

논문 2012-49TC-7-1

반복 2차 등화기의 홀로그래픽 데이터 저장 장치 적용 (Application of an Iterative 2D Equalizer to Holographic Data Storage Systems)

김 선 호*, 임 성 빈**

(Sunho Kim and Sungbin Im)

요 약

자기 저장장치의 한계가 보이는 현 시점에서 홀로그래픽 저장장치는 빠른 데이터 전송율과 높은 기록밀도를 가지고 차세대 광 저장장치의 매력적인 후보로 떠오르고 있다. 본 논문에서는 HDSS (Holographic data storage system)의 채널 환경에서 발생하는 2차원 심볼간 간섭효과와 픽셀 어긋남 문제로 인해 발생하는 비트 오검출 문제를 효율적으로 해결하기 위해서 축약 사상 이론 (contraction mapping theorem) 기반의 반복 2차원 등화 기법을 제안한다. 제안하는 기법의 성능을 평가하기 위해 다양한 홀로그래픽 채널 환경을 구성하고 모의 실험을 수행하여 제안하는 기법의 BER 성능을 측정하여 기존의 threshold detection 기법과 비교함으로써 제안 기법의 우수성을 확인하였다.

Abstract

At the present time when the limits of the magnetic storage systems appear, the holographic data storage (HDS) devices with high data transfer rate and high recording density are emerging as attractive candidates for next-generation optical storage devices. In this paper, to effectively improve the detection performance that is degraded by the two-dimensional inter-symbol interference under the HDS channel environment and the pixel misalignment, an iterative two-dimensional equalization scheme is proposed based on the contraction mapping theorem. In order to evaluate the performance of the proposed scheme, for various holographic channel environments we measure the BER performance using computer simulation and compare the proposed one with the conventional threshold detection scheme, which verifies the superiority of the proposed scheme.

Keywords : HDSS, holographic channel, 2D-ISI, blur, 2D equalizer.

I. 서 론

멀티미디어 기술의 발전과 증대하는 사용자의 요구에 맞추어 고용량의 정보저장 장치와 그 효율을 높이기

위한 다양한 기술들이 연구되고 있다. 그 중 차세대 광 저장장치로 부각되고 있는 홀로그래픽 저장장치 시스템 (HDSS: Holographic Data Storage System) 은 데이터를 이루는 기본 단위인 픽셀이 2차원 공간에 저장되며, CCD(charge coupled detector) 배열을 통해 2차원의 이미지 데이터를 읽어내는 장점을 지닌다. 따라서 순차적 기록 방식을 지니는 저장 매체와는 달리 데이터의 기록과 재생이 2차원 페이지 단위로 이루어져 데이터의 처리속도를 높이고 높은 전송효율을 달성할 수 있다. 또한 홀로그래픽 저장 장치는 그 특성상 페이지 이미지를 겹쳐서 저장하는 것이 가능하여 기록 밀도를 크게 높일

* 학생회원, ** 정회원-교신저자, 숭실대학교 정보통신공학과

(School of Electronic Engineering, Soongsil University)

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2012-0005461)

접수일자: 2012년4월20일, 수정완료일: 2012년6월25일

수 있어 1.5TB이상의 높은 저장 용량을 얻을 수 있다^[1]. 그림 1을 통해서 일반적인 홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템의 모습을 제시하였다.

그러나 페이지 단위의 2차원 기록, 재생 과정에서 인접한 심볼간의 2차원 간섭 (2D-ISI: Inter Symbol Interference)이나 인접한 페이지간의 간섭 (IPI: Inter Page Interference), 고립된 픽셀(isolated pixel) 및 장치 구성에 따른 픽셀 어긋남(misalignment)등의 문제가 발생하며, HDS에서 이러한 오류를 극복하고 높은 기록 밀도와 저장 장치의 신뢰성을 향상시키기 위해 변조 부호화 및 복호 알고리즘, 비트 검출기 및 등화기에 관한 다양한 연구가 활발하게 진행되고 있다^[2-3].

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 페이지의 심볼간 간섭 문제에 초점을 맞추어 contraction mapping theorem에 기반한 간단한 반복 형태의 2차원 비트 검출 기법을 제안하고, 다양한 홀로그래픽 채널 환경에서 모의 실험을 통해 비트 오류(BER) 성능을 측정하여 제안하는 기법의 성능을 평가하도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 서론에 이어 II장에서 홀로그래픽 채널 환경 및 모델링에 관한 구체적인 언급을 담았다. III장에서는 제안하는 contraction mapping 기반의 이차원 등화기에 대해 설명하고 IV장에서 모의실험을 통해 다양한 2차원 ISI 환경을 갖는 홀로그래픽 채널에서 제안하는 기법의 비트 오류 성능을 비교·확인하며, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 홀로그래픽 채널 환경

일반적으로 이차원 홀로그래픽 채널을 구성하기 위해서는 다양한 응답함수가 사용되며 사용하는 함수의 형태에 따라 VHSC(volume holographic storage channel)^[4], 페이지 기반 채널(page-oriented channel)^[5] 등으로 구분할 수 있다.

본 논문에서 이차원 홀로그래픽 채널을 구성하기 위한 연속 PSF (continuous point spread function)는 다음과 같이 정의된다^[5].

$$\begin{aligned} h(x, y) &= h_x(x)h_y(y) \\ &= \exp[-(x^2 + y^2)/2\sigma_B^2] \end{aligned} \quad (1)$$

x 와 y 는 각각 홀로그래픽 2차원 페이지의 가로축과

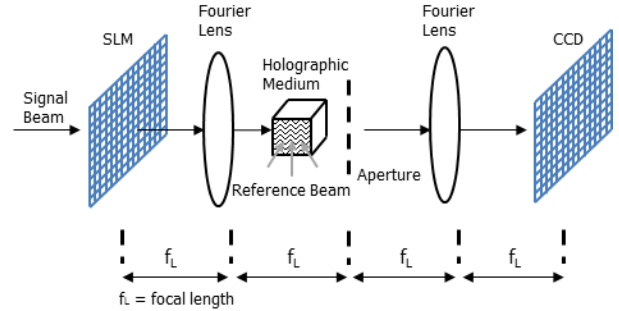


그림 1. 홀로그래픽 데이터 스토리지 시스템
Fig. 1. Holographic Data Storage System.

세로축을 의미하며, σ_B 는 홀로그래픽 빔이 장치를 통과하며 확산되는 현상으로 인해 각 페이지의 인접 픽셀로부터 영향을 받아 발생하는 홀로그래픽 채널의 퍼짐(blur) 정도를 모델링하기 위한 값이다. 2차원 페이지를 입력으로 하는 홀로그래픽 채널 모델의 경우 인접 픽셀에 의한 2차원 ISI가 채널 모델링에 매우 중요한 요소이며 blur factor σ_B 를 통해 이러한 ISI의 크기를 제어할 수 있다. σ_B 의 값이 증가할수록 모델링 하는 채널 내에서 ISI의 영향력이 증가하며, 감소하는 경우 ISI의 영향력 역시 감소한다.

홀로그래픽 저장장치의 각 페이지의 이차원 입력 데이터를 $d[p, q]$ 로 정의하면 채널을 통과한 뒤 CCD 배열을 통해 최종적으로 얻을 수 있는 데이터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r[p, q] = \alpha d[p, q] * h[p, q] + n[p, q] \quad (2)$$

입력 데이터 페이지는 $d(p, q) \in 0, 1$ 와 같은 바이너리 값으로 구성된다. α 는 CCD의 fill factor 값으로 (0,1]의 범위를 가지며 본 논문에서는 1로 가정하여 사용한다. $h[p, q]$ 는 discrete PSF를, $*$ 는 2차원 컨볼루션을 의미하며, $n[p, q]$ 는 가산 백색 잡음(AWGN)을 나타낸다. 홀로그래픽 채널을 모델링하기 위한 이산 PSF의 경우 다음의 식 (3)과 같이 표현된다.

$$h[p, q] = \int_{p-1/2}^{p+1/2} \int_{q-1/2}^{q+1/2} h(x, y) dx dy \quad (3)$$

위 식을 통해 얻어진 채널의 형태는 중앙으로부터 방사형으로 대칭을 이루며 채널 모델링을 위해 사용하는 지수 함수의 σ_B 를 이용하여 인접 픽셀로부터 기인하는 홀로그래픽 채널의 퍼짐(blur)의 정도를 가우시안 분포

로 모델링 할 수 있다. 홀로그래픽 채널 셀의 크기를 5×5 로 설정하고 σ_B 의 값을 0.65로 두었을 때 식 (3)을 통해 구할 수 있는 이산 채널 매트릭스 (DCM: Discrete Channel Matrix)의 구성을 아래에서 확인할 수 있다.

$$H = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0.0022 & 0.0058 & 0.0022 & 0.0001 \\ 0.0022 & 0.0443 & 0.1175 & 0.0443 & 0.0022 \\ 0.0058 & 0.1175 & 0.3117 & 0.1175 & 0.0058 \\ 0.0022 & 0.0443 & 0.1175 & 0.0443 & 0.0022 \\ 0.0001 & 0.0022 & 0.0058 & 0.0022 & 0.0001 \end{bmatrix} \quad (4)$$

또한 계산된 이산 채널 매트릭스는 $\sum_{ij} h(i, j) = 1$ 과 같이 정규화 한다.

III. 제안하는 이차원 등화기

본 논문에서는 홀로그래픽 채널의 2차원 ISI를 고려하여 채널 환경을 구성하고 이에 적합한 contraction mapping theorem에 기반한 반복 등화 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 채널을 통과한 입력 데이터를 원래의 비트 패턴으로 등화(equalization)하는 과정에서 contraction mapping 이론을 기반으로 하여 고정점(fixed point) 문제로 간주하여 효율을 향상 시키는 것에 중점을 두고 있다. 제안하는 기법의 등화식은 다음과 같다^[6].

$$x_0[n, m] = \lambda y[n, m]$$

$$x_{k+1}[n, m] = \lambda y[n, m] + f[n, m] * dec(x_k[n, m]) \quad (5)$$

$f[n, m] = \delta[n, m] - \lambda h[n, m]$ 이며 $\delta[\cdot]$ 는 Kronecker delta 함수를 의미한다. 위 식에서 $x \geq 0$ 의 조건을 만족하는 경우 $dec(x) = 1$ 의 값을 가지고, 조건을 만족하지 못하는 경우에는 $dec(x) = -1$ 의 값을 갖는다. 식 (5)에서 $x_{k+1} = x_k = dec(x_k)$ 인 경우가 성립되는 경우 이를 고정점으로 놓을 수 있다. 고정점이 성립되는 경우에 위의 식 (5)에서 $0 = \lambda y - \lambda h * x_k$ 를 얻을 수 있으며, 이 경우 고정점 x_k 가 올바르게 검출된 원래의 비트 값이 된다. 식 (5)에서 고정점의 값을 찾기 위해 contraction mapping theorem을 이용할 수 있으며 이 경우 고정점 값의 수렴 조건은 다음과 같이 표현할 수 있다.

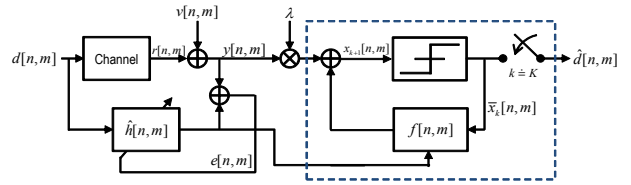


그림 2. 제안하는 2차원 등화기 시스템 블록
Fig. 2. Functional blocks of proposed 2D equalizer.

$$\gamma[w_1, w_2] = |1 - \lambda H[w_1, w_2]| < 1 \quad (6)$$

여기서 γ 는 contraction 상수이며, $H[w_1, w_2]$ 은 $h[n, m]$ 의 푸리에 변환(Fourier transform) 값이고 λ 는 상수 값이다. 식 (6)은 $Re\{H[w_1, w_2]\} > 0$ 와 등가 관계를 갖는다.

앞 장에서 살펴 본 바와 같이 식 (1)과 같이 $h(x, y) = h_x(x)h_y(y)$ 의 형태를 갖는 2차원 채널에서 발생하는 2차원 가우시안(Gaussian) 펄스는 정확히 중심에서 방사형으로 대칭 구조를 갖는 even-symmetric의 형태로 나타나며 이를 푸리에 변환하면 그 값은 양의 실수를 취한다. 따라서 이러한 형태의 홀로그래픽 채널에서 고정점 값을 찾기 위한 조건인 식 (6)을 정확히 만족시킬 수 있다. 이러한 접근 방식에 근거해서 2차원 펄스 응답의 역수를 찾기 위한 복잡하고 많은 연산과정 없이, 고정점 값을 찾아 이를 대체하기 위한 간단한 반복 연산 기반의 등화 기법을 제안할 수 있다. 제안 기법의 가장 큰 장점은 유한한 횟수의 반복 연산 과정을 거치며 등화를 수행할 때, 어떤 특정한 시점에서 출력 비트 값이 적절하다고 판단되면 언제든지 원하는 시점에서 연산과정을 멈출 수 있다.

그러나 제안하는 기법은 반복 연산과정에서 $h[n, m]$ 의 추정값인 이산(discrete) 채널 응답 $\hat{h}[n, m]$ 을 필요로 한다.

그러므로 $f(n, m)$ 은 $f[n, m] = \sigma[n, m] - \lambda \hat{h}[n, m]$ 으로 다시 표현 할 수 있으며, 그림 2에서 제안하는 등화기의 구조를 확인할 수 있다. 제안하는 2차원 등화기 구조에서 $\overline{x_k}$ 는 $\overline{x_k} = dec(x_k)$ 를 의미한다.

또한 제안된 기법의 성능을 이론적으로 검증하기 위해 입력으로 사용된 원래의 비트 값과 contraction mapping theorem을 기반으로 하여 추정된 비트 값과의 오차 경계(error boundary)를 구하도록 한다.

각각의 w_1, w_2 가 $\gamma_u = \max_{w_1, w_2} \gamma[w_1, w_2] < 1$ 를

만족하는 경우,

$$\|d[n, m] - x_k[n, m]\| \leq \frac{\gamma_u^k [x_1[n, m] - x_0[n, m]]}{1 - \gamma_u} \quad (7)$$

를 얻을 수 있다. x_0 는 추정 비트의 초기 값이며 이 값이 추정 과정에서 발생할 수 있는 오류 범위(error bound)를 결정짓는다. 식 (7)에서 k 가 무한대로 증가해 가는 상황에서, $\gamma_u < 1$ 의 조건을 만족하는 동안에는 잡음이 삽입되지 않는 환경에서 오류의 크기는 감소하게 된다. 따라서 수렴율(convergence rate)은 γ_u 의 크기(magnitude)에 따라 결정되며, 식 (7)의 contraction 상수 γ_u 는 상수 λ 에 의해 결정된다.

IV. 모 의 실험

홀로그래픽 채널에서 다양한 2D-ISI 환경을 구성하기 위해 기록 신호의 퍼짐 정도(blur)를 나타내는 blur factor σ_B 는 0.425, 0.450, 0.475의 값을 사용하였으며, 성능 평가를 위해서 전통적인 방식의 threshold detection 기법과 제안하는 기법을 사용한 경우에 SNR에 따른 BER 성능을 모의 실험을 통해 측정하고 비교하였다. 이진 입력 데이터는 1000 by 1000 크기의 페이지를 랜덤하게 구성하여 사용하였다.

먼저 채널 코딩을 사용하지 않고 raw BER 성능을 비교한 결과를 그림 3에 나타내었다. 목표 BER을 10^{-3} 으로 놓았을 때 blur factor σ_B 의 값이 0.425인 경우 약 4 dB, 0.45인 경우 약 6 dB의 성능 향상을 보였다. 주어진 결과에 의하면 σ_B 의 값이 증가하여 2차원 ISI의 영향력이 증대하는 상황에서도 높은 성능 개선이 이루어짐을 확인할 수 있다.

다음으로 0.83의 부호화율을 갖는 컨볼루션 코드(convolutional code)를 이너 코드(inner code)로 사용하여 BER 성능 비교를 수행한 결과를 그림 4에 보였다. 목표 BER을 10^{-5} 으로 두었을 때 blur factor σ_B 의 값이 0.425인 경우와 0.45인 경우 약 4 dB의 성능 향상을 확인할 수 있다. σ_B 의 값을 0.475로 증가시키는 경우에는 약 5 dB의 성능 향상이 관찰된다. 오류정정 코드를 사용하지 않은 경우와 비교하여 보면 이너 코드로 사용한 컨볼루션 코드의 특성상 성능 개선이 SNR 6 dB 이상인 경우에서부터 관찰되게 된다. 이상의 결과를 보

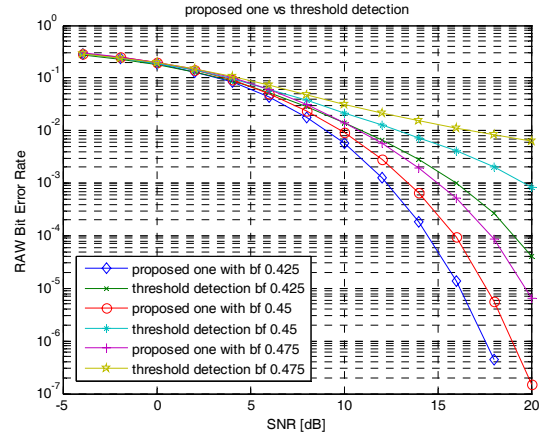


그림 3. 다양한 blur factor 변화에 따른 raw BER 성능 비교

Fig. 3. Comparison of raw BER performance with various blur factor.

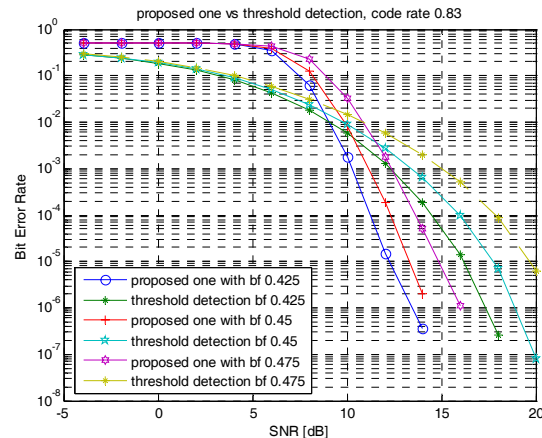


그림 4. 부호화율 0.83 에서 다양한 blur factor 변화에 따른 raw BER 성능비교

Fig. 4. Comparison of BER performance with various blur factor, fixed code rate 0.83.

아 부호화 기법을 사용할 때와 그렇지 않은 경우 모두 채널의 2차원 ISI가 증가하는 환경에서 제안하는 기법이 효율적으로 사용될 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 페이지 기반 홀로그래픽 채널의 2차원 ISI 환경을 고려하여 이에 적합한 2차원 등화 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 contract mapping 이론을 기반으로 하여 고정점 값을 찾아, 등화 과정에서 2차원 펄스 응답의 역수를 찾기 위한 복잡한 연산과정이

필요 없는 단순한 형태의 2차원 등화기의 구현이 가능하다.

제안 기법의 성능을 평가하기 위해 다양한 값의 blur factor를 도입하여 홀로그래픽 채널을 모델링하였으며, 모델링 된 채널 환경 하에서 BER 성능을 평가하고 전통적인 threshold detection 기법과 이를 비교하였다. 그 결과 blur factor가 증가하여 2차원 ISI가 심화되는 상황에서 이너 코드를 사용하지 않은 경우와 사용한 경우 모두 σ_B 0.425 기준에서 약 4 dB의 성능 향상을 보였으며, σ_B 0.475 기준에서 약 5 dB 이상의 성능 향상을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안하는 contraction mapping 기반의 등화기법이 홀로그래픽 채널의 2차원 ISI 환경에서 매우 강인한 성능을 보이며 이를 홀로그래픽 데이터 스토리지 시스템에 효율적으로 적용할 수 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] L. Hesselink et al., "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, vol. 4342, no. 393, pp. 393-400. 2004.
- [2] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "linear minimum mean square error equalization for holographic data storage," *Proc. IEEE*, vol. 3, pp. 1957 - 1961, 1999.
- [3] K. M. Chugg, X. Chen and M. A. Neifeld, "Two-dimensional equalization in coherent and incoherent page oriented optical memory," *JOSA-A*, vol. 16, pp. 549-562, 1999.
- [4] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," *Proc. SPIE*, vol. 4090, pp. 205 - 210, Sep. 2000.
- [5] M. A. Neifeld, K. M. Chugg and B. M. King, "Parallel data detection in page-oriented optical memory," *Optics Letter*, vol. 21, No. 18, pp.1481-1483, Sep. 1996.
- [6] A. W. Naylor and G. R. Snell, *Linear Operator Theory in Engineering and Science*, Springer-Verlag, 1982.

저 자 소 개

김 선 호(학생회원)

2007년 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사

2009년 숭실대학교 정보통신공학과 석사

2009년~현재 숭실대학교 정보통신공학과
박사과정 재학중

<주관심분야 : 저장장치시스템, 간섭감소기법, 최적화기법, 채널추정>



임 성 빈(정회원)-교신저자

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, 저장장치시스템>