

다중 모듈러스 자기복원 등화의 오차 역동성 증강에 따른 수렴 특성 분석

오길남*

¹광주대학교 광통신공학과

Convergence Property Analysis of Multiple Modulus Self-Recovering Equalization According to Error Dynamics Boosting

Kil Nam Oh*

¹Dept. of Optical Communications Engineering, Gwangju University

요약 기존의 다중 모듈러스 기반 자기복원 등화 유형은 등화 초기에 적용되지 못하고 정상상태 성능 개선에 활용되었다. 본 논문에서는 다중 모듈러스를 원하는 응답으로 하는 유형의 자기복원 등화에서, 오차를 증강하여 오차의 역동성을 확장함으로써 초기 수렴 성능을 개선하고, 그 특성을 분석하였다. 제안 방법에서 오차 증강은 등화기 출력에 대한 심볼 관정에 비례하여 이루어진다. 아울러 제안 방법은 오차 역동성의 확장으로 인한 초기 수렴 기능을 갖기 때문에, 초기 수렴속도와 정상상태 오차 레벨에서 우수한 성능을 보인다. 특히 제안 방법은 등화의 전 과정을 하나의 알고리즘으로 진행하므로 기존의 다른 동작 모드로의 전환이나 선택 방법, 또는 다른 알고리즘과의 동시 동작 등이 불필요하다. 다중경로 전파와 부가 잡음이 있는 채널 조건하에서 이루어진 고차 신호점에 대한 자기복원 등화의 성능 분석 시뮬레이션을 통해 제안 방법의 유용성을 검증하였다.

Abstract The existing multiple modulus-based self-recovering equalization type has not been applied to initial equalization. Instead, it was used for steady-state performance improvement. In this paper, for the self-recovering equalization type that considers the multiple modulus as a desired response, the initial convergence performance was improved by extending the dynamics of the errors using error boosting and their characteristics were analyzed. Error boosting in the proposed method was carried out in proportion to a symbol decision for the equalizer output. Furthermore, having the initial convergence capability by extending the dynamics of errors, it showed excellent performance in the initial convergence rate and steady-state error level. In particular, the proposed method can be applied to the entire process of equalization through a single algorithm; the existing methods of switching over or the selection of other operation modes, such as concurrent operating with other algorithms, are not necessary. The usefulness of the proposed method was verified by simulations performed under the channel conditions with multipath propagation and additional noise, and for performance analysis of self-recovering equalization for high-order signal constellations.

Keywords : Bussgang equalization, Nonlinear estimator, Desired response, Error boosting

1. 서론

자기복원 등화기는 탭 계수를 조절할 수 있는 적응 필

터와 학습 시퀀스를 대체할 원하는 응답(desired response)을 발생시키기 위한 비선형성(nonlinearity)이 연결된 구조를 갖는데, 이런 구조의 등화를 Bussgang 등화라 한다

이 연구는 2015년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author: Kil Nam Oh (Gwangju University)

Tel: +82-62-670-2345 email: knoh@gwangju.ac.kr

Received September 22, 2015

Revised October 13, 2015

Accepted January 5, 2016

Published January 31, 2016

[1]. Bussgang 등화는 비선형성을 사용하여 원하는 응답을 얻고, 이를 오차 발생에 적용하여 얻어진 오차를 등화기 탭 계수 갱신에 사용한다[1].

Bussgang 유형의 등화에서, 원하는 응답을 어떻게 얻느냐에 따라 알고리즘을 구분할 수 있다. 대표적으로 축소 정상도 알고리즘(reduced constellation algorithm: RCA)이나[2,3,4] 일정 모듈러스 알고리즘(constant modulus algorithm: CMA)[5,6,7] 등은 정상도로부터 산출한 고차 통계량(higher-order statistics)을 원하는 응답으로 한다. 그러나 다중 모듈러스 반경의거(multimodulus radius-directed: MRD)[8], 반경의거 등화(radius-directed equalization: RDE)[9], 그리고 판정의거(decision-directed: DD)[1] 등은 정상도 상에서 등화기 출력의 위치에 따른 심볼 판정이나 이를 기반으로 한 반경을 원하는 응답으로 한다.

RCA나 CMA와 같이 하나의 고차 통계량을 원하는 응답으로 하는 알고리즘[2-7]에서는 등화기 출력을 하나의 원하는 응답과 비교함으로써 비용 함수 또는 오차가 등화기 출력의 크기에 따라 넓은 범위의 값을 갖는다. 이 유형의 알고리즘은 등화 초기에 사용되어 수렴을 달성하는 특성을 보인다. 그러나 송신 심볼과 일치하지 않는 축소 정상도 또는 일정 모듈러스 등을 원하는 응답으로 삼는 결과 등화기가 완전히 수렴하여도 정상상태 MSE(mean square error)가 클 수밖에 없다.

다수의 심볼 판정이나 모듈러스, 또는 반경 등을 원하는 응답으로 사용하는 MRD, RDE 등[8,9]에서는 등화기 출력이 위치하는 구간에 따라 원하는 응답이 다르게 적용되어, 비용 함수가 일정한 범위의 값을 가지도록 설계되어 있어 비용 함수의 역동성이 작다. 이 유형의 알고리즘은 공통적으로 정상상태에서는 우수한 MSE 성능을 보이나, 초기 수렴에는 실패한다. 따라서 등화 초기에 적용되지 못하고 주로 정상상태 성능 개선에 응용된다.

원하는 응답의 유형에 따라 비용함수 또는 오차의 역동성이 변화하며, 이에 따라 알고리즘의 수렴 특성이 달라진다. 본 논문에서는 다중 모듈러스 유형 알고리즘의 초기 수렴 능력과 빠른 수렴을 위해 오차 역동성을 개선하고자 오차 증강(error boosting) 방법을 제안한다. 눈모형이 닫힌 등화 초기에 오차 또는 비용함수를 증강하여 적용 시, 눈모형을 여는 능력을 가질 수 있음을 보이고, 그 수렴 특성을 시뮬레이션을 통해 분석한다. 다음 장에서, 원하는 응답과 오차 역동성의 관계, 오차 역동성 증

강 방법, 모의실험 분석 결과, 그리고 결론 순으로 기술한다.

2. 원하는 응답의 유형과 오차 역동성

통신 채널을 트랜스버설 필터로 모델링하면 채널 임펄스 응답을 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$H = [h_0, h_1, \dots, h_{L-1}]^T \quad (1)$$

여기서 L 은 채널 임펄스 응답의 길이, $(\bullet)^T$ 는 벡터의 전치를 나타낸다. 송신 심볼 x_n 과 채널을 통과한 수신 심볼 r_n , 그리고 부가 잡음 η_n 을 고려하면, 채널 입출력 관계는 아래와 같다.

$$r_n = \sum_{i=0}^{L-1} h_i x_{n-i} + \eta_n \quad (2)$$

수신 심볼은 조절 가능한 N 개의 탭을 가지는 등화기 $F_n = [f_{0,n}, f_{1,n}, \dots, f_{N-1,n}]^T$ 에 입력되고, 등화기 출력 z_n 은 다음으로 주어진다.

$$z_n = \sum_{i=0}^{N-1} f_{i,n} r_{n-i} \quad (3)$$

iteration n 에서 등화기는 다음의 갱신식에 의해 조절된다.

$$F_{n+1} = F_n - \mu e_n R_n^* \quad (4)$$

여기서 $R_n = [r_n, r_{n-1}, \dots, r_{n-N+1}]^T$ 는 수신 심볼 벡터, μ 는 스텝 사이즈, $(\bullet)^*$ 는 벡터의 complex conjugate을 나타낸다. e_n 은 오차이며, 오차 발생은 등화기 출력과 원하는 응답과의 차이로 되므로 원하는 응답의 유형에 따라 다양한 오차 발생과 알고리즘으로 귀결된다.

하나의 단일 모듈러스를 원하는 응답으로 하는 대표적인 알고리즘인 CMA는 M-PSK 신호에 대한 등화에서

등화기 출력이 일정 진폭과 같아지도록 하기 위해 원하는 응답을 일정 모듈러스(constant modulus: CM) $R_2 = E|a_n|^4 / E|a_n|^2$ 로 정의하고, 이를 사용하여 비용 함수 J_n^{CM} 과 오차 e_n^{CM} 을 각각 다음과 같이 설정한다. 식에서 E 는 기댓값을 나타낸다.

$$J_n^{\text{CM}} = E(|z_n|^2 - R_2)^2 \quad (5)$$

$$e_n^{\text{CM}} = z_n(|z_n|^2 - R_2) \quad (6)$$

여기서 일정 모듈러스 R_2 는 고차 통계량으로부터 얻어진 하나의 원하는 응답이다.

CMA가 등화 문제를 복소수 평면 상에서 다룬 반면, 이를 실수와 허수를 분리하여 처리한 MCMA[10] 또는 Yang의 MMA[11]에서는 실수 및 허수 성분 각각에 대해 원하는 응답을 다음과 같이 정의한다. 즉 $R_{2,R} = E a_{n,R}^4 / E a_{n,R}^2$, $R_{2,I} = E a_{n,I}^4 / E a_{n,I}^2$ 이다. 여기서 $R_{2,R}$, $R_{2,I}$, $a_{n,R}$ 및 $a_{n,I}$ 는 각각 단일 모듈러스(single modulus: SM)와 송신 심볼의 실수 및 허수 성분을 나타낸다. 그러면 비용함수와 오차를 각각 다음과 같이 설정한다.

$$J_n^{\text{SM}} = E(z_{n,R}^2 - R_{2,R})^2 + E(z_{n,I}^2 - R_{2,I})^2 \quad (7)$$

$$e_n^{\text{SM}} = z_{n,R}(z_{n,R}^2 - R_{2,R}) + jz_{n,I}(z_{n,I}^2 - R_{2,I}) \quad (8)$$

이 유형은 복소수 심볼을 두 실수 심볼로 간주, 각각 처리하는 결과 등화와 동시에 위상 회전을 복원하는 이점을 갖는다.

이상 심볼 성장도로부터 얻어진 고차 통계량을 원하는 응답으로 사용하는 유형을 기술하였으며, 이들의 특징은 하나의 원하는 응답, 즉 일정 모듈러스 또는 단일 모듈러스를 사용함으로써 비용함수 또는 오차의 역동성이 크다는 점이다. 그 결과 등화기 출력의 상대적 크기에 따른 등화기 갱신이 이루어져 수렴 특성을 개선하며, 특히 초기 수렴에 탁월한 성능을 보인다.

한편, 다수의 반경(multiple radius: MR)을 사용하는 RDE는 CMA에서와 같이 등화 문제를 복소수 평면 상에서 다루되, 일정 모듈러스 대신 다수의 반경 λ_i 을 원하는 응답으로 사용한다. 즉 $\lambda_i (i=1, \dots, k)$ 는 QAM 성장도 상 원점에서 심볼까지의 거리, 즉 반경이다. 그러면 비용함수와 오차는 각각 다음으로 주어진다.

$$J_n^{\text{MR}} = E(|z_n|^2 - \lambda_i^2)^2 \quad (9)$$

$$e_n^{\text{MR}} = z_n(|z_n|^2 - \lambda_i^2) \quad (10)$$

또한 다중 모듈러스(multiple modulus: MM)를 사용하는 MMA(multilevel modulus algorithm)[12] 및 MRD 등은 실수 성분과 허수 성분을 분리하여 각각에 대해 다수의 모듈러스를 원하는 응답으로 사용한다. 즉 $\gamma_{i,R} = \text{dec}(z_{n,R})^2$, $\gamma_{i,I} = \text{dec}(z_{n,I})^2$ 이며, 여기서 $\text{dec}(\cdot)$ 는 심볼 판정을 나타낸다. 비용함수와 오차는 각각 다음과 같다.

$$J_n^{\text{MM}} = E(z_{n,R}^2 - \gamma_{i,R}^2)^2 + E(z_{n,I}^2 - \gamma_{i,I}^2)^2 \quad (11)$$

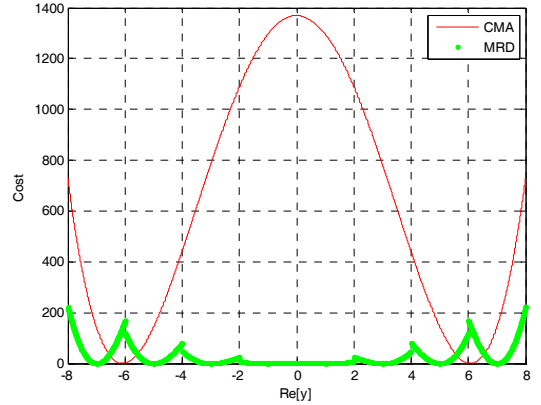


Fig. 1. Cost function comparison of CMA and MRD for 64-QAM.

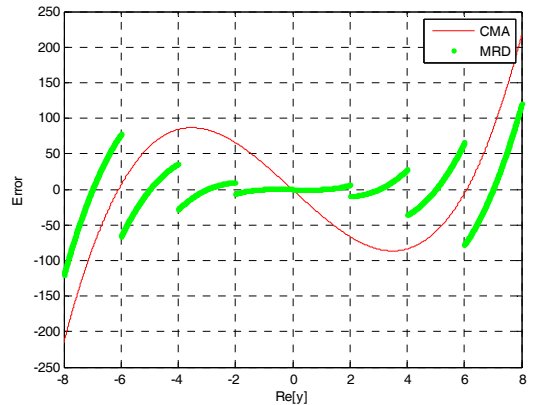


Fig. 2. Error comparison of CMA and MRD for 64-QAM.

$$e_{n,R}^{MM} = z_{n,R}(z_{n,R}^2 - \gamma_{i,R}^2) + jz_{n,I}(z_{n,I}^2 - \gamma_{i,I}^2) \quad (12)$$

그런데 다수의 반경 또는 다중 모듈러스는 결국 등화기 출력에 대한 최인접 심볼 판정으로 주어지고, 오차는 등화기 출력과 심볼 판정과의 차이로 주어지므로 오차를 일정한 범위로 제한하게 되어 비용함수 또는 오차 역동성이 작게 된다. 그에 따라 등화기 탭 계수의 갱신이 충분히 이루어지지 못하며, 이는 수렴 특성의 저하를 초래한다. 참고로, CMA에서는 오차 산출에 하나의 원하는 응답, 즉 일정 모듈러스를 사용하기 때문에 이런 문제를 갖지 않는다.

그림 1과 2에 원하는 응답에 따른 비용 함수와 오차의 역동성을 통계량 기반의 CMA와 다중 모듈러스 기반의 MRD에 대해 64-QAM에 대해 각각 비교하였다. 두 그림에서 MRD는 CMA에 비해 비용함수와 오차의 역동이 제한적임이 나타나 있다. 탭 계수 갱신식 (4)에서 알 수 있는 바와 같이 오차의 역동성에 의해 탭 계수 갱신의 정도가 달라지며, 이는 등화기의 초기 수렴 능력과 정상상태 성능 및 수렴 속도에 영향을 준다.

3. 오차 역동성 증강

등화기 출력의 크기 또는 정상도 상의 위치가 다르다면 오차의 크기와 역동성은 달라야 한다. 그러나 다수의 원하는 응답 하에서는 두 출력의 크기가 다를지라도 정상도 상의 위치에 따라 두 오차의 크기가 같아질 수 있으며, 따라서 오차의 역동 범위가 같을 수밖에 없다. 이는 오차에 등화기 출력의 크기가 반영되지 않은 결과로서, 이를 개선할 필요가 있다.

본 논문에서는 다중 모듈러스 또는 다수의 원하는 응답을 사용하는 알고리즘의 오차 역동성을 확장하기 위해 오차에 심볼 판정을 증강하는 방법을 고안하였다. 제안하는 오차 증강의 두 형태는 다음과 같다. (i) 심볼 판정의 절대값 증강과 (ii) 제곱값 증강 형태이다. BPSK와 QPSK에서는 증강된 오차가 원래의 오차와 완전히 동일해진다.

먼저 RDE에서 분석에 사용한 두 형태의 증강된 오차는 다음과 같다.

$$e_{n,R}^{MR} = e_{n,R} \text{dec}|z_{n,R}| + je_{n,I} \text{dec}|z_{n,I}| \quad (13)$$

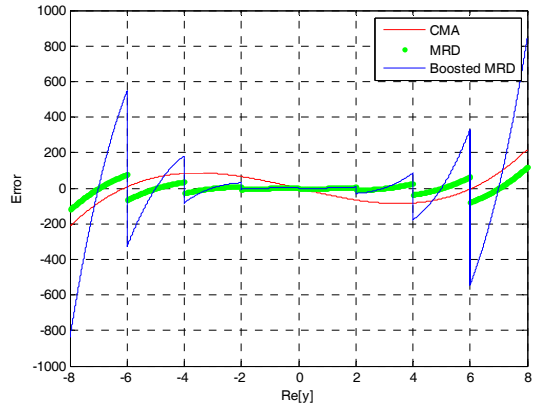


Fig. 3. Error comparison of CMA, MRD and boosted MRD for 64-QAM.

$$e_{n,R}^{MR} = e_{n,R} \text{dec}|z_{n,R}|^2 + je_{n,I} \text{dec}|z_{n,I}|^2 \quad (14)$$

다음 MRD에서 분석에 사용한 두 형태의 증강된 오차는 다음과 같다.

$$e_{n,R}^{MM} = e_{n,R} \text{dec}|z_{n,R}| + je_{n,I} \text{dec}|z_{n,I}| \quad (15)$$

$$e_{n,R}^{MM} = e_{n,R} \text{dec}|z_{n,R}|^2 + je_{n,I} \text{dec}|z_{n,I}|^2 \quad (16)$$

두 오차 형태 중 절대값 증강에 대해 오차의 증강 전과 후의 동작을 그림 3에 보였다. MRD 오차는 증강된 결과 CMA 오차보다 더 큰 역동성을 갖게 되었다. 역동성이 확장된 오차를 등화기 탭 계수 갱신에 적용함으로써 초기 수렴에 효과가 있음을 모의실험에서 확인하였다. 수신 심볼의 위치에 따라 원하는 응답을 달리해서 오차를 계산할 때, 원하는 응답의 크기를 고려하지 않은 오차 계산은 탭 갱신을 충분히 하지 못한다. 그러므로 이를 고려한 증강이 유효하다.

4. 오차 증강 분석

오차 증강의 효과를 분석하기 위해, 다중 모듈러스 유형 알고리즘 중 MRD에 대해 오차 증강을 적용하여 실험하였다. 부가 잡음이 있는 다중경로 채널 하에서 초기 수렴 여부와 수렴 속도 및 정상상태에서 잔류 심볼간 간섭(residual intersymbol interference: RISI)[13]을 조사하였다.

16/64/256-QAM에 대해 CMA, MRD 및 오차 증강된 MRD의 성능을 비교하였다. 실험에 사용한 다중경로 채널로는 대표적인 비최소 위상 시스템(non-minimum phase system)인 진화선 채널[14]을 사용하였으며, 이를 탭 지연 라인 모델을 사용하여 구현하였다. 채널의 임펄스 응답은 아래와 같으며, 이 채널의 주파수 응답은 대역 내에서 완전한 감쇄를 보인다.

$$h(z) = (-0.005 - j0.004) + (0.009 + j0.030)z^{-1} - (-0.024 - j0.104)z^{-2} + (0.854 + j0.520)z^{-3} + (-0.218 + j0.273)z^{-4} - (0.049 - j0.074)z^{-5} + (-0.016 + j0.020)z^{-6}$$

실험 결과는 200회의 Monte Carlo 시행에서 얻어진 결과를 평균하여 그림 4-6에 나타내었다. 먼저, 그림 4에 16-QAM, SNR 10dB 조건에서 얻은 결과를 보였다. 실험에 사용된 모든 알고리즘이 유사한 iterations에서 완전히 수렴하였다. CMA는 정상상태에서 비교적 큰 RISI에 도달한 반면, MRD는 정상상태에서 CMA를 다소 개선한 RISI에 도달하였다. 오차 증강된 MRD는 두 형태 모두 CMA에 비해 5dB 정도 개선된 RISI에 도달하였다. 제안한 오차 증강 MRD는 두 형태가 거의 동일한 성능을 보였다.

그림 5에 64-QAM, SNR 15dB 조건에서 얻은 결과를 나타내었다. MRD를 제외한 모든 알고리즘이 유사한 iterations에서 정상상태에 수렴하였다. MRD는 다수의 모듈러스를 원하는 응답으로 사용하는 까닭에 등화 개시에서 완전히 닫힌 눈모형을 여는 속도가 매우 더딘데, 수렴상수 작게 시작해야 알고리즘의 발산을 피할 수 있었다. 그러나 서서히 진행해서 눈모형이 열리기 시작하면 빠르게 RISI를 개선하였으며, 정상상태 성능은 만족스럽다. CMA에 비해 5dB 정도 낮은 RISI에 수렴하였다. CMA는 빠른 수렴을 보이나 큰 RISI에 수렴하였다. 증강된 MRD는 두 형태 모두 빠른 수렴과 함께 CMA에 비해 6~7dB 정도 낮은 RISI에 수렴하였다. MRD에 비해서는 오차 증강에 의한 정상상태 이득은 크지 않으나 초기 수렴 속도의 개선 효과가 두드러지게 나타났다.

그림 6에 256-QAM, SNR 25dB 조건에서 얻은 결과를 제시하였다. MRD는 초기 RISI를 거의 개선하지 못하였다. 즉 256-QAM에서는 정상도의 조밀한 심볼로 인하여 판정 오류가 커짐에 따라 등화기의 오수렴이 빈번하여 눈모형을 열지 못하였다. CMA는 빠른 수렴을 보

이나 큰 RISI에 도달하였다. 증강된 MRD는 두 형태 모두 빠른 수렴과 동시에 CMA에 비해 10dB 정도 낮은 RISI를 달성하였다.

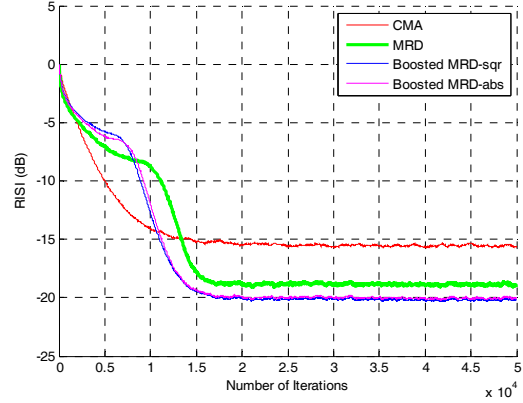


Fig. 4. RISI performance: 16-QAM, SNR 10dB.

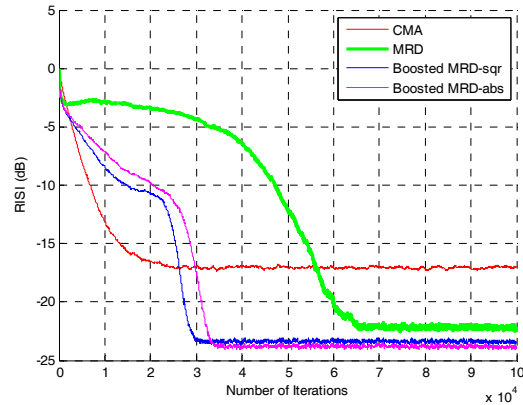


Fig. 5. RISI performance: 64-QAM, SNR 15dB.

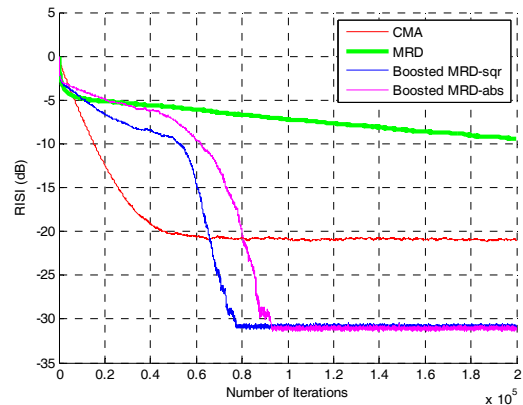


Fig. 6. RISI performance: 256-QAM, SNR 25dB.

이상의 실험 결과로부터 MRD는 초기 수렴이 매우 더디거나 안 되었고, 고차로 갈수록 성능이 저하하는 것으로 나타났다. 반면 증강된 MRD는 빠른 수렴과 동시에 낮은 RISI를 달성하였으며, 고차로 갈수록 개선이 커지는 것으로 나타났다. 오차를 증강함으로써 오차의 범위를 확장하는 것이 알고리즘의 초기 수렴과 정상상태 성능을 개선함을 확인하였다.

5. 결론

원하는 응답의 유형에 따른 비용함수 또는 오차의 역동성에 의해 수렴 특성이 결정됨을 실험을 통해 분석하고, 기존 방법, 특히 다중 모듈러스를 원하는 응답으로 하는 유형에서 오차의 역동성을 증강함으로써 초기 수렴과 정상상태 오차 성능을 동시에 개선할 수 있음을 검증하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션에 의해 오차의 역동성 증강과 성능간의 관계를 분석하였으나, 향후 수학적 해석을 통해 분석하는 것이 필요하다.

References

- [1] M. Pinchas, The whole story behind blind adaptive equalizers/blind deconvolution, Bentham Science Publishers, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2174/97816080535201120101>
- [2] Y. Sato, "A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation systems," IEEE Trans. Commun., vol. 23, no. 6, pp. 679 - 682, Jun. 1975.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCOM.1975.1092854>
- [3] S. Abrar, "A family of reduced-constellation algorithms for blind equalization of square-QAM Signals," ICM 2005, pp. 296 - 300, Dec. 2005.
- [4] A. Benveniste and M. Goursat, "Blind equalizers," IEEE Trans. Commun., vol. 32, no. 8, pp. 871 - 883, Aug. 1984.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCOM.1984.1096163>
- [5] D.N. Godard, "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems," IEEE Trans. Commun., vol. 28, no. 11, pp. 1867 - 1875, Nov. 1980.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCOM.1980.1094608>
- [6] J.R. Treichler and B.G. Agee, "A new approach to multipath correction of constant modulus signals," IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. 31, no. 2, pp. 459 - 472, Apr. 1983.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TASSP.1983.1164062>
- [7] D. Ashmawy, K. Banovic, E. Abdel-Raheem, M. Youssif, H. Mansour, and M. Mohanna, "Joint MCMA and DD blind equalization algorithm with variable-step size," Proc. IEEE Int. Conf. Electro/Information Technology, pp. 174 - 177, Jun. 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/eit.2009.5189605>
- [8] J.M. Filho, M.T.M. Silva, and M.D. Miranda, "A family of algorithms for blind equalization of QAM signals," Proc. IEEE ICASSP, pp. 3388 - 3391, May 2011.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/icassp.2011.5947112>
- [9] M. J. Ready and R. P. Gooch, "Blind equalization based on radius directed adaptation," Proc. IEEE ICASSP, pp. 1699-1702, Apr. 1990.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/icassp.1990.115806>
- [10] C.A.R. Fernandes, G. Favier, and J.C.M. Mota, "Decision directed adaptive blind equalization based on the constant modulus algorithm," Signal, Image and Video Processing, vol. 1, no. 4, pp. 333 - 346, Oct. 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11760-007-0027-2>
- [11] J. Yang, J.-J. Werner, and G. A. Dumont, "The multimodulus blind equalization and its generalized algorithms," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 20, no. 6, pp. 997 - 1015, Jun. 2002.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSAC.2002.1007381>
- [12] A.W. Azim, S. Abrar, A. Zerguine, and A.K. Nandi, "Steady-state performance of multimodulus blind equalizers," Signal Processing, vol. 108, pp. 509 - 520, Mar. 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sigpro.2014.10.020>
- [13] S. Chen, T.B. Cook, and L.C. Anderson, "A comparative study of two blind FIR equalizers," Digital Signal Processing, vol. 14, no. 1, pp. 18-36, Jan. 2004.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsp.2003.04.001>
- [14] E. Biglieri, J. Proakis, and S. Shamai, "Fading channels: information-theoretic and communications aspects," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 44, no. 6, pp. 2619 - 2692, Oct. 1998.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/18.720551>

오길남(Kil Nam Oh)

[정회원]



- 1984년 3월 ~ 2000년 2월 : 한국 전자통신연구원 책임연구원, 팀장
- 2000년 3월 ~ 현재 : 광주대학교 광통신공학과 교수

<관심분야>

블라인드등화, 통신신호처리, OFDM