

논문 2015-52-6-2

홀로그래픽 데이터 저장 장치를 위한 2차원 인접 심볼간 간섭 보상

(Two Dimensional Inter-symbol Interference Compensation for Holographic Data Storage)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[Ⓢ])

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 매질의 체적에 데이터를 저장하고 CCD를 사용하여 2차원 픽셀의 이미지로써 데이터를 처리하기 때문에 빠른 데이터 전송률과 저장 용량을 현저히 증가시킬 수 있다. 하지만 홀로그래픽 저장장치는 기존의 저장장치들과는 다른 오류 요인인 2차원 인접심볼간 간섭이 발생한다. 본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 읽은 데이터가 검출기를 통과하기 전에 전처리과정을 통하여 인접심볼간 간섭을 줄이는 방법을 제안한다. 이 방법은 어긋남을 보정하기 위한 전처리과정과 변조부호방법을 결합하여 사용할 수도 있다는 장점이 있다.

Abstract

In holographic data storage systems, data is recorded and read by page on a volume of storage medium, and it can increase transmission rate and storage capacity because of two-dimensional page-oriented data processing by charge-coupled devices. However, HDS suffers two-dimensional intersymbol interference unlike conventional data storages. In this paper, we propose a preprocessing method of decreasing ISI before read data in HDS pass to detector. This method has some advantage when we collaborate with the preprocessing for reducing misalignment error and modulation code

Keywords : holographic data storage, 2D-ISI, preprocessing

I. 서 론

홀로그래픽 저장장치는 홀로그래픽 기술을 이용한 차세대 저장장치로 많은 주목을 받고 있다^[1]. 홀로그래

픽 저장장치는 평면이 아닌 3차원적으로 데이터를 저장하므로 높은 저장 용량, 빠른 전달속도 그리고 짧은 접근시간을 동시에 달성할 수 있는 저장장치이다^[2~3]. 홀로그래픽 저장장치의 원리는 하나의 볼륨에 페이지 단위로 여러 장의 데이터를 멀티플렉싱하여 저장하는데, 정보를 담고 있는 데이터 페이지를 SLM(Spatial Light Modulator)에 의해 신호빔으로 바꾸고, 이를 기준빔(Reference Beam)으로 간섭시켜 생기는 간섭무늬를 홀로그램 매체에 기록하고, 반대로 읽을 때는 기준빔을 홀로그램 매체에 입사하여 정보 페이지 신호를 추출한다. 또한, 유일하게 2차원으로 데이터를 읽기/쓰기 때문에 보다 빠른 처리 속도가 가능하다. 하지만 홀로그래

* 학생회원, ** 정회원, 숭실대학교 전자정보공학부 (School of Electronics Engineering, Soongsil University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: zlee@ssu.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).

Received ; April 21, 2015 Revised ; April 28, 2015

Accepted ; May 22, 2015

픽 저장장치는 많은 오류 요인들이 있는데, 대표적으로 인접 심볼 간 간섭(Inter-Symbol Interference, ISI), 인접 페이지 간 간섭(Inter-Page Interference, IPI), 어긋남(misalignment) 등이 존재한다.

기존에 오류를 범하게 되는 주된 요인이 줄 단위로 정보를 저장하고 읽음으로서 생기는 인접 심볼 간 간섭 라면, 홀로그래픽 저장장치는 CCD(Charge-Coupled Devices)를 통해 페이지 단위로 읽기 때문에 인접한 픽셀 사이에 블러(blur) 현상이 발생한다. 즉 2차원 인접 심볼 간 간섭이 생긴다^[4]. 이렇게 되면 기존에는 앞과 뒤의 데이터만 생각하고 신호처리를 하면 되었지만 홀로그래픽 저장장치는 앞과 뒤의 데이터뿐만 아니라 위와 아래의 데이터도 생각해야만 한다. 1차원에서 2차원으로 신호처리를 해야 하기 때문에 에러가 더 많이 생기게 되며, 에러를 제어하기도 쉽지 않다. 또한 홀로그래픽 저장장치는 페이지를 같은 공간에 저장하기 때문에 인접 페이지 간 간섭이 발생한다. 페이지를 여러 개 겹쳐서 저장하는 여러 가지 멀티플렉싱 기법이 존재하며, 인접 페이지 간 간섭을 최소화 할 수 있는 멀티플렉싱 기법이 다양하게 제안되고 있다^[5]. 그러나 인접 페이지 간 간섭을 완전히 제거하는 기법은 없다. 또한 홀로그래픽 저장장치에서 데이터를 읽을 때 CCD 배열의 위치가 정확하게 일치하지 않을 경우 어긋남(misalignment)이 발생하게 된다. 이러한 어긋남은 비트 오류(Bit Error Rate, BER) 성능을 나쁘게 한다. 따라서 2차원 인접 심볼 간 간섭, 인접 페이지 간 간섭, 어긋남 등이 존재하기 때문에 이를 줄일 수 있는 알고리즘이 필요하다^[6-10].

본 논문에서는 전처리과정을 이용하여 주변픽셀에 의하여 영향을 받은 원 데이터를 보상해 주는 방식을 제안한다. 또한 어긋남을 보상하기 위한 전처리과정과 결합한 성능을 알아본다^[11].

II. 인접 심볼 간 간섭 보상 방식

1. 2차원 심볼 간 간섭의 영향

그림 1은 채널을 통과하기 전과 후의 결과를 보여준다. 채널을 통과하기 전의 데이터는 0과 1을 구분할 수 있다. 하지만 채널을 통과 후에는 여러 오류 요인들 때문에 데이터가 불명확해진다. 이 때문에 오류가 발생한다. “ON” 픽셀은 주변의 픽셀에 영향을 주기 때문에

“ON” 픽셀에 인접한 픽셀은 영향을 받게 된다. 예를 들어, (1,2), (2,1), (2,3), (3,2)에 위치한 픽셀이 “ON”이면 채널을 통과한 데이터는 “ON” 픽셀이 주변 픽셀에 영향을 미치게 되며, “ON” 픽셀에 둘러싸인 (2,2)픽셀은 가장 많은 영향을 받는다. 또한 “ON”픽셀의 주변에 있는 (1,1), (1,3), (3,1), (3,3) 픽셀 또한 영향을 받는다. 이러한 방법을 반대로 이용하여, 인접 심볼 간 간섭에 의해 영향을 받은 픽셀을 보상한다.

2. 제안된 인접 심볼 간 간섭 보상 방식

본 논문은 인접 심볼 간 간섭으로 인하여 영향을 받은 인접 데이터 값을 이용하여 원 데이터를 보상해 주는 방식이다. 이러한 방식을 사용하는 이유는 한 픽셀을 기준으로 주변 픽셀들에 의해 영향을 받았으므로 다시 주변 픽셀들을 사용하여 보상한다. 그림 2는 홀로그래픽 저장장치를 위해 제안된 인접 심볼 간 간섭 보상 전처리 과정의 신호 처리 절차를 보여준다. 입력데이터가 채널에 통과한 후, 부가백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN)을 추가하여 수신된 데이터에 $I_{(m,n)}$ 을 기준으로 다음과 같이 보상된 데이터 $I'_{(m,n)}$ 을 계산한다.

$$I'_{(m,n)} = I_{(m,n)} - \Delta (I_{(m-1,n-1)} + I_{(m-1,n)} + I_{(m-1,n+1)} + I_{(m,n-1)} + I_{(m,n+1)} + I_{(m+1,n-1)} + I_{(m+1,n)} + I_{(m+1,n+1)}) \quad (1)$$

이 때 Δ 값은 SNR과 어긋남의 양에 따라 변하지만 본 논문에서는 실험을 통해 얻어진 최적의 Δ 값들의 평균값인 0.12로 사용하였다. 식 (1)을 계산을 한 후 $I_{(m,n+1)}$ 로 이동하여 주변 8개의 픽셀 값을 이용하여 위와 같은 계산을 반복한다. 예를 들어 $I_{(m,n)}$ 픽셀 값이 0이고 주변 8개의 픽셀 값이 1인 입력데이터를 채널을 통과시키면 $I_{(m,n)}$ 의 값은 인접 심볼 간 간섭 영향으로 인하여 커진다. 그러나 주변의 값들 또한 1이 채널을 통과한 값이므로 상당히 큰 값을 가지고 있으며 이러한

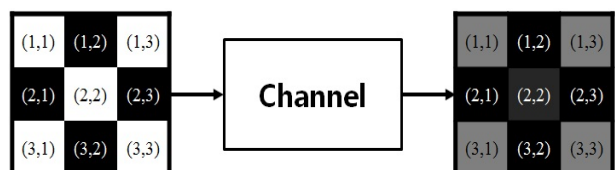


그림 1. 2차원 인접 심볼 간 간섭 예제
Fig. 1. Example of 2D inter-symbol interference.

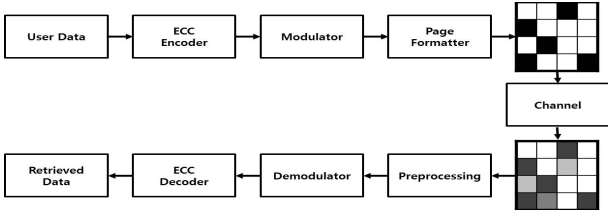


그림 2. 홀로그래픽 저장장치를 위한 인접 심볼간 간섭 보상 전처리 과정의 신호 처리 절차

Fig. 2. Signal processing with the preprocessing of ISI compensation for HDS.

값을 식 1을 이용하여 계산하면 인접 심볼 간 간섭의 영향을 줄일 수 있다.

즉, $I_{(m,n)}$ 을 중심으로 주변에 큰 값이 많이 있다면 영향을 많이 받았음을 알 수 있고 주변의 값들이 작다면 영향을 많이 받지 않았음을 알 수 있다. 따라서 제안한 식을 통해 간섭을 줄일 수 있다. 또한 더 좋은 성능을 발휘하기 위해 인접 심볼 간 간섭 보상 이후에 어긋남 보상을 결합하여 사용할 수도 있다.

III. 실험

홀로그래픽 저장장치의 채널 모델은 CCD 배열을 통해 입력 데이터를 출력 데이터로 만든다. 입력페이지에서 (x,y) 의 위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 식 (2) 와 같다.

$$h(x,y) = \frac{1}{\sigma_b^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x}{\sigma_b}, \frac{y}{\sigma_b}\right) \quad (2)$$

여기서 σ_b 는 분산된 신호의 회미한(blur)정도를 나타내며, blur의 값이 크면 클수록 2차원 인접 심볼 간 간섭이 증가한다. $\text{sinc}(x,y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{sinc}(x,y) = \left(\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, \frac{\sin(\pi y)}{\pi y}\right) \quad (3)$$

$[p,q]$ 위치의 이산 PSF는 다음과 같이 정의한다.

$$h[p,q] = \int_{q-\alpha/2+m_y}^{q+\alpha/2+m_y} \int_{p-\alpha/2+m_x}^{p+\alpha/2+m_x} h(x,y) dx dy \quad (4)$$

여기서 CCD 배열이 제대로 된 위치에 있지 않고, 어긋남 형태로 위치하게 되는 것을 어긋남 이라고 하고, x 축의 어긋남을 m_x , y 축의 어긋남을 m_y 로 정의할 때 연속적인 PSF는 다음과 같다.

$$h(x,y) = \frac{1}{\sigma_b^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x+m_x}{\sigma_b} + \frac{x+m_y}{\sigma_b}\right) \quad (5)$$

본 실험에서는 한 페이지의 크기를 1024×1024 픽셀로 하였고, 이러한 페이지를 10페이지를 실험하였다. 블러는 1.85이다. 채널 등화기에서 사용하는 부분응답(Partial Response, PR) 타겟은 PR(131)을 사용하였다. 채널에 주어지는 잡음 환경은 신호대잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 변화하면서 하였고, 신호대잡음비는 $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 로 정의하였다. σ_w^2 은 부가백색 가우시안 잡음전력이다.

먼저 비트오율 성능이 가장 높게 나타날 때의 Δ 값

표 1. SNR과 misalignment에 따른 Δ 의 최적의 값
Table 1. The optimal value of Δ according to the SNR and misalignment.

misalignment \ SNR	(0%, 0%)	(15%, 15%)	(30%, 30%)
10	0.097	0.106	0.122
11	0.099	0.109	0.129
12	0.105	0.119	0.128
13	0.104	0.122	0.130
14	0.112	0.124	0.130
15	0.105	0.117	0.135
16	0.117	0.136	0.137
17	0.127	0.130	0.139
18	0.100	0.112	0.139

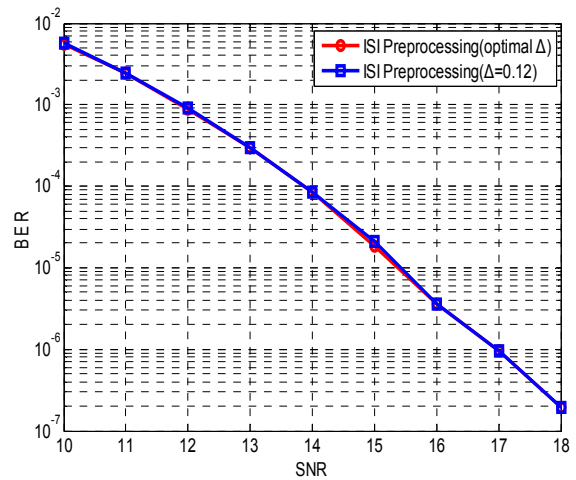


그림 3. Δ 에 따른 제안된 인접 심볼 간 간섭 보상 전처리 과정의 성능 그래프

Fig. 3. Performances of the the proposed ISI preprocessing according to Δ .

을 알아보았다. 표 1을 보면 신호대잡음비와 어긋남에 따른 최적의 Δ 값을 표시하였다. 그러나 그림 3을 보면 Δ 값의 평균값과 Δ 값의 최적의 값이 많은 차이를 보이지 않으므로 Δ 값의 평균값을 사용한다.

실험에서는 (1) 보상이 없는 랜덤 데이터, (2) 어긋남 보상 전처리과정, (3) 인접 심볼 간 간섭을 보상을 위한 제안된 전처리과정, (4) 제안된 인접 심볼 간 간섭 보상 전처리과정과 어긋남 보상 전처리과정의 결합 등 총 4 가지 경우를 비교하였다.

그림 4는 ISI 보상에 대한 예제를 보여준다. 만약에 '1'로 둘러싸여 있는 '0'이 채널을 통과한다면, 그 값은 ISI 영향에 의해 상당히 증가한다. 그러나 제안된 ISI 보상방식을 통해 감소시킬 수 있다.

그림 5는 SNR에 따른 비트오율 성능을 보여준다. 어긋남은 (10%, 10%)이다. 경우 (2)는 경우 (1)보다 성능이 좋았으며, 경우 (3)은 경우 (2) 보다 성능이 좋았다. 그리고 경우 (4)가 가장 성능이 뛰어났다.

그림 6은 어긋남에 따른 비트오율 성능을 보여준다. SNR은 10dB로 설정하였다. 경우 (1)의 경우가 가장 안 좋았다. 경우 (3)은 어긋남이 (15%, 15%)보다 작을 때

0	1	0	1	4.13	5.18	4.92	7.12	1.39	2.20	1.46	3.70
1	1	1	1	5.55	7.06	7.11	7.12	2.80	3.98	3.62	4.07
0	1	0	1	5.20	6.57	4.94	5.99	1.96	3.33	1.28	3.03
0	1	0	1	5.15	6.20	4.71	5.90	1.81	3.23	1.59	3.14
Input data				Channel effect				ISI Compensation			

그림 4. 인접 심볼 간 간섭 보상의 예제
Fig. 4. Example of ISI compensation.

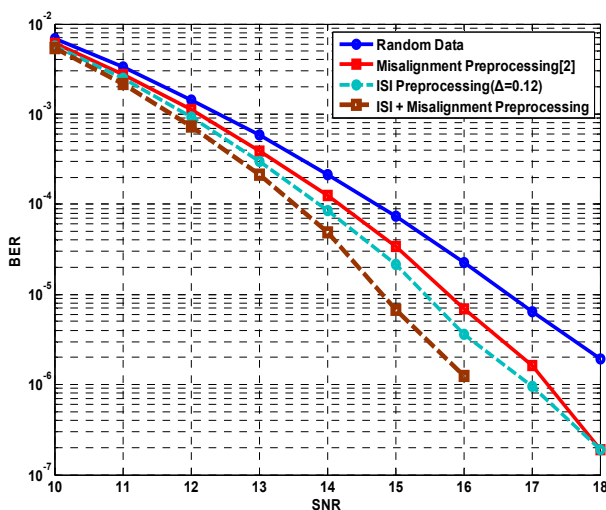


그림 5. SNR에 따른 비트오율 성능
Fig. 5. BER performance with respect to SNR.

경우 (2)보다 성능이 좋았다. 이것은 경우 (2)는 어긋남 문제에 대하여 초점을 맞추고 있으며, 경우 (3)은 ISI 문제에 대하여 초점을 맞추고 있기 때문이다. 그러므로 경우 (2)와 경우 (3)의 결합인 경우 (4)가 가장 좋은 성능을 나타낸다.

마지막으로 그림 7은 변조코드와 인접 심볼 간 전처리 과정의 결합을 보여준다. 6/8 균형부호만 이용한 경우보다, 6/8 균형부호와 인접 심볼 간 전처리 과정을 결합하면 더 좋은 성능을 발휘하였다. 이는 변조와 같이 결합하여 사용하면 더 좋은 성능이 가능하다.

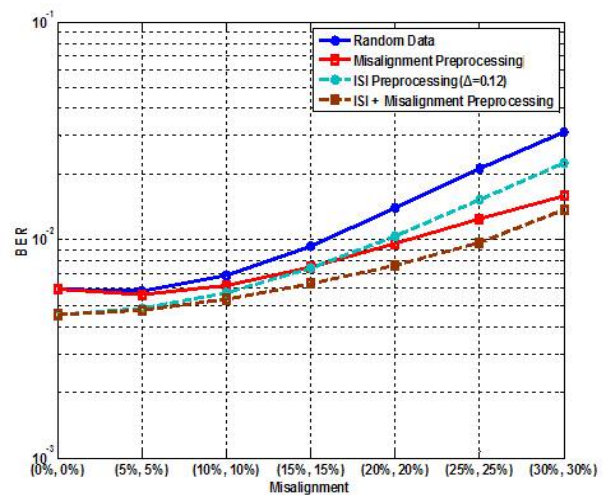


그림 6. 어긋남에 따른 비트오율 성능
Fig. 6. BER performance according to misalignment.

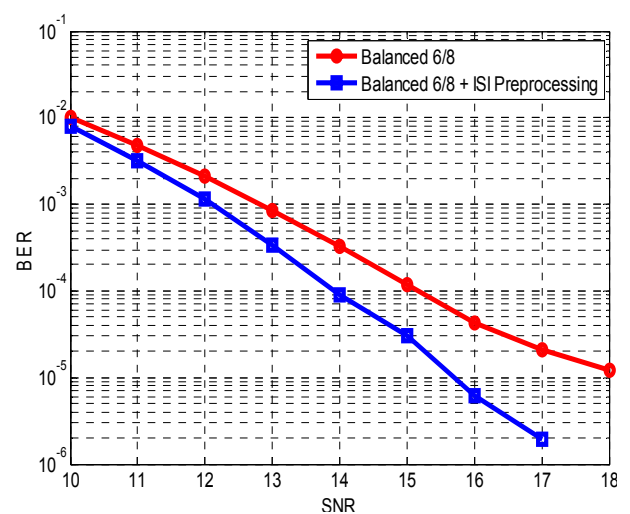


그림 7. SNR과 인접 심볼 간 보상 전처리 과정에 따른 비트오율 성능
Fig. 7. BER performance according to SNR and ISI preprocessing.

IV. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 저장장치에서 데이터 검출 에러를 줄이기 위해 간단한 인접 심볼 간 보상 방법에 대하여 소개하였다. 또한 제안된 인접 심볼 간 보상 전처리과정과 어긋남 보상 전처리과정의 결합을 제안하였다. 이러한 결합과정은 하나의 전처리과정을 사용하는 것보다 좋은 성능을 나타내었다. 그러므로 제안된 인접 심볼 간 전처리과정은 복조기 과정 전에 사용하면 검출 성능을 향상시킬 수 있다.

REFERENCES

- [1] D. Psaltis, M. Levene, A. Pu, G. Barbastathis, and K. Curtis, "Holographic storage using shift multiplexing," *Opt. Lett.*, Vol. 20, no. 7, pp. 782-784, April 1995.
- [2] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, August 2004.
- [3] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Günter, R. M. Macfalane, and G. T. Sincerbox, "Pixel-matched holographic data storage with megabit pages," *Opt. Lett.*, Vol. 22, no. 19, pp.1509-1511, October 1997.
- [4] V. Vadde and B. V. K. V. Kumar, "Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage," *Appl.Opt.*, Vol. 38, no. 20, pp. 4374-4386, July 1999.
- [5] A. Vardy, M. Blaum, P. H. Siegel, and G. T. Sincerbox, "Conservative arrays: multidimensional modulation codes for holographic recording," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 42, no. 1, pp. 227-230, January 1996.
- [6] J. Kim, J. Wee, and J. Lee, "Error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, no. 8, pp. 08KB04, August 2010.
- [7] J. Kim and J. Lee "Error-Correcting 6/8 Modulation Code for Reducing Two-Dimensional Intersymbol Interference," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, no. 9, pp. 09MB06, September 2011.
- [8] C. Chen, C. Fu, and T. Chiueh, "Low-complexity pixel detection for images with misalignment and interpixel interference in holographic data storage," *Appl.Opt.*, Vol. 47, no. 36, pp. 6784-6795, December 2008.
- [9] 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. Appl. Phys.*, Vol. 48, no. 3, pp. 03A033, March 2009.
- [10] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional SOVA and LDPC codes for holographic data storage system," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 45, no. 5, pp. 2260-2263, MAY 2009.
- [11] H. Kim, P. Yoon, J. Park, H. Jung, and G. Park, "Misalignment compensation and equalization for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, no. 3, pp. 03A034, March 2009.

저 자 소 개



정 성 권 (학생회원)
2015년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부 학사
2015년 3월~현재 숭실대학교
정보통신공학과 석사과정
<주관심분야 : 채널코딩, 고밀도
저장장치 시스템>



이 재 진 (정회원)
1983년 2월 연세대학교
전자공학과 학사
1984년 12월 U. of Michigan,
Dept. of EECS 석사
1994년 12월 Georgia Tech. Sch.
of ECE 박사
1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원
1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신
연구소 책임 연구원
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과
부교수
2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부
교수
<주관심분야 : 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스
템>