

오차 제곱 가중치기반 탭 계수 갱신을 적용한 동시 등화기

정회원 오길남*

Concurrent Equalizer with Squared Error Weight-Based Tap Coefficients Update

Kil Nam Oh* *Regular Member*

요약

동시 등화는 통신 채널을 블라인드 등화 시 수렴 특성 개선에 유용하다. 그러나 동시 등화는 등화기가 정상상태에 수렴한 후에도 동시 적응을 계속함으로써 성능 개선이 제한적이다. 본 논문에서는 동시 등화의 수렴 특성과 함께 정상상태 성능을 개선하기 위해, 가변 수렴상수와 가중치기반의 탭 계수 갱신을 적용하는 새로운 동시 등화 기법을 제안한다. 제안하는 동시 vsCMA+DD 등화는 가변 수렴상수 CMA(variable step-size CMA: vsCMA)와 판정의거(decision-directed: DD) 알고리즘의 오차 신호를 사용하여 가중치를 산출하고, 이를 이용하여 두 등화기를 각각 가중 갱신한다. 제안 방법은 vsCMA에 의해 CMA의 오차 성능을 개선하고, 가중치기반의 탭 계수 갱신에 의해 수렴 속도와 정상상태 성능을 개선하였다. 모의실험을 통해 제안 방식의 성능 개선을 검증하였다.

Key Words : Concurrent Equalizer, Blind Equalization, CMA, Step-Size Parameter, vsCMA

ABSTRACT

For blind equalization of communication channels, concurrent equalization is useful to improve convergence characteristics. However, the concurrent equalization will result in limited performance enhancement by continuing concurrent adaptation with two algorithms after the equalizer converges to steady-state. In this paper, to improve the convergence characteristics and steady-state performance of the concurrent equalization, proposed is a new concurrent equalization technique with variable step-size parameter and weight-based tap coefficients update. The proposed concurrent vsCMA+DD equalization calculates weight factors using error signals of the variable step-size CMA (vsCMA) and DD (decision-directed) algorithm, and then updates the two equalizers based on the weights respectively. The proposed method, first, improves the error performance of the CMA by the vsCMA, and enhances the steady-state performance as well as the convergence speed further by the weight-based tap coefficients update. The performance improvement by the proposed scheme is verified through simulations.

1. 서론

통신 시스템에서는 다중경로 채널에 의한 심벌간 간섭(intersymbol interference: ISI) 영향을 피할 수

없다. ISI의 주원인은 채널의 퍼짐 현상이며, 높은 대역폭 효율을 갖는 QAM 신호를 사용하는 고속 통신에서 그 영향이 심해진다. ISI에 대처하기 위해 수신기에서 등화가 사용되며, CMA(constant modulus

※ 이 연구는 2010년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

* 광주대학교 광통신공학과(knoh@gwangju.ac.kr)

논문번호 : KICS2010-11-549, 접수일자 : 2010년 11월 22일, 최종논문접수일자 : 2011년 3월 21일

algorithm)가 계산 단순성으로 인하여 널리 사용되고 있다.

CMA는 QAM 시스템에 대한 등화 시, 원래 심벌점 대신 일정 modulus를 기준 신호로 사용하여 오차 신호를 추정함으로써 수렴 후의 평균 제곱 오차(mean square error: MSE)가 충분히 작아지지 않는다^[1]. 이를 개선하기 위해 수렴 후 판정의거(decision-directed: DD) 적응 모드로 전환하여 정상상태 MSE를 최소화하는 방법이 흔히 사용된다^[2]. 그러나 이 방식의 문제는 DD 적응 모드로의 전환이 적절한 시점에 이루어져야 하는 점이다^[3]. CMA-DD 전환 방식이 갖는 문제점을 해결하는 한 방법으로 동시 등화(concurrent equalization)가 제안되었다.

동시 등화^{[3],[5]}는 연판정(soft decision)과 경판정(hard decision)을 동시에 수행하면서 등화 초기에서부터 수렴에 이르기까지 두 알고리즘이 상호 보완적으로 동작하여 성능을 개선한다. 그러나 동시 등화기가 수렴에 도달한 이후에는 동시 동작에 의해 성능 개선이 제한되는 측면도 있다. 왜냐하면 정상 상태에서 두 알고리즘이 하나의 전역 최소(global minimum)에 수렴하지 못하기 때문이다.

한편 판정의거 알고리즘은 최근접 심볼 판정으로 경판정을 수행하며, 이것은 눈모형이 닫힌 조건에서는 심볼 추정의 신뢰성이 낮다. 그러나 눈모형이 열린 상태에서는 최소 MSE에 수렴하는 것으로 알려져 있다^[2]. 그러므로 정상상태에서는 동시 동작을 중지하고 경판정만을 수행하는 것이 오차 성능을 더욱 개선할 수 있음을 알 수 있다.

본 논문에서는 동시 등화에서 등화기가 정상상태에 수렴한 이후에는 경판정이 주된 동작모드가 되도록 하는, 가중치기반의 탭 계수 갱신 알고리즘을 제안한다. 제안한 방식은 동시 등화에 사용된 두 알고리즘으로부터 구해진 오차 신호를 이용하여 가중치를 산출하고, 이를 적용하여 두 등화기의 탭 계수를 각각 가중 갱신하도록 한다. 결과적으로 정상상태에서 DD에 의한 갱신이 추가 되고 CMA에 의한 갱신은 거의 중지하는 특성을 구현하였다.

II장에서 동시 등화의 문제점을 살펴보고, III장에서 제안하는 가중치기반의 동시 등화를 기술한다. IV장에서 성능 평가 결과를 제시하고, V장에서 결론을 언급한다.

II. 동시 등화의 문제점

De Castro 등^[3]이 제안한 동시 CMA+DD 등화

에서는 CMA와 DD에 의해 등화기 탭 계수가 동시에 갱신된다. 이때 DD에 의한 탭 계수 갱신 여부를 flag를 두어 제어하였다. 동시 CMA+DD 등화는 CMA의 블라인드 수렴 특성을 저해하지 않으면서 비동시 CMA-DD 전환 방식이 가지는, 전환 시점에 따른 성능 변동의 민감성을 완화하였다^[3].

Chen 등은 동시 등화에 연판정의거(soft decision-directed: SDD)를 사용할 것을 제안하였다^{[4],[5]}. 동시 CMA+SDD 등화에서는 DD 대신 SDD를 사용함으로써, 경판정에 따른 오차 전파의 우려 없이 매 iteration마다 CMA와 동시에 SDD에 의한 탭 계수 갱신을 수행할 수 있어 동시 동작을 단순화하였다.

동시 등화에서 비용 함수는 두 알고리즘의 비용 함수의 합으로 주어진다. 즉, 동시 CMA+DD 등화에서 비용 함수 Ψ_n 은

$$\Psi_n = \Psi_n^{CMA} + \Psi_n^{DD} \quad (1)$$

이며^[3], CMA의 비용함수 Ψ_n^{CMA} 와 DD의 비용함수 Ψ_n^{DD} 는 각각 다음과 같다.

$$\Psi_n^{CMA} = E[(|y_n|^2 - \gamma)^2] \quad (2)$$

$$\Psi_n^{DD} = E[|y_n - \hat{s}_n|^2] \quad (3)$$

식 (2)와 (3)에서, CMA의 비용 함수는 $|y_n|^2$ 과 γ 와의 차에 대한 기대값으로 정해지고, DD의 경우는 y_n 과 \hat{s}_n 에 대한 심볼 추정 \hat{s}_n 과의 차에 대한 기대값으로 주어진다.

비용함수를 최적화하기 위해 stochastic gradient descent 방법을 이용하면, 동시 CMA+DD 등화에서 탭 계수 갱신 식은 아래와 같다.

$$C_{n+1} = C_n - \mu \widehat{\nabla}(\Psi_n^{CMA} + \Psi_n^{DD}) \quad (4)$$

여기서 μ 는 수렴 상수, $\widehat{\nabla}$ 는 gradient의 근사를 나타낸다. (4)에서 gradient 항이 영이 될 때 탭 계수 갱신은 중지된다. 동시 등화에서 탭 계수 벡터 C_n 은 CMA의 탭 계수 벡터 C_n^{CMA} 와 DD의 탭 계수 벡터 C_n^{DD} 의 합이므로,

$$C_n = C_n^{CMA} + C_n^{DD} \quad (5)$$

로 주어진다.

이상의 논의로부터, 동시 등화는 (4)에서 두 비용 함수의 합을 최소로 하는 탭 계수에 도달하는 것이 목표라 할 수 있다. 그런데 등화기가 더 이상 갱신 되지 않는 정상상태에서 비용함수가 영이 된다고 가정하면, (2)에서 $(|y_n|^2 - \gamma)^2 = 0$, 즉 $|y_n|^2 = \gamma$ 가 된다. 여기서 γ 는 다음으로 정의된다^[7].

$$\gamma = \frac{E[a_n^4]}{E[a_n^2]} \quad (6)$$

γ 는 심벌 정상도(symbol constellation)에 의해 정해지는 일정 modulus이다. 한편 식 (3)에서는 $|y_n - \hat{s}_n|^2 = 0$, 즉 $y_n = \hat{s}_n$ 이 된다. 여기서 \hat{s}_n 은 송신 심벌점에 대한 추정으로, 다음으로 주어진다.

$$\hat{s}_n = \text{dec}(y_n) \quad (7)$$

$\text{dec}(\cdot)$ 는 최근점 심벌 판정을 나타낸다.

식 (6)과 (7)에서 보는 바와 같이, 두 비용 함수가 영이 되는 조건이 일치하지 않는다. 그러므로 동시 등화에서는 두 비용함수가 동시에 최소가 되는 탭 계수 상태가 아닌, 두 비용함수의 합이 최소가 되는 상태에 도달하는 것이다.

이와 같이 동시 등화에서는 두 알고리즘이 각각 블라인드 수렴 성능과 정상상태 오차 성능을 극대화하도록 비용 함수가 정해졌기 때문에 두 비용 함수가 동시에 영이 되지 못한다. 따라서 두 알고리즘에 의한 동시 등화기 갱신은 서로 불일치가 발생하므로 동시 등화는 이를 절충하는 식으로 동작하게 된다. 이는 특히 정상상태에서 MSE를 크게 하는 요인이 된다.

III. 가중치기반 동시 등화

3.1 가변 수렴상수 CMA

CMA-DD 전환 방식과 동시 등화 방식 등이 가지는 문제점과 CMA의 정상상태 MSE를 개선하기 위해, 먼저 CMA의 수렴상수를 변화시키는 알고리즘을 제안한다. 제안하는 수렴상수 가변 알고리즘에서는 매 iteration 마다 오차 신호를 계산하여 이를 수렴상수 갱신에 사용한다. 이때 오차 신호에 대한 이동평균(moving average)을 수렴상수 갱신 여부를 판단하는 기준으로 삼았다.

제안하는 수렴상수 가변 방법에서, 수렴상수 μ_n^{vsCMA} 는 다음 식에 의해 가변된다.

$$\mu_{n+1}^{\text{vsCMA}} = \mu_n^{\text{vsCMA}} - \frac{\alpha}{n} \left[\log_{10} \left(\frac{\varepsilon_n^{\text{MA}}}{\varepsilon_{n-1}^{\text{MA}}} \right) \right] \quad (8)$$

여기서 α 는 수렴상수 갱신의 속도를 조절한다. $\varepsilon_n^{\text{MA}}$ 는 윈도우 길이가 M 인 이동평균이며, 다음으로 정의된다.

$$\varepsilon_n^{\text{MA}} = \frac{1}{M} \sum_{i=n-M+1}^n \varepsilon_i \quad (9)$$

위 식에서 ε_i 는 vsCMA의 오차 신호에 대한 제곱으로 $\varepsilon_i = |e_i^{\text{vsCMA}}|^2$ 이다.

알고리즘의 동작은, n 번째 iteration에서 현재의 오차 제곱 이동평균 $\varepsilon_n^{\text{MA}}$ 와 바로 이전의 오차 제곱 이동평균 $\varepsilon_{n-1}^{\text{MA}}$ 를 비교하여, $\varepsilon_n^{\text{MA}} < \varepsilon_{n-1}^{\text{MA}}$ 를 만족하면 등화된 신호의 MSE가 개선되고 있는 것으로 판단, 즉 등화기가 수렴해가고 있는 것이므로 수렴상수를 갱신하고, 그렇지 않은 경우에는 갱신하지 않도록 하였다. vsCMA는 CMA의 초기 블라인드 수렴 특성을 저해하지 않으면서 정상상태 MSE 개선을 목표로 하므로 눈모형이 더욱 열리고 있다고 판단되는 경우에만 수렴상수를 갱신하였다.

가변 수렴상수를 적용한 탭 계수 갱신 식은 (4)와 (5)로부터 다음으로 주어지며,

$$C_{n+1}^{\text{vsCMA}} = C_n^{\text{vsCMA}} - \mu_n^{\text{vsCMA}} \varepsilon_n^{\text{vsCMA}} R_n^* \quad (10)$$

R_n^* 은 등화기 입력 데이터 벡터의 복소 공액(complex conjugate)이다. 가변 수렴상수 μ_n^{vsCMA} 은 정상상태에서 시간(iteration)이 경과함에 따라 무한히 영에 가까운 값이 되므로, (10)에서 오차 신호를 포함한 탭 계수 증분 항은 영에 근접하게 된다.

3.2 오차 제곱 가중치기반의 탭 계수 갱신

II장에서 고찰한 바와 같이, 동시 등화는 등화기가 정상상태에 수렴한 후에도 동시 동작을 계속함으로써 성능 개선의 여지가 있다. 이를 개선하기 위해, 동시 등화에서 등화기가 정상상태에 수렴한 이후에는 경판정이 주된 동작모드가 되도록 하는, 가중치기반의 등화기 탭 계수 갱신 알고리즘을 제안

한다.

제안하는 동시 vsCMA+DD 등화에서 가중치기반 탭 계수 갱신 식은 vsCMA와 DD에 대해 각각 다음으로 주어진다.

$$C_{n+1}^{vsCMA} = C_n^{vsCMA} - \beta \mu_n^{vsCMA} e_n^{vsCMA} R_n^* \quad (11)$$

$$C_{n+1}^{DD} = C_n^{DD} - (1 - \beta) \mu_n^{DD} e_n^{DD} R_n^* \quad (12)$$

여기서 β 와 $(1 - \beta)$ 는 각각 vsCMA와 DD에 의한 탭 계수 갱신을 위한 가중치로서,

$$\beta = \frac{|e_n^{DD}|^2}{|e_n^{vsCMA}|^2 + |e_n^{DD}|^2} \quad (13)$$

$$1 - \beta = \frac{|e_n^{vsCMA}|^2}{|e_n^{vsCMA}|^2 + |e_n^{DD}|^2} \quad (14)$$

와 같이 정의하였다. 위의 두 식에서 e_n^{vsCMA} 과 e_n^{DD} 는 각각 vsCMA와 DD의 오차 신호로, 다음과 같다.

$$e_n^{vsCMA} = y_n (|y_n|^2 - \gamma) \quad (15)$$

$$e_n^{DD} = y_n - \text{dec}(y_n) \quad (16)$$

가중치기반 탭 계수 갱신을 적용한 동시 vsCMA+DD 등화에서 두 알고리즘은 가중치 β 에 따라 등화기를 갱신하며, β 는 (13)과 (14)에 따라 0에서 1사이의 값을 가진다. 추정 오차가 작은 알고리즘은 상대적으로 1에 가까운 가중치를 가지고 등화기를 갱신하나, 추정 오차가 큰 알고리즘은 0에 가까운 가중치를 가지므로 등화기를 거의 갱신하지 않게 된다. 예컨대 정상상태에서는 DD 오차 신호가 CMA 오차 신호에 비해 정확도가 높아 작은 값이 될 것이므로, $|e_n^{DD}|^2 \ll |e_n^{vsCMA}|^2$ 이고 β 는 0에 근접하므로 (11)에 의해 C_n^{vsCMA} 는 거의 갱신되지 않고, 반면 (12)에 의해 C_n^{DD} 는 거의 1에 가까운 가중치로 갱신된다. 이러한 방식으로 제안 방법에서는 정상상태에서 동시 동작을 조절하는 효과를 갖는다.

이상 논의한 바와 같이, 동시 등화에 있어서, 제안한 수렴상수 가변 방법과 가중치에 따른 등화기

가중 갱신 방법은, 수렴상수 가변에 의해 정상상태 성능을 개선하는 것에 더하여 정상상태에서 동시 동작을 거의 중지하는 효과로 인하여 결과적으로 CMA와 동시 등화의 성능을 개선하였다.

일반적으로 수렴상수는 알고리즘의 채널 추적 성능에 영향을 준다. 그러나 본 논문의 방법에서는 수렴상수를 가변 하는 것뿐만 아니라 동시 동작을 조절함으로써 알고리즘의 채널 추적 성능이 저하하지 않도록 하였다. 제안 방법은 아무런 제약 조건이나 초기 설정 등이 필요 없는 매우 일반적인 방법으로서, 본 논문에서 적용한 CMA와 DD에 국한되지 않고 다른 알고리즘에도 적용가능하다.

IV. 성능 평가

성능 평가는 제안한 방식을 CMA 및 동시 CMA+DD 등화^[3]와 비교하는 것으로 하였다. 정상상태의 MSE 성능과 잔류 심벌간 간섭(ISI) 성능, 그리고 심벌 오류(SER) 등을 평가하였다.

모의실험에서는 다중경로 전파 채널^[6]을 22 탭 지연 라인(tapped delay line) 모델에 의해 모델링하였다. 이것은 3 심벌 길이의 preghost와 18 심벌 길이의 postghost를 가지는 다중경로 채널이다. 즉 이 채널에서는 ISI가 21 심벌 간격에 걸쳐 확산된다.

모의실험에 사용한 등화기는 선형 트랜스버설 필터 구조의 23 탭을 가지는 복소 등화기이며, 등화기의 중심 탭을 1로 초기화하였다. 등화 알고리즘의 수렴상수는 시뮬레이션에 사용된 세 알고리즘이 모두 동일한 초기 수렴속도를 보이도록 설정하였다.

이상의 모의실험 조건에서 얻은 실험 결과에 따르면 이동평균의 윈도우 길이가 2~4 심벌 정도면 성능에 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 성능 평가에서는 이동평균의 빠른 응답 속도와 성능을 고려하여 윈도우 길이를 $L=2$ 로 하였다.

MSE와 SER 성능을 구하기 위해서는 먼저 채널에 의한 임의의 위상 회전을 제거해야 하므로 CMA에서는 위상 복원 회로를 거쳤다^[4]. 동시 CMA+DD와 제안한 방식에서는 동시 구조인 덕분에 등화와 함께 위상 복원이 이루어지므로 별도의 위상 복원 회로는 불필요하였다. 신호점은 16-QAM을 적용하였고, 심벌당 신호대 잡음비(SNR per symbol) $E_s/N_0 = 10\text{dB}$ 에서 30dB의 조건에서 성능을 분석하였다.

먼저, 그림 1과 2에서 각각 $E_s/N_0 = 20\text{dB}$ 와

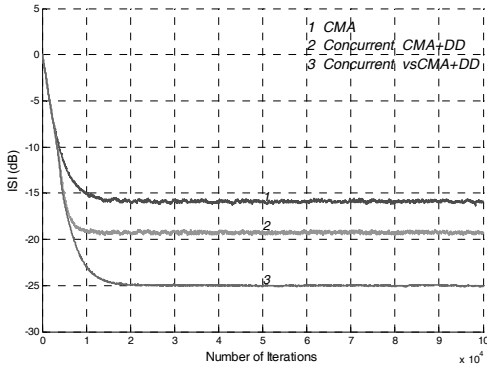


그림 1. $E_s/N_0 = 20\text{dB}$ 에서의 잔류 ISI 성능 비교

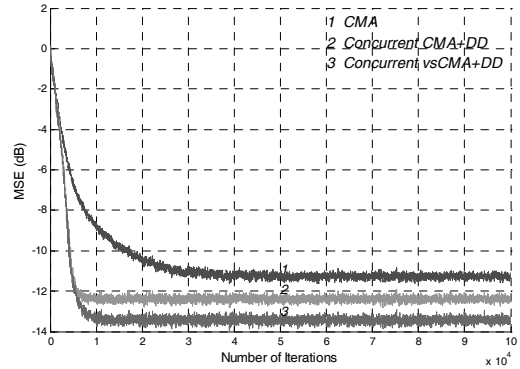


그림 3. $E_s/N_0 = 20\text{dB}$ 에서의 MSE 성능 비교

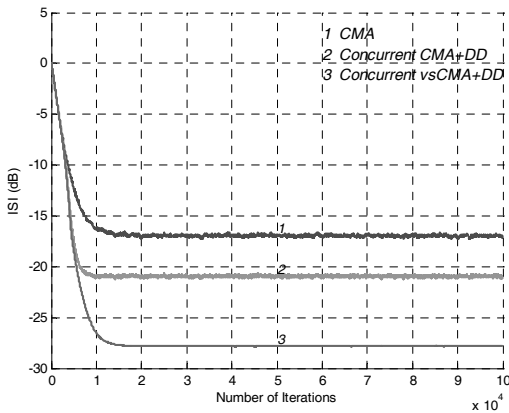


그림 2. $E_s/N_0 = 30\text{dB}$ 에서의 잔류 ISI 성능 비교

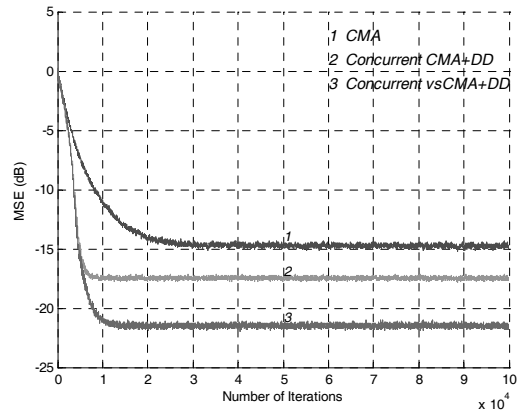


그림 4. $E_s/N_0 = 30\text{dB}$ 에서의 MSE 성능 비교

30dB에서의 잔류 ISI 성능을 비교하였다. 100회의 독립적인 수행을 통해 얻어진 ISI 결과를 나타내었다. 그림 1에서, CMA와 동시 CMA+DD 및 제안 알고리즘은 모두 동일한 정도의 수렴 속도를 가지나 정상상태 성능에서 큰 차이를 보이고 있다. CMA는 정상상태에서 잔류 ISI가 크다. 동시 CMA+DD가 CMA를 3dB 이상 개선하였으며, 제안 방식이 CMA에 비해 9dB 이상 개선하였다. 그림 2에서, 세 알고리즘의 수렴특성은 유사하나 정상상태 특성은, 동시 CMA+DD가 CMA를 4dB 이상 개선하였으며, 제안 방식이 CMA에 비해 10dB 이상 개선하였다.

다음, 그림 3과 4에서 MSE 성능을 보였다. 100회의 수행에서 얻어진 결과를 평균하였으며, 다시 MSE의 급격한 변동을 완화하기 위해 32 탭 길이의 이동평균 필터로 필터링하여 나타내었다. 그림 3에서 동시 CMA+DD 및 제안 알고리즘이 CMA에 비해 빠르게 정상상태에 도달하며, 정상상태 오차

성능을 개선하고 있다. 제안한 방식이 CMA와 De Castro의 동시 등화에 비해 1~2dB 이상 개선하였다. 그림 4에서는 제안 방식이 CMA와 De Castro의 동시 등화에 대해 각각 6dB와 4dB 정도 개선하였다. 아울러 제안 방식은 CMA와는 달리 초기 블라인드 수렴 특성의 저하를 보이지 않았다.

마지막으로 SER 성능을 그림 5에 나타내었다. 그림에 의하면 SER이 10^{-3} 이하로 떨어지는데 요구되는 E_s/N_0 가 CMA의 경우 30dB 인 것에 반해, 동시 CMA+DD의 경우 23dB, 제안한 동시 vsCMA+DD의 경우 21dB 정도이므로 동시 vsCMA+DD는 CMA에 비해 8dB 이상, 동시 CMA+DD에 비해 2dB 이상 개선하고 있다. 또한 CMA는 E_s/N_0 가 증가하여도 SER이 크게 개선되지 않는 반면, 동시 알고리즘은 E_s/N_0 증가에 따라 SER을 크게 개선하며, 특히 제안한 동시 vsCMA+DD의 경우 SNR이 증가함에 따라 SER이 급격히 낮아지고 있다.

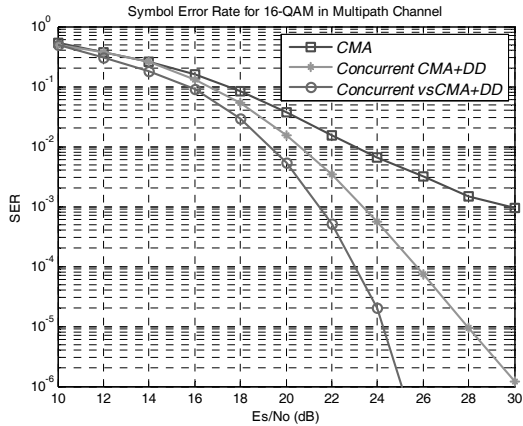


그림 5. $E_s/N_0 = 10 \sim 30$ dB에서의 SER 성능 비교

V. 결 론

제안한 가변 수렴상수와 가중치기반의 탭 계수 갱신을 적용한 동시 vsCMA+DD 등화 방법은, 먼저 vsCMA에 의해 CMA의 정상상태 오차 성능을 개선하며, 오차 제곱 가중치에 따른 탭 계수 갱신으로 초기 수렴 속도의 저하 없이 정상상태에서 동시 등화의 성능을 개선하였다. 특히 가중치기반의 탭 계수 갱신은 두 알고리즘의 오차 추정의 정확도에 따라 가중치를 동적으로 조정하여 정상상태에서 동시 동작을 제어하는 효과를 갖는다. 모의실험 결과 제안한 방식은 CMA와 기존의 동시 등화 알고리즘에 비해 모든 SNR 조건에서 잔류 ISI와 MSE 및 SER 성능을 개선하였다.

참 고 문 헌

[1] S. Abrar and R.A. Axford Jr., "Sliced multi-modulus blind equalization algorithm," *ETRI Journal*, Vol.27, No.3, pp.257-266, June, 2005.

[2] O. Macchi and E. Eweda, "Convergence analysis of self-adaptive equalizers," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.IT-30, No.2, pp.161-176, March, 1984.

[3] F.C.C. De Castro, M.C.F. De Castro and D.S. Arantes, "Concurrent blind deconvolution for channel equalization," *Proc. ICC '2001*, Vol.2, pp.366-371, June, 2001.

[4] M.T.M. Silva, M.D. Miranda, and R. Soares,

"Concurrent algorithm for blind adaptation of DFE," *Electronics Letters*, Vol.41, No.16, pp.63-64, 4th August, 2005.

[5] S. Chen, and E.S. Chng, "Concurrent constant modulus algorithm and soft decision directed scheme for fractionally-spaced blind equalization," *Proc. ICC '2004*, Vol.4, pp.2342-2346, June, 2004.

[6] S.C. Bateman and S.Y. Ameen, "Comparison of algorithms for use in adaptive adjustment of digital data receivers," *IEE Proc.*, Pt. I, Vol.137, No.2, pp.85-96, 1990.

[7] N.K. Jablon, "Joint blind equalization, carrier recovery, and timing recovery for high-order QAM signal constellations," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol.SP-40, pp.1383-1398, June, 1992.

오길남 (Kil Nam Oh)

정회원



1982년 2월 경희대학교 전자공학과 공학사

1984년 2월 경희대학교 전자공학과 공학석사

1996년 2월 경희대학교 전자공학과 공학박사

1984년 3월~2000년 2월 한국

전자통신연구원 책임연구원, 팀장

2000년 3월~현재 광주대학교 광통신공학과 교수
<관심분야> 블라인드 등화, 통신신호처리, OFDM