

엇갈린 형태의 비트 패턴드 미디어 기록장치를 위한 가중치 평균 다중 경로 연판정 출력 비터비 알고리즘

정성권*, 이재진^o

Multipath Soft Output Viterbi Algorithm with Weighted Average for Staggered Bit-Patterned Media Recording

Seongkwon Jeong*, Jaejin Lee^o

요 약

비트 패턴드 미디어 기록장치는 향상된 기록밀도를 달성할 수 있는 차세대 저장장치이다. 하지만 기록밀도를 증가시키기 위해서는 아일랜드들의 간격이 감소되어야 하지만 이러한 감소는 인접 심볼간 간섭과 인접 트랙간 간섭의 영향을 증가시킨다. 비트 패턴드 미디어 구조는 리소그래피 방식에 따라 일반적 형태 혹은 엇갈린 형태로 배열이 가능하며, 엇갈린 형태의 배열 구조는 인접 트랙간 간섭 영향을 줄일 수 있기 때문에 일반적 형태의 구조보다 향상된 성능을 얻을 수 있다. 그러나 일반적 형태의 구조에서 사용되는 신호처리 방식이 아닌 엇갈린 형태의 구조에 알맞은 신호처리 방식이 필요하다. 본 논문에서는 엇갈린 형태의 비트 패턴드 미디어 기록장치에서 가중치 평균에 따른 연판정 출력 비터비 알고리즘을 제안한다.

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

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

ABSTRACT

Bit-patterned media recording is the future magnetic data storage system that can achieve improved areal density. However, the spacing between islands must be reduced to increase areal density. This reduction increases the effects of inter-symbol interference and inter-track interference. According to lithography approach, the bit-patterned media layout can be designed as a regular array or a staggered array. Staggered array layout can reduce the effects of inter-track interference, resulting in improved performance. It is necessary to determine an appropriate detection scheme for improving the performance of staggered BPMR systems. In this paper, we propose a soft output Viterbi algorithm with weighted average in staggered bit patterned media recording.

※ 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 : 201909-195-A-RN, Received September 11, 2019; Revised September 15, 2019; Accepted September 15, 2019

1. 서 론

하드 디스크 드라이브 (hard disk drive)의 기록밀도를 증가시키기 위해 기존의 수평자기기록 (longitudinal magnetic recording) 방식에서 수직자기 기록 (perpendicular magnetic recording) 방식이 사용되어지고 있다. 하지만 급격하게 증가하는 데이터로 인해 수직 자기기록 방식의 기록밀도를 뛰어넘는 데이터 저장장치가 요구되어지고 있다. 기존의 하드디스크는 초상자성현상 (superparamagnetic) 한계로 인하여 기록 밀도를 증가시키기 어렵기 때문에 비트 패턴드 미디어 기록장치 (bit-patterned media recording, BPMR) 는 기록밀도를 증가시키기 위한 하나의 차세대 저장장치로 주목받고 있다¹⁾. BPMR은 하나의 아일랜드에 하나의 비트를 저장할 수 있으며, 기록밀도는 최대 4 Tb/in² (terabit per square inch) 까지 가능하다²⁾. 또한 열 안정성이 뛰어나며, 비선형 천이 이동 (nonlinear transition shift)을 감소시킬 수 있다. BPMR의 기록밀도를 증가시키기 위해서는 다운 트랙 (down track)과 크로스 트랙 (cross track) 방향에 따른 아일랜드의 간격이 감소되어야 한다. 그러나 이러한 간격의 감소는 인접 심볼간 간섭 (inter-symbol interference, ISI)과 인접 트랙간 간섭 (inter-track interference, ITI)을 증가시킨다. 즉 2차원 (two-dimensional, 2D) ISI가 발생되며, 이는 BPMR의 신호검출을 어렵게 하기 때문에 성능을 저하시킨다³⁾.

이러한 오류 요인으로 인해 발생하는 성능저하를 극복하기 위해서는 데이터 저장장치에 알맞은 신호처리 방식이 필요하다. ISI 영향을 줄이기 위해 부분 응답 최대 유사도 (partial response maximum likelihood, PRML) 방식을 사용하여 등화 및 신호를 검출하는 2차원 연관정 출력 비터비 알고리즘 (soft output Viterbi algorithm, SOVA)이 제안되었으며^{4,5)}, BPMR에서 발생하는 간섭 패턴을 사전에 방지하기 위해 다양한 변조부호 방식들이 제안되었다⁶⁻⁸⁾. 또한 상당한 성능 이득을 얻기 위해 데이터 저장장치용 오류정정부호 방식들이 제안되었다^{9,10)}.

본 논문에서는 엇갈린 형태의 BPMR을 위한 가중치 평균 (weighted average) 에 따른 다중 경로 (multipath, MP) SOVA 방식을 제안한다¹¹⁾. 리소그래피 (lithography) 방식에 따라 비트 패턴드 미디어 (bit-patterned media) 구조는 그림 1에서 볼 수 있듯이 일반적 형태 (regular array) 혹은 엇갈린 형태 (staggered array)로 배열이 가능하며, 엇갈린 형태 구

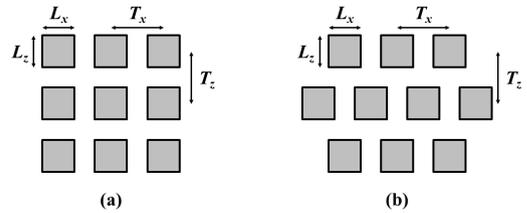


그림 1. 비트 패턴드 미디어 구조 (a) 일반적 형태, (b) 엇갈린 형태
Fig. 1. BPM Structure of (a) regular array and (b) staggered array.

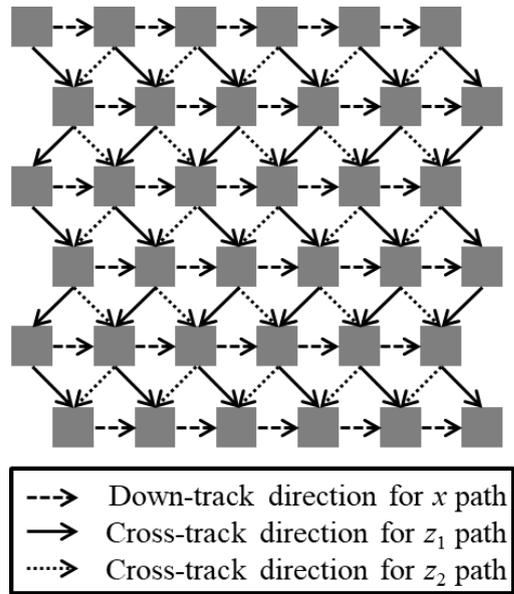


그림 2. 다중 경로 SOVA 구조
Fig. 2. Configuration of MP-SOVA.

조를 사용하면 BPMR의 ITI 영향을 감소시킬 수 있기 때문에 일반적 형태를 사용한 BPMR보다 향상된 성능 및 비트 오류율 (bit error rate, BER)을 얻을 수 있다. 그러나 기존에 제안된 방식은 일반적 형태를 갖는 BPMR에서의 신호처리 방식이며, 엇갈린 형태를 갖는 BPMR을 위해서는 이에 알맞은 적절한 신호처리 방식이 필수적이다.

따라서 본 논문에서는 성능 향상을 위해 기존에 제안된 다중 경로 신호검출 방식을 소개하며, 가중치 평균을 활용하여 향상된 다중 경로 신호 검출 방식을 제안한다.

II. 다중 경로 연판정 출력 비터비 알고리즘

SOVA 알고리즘은 비터비 알고리즘을 응용한 신호 검출 방식으로 출력값을 경판정 값이 아닌 연판정 값을 출력한다. 2차원 SOVA (2D-SOVA) 신호검출 방식은 가로 방향과 세로 방향의 SOVA를 각각 사용하여 연판정 값을 계산하며 하나의 SOVA를 사용하였을 때보다 좋은 성능을 보여준다. 그러나 기존의 2D-SOVA는 일반적 형태의 구조를 위한 검출 방식이기 때문에 엇갈린 형태에 알맞은 신호검출이 요구된다. MP-SOVA 신호검출 방식은 그림 2와 같이 다운 트랙 방향의 1차원 SOVA, 크로스 트랙 방향의 z_1 경로의 1차원 SOVA, 크로스 트랙 방향의 z_2 경로의 1차원 SOVA로 총 3가지 방향을 고려한다. 즉, x , z_1 , z_2 경로에 따른 1차원 SOVA 3개로 구성된다. 기존의 2D-SOVA를 사용하게 되면 크로스 트랙 방향의 SOVA는 z_1 (혹은 z_2) 경로만 고려하게 되기 때문에 z_2 (혹은 z_1) 경로의 ITI를 무시하게 된다. 그림 3은 제안하는 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다. 채널을 통과한 수신 데이터는 다운 트랙 및 크로스 트랙 방향의 2차원 등화기를 통해 등화된다. 이 때 크로스 트랙 방향의 등화기는 z_1 경로를 따르는 등화기 하나만 사용되는데, 이러한 이유는 z_1 경로와 z_2 경로의 등화기를 모두 사용하였을 때와 큰 성능차이가 없기 때문에 복잡도를 감소시키기 위하여 z_1 경로를 따르는 크로스 트랙 방향의 등화기 하나만 사용하였다. 다운 트랙 방향의 등화기에서 출력된 값은 다운 트랙 방향의 SOVA에 입력되고 크로스 트랙 방향의 등화기에서 출력된 값은 z_1 및 z_2 경로에 따른 SOVA에 각각 입력된 후, SOVA 알고리즘을 통해 계산된다. 최종값 $\hat{d}_{p,q}$ 는 3개의 SOVA에서 나온 출력값을 이용하여 아래와 같이 계산된다.

$$\hat{d}_{p,q} = \begin{cases} 1, & \text{if } \frac{\alpha \cdot x_{p,q} + \beta \cdot z_{p,q}^1 + \gamma \cdot z_{p,q}^2}{\alpha + \beta + \gamma} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

여기서 α , β , γ 는 가중치 평균의 가중치를 나타내며, $x_{p,q}$, $z_{p,q}^1$, $z_{p,q}^2$ 는 각각 x , z_1 , z_2 방향에서 q 번째 트랙의 p 번째 아일랜드의 SOVA 출력값을 나타낸다.

III. 엇갈린 형태의 BPMPR 채널 모델

2차원 채널 아일랜드 펄스 응답 $h_{m,n}$ 은 다음과 같다 [12].

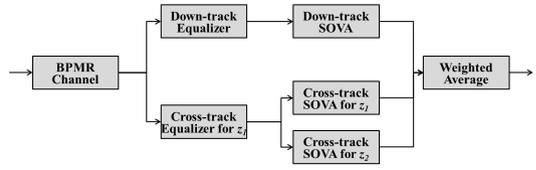


그림 3. 제안하는 MP-SOVA 시스템의 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of the proposed MP-SOVA scheme.

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

이 때 A 는 정규화된 피크 진폭 (normalized peak amplitude), c 는 상수 1/2.3548로 가우시안 함수의 표준편차와 최대 피크 값의 50%일 때의 펄스 폭인 PW50과의 관계를 나타내며, Δ_{off} 는 트랙 어긋남 (track misregistration, TMR), T_z 는 크로스 트랙 방향에서의 아일랜드들의 간격 (track pitch), T_x 는 다운 트랙 방향에서의 아일랜드들의 간격 (bit period), PW_z 와 PW_x 는 각각 크로스 트랙 방향과 다운 트랙 방향의 PW50이다.

엇갈린 형태의 BPMPR 채널을 통과한 수신신호 $r_{p,q}$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} r_{p,q} = & \sum_{n=-N}^N d_{p,q+n} \cdot h_{0,n} \\ & + \sum_{m=0}^{\lfloor (N-1)/2 \rfloor} \sum_{n=-N+m+1}^{N-m} d_{p-2m-1,q+n} \cdot h_{-2m-1,n-(1/2)} \\ & + \sum_{m=0}^{\lfloor (N-1)/2 \rfloor} \sum_{n=-N+m+1}^{N-m} d_{p+(2m+1),q+n} \cdot h_{2m+1,n-(1/2)} \\ & + \sum_{m=1}^{\lfloor N/2 \rfloor} \sum_{n=-N+m}^{N-m} d_{p-2m,q+n} \cdot h_{-2m,n} \\ & + \sum_{m=1}^{\lfloor N/2 \rfloor} \sum_{n=-N+m}^{N-m} d_{p+2m,q+n} \cdot h_{2m,n} + n_{p,q} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $d_{p,q}$ 는 이진 입력데이터, $n_{p,q}$ 는 평균이 0이며 분산이 σ^2 인 부가 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN)으로 모델링된 잡음, N 은 하나의 아일랜드가 주변 아일랜드로부터 영향을 받는 범위를 나타낸다. 본 논문에서는 복잡도를 감소시키기 위하여 N 은 1로 설정하였다.

IV. 실험

실험을 위해 한 페이지의 크기를 1084×1084로 하였으며, 총 1000페이지에 대하여 실험하였다. 다운 트랙 및 크로스 트랙의 방향에 따른 아일랜드 한 변의 길이 L_x , L_z 는 각각 11nm로 하였으며, 다운 트랙 방향

의 PW50인 PW_x 는 19.4nm, 크로스 트랙 방향의 PW50인 PW_z 는 24.8nm로 설정하였다. 기록밀도 2 Tb/in^2 를 달성하기 위해 bit period T_x , track pitch T_z 를 각각 18nm로 설정하였으며, 기록밀도 3 Tb/in^2 를 달성하기 위해 bit period T_x , track pitch T_z 를 각각 14.5nm로 설정하였다. 등화기 계수 업데이트는 least mean square 알고리즘을 사용하였다. 성능비교를 위해 2D-SOVA 신호검출방식, MP-SOVA 신호검출방식, 가중치 평균을 사용한 다중 경로 SOVA (MP-SOVA with weighted average) 신호검출방식을 사용하였다. 표 1은 SNR = 12 dB 이고 기록밀도가 2 Tb/in^2 에서 α , β , γ 에 따른 BER 성능을 보여준다. 이 때 $\alpha = 1$ 로 설정 한 후 β , γ 를 0.5부터 4.0까지 0.1 단위로 변화시키며 실험을 하였다. 표를 통해 알 수 있듯이 $\beta = 2.7$ 이고 $\gamma = 2.9$ 일 때 가장 좋은 성능을 보여주었다. 따라서 본 논문에서는 $\alpha = 1$, $\beta = 2.7$, $\gamma = 2.9$ 로 설정하였으며, 표 1은 $\alpha = 1$, $\beta = 2.7$, $\gamma = 2.9$ 값의 주변 BER 성능을 보여준다. 그림 4는 기록밀도가 2 Tb/in^2 일 때 SNR에 따른 BER 성능 그래프를 보여준다. BER = 10^{-8} 에서 MP-SOVA와 MP-SOVA with weighted average는 2D-SOVA보다 약 0.5 dB 성능 이득을 얻을 수 있었다. 그러나 MP-SOVA 와 MP-SOVA with weighted average의 성능은 유사하였다. 그림 5는 기록밀도가 3 Tb/in^2 일 때 SNR에 따른 BER 성능 그래프를 보여준다. 그림을 통해 알 수 있듯이 MP-SOVA with weighted average을 사용하였을 때 가장 좋은 성능을 얻을 수 있다. 또한 기록밀도가 증가하였을 때 MP-SOVA with weighted average는 다른 검출 방식보다 성능 이득을 얻을 수 있다.

그림 6은 SNR = 14 dB이고 기록밀도가 2 Tb/in^2 일 때 TMR에 따른 BER 성능 그래프를 보여준다.

표 1. SNR = 12 dB 이고 기록밀도가 2 Tb/in^2 에서 α , β , γ 에 따른 BER 성능

Table 1. BER performance according to α , β and γ when SNR is 12 dB and areal density is 2 Tb/in^2 .

β	2.6	2.7	2.8
γ			
2.5	4.510×10^{-5}	4.501×10^{-5}	4.518×10^{-5}
2.6	4.433×10^{-5}	4.476×10^{-5}	4.493×10^{-5}
2.7	4.425×10^{-5}	4.433×10^{-5}	4.501×10^{-5}
2.8	4.391×10^{-5}	4.425×10^{-5}	4.484×10^{-5}
2.9	4.467×10^{-5}	4.365×10^{-5}	4.425×10^{-5}
3.0	4.527×10^{-5}	4.459×10^{-5}	4.399×10^{-5}

MP-SOVA와 MP-SOVA with weighted average는 2D-SOVA보다 성능이 우수하였다. 그러나 TMR이 작은 영역에서는 큰 차이가 없었으나, TMR이 증가할 수록 MP-SOVA with weighted average 방식이 MP-SOVA보다 좋은 성능을 나타내었다. 그림 7은 SNR = 14 dB이고 기록밀도가 3 Tb/in^2 일 때 TMR에 따른 BER 성능 그래프를 보여준다. 그림을 통해 알 수 있듯이 MP-SOVA with weighted average을 사용하였을 때 가장 좋은 성능을 얻을 수 있다. 또한 기록밀도가 증가하였을 때 MP-SOVA with weighted average는 다른 검출 방식보다 성능 이득을 얻을 수

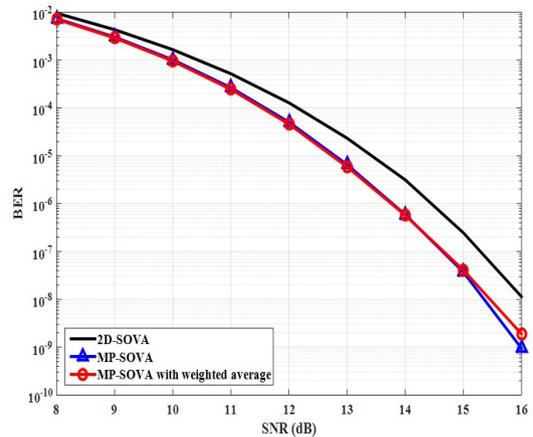


그림 4. 기록밀도가 2 Tb/in^2 일 때 SNR에 따른 BER 성능 그래프

Fig. 4. BER performance according to SNR when areal density is 2 Tb/in^2 .

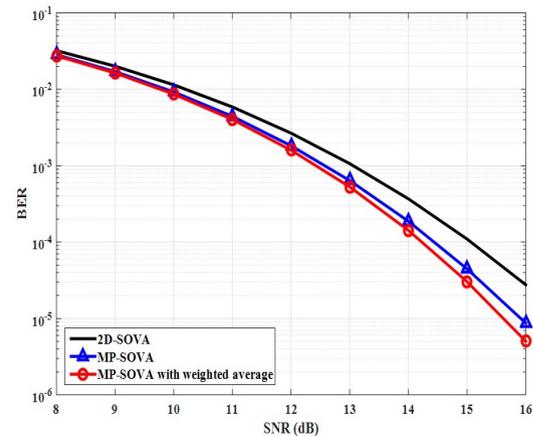


그림 5. 기록밀도가 3 Tb/in^2 일 때 SNR에 따른 BER 성능 그래프

Fig. 5. BER performance according to SNR when areal density is 3 Tb/in^2 .

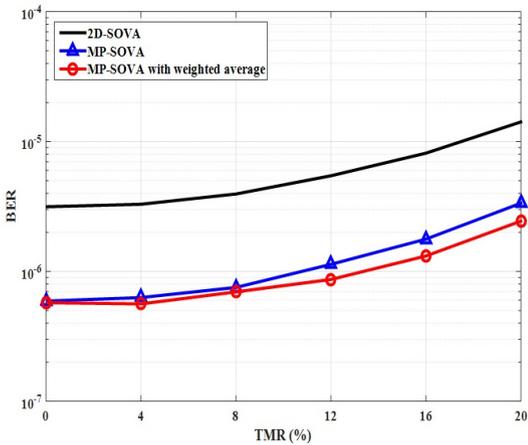


그림 6. SNR = 14 dB 이고 기록밀도가 2 Tb/in² 일 때 TMR에 따른 BER 성능 그래프
 Fig. 6. BER performance depending on TMR when SNR is 14 dB and areal density is 2 Tb/in².

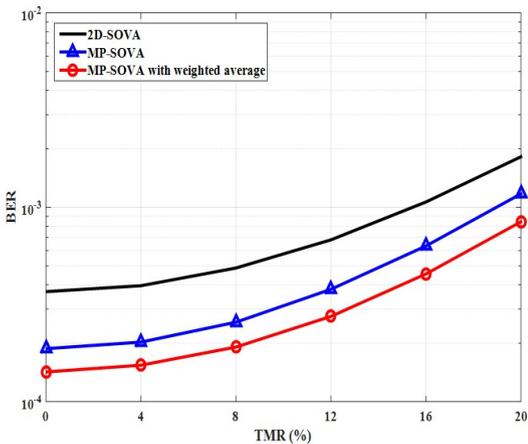


그림 7. SNR = 14 dB 이고 기록밀도가 3 Tb/in² 일 때 TMR에 따른 BER 성능 그래프
 Fig. 7. BER performance depending on TMR when SNR is 14 dB and areal density is 3 Tb/in².

있다.

V. 결론

본 논문은 엇갈린 형태의 비트 패턴드 미디어 기록 장치를 위한 기중치 평균에 따른 다중 경로 SOVA 방식을 제안하였다. 제안하는 기중치 평균에 따른 다중 경로 SOVA는 2차원 SOVA보다 향상된 성능을 보여 주었으나, 기록밀도가 낮을 때에는 다중 경로 SOVA와 유사한 성능을 보여주었다. 하지만 기록밀도 혹은 TMR이 증가될수록 다중 경로 SOVA보다 향상된 성

능을 얻을 수 있다.

References

- [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] 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.
- [3] 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.
- [4] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional soft output Viterbi algorithm with noise filter for patterned media storage," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, pp. 07B742, 2011.
- [5] 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.
- [6] C. D. Nguyen and J. Lee, "Elimination of two-dimensional intersymbol interference through the use of a 9/12 two-dimensional modulation code," *IET Commun.*, vol. 10, no. 14, pp. 1730-1735, 2016.
- [7] 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.
- [8] C. D. Nguyen and J. Lee, "9/12 2-D modulation code for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 3, Art. no. 3101207, 2017.
- [9] S. Jeong and J. Lee, "Iterative channel detection with LDPC product code for bit-patterned media recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 11, Art. no. 8205204, 2017.
- [10] 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.

- [11] S. Jeong and J. Lee, "Signal detection under multi-path inter-symbol interference on staggered bit-patterned media recording systems," *IEEE Magn. Lett.*, vol. 10, Art. no. 6501005, 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.

정 성 권 (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 (Jaejin Lee)



1983년 2월 : 연세대학교 전자공학과 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 : 숭실대학교 전자정보공학부 교수
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지시스템
[ORCID:0000-0001-7791-3308]