

# 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 2차원 7/9 저밀도 ON 픽셀 변조부호

정성권\*, 이재진<sup>o</sup>

## Two-Dimensional 7/9 Sparse-ON Pixel Modulation Code for Holographic Data Storage

Seongkwon Jeong\*, Jaejin Lee<sup>o</sup>

요약

기존 광학 저장장치의 물리적 한계를 극복하기 위해 높은 저장용량 및 짧은 접근 시간을 갖는 홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템은 차세대 저장장치로 주목받고 있다. 홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 페이지당 ON 픽셀의 비율이 약 25%이면 저장용량을 약 15% 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 저장용량을 증가시키기 위한 ON 픽셀의 비율이 약 28%인 2차원 7/9 저밀도 ON 픽셀 변조부호를 제안한다.

**Key Words** : data storage systems, holographic data storage system, modulation code, signal detection, sparse code

ABSTRACT

To overcome the physical limits of the conventional data storage system, holographic data storage system which has advantages of high storage capacity and short access time is one of candidate for the next generation data storage system. When the ratio of ON pixels per page is around 25% in holographic data storage system, the storage capacity is increased to 15%. In this paper, to increase the storage capacity, we proposed a two-dimensional 7/9 sparse-ON pixel modulation code with 28% ON pixel ratio.

### I. 서론

Compact discs (CD), digital versatile discs (DVD), Blu-ray discs 등 광학(optical) 저장장치는 laser spot을 이용하여 데이터를 기록 및 재생을 하는 저장장치이다. 광학 저장장치의 기록밀도를 증가시키기 위해서는 laser spot의 소형화, 더 짧은 파장을 갖는 레이저 등이 필요하지만 기술적 한계에 도달하였다. 하지만

홀로그래픽 데이터 저장장치 시스템(holographic data storage systems, HDSS)는 다른 저장장치와는 다르게 디지털 데이터를 미디어의 볼륨에 저장하기 때문에 기록밀도를 향상시킬 수 있다<sup>1,2</sup>. 또한 2차원 형태의 데이터 페이지 단위로 읽고 쓰기 때문에 데이터 처리 속도 및 전송률이 매우 높다. 이러한 장점으로 HDSS는 차세대 저장장치로 주목받고 있다. 그러나 기존의 저장장치와 다른 오류가 발생하며 성능을 저

\* 본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 BK21플러스 사업 연구(No.31Z20150313339)입니다.

• First Author : (ORCID:0000-0002-4974-337X)Soongsil University Department of ICMC Convergence Technology, seongkwon@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-7791-3308)Soongsil University Department of ICMC Convergence Technology, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201901-408-A-RN, Received January 7, 2019; Revised January 21, 2019; Accepted January 21, 2019

하시킨다. 미디어 체적에 여러 페이지를 한 공간에 기록하기 때문에 페이지들 간에 인접 페이지간 간섭(interpage interference, IPI)가 발생하며<sup>[3]</sup>, 데이터를 기존의 1차원 데이터 저장장치와는 달리 2차원인 페이지 단위로 데이터를 처리하기 때문에 인접 심볼간 간섭(intersymbol interference, ISI) 또한 2차원 형태로 발생한다<sup>[4]</sup>. 이외에도 어긋남 등 여러 오류들이 발생하여 HDSS의 성능이 저하된다<sup>[5]</sup>.

신호처리 관점에서 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 신호처리 방식이 제안되었다. IPI를 줄이기 위하여 ON 픽셀과 OFF 픽셀의 수를 동일하게 유지하는 균형변조부호(balanced modulation code)가 제안되었으며, 하나의 픽셀을 기준으로 상하좌우 모두에 기준된 픽셀과 반대 부호의 픽셀이 발생하지 않기 위해 고립 패턴 제거 변조부호(non-isolated modulation code) 방식 등 오류를 심각하게 발생시키는 패턴들을 방지하기 위한 변조부호 방식이 제안되었다<sup>[6-9]</sup>. 비트 패턴드 미디어 기록장치, HDSS 등 데이터 저장장치의 성능을 향상시키기 위해 2차원 곱부호(product code) 방식이 제안되었다<sup>[10-11]</sup>. 해당 방식은 inner code와 outer code에 각각 저밀도 패리티 체크(low-density parity check, LDPC) 부호를 사용하였으며 부가정보(extrinsic information)를 함께 활용하여 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 HDSS의 기록밀도를 증가시키기 위해 저밀도 ON 픽셀 7/9 변조부호를 제안한다. HDSS의 기록밀도를 높일 수 있는 방법으로 한 페이지당 ON 픽셀의 비율을 낮추게 되면 한정된 체적에 저장할 수 있는 페이지의 수를 증가시킬 수 있게 된다. 한 페이지 내 ON 픽셀의 비율을 25%정도로 하면 체적당 기록밀도를 약 15% 정도 증가시킬 수 있다<sup>[12]</sup>. 제안하는 변조부호는 한 페이지당 약 28%의 ON 픽셀 비율을 나타내는 7/9 변조부호로 7개의 비트를 3×3 구조의 2차원 변조부호로 변환하는 부호를 제안한다.

## II. 2차원 7/9 저밀도 ON 픽셀 변조부호

제안하는 2차원 저밀도 ON 픽셀 7/9 변조부호는 ON 픽셀의 비율을 낮춰 사용하여 기록밀도를 증가시킬 수 있는 변조부호로 7비트를 3×3 구조의 9비트 2차원 변조부호로 변환하여 사용한다. 저밀도 ON 픽셀로 만들기 위해 3×3 구조에서 1의 개수가 0개 일 때의 경우의 코드워드 1개, 1의 개수가 1개 일 때의 경우의 코드워드 9개, 1의 개수가 2개 일 때의 경우의 코드워드 36개, 1의 개수가 3개 일 때의 경우의 코드

표 1. 제안하는 7/9 변조부호의 코드워드 리스트  
Table 1. Codeword lists of the proposed 7/9 modulation code.

00000000	000100110	010000000	100000011
000000001	000101000	010000001	100000100
000000010	000101001	010000010	100000101
000000011	000101010	010000011	100000110
000000100	000101100	010000100	100001000
000000101	000110000	010000101	100001001
000000110	000110001	010000110	100001010
000000111	000110010	010001000	100001100
000001000	000110100	010001001	100010000
000001001	000111000	010001010	100010001
000001010	001000000	010001100	100010010
000001011	001000001	010010000	100010100
000001100	001000010	010010001	100011000
000001101	001000011	010010010	100100000
000001110	001000100	010010100	100100001
000010000	001000101	010011000	100100010
000010001	001000110	010100000	100100100
000010010	001001000	010100001	100101000
000010011	001001001	010100010	100110000
000010100	001001010	010100100	101000000
000010101	001001100	010101000	101000001
000010110	001010000	010110000	101000010
000011000	001010001	011000000	101000100
000011001	001010010	011000001	101001000
000011010	001010100	011000010	101010000
000011100	001011000	011000100	101100000
000100000	001100000	011001000	110000000
000100001	001100001	011010000	110000001
000100010	001100010	011100000	110000010
000100011	001100100	100000000	110000100
000100100	001101000	100000001	110001000
000100101	001110000	100000010	110010000

워드 84개를 선택하면 총  ${}^9C_0+{}^9C_1+{}^9C_2+{}^9C_3=130$ 가지이며 이 중에서 128가지를 선택한다. 표 1은 2차원 저밀도 ON 픽셀 7/9 변조부호를 위해 선택한 128개의 코드워드들의 리스트를 보여주며 선택된 128개의 코드워드들의 ON 픽셀 비율은 약 28%이다. 인코딩 방식은 선택된 128개의 코드워드를 이용하여 일대일 매핑(mapping) 방식으로 인코딩 하였으며, 디코딩은 연판정 출력 비터비 알고리즘(soft-output Viterbi algorithm, SOVA)을 통해 출력된 연판정 값을 이용하여 코드워드들 중 가장 작은 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 갖는 코드워드를 디매핑(de-mapping) 하여 최종 값으로 결정한다.

### III. 홀로그래픽 채널 모델링

그림 1은 HDSS의 블록다이어그램을 보여준다. (x, y)에 관한 연속적 PSF (point spread function) 홀로그래픽 채널 모델은 다음과 같이 정의한다<sup>[13]</sup>.

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

여기서  $\sigma_b$ 는 분산된 신호의 퍼짐 정도를 나타내는 blur,  $m_x$ 와  $m_y$ 는 각각 가로방향과 세로방향의 어긋남 (misalignment) 을 나타낸다. blur의 증가는 ISI를 증가시킨다.  $\text{sinc}(x, y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

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

연속적인 PSF를  $[p, q]$  위치에서 이산적인 PSF로 나타내면 다음과 같다.

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

최종적으로 홀로그래픽 채널을 통과한 수신값  $r[p, q]$ 는 다음과 같다.

$$r[p, q] = d[p, q] \otimes h[p, q] + n[p, q] \quad (4)$$

이 때  $d[p, q]$ 는 채널 통과 전 2차원 입력 데이터,  $n[p, q]$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma$ 인 부가 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 잡음을 나타낸다.

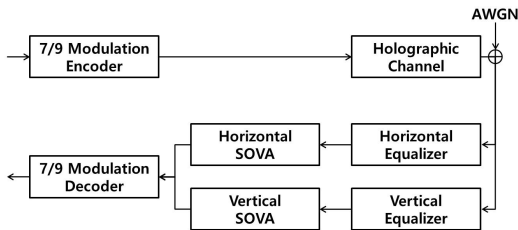


그림 1. 제안하는 HDSS의 블록다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of the proposed HDSS.

### IV. 실험

실험을 위해 한 페이지의 크기를 1023×1023로 하

였으며 총 1000페이지에 대하여 실험을 하였다. 부분 응답 최대 유사도(partial response maximum likelihood, PRML)를 이용하여 채널 등화를 하였으며 이 때 PR타겟의 가로 방향은 PR(1, 3, 1), 세로방향은 PR(1, 3, 1)을 사용하였다. 등화기 계수의 업데이트를 위해 least mean square 알고리즘을 사용하였으며, 신호검출을 위해 가로방향과 세로방향의 SOVA로 구성된 2차원 SOVA를 사용하였다. 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)는  $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$  으로 정의하며, 이 때  $\sigma_w^2$ 는 AWGN의 전력을 나타낸다.

그림 2는 SNR 및 blur가 1.75, 1.85 일 때에 따른 비트 오류율(bit-error ratio, BER) 성능을 보여준다. blur가 변하여도 변조부호를 사용하지 않은 랜덤 데이터와 변조부호는 성능이 유사하였다. 그림 3은 어긋남 및 blur의 변화에 따른 BER 성능을 보여준다. 어긋남이 발생하여도 랜덤 데이터와 변조부호의 BER

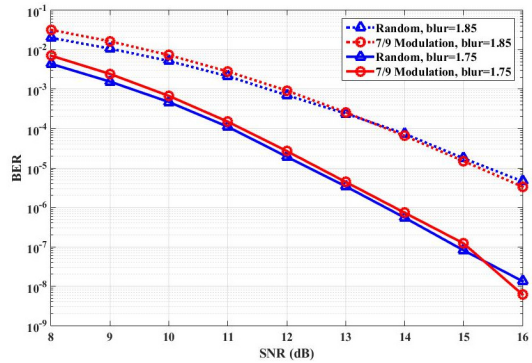


그림 2. SNR 및 blur에 따른 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 2. BER performance of the proposed modulation code in accordance with SNR and blur.

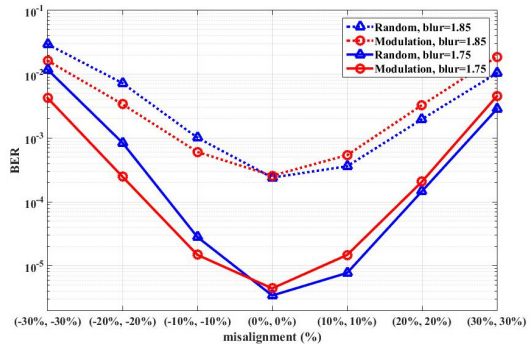


그림 3. 어긋남 및 blur에 따른 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 3. BER performance of the proposed modulation code in accordance with misalignment and blur.

성능이 유사한 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 HDSS의 기록밀도를 증가시키기 위한 저밀도 ON 픽셀 7/9 변조부호를 제안하였다. 제안된 7/9 변조부호는 변조부호를 사용하지 않은 랜덤 데이터와 성능이 유사하게 나타났다. 그러나 HDSS의 기록밀도를 높이기 위해 한 페이지당 ON 픽셀의 비율을 약 25% 정도로 하면 기록밀도를 약 15% 정도 증가시킬 수 있다. 제안하는 변조부호는 약 28% ON 픽셀의 비율을 갖는 변조부호로 랜덤 데이터와 성능은 유사하였으나 변조부호를 사용하면 기록밀도를 증가시킬 수 있다.

## 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, Aug. 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, Jul. 1999.
- [3] D. Park and J. Lee, "Modeling of the inter-page interference on holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 35, no. 7, pp. 581-586, 2010.
- [4] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," in *Proc. SPIE*, vol. 4342, pp. 393-400, 2002.
- [5] G. Yang, J. Kim, and J. Lee, "Mis-alignment channel performance of error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 971-976, 2010.
- [6] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional 5:8 modulation code for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 3, p. 03A031, 2009.
- [7] N. Kim, J. Lee, and J. Lee, "Rate 5/9 two-dimensional pseudobalanced code for holographic data storage systems," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 2B, pp. 1293-1296, 2006.
- [8] B. Kim and J. Lee, "Trellis encoding of 6/8 balanced code for holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 39, no. 10, pp. 569-573, 2014.
- [9] C. D. Nguyen and J. Lee, "Elimination of two-dimensional intersymbol interference through the use of a 9/12 two-dimensional modulation code," *IET Commun.*, vol. 10, no. 14, pp. 1730-1735, 2016.
- [10] S. Jeong and J. Lee, "Iterative decoding of SOVA and LDPC product code for bit-patterned media recoding," *AIP Adv.*, vol. 8, no. 5, pp. 056503, 2018.
- [11] S. Jeong and J. Lee, "LDPC-LDPC product code using modified log-likelihood ratio for holographic storage system," *J. IEIE*, vol. 54, no. 6, pp. 859-863, 2017.
- [12] B. M. King and M. A. Neifeld, "Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage," *Appl. Optics*, vol. 39, no. 35, pp. 6681-6688, 2000.
- [13] M. Keskinöz and B. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," in *Proc. SPIE*, vol. 4090, pp. 205-210, 2000.

### 정 성 권 (Seongkwon Jeong)



2015년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업  
 2017년 8월 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 석사  
 2018년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 박사과정

<관심분야> 채널코딩, 스토리지시스템

이 재 진 (Jaejin Lee)



1983년 2월 : 연세대학교 전자  
공학과 졸업

1984년 12월 : University 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  
책임연구원

1997년 3월~2005년 8월 : 동국대학교 전자공학과  
부교수

2005년 9월~현재 : 송실대학교 전자정보공학부 교수  
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지시스템