

논문 2015-52-10-3

부호율 1/2인 변조부호의 픽셀당 레벨 수에 따른 홀로그래픽 데이터 저장장치 성능 분석

(Performance Analysis of Holographic Data Storage Depending on the Number of Levels Per Pixel of the Code Rate 1/2 Modulation Codes)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[©])

요 약

본 논문에서는 차세대 저장장치로 주목받고 있는 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 여러 가지 레벨의 변조부호를 제안하고 이들의 성능을 알아본다. 멀티레벨 변조부호는 한 픽셀에 1비트 이상 저장 가능하기 때문에 저장용량을 증가시킬 수 있으며, 동일한 픽셀 개수에서 더 많은 코드워드의 표현이 가능하다. 따라서 코드워드간 최소거리가 큰 변조부호를 만들 수 있으며 이런 성질은 오류정정 능력을 가지는 변조부호를 구성할 수 있다. 부호율을 1/2로 고정하고 제안된 변조부호들의 성능을 조사한 결과, 레벨 수가 커서 최소거리가 큰 변조부호의 성능보다 낮은 레벨이기 때문에 최소거리가 작은 변조부호가 더 좋은 성능을 보였다.

Abstract

We propose three multi-level modulation codes of the code rate 1/2 for holographic data storage considered as a promising candidate for next generation storage systems. Since a pixel with multi-levels can represent more than 1 bit, it is possible to increase the storage capacity and have many codewords. Thus, we can choose a code that the minimum distance is as far as possible. When we compare the codes with the code rate 1/2, the performance of the code with small number of levels is better than that of large number of levels.

Keywords : multi-level, holographic data storage, minimum distance

I. 서 론

멀티미디어 기술 및 인터넷의 발전으로 인한 데이터의 폭증으로 차세대 초고속, 초대용량 저장장치에 대한

필요성이 날로 부각되고 있다. 이러한 이유로 홀로그래픽 데이터 저장장치가 차세대 저장장치로서 주목을 받고 있다^[1]. HDS는 페이지 단위로 처리하기 때문에 고속의 데이터 입출력 및 짧은 데이터 접근 시간이 가능하다. 또한 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 픽셀에 1비트 이상의 데이터를 저장할 수 있기 때문에 더 많은 데이터를 저장할 수 있다^[2-3].

이러한 장점에도 불구하고 여러 가지 문제점이 발생하고 있다. 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 픽셀에 1비트 이상의 데이터를 저장하기 때문에 향상된 성능의 문턱 전압 검출기가 필요하다. 이를 위해 최대 유사도에서 사용되는 EM(Expectation-maximization)

* 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 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).

Received ; September 4, 2015 Revised ; September 8, 2015

Accepted ; September 25, 2015

알고리즘 기반의 수신된 신호에서 변화되는 DC 오프셋 값을 추정된 문턱전압 검출기법이 제안되고 있다^[4]. 또 다른 문제점중의 하나는 2차원 인접 심볼간 간섭 (Inter-symbol interference, ISI)이다. 레벨의 증가는 블러(blur) 효과가 심해져 시스템의 성능이 저하될 수 있다. 이를 해결하기 위해 다양한 가장 큰 심볼 값(혹은 가장 작은 심볼 값)의 옆 픽셀에 가장 작은 심볼 값(혹은 가장 큰 심볼 값)이 발생하지 않기 위한 변조코드와 비터비 검출 방법을 변조 방식에 적용한 변조코드 등이 제안되었다^[5~7].

본 논문에서는 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율(code rate)은 1/2로 동일한 상황에서 각 픽셀의 레벨과 코드워드간의 최소거리 증가에 따른 성능을 비교하고 분석한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 각 레벨과 최소거리에 따른 세 가지 새로운 멀티레벨 변조부호를 제안하며, III장에서는 홀로그래픽 채널 모델 및 실험 환경을 설명하고 실험을 결과를 확인한다. IV장에서는 실험을 통한 결론을 맺는다.

II. 레벨 및 최소거리에 따른 코드워드

홀로그래픽 데이터 저장장치에서 한 픽셀당 레벨의 증가는 저장용량을 증가시키며, 또한 코드워드의 수를 증가시킬 수 있다. 예를 들어, 그림 1을 보면 2개의 픽셀이 있을 때, (a) 2레벨(바이너리)일 경우 두 픽셀로 표현할 수 있는 경우의 수는 4개, (b) 3레벨일 경우 두 픽셀로 표현할 수 있는 경우의 수는 9개, 그리고 (c) 4

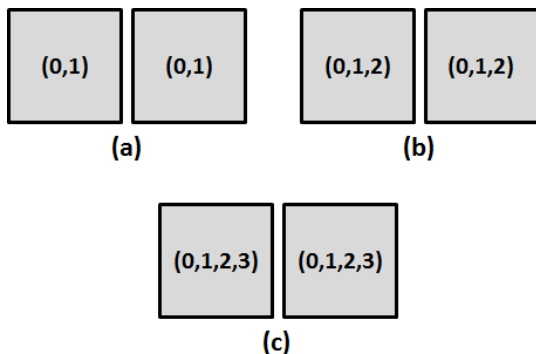


그림 1. (a) 2레벨, (b) 3레벨, (c) 4레벨 일 때 2픽셀의 경우의 수

Fig. 1. Number of cases of 2 pixel when (a) 2-level, (b) 3-level and (c) 4-level.

레벨일 경우 두 픽셀로 표현할 수 있는 경우의 수는 16개이다. 이를 이용하여 2비트를 저장한다고 하면 2레벨일 때는 4개에 일대일 대응이 되며, 3레벨일 때는 9개 중 4개의 코드워드를 선택하며, 4레벨일 때는 16개 중 4개 코드워드를 선택을 하게 된다. 코드워드를 선택하는 과정에서 임의로 선택하는 경우보다 특성에 맞는 코드워드를 선택하면 성능 향상을 높일 수 있다.

성능을 향상시킬 수 있는 방법 중 하나는 코드워드들간의 최소거리(minimum distance)가 큰 코드워드를 선택하는 것이다. 두 개의 $\overline{x_1} = (x_{1,0}, x_{1,1}, \dots, x_{1,n-1})$ 와 $\overline{x_2} = (x_{2,0}, x_{2,1}, \dots, x_{2,n-1})$ 코드워드가 있고 이때 n 을 픽셀의 개수라고 하면 코드워드간 거리 d 는 다음과 같이 정의한다.

$$d(\overline{x_1}, \overline{x_2}) = \sum_{i=0}^{n-1} (x_{1,i} - x_{2,i})^2 \quad (1)$$

이 때 가장 작은 코드워드들 간의 거리차를 d_{\min} 이라고 하면, d_{\min} 을 가능한 크게 선택할수록 좋은 성능을 얻을 수 있다. 따라서 한 픽셀에서 레벨의 증가는 경우의 수를 증가시킬 수 있으므로 d_{\min} 을 증가시킬 수 있다.

표 1은 한 개의 코드워드가 6개의 픽셀로 구성될 때, 레벨과 d_{\min} 에 따른 코드워드 수를 보여준다. 3비트를 표현하기 위해서는 8개 이상의 코드워드가 있어야하고, d_{\min} 이 클수록 성능이 좋아지기 때문에 2-레벨에서는 $d_{\min} \geq 3$ 일 때, 3-레벨에서는 $d_{\min} \geq 6$ 일 때, 4-레벨에서는 $d_{\min} \geq 8$ 일 때의 코드워드를 사용할 수 있다.

표 1. 레벨과 d_{\min} 에 따른 코드워드 수

Table 1. The number of codeword in accordance with level and d_{\min} .

d_{\min}	2레벨	3레벨	4레벨
2	32	365	2048
3	8	55	281
4	4	38	166
5	2	12	47
6	2	10	35
7		4	15
8		4	12
9		2	7

표 2. 레벨과 d_{min} 에 따른 코드워드

Table 2. Codeword according to level and d_{min} .

2레벨, $d_{min} \geq 3$	3레벨, $d_{min} \geq 6$	4레벨, $d_{min} \geq 8$
000000	000000	000000
000111	000222	000233
011001	012012	003302
011110	021120	013031
101010	102201	021320
101101	120102	031013
110011	201021	133100
110100	210210	133333
	222000	220202
	222222	230030
		301022
		303330

표 2는 각 레벨에서 3비트를 표현할 수 있는 최대 d_{min} 에 대한 코드워드를 보여준다. 2레벨이고 $d_{min} \geq 3$ 인 경우는 코드워드가 8개이므로 모두 사용하며, 3레벨이고 $d_{min} \geq 6$ 인 경우는 코드워드가 10개이며 이중에서 8개를 선택한다. 4레벨이고 $d_{min} \geq 8$ 인 경우는 코드워드가 12개이며 이중에서 8개를 선택한다.

부호율(bit/pixel)은 한 픽셀당 몇 비트를 기록할 수 있음을 나타낸다. 3비트를 6개의 픽셀로 표현 한다면 부호율은 0.5bit/pixel(=3bit/6pixel)이다. 즉, 한 개의 픽셀에 0.5비트를 저장하는 것을 나타낸다.

III. 실험

홀로그래픽 채널은 CCD(charge-coupled device)를 통과한 형상으로 모델링 하였다^[8-10]. 입력페이지에서 (x,y) 위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.

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

여기서 σ 는 분산된 신호의 회미한 정도인 블러를 의미한다. $\text{sinc}(x,y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{sinc}(x,y) = \left(\frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \frac{\sin(\pi y)}{\pi y}\right) \quad (3)$$

(p, q) 지점에서의 이산 PSF $[p,q]$ 는 다음과 같이 정

의한다.

$$h[p,q] = \int_{q-\frac{1}{2}}^{q+\frac{1}{2}} \int_{p-\frac{1}{2}}^{p+\frac{1}{2}} h(x,y) dx dy \quad (4)$$

채널을 통과한 신호 $r[p,q]$ 는 다음과 같다.

$$r[p,q] = d[p,q] \otimes h[p,q] + n[p,q] \quad (5)$$

여기서 $d[p,q]$ 는 2차원 입력신호 이고, \otimes 는 2차원 콘볼루션 연산자, $n[p,q]$ 는 부가백색 가우시안 잡음(Additive white Gaussian noise, AWGN)이다.

한 페이지의 크기가 1024×1024를 총 1000페이지에 대하여 실험하였으며, 최대유사도 검출기는 1차원 연관 정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm)를 사용하였다.

그림 2, 3, 4, 5는 2레벨 랜덤 데이터, $d_{min} \geq 3$ 인 2레벨 변조부호, 3레벨 랜덤 데이터, $d_{min} \geq 6$ 인 3레벨 변조부호, 4레벨 랜덤 데이터, $d_{min} \geq 8$ 인 4레벨 변조부호에 대하여 성능을 비교한 결과이다. 각 변조부호들의 부호율은 0.5bit/pixel이지만, 2레벨 랜덤 데이터는 1bit/pixel, 3레벨 랜덤 데이터는 1.5bit/pixel, 4레벨 랜덤 데이터는 2bit/pixel이다.

그림 2는 블러가 1.6일 때의 BER 성능을 보여준다. 2레벨의 경우에는 랜덤 데이터의 성능과 변조부호의 성능이 비슷하게 나왔으나, 3레벨과 4레벨은 랜덤 데이터 성능보다 변조부호의 성능이 좋음을 알 수 있다. 그러나 부호율이 동일한 상황에서 레벨의 증가시켜 d_{min} 을 증가시키는 변조부호보다는 레벨이 낮은 변조부호가 성능이 더 좋음을 알 수 있다.

그림 3은 블러가 1.5일 때의 BER 성능을 보여준다. 블러가 좋아져도 레벨이 낮을수록 성능이 좋아지는 것을 알 수 있다.

그림 4는 블러가 1.6일 때의 SER 성능을 보여준다. BER=10⁻²일 때, 4-level 변조부호는 4-level 랜덤 데이터보다 약 8dB가 성능 향상 되었으며, 3-level 변조부호는 3-level 랜덤 데이터보다 약 3dB가 성능 향상 되었다. 그러나 SER 성능 역시 레벨이 낮을수록 더 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

그림 5는 블러가 1.5일 때의 SER 성능을 보여준다. SER 성능 또한 블러가 좋아져도 레벨이 낮을수록 성능이 좋은 것을 알 수 있다.

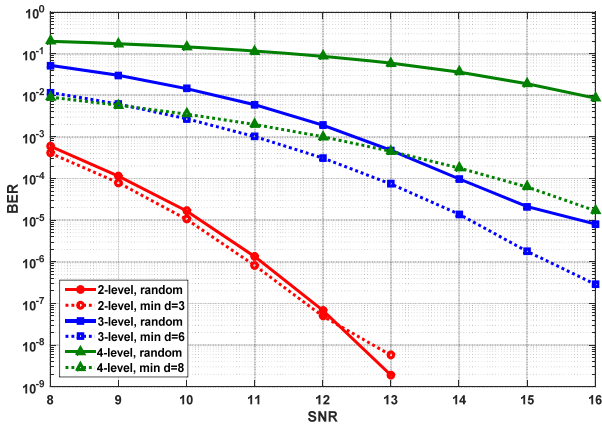


그림 2. 블러가 1.6일 때 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 2. BER performance according to SNR where blur is 1.6.

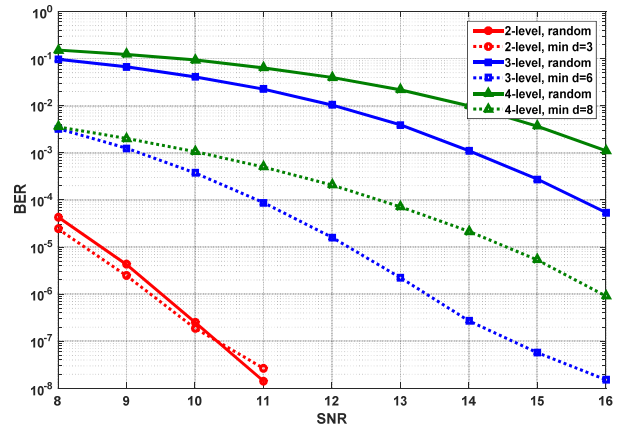


그림 3. 블러가 1.5일 때 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 3. BER performance according to SNR where blur is 1.5.

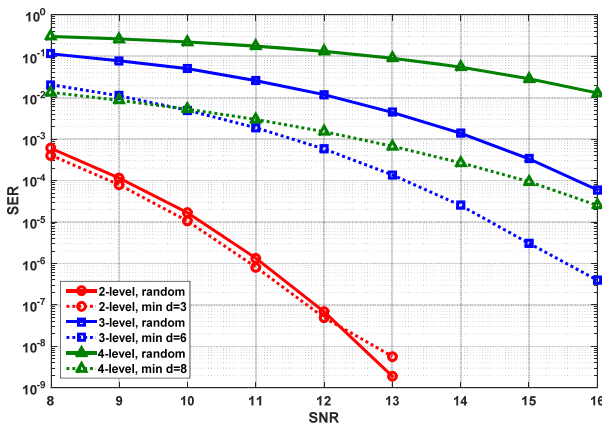


그림 4. 블러가 1.6일 때 SNR에 따른 SER 성능
Fig. 4. SER performance in accordance with SNR where blur is 1.6.

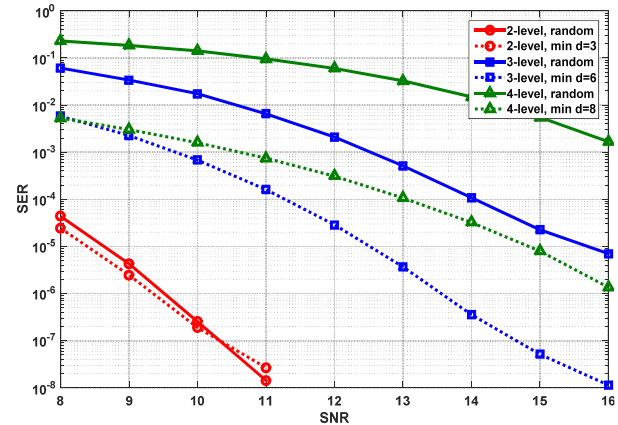


그림 5. 블러가 1.5일 때 SNR에 따른 SER 성능
Fig. 5. SER performance in accordance with SNR where blur is 1.5.

IV. 결 론

본 논문에서는 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율이 0.5bit/pixel로 고정되어 있을 때, 한 픽셀에서 표현이 가능한 레벨 수의 증가와 최소거리 d_{min} 에 따른 제안된 변조부호들에 대한 성능을 비교하였다.

레벨의 증가는 동일한 픽셀 개수에서 더 많은 코드워드를 제공할 수 있으며, d_{min} 의 증가가 가능하다. 그러나 레벨을 높게 하여 d_{min} 을 크게 한 코드워드의 성능보다 레벨을 낮게 하는 것이 더 좋은 성능을 보였다. 이는 멀티레벨의 경우 레벨이 높을수록 ISI가 더욱 심해

지며, 정확한 문턱값 검출(threshold detection)이 필요하다는 것을 의미한다.

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] 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, San Francisco, USA, November 2006.

- [3] U. Wachsmann, R. F. H. Fischer, and J.B. Huber, "Multilevel Codes: Theoretical Concepts and Practical Design Rules," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.45, pp. 1361-1391, July 1999.
- [4] J. Kim, J. Lee, T. Park and S. Im, "Expectation-maximization based adaptive threshold detection algorithm for multi-level holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.50, no. 9, pp. 09MB01, September 2011.
- [5] 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
- [6] S. Kim and J. 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
- [7] G. Kim and J. Lee, "2/3 Modulation Code and Its Viterbi Decoder for 4-level Holographic Data Storage," *J. KICS*, Vol. 38A, no. 10, pp. 827-832, October 2013
- [8] 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, no. 9, pp. 09MB02, September 2011.
- [9] D. Park and J. Lee, "k/(k+1) Tone-Controllable Codes for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, no. 9, pp. 09ME12, September 2011.
- [10] M. Keskinöz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," *Proc. SPIE*, Vol. 4090, no. 1, pp. 205-210, January 2000.
- [11] 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, 2002.
- [12] 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.

 저 자 소 개



정 성 권(학생회원)
 2015년 2월 숭실대학교 정보통신
 전자공학부 학사
 2015년 3월~현재 숭실대학교
 정보통신공학과 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>