패턴드 미디어 채널에서 트랙 위치 오프셋에 따른 성능

정회원 김 진 영*, 종신회원 이 재 진**

Performance of Read Head Offset on Patterned Media Recording Channel

Jinyoung Kim* *Regular Member*, Jaejin Lee** *Lifelong Member*

요 약

본 논문은 차세대 저장장치로 각광받고 있는 패턴드 미디어 장치에 대한 트랙 위치 오프셋에 따른 성능을 알아본다. 패턴드 미디어 채널은 SUL(Soft Underlayer)의 유무에 따라 1차원 검출기인 비터비 검출기와 2차원 검출기인 2차원 SOVA(Soft output Viterbi algorithm)를 이용해 실험하였고, 트랙 위치 오프셋이 없을 때, 10%, 20%, 30%, 40% 있을 때 실험하였다. 트랙 위치 오프셋이 10%일 때는 성능열화가 0.3 dB ~ 0.5 dB 정도로 크지 않았지만 그 이상이 되면, 성능열화가 심해지는 것을 볼 수 있다.

Key Words : Pattened media, Soft output Viterbi algorithm, Two-dimensional Intersysbol Interference

ABSTRACT

We investigate the bit error rate against signal-to-noise ratio performance corresponding to track mis-registration for patterned media storage. The patterned media channels with and without soft underlayer are implemented, and we simulate using one-dimensional Viterbi detector and two-dimensional soft output Viterbi detector (SOVA) when the track mis-registration is 0% (on-track), 10%, 20%, 30%, and 40%. While the BER performance degrades approximate 0.3 ~ 0.5 dB at 10% track mis-registration, it degrades severe over 10% track mis-registration.

I. 서 론

패턴드 미디어 장치(Patterned Media)는 차세대 하드디스크 드라이브의 유력한 후보 중에 하나이다[1]. 현재 하드디스크의 경우 수평자기기록 방식 (Longitudinal Magnetic Recording, LMR)을 넘어서 수직자기기록 방식(Perpendicular Magnetic Recording, PMR)을 사용 중에 있다. 하지만 초상자성현상(Superpara magnetism)으로 인해 더 이상 수직자기기록 채널의 밀도를 높이기 힘든 상태이다[2]. 이러한 초상자성현상을 극복하고 기록 밀도를 높이기 위한 방법 중에 하나가 패턴드 미디어이다. 패턴드 미디어는 기록 비트의 구성을 자기 입자들의 집합체 대신에 단일 자기 도메인으로 전환하여 저장하는 방식이다. 즉, 기록비트를 2차원 패턴 어레이로 제작하여 하나의 패턴에 하나의 도메인을 갖도록 함으로써 입자간의 잡음 문제를 해결하고, 기록밀도를 대폭적으로 증가시키는 것이다. 그림 1에 패턴드 미디어의 채널 모델을 보였다. 패턴드 미디어는 초상자성 현상을 극복하면서 기록밀도를 높일 수 있을 뿐만 아니라 하드디스크 시스템 차원에서도 여러 가지 장점을 제공한다[3]. 먼저 비선형 천이 시프트(Non-Linear Transition Shift, NLTS)의 영향을 줄이며, 타이밍 회복(Timing Recovery)에 큰 장점을 주며, 트랙을 찾는 것을 쉽게 할 수 있다. 이 시스템의

※ 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0014344).
* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(kijiyou@paran.com, zlee@ssu.ac.kr)
논문번호 : KICS2010-10-492, 접수일자 : 2010년 10월 13일, 최종논문접수일자 : 2010년 10월 21일

장점을 살리기 위해서는 좋은 미디어의 개발과 더불어 알맞은 신호처리 기법이 연구되어야 한다. 패턴드 미디어는 저장 비트의 간격의 줄어듦에 따라 기존 저장장치에서 존재하던 인접 심볼간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI) 외에 인접 트랙간 간섭(Inter-Track Interference, ITI)이 존재한다. 이는 기존에 일차원적인 신호처리 방법 외에 이차원적인 신호처리 방법을 생각해야 함을 의미한다. 또한 ITI는 트랙의 위치가 달라지는 현상 (Read Head Offset) 이 발생하면 더욱 성능에 안 좋은 영향을 미친다[4].

현재 하드디스크에 적용되고 있는 신호처리 기법으로는 부분 응답 최대 유사도(Partial Response Maximum Likelihood, PRML) 방법이 있다. 이 방법은 ISI가 있는 채널에서 쓰이는 기법이다. 이 기술은 일정한 ISI를 받는 채널을 쉽게 알 수 있는 부분 응답 형태로 등화를 시켜주어 Viterbi 알고리즘으로 복호하는 기법이다. 이 기술을 패턴드 미디어에 적용했을 때의 성능을 알아보고자 한다.

Ⅱ. 패턴드 미디어 채널

수직자기기록 방식을 적용한 패턴드 미디어의 펄스 모양은 SUL(Soft Underlayer)이 있는 것과 없는 것 두 가지로 모델링 할 수 있다. 이 신호는 [5]에서 제시한 것과 같은 형태로 모델링 하였다. 트랙을 따라 데이터를 읽는데 이 방향을 가로 방향으로 봤을 때 모델링한 패턴드 미디어의 사양은 다음과 같다. 우선 한 비트가 저장되는 사각 섬의 한 변의 길이는 25nm이고, 최대값의 50%에 해당하는 펄스폭인 PW_{50}은 SUL이 있을 때는 18.8nm, 없을 때는 21.2nm이다. 트랙을 가로지르는 방향의 채널 모양은 로렌찌안 펄스 형태와 비슷하다[6]. 수평자기기록 채널의 신호를 표현하기 위해 흔히 사용하는 스텝 응답의 이론적인 모델로는 로렌찌안(Lorentzian) 펄스를 사용한다. 로렌찌안 펄스는 고립 천이 응답 또는 천이 응답으로 참고되며, 수식적인 표현은 다음과 같다. 이 방향의 PW_{50}은 31.2nm 이다. 채널의 모양은 그림 2와 같다. 시뮬레이션의 복잡도를 낮추기 위해서 채널을 다음과 같은 이차원 채널 모양으로 가정하였다.

$$h(x,y)= h_x(x)h_y(y) \qquad (1)$$

여기서 $h_x(x)$는 트랙을 따라가는 방향이고, $h_y(y)$는 트랙을 가로지르는 방향이다. 이를 이용해 수신된

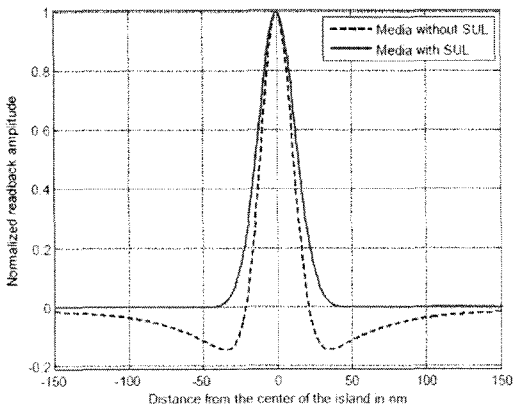

그림 1. 트랙에 따라가는 방향의 채널 모델

신호는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$r[p,q]= d[p,q]\otimes h[p,q]+ n[p,q] \qquad (2)$$

여기서 $d[p,q]$는 랜덤한 이차원 이산 입력 데이터이고, $\otimes$는 2차원 콘볼루션 연산자이고, $h[p,q]$는 $h(pT_x,qT_y)$인 2차원 이산 채널이다. T_x와 T_y는 트랙을 따라가는 방향과 가로지르는 방향의 섬이 나오는 주기이고, p와 q는 트랙을 따라가는 방향과 가로지르는 방향의 이산 위치를 나타낸다. 또한 $n[p,q]$는 평균이 0에 분산이 σ^2인 부가 백색 가우시안 잡음(addictive white Gaussian noise, AWGN)을 나타낸다.

Ⅲ. 등화기 및 검출기

3.1 2차원 등화기

기존의 자기기록 장치에서는 부분응답 최대 유사도(Partial Response Maximum Likelihood, PRML) 기법을 이용하여서 데이터를 검출하였다. PRML 기법은 부분응답(Partial Response) 등화기와 최대 유사도 검출(Maximum Likelihood) 기법을 같이 사용하여 검출 성능을 높인 기법으로, 부분응답기는 채널을 통과한 신호를 우리가 알고 있는 PR 타겟의 형태로 데이터를 보정하고 이를 최대 유사도 검출기인 비터비 검출기로 원래의 입력 신호를 찾아내는 기법이다. 패턴드 미디어 채널의 경우 기존 자기기록 장치와는 다르게 2차원으로 ISI를 주기 때문에, 1차원 콘볼루션하여 출력을 내던 등화기 대신 2차원 콘볼루션으로 구현하였다. 등화기 출력값은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$z[p,q]= r[p,q]\otimes C[p,q], \qquad (2)$$

여기서 $C[p,q]$ 는 등화기의 계수이다. 등화기의 계수는 입력데이터가 PR 타겟을 통과한 값과 등화기의 출력값이 같아지도록 갱신하며 이때, LMS (Least Mean Square) 알고리즘을 사용한다.

3.2 1차원 검출기

기존의 PRML 기법을 패턴드 미디어 채널에 적용하여 실험해 보았다. 등화기는 기존과 다르게 2차원 등화기를 사용하였지만, PR 타겟을 1차원으로 사용하여서 검출기를 1차원으로 구현하였다. 1차원 검출기의 성능을 보는 것은 기존의 시스템을 사용하였을 때 어떠한 성능이 나오는지 예상할 수 있다. 본 논문에서는 2차원 등화기에 1차원 PR 타겟을 사용하여 1차원 비터비 검출기를 사용하여 성능을 알아보았다.

3.3 2차원 검출기

비터비 검출기를 2차원으로 구현하는 것은 매우 어렵다. 패턴드 미디어와 비슷하게 2차원 ISI를 받는 홀로그래픽 채널에서 적용되었던 2차원 검출기를 적용해 보았다[7,8]. 이 2차원 검출기는 방향이 서로 다른 두 개의 1차원 SOVA(Soft output Viterbi algorithm)의 출력값을 평균내서 출력한다. SOVA는 비터비 알고리즘을 수정해서 연판정 출력을 내는 알고리즘이다[9]. 트렐리스를 이용한 연판정 출력 알고리즘 중에 가장 복잡도가 낮다. 이 검출기의 장점은 복잡도를 크게 늘리지 않으면서 2차원 ISI 채널에서 좋은 성능을 낸다는 것에 있다.

Ⅳ. 실험 결과 비교

불명확한 트랙 위치 오프셋에 따른 성능을 보기 위해서, 트랙 위치 오프셋이 0%일 때, 즉 트랙 위치 오프셋이 없을때와 트랙 위치 오프셋이 서로 다를 때의 결과를 보았다. 트랙 위치 오프셋은 한 비트를 저장할 수 있는 자성 섬의 주기에 따라 크기를 백분율한 값으로 정의하였다. 수식으로 나타내면 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{트랙 위치 오프셋} = \frac{\text{헤드 오프셋}}{\text{비트 주기}} \times 100. \quad (2)$$

4.1 검출기별 BER 성능

그림 3은 SUL이 있는 채널에서 트랙 위치 오프셋이 없을 때와, 20%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때를 검출기에 따라 성능을 살펴보았다. 속이 빈 마커는 트랙 위치 오프셋이 없을 때를, 속이 찬 마커는 트랙 위

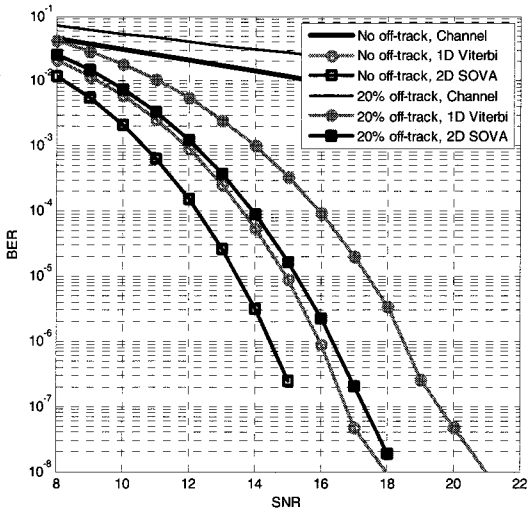

그림 3. SUL이 있는 채널에서 BER 성능

치 오프셋이 있을 때를 나타낸다. BER이 10^{-6}일 때를 기준으로 본다면, 2차원 검출기인 2D SOVA는 1차원 검출기인 1D Viterbi 보다 트랙 위치 오프셋이 없을 때는 약 1.5 dB, 20%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때는 약 2 dB 정도 성능이 더 좋다. 1차원 검출기는 트랙 위치 오프셋이 없을 때보다 20%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때 약 2.5 dB의 성능 열화가 나타나는 것을 볼 수 있다. 2차원 검출기는 같은 상황에서 약 2 dB의 성능 열화를 보인다. 이는 2차원 검출기의 성능이 뛰어나며 트랙 위치 오프셋에 따라서도 더 좋은 성능을 내는 것을 보여준다.

4.2 1차원 검출기의 트랙 위치 오프셋에 따른 성능

그림 4와 5는 SUL이 있는 채널과 없는 채널의 1차원 검출기의 BER 성능을 트랙 위치 오프셋에 따라서 보여주고 있다. 먼저 그림 4는 SUL이 있는 채널에 대한 결과로, 1차원 비터비의 성능을 보여주고 있다. 트랙 위치 오프셋이 커질수록 성능 열화가 더 심해지는 현상을 볼 수 있다. BER 10^{-6}일 때를 기준으로 본다면, 10% 와 20%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때 트랙 위치 오프셋이 없을 때 보다 약 0.5 dB 와 2.5 dB 의 성능 열화가 생긴 것을 볼 수 있다. 30%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때는 성능열화가 더 심해졌으며, 40%의 트랙 위치 오프셋 일때는 SNR이 좋아져도 성능이 좋아지지 않는 오류 마루 현상이 나타나는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 SUL이 있을 때의 결과로 그림 4의 SUL이 없을 때와 비슷한 경향을 보여주는 것을 확인할 수 있다. SUL이 없는 채널은 높은 SNR에서 SUL이 있을 때보다 성능이 더 좋은 것을 볼 수 있다.

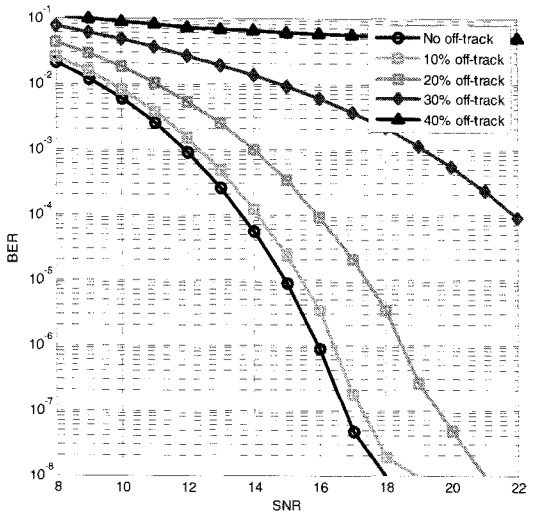

그림 4. SUL이 있는 채널에서 1D Viterbi 검출기의 트랙 오프셋에 따른 BER 성능.

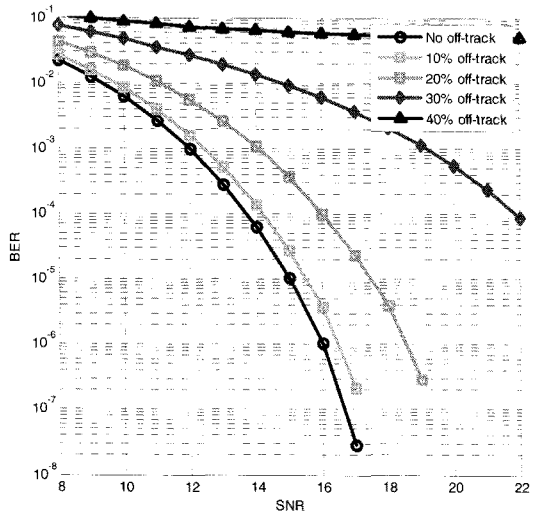

그림 5. SUL이 없는 채널에서 1D Viterbi 검출기의 트랙 오프셋에 따른 BER 성능.

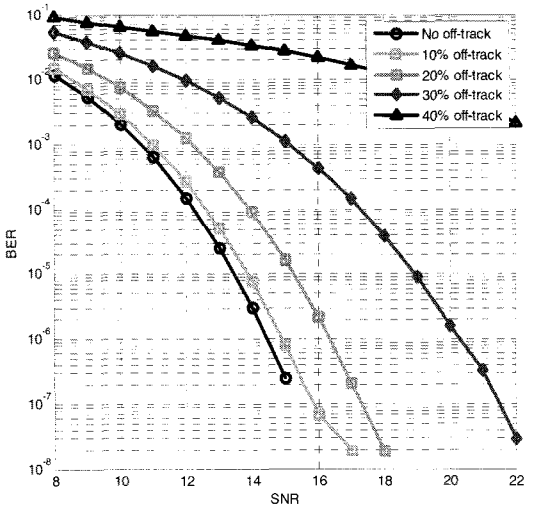

그림 6. SUL이 있는 채널에서 2D SOVA 검출기의 트랙 오프셋에 따른 BER 성능.

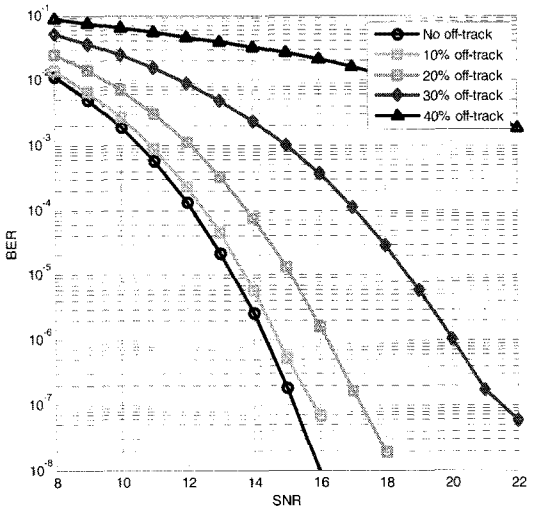

그림 7. SUL이 없는 채널에서 2D SOVA 검출기의 트랙 오프셋에 따른 BER 성능.

4.3 2차원 검출기의 트랙 위치 오프셋에 따른 성능

그림 6과 7은 위의 결과와 마찬가지로 SUL이 있는 채널과 없는 채널의 2차원 검출기의 BER 성능을 보여주고 있다. 그림 6은 SUL이 있는 채널에 대한 결과로서, 2차원 검출기의 성능을 보여준다. 2차원 검출기도 1차원 검출기와 마찬가지로 트랙 위치 오프셋이 커질수록 성능열화가 심한 것을 볼 수 있다. BER 10^{-6}일 때를 기준으로 본다면, 10%, 20%, 30%의 트랙 위치 오프셋은 트랙 위치 오프셋이 없을 때보다 약 0.3 dB, 2 dB, 6 dB의 성능열화가 있는 것을 볼 수 있다. 2차원 검출기의 경우 30%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때는 1차원 검출기보다 우수한 성능을 보여준다. 하지만 40%의 트랙 위치 오프셋이 있을 때는 성능이 안 좋은 성능을 보여주지만 SNR 높아질 때마다 성능이 약간씩은 좋아지는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 SUL이 없는 채널의 결과로 SUL이 있는 채널과 성능 차이가 거의 없는 것을 볼 수 있다.

V. 결 론

패턴드 미디어 채널에서 트랙 위치 오프셋의 크기에 따라서 BER 성능이 어떻게 변하는지 알아보았다.

채널 모델은 SUL이 유무에 따라 모델링하여 각각 실험을 하였다. 트랙 위치 오프셋이 20% 이상 생기면 성능열화가 심한 것을 보았으며, 40% 정도의 트랙 위치 오프셋이 생기면 1차원 검출기는 제대로 검출하지 않으며, 2차원 검출기도 거의 제대로 검출하지 못한 것을 보았다. 따라서 트랙 위치 오프셋의 영향력을 최소로 할 수 있도록 이를 보상하는 알고리즘이 필요하다.

참 고 문 헌

[1] R. L. White, R. M. H. New, and R. F. W. Pease, "Patterned media: A Viable Route to 50 Gbit/in2 and up for magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.33, No.1, pp.990-995, 1997.

[2] P. L. Lu and S. H. Charap, "Thermal Instability at 10Gbit/in2 Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.30, No.6, pp.4230-4232, 1994.

[3] J. Zhu, Z. Lin, L. Guan, and W. Messner, "Recording, noise, and servo characteristics of patterned thin film media," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.36, No.1, pp.23-29, 2000.

[4] P. W. Nutter, I. T. Ntokas, B. K. Middleton, and D. T. Wilton, "Tracking Issues in High-Density Patterned Media Storage," *Intermag 2005*, Digest of Technical Papers, pp. 1377-1378, 2005.

[5] P. W. Nutter, I. T. Ntokas, and B. K. Middleton, "An investigation of the effects of media characteristics on read channel performance for patterned media storage," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41, No.11, pp.4327-4334, 2005.

[6] P. W. Nutter, I. T. Ntokas, B. K. Middleton, and D. T. Wilton, "Effect of island distribution on error rate performance in patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.41, No.10, pp.3214-3216, 2005.

[7] J. Kim and J. Lee, "Partial response maximum likelihood detections using two-dimensional soft output Viterbi algorithm with two-dimensional equalizer for holographic data storage," *Jpn. J. Apl. Phys.*, Vol.48, No.3, pp.03A033, 2009.

[8] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional SOVA and LDPC codes for holographic data storage system," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.45, No.5, 2009.

[9] J. Hagenauer and P. Hoeher, "A Viterbi Algorithm with Soft-decision Output and its Applications," *Proc. IEEE Globecom*, Vol.3, pp.1680-1686, 1989.

김 진 영 (Jinyoung Kim) 정회원

2007년 2월 숭실대학교 기계공학과 학사

2009년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사

2009년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 박사과정

<관심분야> 스토리지 시스템, 반복 복호 부호, 채널 코딩

이 재 진 (Jaejin Lee) 종신회원

1983년 2월 연세대학교 전자공학과 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

1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신 연구소 책임 연구원

1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수

2005년 9월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수

<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템