

# 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 1비트/픽셀 변조부호

정성권\*, 이재진°

## 1 Bit/Pixel Modulation Codes for Multi-Level Holographic Data Storage System

Seongkwon Jeong\*, Jaejin Lee°

### 요약

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 픽셀에 1비트 이상의 데이터 저장이 가능하여 한정된 공간에서 저장 밀도를 높일 수 있기 때문에 차세대 대용량 저장장치로 부각되고 있다. 한편 레벨의 증가는 동일한 픽셀개수에서 코드워드의 수를 증가시킬 수 있기 때문에 적절히 코드워드를 선택하면 변조부호의 최소거리를 증가시킬 수 있다. 최소거리의 증가는 노이즈 마진이 증가하므로 변조부호의 오류 정정 능력이 향상된다. 본 논문에서는 부호율이 1인 세 가지 변조부호를 제안하고, 이들의 최소거리에 따른 성능을 비교한다. 레벨의 증가로 코드워드간의 최소거리를 증가시켜 노이즈 마진을 증가시켰지만, 픽셀의 레벨이 증가할수록 문턱값 검출이 어렵기 때문에 낮은 레벨에 대한 변조부호가 더 좋은 성능을 보였다.

**Key Words** : Multi-level, Holographic data storage, modulation code, codeword, minimum distance

### ABSTRACT

Multi-level holographic data storage is a candidate for the next generation data storage system, since it can store more than one bit per pixel. It is possible to increase the number of codewords if the number of levels is increased, and the code with an appropriate selection of codewords can also increase the minimum distance. In this paper, we propose three multi-level modulation codes of the code rate 1 bit/pixel and compare the performance according to the minimum distance. The result shows that the code with small number of levels is better than that of large number of levels because it is hard to detect threshold value.

### 1. 서론

기존의 자기기록 방식(magnetic, HDD), 광기록 저장장치(CD, DVD) 등은 데이터의 기록 및 재생 원리가 직렬 방식으로 처리된다. 데이터를 비트 단위로 처리하기 때문에 전송률과 처리 속도에 대한 한계를 가

지고 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 홀로그래픽 데이터 저장장치(holographic data storage, HDS)는 차세대 저장장치중 하나로 주목받고 있다<sup>[1,2]</sup>. HDS는 기록 및 재생이 페이지 단위로 이루어져 하나의 페이지가 갖는 비트 수와 다중화된 홀로그램수의 곱이 저장 매질의 총 저장용량이며, 이러한 페이지 단위의 처

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

• First Author : Soongsil University School of Electronic Engineering, seongkwon@ssu.ac.kr, 학생회원

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

논문번호 : KICS2015-08-267, Received August 27, 2015; Revised September 9, 2015; Accepted September 9, 2015

리는 데이터 처리속도 및 전송률을 높여준다. 그러나 HDS는 주요한 문제점인 인접 페이지간 간섭(inter-page interference, IPI)과 2차원 인접 심볼간 간섭(inter-symbol interference, ISI)이 발생한다. IPI는 데이터가 빛의 양으로 기록되기 때문에 인접한 페이지 사이에 간섭이 발생한다. 이를 해결하기 위해 페이지 내에서 1과 0의 픽셀의 개수를 유사하게 만드는 balanced 변조 부호와 balanced 코드에 트렐리스 구조를 적용한 인코딩 방식에 제안되었다<sup>3,4</sup>. 2차원 ISI는 2차원 픽셀 이미지로 읽어 들여, 블러(blur) 효과, 즉 2차원 ISI가 발생한다. 이를 줄이기 위해서 가장 큰 심볼값이 가장 작은 심볼값 주변을 둘러싸고 있는 형태인 고립 픽셀 패턴을 없애야 하며, 주변 픽셀과의 심볼값의 차를 작게 하여야 한다. 따라서 코드내부와 코드 상호간 ISI 차를 최소화하며, 사용되어진 심볼의 분포가 균등하며, 최소 거리를 가능한 코드로 하여야 하는데, 이러한 변조부호의 설계를 위하여 이차정수계 확률론. 비터비 알고리즘이 적용된 변조부호, 고립픽셀 제거 변조부호 방식 등이 제안되고 있다<sup>5-7</sup>. 멀티레벨 HDS는 한 픽셀에 1비트 이상 저장이 가능하여 많은 데이터를 저장할 수 있다. 그러나 멀티레벨 특성에 알맞은 변조부호 및 검출방식이 필요하다<sup>8</sup>. 또한 성능 향상을 위해 고성능 문턱전압검출기가 필요하다<sup>9</sup>.

본 논문에서는 멀티레벨 HDS에서의 부호율이 1 비트/픽셀일 때, 세 가지 레벨의 새로운 변조부호를 제안하고 그들의 성능을 분석한다.

## II. 멀티레벨에서의 변조부호

### 2.1 코드워드간 최소거리

한 부호에 각각  $n$ 개의 픽셀을 가지고 있는 부호  $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ 와  $v = (v_1, v_2, \dots, v_n)$  간의 거리  $d(u, v)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$d(u, v) = \sum_{i=1}^n |u_i - v_i| \quad (1)$$

선형부호  $C$ 에서 서로 다른 부호들 간의 거리 중 가장 최소거리를  $d_{\min}$ 이라고 나타내며 다음과 같이 정의한다.

$$d_{\min} = \min\{d(u, v) | u, v \in C, u \neq v\} \quad (2)$$

$d_{\min}$ 의 증가는 부호의 노이즈 마진을 증가시켜서

오류 정정 능력이 향상된다.

### 2.2 레벨변화에 따른 코드워드의 수

한 픽셀당 가질 수 있는 심볼의 수인 레벨에 따라 코드워드의 개수가 달라진다. 예를 들어 4픽셀이 있을 때 2레벨인 경우에는 한 픽셀에 2개의 심볼을 저장한다. 따라서 가능한 코드워드는  $2^4 = 16$ 개이다. 4픽셀이 있을 때 3레벨인 경우에는 한 픽셀에 3개의 심볼을 저장한다. 따라서 가능한 코드워드는  $3^4 = 81$ 개이다. 레벨의 증가는 동일한 픽셀개수에서 코드워드의 수를 증가시킬 수 있으며, 또한 적절히 코드워드를 선택하면 변조부호의 최소거리  $d_{\min}$ 을 증가시킬 수 있다.

### 2.3 부호율이 동일한 변조부호

표 1은 5레벨이고 4개의 픽셀이  $d_{\min} \geq 5$ 일 때의 코드워드 17개를 보여준다. 4비트로 표현 가능한 가짓수인  $2^4=16$ 개를 17개 중에서 선택하여 일대일 매핑한다. 이때 부호율은 4비트를 입력받아 4개의 픽셀로 나타내므로  $4\text{bit}/4\text{pixel}=1\text{bit}/\text{pixel}$ 이다.

표 2는 4레벨이고 4개의 픽셀이  $d_{\min} \geq 4$ 일 때의 코드워드 20개를 보여준다. 4비트로 표현 가능한 가짓수인  $2^4=16$ 개를 20개 중에서 선택하여 일대일 매핑한다. 이때 부호율은 4비트를 입력받아 4개의 픽셀로 나타내므로  $4\text{bit}/4\text{pixel}=1\text{bit}/\text{pixel}$ 이다.

표 3은 3레벨이고 8개의 픽셀이  $d_{\min} \geq 3$ 일 때의 코드워드 368개를 보여준다. 8비트로 표현 가능한 가

표 1. 5레벨, 4개의 픽셀,  $d_{\min} \geq 5$ 일 때의 코드워드  
Table 1. Codeword of 5-level, 4 pixel and  $d_{\min} \geq 5$ .

Codeword			
0000	0401	2102	3342
0014	0440	2230	4004
0041	1304	2423	4010
0222	2033	3300	4144
0344			

표 2. 4레벨, 4개의 픽셀,  $d_{\min} \geq 4$ 일 때의 코드워드  
Table 2. Codeword of 5-level, 4 pixel and  $d_{\min} \geq 4$ .

Codeword			
0000	0233	2002	3113
0013	1111	2020	3131
0031	1300	2033	3302
0202	1313	2222	3320
0220	1331	3100	3333

표 3. 3레벨, 8개의 픽셀,  $d_{\min} \geq 3$ 일 때의 코드워드  
 Table 3. Codeword of 3-level, 8 pixel and  $d_{\min} \geq 3$ .

Codeword				Codeword			
0000000	01100101	02222222	11212010	00211011	02101222	11001122	20002012
00000012	01100122	10002110	11212221	00212000	02102101	11001201	20011002
00000120	01101002	10002202	11221011	00212210	02110102	11001220	20011110
00000201	01102022	10002221	11221102	00220010	02111000	11002011	20011222
00000222	01102220	10010102	11222200	00220022	02112020	11012101	20012201
00001021	01111112	10010221	12002102	00220101	02112122	11021002	20020000
00001102	01111200	10011022	12002120	00221121	02120201	11021020	20020021
00001210	01112202	10011200	12002211	00221212	02121021	11021212	20020201
00002001	01120011	10012020	12010010	00222020	02121212	11100200	20020220
00002122	01120120	10020012	12010101	01001111	02122100	11102100	20021112
00010111	01120222	10020110	12010122	01002020	02200002	11102121	20022001
00011010	01121101	10021101	12011012	01002200	02200021	11110020	20022120
00011212	01122002	10022122	12012021	01002212	02200100	11110111	20100022
00012012	01200211	10022210	12012200	01010022	02200220	11111222	20100211
00012100	01201000	10100011	12012222	01010100	02201112	11112012	20102101
00012220	01201121	10100202	12020202	01010202	02201201	11112210	20102120
00020001	01202011	10100220	12020210	01010220	02202110	11120022	20102222
00020020	01202222	10101020	12021111	01011001	02210122	11120100	20110101
00020122	01210012	10101112	12100000	01012121	02211221	11122111	20110120
00020200	01210110	10110000	12100012	01020211	02212012	11200022	20111011
00021221	01211020	10110122	12100120	01021110	02212200	11200102	20111202
00022021	01212101	10111211	12100211	01022000	02220001	11201210	20112022
00022102	01220200	10112001	12102010	01022201	02220020	11210001	20120002
00101100	01221220	10121021	12111110	01022222	02221111	11210212	20120212
00101221	01222022	10121220	12111201	01100010	02222102	11210220	20121200
00102010	01222110	10122010	12120002	20122221	21020102	21220122	22110112
00102201	02000001	10122202	12120221	20200000	21020222	21220202	22112100
00110002	02000020	10200110	12121122	20200121	21021022	21221110	22112202
00110021	02000112	10200222	12122001	20201012	21021100	21222212	22120021
00110210	02000200	10201101	12122120	20201220	21022202	22000022	22120101
00111120	02000221	10202021	12201001	20202010	21101001	22000100	22122222
00112111	02001022	10202200	12201020	20210210	21101110	22000202	22200110
00112222	02001202	10202212	12202022	20211020	21101212	22001010	22200212
00120202	02002000	10210201	12202202	20212100	21111121	22001222	22201102
00121000	02011120	10211002	12202220	20220011	21120010	22002001	22202000
00121012	02011211	10212122	12210200	20220221	21121211	22010002	22210020
00122200	02012002	10220112	12212111	20221022	21122000	22010120	22210221
00200001	02020000	10220120	12220110	20222102	21122021	22021001	22211011
00200020	02020012	10221100	12221000	21000221	21200011	22021220	22211210
00200112	02020121	10222012	12222021	21001102	21200201	22022012	22212122
00200200	02021102	10222211	20000001	21002210	21201122	22022020	22220012
00201022	02021200	11000002	20000020	21010011	21202002	22022211	22221121
00201202	02022011	11000021	20000112	21010210	21202111	22101021	22221201
00202002	02022220	11000110	20000200	21012010	21210100	22101200	22222002
00202120	02101011	11000212	20001121	21012112	21212120	22102012	22222010
00210221	02101210	11001000	20002000	21012221	21212201	22102221	22222220

깃수인  $2^8=256$ 개를 368개 중에서 선택하여 일대일 매핑한다. 이때 부호율은 8비트를 입력받아 8개의 픽셀로 나타내므로  $8\text{bit}/8\text{pixel}=1\text{bit}/\text{pixel}$ 이다.

코드워드의 선택은 변조부호가  $n$ 개의 픽셀일 때 각 픽셀이  $c_1=0, c_2=0, \dots, c_n=0$ 을 기준으로 각 코드워드간의  $d_{\min}$ 을 선택하였다. 따라서 기준을 다르게 한다면 다른 구성이 가능하다. 복조방법은 유클리디안 거리를 계산하여 최소값을 갖는 코드워드를 선택하여 복원한다.

### III. 실험

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 한 페이지는 가로 1024개, 세로 1024개의 픽셀을 가지며 20페이지를 실험하였다. 실험을 위한 PR 목표값은 PR(131)을 사용하였다. 실험과정은 입력 비트  $a[k]$ 를 무작위로 발생시킨 후 변조과정을 거친 코드워드들이 한 페이지를 구성하게 된다. 각 픽셀에 해당하는  $d[p, q]$ 는 홀로그래픽 채널을 통과하면서 부가백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN)이 추가된다. 잡음이 섞인 수신된 신호  $r[p, q]$ 는 등화기와 비터비 검출기(Viterbi detector)를 지나게 된다.

그림 1, 2, 3은 블러가 각각 1.6, 1.4, 1.0 일 때 SNR에 따른 BER(bit error rate) 성능을 보여준다. 2레벨 랜덤 데이터는 하나의 픽셀에 1비트씩 저장하므로 1bit/pixel이며, 3레벨 랜덤 데이터는 두 픽셀에 3비트씩 저장하므로 1.5bit/pixel(=3bit/2pixel)이다. 4레벨 랜덤 데이터는 하나의 픽셀에 2비트를 저장하기 때문에 2bit/pixel이며, 5레벨 랜덤 데이터는 네 개의 픽셀에 9비트씩 저장하므로 2.25bit/pixel(=9bit/4pixel)이다.

그림 1을 보면 BER이  $10^{-2}$ 일 때, 3레벨 랜덤 데이터는 3레벨 변조부호와 성능이 비슷하였으나 4레벨 변조부호는 4레벨 랜덤 데이터보다 약 2dB, 5레벨 변조부호는 5레벨 랜덤 데이터보다 약 5.2dB 성능이 우수하였다. 따라서 각 레벨의 랜덤 데이터보다 각 레벨의 변조부호가 성능 비슷하거나 더 좋았다. 그리고 부호율이 각각 1bit/pixel인 2레벨 랜덤 데이터, 3레벨 변조부호, 4레벨 변조부호, 5레벨 변조부호를 보면 레벨이 증가할수록 성능이 좋지 않은 것을 볼 수 있다.

그림 2와 3 또한 각 레벨의 랜덤 데이터 보다 각 레벨의 변조부호가 더 성능이 좋았다. 부호율이 1bit/pixel인 2레벨 랜덤 데이터, 3레벨 변조부호, 4레벨 변조부호, 5레벨 변조부호는 레벨이 올라갈수록 성

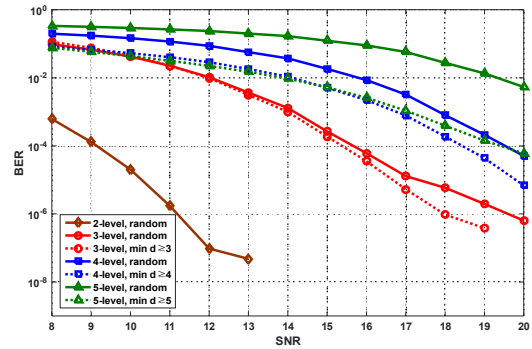


그림 1. 블러가 1.6일 때 SNR에 따른 BER 성능  
Fig. 1. BER performance in accordance with SNR where blur is 1.6

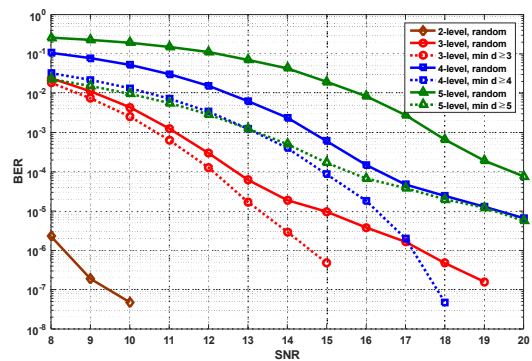


그림 2. 블러가 1.4일 때 SNR에 따른 BER 성능  
Fig. 2. BER performance in accordance with SNR where blur is 1.4

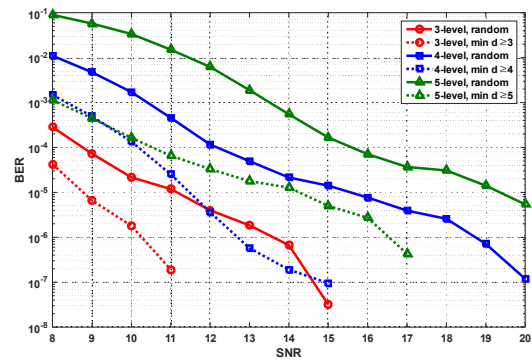


그림 3. 블러가 1.0일 때 SNR에 따른 BER 성능  
Fig. 3. BER performance in accordance with SNR where blur is 1.0

능이 안 좋아지는 것을 볼 수 있으며, 그림 3에서 2레벨 랜덤 데이터는 SNR이 7이상부터 에러를 모두 정정하므로 그래프에 나타나지 않았다.

#### IV. 결론

본 논문은 멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 레벨의 증가로 인한 최소거리  $d_{\min}$ 을 최대로 선택할 수 있는 코드워드를 이용하여 부호율은 1bit/pixel로 동일한 부호율일 때의 성능을 알아보았다. 각 레벨에 대한 변조부호를 사용하면 랜덤 데이터보다 성능이 좋아지는 것을 알 수 있다. 그러나 부호율이 같을 때 레벨을 증가시켜  $d_{\min}$ 을 큰 값을 선택하는 것보다,  $d_{\min}$ 이 작더라도 작은 레벨로 표현하는 것이 더 좋은 성능을 보였다.

#### References

[1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," in *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, 2004.

[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, 1995.

[3] B. Kim and J. Lee, "Trellis encoding of 6/8 balanced code for holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 39, no. 10, pp. 569-573. Oct. 2014.

[4] G. Kim and J. Lee, "A simple decoding scheme for a balanced 6/8 modulation Code," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 51, no. 8, pp. 08JB05, Aug. 2012.

[5] T. Park and J. Lee, "Integer programming models for the design of two-dimensional holographic storage modulation code," *J. KICS*, vol. 38A, no. 6, pp. 459-464. Jun. 2013.

[6] T. Park and J. Lee, "Cutting plane algorithm for the selection of non-isolated pixel modulation code," *J. KICS*, vol. 38A, no. 6, pp. 465-470. Jun. 2013.

[7] B. Kim and J. Lee, "2-D non-isolated pixel 6/8 modulation code," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 50, no. 7, pp. 3501404, Jul. 2014.

[8] U. Wachsmann, R. F. H. Fischer, and J. B. Huber, "Multilevel codes: Theoretical concepts and practical design rules," *IEEE Trans. Inf.*

*Theory.*, vol. 45, no. 5, pp. 1361-1391, Jul. 1999.

[9] 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, Sept. 2011.

#### 정 성 권 (Seongkwon Jeong)



2015년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학과 졸업  
2015년 3월~현재 : 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정  
<관심분야> 채널코딩, 고밀도 저장장치 시스템

#### 이 재 진 (Jaejin Lee)



1983년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업  
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 정보통신연구소 책임연구원  
1997년 3월~2005년 8월 : 동국대학교 전자공학과 부교수  
2005년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 교수  
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 정보저장시스템