

논문 2010-1-17

# Constellation Matching 기법을 이용한 CMA 블라인드 적응 등화기의 성능 개선

## The Performance improvement of CMA Blind Adaptive equalizer using the Constellation Matching Method

임승각\*, 강대수\*\*

Lim Seung Gag, Dae-Soo Kang

**요 약** 본 논문에서는 기존의 CMA 블라인드 적응 등화기의 통신 채널 역모델링 성능을 개선시킬 수 있는 Constellation Matching 기법을 적용한 개선된 CMA 블라인드 적응 알고리즘에 대한 것이다. 무선 이동 채널과 같은 대역 제한 채널에서 발생하는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭 영향을 줄이기 위하여 사용되던 기존의 CMA 블라인드 적응 등화기에서는 진폭 찌그러짐을 보상하는 반면 개선된 적응 알고리즘에서는 부가적인 신호 constellation matching ( CM ) 오차항을 포함하는 비용 함수를 적용하여 등화기 출력에서 진폭과 위상 찌그러짐을 최소화하도록 동작한다. 개선 알고리즘의 역모델링의 성능을 평가하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 잔여 부호간 간섭양과 복원된 신호의 constellation 을 기존 방식과 비교하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 방식이 기존 방식보다 정상 상태에서 안정된 잔여 부호간 간섭량을 얻을 수 있었지만 수렴 속도에서 초기의 적응 과정에서 늦어짐을 확인하였다.

**Abstract** This paper relates with the improved CMA blind adaptive equalization algorithm which uses the constellation matching method that improve the inverse modelling efficiency of a communication channel compared to the present CMA blind adaptive equalizer. The amplitude distortion can be compensated in the present CMA blind adaptive equalizer which is used for the reduction of intersymbol interference by distortion that generate such as a band limited wireless mobile channel, but in the improved adaptive algorithm operates with the minimize the amplitude phase distortion in the output of equalizer by applying the cost function that is composition of additional signal constellation matching error terms. In order to evaluation of the inverse modeling efficiency of improved algorithm, the residual intersymbol interference and recovered signal constellation were compared by computer simulation. As a result of comparion of computer simulation, the improved algorithm has a good stability in the residual intersymbol interference in the steady state, but it has a slow convergence rate in the adaptation state in initial state.

**Key Words :** Adaptive Equalizer, Constellation Matching, Constant Modulus Algorithm

### 1. 서 론

정보의 이용 형태가 다양화되면서 이들 언제 ( Anytime ), 어디서나 ( Anywhere ), 어느 네트워크 (

Anynetwork ) 를 통해서 어느 미디어 ( Anymedia ) 든 지 자유롭게 전달할 수 있도록 정보 통신 기술은 고도화, 고속화되어가고 있으며, 정보원도 음성, 데이터, 영상과 멀티미디어등 광대역화로 변하고 있다. 이와같은 4 Any 를 제공하기위한 네트워크는 무선 전파를 이용하여 형태로 변화하고 있지만, 무선 이동 채널 및 무선 홈 네트워

\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부

\*\*정회원, 공주대학교 정보통신공학부, 교신저자  
접수일자 2010.1.20, 수정완료 2010.2.10

킹과 같은 대역 제한 채널에서는 다중 경로에 의한 깊은 페이딩으로 인하여 수신된 신호가 많이 찌그러진다. 전송되는 정보원이 광대역, 대용량화되면서 이를 고속으로 전송하기 위하여 기존의 단수개의 채널을 설정하는 방식에서 복수개의 부채널을 설정하여 전송할 수 있는 MC-CDMA 와 MCM ( Multi Carrier Modulation ) 등의 전송 기술이 개발되어 단수 채널을 사용하는 방식보다 페이딩의 영향을 줄일 수 있지만 그래도 공통적으로 부채널에서 발생하는 부호간 간섭의 영향을 피할 수 없게 된다. 수신기에서 수신되는 신호의 찌그러짐을 보정하기 위해서는 블라인드 적응 등화기 ( Blind Adaptive Equalizer ) 의 사용하며 이상적의 등화기의 목표는 찌그러짐을 보정하여 부호간 간섭을 zero 시키는 것이다. 이를 이용하므로써 통신망을 통한 시스템의 서비스 품질 ( QoS : Quality of Service ) 와 최대 전송율을 얻을 수 있게 될 것이다. 이와같은 목적으로 사용되는 블라인드 적응 등화 알고리즘 방식으로는 수신 신호의 3~4차 통계치를 이용하는 HOS ( High Order Statistic ) 방식과 CMA ( Constant Modulus Algorithm ) 방식으로 나눌 수 있다. HOS 방식은 고차 상관 함수를 계산하기 위한 알고리즘의 연산이 매우 복잡하여 실시간 응용에서의 문제와 느린 convergence rate 가 가 있지만 비교적 Global convergence 특성의 보장과 진폭과 위상이 복원되는 장점을 갖는다. 그러나 CMA 방식은 비교적 간단한 알고리즘으로 구성되어 실시간 응용할 수 있지만 적응 스텝 상수의 크기에 매우 민감하여 Global convergence 가 보장되지 않으며 위상이 복원되지 않으므로 별도의 위상 고정 루프 ( PLL : Phase Lock Loop ) 를 필요로 한다. 최근에는 CMA 의 특징을 살리면서 convergence를 보장시키기 위한 적응 스텝 상수를 변화시키기 위한 연구와 CMA 알고리즘의 역모델링의 성능을 개선시키기 위한 연구가 동시에 진행되고 있는 실정이다. 본 논문은 이와같은 CMA 의 최근 연구 동향에서 두번째에 해당되는 것으로서 Constellation Matching 기법을 이용한 CMA 블라인드 적응 등화 알고리즘 ( 이하 CM-CMA 로 표기 ) 에 대한 것이다. 제안한 CM-CMA 알고리즘에서는 기존 CMA 의 비용 함수를 개선하여 등화기 출력의 진폭뿐만 아니라 위상 성분까지 송신 신호의 constellation 에 일치시키기 위한 비용 함수를 추가함으로써 보다 개선된 역모델링 효과를 얻을 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 기저 대역의 역모델링을 위한 시스템 구조와 기존 CMA 알고리즘 및 개선된 알고리즘인 CR-CMA 에 대하여 설명한 후 3 장에서는 송신 신호로 16-QAM 신호를 사용하고 신호대 잡음비를 20, 30dB 로 변화시킬때 이들 알고리즘에 의한 복원 신호들을 시뮬레이션 결과로서 제시하였으며, 이들의 성능 비교를 위한 지수로 잔여 부호간 간섭을 사용하여 learning curve 로 확인한 후 4장에서는 결론을 내리겠다.

## II. 본 론

### 1. 기저 대역 블라인드 적응 등화 시스템 모델

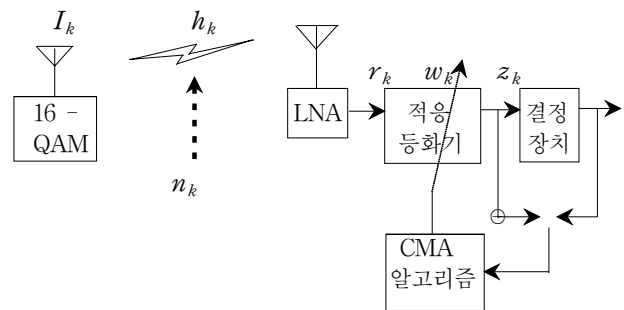


그림 1. 기저 대역 적응 등화 시스템  
Fig. 1. Baseband adaptive equalizer system

그림 1 은 블라인드 적응 등화기를 채용한 수신 시스템의 기저 대역 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서 16-QAM 신호를 송신하면 이 신호는 대역 제한된 채널  $h(t)$  를 통과하면서 부호간 간섭 및 잡음  $n(t)$  가 부가되면서 수신측에 수신된다. 미약한 신호를 전체 잡음 지수를 낮추기 위해 LNA ( Low Noise Amplifier ) 를 통과한 후 적응 등화기에 입력되어진다. 적응 등화기는 디지털 필터로 구성되며 그 계수는 적응 등화기 출력과 결정 장치 출력과의 차이인 오차 신호를 이용하여 디지털 필터 계수를 갱신한다. 이때 새로운 탭 계수를 얻기 위하여 CMA 알고리즘 또는 CM-CMA 알고리즘이 이용될 수 있다. 그림에서 통신 채널을 나타내는 계수  $h(t)$  와 적응 등화기의 계수  $w(t)$  의 컨벌루션 결과는 임펄스 신호가 되거나 주파수 영역에서는  $h(t)$  의 스펙트럼을

$H(f)$ ,  $w(t)$  의 스펙트럼을  $W(f)$  라고할 때 이들의 곱인  $H(f) \cdot W(f) = 1$ 이 되도록  $W(f)$  를 얻는 과정을 등화 (Equalization) 또는 채널의 역모델링 (Inverse Modeling of Channel) 이라고한다. 그림에서 변조와 복조는 이상적으로 가정하였다.

### 2. CMA 알고리즘

그림 1 의 시스템 모델에서 송신 신호인 16-QAM 신호를  $I_k$  라고하고, 대역 제한 채널을 나타내는  $h_k$  를 통과하여 수신기의 초단에 수신되는 신호를  $r_k$  라고하자. 여기서 이산 신호로 이들을 표현하여 샘플링 시간  $kT$  에서 이들의 값들을 각각  $x_k, r_k, h_k$  로 표시하자.

$$r_k = x_k \odot h_k + n_k \quad (1)$$

여기서  $\odot$  는 컨볼루션을 나타내는 기호이다. 적응 등화기의 출력  $z_k$  는 등화기의 계수를  $w_k$  라면 다음과같이 쓸 수 있다.

$$z_k = w_k \odot x_k \quad (2)$$

여기서  $x_k$  는 적응 등화기의 입력 신호를 말하며  $x_k = [r_k \ z_{k-1}]^H$ 가 된다. 시간  $kT$  에서 출력 오차

$$e_k = z_k - I_{k-\Delta} \quad (3)$$

로  $\Delta$  는 채널과 등화기에의한 지연 시간을 나타낸다. 등화기 출력에서 진폭 오차를 나타내는 MSE 는

$$MSE = E[|e_k|^2] = E[|z_k - I_{k-\Delta}|^2] \quad (4)$$

가 된다. 블라인드 등화는 수신된 신호에서 채널에의한 찌그러짐을 보상해주며 CMA 알고리즘에서는 일정한 상수 주위에서 등화기 출력의 modulus 분산이 다음의 비용 함수를 만족할 때 최소화된다.

$$J_c(w) = E\left[\frac{1}{4}(|z_k|^2 - A)^2\right], \quad A = \frac{E[|I_k|^4]}{E[|I_k|^2]} \quad (5)$$

CMA 알고리즘에서 적응 등화기 계수 벡터  $w_k$  는 다음의 식에따라 갱신된다.

$$w_{k+1} = w_k - u_c \hat{e}_c^* x_k \quad (6)$$

비용 함수를 나타내는 식 (5) 는 등화기 출력의 진폭 modulus 분산에대하여 최소가 되도록 계수 벡터를 갱신하게된다.

### 3. CM-CMA 알고리즘

제안된 알고리즘인 CM-CMA ( Constellation Matching-Constant Modulus Algorithm ) 의 비용 함수는 식 (5) 의 CMA 알고리즘의 비용 함수를 변형하여 다음과같이 쓸 수 있다.

$$J_c(w) = E\left[\frac{1}{4}(|z_k|^2 - A)^2 + \beta(g(z_{kr}) + g(z_{ki}))\right] \\ A = \frac{E[|I_k|^4]}{E[|I_k|^2]} \quad (7)$$

여기서  $z_{kr}$  과  $z_{ki}$  는 등화기 출력  $z_k$  의 실수부와 허수부를 나타내며,  $g(x)$  는 constellation matching error function을,  $\beta$  는 진폭과 constellation matching error 간의 절충시키는 가중치를 나타낸다. 식 (7) 의 첫째 항은 기존 CMA 의 진폭 error 함수를 나타내는 비용 함수에 해당된다. 등화기 벡터 계수  $w_k$  의 갱신식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$w_{k+1} = w_k - \mu \nabla J_m(w)|_{w=w_k} \quad (8)$$

식 (8)에서 비용 함수의 Gradient 는 다음과같이 쓸 수 있어서

$$\nabla J_m(w) = E[z_k (|z_k|^2 - A) + \beta n_k]^* x_k \quad (9)$$

식 (8) 의 CM-CMA 갱신식은 다음과같이 된다.

$$w_{k+1} = w_k - \mu \Phi_k^* x_k \quad (10)$$

$$\Phi_k = z_k (|z_k|^2 - A) + \beta n_k$$

$$n_k = -\frac{\pi}{2d} \left[ \sin\left(\frac{z_{kr}}{d} \pi\right) + j \sin\left(\frac{z_{ki}}{d} \pi\right) \right]$$

여기서  $2d$  는 QAM 신호들간의 최소 거리를 나타낸다.

### 4. 반송파 위상 복원 알고리즘

CMA 알고리즘은 위상 error 가 존재할때도 수렴하지만 위상에는 blind 하다는 사실은 잘 알려져있다. 적응 블라인드 등화를 위한 신호 constellation에서 위상 error 는 등화기 출력에서 송신 데이터를 복원키위한 결정 장치에서 성능을 저하시키므로 이를 방지하기위하여 위상 error 에의한 성능 저하를 방지하기위하여 tracking loop를 적용하며 이를 위상 고정 루프 ( PLL ) 와같은 별도의 반송파 추적 루프를 적용한다.

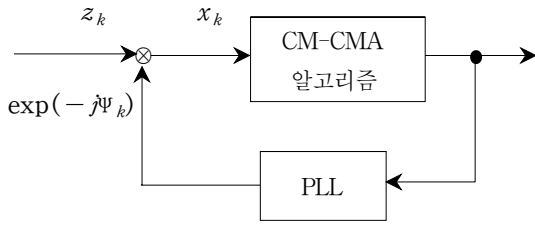


그림 2. 반송파 위상 복원부  
Fig. 2 Carrier Phase Recovery Unit

그림 2는 반송파 위상 복원 루프를 적용한 CM-CMA의 블록 구성도를 나타낸 것으로 적응 등화기의 출력으로부터 얻어지는 값을 이용하여 적응 등화기의 입력인  $x_k$ 에 PLL 출력인  $\exp(-j\psi_k)$ 를 곱하여 알고리즘을 적용한다. 여기서 위상 복원을 위한  $\psi_k$ 는 다음과 같은 갱신식을 적용한다.

$$\psi_{k+1} = \psi_k - \mu \text{Im}[e_k^* z_k] \quad (11)$$

### III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존의 블라인드 적응 등화 알고리즘인 CMA와 제안 방식인 CM-CMA의 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 신호대 잡음 비를 20, 30dB이며 적응 스텝 크기  $\mu = 0.00005, 0.00002$ 로 변화시키면서 알고리즘의 성능을 비교하였다. 그림 3는 이를 위한 신호 처리 과정을 나타낸 것이다. 먼저 16-QAM 신호를 발생시킨 후 이를 그림 4의 통신 채널을 통과시킨 후 신호대 잡음비에 따른 잡음을 부과한 후 이를 블라인드 적응 등화 알고리즘의 입력 신호로 이용한다. 등화후의 복원 성상도를 얻은 후 이들의 성능을 계산하고 비교하였다.

그림 4는 그림 1의 통신 채널을 나타내는 필터 계수  $h_k$ 의 값을 실수와 허수로 나타낸 것이다. 또한 그림 5는 신호대 잡음비가 30dB인 경우 그림 4의 채널을 통과한 후 잡음이 부가될때의 수신 신호의 성상도를 나타낸 것이다. 전체적으로 위상 회전 (Phase Rotation)을 발생되었으며 16개의 신호점 (Signal Constellation)을 구분할 수 없을 정도로 진폭이 찌그러짐을 알 수 있다.

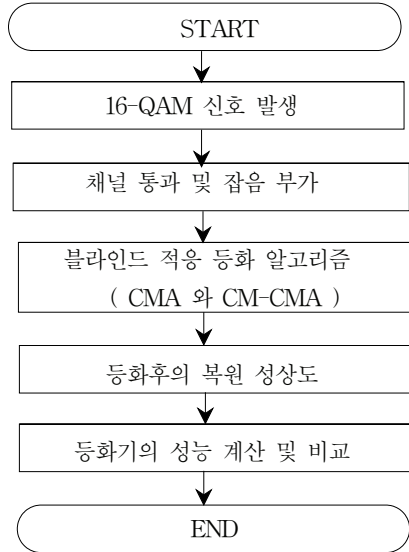


그림 3. 시뮬레이션을 위한 신호 처리도  
Fig. 3. Signal processing chart for simulation

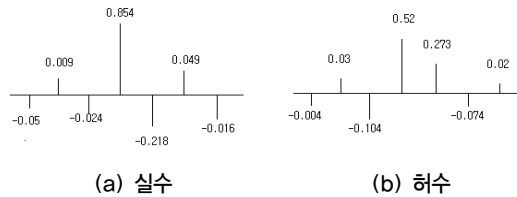


그림 4. 통신 채널의 필터 계수  
Fig. 4 Filter coefficient of communication channel

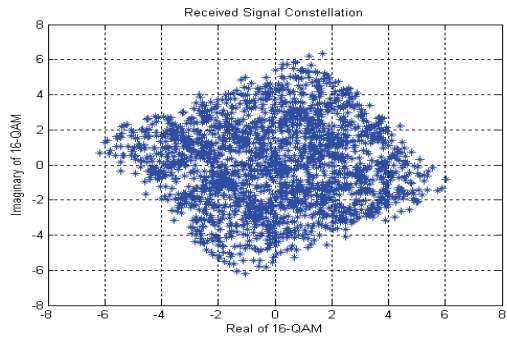
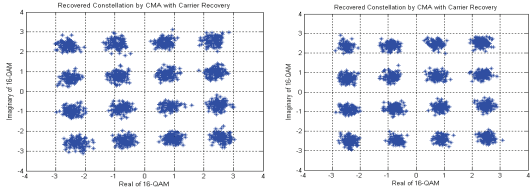


그림 5. 수신 신호 성상도 (SNR = 30dB)  
Fig. 5 Received signal constellation (SNR=30dB)

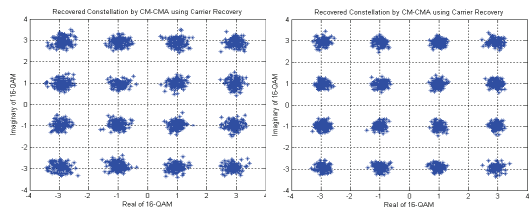
그림 5의 수신 신호를 이용하여 CMA와 CM-CMA 알고리즘을 적용한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 (a)에서는 적응 스텝 상수  $\mu = 0.00005$  일때의 복원 결과이며 (b)에서는  $\mu = 0.00002$  일때의 CMA 알

고리즘의 결과이다. 이들 모두에서 위상 고정 루프를 사용하였으며 진폭도 어느 정도 보상이 되어 16개의 신호 점을 구분할 수 있음을 알 수 있지만, 적응 스텝 상수가 적응수준에 영향을 줄 수 있다. 그림 7의 (a)에서는 적응 상수  $\mu = 0.000005$  일때의 복원 결과이며 (b)에서는  $\mu = 0.000002$  일때의 제안 CM-CMA 알고리즘의 결과를 나타낸 것으로서 진폭과 constellation matching error 간을 절충키위한 상수인  $\beta$  로서 100을 사용하였다.



(a)  $\mu = 0.00005$  (b)  $\mu = 0.00002$

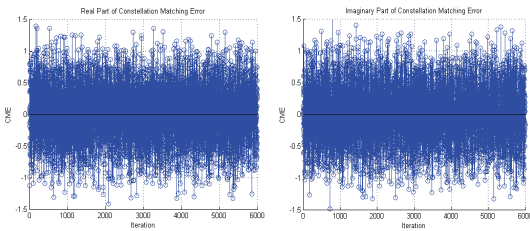
그림 6. CMA 의 복원 신호 성상도  
Fig. 6 Recovered signal constellation by CMA



(a)  $\mu = 0.000005$  (b)  $\mu = 0.000002$

그림 7. CM-CMA 의 복원 신호 성상도  
Fig. 7. Recovered signal constellation by CM-CMA

그림 8은 그림 7의 (b)를 얻기위한 CM Error 함수를 실수와 허수로 나타낸 것으로서, 반복 횟수 (Iteration)에 따라 변화하면서 성능을 개선키위하여 동작한다. 오차 함수의 평균 값으로 실수로는 0.0063, 허수로는 0.0028로 거의의 평균 0에 가까워짐을 알 수 있다.



(a) 실수 성분 (b) 허수 성분

그림 8. Constellation Matching Error 함수  
Fig. 8 Constellation Matching Error Function

블라인드 적응 등화기의 성능을 나타내는 지수로는 MSE ( Mean Square Error ) 또는 잔류 ISI ( Residual ISI ) 등이 있다. MSE 는 식 (4)를 반복 횟수에따라 나타낸 것이며, 잔류 ISI 는 통신 채널의 필드 계수  $h_k$  와 적응 등화기의 계수  $w_k$  를 이용하여 이들의 컨볼루션을 이용하여 다음과같이 정의되며 적응 등화기가 채널 찌그러짐을 제거하고 남은 잔류량을 나타낸 것으로 널리 사용되므로 여기서도 이를 사용하여 성능을 평가하는 지수로 사용하였다. 여기서 \* 는 컨볼루션을 나타내는 기호이다.

$$\text{잔류 } ISI_{dB} = 10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_i |h_k * w_k|^2 - |h_k * w_{k_{\max}}|^2}{|h_k * w_{k_{\max}}|^2} \right]$$

그림 9는 제안된 CM-CMA 알고리즘의 기존 CMA 알고리즘에 대한 성능 우월도를 보이키위하여 잔류 ISI를 반복 횟수 ( Iteration ) 에 대하여 제시한 것이다. 이를 위하여 10000 개의 16-QAM 신호를 발생시키면서 6 회의 monte-carlo 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 수렴 속도 측면에서는 정상 상태 (-22dB)에 도달할때까지는 두가지 방식이 모두 5000 회 정도의 Iteration 이 필요함을 알 수 있지만 수렴 속도를 결정하는 곡선의 기울기는 기존 CMA 방식이 CM-CMA 보다 조금 우월한 반면 정상 상태에 도달한 후에는 잔류 ISI 양에서 CM-CMA 방식이 기존 CMA 방식보다 적은 양이되어 개선된 등화 능력을 보임을 알 수 있다. 표 1은 정상 상태 도달전과 후의 잔류 ISI 의 통계치를 나타낸 것이며 이에 대해서는 그림 6 과 그림 7 의 복원 constellation에서도 CM-CMA 가 기존 CMA 보다 개선된 결과를 보임과도 일치한다.

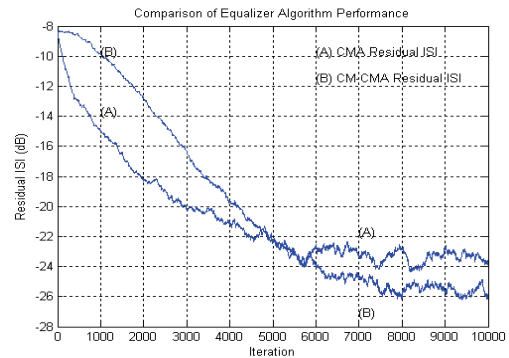


그림 9. CMA 와 CM-CMA 의 잔류 ISI 성능 지수  
Fig. 9. Residual ISI performance index of CMA & CM-CMA



표 1. 잔류 ISI 의 통계치

Table 1. Statistics of residual ISI

	정상 상태 도달전		정상 상태 도달후	
	Mean	Variance	Mean	Variance
CM-CMA	0.0534	0.0022	0.0034	$7.1 \times 10^{-7}$
CMA	0.0211	$4.5 \times 10^{-4}$	0.0045	$2.9 \times 10^{-7}$

## V. 결론

본 논문은 고속, 광대역 신호의 전송시 통신 채널에서 발생하는 찌그러짐에 의한 부호간 간섭 영향을 최소화시키기 위하여 사용되는 자기 적응 등화기의 성능 개선에 관한 것으로서 기존 방식인 CMA를 개선한 CM-CMA 알고리즘을 제안하였다. 기존 CMA 의 비용 함수에 진폭 뿐만 위상을 고려한 Constellation Matching 개념을 도입하여 이들간에 적당한 tradeoff 특성을 도입함으로써 개선된 성능의 자기 적응 등화 알고리즘을 구성하였다. 이와같은 알고리즘의 성능 비교를 위하여 16-QAM 신호를 발생한 후 채널을 통과시킨 후 수신 신호를 이용하였으며, 성능 지수로는 잔류 ISI를 이용하였다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 정상 상태까지의 도달 횟수를 나타내는 수렴 속도에서는 이들 방식들이 유사하였다. 그러나 정상 상태에 도달한 후의 잔류 ISI 양에서는 제안된 CM-CMA 방식이 기존 CMA 방식보다 평균값과 분산의 통계치뿐만 아니라 복원 정상도에서도 우월함을 확인하였다. 현재 자기 적응을 위한 여러 가지 알고리즘중에서 연산량이 가장 적은 장점을 갖는 CMA 알고리즘의 성능을 개선하여 OFDM 전송과 같은 고속, 광대역 신호의 찌그러짐을 고속으로 보상하기 위한 알고리즘의 지속적인 연구와 H/W 의 구현에 의한 실용화가 필요하다.

## 참 고 문 헌

[1] Ta-Hsin Li, Kais Mbarek, "A Blind Equalizer for nonstationary Discrete-Valued Signals", IEEE Trans. on Signal Processing, pp.247~254, Vol.45, No.1, Jan. 1997

[2] S. Barbarossa, A.Scaglione, "Blind equalization using cost functions matched to the signal constellation", Proc. 31st Asilomar Conf. Signal

Syst. Comput., Packfic Grove, CA, Nov. 1997

[3] Lin He, G.Amin, C.Reed, C.Malkemes, "A Hybrid Adaptive Blind Equalization Algorithm for QAM Signals in Wireless Communications", IEEE Trans. on Signal Processing, pp.2058~2069, Vol.52, No.7, July 2004

[4] Y.Chen, Tho Le-Ngoc, B.Champagne, C.Xu, "Recursive Least Squares Constant Modulus Algorithms for Blind Adaptive Array", IEEE Trans. on Signal Processing, pp.1452~1456, Vol.52, No.5, May 2004

[5] V.Zaroso, P.Comon, "Optimal Step-Size Constant Modulus Algorithm", IEEE Trans. on Comm., pp.10~13, Vol.56, No.1, Jan. 2008

[6] I.Fijalkow, A.Touzni, J.Treichler, "Fractional-spaced equalization with CMA : Roburstness to channel noise and lack of disparity", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.45, pp.56~66, Jan. 1997

[7] T.E.Biedka, W.H.Tranter, J.H.Reed, "Convergence analysis of the least squares constant modulus algorithm in interference cancellation applications", IEEE Trans. on Signal Processing, Vol.48, pp.491~501, Mar. 2000

[8] 이종현, 임승각, "OFDMA 기반 Wibro 중계국에서 루프 간섭 제거 및 적응 등화기를 이용한 성능 개선에 관한 연구", 제43권, TC편, 제11호, pp.1402~1409, 2006

[9] Lin He, Saleem A.Kassam, "Convergence analysis of bline equalization algorithms using constellation-matching", IEEE Trans. on Comm., Vol.56, No.11, Nov. 2008

[10] S.Haykin, Adaptive Filter Theory, 2nd Edition, Prentice Hall, 1991

[11] A.L.Sayed, Fundamentals of Adaptive Filtering, Wiley-Interscience, 2003

\* 본 연구는 2010년 지식경제부 정보통신산업진흥원 미디어융합 전공과정 지원 사업에의한 수행 결과임

### 저자 소개

#### 임 승 각(정회원)



- 1983년 숭실대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1997년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2003년~현재 공주대학교 정보통신공학부 교수.

<주관심분야 : 통신/방송 시스템, 이동통신>

#### 장 대 수(정회원)



- 1983년 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1985년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1992년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2003년~현재 공주대학교 정보통신공학부 교수

<주관심분야 : 디지털통신, 신호처리, 이동통신>