

# QAM 시스템에서 다단계 결정-지향 알고리즘을 이용한 블라인드 적응 등화

正會員 이 영 조\*, 조 형 래\*\*, 강 창 언\*\*\*

## Blind Adaptive Equalization using the Multi-Stage Decision-Directed Algorithm in QAM Data Communications

Young Jo Lee\*, Hyoung Rae Cho\*\*, Chang Eon Kang\*\*\* *Regular Members*

### 요 약

학습 신호를 사용하지 않고 심볼간의 간섭을 제거하여 전송된 데이터를 복구하는 등화 방법을 블라인드 등화(blind equalization)라 한다. 본 논문에서는 수렴 속도와 정상상태오차를 줄이기 위하여 Sato 알고리즘과 결정-지향 알고리즘의 장점을 동시에 이용하는 다단계 결정-지향 알고리즘을 제안한다. 다단계 결정-지향 알고리즘은 초기 시작 모드에서는 수렴이 보장되는 Sato 알고리즘과 똑같이 동작을 한다. 이후 등화기가 점점 수렴함에 따라, 블라인드 등화기에서 사용하는 양자화기의 레벨 수를 증가시켜 수렴 속도를 빠르게 해준다. 양자화기의 레벨이 완전히 증가하였을 경우 다단계 결정-지향 알고리즘은 수렴 후 자승 평균 오차가 작은 결정-지향 알고리즘과 똑같이 동작하게 된다. 그러므로 다단계 결정-지향 알고리즘은 빠른 수렴 속도를 보이면서도, 정상상태에서 작은 오차 값을 갖는다.

### ABSTRACT

Adaptive channel equalization accomplished without resorting to a training sequence is known as blind equalization. In this paper, in order to increase the speed of the convergence and to reduce the steady-state mean squared error simultaneously, we propose the multi-stage DD(decision-direct) algorithm derived from the combination of the Sato algorithm and the decision-directed algorithm. In the starting stage, the multi-stage DD algorithm is identical to the Sato algorithm which guarantees the convergence of the equalizer. As the blind equalizer converges, the number of the level of the quantizers is increased gradually, so that the proposed algorithm operates

\*LG정보통신 이동통신 방식실

\*\*한국해양대학교 전자공학과

\*\*\*연세대학교 전자공학과 정보통신 연구실

論文番號:97049-0205

接受日字:1997年 2月 5日

identical to the decision-directed algorithm which leads to the low error power after the convergence. Therefore, the multi-stage DD algorithm obtains fast convergence rate and low steady state mean squared error.

## I. 서 론

디지털 통신 시스템에서 학습 신호에 의지하지 않고 등화기의 탭 계수를 조정하는 블라인드 채널 등화는 Sato에 의해 처음 제안되었으며[1], Sato의 알고리즘을 Godard가 발전시켜 일반화시켰다[2]. Godard에 의해 제안된 블라인드 등화 알고리즘은 기존의 자승 평균 오차함수(mean squared error function)를 변형시킨 포물선을 이루지 않는 비용함수(cost-function)를 사용하며, 송신 신호의 데이터 심볼 구조에 따라 성상도 상에서 심볼간의 길이(modulus)가 일정하다고 가정하여 등화하는 알고리즘이다[3]. 특히 등화기의 출력 신호의 전력을 가지고 처리하는 Constant Modulus Algorithm(CMA)이 계속해서 연구가 진행되고 있다.

Benveniste와 Goursat는 Sato의 블라인드 모델에서 시작하여 수렴이 일어난 후에 자동적으로 기존의 결정-지향(decision directed)알고리즘으로 넘어가는 방법을 제안하였고[4], Macchi와 Eweda는 초기 설정 계수 값이 눈이 열려 있는 상태(open-eye pattern)에 해당되지만 하면 결정-지향 알고리즘은 잡음이 없는 경우 최적의 계수 값에 수렴함을 증명하였다[5]. Picchi와 Prati는 결정-지향 알고리즘을 기초로 등화기 계수 조정을 위한 오차값에 신뢰도를 부여하는 Stop-and-Go 알고리즘을 제안하였다[6]. Ready는 CMA와 결정-지향 알고리즘의 혼합된 모습을 하고 있는 반경-지향방식을 제안했다[7]. 그러나 이 알고리즘은 심볼간의 간섭이나 잡음이 심할 때 초기의 오결정으로 인한 탭 계수의 오조정때문에 수렴 상태가 불안정하다. 반경-지향방식의 초기의 수렴 상태가 불안정한 것을 해결하기 위해서 Picchi와 Prati의 Stop-and-Go 알고리즘과 비슷하게 출력오차의 신뢰도에 따라 적응 과정을 진행하는 알고리즘이 제안되었다[8]. Weerackody와 Kassam은 신뢰성에 따라 두 개의 영역으로 나누어 두 개의 알고리즘을 번갈아 사용하는 이중모드 알고리즘을 제안했다[9].

위의 적응 알고리즘들은 전통적인 LMS 알고리즘

의 탭 계수 조정을 위한 오차 함수를 학습 신호가 포함되지 않도록 변형하여 오차 함수를 사용하며, 등화기 출력이 Bussgang 통계적 성질을 가지고 있으므로 변형된 LMS 또는 Bussgang 계열의 알고리즘으로 볼 수 있다.

본 논문에서는 수렴 속도와 정상상태오차를 줄이기 위하여 Sato 알고리즘과 결정-지향 알고리즘의 장점을 동시에 이용하는 다단계 결정-지향 알고리즘을 제안한다. 다단계 결정-지향 알고리즘은 초기 시작 모드에서는 수렴이 보장되는 Sato 알고리즘과 똑같이 동작을 한다. 이 후 등화기가 점점 수렴함에 따라, 블라인드 등화기에서 사용하는 양자화기의 레벨 수를 증가시켜 수렴 속도를 빠르게 해준다. 양자화기의 레벨이 완전히 증가하였을 경우 다단계 결정-지향 알고리즘은 수렴 후 자승 평균 오차가 작은 결정-지향 알고리즘과 똑같이 동작하게 된다. 그러므로 다단계 결정-지향 알고리즘은 빠른 수렴 속도를 보이면서도, 정상상태에서 작은 오차값을 갖는다.

논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서 디지털 통신 채널 모델링에 관하여 기술하고, 제3장에서는 Sato 알고리즘을 기초로 한 다단계 결정-지향 알고리즘을 설명한다. 제4장에서는 블라인드 알고리즘의 오차함수를 비교하고, 제5장에서는 실험을 통하여 블라인드 알고리즘들의 특성을 고찰하고 제6장에 결론을 맺는다.

## II. 디지털 통신 채널 모델링

디지털 통신 시스템은 그림 1처럼 간략하게 모델링되고 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n x(t-nT) + v(t) \quad (1)$$

여기서  $\{I_n\}$ 은 전송하고자 하는 복소수 심볼열  $I_n + jI_{n,r} + jI_{n,i}$ 를 나타내고,  $T$ 는 한 심볼 구간의 길이이다. 그리고  $x(t) = x(t) * x_r(t) * x_i(t)$ 의 채널을 나타내며,  $v(t)$ 는 수신 필터를 통과한 부가 가우시안 잡음을 나타낸다.  $x_r(t)$ 는 송신 필터를,  $x_i(t)$ 는 통신채널을,  $x(t)$ 는

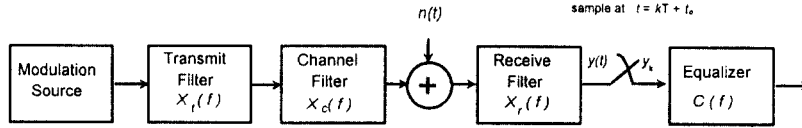


그림 1. 동가 디지털 통신시스템  
Fig. 1 Equivalent Digital Communication System.

수신 필터를 각각 나타낸다.

$y(t)$ 가  $t = kT + \tau_0$ , ( $k=0, 1, 2, \dots$ )의 시간에 표본화 될 경우

$$y(kT + \tau_0) \equiv y_k = \sum_{n=0}^{\infty} I_n x(kT - nT + \tau_0) + v(kT + \tau_0) \quad (2)$$

이고, 이 때  $\tau_0$ 는 표본화 순간이 지터와 같은 현상에 의해 정확하지 못함으로써 생기는 시간 지연을 나타낸다. 만약 표본화 순간이 정확하여  $\tau_0$ 를 0이라 가정하면 식(2)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t) &= \sum_{n=0}^{\infty} I_n x(kT - nT + \tau_0) + v(kT + \tau_0) \\ &= \sum_{n=0}^{\infty} I_n x_{k-n} + v_k \quad k=1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (3)$$

### Ⅲ. 다단계 결정-지향 알고리즘

Sato 알고리즘은 수렴성이 보장되나 완벽히 수렴한 후에도 잔류 심볼간의 간섭이 많이 남는 문제점이 있고, 결정-지향 알고리즘은 수렴도 빠르면서 잡음이 없을 경우 수렴 후 오차값을 영으로 만드는 좋은 특성이 있으나 수렴성이 보장되지 못한다. 다단계 결정-지향 알고리즘은 Sato 알고리즘의 초기 수렴 능력을 사용하다 점차 결정-지향 알고리즘으로 전환하는 알고리즘이다.

다단계 결정-지향 알고리즘은 처음에는 다음과 같이 Sato 알고리즘과 똑같이 동작한다[1].

$$C_{k+1} = C_k - \mu(z_k - \gamma \text{csgn}(z_k))V_k^* \quad (4)$$

여기서 벡터  $C$ 는 등화기의 탭계수이며,  $\mu$ 는 스텝사이즈이다. 그러나 Sato 알고리즘의 오차 값을 관찰하고

있다가 수렴하였을 경우 Sato 알고리즘에서 사용하는 오차함수를 바꾸어 준다. Sato 알고리즘의 오차함수를 위해 사용하는  $\gamma \text{csgn}(\cdot)$ 은 단순히 등화기의 출력의 동위상 또는 직교위상 값의 극성만 판단하는 2레벨의 양자화기이다. Sato 알고리즘을 사용한 블라인드 등화기는 비록 심볼간의 간섭을 완벽히 줄여주는 못하지만 일정 수준 이하로 줄여주므로 다음식과 같이 등화기의 출력 단에서 심볼간의 간섭의 값이 일정한 값  $d_n$  보다 작게 유지되는가를 확인하여, 양자화기의 레벨  $N$ 을 확장시켜줄 수 있다[10].

$$|z_{k,r} - I_{k,r}| < d_n \text{ AND } |z_{k,r} - I_{k,r}| < d_n \quad (5)$$

여기서  $z_{k,r}$ 과  $I_{k,r}$ 은 수신 신호와 전송 신호의 실수 값이고,  $z_{k,i}$ 와  $I_{k,i}$ 는 수신 신호와 전송 신호의 허수 값이다. 이 경우 비용함수는 다음과 같이 된다.

$$\Psi(z_k) = |z_k - M_i| \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

식(6)의 비용함수를 이용한 필터 계수 조정식은 다음과 같다.

$$C_{k+1} = C_k - \mu(z_k - M_i)Y_k^* \quad i=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

여기서  $M_i$ 는 다음 식처럼 주어지는  $Q_N(\cdot)$ 의 양자화기의 출력 레벨 값이다.

$$M_i = Q_N(z_k) \quad i=1, 2, \dots, N \quad (8)$$

여기서  $N$ 은 원하는 양자화 레벨의 수이다. 식(7)의 필터계수 조정식이 바이어스되지 않게 동작하려면 다음 식과 같은  $M_i$  ( $i=1, \dots, N$ )의 값을 가져야 한다[11].

$$M_i = \frac{E\{|I_k|^2\}}{E\{|I_k|\}} \quad I_k \in S_i, i = 1, \dots, N \quad (9)$$

여기서  $S_i$ 는 송신 신호 집합을  $N$ 개의 부집합으로 나누었을 때  $i$ 번째 부집합을 나타낸다.

알고리즘의 첫 단계로  $n=1$ 이면 Sato 알고리즘의  $N=2$ 인 2레벨 양자화기로  $M_i$ 는 Sato 알고리즘의  $Ycsgn(\cdot)$ 과 같게 되어 식(7)은 Sato 알고리즘과 동일해진다. 다음 단계  $n=2$ 가 되어 양자화 레벨의 개수  $N$ 이 증가하면 등화기는 더 정확한 양자화기를 사용하므로 심볼간의 간섭양을 더 줄일 수 있다. 그러나 식(5)의  $I_k$ 는 전송신호로 블라인드 알고리즘은 이 값을 알 수가 없으므로 식(5)를 그대로 사용할 수가 없다. Sato 알고리즘을 사용하여 어느 정도 심볼간의 간섭을 줄여 수렴을 하게 되면, 등화기의 출력 값은 송신 신호 주위로 물리게 된다. 그러므로 식(5)는 다음 식과 같이 등화기 출력 신호  $z_k$ 와 거리상 가장 가까운 송신 신호  $I_{k, \min}$ 과의 차이로 바꿀 수 있다.

$$|z_{k,r} - I_{k, \min,r}| < d_n \text{ AND } |z_{k,i} - I_{k, \min,i}| < d_n \quad (10)$$

일반적으로 고차의 PAM 또는 QAM 신호를 사용하였을 경우, Sato 알고리즘만으로는 경관정을 하여 신호를 검출할 정도로 수렴을 하지 못한다. 그러므로 등화기 출력값의 크기가 작은 것들은 오판정하기가 쉬우므로 송신 신호 집합 중 가장 큰 전력을 가지고 있는 신호점 이상인 신호들만을 가지고 판단을 한다. 즉 등화기 출력 값이 큰 신호만을 가지고 잔류 간섭양이 어느 정도 남았는가를 검사하여 수렴을 확인할 수 있기 때문에 식(10)대신에 다음 식을 이용하여 수렴 여부를 판단할 수 있다.

$$|z_k| < d'_n = I_{outer} + d_n \quad (11)$$

여기서  $I_{outer}$ 는 송신 신호 집합 중에서 가장 큰 전력을 가지고 있는 신호점을 나타낸다. 등화기 출력 값이 식(11)을 만족하여 유지되면 양자화 레벨  $N$ 을 늘려주게 된다.

$d_n$ 의 값은 다음 단계에서 사용할 양자화 함수에 따라 다르게 잡아 주어야 한다. 즉 다음식과 같이 다음 단계의 레벨의 개수 또는 부집합의 개수에 의해  $d_n$ 의

값이 결정되어야 한다.

$$d_n \leq \frac{1}{2} \text{distance}\{Q_{(N')}(\cdot)\} \quad (12)$$

여기서  $N'$ 은 다음 단계의 양자화 레벨 개수이고,  $\text{distance}\{\cdot\}$ 은 다음 단계의 가장 가까운 거리를 나타낸다.

등화기의 출력값이 식(11)을 만족하는가는 평균값을 이용하여 판단한다. 원하는  $d_n$ 의 값을 알고 있다면 등화기의 출력의 확률 분포를 이용하여 신뢰도와  $d_n$ 의 값에 따른 기준 평균값( $m(d_n)$ )을 구할 수 있다[11]. 등화기의 출력단에서는 다음 식과 같이 기준( $I_{outer}$ ) 이상의 값을 가지고 계속해서 평균값을 취한다.

$$A(n) = \beta A(n-1) + (1-\beta) [z_k - I_{outer}] \text{ if } |z_k| > I_{outer} \quad (13)$$

여기서  $\beta$ 는 시간상 평균을 위한 망각인자이다.  $A(n)$ 의 값을 기준 평균값과 비교하여 잔류 간섭양을 판단하고,  $A(n)$ 의 값이 기준 평균값보다 작아지면 양자화기의 레벨의 개수를 증가시킨다.  $Q_N(\cdot)$ 의 양자화기의 레벨 개수  $N$ 은 결정-지향 알고리즘의 양자화기와 같게 될 때까지 증가시킬 수 있다.  $Q_N(\cdot)$ 의 양자화기의 레벨 개수  $N$ 이 결정-지향 양자화기의 레벨 개수와 같게 될 때는 식(7)이 결정-지향 알고리즘의 필터 계수 조정식과 같게 된다. 만약 채널의 환경이 갑자기 변하여 잔류 간섭양이 증가를 하게 되면 다단계 결정-지향 알고리즘은 양자화기의 레벨의 수  $N$ 을 줄여주어 변하는 환경에 대처할 수 있다. 다단계 결정-지향 알고리즘은 등화기 출력의 평균을 구하는 계산 과정

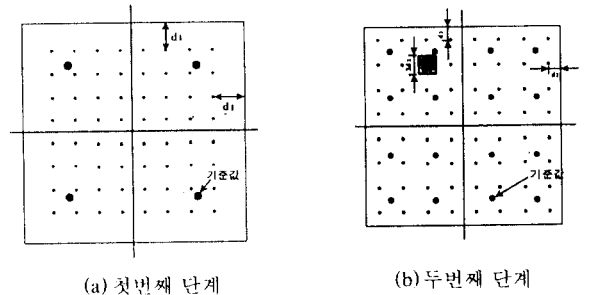


그림 2. 64QAM에서 다단계 결정-지향 알고리즘의 기준값  
Fig. 2 The Reference values of the Multi-stage DD algorithm in 64-QAM

과 기준 평균값과의 비교 과정이 필요하므로 기존의 알고리즘에 없는 별도의 처리 과정이 필요하다.

64-QAM에 다단계 결정-지향 알고리즘을 적용하면 처음에는 그림 2(a)와 같이 4개의 기준값(2개의 양자화 레벨)을 사용하는 Sato 알고리즘으로 동작한다.  $d_1$  이하로 간섭이 작아지면 그림 2(b)와 같이 16개의 기준값을 사용하게 되며 간섭이  $d_2$  이하가 되면 64개의 모든 신호점을 사용하는 결정-지향의 알고리즘이 된다.

#### IV. 오차함수의 비교

블라인드 알고리즘의 동작 특성을 쉽게 이해할 수 있도록 이들 알고리즘의 오차 함수를 도해적으로 나타낼 수 있다. 표현의 편의를 위해서 8PAM(-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7)을 사용하였을 경우를 선택한다. 고정된 스텝크기에서 오차값이 크면 빠른 수렴을 보일 수 있으나, 변동이 커서 수렴 후 불안정한 특성을 보인다. 만약 송신 신호점 근처에서 오차값이 작을수록 안정된 수렴 상태를 보일 수 있으나, 수신 신호가 송신 신호점 근처로 모이게 해주는 알고리즘이 별도로

필요하다.

그림 3(a)의 Sato 알고리즘의 오차함수는 입력값에 대하여 오차값의 영역이 넓어 빠른 수렴을 보일 것이며, 그림 3(c)의 결정-지향 알고리즘의 오차함수는 오차값이 작아서 수렴 상태가 안정적일 것이다. 다단계 결정-지향 알고리즘은 그림 3(a)의 Sato 알고리즘에서 시작하여 그림 3(b)의 중간 단계를 거쳐 그림 3(c)의 결정-지향 알고리즘으로 차차 넘어 간다. 그림 3(d)는 Benveniste와 Goursat 알고리즘의 오차함수로 Sato 알고리즘의 오차함수와 결정-지향 알고리즘의 오차함수를 더하였기 때문에 오차값의 폭이 넓어지는 특징이 있으나 송신 심볼의 근처의 값에서는 결정-지향 알고리즘과 비슷한 값을 가짐을 볼 수 있다. 그러므로 큰 오차값에 의해 스텝 크기를 줄 수는 없으나 수렴 후 안정된 수렴 상태를 보일 것이다. 그림 3(e)의 Stop-and-Go 알고리즘은 신뢰 구간에 따라 오차값이 결정-지향 알고리즘을 따르거나 또는 영의 값을 내보낸다. Stop-and-Go 알고리즘은 오차값이 항상 작은 상태이므로 스텝크기를 크게 해줄 수 있는 특징을 갖는다. 그림 3(f)의 이중모드 Sato 알고리즘은 신뢰 구

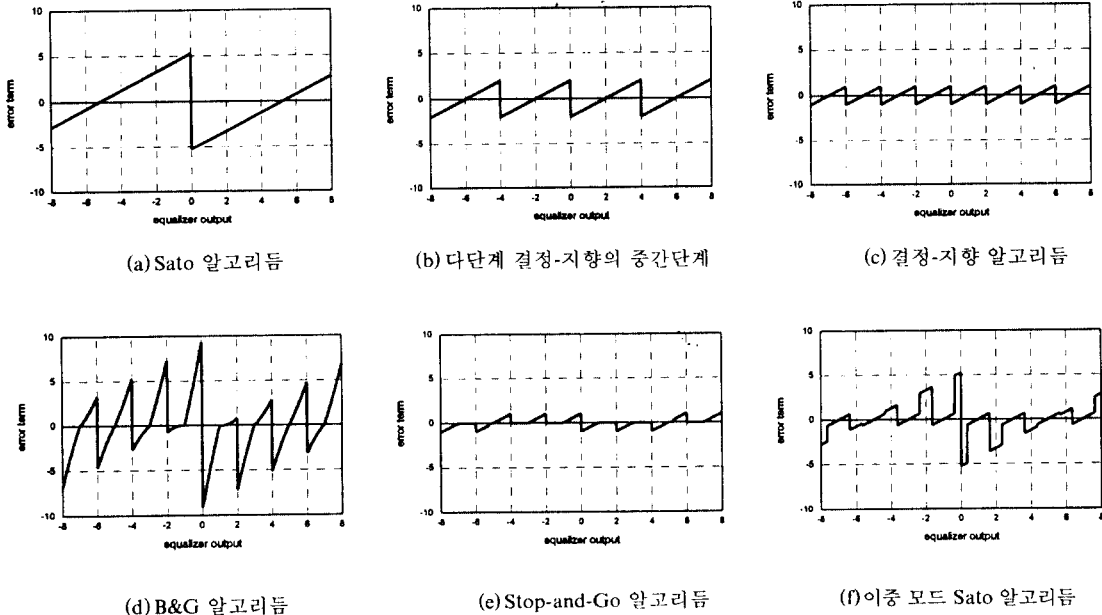


그림 3. 블라인드 등화 알고리즘의 오차함수 비교

Fig. 3 Comparison of the Error Terms in Blind Equalization Algorithms

간에 따라 오차값이 결정-지향 알고리즘을 따르거나 또는 Sato 알고리즘을 따른다.

### V. 실험 결과 및 고찰

#### 1. 실험 환경

실험에 사용한 원천 부호는 실수부와 허수부의 신호점이 각각  $-7, -5, -3, -1, 1, 3, 5, 7$ 인 64QAM 신호를 사용하며 신호 대 잡음비는 30dB와 50dB로 한다. 실험에는 두 개의 모델링된 채널을 사용한다. 채널1의 복소 임펄스 응답은[6][9]

$$h_{real}(z) = -0.005 + 0.009z^{-1} - 0.024z^{-2} + 0.854z^{-3} - 0.218z^{-4} - 0.049z^{-5} - 0.016z^{-6} \quad (14)$$

$$h_{imag}(z) = -0.004 + 0.030z^{-1} - 0.104z^{-2} + 0.520z^{-3} + 0.273z^{-4} - 0.074z^{-5} + 0.020z^{-6}$$

이고, 채널2의 임펄스 응답은[8]

$$h_{real}(z) = 0.1032 + 0.1287z^{-1} + 0.2291z^{-2} + 0.2715z^{-3} + 0.3960z^{-4} + 0.7920z^{-5} + 0.0919z^{-6} + 0.0672z^{-7} + 0.0495z^{-8} + 0.0410z^{-9}$$

$$h_{imag}(z) = 0.0119 + 0.0154z^{-1} + 0.0414z^{-2} + 0.0498z^{-3} + 0.0871z^{-4} + 0.1281z^{-5} + 0.0235z^{-6} + 0.0170z^{-7} + 0.0123z^{-8} + 0.0109z^{-9} \quad (15)$$

이다. 여기서  $h_{real}(z), h_{imag}(z)$ 은 각각  $h_i$ 의 실수부와 허수부를 나타낸다.

등화기의 탭의 수는 11개 또는 15개를 사용하고, 모든 등화기의 탭의 초기값은 중앙 탭을  $2 + j0$ 로 하고 나머지는 모두  $0 + j0$ 으로 한다.

#### 2. 다단계 결정-지향 알고리즘의 성능분석

Sato 알고리즘은  $\gamma = 5.25$ 로 하고, 스텝 크기를 0.00005 하였다. Benveniste와 Goursat 알고리즘은 스텝 크기를 0.00002로 하고  $k1$ 과  $k2$ 는 4와 1로 하였다. Stop-and-Go 알고리즘의  $\beta$ 값은 Sato 알고리즘의  $\gamma$ 값과 같게 하고 스텝크기는 0.0001로 하였다. 이중모드 Sato 알고리즘 그리고 다단계 결정-지향 알고리즘의 스텝 크기는 0.00005로 하였다. 이중모드 Sato 알고리즘의

$D_k$ 의 값은 신호집과의 차이가 0.65이하로 하였다. 다단계 결정-지향 알고리즘은  $M_1 = \{-5.25, 5.25\}$ 이고,  $M_2 = \{-6.167, -2.5, 2.5, 6.167\}$ 이다. 또한  $d_1$ 과  $d_2$ 의 값은 각각 1.8335와 1로 하였으며, 99%의 신뢰도를 갖는 기준 평균값  $m(d_1)$ 과  $m(d_2)$ 는 각각 0.5670과 0.3093이다.  $\beta$ 는 0.99를 사용하였다. 모든 실험은 500번의 독립실행을 통해 평균을 취한 것이다.

그림 4는 채널1에 대한 실험으로 등화기의 탭 수를 15개로 하고 신호 대 잡음비를 30dB로 하였을 경우의 수렴곡선이다. 곡선(1)의 Sato 알고리즘은 자승 평균 오차 값이 약 -3dB이하로 줄어들지 않는다. 그러나 다른 알고리즘들은 약 -7dB까지 수렴을 한다. Benveniste와 Goursat의 알고리즘과 Stop-and-Go 알고리즘은 큰 오차함수의 값 또는 스텝 크기를 크게 사용하므로 빠른 초기 수렴 속도를 보이지만, 완전한 정상 상태로의 수렴 속도는 다단계 결정-지향 알고리즘이 빠르다는 것을 알 수 있다. 그림 5는 채널1에 대한 실험으로 등화기의 탭 수를 11개로 사용하고 신호 대 잡음비를 30dB로 하였을 경우이며, 그림 6은 채널1에 대한 실험으로 등화기의 탭 수는 15개로 사용하고 신호 대 잡음비를 50dB로 증가시킨 경우이다. 두 경우에도 비슷한 결과를 얻을 수 있다. 그림 7은 채널2에 대한 실험으로 등화기의 탭 수를 15개로 사용하고 신호 대 잡음비를 30dB로 하였을 경우의 수렴 곡선이

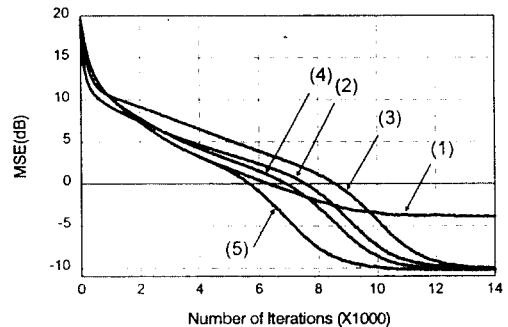


그림 4. 채널 1에서의 수렴 곡선(SNR: 30dB 탭 수: 15)  
Fig. 4 Convergence Curves(SNR = 30dB, the number of taps = 15)

- (1): Sato 알고리즘
- (2): Benveniste와 Goursat 알고리즘
- (3): Stop-and-Go 알고리즘
- (4): 이중모드 Sato 알고리즘
- (5): 다단계 결정-지향 알고리즘

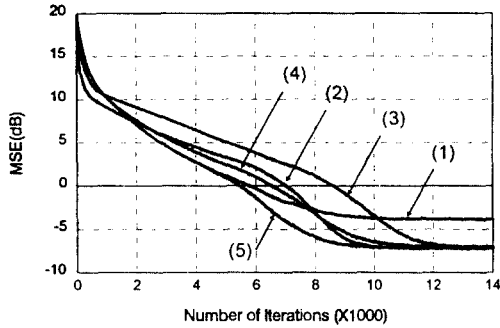


그림 5. 채널 1에서의 수렴 곡선(SNR: 30dB 탭 수: 11)  
Fig. 5 Convergence Curves in channel 2 (SNR = 30dB, the number of taps = 11)

- (1): Sato 알고리즘
- (2): Benveniste와 Goursat 알고리즘
- (3): Stop-and-Go 알고리즘
- (4): 이중모드 Sato 알고리즘
- (5): 다단계 결정-지향 알고리즘

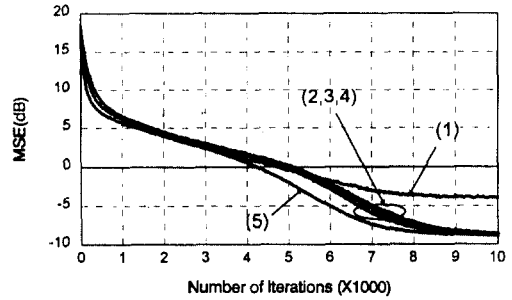


그림 7. 채널 2에서의 수렴 곡선(SNR: 30dB 탭 수: 15)  
Fig. 7 Convergence Curves in channel 2 (SNR = 30dB, the number of taps = 15)

- (1): Sato 알고리즘
- (2): Benveniste와 Goursat 알고리즘
- (3): Stop-and-Go 알고리즘
- (4): 이중모드 Sato 알고리즘
- (5): 다단계 결정-지향 알고리즘

다. 일반화된 Sato 알고리즘의 자승 평균 오차값은 약 -4dB에서 머무르고 나머지 알고리즘은 약 -8dB로 떨어지며 수렴 속도는 거의 비슷하다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 수렴 속도와 정상상태오차를 줄이기 위하여 Sato 알고리즘과 결정-지향 알고리즘의 장점을 동시에 이용하는 다단계 결정-지향 알고리즘을 제안하였다. Sato 알고리즘은 수렴을 보장해 주나 수렴 후에 자승평균 오차가 너무 큰 문제가 있다. 한편 결정-지향 알고리즘은 수렴 후 자승평균오차는 작으나 채널 상태에 따라 수렴을 못하는 경우가 발생한다. 다단계 블라인드 알고리즘은 두 알고리즘의 좋은 특성을 모두 이용하는 알고리즘이다. 초기에는 수렴을 보장하는 Sato 알고리즘을 사용하다 점차 완벽한 수렴을 보여주는 결정-지향 알고리즘으로 전환되는 알고리즘이다. 제안된 알고리즘은 레벨 증가의 순간을 판단하기 위해서 평균을 구하는 회로와 비교기가 필요하다. 그러므로 다단계 결정-지향 알고리즘은 단순히 평균을 구하는 회로와 비교기가 증가만으로 빠른 수렴 속도와, 수렴 후에 남아 있는 잔류 자승 평균 오차가 작은 특성을 갖는다.

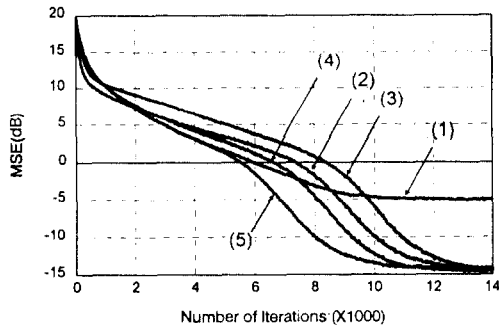


그림 6. 채널 1에서의 수렴 곡선(SNR: 50dB 탭 수: 15)  
Fig. 6 Convergence Curves in channel 1 (SNR = 50dB, the number of taps = 15)

- (1): Sato 알고리즘
- (2): Benveniste와 Goursat 알고리즘
- (3): Stop-and-Go 알고리즘
- (4): 이중모드 Sato 알고리즘
- (5): 다단계 결정-지향 알고리즘

참 고 문 헌

1. Y. Sato, "A Method of Self-Recovering Equalization for Multilevel Amplitude Modulation System," IEEE Trans. on Comm., vol. COM-23, no. 7, pp. 679-682, June 1975.
2. D. N. Godard, "Self recovering equalization and carrier tracking in two-dimensional data communication system," IEEE Trans. on Comm., vol. COM-28, no. 11, pp. 1867-1875, Nov. 1980.
3. Z. E. Mazo, "Analysis of decision directed equalizer convergence," B. S. T. J., vol. 59, no. 10, pp. 1857-1876, Dec. 1980.
4. A. Benveniste and H. Goursat, "Blind equalizers," IEEE Trans. on Comm., vol. COM-32, no. 8, pp. 871-882, Aug. 1984.
5. O. Macchi and E. Eweda, "Convergence analysis of adaptive equalizers," IEEE Trans. on Inform. Theory, vol. IT-30, no. 3, pp. 16176, Mar. 1984.
6. G. Picchi and G. Prati, "Blind equalization and carrier recovery using a 'Stop and Go' decision-directed algorithm," IEEE Trans. on Comm., vol. COM-35, no. 9, pp. 877-887, Sep. 1987.
7. M. J. Ready and R. P. Gooch, "Blind equalization based on radius directed adaptation," IEEE ICASSP'90., pp. 1699-1702, Apr. 1990.
8. 이영조, 윤영우, 조형래, 홍대식, 강창언, "개선된 반경-지향 방식을 이용한 블라인드 적응등화기," 한국통신학회 논문지, 제19권, 제7호, pp. 1364~1373, 1994. 7.
9. V. Weerackody and S. A. Kassam, "Dual-Mode Type Algorithms for Blind Equalization," IEEE Trans. Comm., Vol. COM-42, no. 6, pp. 228, Jan. 1994.
10. S. Chen, S. Mclaughlin and B. Mulgrew, "Multi-Stage Blind Clustering Equaliser," IEEE Trans. Comm., vol. 43, no. 2/3/4 pp. 701-705, Feb./mar./Apr. 1995.
11. 이영조, 이재용, 임승주, 강창언, "QAM 시스템에서 다단계 반경-지향 알고리즘을 이용한 블라인드 적응 등화," 한국통신학회 제22권, 제9호, 1997. 9.

이 영 조(Young Jo Lee)	정회원
통신학회 논문지 제22권 제9호 참조	
조 형 래(Hyoung Rae Cho)	정회원
통신학회 논문지 제22권 제7호 참조	
강 창 언(Chang Eon Kang)	정회원
통신학회 논문지 제20권 제1호 참조	