고밀도 비선형 광 저장장치를 위한 새로운 부분응답 최대유사도 신호 검출 기술

준회원 이 규 석*, 종신회원 이 재 진**°

PRML Detection for Asymmetric High-density Optical Storage System

Kyusuk Lee* *Associate Member*, Jaejin Lee** *Lifelong Member*

요 약

본 논문은 고밀도 광 기록 저장장치에서 오류의 주 원인이 되는 tangential tilt의 문제를 해결하기 위한 개선된 부분응답최대유사도 신호 검출 방법을 제안한다. 틸트의 변화에 따라 등화기 계수와 비터비 디코더의 가지 기준값을 적응적으로 갱신하여 채널의 변화에 잘 적응하도록 하였다. 채널의 변화를 감지하는 요소로 주기적으로 반복되는 데이터의 동기패턴을 이용하여 누적 평균을 취한 후 변화량에 해당되는 등화기 계수값과 비터비 디코더의 가지 기준값을 동시에 갱신한다. 제안된 방법을 적용한 결과 기존의 PRML 검출기에 비해 비트 오류율 10-6에서 최대 4dB이상 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

Key Words : Optical Storage, Prml Detection, Asymmetric Optical Channel, Tangential Tilt

ABSTRACT

We propose a partial response maximum likelihood(PRML) detection method that improves the performance of the high-density optical storage system. It concurrently adjusts the coefficients of equalizer and reference values of branches in Viterbi detector. For the estimation of asymmetric channel characteristics by the tangential tilt, we exploit sync patterns in each data frame. The simulation result shows it improves the performance up to 4dB at 10-6 BER compared to conventional adaptive PRML.

Ⅰ. 서 론

매체에 기록된 데이터가 재생될 때 데이터들 사이에는 인접 심벌 간섭이 발생한다. 인접 심벌 간섭은 채널 밀도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다. 광 채널에서 비선형 인접 심벌 간섭의 주된 발생 원인은 데이터를 매체에 기록하는 과정에서 발생하는 domain bloom 현상으로, 이 현상은 광 기록 시스템 잡음의 대부분을 차지하는 천이 지터를 발생시키며, 이 잡음은 재생된 데이터에 더해지는 요소이다. 하지만, 최근 기록 밀도가 증가하면서 이러한 비선형 잡음에 의한 성능저하 현상보다 디스크의 기울임 현상으로 인한 신호 왜곡 현상이 검출 성능을 감소시키는 주요 요인으로 대두되고 있다. 이러한 디스크의 기울임 현상은 광 기록 장치의 특성상 디스크를 회전시키는 모터의 축에 디스크가 정확히 고정되는 것이 아니라, 모터가 회전하면서 발생하는 진동이나 외부 충격으로 인해 모터의 회

※ 본 논문은 2005년 교육인적자원부의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-2005-041-D00592).
* 삼성전자 (jinrho@naver.com)
** 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실 (zlee@ssu.ac.kr) (° : 교신저자)
논문번호 : KICS2006-05-243, 접수일자 : 2006년 5월 22일, 최종논문접수일자 : 2006년 10월 16일

전축으로부터 수직 혹은 수평으로 기울어지는 현상을 말한다. 그리고, 디스크의 기울임 현상은 채널의 임펄스 응답 특성을 왜곡시킨다. 따라서, 고밀도 광 기록 저장 장치에서는 이러한 디스크의 기울임 현상을 정확히 분석하고 제거하는 일이 중요하다.

이러한 문제점을 해결하기 위해서 기존의 PRML 검출 방법을 변형시킨 다양한 형태의 검출 방법이 제안되어왔다[1,2]. 그 중 대표적인 방법이 LMS (Least Mean Square error) 알고리즘을 이용하여 등화기의 계수값을 갱신하는 방법과 비터비 검출기에서 가지 메트릭(branch metric, BM)의 기준값(reference level value)을 갱신하는 방법이 있다. 일반적으로 두 알고리즘은 비터비 검출기의 출력 데이터를 이용하여 PR 목표(traget)값을 계산하거나, 가지 메트릭의 기준값을 계산한다. 하지만, 이러한 PRML 검출 방법은 몇 가지 문제점을 갖고 있다. 첫째, 등화기 계수값을 갱신할 때, 초기에 설정한 등화기 계수값이 현재 채널 상태와 너무 차이가 많이 난다면 잘못된 방향으로 계수값이 갱신되어 오히려 검출 성능을 저하시킬 수 있다. 둘째, 채널의 왜곡 현상이 심화되거나 잡음의 영향이 증가할 경우 비터비 검출기의 출력값에 오류 발생 확률이 높아져서 잘못된 PR 목표값을 계산하게 되고, 갱신되는 등화기의 계수값 또한 틀리게 된다. 셋째, 등화기의 탭 갯수가 많을 경우, 계수값의 수렴 속도가 감소하는 문제가 발생하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 변조코드의 동기 데이터를 이용하여 현재 채널 상태를 분석하고, 이에 적합한 등화기의 계수값과 가지 메트릭의 기준값을 갱신하는 변형된 형태의 적응등화 PRML 검출 방법을 제안한다. 본 논문의 구성은 II장에서 제안하는 PRML 검출 방법에 대해 구체적으로 기술하고, III장에서는 모의실험 결과를 기존의 PRML 검출 방법과 비교 분석하였다. 마지막으로 결론은 IV장에 구성하였다.

Ⅱ. 디스크 기울임 분석기를 갖는 PRML 검출기

2.1. 제안한 PRML 검출기

본 논문에서는 고밀도 광 기록 시스템에 적용 가능한 적응 등화 방법을 이용한 부분 응답 최대 유사 검출 기술을 개발하였다. 이것은 종래의 적응 등화 방법과 같이 디스크의 상태에 따라 기준 가지값을 변화시키거나 등화기의 계수값을 지속적으로 갱신하는 방법이 아니다. 기존의 방법은 하드웨어의 계산량 뿐만 아니라 복잡도를 증가시키기 때문에 본 논문에서는 디스크 상태에 따라 미리 계산된 기준 가지값과 등화기 계수값을 두 개의 롬에 나누어 저장하고, 디스크 상태를 분석하여 롬에 저장된 값들을 이용하여 기준 가지값과 등화기의 계수값을 갱신하는 방법을 택하였다. 고밀도 광 기록 시스템에서 비선형적인 채널 특성을 발생시키는 가장 큰 요인인 디스크의 기울임(tangential tilt) 현상을 분석하기 위해 동기 패턴(sync pattern)을 이용하였다. 타이밍 회복(timing recovery)을 위해 사용되는 동기 데이터는 각 프레임의 앞단에서 일정한 패턴을 갖고 주기적으로 나타나게 되는데, 이러한 데이터 중 일정 구간에서 고정된 값을 갖고 반복되기 때문에 디스크 상태의 변화를 분석하기에 적합하다.

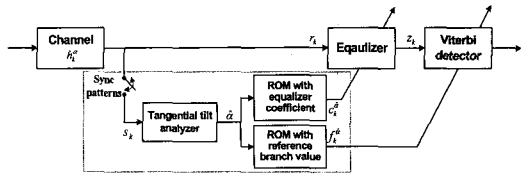


그림 1. 제안한 PRML 검출기의 전체 블록도

그림 1에서는 제안한 PRML 검출기의 전체 시스템 블록도를 나타내었다. 블록도 좌측의 채널을 통과하여 들어오는 데이터 가운데 동기 데이터가 발생하게 되면 스위치가 닫히게 되고, 디스크 기울임 분석기(Tangential tilt analyzer)에서 디스크의 기울임(tangential tilt) 각도를 분석하게 된다. 두개의 ROM에는 각각의 기울임 각도에 가장 적합한 등화기 계수와 가지 메트릭(branch metric)의 기준값이 미리 계산되어 저장되어 있다. 이 값들은 앞 블록에서 분석된 기울임 각도에 따라 그에 맞는 계수값 및 기준값을 동시에 갱신하게 된다.

2.2. 디스크의 기울임 분석기

그림 2에서는 디스크의 기울임 각도를 분석하는 과정에 대해 나타내었다. 기울임 각도 분석기는 FIR 필터, 누산기(accumulator), 평균기 (averaging unit), 레벨 슬라이서 (Level slicer)로 이루어져 있다. 본 논문에서는 디스크의 기울임 각도를 분석하기 위해

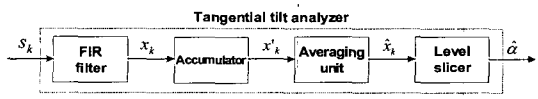


그림 2. 디스크 기울임 분석기

서 동기 데이터를 이용하였다. BD (Blu-ray Disc)에 사용되는 변조코드의 동기 데이터는 30비트로 구성되어 있고, 그중 끝단의 6비트는 동기 데이터를 구분하기 위한 데이터로 구성되어 있고, 7가지의 다른 패턴을 갖고 있다. 나머지 24비트 중 제일 앞단의 1비트는 이전 코드워드에 따라 변하게 된다. 따라서, 마지막으로 남는 23비트만이 고정된 값을 갖고 반복적으로 나타나게 된다. 모의실험에서는 21탭을 갖는 채널 모델을 이용하였다. 그런데, 이 모델의 각각의 양 끝단 두 탭의 계수값은 0에 가깝기 때문에 이 값을 무시할 수 있다. 따라서, 17개의 인접 심벌로부터 간섭 현상이 발생한다고 가정할 수 있다. 또한, 위의 모델에서 기울임 각도는 0.0°, 0.3°, 0.6°, 0.9°에 대해 고려하였다. 이러한 채널 모델을 이용하여 고정된 23비트에 대해 채널 출력값을 구해보면(-a, -b, -c, c, b, a)와 같이 나타나게 된다. 이렇게 대칭적인 값이 나오는 이유는 동기 데이터 중간에 9T 값을 갖는 데이터가 2회 연속적으로 상반된 부호값을 가지면서 반복되기 때문이다. 예를 들어 처음 9T 신호가 양(+)이면 그 다음 입력되는 9T 신호는 그 반대 부호인 음(-)이 되고, 그 반대도 마찬가지이다. 여기서, 채널에 기울임 현상이 발생했을 경우 그 결과 채널 출력값은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$(-a+t_k^{\alpha},-b+t_{k+1}^{\alpha},-c+t_{k+2}^{\alpha},c+t_{k+3}^{\alpha},b+t_{k+4}^{\alpha},a+t_{k+5}^{\alpha}) \quad (1)$$

여기서, t_k^{α}는 기울임 현상으로 인생 발생되는 왜곡값을 나타낸다. 따라서, 우리는 이러한 데이터 값을 이용하여 LMS 기반의 6 탭 FIR 필터를 설계하였다. FIR 필터는 위에서 가정한 4개의 기울임 각도에 따라 그림 3과 같이 4개의 등화된 값을 출력하도록 설계하였다. 하지만, 재생 매체에서 발생되는 여러 가지 잡음이나 왜곡 현상으로 인해서 등화되어 출력되는 값들은 안정된 상태를 유지하지 못하게 된다. 이에 따라, 본 논문에서는 안정된 결과값을 유도하기 위해서 출력되는 등화값의 평균값을 구하여 적용하였다. 평균값 계산을 위해서 누산기에서는 필터로부터 출력되는 값을 누적하여 평균기로 전송하게 되고, 이렇게 전송된 누적값은 평균기를 통해 평균값으로 계산되어진다. 그런 다음, 계산된 평균값은 레벨 슬라이서에 입력되어 디스크의 기울임 각도를 판단한다. 기울임 각도를 판단하기 위해서 노이즈가 제거된 상태에서 계산된 4개의 등화값을 A, B, C, D라 할 때, 각각의 기울임 각도에 해당하는 범주를 다음과 같이 설정하여 이에 해당되는 각도를 판단하였다.

$$\text{기울임 각도 } 0.0° : \hat{x}_k \le \frac{A}{2} \quad (2)$$

$$\text{기울임 각도 } 0.3° : \frac{A}{2} < \hat{x}_k \le \frac{B}{2} \quad (3)$$

$$\text{기울임 각도 } 0.6° : \frac{B}{2} < \hat{x}_k \le \frac{C}{2} \quad (4)$$

$$\text{기울임 각도 } 0.9° : \frac{C}{2} < \hat{x}_k \quad (5)$$

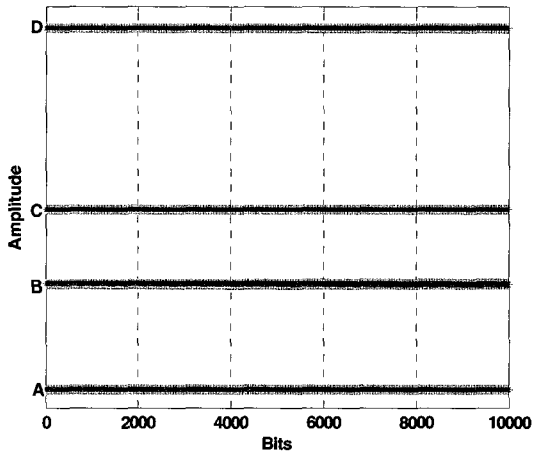


그림 3. FIR 필터의 등화된 값

2.3. Branch Metric 기준값

일반적으로 비터비 트렐리스 상에서 가지 메트릭의 기준값은 등화기의 목표값에 따라 정해지는데, 이렇게 일률적으로 적용되는 가지 메트릭의 기준값은 채널 특성에 맞는 가장 적합한 값이 아니기 때문에, 이로 인해서 데이터 검출 성능이 저하될 수 있다. 그림 4에서는 비터비 트렐리스에서 이상적인 가지 메트릭의 기준값과 디스크의 기울임 현상에 의해 왜곡되어진 가지 메트릭의 기준값과의 차이를 나타내고 있다. 여기서 가지 메트릭의 기준값은 각각의 기울임 각도에서 비터비 출력 데이터를 이용하여 이에 해당하는 가지 메트릭 기준값을 등화기 출력값의 평균을 계산한 것이다. 이렇게 하면 현재 채널 상태에 맞는 가장 적합한 가지 메트릭의 기준값을 구할 수 있다. 기존의 이상적인 기준값과의 차이를 살펴보면 기록 밀도나 변조 코드 특성 때문에 디스크의 기울임 각도가 0.0°일 때도 차이가 발생하는 것을 확인할 수가 있다. 마찬가지로 디스크의 기

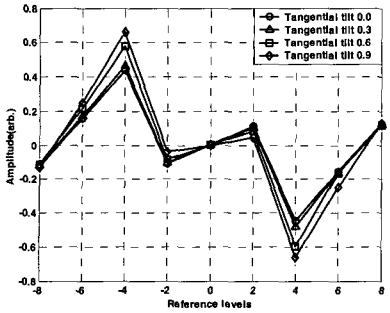


그림 4. PR(12221)ML 검출기에서 이상적인 가지값과 디스크 기울임 각도에 따른 가지값의 변화에 대한 분석 그래프

울임 정도가 증가할수록 이상적인 기준값과의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이는 더 이상 이상적인 기준값만을 적용해서는 성능향상에 한계가 나타날 수 있음을 보여주는 것이다. 이에 따라, 검출 성능을 향상시키기 위해서는 각각의 디스크 기울임 각도에 적합한 가지 메트릭의 기준값을 갱신해야한다. 따라서, 본 논문에서는 기존의 적응 등화 PRML 검출 방법에서 오직 등화기의 계수값만을 갱신시키는 것과 다르게 등화기 계수값 뿐만 아니라 가지 메트릭의 기준값을 채널 상태에 맞게 동시에 갱신시켜주었다.

Ⅲ. 모의실험

제안된 PRML 검출기의 성능을 분석하기 위해서 그림 5에 나타난 35GB BD 채널에서의 채널 임펄스 응답을 이용하였다[3]. 그림 5에 나타난 채널 임펄스 응답은 실제 디스크 상에서 tangential tilt가 0°~0.9°로 변화될 때 발생되는 채널 임펄스 응답의 모델을 일반화시킨 그림이다. 또한, 모의실험을 위해서 17PP 변조 코드를 입력 시퀀스로 사용하였으며 채널 잡음으로는 AWGN이 이용되었고, PR(12221)을 PR 목표값으로 설정하였다.

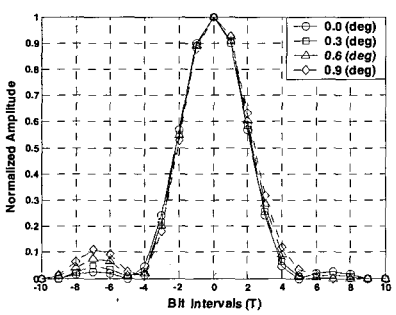
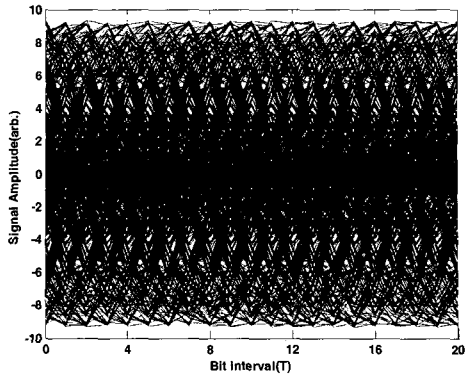
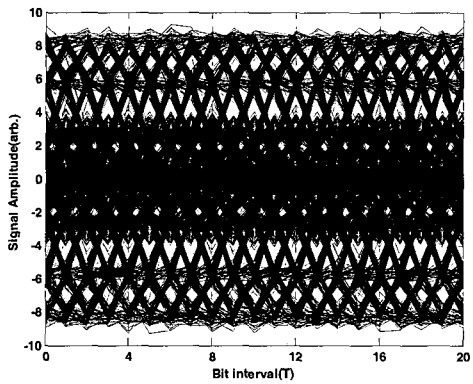


그림 5. 35GB BD에서의 채널 임펄스 응답



(a) 적응 등화를 적용하지 않은 경우



(b) 적응 등화 방법을 적용한 경우

그림 6. 디스크 기울임 각도 0.9°에 대한 eye pattern

3.1. 등화기 출력에 대한 아이 다이어그램

그림 6에서는 기록 용량이 35GB급인 광 기록 채널에서 PR(12221)의 등화기 출력값을 아이 다이어그램으로 나타내었다. 여기서, 디스크 기울임 각도를 0.9°로 설정하였고, 백색 가우시안 잡음은 고려하지 않았다. 아이 다이어그램은 20개의 데이터 샘플을 한 주기로 설정하여 10000번 겹쳐 그린 것이다. 그림 6(a) 그림은 적응 등화 방법을 적용하지 않은 PR(12221)의 아이 다이어그램을 나타내고, (b)는 본 논문에서 제안한 적응 등화 방법을 적용한 PR(12221)의 등화기 출력에 대한 아이 다이어그램을 나타내고 있다. 기존의 등화 방법은 기울임 각도가 0.0°인 것을 가정하여 적응시킨 등화기 계수값과 이상적인 가지 메트릭 기준값을 사용하였기 때문에, 변화된 채널 환경에 적응하지 못하고 아이가 닫혀 있는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 본 논문에서 제안한 적응 등화 방법을 적용한 아이 다이어그램을 보면 디스크의 기울임 상태를 파악하고 그에 맞는

등화기 계수값과 가지 메트릭 기준값을 갱신시킴으로써 기존의 등화 방법에 비해 아이가 월등하게 열려있는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 기존의 등화 방법에 비해 데이터 검출 성능이 향상될 수 있음을 보여주고 있다.

3.2. PRML 검출 성능 비교

채널 모델의 종류는 디스크의 기울임 각도, 0.0°, +0.3°, +0.6°, +0.9°에 따라 총 네 가지로 분류되고, PRML 검출 성능을 평가하기 위해서 백색 가우시안 잡음을 고려하였다. 성능 평가에 사용된 변조코드는 BD의 표준으로 지정되어있는 17PP 변조 코드를 이용하였다[4].

그림 7에서는 디스크 기울임 각도가 0.9°인 경우이다. 또한, PR 등화 목표 차수가 4차인 PR(12221)이고, 기존의 다양한 PRML 방법과 비교하여 모의실험을 수행하였다. 먼저, 디스크의 기울임 각도를 이미 알고 있다고 가정하고, 그에 가장 적합한 등화기 계수값과 가지 메트릭 계수값을 이용하여 얻어진 BER 그래프를 Simulated optimal bound라 하고, × 기호를 갖는 그래프로 표현하였다. 따라서, Simulated optimal bound 그래프는 가장 적합한 성능을 나타내는 환경이라고 생각할 수 있다. □ 기호로 표현되는 그래프는 본 논문에서 제안한 적응 등화 방법을 갖는 PRML의 성능을 나타내고 있는데, Simulated optimal bound와 일치하는 것을 확인할 수 있다. 이는 △ 기호로 표현된 기존의 PRML 검출 방법보다 비트 오류율 10^{-5}에서 4dB이상 성능이 향상된 것이다. 그 이유는 기존의 PRML 검출 방법은 디스크 기울임 각도가 0.0°일 때 적응된 등화기 계수값과 가지 메트릭 계수값을 이용하기 때문에, 각 계수값들이 현재 채널 상태와 일치하지 않아 성능이 저하되는 결과를 초래하게 된다. 반면, 본 논문에서 제안한 적응등화 방법은 채널의 상태가 변함에 따라, 동기 데이터를 분석하여 현재 채널 상태를 빠르게 파악하고, ROM에 저장되어 있는 가장 적절한 등화기 계수값 및 가지 메트릭의 기준값을 갱신함으로써 검출 성능을 향상시킬 수 있다. 또한, 기존에 사용되던 가지 메트릭의 기준값만을 갱신시키는 적응 등화 PRML 방법은 기록 밀도가 증가함으로써 적응 등화 방법을 적용하지 않은 PRML 검출 방법보다 성능이 더욱 악화되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 기록 밀도 증가로 인해 디스크의 기울임으로 인한 재생 신호 왜곡 현상이 더욱 심화됨으로써 갱신되는 기준값들이 채널 상태와는 다른 방향으로 갱신됨으로써 성능을 저하시키는 것으로 예상할 수 있다.

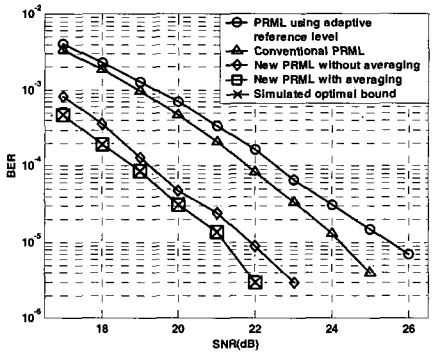


그림 7. 디스크 기울임이 0.9°일 때 PR(12221)ML 검출기의 비트 오류율(BER) 성능 비교 그래프

그림 8에서는 PRML 성능 평가를 위해서 신호대 잡음비가 19dB일 때 각각의 디스크 기울임 각도에 따라 기존의 PRML 검출 방법과 제안한 적응 등화 PRML 검출 방법의 비트 오류율을 비교하였다. 본 논문에서 제안한 적응 등화 PRML의 검출 성능 그래프를 살펴보면 Simulated optimal bound의 성능 그래프와 거의 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 디스크의 기울임 각도가 변하는 것에 상관없이 본 논문에서 제안한 검출기에서 현재 디스크의 기울임 정도를 파악하여 가장 적합한 등화기 계수값과 가지 메트릭 기준값을 적용할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 또한, 디스크의 기울임 각도가 0.9°가 되었을 때도 기존의 PRML 검출기의 비트 오류율은 10^{-3}을 나타내고 있는 반면 적응 등화 방법을 적용한 PRML 검출기는 10^{-4}로 기존의 검출 방법에 비해 뛰어난 성능을 나타내고 있다.

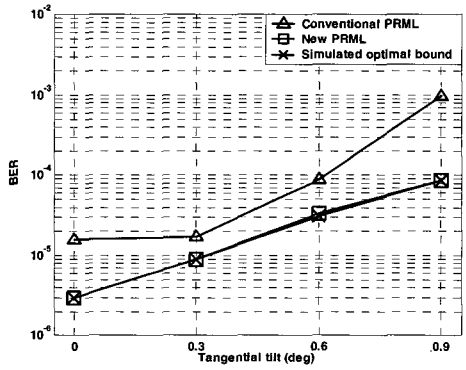


그림 8. PR(12221)ML 검출기에서 디스크 기울임 각도에 따른 비트 오류율(BER) 성능 비교 그래프

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 고밀도 광기록 장치에서 발생하는 디스크 기울임 현상으로 인한 검출 성능 저하를 방지하기 위해서 디스크 기울임 분석기를 갖는 적응 등화 PRML 검출 방법을 제안하였다. 디스크의 기울임을 분석하기 위해서 고정된 값을 갖고 일정 주기로 반복되는 동기 데이터를 이용하였다. 동기 데이터는 LMS 알고리즘을 이용하여 구성된 FIR 필터에 의해 분석되어 현재의 디스크 상태를 판단할 수 있게 한다. 이렇게 분석된 디스크의 기울임 정도를 이용하여 미리 각각의 디스크 기울임에 가장 적합하게 계산되어 롬에 저장된 등화기 계수값과 가지 메트릭의 기준값을 갱신한다. 이러한 방법은 지속적으로 계수값을 계산하여 갱신시켜줘야 하는 기존의 적응등화 방법에 비해 간단하게 각각의 계수값을 갱신시킬 수 있다. 이러한, 디스크 분석기를 갖는 적응 등화 PRML 검출기의 성능은 기존의 PRML 검출기에 비해 비트 오류율 10^{-6}에서 최대 4 dB이상 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[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] 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.

[3] 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.

[4] Bart Van Rompaey, "The Blu-ray disc physical format," ODS 2003 Tutorial Session, Vancouver, May 2003.

이 규 석 (Kyusuk Lee) 준회원

2004년 2월 동국대학교 전자공학과 학사

2006년 2월 동국대학교 전자공학과 석사

2006년 2월~현재 삼성전자 연구원

<관심분야> 채널코딩, 신호검출 알고리즘, 통신시스템

이 재 진 (Jaejin 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 부교수

2005년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수

<관심 분야> 채널코딩, 스토리지 시스템, 통신이론