

비트 패턴드 미디어 기록장치에서 트랙 방향에 따른 연관정 출력 비터비 알고리즘의 성능

정 성 권*, 이 재 진^o

Performance of Soft Output Viterbi Algorithm Depending on Track Direction on Bit-Patterned Media Recording

Seongkwon Jeong*, Jaejin Lee^o

요 약

데이터의 폭발적인 증가로 인하여 고밀도 데이터 저장장치에 대한 요구가 증가되어지고 있다. 기록밀도를 증가시키기 위해서는 아일랜드의 간격이 줄어들어야 하는데 이러한 기록밀도의 증가는 인접 심볼간 간섭과 인접 트랙간 간섭을 증가시킨다. 즉 비트 패턴드 미디어 기록장치의 성능을 저하시킨다. 특히 인접 트랙간 간섭의 영향이 인접 심볼간 간섭의 영향보다 더 크기 때문에 이에 알맞은 신호검출 기법이 요구된다. 본 논문에서는 비트 패턴드 미디어 기록장치에서 트랙 방향에 따른 연관정 출력 비터비 알고리즘의 성능을 비교한다. 크로스 트랙 방향의 연관정 출력 비터비 알고리즘 검출기는 다운 트랙 방향의 연관정 출력 비터비 알고리즘 및 2차원 연관정 출력 비터비 알고리즘 검출기보다 더 좋은 성능을 보여주었다.

키워드 : 비트 패턴드 미디어 기록장치, 데이터 저장장치, 부분 응답 최대 유사도, 신호검출, 연관정 출력 비터비 알고리즘

Key Words : Bit-patterned media recording, data storage systems, partial response maximum likelihood, signal detection, soft output Viterbi algorithm.

ABSTRACT

Because of the explosion in data growth, the requirement for high areal density storage systems has increased. To satisfy the demand for high areal density in bit-patterned media recording technology, the space between islands is reduced. However, this reduction causes inter-symbol interference and inter-track interference, i.e., two-dimensional ISI, degrade the system performance. Since the effect of inter-track interference is greater than that of inter-symbol interference in bit-patterned media recording, an appropriate signal detection schemes are required. In this paper, we compare the bit error rate performance of soft output Viterbi algorithm according to track direction in bit-patterned media recording. The soft output Viterbi algorithm detector for cross-track direction provided better performance than the soft output Viterbi algorithm detector for down-track direction and two-dimensional soft output Viterbi algorithm detectors.

* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1F1A1046899).

• First Author : Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, seongkwon@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, zlee@ssu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 201909-196-A-RN, Received September 11, 2015; Revised September 15, 2015; Accepted September 15, 2015

I. 서 론

기존의 자기 (magnetic) 데이터 저장장치는 초상자 성현상 (superparamagnetism) 한계에 의해 기록밀도를 증가시키기 어렵지만, 비트 패턴드 미디어 기록장치 (bit-patterned media recording, BPMP)는 이러한 한계를 극복할 수 있는 차세대 데이터 저장장치로 주목받고 있다^[1]. BPMP는 하나의 아일랜드 (island)에 한 비트를 저장할 수 있으며, 최대 4 Tb/in² (terabit per square inch) 까지 저장용량을 증가시킬 수 있다^[2]. 또한 비선형 천이 이동 (nonlinear transition shift) 감소, 뛰어난 열 안정성 등 여러 장점을 갖는다^[3]. BPMP에서 기록밀도를 증가시키기 위해서는 아일랜드들 간의 간격이 감소되어야 하는데, 이러한 감소는 인접 심볼간 간섭 (inter-symbol interference, ISI)와 인접 트랙간 간섭 (inter-track interference, ITI)을 증가시킨다. 즉 간섭이 2차원 (two-dimensional, 2D) 형태로 발생되며, 기록밀도를 증가시킬수록 간섭이 더욱 증가한다^[4]. 이외에도 트랙 어긋남 (track misregistration, TMR), 미디어 잡음 등 다양한 오류가 발생한다^[5,6]. 이러한 문제점들을 해결하기 위해 신호검출, 오류정정부호, 변조부호 등 다양한 신호처리 기술이 제안되었다. 비트 패턴드 미디어 기록장치와 유사하게 2D-ISI가 발생하는 홀로그래픽 데이터 저장장치 (holographic data storage, HDS)를 위해 가로 방향과 세로 방향으로 연판정 출력 비터비 알고리즘 (soft output Viterbi algorithm, SOVA)을 사용한 2D-SOVA 신호검출 방식이 제안되었다^[7]. 데이터 저장장치는 일반적인 통신시스템과 달리 재전송이 불가능하기 때문에 매우 낮은 디코딩 실패 확률이 요구된다. 따라서 오류정정능력을 향상시키기 위하여 저밀도 패리티 체크 (low-density parity check) 부호를 활용한 여러 오류정정부호 기법이 제안되었다^[8,9]. 또한 데

이터 저장장치에서 특정한 패턴은 간섭이나 오류를 발생시키게 할 수 있으므로 이를 사전에 방지하기 위해 여러 가지 변조부호 방식이 제안되었다^[10,11]. BPMP는 트랙의 방향에 따라 간섭 영향의 크기가 다르며, 특히 기록밀도가 증가할수록 다운트랙 (down-track) 방향의 ISI 영향 보다 크로스 트랙 (cross-track) 의 ITI 영향이 더욱 심하기 때문에 이에 알맞은 신호검출 방식이 필요하다. 본 논문에서는 그림 1에서 보는 것과 같이 BPMP에서 트랙 방향에 따른 SOVA의 성능을 비교한다.

II. 연판정 출력 비터비 알고리즘

기존의 데이터 저장장치는 1차원 ISI만 발생하기 때문에 1차원 Viterbi 알고리즘을 사용하였으며, 이를 이용한 것이 부분 응답 최대 유사도 (partial response maximum likelihood, PRML)이다. 하지만 2D-ISI가 발생하는 데이터 저장장치인 HDS를 위해 2D-SOVA 방식이 제안되었으며 이 방식은 가로 방향과 세로 방향으로 각각 SOVA를 사용하여 검출한 후 나온 값을 평균하여 최종값으로 결정하는 방식으로 가로 혹은 세로 방향의 1차원 SOVA만 사용하였을 때보다 좋은 성능을 보여준다^[7]. 하지만 이러한 이유는 HDS의 채널의 가로 방향의 간섭과 세로 방향의 간섭의 크기가 동일하기 때문이다. 아래는 신호의 퍼짐정도인 블러 (blur)가 1.85일 때의 HDS의 채널 계수 h_{HDS} 를 보여준다.

$$h_{HDS} = \begin{bmatrix} 4.774 & 12.016 & 4.774 \\ 12.016 & 30.234 & 12.016 \\ 4.774 & 12.016 & 4.774 \end{bmatrix} \quad (1)$$

채널 계수 h_{HDS} 를 통해 알 수 있듯이 가로 방향과 세로 방향의 계수가 12.016으로 일정하기 때문에 가로 방향과 세로 방향으로부터 동일한 간섭의 크기를 받는다. 그러나 BPMP은 HDS와는 다르게 가로 (다운 트랙) 방향의 영향인 ISI와 세로 (크로스 트랙) 방향의 영향인 ITI의 크기가 다르다. 아래는 기록밀도가 1.5 Tb/in² 과 3 Tb/in² 에서 BPMP의 채널 계수 h_{BPMP} 을 보여준다.

$$h_{BPMP1.5} = \begin{bmatrix} 0.0053 & 0.1370 & 0.0053 \\ 0.0388 & 1.0000 & 0.0388 \\ 0.0053 & 0.1370 & 0.0053 \end{bmatrix} \quad (2)$$

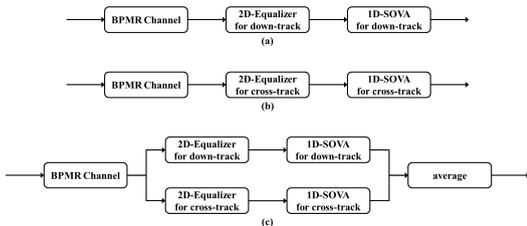


그림 1. 시스템 블록 다이어그램. (a) 다운 트랙 방향 1D-SOVA, (b) 크로스 트랙 1D-SOVA, (c) 2D-SOVA
Fig. 1. System block diagram. (a) 1D-SOVA for down-track direction, (b) 1D-SOVA for cross-track direction, (c) 2D-SOVA.

$$h_{BPMB3.0} = \begin{bmatrix} 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \\ 0.2125 & 1.0000 & 0.2125 \\ 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \end{bmatrix} \quad (3)$$

채널 계수 h_{BPMB} 를 보면 HDS의 채널 계수 h_{HDS} 와는 달리 가로 방향의 ISI보다 세로 방향의 ITI의 크기가 더 크며, 특히 ITI의 영향은 기록밀도가 증가할수록 더욱 심각해진다. 따라서 본 논문에서는 BPMB 채널에서 다운 트랙 방향 1D-SOVA만을 사용하였을 때, 크로스 트랙 방향 1D-SOVA만을 사용하였을 때, 다운 트랙 및 크로스 트랙 방향을 모두 사용한 2D-SOVA를 사용하였을 때의 성능을 비교한다.

III. BPMB 채널 모델

BPMB 채널 계수 $h_{m,n}$ 은 다음과 같이 2차원 가우시안 아일랜드 펄스 응답 (Gaussian island pulse response)를 샘플링하여 얻을 수 있다.

$$h_{m,n} = A \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2c^2} \left[\left(\frac{mT_x + \Delta_{off}}{PW_x} \right)^2 + \left(\frac{nT_x}{PW_x} \right)^2 \right] \right\} \quad (4)$$

여기서 A 는 정규화된 피크 진폭 (normalized peak amplitude), c 는 가우시안 함수의 표준편차와 신호 펄스 최대값의 50%일 때 펄스폭을 나타내는 파라미터 PW_{50} 과의 관계로 상수 $1/2.3548$ 이며, track pitch T_x 는 크로스 트랙 방향에서 아일랜드들의 간격, bit period T_x 는 다운 트랙 방향에서 아일랜드들의 간격, Δ_{off} 는 트랙 어긋남, PW_x 는 크로스 트랙 방향에서 PW_{50} , PW_x 는 다운 트랙 방향에서 PW_{50} 이다.

BPMB 채널을 통과한 수신신호 $r_{p,q}$ 는 아래와 같이

계산된다.

$$r_{p,q} = \sum_{m=-N}^N \sum_{n=-N}^N d_{p-m,q-n} \cdot h_{m,n} + n_{p,q} \quad (5)$$

여기서 N 은 그림 2와 같이 하나의 아일랜드를 기준으로 N 만큼 떨어진 주변 아일랜드에서 주는 영향의 범위를 나타내며, $d_{p,q}$ 는 p 번째 트랙의 q 번째 아일랜드의 입력 데이터를 나타내며, $n_{p,q}$ 는 평균이 0이며 분산이 σ^2 인 부가 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise)으로 모델링 된 잡음이다.

표 1. SNR이 12dB이고 기록밀도가 1.5 Tb/in²일 때 PR target에 따른 BER performance
Table 1. BER performance according to PR target when SNR is 12 dB and areal density is 1.5 Tb/in².

	0.05		0.10		0.15	
	down-track	cross-track	down-track	cross-track	down-track	cross-track
0.00	8.4×10^{-5}	4.1×10^{-5}	8.4×10^{-5}	3.0×10^{-5}	8.4×10^{-5}	3.2×10^{-5}
0.05	7.5×10^{-5}	4.1×10^{-5}	7.5×10^{-5}	3.0×10^{-5}	7.5×10^{-5}	3.2×10^{-5}
0.10	9.7×10^{-5}	4.1×10^{-5}	9.7×10^{-5}	3.0×10^{-5}	9.7×10^{-5}	3.2×10^{-5}

표 2. SNR이 14dB이고 기록밀도가 3.0 Tb/in²일 때 PR target에 따른 BER performance
Table 2. BER performance according to PR target when SNR is 14 dB and areal density is 3.0 Tb/in².

	0.05		0.10		0.15	
	down-track	cross-track	down-track	cross-track	down-track	cross-track
0.00	2.5×10^{-3}	1.0×10^{-4}	2.5×10^{-3}	5.2×10^{-5}	2.5×10^{-3}	9.5×10^{-5}
0.05	2.4×10^{-3}	1.0×10^{-4}	2.4×10^{-3}	5.2×10^{-5}	2.4×10^{-3}	9.5×10^{-5}
0.10	2.7×10^{-3}	1.0×10^{-4}	2.7×10^{-3}	5.2×10^{-5}	2.7×10^{-3}	9.5×10^{-5}

IV. 실험

본 실험에서는 하나의 페이지의 크기가 4096 × 4096으로 하였으며, 총 10페이지를 실험하였다. 다운 트랙 방향과 크로스 트랙 방향의 아일랜드의 한 변의 길이인 L_x 와 L_z 는 각각 11nm로 하였으며, PW_x 는 19.4nm, PW_z 는 24.8nm로 설정하였다. 기록밀도 1.5 Tb/in²를 달성하기 위해 T_x 와 T_z 를 각각 21nm로 하였으며, 기록밀도 3.0 Tb/in²를 달성하기 위해 T_x 와 T_z 를 각각 14.5nm로 하였다. 등화기 계수 업데이트를 위해서는 least mean square algorithm을 사용하였다. 표 1은 신호대잡음비 (signal to noise ratio, SNR)가 12

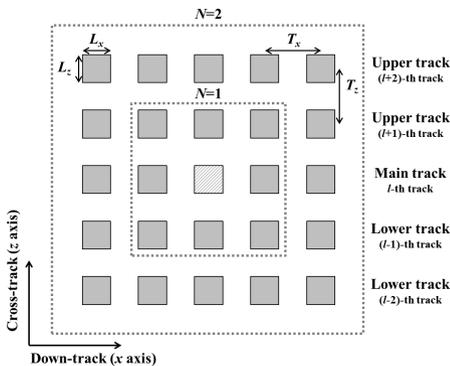


그림 2. N 에 따른 주변 아일랜드로부터의 간섭 영향의 길이
Fig. 2. Length of the interference from neighboring islands according to N .

dB 일 때 기록밀도 1.5 Tb/in^2 와 표 2는 SNR이 14 dB 일 때 기록밀도 3.0 Tb/in^2 에서 부분 응답 (partial response, PR) target에 따른 다운 트랙 방향의 SOVA 및 크로스 트랙 SOVA의 BER 성능을 보여준다. 표 1을 통해서 알 수 있듯이 기록밀도 1.5 Tb/in^2 에서는 PR target을 다운 트랙 방향으로는 PR(0.05 1 0.05) 크로스 트랙 방향으로는 PR(0.1 1 0.1)로 설정하였으며, 표 2를 통해서 알 수 있듯이 기록밀도 3.0 Tb/in^2 에서는 PR target을 다운 트랙 방향으로는 PR(0.15 1 0.15) 크로스 트랙 방향으로는 PR(0.25 1 0.25)로 설정하였다.

그림 3은 기록밀도가 1.5 Tb/in^2 에서 SNR에 따른 BER 성능을 보여준다. 크로스 트랙 방향의 SOVA는 다운 트랙 방향의 SOVA보다 BER = 10^{-4} 에서 약 0.7 dB 성능이득을 얻을 수 있다. 또한 2D-SOVA보다 약간의 성능이득을 얻을 수 있다. 그림 4는 기록밀도가 3.0 Tb/in^2 에서 SNR에 따른 BER 성능을 보여준다. 크로스 트랙 방향의 SOVA는 다운 트랙 방향의 SOVA보다 우수한 성능을 보여주며, 2D-SOVA보다 BER = 10^{-4} 에서 약 1.5 dB 성능이득을 얻을 수 있다. 그림 5는 SNR = 14 dB 이고 기록밀도가 1.5 Tb/in^2 에서 TMR에 따른 BER 성능을 보여준다. 트랙 어긋남이 증가하여도 크로스 트랙 방향의 SOVA가 다운 트랙 방향의 SOVA 및 2D-SOVA보다 더 좋은 성능을 보여준다. 그림 6은 SNR = 14 dB 이고 기록밀도가 3.0 Tb/in^2 에서 TMR에 따른 BER 성능을 보여준다. 기록밀도 및 트랙 어긋남이 증가하여도 크로스 트랙 방향의 SOVA가 다운 트랙 방향의 SOVA 및 2D-SOVA보다 더 좋은 성능을 보여준다.

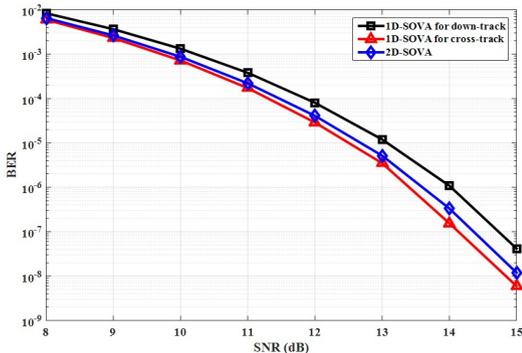


그림 3. 기록밀도가 1.5 Tb/in^2 에서 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 3. BER performance according to SNR when areal density is 1.5 Tb/in^2 .

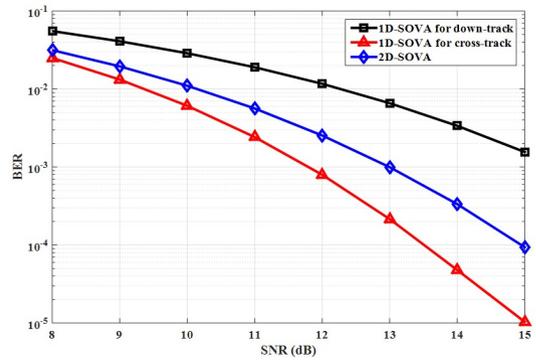


그림 4. 기록밀도가 3.0 Tb/in^2 에서 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 4. BER performance according to SNR when areal density is 3.0 Tb/in^2 .

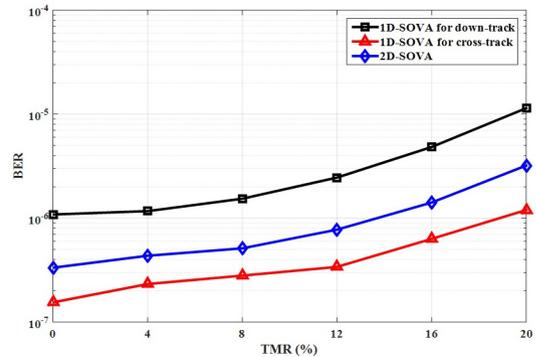


그림 5. SNR = 14 dB이고 기록밀도가 1.5 Tb/in^2 에서 TMR에 따른 BER 성능
Fig. 5. BER performance in accordance with TMR when SNR = 14 dB and areal density is 1.5 Tb/in^2 .

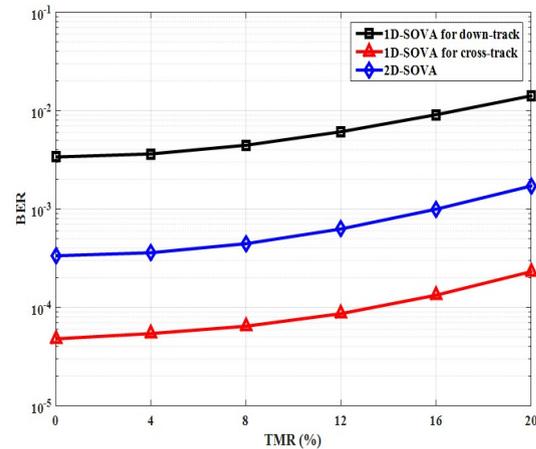


그림 6. SNR = 14 dB이고 기록밀도가 3.0 Tb/in^2 에서 TMR에 따른 BER 성능
Fig. 6. BER performance in accordance with TMR when SNR = 14 dB and areal density is 3.0 Tb/in^2 .

V. 결론

본 논문에서는 BPMR에서 트랙 방향에 따른 SOVA의 성능을 비교하였다. BPMR은 트랙의 방향에 따라 간섭 영향의 크기가 다르기 때문에 BPMR과 유사한 2차원 구조를 갖는 HDS에서 사용되는 2D-SOVA 방식이 아니라 ITI 영향이 더욱 심하기 때문에 크로스 트랙 방향을 따라 신호검출을 해야 성능 이득을 얻을 수 있다.

References

[1] H. J. Richter, et al., "Recording on bit-patterned media at densities of 1 Tb/in² and beyond," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 42, no. 10, pp. 2255-2260, 2006.

[2] W. Chang and J. R. Cruz, "Inter-track interference mitigation for bit-patterned magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, no. 11, pp. 3899-3908, 2010.

[3] 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.

[4] R. Wood, M. Williams, A. Kavcic, and J. Miles, "The feasibility of magnetic recording at 10 terabits per square inch on conventional media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 2, pp. 917-923, 2009.

[5] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, J. A. Bain, C. Hogg, and S. A. Majetich, "Application of image processing to characterize patterning noise in selfassembled nano-masks for bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3523-3526, 2009.

[6] Y. Ng, K. Cai, B. V. K. V. Kumar, T. C. Chong, S. Zhang, and B. J. Chen, "Channel modeling and equalizer design for staggered islands bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 6, pp. 1976-1983, 2012.

[7] J. Kim and J. Lee, "Performance of two-dimensional soft output Viterbi algorithm for holographic data storage," *J. KICS*, vol.

37, no. 10, pp. 815-820, 2012.

[8] S. Jeong and J. Lee, "Iterative LDPC-LDPC product code for bit patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 3, Art. ID 3100704, 2017.

[9] S. Jeong and J. Lee, "Iterative decoding of SOVA and LDPC product code for bit-patterned media recoding," *AIP Adv.*, vol. 8, no. 5, p. 056503, 2018.

[10] G. Yang, J. Kim, and J. Lee, "Mis-alignment channel performance of error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 971-976, 2010.

[11] S. Jeong and J. Lee, "Performance of 8/10 modulation code according to areal densities on bit-patterned media recording," *J. KICS*, vol. 44, no. 2, pp. 226-231, 2019.

[12] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, J. A. Bain, C. Hogg, and S. A. Majetich, "Application of image processing to characterize patterning noise in selfassembled nano-masks for bit-patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3523-3526, 2009.

정성권 (Seongkwon Jeong)



2015년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업
 2017년 8월 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 석사
 2018년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 박사과정

<관심분야> 채널코딩, 스토리지시스템

[ORCID:0000-0002-4974-337X]

이 재 진 (Jaemin Lee)



1983년 2월 : 연세대학교 전자
공학과 졸업

1984년 12월 : University 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 정보통신연구소
책임연구원

1997년 3월~2005년 8월 : 동국대학교 전자공학과
부교수

2005년 9월~현재 : 송실대학교 전자정보공학부 교수

<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지시스템

[ORCID:0000-0001-7791-3308]