

저밀도 ON 픽셀 2차원 6/8 변조부호

황 명 하*, 이 재 진^o

A Sparse-ON Pixel Two-Dimensional 6/8 Modulation Code

Myungha Hwang*, Jaejin Lee^o

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 볼륨에 페이지 단위로 데이터를 쓰고 읽기 때문에 단위 공간당 기록용량이 매우 크며 또 데이터 전송률이 굉장히 높은 장점이 있다. 반면 데이터를 저장하는 픽셀간의 밀도가 높아짐에 따라 2차원 인접 심볼간 간섭과 인접한 페이지끼리 서로 영향을 주는 인접 페이지간 간섭이 생기는 단점이 있다. 특히 한 페이지의 밝은 정도에 따라 인접한 페이지에 영향을 주어 한 볼륨에 저장할 수 있는 페이지의 수를 줄어 들게 할 수 있다. 본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 한 페이지에 기록되는 ON 픽셀의 비율을 낮춰서 한 볼륨에 들어가는 페이지의 수를 늘리도록 하는 부호율이 6/8인 저밀도 ON 픽셀 2차원 변조부호를 제안한다. 제안된 부호는 기존의 6/8 균형 변조부호와 비교하여 거의 비슷한 성능을 보인다. 따라서 제안된 부호를 사용할 경우 성능의 저하 없이 기록 용량을 늘릴 수 있는 장점이 있다.

Key Words : Holographic data storage, Interpage interference, Two-dimensional intersymbol interference, Modulation code, Sparse-ON pixel code.

ABSTRACT

Since holographic data storages read and write information on a volume and the information is processed per page, it has the advantage of high recording density and data transfer rate. However, there are two major drawbacks like 2-dimensional intersymbol interference and interpage interference as the density between pixels increases. Furthermore, a bright page that contains many ON pixels influences the reliable detection of the neighboring pages, which causes the less number of pages stored in the storage volume. We propose a sparse-ON pixel two-dimensional modulation code with the code rate 6/8 for increasing the number of pages stored in the volume. The proposed code is compared to conventional 6/8 balanced code, and it shows similar or a little bit better performance than that of the balanced code. Therefore, the proposed code can increase the recording capacity without loss of the performance.

I. 서 론

평면이 아닌 3차원적으로 데이터를 저장하는 홀로그래픽 메모리는 저장용량을 굉장히 크게 할 수 있으며, 데이터의 읽기/쓰기도 매우 빠르다. 홀로그래픽 데이터 저장장치(Holographic Data Storage,

HDS)의 기본적인 원리는 하나의 볼륨에 페이지 단위로 여러 장의 데이터를 멀티플렉싱하여 저장하는데, 정보를 담고 있는 데이터 페이지를 SLM (Spatial Light Modulator)에 의해 신호빔으로 바꾸고, 이를 기준빔(Reference Beam)으로 간섭시켜 생기는 간섭무늬를 홀로그램 매체에 기록하고, 반대로

※ 본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020262).

• First Author : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, zzang7441@nate.com, 학생회원
^o Corresponding Author : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원
 논문번호 : KICS2013-09-421, 접수일자 : 2013년 9월 29일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 24일

읽을 때는 기준빔을 홀로그램 매체에 입사하여 정보 페이지 신호를 추출한다^{1,2)}.

홀로그래픽 데이터 저장장치는 다양한 기준빔을 사용하여 여러 페이지를 쉽게 저장할 수 있으며, 데이터를 페이지 형식으로 신호빔을 보내므로 높은 저장능력을 가지며, 빠르게 데이터를 읽고 쓸 수 있는 높은 전송률 가지는 장점이 있다. 그러나 HDS는 다음과 같은 단점을 가지고 있다. 먼저, 여러 개의 이미지가 같은 홀로그램 공간에 저장되어 있기 때문에 인접 페이지간 간섭(Inter-Page Interference, IPI)이 발생한다. IPI가 발생하는 원인은 각 정보 페이지 신호로부터 발생하는 빛의 양에 따라서 인접한 페이지 신호에 영향을 미치며, 밝기가 밝은 페이지가 인접해 있는 어두운 페이지에서는 페이지가 균일한 조건을 유지하기 어렵게 된다. 그리고 다른 평면적인 데이터 저장장치에서와 같이 인접 심볼간 간섭 (Inter-Symbol Interference, ISI)이 발생할 수 있다. HDD나 DVD와 같은 저장장치는 트랙을 따라서 저장하기 때문에 주로 1차원 ISI가 오류의 주 원인이지만, HDS는 2차원인 페이지 형식으로 데이터를 처리하기 때문에, 2차원적으로 ISI가 생긴다.

이러한 단점들을 해결하기 위해서 다양한 신호처리 방법들이 제안되었다³⁻⁷⁾. 특히 원본 데이터를 저장채널의 특성에 맞게 변형하는 변조부호들이 제시되었다⁵⁻⁷⁾. 이 변조부호들은 2차원 ISI에 의해 발생하는 오류 패턴을 피하기 위해, 즉 고립된 픽셀이 있는 경우가 오류 발생의 확률이 높으므로, 인코딩된 코드워드는 고립된 ON 픽셀이나 OFF 픽셀이 존재하지 않도록 한다^{5,6)}.

한편, 페이지당 사용자 데이터를 최대화 하기 위해, 한 데이터 페이지에는 일반적으로 동수의 ON 픽셀과 OFF 픽셀을 갖도록 한다. 이러한 조건을 만족하는 부호를 균형부호(balanced code)라고 한다. 그리고 한 블록에 기록되는 페이지 수가 많아지면 많아질수록 픽셀의 회절 효율은 감소하게 되며, 따라서 신뢰할만한 정도의 데이터 저장과 복구가 가능한 저장 페이지 수에 한계가 생긴다. 이와 비슷한 이유로, 한 페이지에서 ON 픽셀의 수가 적을수록 픽셀당 회절 효율은 증가한다. King과 Neifeld는 대략적으로 한 페이지에 ON 픽셀이 25% 정도이면, HDS의 저장 용량을 15% 정도 증가시킬 수 있다고 보고하였다⁸⁾. Park 등은 이러한 저밀도 ON 픽셀을 갖는 부호들에 대하여 조사를 하고 가능한 ON 픽셀과 OFF 픽셀의 비율에 대하여 조사하였는데, 25%의 ON 픽셀을 유지하려면 부호율의 손실을 감

안해야 하는 단점이 있다⁹⁾. 본 논문에서는 부호율이 6/8인 2차원 변조부호를 제안하는데, 제안된 6/8 변조 코드는 ON 픽셀의 비율이 28%가 되도록 하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장은 제안된 변조부호에 대하여 설명하고, 3장은 기존의 6/8 균형부호와 제안된 부호의 비교를 위한 시뮬레이션 환경에 대한 설명과 시뮬레이션 결과를 기술하며, 5장에서 결론을 맺는다.

II. 저밀도 ON 픽셀 6/8 2차원 변조부호

홀로그래픽 데이터 저장장치에서 일반적으로 사용되고 있는 부호는 ON 픽셀과 OFF 픽셀의 수가 같은 균형부호이다. 데이터 크기에 따라 부호율이 4/6 또는 6/8인 부호가 주로 사용된다. 이 부호는, 예를 들어 6/8 부호의 경우, 코드워드의 모양은 1×8 벡터 형태일 수도 있고, 2×4의 행렬 형태일 수도 있다. 본 논문에서는 코드워드가 2×4 행렬 모양인 6/8 균형부호를 고려한다. 이 때, 8 픽셀로 가능한 ON 픽셀의 수와 OFF 픽셀의 수가 같은 코드워드의 조합은 70가지인데, 입력되는 사용자 데이터의 가지수가 2⁶이므로, 이 가운데 64개를 선택하여 코드워드로 사용한다.

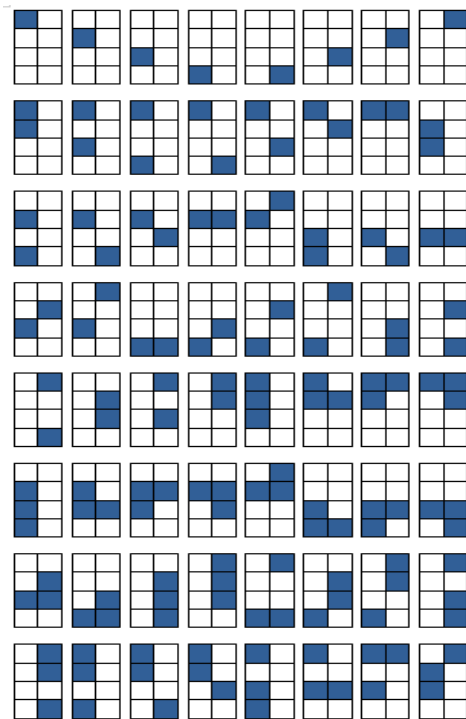


그림 1. 29% ON 픽셀 6/8 부호
Fig. 1. 29% ON-pixel 6/8 code.

본 논문에서 제안하는 부호는 코드워드가 2×4(여기서는 4×2 행렬로 표기함) 행렬 모양인 6/8 부호로서, 한 볼륨에 저장할 수 있는 페이지 수를 최대화하기 위하여, ON 픽셀의 수를 최소화 하는 것이다. 따라서 ON 픽셀의 수가 1개인 코드워드 8개, ON 픽셀의 수가 2개인 코드워드 28개, 그리고 ON 픽셀의 수가 3개인 코드워드 28개를 선택하여 총 64개의 코드워드를 골랐다. 여기서 ON 픽셀의 수가 3개인 코드워드의 종류는 모두 56가지이다. 따라서 6/8 저밀도 ON 픽셀 변조부호의 성능은 64가지의 패턴을 어떻게 설정하느냐에 따라 BER 성능이 약간씩 달라질 수 있다.

그림 1은 ON 픽셀의 비율을 최소로 유지하도록 코드워드를 선택하여 본 논문에서 사용한 저밀도 ON 픽셀 부호이다. (흰 픽셀은 OFF를 검은 픽셀은 ON 상태를 나타낸다.) 이렇게 하면 ON 픽셀의 비율은 약 29%가 된다. 따라서 제안하는 저밀도 ON 픽셀 변조부호와 기존의 6/8 균형 변조부호 간에 비트오류율(Bit Error Rate, BER) 성능을 비교한다. 여기서 고려되는 비교 항목은 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)의 변화, 블러(번짐 정도, blur)값의 변화, 등화기의 길이, 그리고 데이터의 읽기 과정에서의 비틀림 정도(mis-alignment)의 변화 등이다.

III. 시뮬레이션 및 결과

3.1. 홀로그래픽 저장채널 모델

홀로그래픽 채널을 모델링 하는 (x, y) 위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.

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

여기서 σ 는 분산된 신호의 회미한 정도인 블러를 의미한다. 블러가 커지면 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.

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

x축의 어긋남을 m_x 라 하고, y축의 어긋남을 m_y 로 정의한 연속적인 PSF는 다음과 같다.

$$h(x,y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x-m_x}{\sigma}, \frac{y-m_y}{\sigma}\right) \quad (4)$$

본 논문에서는 한 페이지가 1024×1024개의 픽셀을 가지며, 1000페이지를 시뮬레이션 하였다. SNR의 값은 13dB, 블러의 값은 1.85이고 한 픽셀은 5×5개의 셀로 양자화(quantization)하였다. 또 어긋남(mis-alignment) 정도는 X축으로 10%, Y축으로 10%를 기준으로 사용하였다. 그리고 신호검출 과정에서는 2D-SOVA를 사용했으며, 이 때 채널의 PR 타겟은 PR(131)으로 하였다^[3].

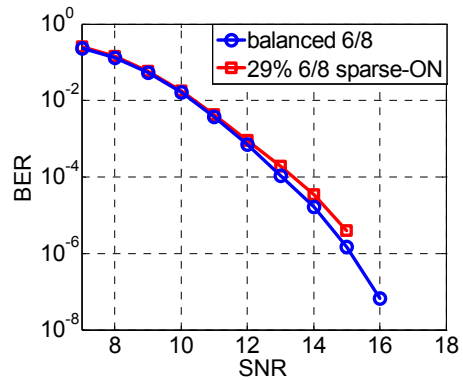


그림 2. 저밀도 ON 픽셀 부호의 성능
Fig. 2. Performance of sparse-ON code.

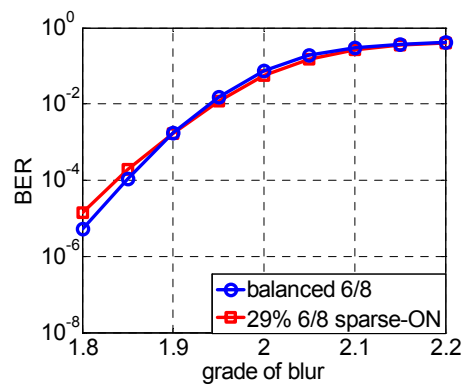


그림 3. 블러 변화에 따른 성능
Fig. 3. BER according to the grade of blur.

3.2. 시뮬레이션 결과

그림 2는 SNR을 7dB부터 18dB까지 증가시키며 BER 성능을 비교한 결과이다. 제안된 부호가 16dB

에서 균형부호와 비교시 약간 성능이 떨어지나 17dB부터 오류를 모두 없애는 것으로 미루어 볼 때, 두 부호가 성능의 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다. 그림 3은 SNR이 13dB일 때 블러의 값이 변화함에 따른 BER의 성능 비교이다. 여기서도 큰 성능의 차이를 볼 수 없으나, 블러의 값이 낮은 경우 균형부호가 약간 성능이 우수하다. 이것은 기록 밀도가 낮은 경우를 의미하는데 기록 밀도가 낮은 경우 당연히 인접한 페이지 간섭이 작아지게 되어서 본 논문에서 고려하는 높은 기록 밀도 환경에 적합한 설정이 될 수 없다. 기록 밀도가 높은 영역, 즉 블러값이 큰 영역에서 두 부호가 거의 같은 성능을 보이는 것은 제안된 부호의 장점을 성능 저하 없이 살릴 수 있음을 의미한다. 그림 4는 픽셀당 양자화 셀 수의 변화에 따른 결과 비교로써, 크기를 5×5로 하는 경우가 가장 좋은 성능을 보였다. 그림 5는 등화기의 길이에 따른 BER 성능 비교로서 균형 부호가 적절한 길이의 등화기를 사용할 경우 제안된 부호보다 약간 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

한편, CCD 배열이 제대로 된 위치에 있지 못하게 된 상태로 어긋남이 생기면 홀로그래픽 데이터의 수신신호 품질에 영향을 미친다. 이는 자기 자신의 신호의 크기를 감소시킬 수 있기도 하지만 인접한 주변의 신호의 크기를 변화게 만들 수 있기 때문이다. 그림 6부터 8은 어긋남 정도를 0%에서 50%까지 10%씩 바뀌가면서 성능 비교 하였다. 그림 6은 X축으로, 그림 7은 Y축으로 변화를 각각 준 결과이며, 그림 8은 X축 Y축을 동시에 10%씩 변화를 준 결과의 그림이다. 세 경우 모두, 제안된 부호와 균형부호를 비교할 때, 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다.

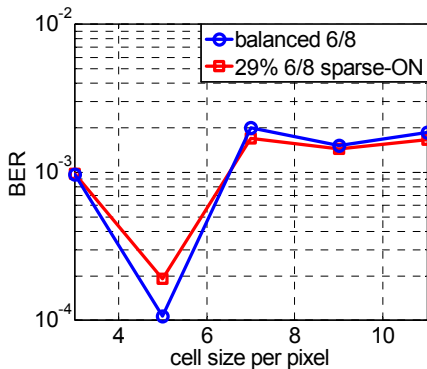


그림 4. Cell 수에 따른 성능
Fig. 4. BER according to the cell size per pixel.

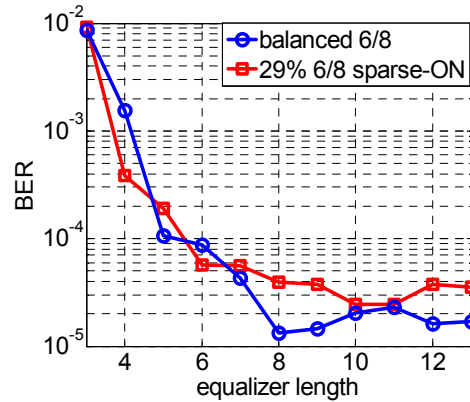


그림 5. 등화기 길이에 따른 성능
Fig. 5. BER according to the equalizer length

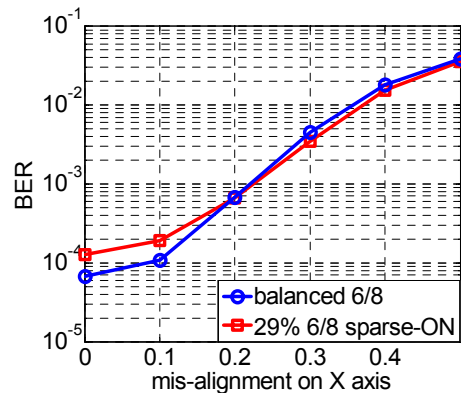


그림 6. X축 어긋남에 따른 성능
Fig. 6. BER of mis-alignment on X-axis

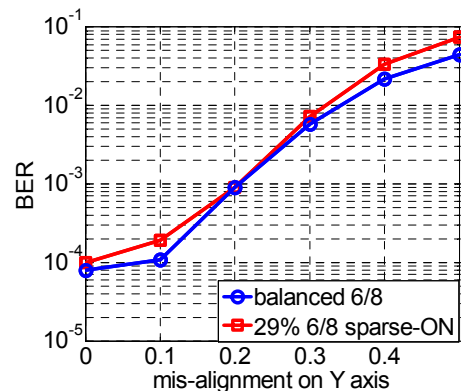


그림 7. Y축 어긋남에 따른 성능
Fig. 7. BER of mis-alignment on Y-axis

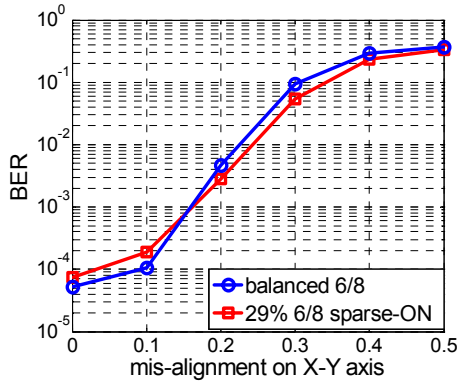


그림 8. X-Y축 어긋남에 따른 성능
Fig. 8. BER of mis-alignment on X, Y-axis

IV. 결 론

본 논문은 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 한 페이지의 밝은 정도에 따라 인접한 페이지에 영향을 주어 한 볼륨에 저장할 수 있는 페이지의 수를 줄어든다는 단점의 보완을 위하여, 한 페이지에 기록되는 ON 픽셀의 비율을 최대한 낮춰서 한 볼륨에 들어가는 페이지의 수를 늘리도록 하는 부호율이 6/8인 저밀도 ON 픽셀 2차원 변조부호를 제안하였다. 제안된 부호는 일반적으로 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 주로 쓰이고 있는 6/8 균형 변조부호와 비교하여 비슷한 성능을 보인다. 따라서 제안된 부호를 사용할 경우 성능의 저하 없이 홀로그래픽 저장장치의 기록 용량을 늘릴 수 있는 장점이 있다.

References

[1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *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," *Applied Optics*, vol. 38, no. 20, pp. 4374-4386, July 1999.

[3] J. Kim and J. Lee, "Partial response maximum likelihood detections using two-dimensional soft output Viterbi algorithm with two-dimensional equalizer for holographic data

storage," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 48, no. 3, pp. 03A033, March 2009.

[4] 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.

[5] N. Kim and J. Lee, "Two-dimensional codes for holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 31, no. 11, pp. 1037-1043, Nov. 2006.

[6] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional 5:8 modulation code for holographic data storage," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 48, no. 3, pp. 03A031, Mar. 2009.

[7] J. Kim, J. Wee, and J. Lee, "Error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 49, no. 8, pp. 08KB04, Aug. 2010.

[8] 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.

[9] D. Park, M. Yoo, and J. Lee, "Tone-controllable codes for holographic data storage system," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 49, no. 8, pp. 08KB05, Aug. 2010.

황 명 하 (Myungha hwang)



2008년 3월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 입학
2013년 9월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사 재학중
<관심분야> 스토리지 시스템, 반복 부호 부호, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee) (2013년 9월호 참조)