

## 고배속 DVD 시스템을 위한 PRML 기법에 관한 연구

이 재 옥(李載旭), 정 병 국(鄭炳國)

삼성전자 중앙연구소

전화 : (0331) 200-4771 / 팩스 : (0331) 200-3122

### A Study on PRML Method for the High Speed DVD System

Jae Wook Lee, Byung Gook Chung

Corporate R&D Center, Samsung Electronics

E-mail : jwlee73@joins.joongang.co.kr

#### Abstract

In this paper, we describe the accommodation of the PRML technique for the high speed and high density optical disk systems, which has been very effective in the high density HDD systems. To make the PRML technique adequate for the optical disk systems, the channel modeling and the simulation are performed. Finally, the architecture has been designed and realized into an ASIC.

We have focused on the differences of PRML architecture between the HDD system and the optical disk system, and the digital realization of the PLL which has been realized with analog circuits.

#### I. 서론

사람들의 멀티미디어에 대한 욕구가 증가하고 고화질 영상데이터 저장에 필요해짐에 따라 기록 용량이 650(MB)로 한정된 CD에 한계를 느끼게 되었고, CD를 대체하여 같은 크기로 CD의 7배 이상의 기록용량을 지원하는 DVD가 등장하게 되었다. 같은 면적에 많은 데이터를 저장하기 위해서 DVD에서는 적색 레이저의 파장이 780(nm)에서 635(nm)로 줄었고, 렌즈의 개구수도 0.45에서 0.5이상으로 증가하였다. 또한, 트랙간 거리와 최소 마크의 길이도 각각 절반 수준으로 감소하

였다. 이렇게 한정된 영역에 기록밀도를 높이고 점점 더 고배속의 동작을 요구하다보니 많은 어려움이 발생하였다. 특히, 인접신호간의 간섭(ISI : Inter Symbol Interference)과 인접트랙간의 간섭(Cross Talk) 등으로 신호의 왜곡이 발생하여 이를 복원하는 기술이 필요하게 되었다. 현재 기록밀도가 계속해서 증가하고 있는 하드디스크 드라이브에서는 이미 이런 문제점을 경험하였고, 이를 PRML(Partial Response Maximum Likelihood)이란 기법을 이용해서 극복하였다.

본 논문에서는 자기적 시스템인 하드디스크 드라이브에 적용하여 좋은 결과를 얻었던 PRML기법을 광학적인 시스템인 DVD에 알맞게 적용하여 개발 중인 광디스크용 PRML 주문형 반도체의 알고리즘과 아키텍처에 대해서 기술하였다.

PRML은 "독립된 데이터로부터 발생한 픽업의 출력 신호의 파형은 정확히 알고 있으며 일정한 형태로 결정된다."라는 가정과 "인접한 전이 신호와의 중첩(super-position)은 선형적(linear)이다." 라는 두 가지 가정을 근거로 고밀도 고배속에서 필연적으로 발생하는 신호의 중첩에 의한 신호의 왜곡을 고려하여 값을 결정하는 방법이다[1]. PRML시스템을 구현하기 위해서는 우선 앞에서 제시한 두 가지 가정을 근거로 채널의 특성을 분석하여 각각의 데이터 열에 따른 픽업의 출력파형을 구하고 이를 가장 근사화한 모델로 나타내는 작업이 필요하다. 근사화된 모델이 결정되면 PR블록의 구현을 통해서 입력 파형을 근사화된 모델의 파형과 동일하게 변환시켜주고, ML블록의 구현을 통해

서 모델의 특징에 알맞게 가장 오류가 적은 데이터를 복원함으로써 PRML 시스템을 이룬다.

## II. DVD 채널 모델링

광학적 채널의 특성은 pit-land 밀도, 트랙 밀도, 광 픽업(Pick-Up)의 특성 등 여러 가지 요인에 의해서 결정된다. 완벽히 실제의 광학적 채널의 특성을 모델링하는 것도 불가능하지만 복잡한 전달함수(Transfer function)의 특성에 대응하는 하드웨어를 구현하는 것도 쉽지 않다. 따라서, 적절한 복잡도를 가지면서 실제 광학적 채널 특성과 유사한 전달함수를 구하는 것이 중요하다. 이때, 실제 광학적 채널의 특성과 전달함수 특성과의 차이는 PR블록에 의해서 보정된다.

$$H(f) = \frac{2}{\pi} \left[ \cos^{-1} \left( \frac{f}{f_c} \right) - \frac{f}{f_c} \sqrt{1 - \frac{f}{f_c}} \right] \dots(1)$$

$$f_c = \frac{2NA}{\lambda} |v| \dots(2)$$

표 1 광학적 채널 모델과 이에 따른 전달함수  
Table 1 Optical Channel Models and Transfer Functions

Model	Transfer Function
PR(1,2,1)	$F(z) = 1 + 2z + z^2$
PR(1.1,1.1)	$F(z) = 1 + z + z^2 + z^3$
PR(1,2,2,1)	$F(z) = 1 + 2z + 2z^2 + z^3$
PR(1,3,3,1)	$F(z) = 1 + 3z + 3z^2 + z^3$

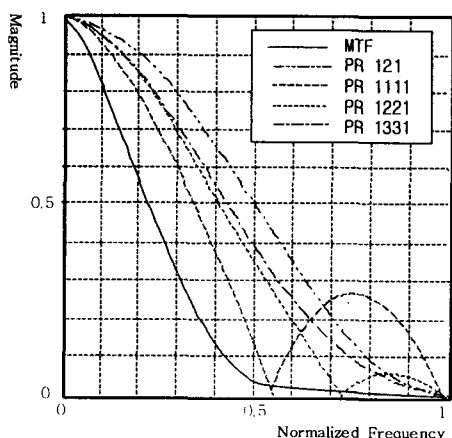


그림 1 광학적 채널 모델에 따른 주파수 응답  
Fig. 1 Frequency Responses of Optical Channel Models

수식 (1)은 Sony사에서 제안한 Trigonometric 모델로 일반적으로 광학시스템의 MTF특성으로 사용된다. 수식에서  $f_c$ 는 채널의 공간 차단 주파수로 수식 (2)의 관계를 만족한다. 수식 (2)에서 NA(Numerical Aperture)는 개구수,  $v$ 는 선속도, 그리고  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다. 광학적 채널의 특성에 따른 전달함수는 표 1과 같고 주파수 응답은 그림 1과 같다. 주파수 영역과 시간 영역에서 각각 MTF (Modulation Transfer Function)의 특성 곡선과 각각의 PR특성을 비교함으로써 PR(1,2,2,1)의 특성이 가장 실제 채널과 유사하다는 것을 확인할 수 있었다.

## III. 시뮬레이션 결과

PRML의 시뮬레이션은 다음과 같은 절차를 통해서 이루어졌다. 우선, Matlab을 이용해서 DVD 디스크 시스템에 적합한 3T~14T까지의 RLL(Run Length Limited) 데이터를 생성하고, RLL 데이터를 수식 (1)로 정의되는 MTF특성을 적용하여 RF신호를 얻는다.

여기에 외부 잡음을 첨가하고 필요에 따라 파형 비대칭 현상과 결합신호를 첨가하여 실제로 PRML칩의 입력으로 들어오는 RF파형과 유사한 신호를 생성한다.

RF신호가 생성되면 이 RF 신호를 기존의 아날로그 Slicer의 동작을 통해서 디지털 데이터를 검출한 뒤에 원래의 RLL데이터와 비교하여 아날로그 Slicer의 BER(Bit Error rate)을 계산해 보았다. 그리고, 등화기를 통과한 RF신호와 등화기를 통과하지 않은 RF신호 자체를 PR(1,2,2,1)의 특성을 고려한 비터비 검출기에 입력으로 사용하여 디지털 데이터를 얻었고, 그 데이터를 다시 RLL데이터와 비교해 봄으로써 PRML의

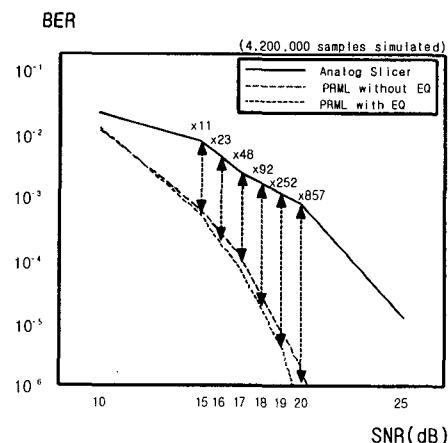


그림 2 아날로그 Slicer와 PRML의 성능비교  
Fig. 2 Performance Comparison of Analog Slicer with PRML

BER을 계산하였다. 시뮬레이션에 사용된 RLL 데이터의 개수는 4,200,000개였고, 시뮬레이션 결과는 그림 2에 나타내었다. 그림 2의 그래프를 통해서 SNR이 작아 신호의 품질이 나쁜 경우에는 기존의 아날로그 Slicer를 이용한 결과나 PRML을 적용한 결과나 많은 차이가 없으나, SNR이 커서 신호의 품질이 좋아질수록 PRML기법을 이용하는 것이 효율적인 것을 확인할 수 있다. 실제 DVD 세트에서의 신호의 품질은 18~20(dB)로 추정되고 있는데, 이를 고려한다면 PRML을 사용함으로써 단순한 아날로그 Slicer에 비해서 BER을 1/100 ~ 1/1000로 줄일 수 있으리라 기대된다.

#### IV. PRML 아키텍처

2장에서 DVD채널의 특성이 PR(1,2,2,1)과 유사하다는 사실을 확인하였다. 이 사실에 근거해서 본 논문에서는 PR(a,b,b,a) 특성을 채널의 모델로 가정하고 PR블록과 ML블록을 구성하였다. 즉, a=1, b=2라고 설정하였을 경우 PR(1,2,2,1)에 대응할 수 있다. PR 특성을 PR(1,2,2,1)으로 고정하지 않고 PR(a,b,b,a) 특성을 사용함으로써 a,b값의 변화에 따른 다양한 형태의 채널 모델에 대응할 수 있도록 하여 적용 시스템의 채널 특성이 변화하더라도 무리없이 대응할 수 있도록 하였다. 그림 3에 광학적 채널을 위한 PRML의 전체 아키텍처를 나타내었다. 본 논문에서 다루고 있는 광학적 시스템에서의 PRML 아키텍처는 자기적 시스템에서의 PRML 아키텍처와 기본적으로는 유사한 구조를 가지면서도 차이점을 가지고 있다. 자기적 시스템과 광학적 시스템의 특성차이에 의한 아키텍처의 차이는 광학적

시스템 아키텍처에는 '비대칭 파형 보정기'와 'Blank 검출기'가 추가로 사용되었다는 점이다. '비대칭 파형 보정기'는 디스크의 제작시에 공정의 오류로 RF파형의 중간 레벨을 중심으로 상위 파형의 주기와 하위 파형의 주기가 다르게 발생하는 현상을 보정하기 위한 회로이다. 비대칭 파형의 검출은 DSV(Digital Sum Value)검출에 의해서 이루어지고, 그 보정은 입력신호에 일정한 보정값을 더해줌으로써 이루어진다. 'Blank 검출기'는 디스크에 아무 데이터도 쓰여져 있지 않은 영역이나 지문이나 먼지등에 의해서 신호에 오류가 있는 경우를 감지하여 PLL회로가 이전의 상태를 유지할 수 있도록 하여 PLL Lock이 풀리는 것을 방지해 주는 역할을 한다.

그리고, 본 논문에서 제시한 아키텍처가 기존의 PRML 아키텍처와 기능은 같지만 다른 점은 아날로그 회로의 디지털 회로로의 구현이라고 할 수 있다. PR블록에서의 아날로그 필터를 LPF와 등화기로 구성되는 2단 디지털 필터로 교체하여 배속에 따른 필터의 특성 변화가 없도록 하였고, 클럭 복원을 위해 사용되는 PLL회로도 디지털회로로 교체하였다[2,3,4]. 아날로그 Slicer 출력과 클럭과의 비교를 통해서 위상오차를 검출하였던 위상검출기를 A/D변환된 파형의 레벨값을 근거로 위상오차를 정량적으로 계산하는 디지털 회로로 구현하였다. 그리고, 오차값을 누적하여 VCO에 반영될 수 있도록 해주는 Charge Pump와 아날로그 Loop필터대신에 D/A변환기와 디지털 Loop필터를 사용함으로써 배속에 관계없이 동작하도록 하였다. 즉, 본 논문에서 제시한 아키텍처의 큰 특징이며 장점으로 아날로그 회로를 적게 사용하고 가능한 범위 내에서는 디지털회로를 사용하였다는 점을 들 수 있다.

각 블록의 동작을 살펴보면, 그림 3에서 가변 이득 증폭기, 이득 복원기, A/D변환기, 디지털 LPF, 디지털 등화기로 구성되는 PR블록은 그림 1과 수식(1)의 MTF특성을 가진 RF신호를 PR(a,b,b,a)의 특성을 가지는 파형으로 변환하여 뒷 단에 PR(a,b,b,a)의 입력 특성에 알맞게 동작하는 비터비 검출기의 검출 오류를 최소화 할 수 있도록 하는 역할을 한다. PR블록의 동작은 우선 '이득 복원기'가 4T의 데이터를 검출해서 그 레벨값을 PR특성에 일치하도록 제어 신호를 PWM(Pulse Width Modulation) 형태로 출력하면 '가변 이득 증폭기'는 제어 신호에 알맞게 이득을 가변한다. 디지털 등화기는 3T신호를 중심으로 특성이 PR특성에 일치하도록 하고, 디지털 LPF는 선택적으로 동작하여 디지털 등화기의 변환특성을 보완한다. PR블록에서 대응가능한 PR의 특성은 PR(a,b,b,a)의 한도에서 각각의 이득 제어값과 필터의 계수를 마이컴으로 변환함으로써 쉽게 변경할 수 있다.

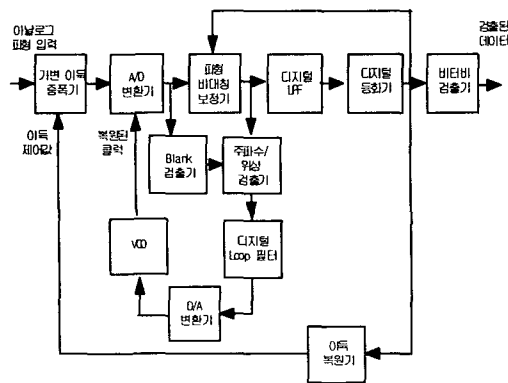


그림 3 광학적 채널용 PRML 아키텍처  
Fig. 3 PRML Architecture for Optical Channel

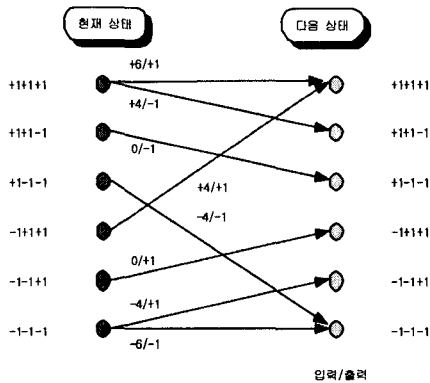


그림 4 PR(a,b,b,a)의 비터비 검출기 상태도  
Fig. 4 State Diagram of PR(a,b,b,a) Viterbi Detector

PR블록에서 PR특성과 유사하게 등화된 파형은 ML을 구성하는 비터비 검출기에 입력으로 들어와서 최대 가능성이 있는 데이터열을 출력시킨다. 비터비 검출기는 광디스크 신호의 최소 주기가 3T인 것을 고려해서 그림 4와 같이 '-1-1-1', '-1-1+1', '-1+1+1', '+1-1-1', '+1+1-1', '+1+1+1'의 6개의 상태만을 사용하여 1T 또는 2T인 신호가 출력되는 것을 방지한다 [5]. 이렇게 하여 출력신호의 오류를 줄이고 하드웨어 구성의 단순화를 꾀하였다. 이때, 비터비 검출기가 지원하는 PR 특성은 PR(a,b,b,a)이며 PR특성의 선택은 마이컴 제어에 의해서 쉽게 이루어진다.

### V. 결론

본 논문에서 제시한 PRML은 그림 5와 같은 형태로 Layout이 이루어져서 0.35 $\mu$ m ASIC 공정을 통해서 100Pin TQFP의 칩으로 구현되었다. 그림 5에서 AGC Amp, ADC, DAC, VCO와 같은 아날로그 cell들은 블록화되어 먼저 위치시키고 그 외의 공간에 디지털회로가 위치하도록 하였다. 그리고, 아날로그 cell들간의 noise영향을 최소화 시키기 위해서 전원을 철저히 분리하였고, 디지털 회로와 아날로그 회로간의 Bulk Bias도 분리하였다.

본 논문에서 제시한 PRML 아키텍처는 자기적 시스템인 HDD에서 기록밀도 증가에 커다란 기여를 하였던 PRML 이론을 토대로 광학적 시스템인 DVD 시스템에 적합하도록 처음으로 시도된 것으로 DVD 시스템에서의 고배속/고밀도화를 위해서 필수적인 요소로 작용할 것이다. PRML의 성능과 밀접한 관계에 있는 PLL의 구현에 있어서도 기존의 Charge Pump와

아날로그 Loop 필터를 사용한 아날로그 PLL대신에 DAC와 디지털 Loop 필터를 사용한 디지털 PLL을 구현하여 PLL이 걸리는 시간을 단축하고 광디스크의 배속과 무관하게 Loop 필터가 적용될 수 있도록 하였다.

현재는 광디스크용 PRML ASIC칩의 성능평가를 위해서 테스트 중이며 실제 DVD 세트에서 실험한 결과 기존의 아날로그 Slicer를 이용한 방법보다 에러율을 최대 1/10로 줄일 수 있었고, 앞으로 디지털 PLL의 성능개선을 통해서 그림 2와 같은 시뮬레이션 결과에 근접하는 에러율로 줄이고자 노력하고 있다.

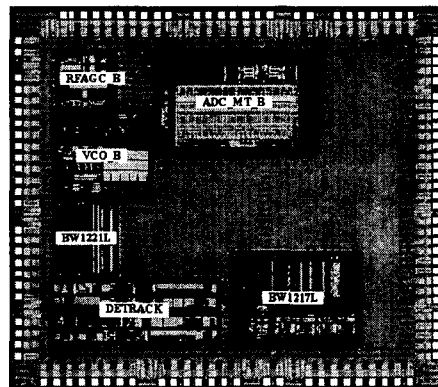


그림 5 구현된 PRML칩의 Layout  
Fig. 5 Layout of Realized PRML Chip

### 참고문헌

- [1] Alexander Taratorin, Characterization of Magnetic Recording Systems : A Practical Approach", *Guzik Technical Enterprises*, 1997.
- [2] 편집부편, "PLL 응용회로", 도서출판 세운, 1988.
- [3] Beomsup Kim, David N. Helman, Paul R. Gray, "A 30-MHz Hybrid Analog/Digital Clock Recovery Circuit in 2- $\mu$ m CMOS", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol. 25, No. 6, pp 1385~1990, December 1990.
- [4] Kamran Azadet, Chris J. Nicole, "Low-Power Equalizer Architecture for High-Speed Modems", *IEEE Communications Magazine*, pp 118~126, October 1998.
- [5] Sung Han Choi, Jun Jin Kong, Byung Gook Chung, Yong Hwan Kim, "Viterbi Detecto Architecture for High Speed Optical Storage", *1997 IEEE TENCON-Speech and Image Technologies for Computing and Telecommunications*, pp 89~92, 1997.