

수직 자기기록 시스템을 위한 코딩 및 PRML 검출 방법의 최적화

정회원 이주현*, 이재진**

Optimization of coding and PRML detection scheme for perpendicular magnetic recording systems

Joo Hyun Lee*, Jae Jin Lee** *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 채널에 적합한 형태의 DC 성분이 억압된 일반화된 PRML (GPRML) 검출 방법을 제안하였다. 또한, 저주파수 영역의 잡음으로부터 데이터를 보호하기 위해 DC 성분이 제거된 코드의 사용을 고려하였다. 본 논문에서는 다양한 PRML 검출기에 코드율이 127/136인 DC 성분이 제거된 코드와 16/17 (=128/136)인 코드율을 갖는 DC 성분이 제거되지 않은 코드를 사용하여 SNR 성능을 분석한 결과, DC 성분이 제거되지 않은 코드에 제안한 GPRML 검출 방법을 사용한 경우, 기존의 PRML 방법을 사용할 때보다 10^{-5} BER에서 1dB 이상의 성능 이득을 보였고, DC 성분이 제거된 코드에 GPRML을 사용할 경우, 정규 밀도 3.3과 3.5에서 각각 1.4dB와 2.0dB의 성능 이득을 보였다.

Key Words : Modulation coding, PRML, perpendicular magnetic recording, DC-free coding, SNR.

ABSTRACT

We propose non-DC-free generalized PRML (GPRML) that are suppressed DC contents for matching to the response of perpendicular magnetic recording channel with a ring-head. In addition, DC-free encoding is considered to prevent low-frequency disturbances. The SNR performance is obtained by combining the various PRML channels with DC-free and non-DC-free codes during the normalized recording density increases from 2.5 to 3.5. The GPRML detections without using DC-free code get SNR gains more than 1dB compared to the conventional PRML systems at 10^{-5} BER. We confirmed that the rate 127/136 DC-free coded GPRML systems show good performances compared with the 16/17 non-DC-free coded GPRML systems. In results, DC-free coded GPRML detections get gains about 1.4dB and 2.0dB at the density of 3.3 and 3.5, respectively.

1. 서 론

최소형의 고용량 정보저장장치의 개발에 있어 높은 부가가치를 창출할 수 있도록 하기 위해서는 이를 위한 신호처리 및 코딩 기술의 연구, 개발이 필수적이다. 다시 말해서, 신호 검출 및 코딩 기술은 기록 밀

도가 높아짐에 따라 물리적인 기술 발전과 함께 매우 중요한 위치를 차지하고 있고, 최적의 성능을 갖는 코딩 기술 및 데이터 검출 방법은 각 시스템의 채널 특성에 따라 다르게 구성된다.

자기 기록 및 재생 시스템을 위한 신호처리부는 오류 정정 코드부(error correction code part), 변조 코

* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실 (xmas@donguk.edu), ** 동국대학교 통신 및 정보저장 연구실 (zlee@dgu.ac.kr)
 논문번호 : 030349-0811, 접수일자 : 2003년 8월 11일

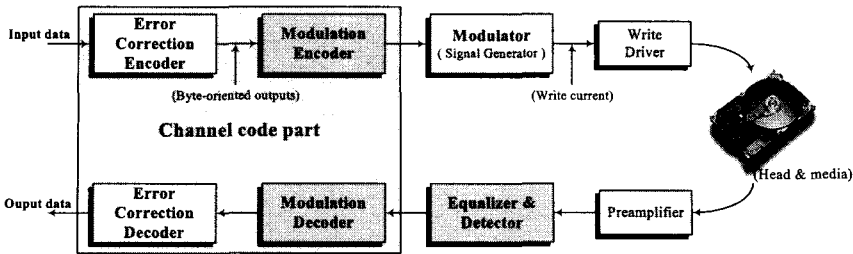


그림 1. 자기 기록 및 재생을 위한 신호처리 블록도

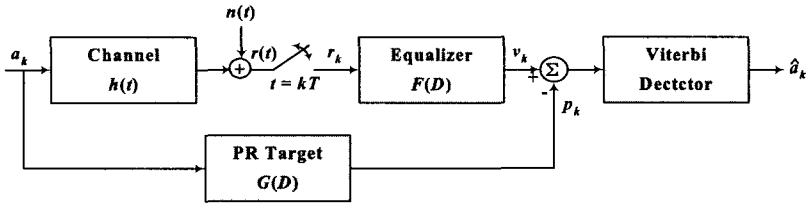


그림 2. 부분 응답 등화 과정을 포함한 최대 유사도 검출(PRML) 과정

드부(modulation code part)와 검출부(detection part)의 세 부분으로 나눌 수 있다 (그림 1)^[1]. 데이터 재생 과정에서 신호 검출부는 재생 헤드를 통해 입력된 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸어 비트열(bit stream)로 만들어주는 역할을 하고, 변조 코드부는 기록되는 데이터열이 기록 매체의 특성에 적합하도록 설계된다. 오류 정정 코드부는 채널에서 발생하는 불규칙 오류(random error) 및 연접 오류(burst error)를 오류 정정 범위 내에서 정정하여 원래의 입력 데이터로 복원하도록 하는 역할을 한다. 현재 대부분의 정보저장장치에서 오류 정정 코드는 입력되는 비트열을 바이트 단위로 출력시키고 있어, 변조 코드부에서도 이를 고려할 필요가 있게 되었다.

본 논문에서 제안하는 검출 및 채널 코딩 방법은 차세대 고밀도 수직 자기기록 중 Ring-헤드를 갖는 채널에 쉽게 적용이 가능하도록 새로운 형태의 일반화된 부분 응답 최대 유사도 (generalized partial response maximum likelihood, GPRML) 검출 방식 및 채널의 응답 특성을 분석하여 검출 성능의 향상을 통한 시스템의 최적화를 위해 DC 성분이 제거된 변조 코드의 사용을 제안하였다. 결과적으로, 이러한 제안을 통해 Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 시스템의 물리적인 비용을 최소화시키면서 고밀도, 고용량의 정보저장장치를 구현할 수 있도록 설계하였다.

II. 일반화된 PRML 검출

본 논문에서 제안하는 코딩 및 검출 방법의 근간으

로 사용된 Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 채널의 헤드는 기존의 HDD에서 사용하던 Ring-헤드의 끝부분(top pole edge)을 깎아낸 형태로써, 헤드의 자계를 보다 강하게 하는 특징을 갖고 있다^[2]. 이러한 채널의 단일 천이 응답(single transition response, $g(t)$)은 하나의 로렌쯔안 펄스(Lorentzian pulse)에 한 비트만큼 시간 이동을 한 반대 극성을 갖는 또 하나의 로렌쯔안 펄스가 서로 중첩된 형태로 표현될 수 있고, 임펄스 응답(impulse response, $h(t)$)은 두 개의 단일 천이 응답에 대한 선형 조합으로 표현될 수 있다^[3].

2.1 시스템 모델

부분 응답 최대 유사도(partial response maximum likelihood, PRML) 검출 기법은 신호간의 간섭을 부분적으로 허용한 후, 수신단에서 신호간 간섭의 보상을 통해 원래의 신호를 복원해 내는 기술이다. 이 기술은 대역이 제한된 환경에서 대역폭 효율을 증가시키고, 기록 밀도의 현저한 향상을 가져오는 장점으로 인해, 현재 대부분의 정보저장장치에 적용되고 있다^[4].

그림 2는 채널을 통과한 입력 데이터에 대해 수신단에서의 부분 응답 등화 (partial response equalization) 및 최대 유사도 검출 (maximum likelihood detection) 과정을 간단히 도시하였다. 수직 자기기록 채널은 이진 입력(binary inputs)을 갖는 잡음이 존재하는 통신 채널(noisy communication channel)의 형태로 표현될 수 있다^[5]. 따라서, 입력 비트 a_k 는 임펄스 응답 $h(t)$ 를 통과한 후, 각종 잡음 $n(t)$ 가 부가되는 형태로 구성된다. 이러한 출력 $r(t)$ 는 다음과

같이 표현할 수 있다.

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t-kT) + n(t) \quad (1)$$

이렇게 통과한 출력 $r(t)$ 가 수신단에서 LPF(low pass filter)를 통과하여 A/D 변환기(analog-to-digital converter)를 거치는 과정을 포함한 일반적인 아날로그 신호처리 과정을 그림 2에서는 표본화기(sampler)로 간단히 표현하였다.

표본화기를 통과한 출력 r_k 는 등화기에 입력되어 PR 등화 과정을 거치게 된다. PR 등화 과정을 위해 사용되는 일반화된 PR (GPR) 다항식은 다음과 같은 형태를 갖는다⁶⁾.

$$G(D) = 1 + g_1 D + g_2 D^2 + \dots + g_n D^n \quad (2)$$

이때, n 과 $g \in \{g_1, g_2, \dots, g_n\}$ 는 각각 0이 아닌 양의 정수와 PR 목표 응답(target response)의 계수를 나타낸다. 현재 상용 HDD에서는 PR 목표 응답으로 $(1-D)(1+D)^n$ 형태의 다항식을 사용하는데, n 이 1과 2인 경우를 각각 PR4 및 EPR4 (extended PR4) 다항식이라 한다⁷⁾. 이와 같이 설계된 등화기를 통해 출력된 값은 다시 비터비 검출기(Viterbi detector)를 통과하여 실제적인 데이터 검출을 수행함으로써 PRML 검출 과정을 마치게 된다.

2.2 GPRML 검출 방법

주어진 채널 조건 하에서 보다 고밀도의 기록과 최적의 데이터 재생 시스템을 구현하기 위해서는 각종 채널 코딩 기술의 적용에 앞서 채널 특성에 관한 연구를 토대로 효율적인 검출 방법의 사용이 필수적이다. 그림 3에서는 Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 채널의 임펄스 응답에 대한 채널 스펙트럼 및 PR 목표 응답을 추정하고, 이에 대한 BER 검출 성능을 나타내었다. 그림 3(a)에서 보는 바와 같이 채널 임펄스 응답이 DC 성분과 고주파수 성분을 어느 정도 포함하고 있음에도 불구하고, 기존의 PR4 기반의 목표 응답을 적용하여 PRML 검출기를 구성할 경우, 저주파수 및 고주파수 대역 모두에서 데이터를 억압시켜 최적의 검출 성능을 이룰 수가 없게 됨을 알 수 있다. 따라서, 저주파수 및 고주파수 대역에서의 데이터 손실을 줄이기 위해 새로운 형태의 PR 목표 값이 필요하게 된다.

본 논문에서는 변형된 Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 채널을 위해 $(1-h_1 D)(1+h_2 D)^n$ ($0 \leq h_1 < 1,$

$h_2 \geq 1, n=0, 1, 2, \dots$) 형태의 새로운 목표 응답 다항식을 제안한다. 채널을 통과한 데이터에 대한 PR 등화 과정에서 $(1-h_1 D)$ 항과 $(1+h_2 D)$ 항은 각각 DC 성분을 억압(suppression)하는 정도와 고주파수 대역에서의 감쇄(attenuation) 정도를 나타낸다. 따라서, 본 논문에서 제안하는 일반화된 PR 목표 응답을 갖는 검출 방법은 어느 정도 DC 영역에서의 데이터의 존재를 고려하여 등화하고, 고주파수 대역의 데이터 손실도 최소화하여 최적의 검출 성능을 나타내도록 한다. 그림 3(a)에서 PR(1 4.3 2.75 -4.375) ($n=2, h_1=0.7, h_2=2.5$)에 대한 응답의 경우, PR4 및 EPR4 응답과는 달리 채널 임펄스 응답에 대해 매우 유사한 형태를 나타내고 있어 기존의 PRML 검출 방법보다 향상된 성능을 가질 수 있다. 이러한 예측을 입증하기 위해, 제안한 GPRML 및 기존의 PR4ML과 EPR4ML 검출 방법에 대해 백색 가우시안 잡음(white Gaussian noise)만이 추가되었을 때의 신호 대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)에 따른 성능을 그림 3(b)에 나타내었다.

또한, 그림 3(b)에서는 PR4ML과 동일한 차수를 갖는 PR 목표 응답 중 최적의 성능을 보이는 PR(1 1.1 -0.8) ($n=1, h_1=0.5, h_2=1.6$) 다항식을 갖는 경우에 대해서 모의실험을 한 결과도 나타내었다. 모의실험 내용을 종합해 볼 때, PR(1 4.3 2.75 -4.375)ML 검출 방법이 가장 최적의 성능을 보이고, PR(1 1.1 -0.8)ML 또한 기존의 PRML 검출 방법보다 우수한 성능을 나타냄을 볼 수 있다. 예를 들어, 10^5 BER에서 $n=1$ 과 2인 경우, PR(1 1.1 -0.8)ML과 PR(1 4.3 2.75 -4.375)ML은 PR4ML, EPR4ML보다 각각 약 0.5dB와 1dB 이상의 성능 향상을 가져옴을 볼 수 있다.

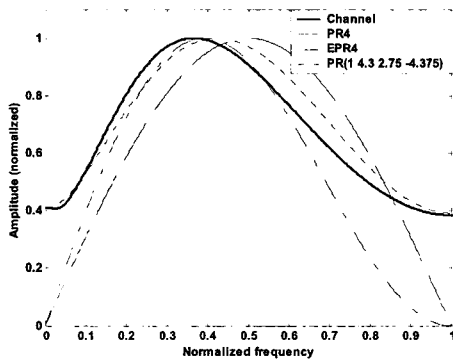
표 1은 그림 3에서 제안한 GPR 다항식 외에 이와 유사한 성능을 보이는 다항식의 계수 값을 나타내었다. 표 1에서 제안한 다항식을 적용한 GPRML 검출 방법은 모두 최적에 근접하는 성능을 나타냄을 컴퓨터 모의실험을 통해 입증하였다.

III. DC-free 변조코딩에 의한 GPRML 검출 성능의 최적화

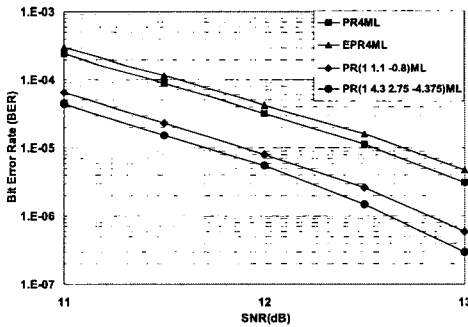
기존의 수평 자기기록 방식에서는 채널이 DC 영역에서 데이터를 통과시키지 않는 특성을 지니고 있어, 일반적인 변조코딩의 사용을 통해 데이터를 재생하는데 문제점이 발생하지 않는다. 그러나, 수직 자기기록

채널에서는 DC 영역으로 데이터가 통과하는 특징을 가지고 있는 반면에, 기록/재생 헤드의 열적 열악함으로 인해 저주파수 대역에서 잡음을 일으키게 되어 데이터의 올바른 재생이 불가능하게 될 수도 있다.

따라서, 가능하면 DC 영역으로의 데이터 통과를 줄이기 위해 DC 성분이 충분히 제거된 형태의 변조 코딩이 필요하다. 정보저장장치에서 요구하는 변조 코드에 대한 제한 조건들은 일반적으로 런-길이 제한



(a) 채널 임펄스 응답 및 PR 목표 응답



(b) PRML 검출 방법에 대한 BER 성능

그림 3. 채널 임펄스 응답 및 PR 목표 응답 추정과 PRML 검출 성능 비교

표 1. 최적화된 GPR 목표 응답 계수

n	h_1	h_2	다항식 계수
1	0.5	1.6	(1 1.1 -0.8)
1	0.4	1.6	(1 1.2 -0.64)
1	0.3	2.1	(1 1.8 -0.63)
2	0.7	2.4	(1 4.1 2.4 -4.032)
2	0.7	2.5	(1 4.3 2.75 -4.375)
2	0.6	2.7	(1 4.8 4.05 -4.374)
2	0.6	2.8	(1 5.0 4.48 -4.704)
2	0.5	3	(1 5.5 6.0 -4.5)

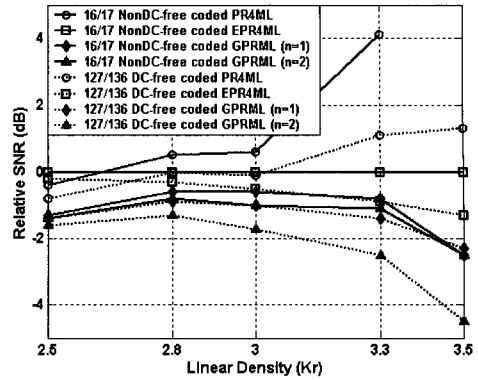


그림 4. 10^{-5} BER에서의 상대적인 SNR

(run-length limited, RLL) 코드를 이용하여 만족시킬 수 있는데, 본 논문에서는 여러 가지 변조 코드 중에서 K. A. S. Immink와 A. V. Wijngaarden에 의해 개발된 코드율 16/17인 (0, 6) 코드를 사용하였고^[8], DC 영역에서 데이터 성분이 존재하지 않도록 하기 위해 기존의 Guided Scrambling 인코딩 방법을 이용하였으며^[9], 이를 GPRML 검출 방법에 적용하여 컴퓨터 모의실험을 통해 성능을 검증하였다. 참고로, 본 논문에서 이용한 코드 이외에 다른 종류의 코드를 사용해도 제안한 방법을 적용함에 있어 영향을 미치지 않는다.

본 절에서는 GPRML 검출 방법과 DC 성분이 제거된 코드를 함께 적용하였을 때의 검출 성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 분석하였다. 이때, 저주파수 영역은 천이 지터 유사 잡음(transition jitter-like noise)이 포함된 형태로 모델링 하였고, AWGN과 천이 지터 유사 잡음의 비율은 50% : 50%으로 가정하였으며, 정규 기록 밀도가 2.5에서 3.5로 증가하는 동안 DC 성분이 제거된 코드와 제거되지 않은 코드에 다양한 형태의 PRML 검출 방법을 결합하여 10^{-5} BER에서의 상대적인 SNR을 그림 4에 나타내었다. 이를 통해, 코드율이 127/136인 DC-성분이 제거된 GPRML 검출 성능이 16/17(=128/136)의 코드율을 갖는 DC-성분이 제거되지 않은 코드에 대한 GPRML 성능보다 우수하여, 정규 기록 밀도가 3.3과 3.5일 때 각각 1.4dB와 2.0dB의 성능 향상이 있음을 확인하였다. 결과적으로, 기존의 수평 자기기록 시스템에서 적용해온 검출 방법 및 변조 코드를 그대로 수직 자기기록 시스템에 적용하는 것보다 제안한 GPRML 검출 방법에 DC-성분이 제거된 코드를 사용한 경우에 월등한 성능 향상을 가져오게 되어 최적화된 시스템을 구현할 수 있음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 시스템의 최적화를 위한 DC 성분이 제거된 코드에 일반화된 검출을 결합한 방법을 제안하였다. 채널 특성의 파악을 통해 수직 자기기록 채널에 대한 GPRML 검출 방법으로 $(1-h_1D)(1+h_2D)$ ($0 \leq h_1 < 1, h_2 \geq 1$) 형태의 새로운 목표 응답 다항식을 제안하였고, 이 중에서 PR(1 1.1 -0.8)ML과 PR(1 4.3 2.75 -4.375)ML이 각 해당 차수에서 최적의 성능을 나타내었으며, 10^{-5} BER 기준에서 PR4ML, EPR4ML보다 각각 약 0.5dB와 1dB 이상의 성능 이득을 보였다.

또한, DC 영역으로 데이터가 통과되는 채널 특성으로 인해 야기되는 검출 성능 저하는 DC-성분을 제거하는 코딩을 통해 보상이 가능함을 모의실험을 통해 입증하였다. 제안한 GPRML 검출 방법과 DC 성분이 제거된 코드를 함께 적용한 결과, 정규 기록 밀도 3.3과 3.5에서 PR(1 4.3 2.75 -4.375)ML의 경우, DC 성분이 제거되지 않은 코드를 사용한 경우보다 각각 약 1.4dB와 2.0dB 정도의 성능 이득을 보였다. 결과적으로, 본 논문에서 제안하는 수직 자기기록 시스템을 위한 DC 성분이 제거된 코드 및 GPRML 검출 방법은 실제 채널과 유사한 모델을 통해 특성 및 문제점 등을 고려하여, 실제의 수직 자기기록 시스템에서 최적화된 성능을 나타낼 수 있다고 할 수 있다.

참고 문헌

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

[2] E. Kim, Y. H. Im, Y. Kim, K. J. Lee, K. Lee and N. Y. Park, "Head design scheme for perpendicular recording with single layered media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 1382-1385, July 2001.

[3] 이주현, 이재진, "Ring-헤드를 갖는 수직 자기기록 시스템을 위한 비대칭 채널 모델," *한국통신학회논문지*, vol. 29, no. 1C, pp. 45-49, Jan. 2004.

[4] K. D. Fisher, W. L. Abbott, J. L. Sonntag and R. Nesin, "PRML detection boosts hard-disk drive capacity," *IEEE Spectrum*, vol. 33, pp. 70-76, Nov. 1996.

[5] R. D. Cideciyan, E. Eleftheriou and T.

Mittelholzer, "Perpendicular and longitudinal recording: A signal-processing and coding perspective," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, no. 4, pp. 1698-1704, July 2002.

[6] H. Song, J. Liu, B. V. K. V. Kumar and E. Kurtas, "Iterative soft decoded partial response channels for hybrid magneto-optical recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 2, pp. 676-681, March 2001.

[7] J. G. Proakis, "Equalization techniques for high-density magnetic recording," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 15, pp. 73-82, July 1998.

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

[9] K. A. S. Imminck and A. V. Wijngaarden, "Simple high-rate constrained code," *Electronics Letters*, vol. 32, no. 20, pp. 1877, Sept. 1996.

이 주 현(Joo hyun Lee)

정회원



2000년 2월 동국대학교 전자공학과 학사
 2002년 2월 동국대학교 전자공학과 석사
 2002년 9월~현재 동국대학교 전자공학과 박사수료
 <관심분야> 통신이론, 채널 코딩,

검출 기법 연구

이 재 진(Jae jin Lee)

정회원



1983년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
 1984년 12월 Univ. of Michigan, Dept. of EECS 석사
 1994년 12월 Georgia Tech., Sch. of ECE 박사
 1995년 1월~1995년 12월 Georgia

Tech. 연구원

1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신 연구소 책임연구원

1997년 3월~현재 동국대학교 전자공학과 부교수
 <관심분야> 통신이론, 채널 코딩, 정보저장 시스템