

논문 2012-50-6-1

# 비트 패턴 미디어 저장장치를 위한 축약사상 기반의 반복적 2차원 등화기

( An Iterative Two-Dimensional Equalizer for Bit Patterned Media  
Storage Systems Based on Contraction Mapping )

문 우 식\*, 임 성 빈\*\*, 박 세 황\*

( Woosik Moon<sup>©</sup>, Sungbin Im, and Sehwang Park )

## 요 약

비트 패턴 미디어 (BPM) 저장장치는 기존 자기 기록장치의 한계를 극복하기 위한 기술 중 하나로 주목 받고 있다. 하지만 고밀도의 BPM 저장장치에서는 트랙간의 간섭 (ITI), 심별간의 간섭 (ISI), 잡음이 비트 오류 (BER)을 심각하게 저하시키는 문제가 있다. 본 논문에서는 ITI와 ISI의 악영향을 경감시키기 위해 축약사상 기반의 단순 반복적 2차원 등화기를 제안한다. 또한 제안한 2차원 등화기에 대한 BPM 저장장치의 채널 특성이 수렴 조건을 만족함을 살펴보았다. 모의실험에서 1차원 등화기와 2차원 등화기의 비트 분리 특성 차이를 보였고, 제안한 등화기의 BER 성능을 다른 등화 방법과 비교하여 평가하였다. 실험 결과에 의하면 본 논문에서 제안한 등화기는 적당한 복잡도를 유지하면서 고밀도 BPM 저장장치를 위한 훌륭한 등화기라 할 수 있다.

## Abstract

Bit patterned media (BPM) storage is one of the promising technologies to overcome the limitations of the conventional magnetic recording. However, there are some problems in a high areal density BPM storage, inter-track interference, inter-symbol interference and noise which are severely degrading performance of the system with reducing the bit error rate. In this paper, we present a simple iterative two-dimensional equalizer based on the contraction mapping theorem to mitigate these adverse effects. Furthermore, we examine that the channel characteristics of the proposed two-dimensional equalizer satisfies the convergence conditions. In the simulation we demonstrate the bit separation characteristics of the one-dimensional equalizer and the two-dimensional equalizer and evaluate the BER performance of the proposed equalizer comparing with the conventional equalizers. According to the results of experiments, the proposed equalizer is a promising equalizer with maintaining proper complexity for a high areal density BPM storage.

**Keywords** : 2D equalizer, BPM, contraction mapping, storage system

## I. 서 론

비트 패턴 미디어 (bit patterned media, BPM) 저장 장치는 기존 자기 기록장치의 한계를 극복하기 위한 기술들 중 하나로 주목 받고 있다. 작은 크기의 아일랜드에 하나의 비트를 저장하는 BPM 저장장치는 고밀도로

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부 (Soongsil University)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2011-0012417).

© Corresponding Author(E-mail: moonsday@ssu.ac.kr)

접수일자 2012년3월15일, 수정완료일 2013년5월21일

구현할 경우 인접 아일랜드와의 간격이 좁아져 트랙간의 간섭 (inter-track interference, ITI)과 심벌간의 간섭 (inter-symbol interference, ISI)으로 성능을 심각하게 악화된다.

따라서 이러한 문제를 해결하여 더 나은 성능을 얻기 위해서는 2차원 (two dimensional, 2D) 등화 기술이 필수적이다. 기존의 자기 기록장치 시스템에서는 부분 응답 최대 유사도 (Partial Response Maximal Likelihood, PRML) 방식이 사용된 바 있다<sup>[1]</sup>. PRML은 ISI를 제거하기 위한 방식으로 PR target과 Viterbi 검출기를 사용하였다. Viterbi 알고리즘은 2차원에 적용하는 것이 매우 어렵기 때문에 2차원 검출기를 위한 다른 기술이 연구될 필요가 있었고<sup>[2]</sup>, 이러한 시도의 일환으로 2개의 1차원 소프트 출력 Viterbi 알고리즘을 결합한 2차원 검출기가 소개된 바 있다<sup>[3]</sup>. 최적화를 위해 2차원 검출기가 고려된 등화기 설계에 블록 선형 계획법이 적용되기도 하였다<sup>[4]</sup>. 본 논문에서는 ISI와 ITI를 완화시키기 위한 방법으로 축약 사상<sup>[5]</sup> (contraction mapping) 기반의 단순 반복적 2차원 등화기를 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 고안한 비트 패턴 미디어의 펄스 응답과 readback 신호 모형에 대해 기술하고, III장에서는 등화기 구조를 제안하고 원리를 검증한다. IV장에서 비트오율 (bit error rate, BER) 관점에서 모의실험 결과를 살펴보고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

## II. 채널 모델과 READBACK 신호의 모의

본 논문에서 BPM의 readback 신호 처리 과정을 모의하기 위해 먼저 Nabavi 매체와 read head를 고려하였다<sup>[6]</sup>. 고려하는 BPM에서 하나의 아일랜드는 가로세로 길이가 11nm인 정사각형 형태이고, 이 아일랜드의 펄스 응답으로는 수치이론 결과와 잘 맞는 2D 가우시안 펄스를 사용하였다<sup>[7]</sup>.

$$h(x, z) = h_x(x)h_z(z) = A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{c^2 x^2}{19.5^2} + \frac{c^2 z^2}{24.7^2}\right)\right) \quad (1)$$

여기에서  $x$ 와  $z$ 는 각각 트랙을 따라 진행되는 방향과 트랙을 가로 지르는 방향을 의미한다. 피크 진폭  $A$ 는

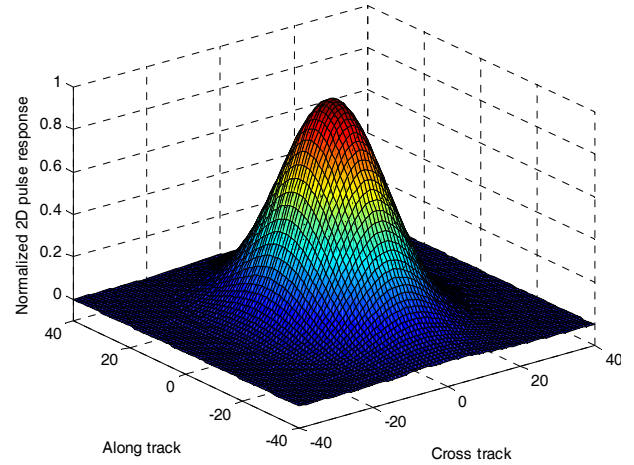


그림 1. 2D 펄스 응답 모의실험

Fig. 1. Simulated 2D pulse response.

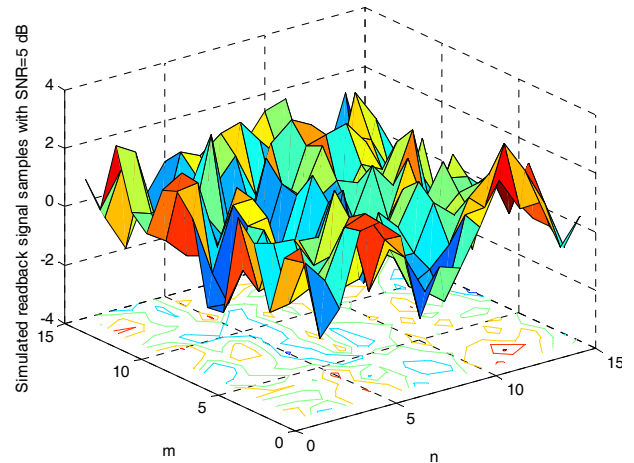


그림 2. SNR=5dB에서 readback 신호 샘플의 일부

Fig. 2. A part of readback signal samples with SNR=5dB.

상수 1로 고정하고  $c$ 는 가우시안 함수의 표준편차로 펄스폭인  $PW_{50}$ 과 연관된 상수 값이다<sup>[7]</sup>.

그림 1은 아일랜드의 2D 펄스 응답을 모의 실험한 결과이다<sup>[8]</sup>. 이 아일랜드는 가로 세로 길이 11nm, 두께 10nm, 부양높이 10nm이다. 신호를 읽는 read head로는 자기저항 (magnetoresistance, MR) 헤드를 사용하며 그 두께 4nm, 너비 22nm, 간격 10nm이다.

BPM에서 균일한 크기의 아일랜드를 사용하고 아일랜드 사이의 간격이 동일하며 잘 정렬되어 있다고 한다면 BPM은 일정한 패턴을 갖고 readback 신호는 아일랜드의 위치에 따라 표현할 수 있다. 이 때 readback 신호는 정해진 위치 ( $nT_x, mT_z$ )에서 표본화 된다. 여기서  $T_x$ 와  $T_z$ 는 각각 트랙을 따라 진행되는 방향과

트랙을 가로지르는 방향의 아일랜드 주기이다. 따라서 표본화된 2차원 readback 신호  $r[n, m]$  은 다음의 수식과 같이 축약된 2D 펄스 응답  $h[n, m]$  와 2D비트 패턴  $d[n, m]$  의 컨벌루션으로 표현될 수 있다.

$$r[n, m] = h[n, m] \otimes d[n, m] \quad (2)$$

여기서  $\otimes$  는 2차원 컨벌루션을 나타낸다. 일반적으로 표본화된 readback 신호  $r[n, m]$  은 부가성 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN) 신호  $v[n, m]$  의 영향을 받는데 다음과 같이 표현한다.

$$y[n, m] = r[n, m] + v[n, m] \quad (3)$$

그림 2는 신호대잡음비 (signal to noise ratio, SNR) 가 5dB인 AWGN에서 readback 신호의 일부를 나타낸 것이다.

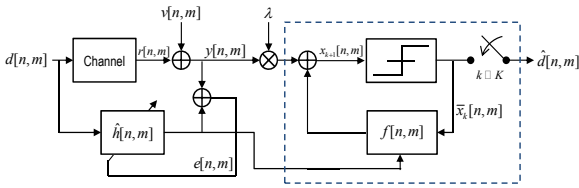


그림 3. 제안한 2D 등화기의 기능적 블록  
Fig. 3. Functional blocks of the proposed 2D equalizer.

### III. 제안하는 등화기

본 논문에서 제안하는 등화기의 핵심 개념은 원래의 비트 패턴을 복구하는데 있어서 발생하는 문제를 고정점 (fixed point) 문제로 간주한 것이다<sup>[5]</sup>. 등화기는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_0[n, m] &= \lambda y[n, m] \\ x_{k+1}[n, m] &= \lambda y[n, m] \\ &\quad + f[n, m] \otimes dec(x_k[n, m]) \end{aligned} \quad (4)$$

위에서  $f[n, m] = \delta[n, m] - \lambda h[n, m]$  이며,  $x \geq 0$  에서  $dec(x) = 1$ , 그 이외에서  $dec(x) = -1$  이 된다. 여기서 고정점을  $x_{k+1} = x_k = dec(x_k)$  로 가정하면 식 (4)로부터  $0 = \lambda y - \lambda h \otimes x_k$  을 얻게 된다. 즉, 고정점  $x_k$  가 검출하고자 하는 비트패턴임을 의미한다.

축약사상 정리<sup>[5]</sup>에 따라 식 (4)의 고정점을 찾기 위해

이 반복은 다음 조건에서 고정점으로 수렴한다.

$$\gamma[\omega_1, \omega_2] \triangleq |1 - \lambda H[\omega_1, \omega_2]| < 1 \quad (5)$$

여기서  $\gamma$ 는 축약상수라 하며,  $H[\omega_1, \omega_2]$ 는  $h[n, m]$ 의 푸리에변환 (FT)이고  $\lambda$ 는 상수이다. 식 (5)는  $Re\{H[\omega_1, \omega_2]\} > 0$  와 동치이다<sup>[9]</sup>.

예로써 여기서 고려한 식 (1)의 2차원 가우시안 펄스는 중심점에 대해 우함수 대칭이기 때문에 식 (1)의 푸리에 변환 (FT)은 양의 실수이다. 따라서 식 (1)의 펄스는 식 (5)의 조건을 충족한다. 앞선 연구에서 검토된 수많은 응답 모델이 이 조건을 충족하고 있다.

이 방법의 장점은 2D 펄스 응답의 복잡한 역함수를 계산하여 구현할 필요 없이 단순 반복 계산법을 사용하여 고정점의 해 (비트패턴)를 구할 수 있다는 점이다. 반복 수행의 특징은 역필터의 출력에 준하는 출력이 되는 지점까지 유한 횟수의 반복 연산 후 정지시킬 수 있다는 점이다. 하지만 이 반복 연산 과정 중에  $h[n, m]$ 의 추정치인 이산 채널 응답  $\hat{h}[n, m]$ 이 필요하다. 따라서 여기서  $f[n, m]$ 은  $\delta[n, m] - \lambda \hat{h}[n, m]$ 로 대체된다.

그림 3은 모의 채널 환경 하에서 제안한 등화기의 기능적 블록을 나타낸다. 그림에서  $\bar{x}_k = dec(x_k)$ 를 나타낸다. 먼저 축약사상 정리를 통해 원래의 비트와 추정된 비트간의 오류 경계를 찾을 수 있다. 각각의  $\omega_1, \omega_2$ 에 대해  $\gamma_u = \max_{\omega_1, \omega_2} \{\gamma[\omega_1, \omega_2]\} < 1$  일 때, 다음의 관계식을 찾을 수 있다.

$$|d[n, m] - x_k[n, m]| \leq \frac{\gamma_u^k |x_1[n, m] - x_0[n, m]|}{1 - \gamma_u} \quad (6)$$

여기서  $x_0$ 가 초기 추정 비트를 나타낸다. 식 (6)은 추정된 비트의 오류 한계를 보여준다. 잡음이 없는 경우 식 (6)에 의해 오류는  $k \rightarrow \infty$ 이고  $\gamma_u < 1$  일 때 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 식 (5)에 의해 수렴율은  $\gamma_u$ 의 크기에 의해 결정되며, 축약상수는 상수  $\lambda$ 에 의해서 결정된다.

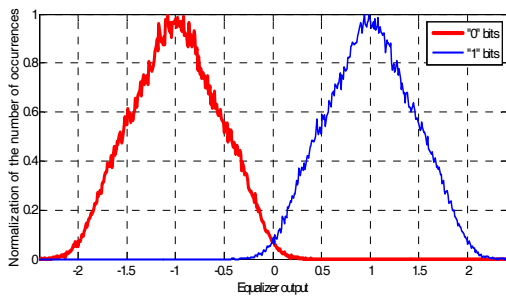
### IV. 모의실험

모의실험에서는 BPM 환경에서 제안한 등화 방법과 다른 방법을 비교하여 성능을 검증하였다. 실험에 사용된 채널 환경은 2장에서 설명한 Nabavi 모델<sup>[8]</sup>의 채널

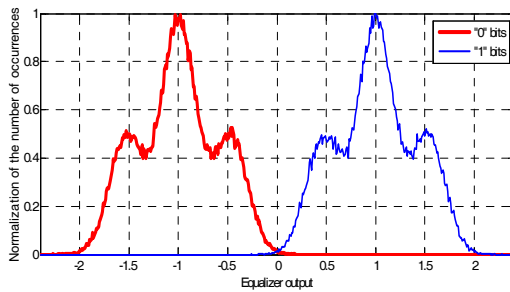
응답으로 다음의 채널행렬  $h$ 와 같다.

$$h = \begin{bmatrix} 0.0215 & 0.213 & 0.0215 \\ 0.1011 & 1 & 0.1011 \\ 0.0215 & 0.213 & 0.0215 \end{bmatrix} \quad (7)$$

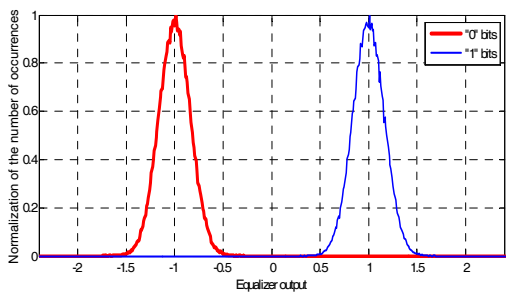
모의실험에서는 2진 랜덤 데이터를 사용하였고 0은 -1로 1은 +1로 변조하였다. 그림 4는 위 채널을 통과한 2진 신호의 비트 분리 특성을 보여준다. 이 때 수신 신호는 가우시안 잡음을 포함한다. 그림 4 (a)는 수신 신호의 비트 분리 특성으로 신호가 넓게 퍼져 분포하고



(a)



(b)



(c)

그림 4. (a) 수신 신호, (b) 1-D PRML 등화기 출력, (c) 제안하는 등화기 출력의 비트 분리 특성

Fig. 4. Bit separation characteristics of (a) a received signal, (b) the PRML equalizer output, and (c) the proposed equalizer output.

있다. 그림 4 (b)는 1D PRML 등화기 출력의 비트 분리 특성으로 트랙의 진행 방향을 따라 PR(1 10 1) 타겟을 이용해 등화한 결과이다. 비트의 분포 특성으로 보아 1D 등화기는 ITI를 효과적으로 제거하지 못했다고 할 수 있다. 그림 4 (c)는 제안한 등화기 출력의 비트 분리 특성이다. 2회 반복 등화시의 결과로 거의 가우시안 잡음만이 남아있다.

그림 5는 채널 행렬  $h$ 에 대하여 SNR에 따른 raw BER 성능을 나타낸다. 데이터는 AWGN 환경에서 부호화하지 않은  $4 \times 10^7$ 개의 랜덤 비트를 사용하였다. 비교 방법 중 threshold detector는 수신 신호에서 0을 기준으로 판단하였고, 2D SOVA<sup>[3]</sup>는 2개의 1D SOVA를 하나는 트랙의 진행방향으로, 다른 하나는 트랙을 가로지르는 방향으로 등화하여 평균값으로 구하였다. 제안하는 방법은 1회, 2회, 10회 반복하여 등화한 결과를 비교하였다. 1D PRML은 threshold detector 다음으로 성능이 나뉘고, 2D 등화 방법의 성능은 1회 반복 제안한 등화기, 2D SOVA, 2회 반복 제안한 등화기, 10회 반복 제안한 등화기 순서로 나타났다. 2회 반복과 10회 반복은 거의 유사한 BER 성능을 보였고, BER이  $10^{-4}$ 에서 threshold detector에 비해 약 6.5dB, 2D SOVA에 비해 약 0.3dB 성능이 우수했다.

그림 6은 데이터를 콘벌루션 부호화하여 SNR에 따른 BER 성능을 나타낸다. 구속 길이와 코드 비는 각각 9와 1/2이고, puncturing을 통해 유효 코드 비가 7/8이 된다. 각 알고리즘의 BER 성능 순서는 그림 5와 같은 순서이다. 2회 반복 제안한 등화 방법은 SNR이 12.5dB

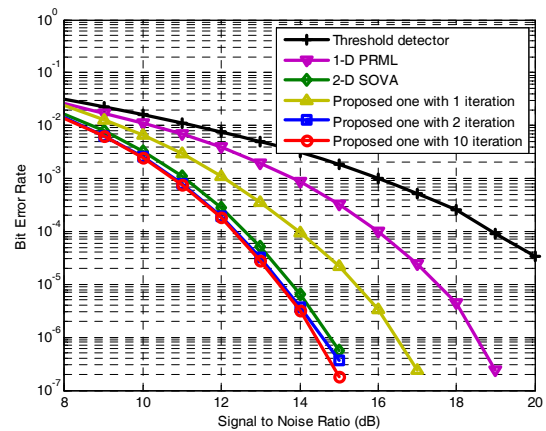


그림 5. 부호화 하지 않은 데이터 사용시 SNR에 따른 BER 성능

Fig. 5. BER performance vs. SNR for uncoded data.

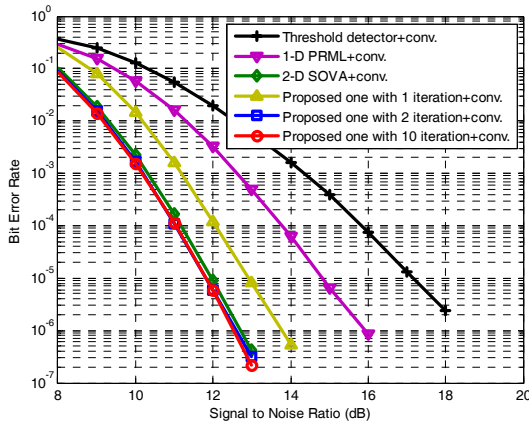


그림 6. 부호화 데이터에 대한 SNR에 따른 BER 성능  
Fig. 6. BER performance vs. SNR for encoded data.

일 때 BER이  $10^{-6}$ 로 부호화 하지 않았을 때에 비해 약 2dB의 SNR 이득을 얻었다. 그리고 2D SOVA에 비해 0.1~0.2dB 성능이 좋고 threshold detector에 비해서는 약 6dB 우수하다. 하지만 콘벌루션 코드 특성에 따라 SNR이 10dB보다 작을 때는 제안한 2회 반복 등화 방법의 BER이 부호화한 경우가 하지 않은 경우보다 나쁘게 나왔다. 부호화한 데이터를 등화한 결과에서도 2회 반복시와 10회 반복시의 제안한 등화 방법의 성능이 거의 유사하게 나타났다. 따라서 제안한 등화 방법은 2회 만에 수렴하였다고 할 수 있다.

복잡도 측면에서는 제안한 등화 방법은 처음에  $\lambda$ 와 곱셈 한번, 그리고 1회 반복마다 2D 콘벌루션 1회, 곱셈 1회, 덧셈 2회를 수행한다. 따라서 제안한 등화 방법의 복잡도는 채널 크기와 반복 횟수의 상수배이다. 이에 반해 비터비 알고리즘은 구속장에 비해 지수적으로 복잡도가 증가한다고 알려져 있다. 따라서 제안한 등화 방법은 복잡도 측면에서 비터비 알고리즘보다 우수하다.

## V. 결 론

본 논문에서는 BPM의 readback 채널 등화를 위해 축약사상 기반의 단순 반복적 2D 등화기를 제안하였다. 그리고 여기서 고려하였던 펄스 응답 채널 모델이 축약사상 정리에 따라 수렴 요구 조건을 충족하는 것을 알 수 있었다. 모의실험을 통해 1D 등화기로는 ISI와 ITI를 모두 제거할 수 없음을 알았고, AWGN 환경에서 다른 방법과 비교하였을 때 우수한 성능을 보여주었다.

부호화를 사용하였을 때와 하지 않았을 때 모두 제안한 등화 방법의 2회 반복과 10회 반복이 거의 같은 성능을 보여 2회 만에 빠르게 수렴하였음을 보였으며, 성능도 가장 우수해 BER이  $10^{-6}$ 에서 threshold detector보다 6dB 이상 좋았다. 복잡도도 채널 크기와 반복 횟수의 상수배로 간단하여 본 논문에서 제안한 등화기가 고밀도의 BPM를 위한 우수한 등화기임을 알 수 있다.

## REFERENCES

- [1] S. X. Wang and A. M. Taratorin, *Magnetic Information Storage Technology*, Academic Press, 1999, ch. 12.
- [2] H. Burkhardt, "Optimal data retrieval for high density storage," *Comp Euro '89 Conf. VLSI Computer Peripherals. VLSI and Microelectronic Applications in Intelligent Peripherals and Their Interconnection Networks*, pp. 43-48, 1989.
- [3] 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.
- [4] S. Kudekar, J. K. Johnson, and M. Chertkov, "Linear Programming based Detectors for Two-Dimensional Intersymbol Interference Channels," *2011 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, pp. 2999-3003, 2011.
- [5] A. W. Naylor and G. R. Sell, *Linear Operator Theory in Engineering and Science*, Springer-Verlag, 1982.
- [6] S. Nabavi, "Signal Processing for Bit-Patterned Media Channels with Inter-Track Interference," *Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng. Comp. Sci., Carnegie Mellon Univ.*, Pittsburgh, PA, 2008.
- [7] Wu Chang and J. R. Cruz, "Inter-Track Interference Mitigation for Bit-Patterned Magnetic Recording," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 46, no. 11, pp. 3899-3908, Nov. 2010.
- [8] S. Nabavi, B. V. K. V. Kumar, and J. A. Bain, "Two-dimensional pulse response and media noise modeling for bit-patterned media," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 44, no. 11, pp. 3789-3792, Nov. 2008.
- [9] J. M. Holtzman, *Nonlinear System Theory*, Prentice-Hall, Inc., 1970, ch. 2.

## — 저 자 소 개 —



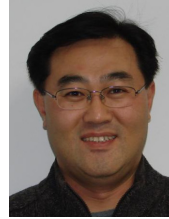
문 우 식(학생회원)  
 2007년 숭실대학교  
 정보통신전자공학부 학사  
 2009년 숭실대학교  
 정보통신공학과 석사  
 2009년~현재 숭실대학교  
 정보통신공학과 박사과정

<주관심분야 : 채널 모델링, 비선형 신호처리>



박 세 황(학생회원)  
 2012년 숭실대학교  
 정보통신전자공학부 학사  
 2012년~현재 숭실대학교  
 정보통신공학과 석사과정

<주관심분야 : 위성 통신, 레이더>



임 성 빈(정회원)-교신저자  
 1986년 서울대학교  
 전자공학과 학사  
 1988년 서울대학교  
 전자공학과 석사  
 1994년 Univ. of Texas at Austin  
 전기및컴퓨터공학과 박사

1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부  
 교수

<주관심분야 : 비선형 신호처리, 통신 시스템>