

반송파 동기와 결합한 고차 QAM을 위한 적응 자력등화 알고리즘

°임창현*, 김기윤*, 김동규*, 최형진*

* : 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터공학부

Joint Carrier Recovery and Adaptive Blind Equalization Algorithm for High-level QAM

°Chang Hyun Yim*, Ki Yun Kim*, Dong Kyu Kim*, Hyung Jin Choi*

* : School of Electrical and Computer Eng., SungKyunKwan Univ.

E-mail: tycoon@ece.skku.ac.kr

Abstract

Adaptive channel equalization accomplished without resorting to a training sequence is known as blind equalization. The Constant Modulus Algorithm(CMA) and Modified CMA(MCMA) are widely referenced algorithms for blind equalization of a QAM system.

This paper proposes a hybrid scheme of CMA and MCMA with Carrier Recovery that is robust for high level QAM with low steady state tracking error.

I. 서론

디지털 통신시스템에서는 대역제한채널특성으로 인접심볼간의 간섭이 발생하여 시스템 성능을 저하시키는 주요 요소이다. 특히 고차 QAM 시스템에서는 다중레벨 특성 때문에 ISI현상이 더욱 더 심각하다.

적응 등화(adaptive equalization)는 ISI를 줄이기 위한 기법으로 훈련등화와 자력등화로 분류할 수 있다. 송,수신단 사이에 이미 약속된 신호열인 훈련열(train sequence)을 이용하여 최적의 등화기 탭 계수를 추정하는 방법을 훈련등화라 한다. 그러나 훈련열이 아닌 단지 수신신호만을 이용하여 적응적으로 채널을 등화하는 기법을 자력등화라 하는데 다지점 통신망(multipoint network)과 같이 훈련열을 이용할 수 없는 시스템에 적용 가능한 등화기법이다. 대표적인 자력등화 알고리즘으로 CMA[1], DM-CMA[2], MCMA[3], DM-MCMA[3] 등 다양한 알고리즘들이 있다.

본 논문에서는 CMA 또는 MCMA를 적용한 자력

등화 알고리즘인 HYBRID 알고리즘을 제안하였으며 반송파 동기회로와 결합할 경우 자력등화 알고리즘들간의 비교 및 성능 분석을 하였다.

본 논문의 전체구성은 다음과 같다. II에서 자력등화 알고리즘의 전반적인 개요와 특성에 대해서 살펴본다. III에서는 반송파 동기 알고리즘에 대해서 살펴보고 IV에서는 모의수행을 통해 반송파 동기회로와 결합한 자력등화 알고리즘들의 성능평가를 수행하고 V에서 결론을 맺는다.

II. 적응 자력등화 알고리즘

그림 1과 같이 송신심볼 $a(n)$ 은 QAM으로 변조된 후 기저대역 ISI 채널 $h(n)$, 잡음 채널 $v(n)$ 을 통과한 후, 탭 계수 N 인 FIR 필터로 구성된 등화기에 입력이 되며 등화기 출력신호 $y(n)$ 는 다음과 같다.

$$y(n) = \sum_{k=0}^{N-1} h(k)a(n-k)e^{j\theta(n)} + v(n) \quad (1)$$

등화기의 탭 계수는 훈련등화일 경우 식(2)와 같이 평균제곱오차(Mean Square Error)를 최소화하도록 탭 계수를 갱신한다.

$$E[|e(n)|^2] = E[|q(n)e^{-\theta(n)} - a(n)|^2] \quad (2)$$

그리고 자력등화일 경우 사전 송신심볼 통계적 특성과 등화기 출력신호 특성을 비유함수 $J(k)$ 로 정의하여 이 비유함수가 최소화하도록 식(3)와 같이 확률 경사도법 알고리즘(stochastic gradient algorithm)을 적

용하여 적응적으로 탭 계수를 갱신하게 된다.

$$C(k+1) = C(k) - \mu \nabla \hat{J}(k) \quad (3)$$

$$= C(k) - \mu e(k) X^*(k)$$

여기서 $e(k)$ 는 오차 추정 함수, μ 는 수렴율 (stepsize)를 뜻한다. 식(3)의 오차 추정 함수 $e(k)$ 를 어떻게 정의하느냐에 따라 자력등화 알고리즘들을 분류할 수 있다.

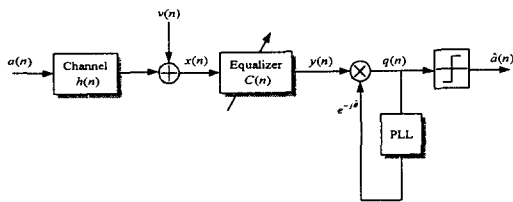


그림 1. 시스템 모델

1. CMA(Constant Modulus Algorithm)

Godard가 제안한 알고리즘으로서 QAM변조신호에 적용이 가능하며 일반적으로 수렴하는 특성을 지닌 알고리즘이다[1]. CMA의 비용함수는 다음과 같다.

$$J(n) = E[(|y(n)|^2 - R^2)^2] \quad (4)$$

여기서, $E[\cdot]$ 는 통계적 기대값을 나타내며 R^2 은 송신신호 $a(n) = a_R(n) + ja_I(n)$ 에 의존하는 상수를 뜻한다.

$$R^2 = \frac{E[|a(k)|^4]}{E[|a(k)|^2]} \quad (5)$$

식(4)를 식(3)에 적용하면 다음과 같은 CMA의 오차 추정 함수를 구할 수 있다.

$$e(k) = y(k)(|y(k)|^2 - R^2) \quad (6)$$

이 알고리즘은 반송파 옵셋에 상관없이 반송파 동기회로가 동작하는 특성을 지니지만 수렴속도가 늦은 단점을 지닌다.

2. DM-CMA(Dual-Mode CMA)

이중모드(Dual-Mode) CMA는 신호성좌점의 다중 반경을 이용하여 오차추정함수를 정의한 알고리즘이다 [2]. 등화기 출력신호의 결정영역에 따라 CMA 또는 RDE(Radius Directed Equalization) 알고리즘으로 탭 계수를 갱신하는 방법이다.

각 결정영역 D_k 은 $R_k - d$ 부터 $R_k + d$ 까지 이루어져 있다. 여기서 $R_k, k=1,2,\dots$ 는 각 신호점들의 반경거리, d 는 반경차를 의미한다. DM-CMA는 등화기의 출력신호가 결정영역안에 속하면 그 영역의 반경(R_k)를 이용하고 결정영역외에 속하면 CMA의 반경(R)을 이용한다. DM-CMA의 오차추정 함수는 다음과 같다.

$$e(k) = y(k)(|y(k)|^2 - R_k^2), \quad y(k) \in D_k, \quad k=1,2,\dots \quad (7)$$

$$e(k) = y(k)(|y(k)|^2 - R^2), \quad y(k) \notin D_k, \quad k=1,2,\dots \quad (8)$$

이 알고리즘은 대체적으로 CMA보다 낮은 MSE를 가지며 반경차에 따라 MSE 성능을 좌우하므로 채널에 따라 적절한 값을 적용해야 한다.

3. DM-MCMA(Dual-Mode MCMA)

DM-MCMA는 식(9)와 같이 CMA의 비용함수를 각각 in-phase와 quadrature 성분에 대해서 정의한 알고리즘인 MCMA[3]와 다중 레벨의 개념을 적용하여 결합한 알고리즘이다[3].

$$J(k) = J_I(k) + J_Q(k) \quad (9)$$

$$J_I(k) = E[(y_I^2 - M_I^2)^2], \quad M_I^2 = \frac{E[a_I^4]}{E[a_I^2]} \quad (10)$$

$$J_Q(k) = E[(y_Q^2 - M_Q^2)^2], \quad M_Q^2 = \frac{E[a_Q^4]}{E[a_Q^2]} \quad (11)$$

정상상태에서 CMA는 임의의 위상 회전(phase rotation)이 일어나므로 수신신호를 복조하기 위해서는 별도의 반송파 동기회로가 필요하다. 또한 고차 QAM (예:64, 256)일수록 반경 분포가 균일하지 않은 특성을 지닌 반면 MCMA는 이 CMA의 단점을 보완한 알고리즘이며 대체적으로 CMA보다 더 낮은 MSE를 갖는 특성을 지닌다. 그러나 수신신호에 큰 반송파 옵셋이 있을 경우 전체 신호성좌점의 크기가 줄어드는 현상이 발생한다. 그러므로 반송파 동기회로와 결합하여 동작시킬 경우 위상검출기(PD) 알고리즘에 따라 DM-MCMA의 성능이 결정된다. 즉 등화기와 반송파 동기회로가 서로 영향을 주는 관계라 할 수 있다.

In-phase와 quadrature 성분에 대해서 $M_{I,Q,k} - d$ 부터 $M_{I,Q,k} + d$ 까지 이루어진 결정영역 $D_{I,k}, D_{Q,k}$ 을 도시하였다. 결정영역안에 속할 경우 $y_I(k), y_Q(k)$ 에 가장 가까운 신호 성분인 $M_{I,k}, M_{Q,k}$ 속하지 않을 경우 MCMA의 성분인 M_I, M_Q 를 이용하는 알고리즘이다.

DM-MCMA의 오차 추정 함수는 다음과 같다.

$$e(k) = e_I(k) + je_Q(k) \quad (12)$$

$$e_I(k) = \begin{cases} y_I(k)(y_I^2(k) - M_{I,k}^2), & y_I(k) \in D_{I,k} \\ y_I(k)(y_I^2(k) - M_I^2), & y_I(k) \notin D_{I,k} \end{cases} \quad (13)$$

$$e_Q(k) = \begin{cases} y_Q(k)(y_Q^2(k) - M_{Q,k}^2), & y_Q(k) \in D_{Q,k} \\ y_Q(k)(y_Q^2(k) - M_Q^2), & y_Q(k) \notin D_{Q,k} \end{cases} \quad (14)$$

$$M_{I,k}^2 = \frac{E[y_I^4]}{E[y_I^2]^2}, \quad M_{Q,k}^2 = \frac{E[y_Q^4]}{E[y_Q^2]^2} \quad (15)$$

4. HYBRID 알고리즘

본 논문에서 제안하는 알고리즘으로 그림 2와 같이 결정 영역에 따라 DM-CMA 또는 DM-MCMA를 적용하는 알고리즘이다. 고차 QAM에서 수신신호에 ISI 성분과 큰 반송파 오프셋이 있을 경우 초기에는 ISI 영향으로 인하여 결정영역외에 속하는 신호가 많으므로 DM-CMA으로 ISI 성분을 제거하고 동시에 반송파 동기회로가 동작하여 반송파 오프셋을 크게 줄인다. 정상 상태에서는 대부분의 신호가 분할영역안에 속하게 되므로 DM-MCMA으로 탭 계수를 갱신하면 단일 자력동화 알고리즘을 적용하는 경우보다 MSE를 더 줄일 수 있는 장점을 지닌 알고리즘이다. 즉 HYBRID 알고리즘은 각 DM-CMA, DM-MCMA의 장점만을 적용한 알고리즘이라 할 수 있다.

HYBRID의 오차추정함수는 다음과 같다.

$$e_{I,Q}(k) = \begin{cases} y_{I,Q}(k)(y_{I,Q}^2(k) - M_{I,Q,k}^2), & y_{I,Q}(k) \in D_{I,Q,k} \\ y(k)(|y(k)|^2 - R^2), & y(k) \notin D_k \end{cases} \quad (16)$$

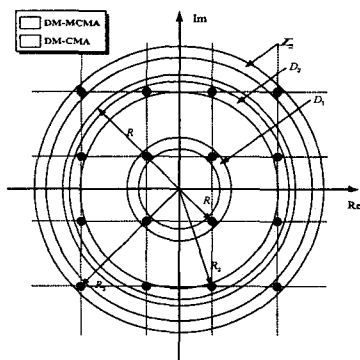


그림 2. HYBRID의 결정 영역(16QAM)

III. 반송파 동기

반송파 동기 회로는 그림 3과 같이 PD(Phase

Detector), 2차 능동필터, VCO로 구성된다. PD 알고리즘으로 DD(Directed Decision)알고리즘으로 전송된 심볼이 수신된 심볼의 가장 가까운 성좌점으로 판정된 위상을 검출하는 것이다. 이 알고리즘은 심볼 임계 레벨을 심볼사이의 거리 중간 지점으로 선택하고 심볼 결정을 수행한다. 동기화 출력신호($q(n)$)가 어떤 심볼 영역($\hat{a}(n)$)안으로 들어왔을 때 수신된 신호와 그 지점 심볼간의 위상 검출에러는 식(17)과 같이 계산되어질 수 있다.

$$\Psi(n) = \text{Im} \left[\frac{\hat{a}(n)}{q(n)} \right] \quad (17)$$

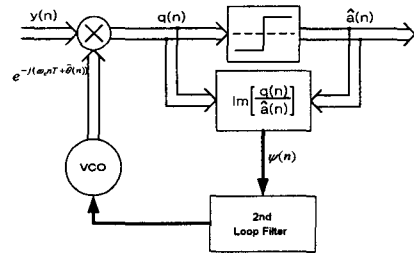


그림 3. 반송파 동기 블록도

IV. 모의 수행 결과 및 분석

본 논문에서 64QAM 변조 신호에 대해서 제안한 HYBRID 알고리즘과 기존의 자력동화 알고리즘들을 성능 비교를 하였다. 동기화의 입력 신호의 전력을 정규화하였으며 식(18)와 같이 SNR은 40[dB]로 설정하였다.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{E[|a(n) * h(n)|^2]}{\sigma^2} \quad (18)$$

그리고 기저대역 등가 ISI 채널은 [4]에서 제시한 채널을 채택하였으며 23탭($N=23$)으로 구성된 동기회로를 사용하였으며 수렴율은 1×10^{-3} 로 설정하였다.

그림 4는 반송파 오프셋이 없을 경우 DM-MCMA, HYBRID, DM-CMA, CMA 순으로 성능이 우수하지만 그림 5와 같이 반송파 오프셋($\Delta f T = 0.02$)이 있을 경우 HYBRID, DM-CMA, CMA, DM-MCMA 순으로 성능이 우수함을 알 수 있다. 그러므로 반송파 오프셋이 클 경우 DM-MCMA는 수렴속도가 늦고 MSE가 크다는 단점을 가지고 있다.

V. 결론

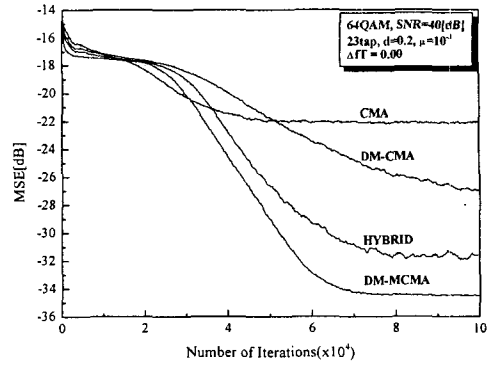
본 논문에서는 다중모드 개념과 CMA와 MCMA의 장점을 결합한 HYBRID 알고리즘을 제시하였으며 반

송과 동기회로와 결합하여 모의 수행을 통하여 HYBRID알고리즘이 기존 자력등화 알고리즘보다 우수한 성능을 가진다.

♣ 감사의 글: 본 논문은 (주)현대전자의 지원으로 수행된 산학연구과제 “통합 유선 케이블용 모뎀 알고리즘 및Chip 설계기술 개발” 결과중 일부임.

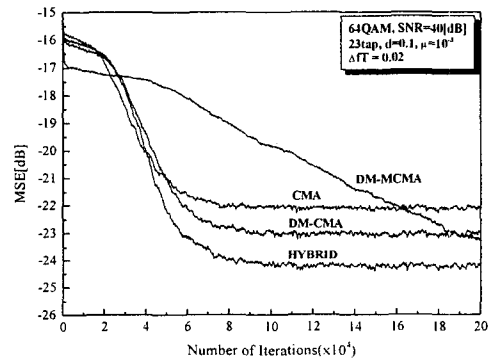
【참고문헌】

- [1] D. N. Godard, "Self-Recovering Equalization and Carrier Tracking in Two-Dimensional Data Communication Systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-28, pp. 1867-1875, Nov. 1980.
- [2] V. Weerackody and S. A. Kassam, "Dual-Mode Type Algorithms for Blind Equalization," *IEEE Trans Commun.*, vol. COM-42, pp. 22-28, Jan. 1994.
- [3] K. N. Oh, "A Single/Multilevel Modulus Algorithm for Blind Equalization of QAM Signals," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E80-A, no. 6, pp. 1033-1039, June 1997.
- [4] D. Hatzinakos and C. L. Nikias, "Blind Equalization Using a Tricepstrum-Based Algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-39, pp. 669-682, May 1991.

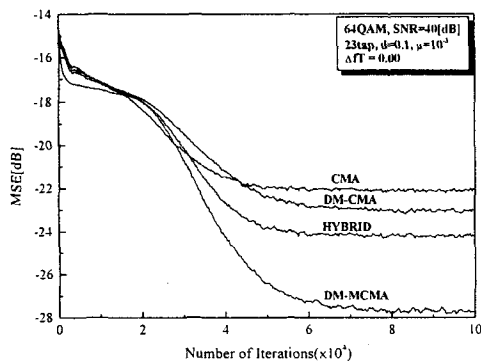


(b) $d = 0.2$ 일 경우의 MSE

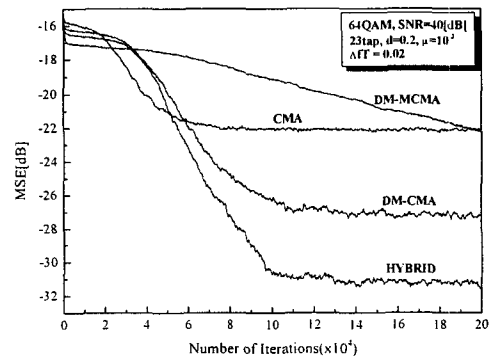
그림 4. 주파수 오프셋이 없을 경우(64QAM)



(a) $d = 0.1$ 일 경우의 MSE



(a) $d = 0.1$ 일 경우의 MSE



(b) $d = 0.2$ 일 경우의 MSE

그림 5. 주파수 오프셋이 있을 경우 ($\Delta fT=0.02$)