

논문 2014-51-5-9

비대칭 신호 모델을 이용한 super-RENS 신호에서의 비선형 등화기

(The Nonlinear Equalizer for Super-RENS Read-out Signals using an Asymmetric Waveform Model)

문 우 식*, 박 세 황**, 이 지 은**, 임 성 빈*

(Woosik Moon, Sehwang Park, Jieun Lee, and Sungbin Im[©])

요 약

Super-RENS(super-resolution near-field structure) read-out 신호는 비선형 채널을 겪으면서 ISI(inter-symbol interference)의 영향으로 신호가 변형된다. 본 논문에서는 등화기의 측면에서 super-RENS 신호에 나타나는 비대칭성과 domain bloom 특성에 대해 살펴본다. Domain bloom은 광 레코드의 기록 과정에서 발생한다. 본 연구에서는 비대칭 심벌 변환 방식을 이용하여 비대칭 심벌들을 생성하며, 비선형 심벌과 선형 FIR(finite impulse response) 필터로 read-out 채널을 모델링한다. 이러한 비선형 채널의 등화는 채널의 선형 FIR 필터의 역필터를 찾은 다음 역필터로 등화된 신호를 심벌 변환 방식으로 전개된 결정 방식 테이블에 기초하여 판별하는 과정으로 진행된다. 제안하는 등화기를 raw BER(bit error ratio)의 관점에서 모의실험과 실제 super-RENS read-out 신호를 이용하여 분석하였다.

Abstract

Super-resolution near-field structure (super-RENS) read-out samples are affected by a nonlinear and noncausal channel, which results in inter-symbol interference (ISI). In this study, we investigate asymmetry or domain bloom in super-RENS in terms of equalization. Domain bloom is caused by writing process in optical recording. We assume in this work that the asymmetry symbol conversion scheme is to generate asymmetric symbols, and then a linear finite impulse response filter can model the read-out channel. For equalizing this overall nonlinear channel, the read-out signals are deconvolved with the finite impulse response filter and its output is decided based on the decision rule table that is developed from the asymmetry symbol conversion scheme. The proposed equalizer is investigated with the simulations and the real super-RENS samples in terms of raw bit error rate.

Keywords: domain bloom, equalizer, nonlinearity, super-RENS.

* 정회원, ** 학생회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부
(Soongsil University, School of Electronic Engineering)

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

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

접수일자: 2014년3월25일, 수정일자: 2014년4월9일
수정완료: 2014년4월30일

I. 서 론

광 저장매체는 지난 30년간 끊임없는 발전을 거듭해 왔다. CD(compact disc)에서 BD(Blu-ray disc)로 광 저장매체의 용량도 100배 이상 증가하였다^[1]. 고화질 및 고선명 멀티미디어 서비스와 대용량 데이터 처리에 대한 수요도 증가하였고, UHD(ultra high definition) 방송

도 시행되었다. 이제 BD를 넘어서는 대용량 광 저장장치에 대한 관심이 증대되고 있다. Super-RENS (super-resolution near-field structure) 디스크 시스템은 기존의 BD 시스템에 비해 고용량이며 호환성이 있어 주목받고 있는 기술 중의 하나이다^[2-7]. 이 기술은 광초점의 크기를 줄여서 광 디스크 기록 밀도를 높이는 근접장 기술과 디스크 내부에서 초해상 현상을 이용하여 분해능보다 작은 크기의 마크를 저장해서 용량을 증가시킨다. 디스크 내부의 초해상 현상을 이용하기 때문에 이전 기술과 드라이브 장치의 구조면에서 호환성을 갖는 장점이 있다^[8].

Super-RENS 디스크의 read-out 신호는 비선형 특성을 갖는다고 알려져 있고^[8-12], 이 디스크의 read-out 채널은 분해능보다 작은 마크를 읽으면서 인접 데이터와의 ISI(inter symbol interference)를 발생시킨다^[8-9]. 따라서 신호의 복원을 위해서는 ISI에 적합한 비선형 채널 등화기를 적용할 필요가 있다. 기존의 비선형 등화기는 비선형을 모델링하는 과정에서 높은 복잡도를 갖는다^[8]. SCPWL(simplicial canonical piecewise linear) 모델은 계산 복잡도를 낮추기 위해 제안되었다^[11-12]. 이는 기존의 방식들에 비해서는 계산 복잡도를 낮추지만, 실질적인 구현에 있어서는 여전히 높은 복잡도를 갖는다. 이런 이유로 본 논문에서는 비대칭 파형 모델을 이용한 등화기를 제안한다. 비대칭 신호는 데이터의 기록과정에서 발생한 걱정하지 못한 매칭이 원인이 된다. 이는 너무 크거나 작은 의도하지 않은 마크를 만들어 낸다. 이런 비대칭 현상은 read-out 신호의 DC(direct current) 레벨의 편이를 가져오고, 이런 현상을 domain bloom이라고 한다^[3, 13-14]. 이러한 채널 특성을 비대칭 파형 변환 및 FIR(finite impulse response) 필터로 구현하고 비선형 채널 등화기를 설계하였다^[13-14].

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 제안한 등화기에 사용되는 비대칭 심벌 변환 방식에 대해 설명하고, III장에서 전체적인 시스템 모델과 비대칭 심벌 변환 방식에 기초한 등화기를 설명한다. 그 다음 IV장에서 제안하는 등화기를 super-RENS의 read-out 신호에 적용하였고 BER(bit error rate) 관점에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 그리고 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

II. 비대칭 심벌 변환 방식

제안하는 등화기에서 사용된 비대칭 파형 변환 방식은 식 (1)과 같다^[13].

$$b_k = a_k - \frac{1}{4}(|A| + Aa_k)(2a_k - a_{k+1} - a_{k-1}) \quad (1)$$

여기서, $b_k \in \{-1, B, 1\}$ 는 비트 패턴 $a_k \in \{-1, +1\}$ 에 대응하는 비대칭 심벌이며, A 는 read-out 신호에 포함된 비대칭 특성에 비례하는 매개변수이다. b_k 는 연속적인 세 개의 심벌 $\{a_{k-1}, a_k, a_{k+1}\}$ 에 의해 결정되고, B 는 $A > 0$ 면 $1-A$ 혹은 $1-2A$ 이고 $A < 0$ 면 $-1-A$ 혹은 $-1-2A$ 이다. 비대칭이 아닌 경우($A=0$)에 b_k 는 a_k 와 동일하다. 매개변수 A 는 심벌 b_k 의 비선형의 정도를 조정한다. 매개변수 A 와 연속하는 세 심벌, $\{a_{k-1}, a_k, a_{k+1}\}$ 에 대응하는 비대칭 심벌 b_k 는 표 1에 도시된 상태중 하나의 값을 갖는다.

표 1. 판별 규칙 테이블

Table 1. Decision rule table.

$A > 0$	$a_k = -1$	$a_{k-1}, a_{k+1} : \text{don't care}$		$a_k = b_k = -1$
	$a_k = +1$	$a_{k-1} = +1$	$a_{k+1} = +1$	$b_k = +1$
			$a_{k+1} = -1$	$b_k = 1 - A$
	$a_{k-1} = -1$	$a_{k+1} = +1$	$b_k = 1 - 2A$	
$a_{k+1} = -1$				
$A < 0$	$a_k = +1$	$a_{k-1}, a_{k+1} : \text{don't care}$		$a_k = b_k = +1$
	$a_k = -1$	$a_{k-1} = +1$	$a_{k+1} = +1$	$b_k = -1 - 2A$
			$a_{k+1} = -1$	$b_k = -1 - A$
	$a_{k-1} = -1$	$a_{k+1} = +1$	$b_k = -1$	
$a_{k+1} = -1$				

III. 시스템 모델과 등화기

1. 시스템 모델

그림 1은 본 연구에서 고려하는 시스템 모델을 블록 다이어그램으로 보여준다. 본래의 비트 패턴, $a_k \in \{-1, 1\}$ 는 비대칭 블록으로 입력되고, 이 블록의 연산은 식 (1)과 같다. 채널은 비대칭 파형 변환과 선형 FIR 필터가 연결된 형태로 표현된다. Read-out 신호는 채널을 통과한 신호에 잡음이 포함된 형태로 식 (2)와 같이 표현된다.

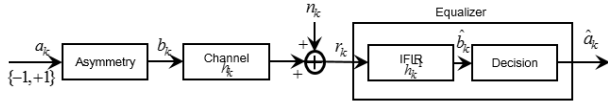


그림 1. 본 논문에서 사용하는 시스템 모델

Fig. 1. System model considered in this paper.

$$r_k = b_k * h_k + n_k \quad (2)$$

여기서 ‘*’는 선형 컨볼루션을 나타내며, 임펄스 응답 h_k 는 채널의 선형 성분을 나타낸다. 그림에서 n_k 는 zero-mean AWGN(additive white gaussian noise)이며, read-out 신호 샘플은 r_k 이다.

2. 등화기

그림 1의 뒷부분은 본 연구에서 제안하는 등화기이다. 제안하는 등화기의 첫 번째 성분은 채널에서 FIR 필터인 h_k 의 역 필터링을 수행하는 FIR 필터 h_k^{-1} 이다. 컴퓨터 시뮬레이션에서는 필터 계수 h_k^{-1} 을 찾기 위해 RLS(recursive least square) 알고리즘^[15]을 이용한다. 완전한 역필터를 구할 수 있다면 \hat{b}_k 는 다음과 같다.

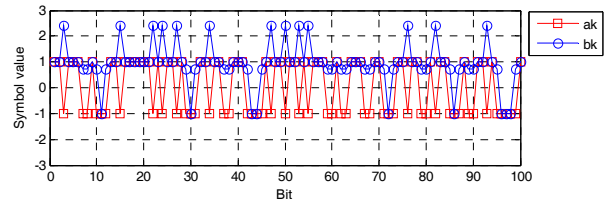
$$\hat{b}_k = h_k^{-1} * (b_k * h_k + n_k) = b_k + h_k^{-1} * n_k \quad (3)$$

비트를 판별하는 ‘Decision’ 블록에서는 표 1에 주어진 판별 규칙 테이블을 참조하여 판별과정이 수행된다. 예를 들어 $A = -1.71$ 이고 $\hat{b}_k = +1$ 이면, \hat{a}_k 는 $+1$ 혹은 -1 이 된다. \hat{b}_k 를 위해 강판정은 \hat{b}_k 의 가능한 모든 값들 사이의 최소 거리를 측정하여 만들어 진다.

부득이하게 결정 규칙 테이블은 매개변수 A 가 $+1$ 혹은 -1 일 때, 판정을 명확히 정의할 수 없는 경우가 있다. 예를 들어 $A = +1$ 이면 상태 $\{b_k = -1 | a_k = -1\}$ 와 $\{b_k = -1 | a_k = +1\}$ 가 상충된다. 따라서 \hat{a}_k 에 대한 결정을 할 수 없게 된다. 따라서 일반적으로 등화기에서 $A \neq -1, +1$ 라 가정한다.

3. A의 추정

그림 2는 비트 패턴에 따른 a_k 와 $A = -1.71$ 일 때 비트 패턴에 대응하여 식 (1)에 의해 얻어지는 비대칭 심벌들 b_k 를 보여준다. 비대칭 심벌들 b_k 의 평균이 1에 가깝게 올라가 있고 값이 2 이상인 심벌들이 있다. $|A| > 1$ 일 때 $|b_k| > 1$ 의 특성이 나타나며, 이러한 특성

그림 2. 비트 패턴 a_k , 비대칭 신호 b_k 의 파형 ($A = -1.71$).Fig. 2. Waveforms of bit patterns a_k and asymmetric symbols b_k ($A = -1.71$).

은 $|A|$ 가 클 때 두드러지게 나타난다. A 의 값은 read-out 신호 r_k 로부터 추정할 수 있다. 이 A 는 등화기에 판별 규칙 테이블을 통해 신호를 판정할 때 사용된다. 식 (1)에서 a_k 가 분포가 확률적으로 독립이며 균일하게 분포한다면,

$$E\{b_k\} = -\frac{1}{2}A \quad (4)$$

이고, AWGN 잡음은 $E\{n_k\} = 0$ 이다. 식 (3)에 의해

$$E\{\hat{b}_k\} = E\{b_k\} \quad (5)$$

이므로 추정된 A 는 $-2\{\hat{b}_k\}$ 가 된다.

IV. 실험 결과

1. 모의실험을 통한 등화기 분석

제안한 등화기의 성능을 분석하고 검증하기 위해서 변수 A 에 다양한 값을 적용시켜 raw BER를 측정해 보았다. 비트 패턴은 임의로 생성된 10^7 개의 심벌을 사용하였다. 여기서는 어떤 부호화 방식도 사용하지 않았다. 선형 채널을 구성하는 FIR 필터는 20개의 필터 계수 h_k 를 갖는 윈도우 방식의 low-pass FIR 필터를 사용하였다. 이 FIR 필터의 진폭 스펙트럼은 그림 3에 도시되어 있다. 모의실험에서는 SNR(signal to noise ratio)을 0 dB에서 40 dB까지 2 dB씩 증가하면서 실험하였다.

등화기에서는 선형 채널인 FIR 필터를 등화하기 위해 20 tap을 사용하는 역 필터 h_k^{-1} 를 0.95의 forgetting factor를 가지는 RLS 알고리즘으로 추정하여 사용하였다. 그림 4는 매개변수 A 가 -1.71 , 1.80 , -0.5 그리고 0일 때 SNR에 따른 raw BER 곡선을 보여준다. $A = 0$

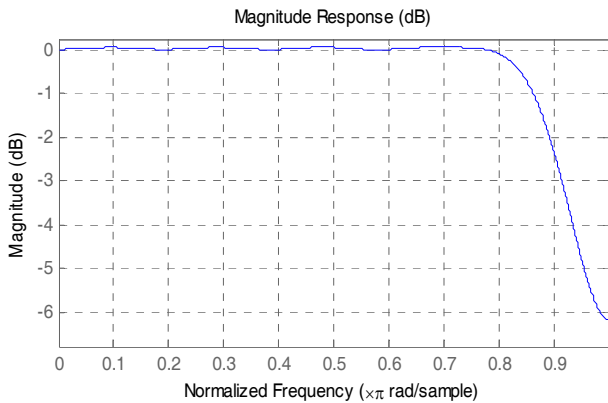


그림 3. 채널 필터의 주파수 응답
Fig. 3. Frequency response of the channel filter.

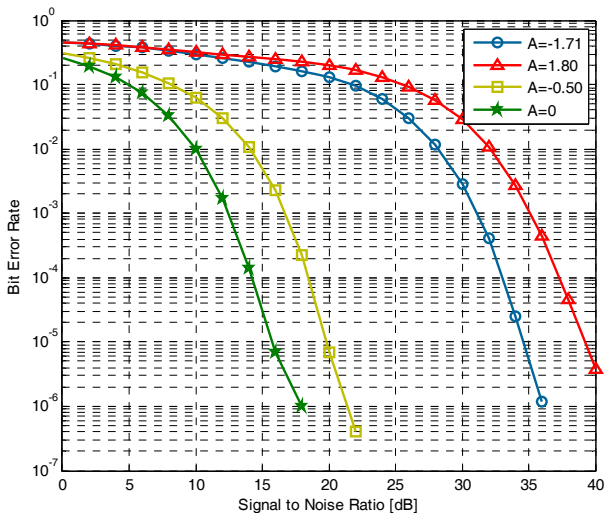


그림 4. 알려진 매개변수 A로부터의 BER과 SNR
Fig. 4. BER vs SNR from known parameter A .

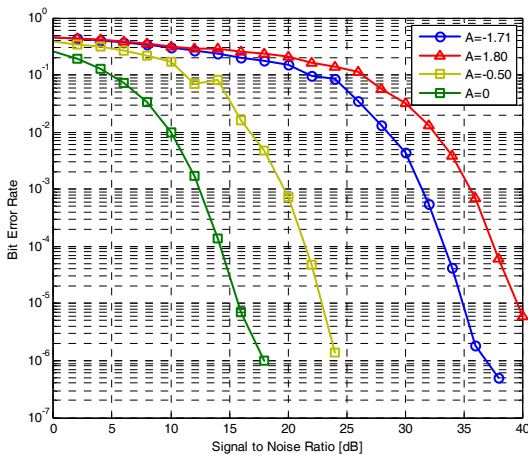


그림 5. 추정된 매개변수 A에서의 BER과 SNR
Fig. 5. BER vs SNR for estimated parameters A.

인 경우 $b_k = a_k$ 로 비대칭이 적용되지 않으므로 채널은 선형 채널이 된다. $|A|$ 가 증가할수록 비대칭성이 높아지며 더 심각한 비선형성을 보인다. 그러므로 $|A|$ 가 클 때 BER이 감소된다. 그림 4는 매개변수 A 을 알고 있을 때 등화성능으로 $|A|$ 가 클수록 BER이 나뉘어 보여준다.

그림 5는 추정된 매개변수 A 에 관한 SNR에 따른 raw BER 곡선을 나타낸다. SNR이 좋을수록 추정된 A 값으로 구한 BER과 알려진 A 로 구한 BER이 약간의 편차를 보인다. 그림 5의 결과를 그림 4와 비교하면 A 를 추정하는 등화기는 A 가 -0.5 일 때 3 dB 감소하고, A 가 $-1.71, 1.80$ 일 때 1 dB 감소한다.

2. 실제 데이터에 등화기 적용

제안하는 등화기를 super-RENS read-out 신호 샘플에 적용하였다. 실험에 사용된 super-RENS read-out 신호를 얻기 위한 매체의 물리적 조건은 다음과 같다. 사용된 비트 패턴은 (1,7) RLL (run-length-limited) 코드로 부호화된 결과이며 read-out 신호는 500 Msps로 샘플링되었다^[16-17]. 디스크 특성은 표 2에 요약되어 있다. 디스크에서 2T pit의 길이는 80 nm이며, 이는 12

표 2. 디스크 특성의 요약
Table 2. Summary for the disc properties.

Numerical aperture (NA)	0.85
Disc	Blu-ray disc
Recording layer	ZnS-SiO ₂ /InSb/ZnS-SiO ₂
Diameter (cm)	12
Cover later (nm)	0.1
Track pitch (nm)	320
Laser wavelength (nm)	405

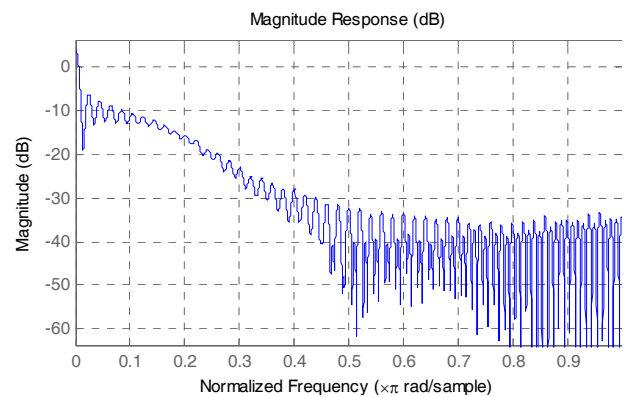


그림 6. 추정된 FIR 필터의 주파수 응답
Fig. 6. Frequency response of the estimated FIR filter.

cm 디스크에서 대략 46G Byte의 용량에 저장할 수 있다. 한 프레임은 9186 심벌(marks+spaces)로 구성된다. 레이저 전력은 약 1.3 mW이며 이 때 CNR (carrier-to-noise ratio)는 대략 37 dB이다. 데이터 조건에 대한 세부내용은 참고문헌 [18]에 나타나 있다.

채널 분석에서 251 tap의 FIR 필터 h_k 를 추정하였고, read-out 신호 r_k 사용하여 비대칭 심벌 b_k 를 구하였다^[14]. 251 tap을 가지는 역필터 h_k^{-1} 를 찾기 위해서 Wiener 역필터 디자인을 활용하였다^[19-20]. 그림 6은 추정된 FIR 필터의 주파수 스펙트럼이다. 이는 매개변수 A 를 -1.71 로 결정하였을 때의 결과로 측정된 read-out 신호와 모델링 결과와의 MSE(mean square error)가 이때 최소화 되었다^[14]. 그래서 이 결과로 등화기를 설계하였다. 측정된 read-out 신호의 패턴 수는 57,815이다. 결과적으로 raw BER이 0.042로 측정되었고, 이는 canonical piecewise linear model에 기반한 등화기의 성능과 유사하며, SCPWL 등화기보다는 성능이 나빴다.

V. 결 론

본 연구에서는 측정된 super-RENS read-out 신호에 있는 domain bloom 현상을 등화 할 수 있는 등화기를 제안하였다. 이를 위해 비선형 채널을 비대칭 심벌과 선형 채널로 모델링하였다. 여기서 비대칭 심벌은 비트 패턴으로부터 변환하고 FIR 필터로 선형 채널을 구현하였다. 원래의 비트 패턴을 복원하기 위해서 등화기는 FIR 필터의 역필터를 구하였고 그 결과를 심벌 변환 방식을 적용한 색인표를 참조하여 비트를 판별하였다.

모의실험 결과에 따르면 $|A|$ 가 증가할수록 비대칭의 정도는 커지며, BER은 감소되었다. 수신 신호 r_k 의 파형을 분석하면 심각한 신호의 왜곡 상황에서도 쉽게 매개변수 A 를 추정할 수 있고, 비트 패턴들을 판별할 수 있다. 매개변수 A 를 알고 있을 때, 그 A 로 등화한 결과와 추정된 A 로 등화한 결과를 비교하면 BER 성능은 추정된 A 로 구한 결과가 3 dB 나쁘다. 그리고 제안하는 등화기를 super-RENS read-out 신호 샘플들을 이용해 검증하였다. 실험결과는 canonical piecewise linear 등화기와 비슷한 결과가 관찰되었고, 등화기의 구조는 그보다 간단하다. 실제 응용에서는 코딩 방식 등에서 더 많은 연구가 필요하다.

REFERENCES

- [1] L. Huang, G. Mathew, and T. Chong, "Channel Modeling and Target Design for Two-Dimensional Optical Storage Systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 8, pp. 2414-2424, Aug. 2005.
- [2] N. Takamori, M. Yamamoto, G. Mori, H. Tajima, K. Kojima, and A. Takahashi, "Energy Gap induced Super-Resolution (EG-SR) ROM Disc with High Readout Stability," *ISOM/ODS'05 Tech Dig.*, ThC1., 2005.
- [3] M. Kagawa, J. Nakano, T. Abiko, and S. Igarashi, "A Study of Asymmetry Compensation for Partial-Response Maximum-Likelihood Detection in Optical Recording Media," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 2214-2216, Apr. 1998.
- [4] J. Tominaga, T. Nakano, and N. Atoda, "An approach for recording and readout beyond the diffraction limit with an Sb thin film," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 73, no. 15, pp. 2078-2080, Oct. 1998.
- [5] T. Nakano, A. Sato, H. Fuji, J. Tominaga, and N. Atoda, "Transmitted signal detection of optical disks with a superresolution near-field structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 2, pp. 151-153, May. 1999.
- [6] J. Tominaga, T. Shima, M. Kuwahara, T. Fukaya, A. Kolobov, and T. Nakano, "Ferroelectric catastrophe: Beyond nanometre-scale optical resolution," *Nanotechnology*, vol. 15, no. 5, pp. 411-415, May 2004.
- [7] J. Kim, I. Hwang, H. Kim, I. Park, and J. Tominaga, "Signal Characteristics of Super-Resolution Near-Field Structure Disks with 100 GB Capacity," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 44, pp. 3609-3611, May. 2005.
- [8] W. Moon, S. Park, and S. Im, "Application of the CS-based Sparse Volterra Filter to the Super-RENS Disc Channel Modeling," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 49, no. 5, pp. 354-360, May 2012.
- [9] M. Seo, S. Im, and J. Lee, "Nonlinear Equalization for Super-Resolution Near-Field Structure Discs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, pp. 6045-6047, Jul. 2008.
- [10] T. Maeda, H. Minemura, and T. Shimano, "Nonlinear Components in Optical Disk Signals: Analysis and Compensation," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, no. 2, pp. 992-996, Feb. 2005.
- [11] M. Seo, S. Jeon, and S. Im, "Nonlinear Modeling of Super-RENS Disc Systems Using a SCPWL

- Model,” Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 47, no. 12, pp. 1005-1011, Dec. 2010.
- [12] M. Seo, S. Jeon, and S. Im, “Nonlinear Equalization for Super-Resolution Near-Field Structure Discs Using a Simplicial Canonical Piecewise-Linear Model,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 9, pp. 09MB04, Sep. 2011.
- [13] H. Pozidis, J. W. M. Bergmans, and W. M. J. Coene, “Modeling and Compensation of Asymmetry in Optical Recording,” *IEEE Trans. Comm.*, vol. 50, pp. 2052-2063, Dec. 2002.
- [14] S. Im, S. Park and W. Moon, “Domain Bloom in Super-Resolution Near-Field Structure Read-Out Signals,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 9, pp. 09LE01, Sep. 2013.
- [15] S. Haykin, *Adaptive Filter Theory, 4th ed.*, Prentice Hall, pp. 436-463, 2002.
- [16] M. Kim, K. Ok, and J. Lee, “Performance Comparison of Detection Methods in Magneto-optical Disc System with (1, 7) RLL Code,” *Proc. IEEE GOLBECOM'95*, pp. 1389-1393, 1995.
- [17] R. Lynch, Jr., “Channels and Codes for Magneto-optical Recording,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 57-72, Jan. 1992.
- [18] B. Hyot, F. Laulagnet, O. Lemonnier, and A. Fargeix, “Super-Resolution ROM Disc with a Semi-Conductive InSb Active Layer,” *ISOM'07 Tech. Dig.*, Mo-B-04, 2007.
- [19] M. H. Hayes, *Statistical Digital Signal Processing and Modeling, 1st ed.*, Willey, pp. 335-353, 1996.
- [20] M. Schetzen, “Nonlinear system modeling based on the Wiener theory,” *Proc. IEEE*, vol. 69, no. 12, pp. 1557-1573, Dec. 1981.

저 자 소 개



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

<주관심분야 : 적응 신호처리, 채널 모델링, 통신 시스템, 비선형 신호처리>



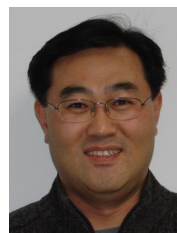
박 세 황(학생회원)
2012년 숭실대학교
정보통신전자공학부 학사
2014년 숭실대학교
정보통신공학과 석사

<주관심분야 : 위성 통신, 레이더>



이 지 은(학생회원)
2003년 숭실대학교 정보통신전자
공학부 학사
2004년~2007년 GE Ultrasound
Korea
2012년 숭실대학교 정보통신
공학과 석사

2010년~현재 숭실대학교 전자공학과 박사 과정
<주관심분야 : 수중음향 영상처리, 수중음향 신호
처리>



임 성 빈(정회원)
1986년 서울대학교
전자공학과 학사
1988년 서울대학교
전자공학과 석사
1994년 Univ. of Texas at Austin
전기및컴퓨터공학과 박사
1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부
정교수

<주관심분야 : 비선형 신호처리, 통신 시스템, 디
지털 방송 시스템>