

논문 2017-54-5-1

# 홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템에서 오류요인에 따른 LDPC 곱부호의 성능

## (Performance of LDPC Product Code According to Error Factors on Holographic Data Storage System)

정 성 권\*, 이 재 진\*\*

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee<sup>Ⓒ</sup>)

### 요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템은 데이터를 줄 단위로 처리하는 것이 아닌 홀로그래픽 매질에 페이지 단위로 처리하기 때문에 빠른 접근 시간, 고용량, 높은 전송 속도의 장점을 갖는다. 하지만 고밀도 저장장치일수록 물리적인 영향에 의해 발생되는 연접오류의 길이는 기존의 저장장치보다 더욱 크다. 본 논문에서는 두 개의 LDPC 부호를 이용한 곱부호 방식을 사용하여 연접오류의 해결 성능을 알아본다. 제안하는 곱부호는 유사한 코드율 일 때, 코드율이 낮은 하나의 LDPC를 사용하는 하는 것 보다 코드율이 높은 두개의 LDPC 부호를 이용하는 것이 더 좋은 성능을 보였다. 또한 2차원 인접 심볼간 간섭 및 어긋남이 발생하여도 성능을 향상시킬 수 있다.

### Abstract

Holographic data storage system (HDSS) features short access times, high storage capacities, and fast transfer rates, since the data is recorded and read not by lines but by pages within a volume of holographic material. Burst error caused by physical impact on the high density storage system becomes very longer than that of conventional storage systems. This paper proposes an LDPC product code using two LDPC code to resolve burst error. When a total code rate is similar, the performance of two LDPC code having high code rate is better than that of one LDPC code having low code rate. Also, with error factors of two-dimensional intersymbol interference and misalignment, the proposed scheme can improve the performance in holographic data storage system.

**Keywords:** holographic data storage system, low-density parity check (LDPC) code, product code, burst error

## I. 서 론

홀로그래픽을 사용하여 저장하는 기술은 전자현미경의 해상도를 향상시키기 위해 개발된 후, 레이저의 발명으로

로 기술의 가속화가 이루어졌다<sup>[1-3]</sup>. 이러한 홀로그래픽 기술로 인하여 매체에 페이지단위로 데이터를 읽기 및 쓰기가 가능해졌다. 이러한 방식을 사용하는 데이터 저장장치가 홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템(holographic data storage system, HDSS)이다. HDSS는 기존의 자기기록방식인 하드디스크나 광기록방식인 CD, DVD, Blu-Ray와 같이 데이터의 기록 및 재생을 1차원적인 직렬 방식으로 처리하는 것이 아니라, 2차원적인 페이지 형태의 모양으로 처리된다. 따라서 데이터를 페이지 단위로 처리하기 때문에 데이터의 처리속도 및 전송률을 높일 수 있으므로 차세대 저장장치로 주목 받고 있다<sup>[4-5]</sup>. 또한 데이터를 표면에 기록하는 기존의 방식과는 달리 HDSS는 홀로그래픽 매질에 데이터를 저장한 후

\* 학생회원, 숭실대학교 정보통신소재융합학과  
(Department of ICMC convergence technology, Soongsil University)

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

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

※ 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2016R1A2B4011270)

Received : March 13, 2017 Revised : March 15, 2017

Accepted : April 7, 2017

빛의 회절 특성을 사용하여 페이지 단위로 기록 및 재생을 하기 때문에 데이터 저장용량을 크게 향상시킬 수 있다<sup>[6]</sup>. HDSS의 원리는 2차원 데이터를 SLM(spatial light modulator)을 이용하여 신호빔 (signal beam)으로 변환 후, 이를 기준빔(reference beam)과 간섭시켜 발생되는 간섭무늬를 HDSS의 매체에 저장한다. 반대로 재생할 때에는 기준빔을 HDSS의 매체에 입사시켜 재생한다. 이처럼 HDSS는 고속의 데이터 전송 및 처리 속도와 향상된 저장용량을 갖고 있지만, 데이터를 2차원적 단위로 처리하기 때문에 발생하는 2차원 인접 심볼간 간섭(two-dimensional intersymbol interference, 2-D ISI)이 발생한다. 또한 데이터를 HDSS의 매체에 페이지 단위로 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭(interpage interference, IPI)도 발생한다.

기록 밀도를 높이기 위해서는 하나의 비트를 저장하는 공간을 작게 만들어야만 하며, 이렇게 하면 하나의 페이지에 더 많은 데이터를 저장할 수 있으나 2-D ISI가 더욱 심해진다. 이와 유사하게 일정한 HDSS의 매체 공간에 저장하려는 데이터 페이지 수를 증가시키면 IPI가 더욱 증가한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 신호처리 연구가 진행되고 있다<sup>[7~10]</sup>. 또한 기록밀도가 높은 저장장치에 급침 혹은 물리적 충격 등에 의해 연립오류(burst error)가 발생한다면 기존의 저장장치보다 더욱 많은 데이터가 손실 될 것이다. 예를 들어, 기존의 저장장치에서 1cm×1cm의 크기의 물리적인 충격에 10,000 비트의 오류가 발생하였다고 가정한다면, 기록 밀도가 향상된 저장장치는 같은 크기의 1cm×1cm 물리적인 충격에 의해 10,000 비트 이상의 오류가 발생하게 된다. 이러한 연립 오류를 해결하기 위해 인터리빙(interleaving), 곱부호(product code) 등 여러 가지 방법들이 제안되고 있다<sup>[11~17]</sup>.

본 논문에서는 두 개의 LDPC(low-density parity check) 부호를 이용한 곱부호에서 각 LDPC 부호의 부가정보(extrinsic information)를 반복적으로 서로 주고받는 방식을 제안한다.

## II. 반복적 LDPC-LDPC 곱부호

곱부호 방식은 그림 1과 같이 2차원 데이터를 가로 방향과 세로 방향으로 각각 RS(Reed-Solomon) 부호, LDPC 부호 등의 오류정정부호를 사용하는 방식이다.

곱부호는 더 큰 연립 오류를 정정하기 위한 방법으로 가로 방향의 부호를 연립 오류가 발생하였는지의 검출

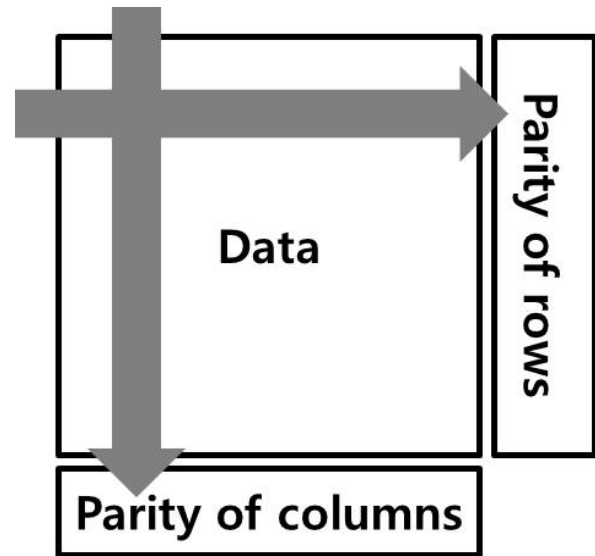


그림 1. 곱부호의 기본 구조

Fig. 1. Basic structure of product code.

을 위해 패리티의 길이를 짧게 하는 특징이 있다. 만약 연립오류가 발생하면 가로 방향의 부호는 세로 방향의 부호에게 오류의 위치정보를 넘겨준다. 세로 방향의 부호는 받은 위치정보를 이용하여, 즉 삭제 디코딩(eraser decoding)을 이용하여 연립 오류 능력을 향상 시킨다. 이러한 곱부호 방식을 이용한 RS-RS, RS-LDPC, LDPC-LDPC 등 다양한 곱부호가 제안되었다. 예를 들어, 하나의 데이터 구조의 크기가 100×1000 bits인 저장장치 시스템에서 5줄의 연립오류(5×1000 bits)가 발생하였다면, 이때 RS-RS 곱부호 방식에서 가로 방향의 RS 디코더는 오류정정능력 이상의 오류가 발생하여 오류정정이 불가능하므로 삭제 디코딩을 통해, 세로 방향의 RS 디코더에게 오류의 위치를 알려준다. 세로 방향의 RS 디코더는 오류의 위치를 알고 있기 때문에 이를 이용하여 위치를 모르는 경우보다 두 배의 오류를 정정한다.

그림 2는 제안하는 반복적 LDPC-LDPC 곱부호의 블록 다이어그램이다. 발생한 데이터를 LDPC1(세로 방향) 인코더와 LDPC2(가로 방향) 인코더를 통해 인코딩 후, HDSS의 채널을 통과시킨 뒤 부가 백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN)을 더한다. 이 후에 2차원 등화기(equalizer)와 2차원 연판정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm, SOVA)을 이용하여 나온 LLR(log-likelihood ratio) 값을 LDPC2 디코더에 입력한다. LDPC2 디코더에서 디코딩 후 나온 부가정보를 LDPC1 디코더에 전달한다. LDPC1 디코더는 2차원 SOVA로부터 받은 LLR값과 LDPC2 디코더로부터 받은 부가정보를 이용하여 디코

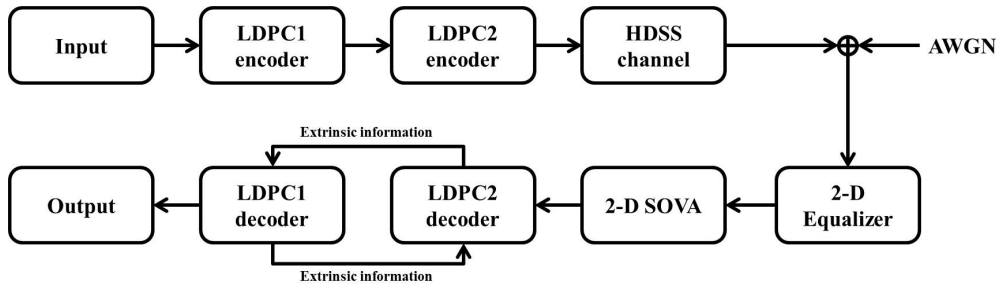


그림 2. 제안하는 곱부호 방식의 블록 다이어그램  
Fig. 2. Block diagram of the proposed product code.

딩을 한 후 다시 LDPC2 디코더에 부가정보를 전달한다. LDPC2 디코더는 2차원 SOVA로부터 받은 LLR값과 LDPC1으로부터 받은 부가정보를 이용하여 디코딩한다.

위와 같이 LDPC1 디코더와 LDPC2 디코더 사이에서 SOVA의 LLR값과 부가정보를 이용하여 반복적으로 디코딩한 후 반복이 끝나면 최종적으로 LDPC1 디코더에서 나온 출력값을 최종값으로 한다.

### III. 실험

HDSS의 채널 모델은 CCD (charge-coupled device)를 이용하여 통과한 형상으로 채널 모델링을 하였다<sup>[18-19]</sup>. 입력페이지에서  $(x, y)$ 의 연속적인 PSF (point spread function)은 아래와 같다.

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

여기서  $\sigma_b$ 는 분산된 신호의 퍼짐 정도를 나타내는 블러 (blur)를 나타내며, 블러가 커질수록 2차원 ISI 또한 증가한다.  $\text{sinc}(x, y)$ 는 아래와 같이 정의한다.

$$\text{sinc}(x, y) = \left(\frac{\sin(\pi x)}{\pi x}, \frac{\sin(\pi y)}{\pi y}\right) \quad (2)$$

이 때, CCD 배열이 올바른 위치에 있지 못한 상태 즉, 어긋남(misalignment)이 발생한다면 PSF는 다음과 같다.

$$h(x, y) = \frac{1}{\sigma_b^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x+m_x}{\sigma_b}, \frac{y+m_y}{\sigma_b}\right) \quad (3)$$

여기서  $m_x$ 와  $m_y$ 는  $x$ 축과  $y$ 축의 어긋남을 나타낸다. 따라서  $[p, q]$  위치의 이산적인 PSF는 아래와 같이 계산된다.

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

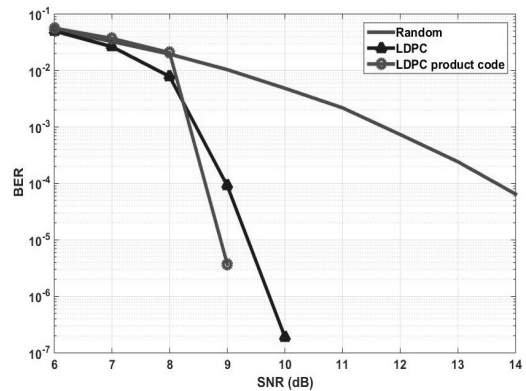


그림 3. SNR에 따른 BER 성능 그래프  
Fig. 3. BER performance according to SNR.

본 논문에서는 한 페이지의 크기가 1084×1084인 페이지에서 실험하였다. 채널의 잡음 환경은 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 변화하면서 하였고, SNR은  $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 로 정의하였다. 이 때  $\sigma_w^2$ 는 부가백색 가우시안 잡음전력을 나타낸다. 채널의 부분 응답(partial response, PR)은 수평, 수직 방향 모두 PR(131) 신호를 사용하였다. 신호검출을 위해 최대유사도 검출기는 2차원 SOVA를 사용하였다. LDPC 곱부호에서 가로와 세로 방향의 LDPC 부호는 (4336, 4096)을 사용하였으며, 곱부호의 전체 부호율(core rate)은 약 0.892이다. LDPC 곱부호의 성능을 가늠하기 위해 (4336, 3856) LDPC 부호 하나를 사용한 경우와 비교하였으며, 이 부호의 부호율은 약 0.889이다. LDPC 부호의 디코딩 방식은 모두 sum-product algorithm을 사용하였으며, LDPC 디코딩의 반복 횟수는 10번이고, LDPC 곱부호에서 LDPC 부호들 간의 반복 횟수는 3번으로 하였다.

그림 3은 SNR에 따른 BER 성능 그래프를 나타낸다. 이 때 블러는 1.85를 사용하였으며, 어긋남은 없다. BER이 10<sup>-4</sup>일 때, 제안하는 곱부호는 랜덤 데이터 보다 약 5dB의 성능이 향상되었으며, 일반적인 LDPC 부호 보다 약 0.4dB의 성능이 향상되었다.

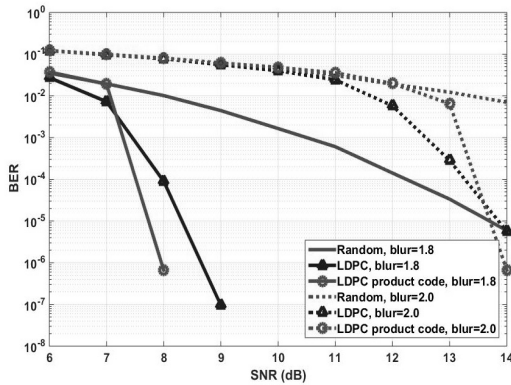


그림 4. Blur에 따른 BER 성능 그래프

Fig. 4. BER performance according to blur.

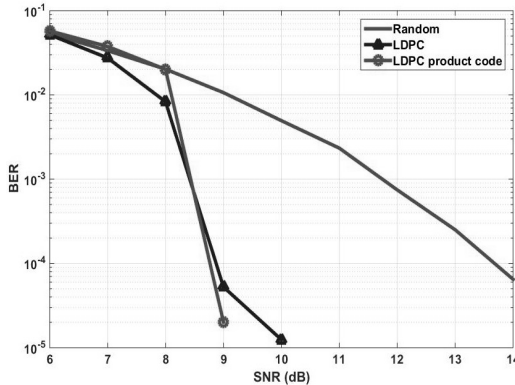


그림 5. 5%의 어긋남일 때 BER 성능 그래프

Fig. 5. BER performance where misalignment is 5%.

그림 4는 블러를 각각  $\sigma_b=1.8$ ,  $\sigma_b=2.0$ 으로 설정하였을 때의 BER 성능 그래프를 나타낸다.  $\sigma_b=1.8$  일 때는 SNR이 8dB 이상부터 제안하는 곱부호가 급격한 성능 향상을 보였으며,  $\sigma_b=2.0$  일 때는 제안하는 곱부호가 SNR이 14dB 이상부터 성능 향상을 보였다. 이러한 이유는 채널환경이 좋지 못할 때에는 부가정보가 정확하지 못하기 때문이다. 하지만 SNR이 향상 될수록 부가 정보를 사용하면 성능을 급격하게 향상 시킬 수 있다.

그림 5는 가로 방향과 세로 방향으로 각각 5%의 어긋남을 주었을 때의 성능 그래프를 보여준다. 이 때 블러는 1.85로 하였다. 제안하는 곱부호가 어긋남이 발생하여도 성능이 우수함을 알 수 있다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템에서 성능향상을 위한 LDPC 곱부호를 반복적으로 사용하는 방식을 제안하였다. 연립오류를 정정하기 위해

사용하는 곱부호 방식을 이용하여 기존의 랜덤에러 또한 성능을 향상시킬 수 있다.

#### REFERENCES

- [1] D. Gabor, "Associative holographic memories," IBM J. Res. Develop., pp. 156-159, 1969.
- [2] E. L. Kral, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Correlation properties of random phase diffusers for multiplex holography," Appl. Opt., Vol. 21, no.7, pp. 1281-1290, April 1982.
- [3] A. E. Krasnov, "Thick-film phase holograms recorded by means of coded reference waves," Sov. J. Quantum. Electron., Vol. 7, no. 9, pp. 1147-1148, 1977.
- [4] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," in Proc. IEEE, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, 2004.
- [5] D. Psaltis, A. Pu, M. Levene, K. Curtis, and G. Barbastathis, "Holographic storage using shift multiplexing," Opt. Lett., Vol. 20, no. 7, pp. 782-784, 1995.
- [6] 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.
- [7] K. Park, B. Kim, and J. Lee, "A 6/9 Four-Ary Modulation Code for Four-Level Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 52, no. 9, pp. 09LE05, September 2013.
- [8] S. Kim and J. Lee, "A Simple 2/3 Modulation Code for Multi-Level Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 52, no. 9, pp. 09LE04, September 2013.
- [9] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional 5:8 modulation code for holographic data storage," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, no. 3, pp. 03A031, March 2009.
- [10] 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.
- [11] J. Park, S. Jeong, and J. Lee, "Equally scattered interleaving for holographic data storage systems," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 54, pp. 09MA02, August 2015.
- [12] J. Lee, J. Lee, and T. Park, "Error control scheme for high-speed DVD systems," IEEE Trans. Consum. Electron., Vol. 51, no. 4, pp. 1197-1203, 2005.

- [13] Y. Han, W. E. Ryan, and R. D. Wesel, "Dual-mode decoding of product codes with application to tape storage," in Proc. IEEE 2005 Global Communications Conf., St. Louis, USA.
- [14] T. V. Vo, and S. Mita, "A novel error-correcting system based on product codes for future magnetic recording channels," IEEE Trans. Magn., Vol. 47, no. 10, pp. 3320-3323, 2011.
- [15] D. Park and J. Lee, "Performance evaluation of LDPC-LDPC product code for next magnetic recording channel," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 49, no. 11, 2012.
- [16] S. Jeong and J. Lee, "Iterative LDPC - LDPC Product Code for Bit Patterned Media," IEEE Trans. Magn., vol. 53, no. 3, pp. 3100704, March 2017.
- [17] S. Jeong and J. Lee, "LDPC product coding scheme with extrinsic information for bit patterned media recoding," AIP Adv., vol. 7, no. 5, pp. 056513, March 2017.
- [18] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," Proc. SPIE, Vol. 4342, pp. 393-400, January 2002.
- [19] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," Proc. SPIE, Vol. 4090, pp. 205-210, September. 2000.

— 저 자 소 개 —



정 성 권(학생회원)  
2015년 2월 숭실대학교 정보통신  
전자공학부 학사  
2015년 3월~현재 숭실대학교 정보  
통신소재융합학과 석사과정  
<주관심분야: 채널코딩, 고밀도 저장  
장치 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 정보통신연구소  
책임 연구원  
1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과  
부교수  
2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수  
<주관심분야: 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스템>