

QAM 복조용 4분면 분할 자력복구 채널등화 알고리즘

류석규, 황유모
명지대 제어계측공학과

Quadrant-partitioned Blind Equalization Algorithm for QAM Demodulation

Seok-Kyu Ryu, Humor Hwang
Dept. of Control and Instrumentation Eng., Myong Ji University

Abstract - We propose a robust blind equalization algorithm based on quadrant-partitioned constellations for QAM demodulation. The algorithm divides the received M-QAM constellations into simple four quadrant. The channel equalization for symbols in each quadrant can be accomplished fast and reliably using the Constant Modulus Algorithm(CMA) and the Stop-and-Go Algorithm(SGA). Test results confirm that the proposed algorithm with lower complexity outperforms both the CMA and the SGA in reducing the SER as well as the MSE at the equalizer output.

1. 서 론

제안된 디지털 통신 채널 대역폭으로 인한 심볼간 간섭(ISI)를 줄이기 위해 훈련열(training sequence)을 이용한 채널 등화기를 사용하는데 이는 구현의 용이 및 빠른 start-up 채널 등화의 이점이 있지만 다중 경로 폐이딩등에 의해 채널 상황이 악화되는 경우에는 훈련열을 사용하지 않고 수신 심볼에만 의존하는 자력 복구 채널 등화(blind equalization)만큼 급격한 채널 상황 변화에 잘 대응하지 못하는 것으로 알려져 있다.^{[1]-[3]}

그림 1은 자력복구 채널 등화기를 구성하는 기본 대역 디지털 통신 시스템 블록도이다. 채널 등화기 출력은 $y(n) = \underline{W}^T(n) \underline{X}(n)$ 이며 채널 등화기의 램프수 $N = (2L+1)$ 이면 $\underline{X}(n) = [x(n+L), \dots, x(n-L)]^T$ 이다. 채널 등화기 계수는 에러 비용 함수를 최소화 하도록 식 (1)의 LMS 알고리즘에 의해 선정되는데 그 에러 비용 함수는 채널 등화기 출력과 전송 심볼의 사전 정보에 의해 결정된다.

$$\underline{W}(n+1) = \underline{W}(n) - \mu e(n) \underline{X}^*(n) \quad (1)$$

여기서 $e(n)$ 은 채널 등화 알고리즘의 에러 비용 함수에 따라 다르게 선정된다.

Godard^[3]에 의해 제안된 Constant Modulus Algorithm(CMA) 등화 방식은 심볼간 간섭이 약한 채널 상황에서는 잘 동작하지만 전송된 심볼에 대한 사전 정보가 별로 없는 ad-hoc 방식에 의해 발생된 제어 신호를 이용해서 채널 등화를 수행할 뿐 아니라 위상 복구와 독립적으로 채널 등화를 하기 때문에 적은 위상 애곡에도 잘 대응하지 못하는 단점이 있다. 최근 CMA의 위상 애곡 성능을 향상시키기 위해 채널 등화기 실수부와 허수부 계수 갱신을 따로 처리하는 Modified CMA(MCMA)^[4]가 제안되었다. MCMA는 위상 애리를 어느 정도 복구 할 수 있지만 충분히 수렴한 후에도 여전히 큰 잔류 애러값이 있어 채널 등화 성능에 문제가 되고 있다.

G.Prati^[5] 등은 채널 등화 성능을 향상 시키기 위해 높지 않으면 계수 갱신을 중단하고 그렇지 않을 경우에만

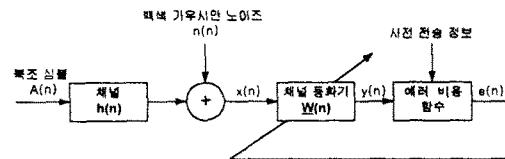


그림 1. 자력복구 채널 등화기를 위한 기저대역 통신 시스템.

계수를 갱신하는 Stop-and-Go Algorithm(SGA)를 제안했는데 이 알고리즘에서는 실제 에러의 추정값을 구하는데 필요한 상수 β_n 값을 채널 상태에 따라 다르게 선정해야 하는 문제점을 갖고 있다.

본 논문에서는 M-QAM 수신 신호 성좌를 4분면으로 분할하여 채널 등화를 수행하는 두 가지 알고리즘들을 제안한다. 첫 번째 알고리즘은 MCMA와 같이 신호를 실수와 허수부로 나누어 처리를 하며 신호 성좌를 4분면으로 분할하여 채널 등화를 수행하는 Quadrant-partitioned CMA(QCMA)이다. 두 번째 알고리즘은 SGA 방식이 결정 경계면에 근접한 신호에 대해 결정 에러가 생길 확률이 높기 때문에 사분면으로 분할하여 SGA를 수행하는 Quadrant-partitioned SGA(QSGA)이다. 또한 두 알고리즘들의 결정 케환(decision feedback:DF) 형태인 DF-QCMA 및 DF-QSGA도 제안한다.

2. 4분면 분할 자력복구 채널 등화 알고리즘

제안하는 알고리즘들은 고차(high order) QAM 수신 신호 성좌를 4분면으로 분할하여 저차 QAM 신호로 변환하여 채널 등화를 수행함으로써 수렴 특성 및 속도 면에서 기존 알고리즘보다 우수하다.

2.1 Quadrant-partitioned CMA

수신 심볼 $a(n) = a_R(n) + ja_I(n)$ 을 4분면으로 분할한 심볼 $a_Q(n) = a_{QR}(n) + ja_{QI}(n)$ 의 실수부와 허수부는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} a_{QR}(n) &= a_R(n) - \frac{Q}{2} \operatorname{sgn} a_R(n) \\ a_{QI}(n) &= a_I(n) - \frac{Q}{2} \operatorname{sgn} a_I(n) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $Q = \sqrt{M}$ 이다. 분할한 심볼 $a_Q(n)$ 을 입력으로 한 채널 등화기 출력 $y_Q(n) = y_{QR}(n) + jy_{QI}(n)$ 의 실수부와 허수부는 다음과 같게 된다

$$y_{QR}(n) = y_R(n) - \frac{Q}{2} \operatorname{sgn} y_R(n)$$

$$y_{QI}(n) = y_I(n) - \frac{Q}{2} \operatorname{sgn} y_I(n) \quad (3)$$

여기서 $y(n) = y_R(n) + jy_I(n)$ 은 $a(n)$ 을 입력으로 한 채널 등화기 출력이다. QCMA를 위한 에러 비용 함수 $J_Q(n)$ 를 다음과 같이 표현하자.

$$J_Q(n) = J_{QR}(n) + J_{QI}(n) \quad (4)$$

여기서 $J_{QR}(n)$ 과 $J_{QI}(n)$ 는 각각 $y_{QR}(n)$ 및 $y_{QI}(n)$ 을 위한 비용함수로서 다음과 같이 선정한다.

$$\begin{aligned} J_{QR}(n) &= E[\{|y_{QR}(n)|^2 - R_{Q,R}\}^2] \\ J_{QI}(n) &= E[\{|y_{QI}(n)|^2 - R_{Q,I}\}^2] \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $R_{Q,R}$ 과 $R_{Q,I}$ 는 다음과 같이 $a_Q(n)$ 으로부터 주어진다.

$$R_{Q,R} = \frac{E[|a_{QR}(n)|^4]}{E[|a_{QR}(n)|^2]}, \quad R_{Q,I} = \frac{E[|a_{QI}(n)|^4]}{E[|a_{QI}(n)|^2]} \quad (6)$$

QCMA 채널 등화기 계수 벡터를 결정하는 식 (1)에서 $e(n) = e_Q(n) = e_{QR}(n) + je_{QI}(n)$ 의 실수부와 허수부는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} e_{QR}(n) &= y_R(n)(|y_{QR}(n)|^2 - R_{Q,R}) \\ e_{QI}(n) &= y_I(n)(|y_{QI}(n)|^2 - R_{Q,I}) \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 Quadrant-partitioned SGA

SGA에서는 다른 분면의 심볼이 잘못 수신될 확률이 높은 각 분면 경계선에 근접한 수신 신호를 채널 등화기 계수 갱신에 사용한다. 본 논문에서 제안하는 QSGA에서는 SGA에서 사용하는 Sato⁽²⁾에러 대신 QCMA에서 사용한 에러를 사용하여 계수 갱신을 조정하게 된다. 그림 2는 64-QAM에 대한 QSGA의 계수 갱신 영역을 나타낸다. QSGA 채널 등화기 계수 갱신식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \underline{W}_R(n+1) &= \underline{W}_R(n) - \mu\{f_R(n)\hat{e}_R(n)x_R(n) + f_I(n)\hat{e}_I(n)x_I(n)\} \\ \underline{W}_I(n+1) &= \underline{W}_I(n) + \mu\{f_R(n)\hat{e}_R(n)x_I(n) - f_I(n)\hat{e}_I(n)x_R(n)\} \end{aligned} \quad (8)$$

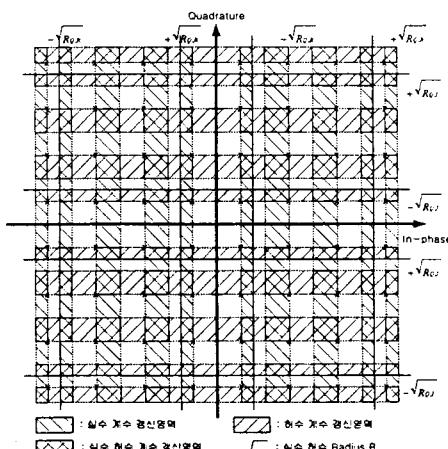


그림 2 . 64-QAM 의 계수 갱신 영역.

여기서 $\hat{e}(n) = \hat{e}_R(n) + j\hat{e}_I(n)$ 은 채널 등화기 출력 $y(n)$ 과 slicer 출력 $\hat{a}(n)$ 사이의 차로써 직접 결정 에러이며 $f_R(n)$ 및 $f_I(n)$ 은 $\hat{e}(n)$ 과 식 (7)의 $e_Q(n)$ 에 의해 다음과 같이 조정된다.

$$\begin{aligned} f_R(n) &= \begin{cases} 1, & \text{if } \operatorname{sgn} \hat{e}_R(n) = \operatorname{sgn} e_{QR}(n) \\ 0, & \text{if } \operatorname{sgn} \hat{e}_R(n) \neq \operatorname{sgn} e_{QR}(n) \end{cases} \\ f_I(n) &= \begin{cases} 1, & \text{if } \operatorname{sgn} \hat{e}_I(n) = \operatorname{sgn} e_{QI}(n) \\ 0, & \text{if } \operatorname{sgn} \hat{e}_I(n) \neq \operatorname{sgn} e_{QI}(n) \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

2.3 DF-QCMA 및 DF-QSGA

제안한 QCMA 및 QSGA를 결정 채널 등화기 형태로 구성할 경우 심볼간 간섭의 constellation 관점에서 그 성능을 입증하기란 쉽지는 않지만 본 논문에서는 그림 3과 같이 결정 채널 등화기 형태로 구성하여 급격한 채널 변화에 적응할 수 있는지에 대한 feasibility를 확인하였다. 결정 채널 등화기 출력은 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{k=-L}^L w_k(n)x(n-k) + \sum_{k=0}^{M-1} v_k(n)\hat{a}(n-k) \quad (10)$$

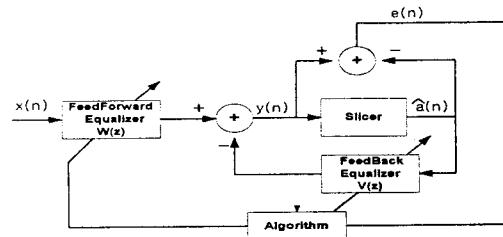


그림 3 . 제안된 DFE 구조도.

3. 시뮬레이션 결과

제안한 알고리즘들의 성능 평가를 위하여 10.76 MHz 전송 심볼률을 갖는 16-QAM과 64-QAM 시스템을 고려하였으며 그림 4의 SGA에서 사용한 채널 임펄스 응답을 적용하였다. 16-QAM과 64-QAM에서 각각 SNR이 20dB 및 60dB 가 되도록 백색 채널 가우시안 노이즈를 고려하였다.

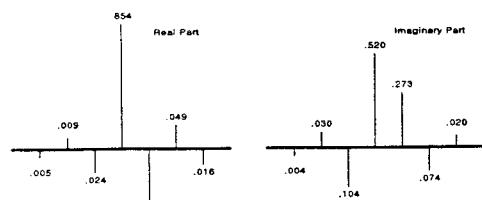


그림 4 . 채널 임펄스 응답

그림 5는 16-QAM의 경우 iteration 수에 따른 각 알고리즘의 MSE 성능을 나타내는데 20,000 iteration 후 QCMA는 약 -20.3 dB로 수렴하게 된다. 그림 6은 수렴후의 신호 성좌를 나타내는데 채널 등화 및 위상 에러 복구 성능이 기존 알고리즘들보다 우수함을 알 수 있다.

그림 7은 64-QAM의 경우 iteration 수에 따른 심볼 에러율(SER)을 나타내는데 30,000 iteration 후 QCMA 및 QSGA 각각 0.175 및 0.0642의 SER을 보인다.

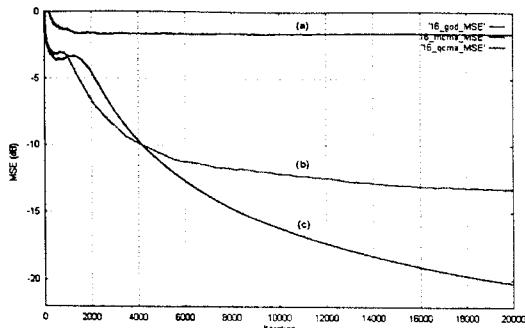


그림 5. 16-QAM의 Iteration 수에 따른 MSE.
(a)CMA, (b)MCMA, (c)QCMA

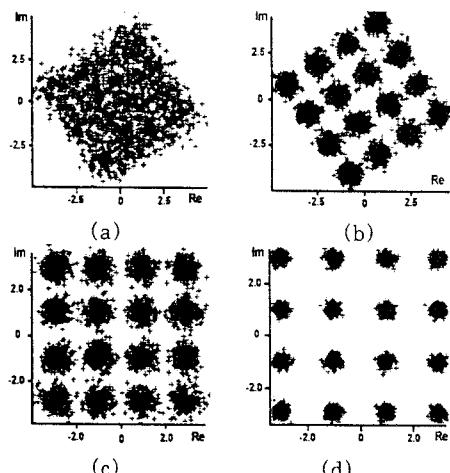


그림 6. 알고리즘 적용전,후의 16-QAM 신호 성좌.
(a)수신 신호, (b)CMA 적용후,
(c)MCMA 적용후, (d)QCMA 적용후

한편 그림 8의 신호 성좌 결과를 보면 (a)CMA 와 (b)SGA 는 채널 등화 및 위상 에러 복구에 실패한 반면 (c)QCMA 는 (a) 및 (b) 보다 open eye 상태이며 (d)QSGA 는 채널 등화와 위상 에러 복구 능력이 우수하다. DF-QCMA 및 DF-QSGA 시뮬레이션 결과는 DF-QCMA 는 QCMA와 그리고 DF-QSGA는 QSGA 결과가 비슷한 성능을 보여주었다.

5. 결 론

QAM 시스템에 적용할 수 있는 제안한 강인한 자력 복구 채널 등화 알고리즘들은 시뮬레이션을 통하여 채널 등화 성능이 기존 알고리즘보다 우수함이 증명되었다. 알고리즘들의 특성상 16, 64, 256등의 QAM 신호에만 적용이 가능한 단점을 보완하여 32, 128 등의 QAM 신호에 적용할 수 있는 알고리즘의 개발이 필요하며 특히 8-VSB 변조 방식에 적용하여 8-VSB HDTV 수신기에 활용할 수 있는지에 대한 연구가 필요하다. 또한 주파수 오차가 존재하는 경우 타 알고리즘과의 성능 비교에 대한 연구가 요구된다.

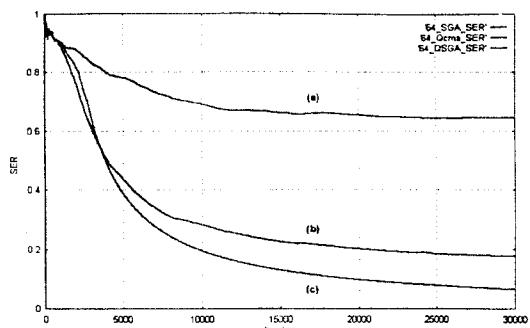


그림 7. 64-QAM의 Iteration 수에 따른 SER.
(a)SGA, (b)QCMA, (c)QSGA

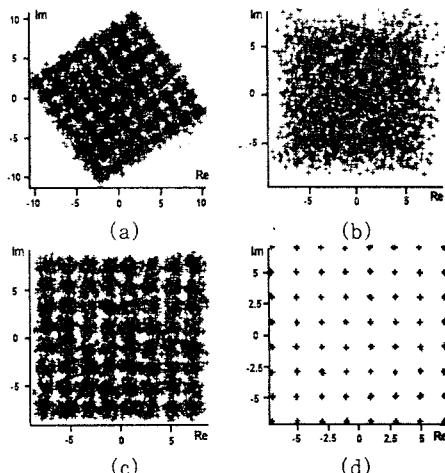


그림 8. 알고리즘 적용전,후의 64-QAM 신호 성좌.
(a)CMA 적용후, (b)SGA 적용후,
(c)QCMA 적용후, (d)QSGA 적용후

[참 고 문 헌]

- [1] A.Benveniste and M. Goursat, "Blind Equalizers," IEEE Trans. Comm., vol. COM-23, pp. 871-883, Aug., 1984.
- [2] Y.Sato, "A method of self-recovering equalization for multilevel amplitude-modulation systems," IEEE Trans. Comm., vol. COM-23, pp. 679-682, June, 1975.
- [3] D. Godard, "Self-recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication systems," IEEE Trans. Comm., vol. COM-35, pp. 1867-1875, Nov., 1980.
- [4] K.N Oh and Y.O. Chin, "New blind equalization techniques based on constant modulus algorithm," Proc. 1995 IEEE GLOBECOM, Singapore, pp. 865-869, Nov., 1995.
- [5] G. Picchi and G. Prati, "Blind equalization and carrier recovery using a "Stop-and-Go" decision-directed Algorithm," IEEE Trans. Comm., vol. COM-35, pp. 877-887, Sep., 1987.