

다중레벨 Modulus를 사용한 블라인드 등화 알고리즘의 성능 분석

오길남

광주대학교 컴퓨터전자통신공학부

Performance Analysis of Blind Equalization Algorithms using Multilevel Modulus

Kil Nam Oh

Division of Computer, Electronics and Communications Engineering, Kwangju University

E-mail: knoh@hosim.kwangju.ac.kr

Abstract - 본 논문에서는 디지털 통신 시스템의 블라인드 등화에 있어서, 다중레벨 modulus를 기준 신호로 사용하여 등화기의 탭 계수 갱신 식에 사용되는 오차 신호를 형성함으로써 등화기의 블라인드 수렴 특성을 개선한 다중레벨 modulus 알고리즘들의 성능을 분석하였다. 다중경로 채널 하에서 QAM 신호점에 대해 컴퓨터 모의실험을 통하여 단일/다중레벨 modulus 알고리즘(SMMA)과 기존의 modified constant modulus algorithm(MCMA) 및 최근에 제안된 다중레벨 modulus 알고리즘(MMA) 등의 블라인드 수렴 및 정상 상태 성능을 비교하였다.

1. 서론

대역폭 효율적인 디지털 전송 시스템에서는 채널 상에서 겪게 되는 선형 왜곡을 보상하기 위해 수신 단에서 적응 등화기를 사용한다. 적응 등화기는 먼저 학습 열을 이용하여 초기화된 후 데이터를 수신하게 된다. 그러나 많은 경우, 예를 들어 방송(broadcast)이나 일대다점(point-to-multipoint) 회로망 등에 있어서 등화기를 학습 기간 없이 데이터 모드에서 운용하는 블라인드 등화 기법이 유용하며, 블라인드 등화 기법은 시스템 구현이 단순한 점 등으로 인해 보다 비용 효과적일 뿐만 아니라, 갑작스런 채널 변화 시 재학습을 필요로 하지 않는 장점이 있다.

블라인드 알고리즘에 의해 적응 등화기를 초기화하기 위해서는 탭 계수 갱신 알고리즘에 사용되는 오차 신호를 정확히 추정하는 것이 요구된다. 이것은 상대적으로

오차 추정의 정밀도를 희생하는 것을 의미한다. 즉, 정밀한 오차 추정은 그 정확도를 떨어뜨리기 때문에 이로 인하여 탭 계수 조절에 있어서 오조정을 유발시켜 등화기 출력이 수렴에 이르지 못하는 결과를 초래한다. 그러므로 수신된 신호점의 눈모형이 열리기 전 상태에서는 오차 추정의 정확도를 높여 탭 계수가 올바른 방향으로 수렴하도록 하는 것이 필요하다. 블라인드 알고리즘에서는 이러한 원칙에 의해 초기 수렴을 달성할 수 있다.

등화기 출력을 대략적으로 양자화 함으로써 오차 추정의 정확도를 높이는 개념에서 출발한 것이 PAM(pulse amplitude modulation) 신호의 블라인드 등화에 가장 먼저 사용된 Sato 알고리즘이다. 이후 이차원 신호점에 적용하기 위한 RCA(reduced constellation algorithm)와 CMA(constant modulus algorithm) 등이 제안되었다. 블라인드 등화 알고리즘으로 가장 널리 사용되고 있는 CMA는 고차 통계량을 오차 신호로 사용함으로써 Sato 알고리즘과 RCA 등에 비해 블라인드 수렴 특성을 개선하였으나, 오차 신호가 위상 성분과는 무관하게 정해지므로 정상상태에서 출력 신호점이 위상 회전되는 문제를 갖는다. 이 문제는 오차 신호가 위상 성분을 포함하도록 간단히 변형함으로써 해결되며, 이것이 MCMA(modified CMA)[1]로 제안된 바 있다.

MCMA를 포함하여 Sato 알고리즘, RCA, CMA 등의 공통적인 문제점은 non-CM(constant modulus) 소스 즉, 고차 QAM(quadrature amplitude modulation) 신호점에 적용 시 수렴 후 정상상태에서 오차 레벨이 만족스럽지 못하다는 점이다. 이것은 언급한 알고리즘들이

블라인드 수렴을 달성하기 위해 오차 추정의 정밀도를 희생한 때문이다. 즉, 원래의 신호점 대신 송신 심벌이 가지고 있는 통계적 특성에 기초하여 정해지는 새로운 신호점을 기준 신호로 사용하여 오차 신호를 형성하는 까닭이다.

이를 개선하기 위해 일단 오차 레벨이 충분히 낮은 레벨로 떨어진 후에는 판정의거(decision-directed: DD) 모드로 전환하는 방식 즉, 기어 시프트 기법이 적용된다. 그러나 기어 시프트 기법에서는 채널 특성의 갑작스런 변동과 같이 채널 상태가 악화되었을 때 등화기를 재 초기화할 수 없다는 문제점이 있다. 다른 방법으로는 초기 수렴 이후에 수렴 상수를 보다 작게 하는 것이 정상상태 오차를 줄이는 기법으로 사용될 수 있다. 그러나 이러한 방법에서는 갑작스런 채널 상태의 변동 시 채널 추적 능력이 저하되는 결과를 초래한다.

정상상태 특성을 개선하기 위한 또 다른 방법으로 이중모드 알고리즘의 부류가 있다. 종래의 CMA에 기초한 DMGA(dual-mode Godard algorithm)와 MCMA에 기초한 DMCMA(dual-mode MCMA) 등은 두 가지 동작 모드를 갖는 이중모드 알고리즘으로서, 오차 신호 형성에 여러 개의 기준 점을 사용하는 점에서 2장에서 기술하는 다중레벨 알고리즘으로 간주할 수 있다.

본 논문에서는 다중레벨의 modulus를 사용하는 알고리즘의 블라인드 수렴 특성을 분석하고, 다중경로 채널에서 알고리즘들의 성능을 비교한다. 먼저 2장에서 기존의 다중레벨 알고리즘의 블라인드 수렴 특성을 기술하고, 3장에서 제안하는 스킵의 블라인드 수렴 특성을 기술한다. 4장에서는 제안 알고리즘의 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 평가하고, 5장에서 결론을 언급한다.

2. 기존의 다중레벨 알고리즘

CMA는 단일의 일정한 modulus를 기준 신호로 사용하여 오차 신호를 형성, 오차 신호 추정의 정확도를 높임으로써 블라인드 등화를 달성하였으나 그에 따른 문제점을 안고 있으며, 이에 대해 다중레벨의 modulus를 사용하는 기법이 하나의 해결 방법이 될 수 있다. 다중레벨 modulus 알고리즘에는 앞에서 언급한 DMGA와 DMCMA 외에도 RDE(radius-directed equalization)와 DAMA(decision adjusted modulus algorithm) 등이 있거니와, 이 둘 알고리즘은 모두 특별한 방법을 적용하여 정상상태의 오차 레벨을 개선하였으나, 공통적으로 초기 블라인드 수렴 성능의 저하 문제를 가지고 있다. 이것은 블라인드 알고리즘이 오차 추정의 정밀도를 높이는 대신 정확도를 희생시킨 것이 원인이다.

최근에 J.-J. Werner 등이 제안한 GMMA (generalized multimodulus algorithm)는 MCMA에 기초한 다중레벨

modulus 알고리즘으로, 여기에서도 정상상태 특성을 개선하기 위해 이차원 신호점에 적용 시 신호점 공간을 보다 작은 영역으로 분할하고, 각 영역마다 하나의 modulus를 정의함으로써 다수의 modulus를 적용하여 오차 신호를 추정한다. 256-QAM 신호점을 예로 들면, 그림 1에 나타낸 바와 같이 전체 신호점 공간은 3개의 영역으로 분할되고, 각각의 분할된 영역에서 modulus가 정해진다.

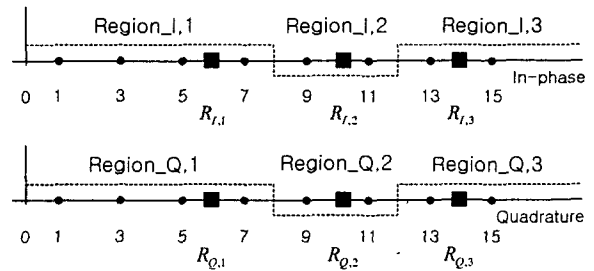


그림 1. 256-QAM에 대한 3개의 영역과 다중레벨 modulus

GMMA에서 오차 신호 $e(n) = e_I(n) + je_Q(n)$ 는 256 신호점에 대해 다음과 같이 주어진다[2, 3].

$$e_I(n) = \begin{cases} y_I(n)(y_I^2(n) - R_{I,1}^2) & y_I \in \text{Region}_{I,1} \\ y_I(n)(y_I^2(n) - R_{I,2}^2) & y_I \in \text{Region}_{I,2} \\ y_I(n)(y_I^2(n) - R_{I,3}^2) & y_I \in \text{Region}_{I,3} \end{cases} \quad (1)$$

$$e_Q(n) = \begin{cases} y_Q(n)(y_Q^2(n) - R_{Q,1}^2) & y_Q \in \text{Region}_{Q,1} \\ y_Q(n)(y_Q^2(n) - R_{Q,2}^2) & y_Q \in \text{Region}_{Q,2} \\ y_Q(n)(y_Q^2(n) - R_{Q,3}^2) & y_Q \in \text{Region}_{Q,3} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $R_{I,k}$ 와 $R_{Q,k}$ 는 각각 동상(in-phase)과 직교(quadrature) 성분의 k 개의 다중레벨 modulus로서 아래와 같이 정의된다.

$$R_{I,k}^2 = \frac{E[|a_I(n)|^4]}{E[|a_I(n)|^2]} \quad a_I \in \text{Region}_{I,k} \quad (3)$$

$$R_{Q,k}^2 = \frac{E[|a_Q(n)|^4]}{E[|a_Q(n)|^2]} \quad a_Q \in \text{Region}_{Q,k} \quad (4)$$

GMMA에서 영역의 분할은 일반화되어 있지 않으며, 경험적인 방식에 의해 정해진다. 그러나 GMMA에서 신호점 평면을 보다 작은 다수의 영역으로 분할하는 것은 기본적으로 오차 추정의 정확도에 부정적인 영향을 미치게 된다. 즉, 등화기 출력의 눈도형이 단혀있는 상태에서는 오차 추정의 정확도가 떨어지게 되어 초기 수렴 성능이 저하될 것으로 예상된다. 아울러 등화기가 완전히 수렴한 후에는 역시 원래의 신호점 대신 송신 신호의 통계량에 의한 새로운 기준 점을 사용한 이유로

인하여 정상상태 특성도 만족스럽지 못할 것으로 짐작할 수 있다.

3. 단일/다중레벨 알고리즘

오차 추정의 정확도와 정밀도를 적절히 조절함으로써 블라인드 수렴 특성을 저하시키지 않으면서 정상상태 특성을 개선하는 단일/다중레벨 알고리즘 (single/multilevel modulus algorithm: SMMA)을 기술한다. 먼저 non-CM 소스에 대해 단일레벨 modulus와 다중레벨 modulus를 정의하는 것이 필요하다. 즉, 이차원 등화기 출력 신호를 in-phase 성분과 quadrature 성분으로 구분하고, 각 성분에 대해 MCMA에서와 같은 방식으로 정해지는 단일의 일정 modulus를 정의한다. 다음 등화기가 완전히 수렴 시 곧, 채널이 완전히 등화되었을 때 오차 신호가 zero가 되도록 하는 기준 점으로 정의되는 다중레벨의 modulus를 정의한다[4]. 이와 같이 정의되는 단일레벨 modulus와 다중레벨 modulus를 256-QAM에 대해 나타내면 그림 2와 같다.

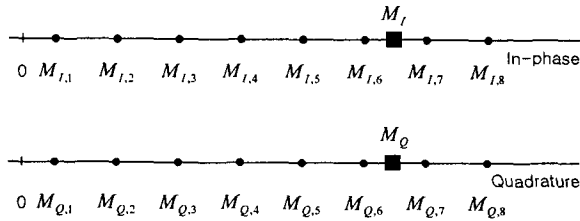


그림 2. 256-QAM에 대한 단일/다중레벨 modulus

SMMA에서는 단일/다중레벨 modulus를 선택적으로 적용하며, 이를 위한 기준으로는 등화기 출력에 잔류하는 심벌간 간섭(intersymbol interference: ISI) 양을 적용한다. 따라서 단일/다중레벨 modulus 알고리즘에서 오차 신호 $e(n) = e_I(n) + j e_Q(n)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$e_I(n) = \begin{cases} y_I(n)(y_I^2(n) - M_{I,k}^2) \frac{isi(n)}{isi(0)} \leq \beta \\ y_I(n)(y_I^2(n) - M_I^2) \text{ otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$e_Q(n) = \begin{cases} y_Q(n)(y_Q^2(n) - M_{Q,k}^2) \frac{isi(n)}{isi(0)} \leq \beta \\ y_Q(n)(y_Q^2(n) - M_Q^2) \text{ otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

여기서 $M_{I,k}$ 와 $M_{Q,k}$ 는 k 개의 다중레벨 modulus로서 각각 다음과 같이 정의되며,

$$M_{I,k}^2 = |a_I(n)|^2 \quad (7)$$

$$M_{Q,k}^2 = |a_Q(n)|^2 \quad (8)$$

여기서 $a_I(n)$ 과 $a_Q(n)$ 는 각각 $y_I(n)$ 과 $y_Q(n)$ 에 가

장 인접한 신호점 심벌이다. M_I 와 M_Q 는 단일레벨 modulus로서 각각 다음과 같이 정의된다.

$$M_I^2 = \frac{E[|a_I(n)|^4]}{E[|a_I(n)|^2]^2} \quad (9)$$

$$M_Q^2 = \frac{E[|a_Q(n)|^4]}{E[|a_Q(n)|^2]^2} \quad (10)$$

SMMA에서는 등화기 출력의 ISI 양에 따라 동작 모드를 달리하며, 따라서 n 번째 iteration에서 등화기 출력에 잔류하는 심벌간 간섭 양 $isi(n)$ 과 초기 심벌간 간섭 양 $isi(0)$ 와의 비가 상수 β 이하이면 눈모형이 충분히 열린 상태로 간주하여 다중레벨 modulus를 적용하여 오차 신호를 형성한다.

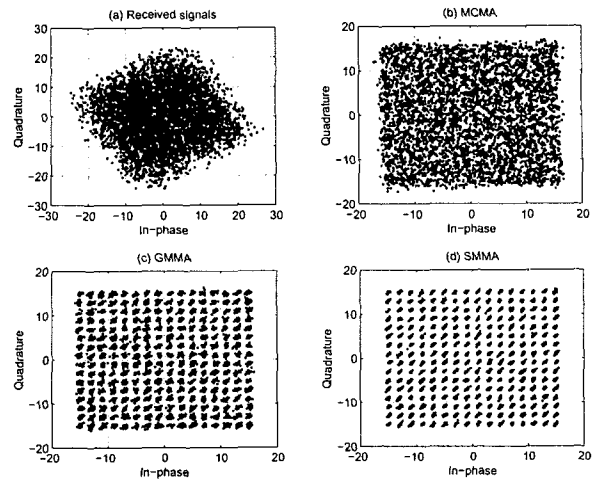
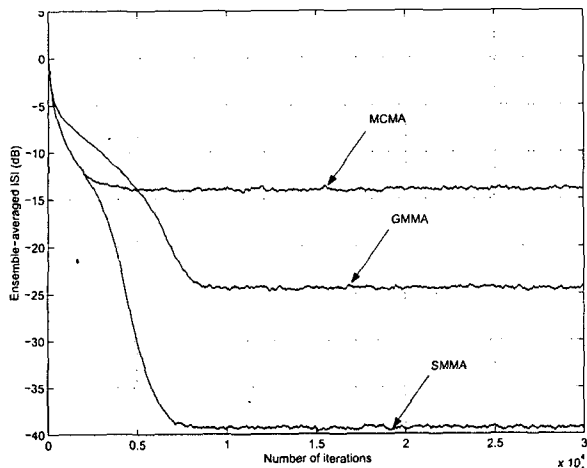
이러한 스킴은 GMMA와는 달리 신호점 평면상에서 영역을 구분하지 않음으로써 구현이 단순하고 고차 신호점에서의 확장이 매우 용이할 뿐만 아니라, 동작 모드 선택에 있어서 이중모드 알고리즘에서 적용하는 신뢰 구간을 사용하는 대신 등화기 출력의 잔류 ISI 양을 적용함으로써 블라인드 수렴 성능의 저하를 초래하지 않는 것으로 나타났다. 또한 채널 상태에 따라 오차 추정의 정확도와 정밀도를 절충함으로써 시변 채널 특성의 변화를 추적하는 기능을 가진다.

4. 모의실험 및 고찰

제안한 SMMA의 성능을 MCMA 및 GMMA와 비교, 평가하였다. 컴퓨터 모의실험에 사용된 채널은 임펄스 응답이 6개의 에코로 이루어져 있으며[5], 송신 신호로는 광대역 전송 시스템 등의 고차 신호점 사용에 맞추어 256-QAM을 사용하였다. 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio: SNR)는 35 dB로 고정하였다.

성능 비교를 위해 수렴 특성과 신호점 정상도를 비교하였다. 먼저, 수렴 특성을 보기 위해 등화기 출력에서의 잔류 ISI를 계산하였다. 그림 3은 알고리즘의 수렴 특성을 보기 위한 모의실험의 결과로서, 잔류 ISI 성능 곡선을 나타낸다. 100번의 Monte Carlo 수행으로부터 얻어진 결과를 앙상블 평균하여 나타내었다. 우선 초기 수렴 속도 면에서, GMMA는 MCMA와 SMMA에 비해 더딘 것으로 나타났다. 이것은 GMMA가 오차 추정의 정밀도를 높여려는 시도로 인하여 오차 추정의 정확도가 저하된 결과이다. 특히 수신 신호의 눈모형이 닫혀 있는 상태에서 오차 추정의 오류로 인해 등화기 탭 계수 갱신의 오조정이 발생하여 등화기의 수렴이 늦어지는 때문인 것으로 분석된다. 한편 SMMA는 등화 초기에는 잔류 ISI 양이 충분히 작아지지 않은 상태이므로

그림 3. 256-QAM 신호에 대한 잔류 심벌간 간섭 성능



단일레벨 modulus 모드 즉, MCMA와 동일한 모드에서 동작하게 된다. 그러나 잔류 ISI가 충분히 작아지면 다중레벨 modulus 모드 즉, DD 알고리즘과 유사한 동작 모드로 자동 전환하므로 수렴 속도의 개선이 가능하다.

정상상태 특성에 있어서는, MCMA와 GMMA는 원래의 신호점 대신 특별하게 정해지는 신호점을 기준점으로 사용, 오차 신호를 형성하므로 정상상태에서 즉, 등화기가 완전히 수렴한 후에 오차 신호가 필연적으로 zero가 되지 못하여 상대적으로 큰 잔류 ISI를 보인다. 반면 SMMA에서는 DD 알고리즘과 유사한 동작으로 인하여 정상상태에서 보다 적은 잔류 ISI를 나타낸다. 그림 4는 256-QAM에 대한 등화 전, 후의 신호점을 나타낸다. 등화기가 충분히 수렴한 상태인 25,000 심벌의 수신 이후 5,000 심벌의 눈모형을 나타내었다. SMMA가 다른 두 알고리즘에 비해 보다 뚜렷한 눈모형을 형성하는 것으로 나타났다. 따라서 판정 장치에 의한 심벌 판정 시 판정 오류가 보다 적을 것으로 예상된다.

이상 모의실험의 결과로부터 SMMA가 MCMA와 GMMA에 비해 초기 블라인드 수렴 속도와 정상상태의 잔류 ISI 양 측면에서 성능 향상을 보이므로 고차 신호점을 사용하는 시스템에 보다 효과적인 블라인드 등화 알고리즘임을 확인하였다.

5. 결론

본 논문에서는 QAM 또는 CAP(carrierless amplitude/phase modulation)와 같은 대역폭 효율적인 시그널링 시스템에서 다중경로 간섭 등을 효과적으로 제거하기 위한 새로운 블라인드 등화 알고리즘을 제안하였다. 제안한 SMMA는 기존의 MCMA와 최근에 발

표된 GMMA에 비해 다중경로 채널 환경에서 수렴 속도와 정상상태에서의 오차 레벨을 개선하는 것으로 나타났다. 제안한 기법은 256-QAM을 비롯한 고차 QAM 신호로 매우 용이하게 확장되므로 VDSL(very high-speed digital subscriber line)이나 CATV 등 광대역 전송 시스템에의 적용에 적합하다.

참고문헌

- [1] K. N. Oh and Y. O. Chin, "Modified Constant Modulus Algorithm: Blind Equalization and Carrier Recovery Algorithm," Proc. IEEE ICC '95, vol. 1, pp. 498-502, Seattle, WA, June 1995.
- [2] J.-J. Werner, J. Yang, D. D. Harman and G. A. Dumont, "Blind Equalization for Broadband Access," IEEE Commun. Magazine, pp. 87-93, April 1999.
- [3] L. M. Garth, J. Yang and J.-J. Werner, "Blind Equalization Algorithms for Dual-Mode CAP-QAM Reception," IEEE Trans. Commun., vol. COM-49, no. 3, pp. 455-466, March 2001.
- [4] K. N. Oh, "Single/Multilevel Modulus Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals," IEICE Trans. Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, vol. E80-A, no. 6, pp. 1033-1039, June 1997.
- [5] G. Picchi and G. Prati, "Blind Equalization and Carrier Recovery Using a "Stop-and-Go" Decision-Directed Algorithm," IEEE Trans. Commun., vol. COM-35, pp. 877-887, Sep. 1987.

그림 4. 256-QAM 신호에 대한 등화 전, 후의 신호점