DBpia

論文 95-7-7-9

디지탈 기록 채널의 트랙 변화를 고려한 PRML 방식과 EPRML 방식

正會員 徐 光 樂*, 趙 鏞 洙*

PRML and EPRML Methods for Track Variation in Digital Recording Channels

Kwang Rak Seo*, Yong Soo Cho* Regular Members

要 約

본 논문에서는 트랙을 따라 다른 선형밀도를 갖는 자기기록 디스크 채널에 대하여 PRML (partial response maximum likelihood) 방식과 EPRML (extended partial response maximum likelihood) 방식의 성능을 비교하였다. 또한 트랙의 선형 밀도에 따라 부분응답최우 (PRML) 방식이나 확장부분응답최우 (EPRML) 방식을 동작시켜 전체적으로 개선된 성능을 얻는 즉 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식을 결합한 방법을 제안하고 기존의 부분응답최우 검출기 및 확장부분응답최우 검출기와 비교하였다. 컴퓨터 모의 실험을 통하여 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식의 비트에러율이 각각 1.5×10^{-5}, 6.3×10^{-6} 인데 반해 제안된 방법의 비트에러율은 약 2.4×10^{-6}으로서 제안된 방법의 비트에러율이 부분응답최우 방식 비트에러율의 약 1/6, 확장부분응답최우 방식 비트에러율의 약 1/2.6임을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, the performances of Partial Response Maximum Likelihood (PRML) and Extended Partial Response Maximum Likelihood (EPRML) methods are compared for the magnetic disk storage channel which shows varying linear density depending on the track. Also, a new approach, where the PRML and EPRML methods are combined so that it can achieve better performance overall by operating one detector or the other depending on the linear density of the track, is proposed and compared with the conventional PRML and EPRML detectors. It is confirmed through computer simulaton that the bit error rate (BER) of the proposed approach is about $2.4\ 10^{-6}$ whereas those of PRML and EPRML methods are $1.5\ 10^{-5}$ and $6.3\ 10^{-6}$, respectively. That is, the bit error rate of the proposed approach is about one sixth of that of the PRML method and ten twenty-sixths of that of the EPRML method.

*중앙대학교 전자공학과
Dept. of Electronic Eng., Chung-Ang Univ.
論文番號 : 94358-1209
接受日字 : 1994年 12月 9日

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

최근 멀티미디어 시대를 맞이하여 디지탈 신호처리 기술이 널리 이용되고 있으며 신호를 디지탈화함으로서 생기는 방대한 양의 데이타를 고밀도로 기록하려는 연구가 활발히 진행 중이다. HDD, 디지탈 VCR, 광자기 디스크등의 기록채널에서 고밀도화는 여러가지 기록 재생의 물리적 특성을 개선함으로 이루어져 왔으며 최근에 신호처리 기법의 발전에 의해 더욱 가속화 되고있다. 기존의 방식은 시스템의 고신뢰와 고밀도를 얻기 위해 run-length limited (RLL) 부호화, 아날로그 검출 방식인 최대치 검출 방식을 이용하여 왔으나 최근 표본화 검출방식이라 불리는 디지탈 검출 방식인 부분응답최우 방식 및 적응 결정궤환 등화기 방식이 우수한 성능을 보인다는 연구 결과가 발표되었다[1][2][3][4][5].

부분응답최우 방식은 심볼간 간섭을 허용하여 원하는 스펙트럼 형태를 취하고, 검출단에서 최우추정법인 비터비 알고리듬을 사용하는 방법이다. 그러나 이러한 부분응답최우 방식은 일정한 선형밀도까지는 최적의 성능을 보이나 고밀도로 갈수록 성능이 떨어지며 고밀도의 채널에서는 확장부분응답최우 방식이 적합하다는 연구 결과가 발표되었다[6]. 본 논문에서는 저밀도에서 고밀도까지 포함하는 일반적인 자기기록 디스크에서의 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식의 성능을 비교하고, 읽고자하는 트랙의 선형밀도를 계산하여 그 값에 따라 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식 중의 하나를 선택하여 동작시킴으로써 전체적으로 성능을 향상시킬 수 있는 방식에 대하여 기술한 뒤 모의 실험을 통해 그 성능을 확인한다.

Ⅱ. 자기기록 채널에서의 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식

자기기록 채널에서 부분응답 신호를 이용한 검출방법이 그림1 에 도시되어 있는데 이는 크게 데이타를 부호화하고 심볼을 발생하는 부분, 부분응답-Ⅳ (partial response-IV)로 모형화되는 기록 재생채널 부분, 그리고 등화기 및 비터비 검출 등으로 기록 데이타를 복구하는 부분으로 구분할 수 있다. 각 부의 역할을 간단히 기술하면 우선 수신단에서 오류 전달 없는 추정을 위해 부호화된 데이타 b_n을 사전 부호화기에 통과시키며, 사전 부호화된 신호 0, 1은 각각 -1, +1의 기록 전류로 변환된다. 등화 부분에서는 기록채널이 갖는 스펙트럼 특성과 비슷한 모양이 되도록 등화기를 사용하여 심볼간 간섭을 조절한다[1][6]. 그리고 마지막으로 허용된 심볼간 간섭을 고려하여 구성된 문턱값 검출기나 최우추정 검출의 비터비 검출기를 사용하여 신호를 복구하게 된다.

자기 매체의 특성을 살펴보면, 자기채널은 자화곡선의 영향 때문에 대부분 포화영역의 이진 신호 기록방식을 이용하며, +1과 -1의 신호에 따라 기록 전류가 변화하여 매체에 자속 변화를 형성한다. 데이타는 주로 T-H(Tomlinson-harashima) 부호화 방식으로 부호화

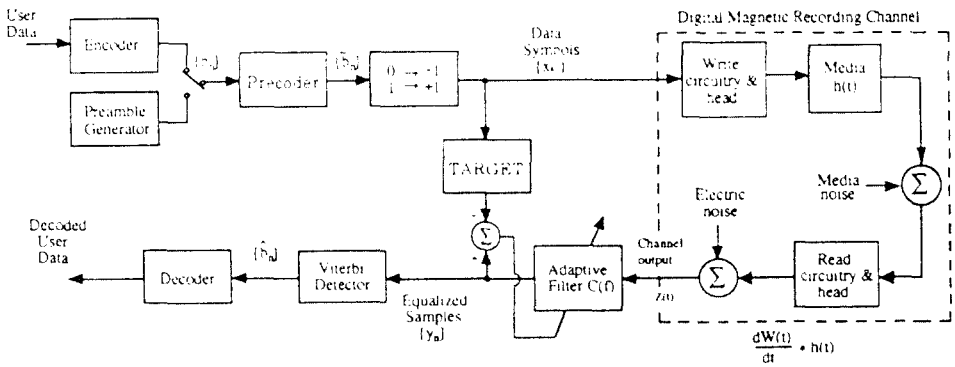


그림 1. 자기 기록 채널을 위한 PRML 블럭도
Fig. 1. block diagram of a for magnetic recording channels

www.dbpia.co.kr

하며, 매체에 기록된 데이타는 자속 변화에 해당하는 즉, 미분치에 비례하는 출력전압 형태로 재생헤드에 의해 읽히므로 DC성분은 통과하지 않는다. 따라서 고밀도화에 따른 비선형 신호의 발생을 무시할 경우 자기채널 출력은 다음과 같다.

$$Z(t) = \frac{dW(t)}{dt} * h(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서 z(t)는 재생파형이며, $\frac{dW(t)}{dt}$ 는 입력 이진 데이타 시퀀스 $x_k \in \{-1, +1\}$에 해당하는 구형 파형에 대한 자기채널의 미분 특성이고, h(t)는 헤드와 자성체간의 물리적 성질 및 기록 재생과정에서 일어나는 공간 손실, 틈 손실, 기록 재생 손실의 효과를 포함한 저역통과 필터 형태의 응답이다. 또한 $n(t)$는 백색잡음으로 모형화되는 전기적 잡음과 유색신호로 유도되는 매체잡음으로 분리할 수 있으나 본 논문에서는 기존의 논문에서와 같이 백색잡음만을 가정한다. 이 경우

$$W(t) = \sum_k x_k \Pi(t - kT) \ , \ \Pi(t) = \begin{cases} 1 & 0 \le t < T \\ 0 & elsewhere \end{cases} \quad (2)$$

로 표현할 수 있으며 이 식을 식(1)에 대입하여 다음 식을 얻는다.

$$Z(t) = \sum_k x_k [\ h(t - kT) - h(t - T - kT)] + n(t) \quad (3)$$

여기서 자기기록 채널응답 h(t)는 일반적으로 다음의 Lorentzian 함수로 모형화된다.

$$h(t) = \frac{1}{1 + (2t/pw50)^2} \quad (4)$$

여기서 $pw50$은 채널 임펄스 응답의 최고 값에서 50% 떨어진 곳에서의 폭 간격을 나타내며, 일반적으로 $pw50/T$을 기록밀도로 사용한다. 따라서 자기채널에서 독립된 입력 심볼 $x_0 = \pm 1$ 에 대한 기록회로 채널, 필터, 등화기의 전체 응답을 $q(t)$로 표시하면 다음과 같다.

$$q(t) = \frac{dW(t)}{dt} * h(t) * c(t) \quad (5)$$

여기서 $\frac{dW(t)}{dt} * h(t)$는 자기기록 채널의 dipulse 응답이고 $c(t)$는 아날로그 필터와이산 시간 필터로 구성된 필터 응답이다. 한편 부분응답-IV와 확장부분응답-IV의 특성을 살펴볼 때 $q(t)$는 다음과 같이 나타낼 수 있다[3][6].

$$\text{PR-IV} : q(t) = p(t) - p(t-2T) \quad (6)$$

$$\text{EPR-IV} : q(t) = p(t) + p(t-T) - p(t-2T) - p(t-3T) \quad (7)$$

여기서 $p(t)$는 나이퀴스트 밴드폭을 만족시키는 신호이다. 좀 더 구체적으로 서술하면, 부분응답-IV의 경우에서 식(3)의 재생 신호를 샘플링한 $z_n(\tau)$는 아래와 같고

$$z_n(\tau) \triangleq z(nT + \tau) = \sum_i (x_i - x_{i-2}) \cdot p[(n-i)T + \tau] + n(nT + \tau) \quad (8)$$

샘플링 위상 오차가 없으면, 곧 $\tau = 0$에서 등화된 샘플 $\{y_n\}$은 다음과 같다.

$$y_n(\tau = 0) = a_n + n_n \quad (9)$$

여기서

$$a_n = x_n - x_{n-2} \ , \ a_n \in \{-2, 0, +2\} \quad (10)$$

따라서 부분응답-IV 경우의 데이타 샘플 $\{a_n\}$은 $\tau = 0$에서 다항식 $1 - D^2$의 특성을 갖는 이산 채널 출력을 나타내며, 이와 비슷하게 확장부분응답-IV 경우의 데이타 샘플 $\{a_n\}$은 $\tau = 0$에서 다항식 $1 + D - D^2 - D^3$의 특성을 가진다. 이를 이산 채널의 주파수 응답으로 표현하면 다음과 같다.

부분응답-IV :

$$\overline{Q}(f) = \frac{1}{T} \sum_m Q(f - \frac{m}{T}) = 1 - e^{\ j4\pi fT} \quad (11)$$

확장부분응답-IV :

$$\overline{Q}(f) = \frac{1}{T} \sum_m Q(f - \frac{m}{T}) = 1 + e^{\ j2\pi fT} - e^{\ j4\pi fT} - e^{\ j6\pi fT} \quad (12)$$

위 식(11), (12) 는 부분응답 신호가 자기기록 채널의 대역통과 특성에 잘 부합됨을 보여주는데 이러한 특성을 지니는 신호는 일반적으로 식(13)과 같은 형태의 다항식으로 표현할 수 있다[7].

$$P_n(n) = (1-D)(1+D)^n \qquad n = 0, 1, 2, \cdots \quad (13)$$

n=1인 부분응답-IV 등화의 경우 ± 2, 0 의 출력 값을 나타내며 이를 3단계 문턱치 결정이나 최우추정(4-

www.dbpia.co.kr

상태 Viterbi) 검출을 함으로써 신호를 검출할 수 있고, n=2인 확장부분응답-IV 등화의 경우는 ±4, ±2, 0의 출력 값을 나타내므로 5단계의 문턱치 결정이나 최우추정(8-상태 Viterbi) 검출에 의해 신호를 검출할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 확장부분응답-IV 등화의 경우 부분응답-IV 등화와 성능을 비교하기 위하여 확장부분응답-IV 등화기 출력 신호의 최대 값(±4)을 부분응답-IV등화기 출력 신호의 최대 값(±2)으로 정규화한다. 이 경우는 신호 복호 시 4-상태 부분응답최우 방식 보다 8-상태 확장부분응답최우 방식이 약 3dB 성능 손실을 가지는데 이러한 손실은 고밀도로 갈수록 등화에서 얻는 성능 이득으로 충분히 극복할 수 있다[6][7]. 또한 부분응답 등화는 일반 선형 등화기에 비해 탭 수를 상당히 줄일 수 있다. 이는 전술한 바와 같이 등화 한 뒤 출력 신호가 채널이 가지는 심볼간 간섭과 비슷한 신호 형태이므로 탭 수를 적게 사용하고도 빠른 수렴 속도를 얻을 수 있게 된다.

한편, 부분응답 방식을 사용하여 얻은 출력 신호에는 원하는 형태의 심볼간 간섭이 포함되어 있으므로 이의 영향을 고려한 복호기를 구성해야 하는데 복구 방법으로는 문턱값 검출과 비터비 알고리듬을 이용한 최우추정 검출등이 있다.

●문턱값 검출

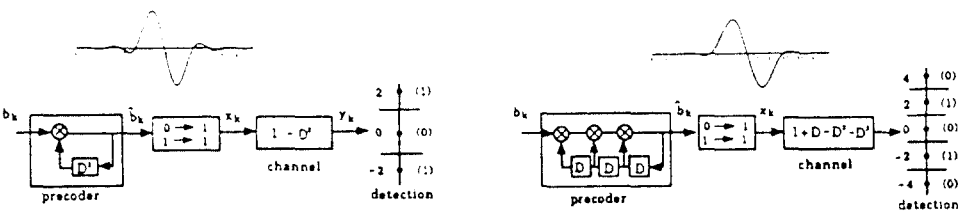
그림2 는 문턱값 검출기를 나타내고 있다. 우선 기지의 심볼간 간섭을 갖는 출력 신호로부터 심볼간 간섭을 제거하기 위해 결정 궤환 등화기를 고려할 수 있다. 즉, 결정된 현재의 신호를 지연시켜 기지의 심볼간 간섭을 발생시킨후 재생 신호에서 이를 빼주는 방식이다[8][9]. 잡음이 없을 경우 이 방식은 원하는 결과를 가져오나 잡음 등에 의해 에러가 발생될 경우 후에 입력되는 신호에도 영향을 미치는 오류 전달 현상을 나타낸다. 이 현상을 방지하기 위해 재생단의 결정 궤환 구조를 기록단으로 가져와 사전 부호화기를 구성할 수 있는데 이를 그대로 사용할 경우 채널에서의 심볼간 간섭은 제거 가능하나 기록 신호가 커지게 된다. 그러나 사전 부호기에 모듈로 연산을 추가하여 기록 신호의 크기를 줄이고 채널 출력 신호를 모듈로 연산할 경우 위의 결과와 동일하다는 결과를 이용하게 되면 오류 전달 없이 심볼간 간섭을 제거할 수 있다[3]. 채널 입력 신호 x_n에 대한 전체 이산 응답을 $q_n = q(t)\,|_{t=nT}$라 하면, 일반적으로 사전 부호화기는

$$\hat{b}_n = \frac{1}{q_0}\left[\, b_n - \sum_{i=1}^{N-1} q_n\, \hat{b}_{n-i}\right] (\mathrm{mod}\ m) \quad (14)$$

로 주어진다. 여기서 $\{b_n\}$은 일반적으로 m진수의 입력 신호열이다. 자기기록 채널에서와 같이 2진 신호를 사용하고 1-D^2의 부분응답-Ⅳ를 전체 이산 응답 q_n으로 택한 경우 사전 부호화기는 $1/(1\oplus D^2)$ 이 된다. 여기서 $\oplus$는 modulo-2 가산을 나타낸다. 따라서 입력 2진 신호열 $\{b_n\}$은 $\{\tilde{b}\} = \{b_n \oplus \tilde{b}_{n-2}\}$ 으로 사전 부호화되며, 이의 검출은 3-단계값 검출 또는 비터비 복호화기에서 이루어진다[3].

●최우추정 검출

부분응답 다항식을 트렐리스 형태로 구현하여 검출단



(a) (b)

그림 2. 문턱값 검출
(a) PR-IV (b) EPR-IV
Fig. 2. Threshold level detection
(a) PR-IV (b) EPR-IV

www.dbpia.co.kr

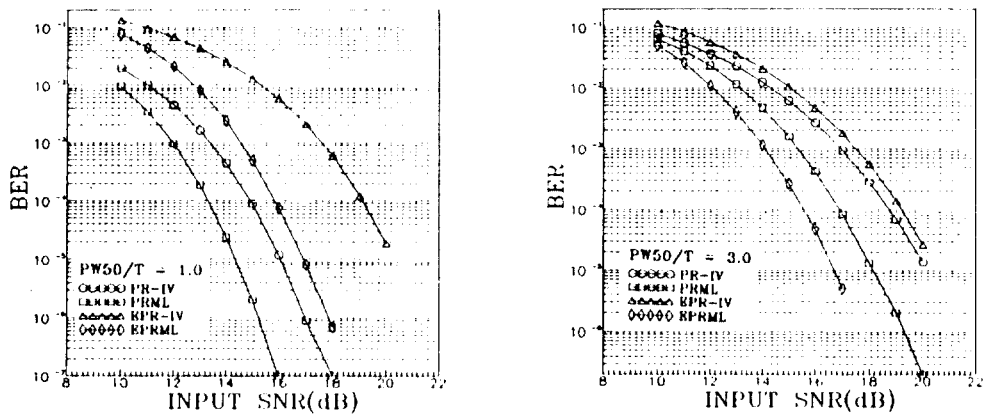
에서 최우추정법인 비터비 검출을 수행하면 약 3dB이상 이득을 얻을 수 있는데 이는 신호 간의 유클리드 거리(d_{min})가 최대가 되도록 검출기에서 연 판정함으로써 에러확률을 줄이는 것이다. 따라서 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식에 대한 에러 확률을 비교해 보면 다음과 같다[10][11].

$$P_e(E) = N_c \cdot N_e \cdot P_d \cdot Q\left(\frac{d_{min}}{2\sigma_b}\right) \quad (15)$$

여기서 d_{min}은 신호 간 최소 유클리디안 거리, σ_b는 잡음 분산, N_c는 에러 사건 조합의 수, N_e는 에러수, P_d는 수신된 데이타열들의 확률이다. 부분응답최우 방식의 경우 d^2_{min}는 $2^2+2^2 = 8$이며, 확장부분응답최우 방식의 경우 d^2_{min} 는 $1^2+1^2+1^2+1^2 = 4$이므로, 8-상태를 사용하는 확장부분응답최우 방식이 4-상태를 사용하는 부분응답최우 방식보다 약 3dB의 손실을 보인다.

구현에서 부분응답최우 방식이나 확장부분응답최우 방식의 최우추정 검출은 비터비 알고리듬을 사용하여도 각 단에서 경로 메트릭을 계산하고 최적 경로를 찾아 기억해야 하므로 계산량이 복잡하고 기억 용량이 커진다. 그러나 부호화기(예, 8/9)를 사용하면 클럭 복구와 수신단의 빠른 start-up, 비터비 복호 시 경로기억 길이를 줄일 수 있다[1],[12]. 또한 식(10)에서 나타나듯이 짝수(또는 홀수) 데이타 열은 짝수(또는 홀수) 입력 심볼에 의해서만 영향을 받으므로 다항식 $1-D'(D'=2D)$를 갖는 두 개의 독립적인 dicode 부분응답 열로 볼 수 있다. 따라서 부분응답-Ⅳ에서 수신단에 들어오는 데이타 열을 두 개의 독립적인 항으로 분리하여 각각에 차 -메트릭 비터비(difference-metric Viterbi) 알고리듬을 적용하면 계산량과 기억 용량을 줄일 수 있다[13][14].

그림3는 문턱값 검출과 최우추정 검출을 모의 실험함으로써 얻어진 비트 에러 성능곡선이다. 그림3 (a)는 선형 밀도(pw50/T)가 1.0인 경우이다. 비트에러율이 10^{-5}에서, 부분응답최우 방식은 부분응답-IV 문턱값 검출에 비해 약 2dB정도의 이득을 보이고, 확장부분응답최우 방식은 확장부분응답-IV 문턱값 검출과 견주어 약 4dB 정도 성능 이득을 보인다. 또한 부분응답최우 방식이 확장부분응답최우 방식에 비해 약 3dB정도의 성능 이득을 나타내고 있다. 그림3 (b)는 선형 밀도(pw50/T)가 3.0 인 경우이다. 비트에러율이 10^{-5} 에서, 부분응답최우 방식이 부분응답-IV 문턱값 검출에 견주어 약 2dB정도 성능 개선을 보이고, 확장부분응답최우 방식은 확장부분응답-IV 문턱값 검출에 견주어 약 4dB 성능 개선을 보인다. 그러나 선형 밀도가 1.0인 경우와 반대로 확장부분응답최우 방식이 부분응답최우 방식에 견주어 약 2.5 dB 정도 성능 개선을 갖는다. 선형 밀도가 변함에 따라 성능이 저밀도에서는 부분응답최우 방식이 좋게 나타나다가 어느 기록 밀도 이후부터



(a) (b)

그림 3. 입력 SNR 변화에 대한 BER
(a) pw50/T = 1.0 (b) pw50/T = 3.0
Fig. 3. Performance of PRML and EPRML for varying input SNR
(a) pw50/T = 1.0 (b) pw50/T = 3.0

www.dbpia.co.kr

는 확장부분응답최우 방식이 부분응답최우 방식에 비해 성능이 우수하게 나타난다. 이는 부분응답-IV 등화기가 선형밀도에 따라 변하는 채널에서 고밀도 채널응답을 쉽게 등화시키지 못하고 상대적으로 잡음에 대한 영향을 더 받기 때문이다[6]. 그러므로 확장부분응답최우 방식은 고밀도로 갈수록 등화에서 얻는 높은 이득으로 가지고 비터비 검출에서의 손실(부분응답최우 방식에 비하여)을 충분히 극복하고 전체 성능을 높이게 된다[8].

일반적인 디스크의 트랙변화가 $1.0 \leq pw50/T \leq 3.0$ 범위를 지닌다고 볼 때, 그림3 에서 보듯이 부분응답최우 방식이나 확장부분응답최우 방식의 성능은 차이를 나타내게 되는데 저밀도에서는 부분응답최우 방식이, 고밀도에서는 확장부분응답최우 방식이 상대적으로 좋은 성능을 나타낸다. 본 논문에서는 이러한 트랙 변화를 고려하여 저밀도에서는 부분응답최우 방식을 동작시키고 고밀도에서는 확장부분응답최우 방식을 동작시켜 전체적으로는 부분응답최우 방식이나 확장부분응답최우 방식만을 사용하는 기존의 방식보다 성능이 향상된 방식을 제안한다. 그림4에 나타난 이 방식은 읽고자 하는 트랙의 기록밀도를 계산하여 그 기록밀도에 적합한 등화와 검출 방식 (부분응답최우 방식 또는 확장부분응답최우 방식)을 결정하는 기록밀도 계산기, 비터비 선택기 부분과 선택된 등화 방식 하에서 최적의 등화기 계수를 결정하여 그 트랙에 적합한 등화기 탭 계수를 공급해 주는 부분으로 크게 나눌 수 있다. 최적의 등화기 계수 공급을 위하여 적응적 방법 또는 대조표을 사용할 수 있는데, 적응적 방법을 이용하기 위해서는 각 트랙마다 훈련 열이 필요하게 되고 수렴시까지 데이타를 읽을 수 없게 되는 단점이 있다. 일반적으로 각 트랙의 기록 재생 특성은 측정에 의하여 미리 구할 수 있고 그 트랙에 해당되는 기록밀도와 부분응답최우 방식 (또는 확장부분응답최우 방식) 하에서의 최적 등화기 계수 역시 해석적 방법 또는 적응적 방법에 의해 쉽게 구할 수 있으므로 대조표를 이용하는 것이 효과적이다. 즉, 각 트랙의 기록밀도와 최적 등화기 계수를 미리 계산하여 대조표의 해당 번지에 기억시키고, 읽고자 하는 트랙이 주어졌을 경우 기억된 최적 계수를 해당번지에서 읽어내어 등화기로 보내게 된다. 그리고 비터비 선택기는 주어진 자기 디스크의 부분응답최우와 확장부분응답최우의 성능 교차점을 기준으로 하여 저밀도에서는 부분응답-IV 검출기, 고밀도에서는 확장부분응답-IV 검출기를 동작시킨다. 그러므로 제안된 방식은 기록 밀도가 변해가는 기록채널에서 부분응답최우 방식이나 확장부분응답최우 방식 중의 하나만을 사용했을 경우에 비해 성능 개선을 가져올 수 있다.

Ⅲ. 모의실험

각 방식의 성능 비교를 위하여 자기기록 채널의 선형

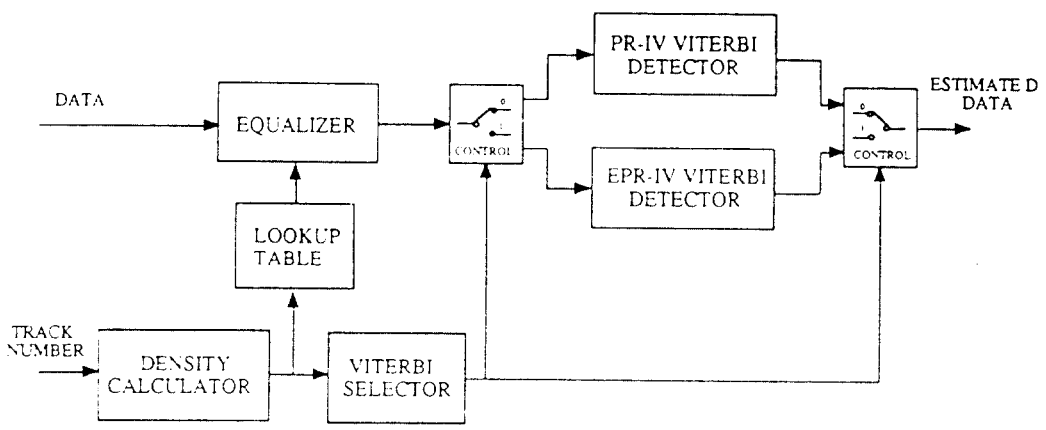


그림 4. PRML과 EPRML을 결합한 블럭도
Fig. 4. A block diagram of a combined PRML with EPRML

www.dbpia.co.kr

밀도가 $1.0 \le pw50/T \le 3.0$ 사이에서 변화하고 각 트랙을 검색할 확률은 같다고 가정하였다. 등화기의 성능 비교를 위하여 등화기 출력에서의 출력 SNR을 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{PEAK}{MSE\ NOISE} = \frac{2.0}{\sigma^2_{error}} \tag{16}$$

그림5 은 입력 SNR 20dB 하에서 PR-IV와 EPR-IV 등화기의 각 선형 밀도에 따른 탭 수의 영향을 보여준다. 일반적으로 $pw50/T$가 증가함에 따라 등화가 힘들어져 각 등화기의 출력 SNR은 감소하며, 탭 수가 증가함에 따라 출력 SNR은 어느 정도 증가하나 부분응답-IV, 확장부분응답-IV, 모두 7개 이상부터는 큰 성능의 변화가 없는 것을 관찰할 수 있다. 따라서 본 모의실험에서는 9개의 탭을 사용하여 모든 실험을 수행하였다. 또한 그림6 에서 보듯이 입력 SNR 변화에 따른 출력 SNR을 비교해 보면 각각의 밀도 변화에서 확장부분응답-IV 등화가 부분응답-IV 등화보다 전체 입력 SNR 범위에서 출력 SNR이 높은 것을 알 수 있는데, 선형 밀도 1.0에서는 약 3 dB, 선형 밀도 3.0에서는 약 6 dB 이상 출력 SNR이 좋게 나타난다. 특히 고밀도로 갈수록 확장부분응답-IV 등화기 성능 이득은 최우추정 검출에서 잃게 될 약 3 dB 손실을 극복함으로써 확장부분응답최우 방식이 부분응답최우 방식에 비해 성능이 좋아지는 요인으로 작용한다.

그림7 (a),(b)는 각 밀도에서의 펄스응답 및 펄스의 주파수 응답을 나타내고 그림7 (c),(d)는 이 채널에 대한 등화기의 주파수 응답과 전체 채널의 주파수 응답을 나타내고 있다. 그림7 (c),(d) 에서 전체적으로 DC와 Nyquest 주파수에서 정확하게 null을 가지는 것을 알 수 있으며 그 결과 부분응답 검출은 최대치 검출기에 비해 대역폭 효율이 좋게 나타난다. 또한 PR-IV 등화에 비해 확장부분응답-IV 등화는 나이퀴스트 주파수 부근에서 상대적으로 크기가 감소하는데 그 결과 잡음에 대한 영향을 고주파 부분에서 보다 잘 감소시킴으로써 상대적으로 높은 출력SNR 이득을 얻게 된다.

그림8 (a),(b)는 입력 SNR을 15dB에 고정시킨 경

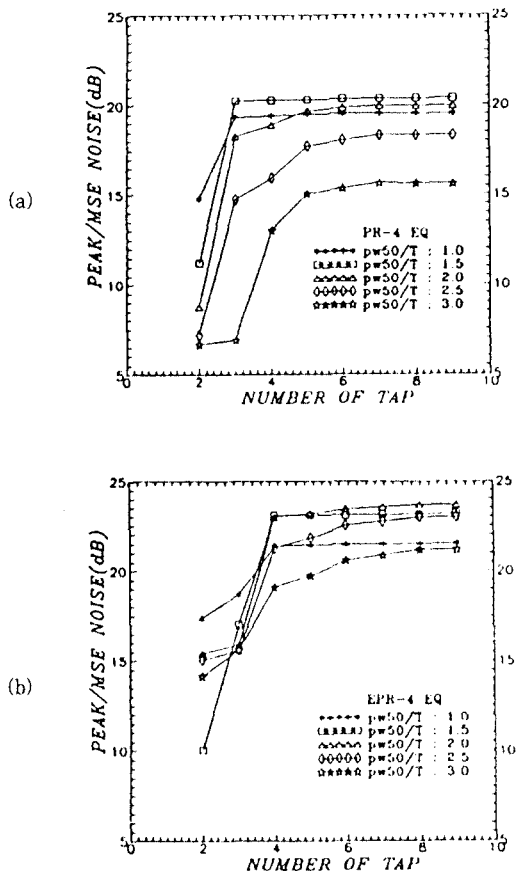


그림 5. 탭 수 증가에 따른 성능 비교
(a) PR-IV (b) EPR-IV
Fig. 5. Equalizer performance vs. number of taps
(a) PR-V (b) EPR-IV

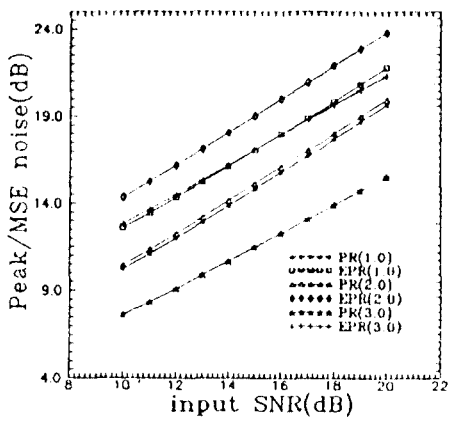


그림 6. PR-IV와 EPR-IV의 등화 성능
Fig. 6. Performance of PR-IV and EPR-IV equalization

www.dbpia.co.kr

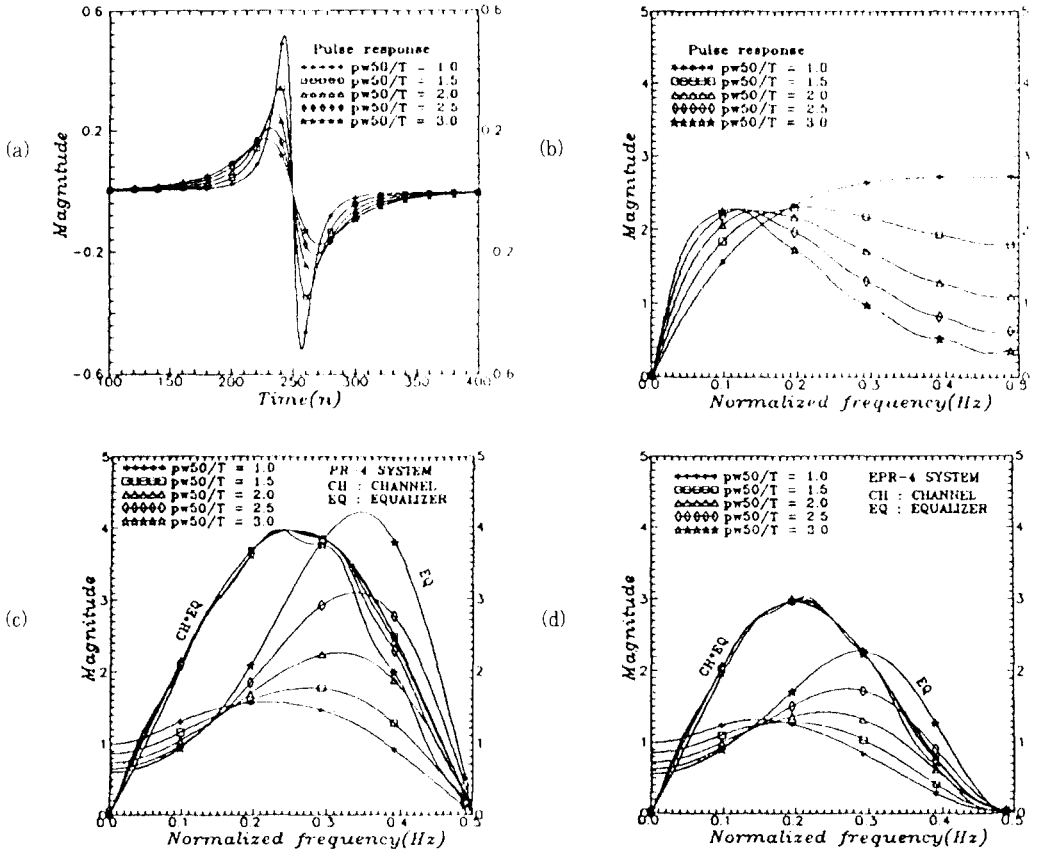
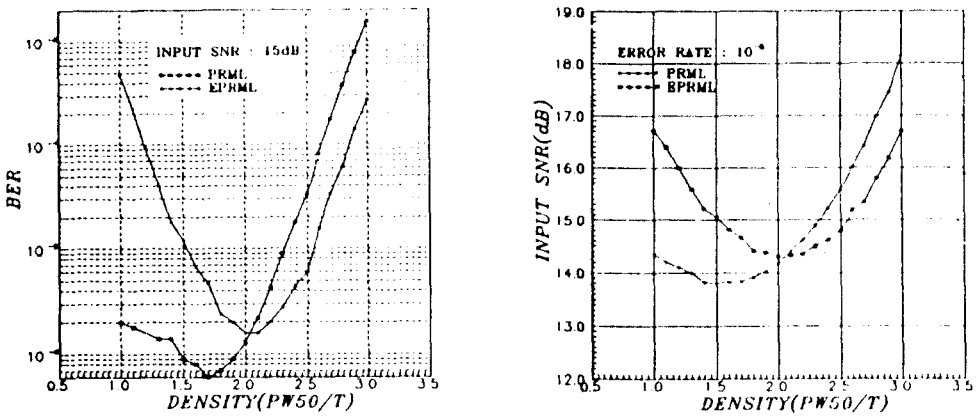


그림 7. 선형 밀도 변화에 대한 PRML과 EPRML
(a) 펄스 응답 (b) 주파수 응답 (c) PR-IV 등화 (d) EPR-IV 등화
Fig. 7. PRML and EPRML for the variation of linear density
(a) pulse response (b) frequency response (c) PR-IV equalization (d) EPR-IV equalization

우 또는 에러율을 10^{-5}에 고정한 경우의 선형 밀도 변화에 따른 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식의 비트에러율과 입력 SNR을 보여준다. 그림8 (a)는 입력 SNR을 고정한 경우로서 선형 밀도가 2.0 부근에서 부분응답최우 방식과 확장부분응답최우 방식이 교차함을 보인다. 즉 선형 밀도가 1.5인 곳에서 부분응답최우 방식이 약 1.2dB 성능 이득을 가지며, 선형 밀도가 2.5인 곳에서는 확장부분응답최우 방식이 약 1dB 성능 이득을 갖는다. 따라서 선형 밀도($pw\ 50/T = 2.0$)을 기준으로 하여 저밀도($pw50/T < 2.0$) 에서는 부분응답최우 방식이, 고밀도($pw50/T > 2.0$)에서는 확장부분응답최우 방식이 우수한 성능을 가짐을 알 수 있다. 또한 에러율을 10^{-5}에 고정하고 선형밀도를 바꾸어 가며 그 때의 입력 SNR 을 비교한 결과가 그림8 (b)에 주어져 있는데 그림8 (a)와 비슷한 결과를 가져옴을 알 수 있다. 따라서 자기 디스크 채널은 2.0을 기준으로 하여 저밀도에서는 부분응답최우 방식을 사용하고 고밀도에서는 확장부분응답최우 방식을 사용하는 제안된 방법이 부분응답최우 방식이나 확장부분응답최우 방식만을 사용한 경우에 비해 성능을 개선할 수 있으리라는 것을 쉽게 알

www.dbpia.co.kr



(a) (b)

그림 8. 밀도 변화에 대한 PRML과 EPRML의 성능 비교
(a) 비트 에러 오율 (b) 입력 SNR
Fig. 8. Performance comparison of PRML and EPRML for variation of linear density
(a) BER (b) input SNR

표 1. 부분응답최우 방식, 확장부분응답최우 방식, 제안된 방식에서의 BER
Tabel 1. BER of PRML, EPRML, and proposed method

	계 산 치	측 정 치
PRML	1.463×10^{-5}	1.467×10^{5}
EPRML	6.863×140^{-6}	6.281×10^{-5}
PRML+EPRML	2.628×10^{-6}	2.419×10^{-6}

수 있다.

다음은 랜덤 억세스 방식의 자기 디스크에서 부분응답최우 방식, 확장부분응답최우 방식, 그리고 제안한 방식의 성능을 평가하기 위하여 입력 SNR 15dB 상황 하에서 선형 밀도가 1.0~3.0 까지 변화하는 트랙을 랜덤하게 접속하고 10^6개의 데이타 샘플을 반복 수행하여 디스크에 대한 전체 비트에러율을 구하였다. 표1은 이에 대한 결과로 부분응답최우 방식, 확장부분응답최우 방식, 제안한 방식의 성능을 이론에 의한 계산치와 실제 모의실험을 통해 얻어진 측정치를 비교한 것이다. 제안된 방법의 경우 2.4×10^{-6}의 비트에러율을 얻은 반면 부분응답최우 방식은 1.5×10^{-5}, 확장부분응답최우 방식은 6.3×10^{-6}의 비트에러율 얻음으로서 비트에러율 감소를 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 디지탈 자기 기록 채널에서의 성능 개선을 위하여 부분응답 검출에 대한 방법을 고찰하였다. 저밀도에서 성능이 좋은 부분응답최우 방식과 고밀도에서 좋은 성능을 갖는 확장부분응답최우 방식을 함께 사용하여 트랙에 따라 밀도가 변하는 자기 디스크와 같은 채널에서 성능을 향상시킬 수 있는 방식을 제안하였고 이를 부분응답최우 방식 또는 확장부분응답최우 방식만을 사용하였을 경우와 비교하였다. 그 결과 제안된 방식은 확장부분응답최우 방식 및 부분응답최우 방식에 대하여 각각 약 1/2.6배 및 1/6배로 비트에러율이 줄어들어 제안된 방식이 우수함을 확인하였다.

본 논문에서 모의 실험을 수행할 때의 몇 가지 가정, 즉 고밀도 채널에서 발생되는 비선형 왜곡과 유색 잡음에 대한 해석에 대한 연구가 앞으로 필요하다. 또한 부분응답최우 방식의 경우 차-메트릭 비터비 알고리듬을 사용하여 하드웨어 복잡성과 계산 속도를 줄일 수 있으나 확장부분응답최우 방식은 아직 계산량 및 하드웨어 복잡성을 줄이는 방법에 대한 연구가 되어 있지 않으므로 이에 대한 연구가 필요하다.

www.dbpia.co.kr

참고문헌

1. R. D. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML System for Digital Magnetic Recording," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-10, pp.38-56, Jan., 1992.
2. W. L. Abbott, Adaptive Equalization and Coding for Magnetic Recording Channels, Ph. D. Thesis, Stanford University, Mar., 1991.
3. E. A. Lee and D. G. Messerschmitt, *Digital Communication*, Boston : KALA, 1988.
4. J. Moon and L. R. Carley, "Performance Comparison of Detection Methods in Mag- netic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. MAG-26, pp.3155-3172, Nov., 1990.
5. J. M. Cioffi, "Least-Squares Storage-Channel Identification," *IBM J. of R&D*, Vol. 30, pp.310-319, May, 1986.
6. P. Kabal and S. Pasupathy, "Partial-Response Signaling," *IEEE Trans. Comm*, Vol. COM-23, pp.921-934, Sep., 1975.
7. H. K. Thapar and A. M. Patel, "A Class of Partial Response Systems for Increasing Storage Density in Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. MAG-23, pp.3666-3668, Sep., 1987.
8. J. M. Cioffi, W. L. Abbott, H. K. Thapar, C. M. Melas, and K. D. Fisher, "Adaptive Equalization in Magnetic Disk Storage Channels," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 28, pp. 14-29, Feb., 1990.
9. J. Watkinson, *The Art of Digital Video*, London & Boston: Focal Press, 1990.
10. T. Sugawara, M. Yamagishi, H. Mutoh, K. Shimoda, and Y. Mizoshita, "Viterbi Detector Including PRML and EPRML," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. MAG-29, pp.4021-4023, Nov., 1993.
11. G. David Froney, Jr., "The Viterbi Algorithm," *Proc. IEEE*, Vol. 61, pp.268- 278, Mar. 1973.
12. R. W. Wood and D. A. Petersen, "Viterbi Detection of Class Ⅳ Partial Response on a Magnetic Recording Channel," IEEE Trans. Comm., Vol. COM-34, pp.454-461, May, 1986.
13. J. K. Wolf, "A Survey of Codes for Partial Response Channels," IEEE Trans. on Magn., Vol. MAG-27, pp.4585-4589, Nov., 1991.
14. F. Dolivo, T. Howell, and G. Ungerboeck, "Decoding the Output Signal of a Partial-Response Class-Ⅳ Communication or Recording Device Channel," U.S. Patents 4,571,734, Feb., 1986 and 4,644,564, Feb., 1987.

徐 光 樂(Kwang Rak Seo) 준회원

1993년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1993년 3월~1995년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사)

※주관심 분야 : 디지털 통신 및 신호처리, Digital Magnetic Storage Channel

趙 鏞 洙(Yong Soo Cho) 정회원

1984년 2월 : 중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사)
1987년 8월 : 연세대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사)
1991년 5월 : Department of Electrical and Computer Engineering(Ph. D), the University of Austin at Texas,
1992년 3월~현재 : 중앙대학교 전자공학과 조교수
※주관심 분야 : 디지털 recoding, 비선형 필터, 적응신호처리, 고차 스펙트럼

www.dbpia.co.kr