The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)
Vol. 19, No. 1, pp.51-56, Feb. 28, 2019. pISSN 2289-0238, eISSN 2289-0246

https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.1.51
JIIBC 2019-1-7

블라인드 적응 등화를 위한 CCA와 RMMA 알고리즘의 성능 비교

A Performance Comparison of CCA and RMMA Algorithm for Blind Adaptive Equalization

임승각*

Seung-Gag Lim*

요 약 본 논문은 nonconstant modulus 특성의 높은 스펙트럼 효율을 갖는 16-QAM 신호 전송 시 채널에 의한 부호간 간섭을 줄이기 위한 CCA (Compact Constellation Algorithm)와 RMMA (Region-based MMA) 블라인드 적응 등화 알고리즘의 성능 비교에 관한 것이다. CCA는 결정 장치의 출력인 sliced symbol과 16개의 모든 신호점들을 compact화한 통계적 심볼을 이용하여 탭 계수 갱신을 위한 오차 신호의 분산을 줄여 초기 수렴과 misadjustment를 개선하지만 연산량이 증대되며, RMMA는 신호점이 속하는 영역을 기준으로 4개의 constant modulus 신호로 변환한 후 오차 신호를 얻으므로 빠른 수렴 속도와 misadjustment 및 채널 추적 능력이 연산량 증가없이 개선되는 효과를 얻을 수 있다. 논문에서는 동일한 채널에서 이들 알고리즘을 구현한 후 블라인드 적응 등화 성능을 등화기 출력 신호의 성상도, 잔류 isi양, MSE 및 SER을 적용하여 비교하였다. 시뮬레이션의 결과 출력 신호 성상도, 잔류 isi 및 MSE에서는 RMMA가 CCA보다 우월하였지만 수렴 속도는 약1.3배 정도 늦어짐을 알 수 있었다. 또한 잡음에 대한 robustness를 나타내는 SER 성능에서는 SNR이 적을때는 CCA가 우월하지만 6dB 이상에서는 RMMA가 우월하였다.

Abstract This paper related with the performance comparison of CCA and RMMA blind adaptive equalization in order to reduce the intersymbol interference which is occurred in channel when transmitting the 16-QAM signal, high spectrum efficiencies of nonconstant modulus characteristic. The CCA possible to improve the misadustment and initial convergence by compacting the every signal constellation of 16 by using the sliced symbol of the decision device output, namely statistical symbol, but incresing the computational cost. The RMMA possible to minimize the fast convergence speed and misadjustment and channel tracking capability without increasing the computational cost by obtain the error signal after transform to 4 constant modulus signal based on the region of signal constellation located. In this paper, these algorithm were implemented in the same channel, and the blind adaptive equalization performance were compared using the equalizer output signal constellation, residual isi, MSE, SER. As a result of simulation, the RMMA has better performance in output signal constellation, residual isi and MSE compared to the CCA, but has slow convergence speed about 1.3 times. And the SER performance presenting the robustness to the noise signal, the CCA has more beeter in less SNR, but the RMMA has better in greater than 6dB in SNR.

Key Words : CCA, Region-based MMA, residual isi, MD, dispersion constant

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부 정보통신공학 전공
접수일자 2018년 11월 5일, 수정완료 2018년 12월 23일
게재확정일자 2019년 2월 8일

Received: 5 November, 2018 / Revised: 23 December, 2018 / Accepted: 8 February, 2019
*Corresponding Author: sglim@kongju.ac.kr
Dept. of Information and Communication, Kongju National University, Korea

Ⅰ. 서 론

디지털 통신 시스템을 이용한 다양한 정보 전송의 요구와 정보량이 급증하면서 스펙트럼 효율이 높은 고차의 nonconstant modulus 신호 방식이 널리 사용되고 있지만, 대역폭 제한과 다중 경로에 의한 신호의 찌그러짐에 의한 부호간 간섭 영향이 증대되는 새로운 문제에 직면하게 된다[1][2]. 이와 같은 전송 손상에 대처하기 위하여 다양한 적응 등화 기법이 등장하였다. 적응 등화기는 수신된 신호에서 부호간 간섭을 최소화하여 결정 장치에서 정보를 재생하는데 오류율을 최소화시키기 위한 디지털 필터를 말하며, 적응 등화를 위하여 송신국과 수신국이 사전에 알고 있는 학습열을 이용하는 채널의 전달 특성을 추정하지만, 이로 인한 사용 가능한 유효 대역폭이 낭비되므로, 학습열에 의존하지 않으며 송신 신호의 통계적 특성에 의한 blind 적응 등화 방식이 등장하였다. 그러나 blind 방식은 학습열 기반 방식에 비하여 등화 성능이 열화되므로 이를 개선시킬 수 있는 다양한 알고리즘에 대하여 등장하고 있다. blind 적응을 위한 알고리즘으로는 Godard가 제안한 CMA (Constant Modulus Algorithm)가 있지만 수신 성상도에서 진폭만을 보상이 가능하며 위상 보상은 불가능하므로 별도의 위상 보정 장치가 필요하게 된다. 반면 MMA (Multi Modulus Algorithm)는 진폭과 위상의 동시 보상이 가능하지만 높은 스펙트럼 효율을 갖는 QAM 신호에서 CMA보다 성능이 더욱 열화되므로 이를 개선하기 위하여 다양한 MMA 알고리즘들이 등장하였다[4][5]. CCA (Compact Constellation Algorithm)는 적응 등화기의 탭 계수 갱신 시 필요한 오차 신호를 발생할 때 16개의 모든 신호점들에 대하여 송신 신호와는 다른 형태로 compact화된 통계적 심볼과 결정 장치의 출력인 sliced symbol을 이용하여 오차 신호의 분산을 줄여서 초기 수렴과 탭 계수 갱신에 의해 발생되는 misadjustment를 최소화시킬 수 있지만 연산량이 증대된다. RMMA (Region-based Multi Modulus Algorithm)는 오차 신호 발생 시 nonconstant modulus 신호를 4개의 constant modulus 신호가 되도록 신호점을 축소하여 이용하므로서 빠른 수렴 속도와 misadjustment 및 채널 추적 능력을 개선시킬 수 있는 특징이 있다[3][4][6][7].

본 논문에서는 16-QAM nonconstant modulus 신호에 대하여 constant modulus로 신호점 축소 개념을 이용하는 이들 CCA와 RMMA 알고리즘의 등화 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인한다. 논문의 구성으로 2장에서는 적응 등화기를 사용하는 수신기의 기저 대역 모델과 CCA 및 RMMA 알고리즘에 대하여 설명한 후 3 장에서는 시뮬레이션 과정 및 결과를 다루고, 마지막 4장에서는 결론을 내리겠다.

Ⅱ. 본 론

1. 기저 대역 통신 시스템

그림 1은 적응 등화기를 적용한 기저 대역 통신 시스템 모델을 나타낸 것이다. 송신측의 source인 정보원의 신호는 constellation mapping 과정을 통해 스펙트럼 효율이 높은 16-QAM의 신호 s_k로 변환, 송신하면 부호간 간섭을 발생시키는 임펄스 응답이 h_k인 채널을 통과하면서 잡음 n_k가 부가된 후 수신 신호 r_k가 된다. 수신된 신호는 유한 차수의 응답이 f_k인 적응 등화기에 입력되어 진폭과 위상이 보상된 출력 신호 z_k를 얻은 후 이 신호는 결정 장치를 통과하면서 최종 복원 신호 $\hat{s}_k$를 얻은 후 수신측 sink에 전달된다. 이때 등화기의 응답 f_k는 등화기 출력 신호 z_k 또는 $\hat{s}_k$를 이용하여 CCA 또는 RMMA 알고리즘에 의한 비용 함수를 최소화시키도록 적응적으로 변화시킨다.

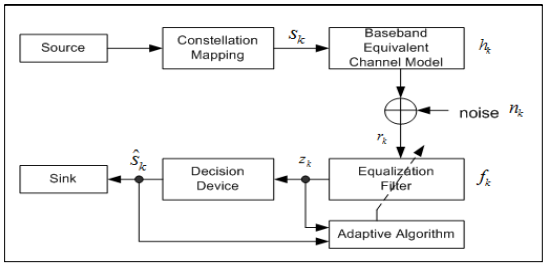


그림 1. 기저 대역 통신 시스템
Fig. 1. Baseband communication system

2. CCA 알고리즘

CCA는 DDA (Decision Directed Algorithm)의 초기 수렴 불확실성을 개선하고, RCA (Reduced Constellation Algorithm)의 등화 잡음의 원인이 되는 오차항의 분산값을 줄이기 위하여 등장하였다. 이를 위하여 독립적인 통

계 심볼을 송신 심볼의 constellation에 각각 할당하는데, 통계 심볼은 실제 송신 심볼의 subset은 아니다. 송신 신호의 레벨 수가 증가할수록 등화 잡음의 감소는 현저해지며, 통계 심볼은 dispersion constant $R_{R,}R_I$ 및 결정 장치의 출력 $\widehat{s_k}$에 의해 결정되어진다. 그림 1의 기저 대역 통신 시스템 모델에서 송신 신호를 s_k, 채널에서 부가되는 잡음을 n_k, 등화기 입력 신호를 r_k, 등화기의 필터 계수를 f_k, 등화기 출력 신호를 z_k라고 하자. 등화기 필터의 차수를 N 이라고 하면 필터 계수 벡터와 등화기 입력 벡터는 다음과 같다.

$$F_k = [f_0\, f_1\, f_2 \quad \cdots\cdots \quad f_{N-1}] \\ R_k = [r_k\, r_{k-1}\, r_{k-2} \cdots\cdots r_{k-N+1}] \tag{1}$$

이를 이용하면 등화기의 출력 신호는 다음과 같다.

$$z_k = F_k^T R_k \tag{2}$$

그림의 CCA 등화기 구조에서 결정 장치 출력을 이용한 통계 심볼 $R_R|\widehat{S_R(k)}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_R(k))$와 $R_I|\widehat{S_I(k)}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_I(k))$를 구하는데, 여기서 c는 0 과 1 사이의 compact slice 가중치이며, 심볼은 RCA의 $(R_R,R_I),(R_R,-R_I),(-R_R,R_I)$와 $(-R_R,-R_I)$의 4개로 축소시키는 것이 아니라 원래의 심볼 개수를 유지하면서 이들을 일정한 modulus 범위 내에서 compact시키기 때문에 CCA 이름이 사용된다. CCA의 비용 함수J_{CCA}와 탭 계수 갱신식을 다음의 식 (3)에 나타내었다.

$$J_{CCA} = E[(z_{Rk} - R_R|\widehat{S_{Rk}}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_{Rk})^2 \\ + (z_{Ik} - R_I|\widehat{S_{Ik}}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_{Ik})^2] \\ F_{k+1} = F_k + \mu[(R_R|\widehat{S_{Rk}}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_{Rk}) - z_{Rk}) + \\ j(R_I|\widehat{S_{Ik}}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_{Ik}) - z_{Ik})]R_k^* \tag{3}$$

탭 갱신식에서 오차의 실수와 허수부를 각각 나타내는

$$R_R|\widehat{S_R(k)}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_R(k)) - z_R(k), \\ (R_I|\widehat{S_I(k)}|^c \cdot \mathrm{sgn}(z_I(k)) - z_I(k))$$

는 DDA와 RCA의 오차를 포함하고 있다. 이와 같이 결정 장치의 출력을 탭 계수 갱신식에 반영하므로서 등화기 출력 z_k가 가장 인접한 심볼로부터의 거리 정보로 이용하므로 정상 상태에서 탭 계수의 misadjustment 에 의한 등화 잡음을 경감시킬 수 있다. CCA의 경우 주어진 slice 가중치 c의 값을 이용한 modulus는 다음과 같다.

$$R_R = \frac{E[S_{Rk}]^2}{E[S_{Rk}]^{(1+c)}}, R_I = \frac{E[S_{Ik}]^2}{E[S_{Ik}]^{(1+c)}} \tag{4}$$

3. RMMA 알고리즘

RMMA는 발산을 방지하기 위하여 입력 regressor 벡터 R_k의 euclidean norm의 자승치에 반비례하는 시변 step size를 갖는 Normalized-MMA 개념으로 동작하면서 송신 신호의 추정치를 이용하지 않고 등화기 출력에 비례하는 오차에 의해 탭 계수를 갱신하게 되므로 dual mode MMA라고도 한다. 먼저 발산을 방지하기 위하여 Normalized-CMA에서 탭 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$F_{k+1} = F_{(k)} + \frac{\mu}{\delta + \|R_k\|^2}[d_k - z_k]\ R_k^* \tag{5}$$

여기서 δ는 매우 적은 양의 정수, $\|\bullet\|$은 $\bullet$의 euclidean norm이고 d_k와 z_k는 원하는 응답의 추정값을 나타내며 이들은 다음의 관계가 성립된다.

$$d_k = x_k z_k \\ x_k = \begin{cases} \dfrac{(\beta\sigma_s^2 - |z_k|^2)}{(\beta\sigma_s^2 - R)}, & |z_k|^2 \le \beta\sigma_s^2 \\ 0 \quad , \text{ 기타} \end{cases} \tag{6}$$

여기서 $\sigma_s^2 = E[|s_k|^2], R = E[|s_k|^4]/E[|s_k^2|],\ \beta = 2 \text{or } 3$ 로 정의된다. 2 가지의 추정치인 d_k, z_k는 동일한 부호일 때 consistency가 성립되며, 이때 correction 항인 x_k는 양의 값이 된다. 식 (5)의 Normalized-CMA를 MMA로 더욱 확장, multimodulus 비용 함수를 적용하면 $d_k - z_k$를 $[d_{Rk} + jd_{Ik}] - [z_{Rk} + jz_{Ik}]$로 대체할 수 있다. 16-QAM의 복소 평면을 4 개의 4-QAM으로 분할한 후 각 region A_k는 4개의 심볼점을 포함하고 있으며, 중앙에는 $c_k = c_{Rk} + jc_{Ik}$라는 심볼점이 존재한다. 등화기 출력이 어느 region에 속하며, 그 중앙값은 얼마인지를 알 수 있으며, 식별된 region과 중앙값을 이용하여 마치 constant modulus 신호인 것처럼 다음의 translation이 필요하다. 식별된 region의 중앙값이 복소 평면 원점으로 이동시켜 4-QAM 신호로 취급하고, translated된 출력 신호 $\overline{z_k} = \overline{z_{Rk}} + j\overline{z_{Ik}}$를 얻으므로 region A_k내의 심볼점인 $a_{km} = \pm 1 \pm j1$의 4-QAM 신호가 된다. 또한 region A_k의 위치 정보를 translation에 의해 잃더라도 비용 함수는 복소 평면상에서 A_k의 위치 정보가 필요하게 되며,

RMMA 알고리즘에서 translation에 의한 순간 비용 함수는 다음과 같다.

$$\bar{J}=\frac{1}{8}\sum_{l=1}^{M/4}\alpha_l[|c_{Rl}|[1-\overline{z_{Rlk}^2}]^2+|c_{Il}|[1-\overline{z_{Ilk}^2}]^2] \quad (7)$$

여기서 식별되어진 region A_k에서는 $\alpha_l=1$이 되며, 나머지 region에서는 $\alpha_l=0$가 된다. 또한 곱셈 인자인 $|c_{Rl}|,|c_{Il}|$는 translated 이전의 region 정보를 제공하게 되며, 이들은 다음의 관계가 성립된다.

$$\nabla\bar{J}=\sum_{l=1}^{M/4}\alpha_l\overline{e_{lk}}R_k^* \quad (8)$$

$$\overline{e_{lk}}=|c_{Rl}|[\overline{d_{Rlk}}-\overline{z_{Rlk}}]+j|c_{Il}|[\overline{d_{Ilk}}-\overline{z_{Ilk}}] \quad (9)$$
$$\overline{d_{Rlk}}=\overline{x_{Rlk}}\,\overline{z_{Rlk}},\quad \overline{d_{Ilk}}=\overline{x_{Ilk}}\,\overline{z_{Ilk}}$$
$$\overline{x_{Rlk}}=1.5-0.5\overline{z_{Rlk}^2},\quad \overline{x_{Ilk}}=1.5-0.5\overline{z_{Ilk}^2}$$

최종적으로 RMMA 알고리즘에서의 탭 계수 갱신식은 식 (5), (7), (9)을 조합하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$F_{k+1}=F_k+\frac{\mu}{\delta+\|R_k\|^2}\overline{e_{lk}}R_k^* \quad (10)$$

여기서 δ는 regularization factor로 양의 매우 적은 상수이다.

Ⅲ. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

CCA와 RMMA 적응 등화 알고리즘의 성능을 비교하기 위하여 동일한 채널과 SNR하에서 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라메터로는 CCA에서 slice 가중치 c=0.5, 계수 갱신을 위한 step size $\mu=0.0004$ 이고, RMMA에서 $\delta=1\times10^{-6}, \mu=0.025$ 이며, FIR 등화 필터의 차수는 15이다. 그림 2는 이를 위한 신호 처리 흐름도를 나타낸 것으로, 송신측에서 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후 임펄스 응답이 h_k인 채널을 통과시킨 후 SNR=30dB가 되도록 잡음을 부가하여 수신 신호를 얻었다. 수신 신호를 이용하여 CCA 및 RMMA 알고리즘을 적용하여 부호간 간섭을 경감시킨 후 이들의 등화 성능을 비교하였으며, 그림 3은 부호간 간섭을 발생시키는 채널의 계수를 실수와 허수로 분리하여 나타낸 것이다.

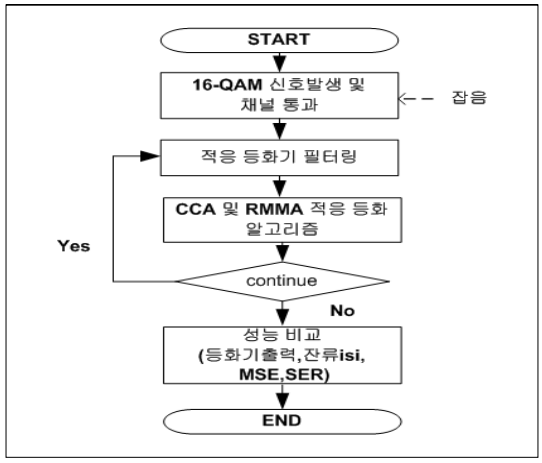
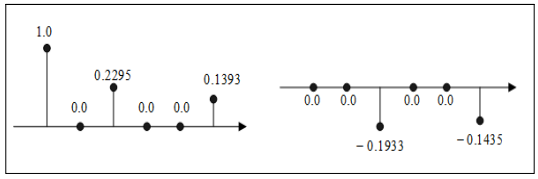


그림 2. 신호 처리 흐름도
Fig. 2. Signal processing flowdiagram



(a) 실수 (b) 허수

그림 3. 채널의 계수
Fig. 3. Coefficient of channel

이상의 과정을 통하여 CCA와 RMMA 알고리즘의 적응 등화 성능을 비교하였다. 성능 비교를 위한 지수로는 등화기 출력 신호 constellation, 적응 등화기의 수렴 속도를 나타내는 잔류 isi 와 MSE 및 적응 알고리즘의 외부 잡음에 대한 강인성을 알 수 있는 SER을 사용하였다.

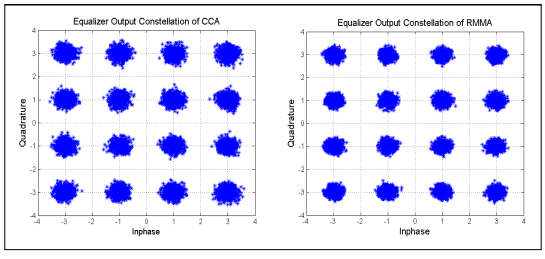


그림 4. 등화기 출력 신호 성상도
Fig. 4. Signal constellation of equalizer output

그림 4는 정상 상태에서 부호간 간섭이 제거된 후의 등화기 출력 신호 constellation을 나타낸 것이다. 2 가지 알고리즘 모두 16개 심볼점에 대하여 명확하게 구분되어

지므로 채널에서 발생된 진폭과 위상 찌그러짐에 의한 부호간 간섭이 상당히 보상됨을 알 수 있다. 그러나 각 신호점의 폭과 신호점간 거리가 좁고 멀수록 등화 성능이 우월한 알고리즘이 되므로 그림에서 RMMA가 CCA 보다 신호점폭이 좁고, 신호점간 거리가 멀어지므로 적응 등화 성능이 우월함을 알 수 있다.

두 번째로 적응 등화기의 성능 지수는 채널의 급격한 변화 및 순단등의 비정상적인 상태에서 정상으로 회복할 수 있는 수렴 특성을 나타내는 잔류 isi (residual isi)와 MSE를 사용하였다. 그림 5는 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로 정상 상태에 도달하기 위한 수렴 시간과 정상 상태 이후의 잔여량을 알 수 있다. 잔류 isi 통신 채널 h_k와 등화 필터 계수 f_k가 완전 보상이 될 때 시간 영역에서는 이들의 convolution 결과는 이론적으로는 임펄스 신호가 된다. 그러나 완전 보상은 불가능케 되어 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 전력을 나타낸다. 그림에서 -20dB의 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에서는 CCA가 RMMA보다 약 1.3배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 RMMA가 CCA보다 약 -1.2dB 정도 더욱 감소된다.

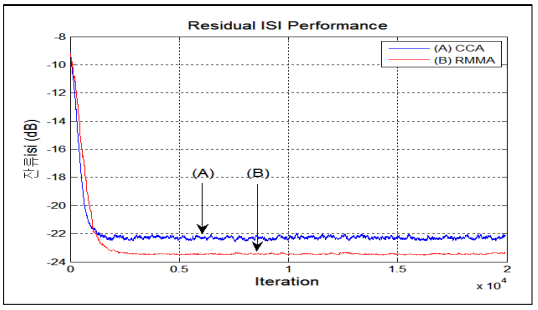


그림 5. 잔류 isi 성능
Fig. 5. Residual isi performance

MSE는 이들 알고리즘에 의한 등화기 출력과 결정 장치에서 송신 신호를 복원할 때 이들 2가지 신호간의 진폭 차이의 자승치를 나타낸 것으로 송신 신호점 주위에서의 진폭 흔들림을 의미하며 그림 6은 이들 두 알고리즘의 MSE 성능을 나타낸 것이다. MSE 성능에서도 수렴 속도는 CCA가 RMMA보다 조금 빠름을 알 수 있지만 정상 상태 이후부터 MSE 성분은 적어지지만 그 변동 범위가 커서 misadjustment 영향이 큼을 알 수 있다.

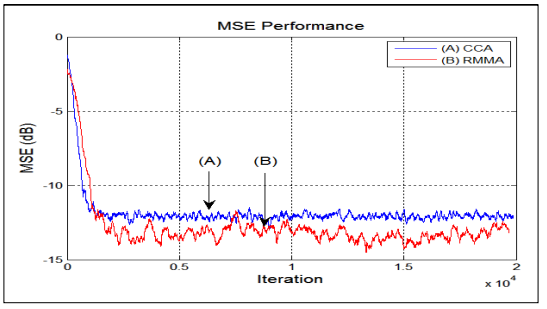


그림 6. MSE 성능
Fig. 6. MSE performance

마지막 성능 비교를 위한 지수로서 채널에서 부가되는 잡음 신호에 대한 알고리즘의 강인성을 나타내는 SNR에 대한 심볼 오류율을 나타내는 SER 성능을 그림 7에 나타내었으며 시뮬레이션에서는 SNR을 0~12dB 까지 3dB 단위로 변화시켰다. 시뮬레이션 결과 SNR이 비교적 낮은 0~6dB 범위에서는 CCA가 RMMA보다 강인하였지만, 그 이상의 SNR에서는 RMMA가 CCA보다 강인함을 알 수 있었다. 잡음에 대한 강인성 측면에서는 CCA가 우월하지만 RMMA 적응 알고리즘이 개선된 등화 성능을 얻기 위해서는 6dB 이상의 높은 SNR이 요구된다.

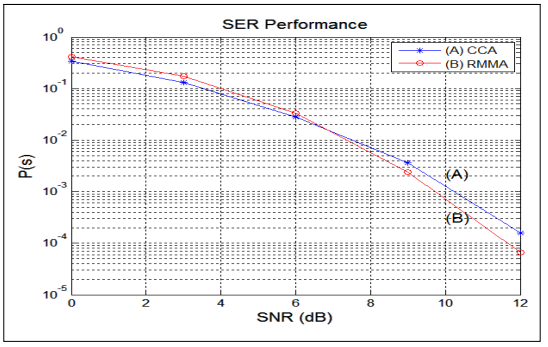


그림 7. SER 성능
Fig. 7. SER performance

V. 결 론

본 논문에서는 스펙트럼 효율이 높은 16-QAM의 nonconstant modulus 신호를 전송할 때 채널에서 발생되는 진폭과 위상 찌그러짐에 의해 발생되는 부호간 간섭을 경감시킬 수 있는 적응 등화 알고리즘인 CCA와

RMMA의 성능을 비교하였다. CCA는 결정 장치의 출력인 sliced symbol의 가중치를 이용한 통계적 심볼을 이용하여 오차 신호를 발생시키지만, RMMA는 16개의 신호 성상도를 4개의 영역으로 분리한 후, 각 영역의 중앙점을 원점으로 translation시키는 원리로 오차 신호를 발생시켜 적응 등화 탭 계수를 갱신한다. 동일한 채널에서 이들 알고리즘의 성능을 시뮬레이션한 결과 정상 속도에 도달하는 수렴 속도에서는 CCA가 RMMA보다 약1.3배 정도 빠르지만, 정상 상태 이후의 잔여량에서는 RMMA가 CCA보다 약 1.2dB정도 개선됨을 알 수 있었다. 잡음에 대한 강인성에서는 SNR이 낮을때는 CCA가 RMMA보다 우월하지만, SNR이 높을때는 RMMA가 CCA보다 우월함을 알 수 있어서, RMMA에 의한 개선된 등화 성능을 얻기 위해서는 최소 6dB 이상의 SNR이 요구됨을 알 수 있었다. 이상의 연구 결과를 실제 고속 디지털 통신 시스템에 응용되기 위하여는 알고리즘의 단순화를 위한 지속적인 연구가 필요할 것이다.

References

[1] A.Benveniste, M.Goursat, “Blind Equalizers”, IEEE Trans. Commun., Com-32, pp.871~883, 1984.
DOI : 10.1109/TCOM.1984.1096163

[2] C.B.Papadias, D.T.M.Slock, “On the Decision-Directed Equalization of Constant Modulus Signals“, 28th Asilomar Conf. Signals, Systems & Computers, pp.1423~1427, Nov. 1994.
DOI : 10.1109/ACSSC.1994.471692

[3] S.Abrar, “Compact Constellation Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals”, Int. Networking & Communication Conf., pp.170~174, 2004.
DOI : 10.1109/INCC.2004.1366599

[4] J.M.Filho, M.T.M.Silva, M.D.Miranda, “A Region-based Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals“, IEEE 15th workshop on statistical signal processing, pp.685~688, 2009.
DOI : 10.1109/SSP.2009.5278484

[5] J.Yang, J.J.Weren, G.A.Dumont, “The Multimodulus Blind Equalization Algorithm“, 13th Int. Conf. D.S.P. Processing, pp.127~130, 1997.
DOI : 10.1109/ICDSP.1997.627988

[6] S.G.Lim, “The Performance Analysis of CCA Adaptive Equalization Algorithm for 16-QAM Signal“, Jour. on I.I.B.C., Vol.13, No.1, pp.27~34, Feb. 2013.

[7] S.G.Lim, “A Performance Evaluation of RMMA Adaptive Equalization Algorithm in 16-QAM Signal“, Jour. on I.I.B.C., Vol.15, No.2, pp.99~104, April 2015.

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