

# 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 고립 픽셀 제거 6/9 변조부호

정성권\*, 이재진<sup>o</sup>

## Non-Isolated Pixel 6/9 Modulation Code for Holographic Data Storage System

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

요약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 높은 저장용량과 데이터 전송 속도에 장점이 있기 때문에 차세대 저장장치로 주목받고 있다. 하지만, 신호처리 관점에서 홀로그래픽 데이터 저장장치는 인접 심볼간 간섭 및 인접 페이지간 간섭에 대한 문제를 가지고 있다. 본 논문에서는 인접 심볼간 간섭을 발생시키는 오류 패턴은 방지하기 위해 홀로그래픽 데이터 저장장치용 고립 픽셀 제거 6/9 변조부호를 제안한다.

**키워드** : 데이터 저장장치, 홀로그래픽 데이터 저장장치, 인접 심볼간 간섭, 변조부호, 고립 픽셀 제거

**Key Words** : Data storage system, holographic data storage system, intersymbol interference, modulation code, non-isolated pattern.

### ABSTRACT

Holographic data storage system which has high data capacity and data transfer rate has attracted a lot of interest as next generation optical storage system. However, in terms of signal processing and error control coding, holographic data storage system has been faced with two major problems of intersymbol interference and interpage interference. In this paper, we introduce non-isolated 6/9 modulation code for holographic data storage system to prevent error pattern that cause intersymbol interference.

### I. Introduction

홀로그래프를 활용하여 데이터를 저장하는 기술은 전자현미경의 해상도를 향상시키기 위해 개발되어진 후 레이저의 발명으로 기술의 가속화가 되어졌다<sup>1-3)</sup>. 홀로그래픽 데이터 저장장치(holographic data storage system, HDSS)는 데이터를 SLM(spatial light modulator)을 통해 신호빔(signal beam)으로 변경하고, 이를 기준빔(reference beam)과 간섭시켜서 발생

되는 간섭무늬를 홀로그램 매체에 기록하여 데이터를 저장한다. 데이터를 읽을 때에는 기준빔을 홀로그램 매체에 입사한 후 발생하는 신호를 추출하여 데이터를 얻는다. HDSS는 기존의 1차원적으로 처리하는 하드디스크, CD, DVD 등과는 달리 하나의 데이터 매질에 여러 페이지를 저장할 수 있기 때문에 저장용량을 증가시킬 수 있으며, 정보를 페이지 단위로 처리하기 때문에 높은 데이터 전송률을 갖는다. 따라서 이러한 장점으로 인해 HDSS는 데이터 저장장치가 핵심적으

\* 이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2019R1F1A1046899).

• First Author : University, Department of ICMC Convergence Technology, seongkwon@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, zlee@ssu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : 201911-300-A-RN, Received November 18, 2019; Revised November 20, 2019; Accepted November 20, 2019

로 요구되어지는 특징을 갖기 때문에 차세대 광학 저장장치로 주목받고 있다<sup>4-6)</sup>.

하지만 HDSS는 기존의 데이터 저장장치와는 다른 오류 요인이 발생한다. 첫 번째는 하나의 데이터 매질에 여러 페이지를 저장하기 때문에 페이지들 간의 간섭이 발생하여 인접 페이지간 간섭(interpage interference, IPI)이 발생하게 된다<sup>7)</sup>. 두 번째는 데이터의 기록 및 읽기 과정을 페이지 단위로 처리하기 때문에 2차원 인접 심볼간 간섭(intersymbol interference, ISI)가 발생하게 된다<sup>8)</sup>. 따라서 이를 해결하기 위해서 다양한 신호처리 기법이 제안되었다. IPI를 완화하기 위해 균형(balanced) 변조부호 방식이 제안되었다<sup>9)</sup>. 균형 변조부호 방식은 페이지 내에서 '0' 픽셀과 '1' 픽셀의 수를 동일하게 하게 만드는 변조부호이며, 변조부호를 사용하면 각각의 페이지에서 빛의 양을 동일하게 만들 수 있기 때문에 신호빔의 강도에 의한 변화가 적어 IPI를 감소시킬 수 있다. ISI를 완화시키기 위해서는 그림 1과 같이 고립 픽셀 형태가 발생하지 않게 하여야 하는데, 이를 제거하기 위해 여러 가지 변조부호 방식이 제안되었다. 또한 2차원 ISI와 IPI에 대한 영향을 동시에 감소시키기 위하여, 정수계획법을 활용한 변조부호 방식이 제안되었다<sup>10)</sup>. 변조부호를 선택하기 위해 목적함수로는 코드워드내의 셀들간의 심볼값의 차이와 코드워드들이 인접하였을 때의 인접심볼값의 차이를 최소화 시켰으며, 제약식은 심볼의 분포를 균등하게 하고, 두 코드워드간의 최소 거리 조건을 주어 변조부호 모형을 수식화 하였다. 또한 등화기와 신호검출기로 구성된 부분 응답 최대우사도(partial response maximum likelihood)를 사용하면 ISI 영향을 줄일 수 있다<sup>11)</sup>. 이외에도 HDSS의 성능을 향상시키기 위해 오류 제어 부호(error control coding, ECC) 등 다양한 방식이 제안되었다 [12-15].

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 고립 픽셀 제거 6/9 변조부호를 제안한다. 제안하는

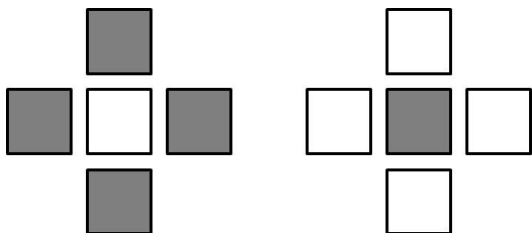


그림 1. 고립 픽셀 패턴 예제  
Fig. 1. Example of isolated pixel pattern.

6/9 변조부호는 고립 픽셀을 제거할 수 있으며, 코드워드간의 최소거리가 2이상인 부호로 구성되어있다. 또한 변조된 데이터가 서로 인접하여도 고립 픽셀 패턴이 발생되지 않는다.

## II. 제안하는 6/9 변조부호

제안하는 변조부호는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 발생하는 2차원 ISI의 영향을 감소시키기 위해 고립 픽셀 패턴을 제거하는 변조부호이며, 그림 2는 제안하는 시스템의 블록 다이어그램을 보여준다.

인코딩 과정은 6비트의 입력데이터  $a=[a_0 a_1 a_2 a_3 a_4 a_5]$ 를 9비트의 코드워드  $c=[c_0 c_1 c_2 c_3 c_4 c_5 c_6 c_7 c_8]$ 로 변조하여 사용하며 코드워드 구조는 그림 3과 같다. 코드워드 가능한  $2^6=512$ 가지 중에서 3가지 조건을 통하여  $2^6=64$ 개를 선택하였다. 첫 번째로는 코드워드 내에서 고립 픽셀이 발생하지 않는 코드워드를 선택하였으며, 두 번째로는 그림 4와 같이 코드워드가 서로 이웃하여도 고립 픽셀 패턴이 발생하지 않는 패턴을 선택하였다. 마지막으로는 코드워드간의 최소거리가 2이상인 코드워드를 선택하였다. 해당 조건을 통해 얻어진 코드워드 64개는 표 1과 같이 일대일 매핑을 통해 변조되어진다.

변조된 데이터는 홀로그래픽 채널을 통과 후 등화기와 연관정 출력 비터비 알고리즘(soft-output Viterbi algorithm, SOVA)에 의해 신호검출이 되어진다. 디코딩 과정은 SOVA의 출력값을 64개의 코드워드와 유클리디안 거리(Euclidean distance) 계산을 통해 거리가 최소인 값인 코드워드를 선택한 후 디매핑 과정을 통해 최종값을 선택한다.

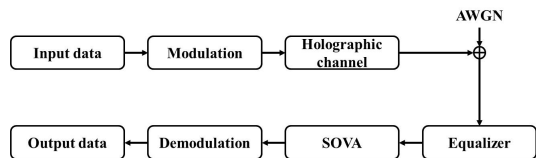


그림 2. 제안하는 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 2. Block diagram of the proposed system.

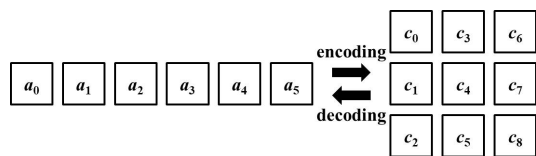


그림 3. 제안하는 변조부호의 구조  
Fig. 3. Structure of the proposed modulation code.

### III. 홀로그래픽 채널 모델링

홀로그래픽 채널 모델을 위해  $(x, y)$ 에 관한 연속적 PSF (point spread function)을 아래와 같이 나타낸다 [16].

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

여기서  $\sigma_b$ 는 분산된 신호의 퍼짐 정도를 나타내는 블러(blur)이며,  $m_x$ 와  $m_y$ 는 가로방향과 세로방향에 대한 각각의 어긋남(misalignment)을 나타낸다. 이 때  $\text{sinc}(x, y)$ 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 이산 PSF로 표현하면 다음과 같다.

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

따라서 홀로그래픽 채널을 통과하여 얻어진 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 채널을 통과 전 2차원 입력 데이터이며,  $n[p, q]$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma$ 인 부가 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)을 나타낸다.

input	111011			011101			011101		
	1	1	0	0	0	1	1	1	1
codeword	1	0	0	1	0	1	0	0	1
	1	1	1	1	0	0	0	0	0

그림 4. 제안하는 번조부호 예제  
Fig. 4. Example of the proposed modulation code.

표 1. 선택된 코드워드들의 집합  
Table 1. Set of codewords.

input	codeword	input	codeword
000000	000000000	100000	011010010
000001	000000011	100001	011011000
000010	000000110	100010	011011011
000011	000001001	100011	100100000
000100	000001111	100100	100100110
000101	000010010	100101	100101001
000110	000010111	100110	100101111
000111	000011000	100111	100110100
001000	000011011	101000	100110111
001001	000100100	101001	100111000
001010	000100111	101010	101101000
001011	000101101	101011	101101101
001100	000110000	101100	110000000
001101	000110110	101101	110000011
001110	000111001	101110	110000110
001111	000111100	101111	110010010
010000	000111111	110000	110100100
010001	001001000	110001	110100111
010010	001001011	110010	110110000
010011	001011001	110011	110110110
010100	001011111	110100	111000111
010101	001101100	110101	111001000
010110	001101111	110110	111001011
010111	001111000	110111	111010000
011000	010010000	111000	111011001
011001	010010011	111001	111100000
011010	010010110	111010	111100110
011011	011000000	111011	111101001
011100	011000011	111100	111101100
011101	011000110	111101	111110100
011110	011001001	111110	111111000
011111	011001111	111111	111111111

### IV. 실험

실험을 위해 한 페이지의 크기는  $1020 \times 1020$ 으로 총 1000페이지에 대해 실험을 하였다. 채널 및 잡음의 영향을 받은 데이터의 신호검출을 위해 부분 응답 최대우사도를 사용하였다. 이 때 등화기의 계수 업데이트를 위해 least mean square 알고리즘을 사용하였으며, 신호검출기는 SOVA를 사용하였다. 신호대잡음

(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 5는 블러가 1.75, 1.95 일 때에 SNR에 따른 비트 오류율(bit-error ratio, BER) 성능을 보여준다. 블러가 1.75 일 때 변조부호를 사용하면 변조부호를 사용하지 않은 데이터(uncoded data) 보다 BER =  $10^{-6}$ 에서 약 1.6 dB 성능 이득을 얻을 수 있다. 또한 블러가 증가하여도 향상된 성능 이득을 얻을 수 있다.

그림 6은 SNR = 13 dB 이고 블러가 1.75, 1.95 일 때에 어긋남에 따른 BER 성능을 보여준다. 오류 요소인 어긋남이 증가하여도 제안하는 6/9 변조부호는 변조부호를 사용하지 않은 데이터보다 향상된 성능을 보인다.

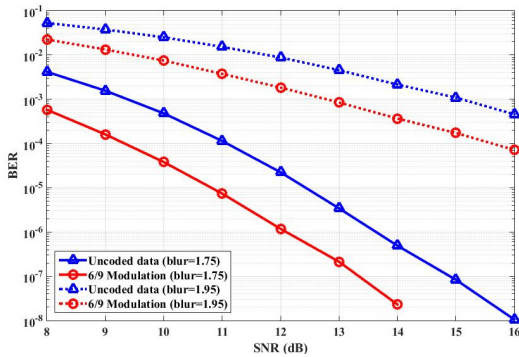


그림 5. SNR에 따른 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 5. BER performance of the proposed 6/9 modulation code according to SNR.

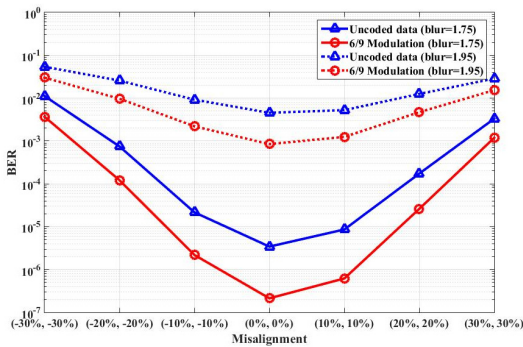


그림 6. SNR 13 dB에서 misalignment에 따른 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 6. BER performance of the proposed 6/9 modulation code in accordance with misalignment when SNR is 13 dB.

## V. 결론

본 논문에서는 HDSS의 ISI 영향을 감소시키기 위해 고립 픽셀 제거 6/9 변조부호를 제안하였다. 제안하는 변조부호는 고립 픽셀을 제거하며, 코드워드가 인접하여도 고립 픽셀 패턴이 발생하지 않고, 코드워드간의 최소거리가 2이상이기 때문에 향상된 성능 이득을 얻을 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, Apr. 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] 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.
- [5] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," in *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, 2004.
- [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, 1999.
- [6] 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.
- [8] 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, no. 393, pp. 393-400, 2002.
- [9] 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.

- [10] B. Kim and J. Lee, "Integer programming models for the design of two-dimensional holographic storage modulation code," *J. KICS*, vol. 38, no. 6, pp. 459-464, 2014.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] C. D. Nguyen and J. Lee, "Iterative readback-aided detection for holographic data storage systems," *Electron. Lett.*, vol. 52, no. 17, pp. 1436-1438, 2016.
- [14] C. D. Nguyen and J. Lee, "Iterative detection supported by extrinsic information for holographic data storage systems," *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 23, pp. 1857-1859, 2015.
- [15] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional soft output Viterbi algorithm with noise filter for patterned media storage," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 7, pp. 07B742, 2011.
- [16] 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)**

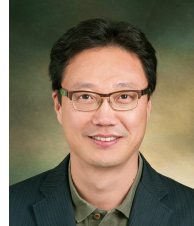


2015년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 졸업  
 2017년 8월 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 석사  
 2018년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신소재융합학과 박사과정

<관심분야> 채널코딩, 스토리지시스템

[ORCID:0000-0002-4974-337X]

**이 재 진 (Jaejin Lee)**



1983년 2월 : 연세대학교 전자공학과 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 : 숭실대학교 전자정보공학부 교수

<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지시스템

[ORCID:0000-0001-7791-3308]