

논문 2010-47TC-12-4

SCPWL 모델을 이용한 Super-RENS 디스크 시스템의 비선형 모델링

(Nonlinear Modeling of Super-RENS Disc Systems Using a SCPWL Model)

서 만 중*, 전 석 훈*, 임 성 빙**

(Manjung Seo, Seokhun Jeon, and Sungbin Im)

요 약

Super-RENS (Super-Resolution Near-field Structure) 디스크 시스템은 BD (Blu-ray Disc) 이후의 차세대 광 기록 저장 시스템의 유망한 후보이다. 따라서 super-RENS 시스템을 위한 등화기 개발과 성능 분석을 위해 정확하고 신뢰성 있는 채널 모델은 매우 중요하다. 본 논문에서는 super-RENS 시스템의 모델링을 위해 SCPWL (Simplicial Canonical Piecewise-Linear) 모델을 적용하고자 한다. Super-RENS 디스크로부터 획득한 RF 신호 샘플들을 사용하여 모의실험을 수행한 결과, super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 SCPWL 모델이 효과적으로 활용될 수 있다는 것을 확인하였다.

Abstract

The super-resolution near-field structure (super-RENS) disc system is the most promising one for next-generation optical data storage systems to succeed the Blu-ray disc (BD). In this paper, we apply the simplicial canonical piecewise-linear (SCPWL) model to modeling super-RENS read-out signals since reliable and accurate channel modeling is essential for performance analysis and development of equalizers for super-RENS systems. The validity of this model is verified using radio frequency (RF) signal samples obtained from a super-RENS disc. The experiment results on modeling indicate that the SCPWL model can be efficiently utilized for the nonlinear modeling of the super-RENS systems.

Keywords: super-RENS, SCPWL model, nonlinear modeling, nonlinearity

I. 서 론

광 디스크는 소형, 높은 신뢰도, 고속의 접근성, 비트당 저렴한 가격 등의 특성 때문에 음성, 데이터, 영상 등 대용량의 각종 정보를 기록한 멀티미디어 환경에 적합한 미디어로 크게 각광 받고 있다. 광 디스크의 용량 증가는 표 1과 같이 주로 레이저 광원의 단파장화와 대

물렌즈의 개구수 (Numerical Aperture; NA) 증대를 통한 빔 사이즈의 감소에 의해 보다 작은 마크를 기록/재생할 수 있게 해서 밀도를 증가시키는 방법을 사용해왔다. 그러나 현재 가장 고밀도를 갖는 BD (Blu-ray Disc)의 경우에 파장이 405nm이고 NA가 0.85로 BD에서 사용하는 가장 짧은 마크의 길이가 150nm로 이미 회절한계 근처이다^[1]. 따라서 BD 이후의 대용량 광 디스크를 위해서는 파장을 짧게 하고 NA를 키워야 하는데 현재의 레이저 다이오드와 렌즈의 개구수, 커버층의 광학적 특성 등의 기술 한계를 고려하면 차후 얼마동안은 이의 기술발달이 이루어지기 어렵다고 보여진다.

선진 연구 기관들은 BD 이후에 100GB 이상의 대용

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

※ 이 논문은 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로
한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(2010-0015959)

접수일자: 2009년9월17일, 수정완료일: 2010년12월10일

량 저장이 가능한 차세대 광 저장장치 시스템으로 NFR (Near-Field Recording), 홀로그래픽 데이터 저장 시스템 (Holographic Data Storage System; HDSS), super-RENS (Super-Resolution Near field Structure) 디스크 시스템 개발에 힘쓰고 있다. 이러한 차세대 광 저장장치의 후보들 중 본 논문에서 다루고자 하는 super-RENS 디스크 시스템은 분해능보다 작은 마크를 기록/재생하는 기술인 초해상 기술과 동일한 과정의 광원을 사용하면서도 광초점의 크기를 줄여서 광 디스크의 기록 용량을 증가시키는 근접장 기술로 이루어져 있다^[2~5].

Super-RENS 기술은 광 디스크 내부에서의 초해상 현상을 이용하기 때문에 드라이브 구조를 변경하지 않으면서도 앞서 언급한 용량증가를 위한 한계를 극복할 수 있고, 또한 디스크의 출납이 가능하기 때문에 sub-tera byte급의 용량을 얻을 수 있는 유망한 후보 기술로 인식되고 있다^[6]. 이러한 super-RENS 기술을 연구하는데 있어 가장 기초가 되는 것은 기록 채널 분석 및 시스템 모델링이다. 신뢰성 있는 채널 모델은 다양한 데이터 검출 알고리즘의 성능 확인에 중요한 척도가 되므로 정확한 모델링이 요구되며, 추정된 채널 모델을 기반으로 이에 적합한 변조 코딩 및 에러 정정 부호 기술이 사용되어야 한다.

이에 본 논문에서는 참고문헌 [7]에서 실시한 super-RENS 디스크의 재생신호에 대한 bicoherence 테스트 결과를 기반으로 super-RENS 디스크 시스템의 비선형 모델링을 위해 SCPWL (Simplicial Canonical Piecewise-Linear) 모델을 적용하여 그 활용여부를 실험하고자 한다. Super-RENS 시스템의 모델링을 위해 본 논문에서 고려하는 SCPWL 모델은 비선형 시스템

표 1. 광 디스크의 종류 및 파라미터

Table 1. The types and their parameters of the optical discs.

	CD	DVD	BD	HD-DVD	super-RENS
Capacity	0.68 GB	4.7 GB	23~27 GB	15~20 GB	100 GB 이상
Wavelength	780nm	650nm	405nm	405nm	405nm
NA	0.45	0.6	0.85	0.65	0.85

을 분석하는데 있어 회로의 동작영역을 여러 개의 구간으로 나누고, 각 구간에서의 비선형 특성을 선형 함수로 표현하여 처리함으로써, 하드웨어 측면에서 구현이 용이하다. 또한 일반적인 비선형 방정식보다 계산적인 측면에서 뿐만 아니라 메모리 효율성에서도 매우 유용하다^[8].

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 서론에 이어 II장에서는 본 논문에서 고려하는 SCPWL 모델에 대하여 살펴본다. III장에서는 비선형 채널 모델링을 위해 SCPWL 모델을 적용하여 성능을 평가하고, 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. Simplicial Canonical Piecewise-Linear 모델

1. SCPWL 적용 필터

그림 1은 본 논문에서 고려하는 SCPWL 적용 필터의 구조를 나타낸 것으로 전단에 위치한 선형 부분은 식 (1)과 같이 N 차 FIR (Finite Impulse Response) 필터로 구현할 수 있다.

$$v(k) = \sum_{i=0}^N h_i x(k-i) = h^T x(k) \quad (1)$$

여기서, $h = [h_0 \ h_1 \ \dots \ h_{N-1}]^T$ 는 FIR 필터의 계수 벡터를 나타내고, $x(k)$ 는 입력 비트 패턴 벡터를 의미한다. 후단에 위치한 SCPWL 함수는 다음과 같이 표현될 수 있다^[8].

$$f(v(k)) = c_0 + \sum_{i=1}^{\sigma-1} c_i A(v(k)) \quad (2)$$

식 (2)를 벡터형태로 나타내면 다음과 같다.

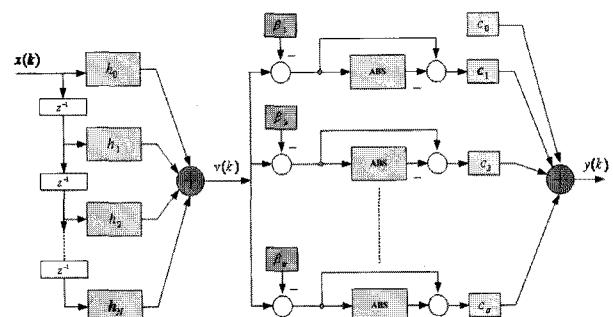


그림 1. SCPWL 적용 필터의 구조

Fig. 1. Structure of the SCPWL adaptive filter.

$$f(v(k)) = c^T \Lambda(v) \quad (3)$$

여기서, σ 는 입력 공간을 몇 개로 나눌 것인지를 사전에 정의한 분할 수이고, $c = [c_0 \ c_1 \ c_2 \cdots \ c_\sigma]^T$ 는 SCPWL 적용 필터의 계수 벡터를 나타낸다. 그리고 $\Lambda(v) = [1 \ \Lambda_1(v(k)) \cdots \ \Lambda_\sigma(v(k))]^T$ 는 기저함수 벡터를 나타내는 것으로 기저함수 $\Lambda_i(v(k))$ 는 식 (4)와 같이 주어진다^[8~9].

$$\Lambda_i(v(k)) = \begin{cases} \frac{1}{2}(v(k) - \beta_i + |v(k) - \beta_i|), & v \leq \beta_\sigma \\ \frac{1}{2}(\beta_\sigma - \beta_i + |\beta_\sigma - \beta_i|), & v > \beta_\sigma \end{cases} \quad (4)$$

여기서, β_i , $(1, \dots, \sigma)$ 는 미리 정의된 i 번째 분할 지점을 나타내고, $\beta_1 \leq \beta_2 \leq \dots \leq \beta_\sigma$ 와 같이 동일한 크기의 영역으로 분할되어야 한다.

식 (1)을 식 (3)에 대입하면 SCPWL 적용 필터의 출력은 다음과 같다.

$$y(k) = c^T \Lambda(h^T x(k)) \quad (5)$$

2. SCPWL 모델을 위한 LMS 기반의 알고리즘

SCPWL 모델의 계수들은 식 (6), (7)과 같은 LMS (Least Mean Square) 기반의 알고리즘을 통해 각각 업데이트 된다.

$$h(k+1) = h(k) + \mu_h \left(c^T \frac{\partial \Lambda(v)}{\partial v} \right) x(k) e(k) \quad (6)$$

$$c(k+1) = c(k) + \mu_c \Lambda(v) e(k) \quad (7)$$

여기서, $e(k)$ 는 추정하고자 하는 RF 신호 $d(k)$ 와 모델의 출력 신호 $y(k)$ 의 오차를 나타낸다. 그리고 μ_h 와 μ_c 는 각각 SCPWL 모델의 계수 h , c 와 관련된 스텝사이즈를 의미한다.

식 (6)에서 정의된 $[\cdot]_j$ 는 벡터의 j 번째 성분으로 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\left[\frac{\partial \Lambda(v)}{\partial v} \right]_1 = 0$$

$$\left[\frac{\partial \Lambda(v)}{\partial v} \right]_{j+1} = \begin{cases} \frac{1}{2}(1 + sign(v - \beta_j)), & v \leq \beta_\sigma \\ 0, & v > \beta_\sigma \end{cases} \quad (8)$$

for $j = 1, \dots, \sigma$

스텝사이즈 μ_h 와 μ_c 의 범위는 각각 식 (9), (10)과 같

으며^[10], 앞서 설명한 SCPWL 적용 필터의 알고리즘을 표 2에 정리하였다.

$$0 < \mu_h < \frac{1}{\left(\sum_{i=2}^{\sigma+1} c_i^2 \right) \lambda_{\max}} \quad (9)$$

$$0 < \mu_c < \frac{1}{\left(1 + \sum_{i=1}^{\sigma-1} (\beta_\sigma - \beta_i)^2 \right)} \quad (10)$$

표 2. 제안된 알고리즘의 요약

Table 2. Summary of the proposed algorithm.

Definitions :

$y(k)$: SCPWL adaptive filter output

$e(k)$: error signal

$v(k)$: linear filter output

Parameters :

σ : number of predefined partition points

μ_h : step size related to h coefficients

μ_c : step size related to c coefficients

Data :

$x(k)$: input bit pattern

$d(k)$: target RF signal

Initialization :

$h(0) = 0$

$c(0) = [-1 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 0 \ 0]^T$

For each k , $k = 1, 2, \dots$

$v(k) = h^T(k)x(k)$

$y(k) = c^T(k)\Lambda[v]$

$e(k) = d(k) - y(k)$

$h(k+1) = h(k) + \mu_h c^T(k) \frac{\partial \Lambda[v]}{\partial v} x(k) e(k)$

$c(k+1) = c(k) + \mu_c \Lambda[v] e(k)$

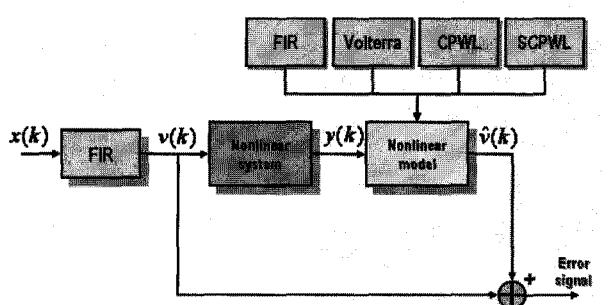


그림 2. SCPWL 모델의 성능 평가를 위한 실험 구성도

Fig. 2. Block diagram of the experiment setup for performance evaluation of the SCPWL model.

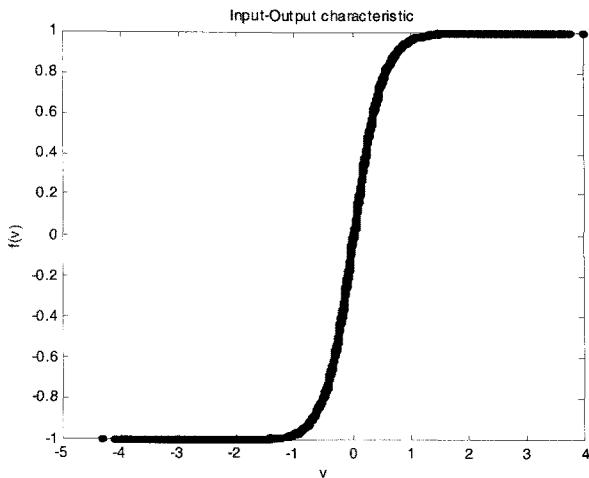


그림 3. 비선형 시스템의 입출력 특성

Fig. 3. Input-output characteristic of the nonlinear system.

여기서, λ_{\max} 는 $R_x = E[xx^T]$ 의 최대 고유값을 나타낸다.

3. SCPWL 모델의 성능평가

그림 2는 SCPWL 모델의 성능을 평가하기 위한 실험 구성도를 나타낸 것으로 선형 FIR (30 tap), 2차 볼테라 (Volterra) 모델, CPWL 모델 ($\sigma = 3$)과의 비교 실험을 수행하였다^[10]. 본 실험에서 추정하고자 하는 신호 $v(k)$ 는 식 (11)과 같이 7차 FIR 필터를 통해 얻어지며 비선형 시스템의 출력신호 $y(k)$ 는 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} v(k) = & 0.06 \times x(k) + 0.1 \times x(k-1) \\ & + 0.22 \times x(k-2) + x(k-3) \\ & + 0.27 \times x(k-4) + 0.13 \times x(k-5) \\ & + 0.08 \times x(k-6) + 0.07 \times x(k-7) \end{aligned} \quad (11)$$

$$y(k) = \frac{e^{v/0.25} - 1}{e^{v/0.25} + 1} \quad (12)$$

그림 3은 본 실험에서 사용된 비선형 시스템의 입출력 특성을 나타낸다. 그림 4는 실험에 사용된 모델들의

표 3. 각 모델들에서 사용된 파라미터의 수
Table 3. Total number of parameters for each model used in the comparisons.

Volterra	FIR	CPWL	SCPWL
135	30	11 ($\sigma = 3$)	14 ($\sigma = 2$) 20 ($\sigma = 8$)

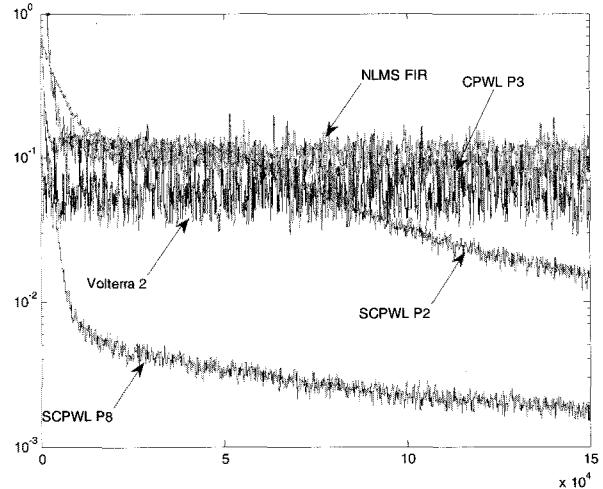


그림 4. MSE 특성 곡선의 비교

(FIR, Volterra, CPWL, SCPWL)

Fig. 4. Comparison of the MSE learning curves.
(FIR, Volterra, CPWL, SCPWL)

MSE (Mean Square Error) 비교한 것으로 SCPWL 모델의 스텝사이즈 μ_h 와 μ_c 는 각각 0.005와 0.01이고, $\sigma = 2, 8$ 로 설정하였다. 그림 4와 표 3에서 알 수 있듯이 SCPWL 모델이 비교적 적은 수의 파라미터를 가지고 가장 빠르게 수렴하는 것을 알 수 있다.

III. 모의실험 및 결과

그림 5는 super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위한 실험 구조를 나타낸 것으로 랜덤하게 발생시킨 2진 비트 패턴이 SCPWL 모델을 통과한 후 super-RENS 시스템을 통해 출력된 RF 신호와의 비교

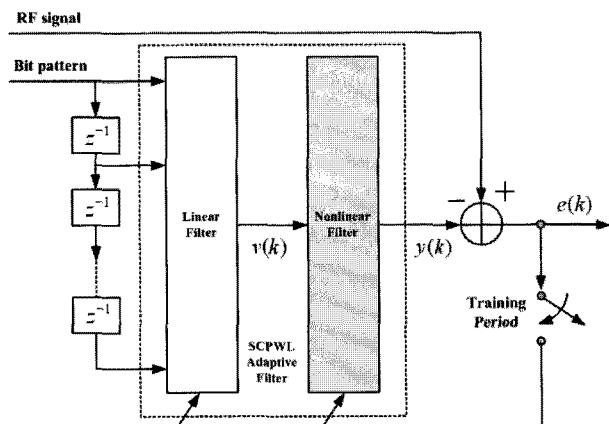


그림 5. 모델링을 위한 실험 구조

Fig. 5. Block diagram of the experiment setup for modeling.

표 4. 디스크의 특성

Table 4. Summary of the disc properties.

Disc	BD (Blu-ray)
Diameter	12cm
Laser wavelength	405nm
NA	0.85
Frame length	9186 symbols (marks+spaces)
Sampling rate	500MHz (2ns/bit)
Data coding	(1, 7) RLL

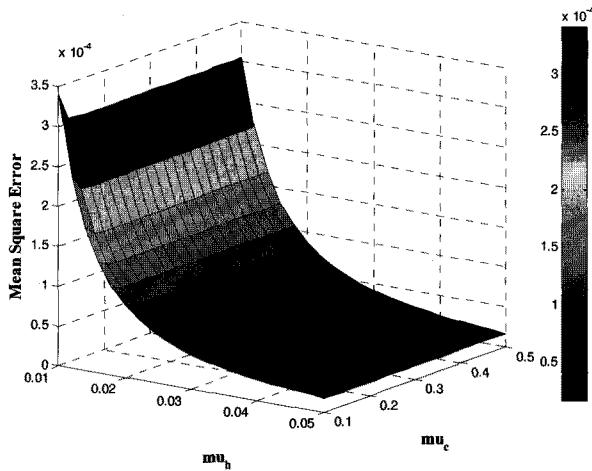


그림 6. 다양한 스텝사이즈에 따른 MSE 특성

Fig. 6. MSE characteristic according to various step sizes.

를 통해 오차 신호를 생성한다. 그리고 생성된 오차 신호를 사용하여 SCPWL 모델의 계수 값을 계속적으로 업데이트하여 RF 신호를 추정하는 것이다. 본 실험에서 사용한 디스크의 특성은 표 4와 같다^[11].

그림 6은 SCPWL 모델의 스텝사이즈에 따른 MSE 특성을 나타낸 것이다. 사전에 정의된 입력 공간의 분할 수는 8이고, 입력 지연은 10으로 설정하였으며, 스텝 사이즈 μ_h 와 μ_c 의 범위를 각각 0.01~0.05와 0.1~0.5로 변화시켜가며 3000 샘플 단위로 MSE를 측정한 결과 μ_h 가 증가함에 따라 MSE가 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 μ_c 는 MSE의 변화에 별다른 영향을 주지 않았다.

그림 7은 SCPWL 모델의 입력 공간의 분할 수를 2~8로 변화시켜가며 3000 샘플 단위로 MSE를 측정한 것이다. 그림에서 나타낸 것처럼 입력 공간의 분할 수가 증가함에 따라 MSE가 감소하는 것을 알 수 있으며

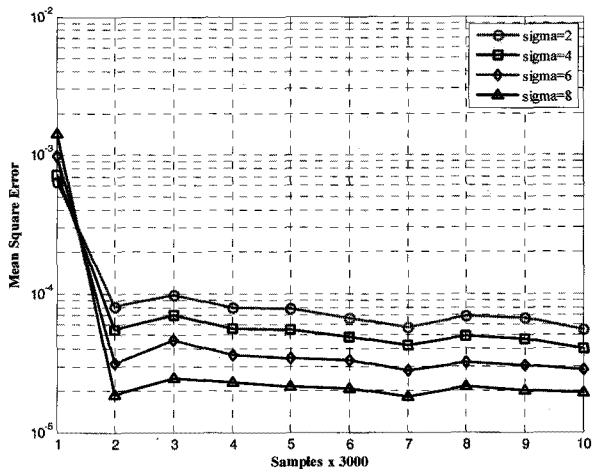


그림 7. σ에 따른 MSE 특성 곡선

Fig. 7. MSE learning curves according to the number of partitions.

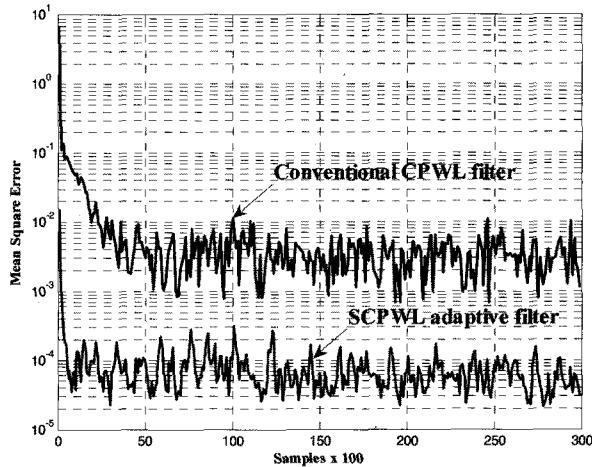


그림 8. MSE 특성 곡선의 비교

Fig. 8. Comparison of the MSE learning curves.

이때, 원신호인 RF 신호와의 최소 오차는 약 1.85×10^{-5} 으로 나타났다. 그림 8은 입력 공간의 분할 수 ($\sigma = 2$)를 동일하게 설정하였을 때, 기존의 CPWL 모델^[12]과 SCPWL 모델과의 MSE를 100 샘플 단위로 측정하여 비교한 것으로 CPWL 모델의 경우 원신호인 RF 신호와의 MSE가 약 3×10^{-3} 이고, SCPWL 모델의 MSE가 약 5.5×10^{-5} 으로 SCPWL 모델이 더 우수한 성능을 나타내었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 SCPWL 모델을 적용하였다. 다양한 비선형 모

델들과의 성능 비교를 통해 SCPWL 모델이 적은 수의 파라미터를 가지고 우수한 모델링 성능을 나타냄을 확인하였고, super-RENS 디스크로부터 획득한 RF 신호 샘플들을 사용하여 SCPWL 모델의 스텝사이즈와 입력 공간의 분할 수를 변화시켜가며 모의실험을 수행한 결과, super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 SCPWL 모델이 매우 유용하게 활용될 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, 비선형 모델링을 통해 획득한 정보를 super-RENS 시스템에 존재하는 비선형 왜곡에 의한 심볼간 간섭을 억제하고 신호의 품질을 개선하기 위한 등화기 개발에 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] <http://www.blu-raydisc.com/en.html>
- [2] 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.
- [3] 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, Jul. 1999.
- [4] D. P. Tsai, and W. C. Lin, "Probing the near fields of the super-resolution near-field optical structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 10, pp. 1413–1415, Sep. 2000.
- [5] T. Kikukawa, T. Nakano, T. Shima, and J. Tominaga, "Rigid bubble pit formation and huge signal enhancement in super-resolution near-field structure disk with platinum-oxide layer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 81, no. 25, pp. 4697–4699, Dec. 2002.
- [6] 김주호, 황인오, 김현기, 윤두섭, 박인식, "Optical Memory Disc Using Super-resolution Phenomenon of Super-RENS Technology," *Optical Society of Korea Annual Meeting 2004*, pp. 248–251, Feb. 2004.
- [7] M. Seo, S. Im, and J. Lee, "Nonlinear Equalization for Super-Resolution Near-Field Structure Discs," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 47, no. 7, pp. 6045–6047, Jul. 2008.
- [8] J. L. Figueroa, J. E. Cousseau, and R. J. P. de Figueiredo, "A low complexity simplicial canonical piece-wise linear adaptive filter," *Circ. Syst., Signal Process. J.*, vol. 23, pp. 365–386, Oct. 2004.
- [9] P. Julian, A. Desages, and O. Agamennoni, "High level canonical piecewise linear representation using a simplicial partition," *IEEE Trans. Circuits Syst. Part I*, vol. 46, pp. 463–480, Apr. 1999.
- [10] J. N. Lin and R. Unbehauen, "Adaptive nonlinear digital filter with canonical piecewise-linear structure," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. 37, pp. 347–353, 1990.
- [11] B. Hyot, F. Laulagnet, O. Lemonnier, and A. Fargeix, "Super-Resolution ROM Disc with a Semi-Conductive InSb Active Layer," *Tech. Dig. ISOM'07*, Mo-B-04, Oct. 2007.
- [12] M. Seo, H. Shim, S. Im, and C. Kim, "Nonlinear Modeling and Equalization of Super-Resolution Near-Field Structure Discs Using a Canonical Piecewise-Linear Model," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 8, pp. 08KE03-1–08KE03-5, Aug. 2010.

저자소개



서 만 중(학생회원)
 2005년 한국교육개발원
 정보통신공학과 학사
 2007년 송실대학교
 정보통신공학과 석사
 2007년~현재 송실대학교
 정보통신공학과
 박사과정 재학중

<주관심분야 : OFDM PAPR 감소기법, 디지털
 사전왜곡기법, Super-RENS 시스템, 비선형 신호
 처리>



전 석 훈(학생회원)
 2010년 송실대학교
 정보통신전자공학부 학사
 2010년~현재 송실대학교
 정보통신공학과
 석사과정 재학중

<주관심분야 : 비선형 신호처리, FPGA>



임 성 빙(정회원)
 1986년 서울대학교
 전자공학과 학사
 1988년 서울대학교
 전자공학과 석사
 1994년 University of Texas at
 Austin 전기 및 컴퓨터
 공학과 박사
 1995년~현재 송실대학교 정보통신전자공학부
 정교수

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