

MTR 코드를 위한 변형된 트렐리스를 갖는 PRML 검출 방법

정희원 이주현*, 이재진**

PRML detection scheme with modified trellis for a MTR code

Joohyun Lee*, Jaejin Lee* *Regular Members*

요 약

연속적인 최대 천이 길이(j)를 2 이하로 제한하는 MTR 코드를 사용할 경우, 4차의 부분 응답 최대 유사도 (PRML) 검출기의 성능은 기존의 일반적인 코드를 사용한 경우에 비해 현저히 향상될 수 있으나, 낮은 코드율로 인해 코드율 손실이 생긴다. 본 논문에서는 코드워드 자체에서는 MTR 구속 조건이 2를 만족하면서 코드워드를 연결하였을 때에는 $j=3$ 을 허용하는 코드율이 7/8인 코드에 대해 $j=2$ 와 $j=3$ 인 형태의 트렐리스를 결합시켜 변형된 형태의 PRML 검출 방법을 제안하였다. 이러한 결합된 트렐리스를 갖는 변형된 형태의 4차 PRML 검출 방법은 높은 기록 밀도의 수평 또는 수직 자기기록 시스템에서 기존의 코드율 8/9인 코드에 대한 4차 PRML 검출 방법에 비해 10⁻⁵ BER에서 최소 2dB 이상의 SNR 성능 이득을 보임을 확인하였다.

Key Words . PRML detection, MTR code, magnetic recording systems, Viterbi trellis

ABSTRACT

When codeword sequence has two or less successive transitions, the performance of 4th-order partial response maximum-likelihood (PRML) detector can be improved. However, the code leads to an unacceptable loss of performance due to the low code rate. For a rate 7/8 code that MTR constraint (j) of each codeword is limited to 2, and j is allowed to be 3 when codewords are connected, we modified the trellis of PRML detector to combine $j=2$ with $j=3$. We confirmed that the rate 7/8 coded 4th-order PRML detection with combined trellis achieves the SNR gain more than 2dB compared to the rate 8/9 coded 4th-order PRML detection at 10⁻⁵ BER in high-density longitudinal or perpendicular magnetic recording systems.

1. 서론

런-길이 제한된 코드(run-length limited codes, RLL codes)를 이용한 피크 검출 시스템(peak detection system)은 디지털 자기 저장장치의 기록 밀도가 낮은 경우에 매우 우수한 성능을 나타낸다 [1]. RLL 코드에서 (d, k)-구속 조건은 '1'과 '1' 사이에 연속되는 '0'의 수가 최소 d 개에서 최대 k 개가 되도록 하여, 펄스의 간섭(interference) 현상을 줄이면서,

동시에 동기화 손실 문제를 막아주는 역할을 한다. 코드율 2/3인 RLL (1,7) 코드와 코드율 1/2인 RLL (2,7) 코드가 피크 검출기와 함께 기록 저장 시스템에서 널리 사용되었던 대표적인 코드이다. 저장장치의 기록 밀도를 보다 증가시키기 위해, 검출기의 성능 감소가 거의 없는 부분 응답 최대 유사도 검출(partial response maximum likelihood) 기술[2]이 도입되면서 코드율 8/9과 16/17인 코드와 함께 사용되어 왔다 [3, 4]. 최근에는 확장된 부분 응답 채널

* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실 (xmas@dongguk.edu), ** 동국대학교 통신 및 정보저장 연구실 (zlee@dgu.ac.kr)
논문번호 030363-0820, 접수일자 2003년 8월 20일

(extended partial response channels)에 대해 코딩 이득(coding gain)을 제공하는 최대 천이 길이의 제한을 갖는 코드(maximum transition run codes, MTR codes)가 도입되었다 [5]. 이때, 최대 허용 가능한 천이의 수(j)가 2인 경우, MTR 코드의 최대 허용 가능한 코드율은 8/9보다 매우 낮게 되어, 상당한 코딩 손실이 생긴다.

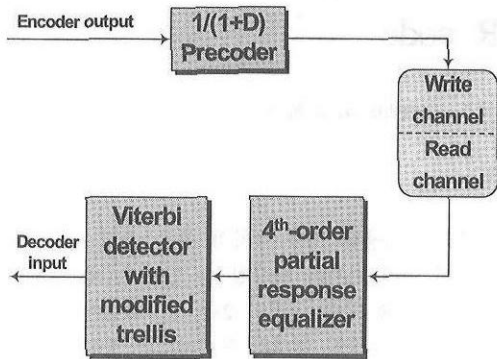


그림 1. 변형된 트렐리스를 갖는 제안한 PRML 검출 시스템

본 논문에서는 문헌 [6]에서 제안한 코드율 손실을 줄인 코드율이 7/8인 MTR 코드에 대해 기존의 4차 PRML 검출 방법에 비해 현저한 성능 향상을 나타내도록 변형된 트렐리스를 갖는 검출 방법을 제안한다. 이 검출 방법은 코드율 7/8인 MTR 코드의 특성으로 인해 각 코드워드는 $j=2$ 로 제한하면서, 코드워드가 연결되는 부분에서는 $j=3$ 까지 허용하는 형태에 맞도록 비터비 알고리즘의 가지 메트릭(branch metric, BM) 계산을 변형하여 최적의 성능을 나타내도록 하였다.

2. 코드율 7/8인 MTR 코드 및 PRML 검출기 구성

그림 1은 문헌 [6]에서 제안한 7/8의 코드율을 갖는 MTR 코드를 위해 기존의 PRML 검출 방법에 대해 변형된 트렐리스를 갖는 형태의 PRML 검출 시스템에 대한 블록도를 나타내고 있다. 이때, 프리코더(precoder)로 입력되는 MTR 코드의 현재 코드워드를

$c_k \in \{x_7(\text{MSB}), x_6, \dots, x_0(\text{LSB})\}$ 라 하고, 그 다음으로 들어오는 코드워드를

$c_{k+1} \in \{y_7(\text{MSB}), y_6, \dots, y_0(\text{LSB})\}$ 라 할 때, 각 코드워드 내부에서는 MTR 구속 조건이 $j=2$ 를 만족한다. 그러나, 상기 MTR 코드는 코드워드를 연결하였을

때, x_1, x_0, y_7 의 연속적인 세 비트가 모두 1인 경우 또는 x_0, y_7, y_6 의 연속적인 세 비트가 모두 1인 경우가 발생한다. 따라서, 기존의 $j=2$ 인 형태의 PRML 검출 방법은 적용할 수가 없고, 단지 $j=3$ 을 허용하는 PRML 검출 방법을 사용할 수 있다. 그러나, 상기 코드는 코드워드 경계에서만 $j=3$ 을 허용하고, 나머지 부분에서는 항상 $j=2$ 를 만족하므로 전체적으로 $j=3$ 을 허용하는 PRML 검출 방법을 사용하면 상대적으로 검출 성능 손실이 예상된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 프리코더를 통과한 후에 자기기록 채널에 기록된 데이터에 대한 재생 과정에서 4차의 부분 응답 등화기(4th-order partial response equalizer)를 통해 채널 출력을 등화한 후에, 등화된 출력은 다시 본 논문에서 제안하는 변형된 트렐리스를 갖는 비터비 검출기(Viterbi detector with modified trellis)에 입력되어 검출 과정을 수행하게 된다. 검출기를 통과한 데이터는 다시 MTR 코드의 디코더로 입력되어 디코딩 과정을 수행한다.

3. 변형된 트렐리스를 갖는 PRML 검출 방법

4차의 PR 등화를 통한 기존의 $j=2$ 인 MTR 코드에 대한 비터비 검출기에서는 가지 메트릭 (branch metric, BM)을 구하기 위한 트렐리스에서 연속적인 데이터 천이가 3회 이상 발생하는 6개의 가지가 제거된다(그림 2(a)). 이로 인해 고밀도의 자기기록 채널에서 $j=2$ 인 MTR 코드에 대한 PRML 검출 성능은 기존의 PRML 검출 성능보다 매우 향상되지만, 상대적으로 $j=3$ 인 MTR 코드에 비해 매우 낮은 코드율을 나타낸다. 반대로 4차의 PR 등화를 통한 $j=3$ 인 MTR 코드(그림 2(b))의 경우 코드율 향상면에서 이점이 있는 반면에, 비터비 검출기에서 연속적인 데이터 천이가 4회 이상 발생하는 2개의 가지만 제거되기 때문에 기존의 PRML 검출기보다 성능이 향상되긴 하지만, $j=2$ 인 MTR 코드에 대한 PRML 검출 성능보다는 상대적으로 열악하다.

본 논문에서 제안한 변형된 PRML 검출 방법은 $j=2$ 와 $j=3$ 인 트렐리스가 결합된 형태로 구현될 수 있고, 그림 3에 나타내었다. 이 경우, 코드워드 경계까지는 $j=2$ 인 트렐리스를 통해 비터비 검출 기술을 적용하고, 코드워드가 연결되는 시작점부터 연속 3비트까지는 $j=3$ 인 코드워드의 허용을 위해 $j=3$ 인 트렐리스의 변형을 통해 검출하는 형태로 구현된다. 예를 들어, 현재 코드워드의 4번째 비트(x_4)부터 마지막

LSB (x_0)까지 5비트에 대해서는 항상 $j=2$ 인 트렐리스에 의해 검출이 가능하다. 그러나, 뒤이은 다음 코드워드의 MSB (y_7)와 그 다음 비트 (y_6)는 $j=3$ 을 허용하기 때문에 트렐리스의 변형이 필요하게 된다 따라서, y_7 에 해당하는 트렐리스에서는 기존의 $j=2$ 인 트렐리스에서 다음의 경우에 대해 BM을 추가로 계산해야 한다.

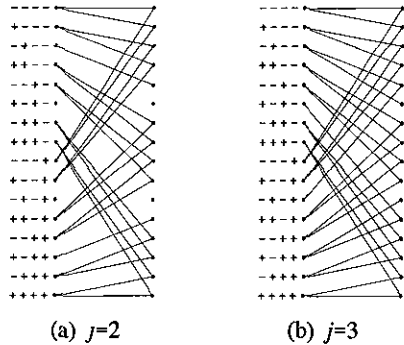


그림 2 기존의 $j=2$ 와 $j=3$ 인 MTR 코드에 대한 트렐리스도

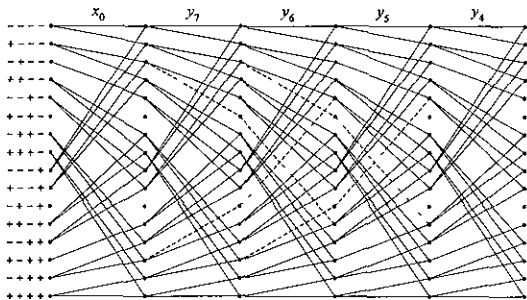


그림 3 $j=2$ 와 $j=3$ 인 트렐리스가 결합된 형태의 변형된 트렐리스도

$$BM(a_k=+1|a_{k-1}=-1, a_{k-2}=+1, a_{k-3}=-1, a_{k-4}=-1) \quad (1)$$

$$BM(a_k=-1|a_{k-1}=+1, a_{k-2}=-1, a_{k-3}=+1, a_{k-4}=+1) \quad (2)$$

또한, 그 다음 비트 y_6 의 경우에는 이전 비트 (y_7)에 대한 트렐리스에 의해 기존의 $j=3$ 인 트렐리스에 대한 BM을 계산한다 즉, 기존의 $j=2$ 인 트렐리스에서 다음의 경우에 대해 BM을 추가로 계산해야 한다

$$BM(a_k=+1|a_{k-1}=-1, a_{k-2}=+1, a_{k-3}=-1, a_{k-4}=-1) \quad (3)$$

$$BM(a_k=+1|a_{k-1}=+1, a_{k-2}=-1, a_{k-3}=+1, a_{k-4}=-1) \quad (4)$$

$$BM(a_k=-1|a_{k-1}=-1, a_{k-2}=+1, a_{k-3}=-1, a_{k-4}=+1) \quad (5)$$

$$BM(a_k=-1|a_{k-1}=+1, a_{k-2}=-1, a_{k-3}=+1, a_{k-4}=+1) \quad (6)$$

마지막으로, y_6 이후의 비트에 대해서는 다시 $j=2$ 인 경우로 제한되므로, 다음 비트 y_5 에서는 $j=2$ 만을 허용하도록 트렐리스의 변형이 필요하게 된다. 따라서, y_5 에 해당하는 트렐리스에서는 기존의 $j=2$ 인 트렐리스에서 다음의 경우에 대해 BM을 추가로 계산해야 한다

$$BM(a_k=+1|a_{k-1}=+1, a_{k-2}=-1, a_{k-3}=+1, a_{k-4}=-1) \quad (7)$$

$$BM(a_k=-1|a_{k-1}=-1, a_{k-2}=+1, a_{k-3}=-1, a_{k-4}=+1) \quad (8)$$

4. 모의실험 결과

그림 4에서는 본 논문에서 제안한 코드율 7/8인 MTR 코드에 대한 변형된 트렐리스를 갖는 4차의 PRML 검출기에 대한 성능을 기존의 선형 수평 자기 기록 시스템에서 사용하고 있는 코드율 8/9인 변조 코드에 대한 검출 성능과 비교하여 나타내었다 이때, 사용한 수평 자기기록 채널은 진폭이 1로 정규화된 로렌치안 펄스(Lorentzian pulse)를 사용하였고, 사용자 비트(user bit)에 대한 정규화된 밀도(normalized density)가 2.5인 경우에 대해 EEPR4ML 검출기를 사용하였다 [7]. 그림에서 보는 바와 같이 고밀도에서 10^{-5} BER을 기준으로 코드율 8/9인 코드에 대한 검출 성능은 7/8 코드에 대한 성능에 비해 상대적으로 0.5dB 이상 저하된다 이러한 원인은 8/9인 코드의 경우, 연속되는 천이가 최대 12비트까지 발생할 수 있기 때문에, 기록 밀도가 높아질수록 인접 심벌간의 간섭이 심해져서 검출 성능의 감소를 나타내기 때문이다. 또한, 7/8 코드에 대해 기존의 $j=3$ 인 트렐리스를 이용하면 0.3dB 정도의 추가적인 성능 향상을 보이고, 변형된 트렐리스를 갖는 비터비 검출기는 기존의 EEPR4ML 검출기에 7/8 코드를 사용한 경우보다

0.6dB 이상 성능 이득을 얻을 수 있다.

그림 5에서는 코드율 7/8인 MTR 코드와 이에 대한 결합된 트렐리스를 갖는 4차의 PRML 검출기에 대한 성능을 기존의 선형 수직 자기기록 시스템에서 코드율 8/9인 변조 코드에 대한 검출 성능과 비교하여 나타내었다. 이때, 사용한 선형 수직 자기기록 채널은 $\tanh()$ 함수로 이루어진 기존의 채널 모델을 사용하였고, 사용자 비트에 대한 정규화된 밀도가 1.5인 경우에 대해 PR(12321)ML 검출기를 사용하였다 [8]. 그림에서 보는 바와 같이 고밀도에서 10^{-5} BER을 기준으로 코드율 8/9인 코드에 대한 검출 성능은 7/8 코드에 대한 성능에 비해 상대적으로 0.8dB 정도 감소된다. 또한, 7/8 코드에 대해 기존의 $j=3$ 인 트렐리스를 이용하면 1.3dB 정도의 추가적인 성능 향상을 보이고, 변형된 트렐리스를 갖는 비터비 검출기는 기존의 PR(12321)ML 검출기에 7/8 코드를 사용한 경우보다 2dB 정도의 성능 이득을 얻을 수 있다.

마찬가지로 그림 6에서는 기존의 비선형 수직 자기기록 시스템에 대해서 검출 성능을 비교하여 나타내었다. 이때, 사용한 비선형 수직 자기기록 채널은 비선형 잡음(지터, DC-offset)이 포함된 형태의 채널 모델을 사용하였고, 전체 잡음 중에 DC-offset 잡음이 10% 차지하고, 나머지 중 지터 잡음과 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise, WGN)이 차지하는 비율을 각각 15%, 85%로 고정하였으며, 사용자 비트에 대한 정규화된 밀도가 1.5인 경우에 대해 PR(12321)ML 검출기를 사용하였다. 그림 6에서도 10^{-5} BER을 기준으로 코드율 8/9인 코드에 대한 검출 성능은 7/8 코드에 대한 성능에 비해 상대적으로 0.8dB 정도 감소된다. 또한, 7/8 코드에 대해 기존의 $j=3$ 인 트렐리스를 이용하면 0.8dB 정도의 추가적인 성능 향상을 보이고, 결합된 트렐리스를 갖는 비터비 검출기는 기존의 PR(12321)ML 검출기에 7/8 코드를 사용한 경우보다 2dB 정도의 성능 이득을 얻을 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 연속적인 천이의 제한을 갖는 코드율이 7/8인 자기기록을 위한 MTR 코드를 위한 변형된 형태의 트렐리스를 갖는 PRML 검출 방법을 제안하였다. 이 검출 방법은 MTR 코드의 특성으로 인해 $j=2$ 와 $j=3$ 인 트렐리스를 결합하여 일부 변형된 형태로 이루어져 있다. 이러한 변형된 트렐리스를 갖는 4차 PRML 검출 방법은 높은 기록 밀도의 수평 및 수

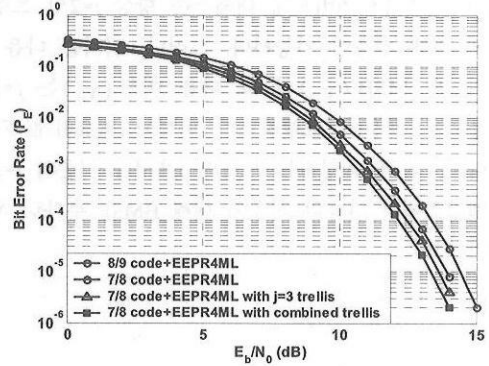


그림 4. 선형 수평 자기기록 채널에서의 비트 오류율 성능 비교 그래프

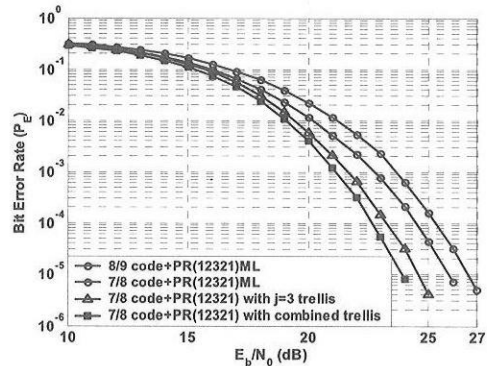


그림 5. 선형 수직 자기기록 채널에서의 비트 오류율 성능 비교 그래프

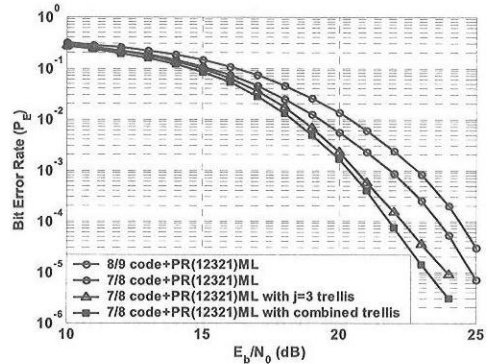


그림 6. 비선형 수직 자기기록 채널에서의 비트 오류율 성능 비교 그래프

직 자기기록 시스템에서 기존의 코드율 8/9인 코드에 대한 4차 PRML 검출 방법에 비해 수 dB 이상의 검출 성능 이득을 보임을 확인하였다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 검출 방법은 기존의 $j=2$ 인 MTR 코드보다 코드율 손실을 줄인 코드율이 7/8인 MTR 코드에 대해 최적의 성능을 나타내는 검출 방법이라고 할

수 있다.

참 고 문 헌

[1] R. D. Cideciyan, E. Eleftheriou, B. H. Marcus, and D. S. Modha, "Maximum transition run codes for generalized partial response channels," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 19, no. 4, pp. 619-634, April 2001.

[2] R. D. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML system for digital magnetic recording," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 10, pp. 38-56, Jan. 1992.

[3] J. Eggenberger and A. M. Patel, "Method and apparatus for implementing optimum PRML codes," U. S. Patent 4,707,681, Nov. 17, 1987.

[4] A. M. Patel, "Rate 16/17 (0,6/6) code," *IBM Tech. Discl. Bull.*, vol. 31, pp. 21-23, Jan. 1989.

[5] J. Moon and B. Brickner, "Maximum transition run codes for data storage systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, pp. 3992-3994, Sept. 1996.

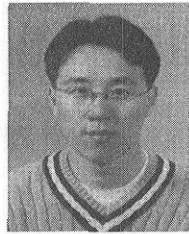
[6] 이주현, 이재진, "고밀도 자기기록 채널을 위한 연속적인 천이의 제한을 갖는 코드," *한국통신학회논문지*, vol. 29, no. 8C, pp. 1034-1039, Aug. 2004..

[7] P. H. Siegel and J. K. Wolf, "Modulation and coding for information storage," *IEEE Communications Magazine*, vol. 29, pp. 68-86, Dec. 1991.

[8] S. Gopalswamy and P. McEwen, "Read channel issues in perpendicular magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 1929-1931, July 2001.

이 주 현 (Joohyun Lee)

정회원



2000년2월: 동국대 전자공학과 학사
 2002년2월: 동국대 전자공학과 석사
 2002년9월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사수료

<관심 분야> 통신이론, 채널 코딩, 검출 기법 연구

이 재 진 (Jaejin Lee)

정회원



1983년2월: 연세대 전자공학과 학사
 1984년12월: U. of Michigan, Dept. of EECS 석사
 1994년 12월: Georgia Tech., Sch. of ECE 박사
 1995년 1월~1995년 12월: Georgia Tech. 연구원

1995년 1월~1997년 2월: 현대전자 정보통신 연구소 책임연구원

1997년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 부교수

<관심 분야> 통신이론, 채널 코딩, 기록저장 시스템