

# 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 4-레벨 오류정정 변조부호

## I. 서론

이재훈\*, 이재진<sup>o</sup>

### 4-level Error Correcting Modulation Codes for Holographic Data Storage System

Jaehun Lee\*, Jaejin Lee<sup>o</sup>

#### 요약

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 스토리지 시스템은 픽셀당 1비트 이상을 저장할 수 있기 때문에 용량에서 큰 이점을 갖는다. 만약 부호율이 2/3인 변조부호라면 2/3(symbol/pixel)은 4/3(bit/pixel)이고, 이것은 1pixel에 약 1.3개 bit를 담을 수 있다. 본 논문에서는 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 한 픽셀이 4-레벨을 가지는 경우, 최소 유클리디안 거리가 3과 4인 변조부호를 각각 제안하였다. 제안한 변조부호는 랜덤한 경우보다 훨씬 더 좋은 성능을 보였고, 거리가 클수록, 성능이 더 좋아지는 것을 보였다.

**Key Words** : Multilevel, Holographic, Modulation Codes, Error Correction

#### ABSTRACT

Multilevel holographic data storage systems have a big advantage for capacity since it can store more than one bit per pixel. For instance, 2/3 modulation code stores 2/3(symbol/pixel) and 4/3(bit/pixel). Then it is about 1.3 bits per one pixel. In this paper, we propose two 4-level modulation codes, which have the minimum Euclidean distances of 3 and 4, respectively. The proposed codes perform better than random data. The performance of larger minimum distance code shows better than that of shorter one.

정보화 시대가 발전할수록 개인이나 기업체에서 다루는 정보의 양도 급격히 늘어나고 있으며, 이러한 많은 정보들을 디지털 데이터화 시키는 것이 강조되고 이를 위한 저장 장치의 개발이 필요하다. 이 방대한 정보들을 저장하기 위해서 CD (Compact Disc), DVD (Digital Versatile Disc), BD (Blue-ray Disc)까지 상용화가 되어 있지만, 이마저도 한계에 와서, 새로운 광기록 저장장치가 필요하다<sup>1)</sup>. 이에 따라 새로 개발되고 있는 저장 장치 중, 홀로그래픽 데이터 저장장치 (Holographic Data Storage Systems, HDSS)는 데이터를 체적 단위로 저장함으로써 기존의 저장장치들보다 더 많은 정보를 저장할 수 있기 때문에 차세대 광기록 저장장치로 주목받고 있다. HDSS는 2차원으로 데이터를 읽고 쓰기 때문에 타 저장장치 보다 빠른 처리 속도를 보인다. 하지만 이 때문에 인접 심볼간 간섭 (inter-symbol interference, ISI), 인접 페이지간 간섭 (inter-page interference, IPI)이 발생하는 단점이 있다<sup>1-4)</sup>. 이 문제를 해결하기 위해 여러 가지 2차원 변조 부호를 연구해 왔다<sup>5-10)</sup>.

멀티 레벨 홀로그래픽 데이터 저장 장치는 픽셀당 1비트 이상을 저장할 수 있다. M-Level을 갖는 홀로그래픽 데이터 저장장치라면, 한 픽셀이 나타낼 수 있는 심볼의 수는 M 가지가 되고 이것은 용량에서 큰 이점을 갖는다<sup>11,12)</sup>. G. Birr은 HDSS에 대해서 그레이 스케일 데이터 페이지를 조사하였는데, 그의 실험 결과 3-레벨 인코딩 매핑은 기존 용량보다 30% 향상된 성능을 보였고, 또한 2진 인코딩 보다 30% 향상된 데이터 전송률을 보였다<sup>12)</sup>. B. King 또한 유사한 결과를 소개하였다<sup>13)</sup>.

본 논문에서는 픽셀당 4-Level을 가지면서 한 부호가 4-픽셀로 구성된 부호 중에서, 최소 유클리디안 거리가 4 이상과 3 이상인 두 부호를 제안하였으며, 이들의 성능을 부호화 하지 않은 랜덤 데이터의 경우와 함께 성능을 비교하였다.

## II. 제안된 4-레벨 변조코드

픽셀에서 멀티 레벨은 이진 인코딩보다 노이즈 마진이 작다. 이 문제를 완화하기 위해 멀티 레벨 변조

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

• First Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, dlwogns421@naver.com, 학생회원

o Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2014-09-352, Received September 15, 2014; Revised September 23, 2014; Accepted September 23, 2014

부호는 반드시 코드워드들의 거리가 가능한 한 크게 되도록 디자인되어야 한다. 예를 들어, 4-픽셀인 두 개의 코드워드들  $x=(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 와  $y=(y_1, y_2, y_3, y_4)$  사이의 거리는 식 (1)과 같이 계산한다.

$$d = |x_1-y_1|+|x_2-y_2|+|x_3-y_3|+|x_4-y_4| \quad (1)$$

거리  $d$ 가 크다면 노이즈 마진이 증가되기 때문에 오류로부터 더 효과적일 것이다.

본 논문에서 제안하는 변조부호의 코드워드에서 각 픽셀(심볼)은 4-레벨이기 때문에 한 픽셀은 0 부터 3 중 하나의 값을 가질 수 있다. 그리고 한 코드워드는 4-픽셀로 구성되어 있기 때문에 0000부터 3333까지 총 256가지의 코드워드 패턴이 가능하다. 먼저, 이 코드워드들 중  $d \geq 4$ 라고 했을 때, 식 (1)을 만족하는 코드워드의 개수는 20개가 된다. 20개의 코드워드 중 임의의 두 개를 뽑아서 식 (1)을 적용시켜도 모두 만족을 한다. 이 코드워드 20개는  $2^4 < 20 < 2^5$  이기 때문에 표 1과 같이 20개의 코드워드 중 16개만 사용하여 각각 입력 심볼에 1:1 매핑해줄 수 있고, 코드율은  $4/4(\text{bit}/\text{pixel})$ 이 된다. 두 번째로, 256가지의 가능한 픽셀 패턴 중에서 식 (1)을 계산하였을 때,  $d \geq 3$ 을 만족하는 코드워드의 개수는 29개가 된다. 이 코드워드들 역시 임의의 두 개를 뽑아서 식 (1)을 적용시켜도 모두 만족을 한다. 또한  $2^4 < 29 < 2^5$  이기 때문에 표 1과 같이 29개의 코드워드 중 16개만 사용하여 각각 입력 심볼에 1:1매핑 해줄 수 있고, 코드율은  $4/4(\text{bit}/\text{pixel})$ 이 된다.

표 1. 4레벨 4픽셀 거리4와 거리3 이상의 코드워드 할당  
Table 1. Codeword assignment of 4level 4pixel larger than 4distance and 3distance.

입력 심볼	4L, 4P, D>=4	4L, 4P, D>=3	입력 심볼	4L, 4P, D>=4	4L, 4P, D>=3
0000	0000	0000	1000	1313	0303
0001	0013	0003	1001	1331	0310
0010	0031	0021	1010	2002	0331
0011	0202	0033	1011	2020	1110
0100	0220	0112	1100	2033	1132
0101	0233	0130	1101	2222	1221
0110	1111	0201	1110	3100	1312
0111	1300	0223	1111	3113	1333

### III. 모의 실험

실험을 위한 홀로그래픽 데이터 저장장치의 채널은 신호대잡음비(SNR)가  $10\log_{10}(1/\sigma^2)$ 가 되도록 했다. 수식으로 만든 채널을 사용하기 위해 PR타겟은 PR(131)을 사용하였다. 입력 데이터는 페이지 단위로 가로 1024, 세로 1024 픽셀의 크기로 하였고, 총 100 페이지를 실험하였다.

그림 1은 제안한 변조부호들의 성능을 보여주는 시뮬레이션 결과 그래프이다. 그림에서 보이는 ‘Random’은 부호화하지 않은 데이터를 사용하여 시스템을 통과시킨 결과이고, ‘4 level, 4 pixel, distance >= 4’는 조사하였던 20개의 코드워드 중 16개를 사용하여 매핑시킨 후에 시스템을 통과시킨 결과이며 ‘4 level, 4 pixel, distance >= 3’은 조사하였던 29개의 코드워드 중 16개를 사용하여 매핑시킨 후에 시스템을 통과시킨 결과이다.

부호화하지 않은 데이터를 사용하여 시스템을 통과시켰을 때, 성능이 좋지 않은 것을 확인할 수 있다. SNR이 18dB 이상이 되어도 모든 오류를 정정하지 못하는 반면, ‘4 level, 4 pixel, distance >= 4’의 경우, SNR이 12dB 전후로 성능이 급격히 좋아지다가 SNR이 14dB 이상이 되면서 모든 오류를 정정하는 것을 볼 수 있다. ‘4 level, 4 pixel, distance >= 3’의 경우도 마찬가지로, SNR이 12dB 전후로 성능이 급격히 좋아지면서 SNR이 15dB 이상에서 모든 오류를 정정하는 것을 볼 수 있다. 이를 통하여 거리  $d$ 가 큰 값을 갖는 변조부호일수록 성능이 더 좋은 것을 알 수 있다.

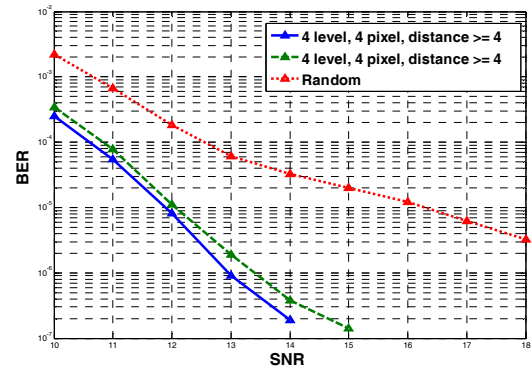


그림 1. 각 변조 방법에 따른 BER 성능  
Fig. 1. BER of each modulation scheme.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위해서 두 가지 4-레벨 4-픽셀 변조부호를 제안하였다. 제안된 부호는 최소 유클리디안 거리가 3과 4인 부호로서, 랜덤 데이터와 비교해서 BER 값이 훨씬 더 좋은 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

#### References

- [1] S. Kim, J. Kim, and J. Lee, "A simple 2/3 modulation code for multi-level holographic data storage," in *Proc. Int. Symp. Optical Memory (ISOM 2010)*, Session Tu-I-14, Oct. 2010.
- [2] D. Park and J. Lee, "Modeling of the inter-page interference on the holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 35, no. 7, pp. 581-586, Jul. 2010.
- [3] 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.
- [4] E. L. Kral, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Correlation properties of random phase diffusers for multiplex holography," *Appl. Opt.*, vol. 21, no. 7, pp. 1281-1290, Apr. 1982.
- [5] K. Park, S. Kim, J. Kim, and J. Lee, "6/9 4-ary modulation code for 4-level holographic data storage," in *Proc. Int. Symp. Optical Memory (ISOM 2010)*, Session Tu-I-21, Oct. 2010.
- [6] 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, Mar. 2009.
- [7] 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, Jan. 2002.
- [8] 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, Aug. 2010.
- [9] 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, Oct. 2013.
- [10] 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.
- [11] 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, Mar. 2009.
- [12] G. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. Hoffnagle, C. Jefferson, and M. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 15, pp. 1218-1220, Aug. 1998.
- [13] B. King, G. Burr, and M. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage," *Appl. Opt.*, vol. 42, no. 14, pp. 2546-2559, May 2003.