

인접 트랙간 간섭을 제거하기 위한 6/8 변조부호

정성권*, 이재진^o

6/8 Modulation Code for Removing Inter-track Interference

Seongkwon Jeong*, Jaejin Lee^o

요약

본 논문에서는 비트 패턴드 미디어 기록장치에서 인접 트랙간 간섭을 제거하기 위한 6/8 변조부호 방식을 제안한다. 비트 패턴드 미디어 기록장치는 차세대 자기 저장장치중 하나로 기존의 자기 저장장치보다 기록밀도를 높일 수 있다. 그러나 기록밀도를 증가시키기 위해서는 아일랜드들간의 간격이 줄어들어야 하는데, 이는 심각한 인접 심볼간 간섭과 인접 트랙간 간섭을 발생시킨다. 변조부호는 인접 심볼간 간섭 혹은 인접 트랙간 간섭 등 오류를 발생시키는 패턴을 제거하기 위한 방식이다. 제안하는 6/8 변조부호는 비트 패턴드 미디어 기록장치에서 심각한 인접 트랙간 간섭 패턴을 방지한다.

키워드 : 비트 패턴드 미디어 기록장치, 데이터 저장장치, 변조부호, 인접 심볼간 간섭, 인접 트랙간 간섭

Key Words : Bit-patterned media recording, data storage systems, modulation code, inter-symbol interference, inter-track interference.

ABSTRACT

In this paper, we propose 6/8 modulation code for eliminating inter-track interference on bit-patterned media recording. Bit-patterned media recording is one of candidate for future magnetic storage systems capable of storing huge amounts of data and achieving an areal density. However, since the spacing between islands should be reduced to increase the areal density, the reduction causes severe inter-symbol interference and inter-track interference. The modulation code is a technique for avoiding a pattern causing an error such as inter-symbol interference and inter-track interference. The proposed 6/8 modulation code mitigates the effect of inter-track interference in high density bit-patterned media recording system.

1. 서론

최초의 하드 디스크 드라이브 (hard disk drive)는 1957년 IBM에서 개발되어졌으며, 현재까지 꾸준히 기록밀도 및 데이터 전송률이 증가하고 있다. 초기의 하드 디스크 드라이브는 수평자기기록 (longitudinal magnetic recording) 방식을 이용하여 사용하였다. 수평자기기록 방식은 매질에 자화를 수평방향으로 하여

데이터를 기록 및 재생을 하는 방식이다. 하지만 기록 밀도를 증가시킬 수 있는 한계로 인해 수직자기기록 (perpendicular magnetic recording) 방식으로 현재까지 사용되어지고 있다. 수직자기기록 방식은 매질에 자화를 수직방향으로 하여 데이터를 기록 및 재생을 하는 방식으로 기존의 수평자기기록 방식보다 기록밀도를 증가시킬 수 있었다. 그러나 수직자기기록 방식도 초상자성현상 (superparamagnetic) 한계에 의해 기

* 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, 종신회원

논문번호 : 201909-197-A-RN, Received September 11, 2019; Revised September 15, 2019; September 15, 2019

록밀도를 향상시키기 어렵다¹¹. 초상자성현상은 자기 입자 (magnetic grain)들에 데이터를 기록하여도 열적 안정성에 의해 자기 입자들이 현재 상태를 유지하지 못하고 변하게 되는 현상이며 기록밀도가 높아질수록 상태를 유지하는 시간이 감소된다. 이는 데이터 읽기 과정에서 제대로 된 신호검출을 하기 어렵다.

따라서 기존의 자기저장장치의 한계를 극복하고 기록밀도를 증가시키기 위하여 여러 가지 자기저장장치 기술들이 제안되었다². 열 보조 자기기록장치 (heat assisted magnetic recording)는 기록 매체에 순간적으로 열을 가하여 기록을 하는 방식이며^{3,4}, 마이크로파 보조 자기기록장치 (microwave assisted magnetic recording)는 마이크로파를 이용하여 초상자성현상을 피하고 기록밀도를 증가시킬 수 있다⁵. 비트 패턴드 미디어 기록장치 (bit-patterned media recording, BPMR)은 기존 하드 디스크 드라이브와는 달리 하나의 자성으로 된 아일랜드에 한 비트를 저장하는 방식으로 비선형 천이 이동을 감소시키며, 타이밍 회복 (timing recovery)과 트랙을 찾는 것을 쉽게 할 수 있다⁶.

본 논문에서는 BPMR에서 인접 트랙간 간섭 (intertrack interference, ITI)을 제거하기 위한 6/8 변조부호를 제안한다. BPMR은 기존의 데이터 저장장치에서 발생하는 1차원 인접 심볼간 간섭 (inter-track interference, ISI)이 아닌 ITI와 ISI로 구성된 2차원 ISI가 발생된다. 특히 BPMR에서는 ITI 영향이 ISI 영향보다 크기 때문에 변조부호 또한 해당 영향력을 고려하여 설계해야한다. 신호처리 관점에서 BPMR의 성능을 높이기 위한 오류정정부호, 변조부호, 신호검출 등 다양한 알고리즘이 제안되었다⁷⁻¹¹. 제안하는 변조부호는 ITI를 발생시키는 패턴을 사전에 제거하여 성능을 높이며, 코드워드 형태에 따라 성능을 비교한다.

II. 제안하는 6/8 변조부호

ITI 영향을 줄이기 위한 제안하는 6/8 변조부호의 코드워드 형태는 그림 1과 같이 메시지 비트 6개를 8×1 형태의 $C = [c_0 c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 c_6 c_7]^T$ 8개의 코드비트로 데이터를 변형한다. 전체 가능한 코드워드의 $2^8=256$ 가지 중에서 $2^6=64$ 개를 선택하기 위해 그림 2와 같이 심각한 간섭을 발생시키는 패턴인 $[\dots 101\dots]^T$ 혹은 $[\dots 010\dots]^T$ 제외하면 총 68가지의 코드워드가 선택되며 여기서 64개를 임의로 선

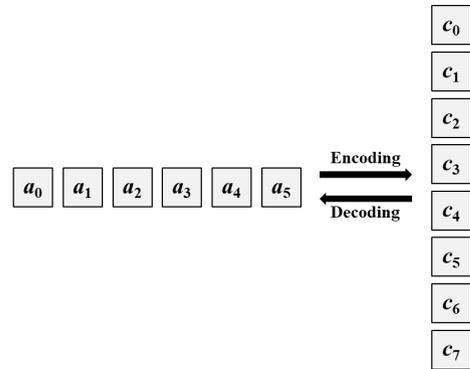


그림 1. 제안하는 변조부호의 인코딩 및 디코딩 구조
Fig. 1. Encoding and decoding of the proposed code.

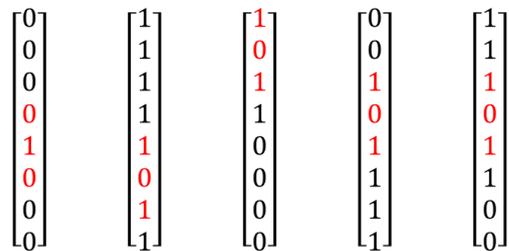


그림 2. 심각한 ITI를 발생시키는 코드워드 예제
Fig. 2. Examples of codeword causing severe ITI.

표 1. 선택된 코드워드 집합
Table 1. Set of selected codewords.

| | | | |
|----------|----------|----------|----------|
| 00000000 | 00111000 | 01111110 | 11000001 |
| 00000001 | 00111001 | 01111111 | 11000011 |
| 00000011 | 00111100 | 10000000 | 11000110 |
| 00000110 | 00111110 | 10000001 | 11000111 |
| 00000111 | 00111111 | 10000011 | 11001100 |
| 00001100 | 01100000 | 10000110 | 11001110 |
| 00001110 | 01100001 | 10000111 | 11001111 |
| 00001111 | 01100011 | 10001100 | 11100000 |
| 00011000 | 01100110 | 10001110 | 11100001 |
| 00011001 | 01100111 | 10001111 | 11100011 |
| 00011100 | 01110000 | 10011000 | 11100110 |
| 00011110 | 01110001 | 10011001 | 11100111 |
| 00011111 | 01110011 | 10011100 | 11110000 |
| 00110000 | 01111000 | 10011110 | 11110001 |
| 00110001 | 01111001 | 10011111 | 11110011 |
| 00110011 | 01111100 | 11000000 | 11111000 |

택하였다. 표 1은 64개의 코드워드 리스트를 보여준다. 인코딩은 6비트 입력데이터를 최종 선택된 64개의 주어진 코드워드에 일대일 매핑 (mapping) 방식을

이용하여 매핑한다.

디코딩 방식은 8개의 연관정 출력 비터비 알고리즘 (soft output Viterbi algorithm, SOVA)의 출력값과 64개의 코드워드들 사이의 유클리디안 거리 (Euclidean distance) 계산을 통해 가장 거리가 작은 값을 코드워드로 선택한 후 매핑의 반대과정인 디매핑 (demapping)을 통해 최종값을 선택한다.

III. BPMR 채널 모델

입력 데이터 $a_k \in \{0, 1\}$ 는 변조부호 방식을 통해 $c_{p,q}$ 로 변조되며, 변조된 데이터는 채널을 통과하기 전 비트 '0'은 '-1'로 비트 '1'은 '1'로 자화되어지며, 채널을 통과한 수신 데이터 $r_{p,q}$ 는 다음과 같다.

$$r_{p,q} = \sum_{m=-Nn}^N \sum_{n=-N}^N d_{p-m,q-n} \cdot h_{m,n} + n_{p,q} \quad (1)$$

여기서 N 은 간섭의 범위로 하나의 아일랜드가 N 만큼 떨어진 아일랜드로부터 받는 간섭을 받을 수 있다. $d_{p,q} \in \{0, 1\}$ 는 p 번째 트랙의 q 번째 아일랜드의 채널 통과하기 전 자화된 데이터, $n_{p,q}$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 부가 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise), $h_{m,n}$ 은 BPMR의 채널 계수를 나타내며 아래와 같이 2차원 가우시안 아일랜드 펄스 응답 (Gaussian island pulse response)를 샘플링하여 얻을 수 있다^[12].

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

여기서 A 는 정규화된 피크 진폭 (normalized peak amplitude), c 는 상수 $1/2.3548$ 로 가우시안 함수의 표준편차와 신호 펄스 최대값의 50%일 때의 값인 PW_{50} 과의 관계를 통해 얻어진 상수, track pitch T_z 는 크로스 트랙 방향에서 아일랜드들의 거리, bit period T_x 는 다운 트랙 방향에서 아일랜드들의 거리, Δ_{off} 는 트랙 어긋남 (track misregistration, TMR)^[13], PW_z 는 크로스 트랙 방향에서 PW_{50} , PW_x 는 다운 트랙 방향에서 PW_{50} 이다.

IV. 실험

본 실험에서는 한 페이지의 크기가 1024×1024 인 페이지를 총 100페이지 실험하였다. 크로스 트랙 방

향의 아일랜드 한 변의 길이인 L_z 와 다운 트랙 방향의 아일랜드 한 변의 길이인 L_x 의 길이를 각각 11nm로 하였으며, PW_x 는 19.4nm PW_z 는 24.8nm로 설정하였다. 기록밀도 2.0 Tb/in²를 설정하기 위하여 크로스 트랙 방향 및 다운 트랙 방향의 아일랜드간의 간격인 T_z 와 T_x 를 각각 21nm로 하였으며, 기록밀도 3.0 Tb/in²를 설정하기 위하여 크로스 트랙 방향 및 다운 트랙 방향의 아일랜드간의 간격인 T_z 와 T_x 를 각각 14.5nm로 하였다. 등화기 계수 업데이트를 위해 least mean square 알고리즘을 사용하였으며, 신호검출을 위해 SOVA 검출기를 사용하였다. 이 때 부분응답 (partial response, PR) target은 기록밀도 2.0 Tb/in²에서는 PR target을 다운 트랙 방향으로는 PR(0.1 1 0.1) 크로스 트랙 방향으로는 PR(0.2 1 0.2)로 설정하였으며, 기록밀도 3.0 Tb/in²에서는 PR target을 다운 트랙 방향으로는 PR(0.15 1 0.15) 크로스 트랙 방향으로는 PR(0.25 1 0.25)로 설정하였다. 성능 비교를 위해 변조부호를 사용하지 않았을 때 (no modulation), 제안하는 6/8 변조부호 (vertical 6/8 modulation code), 제안하는 6/8 변조부호를 가로 형태로 사용하였을 때 (horizontal 6/8 modulation code)를 비교하였다. 제안하는 6/8 변조부호의 형태는 다음과 같이 $C = [c_0 c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 c_6 c_7]^T$ 열 벡터이나, 제안하는 6/8 변조부호를 가로 형태로 사용하였을 때의 형태는 다음과 같이 $C = [c_0 c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 c_6 c_7]$ 행 벡터이다.

그림 3은 기록밀도 2.0 Tb/in²에서 신호대잡음비 (signal to noise ratio, SNR)에 따른 비트오류율 (bit error rate, BER) 성능 그래프를 보여준다. 제안하는 변조부호를 사용하였을 때와 제안하는 6/8 변조부호를 가로 형태로 사용하였을 때는 변조부호를 사용하지 않았을 때 보다 성능이 저하되었다.

그림 4는 기록밀도 3.0 Tb/in²에서 SNR에 따른 BER 성능 그래프를 보여준다. 제안하는 6/8 변조부호는 제안하는 6/8 변조부호를 가로 형태로 사용하였을 때와 변조부호를 사용하지 않았을 때보다

BER=10⁻³에서 각각 0.9dB, 1.2dB 성능 이득을 얻을 수 있다. 이러한 이유는 BPMR의 기록밀도가 증가할수록 ITI 영향이 증가하는데 제안하는 변조부호는 ITI 영향을 감소시키기 위한 변조부호이기 때문에 기록밀도가 높아질수록 성능 이득을 얻을 수 있다.

그림 5는 기록밀도 2.0 Tb/in²이고 SNR=12 dB에서 TMR에 따른 BER 성능을 보여준다. 변조부호를 사용하지 않았을 때의 성능이 제안하는 변조부호를 사용하였을 때와 제안하는 6/8 변조부호를 가로 형태

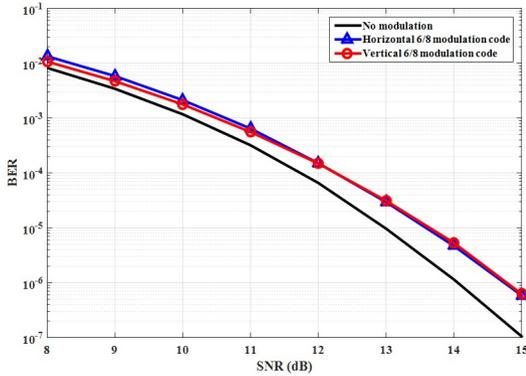


그림 3. 기록밀도 2.0 Tb/in²에서 SNR에 따른 제안하는 6/8 변조부호의 BER 성능
Fig. 3. BER performance of the proposed 6/8 modulation code according to SNR when areal density is 2.0 Tb/in².

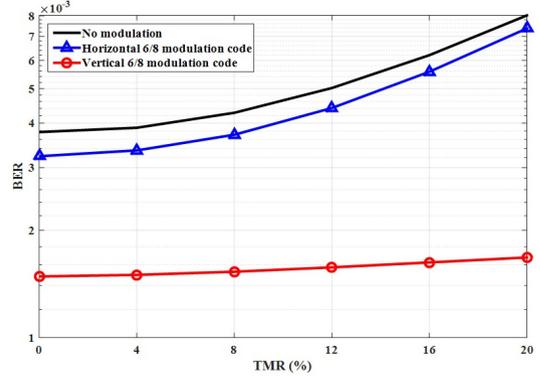


그림 6. 기록밀도 3.0 Tb/in²에서 TMR에 따른 제안하는 6/8 변조부호의 BER 성능
Fig. 6. BER performance of the proposed 6/8 modulation code according to TMR when areal density is 3.0 Tb/in².

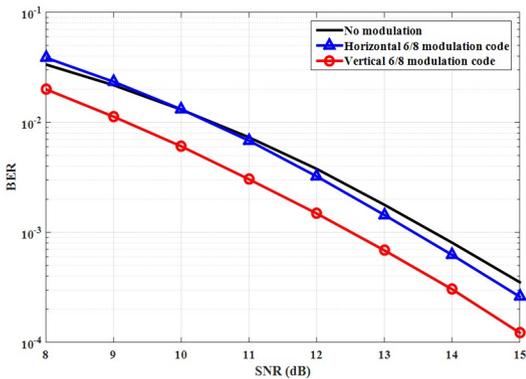


그림 4. 기록밀도 3.0 Tb/in²에서 SNR에 따른 제안하는 6/8 변조부호의 BER 성능
Fig. 4. BER performance of the proposed 6/8 modulation code according to SNR when areal density is 3.0 Tb/in².

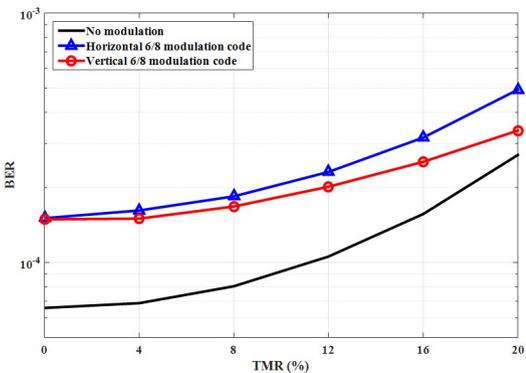


그림 5. 기록밀도 2.0 Tb/in²에서 TMR에 따른 제안하는 6/8 변조부호의 BER 성능
Fig. 5. BER performance of the proposed 6/8 modulation code according to TMR when areal density is 2.0 Tb/in².

로 사용하였을 때보다 성능이 우수하였다. 그러나 TMR이 증가할수록 제안하는 변조부호와 변조부호를 사용하지 않았을 때와 성능이 비슷해지는데 이러한 이유는 트랙이 어긋날수록 ITI 영향이 증가하게 되기 때문에 변조부호가 이러한 잡음 영향을 줄일 수 있다.

그림 6은 기록밀도 3.0 Tb/in²이고 SNR=12 dB에서 TMR에 따른 BER 성능을 보여준다. 제안하는 6/8 변조부호는 제안하는 6/8 변조부호를 가로 형태로 사용하였을 때와 변조부호를 사용하지 않았을 때보다 성능 이득을 얻을 수 있으며, 또한 제안하는 6/8 변조부호는 TMR 잡음이 증가하여도 성능의 변화가 크게 없다.

V. 결론

본 논문에서는 인접 트랙간 간섭을 제거하기 위한 6/8 변조부호를 제안하였다. 제안하는 6/8 변조부호는 기록밀도 2.0 Tb/in²에서 제안하는 변조부호의 성능이 변조부호를 사용하지 않았을 때보다 우수하지 않은 이유는 제안하는 변조부호는 ITI 영향력을 감소시키기 위한 설계되었지만 기록밀도가 3.0 Tb/in²보다 ITI 영향이 작기 때문에 변조부호가 간섭 영향을 크게 줄일 수 없었으며 또한 64개의 코드워드간의 거리 (distance)가 작기 때문에 정정능력이 작다. 그러나 기록밀도가 높을 때에는 제안하는 변조부호의 성능이 우수하였는데 ITI 영향을 감소시키기 위한 변조부호이기 때문에 기록밀도가 높아질수록 성능 이득을 얻을 수 있다.

References

- [1] 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.
- [2] Y. Shiroishi, K. Fukuda, I. Tagawa, H. Iwasaki, S. Takenoiri, H. Tanaka, H. Mutoh, and N. Yoshikawa, "Future option for HDD storage," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 3816-3822, 2009.
- [3] T. Rausch, J. A. Bain, D. D. Stancil, and T. E. Schlesinger, "Thermal Williams-Comstock model for predicting transition lengths in a heat-assisted magnetic recording system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, no. 1, pp. 137-147, Jan. 2004.
- [4] M. H. Kryder, E. C. Gage, T. W. McDaniel, W. A. Challener, R. E. Rottmayer, G. Ju, Y. T. Hsia, and M. F. Erden, "Heat assisted magnetic recording," in *Proc. IEEE*, vol. 96, no. 11, pp. 1810-1835, 2008.
- [5] J.-G. Zhu, X. Zhu, and Y. Tang, "Microwave assisted magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, no. 1, pp. 125-131, 2008.
- [6] T. R. Albrecht, H. Arora, V. Ayanoor-Vitikkate, J. Beaujour, D. Bedau, D. Berman, A. L. Bogdanov, Y. Chapuis, J. Cushen, E. E. Dobisz, G. Doerk, H. Gao, M. Grobis, B. Gurney, W. Hanson, O. Hellwig, T. Hirano, P. Jubert, D. Kercher, J. Lille, Z. Liu, C. M. Mate, Y. Obukhov, K. C. Patel, K. Rubin, R. Ruiz, M. Schabes, L. Wan, D. Weller, T. Wu, and E. Yang, "Bit-patterned magnetic recording: Theory media fabrication and recording performance," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 51, no. 5, 2015.
- [7] C. D. Nguyen and J. Lee, "Scheme for utilizing the soft feedback information in bit-patterned media recording systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 53, no. 3, Art. no. 3101304, Mar. 2017.
- [8] 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, Jan. 2019.
- [9] S. Jeong and J. Lee, "Iterative decoding of SOVA and LDPC product code for bit-patterned media recording," *AIP Adv.*, vol. 8, no. 5, pp. 056503, 2018.
- [10] 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.
- [11] J. Kim and J. Lee, "Performance of read head offset on patterned media recording channel," *J. KICS*, vol. 35, no. 11, pp. 896-900, 2010.
- [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.
- [13] 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, Mar. 2017.

정성권 (Seongkwon Jeong)

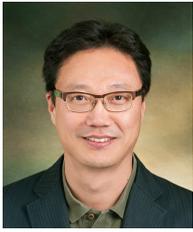


2015년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업
 2017년 8월 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 석사
 2018년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 박사과정

<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]