

<http://dx.doi.org/10.7236/JIWIT.2012.12.2.153>

JIWIT 2012-2-19

블라인드 적응 등화를 위한 CMA와 MMA 알고리즘의 성능 비교

The Performance Comparison of the CMA and MMA Algorithm for Blind Adaptive Equalization

임승각*

Seung-Gag Lim

요약 본 논문에서는 통신 채널에서 발생하는 찌그러짐과 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 사용되는 적응 등화 알고리즘인 CMA 와 MMA 의 성능을 비교하였다. 다른 방식에 비해 비교적 간단한 연산으로 고속 등화가 가능한 알고리즘인 CMA (Constant Modulus Algorithm)와 이의 오차 함수를 변형한 MMA (Multi-Modulus Algorithm)의 성능을 분석하여 점대점 또는 점대다점의 디지털 전송에서 적용 가능성을 확인하였다. CMA 알고리즘은 수신 신호의 진폭만을 보상하며 위상은 보상하지 못하므로 별도의 PLL을 사용하여야 하지만, MMA 알고리즘은 진폭과 위상을 동시에 보상할 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였으며 이의 성능 비교를 위해서 적응 등화에 필수적인 수렴 특성과 잔류 isi양을 사용하였고, 그 결과 수렴 특성에서는 MMA 방식이, 진폭 보상을 나타내는 잔류 isi 양에서는 CMA 방식이 우월함을 알 수 있었다

Abstract This paper deals with the performance comparison of adaptive equalization algorithm, CMA and MMA, that is used for the minimization of the distortion and noise effect in the communication channel at receiver.. We confirmed the application possibilities of the point to point or point to multipoint digital transmission technologies by analyzing the performance of MMA which is changing the error function of CMA that is the possible algorithm of fast equalization by relatively simple arithmetic computation compared to the other method. In CMA algorithm, we need the PLL for the amplitude compensation only and not possible to phase compensation inherently. But in MMA algorithm, we confirmed that the amplitude and phase of received signal can be compensated by computer simulation. For the comparison of algorithm, we used the essential performance index, convergence characteristics and residual isi. The result of performance comparison of algorithms, the MMA has good in convergence characteristic and the CMA has good in residual isi that is used for the amplitude compensation.

Key Words : CMA, MMA, Adaptive Equalization

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부
접수일자 2011년 12월 6일, 수정완료 2012년 3월 2일
게재확정일자 2012년 4월 13일

Received: 6 December 2011 / Revised: 2 March 2012 /
Accepted: 13 April 2012

*Corresponding Author : sglim@kongju.ac.kr
Dept. of Information and Communication, Kongju
National University, Korea

I. 서 론

최근 정보 통신의 활성화에 따라 언제, 어디서, 어떤 정보원을 자유롭게 주고 받을 수 있는 요구가 폭증하고 있다. 이를 위하여 광대역 정보를 신속하게 주고 받기 위한 단말 기술, 신호 처리 및 컴퓨터 기반 기술등이 급격히 발전하고 있지만 상대적으로 전송 매체 기술의 발전은 느린 편이다. 광대역 디지털 전송을 위한 다양한 방법 중에서 ATM 기반의 LAN, 광대역 기반의 FTTC (Fiber To The Curb), 동축 케이블과 UTP (Unshielded Twisted Pair)를 이용한 DSL (Digital Subscriber Loop) 과 무선 이동 채널의 전송 매체등에서는 대역 제한 (Band Limited)과 잡음 및 간섭이라는 장애 요인들이 존재하여 통신 시스템의 throughput을 저하시키고 있으므로 이를 극복할 수 있는 다양한 전송 기술들이 등장하고 있으며, 변복조기에도 대역폭 효율적 (Bandwidth Efficient)인 방식의 채용은 필수적이다. 특히 유선과 무선의 대역 제한 채널과 다중 경로 채널에서는 송수신 필터를 사용하여 전송코저하는 디지털 부호 스펙트럼의 광대역성을 제한하지만 물리적 채널이 갖는 제한된 스펙트럼에서는 인접 부호간 발생하는 부호간 간섭 (ISI : InterSymbol Interference)이 발생되며[6][7], 고속, 광대역 정보 전송시 이의 영향은 더욱 증대된다. 채널 등화는 전송시 채널에서 발생하는 부호간 간섭과 잡음의 영향을 최소화시키기 위하여 사용되며, 미지의 시변 (time varying) 채널에서 등화기의 계수 (coefficient)를 초기화한 후 채널의 역전달 함수를 갖는 계수를 계산하여 수신 신호에서 이의 영향을 경감시키기 위해 적응 등화 알고리즘이 사용된다. 초기의 등화기는 실제 정보의 전송 전에 송수신측이 상호 약속된 학습열 (training sequence)을 이용하여 등화기 계수를 설정하는 overhead 과정이 필요하였으며, 실제 유럽의 GSM 시스템의 경우 전체 전송되는 정보량중 약 25% 정도가 등화를 위한 overhead가 차지한다. 최근에는 학습열 없이도 수신되는 정보에서 복원 정보뿐만 아니라 채널의 특성을 파악하여 등화기의 계수까지 갱신할 수 있는 블라인드 적응 등화기 (Blind Adaptive Equalizer)가 등장하여 기존의 overhead 문제뿐만 아니라 전송 효율과 통신 시스템의 throughput을 증대시켜 서비스 품질 (QoS : Quality of Service)를 만족시킬 수 있다.

기본적인 블라인드 적응 등화기의 알고리즘으로는 수

신 신호의 4차원 상관을 이용하는 tricepstrum 기반의 고차 통계치 (HOS : High Order Statistics) 알고리즘과 CMA (Constant Modulus Algorithm)으로 나눌 수 있다. 전자의 경우 4차원 상관을 얻기 위하여 많은 연산량이 필요하여 고속 전송에서 실시간 응용이 어렵지만 어떠한 통신 채널 환경에서도 수신 신호의 진폭과 위상 보상이 보장되는 global convergence 특성을 갖고 있다. 그러나 후자의 경우 비교적 간단한 연산량으로 실시간 응용이 가능하지만 수신 신호의 진폭만 보상되며 위상의 보상이 불가능한 수렴 특성을 갖는다. 최근에는 CMA의 이와같은 문제를 해결하기 위해 외부에 PLL (Phase Locked Loop)를 사용하거나^[7] MMA (Multi-Modulus Algorithm)가 등장하여 외부의 부가 회로 없이도 진폭과 위상의 보상이 가능토록 하고 있지만 PLL을 부가하는 경우 적응 등화기뿐만 아니라 PLL 회환 루프를 다시 형성하게 되어 전체적인 시스템의 안정성에 문제가 있을 수 있으므로 많은 주의가 필요하게 되므로 여기서는 고려하지 않는다^[3]. 본 논문에서는 이와 같은 CMA 와 MMA 적응 등화 알고리즘을 구현하여 이들의 성능을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 비교하며 이를 위한 지수로는 수렴 속도, 잔류 ISI와 복원 정상도 (constellation)을 사용하였다. 2 장에서는 적응 등화기를 적용한 기저 대역 복소 수신 시스템의 간략한 모델을 나타낸 후 3 장에서는 CMA 와 MMA 알고리즘에 대해 설명한 후 4 장에서는 시뮬레이션의 결과를 제시한 후 5 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. 기저 대역 복소 수신 시스템

그림 1은 적응 등화기를 사용하는 디지털 기저 대역 복소 수신 시스템의 모델을 나타낸 것이다. 송신측에서는 CAP (Carrierless AM/PM) 이나 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)과 같은 복소 형태의 신호 s_k 를 송신하면 임펄스 응답이 h_k 인 대역 제한 채널을 통과하면서 가우시안 잡음 n_k 가 부가되어 수신된다. 수신된 신호 r_k 는 응답이 f_k 인 등화기에 입력되어 진폭과 위상이 보상된 출력 신호 z_k 를 얻게 된다. 이때 등화기의 응답 f_k 는 출력 신호 z_k 와 CMA 또는 MMA 알고리즘을 이

용하여 매 순간 적응적으로 변화시키게 된다. 등화기는 일반적으로 탭의 개수가 유한한 FIR (Finite Impulse Response) 또는 IIR (Infinite Impulse Response) 디지털 필터가 사용되지만 필터의 안정성 (Stability)이 보장되는 FIR 형태를 주로 사용하며 필터의 차수도 10~20차 정도면 충분하다. 여기서 복소 시스템은 위의 모든 신호들이 복소수 형태를 가지고 있음을 의미한다.

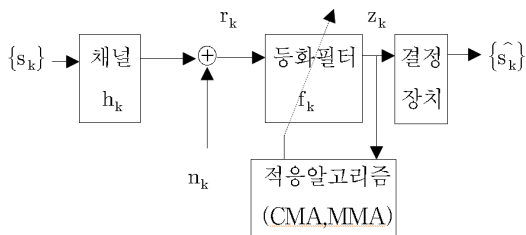


그림 1. 기저 대역 복소 수신 시스템
Fig. 1. Baseband Complex Receive System

2. CMA 와 MMA 알고리즘

그림 1의 복소 시스템에서 송신 신호인 복소 신호 s_k 는 임펄스 응답이 h_k 인 채널을 통과하며 이때 잡음 n_k 가 부가되어 수신되는 신호 r_k 는 다음과 같다.

$$r_k = s_k \circledast h_k + n_k \quad (1)$$

여기서 \circledast 는 convolution을 나타내는 기호이다. 식(1)의 신호는 유한 차수의 임펄스 응답 계수 f_k 를 갖는 등화 필터를 통하여 식(2)와 같은 출력 신호 z_k 를 얻으며 이를 결정 장치 (Decision Device)를 통해 복원된 \hat{s}_k 를 얻는다.

$$z_k = r_k \circledast f_k \quad (2)$$

등화 필터의 출력에서 MSE (Mean Square Error)는 다음과 같이 정의되며 이때 convolution에 의한 지연 시간은 무시하자.

$$MSE = E\{|e_k|^2\} = E\{|z_k - s_k|^2\} \quad (3)$$

적용 등화 알고리즘은 등화 필터 계수 f_k 에 대한 특정한 비용 함수 J 를 최소화시키므로, 이를 SGA (Stochastic Gradient Algorithm)를 적용하여 반복시킨다. 여기서 비용 함수는 각각의 알고리즘에 따라 상이하게 되며 CMA에서는 식(4)와 같이 정의된다.

$$J_{CMA} = E\{|z_k|^2 - R_{CMA}^2\}, R_{CMA}^2 = \frac{E\{|s_k|^4\}}{E\{|s_k|^2\}} \quad (4)$$

R_{CMA}^2 를 Constant Modulus 라고하며 이를 이용하여 계수 f_k 를 갱신 (update)시키기위한 오차 함수는 다음과 같다.

$$\bar{e}_{kCMA} = z_k(|z_k|^2 - R_{CMA}^2) \quad (5)$$

CMA는 신뢰할 수 있는 초기 수렴을 보장하지만 식(5)의 오차 함수는 실수값이므로 위상을 복원하지 못하여 등화기 출력 파형이 임의 위상 회전된 성상도를 가지므로 이를 보상하는 방안이 필요하게 된다. 반면 MMA에서의 비용 함수는 식(4)의 CMA 와 GSA (Generalized Sato Algorithm)의 비용 함수를 조합하여 식(6)과 같이 정의한다.

$$J_{MMA} = E\{(|z_{kr}|^p - R_{MMA}^p)^2 + (|z_{ki}|^p - R_{MMA}^p)^2\} \\ R_{MMA}^p = \frac{E\{|s_{kr}^{2p}\}}{E\{|s_{kr}^p\}} = \frac{E\{|s_{ki}^{2p}\}}{E\{|s_{ki}^p\}} \quad (6)$$

여기서 p 는 정수로서 일반적으로 2의 값을 많이 사용하며 z_{kr}, z_{ki} 는 등화기 출력 z_k 의 실수와 허수, s_{kr}, s_{ki} 는 송신 신호 s_k 의 실수와 허수를 각각 나타내며 R_{MMA}^p 는 p 차 Multi Modulus를 나타낸다. 식(6)의 MMA 비용 함수는 1차원적인 식(4)의 CMA 비용 함수를 2 개 더한 형태로 표시되므로 등화기 출력을 복소 평면에서 표시해보면 4개의 점 ($\pm R_{MMA} \pm jR_{MMA}$) 주위로 분포하게 된다. $p=2$ 인 MMA의 경우 CMA의 식(5)와 같은 오차 함수는 다음과 같다.

$$\bar{e}_{kMMA} = z_{kr}(|z_{kr}|^2 - R_{MMA}^2) + j z_{ki}(|z_{ki}|^2 - R_{MMA}^2) \quad (7)$$

CMA 와 MMA 의 오차 함수인 식(5)와 식(7)을 비교해보면 MMA는 복소수 값이 되어 등화기 출력에서 위상이 보상되어지며 이들을 이용하여 등화 필터의 계수는 다음과 같이 갱신되어진다. 여기서 μ 는 적응 스텝의 크기를 나타낸다.

$$f_{k+1} = f_k - \mu \bar{e}_{kCMA} r_k^* \quad , \text{ CMA} \quad (8) \\ f_{k+1} = f_k - \mu \bar{e}_{kMMA} r_k^* \quad , \text{ MMA}$$

다음의 그림 2는 송신 신호가 16-QAM 인 경우 등화기 출력에서 CMA와 MMA 알고리즘의 zero error contour를 나타낸 것으로서 CMA는 반지름이 R 인 원을

중심으로 임의의 출력 신호점 z_k 를 얻으면 오차 크기만 알 수 있지만 MMA는 반지름이 R 인 4 개의 직사각형 주위로 임의의 출력 신호점 z_k 를 얻으면 x, y 방향 (복소수) 으로 오차 신호의 크기와 위상을 알 수 있게된다. 이들을 이용하여 식(8)과 같이 오차를 줄이도록 등화기의 계수를 update시키도록 CMA와 MMA 알고리즘을 반복 수행된다.

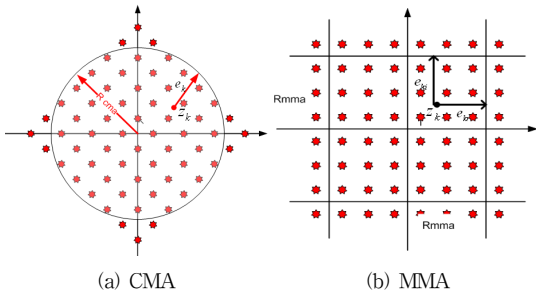


그림 2. 알고리즘의 영-오차 윤곽선
Fig. 2. Zero-error contour of algorithms

III. 컴퓨터 시뮬레이션

2 가지의 블라인드 적응 등화 알고리즘의 성능 분석을 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에서는 동일하게 신호대 잡음비를 30dB, 적응 스텝 크기 μ 는 0.0002와 0.0004로 변화시켰고 적응 필터의 차수는 17 차 FIR로 설정하였으며 송신 복소 신호로는 16-QAM 신호를 발생시킨 후 통신 채널을 통과시켜 수신 신호 r_k 를 얻었다. 이때 추가되는 잡음 n_k 는 신호대 잡음비를 고려하여 신호 전력에 따른 상대적인 진폭을 갖도록 발생시켰다. 그림 3은 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 나타낸 것으로 랜덤하게 송신 신호를 발생시킨 후 동일한 isi를 발생시키는 통신 채널을 통과시켰다. 여기에 잡음이 추가시킨 후 적응 등화 필터의 입력 신호로 사용하였으며, 등화 필터의 계수를 갱신시키기 위하여 식(8)을 적용하였고 통신 채널의 계수 h_k 를 표 1에 나타내었다.

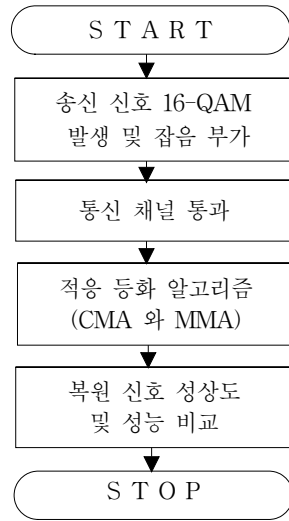


그림 3. 신호 처리 흐름도
Fig. 3. Signal Processing Flowdiagram

표 1. 채널의 임펄스 계수

Table 1. Impulse coefficient of channel

$h(-3)$	$-0.005-j0.004$	$h(-2)$	$0.009+j0.03$
$h(-1)$	$-0.024-j0.104$	$h(0)$	$1.854+j0.52$
$h(1)$	$-0.218+j0.273$	$h(2)$	$0.049-j0.074$
$h(3)$	$-0.016+j0.02$		

그림 4는 송신된 16-QAM 신호와 신호대 잡음비 30dB 인 경우 수신된 신호의 정상도를 나타낸 것이다. 송신 신호의 16개 심볼점들이 채널을 통과한 후 잡음이 부가되어 수신되면 심볼점들 간에 부가한 간섭과 랜덤 잡음이 부가되어 구별이 어려워지며 전체적으로 마름모 모양으로 위상 회전 (phase rotation)과 진폭 찌그러짐이 발생됨을 알 수 있다.

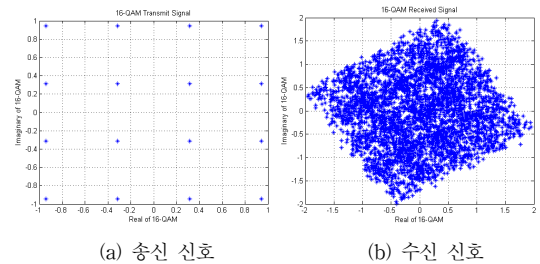


그림 4. 송신 신호와 수신 신호
Fig. 4. Transmit and Received signal

그림 4의 수신 신호를 등화 필터의 입력으로 사용할 때 각 알고리즘의 복원 신호 성장도를 그림 5와 6에 나타 내었으며, 이때 적응 스텝 크기를 0.0002와 0.0004로 변 화시켰다. 2가지의 알고리즘 모두 적응 스텝 크기가 적을 수록 신호점의 크기가 적어지므로 우월한 등화 성능을 가짐을 알 수 있으며, CMA 알고리즘의 경우 위상 복원이 되지 않으며 MMA 알고리즘은 위상이 복원됨을 알 수 있다. 또한 복원된 신호점의 크기는 CMA 가 MMA 보다 적게 되어 진폭에 대한 보상 성능이 더욱 우월함을 알 수 있다.

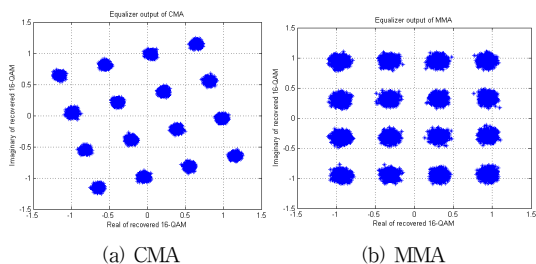


그림 5. 등화기 출력 ($\mu = 0.0002$)
Fig. 5. Equalizer output ($\mu = 0.0002$)

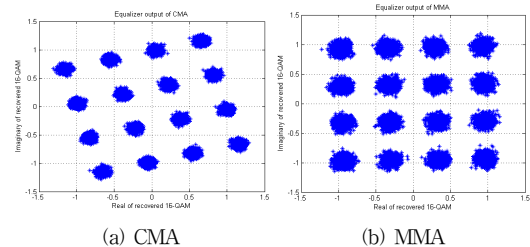
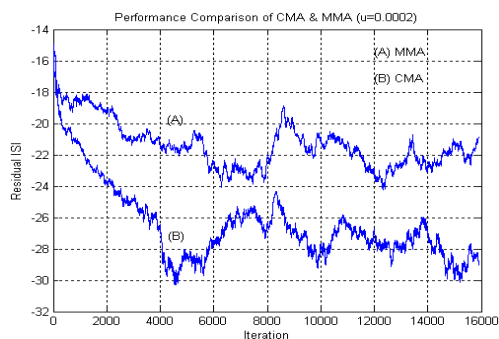


그림 6. 등화기 출력 ($\mu = 0.0004$)
Fig. 6. Equalizer output ($\mu = 0.0004$)

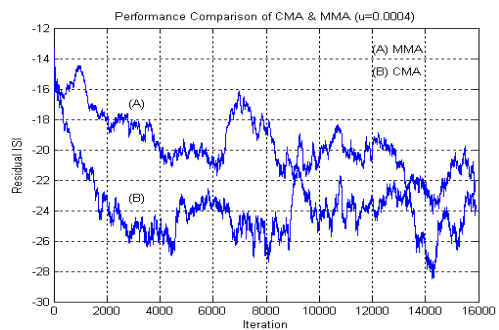
블라인드 적응 등화기의 성능을 나타내는 지수로는 잔류 isi (Residual isi)를 사용하였다. 잔류 ISI는 통신 채널 h_k 와 등화 필터 계수 f_k 가 완전 보상이 될 때 시간 영역에서는 이들의 convolution 결과는 임펄스 신호가 된다. 그러나 완전 보상은 불가능케 되어 임펄스 성분을 제외한 나머지 잔류 성분들의 크기를 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$\text{잔류 isi}_{dB} = 10 * \log_{10} \frac{\sum |h_k \circ f_k|^2 - |h_k \circ f_{k_{\max}}|^2}{|h_k \circ f_{k_{\max}}|^2} \quad (9)$$

그림 7은 적응 스텝 크기를 0.0002, 0.0004일때 이들 2 가지 알고리즘의 잔류 ISI를 iteration 횟수에 대하여 나타 낸 것이다. 적응 스텝의 크기가 적을수록 2 가지 알고리즘 모두 좋은 성능을 보이며 진폭 보상만 수행하는 CMA 가 진폭과 위상을 동시에 보상할 수 있는 MMA 보다 우월함을 알 수 있으며 이의 통계치를 표 2에 나타내 었다. 이는 그림 5와 6의 등화기 출력에서도 신호점의 크 기에서도 확인된 점과도 일치한다. 또한 적응 등화기의 수렴 속도 측면에서도 CMA 가 MMA 보다 iteration 초 기의 기울기가 심하므로 우월함을 알 수 있다.



(a) $\mu = 0.0002$



(b) $\mu = 0.0004$

그림 7. CMA 와 MMA 의 잔류 ISI
Fig. 7. Residual isi of CMA and MMA

표 2. 잔류 isi의 통계치
Table 2. Statistics of residual isi

	$\mu = 0.0002$		$\mu = 0.0004$	
	CMA	MMA	CMA	MMA
평균	0.0032	0.0088	0.0052	0.0121
분산	8.2317e-06	1.2402e-05	1.4129e-05	3.5625e-05

V. 결론

논문에서는 대역 제한과 다중 경로 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭과 백색 잡음의 영향을 보상하기 위한 블라인드 적응 등화 알고리즘인 CMA와 MMA에 대한 성능을 비교하였다. 이를 위하여 16-QAM을 송신 복소 신호로 사용하였으며 성능을 비교하기 위하여 복원 신호 정상도와 잔류 isi를 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 복원 정상도에서는 CMA 알고리즘이 진폭만을 보상하므로 우월하였지만 위상을 보상하기 위한 PLL과 같은 별도의 구성이 필요함을 알 수 있었다. 반면 MMA 알고리즘은 진폭과 위상을 모두 보상할 수 있었지만 진폭 보상은 CMA 보다 떨어짐을 확인하였으며 수렴 속도도 빠름을 확인할 수 있었다. 이는 적응 등화기에서 진폭과 위상의 동시 보상과 잔류 isi를 적게 하면서 빠른 수렴 속도를 동시에 얻을 수 없으므로 이들 간의 적당한 trade-off 가 존재함을 알 수 있었다. 그러나 고속, 광대역의 양방향성, 실시간 트래픽을 전송하기 위해서는 전송 채널의 제약 조건을 극복하기 위하여 본 연구 결과인 이들 trade-off 조건을 완화시키면서 성능을 더욱 개선시킬 수 있는 새로운 알고리즘 개발이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

[1] D.N.Godard, "Self-recovering Equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication system", IEEE Trans. on Comm., Vol. 28, pp.1867~1875, Nov. 1980

[2] 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

[3] X.L.Li, X.D.Zhang, "A Family of Generalized Constant Modulus Algorithms for Blind Equalization", IEEE Trans. on Comm., Vol.54, No.11, pp.1913~1917, Nov. 2006

[4] J.Yang, J.J.Werner, G.A.Dumont, "The Multimodulus Blind Equalization Algorithm", 13th International Conference on D.S.P Proceeding Vol.1,

pp.127~130, 1997

[5] S.A.Sheikh, P.Fan, "A New Multimodulus Blind Equalizer for Dense QAM Constellation", International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia networks, pp.1~4, 2006

[6] A.Labed, A.A.E.Bey, T.Chonavel, A.Belouchrani, "New Hybrid Adaptive Blind Equalization Algorithm for QAM Signal", International Conference on A.S.S.P., pp.2809~2812, 2009

[7] J.T.Yuan, T.C.Lin, "Equalization and Carrier Phase Recovery of CMA and MMA in blind adaptive Receiver", IEEE Trans. on S.P., Vol. 58, No. 6, pp. 3206~3217, June 2010

[8] X.L.Li, W.J.Zeng, "Performance Analysis and Adaptive Newton Algorithms of Multimodulus Blind Equalization Criterion", Signal Processing, Vol. 89, pp.2263~2273, Nov. 2009

[9] S.G.Lim, Y.H.Jeong, "The Performance Improvement of CMA Adaptive Equalization in 16-QAM Singal using the Coordinate Reduction", Journal of I.W.I.T., Vol.11, No.3, pp.107~113, June 2011

[10] S.G.Lim, "The Performance Comparison of CR-CMA and CM-CMA Adaptive Equalization in 16-QAM signal", Journal of I.W.I.T., Vol. 11, No.3, pp.115~121, June 2011

[11] K.H.Oh, "An Algorithm for Variable Step-Size Improving Steay-State Performance of Blind Equalization", Journal of K.I.I.T., Vol.9, No.10, pp.43~48, Oct. 2011

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>