

# 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 동일한 부호율 2/3인 저밀도 ON 픽셀 변조부호 비교

서 기준\*, 이재진<sup>o</sup>

## Comparison of Sparse-ON Pixel Modulation Codes with Equal Code Rate of 2/3 in Holographic Data Storage

Kijun Seo\*, Jaejin Lee<sup>o</sup>

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 데이터를 미디어의 체적에 페이지 단위로 저장한 후 페이지 단위로 읽어내어 처리하기 때문에 빠른 데이터 처리속도, 대용량화, 높은 전송률 등의 장점들을 갖는다. 하지만, 여러 이미지가 같은 홀로그램 공간에 저장되기 때문에 인접 페이지간 간섭이 발생하며, 데이터를 2차원인 페이지 단위로 처리하기 때문에 2차원 인접 심볼간 간섭도 발생한다. 한 페이지에 ON 픽셀의 비율이 25% 정도이면, 홀로그래픽 데이터 저장장치의 저장 용량을 15% 정도 증가시킬 수 있다고 보고되었다. 본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치의 저장용량을 증가시키기 위해 한 페이지에 기록되는 ON 픽셀의 비율을 낮춰 한 체적에 들어가는 페이지의 수를 늘릴 수 있는 2/3의 동일한 부호율을 가지는 변조부호들을 제안한다.

**키워드** : 홀로그래픽 데이터 저장장치, 인접 페이지간 간섭, 인접 심볼간 간섭, 변조부호, 저밀도 ON 픽셀, 최소거리

**Key Words** : Holographic data storage, Interpage interference, Intersymbol interference, Modulation code, Sparse-ON pixel, Minimum distance

### ABSTRACT

Unlike storage systems that store information on a volume, holographic data storage has high data processing speed, large capacity, and high data transfer rates because it stores data on a page-by-page basis in the volume of the media. However, because several images are stored in the same hologram space, inter-page interference occurs, and because data is processed in units of two-dimensional pages, two-dimensional inter-symbol interference also occurs. If the ratio of ON pixels per page is around 25%, the storage capacity of a holographic data storage system can be increased by 15%. In this paper, we propose modulation codes with a same code rate of 2/3 to increase the number of pages in a volume by lowering the ratio of ON pixels recorded on a page to increase the storage capacity of the holographic data storage system.

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

• First Author : Soongsil University, Department of ICMC Convergence Technology, seo714@soongsil.ac.kr, 학생회원

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

논문번호 : 201908-174-A-RN, Received August 27, 2019; Revised September 21, 2019; Accepted September 21, 2019

## I. 서론

홀로그래픽 데이터 저장장치 (Holographic Data Storage, HDS)는 미디어의 체적에 페이지 단위로 저장 및 읽기를 하는 광 저장장치이다. HDS의 기본 원리는 원 신호 정보를 담고 있는 데이터 페이지를 SLM (Spatial Light Modulator)에 의해 신호빔으로 바꾸고, 이를 기준빔 (Reference Beam)으로 간섭을 발생시켜 간섭무늬를 홀로그램 매체에 기록한다. 반대로 읽을 때는 기준빔을 홀로그램 매체에 입사하여 페이지 신호를 추출한다. 그래서 기존의 미디어의 표면에 정보를 저장하는 광 기록 저장장치 (CD, DVD)나 자기기록 저장장치 (Hard Disk Drive)와는 다르게 체적에 정보를 저장하기 때문에 보다 많은 저장 용량을 제공할 수 있다. 또, 데이터 처리 속도 및 데이터 전송 속도가 매우 우수하다는 장점도 있다. 이러한 장점으로 HDS는 차세대 저장장치로 주목받고 있다<sup>1,2</sup>.

하지만 HDS는 여러 페이지가 같은 공간에 저장되어 있기 때문에 인접 페이지간 간섭 (Inter-Page Interference, IPI)이 발생하고<sup>3</sup>, 데이터를 기존처럼 1차원으로 처리하지 않고 2차원인 페이지 단위로 데이터를 처리하기 때문에 2차원 인접 심볼간 간섭 (Two-Dimensional Inter-Symbol Interference, 2D-ISI)이 발생한다<sup>4</sup>. 이와 같은 간섭 현상들은 성능 저하의 원인이 되며, 이외에도 어긋남 (Misalignment)과 같은 여러 오류들이 발생해 HDS의 성능이 저하된다<sup>5</sup>. 이러한 문제들을 해결하기 위해 다양한 알고리즘과 신호처리 방법들이 제안되었다. 먼저, 한 픽셀을 기준으로 왼쪽, 오른쪽 픽셀뿐만 아니라 위쪽 픽셀과 아래쪽 픽셀 모두가 기준 픽셀과 반대 부호의 픽셀이

생기지 않게 하기 위해 고립 패턴 제거 변조부호 (Non-Isolated Modulation Code) 방식이 제안되었으며, IPI를 줄이기 위해 ON 픽셀과 OFF 픽셀의 수를 같도록 하는 균형변조부호 (Balanced Modulation Code)가 제안되었다<sup>6-8</sup>.

한편, HDS는 한 체적에 기록되는 페이지 수가 많아지면 픽셀의 회절 효율이 감소되어 저장 가능한 페이지 수의 한계가 발생한다. 이와 비슷한 이유로 한 페이지 내에 ON 픽셀의 수가 적을수록 픽셀 당 회절 효율은 증가한다. King과 Neifeld는 한 페이지에 ON 픽셀의 비율이 약 25% 정도일 때, 저장용량을 15% 정도 증가시킬 수 있다고 보고했다.

본 논문에서는 부호율이 2/3, 4/6, 6/9로 부호율이 동일한 변조부호들을 제안한다<sup>9,10</sup>. 또한 본 논문은 기존 변조부호 논문에서 Sparse-ON 픽셀을 적용함으로써, 한 페이지당 ON 픽셀의 비율을 최대한 낮춰 한 체적에 들어가는 페이지의 수를 늘린다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 제안된 변조부호에 대해 설명하고, 3장은 홀로그래픽 채널 모델링, 4장은 시뮬레이션 결과에 대해 기술한다. 그리고 5장을 끝으로 결론을 맺는다.

## II. 제안된 저밀도 ON 픽셀 변조부호

### 2.1 동일한 부호율을 갖는 변조부호

본 논문에서는 2/3의 동일한 부호율을 가지는 2/3, 4/6, 6/9 변조부호들을 제안한다. 2/3 변조부호는 2비트를 입력받아 3×1 구조의 3비트 2차원 변조부호로 변환하여 사용하고, 4/6 변조부호는 4비트를 입력받아 3×2 구조의 6비트 2차원 변조부호로 변환하고, 6/9 변조부호는 6비트를 입력받아 3×3 구조의 9비트 2차원 변조부호로 변환하여 사용한다. 그림 1은 제안하는 변조부호의 코드워드 구조를 그림으로 표현한 것이다.

### 2.2 ISI 완화 변조부호

제안하는 변조부호는 ISI를 완화할 수 있다. 제안된 변조부호들은 다음과 같은 방법으로 생성된다. 예를 들어, 제안된 4/6 변조부호를 기준으로 설명하면 첫 번째로, 모든 코드워드 2<sup>6</sup>=64개를 생성한다. 그 다음 그림 1 (b)의 가운데 픽셀인 c<sub>1</sub>, c<sub>4</sub>를 기준으로 위쪽 픽셀과 아래쪽 픽셀 모두가 가운데 픽셀과 반대 부호를 가지는 패턴을 제거하였다. 즉, 세로 방향 ISI 패턴들을 제거한 것이다. 이 과정을 거치게 되면 64개 중 36개만 남게 된다. 한 체적에 저장할 수 있는 페이지 수를 최대로 늘리기 위해서는 ON 픽셀의 수를 최소

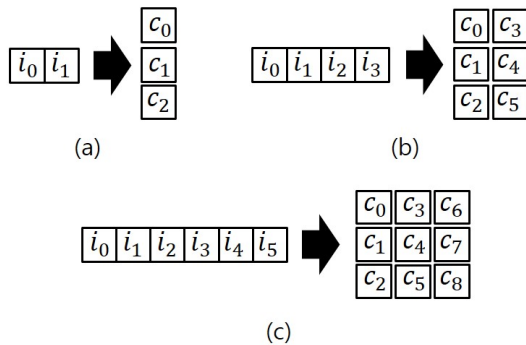


그림 1. 제안하는 변조부호 구조 ((a) 2/3 구조, (b) 4/6 구조, (c) 6/9 구조)  
 Fig. 1. The proposed modulation code structure. ((a) 2/3 structure, (b) 4/6 structure, (c) 6/9 structure).

화 하는 것이 좋다. 그래서 저밀도 ON 픽셀로 만들기 위해 3×2 구조에서 1의 개수가 0개 일 때 1개의 코드워드, 1의 개수가 1개 일 때 4개의 코드워드, 1의 개수가 2개 일 때 8개의 코드워드, 1의 개수가 3개 일 때 10개의 코드워드를 선택한다. 이 때, 필요한 코드워드의 개수는 2<sup>4</sup>=16개이기 때문에 1의 개수가 0개부터 2개 일 때의 모든 코드워드들과 3개 일 때 코드워드 10개 중 3개를 선택하면 된다. 3개를 선택할 때는 코드워드 간의 최소거리가 2이상인 조건을 만족하는 코드워드들만 선택했다. 표 1, 2와 3은 2차원 저밀도 ON 픽셀 변조부호를 위해 선택한 코드워드를 나타낸 것이다. 입력 데이터와 코드워드 간의 다음과 같다. 표 1의 경우 4개의 3bit 코드워드는 2bit 입력 데이터 00~11와 순차적으로 매핑되고, 표 2의 경우도 16개의 6bit 코드워드는 4bit 입력 데이터 0000~1111와 순차적으로 매핑되고, 표 3의 경우도 64개의 9bit 코드워드는 6bit 입력 데이터 000000~111111와 순차적으로 매핑된다. 4/6 변조부호의 경우 16개를 선택하였으며,

표 1. 제안하는 2/3 변조부호의 코드워드  
Table 1. Codeword of the proposed 2/3 modulation code.

000	001	100	011
-----	-----	-----	-----

표 2. 제안하는 4/6 변조부호의 코드워드  
Table 2. Codeword of the proposed 4/6 modulation code.

000000	100000	001100	110000
000001	000011	011000	000111
000100	000110	100001	001011
001000	001001	100100	111000

표 3. 제안하는 6/9 변조부호의 코드워드  
Table 3. Codeword of the proposed 6/9 modulation code.

00000000	001000100	000111001	100000110
00000001	001001000	000110100	100001001
000000100	001100000	000111000	100001100
000001000	011000000	001000011	100011000
001000000	100000001	001000110	100100001
001000000	100000100	001001001	100100100
100000000	100001000	001001100	100110000
000000011	100100000	001011000	110000001
000000110	110000000	001100001	110000100
000001001	000000111	001100100	110001000
000001100	000001011	001110000	110100000
000011000	000001110	011000001	111000000
000100001	000011001	011000100	000001111
000100100	000011100	011001000	001110001
000110000	000100011	011100000	011001001
001000001	000100110	100000011	111100000

선택된 16개 코드워드의 ON 픽셀 비율은 약 30%이다. 인코딩 할 때는 선택된 16개의 코드워드를 이용하여 일대일 매핑 (Mapping)으로 인코딩 하였으며, 디코딩은 연판정 출력 비터비 알고리즘 (Soft-Output Viterbi Algorithm, SOVA)을 통해 얻은 연판정 값을 이용하였다. 그리고 이를 통해 나온 코드워드들 중 유클리디안 거리 (Euclidean Distance)가 최소가 되는 코드워드를 선택해 디매핑 (De-Mapping)하였다.

### III. 채널 모델링

그림 2는 HDS의 블록다이어그램을 보여준다. 홀로그래픽 채널 모델링은 CCD (Charge-Coupled Device) 배열을 이용해 입력 데이터를 출력 데이터로 만든다. 데이터 입력 페이지에서 2차원적인 (x, y)의 연속적인 PSF (Point Spread Function)은 다음 수식과 같다<sup>[11]</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 희미한 정도인 블러 (Blur)를 의미한다.  $m_x$ 와  $m_y$ 는 각각 x축과 y축의 어긋남을 나타낸다. Blur가 커지게 되면 2차원 ISI가 증가한다.  $\text{sinc}(x, y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

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

[p, q] 위치의 이산 PSF는 다음과 같이 정의한다.

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

홀로그래픽 채널을 통과한 수신 값 r[p, q]는 다음과 같다.

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

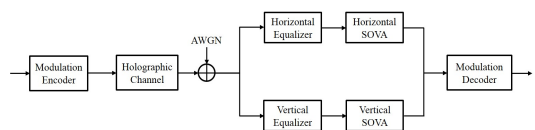


그림 2. HDS의 블록다이어그램  
Fig. 2. Block diagram of HDS.

$d[p, q]$ 는 채널을 통과하기 전 2차원 입력 데이터이고,  $n[p, q]$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인 부가 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise, AWGN) 잡음을 말한다.

#### IV. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 실험을 위해 한 페이지의 크기를  $1020 \times 1020$ 으로 하고 총 페이지 수는 1000페이지로 하였다. 기본 blur 값은 1.85로 하였는데 그러한 이유는 blur 값을 보다 낮게 설정하면 신호검출이 잘되며, 반대로 blur 값을 보다 높게 설정하면 신호검출이 어렵기 때문에 적절한 blur 값인 1.85로 설정하였다. 채널의 잡음 환경은 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 변화하였고, SNR은  $10 \log_{10}(1/\sigma^2)$ 으로 정의하였다. 여기서  $\sigma^2$ 은 AWGN의 전력을 말한다. 채널의 부분응답 (Partial Response)은 수평 방향 PR(131), 수직 방향 PR(131)로 하였다. 신호검출을 위해 수평 방향과 수직 방향의 SOVA로 구성된 2차원 SOVA를 사용하였다.

그림 3과 4는 blur의 값이 각각 1.75, 1.95 일 때 SNR에 따른 비트 오류율 (Bit-Error Ratio, BER) 성능을 나타낸다. Blur 값이 변하여도 랜덤 데이터보다 변조부호를 적용한 것이 성능 이득을 얻을 수 있었으며, 변조부호들 간의 성능은 유사하였다.

그림 5는 SNR에 따른 랜덤 데이터와 제안하는 2/3, 4/6, 6/9 변조부호의 성능을 나타낸다. 세 변조부호의 부호율은 약 0.66으로 동일하며, 2/3 변조부호가 가장 좋은 성능을 보이고 있다. BER이  $10^{-5}$ 일 때, 2/3 변조부호는 4/6 변조부호보다 약 0.4 dB정도 좋은 성능을 나타내고, 6/9 변조부호보다는 약 0.1 dB정도 좋은 성

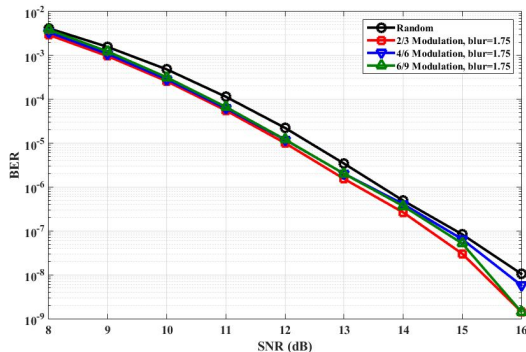


그림 3. blur=1.75일 때, 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 3. BER performance of the proposed modulation code when blur=1.75.

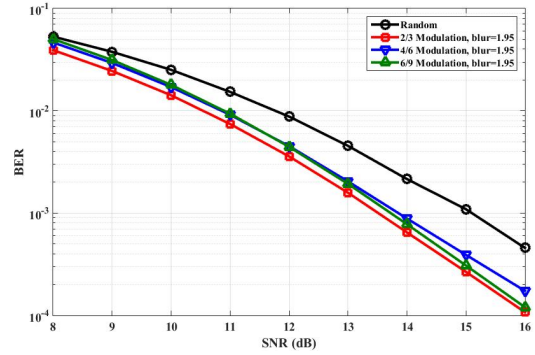


그림 4. blur=1.95일 때, 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 4. BER performance of the proposed modulation code when blur=1.95.

능을 나타낸다. 그리고 SNR이 낮은 영역에서는 4/6 변조부호가 6/9 변조부호보다 좋은 성능을 나타내고 있다가 SNR이 약 12 dB인 지점 이후로는 성능이 역전되는 현상을 보이고 있는데, 이러한 이유는 선택한 코드워드들 간의 최소거리 때문이다. 4/6 변조부호에서 몇 개의 코드워드들을 선택할 때 최소거리가 2 이상인 것들을 선택한 반면, 6/9 변조부호에서는 최소거리가 4 이상인 것들로 선택했다. 그 결과 SNR이 점점 증가할수록 6/9 변조부호가 4/6 변조부호보다 더 좋은 성능을 나타낸다.

그림 6은 어긋남에 따른 BER 성능을 보여준다. 어긋남 정도를 -30%에서 30%까지 10%씩 바뀌가면서 성능을 비교해 보았으며, 어긋남이 발생하여도 랜덤 데이터보다 변조부호를 적용한 것이 성능 이득을 얻을 수 있었으며, 변조부호들 간의 성능은 유사하였다.

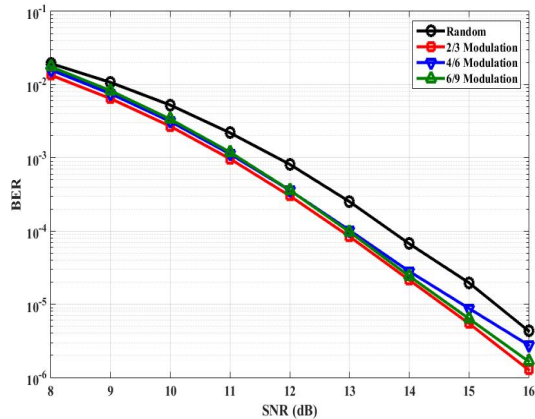


그림 5. 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 5. BER performance of the proposed modulation code.

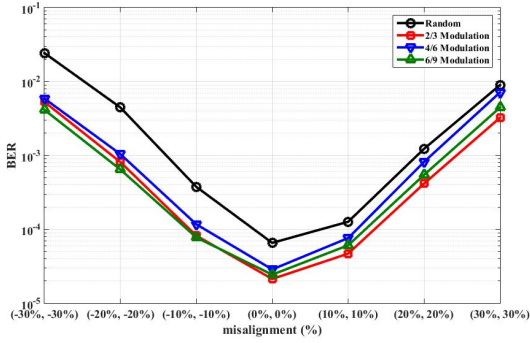


그림 6. 어긋남에 따른 제안하는 변조부호의 BER 성능  
Fig. 6. BER performance of the proposed modulation code according to misalignment.

### V. 결론

본 논문에서는 HDS에서 ISI에 의해 발생하는 패킷을 제거하여 오류 요인을 줄였다. 그리고 한 페이지에 저장되는 ON 픽셀의 비율을 최대한 낮춰서 한 체적에 들어가는 페이지의 수를 늘리도록 하는 동일한 부호율을 가지는 2/3, 4/6, 6/9 변조부호들을 제안하였다. 한 페이지당 ON 픽셀의 비율을 25% 정도로 하면 저장용량을 약 15% 정도 증가시킬 수 있다. 제안하는 변조부호들은 평균적으로 약 30%의 ON 픽셀 비율을 가지고 있고, 랜덤 데이터보다 성능이 우수하며 HDS의 저장용량 또한 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] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] B. M. King and M. A. Neifeld, "Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage," *Applied Optics*, vol. 39, no. 35, pp. 6681-6688, Dec. 2000.

[10] 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, Aug. 2010.

[11] M. Keskinöz and B. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," in *Proc. SPIE*, vol. 4090, pp. 205-210, 2000.

서기준 (Kijun Seo)



2018년 2월: 강릉원주대학교 정보통신공학과 졸업  
2018년 3월~현재: 숭실대학교 정보통신소재융합학과 석사과정  
<관심분야> ECC, 변조부호  
[ORCID:0000-0002-0968-7190]

이 재 진 (Jaejin Lee)



1983년 2월 : 연세대학교 전자공  
학과 졸업

1984년 12월 : University of  
Michigan, Dept. of EECS 석  
사

1994년 12월 : Georgia Tech,  
Sch. of ECE 박사

1995년 1월~1995년 12월 : Georgia Tech, 연구원

1996년 1월~1997년 2월 : 현대전자 정보통신연구소 책  
임연구원

1997년 3월~2005년 8월 : 동국대학교 전자공학과 부교수

2005년 9월~현재 : 송실대학교 전자정보공학부 교수

<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 스토리지시스템

[ORCID:0000-0001-7791-3308]