

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2019.19.2.85>

IIBC 2019-2-12

QAM 신호 전송에서 MMA 적응 등화 알고리즘의 Robustness 성능 개선

A Robustness Performance Improvement of MMA Adaptive Equalization Algorithm in QAM Signal Transmission

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문에서는 QAM 신호 전송시 채널에서 발생하는 부호간 간섭을 줄일 수 있는 기존 MMA (Multi Modulus Algorithm) 적응 등화 알고리즘의 잔류 isi와 robustness 성능을 개선시키기 위한 M-CMA (Multi-Constant Modulus Algorithm)에 관한 것이다. 기존 MMA 알고리즘은 고정된 dispersion constant를 이용한 비용 함수와 오차 함수에 의존하지만, 제안하는 M-CMA 알고리즘은 복수개의 dispersion constant를 이용한 새로운 비용 함수와 오차 함수를 이용한다. 이로 인하여 CMA의 robustness와 MMA의 진폭과 위상의 동시 보상이 가능하게 된다. 제안 M-CMA 알고리즘의 성능을 기존 MMA 알고리즘과 비교하기 위하여 동일한 채널과 잡음 환경하에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 위한 지수로는 등화기 출력 신호 정상도, 잔류 isi, MD 및 MSE learning 곡선과 robustness를 나타내는 SER을 사용하였다. 시뮬레이션 결과 모든 성능 지수에서 M-CMA가 기존 MMA 보다 robustness와 나머지 성능의 우월함을 확인하였다.

Abstract This paper related with the M-CMA adaptive equalization algorithm which is possible to improve the residual isi and robustness performance compare to the current MMA algorithm that is reduce the intersymbol interference occurs in channel when transmitting the QAM signal. The current MMA algorithm depend on the cost function and error function using fixed signal dispersion constant, but the M-CMA algorithm depend on the new proposed cost function and error function using multiple dispersion constant. By this, it is possible to having robustness of the CMA and simultaneous compensation of amplitude and phase of MMA. The computer simulation was performed in the same channel and noise environment for compare the proposed M-CMA and current MMA algorithm. The equalizer output signal constellation, residual isi, MD, MSE learning curves and SER, represents the robustness were used for performance index. As a result of simulation, the M-CMA has more superior to the MMA in robustness and other performance index.

Key Words : MMA, M-CMA, multiple dispersion constant, residual isi, MD

1. 서 론

디지털 통신의 응용이 증대되면서 고속 전송율과 한

정된 스펙트럼을 효율적으로 이용하기 위한 전송 기술이 중요해진다. 전송 기술은 채널을 통해 송수신 시스템간을 연결하여 정보의 신속, 정확하게 전달기 위한 요소

*정희원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2019년 1월 8일, 수정완료 2019년 2월 28일
게재확정일자 2019년 4월 5일

Received: 8 January, 2019 / Revised: 28 February, 2019 /

Accepted: 5 April, 2019

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

기술을 말한다. 특히 대역 제한 특성과 다중 경로 및 이동에 의한 도플러 효과등을 발생시키는 채널에서는 부호간 간섭, 동기 이탈등에 의하여 통신 시스템의 throughput 성능이 열화된다. 특히 부호간 간섭은 수신기의 결정 장치에서 이전 부호의 영향이 다음 부호의 결정에 영향을 미쳐 비트 오류율이나 심볼 오류율의 직접적인 원인이 되므로 이에 대한 적절한 기술적 대응책이 필요하다. 주된 대응책으로 널리 사용되는 것은 적응 등화기이다. 등화기는 채널 전달 함수의 역함수를 갖는 디지털 필터이며, 적응은 역함수를 채널 상태에 따라 수시로 변동시킬 수 있음을 말한다. 따라서 등화를 위해서는 채널 전달 함수를 정확하게 추정해야 하며, 초기의 등화기는 상호 약속된 학습열에 의한 이의 역특성을 갖도록 하였다^{[1][2]}. 그러나 시변 채널인 경우 전달 함수가 변동하므로 등화기 필터 계수를 적응적으로 변화시키는 것이 필요하지만, 이로 인한 채널 용량과 전송 효율이 저하된다. 블라인드 적응 등화기가 학습열에 의존하지 않고 수신측에서 데이터를 수신하면서 스스로 적응 등화가 가능하지만 학습열 의존 방식보다 등화 성능이 열화된다. 블라인드 적응 등화를 위한 알고리즘으로는 CMA와 MMA등을 들 수 있다^{[3][4]}. CMA는 연산량이 적고 외부 잡음에 강한 robustness성을 갖지만 부호간 간섭 제거를 위한 채널의 진폭 찌그러짐만을 보상하므로 위상 찌그러짐 보환책이 따로 필요하다. 반면 MMA는 연산량이 CMA보다 증가되지만 진폭과 위상 찌그러짐의 동시 보상이 가능하며, robustness와 다른 등화 성능은 CMA보다 열화된다. 본 논문에서는 CMA와 MMA간의 연산량과 등화 성능간의 상반된 조건을 적절히 조합시킨 M-CMA (Multi-Constant Modulus Algorithm) 알고리즘을 제안하였으며, 이의 개선된 적응 등화 성능을 시뮬레이션을 통해 확인하였다^{[3][6]}. 이를 위해 2장에서는 블라인드 적응 등화기를 사용하는 기저 대역 통신 모델과 CMA와 MMA 및 M-CMA 알고리즘에 대해 설명한 후, 3장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 환경, 과정 및 MMA와 M-CMA 알고리즘의 성능 비교 결과를 다룬다. 적응 등화 성능을 비교하기 위하여 성능 지수인 등화기 출력 신호 정상도, 잔류 isi 와 MD, MSE 및 SER을 적용하였으며, 마지막으로 4장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 통신 시스템 모델

그림 1은 적응 등화기를 사용한 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 기저 대역 송신 신호 s_k 는 정방형 QAM의 정상도를 심볼 형태로 분포하며 각 채널 별로 i.i.d. (independently and identically distribute) 분포한다. 송신측에서 기저 대역 신호 s_k 를 발생하면 부호간 간섭을 발생하는 임펄스 응답 계수가 h_k 인 채널을 통하여 수신측에 전달된다. 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 부가 잡음 n_k 이 더해지며 다음과 같다.

$$r_k = \sum_{i=0}^{M-1} h_i s_{k-i} + n_k = h_k * s_k + n_k \quad (1)$$

여기서 $*$ 는 선형 convolution 연산을 나타내는 기호이며, M 은 채널을 나타내는 필터의 차수를 나타내고 h_k 은 미지의 복소값이다. 식(1)의 신호는 차수가 N 이고 계수가 f_k 인 등화기에 인가되며 이들은 다음과 같이 된다.

$$f_k = [f_0 \ f_1 \ f_2 \ \dots \ f_{N-1}] \quad (2)$$

$$r_k = [r_k \ r_{k-1} \ r_{k-2} \ \dots \ r_{k-N+1}]$$

이들을 이용하면 등화기 출력 z_k 는 다음과 같다.

$$z_k = f_k * r_k = s_k * h_k * f_k + n_k * f_k = s_k * \delta_k + \alpha_k \quad (3)$$

δ_k 는 임펄스이며 α_k 는 적응 등화에 의한 잡음의 역압 능력을 나타낸다. 계수가 f_k 인 적응 등화기의 주파수 전달 함수 $F(\omega)$ 는 통신 채널의 역전달 함수 $1/H(\omega)$ 를 갖도록 설정된다. 그림에서 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하며 등화기에 의해 발생하는 지연 시간은 무시한다. 적응 등화기의 출력 z_k 를 이용하여 오차 신호를 발생한 후 새로운 등화기 탭 계수 f_{k+1} 을 갱신하며, 출력은 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치 \hat{s}_k 를 얻게 된다.

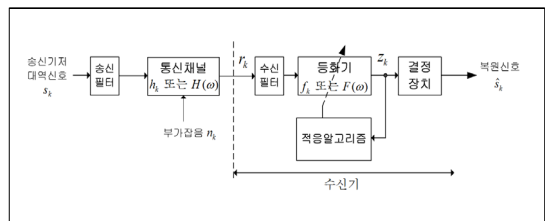


그림 1. 통신 시스템 모델
Fig. 1. Communication system model

2. CMA 와 MMA 알고리즘

CMA는 블라인드 적응 등화를 위한 최초의 알고리즘으로 Godard등이 제안한 알고리즘을 말한다. CMA의 비용 함수는 다음과 같으며, 이를 최소화시키도록 반복적으로 탭 계수를 갱신하게 된다.

$$J = E[(|z_k|^2 - R_{CMA}^2)^2] = E[e_k^2], R_{CMA}^2 = \frac{E[|z_k|^4]}{E[|z_k|^2]} \quad (4)$$

R_{CMA}^2 은 constant modulus 또는 dispersion constant 라고 하며 등화기 출력 $|z_k|^2$ 이 사반 평면상에서 반지름이 constant modulus인 원주상에 존재하도록 탭 계수를 갱신하게 된다. 이때 QAM 신호와 같은 복소수의 절대값 자승을 이용하므로 진폭 보상이 가능하지만 위상 보상이 불가능한 단점을 가지며, 오차 신호와 탭 계수 갱신은 다음과 같다.

$$\overline{e_{kCMA}} = z_k (|z_k|^2 - R_{CMA}^2) \quad (5)$$

$$f_{k+1} = f_k - \mu (|z_k|^2 - R_{CMA}^2) r_k^*$$

반면 MMA 적응 등화 알고리즘에서는 등화기 출력 z_k 의 실수부와 허수부를 나타내는 z_{kr} , z_{ki} 을 독립적으로 처리하는 오차 신호를 얻은 후 이를 탭 계수 갱신을 위하여 사용하므로 진폭과 위상의 동시 보상이 가능케 되지만, 이들을 분리, 처리하기 위한 연산이 증대된다. MMA의 비용 함수 J는 다음과 같이 정의되며, 이를 최소화시키도록 등화기 탭 계수를 갱신한다.

$$J = E[(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2)^2 + (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2)^2] \quad (6)$$

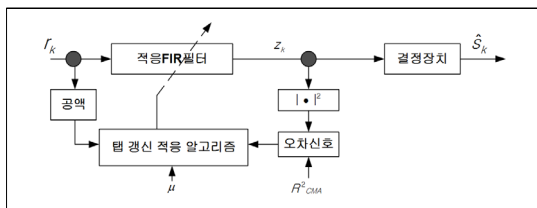
$$R_{MMA}^2 = \frac{E(|s_{kr}^4|)}{E(|s_{kr}^2|)} = \frac{E(|s_{ki}^4|)}{E(|s_{ki}^2|)}$$

MMA의 오차 신호와 등화 필터 계수의 갱신식은 다음과 같다.

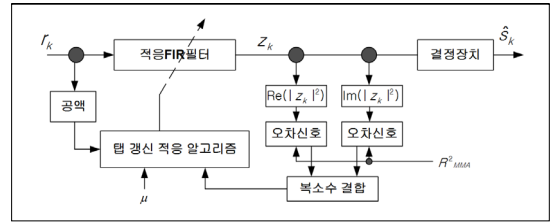
$$\overline{e_{kMMA}} = z_{kr} (|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{ki} (|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2) \quad (7)$$

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

이상과 같이 동작하는 CMA와 MMA 내부 구조를 그림 2에 나타내었고, 그림 3은 MMA의 오차 신호이다.



(1) CMA의 내부 구조



(2) MMA의 내부 구조

그림 2. CMA와 MMA의 내부 구조

Fig. 2. Internal structure of CMA and MMA

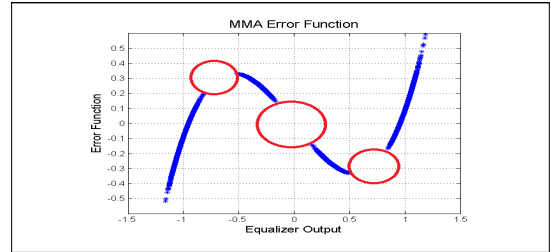


그림 3. MMA의 오차 신호

Fig. 3. Error signal of MMA

3. M-CMA 알고리즘

M-CMA는 CMA의 강인한 robustness성과 MMA의 진폭과 위상의 동시 보상 능력을 결합시키기 위하여 등장한 알고리즘이다. 이를 위해 MMA에서와 같이 다차원 QAM 신호에서 반송과 위상의 정보는 위상 offset을 제거하기 위하여 비용 함수에 반영되고 있다. 16-QAM 신호에서 inphase와 quadrature축에서 $[\pm 0.3, \pm 1]$ 의 정규화된 진폭을 갖게 되므로, 제안 M-CMA 알고리즘에서 등화기의 비용 함수와 오차 함수 및 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$J = E[(z_{kr}^2 - 0.3)^2 \cdot (z_{kr}^2 - 1)^2 + (z_{ki}^2 - 0.3)^2 \cdot (z_{ki}^2 - 1)^2] \quad (8)$$

$$\overline{e_{kM-CMA}} = [z_{kr} (|z_{kr}|^2 - 0.3)(z_{kr}^2 - 1) + j z_{ki} (|z_{ki}|^2 - 0.3)(z_{ki}^2 - 1)]$$

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

M-CMA의 내부 구조도 그림 2의 MMA와 동일하고, 오차 신호를 얻는 과정이 식 (7)과 (8)처럼 상이하며 이의 오차 신호를 그림 4에 나타내었다.

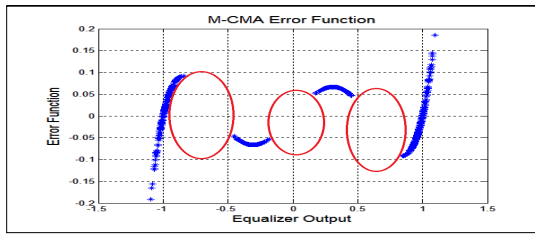
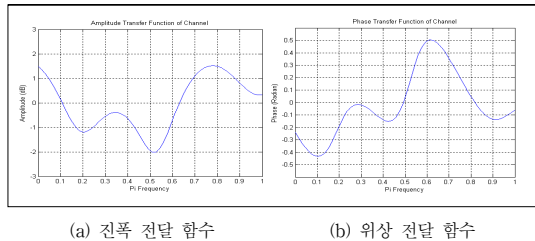


그림 4. M-CMA의 오차 신호
Fig. 4. Error signal M-CMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

제안 M-CMA는 CMA와 MMA 알고리즘의 특성을 조합시켜 적응 등화 특성을 MMA보다 개선시키기 위하여 등장하였으며, 이를 확인하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 동일 채널에서 신호대 잡음비를 30dB, 적응을 위한 스텝 크기로서 MMA는 $\mu = 0.0009$, M-CMA에서 $\mu = 0.0015$ 이었으며, 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터이었다. 그림 5는 부호간 간섭을 발생시키는 통신 채널의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 나타낸 것이다.



(a) 진폭 전달 함수 (b) 위상 전달 함수

그림 5. 채널의 주파수 전달 함수와 영점 분포
Fig. 5. Frequency transfer function

그림 6은 시뮬레이션을 위한 전체적인 신호 처리 과정을 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 5의 통신 채널을 통과시켜 부호간 간섭을 부가한 후, 30dB의 신호대 잡음 전력비를 갖도록 잡음을 더하여 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이와 같은 수신 신호는 적절한 초기화 과정을 거친 후, MMA와 M-CMA 적응 알고리즘으로 처리하여 이의 성능을 나타내는 등화기 출력 z_k 의 정상도, 잔류 isi와 MD, MSE 및 SER을 계산하였다.

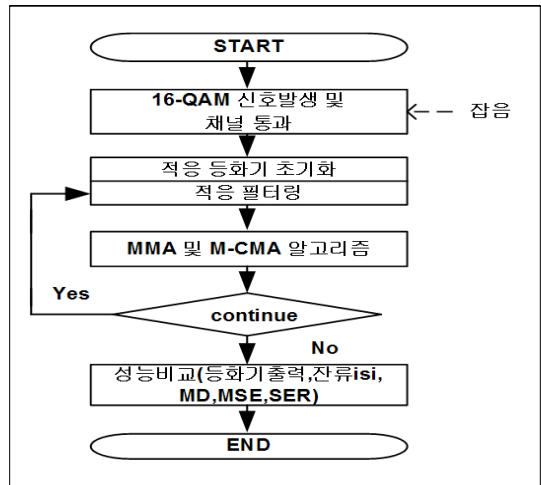


그림 6. 신호 처리 흐름도
Fig. 6. Flowdiagram of signal processing

그림 7은 이들 알고리즘을 첫 번째 성능 비교를 위하여 정상 상태 이후의 등화기 출력 신호의 정상도를 나타낸 것이다. 정상도에서 각 신호점들의 폭이 좁고, 신호점 간 거리가 멀수록 결정 장치에서 오류 발생 가능성이 감소되므로 우수한 성능을 갖는다. 정성적으로 이와 같은 관점에서 M-CMA가 기존 MMA보다 우월함을 알 수 있다.

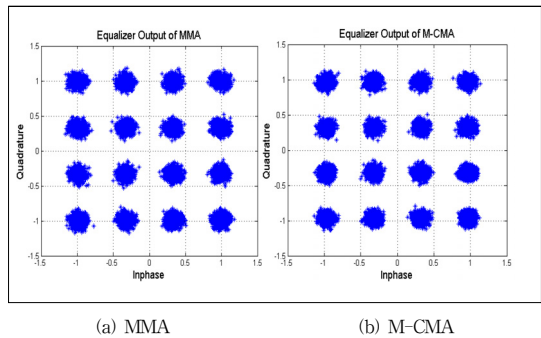


그림 7. 등화기 출력 신호 정상도
Fig. 7. Output signal constellation of equalizer

두 번째 성능 비교를 위한 지수로 잔류 isi와 MD, MSE 를 사용하였으며, 이들 곡선에서는 초기 과도 과정을 지나 정상 상태에 도달할 때까지의 수렴 속도와 정상 상태에서의 잔류량을 알 수 있다. 잔류 isi는 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화 시 이들의 종합 특성은 시간 영역에서는 임펄스, 주파수 영역에서는 평탄 특성이 된다. 이는 이론적이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지

못하고 잔류 성분들이 존재하게 되므로 이들의 전력 크기를 의미한다. 그림 8은 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 정상 상태 (-20dB)에 도달하기 위해 M-CMA는 3788회, MMA는 3340회가 소요되어 수렴 속도에서는 MMA가 M-CMA보다 약 1.14배 정도 빠르지만, 수렴후의 잔여량은 M-CMA가 MMA보다 평균 0.5dB 정도 훨씬 적어지므로 misadjustment에 의한 등화 잡음이 적게 된다.

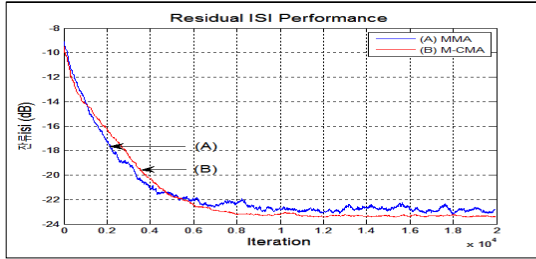


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

그림 9는 MD 성능을 나타낸 것으로 잔여 isi 성분을 전압으로 나타낸 것이다. 정상 상태 (0.3)에 도달하기 위해 M-CMA는 4515회, MMA는 4284회가 소요되어 MMA가 M-CMA보다 약 1.05배 빠르지만 수렴후의 잔여량에서는 M-CMA가 MMA보다 평균 1.1dB 개선된다.

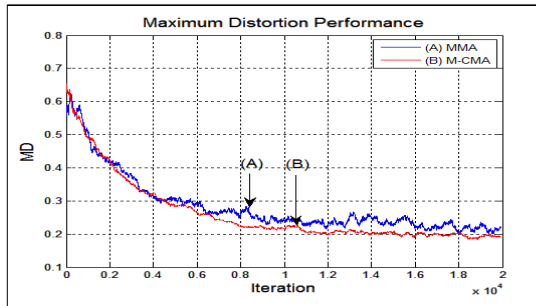


그림 9. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 9. Maximum distortion performance

그림 10은 MSE 성능을 나타낸 것으로 등화기 출력과 결정 장치의 출력간에 발생하는 진폭의 차이를 정의되며 jitter값을 의미한다. 정상 상태 (-20dB)에 도달하기 위한 수렴 속도에서 M-CMA는 4856회, MMA는 3779회가 소요되어 수렴 속도에서 MMA가 약 1.3배 빠르지만, 정상 상태 이후 잔류양에서는 M-CMA가 MMA보다 약 0.4dB 정도 개선된다.

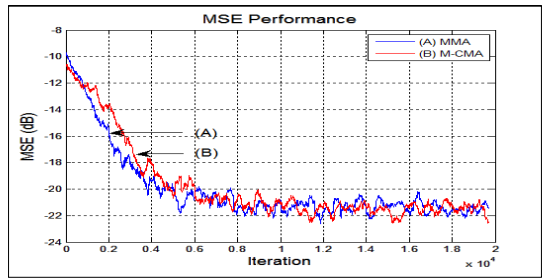


그림 10. MSE 성능
 Fig. 10. MSE performance

그림 11은 SER 성능을 나타낸 것으로 채널에 부가되는 잡음에 대한 robustness성을 알 수 있으며, 신호대 잡음비를 0에서 30dB까지 5dB 단위로 변화시킬 때 MMA와 M-CMA의 심볼 오류율을 나타냈다. 동일한 신호대 잡음비에서 심볼 오류 개수가 적을수록 우월한 robustness성을 갖게 되는데, 신호대 잡음비가 0~10dB의 범위에서는 MMA가 M-CMA보다 우월하지만, 그 이상의 범위에서는 M-CMA가 MMA보다 월등히 우월함을 알 수 있다.

M-CMA는 CMA로부터 개량되었으며 내부 구조는 MMA와 같지만 탭 갱신식은 CMA 형태를 취하므로 신호대 잡음비가 낮을때는 CMA의 한계성을 가진다. 신호대 잡음비가 낮은 구간에서는 MMA보다 열악하지만 10dB 이상에서는 이를 극복하고 MMA보다 우월하며, 심볼 오류율 10⁻²에서 M-CMA가 MMA보다 우월하여 등화 이득이 약 2dB 정도이며, 신호대 잡음비가 증가할수록 등화 이득이 증가됨을 알 수 있다. 일반적인 상용 통신에서 신호대 잡음비가 10dB 이상임을 고려할 때 M-CMA는 상용 통신 환경에서 외부의 부가 잡음에 대한 robustness가 크게 개선됨을 알 수 있다.

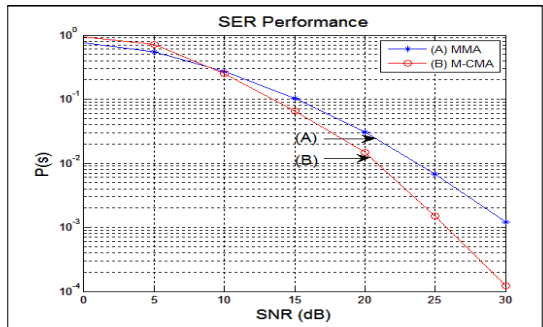


그림 11. SER 성능
 Fig. 11. SER performance

IV. 결론

본 논문은 기존 MMA 적응 등화 알고리즘의 성능을 개선하기 위하여 새롭게 제안하는 비용 함수와 오차 함수를 갖는 M-CMA 알고리즘에 관한 것이다. M-CMA는 CMA의 외부 잡음에 대한 robustness성과 MMA의 진폭과 위상의 동시 보상 능력을 가지면서 열화되는 등화 성능을 개선할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

등화 성능 지수에서 잔류ISI, MD, MSE에서 M-CMA는 MMA보다 정상 상태 이후 대략 0.4~1.1dB 정도 개선되었으며, 특히 SER 성능에서는 월등히 robust함을 알 수 있었다. 그러나 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 속도에서는 약 1.05~1.3배 정도 늦어짐을 확인하였다. 이는 비교적 채널의 변화가 느리고 신호대 잡음비가 충분히 확보되는 채널 환경에서 적응 등화를 위한 알고리즘으로 M-CMA가 사용 가능케 될 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 결과는 적응 등화기에서 성능과 수렴 속도간의 tradeoff 조건이 언제나 성립되므로, 향후 이와 같은 조건들을 해결할 수 있는 방안에 대한 연구가 지속적으로 필요하다.

References

[1] 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.
doi: 10.1109/TSP.2010.2044255.

[2] J.Yang, J.J.Werner, G.A.Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization Algorithm", 13th Int. Conf. of DSP, Vol.1, pp.127~130, July 1997.
doi:10.1109/ICIME.2010.5478261.

[3] G. Giunta, F. Benedetto, "A Signal Processing Algorithm for Multi-Constant Modulus Equalization", 36TH Int. Conf. on Telecom. and Signal Processing, pp.52~56, Feb. 2013.
doi: 10.1109/TSP.2013.6613890.

[4] J. Yang, J. J. Werner, D. D. Harman, G. A. Dumont, "Blind Equalization for Broadband Access", IEEE Commun. Magazine, Vol.37, No.4,

pp.87~93, 1999.

doi: 10.1109/35.755455.

[5] S. Abrar, A. K. Nandi, "Blind Equalization of square-QAM Signals : A Multimodulus Approach", IEEE Trans. on Commun., Vol.58, No.6, pp.1674~1685, 2010.
doi: 10.1109/TCOMM.2010.06.0900552

[6] J. T. Yuan, K. D. Tsai, "Analysis of the multi-modulus Blind Equalization Algorithm in QAM Communication Systems", IEEE Trans. on Comm., Vol.53, No.9. pp.1427~1431, 2005.
doi: 10.1109/TCOMM.2005.855017.

[7] R. M. Gray, T. G. Stockham, "Dithered Quantizers", IEEE Trans. on Inf. Theory, Vol.39, No.3, May 1993.

[8] S.G.Lim, "The Performance Comparison of the CMA and MMA Algorithm for Blind Adaptive Equalization", Jour. on. I.W.I.T., Vol.12, No.2, pp.153~158, 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