

저밀도 심볼점과 고밀도 심볼점을 선택적으로 이용하는 블라인드 등화

오길남*

Blind Equalization Selectively Using Coarse Symbol Constellation and Dense Symbol Constellation

Kil Nam Oh*

요 약

블라인드 등화 시에, 송신된 심볼점과 이로부터 증가적으로 유도된 심볼점을 선택적으로 적용하여 오차를 발생시키고, 이를 이용하여 등화기를 갱신하는 방법을 제안한다. 제안 방법은 심볼 추정의 정확도 향상과 오차 개선에 효과적인 심볼점을 각각 적용하여 등화기 출력의 눈모형을 빠르게 열리게 하면서 동시에 오차 성능을 개선할 수 있음을 보였다. 심볼점을 적용하는 기준으로는 등화기 출력이 형성하는 심볼점들의 분산을 사용하였다. 아울러 등화기 갱신의 정확도를 높이기 위해 현재 및 이전 분산을 활용하여 오차를 조절하였다. 모의실험을 통해 잡음이 부가된 다중경로 채널 하에서 64-QAM에 대해 제안 방식의 등화 성능을 검증하였다.

Key Words : Intersymbol interference, Symbol estimation, Coarse/Dense constellation, Eye diagram

ABSTRACT

For blind equalization, we propose a method of updating an equalizer, which generates an error from selectively applying a transmitted symbol constellation and that of induced equivalently from the transmitted symbol constellation and updates the equalizer by using this error. The proposed method, by selectively using the symbol constellation effective for improvement of symbol estimation accuracy and that of effective for improvement of error performance, showed that it is possible to improve the error performance at the same time to open the eye diagram of equalizer output quickly. As a criterion applying the symbol constellation, we used the dispersion of symbol points of equalizer output. In addition, to increase the accuracy of updating an equalizer the error was controlled by using current and previous dispersions. By simulation, under multipath channel with additive noise, we verified the equalization performance of the proposed method for 64-QAM.

I. 서 론

디지털 통신 시스템에서 채널에 의해 왜곡된 수신 심볼에 대한 등화는 수신단의 등화기가 수신 심볼로부터 송신 심볼을 복원할 수 있도록 등화기 탭 계수를

설정하는 것으로 이루어진다. 이때 채널의 전달함수 또는 임펄스 응답을 사전에 알고 있다면 수신단에서는 등화기 특성이 채널 특성의 역이 되도록 등화기의 탭 계수를 설정하면 될 것이다. 그러나 채널 특성을 사전에 알지 못하거나 시변이라면 위와 같은 방법을

* 이 연구는 2013년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

• First Author : Dept. of Optical Communications Engineering, Gwangju University, knoh@gwangju.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2014-08-303, Received August 18, 2014; Revised October 6, 2014; Accepted October 8, 2014

적용할 수 없다.

이러한 경우에는 그림 1에 보인 송신기 Tx와 채널 H, 그리고 등화기 W 등으로 이루어지는 전체 시스템에서, 관찰된 등화기 출력으로부터 임계 판정 장치에 의해 송신 심볼을 추정하고 추정된 송신 심볼과 등화기 출력 간의 차이, 즉 오차가 최소가 되도록 등화기의 탭 계수를 반복적으로 조절해가는 방법이 사용된다. 이와 같은 임계 판정 장치에 의거한 판정의거 (decision-directed: DD) 등화^[1]는 등화기가 채널 특성의 역에 어느 정도 근사된 이후에 심볼 추정의 정확도를 보이기 때문에 흔히 등화기를 학습시키기 위한 데이터 의존(data-aided: DA) 등화가 함께 사용된다. 즉 DA에 의해 등화기의 초기화를 달성한 후에 DD로 전환하는 것이 필요하다. 이는 등화기 초기화에 DD를 사용할 수 없음을 의미한다.

등화기의 초기화를 위해 사용하는 DA 등화에서는 주기적으로 미리 알고 있는 학습열을 수신하고 이를 이용하여 등화기를 초기화한 후 DD 등화로 전환한다. 그러나 디지털 통신 시스템에서는 주기적으로 학습열을 보낼 수 없는 경우가 대부분이고, 학습열을 보내는 것이 큰 부하가 될 수 있다. 또한 학습열을 주기적으로 전송하는 것은 그만큼 전송 대역폭을 할당해야 하므로 전송효율을 떨어뜨리고 시스템 복잡도를 증가시킨다.

등화기의 초기화에 학습열을 사용하지 않는 블라인드 등화에서는 오차를 산출하기 위한 기준 심볼(reference symbol)을 발생시켜야 한다. 이를 위해 등화기 다음에 비선형 추정기 $G(\cdot)$ 를 두어 송신 심볼을 추정하고 이를 기준 심볼로 삼아 오차를 산출한다. 비선형 추정기는 기준 심볼과 함께 형성되며 사용되는 심볼점에 따라 결정된다.

최근까지 다양한 비선형 추정기의 적용에 따라 Sato 알고리즘^[2]을 비롯하여 Godard 알고리즘^[3] 등 여러 알고리즘이 제안되었다. 이들 알고리즘의 특징은 원심볼점 대신 특별하게 정해지는 저밀도 심볼점을 사용하여 송신 심볼을 추정하는 점이다. 저밀도 심볼점은 원심볼점의 가능한 심볼 집합에서 심볼점의 수를 크게 줄인 것으로서, 이를 이용한 심볼 추정은 오판 확률을 낮추며 결과적으로 등화기의 오조정 가능성을 줄인다. 저밀도 심볼 추정은 정확도를 높여 등화기의 오조정을 피함으로써 눈모형을 빠르게 여는 방법이라 할 수 있다.

그러나 저밀도 심볼 추정은 닫힌 눈모형을 열리게 하는 데는 탁월하나 등화기가 잔류 오차 레벨이 큰 상태로 수렴하는 현상을 피할 수 없다. 이 문제에 대한 방안으로, 눈모형이 어느 정도 열리기 시작하면 저밀도 심볼 추정을 중단하고 고밀도 심볼 추정으로 전환하는 방법^[4]이 제안되었다. 또한 매 iteration 마다 저밀도 심볼 추정과 고밀도 심볼 추정을 동시에 수행하는 방법^[5] 등도 제안되었다.

본 논문에서는 저밀도 심볼 추정과 고밀도 심볼 추정을 선택적으로 적용하는 등화 방법을 제안한다. II장에서 저밀도 심볼점과 고밀도 심볼점을 사용한 심볼 추정을 소개하고, III장에서 심볼 추정을 선택적으로 이용하는 등화 구조를 제안하고 심볼점을 선택하는 기준과 오차 산출을 기술한다. IV장에서 제안 방법을 기존 방법과 비교 평가한 결과를 기술하고, V장에서 결론을 요약한다.

II. 저밀도 심볼점과 고밀도 심볼점

등화기 갱신에 있어서 최적 탭 계수에 빠르게 도달

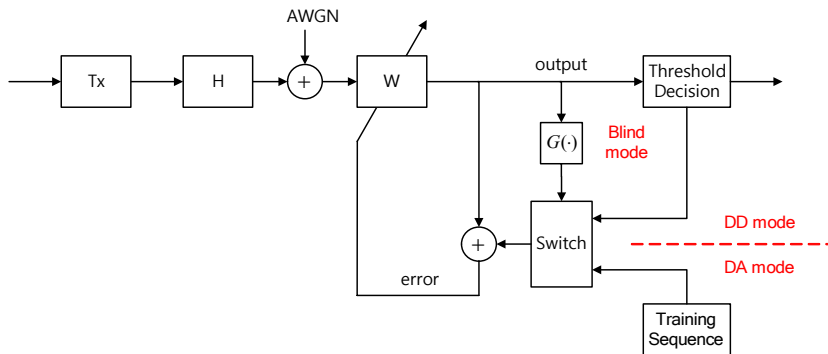


그림 1. 송신기, 채널 및 등화 시스템
Fig. 1. Transmitter, channel, and equalization system.

하기 위해서는 탭 계수 갱신이 최적 탭 계수를 향하는 것뿐만 아니라, 최적 탭 계수로부터 멀어지는 방향으로 진행되지 않는 것도 중요하다. 즉 심볼 추정의 정확성을 높이는 것과 동시에 잘못된 추정을 줄이는 것이 필요하다. 이러한 관점에서 눈모형이 닫힌 상태에서는 저밀도 심볼 추정이 고밀도 심볼 추정에 비해 안전하다. 저밀도 심볼점의 특징은 기준 심볼을 원심볼점의 비트 수 보다 적은 비트로 나타내는 것이다. 예를 들면, sign 알고리즘은 송신 심볼을 1 비트, 즉 +/-로 추정하며, Sato 알고리즘과 constant modulus algorithm(CMA)^[3]도 송신 심볼을 원심볼점 보다 적은 비트로 표현되는 저밀도 심볼점으로 추정한다.

저밀도 심볼 추정 알고리즘에는 이 외에도 Sato 알고리즘을 이차원 심볼점으로 일반화한 B-G 알고리즘^[2]과 축소 심볼점 알고리즘(RCA)^[6], 이차원 심볼점을 두 일차원 심볼점으로 간주하여 각각에 대해 일정 모듈러스를 적용함으로써 위상 회전 문제를 해결한 변형된 CMA(MCMA)^[7], 연판정의거(soft decision-directed: SDD) 알고리즘^[8]의 계산 복잡성을 감소시킨 단순화된 SDD(SSDD) 알고리즘^[9] 등이 있다. 이들 알고리즘에서 사용되는 오차와 저밀도 심볼점을 표 1에 정리하였다.

표 1의 수식에서 $y(n)$, $y_R(n)$, $y_I(n)$ 은 각각 등화기 출력과 그 실수 및 허수 성분, $a(n)$, $a_R(n)$, $a_I(n)$ 은 각각 송신 심볼점과 그 실수 및 허수 성분, 그리고 γ_1 , γ_2 , Γ , Γ_R , Γ_I 등은 저밀도 심볼점을 나타낸다. 저밀도 심볼점을 사용한 심볼 추정은 거친 추정을 하는 것이 특징이다.

한편 고밀도 심볼 추정 알고리즘에는 표 2에 나타낸 바와 같이, 원심볼점을 사용한 판정의거 알고리즘^[1]과 경판정 대신 아날로그적인 값을 넘으로써 오판정에 따른 위험을 감소시킨 SDD 알고리즘^[8], 그리고 QAM 심볼점의 반경을 기준 심볼로 하는 RDE(radius directed equalization) 알고리즘^[10]과 MRD (multimodulus radius-directed) 알고리즘^[11] 등이 있다. 이들 알고리즘에서 사용되는 오차와 그에 사용되는 고밀도 심볼점을 표 2에 나타내었다. 표의 수식에서 $\hat{a}(n)$, s_i , γ_i , 등은 고밀도 심볼점이며, 고밀도 심볼점을 사용한 심볼 추정은 미세 추정이 특징이다.

III. 기준 심볼점을 선택적으로 이용한 심볼 추정

제안 방법에서는 저밀도 심볼점과 고밀도 심볼점을 선택적으로 적용하여 심볼을 추정하고 오차를 산출하여 등화기를 갱신함으로써 등화기 출력에 적합한 등화기 갱신이 이루어지도록 하였다. 제안 알고리즘의 핵심은, 눈모형이 열리기 전에는 저밀도 심볼 추정을 적용하여 완전히 닫힌 눈모형을 빠르게 열리게 하고, 눈모형이 열린 후에는 고밀도 심볼 추정을 통해 오차 레벨을 개선하는 점이다.

제안하는 등화 구조를 그림 2에 보였다. 등화기 출력에 따라 심볼점을 선택하고 오차를 발생시키는 부분, 그리고 현재 오차를 조절하는 부분 등을 포함하였다. 제안 방법에서는 저밀도 심볼 추정과 고밀도 심볼 추정의 선택 방법을 고안하고, 이를 통해 저밀도 추정에서 고밀도 추정으로 진행하도록 하였다. 본 논문에서는 저밀도 추정에 표 1의 SSDD 알고리즘을, 고밀도 추정에 표 2의 DD 알고리즘을 적용하였다.

표 1. 저밀도 심볼점에 따른 오차와 저밀도 심볼점
Table. 1. Errors according to coarse symbol constellation and coarse symbol constellations.

알고리즘	오차	저밀도 심볼점
Sato 알고리즘	$e^{Sato}(n) = y(n) - \gamma_1 \text{sgn}(y(n))$	$\gamma_1 = \frac{E[a(n) ^2]}{E[a(n)]}$
RCA 알고리즘	$e^{RCA}(n) = y(n) - \gamma_2 \text{csgn}(y(n))$	$\gamma_2 = \frac{E[a_R(n) ^2]}{E[a_R(n)]} = \frac{E[a_I(n) ^2]}{E[a_I(n)]}$
CMA 알고리즘	$e^{CMA}(n) = y(n)(y(n) ^2 - \Gamma)$	$\Gamma = \frac{E[a(n) ^4]}{E[a(n) ^2]}$
MCMA 알고리즘	$e^{MCMA}(n) = y_R(n)(y_R(n) ^2 - \Gamma_R) + jy_I(n)(y_I(n) ^2 - \Gamma_I)$	$\Gamma_R = \frac{E[a_R(n) ^4]}{E[a_R(n) ^2]}, \Gamma_I = \frac{E[a_I(n) ^4]}{E[a_I(n) ^2]}$
SSDD 알고리즘	$e^{SSDD}(n) = y(n) - a \frac{\exp(2ay(n)/\sigma^2) - 1}{\exp(2ay(n)/\sigma^2) + 1}, \sigma^2 : \text{분산}$	$\pm a$

표 2. 고밀도 심볼점에 따른 오차와 저밀도 심볼점
Table. 2. Errors according to dense symbol constellation and dense symbol constellations.

알고리즘	오차	고밀도 심볼점
DD 알고리즘	$e^{DD}(n) = y(n) - \hat{a}(n)$	$\hat{a}(n) = \text{dec}(y(n))$
SDD 알고리즘	$e^{SDD}(n) = \sum_{i=1}^M \exp(- y(n) - s_i ^2 / 2\sigma^2)(y(n) - s_i), \sigma^2: \text{분산}$	$s_i \in \{s_1, s_2, \dots, s_M\}$
RDE 알고리즘	$e^{RDE}(n) = y(n)(y(n) ^2 - \gamma_i)$	$\gamma_i: \text{QAM 심볼점의 radii}$
MRD 알고리즘	$e^{MRD}(n) = y_R(n)(y_R^2(n) - \hat{a}_R^2(n)) + j[y_I(n)(y_I^2(n) - \hat{a}_I^2(n))]$	$\hat{a}_R(n) = \text{dec}(y_R(n))$ $\hat{a}_I(n) = \text{dec}(y_I(n))$

등화기가 충분히 수렴하면 등화기 출력은 원심볼점에 가까운 뚜렷한 심볼점을 형성하고 이때 등화기 출력의 분산은 매우 작다. 그러나 등화기가 수렴하지 못하면 등화기 출력은 뚜렷한 심볼점을 형성하지 못하고 심볼점 근처에 퍼져 분산이 크게 된다. 그러므로 출력의 분산을 이용해서 적용할 심볼점을 판단할 수 있다. 즉 분산이 일정한 범위 내에 들면 고밀도 심볼점, 그렇지 않으면 저밀도 심볼점에 의해 오차를 산출한다. 이는 결과적으로 심볼 추정과 오차의 정확도에 영향을 미치고 등화기 탭 계수 갱신에 영향을 주어 수렴 속도와 잔류 오차 레벨로 나타난다.

먼저 등화기 출력 $y(n)$ 을 관찰하고

$$y(n) = X^T(n) W(n) \tag{1}$$

여기서 $X(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]^T$ 와 $W(n) = [w_0(n), w_1(n), \dots, w_{N-1}(n)]^T$ 는 각각 등화기 입력 데이터 벡터와 길이가 N 인 등화기 탭 계수 벡터를 나타낸다. 다음, 등화기 출력 $y(n)$ 과 최인접 심볼 추정 $\hat{a}(n)$ 과의 차이의 제곱, 즉 분산 $\sigma^2(n)$ 을 계산한다.

$$\sigma^2(n) = |y(n) - \hat{a}(n)|^2 \tag{2}$$

$\sigma^2(n)$ 값의 범위에 따라 현 iteration에서의 오차 $e(n)$ 은 다음 두 기준에 의해 발생된다. 여기서 이를 판단하기 위한 β 는 두 인접한 심볼 간의 차이를 이용하여 실험적으로 정하였다. 이후 수식의 간결한 표현을 위해 일차원 심볼점에 대해 전개하나, 이차원 심볼점에 대해서도 그대로 확장되며, 이차원 심볼점의 실수 성분과 허수 성분 각각에 대해서 일차원 심볼점의 경우와 마찬가지로 표현된다.

(i) 분산이 β 보다 크면 저밀도 심볼점을 이용한 SSDD 오차를 적용한다. SSDD 오차를 M-PSK로 확장하기 위해 저밀도 심볼점 γ 를 적용하면 오차는,

$$e(n) = y(n) - \gamma \frac{\exp(2\gamma y(n)/\sigma^2) - 1}{\exp(2\gamma y(n)/\sigma^2) + 1} \tag{3}$$

가 된다. 여기서 γ 는 다음으로 주어진다.

$$\gamma = \frac{E[|a(n)|^2]}{E[|a(n)|]} \tag{4}$$

(ii) 분산이 β 이내 이면 고밀도 심볼점을 이용한 DD 오차를 적용한다.

$$e(n) = y(n) - \hat{a}(n) = y(n) - \text{dec}(y(n)) \tag{5}$$

여기서 $\hat{a}(n)$ 은 고밀도 심볼점을 나타낸다.

다음, 등화기 갱신의 정확도를 높이기 위해 현재 오차를 조절하였다. 조절된 오차를 $\epsilon(n)$ 이라 하면

$$\epsilon(n) = \alpha(n) e(n) \tag{6}$$

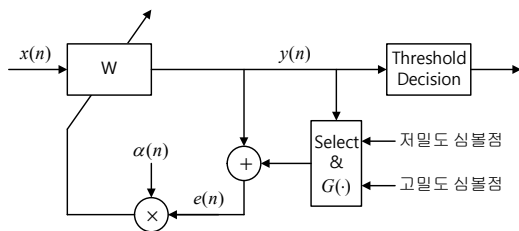


그림 2. 심볼점을 선택적으로 이용하는 등화 구조
Fig. 2. Equalization structure selectively applying symbol constellation.

으로 설정하였다. 이때 현재 분산과 이전 분산을 이용해서 $\alpha(n)$ 을 다음과 같이 정하였다.

$$\alpha(n) = \frac{\sigma^2(n)}{\sigma^2(n) + \sigma^2(n-1)} \quad (7)$$

여기서 $\sigma^2(n)$ 과 $\sigma^2(n-1)$ 은 각각 현재 및 바로 이전의 분산이다. $\sigma^2(n)$ 의 범위는 $0 \leq \sigma^2(n) \leq 1$ 이며, 분산이 1에 가까울수록 등화기 출력이 두 심볼의 경계에 가까이 위치하므로 오차의 정확도는 0.5에 가깝다. 분산이 0에 접근하면 등화기 출력은 심볼점의 중심에 놓이므로 오차의 정확도는 1에 접근한다. 이러한 점을 반영하여 두 분산의 상대적 비에 따라 오차를 조절하였다. 조절된 오차 (6)을 이용하여 등화기 최적화는 SGD(stochastic gradient descent) 알고리즘에 의해 달성된다.

$$W(n+1) = W(n) - \mu \epsilon(n) X^*(n) \quad (8)$$

여기서 μ 는 수렴 상수, $X^*(n)$ 는 등화기 입력 데이터 벡터의 복소 공액(complex conjugate)이다.

IV. 실험 결과

모의실험은 64-QAM 심볼점에 대해 가우시안 잡음이 부가된 다중경로 채널에서 심볼간 간섭(ISI) 제거 성능과 MSE 성능, 그리고 심볼점 형성 성능을 모두 측정하였다. 실험에 사용된 다중경로 채널^[2]은 다중경로 전파에 의해 진폭 및 위상 왜곡을 보이는 음성 대역 채널이며, 7-tapped delay line 모델로 구현되었다.

부가 잡음은 비트당 에너지대 잡음밀도 E_b/N_0 를 사용하여 64-QAM에 대해 $E_b/N_0 = 20$ dB를 적용하였다. 등화기 출력의 분산을 계산 시 이동 평균을 적용하였고, β 는 인접한 두 심볼점의 차이 D 의 $(D/4)^2$ 으로 설정하였다. 제안 방식의 성능을 널리 사용되던 CMA 및 SSDD 알고리즘과 비교하였으며, 또한 저밀도 심볼점과 고밀도 심볼점을 동시에 사용한 방식과 비교하기 위해 CMA+DD 동시 알고리즘의 성능을 함께 조사하였다.

먼저 그림 3에 보인 심볼간 간섭 제거 성능에서, CMA와 SSDD는 유사한 성능을 보였으며, CMA+DD와 제안 방식은 CMA와 SSDD에 비해 각각 9 ~ 10 dB와 20 ~ 21 dB 정도 개선한 성능을 보였다. 그림 4에 보인 MSE 성능에서도 CMA와 SSDD

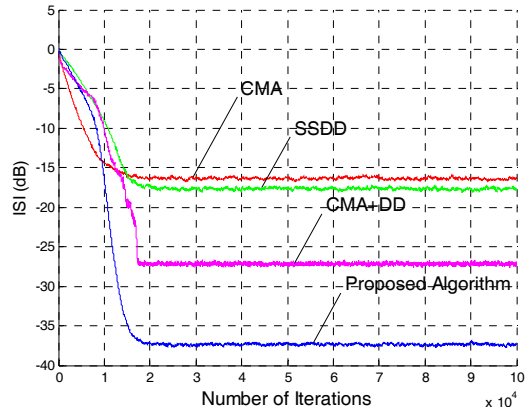


그림 3. 64-QAM에 대한 심볼간 간섭 성능, $E_b/N_0 = 20$ dB
Fig. 3. ISI performance for 64-QAM, $E_b/N_0 = 20$ dB.

는 유사한 성능을 보였으며, CMA+DD와 제안 방식은 두 방식에 비해 3 ~ 4 dB 정도 개선하였다. 특히 CMA는 제안 방식과 CMA+DD 및 SSDD와는 달리 위상 회전된 신호점에 수렴하는 관계로 먼저 위상 복원 회로를 거쳐 위상 회전을 복원한 상태에서 MSE를 계산할 필요가 있었다.

그림 5에 보인 심볼점 형성 성능에서는, CMA는 채널에 의해 위상 회전된 심볼점을 형성하면서 눈모형을 충분히 열지 못한 상태로 수렴하였고, SSDD는 위상 회전을 복원한 눈모형을 형성하였으나 또렷하지 않은 상태로 수렴하였다. 반면 CMA+DD와 제안 방식에서는 심볼점의 위상 회전을 복원하였으며 CMA와 SSDD에 비해 또렷한 눈모형을 형성하였다.

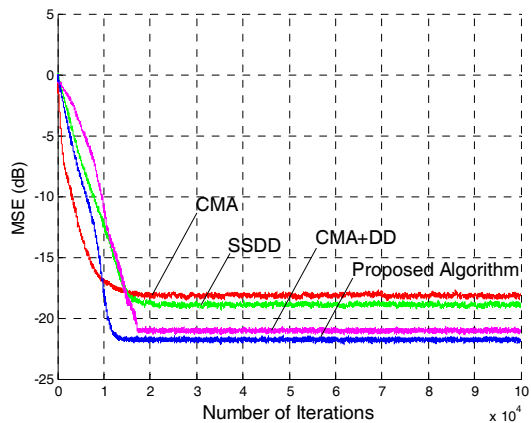


그림 4. 64-QAM에 대한 평균제곱오차 성능, $E_b/N_0 = 20$ dB
Fig. 4. MSE performance for 64-QAM, $E_b/N_0 = 20$ dB.

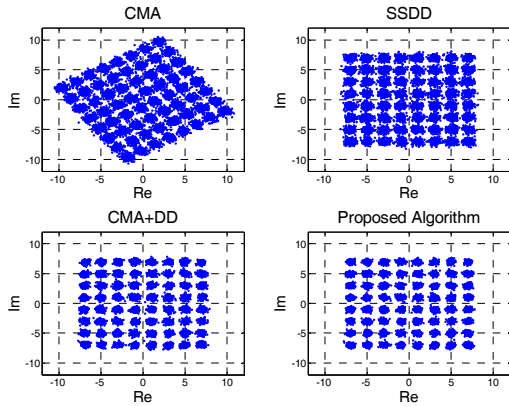


그림 5. 64-QAM 심볼점 정상도, $E_b/N_0 = 20$ dB
 Fig. 5. Symbol constellation for 64-QAM, $E_b/N_0 = 20$ dB.

V. 결 론

블라인드 등화에 사용되는 기준 심볼점을 저밀도 심볼점과 고밀도 심볼점으로 구분하고, 두 심볼점을 선택적으로 이용하는 방법을 제안하였다. 제안 방법은 심볼 추정에 효과적인 심볼점을 적용하여 눈모형이 닫힌 등화 초기에 빠르게 눈모형을 열리게 하고, 원심볼점을 사용한 심볼 추정을 통해 오차 레벨을 개선하였다. SSDD와 DD를 사용하여 진행한 실험 결과로부터 기준 심볼점을 선택적으로 이용하는 방법의 유용성을 확인하였다. 아울러 제안 방법은 수렴 속도와 오차 성능에서 기존의 대표적인 방식인 CMA의 성능을 크게 개선하는 것으로 나타났다.

References

[1] S. Abrar and A. K. Nandi, "Decision directed adaptive blind equalization based on the constant modulus algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 6, pp. 1674-1685, Jun. 2010.

[2] A. Benveniste, M. Goursat, and G. Ruget, "Robust identification of a nonminimum phase system: Blind adjustment of a linear equalizer in data communications," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 25, pp. 385-399, Mar. 1980.

[3] D. N. Godard, "Self-recovering equalization carrier tracking in two-dimensional data communications systems," *IEEE Trans.*

Commun., vol. 28, pp. 1867-1875, Nov. 1980.

[4] J.-T. Yuan and T.-C. Lin, "Equalization and carrier phase recovery of CMA and MMA in blind adaptive receivers," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 58, no. 6, pp. 3206-3217, Jun. 2010.

[5] S. Chen and E. S. Chng, "Concurrent constant modulus algorithm and soft decision directed scheme for fractionally-spaced blind equalization," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 2342-2346, Paris, France, Jun. 2004.

[6] D. N. Godard and P. E. Thirion, *Method and device for training an adaptive equalizer by means of an unknown data signal in a QAM transmission system*, U.S. Patent 4 227 152, Oct. 7, 1980.

[7] R. Hamzehyan, R. Dianat, and N. C. Shirazi, "New variable step-size blind equalization based on modified constant modulus algorithm," *Int. J. Machine Learning and Computing*, vol. 2, no. 1, pp. 30-34, Feb. 2012.

[8] J. Karaoguz, "A generalized decision-directed blind equalization algorithm applied to equalization of multipath Rayleigh fading mobile communication channels," Ph.D. Dissertation, North Carolina State Univ., 1992.

[9] S. J. Nowlan and G. E. Hinton, "A soft decision-directed LMS algorithm for blind equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 41, pp. 275-279, Feb. 1993.

[10] M. J. Ready and R. P. Gooch, "Blind equalization based on radius directed adaptation," in *Proc. IEEE ICASSP*, pp. 1699-1702, Albuquerque, NM, Apr. 1990.

[11] J. M. Filho, M. T. M. Silva, and M. D. Miranda, "A family of algorithms for blind equalization of QAM signals," in *Proc. IEEE ICASSP*, pp. 3388 - 3391, May 2011.

[12] G. Picchi and G. Prati, "Blind equalization and carrier recovery using a "Stop-and-Go" decision-directed algorithm," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 35, no. 9, pp. 877 - 887, Sept. 1987.

오 길 남 (Kil Nam Oh)

현재 : 광주대학교 광통신공학과 교수

<관심분야> 블라인드 등화, 통신신호처리, OFDM