

<http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2014.14.6.55>

IIBC 2014-6-9

## 최소 Disturbance 기법을 적용한 향상된 CMA 적응 등화 알고리즘

### Adaptive Equalization Algorithm of Enhanced CMA using Minimum Disturbance Technique

강대수\*

Dae-Soo Kang\*

**요약** 본 논문은 CMA 적응등화기에서 최소 disturbance 기법을 적용하여 진폭과 위상의 동시 보상이 가능한 ECMA (Enhanced CMA) 알고리즘의 성능에 관한 것이다. ECMA는 적응등화기 탭 계수의 변화량을 squared euclidean norm 관점에서 최소화하는 최소 disturbance 기법과 decision directed mode에 의한 gradient noise amplification 문제와 안정도 및 robustness 성능을 알고리즘 연산량의 큰 증가없이 개선할 수 있고, 수신신호에서 진폭과 위상의 동시 보상이 가능하도록 새로운 비용함수를 제안하였다. 논문에서는 ECMA 알고리즘의 성능을 MCMA와 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 수신측에서의 등화기 출력신호인 복원된 신호 정상도, 수렴 성능을 나타내는 성능지수인 잔류 isi 및 MD (Maximum Distortion), MSE 특성곡선과 채널과 등화기의 종합 주파수 특성을 성능 비교 지수로 사용하였다. 시뮬레이션 결과 ECMA가 복원정상도에서 진폭과 위상보상 능력 및 적응등화를 위한 수렴시간에서 MCMA보다 우월함을 알 수 있었다.

**Abstract** This paper related with the ECMA (Enhanced CMA) algorithm performance which is possible to simultaneously compensation of the amplitude and phase by applying the minimum disturbance techniques in the CMA adaptive equalizer. The ECMA can improving the gradient noise amplification problem, stability and robustness performance by the minimum disturbance technique that is the minimization of the equalizer tap weight variation in the point of squared euclidean norm and the decision directed mode, and then the new cost function were proposed in order to simultaneously compensation of amplitude and phase of the received signal with the minimum increment of computational operations. The performance of ECMA algorithm was compared to present MCMA by the computer simulation. For proving the performance, the recovered signal constellation that is the output of equalizer output signal and the residual isi and Maximum Distortion characteristic and MSE learning curve that are presents the convergence performance in the equalizer and the overall frequency transfer function of channel and equalizer were used. As a result of computer simulation, the ECMA has more better compensation capability of amplitude and phase in the recovered constellation, and the convergence time of adaptive equalization has improved compared to the MCMA. .

**Key Words :** CMA, ECMA, Minimum Disturbance Technique, residual isi, Maximum Distortion

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학 전공  
접수일자: 2014년 9월 30일, 수정완료: 2014년 10월 30일  
게재확정일자: 2014년 12월 12일

Received : 30 September, 2014 / Revised: 30 October, 2014

Accepted :12 December, 2014

\*Corresponding Author : dskang@kongju.ac.kr

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

## I. 서 론

최근택내, 사무실 또는 이동 환경에서의 디지털화된 정보를 전송하기 위한 디지털 통신 시스템의 이용이 보편, 대중화되어가고 있다. 이와 같은 시스템에서 수신기는 송신된 심볼을 정확, 신속하게 추정해내는 추정기(estimator)의 역할이 매우 중요해지며, 추정기는 등화기(equalizer)와 결정 장치(decision device)로 구성된다. 송신기에서 보낸 심볼이 다양한 통신 채널에서 부가되는 진폭과 위상 찌그러짐에 의한 부호간 간섭과 잡음등의 영향을 받게 되므로, 등화기에서는 이들에 대한 영향을 보상하거나 최소화하여 추정기가 올바른 심볼을 재생토록 하는 디지털 필터를 말한다. 이를 위하여 학습열을 전송한 후 수신기에서 채널 특성을 계산하여 이의 역 특성을 갖도록 하는 방법이 사용되지만, 이는 한정된 채널 대역폭을 낭비하며, 전송 중에도 수시로 학습열을 전송해야하므로 전송 효율을 떨어뜨린다. 이를 개선키 위하여 학습열없이도 스스로 채널의 특성을 추적할 수 있는 블라인드(blind) 등화 또는 자기 복원(self recovery) 등화 방식이 등장하였으며, 대표적으로 Godard가 제안한 CMA(Constant Modulus Algorithm)가 있다.<sup>[1]</sup> CMA에서는 가장 간단한 연산으로 constant modulus 특성을 갖는 PAM, QAM 신호를 대상으로 적응 필터의 비용 함수를 최소화시키도록 채널에서 발생하는 진폭 찌그러짐의 보상 및 부가 잡음의 영향을 최소화할 수 있지만, 위상 회전에 의한 찌그러짐은 보상이 불가능한 문제점이 있다.<sup>[1][2][5]</sup> 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 Oh 등이 제안한 MCMA(Modified CMA)와 Thakallapalli등이 새로운 비용 함수를 제안하였다. 논문에서는 기존 CMA 구조를 가지면서 minimum disturbance 기법과 decision directed mode를 적용한 새로운 비용 함수에 의한 진폭과 위상의 동시 보상 및 gradient noise amplification 문제를 개선한 Enhanced CMA(ECMA)를 제안한 후 이의 성능을 동시 진폭과 위상 보상 능력을 갖는 MCMA와 비교한다. 2장에서는 등화기를 사용하는 시스템 모델과 MCMA 및 ECMA 적응 등화 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션 과정과 결과로서 이들의 등화 성능을 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 적응 등화기를 사용하는 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 적응 등화기를 사용한 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 constant modulus 특성을 갖는 기저 대역 신호  $s_k$ 를 전송하면 대역 제한과 부호간 간섭등을 나타내는 임펄스 응답이  $h_k$ 인 채널을 통하여 수신측에 전달된다. 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 잡음이 부가될 것이며, 수신측에서는 적응 등화기에 인가된다. 이때 등화기의 전달 함수는 통신 채널의 역 전달 특성을 갖도록 설정되어 채널에서 부가된 찌그러짐에 의한 부호간 간섭은 보상되어진 후, 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치  $\hat{s}_k$ 를 얻게 되며, 이 과정에서 발생하는 지연 시간은 무시한다. 이때 등화기 계수인  $f_k$ 는 매 수신 신호  $r_k$ 마다 갱신되어지며, 학습열에 의존하지 않으므로 블라인드 적응 등화 방식에 해당한다.

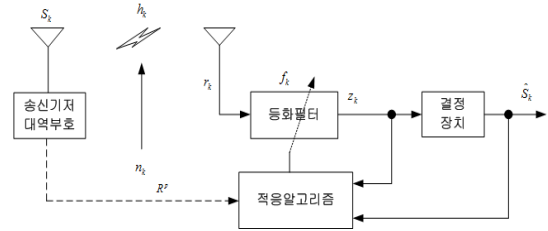


그림 1. 기저 대역 시스템 모델  
Fig. 1. Baseband system model

### 2. MCMA

MCMA는 CMA의 구조를 실수와 허수부로 나누어 별도로 처리하며 이를 그림 2에 나타내었다. 그림 1에서 송신 신호를  $s_k$ , 채널에서 부가되는 잡음을  $n_k$ , 등화기 입력 신호를  $r_k$ , 등화기 출력 신호를  $z_k$ 라고 하고 결정 장치의 출력을  $\hat{s}_k$ 라고 하자. 수신된 신호로부터 실수와 허수로 나누어 2 개의 등화 필터가 사용되며, 이들의 차수를  $N$  이라고 하자.

$$\begin{aligned}
 F_R(k) &= [f_{r0}(k) \ f_{r1}(k) \ f_{r2}(k) \ \dots \ f_{rN-1}(k)] \\
 F_I(k) &= [f_{i0}(k) \ f_{i1}(k) \ f_{i2}(k) \ \dots \ f_{iN-1}(k)] \\
 R_R(k) &= [r_r(k) \ r_r(k-1) \ r_r(k-2) \ \dots \ r_r(k-N+1)] \\
 R_I(k) &= [r_i(k) \ r_i(k-1) \ r_i(k-2) \ \dots \ r_i(k-N+1)]
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $F_R(k)$ 와  $F_I(k)$ 는 등화 필터의 실수부와 허수부를 나타내는 계수를 나타내고,  $R_R(k)$ 와  $R_I(k)$ 는 수신 신호의 실수와 허수를 나타낸다. 이들을 이용하면 실수와 허수부 등화기의 출력 신호는 다음과 같다.

$$z_{Rk} = F_R(k)^T R_R(k), \quad z_{Ik} = F_I(k)^T R_I(k) \quad (2)$$

적용 알고리즘을 위하여 MCMA 에서는 기존 CMA의 비용 함수를 개량하여 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} J_z(k) &= E[(|z_k|^2 - R_2)^2], & R_2 &= \frac{E[|s(k)|^4]}{E[|s(k)|^2]} & \text{CMA} \\ J_z(k) &= J_{Rk} + J_{Ik}, & J_{Rk} &= E[|z_{Rk}|^2 - R_{2R}], \\ & & J_{Ik} &= E[|z_{Ik}|^2 - R_{2I}], \\ R_{2R} &= \frac{E[|s_R(k)|^4]}{E[|s_R(k)|^2]}, & R_{2I} &= \frac{E[|s_I(k)|^4]}{E[|s_I(k)|^2]} & \text{MCMA} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $R_2, R_{2R}, R_{2I}$  는 CMA와 MCMA의 실수와 허수에 대한 constant modulus를 나타내며 송신 신호의 고차 값을 이용하여 얻을 수 있다.

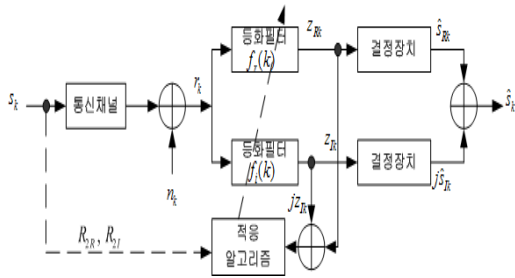


그림 2. MCMA 등화기 구조  
 Fig. 2. Architecture of MCMA Equalizer

적용 등화 필터의 탭 계수 갱신은 식 (3)의 비용 함수에 최적화시키기 위한 stochastic gradient algorithm을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(k+1) &= f(k) - \mu e(k) R^*(k) \\ e(k) &= e_R(k) + j e_I(k) \\ e_R(k) &= z_{Rk} (|z_{Rk}|^2 - R_{2R}), \quad e_I(k) = z_{Ik} (|z_{Ik}|^2 - R_{2I}) \end{aligned} \quad (4)$$

완전 등화가 이루어질 때 CMA는 등화기 출력을 받지 않음  $\sqrt{R_2}$  인 원주 상에 위치하도록 하지만, MCMA는 비용 함수를 실수와 허수로 분리하므로 실수와 허수축 상에서  $\pm\sqrt{R_{2R}}$ 와  $\pm\sqrt{R_{2I}}$ 의 점에 위치하도록 한다. 이들 CMA와 MCMA 알고리즘의 비용 함수는 자승 오차를 최소화하지만, 비록 이들이 최적의 값으로 수렴이 되더라도 constant modulus를 이용한 최소화 방향으로 지속적인 갱신이 일어나기 때문에 등화 잡음이나 misadjustment가 발생되어 등화 성능이 열화될 수 있다.

### 3. ECMA

제안 방식인 ECMA 에서는 constrained optimization problem에서 최소 disturbance 원칙에 기초하고 있다. 주어진 등화기의 입력 regressor vector인  $R^*(k)$ 에서 과거의 탭 계수 벡터인  $f(k)$ 에서 다음의 계수 벡터인  $f(k+1)$ 로 변화할 때 squared euclidean norm이 최소가 되도록 한다. 즉 다음과 같은 constraints

$$\begin{aligned} q_R(k) (q_R^2 - R_{2R}) &= 0, & q_R(k) &= \text{Re}[f^H(k+1)R(k)] \\ q_I(k) (q_I^2 - R_{2I}) &= 0, & q_I(k) &= \text{Im}[f^H(k+1)R(k)] \end{aligned} \quad (5)$$

하에서 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\|\delta f(k+1)\|^2 = \|f(k+1) - f(k)\|^2 = \min \quad (6)$$

여기서  $\|x\|$ 는  $x$ 의 norm을 나타내며, 이와 같은 constraint는 탭 계수 갱신 시의 변화량을 smoothing시켜 갱신에 의한 식 (4)의 오차 신호는 0으로 접근해지면서 이로 인한 잡음을 줄일 수 있게 된다. 이와 같은 constraint optimisation problem을 풀기 위하여 Lagrange 상수가 사용되며 최종적인 탭 계수 갱신식은 다음과 같이 되며 여기서  $\text{sgn}(x)$ 는  $x$ 의 sign 함수이다.

$$\begin{aligned} f(k+1) &= f(k) - \frac{\mu}{\|R(k)\|^2} R(k) [e_R(k) + j e_I(k)]^* \\ e_R(k) &= z_{Rk} (|z_{Rk}|^2 - R_{2R}) \text{sgn}(z_{Rk}) \\ e_I(k) &= z_{Ik} (|z_{Ik}|^2 - R_{2I}) \text{sgn}(z_{Ik}) \end{aligned} \quad (7)$$

입력 regressor 벡터인  $R(k)$ 에 포함되는 시간  $k$ 에서 입력되는 새로운 벡터는 제안된 블라인드 모드의 방법으로  $k+1$ 에 계산되어지는  $f(k+1)$ 값은 기지의  $f(k)$ 에 대

하여 euclidean norm 관점에서 최소 변화량이 된다. 일반적으로 안정성을 고려할 때 등화 알고리즘에서 사용되는 스텝 크기의 값은 LMS 알고리즘을 사용할때의 스텝 크기보다 적게 한다. 그러나 스텝 크기의 값은 수렴 속도를 결정하므로 이로 인하여 등화 알고리즘의 속도는 LMS 보다 느리며, 동일한 steady state squared error에서 블라인드 등화를 위한 선정된 스텝 크기는 LMS 알고리즘에서 허용되는 값보다 적게 되므로, 이로 인하여 블라인드 등화 알고리즘의 수렴 속도가 느린 LMS보다 느리게 된다. CMA 블라인드 등화 알고리즘의 수렴 속도를 개선시키기 위하여는 오차 레벨이 충분히 낮아질 때 decision directed mode로 전환하는 dual mode 동작이 필요하다.

dual mode는 blind mode와 decision directed mode로 나누어, 초기의 등화 개시 시에는 blind mode로 동작한 후 오차 레벨이 낮아지면 decision directed mode로 동작하여 안정된 등화를 수행하게 된다. blind mode ECMA에서의 오차 신호는 식 (7)과 같으며, decision directed mode에서의 오차 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_R(k) &= z_R(k) - s_R(k) \\ e_I(k) &= z_I(k) - s_I(k) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서  $s_R(k)$ 와  $s_I(k)$ 는 등화기 출력을 decision device를 통하여 재생된 신호의 추정치를 나타낸다. 이와 같은 dual mode 구조에 Normalized LMS 방식으로 적용하므로써 이들 mode간에 smoothing한 스위칭이 이루어져 안정도 개선등의 ECMA 특징을 얻을 수 있으며, 그림 3은 이의 구조를 나타낸 것이다.

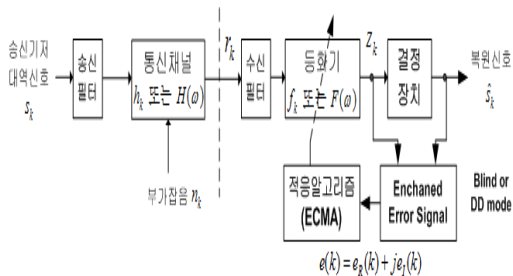


그림 3. ECMA 등화기 구조  
Fig. 3. Structure of ECMA Equalizer

### III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존 CMA의 진폭과 위상의 동시 보상 능력을 갖는 MCMA와 ECMA 알고리즘의 성능 비교를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝의 크기  $\mu$ 로 MCMA와 ECMA 모두 0.0018, 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 4는 시분산 통신 채널의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 나타낸 것이며, 진폭 전달 함수는 이득이 3.5dB 범위에서 변동하므로 일정하지 않은 찌그러짐을 발생시킴을 알 수 있고, 위상 전달 함수는 주파수에 따라 위상의 변화량 또는 기울기가 불규칙적인 비선형 위상 특성을 가지고 있으므로 변조 신호를 전송하는 경우에는 이로 인한 군지연이 발생됨을 알 수 있다. 이와 같은 2 가지 특성에 의해 수신된 신호 정상도에는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭이 존재하게 될 것이다. 그림 5는 시뮬레이션을 위한 전체 신호 흐름도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 4의 통신 채널을 통과시키고 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 잡음을 부가시켜 그림 2의 수신 신호  $r_k$ 를 얻었다. 이를 MCMA와 ECMA 알고리즘으로 처리한 후 이의 성능을 비교하였으며, 이를 위한 지수로는 등화기 출력인 수신측 복원 정상도, 잔류 isi 및 MD, MSE, 채널과 등화기의 종합 진폭과 위상 전달 특성을 사용한다. 그림 6은 송신 신호와 수신 신호의 정상도를 나타낸 것으로서 송신 신호의 경우 총 16개의 심볼이 존재하지만, 수신 신호에는 비선형 특성과 부호간 간섭이 존재하여 심볼점들을 구별할 수 없다.

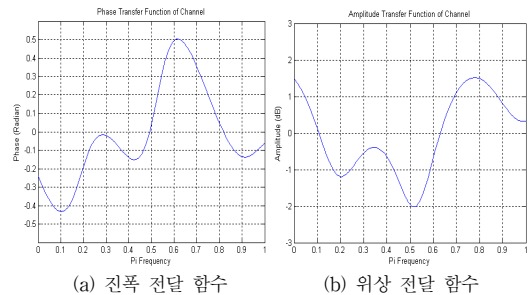


그림 4. 시분산 채널의 주파수 전달 함수  
Fig. 4. Frequency Transfer Function of Time-dispersive Channel

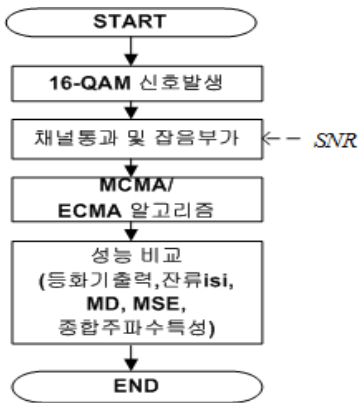


그림 5. 신호 처리도  
 Fig. 5. Signal Processing Diagram

성능 비교를 위한 첫 번째 지수로는 MCMA, ECMA 알고리즘의 등화기 출력 신호 성상도를 그림 6에 나타내었다. 3개의 성상도에서 총 16개의 신호점이 명확히 구분되며, 신호점들의 폭과 신호점간의 거리를 비교하여 정성적인 성능을 평가할 수 있다. 제시된 그림에서 신호점의 폭은 ECMA가 MCMA 보다 좁으며 각 신호점간의 거리에서도 ECMA가 MCMA보다 크므로 오류 발생 확률이 적어져서 송신 출력을 낮출 수 있으므로 ECMA가 MCMA 보다 진폭과 위상 보상 능력이 우월함을 알 수 있다.

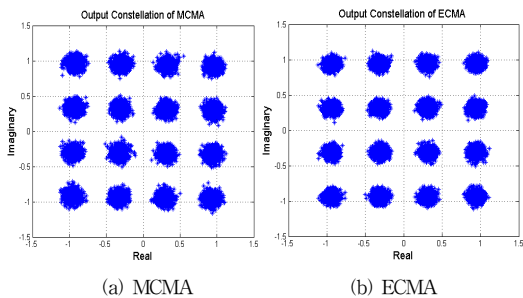


그림 6. 복원 성상도  
 Fig. 6. Recovered Constellation

두 번째 지수로는 적응 등화기의 수렴 속도와 수렴양을 나타내는 잔류 isi와 MD 및 MSE learning 곡선을 사용하며 이들은 적응 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 특히 수렴 속도는 적응 등화기가 동작하는 중에 채널이 순단되는 경우 이에 신속하게 대응하여 정상적인 등화가 이루어지기까지의 소요되는 시간을 나타낸다. 등화기가 완전 등화 상태에서는 시간 영역에서 채널

과 등화기 계수의 컨볼루션은 임펄스 특성을 가져야 한다. 그러나 이는 이론적인 관계이며 실제적으로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하므로 잔류 isi는 이들 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 크기를 의미한다. 또한 MD는 그림 6의 복원 성상도에서 원래의 송신 신호점과 복원 신호점간의 거리를 나타내며, 마지막으로 MSE는 등화기 출력  $z_k$ 와 복원 신호인  $\hat{s}_k$ 와의 차이를 제곱을 취한 것으로 진폭 차이를 나타내며 이들을 그림 7, 8, 9에 순서대로 나타내었다. 잔류 isi 성능의 경우 정상 상태에 도달하기위한 수렴 속도에서 ECMA가 MCMA보다 빠르며 그 이후의 잔류양에서 ECMA가 MCMA보다 -1.8dB 정도 적음을 알 수 있다.

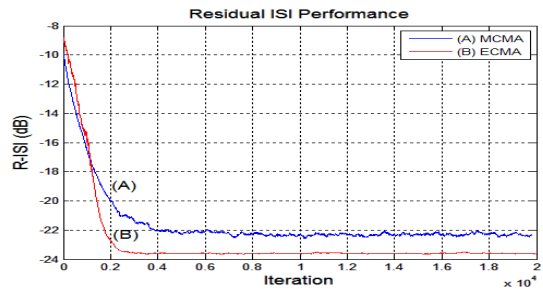


그림 7. 잔류 isi 성능  
 Fig. 7. Residual isi Performance

Maximum Distortion 성능의 경우 등화 초기에는 ECMA가 MCMA보다 열악하지만 어느 정도 적응이 이루어진 후에는 수렴 속도와 정상 상태 이후의 MD양에서 ECMA가 MCMA보다 우월함을 알 수 있다. 이들의 2가지 성능 지수에서 등화기 탭 계수의 갱신에 따른 등화 잡음이 ECMA가 MCMA보다 훨씬 적음을 알 수 있는데 이는 euclidean norm 관점에서 계수 변화량을 최소가 되도록 탭 계수 갱신을 수행하기 때문이다.

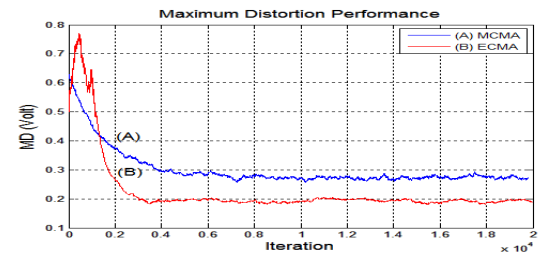


그림 8. MD 성능  
 Fig. 8. MD Performance

MSE 성능의 경우 진폭의 오차 자승만을 계산하므로 정상 상태 도달을 위한 수렴 속도의 경우 ECMA가 MCMA보다 훨씬 빠르며 정상 상태 이후의 성능에서도 ECMA가 MCMA보다 -3dB 정도 우월한 성능을 얻을 수 있지만, 다른 성능 지수에 비하여 변화량의 분산이 크을 알 수 있다.

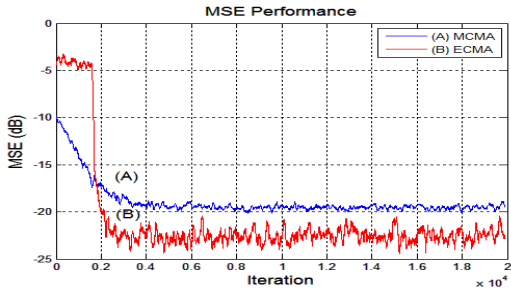


그림 9. MSE 성능  
Fig. 9. MSE Performance

마지막 성능 비교를 위한 지수로서 채널과 등화기가 시스템적으로 직렬 연결 형태이므로 주파수 영역에서 이들의 종합 진폭과 위상 전달 특성을 그림 10에 나타내었다.

종합 진폭 전달 함수에서 모든 주파수 범위에 걸쳐 ECMA가 MCMA보다 훨씬 평탄해짐을 알 수 있으며, 위상 전달 함수에서는 이들 2 가지 방식들의 위상 변화량인 기울기가 거의 일정한 선형 특성으로 유사하게 균지연을 보상할 수 있다. 따라서 디지털 전송의 경우 진폭보다는 위상이 중요시되므로, 이들 방식의 성능은 거의 유사하지만, 진폭 보상을 고려한 수렴 성능에서는 ECMA가 MCMA보다 우월함을 알 수 있다.

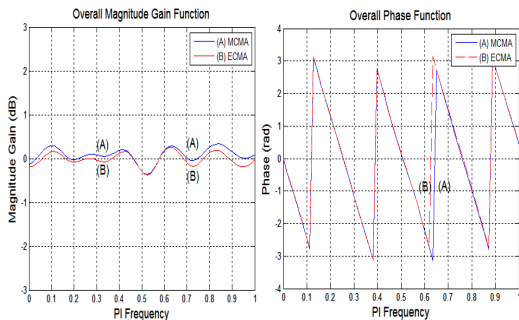


그림 10. 전체 주파수 전달 함수  
Fig. 10. Overall Frequency Transfer Function

## V. 결론

논문은 통신 채널에서 발생하는 진폭과 위상 찌그러짐을 동시에 보상할 수 있도록 최소 disturbance 기법을 적용한 ECMA 적응 등화 알고리즘의 성능에 관한 것이며, 이의 성능 비교를 위하여 동일한 진폭과 위상 동시 등화 능력을 갖는 MCMA와 비교하였다. MCMA에서는 적응 등화를 위하여 실수부와 허수부로 나누어 별도로 처리하여 cross coupling에 의한 위상 성분을 제거시켜 진폭과 위상을 동시 보상하지만, 제안 ECMA에서는 등화기 탭 계수 갱신시 squared euclidean norm이 최소가 되도록 하는 최소 disturbance 기법을 적용하므로서 진폭과 위상의 동시 복원뿐만 아니라 탭 계수 변경에 따른 gradient noise의 최소화 및 안정성등을 개선할 수 있는 새로운 비용 함수를 제시하였다. 이의 적응 등화 성능을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 등화기 출력 신호의 정상도와 수렴 특성을 확인하기 위한 잔류 isi와 MD 및 MSE, 채널과 등화기를 2개의 독립된 직렬 연결된 시스템으로 간주할 때 이들의 종합 주파수 전달 특성을 비교 지수로 사용하였다. 복원 정상도에서 ECMA가 MCMA보다 심볼점의 폭과 심볼점간 거리에서 우월함을 알 수 있었으며, 수렴 특성에서 정상 상태에 도달할 때까지의 수렴 시간과 정상 상태 이후의 잔류량등에서 ECMA가 MCMA보다 훨씬 적어졌으며, 종합 주파수 전달 특성에서도 진폭은 ECMA가 MCMA보다 훨씬 평탄해지며, 위상에서는 동등한 성능으로 보상되어짐을 알 수 있었다.

## References

- [1] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980.
- [2] Oh, K.N., "Modified constant modulus algorithm : blind equalization and carrier phase recovery algorithm", Proc. of ICC'95, PP.498~502, June 1995.
- [3] J.C.Lin, "Blind equalisation technique based on an improved constant modulus adaptive algorithm", Proc. IEE of Communication, Vol.149, No.1,

pp.45~50, 2002.

- [4] A.M.Nassar, E.E.Nahal, "Adaptive Blind Equalization Technique to Enhance the Constant Modulus Algorithm Performance", International Computer Engineering Conf., pp.146~151, 2010.
- [5] S.Haykin et al., "Adaptive Tracking of Linear Time Variant Systems by Extended RLS Algorithms", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.45, No.5, May 1997
- [6] J.R.Treichler, M.G.Larimore, "New Processing Techniques based on the Constant Modulus Adaptive Algorithm", IEEE Trans. on. A.S.S.P., Vol. ASSP-33, No.2, pp.420~431, Apr. 1985.
- [7] S.R.Thakallapalli, S.R.Nelatury, S.S.Rao, "A New Error Function for Fast Phase Recovery of QAM Signals in CMA Blind Equalizers", IEEE Workshop on Statistical Signal Processing, pp.70~73, 2003
- [8] L.He, M.Amin, "A Dual mode technique for improved blind equalization for QAM signals", IEEE S.P. Letters, Vol.10, No.2, pp.29~31, Feb. 2003

### 저자 소개

#### 강 대 수(정회원)



- 1983년 : 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 : 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1992년 : 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2005년 ~ 현재 : 공주대학교정보통신공학부 교수.

<주관심분야 : 디지털통신, 이동통신, 인지신호처리>

이 논문은 2013년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구비지원에 의하여 연구되었음.  
This work was supported by the research grant of the Kongju National University in 2013.