Constellation Reduction - Multiple Modulus Algorithm)와 FC-MMA (Fast Convergence - Multiple Modulus Algorithm) 등화 알고리즘의 성능을 비교하였다. CR-MMA 적응 등화기는 탭 계수 갱신을 위하여 nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로 축소하여 오차 신호를 이용하지만, FC-MMA 적응 등화기는 신호점의 축소 대신 신호 심볼의 레벨수를 고려한 수정된 dispersion constant를 적용하여 오차 신호를 이용한다. 이들 알고리즘들은 MMA 계열중에서 수렴 특성이 우수한 것으로 알려져 있으므로, 본 논문에서는 수렴 특성을 포함한 성능을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 시뮬레이션 결과 FC-MMA는 출력 신호 정상도와 잔류 isi 및 최대 찌그러짐과 SER 성능이 CR-MMA보다 우월하지만, 수렴 속도가 늦어짐을 알 수 있었다.

Abstract This paper compares the equalization algorithm of CR-MMA (Constellation Reduction-Multi Modulus Algorithm) and FC-MMA (Fast Convergence-Multi Modulus Algorithm) for the compensation of channel's distortion in transmitting the 2 dimensional 16-QAM signals. The CR-MMA adaptive equalizer use the error signal by reduce the nonconstant modulus signal to constant modulus signal in order to updates the tap coefficient, and the FC-MMA adptive equalizer use the error signal applying the modified dispersion constant considering the number of symbol level instead of signal point reduction. These two algorithm are known to its superior to the convergence characteristic among the MMA series equalizer. In this paper, the other equalization performance including the convergence characteristic was compared by computer simulation. As a result of computer simulation, FC-MMA has more good performance in the residual isi, maximum distortion and SER performance than CR-MMA, but not in convergence speed.

Key Words : CR-MMA, FC-MMA, residual isi, constant modulus, Maximum Distortion

1. 서 론

오늘날 대량의 정보들이 통신 시스템을 통하여 전달

되고 있으며, 이를 더욱 고속, 효율적으로 전송하기 위한 다양한 기술이 등장하고 있다. 통신 기술을 단말, 교환 및 전송 기술로 대별할 때, 단말과 교환 기술은 많은 발전이

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학전공
접수일자: 2017년 11월 16일, 수정완료: 2018년 1월 6일
게재확정일자: 2018년 2월 9일

Received: 16 November, 2017 / Revised: 6 January, 2018

Accepted: 9 February, 2018

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

이루어졌지만, 유선과 무선의 매체를 통한 전송기술의 경우 아직도 발전이 느린 상태이다. 특히 전송 가능 대역폭의 제한과 비선형 찌그러짐에 의한 품질의 열화를 줄이기 위한 다양한 연구가 이루어지고 있으며, 이의 대표적인 예로 블라인드 적응 등화 (blind adaptive equalizer)를 들 수 있다^{[1][4]}. 블라인드 등화를 위하여 채널의 전달 특성을 알기 위한 학습열 전송이 불필요하게 되어 채널 용량을 극대화할 수 있고, 전송 효율 개선에 의한 통신 시스템의 throughput을 개선할 수 있는 특징이 있다. 그러나 학습열 의존 등화 방식에 비하여 수렴 속도가 늦으며 등화 성능이 열화되는 문제점이 있으므로, 이를 개선하기 위하여 다양한 블라인드 적응 등화 알고리즘이 등장하고 있으며 널리 사용되는 것이 CMA와 MMA 알고리즘이다^[3]. 이들 방식에서는 송신 신호가 constant modulus를 갖는 4-QAM, PAM과 같은 신호에서 최고의 성능을 얻을 수 있지만, 신호점수 M 값이 증가되어 스펙트럼 효율을 개선할 수 있는 16-QAM과 같은 nonconstant modulus에서는 성능이 저하되는 문제점이 있다. CR-MMA는 이런 문제점을 개선키 위하여 적응 등화기의 탭 계수를 얻기 위한 오차 신호 발생시 nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로 변환 또는 축소하는 과정을 MMA 알고리즘에 도입하여 빠른 수렴 속도를 얻으며^{[6][7]}, FC-MMA는 신호점의 축소 과정 없이 수렴 속도의 개선을 목적으로 MMA 알고리즘의 오차 함수에 강제로 0점을 삽입시켜 수렴 속도를 개선시키고 있다^[2]. 지금까지는 이들 알고리즘들이 상이한 채널 환경하에서 수렴 속도가 가장 우월하다고 문헌 [2],[6]에 제시하고 있다. 본 논문에서는 동일한 채널 환경에서 이를 직접 비교하기 위하여 CR-MMA와 FC-MMA 블라인드 적응 등화 성능을 컴퓨터 시뮬레이션하였다. 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 통신 시스템의 모델을 설명한 후 3 장에서는 CR-MMA와 FC-MMA 알고리즘을 다루며, 4 장에서는 시뮬레이션의 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 기저 대역 통신 시스템 모델

그림 1은 2차원 복소 QAM 신호를 전송하는 통신 시스템의 송신부와 수신부를 나타내는 통신 시스템 모델을

나타낸 것이며, 대역 통과 부분을 나타내는 Tx 와 Rx filter 및 스펙트럼 이동을 나타내는 $\cos \omega_c t$ 와 $\sin \omega_c t$ 는 이상적으로 가정하자. 송신측 QAM Mod.에서 16-QAM과 같은 신호 s_k 를 송신하면 대역 제한과 찌그러짐을 발생하는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통과하면서 가우시안 잡음 n_k 가 추가되어 수신된다. 수신된 신호 r_k 는 응답이 f_k 인 등화기에 입력되어 채널에 의해 발생한 찌그러짐을 보상한 출력 z_k 를 얻은 후, 이는 결정 장치 (decision device)에서 송신 신호 s_k 의 추정치인 \hat{s}_k 를 얻게 된다. $s_k \approx \hat{s}_k$ 가 되기 위한 등화기의 응답 f_k 는 출력 신호 z_k 와 결정 장치의 출력 \hat{s}_k 를 이용한 modulus에 의존하는 오차 신호에 의한 적응 알고리즘을 적용한다.

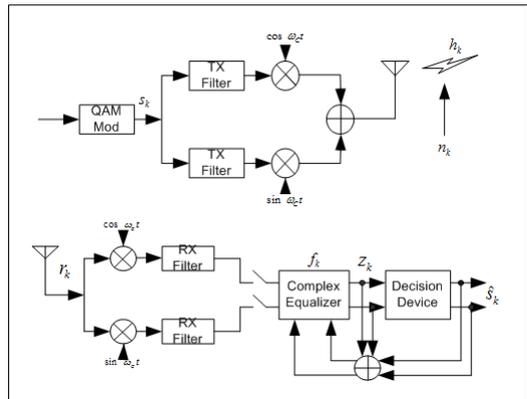


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델
Fig. 1. Baseband communication system model

2. CR-MMA 알고리즘

CR-MMA는 기존 MMA 알고리즘에서 오차 신호를 얻기 위한 등화기 출력에서 16개의 nonconstant modulus 신호점을 축소시켜 4개의 constant modulus 신호점인 $\pm 1 \pm j1$ 의 4개 신호점으로 축소하여 사용하는 개념을 말한다. 따라서 16-QAM 신호를 4-QAM 신호로 변환하여 오차 신호를 발생한다. constellation reduction에서는 modulus를 R_{RCA}^2 를 1로 줄여서 모든 신호점은 적은 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. constellation reduction을

위하여 송신 신호가 16-QAM인 경우 등화기의 출력을 Z_k 라면 다음의 식이 적용된다.

$$\widehat{Z}_{Rk} = Z_{Rk} - 2 \text{sign}(Z_{Rk}), \widehat{Z}_{Ik} = Z_{Ik} - 2 \text{sign}(Z_{Ik}) \quad (1)$$

여기서 z_{Rk} , z_{Ik} 는 그림 1에서 z_k 의 실수와 허수부를 나타낸다. 그림 2는 16-QAM 신호점에서 $1+j1$, $-3+j1$, $-3-j3$, $1-j3$ 의 4개 신호점이 식 (1)을 적용할 때 4-QAM 신호점에서 $-1-j1$ 으로 축소되는 과정을 나타낸 것이다.

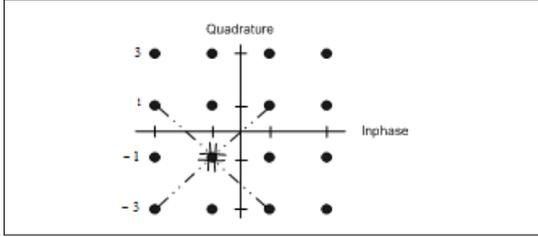


그림 2. 신호점 축소 예
 Fig. 2. Example of constellation reduction

이들을 이용하면 CR-MMA의 비용 함수와 오차 신호 및 필터 계수의 갱신식은 다음과 같이 된다.

$$J = E[(\widehat{z}_{kr} - R_R^2)^2 + (\widehat{z}_{ki} - R_I^2)^2] \quad (2)$$

$$e_{\text{CR-MMA}} = \widehat{z}_{kr} (\widehat{z}_{kr}^2 - R_R^2) + j \widehat{z}_{ki} (\widehat{z}_{ki}^2 - R_I^2)$$

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

이와 같은 알고리즘을 고려하여 그림 3은 그림 1의 수신부에서 사용되는 CR-MMA 등화기의 내부 구성도를 나타낸 것이다. 수신되는 데이터 벡터를 저장하는 버퍼를 내부에 두고 등화기의 출력 z_k 를 식 (1)을 적용하여 constellation reduction시킨 후 modulus를 이용하여 오차 신호 $e_{\text{CR-MMA}}$ 를 발생시킨 후 step 크기를 곱하여 이전 등화기 계수 f_k 에서 변동량을 뺀 후 새로운 등화기 계수 f_{k+1} 를 얻도록 되어 있으며, 그림 4는 식(2)의 CR-MMA의 오차 함수를 나타낸 것이다.

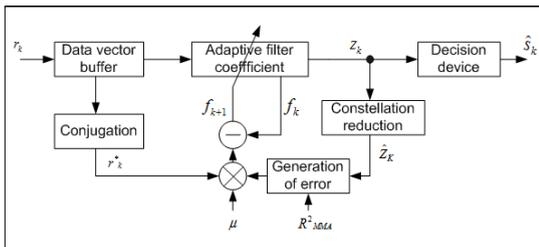


그림 3. CR-MMA의 내부 구조
 Fig. 3. Internal structure of CR-MMA

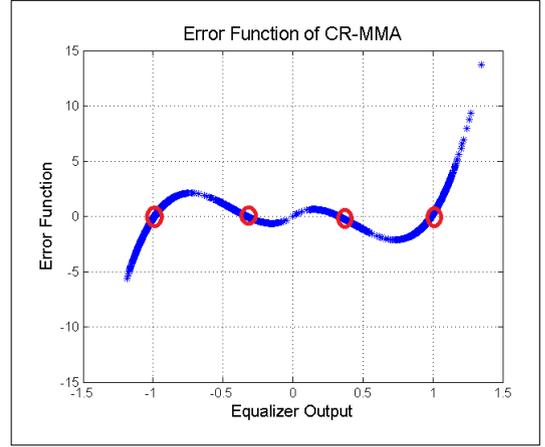


그림 4. CR-MMA의 오차 함수
 Fig. 4. Error function of CR-MMA

3. FC-MMA 알고리즘

FC-MMA 은 오차 함수의 (+)와 (-) 영역을 분할하여 송신 신호 정상도에서 중간 심볼 레벨에 강제로 null을 삽입시킨다. null을 삽입시켜 송신 constellation에서 심볼 레벨의 중간에서 오차를 0으로 만들뿐 만 아니라 전체적인 오차 함수를 줄일 수 있게 된다. 이는 기존 MMA 오차 함수의 실수부와 허수부에 다음과 같이 주어지는 항을 곱하여 얻어진다.

$$(z_{kr}^2 - (m-1)^2)/R_{\text{FC-MMA}}^2, (z_{ki}^2 - (m-1)^2)/R_{\text{FC-MMA}}^2 \quad (3)$$

여기서 m 은 송신 신호의 심볼 레벨수를 나타내며 16-QAM에서는 2, 64-QAM에서는 4의 상수값이다. 이와 같이 곱해지는 항은 기존 MMA 오차 함수의 대칭 특성을 변화시키지 않는다. FC-MMA의 실수와 허수부의 비용 함수와 오차 함수는 다음과 같이 된다.

$$J_{k,R,\text{FC-MMA}} = E\left[\frac{z_{kr}^6}{6R_R^6} + \frac{(m-1)^2 z_{kr}^2}{2} - \frac{z_{kr}^4}{4} - \frac{(m-1)^2 z_{kr}^4}{4R_R^4} + H_R\right] \quad (4)$$

$$J_{k,I,\text{FC-MMA}} = E\left[\frac{z_{ki}^6}{6R_I^6} + \frac{(m-1)^2 z_{ki}^2}{2} - \frac{z_{ki}^4}{4} - \frac{(m-1)^2 z_{ki}^4}{4R_I^4} + H_I\right]$$

$$e_{k,\text{FC-MMA}} = \frac{(z_{kr}^2 - (m-1)^2)}{R_R} z_{kr} (z_{kr}^2 - R_R) + j \frac{(z_{ki}^2 - (m-1)^2)}{R_I} z_{ki} (z_{ki}^2 - R_I)$$

여기서 H_R , H_I 는 $J_{k+1,R;I} \geq 0$ 이 되도록 선택되어지는 적분 상수를 말하며 다음의 식 (5)와 같이 된다.

$$H_{R;I} = \frac{R_{R;I}[3(m-1)^2 - R_{R;I}]}{12} \quad (5)$$

dispersion constant는 수렴 후 등화기 출력의 통계치가 송신 심볼의 통계치와 matching시키도록 등화기 이득

을 조절하는데 중요한 역할을 수행하며 식 (6)과 같이 된다.

$$R_R = \frac{E[s_{kR}^6 - s_{kR}^4(m-1)^2]}{E[s_{kR}^4 - s_{kR}^2(m-1)^2]}, R_I = \frac{E[s_{kI}^6 - s_{kI}^4(m-1)^2]}{E[s_{kI}^4 - s_{kI}^2(m-1)^2]} \quad (6)$$

그림 5는 FC-MMA의 오차 함수를 나타낸 것으로 2개의 부차적인 0점이 중앙 심볼 레벨에 해당하는 특정한 위치에서 발생된다. 이는 송신 성상도의 중앙 심볼 레벨 점에서 오차를 0으로 할 뿐만 아니라 모든 오차 함수를 최소화한다. 식 (4)와 (6)을 이용하면 FC-MMA 알고리즘에서의 탭 계수 갱신식은 다음과 같이 된다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu e_{k,FC-MMA}^* \quad (7)$$

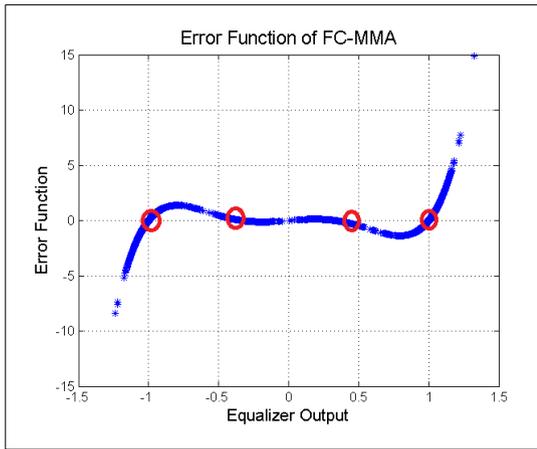


그림 5. FC-MMA의 오차 함수
Fig. 5. Error function of FC-MMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션

블라인드 적응 알고리즘인 CR-MMA와 FC-MMA의 등화 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 동일한 채널에서 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝 크기 μ 는 CR-MMA에서는 0.00045와 FC-MMA에서는 0.0006이었으며, 등화기의 적응 필터 차수는 15차 FIR, 송신 신호로는 16-QAM s_k 를 이용하였다. s_k 는 찌그러짐을 발생시키는 통신 채널 h_k 를 통과한 후 잡음 n_k 를 추가하여 수신 신호 r_k 을 얻었다. 채널 계수는 [1, 0, 0.2295-0.1933j, 0, 0, 0.1393-0.1435j]이었으며, 그림 6은 전체적인 신호 처리 과정을 나타낸 것이다.

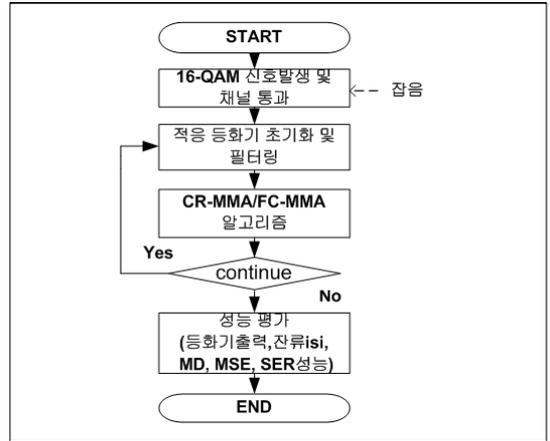


그림 6. 신호 처리 흐름도
Fig. 6. Signal processing flowdiagram

그림 7은 정상 상태에서 적응 등화기의 첫 번째 성능 지수인 등화기 출력 신호의 성상도를 나타낸 것이다. 성상도에서 각 신호점간의 거리가 멀며 신호점의 폭이 좁을수록 등화 능력이 우수하다. 성상도에서 FC-MMA가 CR-MMA보다 신호점간의 거리가 멀고 신호점들의 폭이 좁으므로 적응 등화 능력이 우월함을 정성적으로 알 수 있다.

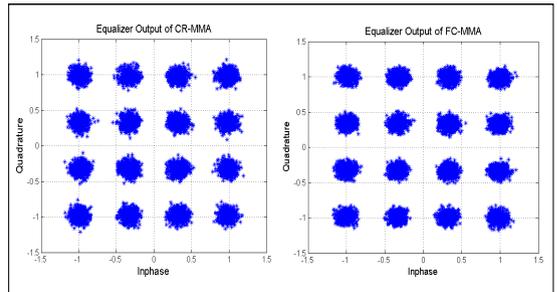


그림 7. 등화기 출력 신호 성상도
Fig. 7. Equalizer Output signal constellation

적응 등화기의 성능을 나타내는 내부 지수로 수렴 속도를 알 수 있는 잔류 isi (residual isi)와 최대 찌그러짐 (maximum distortion) 및 MSE를 사용하였다. 잔류 isi는 통신 채널 h_k 와 등화 필터 계수 f_k 가 완전 보상이 될 때 시간 영역에서는 임펄스 신호가 된다. 그러나 완전 보상은 불가능케 되어 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 전력 크기를 나타내며, 최대 찌그러짐은 잔여 성분들의 전압 크기를 나타낸다. MSE는 복원 신호점을 중

심으로 jitter의 양을 의미하며, 이들의 성능 곡선에서는 채널의 순시 변동에 빠르게 적응 여부를 나타내는 정상 상태까지 도달 시간을 나타내는 수렴 성능을 알 수 있다.

그림 8은 잔류 isi의 성능을 나타낸 것으로, 반복될수록 양호한 수렴 특성을 가지며 등화 잡음이 매우 적어짐을 알 수 있다. 적응 등화기의 정상 상태를 -20dB로 설정할 때 여기에 도달하는 수렴 속도에서 CR-MMA는 382회, FC-MMA는 659회가 소요되어 수렴 속도에서는 CR-MMA가 FC-MMA보다 약 1.7배 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여 성분에서는 FC-MMA가 CR-MMA보다 대략 1.2dB 정도 더욱 개선시킴을 알 수 있다. 그림 9는 최대 찌그러짐 성능을 나타낸 것으로 정상 상태로 0.35volt로 설정할 때 CR-MMA는 480회, FC-MMA는 661회가 소요되어 수렴 속도에서는 CR-MMA가 1.3배 정도 빠르며 정상 상태 이후의 잔여 성분에서 FC-MMA가 CR-MMA보다 대략 0.08volt 정도 적으므로 이의 성능이 개선됨을 알 수 있다.

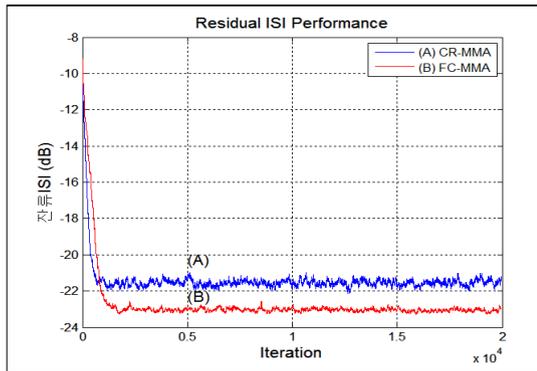


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

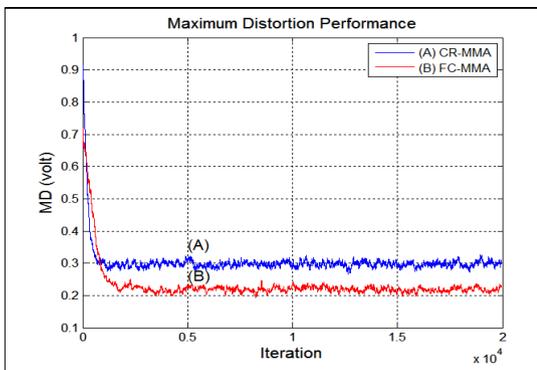


그림 9. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 9. Maximum distortion performance

그림 10은 등화기 출력 신호와 결정 장치 출력간의 진폭의 차이의 제곱 또는 jitter의 크기를 나타내는 MSE 성능을 나타낸 것이다. MSE에서도 -18dB를 정상 상태 기준으로 설정할 때 CR-MMA는 425회, FC-MMA는 618회가 소요되어 수렴 속도에서 CR-MMA가 FC-MMA보다 약 1.5배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후부터는 FC-MMA가 약 1.5dB 정도 CR-MMA보다 개선됨을 알 수 있다.

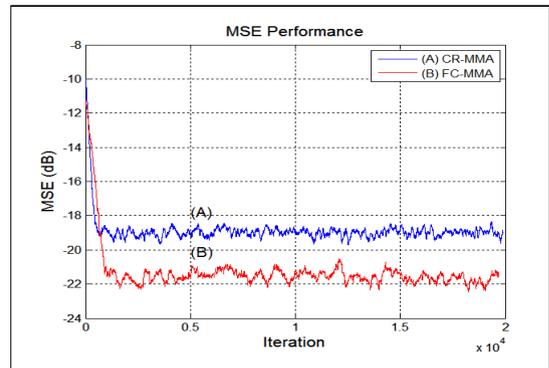


그림 10. MSE 성능
 Fig. 10. MSE performance

그림 11은 이들 두가지 알고리즘의 외부 잡음에 대한 robustness를 확인하기 위하여 신호대 잡음비 SNR에 대한 SER 성능을 나타낸 것이다. 시뮬레이션 결과 잡음에 대한 robustness에서는 CR-MMA가 FC-MMA보다 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다. 즉 채널이 전력이나 잡음 제한인 경우에는 CR-MMA가 사용 가능하며, 대역폭 제한인 경우에는 FC-MMA를 사용하는 것이 좋을 수 있다.

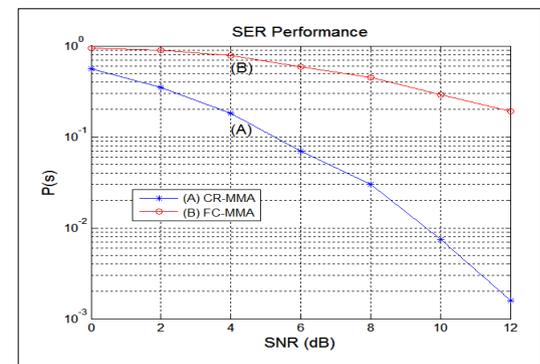


그림 11. SER 성능
 Fig. 11. SER performance

V. 결론

논문에서는 16-QAM과 같은 대역폭 효율적인 신호를 전송하는 통신 시스템에서 채널의 찌그러짐을 보상하기 위하여 사용되는 CR-MMA와 FC-MMA 블라인드 적응 등화 알고리즘의 성능을 비교하였다. CR-MMA는 신호 점을 축소한 후 이를 이용하여 오차 신호를 발생시키며, FC-MMA는 신호점 축소없이 오차 함수의 (+)와 (-) 영역을 분할하여 중간 심볼 레벨에 강제로 null을 삽입시키는 원리이다. 각 알고리즘의 성능 비교 결과 등화기 내부의 지수인 잔류 isi, 최대 찌그러짐, MSE 성능에서는 정상 상태 이후에는 FC-MMA가 CR-MMA보다 훨씬 우수하였다. 그러나 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서는 CR-MMA가 FC-MMA보다 1.3~1.7배 정도 빠름을 알 수 있었다. 등화기 외부의 성능 지수인 SER에서는 CR-MMA가 FC-MMA보다 훨씬 우월한 성능을 보였다. 이와 같은 결과를 고려할 때, 통신 채널의 환경이 잡음 제한 또는 전력 제한인 경우에는 FC-MMA 보다 CR-MMA가 적당함을 알 수 있고, 대역폭 제한인 경우 FC-MMA를 사용하는 것이 적당함을 알 수 있다. 그러나 적응 등화기의 성능에서 수렴 속도와 정상 상태 이후의 잔여량에서는 항상 tradeoff 관계가 있으므로, 이들을 모두 만족시킬 수 있는 적응 알고리즘에 대한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

References

- [1] J.Yang, J.J.Werner, G.A.Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization and Its Generalized Algorithms", IEEE Journal on S.A.C., Vol.20, No.3, pp.997~1015, June 2002. DOI : 10.1109/JSAC.2002.1007381
- [2] S.A.Sheikh, P.Fan, "Fast Convergence Multimodulus Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals", Int. Conf. on Information and Emerging Technology, pp.1~5, 2007. DOI : 10.1109/ICIET.2007.4381307
- [3] W. Rao, K.M.Yuan, Y.Guo, C.Yang, "A simple constant modulus algorithm for blind equalization suitable for 16-QAM Signal", Int. Conf on signal

processing, Vol.2, pp.1963~1966, 2008.

DOI : 10.1109/ICOSP.2008.4697528

- [4] W. Rao, H.J.Xu et al., "Joint Blind Equalization and Detection of QAM and PAM transmission", ICMMT 2010 Proceeding, pp.1248~1251, 2010. DOI : 10.1109/ICMMT.2011.5524979
- [5] W. Rao, "Amplitude Transformation-Based Blind Equalization Part 2 : Suitable for High-Order QAM Signals", Int. Conf. on Environmental Science and Information Application Technology, Vol.10, pp.1282~1286, 2011.
- [6] J.S.Yoon, S.G.Lim, "The Performance of Dual Structure CR-CMA Adaptive Equalizer for 16-QAM Signal", Jour. on I.W.I.T., Vol.12, No.5, pp.107~114, Oct. 2012.
- [7] S.G.Lim, "Performance Improvement of MMA Adaptive Equalization Algorithm by using the Constellation Reduction in QAM Signal", Jour. on I.W.I.T., Vol. 14, No.5, pp. 1~7, Oct. 2014.
- [8] S.G.Lim, "FC-MMA Adaptive Equalization Algorithm to improve the Convergence Speed of MMA in 16-QAM System", Jour. of I.W.I.T., Vol. 14, No.1, pp.93~99. Feb. 2014.
- [9] 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>