

고밀도 광기록 채널을 위한 PRML 시스템의 설계 및 성능 분석

조한규, 안성근*, 김진용*, 강창언, 홍대석

연세대학교 전기.컴퓨터 공학과

(*) : LG 전자 주식회사 디지털 미디어 연구소

Tel. : 361-2865 Fax : 312-4887

A PRML System for High Density Optical Recording

Hangyu Cho, Seongkeun Ahn*, Jinyong Kim*, Changeun Kang, and Daesik Hong

Dept. of Electrical & Computer Engineering, Yonsei Univ.

(*) : LG Electronics Inc., SEOUL, KOREA

E-mail : cool@catseye.yonsei.ac.kr

This paper deals with methods for partial response maximum-likelihood (PRML) detection and crosstalk cancellation. In accordance with the demand for increased recording density, 20 gigabyte (Gbyte) digital versatile disk (DVD) ROM channel is considered. Channel is modelled to be close to real optical channel using DIFFRACT™. After comparing the spectral characteristics of various PR polynomials, $P(D)=1+D+D^2+D^3$ is proposed as a target PR. The performance of the system is illustrated under the condition that the readout signal is degraded by crosstalk, radial tilt and nonlinear distortions in optics. The experimental results show that crosstalk and nonlinear distortions degrade performance by about 2dB, respectively. We also show that when radial tilt is added to the crosstalk, the performance degradation assumes quite significant proportions.

I. 서 론

테이블 1은 기존의 4.7 Gbyte DVD-ROM과 20 Gbyte DVD-ROM의 사양을 나타낸다. 20 Gbyte의 경우, 레이저의 파장이 짧아지고, 트랙간 간격이 좁아졌음을 확인할 수 있다. 즉, 기록 밀도가 높아지면, 인접 심볼간 간섭과 다양한 비선형 왜곡 인자들에 의한 시스템의 성능 열화가 심각해진다. 따라서, 향상된 신호 처리 기법 및 시스템 설계가 요구된다. 본 논문에서는 디지털 기록 시스템에서 최적에 가까운 성능을 보이는 PRML 시스템을 제안한다 [1][2][3]. 그림 1은 PRML 시스템의 구성도를 나타낸다. PRML 시스템에서 채널을 통과한 신호는 등화기에 의해서 유한한 레벨의 샘플값을 가지게 되며, Viterbi 검출기에 의해서 원신호

로 복원된다.

본 논문에서는 크게 두가지의 주제를 다룬다. 첫째 고밀도 광채널을 위한 PR 다항식의 결정 및 시스템의

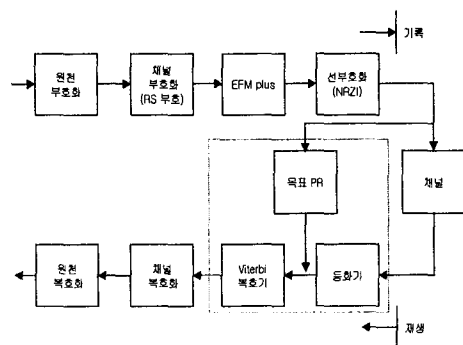


그림 1. PRML 시스템 구성도

이 논문은 2000년도 두뇌 한국 21사업 핵심분야에 의하여 지원되었으며, 한국 과학 기술 재단과 LG 전자 주식회사의 부분적인 연구 지원하에 이루어 졌음

표 1. DVD-ROM의 사양

	4.7 Gbyte	20 Gbyte
레이저 파장	650 nm	410 nm
개구율(NA)	0.6	0.65
3T의 피트 길이 (T: 심볼 간격)	0.4 μm	0.21 μm
트랙간 간격	0.74 μm	0.36 μm

설계이다. 둘째, 인접 심볼간 간섭, 광학계의 비선형성, 인접 트랙간 간섭, 그리고, 디스크의 비틀거림 (tilt)이 존재하는 다양한 환경에서의 성능 비교이다. 구체적으로 살펴 보면, 2 장에서는 DIFFRACT™ 시뮬레이션에 의한 채널 모델링을 살펴본다. 3 장에서는 PRML 시스템 설계의 기반이 되는 목표 PR 다항식의 결정을 다룬다. 4 장에서는 설계된 PRML 시스템의 성능을 다양한 성능 열화 인자하에서 분석하고, 5 장의 결론으로 매듭 짓는다.

II. 채널 모델링

본 논문은 20 Gbyte DVD-ROM 채널을 목표로 한다. 우선, DIFFRACT™ 시뮬레이션에 의하여 선형적인 채널 모델을 구한다. 그림 2는 결과적인 채널의 임펄스 응답을 나타낸다. 그러나, 실제 DVD-ROM에는 선형적으로 표현될 수 없는 광학계의 비선형 특성이 존재한다. 그러므로, 정확한 성능 예측을 위해서는 이러한 비선형 특성을 모델링 과정에 포함시켜야 한다. DIFFRACT™ 시뮬레이션에 의하여 이러한 비선형 특성을 살펴보면, 전후 심볼들의 패턴에 따라 비선형 특성이 결정됨을 알 수 있다. 그러므로, 다양한 심볼패턴

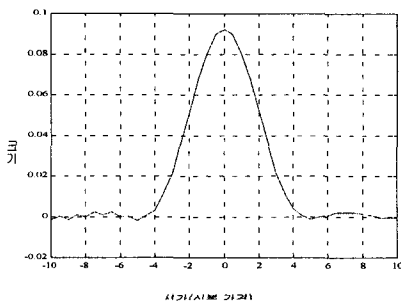


그림 2. 20 Gbyte DVD-ROM 채널의 임펄스 응답

들마다 비선형 특성을 나타내는 일정한 값을 선형 채널 출력에 더함으로써, 광학계의 비선형 특성을 근사적으로 모델링 한다. 그림 3은 선형적인 채널 모델링과 비선형 특성을 포함한 모델링을 채널 출력에 의하여 비교한다. 비선형 특성을 포함한 모델링이 실제 DIFFRACT™ 시뮬레이션 (실선)의 경우와 거의 오차가 없음을 확인할 수 있다. 채널 모델링에 대한 자세한 세부 사항들은 [4]에 나타나 있다.

III. 목표 PR 다항식의 결정

PRML 시스템의 설계에 있어서 가장 중요한 것은 잡음 강화를 최소로 하는 목표 PR 다항식의 결정이다. 그림 4는 다양한 PR 다항식의 주파수 특성과 20 Gbyte DVD-ROM 채널의 주파수 특성을 보여준다. 그림에서 알 수 있듯이, 실제 채널은 대역 제한 특성을 갖는다 (일반적으로, 대역 제한 특성은 밀도와 비례하여 증가한다). 그러나, $P(D) = 1 + D$ 와 $P(D) = (1 + D)^2$ 를 목표 PR로 사용할 경우는 대역 제한 특성이 없기 때문에 잡음 강화가 심각하다. 반면에, $P(D) = 1 + D + D^2 + D^3$ 과 $P(D) = 1 + D + D^2 + D^3 + D^4$ 의 경우는 실제 채널과 거의 유사한 주파

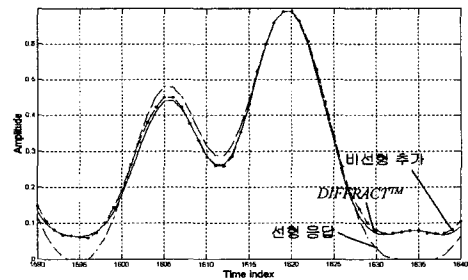


그림 3. 선형 모델링과 비선형이 추가된 모델링, 그리고, DIFFRACT™에 의한 채널 출력의 비교

수 특성을 보이므로, 잡음 강화를 상당히 줄일 수 있다.

PR 다항식의 선택에 있어서 잡음 강화와 함께 반드시 고려되어야 하는 것이 Viterbi 복호기의 복잡도이다. 일반적으로 PR 다항식의 길이를 n 이라고 하면, Viterbi 복호기의 Trellis 선도상에서의 상태 (state) 수는 2^{n-1} 이 된다. 본 시스템에서는 run-length-limited (RLL) (2,10) 부호화 과정이 고려되므로, 최소 거리 제한 조건 (minimum distance constraint) $d=2$ 를 어기는 모든 경로 (path)는 Trellis 선도상에서 제거된다 (그림 5). 따라서, 결론적인 상태수는 $P(D)=1+D+D^2+D^3$ 의 경우는 6이고, $P(D)=1+D+D^2+D^3+D^4$ 의 경우는 8이다. 그러므로, Viterbi 복호기의 복잡도를 고려하여 본 시스템에서는 $P(D)=1+D+D^2+D^3$ 을 목표 PR 다항식으로 제안한다.

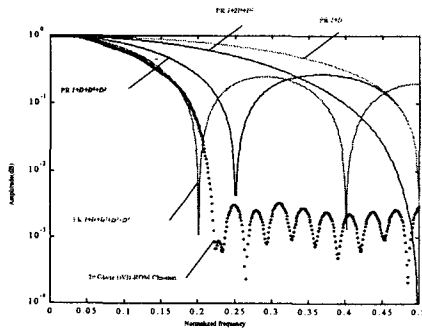


그림 4. 다양한 PR 다항식들과 20 Gbyte DVD-ROM 채널의 주파수 특성 비교.

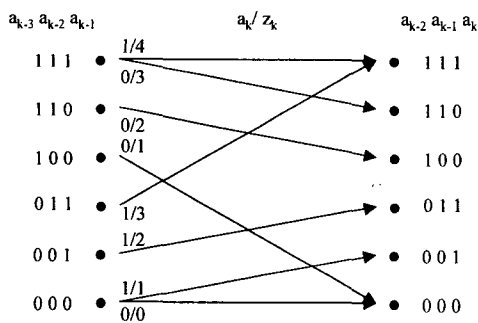


그림 5. $P(D)=1+D+D^2+D^3$ 일 때의 Trellis 선도 (RLL (2,10) 변조 부호 고려).

IV. 다양한 성능 열화 인자에 따른 성능 비교

본 절에서는 다양한 성능 열화 인자에 따른 시스템 성능을 모의 실험을 통해 살펴 본다. 모의 실험에 의한 검출 에러율 곡선은 입력 심볼열 100만개에 대한 결과를 10번 평균내어 얻어졌다.

그림 6은 인접 심볼간 간섭 (ISI), 인접 트랙간 간섭 (Crosstalk), 그리고, 디스크의 비틀거림 (Tilt)이 존재할 때의 성능 비교를 보여준다. 인접 심볼간 간섭만 존재할 때의 성능을 기준으로, 만일 인접 트랙간 간섭이 더해지면 2dB 정도의 성능 열화가 유발되는 것을 확인할 수 있다. 특히, 효율적인 성능 분석을 위해 등화기의 출력을 살펴보는 것은 의미가 있다. 그림 7은 등화기 출력 정보열의 히스토그램을 나타낸다. 그림 7(a)의 경우는 인접 심볼간 간섭만이 존재하는 경우를 나타내며, 신호 레벨들 사이의 구분이 명확함을 확인할 수 있다. 반면에, 인접 트랙간 간섭이 더해진 그림 7(b)의 경우에는 신호 레벨들 사이의 구분이 모호해짐을 확인할 수 있다. 이러한 신호 레벨들 사이의 모호함은 Viterbi 복호기의 검출 에러를 유발하게 된다. 그림 6에서는 또한, 인접 트랙간 간섭에 디스크의 비틀거림이 더해지면, 3dB 정도의 추가적인 성능 열화가 존재함을 알 수 있다. 이 때, 인접 트랙간 간섭에 심각한 영향을 주는 반지름 방향으로의 비틀거림 (radial tilt)만을 고려하였다. 그림 6에는 20 Gbyte DVD-ROM 채널에서 얻을 수 있는 최적의 분석적 성능 (maximum-likelihood sequence detection bound; MLSDbound) 역시 주어져 있다 [5].

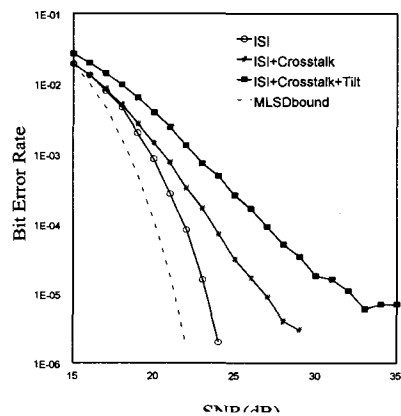
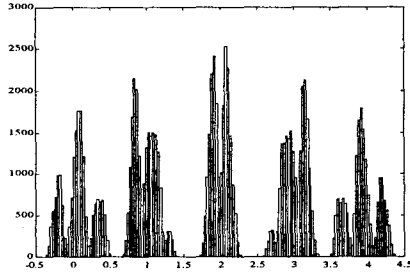
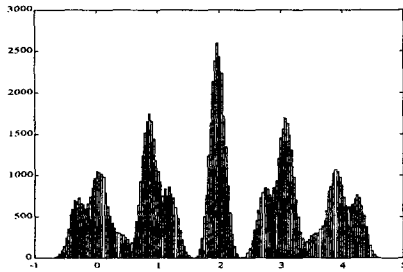


그림 6. 인접 심볼간 간섭, 인접 트랙간 간섭과 디스크의 비틀거림에 의한 성능 열화.

그림 8은 그림 6의 경우들에 대해서 광학계의 비선형 특성이 더해졌을 때의 성능을 보여준다. 먼저, 인접 심볼간 간섭에 광학계의 비선형 특성이 더해지면, 2dB 이하의 성능 열화가 생기는 것을 확인할 수 있다.



(a) 인접 심볼간 간섭만 존재



(b) 인접 심볼간 간섭과 인접 트랙간 간섭 존재

그림 7. 등화기 출력 심볼열의 신호 레벨의 히스토그램

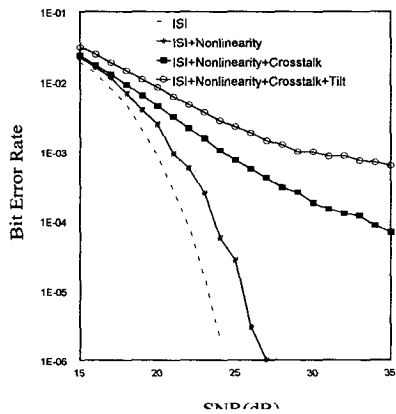


그림 8. 광학계의 비선형 왜곡이 존재할 때, 인접 심볼간 간섭, 인접 트랙간 간섭과 디스크의 비틀거림에 의한 성능 열화.

그러나, 여기에 인접 트랙간 간섭이 더해지거나, 혹은 인접 트랙간 간섭과 디스크의 비틀거림이 함께 더해지면, 심각한 성능 열화가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이 경우에는 신뢰성있는 재생을 가능하게 하는 최소의 검출 에러율인 10^{-4} 에 도달하지 못하게 된다.

V. 결 론

본 논문은 고밀도 광기록 채널을 위한 PRML 시스템의 설계를 다룬다. 우선, 잡음 강화와 시스템 복잡도를 고려하여 $P(D) = 1 + D + D^2 + D^3$ 를 목표 PR 다항식으로 제안하였다. 제안된 PR 다항식을 바탕으로 Viterbi 복호기를 설계하였다. 다음으로, 인접 심볼간 간섭이외에 인접 트랙간 간섭, 디스크의 비틀거림, 그리고 광학계의 비선형 특성과 같은 성능 열화 인자에 따른 성능 열화 정도를 모의 실험을 통하여 비교하였다. 실험 결과에 의하면, 광학계의 비선형성과 인접 트랙간 간섭은 2dB 정도의 성능 열화를 유발하였다. 그러나, 두 가지 인자가 함께 존재하는 경우, 혹은 디스크의 비틀거림까지 더해지는 경우에는 신뢰성 있는 신호의 재생이 거의 불가능하였다. 그러므로, 신뢰성 있는 신호의 복원을 위해서는 광학계의 비선형성을 제거하기 위한 신호 처리 기법이 차후 연구 과제로 필요함을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] T. Narhara, K. Aratani, A. Fukumoto and S. Masuhara, "Partial-Response Maximum-Likelihood Detection Method for Magneto-Optical Recording," *Jpn. J. apply. Phys.*, Vol. 36, Part 1, No. 1B, pp. 549-556, Jan., 1997.
- [2] H. K. Thapar et. al., "A class of Partial Response Systems for Increasing Storage Density in Magnetic Recording," *IEEE Trans. On Magnetics*, Vol. MAG-23, No. 5, Sep., 1987.
- [3] Jaekyun Moon and L. Richard Carley, "Partial Response Signaling in a Magnetic Recording Channel," *IEEE Trans. Magnetics*, Vol. MAG-4, No. 24, Nov. 1988.
- [4] Seong-keun Ahn, Hyung-Nam Kim, Seong-Yun Jeong, Kyung-Chan Park and Jin-Yong Kim, "Linear Modeling and Nonlinearity Compensation of the High Density Disc Channel," *ISOM/ODS '99*, pp. 345-347, July, 1999.
- [5] G. D. Forney, "Maximum-likelihood Sequence Estimation of Digital Sequences in the Presence of Intersymbol Interference," *IEEE Tran. Inform. Theory*, Vol. IT-18, pp. 363-378, May, 1972.
- [6] J. W. M. Bergmans, *Digital Baseband Transmission and Recording*, Kluwer Academic Publishers, 1996.