

논문 2010-47TC-2-3

정규 구간선형 모델과 볼테라 모델을 기반한 Super-RENS 시스템 모델링 및 등화

(Modeling and Equalization for Super-RENS Systems Based on the
Canonical Piecewise-Linear and Volterra Models)

서만중*, 심희성*, 임성빈**

(Manjung Seo, Heesung Shim, and Sungbin Im)

요약

신뢰성 있는 채널 모델은 다양한 데이터 검출 알고리즘의 개발과 성능 평가에 중요한 척도가 되므로 정확한 모델링이 요구된다. 본 논문에서는 Super-RENS (Super-Resolution Near-field Structure) 시스템의 비선형 모델링을 위해 정규 구간선형 모델 (canonical piecewise-linear; PWL)과 2차 볼테라 (second-order Volterra) 모델을 적용하고자 한다. 또한 이를 바탕으로 비선형 심볼간 간섭 (Inter-Symbol Interference; ISI)을 제거하기 위해 새로운 비선형 등화기를 제안한다. Super-RENS 디스크로부터 획득한 RF 신호 샘플들을 사용하여 모의실험을 수행한 결과, Super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델이 유용하게 활용될 수 있다는 가능성을 확인하였고, 제안된 비선형 등화기의 성능은 비트오율 측면에서 등화기가 없는 경우보다 우수한 성능을 나타내었다.

Abstract

A correct and accurate model of optical data storage systems is very important in development and performance evaluation of various data detection algorithms. In this paper, we present a nonlinear modeling scheme of a super-resolution near-field structure (Super-RENS) read-out signal using the canonical piecewise-linear (PWL) and the second-order Volterra models. Nonlinear equalizers may be developed on the basis of the information obtained from this nonlinear modeling. To mitigate the nonlinear inter-symbol interference (ISI), we proposed a new nonlinear equalizer for Super-RENS discs. Its validity is tested with the RF signal samples obtained from a Super-RENS disc. The experiment results verified the possibility that the canonical PWL and the second-order Volterra models can be utilized for nonlinear modeling of Super-RENS systems. The proposed equalizers are superior to the one without equalization in terms of bit error rate (BER).

Keywords : Super-RENS, canonical PWL, Volterra, nonlinearity, equalizer

I. 서론

최근 들어, 광 기록 저장 시스템을 위한 다양한 기록

방식들이 연구되고 있다. 멀티미디어 환경에 적합한 미디어로 광디스크가 크게 각광 받고 있는 가운데 현재 선진 연구 기관들은 BD (Blu-ray Disc)^[1] 이후에 100GB 이상의 대용량 저장이 가능한 광 저장 기술의 관점에서 동일한 파장의 광원을 사용하면서도 광 초점의 크기를 줄여서 광디스크의 기록 용량을 증가시키는 기술로서 근접장 (near field) 광메모리 기술에 주목하고 있다. 홀로그래프 디스크와 함께 차세대 광디스크 기술로 떠오르는 Super-RENS (Super-Resolution Near field Structure)는 이러한 초해상 기술과 근접장 기술로

* 학생회원, ** 평생회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부

(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2009-0071811)

접수일자: 2009년12월16일, 수정완료일: 2010년2월17일

이루어져 있다^[2~4]. Super-RENS 기술은 광디스크 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^[5]. 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 Super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 정규 구간선형 (canonical piecewise-linear) 모델과 2차 볼테라 (second-order Volterra) 모델을 적용하여 그 활용여부를 실험하고자 한다. 또한 참고문헌 [6]에서 실시한 Super-RENS 디스크의 재생신호에 대한 bicoherence 테스트 결과를 살펴보면 Super-RENS 재생신호의 bicoherence 추정치가 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 Super-RENS 디스크에 비선형성이 존재함을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 Super-RENS 디스크에 존재하는 비선형 왜곡에 의한 심볼간 간섭 (Inter-Symbol Interference; ISI)을 억제하고 신호의 품질을 개선하기 위해 비선형 모델링의 실험 결과를 바탕으로 새로운 비선형 등화기를 제안한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되었다. 서론에 이어 II장에서는 본 논문에서 고려하는 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델에 대하여 간략히 설명하고 III장에서는 비선형 채널 모델링을 위해 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델을 적용하여 성능을 평가한다. IV장에서는 비선형 채널 모델링의 결과를 바탕으로 제안된 비선형 등화기의 성능을 평가하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델

1. 정규 구간선형 모델

정규 구간선형 모델은 전자 장비와 회로 모델링 등 비선형 시스템을 분석하는데 있어, 일반적인 비선형 방정식보다 계산적인 측면에서 뿐만 아니라 메모리 효율성에서도 매우 유용하다^[7~9]. 연속적인 구간선형 함수의 정규 표현은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$f(x) = Bx + a + \sum_{i=1}^{\sigma} C_i |\langle \alpha_i, x \rangle - \beta_i| \quad (1)$$

여기서, a , x , C_i , α_i 는 n 차원 벡터이고, B 는 $n \times n$ 행렬, β_i 는 스칼라, 그리고 \langle, \rangle 는 벡터의 내적을 나타낸다.

이 방법은 중복되는 데이터가 저장되지 않기 때문에 장치 매개 변수들의 저장을 위한 메모리 공간이 적게 필요하며, 구현 측면에서도 매우 효율적이다. 식 (1)에 나타난 정규 구간선형 모델의 파라미터 업데이트 방정식은 다음과 같다^[10].

$$\alpha_i(n+1) = \alpha_i(n) + 2\mu x \operatorname{sgn}(\langle \alpha_i, x \rangle - \beta_i) C_i^T V_e \quad (2)$$

$$\beta_i(n+1) = \beta_i(n) - 2\mu \operatorname{sgn}(\langle \alpha_i, x \rangle - \beta_i) C_i^T V_e \quad (3)$$

$$C_i(n+1) = C_i(n) + 2\mu |\langle \alpha_i, x \rangle - \beta_i| V_e \quad (4)$$

$$B(n+1) = B(n) + 2\mu V_e x^T \quad (5)$$

$$a(n+1) = a(n) + 2\mu V_e \quad (6)$$

$$V_e(n) = \begin{bmatrix} \epsilon_1(n) \\ \epsilon_2(n) \\ \vdots \\ \epsilon_i(n) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\epsilon_i = (d_i - \hat{y}_i) \quad (8)$$

여기서,

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } x \geq 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases}$$

이고, μ 는 LMS (Least Mean Square) 알고리즘의 스텝 사이즈를 나타낸다. d_i 와 \hat{y}_i 는 각각 원래의 RF 신호와 모델의 출력 신호를 의미하며, ϵ_i 는 d_i 와 \hat{y}_i 의 오차를 나타낸다.

2. 볼테라 모델

볼테라 모델에 기반한 방법들은 수학적 기초를 가지고, 비선형 현상들의 폭넓은 범위를 모델링 할 수 있다. 만일 볼테라 모델에 의해 표현되는 비선형 시스템이 안

정되고 유한한 메모리를 가진다고 가정한다면 2차 볼테라 모델^[11]은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = \sum_{\tau_1=0}^{N-1} h_1(\tau_1)x(n-\tau_1) + \sum_{\tau_1=0}^{N-1} \sum_{\tau_2=0}^{N-1} h_2(\tau_1, \tau_2)x(n-\tau_1)x(n-\tau_2) + \dots \tag{9}$$

여기서 $x(n)$ 은 시스템의 입력 시퀀스를 나타내고, $y(n)$ 은 볼테라 모델에 의해 예상되는 시스템의 출력 시퀀스를 나타낸다. $h_1(\tau_1)$ 과 $h_2(\tau_1, \tau_2)$ 는 각각 1차, 2차 볼테라 계수이다. 또한 N 은 시스템의 시간지연을 나타내고, 위의 볼테라 계수들을 찾는 방법으로는 최소자승 (least square) 방법을 사용한다.

볼테라 모델은 일반적으로 기억성이 있는 테일러 시리즈 (Taylor series)로 해석이 가능하기 때문에 2차, 3차 등의 선형 필터의 확장으로 해석할 수 있다. 이러한 이유로 비선형 시스템뿐만 아니라 등화기, 전치 보상기 등 메모리가 필요한 시스템은 볼테라 모델로 구현할 수 있다.

III. 비선형 모델링

그림 1은 정규 구간선형 모델을 적용하여 Super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위한 실험 구성도를 나타낸 것으로 표 1과 같은 조건에서의 디스크^[12]로부터 출력된 RF 신호 샘플들을 사용하였다. 랜덤하게 발생시킨 2진 비트 패턴이 정규 구간선형 모델을 통과한 후 파라미터들을 갱신하여 Super-RENS 시스템을 통해 출력된 RF 신호를 추정하는 것이다. 그리고 좀 더 효율적인 모델링을 위해 트레이닝 전에 RF 신호의 잡음을 제거하는 사전 신호처리 과정을 수행하였다^[13].

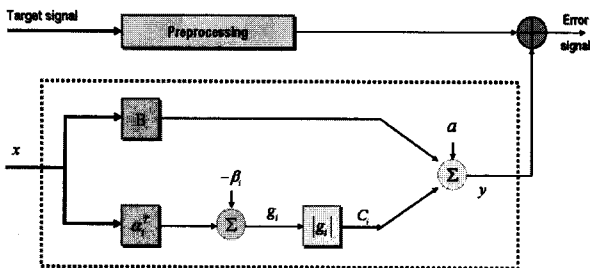


그림 1. 정규 구간선형 모델을 이용한 비선형 모델링의 성능 평가를 위한 실험 구성도
 Fig. 1. Block diagram of the experiment setup for performance evaluation of nonlinear modeling using a canonical PWL model.

표 1. Super-RENS 디스크의 특성
 Table 1. Summary of the Super-RENS disc properties.

Disc	BD (Blu-ray)
Recording layer	Metal/Si
Diameter	12cm
Cover	0.1mm
Track pitch	320nm
Laser wavelength	405nm
Minimum mark size	150nm
Linear velocity	4.92m/s
NA	0.85
Dynamic tester	Plustec ODU-1000
Recording power	9.3mW
Read-out power	1.2mW

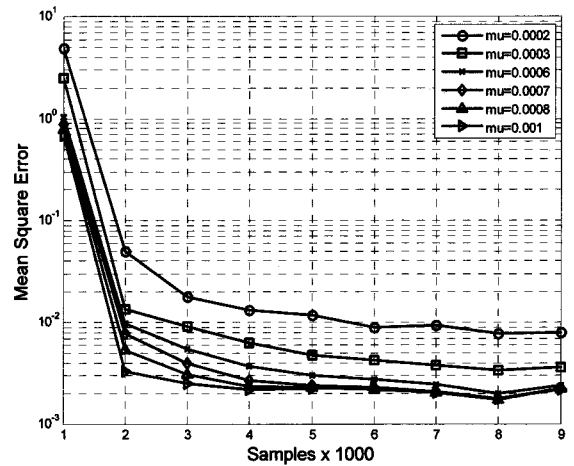


그림 2. 다양한 스텝사이즈에 따른 MSE
 Fig. 2. MSE's for various step sizes.

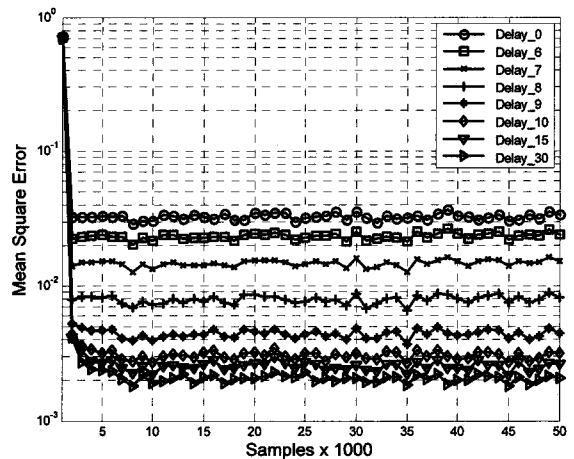


그림 3. 다양한 입력 지연에 따른 MSE
 Fig. 3. MSE's for various input delays.

그림 2는 정규 구간선형 모델의 입력 지연을 30으로 설정하고, LMS 알고리즘의 스텝사이즈를 0.001에서 0.0002까지 변화시켜가며 MSE (Mean Square Error)를 측정하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 스텝사이즈가 증가 할수록 MSE가 감소하는 것을 알 수 있다. 이 때 스텝사이즈가 0.001보다 커지면 발산해 버리므로, 적절한 스텝사이즈의 설정이 매우 중요하다. 그림 3은 정규 구간선형 모델의 스텝사이즈를 0.0001로 설정하고, 입력 지연을 0부터 30까지 변화시켜가며 1000샘플 단위로 MSE를 측정하였다. 실험결과 입력 지연을 30으로 설정하였을 때 MSE가 1.4×10^{-3} 로 최소인 것을 알 수 있다.

그림 4는 2차 볼테라 모델을 적용하여 Super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위한 실험 구성도를 나타낸 것으로 앞선 실험과 동일한 조건에서 실험을 실시하였다. 그림 5는 볼테라 필터의 지연 범위를 0부터 30까지

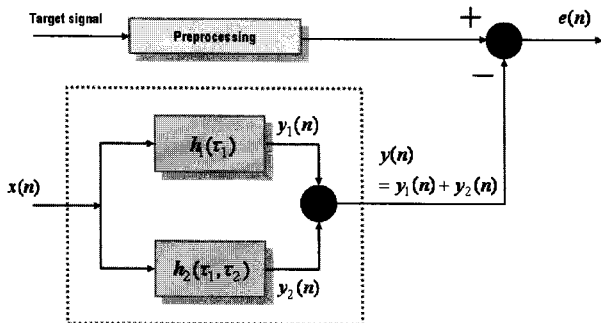


그림 4. 2차 볼테라 모델을 이용한 비선형 모델링의 성능 평가를 위한 실험 구성도

Fig. 4. Block diagram of the experiment setup for performance evaluation of nonlinear modeling using a second-order Volterra model.

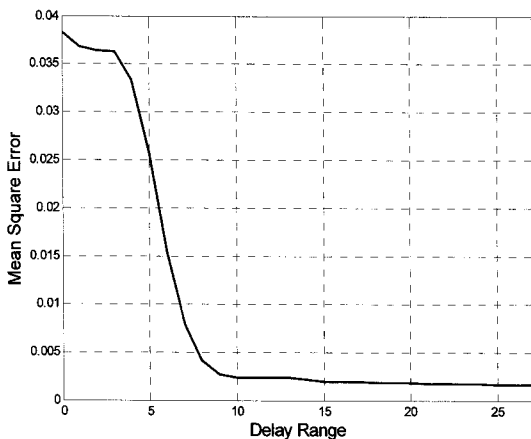


그림 5. 2차 볼테라 모델의 지연범위에 따른 MSE
Fig. 5. MSE's vs. delay ranges of the second-order Volterra model.

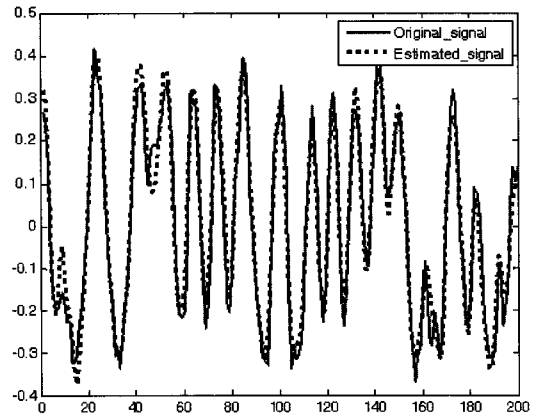


그림 6. RF 신호와 2차 볼테라 모델의 출력신호 비교
Fig. 6. Comparison of the RF signal and the second-order Volterra model output signal.

변화시켰을 때의 MSE 곡선을 나타낸 것이다. 실험결과 입력 지연을 30으로 설정하였을 때 MSE가 1.6×10^{-3} 로 최소인 것을 알 수 있다. 그림 6은 볼테라 필터의 비선형 모델링 성능을 살펴보기 위해 2진 비트 패턴을 사용하여 Super-RENS 시스템의 RF 신호를 추정한 것으로 그림에 나타난 것처럼 시간영역에서 RF 신호와 2차 볼테라 모델의 출력신호를 비교한 결과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

IV. 비선형 등화기

본 논문에서는 Super-RENS 디스크에 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델 기반의 비선형 등화기를 사용하여 비선형 왜곡에 의한 심플한 간섭을 제거하고 신호의 품질을 개선하고자 한다.

그림 7은 제안된 정규 구간선형 모델 기반의 비선형 등화기 성능을 평가하기 위한 실험 구성도를 나타낸 것

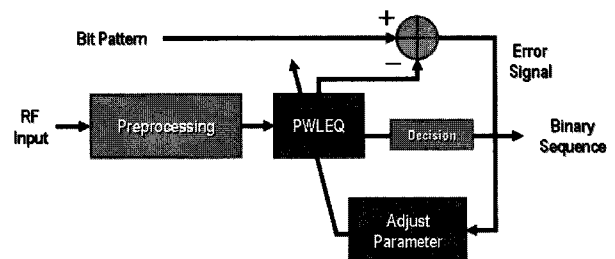


그림 7. 정규 구간선형 모델 기반의 등화기 성능 평가를 위한 실험 구성도

Fig. 7. Block diagram of the experiment setup for performance evaluation of the canonical PWL model based equalizer.

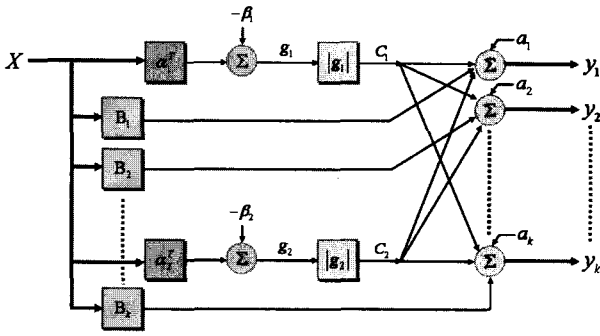


그림 8. 제안된 등화기 구조
Fig. 8. Structure of the proposed equalizer.

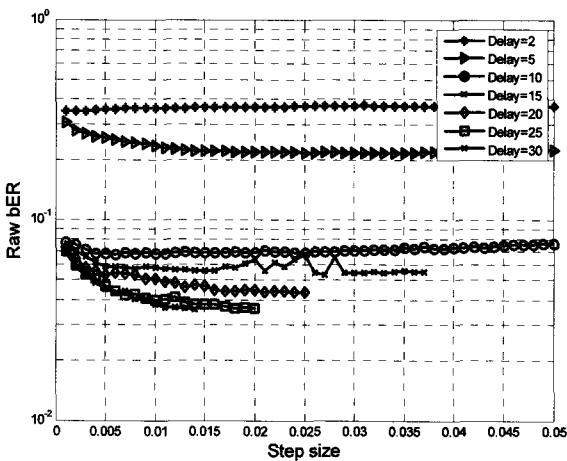


그림 9. 다양한 스텝사이즈에 따른 raw BER
Fig. 9. Raw BER for various step sizes.

으로 앞서 실험한 비선형 모델링과 동일한 RF 신호 샘플들을 사용하였다. 여기서 실험 구성도에 나타난 PWLEQ 블록은 제안된 비선형 등화기를 나타내며 세부구조는 그림 8에 도시하였다.

PWLEQ의 출력신호는 원래의 비트 패턴과의 비교를 통하여 오차신호를 생성한다. 이를 바탕으로 PWLEQ의 파라미터들을 업데이트하며 최적의 등화모델이 추정된다. 마지막으로 추정된 등화모델의 출력과 비트 패턴간의 raw BER을 측정하여 특성들을 분석하게 된다. 이 실험의 주요 factor는 LMS 알고리즘의 스텝사이즈와 입력데이터 집합을 결정하는 입력 지연이다. 본 논문에서는 다양한 스텝사이즈를 적용하고 입력 지연을 변화시켜가며 실험을 실시하였다.

그림 9는 정규 구간선형 모델 기반의 비선형 등화기에 다양한 스텝사이즈에 적용하여 raw BER 성능을 측정한 것이다. 전반적으로 스텝사이즈가 커짐에 따라 raw BER 성능이 좋아지는 것으로 나타났으며, 입력 지연이 길어질수록 raw BER 특성이 향상되는 것을 알

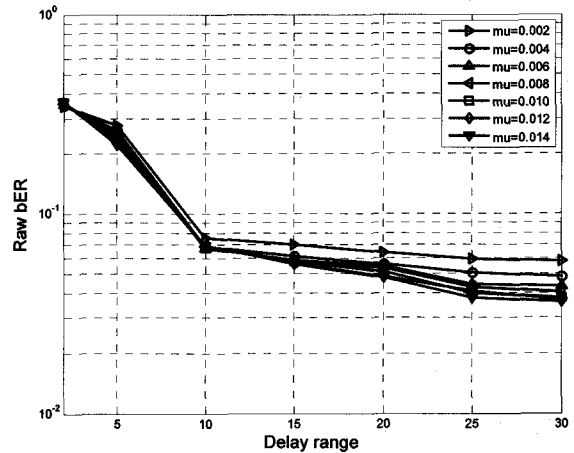


그림 10. 다양한 입력 지연에 따른 raw BER
Fig. 10. Raw BER for various input delays.

표 2. 입력 지연과 스텝사이즈에 따른 raw BER의 최소값
Table 2. Minimum raw BER according to the input delay and step sizes.

입력 지연	스텝사이즈	Raw BER
2	0.001	0.3464
5	0.029	0.2151
10	0.006	0.0671
15	0.027	0.0531
20	0.025	0.0436
25	0.020	0.0362
30	0.014	0.0360

수 있다. 그림 10은 입력 지연에 따른 raw BER을 나타낸 것으로 입력 지연 범위가 5~10 사이에서는 raw BER 성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 반면에 같은 범위의 입력 지연 25~30 사이에서는 raw BER 성능의 변화가 거의 나타나지 않는다. 이는 입력 지연 값의 한계가 존재함을 의미한다. 또한 그림 9에 나타난 것처럼 입력 지연 값에 따라서 스텝사이즈의 한계가 존재함을 알 수 있다. 표 2에서 알 수 있듯이 스텝사이즈와 입력 지연의 상호 제한적인 관계에 의해 두 factor사이의 최소값들이 각각 존재함을 알 수 있다.

그림 11은 제안된 볼테라 모델 기반의 비선형 등화기 성능을 평가하기 위한 실험 구성도를 나타낸 것으로 Super-RENS 디스크에 존재하는 비선형 왜곡에 의한 심볼간 간섭을 제거하기 위해 본 논문에서 고려하는 모델 구조는 비인과성 (noncausal) 2차 볼테라 모델이다. 볼테라 계수들을 추정하기 전에 RF 신호 샘플들의 저

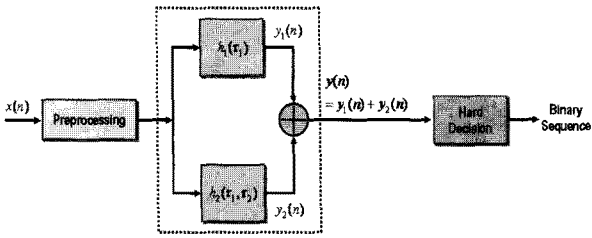


그림 11. 2차 볼테라 모델 기반의 등화기 성능 평가를 위한 실험 구성도

Fig. 11. Block diagram of the experiment setup for performance evaluation of the second-order Volterra model based equalizer.

표 3. 2차 볼테라 모델의 입력 advance에 따른 NMSE와 raw BER (lag=5)

Table 3. NMSE and raw BER according to the input advances of the second-order Volterra model (lag=5).

Advance	NMSE	Raw BER	Advance	NMSE	Raw BER
1	0.864	0.3474	11	0.2315	0.0422
2	0.6365	0.2163	12	0.2286	0.0405
3	0.2997	0.0755	13	0.2236	0.0377
4	0.2975	0.0734	14	0.223	0.0375
5	0.2901	0.0694	15	0.2218	0.0368
6	0.2783	0.0643	16	0.2202	0.0363
7	0.262	0.0577	17	0.2201	0.036
8	0.2604	0.0568	18	0.2197	0.0361
9	0.2479	0.0521	19	0.2192	0.036
10	0.2329	0.0432	20	0.2189	0.0358

주파 잡음 성분을 제거를 위한 저역통과 필터링을 실시하고, 최대값 +1, 최소값 -1로 스케일링 된다. 제안된 비선형 등화기의 출력신호는 원신호를 복원하기 위해 경판정 (hard decision)을 통해 0보다 클 경우 +1, 0보다 작을 경우 -1을 출력하게 된다.

표 3은 lag를 5로 설정하고, advance를 1부터 20까지 변화시켜가며 NMSE (Normalized Mean Square Error)와 raw BER을 측정하였다. 여기서, lag와 advance는 각각 과거값과 미래값을 나타낸다. 실험결과, advance가 20일 때 NMSE와 raw BER이 각각 0.2189와 0.0358로 최소인 것을 알 수 있다. 그림 12는 실험에 관련된 세 개 신호의 샘플 파형들을 도시한 것으로 첫 번째 그림은 target 신호로 사용된 랜덤하게 발생시킨 비트 패턴을 나타낸 것이다. 두 번째 그림은 제안된

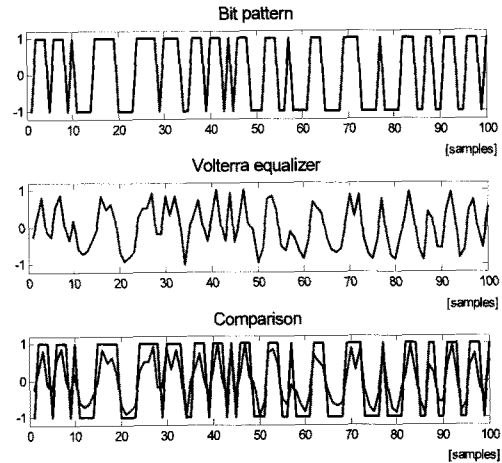


그림 12. 비트패턴과 2차 볼테라 등화기 출력의 샘플 파형

Fig. 12. Sample waveforms of bit pattern and second-order Volterra equalizer output.

비선형 등화기의 출력신호 파형을 나타낸 것이다. 세 번째 그림에서 알 수 있듯이 제안된 비선형 등화기의 출력신호 파형이 target 신호인 비트 패턴과 유사한 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 Super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델을 적용하였다. 또한 이를 바탕으로 비선형 심볼간 간섭을 제거하기 위해 새로운 비선형 등화기를 제안하였다. Super-RENS 디스크로부터 획득한 RF 신호 샘플들을 사용하여 다양한 스텝사이즈와 입력 지연을 변화시켜가며 모의실험을 수행한 결과, Super-RENS 시스템의 비선형 모델링을 위해 정규 구간선형 모델과 2차 볼테라 모델이 유용하게 활용될 수 있다는 가능성을 확인하였고, 제안된 비선형 등화기의 성능은 비트오율 측면에서 등화기가 없는 경우보다 우수한 성능을 나타내었다. 향후 Super-RENS 시스템을 위한 제안된 비선형 등화기의 성공적인 구현을 위해서는 다양한 Super-RENS 디스크의 RF 신호 샘플들을 획득하여 실험을 실시하고, 이에 따른 각 모델의 최적 파라미터를 구하기 위한 연구가 더 필요하다.

참고 문헌

- [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] 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.
- [6] 서만중, 임성빈, 이재진, "신경망을 이용한 Super-RENS 시스템의 비선형 모델링," *대한전자공학회 논문지*, vol. 45, no. 3, pp. 53-60, 2008년 3월.
- [7] L. O. Chua and R. Ying, "Canonical Piecewise-Linear Analysis," *IEEE Trans. Circ. Syst.*, vol. CAS-30, no. 3, pp. 125-140, Mar. 1983.
- [8] L. O. Chua and A. C. Deng, "Canonical Piecewise-Linear Modeling," *IEEE Trans. Circ. Syst.*, vol. CAS-33, no. 5, pp. 511-525, May 1986.
- [9] C. Kahlert and L. O. Chua, "A Generalized Canonical Piecewise-Linear Representation," *IEEE Trans. Circ. Syst.*, vol. 37, no. 3, pp. 373-383, Mar. 1990.
- [10] R. Batruni, "A Multilayer Neural Network with Piecewise-Linear Structure and Back-Propagation Learning," *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 395-403, May 1991.
- [11] M. Schetzen, *The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear Systems*, New York: Wiley, 1980.
- [12] K. Kwak, S. Kim, C. Lee, and K. Song, "New materials for super-resolution disc," *SPIE Proceedings*, vol. 6620, ODS2007 TuC5, 2007.
- [13] 서만중, 임성빈, "Super-RENS 디스크를 위한 신경망 기반의 비선형 등화기," *대한전자공학회 논문지*, vol. 45, no. 12, pp. 90-96, 2008년 12월.

저자 소개



서만중(학생회원)
2005년 한국교육개발원
정보통신공학과 학사
2007년 숭실대학교
정보통신공학과 석사
2007년~현재 숭실대학교
정보통신공학과
박사과정 재학중

<주관심분야 : OFDM PAPR 감소기법, DVB-T 시스템, Super-RENS 시스템, 비선형 신호처리>



심희성(학생회원)
2007년 한국교육개발원
컴퓨터과학과 학사
2008년~현재 숭실대학교
정보통신공학과
석사과정 재학중

<주관심분야 : 차세대 이동통신 시스템, FPGA>



임성빈(평생회원)
1986년 서울대학교
전자공학과 학사
1988년 서울대학교
전자공학과 석사
1994년 University of Texas at
Austin 전기 및 컴퓨터
공학과 박사

1995년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부
교수

<주관심분야 : 비선형 신호처리, 통신 시스템, 디지털 방송 시스템>