

논문 2017-54-6-2

홀로그래픽 데이터 저장장치에서 트렐리스 인코딩을 이용한 4-레벨 4/6 변조부호

(4-Level 4/6 Modulation Code with Trellis Encoding
on Holographic Data Storage)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[©])

요 약

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 성능을 저하시키는 요소인 2차원 인접 심볼간 간섭을 피하기 위해 변조부호가 요구된다. 변조부호는 주변의 가장 큰 심볼과 가장 작은 심볼에 의해 발생하는 심각한 ISI 패턴을 제거할 수 있다. 본 논문에서는 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 4/6 변조부호를 제안하며 또한 트렐리스 인코딩 방식을 이용하여 오류정정능력을 갖는 변조부호를 제안한다. 제안하는 4/6 변조부호는 가장 작은 심볼인 '0'과 가장 큰 심볼인 '3'이 어느 방향에서도 인접하지 않도록 한다. 또한 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 같은 코드율을 갖는 변조부호들과 성능 비교를 한다.

Abstract

Multi-level holographic data storage requires modulation codes for avoiding two dimensional inter-symbol interference (2D-ISI). Modulation codes can remove the fatal ISI pattern of neighboring the largest and the smallest symbols. In this paper, we propose a 4-level 4/6 modulation code and its trellis encoding for error correction. The proposed 4/6 modulation code prevents that the symbol 0 and 3 are not adjacent in any direction. Also, we compare the proposed modulation code with the same code rate modulation codes for four-level holographic data storage.

Keywords : holographic data storage, multi-level, modulation code, trellis encoding

I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장장치(holographic data storage, HDS)는 홀로그래픽 체적에 페이지 단위로 저장 및 읽기를 하는 광 저장장치이다. 따라서 기존의 표면에 데이터를 기록하는 CD, DVD, Blu-ray 등의 광 저장장치,

하드디스크(hard disk, HDD)와는 다르게 여러 페이지를 겹쳐서 저장하기 때문에 향상된 저장 용량을 제공할 수 있다. 이러한 이유로 인터넷의 발전과 증가하는 데이터들을 저장하기 위한 차세대 저장장치로서 주목받고 있다^[1]. 하지만 데이터를 2차원 단위로 저장하기 때문에 기존의 저장장치에서 발생하는 1차원적인 인접 심볼간 간섭(intersymbol interference, ISI)이 아닌 2차원 ISI가 발생하며 하나의 체적에 페이지 단위로 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭(interpage interference, IPI)가 발생한다^[2-3]. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해 다양한 오류정정부호 및 변조부호가 제안되고 있다^[4-6]. 멀티레벨 HDS는 하나의 픽셀이 1bit 이상의 데이터를 저장할 수 있다^[7-8]. 예를 들어 4-레벨 HDS에서는 하나의 픽셀이 표현할 수 있는 심볼은 4가지이기 때문에 하나의 픽셀에 2bit를 저장할 수 있다. 즉, 저장용량을 급격하게

* 학생회원, 숭실대학교 정보통신소재융합학과
(Department of ICMC convergence technology, Soongsil University)

** 정회원, 숭실대학교 전자정보공학부 (School of Electronics Engineering, Soongsil University)

© Corresponding Author (E-mail : zlee@ssu.ac.kr)

※ 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF-2016R1A2B4011270)

Received : March 13, 2017 Revised : March 15, 2017

Accepted : May 15, 2017

증가시킬 수 있다. 하지만 4-레벨로 저장할 경우에는 블러(blur) 현상이 심해지기 때문에 멀티레벨에서 발생하는 2차원 ISI를 줄이기 위한 변조부호가 필요하며 이를 위한 연구가 발표되고 있다^[9-11].

본 논문에서는 4-레벨 HDS에서 트렐리스 인코딩을 이용한 4/6 변조부호 방식을 제안한다. 제안하는 변조 코드는 그림 1과 같이 4-레벨 HDS 시스템에서 심각한 ISI를 발생시키는 상황인 가장 큰 심볼인 '3'과 가장 작은 심볼인 '0'이 인접하지 않도록 하여 2차원 ISI 간섭을 줄인다. 또한 트렐리스 구조를 이용하여 오류정정능력을 갖는 변조부호를 제안한다. 변조 부호에 트렐리스 구조를 사용하여 부호화 한다면 부호 이득을 얻을 수 있는 변조부호를 만들 수 있다. 이는 기존의 변조부호보다 성능을 향상시킬 수 있다.

II. 4-레벨 4/6 변조부호

4-레벨 HDS는 하나의 픽셀이 표현할 수 있는 심볼의 개수가 4개이므로 하나의 픽셀당 2비트를 저장할 수 있다. 2비트 (00, 01, 10, 11)가 발생하면 하나의 심볼(0, 1, 2, 3)으로 표현한다. 그림 2는 제안하는 변조부호의 코드워드 구조를 보여준다. 8비트가 발생하면, 즉 4개의 입력심볼(i_0, i_1, i_2, i_3)이 발생하면 4개의 입력심볼은 3×2 구조의 6개의 심볼 형태의 코드워드로 변조된다. 이때 C_0, C_3, C_4 픽셀은 심볼 값 (1, 2)만 가질 수 있으며, C_1, C_2, C_5 는 심볼 값 (0, 1, 2, 3)을 가질 수 있다. 하지만 그림 3의 (a)를 보면 변조부호들 간의 배열을 통해 C_5 와 C_1 이 이웃하게 되는 상황이 발생하게 된다. 이는 심각한 2차원 ISI를 발생시킬 수 있다. 예를 들어 C_5 가 가장 큰 심볼인 '3'을 나타내고 C_1 이 가장 작은 심볼인 '0'을 나타내고 C_1 이 가장 큰 심볼인 '3'을 나타낸다면 가장 최악의 ISI 상황을 나타낸다. 따라서 이러한 상황을 피하기 위해 그림 3의 (b)와 같이 홀수라인과 짝수라인을 통해 변조부호의 순서를 바꿔준다. 즉 홀수라인에서는 코드워드의 순서가 $C_0, C_1, C_2, C_3, C_4, C_5$ 의 순서라면 짝수라인의 코드워드의 순서는 $C_1, C_0, C_3, C_2, C_5, C_4$ 순서로 변환한다. 이러한 방식을 사용하면 C_5 와 C_1 이 만나는 상황인 가장 심각한 2차원 인접 심볼간 간섭을 피할 수 있다. 표 1은 제안하는 4/6 변조부호의 코드워드를 보여준다. 가능한 코드워드의 총 개수인 4096개(=4⁶개)의 코드워드 중에서 그림 2의 조건인 C_0, C_3, C_4 는 심볼 값 (1, 2), C_1, C_2, C_5 는 심볼 값 (0, 1, 2, 3)을 가질 수 있도록 하는 코드

워드 256개(=4⁴개)를 선택하였으며 선택된 코드워드들 간의 최소거리(minimum distance) d_{min} 은 2이다. 제안하는 변조부호의 코드율(code rate)은 4/6=0.66이며, 한 픽셀당 1.33bits(8bit/6pixel) 저장이 가능하다.

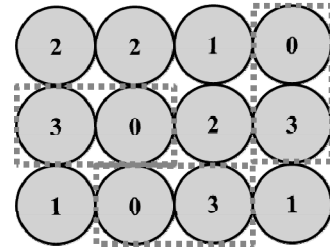


그림 1. 4-레벨 HDS에서 심각한 2차원 ISI의 예제
Fig. 1. Example of fatal two-dimensional ISI in 4-level HDS.

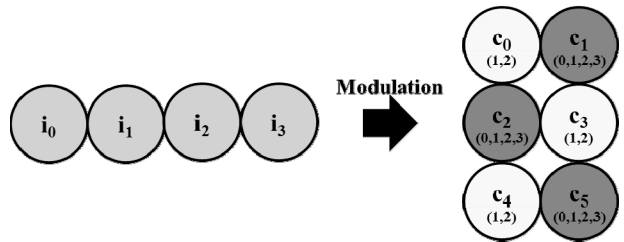


그림 2. 제안하는 변조방식의 배열 방식
Fig. 2. Arrangement of the proposed modulation method.

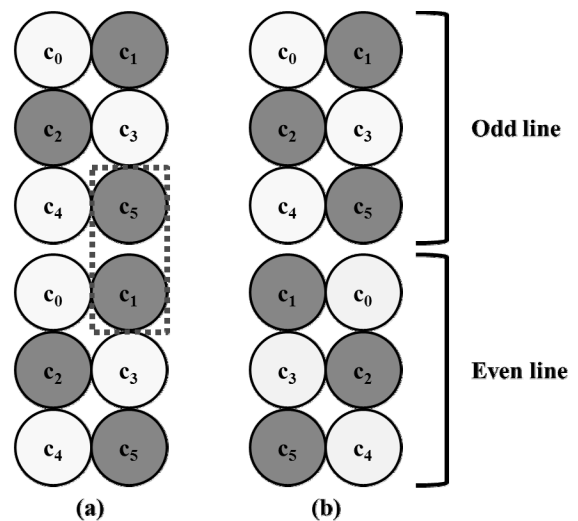


그림 3. 제안하는 변조부호의 구성
Fig. 3. Composition of proposed modulation code.

표 1. 4-레벨 4/6 변조부호의 코드워드
Table1. Codeword of 4-level 4/6 modulation code.

입력심볼	코드워드		입력심볼	코드워드	
0000	0	100110	1000	64	120110
0001	1	100112	1001	65	120112
0002	2	100121	1002	66	120121
0003	3	100123	1003	67	120123
0010	4	100211	1010	68	120211
0011	5	100213	1011	69	120213
0012	6	100220	1012	70	120220
0013	7	100222	1013	71	120222
0020	8	101111	1020	72	121111
0021	9	101113	1021	73	121113
0022	10	101120	1022	74	121120
0023	11	101122	1023	75	121122
0030	12	101210	1030	76	121210
0031	13	101212	1031	77	121212
0032	14	101221	1032	78	121221
0033	15	101223	1033	79	121223
0100	16	102110	1100	80	122110
0101	17	102112	1101	81	122112
0102	18	102121	1102	82	122121
0103	19	102123	1103	83	122123
0110	20	102211	1110	84	122211
0111	21	102213	1111	85	122213
0112	22	102220	1112	86	122220
0113	23	102222	1113	87	122222
0120	24	103111	1120	88	123111
0121	25	103113	1121	89	123113
0122	26	103120	1122	90	123120
0123	27	103122	1123	91	123122
0130	28	103210	1130	92	123210
0131	29	103212	1131	93	123212
0132	30	103221	1132	94	123221
0133	31	103223	1133	95	123223
0200	32	110111	1200	96	130111
0201	33	110113	1201	97	130113
0202	34	110120	1202	98	130120
0203	35	110122	1203	99	130122
0210	36	110210	1210	100	130210
0211	37	110212	1211	101	130212
0212	38	110221	1212	102	130221
0213	39	110223	1213	103	130223
0220	40	111110	1220	104	131110
0221	41	111112	1221	105	131112
0222	42	111121	1222	106	131121
0223	43	111123	1223	107	131123
0230	44	111211	1230	108	131211
0231	45	111213	1231	109	131213
0232	46	111220	1232	110	131220
0233	47	111222	1233	111	131222
0300	48	112111	1300	112	132111
0301	49	112113	1301	113	132113
0302	50	112120	1302	114	132120
0303	51	112122	1303	115	132122
0310	52	112210	1310	116	132210
0311	53	112212	1311	117	132212
0312	54	112221	1312	118	132221
0313	55	112223	1313	119	132223
0320	56	113110	1320	120	133110
0321	57	113112	1321	121	133112
0322	58	113121	1322	122	133121
0323	59	113123	1323	123	133123
0330	60	113211	1330	124	133211
0331	61	113213	1331	125	133213
0332	62	113220	1332	126	133220
0333	63	113222	1333	127	133222

입력심볼	코드워드		입력심볼	코드워드	
2000	128	220111	3000	192	200111
2001	129	220113	3001	193	200113
2002	130	220120	3002	194	200120
2003	131	220122	3003	195	200122
2010	132	220210	3010	196	200210
2011	133	220212	3011	197	200212
2012	134	220221	3012	198	200221
2013	135	220223	3013	199	200223
2020	136	221110	3020	200	201110
2021	137	221112	3021	201	201112
2022	138	221121	3022	202	201121
2023	139	221123	3023	203	201123
2030	140	221211	3030	204	201211
2031	141	221213	3031	205	201213
2032	142	221220	3032	206	201220
2033	143	221222	3033	207	201222
2100	144	222111	3100	208	202111
2101	145	222113	3101	209	202113
2102	146	222120	3102	210	202120
2103	147	222122	3103	211	202122
2110	148	222210	3110	212	202210
2111	149	222212	3111	213	202212
2112	150	222221	3112	214	202221
2113	151	222223	3113	215	202223
2120	152	223110	3120	216	203110
2121	153	223112	3121	217	203112
2122	154	223121	3122	218	203121
2123	155	223123	3123	219	203123
2130	156	223211	3130	220	203211
2131	157	223213	3131	221	203213
2132	158	223220	3132	222	203220
2133	159	223222	3133	223	203222
2200	160	230110	3200	224	210110
2201	161	230112	3201	225	210112
2202	162	230121	3202	226	210121
2203	163	230123	3203	227	210123
2210	164	230211	3210	228	210211
2211	165	230213	3211	229	210213
2212	166	230220	3212	230	210220
2213	167	230222	3213	231	210222
2220	168	231111	3220	232	211111
2221	169	231113	3221	233	211113
2222	170	231120	3222	234	211120
2223	171	231122	3223	235	211122
2230	172	231210	3230	236	211210
2231	173	231212	3231	237	211212
2232	174	231221	3232	238	211221
2233	175	231223	3233	239	211223
2300	176	232110	3300	240	212110
2301	177	232112	3301	241	212112
2302	178	232121	3302	242	212121
2303	179	232123	3303	243	212123
2310	180	232211	3310	244	212211
2311	181	232213	3311	245	212213
2312	182	232220	3312	246	212220
2313	183	232222	3313	247	212222
2320	184	233111	3320	248	213111
2321	185	233113	3321	249	213113
2322	186	233120	3322	250	213120
2323	187	233122	3323	251	213122
2330	188	233210	3330	252	213210
2331	189	233212	3331	253	213212
2332	190	233221	3332	254	213221
2333	191	233223	3333	255	213223

1. 일대일 매핑 방식

일대일 매핑(mapping) 방식은 4개의 심볼을 6개의 3×2 구조의 코드워드로 일대일 변조하는 방식이다. 예를 들어 입력 4개의 픽셀값이 0000이라면 변조된 6개의 픽셀값인 100110으로 일대일 매핑을 통해 변조하는 방식이다.

2. 128개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식

그림 4는 128개의 상태(state)를 갖는 트렐리스 인코딩 방식을 보여준다. 그림을 보면 첫 번째 상태(state 0)에는 (0, 128), (1, 129), ..., (127,255)의 128개의 가지(branch)를 갖는 첫 번째 상태부터 (127, 255), (0, 128), ..., (126, 254)의 128개의 가지를 갖는 127번째 상태까지 총 128개의 상태가 있다. 그림 5는 각각의 가지들에 대한 심볼 할당 방법의 예제를 보여준다. 괄호 안에 적혀 있는 두 개의 숫자들은 하나의 가지에 대응되는 값이다. 다시 말해 하나의 가지가 두 개의 대응값을 가지고 있으며, 총 256개의 코드워드를 2개씩 하나의 가지에 할당하였기 때문에 128개의 상태가 나온다. 이러한 트렐리스 구조를 사용하면 입력값에 따라서 상태가 변화하고, 출력값도 변한다. 예를 들어 0번째 상태에서 '0000'의 입력 심볼값이 들어오면 출력값으로 첫 번째 괄호의 첫 번째 심볼값인 0번째 코드워드의 값 '100110'를 출력하고 0번째 상태로 이동한다. 0번째 상태에서 입력값으로 '0001'이 들어오면 출력값으로 첫 번째 괄호의 두 번째 심볼값인 128번째 코드워드의 값 '220111'를 출력하고 0번째 상태로 이동한다. 본 변조부호는 k번째 상태에서 할당된 심볼 값은 (k, k+128), (k+1, k+129), (k+2, k+130), ..., (127, 255), (0, 128), ..., (k-1, k+127)과 같다. 해당 변조부호 방식은 부호 이득을 얻기 위해 m 간격마다 0번째 상태로 돌아가는 종료 심볼을 삽입해야 한다. 따라서 실제 부호율은 $4m/6(m+1)$ 이다. 해당 변조부호의 절차는 초기의 상태를 0으로 한 후, 4개의 심볼을 입력받아 현재 상태와 입력 심볼에 알맞은 심볼값을 출력한다. 이후에 해당하는 상태로 옮긴 다음 이러한 과정을 반복하며 마지막 m번째에 0번째 상태로 가기 위해 상태 초기화 패리티 심볼을 삽입한다. 해당 변조부호의 최소거리 $d_{min}=2$ 이기 때문에 1bit의 오류정정은 불가능하지만 오류가 틀린 정보는 검출이 가능하기 때문에 부호 이득을 얻을 수 있다.

해당 변조 부호의 복호방식은 유클리디안 거리(Euclidean Distance)를 이용한 비터비 알고리즘(Viterbi algorithm)을 사용하였으며 오류값은 아래와 같다.

$$\Delta_i(s_c, s_n) = \sum_{j=1}^6 [z_{ji} - u_{ji}^{(k)}(s_c)]^2 \tag{1}$$

여기서 s_c 는 현재 상태(current state), s_n 은 다음 상태(next state), z_{ji} 는 i번째의 수신 코드워드에서 j번째 심볼값이다. $u_{ji}^{(k)}$ 는 k번째 현재 송신 가능한 코드워드들 중에서 i번째 가지의 j번째 코드워드의 심볼이다. 각 상태는, 256개의 거리차들 중에 가장 작은 거리차를 선택한 후 가장 작은 거리차가 아닌 값들은 지워간다. m 번째에서는 초기화를 하였기 때문에 현재 상태가 0번째 상태이며, 이 때 거리값이 가장 작은 길을 선택하여 해당 길에 대응되는 값을 선택한다.

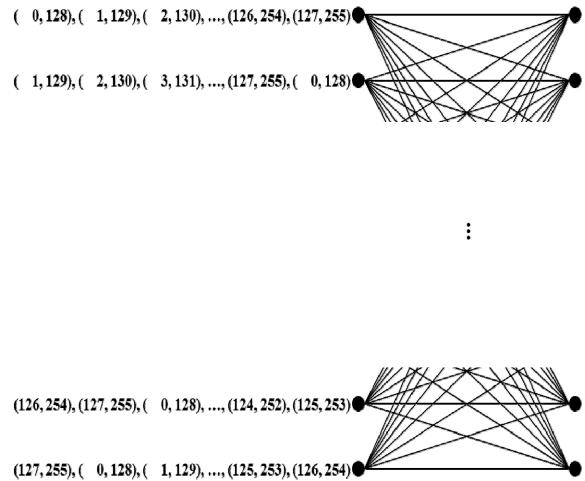


그림 4. 제안하는 4/6 변조부호의 심볼 할당 및 트렐리스 구조
Fig. 4. Symbol assignment and trellis diagram for the proposed 4/6 modulation code.

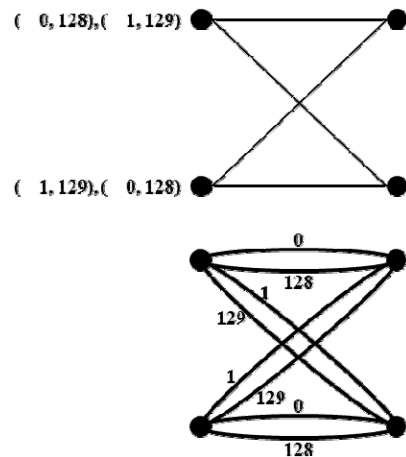


그림 5. 가지들에 대한 심볼 할당 방법
Fig. 5. Assignment of an output symbol for each corresponding branch.

3. 256개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식

256개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식은 128개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식과 유사하다. 256개의 상태에서 각각 하나의 값만 존재한다. 부호화 및 복호화 방식은 앞의 방식과 동일하다. 그러나 일대일 매핑 방식은 m의 길이와 관계가 없지만 128개와 256개의 상태를 갖는 인코딩 방식은 m의 길이에 따라 초기화를 시켜주는 패리티 심볼을 갖는다.

III. 실험

홀로그래픽 채널은 CCD (charge-coupled device)를 통과한 형상을 이용하여 모델링 하였다^[12]. 채널의 잡음 환경은 신호대잡음비 (signal to noise ratio, SNR)에 따라 실험하였으며, 이때 SNR은 $10\log_{10}(1/\sigma^2)$ 로 정의하였다. 여기서 σ^2 는 부가 백색 가우시안 (additive white Gaussian noise, AWGN) 전력이다. 정확한 신호검출을 위해 부분 응답 최대 유사도 (partial response maximum response, PRML)를 이용하였으며 이 때 PR target은 가로방향, 세로방향 모두 PR(131)을 사용하였다. 최대 유사도 검출기는 연관성 출력 비터비 알고리즘 (soft output Viterbi algorithm, SOVA)을 사용하였다. 실험은 한 페이지의 크기가 1024×1024이며, 1000 페이지에 대하여 실험하였다. 제안하는 변조부호의 성능을 비교하기 위해 같은 코드율을 갖는 변조부호인 2/3 변조부호와 6/9 변조부호와 비교하였다^[9-10].

그림 6은 m=30일 때 SNR에 따른 BER 성능을 보여준다. 제안하는 4/6 일대일 매핑 변조부호는 기존의 2/3 및 6/9 변조부호보다 BER이 10^{-5} 일 때, 약 4.5dB 성능 향상을 보였다. 또한 128개와 256개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식은 기존의 변조부호보다 뛰어난 성능을 보여주었다. 그림 7은 m=100일 때 SNR에 따른 BER 성능을 보여준다. 128개와 256개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식은 SNR이 12dB 이하일 때는 일대일 매핑 방식보다 성능이 좋지 못하지만 SNR이 13dB부터는 모든 오류를 정정할 수 있었다. 그림 8은 m=500일 때 SNR에 따른 BER 성능을 보여준다. 128개와 256개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식은 SNR이 8dB에서 10dB일 때 성능 향상이 거의 없었다. 이러한 이유는 m의 길이가 길어졌기 때문에 비터비의 오류 전파에 의해 오류 정정이 올바르게 되지 못하였다. 그러나 11dB 이상부터는 급격하게 성능을 향상시킬 수 있다.

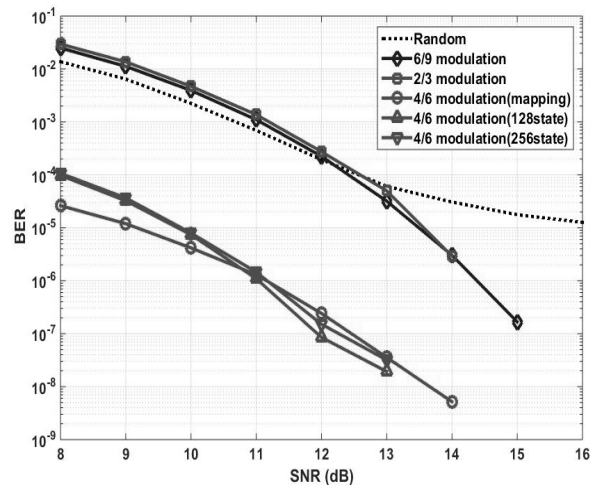


그림 6. m=30일 때 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 6. At m=30, BER performance depending on SNR.

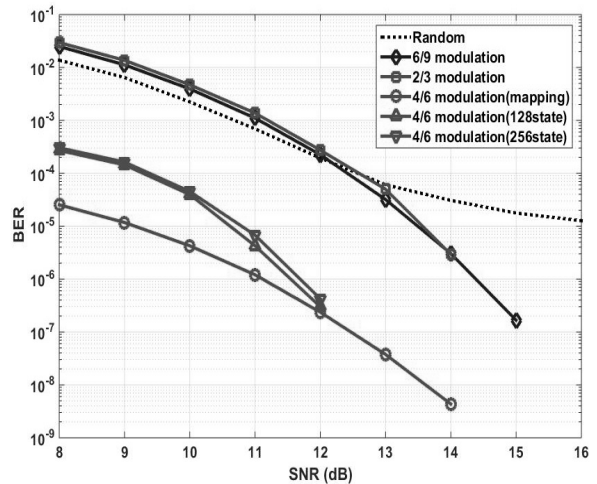


그림 7. m=100일 때 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 7. At m=100, BER performance depending on SNR.

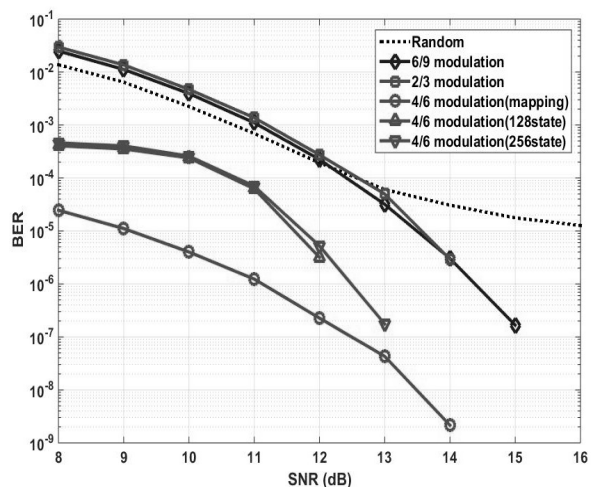


그림 8. m=500일 때 SNR에 따른 BER 성능
Fig. 8. At m=500, BER performance depending on SNR.

IV. 결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 트렐리스 인코딩을 이용한 4-레벨 4/6 변조부호를 제안하였다. 256개의 코드워드를 통해 일대일 매핑, 128개 및 256개의 상태를 갖는 트렐리스 인코딩 방식을 소개하였으며 같은 부호율을 갖는 2/3 변조부호와 6/9 변조부호와의 성능 비교를 보여주었다. 제안하는 변조부호가 기존의 변조부호보다 성능이 우수한 이유는 코드워드들 간의 거리가 크기 때문이다. 제안하는 변조부호의 최소 거리 d_{min} 이 2지만 부호들 간에 거리가 2 이상인 부호가 많기 때문에 성능 향상을 얻을 수 있었다. 따라서 HDS를 위한 변조부호를 설계하기 위해 2차원 심볼간 간섭을 줄일 수 있으며 코드워드들 간의 거리를 증가시킬 수 있다면 급격한 성능 향상을 얻을 수 있다.

또한 트렐리스 인코딩 방식을 이용한 변조부호는 SNR이 14dB 이상부터는 모든 오류를 정정하는 것을 보여주었다. 따라서 SNR이 높은 시스템에서 사용을 한다면 트렐리스 인코딩 방식을 사용한 변조부호를 사용하는 것이 성능 이득을 볼 수 있으며, SNR이 낮고 복잡도를 줄이기 위해서는 일대일 매핑 방식을 사용하는 것이 효율적이다.

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] 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] 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.

[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, March 2009.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] S. Jeong and J. Lee, "4-level 3/4 modulation code for holographic data storage," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 52, no. 9, pp. 1576-1580, September 2015.

[12] 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, January 2002.

저 자 소 개



정 성 권(학생회원)
대한전자공학회 논문지
제53권 10호 참조



이 재 진(정회원)
대한전자공학회 논문지
제53권 10호 참조