

논문 2015-52-10-2

홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율 1/2인 이진 변조부호의 최소거리에 따른 성능 분석

(Performance of the Code Rate 1/2 Modulation Codes According to Minimum Distance on the Holographic Data Storage)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[Ⓢ])

요 약

본 논문은 홀로그래픽 저장장치에서 부호율이 1/2이면서 최소거리가 다른 세 종류의 이진 변조부호를 제안하고, 이 때 최소 거리의 변화에 따른 변조부호의 성능 차이에 대해서 알아본다. 밀도의 정도를 나타내는 블러와 읽기에서 픽셀의 어긋남에 따른 변조부호의 성능을 조사하였다. 최소거리의 증가는 변조기와 복조기의 복잡도를 증가시키는 단점이 있지만, 부호간의 최소 거리를 증가시키면 변조부호가 스스로 오류정정 능력을 향상시키게 되면서 블러와 어긋남에 대해서도 좋은 성능을 보여준다.

Abstract

In this paper, we introduce three modulation codes of the code rate 1/2 with different minimum distances, respectively, and investigate the performance of the codes according to the minimum distance. We simulate the codes in accordance with blur and misalignment. As the minimum distance increases, the complexity of encoder and decoder also grows. However, it can improve the error correcting capability and shows good performance with blur and misalignment.

Keywords : holographic data storage, minimum distance, modulation code

I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장장치(Holographic Data Storage, HDS)는 미디어의 체적에 페이지 단위로 기록과 재생을 하는 광기록 저장장치이다. 다른 기록장치와는 다르게 체적에 기록하기 때문에 저장용량을 증가시

킬 수 있으며, 페이지 단위로 정보를 처리하기 때문에 데이터 처리 속도 및 전송률이 매우 높아서 차세대 저장장치 후보로 거론되고 있다^[1]. 이러한 장점에도 불구하고 홀로그래픽 데이터 저장장치는 여러 단점을 가지고 있다. 홀로그래픽 데이터 저장장치는 여러 페이지를 같은 공간에 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭(Inter-page Interference, IPI)가 발생한다^[2]. 또한 기존에는 라인 단위로 정보를 저장하고 읽기 때문에 1차원적인 인접 심볼간 간섭(Inter-symbol interference, ISI)가 발생한다면, 홀로그래픽 데이터 저장장치는 CCD(charge-coupled devices)를 통해 페이지 단위로 읽기 때문에 2차원 ISI가 발생한다^[3]. 이는 앞과 뒤의 데이터 뿐만 아니라 위와 아래의 데이터를 고려해야 한다. 이

* 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

를 해결하기 위해 OFF 픽셀 주변을 ON 픽셀이 둘러싸지 않도록 혹은 ON 픽셀 주변에 OFF 픽셀이 둘러싸지 않도록 하는 고립픽셀 변조코드 등 다양한 변조코드 및 신호처리 기법이 제안되고 있다^[4~12].

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율은 같지만 최소거리가 다른 세 가지 이진 변조부호를 제안하고 그들의 성능을 알아본다. 제안된 변조부호들의 비교는 (1) 기록밀도와 관련이 되는 블러(blur)의 변화와 (2) 읽기 과정에서 발생하는 어긋남이 발생하였을 때를 기준으로 성능을 알아본다.

II. 거리에 따른 변조부호

변조부호의 중요한 조건중의 하나는 BER을 줄이는 것이다. 따라서 임의적으로 코드워드를 선택하는 것 보다, 코드워드간의 거리차가 큰 코드워드들을 선택하면 오류 정정 능력을 높일 수 있다.

코드워드 U를 $U=(u_1, u_2, \dots, u_k)$ 로 정의하고, 각 픽셀은 1비트를 갖는다. 두 개의 코드워드 U와 \hat{U} 사이의 거리 d는 다음과 같이 정의한다.

$$d(U, \hat{U}) = \sum_{i=1}^k |u_i - \hat{u}_i| \quad (1)$$

여기서 k는 픽셀의 수이다. 모든 코드워드들간에 거리차들 중에서 가장 작은 d값을 d_{min} 이라고 정의하면, d_{min} 이 클수록 성능을 향상시킬 수 있다.

3/6 변조부호는 3개의 비트를 입력받아 6비트로 표현

표 1. $d_{min}=3$ 일 때의 3/6 변조부호의 코드워드

Table 1. Codeword of 3/6 modulation code of $d_{min}=3$.

input	codeword	input	codeword
0	000000	4	101010
1	000111	5	101101
2	011001	6	110011
3	011110	7	110100

표 2. $d_{min}=4$ 일 때의 4/8 변조부호의 코드워드

Table 2. Codeword of 4/8 modulation code of $d_{min}=4$.

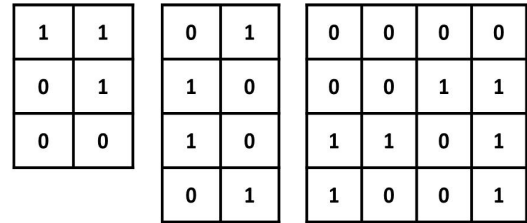
input	codeword	input	codeword
0	00000000	8	10010100
1	00001111	9	10011001
2	00110011	10	10100101
3	00111100	11	10101010
4	01010101	12	11000011
5	01011010	13	11001100
6	01100110	14	11110000
7	01101001	15	11111111

표 3. $d_{min}=5$ 일 때의 8/16 변조부호의 코드워드

Table 3. Codeword of 8/16 modulation code with $d_{min}=5$.

input	codewords	input	codewords
0	0000000000000000	64	0100100100101011
1	0000000000011111	65	0100100100111010
2	0000000011100011	66	0100100111001000
3	0000000011111100	67	0100100111010111
4	0000001100100101	68	0100101000001110
5	0000001100111010	69	0100101000010001
6	0000001111000110	70	0100101011101101
7	0000001111011001	71	0100101011110010
8	0000010101001010	72	0100110001100001
9	0000010101010101	73	0100110001111110
10	0000010110101001	74	0100110010000010
11	0000010110110110	75	0100110010011101
12	0000011001101111	76	0100111101000100
13	0000011001110000	77	0100111101011011
14	0000011010001100	78	0100111110100111
15	0000011010010011	79	0100111110111000
16	0001100000100110	80	0101000100001101
17	0001100000111001	81	0101000100010010
18	0001100011000101	82	0101000111101110
19	0001100011011010	83	0101000111100001
20	0001101100000011	84	0101001000101000
21	0001101100001110	85	0101001000110111
22	0001101111100000	86	0101001011001011
23	0001101111111111	87	0101001011010100
24	0001110101101100	88	0101010001000111
25	0001110101110011	89	0101010001011000
26	0001110110001111	90	0101010010100100
27	0001110110010000	91	0101010010111011
28	0001111001001001	92	0101011101100010
29	0001111001010110	93	0101011101111101
30	0001111010101010	94	0101011110000001
31	0001111010110101	95	0101011110011110
32	0010100001001011	96	0110000101100000
33	0010100001010100	97	0110000101111111
34	0010100010101000	98	0110000110000011
35	0010100010110111	99	0110000110011100
36	0010101101101110	100	0110001001000101
37	0010101101110001	101	0110001001010101
38	0010101110001101	102	0110001010100110
39	0010101110010010	103	0110001010111001
40	0010110100000001	104	0110010000101010
41	0010110100001110	105	0110010000110101
42	0010110111100010	106	0110010011001001
43	0010110111111101	107	0110010011010110
44	0010111000100100	108	0110011100001111
45	0010111000111011	109	0110011100010000
46	0010111011000111	110	0110011111101100
47	0010111011011000	111	0110011111110011
48	0011000001101101	112	0111100101000110
49	0011000001110010	113	0111100101011001
50	0011000010001110	114	0111100110100101
51	0011000010010001	115	0111100110111010
52	0011001101001000	116	0111101001100011
53	0011001101010111	117	0111101001111100
54	0011001110101011	118	0111101010000000
55	0011001110110100	119	0111101010011111
56	0011010100100111	120	0111110000001100
57	0011010100111000	121	0111110000010011
58	0011010111000100	122	0111110011101111
59	0011010111011011	123	0111110011110000
60	0011011000000010	124	0111111001010001
61	0011011000011101	125	0111111100110110
62	0011011011100001	126	0111111110010101
63	0011011011111110	127	0111111111010101

input	codewords	input	codewords
128	1000100101001100	192	1100000001100110
129	1000100101010010	193	1100000001111000
130	1000100110101110	194	1100000010000100
131	1000100110110000	195	1100000010011010
132	1000101001101000	196	1100001101000010
133	1000101001110110	197	1100001101011100
134	1000101010001010	198	1100001110100000
135	1000101010010100	199	1100001110111110
136	1000110000000110	200	1100010100101100
137	1000110000011000	201	1100010100110010
138	1000110011100100	202	1100010111001110
139	1000110011111010	203	1100010111010000
140	1000111100100010	204	1100011000001000
141	1000111100111100	205	1100011000010110
142	1000111111000000	206	1100011011101010
143	1000111111011110	207	1100011011110100
144	1001000101101010	208	1101100001000000
145	1001000101110100	209	1101100001011110
146	1001000110001000	210	1101100010100010
147	1001000110010110	211	1101100010111100
148	1001001001001110	212	1101101101100100
149	1001001001010000	213	1101101101111010
150	1001001010101100	214	1101101110000110
151	1001001010110010	215	1101101110011000
152	1001010000100000	216	1101110100001010
153	1001010000111110	217	1101110100010100
154	1001010011000010	218	1101110111101000
155	1001010011011100	219	1101110111110110
156	1001011100000100	220	1101111000101110
157	1001011100011010	221	1101111000110000
158	1001011111100110	222	1101111011001100
159	1001011111110000	223	1101111011010010
160	1010000100000110	224	1110100000101100
161	1010000100011000	225	1110100000110010
162	1010000111100100	226	1110100011001110
163	1010000111111010	227	1110100011010000
164	1010001000100010	228	1110101100001000
165	1010001000111100	229	1110101100010110
166	1010001011000000	230	1110101111101010
167	1010001011011110	231	1110101111110100
168	1010010001001100	232	1110110101100110
169	1010010001010010	233	1110110101111000
170	1010010010101110	234	1110110110000100
171	1010010010110000	235	1110110110011010
172	1010011101101000	236	1110111001000010
173	1010011101110110	237	1110111001011100
174	1010011110001010	238	1110111010100000
175	1010011110010100	239	1110111010111110
176	1011100100100000	240	1111000000010100
177	1011100100111110	241	1111000000101000
178	1011100111000010	242	1111000011101000
179	1011100111011100	243	1111000011110110
180	1011101000000100	244	1111001100101110
181	1011101000011010	245	1111001100110000
182	1011101011100110	246	1111001111001100
183	1011101011111000	247	1111001111010010
184	1011110001101010	248	1111010101000000
185	1011110001110100	249	1111010101011110
186	1011110010001000	250	1111010110100010
187	1011110010010110	251	1111010110111100
188	1011111010011110	252	1111011001100100
189	1011111010100000	253	1111011001111010
190	1011111101011000	254	1111011010000110
191	1011111101100100	255	1111011010011000



(a) (b) (c)

그림 1. (a) 3/6, (b) 4/8, (c) 8/16 변조부호의 예제
Fig. 1. Example of (a) 3/6, (b) 4/8 and (c) 8/16 modulation code.

할 수 있는 64개의 코드워드 중에서 $d_{\min} \geq 3$ 인 코드워드 8개를 선택하여 코드워드로 내보내며, 표 1은 3/6 변조부호의 심볼 매핑을 보여준다. 4/8 변조부호는 4개의 비트를 입력받아 8비트로 표현할 수 있는 256개의 코드워드 중에서 $d_{\min} \geq 4$ 인 코드워드 16개를 선택하여 코드워드로 내보내며, 표 2는 4/8 변조부호의 심볼 매핑을 보여준다. 8/16 변조부호는 8개의 비트를 입력받아 16비트로 표현할 수 있는 2^{16} 개의 코드워드 중에서 $d_{\min} \geq 5$ 인 코드워드 256개를 선택하여 코드워드로 내보내며, 표 3은 8/16 변조부호의 심볼 매핑을 보여준다.

홀로그래픽 데이터 저장장치는 2차원 형태로 저장하므로 코드워드의 형태는 다양할 수 있다. 본 논문은 3/6 변조부호는 3×2 행렬, 4/8 변조부호는 4×2 행렬, 8/16 변조부호는 4×4 행렬의 코드워드 모양을 선택하였다. 예를 들어 입력 값이 7이면 각각의 변조부호는 그림 1과 같이 표현된다.

III. 실험

1. 홀로그래픽 채널 모델

홀로그래픽 데이터 저장장치의 채널 모델은 CCD 배열을 통하여 입력을 출력 데이터로 만든다^[13]. 입력페이지에서 (x, y) 위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.

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

여기서 σ 는 분산된 신호의 희미한 정도인 블러를 의미하며, m_x 는 x 축의 어긋남, m_y 는 y 축의 어긋남을 의미한다.

2. 실험 결과 비교

실험은 한 페이지의 크기가 1024×1024 픽셀일 때, 1000페이지를 실험하였으며, 신호대잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 위해 적용된 잡음은 부가백색가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN)을 사용하였다.

그림 2는 d_{min} 에 따른 BER 성능을 보여준다. BER이 10^{-5} 일 때 성능을 비교하면, d_{min} 이 5일 때, 랜덤 데이터보다 약 5.5dB, $d_{min}=3, 4$ 보다 약 2.2dB 성능이 좋아짐을 알 수 있다. d_{min} 이 3과 4일 때는 SNR이 18dB 이하에서는 비슷한 성능을 보인다. 이러한 이유는 3/6 변조부호는 코드워드들간의 거리가 3 이상인 것들이 많지만, 4/8 변조부호는 코드워드들간의 거리가 4이상인 것들이 많지 않았다. 또한 $d_{min}=4$ 일 때 페이지 내에서 그림 3과 같이 고립픽셀 패턴이 많이 생겼으며, 이는 2차원 ISI 문제를 발생시킨다. 그러나 18dB 이상부터는 $d_{min}=4$ 는 모든 에러를 정정한다.

그림 4는 어긋남에 따른 BER 성능을 보여준다. 어긋

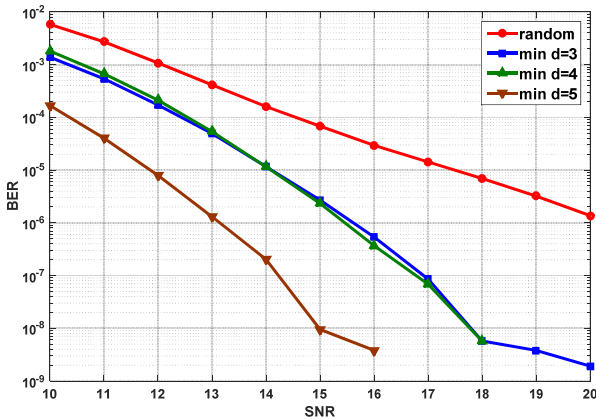


그림 2. d_{min} 에 따른 BER 성능
Fig. 2. BER performance according to d_{min} .

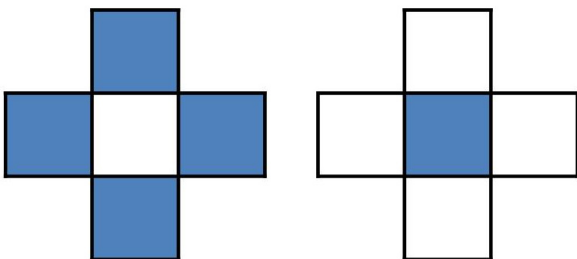


그림 3. d_{min} 에 따른 BER 성능
Fig. 3. BER performance according to d_{min} .

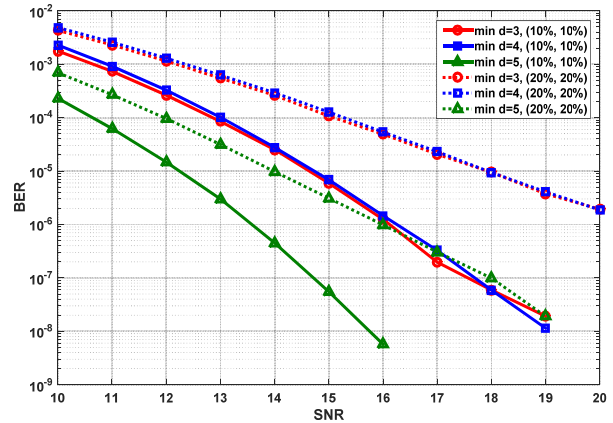


그림 4. 어긋남에 따른 BER 성능
Fig. 4. BER performance according to misalignment.

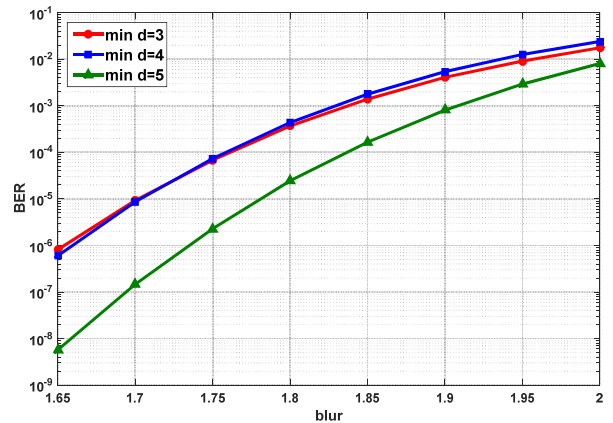


그림 5. blur에 따른 BER 성능
Fig. 5. BER performance in accordance with blur.

남이 x 축 y 축으로 각각 10%씩 발생하였을 때 BER이 10^{-6} 에서 성능을 비교하면 $d_{min}=5$ 가 $d_{min}=3$ 과 4 보다 약 2.4dB 성능이 좋았으며, x 축 y 축으로 각각 20%씩 발생하였을 때 BER이 10^{-5} 에서 성능을 비교하면 $d_{min}=5$ 가 $d_{min}=3$ 과 4 보다 약 4dB 성능이 우수했다. 이는 어긋남이 발생하여도 d_{min} 이 크다면 오류 정정 능력이 좋음을 알 수 있다.

그림 5는 블러의 변화에 대한 BER 성능을 보여준다. 블러가 커질수록 성능은 악화되지만 d_{min} 이 클수록 성능이 좋음을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부호율은 같지만 d_{min} 에 따른 BER 성능을 조사하였다.

d_{min} 의 증가는 더 좋은 성능을 보일 것이라 생각하였지만 $d_{min}=4$ 일 때의 홀로그래픽 데이터 저장장치의 단점인 고립픽셀 패턴에 의한 2차원 ISI가 발생하여 성능이 $d_{min}=3$ 일 때와 비슷함을 볼 수 있다. 그러나 $d_{min}=5$ 인 경우에는 성능은 좋아지나 변조기, 복조기의 복잡도가 높아질 뿐만 아니라 연산속도가 느려진다. 따라서 시스템 설계자는 각 변조코드의 장단점을 파악 후 상황에 맞는 코드를 이용해야 할 것이다.

REFERENCES

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, Vol.92, pp.1231-1280, August 2004.
- [2] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," *Proc. SPIE*, Vol. 4342, no.393, pp. 393-400, January 2002.
- [3] 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, No.20, pp. 4374-4386, July 1999.
- [4] B. Kim and J. Lee, "2-D Non-Isolated Pixel 6/8 Modulation Code," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 50, no. 7, pp. 3501404, July 2014
- [5] 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.
- [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, March 2009.
- [7] J. Kim and J. Lee, "Partial response maximum likelihood detections using two-dimensional equalizer for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.48, no.3, 03A033, 2009.
- [8] D. Park and J. Lee, "Soft-Decoding Algorithm of 3/4 Tone-Controllable Code with Low-Density Parity Check Code for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 50, pp. 09ME11, September 2011.
- [9] J. Kim and J. Lee, "Modified Two-Dimensional Soft Output Viterbi Algorithm for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, no. 8, pp. 08KB03, August 2010.
- [10] J. Kim and J. Lee, "Simplified Decoding of Trellis-Based Error-Correcting Modulation Codes Using the M-Algorithm for Holographic Data Storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 51, pp. 08JD02, August 2012
- [11] 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.
- [12] D. Park, M. Yoo, and J. Lee, "Tone-Controllable Codes for Holographic Data Storage System," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, no. 8, , pp. 08KB05, August 2010.
- [13] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," *Proc. SPIE*, Vol.4090, pp. 205-210, May 2000.

저자 소개



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



이재진(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 52권 6호 참조