

비트 패턴드 미디어 기록장치에서 기록밀도에 따른 8/10 변조부호의 성능

정성권*, 이재진^o

Performance of 8/10 Modulation Code according to Areal Densities on Bit-Patterned Media Recording

Seongkwon Jeong*, Jaejin Lee^o

요약

데이터의 폭발적인 증가로 인하여 고밀도 데이터 저장장치에 대한 요구가 날로 증가하고 있다. 1 Tb/in² 이상의 기록 밀도 등 다양한 장점으로 인해 비트 패턴드 미디어 기록장치(bit-patterned media recording, BPMR)는 차세대 자기 저장장치 시스템으로 주목받고 있다. BPMR의 하나의 섬(islands)은 하나의 비트를 저장할 수 있다. 그러나 고밀도를 달성하기 위해 가로 방향과 세로 방향의 섬들간의 간격이 줄어들면서 인접 심벌간 간섭 및 인접 트랙간 간섭이 심하게 발생하며 이는 BPMR의 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 BPMR에서 기록밀도에 따른 8/10 변조부호의 성능을 확인한다. 기록밀도가 1.5 Tb/in²이고 비트 오류율이 10⁻⁴일 때 변조부호를 사용하지 않은 것이 변조부호를 사용하는 것 보다 약 0.2 dB 성능 이득을 얻을 수 있었다. 그러나 기록밀도가 3.0 Tb/in²이고 비트오류율이 10⁻⁴일 때 변조부호를 사용하는 것이 변조부호를 사용하지 않는 것 보다 약 1 dB 성능 이득을 얻을 수 있었다.

Key Words : Bit-patterned media recording, data storage systems, intersymbol interference, intertrack interference, modulation code

ABSTRACT

The requirement for high-density data storage systems has increased due to the explosion in data growth. Bit-patterned media recording (BPMR) is a candidate for the next-generation magnetic recording systems, and its many advantages facilitate the achievement of recording densities of 1 Tb/in² and beyond. In BPMR, each information bit is represented by a magnetic island; however, due to the small spacings between the along- and across-track islands that are for the achievement of a high areal density, severe extents of the intersymbol interference and intertrack interference (ITI) appear. These error factors degrade the system performance of the recording system. In this paper, we verify the performance of 8/10 modulation code according to areal densities on BPMR. When areal density is 1.5 Tb/in², the random data exhibited performance gains of ~0.2 dB over a modulation code at a bit error ratio of 10⁻⁴. However, when areal density is 3.0 Tb/in², the modulation code exhibited performance gains of ~1 dB over a random data at a bit error ratio of 10⁻⁴.

* 본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 BK21플러스 사업 연구(No.31Z20150313339)입니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-4974-337X)Soongsil University Department of ICMC Convergence Technology, seongkwon@ssu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7791-3308)Soongsil University Department of ICMC Convergence Technology, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201901-407-A-RN, Received January 7, 2019; Revised January 21, 2019; Accepted January 21, 2019

I. 서론

기하급수적으로 증가하는 데이터를 저장하기 위한 요구를 만족시키기 위한 하드디스크(hard disk drive, HDD) 기술 및 용량은 HDD 산업에 의해 급격하게 증가하였다¹⁾. 그러나 일반적으로 사용되어지고 있는 수직자기기록(perpendicular magnetic recording) 방식을 사용한 HDD는 초상자성현상(superparamagnetic), 열적 안정성 등 여러 가지 문제들에 의하여 기록 밀도의 한계에 도달하였다. 이러한 문제들을 극복할 수 있는 비트 패턴드 미디어 저장장치(bit-patterned media recording, BPMR)는 1 Tb/in² 이상의 기록 밀도를 달성할 수 있는 차세대 자기저장장치로 주목받고 있다²⁾. 기존의 HDD는 자기 입자들의 집합체에 한 비트를 저장할 수 있지만, BPMR은 그림 1과 같이 섬(island)이라고 표현되는 하나의 자기 입자에 하나의 비트를 저장할 수 있다. 이러한 기술은 입자들간의 잡음 문제를 해결할 수 있으며, 열적 안정성을 증가시키며, 비선형 천이 변화 등을 감소시킬 수 있다³⁾.

BPMR의 다양한 장점에도 불구하고 BPMR은 인접 심볼간 간섭(intersymbol interference, ISI), 인접 트랙간 간섭(intertrack interference, ITI), 미디어 잡음(media noise), 트랙 어긋남(track mistegration, TMR) 등에 의한 문제가 발생한다. BPMR의 기록밀도를 증가하기 위해서는 섬들간의 간격을 좁혀야 하는데 가로 방향으로 섬들간의 간격이 줄어들수록 ISI에 대한 영향이 더욱 증가하며, 세로 방향으로 섬들간의 간격이 줄어들수록 ITI에 대한 영향이 더욱 증가한다. 즉, 2차원 ISI를 고려해야 하며 섬들간의 간격의 감소로 인한 2차원 ISI의 증가는 데이터 검출을 어렵게 만들기 때문에 BPMR의 성능을 저하시킨다⁴⁾. 또 다른 문제는 저장장치의 헤드가 정확하게 메인트랙을 따라 데이터를 읽어야 하는데 메인트랙을 벗어나 테

이터를 읽을 때 발생하는 TMR 문제이다⁵⁾.

신호처리 관점에서 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 오류정정부호, 신호검출, 변조부호 등 여러 가지 신호처리방식이 제안되었다. 미디어 잡음을 고려한 2차원 등화기와 1차원 PR(partial response) 타겟 기법이 제안되었다⁶⁾. 향상된 비트오류율(bit-error rate, BER)을 얻기 위해 저밀도 패리티 체크(low-density parity check, LDPC) 부호를 이용한 연결부호(concatenated code) 방식이 제안되었으며, 제안된 방식은 LDPC 부호만 사용하였을 때보다 향상된 성능을 보여주었다^{7,8)}. 또한 ISI와 ITI에 대한 간섭을 줄이기 위해 다양한 2차원 변조부호 방식이 제안되었으며⁹⁻¹¹⁾, ISI와 ITI에 대한 간섭을 해결하고 BER 성능을 향상시킬 수 있는 2개의 연판정 출력 비터비 알고리즘(soft-output Viterbi algorithm, SOVA)을 이용한 2차원 SOVA 알고리즘이 제안되었다¹²⁾.

본 논문에서는 기록밀도의 변화에 따른 변조부호의 성능을 알아본다. 또한 미디어 잡음, TMR 등 다양한 오류가 발생하였을 때 기록밀도의 변화에 따른 변조부호의 성능을 확인한다.

II. ITI 영향 감소를 위한 변조부호

8/10 2차원 변조부호는 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위해 제안된 변조부호이다¹¹⁾. 해당 변조부호는 코드워드 내에서 $[0 \ 1 \ 0]^T$, $[1 \ 0 \ 1]^T$ 패턴을 발생하지 않게 하기 때문에 BPMR에서 ITI를 효과적으로 감소시킬 수 있다. 8/10 변조부호의 구조는 8비트의 입력 데이터를 5×2 구조의 codeword로 인코딩하며 1024개의 가능한 코드워드 중 ITI를 감소시킬 수 있는 256개의 코드워드를 선택한다. 제안하는 변조방식은 다음과 같은 조건을 제거하여 ITI를 심각하게 발생시킬 수 있는 고립패턴을 제거할 수 있다. 5×2 구조의 codeword의 첫 번째 열벡터를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{c}_1 = [c_{11} \ c_{21} \ c_{31} \ c_{41} \ c_{51}]^T \quad (1)$$

\mathbf{c}_1 벡터에서 가능한 코드워드 개수인 $2^5=32$ 개의 코드워드 중에서 c_{31} 을 기준으로 고립 패턴을 만드는 패턴인 $[X \ 0 \ 1 \ 0 \ X]^T$, $[X \ 1 \ 0 \ 1 \ X]^T$ 패턴을 제외하면 $32-4-4=24$ 개의 코드워드 부호가 남게 된다. 남은 24개의 코드워드는 $[X \ 0 \ 0 \ 0 \ X]^T$, $[X \ 0 \ 0 \ 1 \ X]^T$, $[X \ 0 \ 1 \ 1 \ X]^T$, $[X \ 1 \ 0 \ 0 \ X]^T$, $[X \ 1 \ 1 \ 0 \ X]^T$, $[X \ 1 \ 1 \ 1 \ X]^T$ 패턴만 남게 되

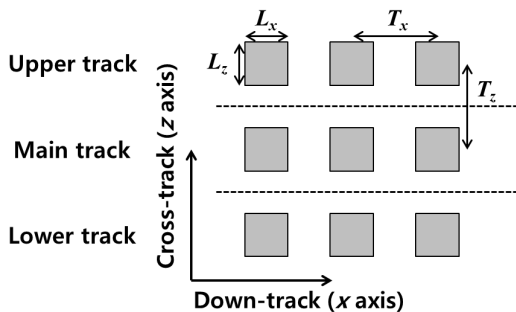


그림 1. 비트 패턴드 미디어의 구조
Fig. 1. Structure of bit-patterned media.

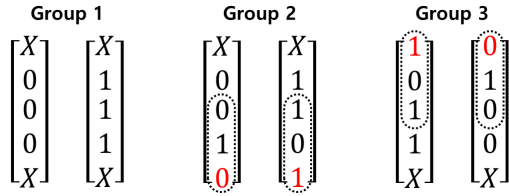


그림 2. c_{31} 에서 심각한 ITI를 발생시키는 패턴이 제거된 그룹들
Fig. 2. Groups with removed severe ITI at c_{31} .

고, 남은 패턴들을 그룹화하면 그림 2와 같다.

Group1의 패턴인 $[X \ 0 \ 0 \ 0 \ X]^T$, $[X \ 1 \ 1 \ 1 \ X]^T$ 은 c_{11} 과 c_{51} 에 어떠한 값이 들어와도 고립 패턴이 발생하지 않는다. Group2에 속한 패턴인 $[X \ 0 \ 0 \ 1 \ X]^T$ 에서 c_{51} 의 값이 0, $[X \ 1 \ 1 \ 0 \ X]^T$ 에서 c_{51} 의 값이 1이면 4개의 고립 패턴이 발생한다. Group3에 속한 패턴인 $[X \ 0 \ 1 \ 1 \ X]^T$ 에서 c_{11} 의 값이 1, $[X \ 1 \ 0 \ 0 \ X]^T$ 에서 c_{11} 의 값이 0이면 4개의 고립 패턴이 발생한다. 따라서 Group2에서 발생하는 4개, Group3에서 발생하는 4개의 패턴을 제외하면 $24-4-4=16$ 개의 코드워드 부호가 남게 된다. 즉 가능한 16개의 코드워드 c_1 벡터는 표 1과 같다. 이와 똑같은 방법으로 두 번째 열벡터인 c_2 벡터 또한 16개의 코드워드를 얻을 수 있다. 8/10 변조부호는 두 개의 열벡터로 구성되어있으며 이 두 개의 벡터의 조합을 통해 총 $16 \times 16=256$ 개의 코드워드를 얻을 수 있다. 8 비트의 입력 데이터에 일대일 매핑을 한 후 0은 -1로 1은 1로 변환시킨다.

디코딩 방식은 SOVA를 통해 얻어진 연판정값과 256개의 코드워드들간의 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 구한 후 이중에서 유클리디안 거리가 최소값인 코드워드를 선택한다. 8/10 변조부호는 하나의 섬을 기준으로 위 트랙과 아래 트랙의 섬의 값이 반대값인 고립 패턴을 제거할 수 있기 때문에 홀로그래픽 데이터 저장장치 뿐만 아니라 BPMR 저장장치에서도 효과적으로 사용할 수 있다.

표 1. 벡터 c_1 에서의 코드워드
Table 1. Codeword list in the Vector c_1 .

0000	01110	00011	00110
00001	01111	10011	00111
10000	11110	01100	11000
10001	11111	11100	11001

III. BPMR 채널 모델링

본 논문에서는 이산 BPMR 채널 모델을 고려하였다. 이진 데이터 $c_{p,q} \in \{-1, 1\}$ 는 BPMR 채널을 통과되며 이 때 p 와 q 는 p 번째 트랙의 q 번째 섬이다. 2차원 가우시안 펄스 응답(Gaussian pulse response) $P(x, z)$ 는 다음과 같다^[13].

$$P(x, z) = A \exp \left\{ -\frac{1}{2c^2} \left[\left(\frac{x + \Delta x}{PW_x} \right)^2 + \left(\frac{z + \Delta z}{PW_z} \right)^2 \right] \right\} \quad (2)$$

이 때, x 는 트랙을 따라가는(down-track) 방향 z 는 트랙을 가로지르는(cross-track) 방향, A 는 진폭이며 여기서 $A=1$, c 는 가우시안 함수의 표준 편차와 최대값의 절반이 되는 지점의 펄스폭 길이인 $PW50$ 과의 관계를 나타내는 상수이며 여기서 $c=1/2.3548$, Δx 는 x 축에서의 위치변동(location fluctuation), Δz 는 z 축에서의 위치변동, PW_x 와 PW_z 는 x 방향과 z 방향의 $PW50$ 의 값이다. BPMR의 2차원 채널 펄스 응답 h 는 다음과 같다.

$$h_{m,n} = P(nT_x, mT_z + \Delta_{off}) \quad (3)$$

여기서 m 과 n 은 z 방향과 x 방향에 대한 인덱스를 나타내며, T_x 는 가로 방향에 따른 섬들 간의 간격(bit period), T_z 는 세로 방향에 따른 트랙간의 간격(track-pitch)이며, Δ_{off} 는 리드 헤드 오프셋(read head offset)을 나타낸다. TMR은 Δ_{off} 와 트랙간의 간격에 관한 관계이며 다음과 같다.

$$TMR(\%) = \frac{\Delta_{off}}{T_z} \times 100 \quad (4)$$

최종적으로 BPMR 채널을 통과한 신호인 $r_{p,q}$ 는 다음과 같다.

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

여기서 N 은 인접 섬들로부터의 영향을 받을 수 있는 간섭의 범위이며 복잡도를 고려하기 위해 $N=1$ 로 하였으며, 간섭 영향에 대한 $n_{p,q}$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 부가 백색 가우시안 잡음, \otimes 은 2차원 컨볼루션 연산을 나타낸다.

IV. 실험

본 논문에서는 기록밀도에 따른 변조부호의 성능을 확인하기 위해 BPMP의 기록밀도가 1.5 Tb/in²와 3.0 Tb/in²에서 각각 실험을 하였다. 이 때 섬들의 가로방향의 변의 길이는 $L_x=11\text{nm}$, 세로방향의 변의 길이는 $L_z=11\text{nm}$ 이며, 1.5 Tb/in²을 실험하기 위해 bit period T_x 와 track pitch T_z 는 각각 21nm로 하였으며, 3.0 Tb/in²을 실험하기 위해 bit period T_x 와 track pitch T_z 는 각각 14.5nm로 하였다. 한 페이지의 크기는 1020×1020이고 총 1000페이지를 실험하였으며, 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)는 $10\log_{10}(1/\sigma^2)$ 으로 정의하였다. 채널 등화를 위한 부분 응답 최대 유사도(partial response maximum likelihood, PRML)를 사용하였으며, 2차원 PR타겟 계수는 다음과 같이 사용하였다.

$$\begin{bmatrix} 0.0 & 0.2 & 0.0 \\ 0.1 & 1 & 0.1 \\ 0.0 & 0.2 & 0.0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

등화기는 2차원 등화기를 사용하였으며 등화 계수는 least mean square 알고리즘을 이용하여 업데이트 한다.

그림 3은 SNR에 따른 변조부호의 성능을 보여준다. 기록밀도가 1.5 Tb/in²이고 BER=10⁻⁴일 때 변조부호를 사용하지 않은 랜덤한 데이터가 변조부호를 사용하는 것 보다 약 0.2dB 성능 이득을 얻을 수 있다. 그러나 기록밀도가 3.0 Tb/in²이고 BER=10⁻⁴일 때 변조부호를 사용하는 것이 변조부호를 사용하지 않은 랜덤한 데이터보다 약 1dB 성능 이득을 얻을 수 있다.

그림 4는 SNR이 13 dB에서 TMR의 변화에 따른

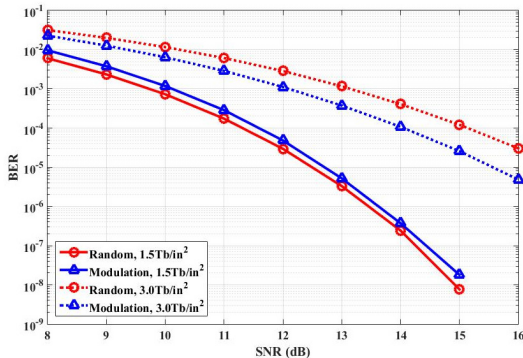


그림 3. SNR 및 기록밀도에 따른 변조부호의 BER 성능
Fig. 3. BER performance of the proposed modulation code according to SNR and areal density.

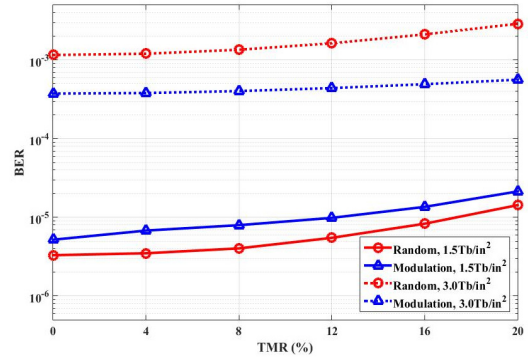


그림 4. TMR 및 기록밀도에 따른 변조부호의 BER 성능
Fig. 4. BER performance of the proposed modulation code according to TMR and areal density.

BER 성능을 보여준다. 기록밀도가 1.5 Tb/in²일 때에는 변조부호를 사용하는 것 보다 랜덤한 데이터가 더 좋은 성능을 보였으나, 기록밀도가 3.0 Tb/in²일 때에는 변조부호를 사용하는 것이 랜덤 데이터 보다 더 좋은 성능을 보여주었다.

그림 5는 SNR이 13 dB에서 위치 변동의 변화에 따른 BER 성능을 보여준다. 기록밀도가 1.5 Tb/in²일 때에는 위치 변동이 16%이하일 때에는 랜덤 데이터가 더 좋은 성능을 보였으나, 20%일 때에는 변조부호를 사용하는 것이 더 좋은 성능을 보였다. 기록밀도가 3.0 Tb/in²일 때에는 변조부호를 사용하는 것이 더 좋은 성능을 보여주었다.

기록밀도가 1.5 Tb/in²일 때에는 랜덤 데이터가 더 좋은 성능을 보였으나, 기록밀도가 3.0 Tb/in²일 때에는 변조부호를 사용한 것이 더 좋은 성능을 보였다. 이러한 이유는 기록밀도의 증가에 따라 2차원 채널 펄스 응답 h 의 간섭이 증가하였기 때문이며 1.5

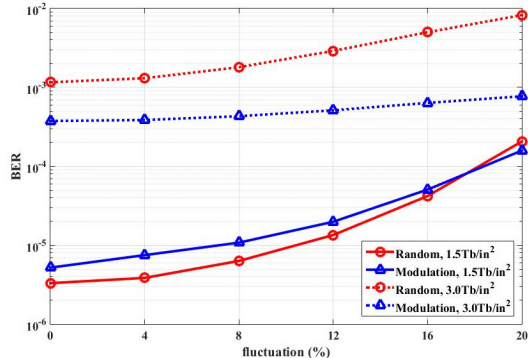


그림 5. 위치 변동 및 기록밀도에 따른 변조부호의 BER 성능
Fig. 5. BER performance of the proposed modulation code according to location fluctuation and areal density.

Tb/in²일 때와 3.0 Tb/in²일 때의 h 의 계수는 다음과 같다.

$$h_1 = \begin{bmatrix} 0.0053 & 0.1370 & 0.0053 \\ 0.0388 & 1.0000 & 0.0388 \\ 0.0053 & 0.1370 & 0.0053 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$h_2 = \begin{bmatrix} 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \\ 0.2125 & 1.0000 & 0.2125 \\ 0.0824 & 0.3876 & 0.0824 \end{bmatrix} \quad (7)$$

h_1 은 기록밀도가 1.5 Tb/in²일 때, h_2 는 기록밀도가 3.0 Tb/in²일 때의 2차원 채널 펄스 응답이다. 기록밀도가 증가할수록 간섭이 심해지기 때문에 변조부호를 사용하는 것이 더욱 좋은 성능을 보여주었다.

V. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 8/10 변조부호를 BPMR에 적용하여 기록밀도에 따른 성능을 분석하였다. 8/10 변조부호는 코드워드 내에서 하나의 섬을 기준으로 위, 아래의 섬이 반대값이 나타나는 것을 방지하는 변조부호 방식으로 특히 기록밀도가 높아질수록 세로 방향으로 심각하게 발생하는 ITI 간섭을 효과적으로 제거하여 변조부호를 사용하지 않을 때 보다 성능이득을 얻을 수 있다. 또한 기록밀도가 증가되었을 때 TMR 및 미디어 잡음 등 오류요인이 발생하여도 변조부호를 사용하지 않았을 때보다 성능이득을 얻을 수 있다.

References

[1] T. R. Albrecht, et al., "Bit-patterned magnetic recording: Theory, media fabrication, and recording performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 5, Art. no. 0800342, 2015.

[2] 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.

[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. X. Wang and A. M. Taratorin, *Magnetic Information Storage Technology*, 1st Ed., pp. 453-456, Academic Press, 1999.

[6] Y. Ng, K. Cai, B. V. K. V. Kumar, S. Zhang, and T. C. Chong, "Modeling and two-dimensional equalization for bit-patterned media channels with media noise," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3535-3538, 2009.

[7] 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.

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

[9] 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.

[10] B. Kim and J. Lee, "Trellis encoding of 6/8 balanced code for holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 39, no. 10, pp. 569-573, 2014.

[11] C. D. Nguyen and J. Lee, "8/10 two-dimensional modulation code for holographic data storage systems," *Electron. Lett.*, vol. 40, no. 9, pp. 1672-1677, 2015.

[12] J. Kim and J. Lee, "Iterative two-dimensional soft output Viterbi algorithm for patterned media," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 3, pp. 594-597, 2011.

[13] 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.

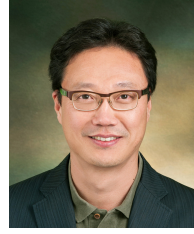
정 성 권 (Seongkwon Jeong)



2015년 2월 : 숭실대학교 정보
통신전자공학부 졸업
2017년 8월 : 숭실대학교 정보
통신소재융합학과 석사
2018년 9월~현재 : 숭실대학교
정보통신소재융합학과 박사
과정

<관심분야> 채널코딩, 스토리지시스템

이 재 진 (Jaejin 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 : 숭실대학교 전자정보공학부 교수
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지시스템