

광 디스크 재생을 위한 적응형 PRML 코어 개발에 관한 연구

박 현 수, 김 민 철, 김 기 현, 심 재 성, 서 중 언, *이 정 현
삼성전자 DM 연구소, *삼성 종합 기술원 i_networking_LAB
전화 : 031-200-3142 / 핸드폰 : 017-214-9065

Adaptive PRML Core Development for Optical Disk Playback

Hyun Soo Park, Min Chul Kim, Ki Hyun Kim, Jae Seong Shim,
Joong Eon Seo, *Jung Hyun Lee
Samsung Electronics Co., LTD, *Samsung Advanced Institute of Technology
E-mail : greenbee@samsung.com

Abstract

A new adaptive PRML architecture, considered not only DVD-ROM but also DVD-Multi including DVD-RAM as well, is presented to demonstrate its superiority over the conventional analog channel in a DVD system. For this new architecture, channel adaptation algorithm using gain controlled type of FIR filter, and asymmetry compensation algorithm using expected level adaptation of viterbi decoder are presented. In addition, a method of modelling the disk tilt and asymmetrical read-back signal are discussed.

I. 서론

PRML (partial response maximum likelihood) 기술은 HDD(hard disk drive)와 같은 자계 기록 장치에 대해 기록 밀도를 향상시키는 효과가 있다는 것은 이미 10년 전부터 알려지기 시작했다. 그럼에도 불구하고 PRML 기술이 DVD-RAM과 같은 광학 기록 기기에 기록 밀도를 향상시키는 효과가 있는지에 대한 여부는 현재까지도 논란의 여지가 있다. 광학 기록 기기에 있어서 관심의 초점은 기록 밀도의 향상의 측면 보다는 열악한 재생 신호가 들어오는 경우에도 좋은 재생 성능을 보여주는 데 있을 것이다. 물론 이러한 성능을 얻기 위해서는 상당히 복잡한 구조의 신호 처

리 과정이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 접선 방향의 편향 성분이나 지터 성분으로 채널 상에 변화가 일어난 경우를 모델링 과정을 통해 시뮬레이션 함으로써 좋은 성능을 얻을 수 있다는 것을 보일 것이며 실제 디스크를 이용한 결과를 통한 성능 향상 또한 언급할 것이다.

II. LSI 구현을 위한 알고리즘과 구조

적응형 PRML LSI의 성능을 미리 예측하기 위해서 적응형 PRML 알고리즘과 채널의 변화를 모델링 하는 작업이 필요하다. 광학적 채널은 데이터의 밀도와 트랙의 밀도, 그리고 픽업과 기타 요인들에 의해 변화된다. 실제 광학적 채널의 변화의 예로는 MTF(Modulation Transfer Function)의 변화에 의해 발생하는 ISI(Inter Symbol Interference)와 크로스토크에 의해 발생하는 ITI(Inter Track Interference), 그리고 피트의 불균일성에 의해 발생하는 비대칭성이 있다.

2.1 채널 적응 알고리즘

광 디스크는 디스크 표면에 레이저를 조사하여 반사된 빛의 세기를 이진 신호로 변화시켜 데이터를 판독하는 구조이다. 그러나 광학적 채널의 특성상 픽업에서 읽어낸 신호는 읽진 신호의 형태가 아닌 아날로그 신호의 형태를 띠게 된다. 이러한 경우 광학적 특성을 하나의 전달 함수로 표현할 경우 입력 신호에 대

한 출력 결과를 쉽게 얻을 수 있다. 이러한 광학적 특성을 MTF라고 하는데 디스크에 접선 방향의 편향 등의 요인이 생기게 되면 MTF 특성이 바뀌게 되어 출력 신호가 열화된다.

그림 1은 접선 방향의 편향 성분이 존재하는 경우에 추출된 MTF 신호를 그래프로 그려본 것이다. 접선 방향의 편향 성분이 증가할 때 가운데 돌출부가 줄어들어 따라 가장 자리의 돌출부가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 경우에 가장 자리의 돌출부의 증가에 따라 인접 피트에서 발생하는 ISI가 증가한다는 것을 예측할 수 있다.

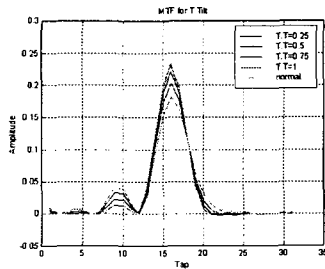


그림 1. 접선 방향의 편향 성분이 존재하는 경우 추출된 MTF 특성

이러한 ISI에 대응하기 위해 본 논문에서는 적응형 PRML 시스템을 제안하며 그 구조는 그림 2와 같다.

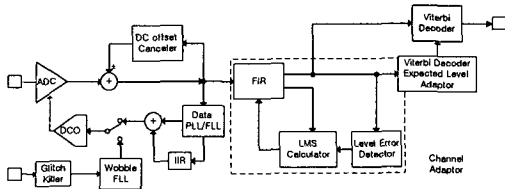


그림 2. 적응형 PRML 시스템 블록도

제안된 채널 적응 모델은 레벨 오류 검출기와 LMS(least mean square) 연산기와 FIR 필터를 포함한다. 본 논문의 레벨 오류 검출기의 원리는 등화기의 출력을 저장하고 주어진 시간 간격인 kT 구간에서의 목적 응답의 예상 레벨에 맞는 출력의 발견된 레벨을 찾기 위해 비교하는 과정을 거치는 것이다. 그림 2에 언급된 레벨 오류 검출기는 미리 결정된 부분 응답의 예상 레벨로부터 검출된 레벨을 빼서 LMS 알고리즘의 오류 값을 연산하는 구조로 되어 있다. 본 논문에서는 PR(a,b,b,a) 타입의 부분 응답이 사용되었는데 이 경우에는 5개의 예상 레벨이 존재한다.

채널 입력 데이터가 $\{a_k\} \in \{-1, 1\}$ 인 경우 예상 레벨은 $\{-2a-2b, -2b, 0, 2b, 2a+2b\}$ 로 정의된다. 이

러한 경우 적응 알고리즘은 식 (1)와 같이 표현된다. [2].

$$\begin{aligned}
 W(n+1) &= W(n) + \mu e_i(n)U(n) \\
 e_i(n) &= E_i - d_i \{y(n), \dots, y(n-4)\} \\
 l &\in \{-max, -mid, zero, +mid, +max\} \\
 y(n) &= U^T(n)W(n)
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 W(n)은 등화기의 계수이고 μ 는 LMS의 이득이며 $e(n)$ 은 오류 값이고 E는 예상 레벨이며 d는 검출된 레벨이고 y(n)은 등화기의 출력이다. 그림 3은 적응화 단계가 끝난 경우 접선 방향의 편향 성분에만 한 FIR 필터의 계수의 변화를 나타낸 것이다.

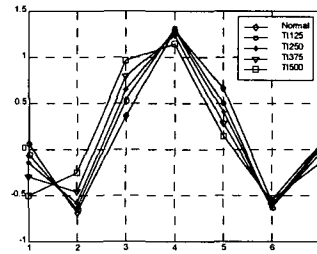


그림 3. FIR 필터의 계수 변화

2.2 크로스 토크 추출 방법

인접 트랙에서 발생하는 ITI 때문에 트랙 밀도가 증가하거나 반경 방향의 편향 성분이 발생할 경우 크로스 토크가 증가하게 된다. 인접 트랙에서 발생하는 ITI의 총 양은 식 (2)와 같이 표시될 수 있다.

$$ITI \text{ gain(dB)} = 10 \times \log_{10} \frac{\sum RF^2_{\text{adjacent track}}}{\sum RF^2_{\text{main}}} \tag{2}$$

표 1은 인접트랙에서 발생한 ITI를 표로 나타낸 것이다. 이득은 식 (2)에 의해 연산되며 식(2)의 괄호 안의 값은 광학 연산 프로그램인 Diffract™에 의해 구한 값을 사용하였다.

표 1. 인접 트랙의 ITI 이득

반경 방향의 편향 성분	인접 안쪽 트랙의 ITI 이득	인접 바깥쪽 트랙에서의 ITI 이득
0도	-35.8dB	-35.8dB
0.25도	-44dB	-31.2dB
0.5도	-46.5dB	-26.9dB
0.75도	-40.4dB	-23.8dB

2.3 비대칭성 모델화와 예상 레벨 적응 알고리즘

광 디스크에서 신호의 비대칭성이 발생하는 주요 원인은 디스크 성형 과정에서 피트나 랜드가 일정한 길이만큼 길어지거나 짧기 때문에 발생한다.[1] 식 (3)은 이러한 비대칭성 모델을 수식으로 표현한 것이다.

$$P(n) = n \times m + \Delta \times (-1)^k \times m$$

$$n \in \{RLCL\}$$
(3)

P(n)은 피트의 길이이고 'n'은 RLCL(Run Length Code Limitation)의 원소이며, 'm'은 단위 피트 길이이고 'k'는 피트인가 랜드인가를 나타내는 지표이다. (피트의 경우는 k=0이고 랜드의 경우는 k=1이다). DVD의 경우 RLCL은 3,4,5,6,7,8,9,10,11,14의 값을 가질 수 있다. 비대칭성 모델에서 NRZI 데이터의 길이에 -1에서 1까지의 값을 가지는 'Δ'을 더하거나 빼줌으로 피트 길이가 결정되고 이 신호를 MTF를 통과시키면 비대칭성이 가미된 신호를 얻을 수 있다.

한편, 이러한 비대칭성을 보정하기 위해 본 논문에서는 비터비 복호화기에 예상 레벨 적응 알고리즘을 사용하였다. 비터비 복호화기는 HDD분야에서는 잘 알려진 기술이며 본 논문에서는 광 디스크 채널에 적합한 비터비 복호화기인 PR(a,b,b,a) 타입을 사용하였다. 그림 4는 PR(a,b,b,a) 타입의 비터비 복호화기의 격자도이다. [3][4].

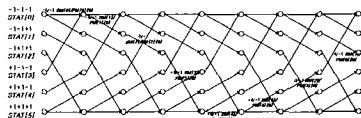


그림 4. PR(a,b,b,a) 타입의 격자도

DVD-ROM의 피트나 랜드 또는 기록 가능한 DVD의 스페이스나 마크가 균형이 맞지 않는 길이를 가진 경우는 재생할 경우 신호의 비대칭성이 생길 수 있다. 이러한 신호의 비대칭성은 검출 성능의 열화를 초래하게 된다. 신호의 비대칭성을 보정하기 위해 예상 레벨의 적응 알고리즘을 도입하게 되었다. 예상 레벨의 적응 알고리즘은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_i(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N}^n D_i(i)$$

$$l \in \{-max, -mid, zero, +mid, +max\}$$
(4)

여기서 $V_i(n)$ 은 비터비 복호화기의 예상 레벨이고

N은 평균치를 위해 사용하고자 하는 자료의 개수이며 $D_i(i)$ 는 FIR 필터의 검출 레벨이다. 그림 5는 비대칭성의 정도에 대한 비터비 복호화기의 예상 레벨의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 이러한 예상 레벨 적응 알고리즘은 채널 적응화 과정에서 충분히 보상하지 못하는 비터비 복호화기의 목적 응답을 보상하는 역할을 한다.

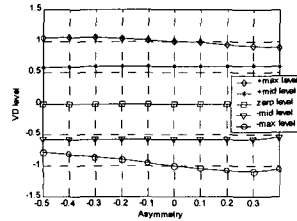


그림 5. 비대칭성에 대한 예상 레벨의 변화

2.4 시뮬레이션 결과

그림 6은 본 논문에서 사용된 광 디스크 채널의 시뮬레이션 블록도이며 이러한 구조로 기존의 이치화기와 적응 PRML 시스템의 성능을 비교할 수 있다.

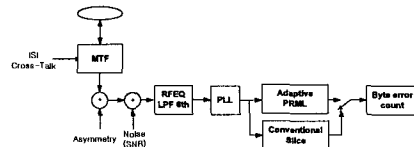


그림 6. 시뮬레이션 블록도

그림 7의 왼쪽 그래프는 지터에 대한 시뮬레이션 성능을 그래프로 나타낸 것이다. 지터 테스트는 ITI 모델과 AWGN 모델에 대한 성능 검증을 위해 사용되었다. 적응 PRML 시스템을 사용한 경우 기존의 이치화 시스템에 비해 10^{-3} 의 바이트 오류에서 4dB의 지터 마진을 얻을 수 있었다. 그림 7의 오른쪽 그래프는 접선 방향의 편향 성분에 대한 바이트 오류를 나타낸 그래프이다. 제안된 적응 PRML 시스템을 사용할 경우 기존의 이치화 시스템에 비해 0.4도의 접선 방향의 마진을 확보할 수 있었다.

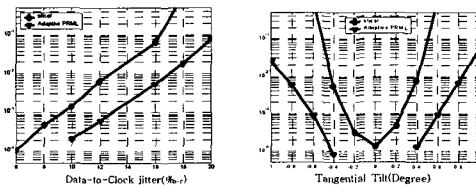


그림 7. 지터 대 바이트 오류 그래프(왼쪽)와 접선 방향의 편향 성분 대 바이트 오류의 그래프(오른쪽)

그림 8은 비대칭성에 대한 검출 성능을 나타낸 것이다. 제안된 적응 PRML 시스템을 사용할 경우 ± 0.1 ($\approx 4\%$) 정도의 마진을 확보할 수 있었다.

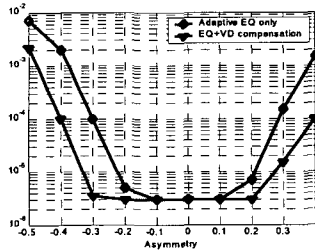


그림 8. 비대칭성 대 바이트 오류의 그래프

III. 실험 결과와 결론

3.1 실험 결과

실제 양산된 LSI의 성능은 DVD-ROM 드라이브와 DVD-RAM 드라이브, 그리고 DVD 플레이어의 세가지 다른 드라이브에서 검증해 보았다. 첫 번째로 DVD-ROM 드라이브에서 동기신호의 검출 정도를 비교해 보았다. 기존의 이치화 시스템의 경우는 78개의 검출 실패가 있었으나 적응 PRML 시스템의 경우는 단지 27개의 검출 실패가 있었다. 실험에는 20000개의 동기 신호가 사용되었으며 이 결과는 표 2에 나타내었다. 제안된 적응 PRML 시스템의 경우 약 3배의 성능 향상 결과를 얻을 수 있었다. 두 번째로 DVD-RAM 드라이브의 PID(Physical ID)부분에 대한 바이트 오류를 측정해 보았다. 전체 1,078,567개의 입력 중 적응 PRML 시스템을 사용할 경우에는 779개의 데이터만이 오류로 나타났다. 이에 비해 기존의 이치화 시스템의 경우는 1,601개의 데이터가 오류로 측정되었다. 따라서 기존의 이치화 시스템에 비해 적응 PRML 시스템이 2배정도 좋은 성능을 나타냈으며 이때의 바이트 오류를 표 2에 나타내었다.

표 2. 동기 신호 검출율과 DVD-RAM 드라이브의 PID 재생 성능

	동기 신호 오류	PID 영역의 바이트 오류
적응 PRML 시스템	1.35×10^{-3}	1.81×10^{-4}
기존의 이치화 시스템	3.9×10^{-3}	3.71×10^{-4}

마지막으로 DVD 플레이어의 경우에 재생 성능을 비교해 보았다. 최근 들어 폭발적으로 증가하고 있는

DVD 시장의 경우 일부 디스크가 재생이 제대로 되지 않아 시장 불량으로 들어오는 디스크가 종종 발견되고 있다. 이러한 디스크들의 불량 형태는 다양한데 디스크 표면에 흠집이 있거나 신호의 비대칭성, 편향 성분, 두께의 불균일성, 피트의 품질 불량 등을 들 수 있다. 이러한 디스크들은 DVD의 표준 규격에 벗어나는데 총 55개의 규격에 벗어난 DVD 디스크 중에서 20개의 디스크가 기존의 이치화 시스템에서 재생 불량을 일으켰다. 이에 비해 적응 PRML이 적용된 시스템의 경우 단지 6개의 디스크만이 재생 불량을 일으켰다.

3.2 결론

적응 PRML LSI가 적용된 DVD 시스템의 경우 일반적인 이치화기를 사용한 시스템에 비해 명백한 장점이 있다. 이러한 장점은 열악한 환경에서 제조된 디스크를 재생할 경우 화면 깨짐이 나타나는 경우에 더욱 더 명확하게 대비된다.

본 논문에서 제안된 구조는 채널 적응 알고리즘을 사용할 경우의 이점에 대해 알아보았다. 이러한 알고리즘은 특히 접선 방향의 편향 성분이 있는 경우 명확한 효과를 보이게 된다. 또한 비터비 복호화기의 예상 레벨 적응화는 신호의 비대칭성에 대해 효과를 보임을 알 수 있었다.

또한 실제 실험을 통해서 접선 방향의 편향 성분이나 신호의 비대칭성의 경우뿐만 아니라 열악한 환경의 디스크의 재생 시에도 탁월한 성능을 보임을 알 수 있었다.

참고문헌(또는 Reference)

- [1] J.W.M. Bergmans, "Digital baseband transmission and recording", KAP, 1996.
- [2] Hyun-Soo Park et al., "Simplified error generation scheme for LMS adaptation of PRML channel", Proceeding of Satellite ISOM2000 Sep.22~23 pp70~71
- [3] M.-G. Kim et al., "Performance comparison of detection methods in magneto-optical disk system with (1,7) RLL code," in Proc. 1995 IEEE GLOBECOM, vol.2, pp. 1389-1393.
- [4] S. Choi et al., "Viterbi detector architecture for high speed optical storage," in Proc. 1997 IEEE TENCON, vol.1, Dec. 2-4, 1997, pp. 89-92.