

논문 2017-54-6-3

홀로그래픽 저장장치를 위한 수정된 로그-유사도비를 이용한 LDPC-LDPC 곱부호

(LDPC-LDPC Product Code Using Modified Log-likelihood Ratio
for Holographic Storage System)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[Ⓒ])

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 높은 데이터 전송률과 저장용량이 매우 크기 때문에 차세대 저장장치 후보 중 하나이다. 하지만 홀로그래픽 데이터 저장장치의 오류요인으로는 인접 페이지간 간섭 및 2차원 인접 심볼간 간섭이 있다. 또한 물리적 영향에 의해 발생하는 연접오류가 있다. 본 논문에서는 이러한 연접오류를 정정하고 성능을 향상시키기 위해 수정된 로그-우도비값과 부가적 정보를 반복적으로 사용하는 방식을 제안한다. 제안하는 LDPC 곱부호는 일반적인 LDPC 부호와 비교하여 BER이 10^{-5} 일 때, 약 0.5dB 성능 향상을 보였다.

Abstract

Since holographic data storage has the advantage of high recording density and data transfer rate, it is a candidate for the next generation storage systems. However, Holographic data storage system is affected by interpage interference and two dimensional intersymbol interference. Also, burst error occurs by physical impact. In this paper, we propose an LDPC product code using modified log-likelihood ratio and extrinsic information to correct burst error and improve performance of holographic data storage. The performance of proposed LDPC product code is 0.5dB better than that of the conventional LDPC code.

Keywords : holographic data storage, burst error, low-density parity check code, product code

I. 서 론

인터넷 속도의 향상과 클라우드 저장 시스템 등의 기술 발전으로 인해 빠른 처리 속도 및 대용량 저장장치 시스템이 요구되고 있다. 이러한 요구를 만족시키기 위

해 홀로그래픽 데이터 저장장치(holographic data storage, HDS)는 차세대 저장장치중의 하나로 주목받고 있다. 홀로그래픽 데이터 저장장치는 기존의 1차원으로 처리하는 저장장치인 하드디스크(hard disk)나 CD, DVD, Blu-ray와는 다르게 2차원 데이터를 매체의 볼륨에 저장하기 때문에 고용량($1\text{Tb}/\text{cm}^3$)을 갖으며, 데이터를 페이지 단위로 처리하기 때문에 1Gbps 이상의 데이터 전송율을 갖는 차세대 저장장치이다. HDS의 원리는 데이터 페이지의 광학이미지를 참조빔(reference beam)과 간섭시켜 발생하는 간섭패턴을 2차원 이미지로 저장한다. 반대로 읽을 때에는 CCD(charge-coupled device)를 통해 데이터를 읽는다. 따라서 기존의 저장장치와는 다른 오류 발생 요인이 존재한다. HDS는 CCD를 이용해서 2차원 데이터를 읽으므로 2차원 인접 심볼간 간섭

* 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 ; May 15, 2017

(intersymbol interference, ISI)이 발생하며, 여러 페이지를 하나의 체적에 저장하기 때문에 발생하는 인접 페이지간 간섭(interpage interference, IPI)가 발생한다^[1~2]. 따라서 이러한 오류요인을 해결하기 위해 등화기(equalizer), 신호검출기, 변조코드, 오류정정부호 등이 제안되었다^[3~7].

Tone-Cotrollable Code는 HDS에서 ON 픽셀과 OFF 픽셀의 비율을 조절하는 방식으로 한 페이지에 ON픽셀의 개수를 약 25%정도로 하여 저장 용량을 약 15% 늘릴 수 있는 방식의 제안이다^[8]. 오류정정능력을 갖는 4/6 변조부호는 HDS에서 성능을 저하시키는 고립 픽셀 패턴을 제거하는 변조부호를 디코딩 과정에서 비터비 알고리즘을 함께 사용하여 오류정정능력을 향상시켰다^[9]. 2차원 연관정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm, SOVA)는 각각 가로 방향과 세로 방향의 SOVA를 이용하여 성능을 향상시킬 수 있다^[10]. 이와 더불어 2차원 SOVA와 오류정정능력을 갖는 변조부호를 함께 이용한 터보 등화기 방식이 제안되었다^[11].

이처럼 HDS의 오류 원인인 2차원 ISI와 IPI를 줄이기 위한 다양한 알고리즘은 제안이 되었다. 그러나 저장장치가 고밀도가 될수록 연접오류 상황에 대한 오류정정 기술이 필요하다. 예를 들어 굵힘에 의해 기존의 저장장치에서 1,000bits의 연접오류가 발생하였다면, 똑같은 크기의 굵힘이 고밀도 저장장치에서 발생하면 1,000bits 이상의 오류가 발생할 것이다. 이러한 연접오류 문제를 해결하기 위해 곱부호(product code)을 사용하며, 곱부호는 Elias가 1954년에 제안한 방식이다^[12]. 곱부호는 2차원 데이터 구조에서 각각 가로 방향과 세로 방향으로 부호화 하는 방식으로 리드 솔로몬(Reed Solomon, RS) 부호, LDPC(low-density parity check) 부호 등의 오류정정부호를 사용하는 방식이다. 이러한 방식을 사용하는 RS-RS 곱부호, LDPC-LDPC 곱부호, RS-LDPC 곱부호 등이 제안되었다^[13~18].

본 논문에서는 가로방향과 세로방향의 LDPC 디코더에서 나온 디코딩값을 이용하여 오류를 판단하고, LDPC 디코더간에 부가정보(extrinsic information)을 전달하는 과정을 통해 성능을 향상시키는 방식을 제안한다.

II. 홀로그래픽 채널 모델

CCD(charge-coupled device)를 이용한 형상의 HDS의 채널 모델링을 사용하였으며, (x, y) 의 연속적인 PSF(point spread function)은 다음과 같다^[19~20].

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

여기서 신호의 희미한 정도를 나타내는 σ_b 는 블러(blur)이며, 블러가 커질수록 2차원 ISI 또한 증가한다. 데이터의 용량을 증가시키기 위해서는 비트의 간격이 좁아져야하며 이때 σ_b 의 값은 커진다. $\text{sinc}(x, y)$ 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, 올바른 위치가 아닌 어긋난 위치에 CCD 배열이 있다면 PSF는 다음과 같다.

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

이 때 m_x 와 m_y 는 수평 방향과 수직 방향으로의 어긋남(misalignment)을 나타낸다. 따라서 $[p, q]$ 위치의 이산적 PSF는 아래와 같이 계산된다.

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

채널을 통과한 신호값인 $r[p, q]$ 는 아래와 같이 계산된다.

$$r[p, q] = d[p, q] \otimes h[p, q] + n[p, q] \quad (5)$$

여기서 $d[p, q]$ 는 채널을 통과하기 전의 2차원 입력 데이터이며, $n[p, q]$ 는 부가 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)이다. 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 통해 채널의 잡음을 가정하였으며, SNR은 $10 \log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 로 정의하였다. 이 때 σ_w^2 는 AWGN의 전력을 나타낸다.

III. 부가정보를 이용한 LDPC 곱부호

곱부호의 사용은 물리적 영향 등에 의해 발생하는 연접오류에 대한 문제를 해결할 수 있다. 일반적으로 곱부호에서 가로방향을 나타내는 inner code는 패리티 길이를 작게 하는 부호화 방식으로, 연접오류가 발생하지 않았다면 디코딩을 통해 오류를 수정하지만, 부호의 오류정정능력 범위 이상의 오류가 나타나면 연접오류로 판단하여 해당 부분의 위치를 세로 방향으로 디코딩 하

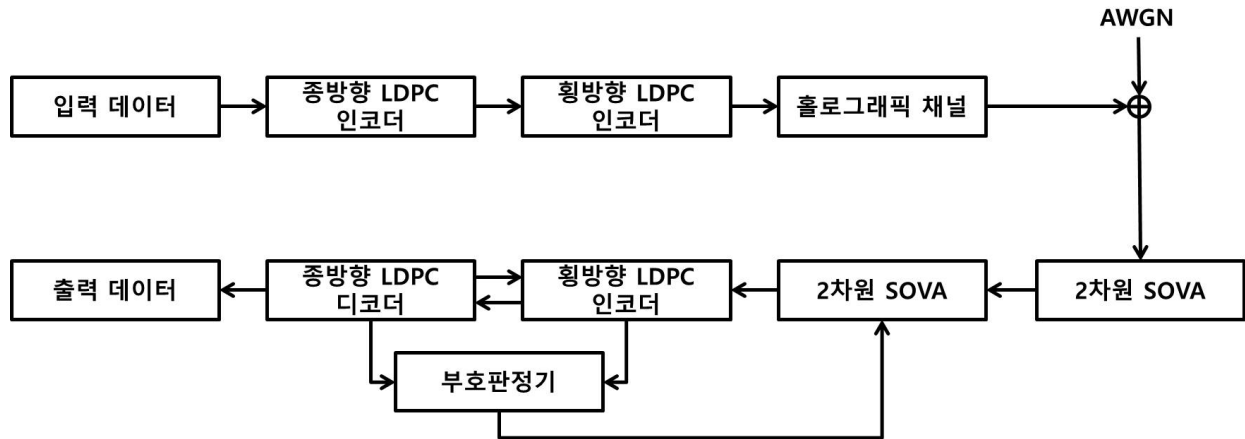


그림 1. 제안하는 LDPC 곱부호 방식의 블록 다이어그램
Fig. 1. Block diagram of the LDPC product code.

는 outer code에게 전달하여 준다. outer code는 패리티를 길게 하는 부호화 방식으로 inner code로부터 받은 정보를 이용하여 오류정정능력을 향상시킬 수 있다.

HDS의 성능을 높이고 연집오류를 해결하기 위해 본 논문에서 제안하는 LDPC 곱부호는 그림 1과 같이 진행된다. 입력 데이터는 종방향 LDPC 인코더와 횡방향 LDPC 인코더에 각각 입력된다. 이후에 나온 패리티들을 각 방향에 맞추어 배열한 후에 홀로그래픽 채널을 통과시키고 AWGN 잡음을 더한다. 수신된 데이터는 2차원 등화기를 통해 등화한 후 2차원 SOVA에 입력한다. SOVA를 이용하여 검출된 신호의 LLR(log-likelihood ratio)값과 부가정보를 이용하여 횡방향 LDPC 디코더에 입력한 후 디코딩 과정을 실시한다. (단, 첫 번째 과정에서 부가정보의 값은 '0'이다.) 횡 방향 디코더의 디코딩 과정이 종료된 후 발생한 출력값은 판정 부분에 전달하며, 부가정보는 종방향 LDPC 디코더에 전달한다. 종방향 LDPC 디코더는 SOVA의 LLR값과 횡방향 LDPC 디코더로부터 전달받은 부가정보를 이용하여 디코딩 과정을 한 후 부가정보를 횡방향 LDPC 디코더로, 출력값은 부호판정 부분에 전달한다.

각 디코딩 과정이 끝난 후 횡방향 LDPC 디코더와 종방향 LDPC 디코더에서 나온 출력값을 부호판정기에서 비교하여 출력값이 다르다면 삭제 디코딩(eraser decoding)을 수행하고 횡방향 LDPC 디코더와 종방향 LDPC 디코더에 정보를 전달한다. 위와 같이 디코딩 과정을 여러번 반복한 후에 반복 과정이 종료되면 종방향 LDPC 디코더를 통하여 나온 결과값을 최종값으로 판단한 후 출력한다.

IV. 실험

본 논문에서는 제안하는 LDPC 곱부호를 위해 가로와 세로 방향의 모두 (4336, 4096) LDPC 부호를 사용하였다. 곱 부호의 최종 코드율은 약 0.892이다. 또한 제안된 곱부호의 성능을 알아보기자 (4336, 3856) LDPC 부호를 하나만 사용한 오류정정부호와 비교하였다. 이것의 코드율은 약 0.889이다. LDPC 디코더에서 디코딩 알고리즘은 sum-product algorithm을 이용하였으며, LDPC 디코딩을 위해 10번의 반복을 수행하였다. 그리고 제안하는 곱부호에서 전체 반복 횟수는 3번이다.

한 페이지는 1084×1084 픽셀로 구성되어있으며 총 10페이지에 대하여 실험하였다. 해당 실험에서는 IPI는 고려하지 않았다. 채널의 부분응답(partial response)은 수평 방향 PR(1, 3, 1), 수직 방향 PR(1, 3, 1) 신호를 사용하였다. 향상된 신호검출을 실행하기 위해 최대우사도(maximum likelihood) 검출기는 2차원 SOVA를 사용하였다.

그림 2는 SNR의 변화에 따른 BER(bit error rate) 성능 그래프를 나타내며, SOVA의 출력값, 하나의 LDPC의 출력값, LDPC-LDPC 곱부호의 성능을 비교하였다. 그림을 보면 SNR이 9 이상부터 제안하는 곱부호 방식의 성능이 우수함을 보여준다.

그림 3은 블러가 각각 1.8과 2.0일 때, BER 성능 그래프를 나타낸다. 블러가 1.8 일 때, BER이 10⁻⁵에서 제안하는 곱부호 방식이 SOVA보다 약 6dB, 하나의 LDPC 부호보다 약 0.5dB 성능이 향상되었다. 블러가 2.0 일 때는 SNR이 14dB 이상부터 급격한 성능 향상을 보여준다.

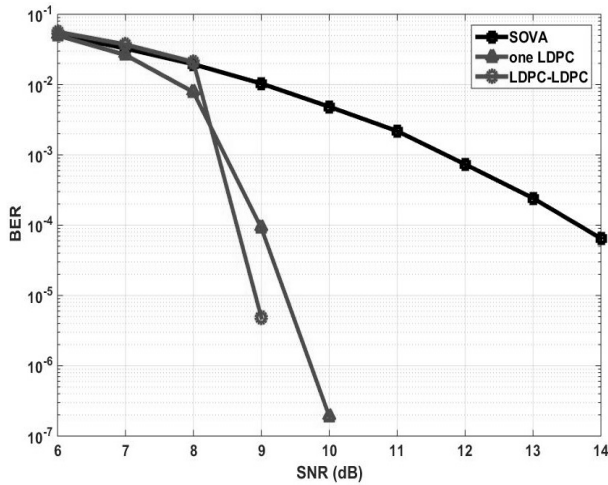


그림 2. SNR의 변화에 따른 BER 성능 그래프
Fig. 2. BER performance in accordance with SNR.

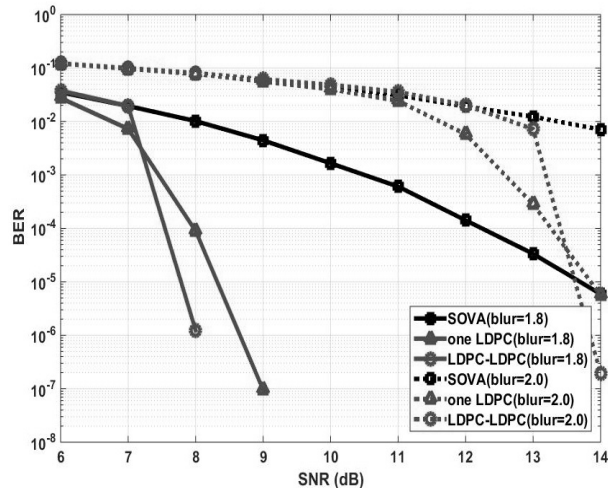


그림 3. $\sigma_b=1.8, 2.0$ 일 때, BER 성능 그래프
Fig. 3. At σ_b of 1.8 and 2.0, BER performance.

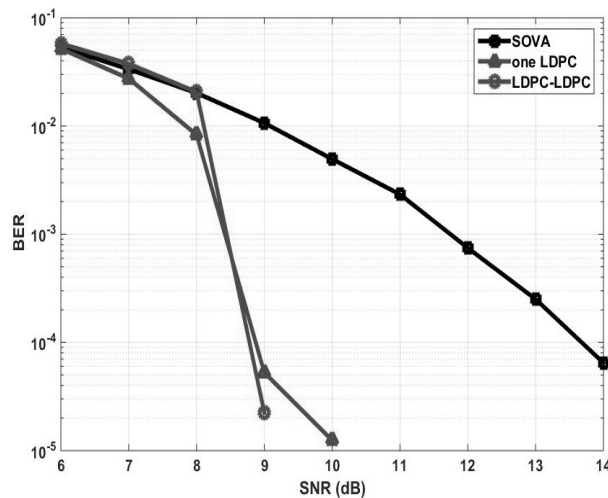


그림 4. 5%의 어긋남일 때 BER 성능 그래프
Fig. 4. At misalignment of 5%, BER performance.

그림 4는 x축과 y축으로 각각 어긋남이 5%가 발생하였을 때의 성능그래프를 보여준다. 그림을 보면 SNR이 8dB 이하 일 때는 제안하는 LDPC-LDPC 곱부호는 성능이 좋지 않지만, SNR이 9dB 이상부터 급격한 성능향상을 보여준다. 이러한 이유는 SNR이 향상됨에 따라 부가정보 또한 정확한 LLR값을 전달하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 홀로그래픽 저장장치에서 부가정보를 사용한 LDPC-LDPC 곱부호 방식을 제안한다. 곱부호는 굵힘 혹은 물리적인 충격에 의해 발생하는 연접오류를 해결하는 방식으로 사용되었으나, 2차원 ISI, IPI, 어긋남 등의 오류요인에 대해서도 오류를 정정할 수 있다. 또한 채널상황에 맞춰 부가정보를 적절하게 수정하여 이용하면 다양한 시스템에서 사용이 가능할 것이다.

REFERENCES

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," in Proc. IEEE, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, 2004.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] G. Kim and J. Lee, "2/3 Modulation Code and Its Vterbi Decoder for 4-level Holographic Data Storage," J. KICS, Vol. 38A, no. 10, pp. 827-832, October 2013.
- [6] 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, Sep. 2011.
- [7] 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, Mar. 2009.

- [8] D. Park, M. Yoo and J. Lee, "Tone- Controllable Codes for Holographic Data Storage System," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 49, no. 8, pp. 08KB05, August 2010.
- [9] 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.
- [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] J. Kim, Y. Moon and J. Lee, "Iterative Decoding between Two-Dimensional Soft Output Viterbi Algorithm and Error Correcting Modulation Code for Holographic Data Storage," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 50, no. 9, pp. 09MB02, September 2011.
- [12] P. Elias, "Error-free coding," IRE Trans., Vol. 4, no. 4, pp. 29-37, 1954.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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 저
장장치 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 부
교수
2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수
<주관심분야: 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스템>