

비선형 등화기를 이용한 적응형 Viterbi 코어 개발에 관한 연구

배주한, 박현수, 김민철, 심재성
삼성전자 DM 연구소

Viterbi Core Development Using Non-linear Equalizer

Ju Han Bae, Hyun Soo Park, Min Chul Kim, Jae Seong Shim,
Samsung Electronics Co., LTD,
E-mail : juhan.bae@samsung.com

Abstract

본 논문에서는 광 저장장치의 기록밀도가 증가할 경우 발생하는 여러 가지 문제점들에 대응하는 PRML 시스템 구현 방법을 제안하고 기존의 시스템의 성능과 제안된 시스템의 성능을 비교한다. 기존의 채널 적응기법 및 비터비 복호화기에 대비해 보다 좋은 성능을 가지는 구조의 비선형 등화방식과 비터비 예상 레벨 적응 알고리즘을 이용한 새로운 구조를 제안하고, 23Gbyte 저장용량을 가지는 Blu-ray 디스크에 28GB의 데이터를 기록하여 기록 기록밀도가 증가한 실제 디스크에 대한 실험 결과에 대하여 논한다.

I. 서론

HDD(hard disk drive)와 같은 자기 기록 장치의 기록 밀도를 향상시키기 위한 방법으로 PRML (partial response maximum likelihood) 기술에 대한 많은 연구가 진행되었다. 기존 PRML 기술을 사용할 경우, 같은 용량이라면 틸트 마진과 같은 안정성이 높아진다는 장점이 있고 같은 마진 특성을 가진다면 디스크 용량을 늘릴 수 있다는 장점이 있으나 매우 복잡한 신호 처리 과정이 구현되어야 한다. 본 논문에서는 기록 밀도 증가에 따른 신호 품질 열화나 피트의 불균일성에 의해 발생하는 비대칭성에 의한 신호 열화에 대해 기존의 구현 방식[1]보다 좋은 성능을 얻기 위해 비선형 변환기 구조와 결합

된 PRML 시스템을 사용해 광 디스크 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 방법을 제안하고, 실제 디스크를 이용한 실험 결과에 대해 언급할 것이다.

II. 제안된 알고리즘 및 구조

광 디스크는 디스크 표면에 레이저를 조사하여 반사된 빛의 세기를 이진 신호로 변화시켜 데이터를 판독하는 구조를 가진다. 광학적 채널의 특성상 픽업에서 읽어낸 신호는 이진 신호의 형태가 아닌 아날로그 신호의 형태를 띠게 된다. 광학적 채널은 데이터의 밀도와 트랙의 밀도, 그리고 픽업과 기타 요인들에 의해 변화되는데, 그 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 비대칭성(asymmetry) 등이 있다. 이러한 신호 품질 열화에 대한 대응으로 기존의 적응 PRML 을 이용한 구조[1]에 비하여 우수한 성능을 가지는 비선형 등화기와 적응 비터비 복호화기로 구성된 PRML 시스템의 구조를 그림 1.에 나타내었다.

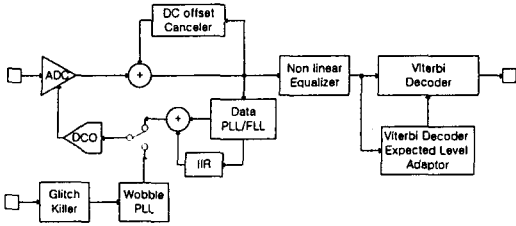


그림 1. 제안된 PRML 시스템 블록도

2.1 비선형 등화기

광 기록기기는 기록 밀도가 증가함에 따라 최단 주기의 신호의 크기가 급격히 작아지는 특성을 나타낸다. 그림 2는 기록 밀도가 올라간 경우에 픽업에서 얻은 신호의 eye diagram 으로, 최단 주기에 해당되는 신호의 크기가 상당히 작아진 것을 확인할 수 있다.

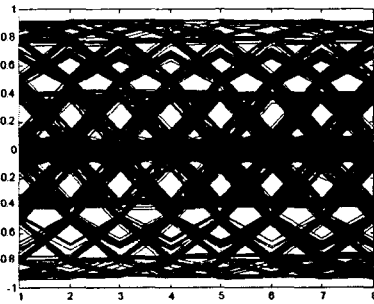


그림 2. 기록 밀도가 높은 경우의 입력 파형

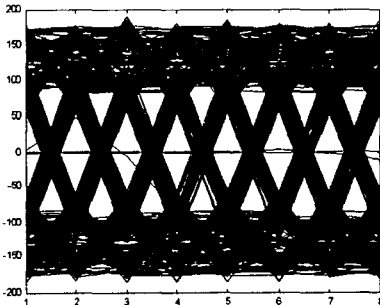


그림 3. 비선형 등화기를 거치고 난 후의 파형

기록 밀도 증가로 인한 신호 품질열화에 대응하기 위한 방법으로 사용된 비선형 등화기의 구조를 그림 4.에 나타내었고, 비선형 함수는 식 (1)과 같다. 그림 3.은 비선형 등화기를 거치고 난 파형의 eye diagram 을 나타

낸 것이다.

비선형 등화기는 비선형 함수를 사용해서 입력 값이 특정 값 이상이거나 이하일 경우 그 값을 강제로 포화시키거나 제거하여 입력 신호의 고주파 성분의 신호를 지터의 증가 없이 키워 줌으로써 입력 신호에 잡음이 섞이는 경우에도 입력 신호를 명확히 구분해 주는 역할을 한다. 짧은 주기의 신호가 재생되는 경우 일반적으로 신호의 레벨이 작고, 지터가 크기 때문에 잡음이 약간만 섞이더라도 신호 재생 시 오류를 발생하는 경우가 많았던 기존의 단점을 보완해서 지터의 증가 없이 짧은 주기의 신호의 크기를 키워주는 효과를 얻을 수 있다.

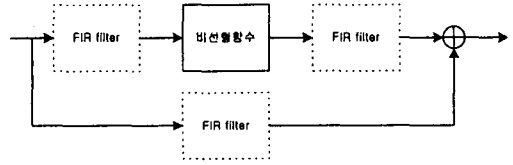


그림 4. 비선형 등화기의 구조

$$y = x \times \left[\{a = 0\} \times \{ |x| \leq k \} + \{a = 1\} \times \{ |x| > k \} \right] + k \times (-1)^{\{a=0\} \times \{x \leq 0\} + \{a=1\} \times \{x > 0\}} \times \left[\{a = 0\} \times \{ |x| > k \} + \{a = 1\} \times \{ |x| > k \} \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 '{}'는 조건식이 참인 경우 1, 거짓인 경우 0 을 나타내는 연산식을 의미한다. x 는 입력을 나타내며 실수의 범위를 가질 수 있고 k 는 비선형 임계치로 0 또는 양의 실수의 범위를 가질 수 있다. a 는 비선형 종류를 나타내는 값이며 0 또는 1 의 값을 가질 수 있다.

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 ITI 의 총 양은 식 (2)와 같이 표시될 수 있다.

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

표 1.은 인접트랙에서 발생한 ITI 를 표로 나타낸 것이다. 이득은 식 (2)에 의해 연산 되며 식 (2)에서 괄호 안의 값은 광학 연산 프로그램인 Diffract™에 의해 구하여진 값을 사용하였다.

표 1. 인접 트랙의 ITI

반경방향의 편향성분	인접 안쪽 트랙의 ITI	인접 바깥쪽 트랙 의 ITI
0 도	- 35.8 dB	- 35.8 dB
0.25 도	- 44 dB	- 31.2 dB
0.5 도	- 46.5 dB	- 26.9 dB
0.75 도	- 40 dB	- 23.8 dB

2.3 비대칭성 모델화와 예상 레벨 적응 알고리즘

광디스크의 피트나 랜드 또는 스페이스나 마크가 균형이 맞지 않는 길이를 가진 경우 신호 재생 시 신호의 비대칭성이 생길 수 있다[2]. 이러한 신호의 비대칭성은 검출 성능의 열화를 초래하게 된다. 식 (3)은 이러한 비대칭성 모델을 수식으로 표현한 것이다.

$$P(n) = n \times m + \Delta \times (-1)^k \times m, \quad n \in \{RLCL\} \quad (3)$$

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 경우 k=0, 랜드의 경우는 k=1 이다.)

Blu-ray 의 경우 RLCL 은 2,3,4,5,6,7,8,9 의 값을 가질 수 있다. 비대칭성 모델에서 NRZI 데이터의 길이에 -1 에서 1 까지의 값을 가지는 'Δ' 을 더하거나 빼줌으로 피트 길이가 결정되고 이 신호를 MTF 를 통과시키면 비대칭성이 가미된 신호를 얻을 수 있다.

앞서 설명된 비대칭성을 보정하기 위해, 본 논문에서는 비터비 복호화기에 예상 레벨 적응 알고리즘을 사

용하였다. 본 논문에서는 광 디스크 채널에 적합한 비터비 복호화기인 PR(a,b,a) 타입을 사용하였으며, 그림 5. 는 PR(a,b,a) 타입의 비터비 복호화기의 격자도를 나타낸 것이다. [3][4].

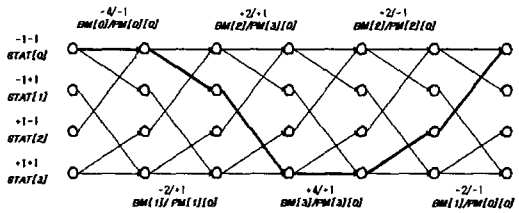


그림 5. PR(a,b,a) 타입의 격자도

예상 레벨의 적응 알고리즘은 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$V_l(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=n-N}^n D_l(i), \quad (4)$$

$$l \in \{-\text{max}, -\text{mid}, +\text{mid}, +\text{max}\}$$

여기서 $V_l(n)$ 은 비터비 복호화기의 예상 레벨이고 N 은 평균치를 위해 사용하고자 하는 자료의 개수이며 $D_l(i)$ 는 필터의 검출 레벨이다. 그림 6.은 비대칭성의 정도에 대한 비터비 복호화기의 예상 레벨의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. Zero 레벨은 기준 레벨을 나타내기 위해 표시했으며, 이러한 예상 레벨 적응 알고리즘에서 비터비 복호화기의 목적 응답 보상은 기준 알고리즘인 채널 적응화 알고리즘의 채널 적응 등화기의 역할을 대신한다.

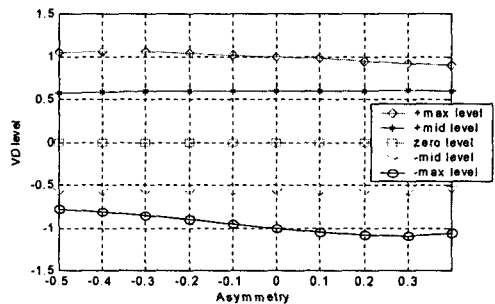


그림 6. 비대칭성에 대한 예상 레벨의 변화

2.4 시뮬레이션 결과

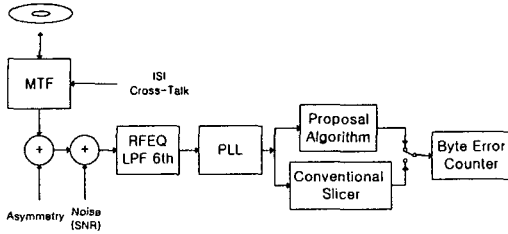


그림 7. 시뮬레이션 블록도

그림 7.은 본 논문에 사용된 광 디스크 채널의 시뮬레이션 블록도이며 이러한 구조로 기존의 이치화기와 제안된 시스템의 성능을 비교할 수 있었다.

그림 8.은 비대칭성에 대한 검출 성능을 나타낸 것이다. 제안된 예상 레벨 적응 알고리즘이 적용된 비터비 복호화기를 사용할 경우 ± 0.1 ($\approx 4\%$) 정도의 마진을 확보할 수 있었다.

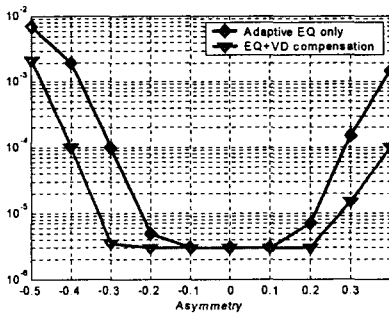


그림 8. 비대칭성 대 바이트 오류의 그래프

2.5 실험 결과

그림 9.는 실제 실험을 통해 23G 급의 디스크를 28G 의 기록 밀도를 사용해 기록/재생한 결과를 나타낸 것이다. 제안된 알고리즘을 사용할 경우 기존 알고리즘에 비해 10 배 이상의 Symbol Error 가 줄어들어 성능이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

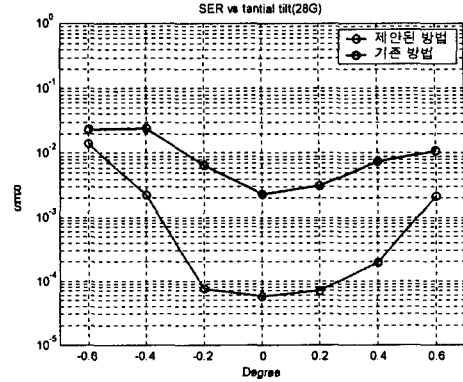


그림 9. 점선 방향의 틸트 대 심볼 오류의 그래프

III. 결론

본 논문에서는 광 디스크에서 신호를 읽을 때 발생하는 문제인 점선 방향의 편향 성분에 의한 신호 왜곡 및 디스크에 기록된 신호에 비대칭성에 의한 신호 왜곡에 대해 명백한 성능향상을 가지는 구조인 비선형 등화기를 이용한 PRML 시스템을 제안하였고, 실험 결과를 통해 제안된 구조의 시스템을 통해 기존의 시스템에 비해 우수한 성능향상을 얻을 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] 박현수의, “광 디스크 재생을 위한 적응형 PRML 코어 개발에 관한 연구”, 대한 전자공학회 하계 학술대회 2002. 6.
- [2] J.W.M. Bergmans, “Digital baseband transmission and recording”, KAP, 1996.
- [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.