

논문 2011-3-15

Coordinate Reduction을 이용한 16-QAM 신호의 CMA 적응 등화 성능 개선

The Performance Improvement of CMA Adaptive Equalization in 16-QAM Signal using the Coordinate Reduction

임승각*, 정영화**

Seung-Gag Lim, Young-Hwa Jeong

요 약 본 논문은 기존 CMA (Constant Modulus Algorithm) 적응 등화기의 성능인 수렴 특성과 잔류 부호간 간섭을 개선하기 위하여 Coordinate Reduction을 적용한 CR(Coordinate Reduction)-CMA에 대한 관한 것이다. 송신 시스템과 수신 시스템을 연결하는 무선과 유선의 대역 제한 채널에서 발생하는 부호간 간섭에 의한 찌그러짐을 줄이기 위하여 등화기가 사용되며, 이의 대표적인 알고리즘으로는 CMA가 널리 알려져 있다. 이와같은 채널을 통하여 대량의 정보를 고속으로 전송하기 위해서는 등화에 필요한 오버헤드를 최소화할 수 있는 빠른 수렴 속도가 요구된다. 논문에서는 등화기 입력단에서 정상 등화 상태에서 오차를 주이는 수신 신호의 Coordinate를 reduce하는 새로운 비용 함수를 도입하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘이 기존 CMA 보다 빠른 수렴 속도와 적은 잔류 부호간 간섭양을 가짐을 확인할 수 있었다.

Abstract This paper is concerned with the CR-CMA (Coordinate Reduction-Constant Modulus Algorithm) adaptive equalization algorithm using the coordinate reduction in order to improve the convergence characteristic and residual intersymbol interference which are used as the performance index for an adaptive equalizer. The equalizer is used to reduce the distortion caused by the intersymbol interference on the wireless and the wired band-limited channel that connect the transmitting system and receiving system. The CMA is widely known as the representative algorithm for equalization. In order to transmitting the mass information with a high speed through the channels, a fast convergence speed in the equalizer performance that is able to minimize overhead needed for equalization is acquired. In this paper, we introduce the new cost function to reduce the constellation of received signal at the input stage of a equalizer. It reduce the error at the steady equalization state. By the computer simulation, we confirmed that the proposed CR-CMA algorithm has the faster convergence speed and the smaller residual intersymbole interference than the conventional CMA.

Key Words : Adaptive Equalizer, CR-CMA, 잔류 isi

1. 서 론

대용량 정보의 등장과 이의 이용 형태가 다양화된면 서 이들 언제 (Anytime), 어디서나 (Anywhere) 자유롭게 이용하고자하는 사용자들의 요구가 증대되면서 이를 지원하기위한 정보 통신 기술은 끊임없이 변화, 발전되고 있다. 이를 위해서는 관련 단말 기술, 네트워크 기

*정회원, 공주대학교 정보통신공학부

**정회원, 남서울대학교 정보통신공학과 (교신저자)

접수일자 2011.2.21, 수정일자 2011.5.10

게재확정일자 2011.6.10

술, 신호 처리 기술과 전송 기술 등이 발달되고 있지만, 통신 채널에 관련된 기술은 상대적으로 느리게 발전되고 있다. 유선 채널의 경우 기존의 전화선에서 인터넷을 위한 DSL 선로 기술이 등장하였으며, 무선 채널의 경우 공간 상태의 시변 (Time Varying) 특성과 다중 경로 (Multipath)에 의한 페이딩, 건축물과 인공 구조물 등의 장애물과 이동 환경에서 발생하는 Doppler Shift 등이 존재하므로 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술 등이 등장하였다^{[1][9]}. 이들은 공통적으로 디지털 신호를 고속으로 전송할 때 대역 제한(Band Limiting)의 특성을 갖게 되어 부호간 간섭(Intersymbol Interference)으로 인한 비트 오류 또는 심볼 오류, 프레임 오류가 증가되므로, 이를 정정하기 위한 재전송과 오류 제어 기법이 사용되므로 전송 시스템의 Throughput을 저하시키는 직접적인 원인이 되고 있으므로^[2], 이를 경감시키기 위하여 기술적으로 다양한 방법이 사용되고 있다. 수신기에서는 채널의 대역 제한에 의한 신호의 찌그러짐을 보상하기 위해서는 적응 등화기 (Adaptive Equalizer)를 사용하게 된다. 적응 등화기는 주파수 영역 (Frequency Domain)에서 채널 주파수 전달 특성의 역수가 되어 채널과 등화기의 Total 주파수 특성은 통과 대역 내에서 평탄해지거나, 시간 영역(Time Domain)에서는 채널의 임펄스 계수와 등화기의 임펄스 계수에 의한 종합 특성은 임펄스(Impulse)가 되도록 적응적으로 등화기의 계수를 Update시켜 이를 보상할 수 있게 된다^{[3][4]}. 이와 같이 수신기에서 적응 등화기를 사용하여 통신망을 통한 시스템의 서비스 품질 (QoS : Quality of Service)을 개선시켜 네트워크 성능 (Network Performance)을 최대화할 수 있다. 이를 위한 목적으로 사용되는 적응 등화기의 대표적인 알고리즘으로는 CMA (Constant Modulus Algorithm)를 들 수 있다. CMA는 비교적 간단한 연산으로 고속 전송에 사용될 수 있는 실시간 응용에 적합하지만, 적응 스텝 상수의 크기에 매우 민감하여 Global Convergence가 보장되지 않으며 위상이 복원되지 않으므로 별도의 위상 고정 루프 (PLL : Phase Lock Loop)를 필요로 하는 단점이 있다. 최근에는 CMA의 특징을 살리면서 수렴 특성을 보장하기 위해 적응 스텝 상수를 변화시키기 위한 연구와 CMA 알고리즘의 성능을 개선시키기 위한 연구가 동시에 진행되고 있는 실정이다. 본 논문은 이와 같은 CMA 연구 동향의 두 번째에 해당되는 일환으로서 Coordinate Reduction 기법을 이용한 CMA 적응 등

화 알고리즘 (CR-CMA)에 대한 것이다. CR-CMA 알고리즘에서는 기존 CMA의 비용 함수를 개선하여 빠른 수렴 속도 및 잔류 부호간 간섭을 얻을 수 있으므로^[3] 고속 디지털 신호의 전송에 사용될 수 있음을 컴퓨터 시뮬레이션으로 확인하였다. 2장에서는 CR-CMA를 적용한 등화 시스템 구조와 Coordinate Reduction의 개념, 기존 CMA 알고리즘 및 CR-CMA에 대하여 설명한 후 3 장에서는 송신 신호로 16-QAM 신호를 사용하고 신호대 잡음비가 30dB일때 이들 알고리즘에 의한 복원 신호들의 constellation과 잔류 부호간 간섭의 성능을 제시한 후 4 장에서는 결론을 내리겠다.

II. 본 론

1. CR-CMA를 적용한 적응 등화 시스템 모델

그림 1은 CR-CMA를 적용한 적응 등화 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 부가되어 수신측에 수신된다. 미약한 신호를 전체 잡음 지수를 낮추기 위해 LNA (Low Noise Amplifier)를 통과한 후 Coordinate Reduction시킨 후 등화 필터에 입력되어진다. 이 과정에서 PLL의 출력과 곱해져 위상 복원을 시키게 된다. 적응 등화기는 디지털 필터로 구성되며 그 계수는 적응 등화기 출력과 결정 장치 출력과의 차이인 오차 신호를 이용한 적응 등화 알고리즘을 이용하여 등화기 필터 계수를 계산한 후 디지털 필터의 계수로 갱신된다. 이때 새로운 탭 계수를 얻기 위하여 CMA 또는 CM-CMA 알고리즘이 이용될 수 있다.

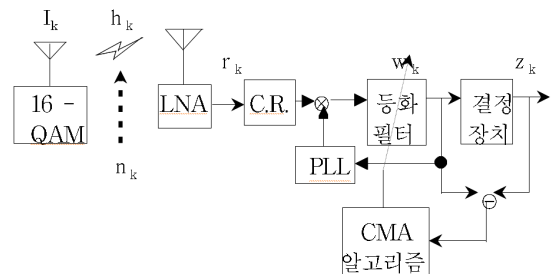


그림 1. CR-CMA를 적용한 기저 대역 등화 시스템 모델
Fig. 1. Baseband equalizing system model using

그림에서 통신 채널을 나타내는 계수 h_k 와 적응 등화기계수 w_k 의 컨볼루션 결과는 시간 영역에서 임펄스가 되거나, 주파수 영역에서 h_k 의 스펙트럼을

$H(f)$, w_k 의 스펙트럼을 $W(f)$ 라고 할 때 이들의 곱인 $H(f)W(f) = 1$ 이 되도록 $W(f)$ 를 얻는 과정을 등화(Equalization) 또는 채널의 역 모델링(Inverse Modeling) 이라고 하며, 이들 관계가 성립될 때 완전 등화가 이루어졌다고 한다. 그림에서 변조와 복조는 이상적으로 가정하였다.

가. Coordinate Reduction 개념

CMA는 등화기의 출력이 반지름이 R 인 원을 중심으로 등화기의 출력이 분포하도록 오차 함수를 조정하게 된다. 이는 QAM 신호의 차수가 증가할수록 오차가 증가하게 되므로 고차의 신호를 저차의 신호로 Coordinate를 Reduce함으로써 오차 함수의 값을 줄일 수 있게 된다. 그림 2 는 원래 QAM 신호의 Constellation과 Reduce된 QAM 신호의 Constellation을 나타낸 것이다. 원래의 신호는 동일한 반지름이 R 인 점선의 원이 4 개로 구분되어 있지만, 이를 축소함으로써 1개의 반지름이 R인 실선의 원으로 축소됨을 알 수 있다. 이와 같이 축소함으로써 채널이 완전히 등화될 때 오차 함수를 기존의 CMA보다 개선되며, 수렴 속도가 빠르게 되어 등화기의 성능을 개선할 수 있게 된다.

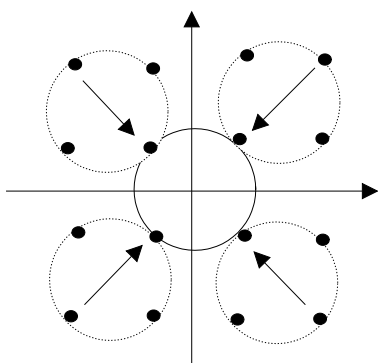


그림 2. 16-QAM의 원 신호와 축소된 신호의 좌표
Fig. 2. Original and Reduced coordinate of 16-QAM constellation

나. CMA 알고리즘

그림 1 의 시스템 모델에서 송신 신호인 16-QAM 신

호를 I_k 라고하고, 대역 제한 채널을 나타내는 h_k 를 통과한 후 수신기의 초단에 수신되는 신호를 r_k 라고 하자.

$$r_k = x_k \odot h_k + n_k \tag{1}$$

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

$$z_k = w_k \odot x_k \tag{2}$$

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

$$e_k = |z_k|^2 - R^2 \tag{3}$$

가 되며 CMA 알고리즘에서는 일정한 상수 R 주위에서 등화기 출력의 Modulus 분산이 다음의 비용 함수를 만족할 때 최소화된다.

$$J_c(w) = E[e_k^2], \quad R = \frac{E[|I_k|^4]}{E[|I_k|^2]} \tag{4}$$

CMA 알고리즘에서 적응 등화기 계수 벡터 w_k 는 다음의 식에 따라 갱신된다.

$$w_{k+1} = w_k - u_c x^* y_k e_k \tag{5}$$

비용 함수를 나타내는 식 (4) 는 등화기 출력의 진폭 Modulus 분산에 대하여 최소가 되도록 계수 벡터를 갱신하게 된다.

다. CR-CMA 알고리즘

Coordinate Reduction은 등화기의 입력단에서 수행되며 원래의 복소수 신호점을 U, 축소된 신호점을 V라면 다음의 식을 적용한다.

$$V = [U_r - 2^* \text{sign}(U_r)] + j [U_i - 2^* \text{sign}(U_i)] \tag{6}$$

여기서 U_r, U_i 는 U 의 실수와 허수부를 나타낸다. 이를 이용하면 식(3)의 오차는 다음과 같다.

$$e'_k = |[y_{rk} - 2 * \text{sign}(y_{rk})] + j[y_{ik} - 2 * \text{sign}(y_{ik})]|^2 - R'^2 \quad (7)$$

R'^2 은 축소된 신호점상에서 정의되는 Constant Radius를 나타내며 다음식과같이 정의된다.

$$R'^2 = \frac{E[|\Pi_{rk} - 2 * \text{sign}(\Pi_{rk}) + j[\Pi_{ik} - 2 * \text{sign}(\Pi_{ik})]|^4]}{E[|\Pi_{rk} - 2 * \text{sign}(\Pi_{rk}) + j[\Pi_{ik} - 2 * \text{sign}(\Pi_{ik})]|^2]} \quad (8)$$

여기서 Π_k 는 그림 1의 16-QAM I_k 를 식(6)을 적용하여 Reduced된 신호점을 나타낸다. 이를 이용하면 식(9)의 비용 함수를 최소화되도록 등화기 계수 w_k 를 갱신한다.

$$J'(w) = E[|e'_k|^2]$$

$$w_{k+1} = w_k - \mu x_k^* e'_k \quad (9)$$

$$[y_k - 2 * \text{sign}(y_{rk}) - j * 2 * \text{sign}(y_{ik})]$$

라. 반송파 위상 복원 알고리즘

CMA 알고리즘은 위상 Error가 존재할 때도 수렴하지만 위상에는 Blind하다는 사실은 잘 알려져 있다. 적응 블라인드 등화를 위한 신호 Constellation에서 위상 Error는 등화기 출력에서 송신 데이터를 복원키 위한 결정 장치에서 성능을 저하시키므로 이를 방지하기 위하여 PLL Loop를 적용한다.

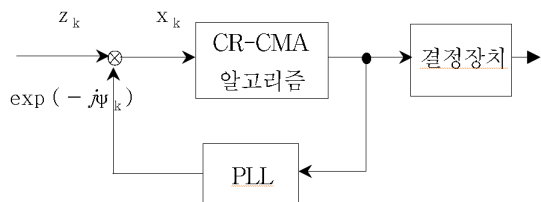


그림 3. 반송파 위상 복원부
Fig. 3. Carrier Phase Recovery Unit

그림 3은 반송파 위상 복원 루프를 적용한 CM-CMA

의 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 ψ_k 는 다음과 같은 갱신식을 적용한다.

$$\psi_{k+1} = \psi_k - \mu \text{Im}[e_k^* z_k] \quad (10)$$

III. 컴퓨터 시뮬레이션 및 결과

기존의 적응 등화 알고리즘인 CMA와 CR-CMA의 성능을 비교하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

SNR은 30dB이며 적응 스텝 크기 $\mu = 0.00025$, 등화기 필터는 7차 FIR을 사용하여 알고리즘의 성능을 비교하였다.

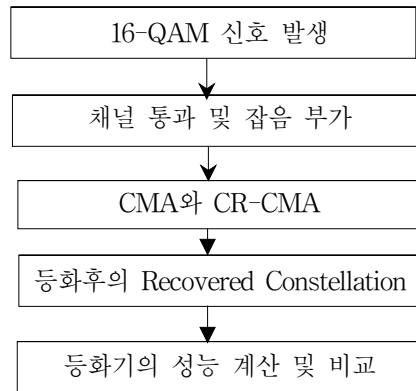


그림 4. 시뮬레이션을 위한 신호 처리도
Fig. 4. Signal processing diagram for simulation

그림 4는 시뮬레이션을 위한 신호 처리 과정을 나타낸 것으로 16-QAM 신호를 발생시킨 후 채널의 계수가 $-0.0005-j0.004, 0.009+j0.03, -0.024-j0.104, 0.854+j0.52, -0.218+j0.273, 0.049-j0.074, -0.016+j0.02$ 인 채널을 통과시켰다. 또한 그림 5는 신호대 잡음비가 30dB일 때 채널을 통과한 후 잡음이 부가될 때의 수신 신호 정상도를 나타낸 것이다. 전체적으로 위상 회전(Phase Rotation)과 진폭 찌그러짐이 발생되었으며 16개의 신호점(Signal Constellation)을 구분할 수 없을 정도임을 알 수 있다.

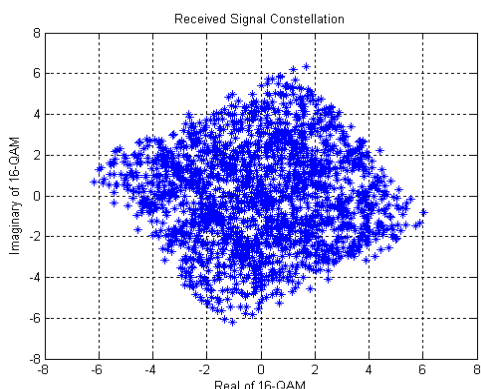


그림 5. 수신 신호 성상도 (SNR = 30dB)
Fig. 5. Received signal constellation (SNR=30dB)

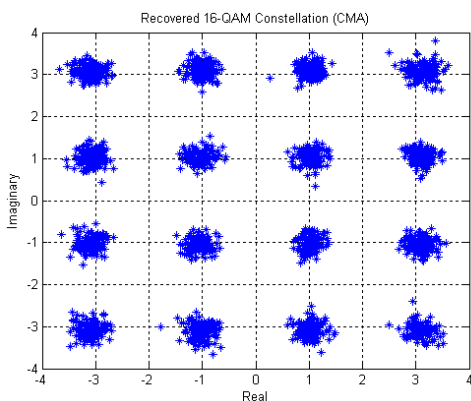


그림 6. CMA에 의한 복원 신호 성상도
Fig. 6. Recovered signal constellation by CMA

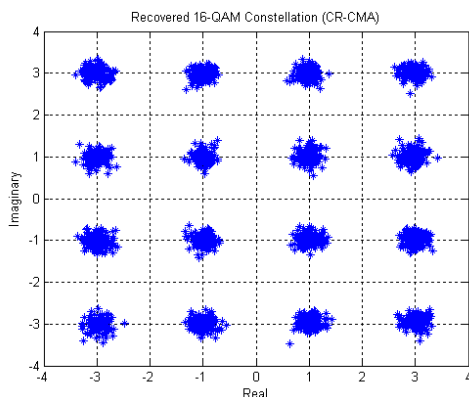


그림 7. CR-CMA에 의한 복원 신호 성상도
Fig. 7. Recovered signal constellation by CR-CMA

그림 5의 수신 신호를 이용하여 CMA와 식(6)을 적용한 CR-CMA 알고리즘을 적용한 결과를 그림 6과 7에 나타내었다. 그림 6은 Coordinate Reduction이 없는 CMA 알고리즘의 복원된 신호 Constellation이고 그림 7은 본 논문에서 제안하는 CR-CMA 알고리즘의 복원된 신호의 Constellation이다. 2가지 방식 모두 위상 고정 루프를 사용하였으며 진폭도 어느 정도 보상이 되어 16개의 신호점을 구분할 수 있음을 알 수 있지만, 적응 스텝 상수가 적을수록 양호함을 알 수 있다.

그림 6과 7의 비교에서 알 수 있듯이 CMA와 CR-CMA 알고리즘에서 적응 스텝 크기 μ 의 값이 동일하였지만 복원 성상도에서 각 신호점의 크기가 적어지는 CR-CMA가 기존 CMA보다 양호해짐을 알 수 있다. 이는 등화기에 의해 우월한 보상이 이루어짐을 의미한다. 이와 같은 성능의 우수성을 나타낼 수 있는 지수로는 잔류 ISI (Residual ISI)가 있다. 잔류 ISI는 통신 채널의 필터 계수 h_k 와 적응 등화기의 계수 w_k 라면 다음과 같이 정의되며 적응 등화기가 채널 찌그러짐을 제거하고 남은 잔류량을 나타낸 것으로 널리 사용되므로 본 논문에서도 이를 사용하여 성능을 평가하는 지수로 사용하였다.

$$\text{잔류 ISI}_{dB} = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum_i |h_k \odot w_k|^2 - |h_k \odot w_{k_{\max}}|^2}{|h_k \odot w_{k_{\max}}|^2} \right] \quad (11)$$

그림 8은 제안된 CR-CMA가 기존 CMA 알고리즘보다 우월한 성능을 보이기 위한 성능 평가 지수인 잔류 ISI I를 반복 횟수 (Iteration)에 대하여 나타낸 것이다. 이를 위하여 6000개의 16-QAM 신호를 발생시키면서 5회의 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기 수렴 속도 측면에서는 정상 상태 (-18dB)에 도달할 때까지는 CR-CMA에서는 948회, CMA에서는 5200회가 필요하게 되므로 매우 빠른 (약 5.4배) 수렴 속도를 가짐을 알 수 있다. 즉 급격한 수렴 특성을 가짐을 알 수 있으며, 또한 정상 상태 후에서 잔류 ISI양이 적어짐을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 Coordinate Reduction 기법을 사용하는 CR-CMA가 기존의 CMA보다 수렴 속도 및 잔류 ISI양이 적게 되어 더욱 완전한 등화를 수행함을 알 수 있다. 표 1은 이와

같은 개선된 능력을 정량적으로 나타내기 위하여 잔류 ISI양의 통계치를 6000회 전체와 정상 상태 도달전 및 후로 나누어 나타낸 것이다. 이에 대해서는 그림 6 과 그림 7의 복원 Constellation에서도 CM-CMA 가 기존 CMA 보다 개선된 결과를 보임과도 일치한다.

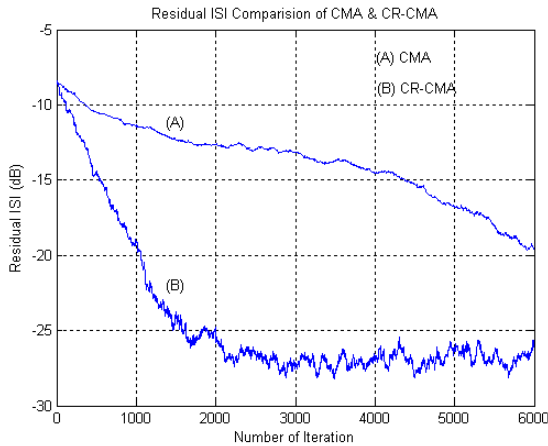


그림 8. CMA 와 CR-CMA 의 잔류 ISI 성능 지수
Fig. 8 Residual ISI performance index of CMA & CR-CMA

표 1. 잔류 ISI 의 통계치
Table 1. Statistics of residual ISI

	전체 RISI		정상 상태 도달 전		정상 상태 도달 후	
	평균	분산	평균	분산	평균	분산
CMA	0.0396	6.01×10^{-4}	0.0548	6.53×10^{-4}	0.0148	7.99×10^{-6}
CR-CMA	0.0101	4.87×10^{-4}	0.0496	0.0012	0.0026	2.87×10^{-6}

IV. 결론

본 논문은 디지털 부호를 전송할 때 통신 채널에서 발생하는 부호간 간섭 영향을 최소화시키기 위하여 사용되는 적응 등화기의 성능 개선에 관한 것으로서 기존 방식인 CMA를 개선한 CR-CMA 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘의 성능 비교를 위하여 16-QAM 신호를 발생한 후 채널을 통과시킨 후 수신 신호를 이용하였고 각 알고리즘은 동일한 채널, 적응 스텝 크기 및 신호대 잡음비를 적용하여 시뮬레이션을 수행하였고, 성능 지수는 잔류 ISI를 이용하였다. 시뮬레이션 결과 기존

CMA 의 비용 함수에 Coordinate Reduction을 적용하는 CR-CMA가 복원 정상도와 잔류 ISI에서 개선된 적응 등화 성능을 확인할 수 있었다. 특히 잔류 ISI에서 정상 상태에 도달하기 위한 Running Iteration을 약5.4배 빠른 수렴 속도를 얻었으며, 복원된 정상도에서 개선되었음을 알 수 있었다. 현재 적응 등화를 위한 여러 가지 알고리즘 중에서 연산량이 가장 적은 특징을 갖는 CMA 알고리즘의 특성을 더욱 개선하여 무선망을 통한 광대역 정보를 전송할 때 발생하는 찌그러짐을 빠른 속도로 보상할 수 있을 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [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] Wen-qun Tang et.al., "Parallel Blind Equalizer Suitable for QAM Signal", 2009 Second Asia-Pacific Conference on Computational Intelligence and Industrial Application, pp.317 ~ 320, 2009 PACIA
- [3] Wei Rao et.al., "A Simple Constant Modulus Algorithm for Blind Equalization Suitable for 16-QAM Signal", pp.1963~1966, ICSP2008 Proceedings, 2008
- [4] 임승각, 강대수, "Constellation Matching 기법을 이용한 CMA 블라인드 적응 등화기의 성능 개선", 한국 인터넷 방송통신학회 논문지, pp.121~127, Vol.10, No.1, Feb. 2010
- [5] 이종현, 임승각, "OFDMA 기반 Wibro 중계국에서 루프 간섭 제거 및 적응 등화기를 이용한 성능 개선에 관한 연구", 제43권, TC편, 제11호, pp.1402~1409, 2006
- [6] 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
- [7] G.Alban, P.Jacques, "New algorithms for blind

equalization : the constant norm algorithm family", IEEE Trans. Signal Processing, vol.55, No.4, pp.1436~1444, 2007

[8] C.R.Johnson, P.Schniter, J.T.Endres, et al., "Blind equalization Using the Constant Modulus Criterion : A Review", Proceedings of the IEEE, 1998, Vol.86, No.10, pp. 1927~1949, 1998

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

[10] T.S.Rappaport, Wireless Communication ; Principle & Practice, Prentice Hall, 2007

저자 소개

임 승 각(정회원)



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

학부 교수.

<주관심분야 : 통신/방송 시스템, 이동통신>

정 영 화(정회원)



- 1984년 경희대학교 전자공학과 학사 졸업.
- 1986년 경희대학교 전자공학과 석사 졸업.
- 1998년 경희대학교 전자공학과 박사 졸업
- 1994년~현재 남서울대학교 정보통신

공학과 교수

<주관심분야 : 적응필터, 스마트 홈/그리드>