

부분응답 신호대잡음비를 이용한 PRML 검출 방법

준회원 박애경*, 종신회원 이재진**

PRML Detection Method Using PRSNR

Aekyung Park* Associate Member, Jaejin Lee** Lifelong Member

요약

본 논문은 광기록 채널에서 신호의 질을 평가하는 부분 응답 신호대잡음비(PRSNR) 방법을 신호 검출에 응용한 부분 응답 최대 유사도(PRML) 검출 방법을 제안한다. 비선형적인 요소가 많은 고밀도 광기록 채널을 적절히 적응 등화하기 위해서는 최대 PRSNR 값을 갖는 등화기를 선택하여야한다는 것을 확인하였다. 제안한 PRML 검출 방법은 기존의 적응 등화기를 사용한 PRML 검출 방법과 비교하여 8.5×10⁻⁵ 오류율에서 1.8dB의 성능 이득을 보인다.

Key Words : optical storage, PRML detection, PRSNR, tangential tilt

ABSTRACT

This paper presents a partial response maximum likelihood (PRML) detection method using partial response signal-to-noise ratio (PRSNR) that evaluates the signal quality of asymmetric optical recording channel. It is confirmed that the equalizer maximizing the PRSNR value can be most properly adapted to the asymmetric optical recording channel. The proposed PRML detection using this result has 1.8dB SNR gain at 8.5×10⁻⁵ bit error rate compared to PRML detection using typical adaptive equalizer.

1. 서론

부분응답 신호대잡음비(Partial Response Signal-to-Noise Ratio, PRSNR)는 신호 특성 측정 이외에 최적의 기록을 위한 신호의 세기를 탐색하는데 사용되고 있다^[1-3]. PRSNR 값은 비트 에러율(bit error rate, BER) 값이 최저일 때의 기록 파워에서 최대 값을 갖는다. 더욱이 BER 값을 정확하게 계산하기 위해서는 많은 참조 데이터(Reference Data)가 필요하지만 PRSNR 값은 참조 데이터 없이 적은 수의 데이터만으로도 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있기 때문에 최적 기록 파워를 찾는 데 있어서 유용하게 사용되고 있다. 따라서 참조 데이터 없이 적은 수의

데이터만으로도 신뢰성 있게 채널의 특성을 파악하는 PRSNR의 특성을 활용하여 PRML 시스템에서 검출 성능을 향상시키는 알고리즘을 본 논문에서 제안한다.

PRSNR을 활용한 PRML 검출기의 전체 구조는 그림 1과 같다. 그림 1에서 a_k 는 최초 입력값 곧 참조 데이터 값이다. 채널을 통과한 입력값은 잡음과 ISI 등으로 왜곡된다. 왜곡된 데이터는 등화기를 거쳐 ISI가 조절되고 목표 다항식과 근사한 신호가 출력될 수 있도록 등화된다. 이 신호가 비터비 검출기를 거쳐 최종적으로 추정된 출력 신호 \hat{a}_k 가 된다. 이 때, PRSNR은 등화기 심플값과 비터비 검출기의 추정값을 사용하여 계산된다. 최적등화기-선택부

※ 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

* 휴맥스 (imak99@hanmail.net)

** 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실 (zlee@ssu.ac.kr, 교신저자)

논문번호 : KICS2006-04-158, 접수일자 : 2006년 4월 3일, 최종논문접수일자 : 2006년 9월 4일

(Optimal Equalizer-Selector, OEQ-Selector)는 계산된 PRSNR 값이 신뢰할 수 있는 값을 얻을 때까지 누적하여 평균시키며, 신뢰할 수 있는 값을 얻었을 때에는 N 개의 등화기 중 PRSNR 값이 최대인 즉, 채널에 가장 적합한 등화기를 선택한다. 최적의 등화기가 선택 되어진 이후에는 더 이상 PRSNR값을 계산하지 않음으로써, PRSNR 계산기로 부가될 수 있는 계산량과 복잡성을 최소화 하였다.

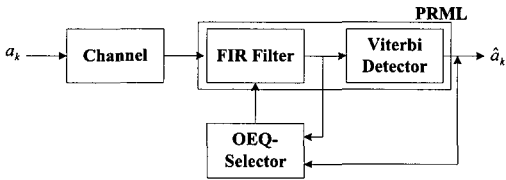


그림 1. 제안된 PRML 검출기의 블록 다이어그램

II. 부분응답 신호대잡음비

2.1. PRSNR의 오류 사건

PRSNR은 목표 다항식(PR Target)에 따라 오류 사건(Error Event)을 미리 규정한다. 예를 들어 목표 다항식을 블루레이(Blu-ray Disc, BD) 채널에서 가장 적합한 것으로 알려진 4차 PR(12221) 타겟을 사용할 경우, 빈번히 발생할 수 있는 오류 사건을 3가지 경우로 정할 수 있다. 오류 사건 $E(D)$ 는 목표 다항식 $H(D)$ 와 오류가 발생할 수 있는 경우인 $A(D)$ 의 컨벌루션으로 계산된다. 여기서 D 는 심볼 지연 연산자이다. 광 기록 채널에서 전형적인 오류 사건은 Bit shift, 고립된 2T 오류, 연속한 2T 오류 사건 등이다. PR(12221)에서 오류 사건과 해당 오류 다항식, 그리고 이러한 오류 사건이 목표 다항식을 통과하므로써 결과적으로 나타나는 오류 다항식을 표 1에 나타내었다.

표 1. PR(12221)에서 오류 사건과 그 결과 다항식

오류 사건	오류 다항식	발생되는 결과 오류 다항식
Bit shift	1	$1 + 2D + 2D^2 + 2D^3 + D^4$
고립된 2T 오류	$1 - D^2$	$1 + 2D + D^2 - D^4 - 2D^5 - D^6$
연속한 2T 오류	$1 - D^2 + D^4$	$1 + 2D + D^2 + D^4 + 2D^5 + D^6$

그림 2~4는 Bit shift, 고립된 2T 오류 그리고 연속한 2T 오류의 오류 벡터를 적용하여 실제 기록된 데이터와 잘못 추정된 데이터와의 유클리드 거리

(Euclidean Distance)를 나타내고 있다. Bit shift, 고립된 2T 오류 그리고 연속한 2T 오류 사건에 대한 각각의 유클리드 거리는 $\sqrt{14}$, $\sqrt{12}$ 그리고 $\sqrt{12}$ 이다.

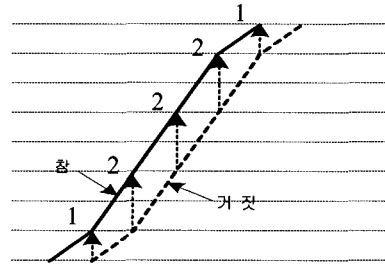


그림 2. Bit shift의 유클리드 거리

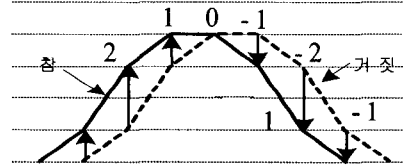


그림 3. 고립된 2T 오류의 유클리드 거리

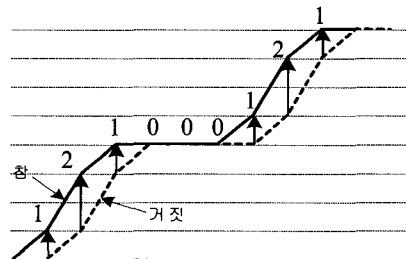


그림 4. 연속한 2T 오류의 유클리드 거리

2.2. PRSNR의 계산

PRSNR을 구하는 방법은 나머지 오류(Residual Error)의 자기상관 $R_i = E[n_k n_{k+i}]$ 와 오류 사건에 따라 달라지는 각각의 필터 계수 β_i 들을 서로 곱한 후 모두 더한 값으로 한다. PR(12221)의 목표 다항식에서 Bit shift 오류 사건에 대한 계수를 구하는 방법을 예로 들어 설명하면 다음과 같다.

먼저 실제 기록된 데이터와 잘못 추정된 데이터와의 차이는 식 (1)과 같다.

$$z^{-2} + 2z^{-1} + 2z^0 + 2z^1 + z^2 \quad (1)$$

식 (1)을 목표 다항식과 컨벌루션 하면 다음과 같은 식이 얻어진다.

$$(z^{-2} + 2z^{-1} + 2z^0 + 2z^1 + z^2)^2 = z^{-4} + 4z^{-3} + 8z^{-2} + 12z^{-1} + 14z^0 + 12z^1 + 8z^2 + 4z^3 + z^4 \quad (2)$$

구해진 식에서 계수 β_i 를 다음과 같이 얻을 수 있다²⁾.

$$(\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4) = (1, \frac{12}{7}, \frac{8}{7}, \frac{4}{7}, \frac{1}{7}) \quad (3)$$

같은 방법으로 고립된 2T 오류와 연속한 2T 오류에 대해서도 각각의 계수를 구할 수 있다. 계수 β_i 를 적용한 PR(12221) 목표 다항식에서는 다음의 세 가지 PRSNR 후보들을 얻을 수 있다²⁾.

$$SNR1 = 14 / \{R_0 + (12R_1 + 8R_2 + 4R_3 + R_4) / 7\}$$

$$SNR2 = 12 / \{R_0 + (8R_1 + R_2 - 4R_3 - 6R_4 - 4R_5 - R_6) / 6\}$$

$$SNR3 = 12 / \{R_0 + (8R_1 + 2R_2 + R_4 + 4R_5 + 6R_6 + 4R_7 + R_8) / 6\}$$

SNR1, SNR2, SNR3은 각각 Bit shift, 고립된 2T 오류 그리고 연속한 2T 오류의 PRSNR을 의미한다. 이 세 가지 PRSNR 후보 중에서 가장 작은 값이 최종적으로 PRSNR 값이 된다.

2.3. 채널 모델

제안된 PRML 검출기의 성능을 분석하기 위해서 그림 5에 나타난 35GB BD 채널에서의 채널 임펄스 응답을 이용하였다. 그림 5의 채널 임펄스 응답은 실제 디스크 상에서 Tangential Tilt가 0°~0.9°로 변화될 때 발생하는 채널 임펄스 응답의 모델을 일반화시킨 그림이다⁴⁾. 각도가 클수록 점점 더 비대칭이 되면서 펄스가 왜곡되는 것을 볼 수 있다.

PRSNR은 앞서 언급한 것과 같이 적은 데이터만으로도 신뢰할 수 있는 값을 얻을 수 있다. 따라서 이 절에서는 표 2와 같은 실험 조건으로 신뢰할 수 있는 PRSNR 값을 얻을 수 있는 데이터 길이를 실험으로 확인하였다. 모의실험은 광기록 채널에서 중요한 비선형 요소인 디스크의 tangential tilt가 변화할 때, 해당 tilt의 각도에 대응하여 적절히 등화기가 쫓아 가는지를 tilt = 0.0°, 0.3°, 0.6°, 0.9°에서 실험하였고, 각 비선형 채널에 최적으로 학습시킨 4개의 등화기를 적용하였다. 그림 6에서 보면

각 실제 채널의 tilt 각도에 따라 최대의 PRSNR 값을 갖는 등화기는 그 비선형 채널에 최적으로 학습된 등화기임을 확인 할 수 있다. 뿐만 아니라 tilt = 0.0°에서는 최대의 PRSNR을 갖는 등화기가 명확히 구분되는 데이터의 시점이 10³이지만 tilt = 0.9°에서는 데이터 수 50개 미만에서 최대의 PRSNR 값이 명확히 구분되는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 비선형 채널의 왜곡이 큰 채널에서도 PRSNR 값은 채널의 특성을 파악하는 지표로 활용할 수 있음을 의미한다.

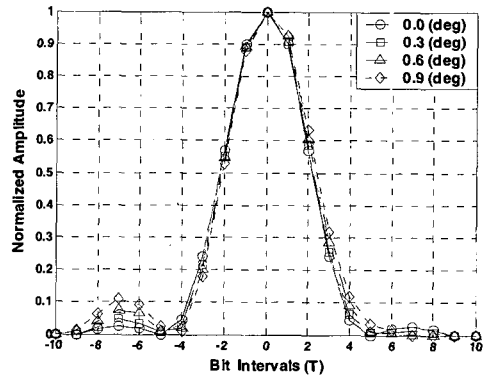
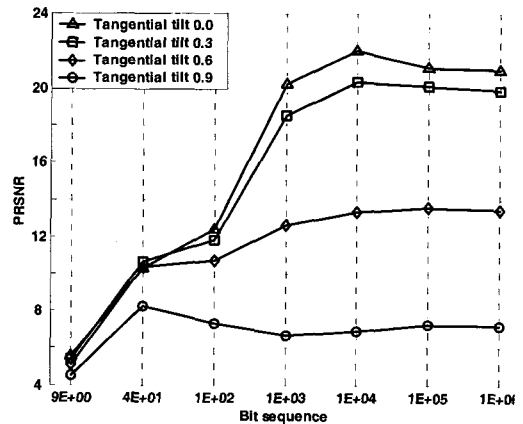


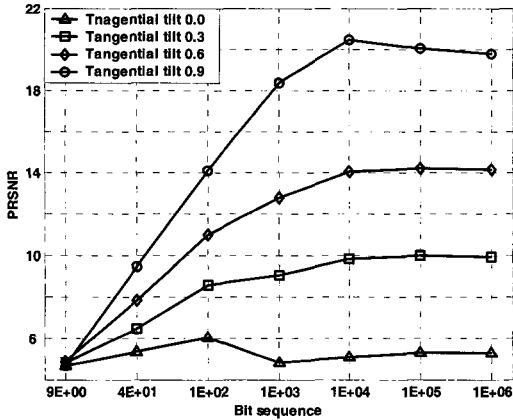
그림 5. 35GB BD 채널에서의 채널 임펄스 응답

표 2. 모의실험 조건²⁾

채널	Blu-ray Disc (BD)
목표 다항식	PR(1,2,2,2,1)
변조 코드	17PP
등화기 필터	9



(a) 실제 채널의 tilt = 0.0°



(b) 실제 채널의 tilt = 0.9°
그림 6. 비선형 채널에서 각 등화기의 PRSNR 값의 변화

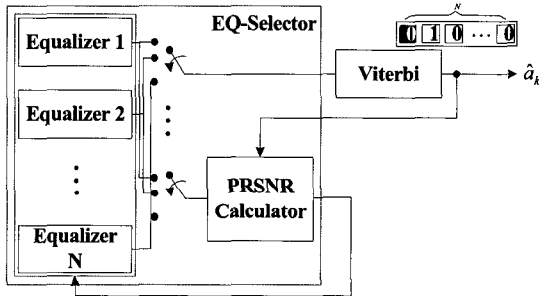


그림 7. PRSNR을 이용한 PRML 검출기

III. PRSNR을 적용한 PRML 검출 방법

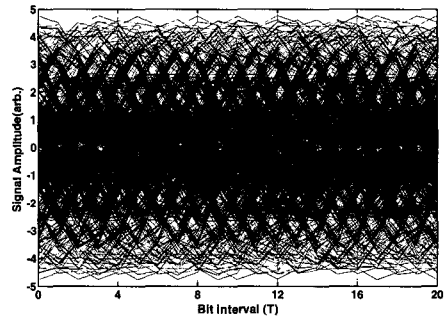
3.1. 알고리즘

PRSNR을 적용한 PRML 검출기는 그림 7과 같이 표현할 수 있다. 제안하는 PRML 검출기는 N개의 등화기, 검출기, PRSNR 계산기로 분류된다. 먼저, 여러 개의 비선형 채널에 각각 학습되어 최적화된 등화기 N개를 차례로 비터비 검출기에 통과시켜 N개의 추정값을 얻는다. 그 추정값을 메모리에 저장한다. 저장된 N개의 비터비 추정값과 N개의 등화기 심볼값을 사용하여 PRSNR 값을 계산한다. 신뢰할 수 있는 PRSNR 값을 얻기 전까지는 PRSNR 계산기에서 얻어진 N개의 PRSNR 값 중에서 가장 큰 값을 갖는 등화기와 비터비 검출기의 추정값을 최종 출력값으로 결정한다. 앞에서 확인된 PRSNR 특성을 활용하여 최대 10³ 번째의 데이터에서 채널에 가장 적합한 등화기를 선택하고, 그 이외의 등화기는 슬립-모드 (Sleep-mode)를 적용한다. 더불어 N

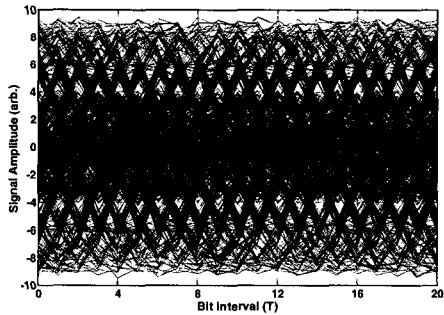
개의 등화기에 따른 N개의 비터비 검출기의 추정값을 저장하였던 메모리도 사용하지 않는다. 최적의 등화기/비터비 검출기를 제외한 다른 등화기/비터비 검출기에 슬립-모드를 적용함으로써 증가될 수 있는 계산량과 복잡성을 줄였다. 따라서 기존의 PRML 검출기와 비교할 때 하드웨어적으로는 N배의 복잡도를 지나 실제적인 검출 과정에서는 기존의 검출기와 같은 양의 계산을 수행한다.

3.2. 성능평가

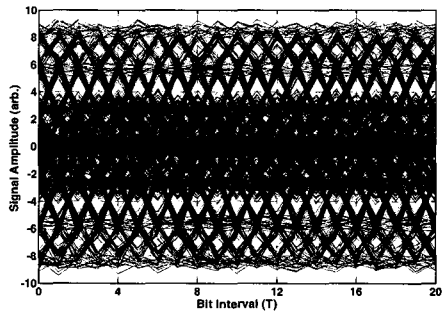
그림 8(a)는 Tilt = 0.9°인 채널의 아이패턴 형상



(a) Tilt = 0.9°인 채널 출력 신호의 Eye Pattern



(b) 등화기 계수가 Tilt = 0.3°에 맞춰진 등화기 출력



(c) 등화기 계수가 Tilt = 0.9°에 맞춰진 등화기 출력

그림 8. Tilt 0.9° 채널에서 각 등화기 출력의 Eye Pattern

이다. 신호의 크기가 -5에서 5까지 분포되어 있음을 확인할 수 있다. 또한 열화의 정도가 -1부터 1까지 집중되어 있다. 부분 응답 등화기를 적용하면 신호의 레벨이 -10에서 10까지 분포되어, 채널에 의해 -1부터 1까지 열화된 신호의 눈 크기를 크게 할 수 있다. 그림 8(b)와 (c)를 비교해서 보면 tilt = 0.9°에 최적으로 학습시킨 등화기 출력 파형의 눈 크기가 가장 크다.

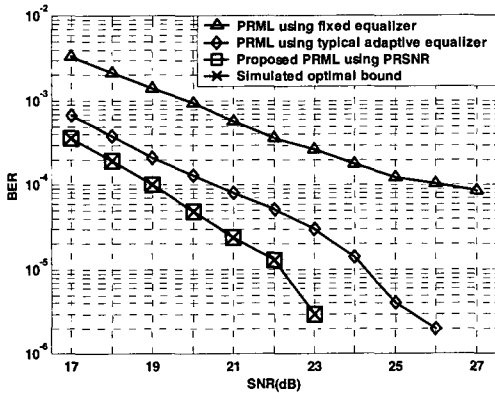


그림 9. Tilt 0.9°에서 제안한 PRML 검출방법과 일반적인 PRML 검출 방법의 BER 성능 비교

그림 9는 tilt가 0.9°인 35GB 비선형 광기록 채널에서 제안한 PRML 검출 방법과 다른 PRML 검출 방법을 비교한 것이다. 그림에서 PRML using fixed equalizer는 트레이닝 기간 동안만 등화기 계수를 갱신하고 트레이닝이 끝나면 계수값을 더 이상 갱신하지 않는 것이고, PRML using typical adaptive equalizer는 데이터 검출과정 내내 등화기 계수를 갱신하는 적응 등화기를 말한다. 또 Simulated optimal bound는 미리 모든 상황을 알고 있다고 가정하여 등화기 계수를 정하고 시뮬레이션한 결과를 말한다. 제안한 PRML 검출 방법은 tilt가 0.9°인 비선형 채널에서 기존의 적응 등화기와 비교하여 8.5×10⁻⁵의 BER에서 1.8dB의 이득을 얻었다. 이외의 다른 비선형 채널에서의 성능은 tilt=0.0°일 때, 3.0×10⁻⁶의 BER에서 0.25dB, tilt=0.3°일 때, 6.0×10⁻⁶의 BER에서 0.52dB, tilt=0.6°일 때, 3.0×10⁻⁶의 BER에서 1.75dB의 이득을 얻었다. 제안한 PRML 검출기는 Tangential tilt가 크면 클수록, 더 높은 SNR 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 본 논문에서 사용한 신호대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)는 아래 식과 같이 나타낼 수 있으며, 여기서 σ_0^2 은 잡음의 전력을 나타낸다.

$$SNR = 10 \log_{10} \frac{A^2}{\sigma_0^2}$$

IV. 결론

본 논문에서는 35GB BD 채널에서 기록신호 특성 측정 방법인 PRSNR을 이용한 PRML 검출기의 알고리즘을 제안하였다. 모의실험에서 각 비선형 채널에서 최대의 PRSNR 값을 갖는 등화기는 그 비선형 채널에서 최적으로 학습된 등화기임을 확인할 수 있었다. 제안한 PRML 검출방법은 성능 향상을 목적으로 사용되는 계수 갱신 등화기를 사용한 PRML 검출방법과 비교하여, 비선형 채널의 Tangential tilt가 증가할수록 더 높은 SNR 이득을 얻었다. 또한 PRSNR 계산기로 인해 부가될 수 있는 계산량과 복잡성을 적은양의 데이터 비트로 채널을 파악하는 PRSNR의 특성을 활용하여 감소시켰다.

참고 문헌

- [1] N. Ide, "Adaptive partial-response maximum likelihood detection in optical recording media," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 5B, pp. 1789-1790, May 2002.
- [2] M. Ogawa, M. Nakano, S. Ohkuno, H. Honma, T. Ichimura and T. Iwanaga, "Optimization of write conditions with a new measure in high-density optical recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, no. 9B, pp. 4863-4866, Sept. 2004.
- [3] T. Narahara, S. Kobayashi, M. Hattori, Y. Shimpuku, G. J. Enden, J. A. H. M. Kahlman, M. Dikj and R. Woudenberg, "Optical Disc System for Digital Video Recording," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 2B, pp. 912-919, Feb. 2000.
- [4] A. Padily, B. Yin, C. Verschuren, J. Lee, R. Vlutters and T. Jansen, "Signal processing for 35GB on a single-layer Blu-ray Disc," *Proc. of SPIE*, vol. 5380, pp. 56-70, 2004.

박 애 경 (Aekyung Park)

준회원



2002년 2월 : 세종대학교
정보통신공학과 학사
2006년 2월 : 동국대학교
전자공학과 석사
2006년 6월 ~현재 :
(주)휴맥스 연구원
<관심분야> 통신신호처리,

통신시스템

이 재 진 (Jaemin Lee)

종신회원



1983년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 학사
1984년 12월 : 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 ~2005년 8월 : 동국대학교 전자공학과 부
교수
2005년 9월 ~현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 부
교수
<관심 분야> 채널코딩, 스토리지 시스템, 통신이론