

논문 2016-53-10-2

4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 12/16 변조부호

(12/16 Modulation Code for 4-Level Holographic Data Storage)

정성권*, 이재진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[©])

요약

홀로그래픽 데이터 저장장치에서 데이터는 줄 단위가 아닌 페이지 단위로 처리하기 때문에, 짧은 접근 시간, 고용량, 빠른 전송 능력을 갖는다. 또한 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서는 하나의 픽셀은 1bit 이상 저장이 가능하다. 하지만 인접한 심볼간의 레벨의 차이가 클수록 인접 심볼간 간섭 문제가 발생한다. 그러므로 가장 큰 심볼과 가장 작은 심볼이 인접하는 것을 방지해야 한다. 본 논문에서는 인접 심볼간 간섭을 줄이기 위해 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 12/16 변조부호를 제안한다.

Abstract

Holographic data storage (HDS) features short access times, high storage capacities, and fast transfer rates since the data is recorded and read not by lines but by pages within a volume of holographic material. Furthermore, a single pixel can store more than 1 bit if it is multi-level. However, there is a problem of inter-symbol interference (ISI) between the adjacent symbols if the level difference between neighboring symbols is large. Hence, one should avoid side by side placement of the smallest level symbol and the largest level symbol in any direction. This paper proposes a 12/16 modulation code for 4-level holographic data storage, so that the largest symbol is 3 and the smallest symbol is 0, in order to reduce the ISI.

Keywords : Holographic Data Storage, Inter-symbol interference, Multi-level, Modulation code

I. 서론

홀로그래픽 데이터 저장장치 (holographic data storage, HDS)는 홀로그래픽 기술을 이용한 차세대 저장장치로 주목받고 있다^[1~2]. HDS는 정보를 표면에 저장하는 저장장치들과는 다르게 페이지 단위로 저장한다. 따라서 대용량화, 정보 입출력속도의 고속화 및 빠른 접근시간을 갖는다^[3~6]. HDS의 원리는 홀로그래픽 매체의 볼륨에 데이터 페이지들을 멀티플렉싱을 하여 저장한다. 이 때 정보 데이터는 SLM (Spatial Light

Modulator)를 이용하여 신호빔으로 변경되어지며, 이를 기준빔 (Reference Beam)으로 간섭시켜 발생되어지는 간섭무늬를 홀로그래픽 매체에 기록한다. 이와 반대로 읽기 과정은 기준빔을 홀로그래픽 매체에 입사하여 정보 데이터를 추출한다. HDS의 여러 장점에도 불구하고, HDS는 인접 심볼간 간섭 (Inter-Symbol Interference), 인접 페이지간 간섭 (Inter-Page Interference), 어긋남 (misalignment)등이 발생한다. 기존의 ISI의 오류발생 원인이 줄 단위로 읽기/쓰기에 의해 발생한다면, HDS는 CCD (Charge-Coupled Devices)를 이용해 페이지 단위로 처리하기 때문에 인접한 픽셀들 사이에 블러 (blur) 현상이 발생하며, 즉 2차원 ISI가 발생한다^[7]. 그러므로 HDS는 앞과 뒤의 픽셀 뿐만 아니라 위와 아래 픽셀도 고려해야만 한다. 따라서 기존의 1차원 신호처리가 아닌 2차원으로 신호처리를 해야 하기 때문에 에러가 더욱 발생하며, 또한 에러를 정정하는 것 또한 쉽지 않다. IPI는 홀로그래픽 저장장치에서 페이지가 같은

*학생회원, **정회원, 송실대학교 전자정보공학부 (School of Electronics Engineering, Soongsil University)

© Corresponding Author (E-mail : zlee@ssu.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).

Received ; August 12, 2016 Revised ; August 17, 2016

Accepted ; September 20, 2016

공간에 저장하기 때문에 발생한다. 페이지를 겹쳐서 저장하는 다양한 멀티플렉싱 방식이 제안되어지고 있다^[8]. 또한 CCD 배열이 정확하게 정렬이 되지 않는다면, 데이터를 읽는 과정에서 어긋남 (misalignment)이 발생하며, 이는 시스템의 성능을 감소시킨다. 따라서 이러한 오류 요인들인 ISI, IPI, 어긋남을 감소시키기 위해 다양한 알고리즘들이 개발되어지고 있다^[9~12].

멀티레벨 HDS는 하나의 픽셀에 1bit 이상의 데이터를 저장할 수 있기 때문에 저장 공간을 더욱 늘릴 수 있다. 하지만, 멀티레벨 데이터를 저장할 때에는 시스템 성능을 저하시키는 영향이 커진다. 그림 1은 2차원 ISI가 심각한 상황을 보여준다. 예를 들어, 4-레벨인 경우에는 가장 큰 심볼인 3과 가장 작은 심볼인 0이 인접한 상황일 때 ISI 영향이 심각해진다. 따라서 이러한 상황을 피하기 위해 다양한 변조부호가 제안되어지고 있다^[13~14].

본 논문에서는 2차원 ISI를 감소시키기 위해 4-레벨 홀로그래픽 저장장치에서의 12/16 변조부호를 제안하며, 기존에 제안된 변조부호와의 비교를 통해 성능을 확인해본다.

II. 제안된 12/16 변조부호 변조 및 복조 방식

1. 변조방식

4레벨 HDS에서 하나의 픽셀은 4개의 심볼 (0, 1, 2, 3)로 표현이 가능하므로, 하나의 픽셀은 2bit 저장이 가능하다. 2차원 ISI이 심각하게 발생하는 패턴을 피하기 위해, 가장 작은 심볼 '0'과 가장 큰 심볼 '3'이 인접하지 않도록 하는 변조부호를 제안한다. 제안된 12/16 변조부호는 12개의 입력 심볼을 받아 16개의 픽셀로 변조를 한다. 이 때 변조된 16개의 코드워드는 4x4 배열구조 모양을 갖는다.

그림 2는 12/16 변조부호의 구조를 보여준다. 그림과 같이 변조된 코드워드 C0, C2, C5, C7, C8, C10, C13, C15는 각각 심볼 {0, 1, 2, 3}을 가질 수 있으며, C1, C3, C4, C6, C9, C11, C12, C14는 각각 심볼 {1, 2}를 가질 수 있다. 총 12개의 입력 데이터 심볼 중에서 D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 심볼 값은 각각 C0, C2, C5, C7, C8, C10, C13, C15에 일대일 매핑 되며, 나머지 D8, D9, D10, D11 심볼값은 표 1의 규칙에 따라 각각 (C1, C3), (C4, C6), (C9, C11), (C12, C14) 심볼 값이 매핑된다. 예를 들어 12개의 입력 데이터 1, 2, 3, 0, 3, 2, 1, 0, 2, 3, 0, 1과 같다면 입력 데이터중 앞의 8개의 심볼인 1, 2, 3, 0, 3, 2, 1, 0의 심볼값은 C0, C2, C5, C7, C8, C10,

C13, C15에 각각 매핑되며, 나머지 4개의 심볼 중 2는 매핑 테이블 규칙에 따라 (C1, C3)에 (2, 1), 3은 (C4, C6)에 (2, 2), 0은 (C9, C11)에 (1, 1), 1은 (C12, C14)에 (1, 2)가 매핑 된다. 표 1의 매핑 규칙은 다음과 같이 정해진다. 입력받은 심볼값을 2진수로 변환한 뒤, 각 자리에 1을 더해준다. 예를 들어, 입력으로 심볼 값을 2를 받았다면, 이를 2진수로 변환한 값인 10의 값에 각각 1을 더해준 2, 1로 변조한다.

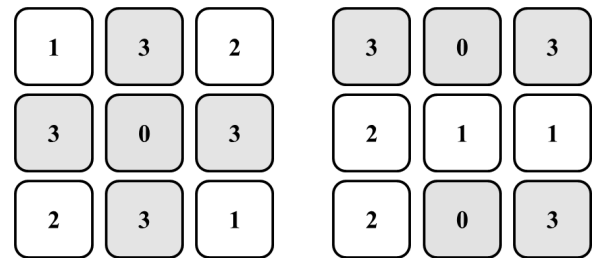


그림 1. 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 심각한 2차원 ISI를 발생하는 예

Fig. 1. Example of serious two-dimensional ISI in 4-level HDS.

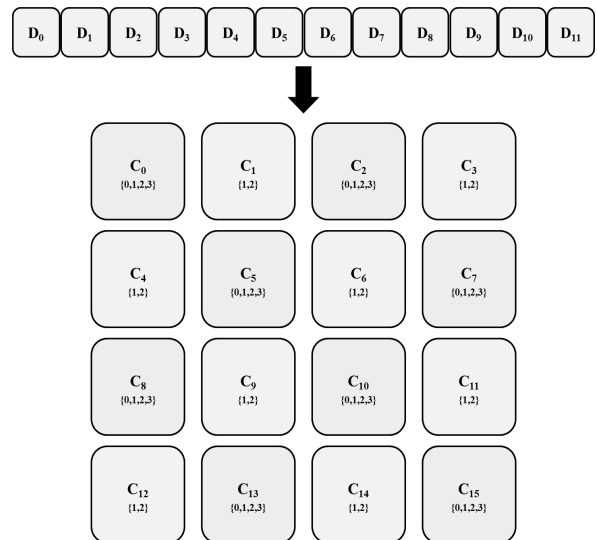


그림 2. 변조부호 방식 구조

Fig. 2. Structure of modulation scheme.

표 1. 심볼 매핑 규칙

Table1. Symbol mapping rule.

D8, D9, D10, D11	(C1, C3), (C4, C6), (C9, C11), (C12, C14)
0	(1, 1)
1	(1, 2)
2	(2, 1)
3	(2, 2)

2. 복조방식

복조방식은 변조방식의 반대과정으로 진행된다. 홀로그래픽 채널 및 검출기를 통과한 값들 중에서, C0, C2, C5, C7, C8, C10, C13, C15은 심볼 {0, 1, 2, 3}으로 표현해준 후에, 출력값으로 D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7에 일대일 매핑을 한다. 하지만 C1, C3, C4, C6, C9, C11, C12, C14은 심볼 값으로 {1, 2}만 가질 수 있으므로, 해당 심볼 값으로 0을 갖는다면 1로 변경하며, 3을 갖는다면 2로 변경한다. 그 후에 심볼 매핑 규칙에 따라 (C1, C3)는 D8, (C4, C6)은 D9, (C9, C11)은 D10, (C12, C14)는 D11에 매핑이 된다. 제안하는 변조코드를 이용하면 가장 큰심볼의 앞과 뒤 뿐만 아니라 위와 아래에 가장 작은 심볼이 인접하는 문제가 발생하지 않는다. 제안하는 변조부호의 코드율은 0.75이며, 한 픽셀당 1.5bits 저장 가능하다.

III. 실험

홀로그래픽 채널 모델링은 CCD 배열을 이용하여 입력 데이터를 출력 데이터로 만든다^[15-16]. 입력 페이지에서의 (x, y)의 연속적인 PSF (Point Spread Function)은 다음과 같다.

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

여기서 σ_b 는 블러의 정도를 나타내며, $\text{sinc}(x, y)$ 는 식(2)와 같이 정의한다.

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

이 때, CCD 배열이 올바른 위치에 있지 않다면, PSF은 다음과 같다.

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

여기서 m_x 와 m_y 는 각각 x축과 y축의 어긋남이며, CCD 배열이 제대로 위치하지 않음을 나타낸다. 따라서 [p, q] 위치의 이산적인 PSF는 식 (4)와 같이 계산된다.

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

본 논문에서는 한 페이지의 크기는 1024×1024이며, 총 1000페이지에 대하여 실험하였다. 채널의 잡음 환경

은 신호대잡음비(Signal-to-Noise Ratio, SNR)를 변화하면서 하였고, SNR은 $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 정의하였다. 이때 σ_w^2 는 부가백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise) 전력을 나타낸다.

채널의 부분응답 (Partial Response)은 수평, 수직 방향 모두 PR(131) 신호를 사용하였다. 신호검출을 위해 최대우사도 검출기는 연관정 출력 비터비 알고리즘 (Soft Output Viterbi Algorithm, SOVA)을 사용하였다.

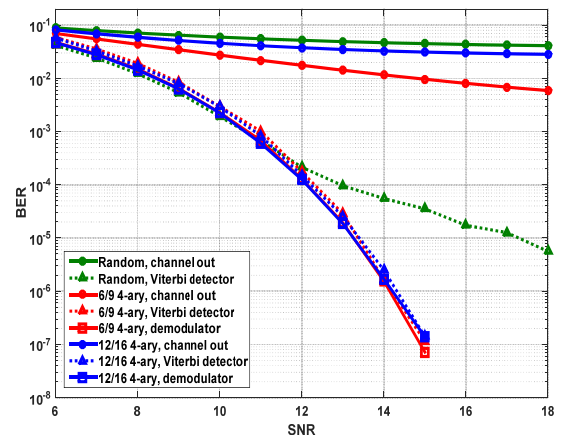


그림 3. SNR에 따른 BER 성능 분석

Fig. 3. BER performance according to SNR.

그림 3은 SNR에 따른 랜덤 데이터, 6/9 변조부호, 제안하는 12/16 변조부호의 성능을 나타낸다. 6/9 변조부호의 부호율은 약 0.66이며 하나의 픽셀은 약 1.33bit를 저장한다^[17]. 어긋남은 각각 x, y축 각각 10% 주었으며 블러는 1로 설정하였다. 비트 오류율(Bit Error Rate, BER)이 10^{-5} 일 때, 제안된 변조부호는 랜덤 데이터보다 약 4dB정도 좋은 성능을 나타내며, 6/9 변조부호와 비슷한 성능을 나타낸다. 하지만 6/9 변조부호보다 제안된 12/16 변조부호가 0.08 코드율이 높다.

그림 4는 blur의 변화에 따른 BER 성능을 보여준다. 이때 어긋남은 각각 x, y축 각각 10% 주었으며, SNR은 14dB이다. 블러가 1.4보다 작을 때에는 랜덤 데이터보다 성능이 뛰어났으며, 6/9 변조부호의 성능과는 비슷함을 보여준다.

그림 5는 어긋남에 따른 BER 성능을 보여준다. 제안된 12/16 변조부호는 랜덤 데이터보다 성능이 우수하였으며, 6/9 변조부호와 비슷한 성능을 보여준다.

그림 6은 제안하는 12/16 변조부호와 랜덤 데이터의 심볼 분포도를 보여준다. 제안된 변조부호의 그래프를 보면 겹치는 구간이 랜덤 데이터보다 겹치는 부분이 적

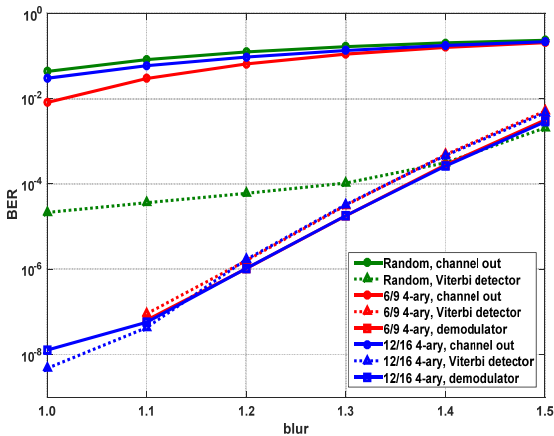


그림 4. Blur에 따른 BER 성능 분석
Fig. 4. BER performance with respect to blur.

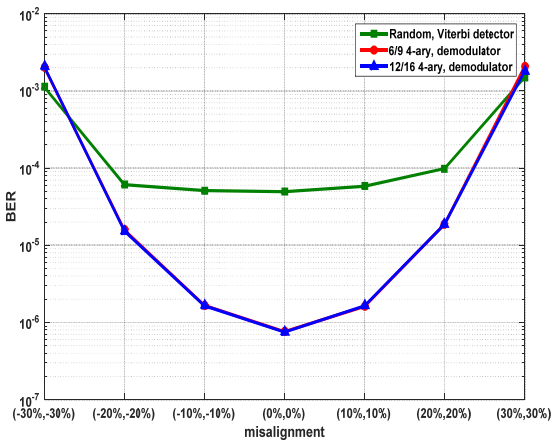


그림 5. 어긋남에 따른 BER 성능 분석
Fig. 5. Comparison of BER performance on misalignment.

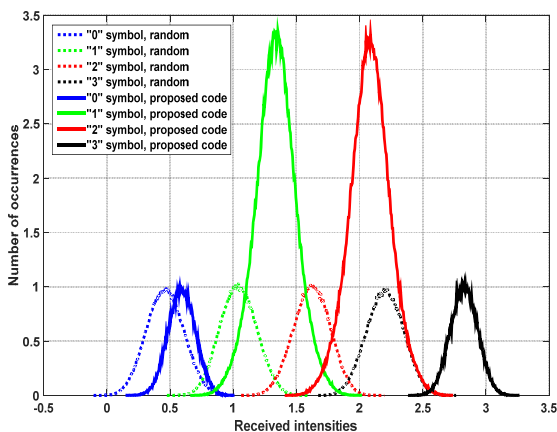


그림 6. 랜덤 데이터와 변조부호 심볼의 분포
Fig. 6. Distributions of the random symbols and the proposed modulation coded symbols.

음을 알 수 있다. 이는 제안하는 변조부호를 사용하면 심볼간의 간섭이 적음을 알 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 4-레벨 HDS를 위한 12/16 변조부호를 제안한다. 제안하는 코드를 사용하면 복잡도가 증가하지만 ISI에 의해 발생하는 패턴을 제거하여 오류요인을 줄이며 랜덤 데이터보다 우수한 성능을 보여준다. 또한 기존에 제안된 6/9 변조부호보다 코드율을 높이면서 비슷한 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] S. G. Srinivasa, O. Momtahan, A. Karbaschi, S. W. McLaughlin, A. Adibi, and F. Fekri, "M-ary, binary, and space-volume multiplexing trade-offs for holographic channels," Proc. IEEE Globecom 2006, pp. 1-5, 2006.
- [2] 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, April 1995.
- [3] B. M. King and M. A. Neifeld, "Sparse modulation coding for increased capacity in volume holographic storage," Appl. Opt., Vol. 39, pp. 6681-6688, 2000.
- [4] R. John, J. Joseph, and K. Singh, "A new balanced modulation code for a phase-image-based holographic data storage system," J. Opt. A: Pure Appl. Opt., Vol. 7, no. 8, pp. 391-395, 2005.
- [5] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," Proc. IEEE, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, August 2004.
- [6] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Günther, R. M. Macfarlane, and G. T. Sincerbox, "Pixel-matched holographic data storage with megabit pages," Opt. Lett., Vol. 22, no. 19, pp. 1509-1511, June 1997.
- [7] 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, pp. 4374-4386, July 1999.
- [8] A. Vardy, M. Blaum, P. H. Siegel, and G. T. Sincerbox, "Conservative arrays: multidimensional modulation codes for holographic recording," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 42, no. 1, pp. 227-230, 1996.
- [9] S. Jeong and J. Lee, "Two Dimensional Inter-symbol Interference Compensation for Holographic

- Data Storage,” Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 52, no. 6, pp. 1076-1080, June 2015.
- [10] 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, pp. 09MB02, 2011.
- [11] 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, March 2009.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] S. Jeong and J. Lee, “Multilevel Modulation Codes for Holographic Data Storage,” Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 52, no. 6, pp. 1581-1586, September 2015.
- [15] 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.
- [16] M. Keskinöz and B. V. K. V. Kumar, “Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC),” Proc. SPIE, Vol. 4090, pp. 205-210, September. 2000.
- [17] B. Kim, K. Park, and J. Lee, “4-level 6/9 Modulation Code for Holographic Data Storage,” J. KICS, Vol. 39A, no. 10, pp. 574-578, October 2014.

 저 자 소 개



정 성 권(학생회원)
 2015년 2월 숭실대학교 정보통신
 전자공학부 학사
 2015년 3월~현재 숭실대학교 정
 보통신공학과 석사과정
 <주관심분야: 채널코딩, 고밀도 저장
 장치 시스템>



이 재 진(정회원)
 1983년 2월 연세대학교 전자공학
 과 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 정보통신연구
 소 책임 연구원
 1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과
 부교수
 2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수
 <주관심분야: 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스템>