

<http://dx.doi.org/10.7236/JIIBC.2014.14.3.57>

JIIBC 2014-3-8

# Adaptive Modulus를 이용한 MCMA 등화 알고리즘의 성능 개선

## Performance Improvement of MCMA Equalization Algorithm Using Adaptive Modulus

임승각\*

Seung-Gag Lim\*

**요약** 본 논문에서는 대역폭 제한과 시분산 특성을 갖는 통신 채널에서 부호간 간섭을 제거시킬 수 있는 MCMA 블라인드 등화 기에 Adaptive Modulus 개념을 적용하여 등화 성능을 개선시킬 수 있는 알고리즘을 제안한다. 학습열의 도움없이 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 진폭과 위상 회전을 동시에 경감시킬 수 있는 MCMA 블라인드 알고리즘에서 송신 신호의 통계적 특성인 Constant Modulus를 고정시켜 사용하지만, 제안 방식에서는 등화기 출력 신호에 따라 Modulus를 적응적으로 변화시킴으로서 개선된 성능을 얻을 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 이를 위해 수신측에서의 등화기 출력 신호인 복원된 신호 성장도, 수렴 성능을 나타내는 성능 지수인 MSE, MD (Maximum Distortion) 및 잔류 isi 특성 곡선을 사용하였으며, 동일한 조건의 적응 등화 알고리즘에서 제안 방식이 기존 MCMA 알고리즘보다 우월함을 확인하였다.

**Abstract** This paper proposes the improving the equalization performance using the adaptive modulus concept to the MCMA blind equalizer in order to the reduction of intersymbol interference which occurs in the band limited and time dispersive communication channel. In MCMA blind algorithm, it is possible to reducing the amplitude and phase rotation of intersymbol interference without training sequence, the fixed constant modulus of transmission signal is used. But in proposed algorithm, the modulus are adaptively varies according to the equalizer output signal, then the improved equalization performance were obtained by the computer simulation. For this, the recovered signal constellation that is the output of the equalizer, the convergence performance by MSE, MD (maximum distortion) and residual isi characteristic learning curve were used. The propose algorithm has fairly good performance compared to the traditional MCMA algorithm in the same adaptive equalization algorithm.

**Key Words** : MCMA, residual isi, Adaptive Modulus, intersymbol interference, MSE

### 1. 서론

다양한 스마트 통신 단말과 클라우드 컴퓨팅과 같은

모바일 인터넷 서비스 활성화에 따라 정형적인 데이터뿐만 아니라 비정형 데이터를 처리할 수 있는 빅데이터 기반 기술 및 이를 효율적으로 지원하기 위한 다양한 표준

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부  
접수일자 2014년 3월 14일, 수정완료 2014년 5월 2일  
게재확정일자 2014년 6월 13일

Received: 14 March, 2014 / Revised: 2 May, 2014

Accepted: 13 June, 2014

\*Corresponding Author: [sglim@kongju.ac.kr](mailto:sglim@kongju.ac.kr)

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

들이 연구되어지고 있다. 빅 데이터는 단순히 큰 데이터가 아닌 부피가 크고, 변화의 속도가 빠르며, 데이터의 속성이 너무도 다양한 데이터를 총칭한다. 이를 지원할 수 있는 기반 기술 중에서도 모바일이라는 속성을 고려하면 무선 전파를 이용하게 될 것이며, 이때 무선 전파의 전파 특성 중 무선 채널에서 발생하는 다중 경로에 의한 페이딩과 대역 제한과 시분산 특성에 의한 부호간 간섭과 잡음의 영향을 극복해야 한다. 이를 경감시키기 위해 다이버시티 수신, 부분 응답 부호화, 개선된 오류 제어 기법과 적응 등화기, 정합 필터 등이 사용되고 있다. 이와 같은 다양한 기술 중에서 디지털 전송 시스템의 성능을 결정짓는 부호간 간섭과 잡음의 영향을 최소화시킬 수 있는 것은 적응 등화기 (adaptive equalizer) 이며, 최근 이에 대한 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 원래 등화기는 통신 채널의 주파수 전달 함수의 역 특성을 갖는 디지털 필터로서 수신측에서 사용되는 일종의 통신 채널의 inverse model에 해당된다. 통신 개시 초기에는 송수신측이 상호 약속된 학습열 (training sequence)을 주고 받으면서 채널의 전달 함수를 추정한 후, 이의 역 특성이 되도록 등화기의 계수를 설정하는 고정 등화기가 있었다. 그러나 모바일이라는 환경에서 채널의 상태는 수시로 변동하므로 전송 중에도 학습열을 주기적으로 보내야 하는 적응 등화기가 사용되었다. 그러나 학습열 전송으로 인하여 전송 대역폭의 낭비와 전송 효율이 저하되므로 이의 도움없이 스스로 통신 채널의 상태를 추적하면서 자동으로 이의 역 특성을 계산하여 등화하면서 수신된 데이터를 복원할 수 있는 블라인드 적응 등화기 (blind adaptive equalizer) 가 등장하였다. 이와같이 학습열의 도움 없이도 자동으로 등화할 수 있는 블라인드 방식에서는 학습열에 의한 등화 방식보다 등화 성능이 열화되는 단점도 있다. 최초의 블라인드 적응 등화 알고리즘은 Godard가 제안한 CMA (Constant Modulus Algorithm)를 들 수 있다<sup>[2][4]</sup>. CMA에서는 일정한 modulus를 갖는 1차원 PAM, 2차원 QAM의 신호를 대상으로 적응 필터의 비용 함수를 최소화시키도록 채널의 진폭 찌그러짐을 보상할 수 있지만, 위상 회전에 의한 찌그러짐은 보상이 불가능케 되는 한계를 갖는다. 이를 개선하기 위해 Oh등은 CMA의 구조를 실수와 허수부로 분리한 후 일정한 modulus를 이용하여 채널의 진폭과 위상 찌그러짐을 동시에 보상할 수 있는 MCMA (Modified CMA)를 제안하였으며, CMA보다 개선된 등화 성능을 얻을 수 있었다<sup>[3][5]</sup>.

본 논문에서는 기존에 제안되었던 MCMA의 구조를 그대로 적용하면서 일정한 modulus 대신 등화기 출력 신호에 따라 modulus를 수시로 변화시킬 수 있는 adaptive varying modulus 개념을 적용시켜 기존 방식보다 더욱 개선된 등화 성능을 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 2장에서는 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델과 MCMA 블라인드 적응 등화 알고리즘과 제안 알고리즘에 대하여 설명한 후, 3 장에서는 시뮬레이션과 결과로서 주어진 통신 채널과 신호대 잡음비에서 이들 알고리즘들의 등화 성능을 제시한 후, 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 고정 등화기를 사용하는 통신 시스템 모델

그림 1은 수신기에서 고정 등화기를 사용한 일반적인 통신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 기저 대역 신호  $s_k$ 를 전송하면 송신 필터를 통과한 후 대역 제한과 다중 경로 전파를 나타내는 필터 모델인 임펄스 응답이  $h_k$ 인 채널을 통하여 수신측에 전달되며 이때 채널에서는 일정한 신호대 잡음 전력비를 갖는 가우시안 잡음이 추가된다. 수신측에서는 수신 필터를 통과한 후 등화기에 인가되며, 이때 등화기의 전달 함수는 통신 채널의 역 전달 함수를 갖도록 설정된다. 송신 필터와 수신 필터는 이상적으로 간주하며, 송신 기저 대역 신호가 받는 채널의 찌그러짐에 의한 부호간 간섭은 등화기에 의해 최소화된 후 결정 장치를 통해 송신 신호의 추정치  $\hat{s}_k$ 를 얻게 된다. 주파수 영역에서는 채널의 임펄스 응답  $h_k$ 의 푸리에 변환치를  $H(\omega)$ , 등화기의 디지털 필터 계수  $f_k$ 의 푸리에 변환치를  $F(\omega)$ 라하면 다음의 관계가 성립된다.

$$H(\omega) \cdot F(\omega) = 1 \quad (1)$$

단 지연 시간은 무시하였다. 즉 채널과 등화기의 종합 주파수 특성은 1이 되어 모든 주파수 성분을 그대로 통과시키게 되어 수신측에서 송신 신호를 추정할 수 있게 되며, 이 과정에서 발생하는 지연 시간은 무시한다.

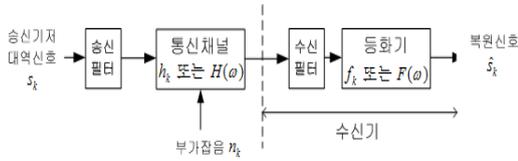


그림 1. 기저 대역 통신 시스템 모델  
 Fig. 1. Baseband communication system model

### 2. Modified Constant Modulus Algorithm

MCMA는 Godard등이 제안한 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.

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

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

$$z_{Rk} = F_R(k)^T R_R(k), \quad z_{Ik} = F_I(k) R_I(k) \quad (3)$$

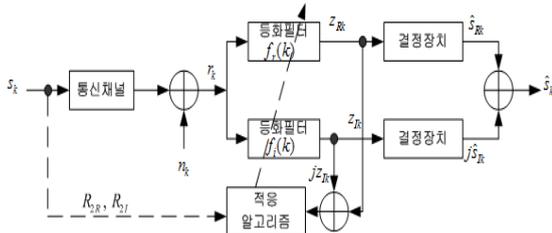


그림 2. MCMA 등화기 구조  
 Fig. 2. Architecture of MCMA equalizer

적용 알고리즘을 위하여 MCMA에서는 기존 CMA의 비용 함수를 개량하였으며, 이들은 다음과 같이 정의된다.

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

여기서  $R_2, R_{2R}, R_{2I}$ 는 CMA와 MCMA의 constant modulus를 나타내며 송신 신호의 고차 값을 이용하여 얻을 수 있다. 적응 등화 필터의 탭 계수 갱신은 식 (4)의 비용 함수에 최적화시키기 위한 stochastic gradient algorithm을 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f(k+1) &= f(k) - \mu e(k) R^*(k) \quad (5) \\ e(k) &= e_R(k) + j e_I(k) \\ e_R(k) &= z_{Rk} (|z_{Rk}|^2 - R_{2R}), \quad e_I(k) = z_{Ik} (|z_{Ik}|^2 - R_{2I}) \end{aligned}$$

완전 등화가 이루어질 때 CMA는 등화기 출력을 반지름이  $\sqrt{R_2}$ 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. Adaptive Varying Modulus 개념

상기의 constant modulus를 등화에 적용하므로써 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 adaptive varying modulus 개념이 등장하였다. MCMA는 등화기 출력을  $\pm\sqrt{R_{2R}}$ 와  $\pm\sqrt{R_{2I}}$ 의 점에 위치하도록 탭 계수를 갱신하게 된다. adaptive varying modulus는 등화기 출력의 실수와 허수부는 그림 3에서 해당 실수부와 허수부에 가장 유사한 maximum likelihood 원칙을 적용하고 있다.

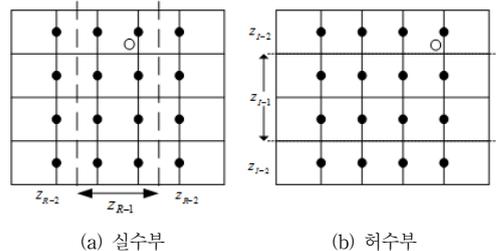


그림 3. 16-QAM에서 실수와 허수의 Likelihood zone  
 Fig. 3. Likelihood zone of real & imaginary of 16-QAM

그림 (a) 에서 zone 1과 zone 2에 속하는  $z_{R-1}, z_{R-2}$  은 신호점의 실수축에 대한 점이며, 그림 (b)에서 zone 1과 zone 2에 속하는  $z_{I-1}, z_{I-2}$  는 신호점의 허수축에 대한 점이다. 그림에서 “O”와 같은 등화기 출력을 얻었다면, 실수축에 대해서는 zone 2에 속하며, 허수축에 대해서도 zone 2에 속하게 되어 modulus를 적응적으로 변화시키게 된다. 16-QAM 신호에서 이와 같은 개념을 적용한 adaptive varying modulus는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{If } z_{Rk} \in Z_{R-1} \text{ then } \sqrt{R_{2R}} &= \pm 0.3153 \\ \text{If } z_{Rk} \in Z_{R-2} \text{ then } \sqrt{R_{2R}} &= \pm 0.946 \\ \text{If } z_{Ik} \in Z_{I-1} \text{ then } \sqrt{R_{2I}} &= \pm 0.3153 \\ \text{If } z_{Ik} \in Z_{I-2} \text{ then } \sqrt{R_{2I}} &= \pm 0.946 \end{aligned} \quad (6)$$

기존 MCMA에서는  $\sqrt{R_2} \approx 2.86$ 를 고정적으로 사용하지만 제안하는 adaptive varying modulus에서는 등화기 출력 신호의 값에 따라 식 (6)과 같이 modulus를 변화시켜 적은 오차 신호를 얻게 되어 수평 속도와 적은 잔류 isi를 얻을 수 있는 큰 장점이 있다.

### III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존의 MCMA 알고리즘과 제안하는 adaptive modulus를 갖는 알고리즘의 성능 비교를 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 위한 파라미터로는 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝의 크기를 모두  $\mu = 0.0018$ , 등화 필터로는 안정성이 보장되는 15차 FIR 필터를 적용하였다. 그림 4는 시 분산 통신 채널의 진폭 전달 함수와 위상 전달 함수를 나타낸 것이다. 진폭 전달 함수는 최대와 최소 전달 함수가 3.5dB 범위에서 주파수에 따라 이득이 변화함을 알 수 있으며, 위상 전달 함수는 주파수에 따라 위상의 변화량이 불규칙적으로 변화하는 비선형 특성을 가지고 있다. 그림 6은 시뮬레이션을 위한 전체 신호 흐름도를 나타낸 것으로 송신측에서는 20000개의 16-QAM 신호를 발생한 후, 그림 5의 통신 채널을 통과시키고 원하는 신호대 잡음비를 갖도록 백색 가우시안 잡음을 부가시켜 수신 신호를 얻었다. 수신 신호는 그림 2의  $r_k$ 가 된 후 이를 MCMA와 adaptive varying modulus 개념을 적용한 제안 알고리즘으로 처리하여 적응 등화 알고리즘의 성능을 나타내는 복원 정상도, 잔류 isi 및 MD, MSE를 계산하였다.

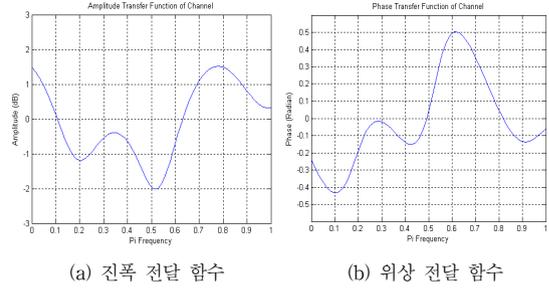


그림 4. 채널의 주파수 전달 함수  
Fig. 4. Frequency transfer function of channel

첫 번째 성능을 정량적인 성능 비교를 위하여 이들 2가지 알고리즘을 적용할 때 적응 등화기의 출력 신호 정상도를 그림 6에 나타내었다. 출력 정상도에서는 신호점의 크기와 폭이 좁고 신호점간의 간격이 클수록 등화 성능이 우월하게 되며, 제안된 알고리즘이 출력 정상도에서 기존 MCMA 방식보다 우월함을 알 수 있다.



그림 5. 신호 처리도  
Fig. 5. Flowdiagram of signal processing

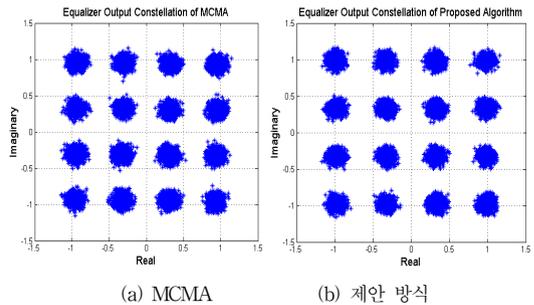


그림 6. 등화기 출력 신호 정상도  
Fig. 6. Output signal constellation of equalizer

2 번째 성능 비교를 위한 지수로 MSE, 최대 찌그러짐과 잔류 isi learning 곡선을 사용하였으며 이들은 등화기의 성능을 나타내는데 매우 중요하다. 이들 곡선에서 얻을 수 있는 것은 초기의 과도 과정을 지나 정상 상태(stable state)에 도달할 때 까지의 수렴 속도와 그들의 양이다. 특히 수렴 속도는 적응 등화기가 정상적으로 동작하는 중에 채널의 상태가 급변하는 경우 이에 신속하게 적응하기 위하여 소요되는 시간을 나타내며 다음과 같이 정의하였다.

$$MSE_{dB} = 10 \log_{10} [s_k - z_k]$$

$$MD = \left[ \frac{\sum_i |h(k)*f(k)| - |h(k)*f(k)|_{\max}}{|h(k)*f(k)|_{\max}} \right]$$

$$\text{잔류 isi}_{dB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_i |h(k)*f(k)|^2 - |h(k)*f(k)|_{\max}^2}{|h(k)*f(k)|_{\max}^2} \right]$$

(7)

먼저 반복 iteration에 대한 등화기 출력과 결정 장치 출력 사이의 자승 오차로 정의되는 MSE learning 곡선을 그림 7에 나타내었다. 이 곡선에서는 진폭의 차이만을 나타내며, 경험상 -19dB를 정상 상태로 정의할 때 MCMA는 2994회, 제안 방식은 1635회에서 달성되므로 MSE 수렴 속도에서 제안 방식이 기존 MCMA보다 빠름을 알 수 있다.

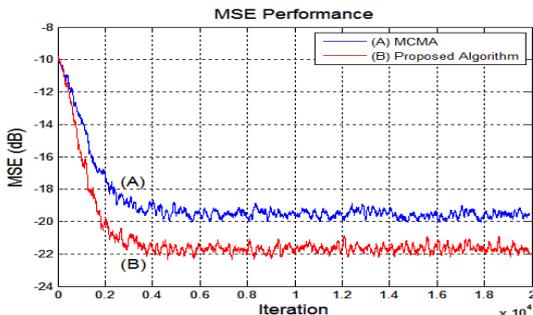


그림 7. MSE 성능  
 Fig. 7. MSE performance

최대 찌그러짐은 그림 6의 복원 정상도에서 원래의 송신 신호점과 복원 신호점간의 거리를 나타내며, 이들 알고리즘의 성능 곡선을 그림 8에 나타내었다. 이 지수도 정상 상태인 -0.35 [v]이하로 정의할 때 MCMA는 2306회, 제안 방식은 1319회에서 달성되므로 MD 수렴 속도에서 제안 방식이 기존 MCMA 보다 빠름을 알 수 있다.

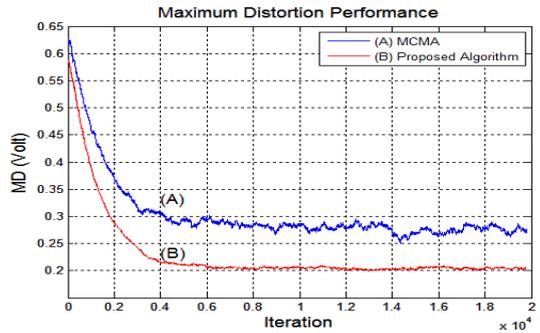


그림 8. MD 성능  
 Fig. 8. MD performance

마지막 성능 비교 지수인 잔류 isi는 통신 채널과 적응 등화기가 완전 등화 상태에서는 이들의 종합 특성으로 주파수 영역에서는 식(1)의 관계가 성립되며, 시간 영역에서는 임펄스 특성을 가져야 한다. 이는 이론적인 관계이며 실제로는 완전 임펄스 특성을 갖지 못하고 잔류 성분들이 존재하게 되므로 이 잔여 성분들의 크기를 의미한다. 그림 9는 블라인드 적응 등화기의 가장 중요한 성능 지수인 잔류 isi 성능을 나타낸 것으로서 -20dB를 정상 상태로 설정할 때 MCMA는 2103회, 제안 방식은 1367회에 달성하였다. 제안 방식이 정상 상태에 도달하는 수렴 속도에서도 빠르며 그 양도 매우 적게 됨을 알 수 있다. 그림 8과 9의 성능에서 정상 상태 이후의 변화량도 매우 적게 되어 adaptive modulus를 이용함으로써 misadjustment에 의한 등화 잡음이 감소됨을 확인할 수 있다.

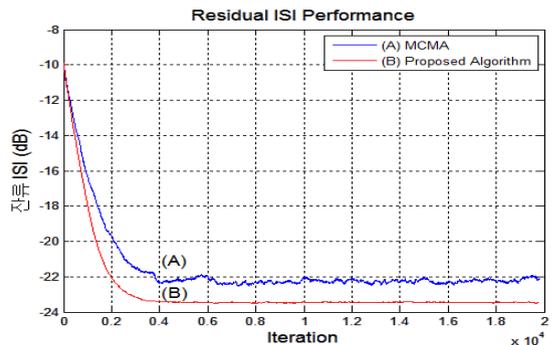


그림 9. 잔류 isi 성능  
 Fig. 9. Residual isi Performance

## V. 결론

논문에서는 시분산 채널에서 발생하는 부호간 간섭의 원인이 되는 진폭과 위상 찌그러짐을 보상하기 위해 송신 신호의 constant modulus를 이용하는 MCMA 알고리즘에 등화기의 출력 신호를 이용한 adaptively varying modulus 개념을 조합한 새로운 알고리즘을 제안하였다.

제안 알고리즘의 개선된 성능을 확인하기 위하여 지수로는 등화기 출력 신호의 정상도, 등화기의 수렴 특성을 확인하기 위하여 MSE, 최대 찌그러짐 및 잔류 isi를 적용하였다. 수렴 특성에서 얻을 수 있는 정보로는 등화기가 정상 상태에 도달할 수 있는 수렴 시간과 정상 상태 이후의 수렴량을 들 수 있다. 정성적인 분석 결과 그림 6, 7, 8, 9에서 제안 방식이 기존 MCMA보다 전체적인 우월성을 확인할 수 있었으며, 수렴 속도에서도 MSE는 1.8배, 최대 찌그러짐은 1.7배, 잔류 isi는 1.5배 정도 빠름을 확인할 수 있었으며, 정량적인 분석 결과 평균적으로 수렴 양에서도 MSE에서는 0.0014, 최대 찌그러짐에서는 0.0703, 잔류 isi에서는 0.0042 적게 됨을 확인할 수 있었다. 이와 같은 개선된 성능을 갖는 제안 알고리즘은 최근 급격히 증가되는 모바일 인터넷 트래픽의 증가에 따른 디지털 전송 분야에서 시스템의 throughput을 개선시킬 수 있는 요소 기술로서 중요한 의미를 갖게 된다. 향후 adaptive varying modulus 개념을 더욱 확장시켜 다양한 블라인드 적응 등화 알고리즘에 적용시킬 수 있도록 지속적인 연구가 필요할 것이다.

## References

- [1] Y.Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude Modulation systems", IEEE Trans. Com., COM-23, pp.679~682, June, 1975
- [2] Godard D.N., "Recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems", IEEE Trans. Com., COM-28, pp.1867~1875, Nov. 1980
- [3] K.N.Oh, Y.O.Chin, "Modified constant modulus algorithm : Blind equalization and carrier phase recovery algorithm", IEEE Int. conf. on com., Vol-

1, ICC-95, pp.498~502, June 1995

- [4] L.He, M.Amin, "A Dual mode technique for improved blind equalization for QAM signals", IEEE Signal Proc. Letters, Vol.10, No.2, pp.29~31, Feb. 2003
- [5] S.A.Sheikh, P.Fan, "Joint Blind Equalization & Carrier Phase Recovery based on Adaptively Varying Modulus Algorithm (AVMA)", Int. multitopic conf., IEEE INMIC, pp.1~6, 2005
- [6] S.A.Sheikh, P.Fan, "A New Multimodulus Blind Equalizer for Dense QAM Constellation", Wireless, Mobile and Networks, Int. conf. of ICWMMN2006, pp.1~4, 2006
- [7] R.Hamzehyan, R.Dianat, N.C.Shirazi, "New Variable Step-Size Blind Equalization Based on Modified Constant Modulus Algorithm", Int. Jour. of Machine Learning and Computing, Vol. 2, No.1, pp.30~34, Feb. 2012
- [8] J.P.Chung, I.J.Kim, "Performance Analysis of Turbo Equalizer in Fading Channel", Jour. of K.I.I.T., Vol. 10, No.1, pp.91~96, Jan. 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 정보통신 공학부 교수.

• 주관심분야 : 방송/통신 시스템, 이동통신