

<https://doi.org/10.7236/IIBC.2017.17.3.87>

IIBC 2017-3-9

16-QAM 신호에서 적응 등화를 위한 CR-MMA와 RMMA 알고리즘의 성능 비교

Performance Comparison of CR-MMA and RMMA Algorithm for Adaptive Equalization in 16-QAM Signals

임승각*

Seung-Gag Lim*

요약 본 논문에서는 nonconstant modulus 신호를 대상으로 채널의 찌그러짐을 보상하기 위한 CR-MMA (Constellation Reduction - Multiple Modulus Algorithm)와 RMMA (Region based Multiple Modulus Algorithm) 등화 알고리즘의 성능을 비교하였다. 적응 등화를 위한 오차 신호를 얻기 위하여 CR-MMA에서는 모든 신호점들을 constant modulus를 갖는 신호로 축소하지만, RMMA에서는 모든 신호점들이 존재하는 지역을 4개로 분할한 후 이를 지역 기반으로 축소하게 된다. 이와 같은 축소 원리를 적용하여 적응 등화를 위한 탭 계수 갱신을 수행하게 되지만 이들은 각기 다른 등화 성능을 갖게 되므로, 논문에서는 이들의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인한다. 시뮬레이션 결과 RMMA는 출력 신호 정상도와 잔류 isi 및 최대 찌그러짐과 SER 성능이 CR-MMA보다 우월하지만, 수렴 속도가 늦어졌다.

Abstract This paper compares the equalization algorithm of CR-MMA (Constellation Reduction-Multi Modulus Algorithm) and RMMA (Region based Multi Modulus Algorithm) for the compensation of channel's distortion in nonconstant modulus signal. In order to obtain the error signal for adaptive equalization, every signal points are reduced to the constant modulus signal in CR-MMA and every signal points are separated into the 4 regions, then the reductions are performed based on this region in RMMA. These two algorithm based on the reduction principle such as in order to updating the tap coefficient in the adaptive equalization, it has different equalization performance. The computer simulation was performed in order to compare the each equalization performance in this paper. As a result of computer simulation, RMMA 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, RMMA, residual isi, constant modulus, Maximum Distortion

1. 서론

모든 디지털 통신 시스템에서 전송 신호는 대역 제한

과 다중 경로 특성을 갖는 유선과 무선 채널을 통하여 수신측으로 전송된다. 한정된 채널 대역폭을 통해 대량의 정보 전달을 위해 스펙트럼 효율이 높은 신호 방식이 선

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2017년 2월 20일, 수정완료 2017년 5월 9일
게재확정일자 2017년 6월 9일

Received: 20 February, 2017 / Revised: 9 May, 2017 /

Accepted: 9 June, 2017

*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr

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

호되며, 이를 위하여 신호의 진폭과 위상을 동시에 변화시키는 2차원 M-QAM 신호가 널리 사용된다^[1].

M은 QAM 신호의 성상도에서 신호점의 수를 나타내며, 신호점의 수가 증가 할수록 스펙트럼 효율을 개선되지만, 신호점간의 거리가 좁아져 수신측에서 오율 발생 가능성이 증대되므로 높은 송신 전력을 요구되어 이들 간에는 tradeoff 관계가 있다. 채널 등화는 이와 같은 채널 환경에서 발생하는 부호간 간섭의 영향을 최소화시킬 수 있는 기술적인 대안이며, 적응 등화 알고리즘은 채널의 특성이 미지 (unknown)이며 시간에 따라 변하는 시변 환경에서 채널 특성의 역특성을 갖도록 등화기의 탭 계수를 갱신할 수 있는 능력을 갖는다^[2]. 적응 등화를 위해 초기에는 학습열 (training sequence)을 이용하였지만, 이의 전송이 불가능하거나 이의 전송에 의한 전송 효율의 저하와 채널의 전송 용량을 최적으로 사용하기 위하여 blind 방식이 등장하였다. blind 방식에서는 수신측에서 디지털 부호를 수신하면서 채널의 역특성을 얻을 수 있는 매우 유용한 방식이지만, 송신 신호가 constant modulus를 갖는 4-QAM 과 같은 신호에서 최고의 성능을 얻을 수 있지만, M 값이 증가되어 스펙트럼 효율을 개선할 수 있는 16-QAM과 같은 nonconstant modulus에서는 성능이 저하되는 문제점이 있다^[5]. 이와 같은 단점을 극복하기 위하여 적응 등화기의 탭 계수를 얻기 위한 오차 신호 발생시 nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로 변환 또는 축소하는 과정을 도입하였으며, 이런 원리를 MMA 적응 등화 알고리즘에 적용한 것으로는 CR-MMA와 RMMA를 들 수 있다^{[3][4][7]}. 그러나 변환 원리에서 이들은 상이하어 CR-MMA에서는 총 16개의 송신 신호점을 4개의 신호점으로 축소시키지만 RMMA에서는 총 16개의 송신 신호점을 4개의 quadrature 영역으로 분리한 후 각 영역들의 중앙부를 중앙점으로 매핑시켜 축소시킨다. 이와 같은 변환 원리의 차이에 의하여 각기 상이한 적응 등화 성능을 얻을 수 있으며, 논문에서는 이들의 등화 성능을 비교하고자 한다. 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 통신 시스템의 모델을 설명한 후 3 장에서는 CR-MMA와 RMMA 알고리즘을 다루며, 4 장에서는 시뮬레이션의 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 통신 시스템 모델

그림 1은 2차원 복소 QAM 신호를 적용한 통신 시스템의 송신부와 수신부를 나타내는 통신 시스템 모델을 나타낸 것이며, 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 nonconstant modulus를 갖는 신호 s_k 를 송신하면 대역 제한과 찌그러짐을 발생하는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통과하면서 가우시안 잡음 n_k 가 부가되어 수신된다. 수신된 신호 r_k 는 응답이 f_k 인 등화기에 입력되어 채널에 의해 발생된 찌그러짐이 보상된 출력 z_k 를 얻게 된 후, 이는 결정 장치 (decision device)에 입력되면서 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 적용하여 매 순간 변화된다. 이때 등화기 필터는 IIR (Infinite Impulse Response)과 FIR (Finite Impulse Response)의 형태가 있지만, 일반적으로 탭 계수의 수시 변경에 의한 안정성을 고려하여 FIR을 많이 사용한다.

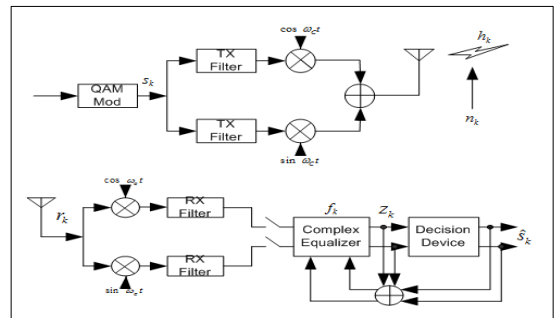


그림 1. 통신 시스템 모델

Fig. 1. 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 $\pm 1 \pm j$ 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 반

경의 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.

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

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

여기서 z_{Rk} , z_{Ik} 는 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.

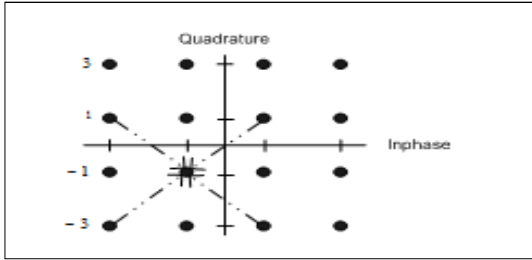


그림 2. 신호점 축소 예
 Fig. 2. Example of constellation reduction

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

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

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

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

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_{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 있다.

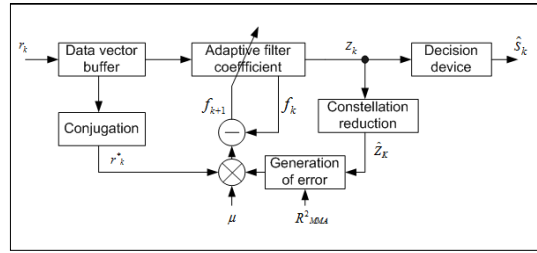


그림 3. CR-MMA의 내부 구조
 Fig. 3. Internal structure of CR-MMA

3. RMMA 알고리즘

RMMA는 발산을 방지하기 위하여 입력 regressor 벡터 $R(k)$ 의 euclidean norm의 자승치에 반비례하는 시변 step size를 갖는 Normalized-MMA 개념으로 동작하며, 등화기 출력에 비례하는 오차에 의해 탭 계수를 갱신하며 Normalized-CMA의 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$f(k+1) = f(k) + \frac{\mu}{\delta + \|R(k)\|^2} [d(k) - z(k)] R^*(k) \quad (3)$$

여기서 δ 는 regularization factor로 매우 작은 양의 정수, $\|\cdot\|$ 은 \cdot 의 euclidean norm이고 $d(k)$ 와 $z(k)$ 는 원하는 응답의 추정값으로 이들은 다음의 관계가 성립된다.

$$d(k) = x(k)z(k) \quad (4)$$

$$x(k) = \begin{cases} \frac{(\beta\sigma_s^2 - |z(k)|^2)}{(\beta\sigma_s^2 - R)} & |z(k)|^2 \leq \beta\sigma_s^2 \\ 0 & \text{기타} \end{cases}$$

여기서 $\sigma_s^2 = E[|s(k)|^2]$, $R = E[|s(k)|^4]/E[|s(k)|^2]^2$, $\beta = 2$ or 3 로 정의된다. 식 (3)의 Normalized-CMA를 MMA로 더욱 확장시키면 $d(k) - z(k)$ 를 $[d_r(k) + jd_i(k)] - [z_r(k) + jz_i(k)]$ 로 대체할 수 있다. 그림 4와 같이 복소 평면을 $M/4$ 개의 4-QAM region으로 분할한 후 각 region A_k 는 4개의 심볼점을 포함하고 있으므로, 그 중앙에는 $c(k) = c_r(k) + jc_i(k)$ 라는 심볼점이 존재한다. 등화기 출력이 어느 region에 속하며, 그 중앙값은 얼마인지를 알 수 있으며, 식별된 region과 중앙값을 이용하여 다음과 같은 변환이 필요하다. region 중앙값을 평면 원점으로 이동시켜 4-QAM 신호로 취급하고, 변환 신호 $\bar{z}(k) = \bar{z}_r(k) + j\bar{z}_i(k)$ 는 $\bar{z}(k) = (z_r(k) - c_r(k)) + j(z_i(k) - c_i(k))$ 의 관계가 있으며, 변환된 후 특정 region내의 심볼점을 나타내는 $a_{km} = \pm 1 \pm j1$ 의 4-QAM 신호가 된다. 또한 region A_k

의 위치 정보를 변환에 의해 잃더라도 비용 함수는 복소 평면상에서 A_k 의 위치 정보가 필요하게 되며, RMMA 알고리즘에서 변환에 의한 순간 비용 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\bar{J} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^{M/4} \alpha_i [|c_{Ri}| [1 - \overline{z_{Ri}^2}(k)]^2 + |c_{Ii}| [1 - \overline{z_{Ii}^2}(k)]^2] \quad (5)$$

여기서 식별되어진 region A_k 에서는 $\alpha_i = 1$ 이 되며, 나머지 region에서는 $\alpha_i = 0$ 가 된다. 또한 곱셈 인자인 $|c_{Ri}|, |c_{Ii}|$ 는 변환 이전의 region 정보를 제공하게 된다. 식 (5)의 순간 비용 함수의 gradient는 다음과 같이 된다.

$$\nabla \bar{J} = \sum_{i=1}^{M/4} \overline{e_i(k)} R^*(k) \quad (6)$$

$$\overline{e_i(k)} = |c_{Ri}| [\overline{d_{Ri}(k)} - \overline{z_{Ri}(k)}] + j |c_{Ii}| [\overline{d_{Ii}(k)} - \overline{z_{Ii}(k)}] \quad (7)$$

$$\overline{d_{Ri}(k)} = \overline{x_{Ri}(k)} \overline{z_{Ri}(k)}, \quad \overline{d_{Ii}(k)} = \overline{x_{Ii}(k)} \overline{z_{Ii}(k)} \quad (8)$$

$$\overline{x_{Ri}(k)} = 1.5 - 0.5 \overline{z_{Ri}^2}(k), \quad \overline{x_{Ii}(k)} = 1.5 - 0.5 \overline{z_{Ii}^2}(k) \quad (9)$$

최종적으로 RMMA 알고리즘에서의 탭 계수 갱신식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$f(k+1) = f(k) + \frac{\mu}{\delta + \|R(k)\|^2} \overline{e_i(k)} R^*(k) \quad (10)$$

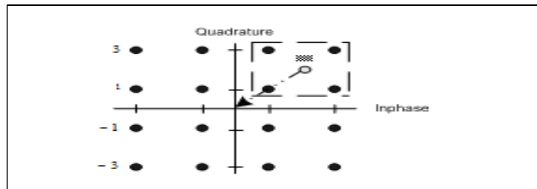


그림 4. RMMA의 신호점 변환
Fig. 4. Constellation transform of RMMA

그림 5는 RMMA의 내부 구조를 나타낸 것으로 등화기 출력력을 이용하여 region을 선택한 후, region의 중앙점 c_k 을 원점으로 변환시켜 오차를 얻도록 되어 있다.

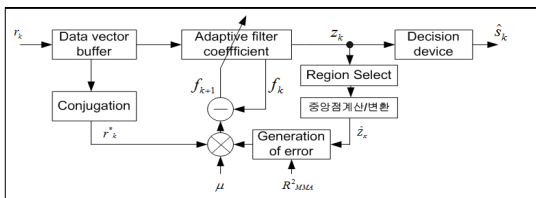


그림 5. RMMA의 내부 구조
Fig. 5. Internal structure of RMMA

III. 컴퓨터 시뮬레이션

nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로 신호점 축소 및 변환 과정을 이용하여 적응 등화를 수행하는 CR-MMA와 RMMA 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위하여 동일한 채널에서 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝 크기 μ 는 CR-MMA에서는 0.00025와 RMMA에서는 0.025이었으며, 등화기의 적응 필터 차수는 15차 FIR, 송신 신호로는 16-QAM의 nonconstant modulus를 이용하였다. 그림 6은 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 나타낸 것이며, 16-QAM 신호를 발생한 후 찌그러짐을 발생하는 통신 채널을 통과시켰다. 여기에 일정한 신호대 잡음비를 갖는 잡음 신호를 부가하여 수신측의 수신 신호로 이용하여 CR-MMA와 RMMA 적응 등화 알고리즘을 통과시킨 후 이들의 성능을 비교하였다.

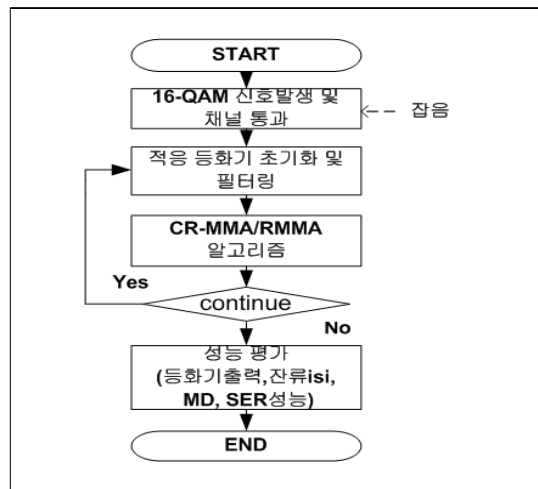


그림 6. 신호 처리 흐름도
Fig. 6. Signal processing flowdiagram

그림 7은 정상 상태에서 적응 등화기의 첫 번째 성능 지수인 등화기 출력 신호의 정상도를 나타낸 것이다. 정상도에서 16개의 신호점을 명확하게 알 수 있으며, 각 신호점간의 거리가 크며 신호점의 폭이 좁을수록 등화 능력이 우수하다. 정상도에서 RMMA가 CR-MMA보다 신호점간의 거리가 멀고 신호점들의 폭이 좁게되어 적응 등화 능력이 우월함을 정성적으로 알 수 있다.

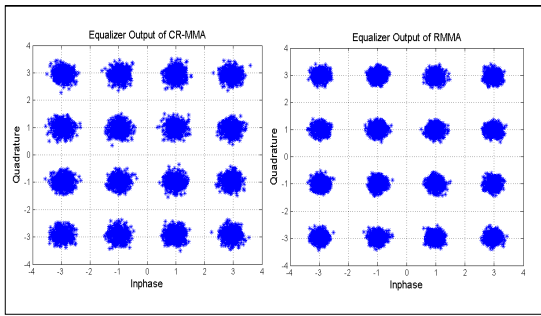


그림 7. 등화기 출력 신호 성상도
 Fig. 7. Equalizer Output signal constellation

적용 등화기의 성능을 나타내는 내부 지수로 잔류 isi (residual isi)와 최대 찌그러짐 (maximum distortion)을 사용하였다. 그림 8은 잔류 isi의 성능을 나타내고 있으며, 반복될수록 양호한 수렴 특성을 가짐을 알 수 있다. 적용 등화기의 정상 상태를 -20dB로 설정할 때 여기에 도달하는 수렴 속도에서 CR-MMA는 382회, RMMA는 868회가 소요되어 수렴 속도에서는 CR-MMA가 RMMA보다 2.7배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여 성분에서는 RMMA가 CR-MMA보다 대략 2dB 정도 더욱 개선시킴을 알 수 있다. 그림 9는 최대 찌그러짐 성능을 나타낸 것이며, 여기서 정상 상태로 0.3 [Volt]로 설정할 때 CR-MMA는 689회, RMMA는 911회가 소요되어 수렴 속도에서는 CR-MMA가 1.32배 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여 성분에서는 RMMA가 CR-MMA보다 대략 0.12 [Volt] 정도 개선됨을 알 수 있다.

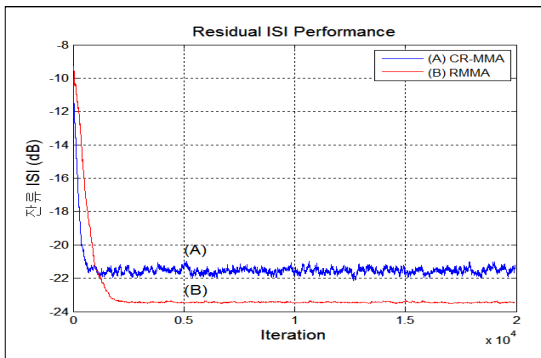


그림 8. 잔류 isi 성능
 Fig. 8. Residual isi performance

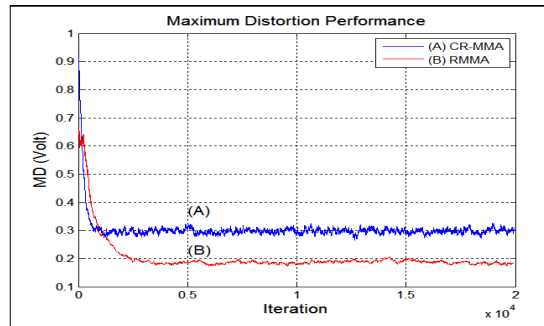


그림 9. 최대 찌그러짐 성능
 Fig. 9. Maximum distortion performance

그림 10은 CR-MMA와 RMMA 적용 등화 알고리즘의 외부 잡음에 대한 강인성을 나타내는 심볼 오류율 성능을 나타낸 것이다. 이들은 다른 등화 알고리즘에 비해 잡음에 대한 robustness가 상당히 우수하지만, 그림에서 알 수 있듯이 RMMA가 CR-MMA보다 더욱 우수하며 심볼 오류율이 10^{-2} 의 경우 약 2dB 정도의 등화 이득 (equalization gain)을 얻을 수 있다.

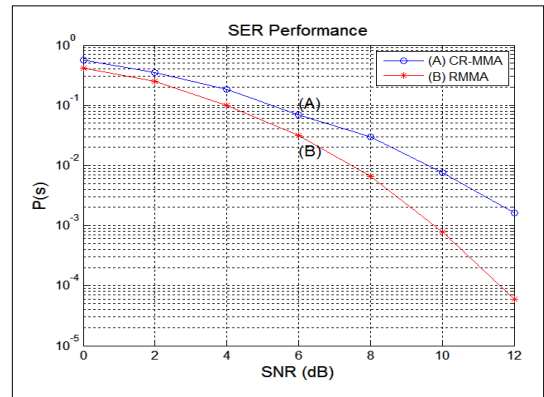


그림 10. SER 성능
 Fig. 10. SER Performance

V. 결론

논문에서는 16-QAM과 같은 nonconstant modulus 신호를 constant modulus 신호로 신호점을 축소하거나 변환하여 적용 등화를 수행하는 CR-MMA와 RMMA 알고리즘의 등화 성능을 비교하였다. 이와 같은 축소 또는 변환 과정은 적용 등화기의 탭 계수를 갱신할 때 요구되는 오차 신호를 발생에 필요하다. CR-MMA는 적용 등화기

출력에서 모든 심볼들을 4-QAM 신호로 축소하며 RMMA는 적응 등화기 출력이 위치하는 region을 기반으로 심볼들을 4-QAM 신호로 변환하여 오차 신호를 발생하게 된다. 등화기 내부의 성능 비교 결과 등화기의 출력 성장도에서는 RMMA가 CR-MMA보다 월등하였고, 수렴 속도에서는 CR-MMA가 RMMA보다 빠르지만 정상 상태 이후부터는 RMMA가 CR-MMA보다 우월하였다. 또한 등화기 외부의 성능 비교를 위해 채널에서 부가되는 잡음에 대한 robustness의 SER 성능에서는 RMMA가 CR-MMA보다 월등히 우월하였다. RMMA가 출력 성장도와 내부 등화 성능과 외부 등화 성능에서는 CR-MMA보다 우월하지만, 수렴 속도에서는 늦어지는 문제점이 있으므로, 이를 개선키 위한 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: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2002.1007381>
- [2] S.Abrar, R.A.Axford, "Sliced Multi-modulus Blind Equalization Algorithm", ETRI Journal, Vol.27, No.3, pp.257~266, June 2005.
- [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: <https://doi.org/10.1109/ICOSP.2008.4697528>
- [4] J.M.Filho, M.T.M.Silva, M.D.Miranda, V.H.Nascimento, "A Region-based Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals", IEEE/15th workshop on statistical signal processing, pp.685~688, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/SSP.2009.5278484>
- [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 R-CMA Adaptive Equalizer for 16-QAM Signal", Jour. n I.W.I.T., Vol.12, No.5, pp.107~114, Oct. 2012.
- [7] S.G.Lim, "Performance Evaluation of RMMA Adaptive Equalization Algorithm in 16-QAM System", Jour. on .W.I.T.,

저자 소개

임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 현재 공주대학교 정보통신공

학부 교수.

<주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신>