

논문 2015-52-9-2

홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 4레벨 3/4 변조부호

(4-level 3/4 Modulation Code for Holographic Data Storage)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[Ⓢ])

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 빠른 전송 능력, 짧은 접근 시간, 그리고 높은 저장용량 등의 장점을 가진다. 하지만 홀로그래픽 데이터 저장장치는 인접 심볼간 간섭, 인접 페이지간 간섭, 어긋남 등의 여러 가지 오류요인이 있다. 특히 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는, 한 픽셀이 나타내는 정보가 0과 1의 이진수가 아닌 그 이상의 정보를 저장하고 있기 때문에, 위와 같은 간섭들이 더 크게 발생할 수 있다. 본 논문에서는 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 인접 심볼간 간섭을 줄이기 위한 3/4 변조 부호를 제안한다.

Abstract

A Holographic data storage has some advantage of fast transmission, short access time and high storage capacity. However, it has several problems such as inter-symbol interference, inter-page interference and misalignment. Especially, for multi-level holographic data storage system, since one pixel contains more than 1bit, the system is more vulnerable to the error. In this paper, we propose a 3/4 modulation code which mitigate inter-symbol interference for 4-level holographic data storage.

Keywords : Holographic data storage, Multi-level, Modulation code, 2D Inter-symbol interference

I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장장치(Holographic data storage, HDS)는 홀로그램을 이용한 광 저장장치이다. 홀로그래픽 데이터 스토리지는 고도 정보화 시대에 필요한 정보 저장장치가 필요한 세 가지 핵심적인 특징을 고루 갖추고 있어 차세대 대용량 정보 저장장치로 각광을 받고 있다. HDS의 세 가지 핵심적인 특징으로는 빠

른 전송 능력, 짧은 접근 시간, 그리고 높은 저장용량 등의 장점을 가진다^[1~2]. 하지만 홀로그래픽 저장 장치에도 주요한 오류 요인으로서는 인접 페이지간 간섭, 인접 심볼간 간섭, 어긋남 등이 있다^[3~4]. 인접 페이지간 간섭(inter-page interference, IPI)은 한 공간에 여러 페이지를 겹쳐서 저장 하기 때문에 다른 페이지가 현재의 페이지에 영향을 준다. IPI는 한 공간에 많은 페이지를 저장하면 할수록 더 심해지며 이를 제어하기는 쉽지 않다. 인접 심볼간 간섭(inter-symbol interference, ISI)은 기존의 저장장치에서 트랙을 따라서 저장하며, 서로 다른 트랙에서는 영향을 받지 않기 때문에 1차원 ISI만 생기지만, 홀로그래픽 저장장치는 2차원 페이지 형식으로 데이터를 처리하기 때문에, 2차원으로 ISI가 생긴다. 이와 같은 에러를 제어하는 방법으로, 부분 응답 최대 유사(Partial Respinse Maximum Likelihood, PRML) 검출 방법 등에 대한 연구가 진행되어 왔다^[5~7].

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

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

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

Received ; July 28, 2015 Revised ; August 17, 2015

Accepted ; September 3, 2015

0	3	2	3	1	2
1	2	0	2	0	0
3	2	1	1	3	2

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

Fig. 1. Example of severe ISI in four-level HDS.

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우, 한 픽셀이 1 비트 이상의 정보를 나타낸다. M-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우, 한 픽셀이 나타낼 수 있는 심볼의 경우는 M가지이다. 이 때문에 멀티레벨로 저장할 경우 저장용량이 증가한다. 하지만 M 레벨로 저장될 경우, 블러 효과가 심해져 시스템의 성능이 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우보다 저하될 수 있다. 이와 같은 ISI를 완화시키기 위하여 다양한 2차원 변조 부호가 연구되고 있다^[8-12].

본 논문에서는 그림 1과 같이 레벨 0 심볼과 레벨 3 심볼이 인접하는 상황이 발생하지 않도록 하기 위한 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서의 2차원 ISI를 보완해주는 3/4 변조부호를 제안한다.

II. 제안된 4-레벨 3/4 변조부호

한 픽셀이 가질 수 있는 심볼의 종류가 4-레벨이므로 입력되는 두 비트 (예: 00, 01, 10, 11)를 하나의 심볼로 만든다. 그림 2는 2×2 배열의 제안하는 변조부호의 코드워드 구조를 보여준다. 3개의 심볼 데이터가 입력되어 2×2 배열의 형태의 4개의 심볼 데이터로 출력된다. 2×2 배열의 형태의 코드워드는 두 부분으로 나눌 수 있다. C1, C4 픽셀은 {0, 1, 2, 3} 레벨의 심볼이 올 수 있고, 나머지 C2, C3 픽셀은 {1, 2} 레벨의 심볼만

C1 {0,1,2,3}	C2 {1,2}
C3 {1,2}	C4 {0,1,2,3}

그림 2. 제안하는 변조부호의 코드워드 구조
Fig. 2. Structure of codeword in the proposed modulation code.

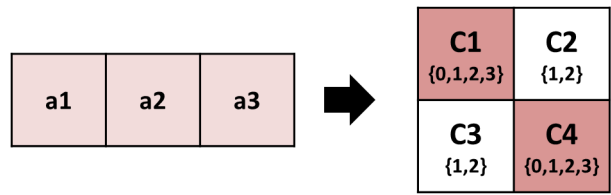


그림 3. 변조 방식에 대한 구조
Fig. 3. Structure of encoding scheme.

표 1. 심볼 매핑 규칙
Table 1. Symbol mapping rule.

a3	(C2, C3)
0	(1, 1)
1	(1, 2)
2	(2, 1)
3	(2, 2)

0,1,2,3	1,2	0,1,2,3	1,2	0,1,2,3	1,2
1,2	0,1,2,3	1,2	0,1,2,3	1,2	0,1,2,3
0,1,2,3	1,2	0,1,2,3	1,2	0,1,2,3	1,2
1,2	0,1,2,3	1,2	0,1,2,3	1,2	0,1,2,3

그림 4. 제안된 변조부호들로 구성된 코드워드 예
Fig. 4. Example of codewords constituted with proposed modulation code.

가능하다. 이렇게 하면 인접한 픽셀이 0 심볼과 3 심볼이 이웃하는 경우가 발생하지 않게 된다.

그림 3은 변조 방식에 대한 구조를 보여준다. 먼저 a1, a2 픽셀은 C1, C4 픽셀에 각각 일대일 대응이 되며, a3 픽셀은 표 1의 매핑 방식에 의해 C2, C3 픽셀에 각각 심볼값이 정해진다. 복조 과정은 변조 과정이 일대일 매핑 방식이므로 변조 과정의 역순으로 진행된다.

그림 4는 제안된 변조부호들이 연결되어 있을 때의 상황을 보여준다. 제안된 변조부호들로 이루어진 코드워드들은 어느 심볼도 0 심볼과 3 심볼이 인접하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 제안된 변조부호로 인하여 2차원 ISI를 완화할 수 있다. 제안된 변조부호의 코드율은 0.75(=3/4)이며 픽셀당 3/2비트를 기록한다.

III. 실험

1. 홀로그래픽 데이터 저장장치 채널

홀로그래픽 데이터 저장장치 채널은 CCD (charge-coupled devie)를 통과한 형상으로 모델링 하였다^[13~14]. 데이터가 기준빔을 통과한 후 나온 회절된 신호를 CCD를 이용하여 검출한다. 연속적인 PSF(point spread function)은 다음과 같이 모델링 된다.

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

여기서 σ_b 는 빛이 블러(blur)가 되는 정도이다. $sinc(x,y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

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

$[p,q]$ 위치의 이산 PSF는 다음과 같이 정의한다.

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

여기서 CCD 배열이 제대로 된 위치에 있지 않고, 어긋난 형태로 위치하게 되는 것을 어긋남이라고 하고, x 축의 어긋남을 m_x , y 축의 어긋남을 m_y 로 정의할 때 연속적인 PSF는 다음과 같다.

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

채널에 주어지는 잡음 환경은 신호대잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)를 변화하면서 하였고, 신호대잡음비는 $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 로 정의하였다. σ_w^2 은 부가 백색 가우시안 잡음전력이다. 그림 5는 시뮬레이션의 전체 블록도를 나타낸다. 신호검출을 위하여 부분응답 최대유사도(partial response maximum likelihood, PRML)시스템을 HDS에 적용하였다. 채널의 부분응답

신호로 수평방향과 수직방향 모두 PR(131) 신호를 사용 하였으며, 등화기(equalizer)는 유한 임펄스 응답에 의한 5×5 계수로 구현하였다. 최대유사도 검출기는 연관정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm, SOVA)으로 구현하였다^[15~16]. 시뮬레이션 과정은 먼저 4-레벨 입력 데이터 $a[k]$ 를 랜덤하게 생성한다. 그 후 변조기를 통하여 인코딩된 코드워드들이 한 페이지를 구성하게 되면 각 픽셀에 해당하는 $d[p,q]$ 가 홀로그램 채널을 통하여 전달되고 AWGN이 추가된다. AWGN은 전송신호에 잡음을 더하여 이루어지는데 일정한 밀도의 잡음이 전체대역에 균일하게 분포한다. 잡음이 섞인 수신된 신호 $r[p,q]$ 는 2차원 등화기와 비터비 검출기 (Viterbi detector)를 지나게 된다.

2. 시뮬레이션 결과

실험은 한 페이지당 1024×1024 의 크기로 1000 페이지를 실험하였으며, 그림 6은 SNR에 따른 랜덤 데이터와 3/4 변조부호의 BER 성능을 보여준다. 이때 블러는 1이고, 어긋남은 x 축과 y 축에 각각 10%씩 설정하였다. 비터비 검출기를 통과한 그래프를 보면 SNR=13dB 부터 랜덤한 경우보다 변조부호가 성능이 급격히 향상 되는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 블러에 따른 랜덤 데이터와 3/4 변조부호의 BER 성능을 보여준다. 이때 SNR=18dB 이고, 어긋남은 x 축과 y 축에 각각 10%씩 설정하였다. 블러가 1.5 보다 작은 경우 비터비 검출기를 통과한 그래프를 보면 제안된 변조부호의 성능이 랜덤한 경우보다 성능이 좋으며 그 이상은 비슷한 성능이 보였다. 이것은 블러가 어느 한계를 벗어나도록 커지면 레벨간의 애매함이 점점 커져서 신호검출의 한계를 보이기 때문이다. 하지만 블러의 크기가 어느정도의 한계 이내에서는 제안된 변조부호를 이용하면 부호이득을 얻

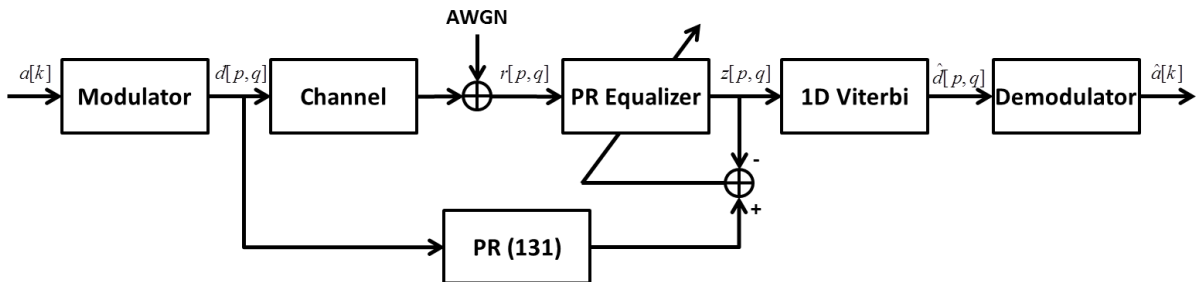


그림 5. HDS의 블록다이어그램
Fig. 5. Block diagram of HDS.

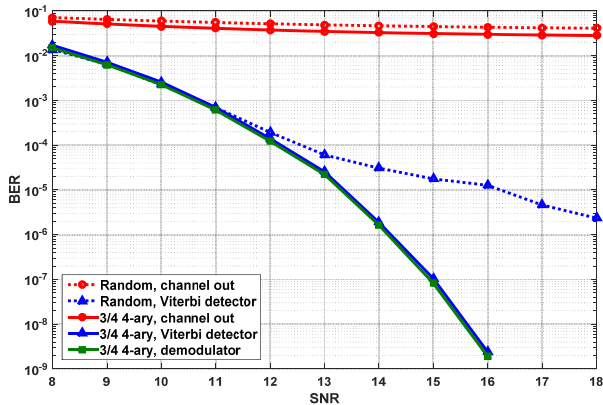


그림 6. SNR에 따른 제안된 랜덤 데이터와 변조부호의 BER 성능

Fig. 6. BER performance of random data and proposed modulation code according to SNR.

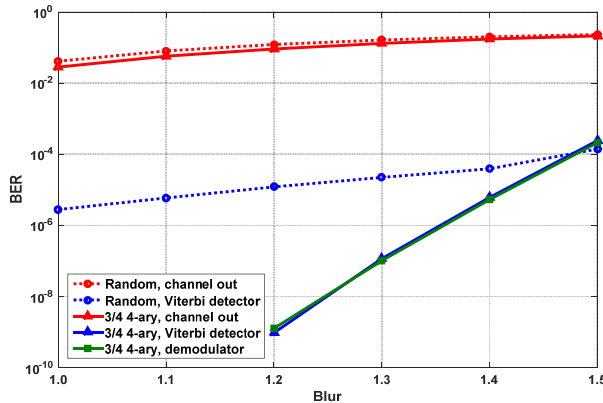


그림 7. 블러에 따른 제안된 랜덤 데이터와 변조부호의 BER 성능

Fig. 7. BER performance of random data and proposed modulation code according to blur.

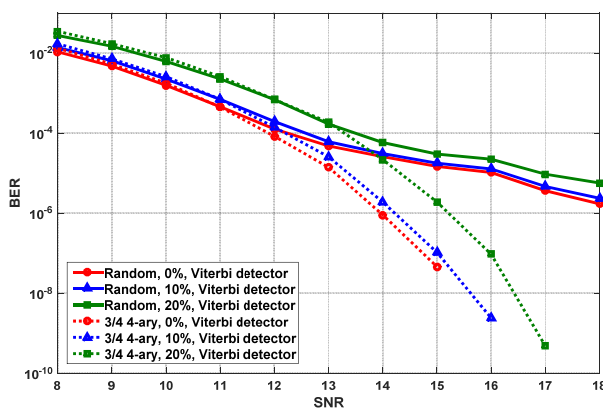


그림 8. 어긋남과 SNR에 따른 제안된 랜덤 데이터와 변조부호의 BER 성능

Fig. 8. BER performance of random data and proposed modulation code according to misalignment and SNR.

을 수 있다. 그림 8은 어긋남에 따른 랜덤 데이터와 3/4 변조부호의 BER 성능을 보여준다. 이때 블러는 1로 설정하였다. 어긋남이 증가하여도 제안하는 변조코드가 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 6~8을 통해 제안된 4레벨 3/4 변조부호가 어느 정도 보장된 채널환경에서 임의의 데이터 시퀀스보다 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 HDS에서 데이터의 2차원 ISI를 완화하여 검출 성능을 향상시킬 수 있는 4-레벨 변조부호를 제안하였다. 제안된 변조부호는 채널의 상태가 아주 열악하지 않은 상황에서는 랜덤한 데이터 시퀀스보다 우수한 성능을 보인다. 또한 어긋남을 주었을 때도 높은 성능 이득을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, August 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, pp. 4374-4386, July 1999.
- [3] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Gunter, R. M. Macfalane, and G. T. Sincerbox, "Pixel matched holographic data storage with megabit pages," *Opt. Lett.*, Vol. 22, no. 19, pp. 1509-1511, October 1997.
- [3] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Gunter, R. M. Macfalane, and G. T. Sincerbox, "Pixel matched holographic data storage with megabit pages," *Opt. Lett.*, Vol. 22, no. 19, pp. 1509-1511, October 1997.
- [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, April 1995.
- [5] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient

- modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," *Proc. SPIE*, Vol. 4090, pp. 205-210, September. 2000.
- [6] 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," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, no. 3, pp. 03A033, March 2009.
- [7] 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.
- [8] Keunhwan Park, Byung-sun Kim, and Jaejin 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.
- [9] Soo Youn Kim and Jaejin Lee, "A Simple 2/3 Modulation Code for Multi-Level Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 52, no. 9, pp. 09LE04, September 2013.
- [10] G. Kim and J. Lee, "2/3 modulation code and its Viterbi decoder for 4-level holographic data storage," *J. KICS*, Vol. 38, no. 10, pp. 827-832, October 2013.
- [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] 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.
- [14] 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, December. 2010.
- [15] Hagenauer, J. and Hoehner, P., "A Viterbi Algorithm with Soft-Decision Outputs and Its Applications," GLOBECOM 1989, pp. 1680-1686, Dallas, USA, November 1989.
- [16] J. Kim and J. Lee, "Performance of Two-Dimensional Soft Output Viterbi Algorithm

for Holographic Data Storage." *J. KICS*, Vol. 37, no. 10, pp. 815-820, October 2012.

— 저 자 소 개 —



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



이 재 진(정회원)
 1983년 2월 연세대학교
 전자공학과 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 정보통신
 연구소 책임 연구원
 1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과
 부교수
 2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부
 교수
 <주관심분야 : 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스
 템>