

# 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 4-레벨 변조 부호의 성능 비교

박근환\*, 이재진<sup>o</sup>

## Performance of 4-level Modulation Code for Holographic Data Storage

Keunhwan Park\*, Jaejin Lee<sup>o</sup>

요 약

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 픽셀에 1비트 보다 많은 데이터를 저장할 수 있다. 본 논문에서는 부호율이  $8/6=1.33$  (bit/pixel)이고 한 픽셀이 4-레벨을 갖는 6픽셀 변조부호를 제안하고 기존에 제안된 4-레벨 6/9 변조부호, 2/3 변조부호의 성능을 비교한다. 제안된 6픽셀 변조부호는 하나의 코드워드가 6픽셀로 구성되어 있고 최소 유클리디안 거리가 3 이상인 변조부호이다. 6픽셀 변조부호는 기존에 제안된 변조부호들 보다 약 1dB 정도 성능 이득이 있었다.

**Key Words** : Holographic Storage, Modulation Code, Multi-level, 2D-ISI, Storage system

ABSTRACT

The multi-level holographic storage system can store more than one bit per pixel. In this paper, we introduce a 6-pixel 4-level modulation code and compare with 4-level 6/9 modulation code and 2/3 modulation code. The proposed 6-pixel modulation code has the minimum Euclidean distance 3. The 6-pixel modulation code is approximately 1dB better than the other modulation codes.

### I. 서 론

오늘날 데이터 사용량이 급격히 증가하면서 데이터의 효율적인 보관, 관리 및 이용을 위한 대용량 저장장치에 대한 기술이 요구되고 있다<sup>[1]</sup> 홀로그래픽 데이터 저장장치는 체적으로 데이터를 저장하기에 대용량 저장에 용이하다. 기본적인 원리를 살펴보면 신호빔과 기준빔이 매질 내에서 간섭을 일으켜 매질 내에 패턴이 형성되어 저장된다. 입력 데이터는 SLM (Spatial Light Modulator)을 통해 변조 형태의 입력 패턴이 만

들어진다. 만들어진 패턴에 레이저 빔을 조사하여 신호빔을 만든다. 이 신호빔이 여러 각도, 파장, 혹은 위상코드로 기준 빔(Reference Beam)과 간섭시켜 홀로그램 매질에 기록한다.<sup>[2]</sup> 이처럼 홀로그래픽 데이터 저장장치는 신호빔으로 데이터를 보낼 때, 데이터를 페이지 형식으로 보내기 때문에 저장 용량을 높일 수 있고, 2차원으로 데이터를 저장하므로 데이터 전송률 또한 높일 수 있다.<sup>[3]</sup> 하지만 홀로그래픽 저장장치는 기존 저장장치들과 달리 중요한 2가지 오류요인이 있다. 먼저 2차원 인접 심볼 간 간섭(Inter-symbol

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

• First Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, pkhroma@gmail.com, 학생회원

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

논문번호 : KICS2015-08-271, Received August 28, 2015; Revised September 11, 2015; Accepted September 11, 2015

Interference, ISI)이다. 기존 저장장치는 트랙을 따라 저장하여 서로 다른 트랙의 영향을 받지 않아 1차원으로 ISI가 생기지만, 홀로그래픽 저장장치는 페이지 단위로 데이터를 처리하기에 2차원 ISI가 발생한다. 다른 오류요인으로는 인접 페이지 간 간섭(Inter-page Interference, IPI)이 발생한다. 이를 보완하기 위해서는 2차원 검출기를 이용하거나 균형(Blanced) 변조 부호를 이용하여야 한다.<sup>[4,6]</sup>

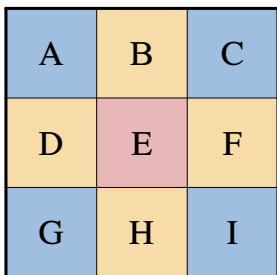
본 논문에서는 2차원 ISI를 보완하기 위해 같은 부호율 8/6=1.33 (bit/pixel)을 갖는 6/9 변조 부호 2/3 변조 부호와 제안된 6픽셀 변조부호를 알아보고 성능을 비교 분석한다.

## II. 본 론

4-레벨 변조부호는 두 비트(ex : 00, 01, 10, 11)를 하나의 심볼(ex : 0, 1, 2, 3)로 만든다. 홀로그래픽 스토리지 채널은 2차원으로 인접 심볼 간 간섭을 만들기 때문에 가장 큰 심볼과 가장 작은 심볼이 인접할 때 정정하기 어려운 오류 값이 발생할 수 있다. 6/9 변조부호와 2/3 변조부호는 가장 큰 심볼과 작은 심볼이 인접하지 않는 부호이고 본 논문에서 제안된 6픽셀  $d_{min} \geq 3$  변조부호는 오류정정 능력을 향상시키기 위한 부호로 코드워드들 간의 유클리디안 거리가 3이상 을 갖는다.

### 2.1 6/9 변조 부호

6/9 변조부호의 부호율은 12/9=1.33 (bit/pixel)이다. 그림 1은 6/9 변조부호의 코드워드 구조다. 우선 여섯 개의 입력 심볼을  $\{S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5\}$ 라 하자. 심볼  $S_0$ 로 픽셀 E를 만든다. 심볼  $S_1$ 과  $S_2$ 는 각각 B, D 픽셀과 F, H 픽셀을 만든다. 표 1은 심볼  $S_1, S_2$ 에 대한 심볼 매핑 테이블이다. A, C, G, I 픽셀로 만들 수 있는 가지 수가 총 81개 이므로 81개 중 64개를



A, C, G, I = {0, 1, 2}  
B, D, F, H = {1, 2}  
E = {0, 1, 2, 3}

그림 1. 6/9 변조 부호 코드워드 구조  
Fig. 1. Codeword structure of 6/9 modulation code

표 1. 심볼 매핑 테이블 ( $S_1$ : B, D and  $S_2$ : F, H)  
Table 1. Symbol mapping table ( $S_1$ : B, D and  $S_2$ : F, H)

$S_1$	B	D	$S_2$	F	H
0	1	1	0	1	1
1	2	1	1	2	1
2	1	2	2	1	2
3	2	2	3	2	2

표 2. 심볼 매핑 테이블 ( $S_3, S_4, S_5$ : A, C, G, I)  
Table 2. Symbol mapping table ( $S_3, S_4, S_5$ : A, C, G, I)

Input	Output	Input	Output
000	0000	200	0200
001	0001	201	0201
002	0002	202	0202
003	1002	203	1201
010	0010	210	0210
011	0011	211	0211
012	0012	212	0212
013	1012	213	1201
020	0020	220	0220
021	0021	221	0221
022	0022	222	0222
023	1022	223	1121
030	1020	230	2020
031	1021	231	2021
032	1122	232	2022
033	1222	233	2012
100	0100	300	2200
101	0101	301	2201
102	0102	302	2202
103	1102	303	2102
110	0110	310	2110
111	0111	311	2111
112	0112	312	2112
113	1112	313	2122
120	0120	320	2210
121	0121	321	2211
122	0122	322	2212
123	1212	323	2121
130	1120	330	2220
131	1221	331	2221
132	1202	332	2222
133	1211	333	1111

1:1 매핑하여 A, C, G, I를 만들어 변조한다. 표 2는 심볼  $S_3, S_4, S_5$ 의 매핑 테이블이다.<sup>[7]</sup>

### 2.2 2/3 변조부호

2/3 변조부호의 부호율은 4/3 = 1.33 (bit/pixel)이

다. 2/3 변조부호는 3x1배열로 홀수 줄과 짝수 줄로 나눠 변조한다. 그림 2는 2/3 변조부호 구조이다. 짝수 줄은 홀수 줄의 픽셀 A와 C를 바꿔 변조하므로써 심볼 0과 3이 인접하지 않는 변조부호를 만들 수 있다. 표 3은 총 16개의 입력 심볼과 픽셀 A, B, C에서 만들 수 있는 총 18개 중 16개를 매핑한 테이블이다.<sup>[1]</sup>

2.3 6픽셀  $d_{min} \geq 3$  변조부호

멀티레벨 홀로그래픽 채널은 이진 부호에 비해 잡음 여유폭(Noise Margin)이 작다.<sup>[8]</sup> 멀티레벨 변조부호는 코드워드간의 거리를 크게 설계하여 이 문제를 완화 할 수 있다. 거리를 계산하기 위해 변조된 코드워드들의 각 픽셀 간의 차를 구하면 된다. 예를 들어, n개의 픽셀 수를 갖는 코드워드 x와 y가 있다고 하자. 이들의 거리 식은 (1)과 같다.

$$d = \sum_{i=1}^n |x_i - y_i| \tag{1}$$

픽셀의 개수 및 레벨의 수에 따라 가질 수 있는 코드워드의 개수는 다르다. 레벨 및 픽셀의 수가 증가하면 코드워드의 개수를 증가시킬 수 있다. 코드워드 개수를 증가시켜 코드워드 간의 적절한 조합을 통해 최소 유클리디안 거리를 증가 시켜 오류정정 능력을 향상시킬 수 있다.

제안된 변조부호는 4-레벨 6픽셀이고 최소거리가 3이상인 코드워드들을 갖는다. 입력 8비트를 받아 6픽셀을 가진 코드워드를 만들면 부호율은 8/6=1.33 (bit/pixel)이다. 제안된 코드워드들은 모든 가능한 코드워드를 발생시켜 다른 코드워드들과 유클리안 거리를 비교 후 거리가 최소 3 이상이면 저장하는 방식으로 생성하였다. 이를 만족하는 코드워드들의 개수는 총 281개이다.<sup>[8]</sup> 입력비트가 8비트이므로  $2^8 = 256$ 개를 순차적으로 선택하여 변조부호를 만들었다. 표 4는 6픽셀이고  $d_{min}$ 이 3 이상인 부호의 심볼 매핑 테이블이다. 복조 방식은 ML (Maximum Likelihood) Decoding 방식으로 채널을 통과하여 나온 코드워드와 표 4의 각각의 output 코드워드들의 심볼 간의 거리를 모두 구한 후 가장 작은 거리의 값을 가진 코드워드로 복조한다.

III. 실험

홀로그래픽 채널은 CCD(charge-coupled detector)

배열을 통해 출력 데이터를 만든다.<sup>[9,10]</sup>

신호의 퍼짐 정도를 모델링 하기 위해 입력 페이지에서 (x, y)위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.

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

여기서  $\sigma$ 는 분산된 신호의 퍼짐 정도를 나타내는 블러(Blur)를 의미하며, 블러(Blur)가 커지면 2차원 ISI가 증가한다.

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

배열을 통해 출력된 데이터가 제대로 된 위치에 있지 못하게 된 상태를 어긋남이라한다. 이 어긋남은 데이터의 신호 품질에 영향을 미친다.<sup>[9]</sup> x축의 어긋남을  $m_x$ 라하고 y축의 어긋남  $m_y$ 로 정의한 연속적인

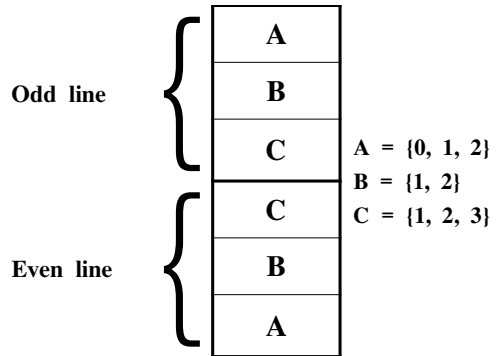


그림 2. 2/3 변조부호 코드워드 구조  
Fig. 2. Codeword structure of 2/3 modulation code

표 3. 2/3 변조부호 심볼 매핑 테이블  
Table 3. Symbol mapping table of 2/3 modulation code

Input	Output	Input	Output
00	011	20	113
01	012	21	121
02	013	22	122
03	021	23	123
10	022	30	211
11	023	31	212
12	111	32	213
13	112	33	221

표 4. 6 pixel  $d_{min} \geq 3$  변조 부호 심볼 매핑 테이블  
 Table 4. Symbol mapping table of 6 pixel  $d_{min} \geq 3$  modulation code

Input	Output	Input	Output	Input	Output	Input	Output
0	000000	64	023232	128	122213	192	221312
1	000003	65	023300	129	123032	193	221333
2	000021	66	030102	130	123102	194	222030
3	000033	67	030110	131	123210	195	222202
4	000112	68	030123	132	123312	196	222320
5	000130	69	030221	133	123333	197	223122
6	000201	70	030330	134	130011	198	223231
7	000223	71	031000	135	130030	199	223301
8	000303	72	031003	136	130201	200	230022
9	000310	73	031021	137	130232	201	230120
10	000331	74	031033	138	130310	202	230203
11	001110	75	031301	139	131113	203	230322
12	001132	76	031313	140	131220	204	231001
13	001221	77	031332	141	132020	205	231211
14	001312	78	032122	142	132133	206	231330
15	001333	79	032130	143	132200	207	232013
16	002001	80	032310	144	132231	208	232032
17	002013	81	033001	145	132302	209	232110
18	002020	82	033023	146	133003	210	232222
19	002200	83	033110	147	200001	211	232313
20	002203	84	033202	148	200013	212	233000
21	002230	85	033221	149	200020	213	233021
22	003022	86	033323	150	200032	214	233130
23	003102	87	033330	151	200200	215	233310
24	003131	88	100322	152	200203	216	233332
25	003211	89	101011	153	200221	217	300102
26	003223	90	101102	154	200233	218	300110
27	003320	91	101123	155	200330	219	300123
28	003332	92	101301	156	201130	220	300131
29	010220	93	101320	157	201313	221	300301
30	010232	94	102031	158	201332	222	301012
31	011002	95	102212	159	202000	223	301211
32	011023	96	102233	160	202003	224	302020
33	011030	97	102331	161	202022	225	302033
34	011213	98	103010	162	202111	226	302113
35	011300	99	103033	163	202220	227	302200
36	011330	100	103113	164	202302	228	302222
37	012032	101	103300	165	203030	229	302333
38	012111	102	103303	166	203132	230	303002
39	012222	103	110010	167	203311	231	303121
40	012302	104	110022	168	203323	232	310011
41	013000	105	110101	169	203330	233	310030
42	013003	106	110113	170	210310	234	310212
43	013120	107	110131	171	211021	235	310220
44	013133	108	110302	172	211033	236	310303
45	013313	109	110333	173	211103	237	310332
46	020001	110	111120	174	211222	238	311000
47	020013	111	111211	175	212123	239	311231
48	020020	112	112012	176	212131	240	311300
49	020032	113	112100	177	213001	241	311323
50	020200	114	112310	178	213013	242	312101
51	020203	115	112323	179	213110	243	312311
52	020311	116	113021	180	213203	244	312330
53	020323	117	113201	181	213233	245	313022
54	021112	118	113230	182	220000	246	313130
55	021131	119	113321	183	220003	247	313212
56	021233	120	120133	184	220031	248	313332
57	022010	121	120212	185	220111	249	320023
58	022103	122	120230	186	220223	250	321020
59	022201	123	121303	187	220301	251	321102
60	022220	124	121321	188	220331	252	321213
61	022331	125	122001	189	221012	253	322003
62	023012	126	122023	190	221132	254	322011
63	023030	127	122121	191	221200	255	322133

PSF는 다음과 같다.

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

실험은 한 페이지당 1024x1024의 크기로 1000 페이지를 하였다. 신호대 잡음비(SNR)는 다음과 같이 정의 하였다.

$$\text{SNR} = 10 \log\left(\frac{1}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

또한 성능을 향상시키기 위하여 PRML (the partial response maximum likelihood) 시스템을 HDSS에 적용하였다. 등화기는 유한 임펄스 응답에 의한 5x5 계수를 구현하였다. 먼저 입력 데이터를 무작위로 생성한다. 그 후 변조기를 통하여 데이터 변조 홀로그래프 채널을 통과하고 부가 백색 가우시안 잡음(AWGN)이 추가된다. 잡음이 섞인 데이터는 등화기와 비터비 검출

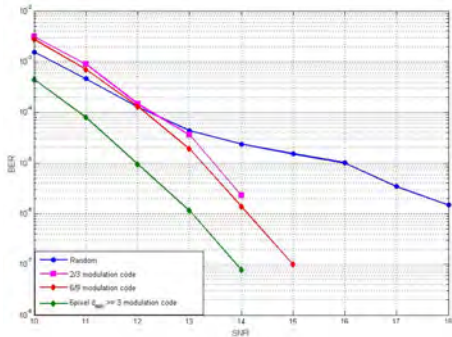


그림 3. Blur = 1.0 일 때 BER 비교 그래프  
Fig. 3. Comparison of the bit error rate at blur = 1.0

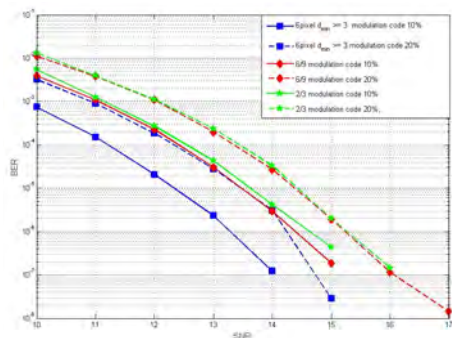


그림 4. Blur = 1.0 일 때 BER 대비 어긋남 비교 그래프  
Fig. 4. Comparison of the bit error rate in terms of misalignment at blur = 1.0

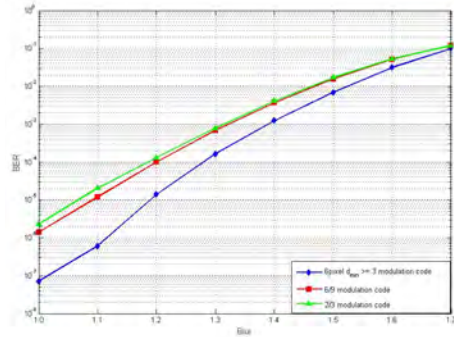


그림 5. BER 대비 블러 비교 그래프  
Fig. 5. BER comparison according to blur

기 (Viterbi dedector)를 지나 복조 (demodulator)된다.

그림 3은 각 변조부호의 SNR 대비 BER(Bit Error Rate) 성능 결과이다. 임의의 데이터보다는 모든 변조부호들이 좋은 성능을 보였다. 특히 제안된 6 pixel  $d_{min} \geq 3$  변조부호가 2/3, 6/9 변조부호보다 약 1dB 정도 좋은 성능을 보인다. 그림 4는 페이지의 어긋남이 존재할 때 성능을 비교하였다. 이 또한 6 pixel  $d_{min} \geq 3$ 인 변조부호가 다른 변조부호들 보다 약 1dB 정도 좋은 성능을 보였다. 그림 5는 블러의 변화에 따른 BER 성능을 나타내는 그래프이다. 블러값이 커질수록 2D ISI가 증가한다. 비교된 변조부호들 중 제안된 6 pixel  $d_{min} \geq 3$  변조부호가 가장 좋은 성능을 보였다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율이 1.33비트/픽셀인 6픽셀  $d_{min} \geq 3$  변조부호를 제안하였고, 제안된 부호와 부호율이 같은 4-레벨 2/3, 6/9 변조부호들과 성능을 비교하였다. 모든 변조부호들이 랜덤 데이터 보다 좋은 성능을 보였으나, 특히 제안된 6 픽셀  $d_{min} \geq 3$  변조부호는 2/3, 6/9 변조부호들 보다 약 1dB 정도 더 좋은 성능을 보였다.

#### References

- [1] 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, Apr. 2013.
- [2] J. Kim and J. Lee, "Performance of two-dimensional soft output viterbi algorithm for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 37A,

no. 10, pp. 815-820, Oct. 2012.

[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] N. Kim and J. Lee, "Two - dimensional codes for holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 31, no. 11, pp. 1037-1043, Nov. 2006.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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, Apr. 2013.

[8] J. Lee and J. Lee, "4-level error correcting modulation codes for holographic data storage system," *J. KICS*, vol. 39A, no. 10, pp. 610-612, Sept. 2014.

[9] 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.

[10] J. Kim and J. Lee, "Iterative two - dimensional soft output Viterbi algorithm for patterned media," *IEEE, Trans. Magn.*, vol. 47, no. 3, pp. 594-597, Mar. 2011.

**박 근 환 (Keunhwan Park)**



2013년 2월 : 정보통신전자공학부 학사  
 2014년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신공학과 석사 재학 중  
 <관심분야> 스토리지 시스템, 오류정정부호, 채널코딩

**이 재 진 (Jaemin 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