

4-레벨 홀로그래픽 저장장치를 위한 2/3 변조부호와 비터비 검출기

김국희*, 이재진^o

2/3 Modulation Code and Its Vterbi Decoder for 4-level Holographic Data Storage

Gukhui Kim*, Jaejin Lee^o

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치에서는 인접 심볼간 간섭이 2차원으로 발생하며, 인접 페이지간 간섭 또한 발생한다. 특히 멀티 레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우, 한 픽셀이 나타내는 정보가 0과 1의 이진수가 아닌 그 이상의 정보를 더 저장하고 있기 때문에, 위와 같은 간섭들이 더 크게 발생할 수 있다. 본 논문에서는 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서의 성능 저하를 보완하기 위하여 2/3 변조 부호를 제안한다. 제안된 2/3 변조 부호는 비터비 검출 방법을 변조 방식에 적용하여 에러 정정 능력을 갖는다. 또한, 본 논문에서는 2/3 변조 부호를 위한 새로운 비터비 디코더를 제안한다. 제안된 비터비 검출기는 복호 시에 필요없는 상태에 대한 계산을 제거하여 복호 성능을 높인다. 제안된 비터비 검출기는 2/3 변조 부호에 대하여 기존의 비터비 검출기보다 더 뛰어난 성능을 보인다.

Key Words : Holographic data storage, Two-dimensional intersymbol interfeence, Multi-level two-dimensional modulation codes, Viterbi algorithm.

ABSTRACT

Holographic data storage system is affected by two dimensional intersymbol interference and inter-page interference. Especially, for multi-level holographic data storage system, since one pixel contains more than 1 bit, the system is more vulnerable to the error. In this paper, we propose a 2/3 modulation code for 4-level holographic data storage system. The proposed modulation code with error correcting capability could be compensated these interferences. Also, in this paper, we proposed a Viterbi decoder for 2/3 modulation code. The proposed Viterbi decoder eliminates unnecessary calculation. As a result, proposed 2/3 modulation code and Viterbi decoder has shown better performance than conventional one.

I. 서 론

홀로그래픽 데이터 스토리지(Holographic Data Storage, HDS)는 홀로그램을 이용한 광 저장장치이다. 홀로그래픽 데이터 스토리지는 고도 정보화 시

대에 필요한 정보 저장장치가 필요한 세 가지 핵심적인 특징을 고루 갖추고 있어 차세대 대용량 정보 저장장치로 각광을 받고 있다. HDS의 세 가지 핵심적인 특징으로는 대용량화, 데이터 입출력 속도의 고속화, 보다 짧은 데이터 접근 시간이다. 하지만

※ 본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0020262).

♦ First Author : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, mariv@ssv.ac.kr, 정회원

° Corresponding Author : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원
논문번호 : KICS2013-09-405, 접수일자 : 2013년 9월 15일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 24일

홀로그래픽 저장장치에는 많은 오류 요인들이 인접 심볼간 간섭 (Intersymbol interference, ISI), 인접 페이지간 간섭 (Interpage interference, IPI), 어긋남 특성(misalignment) 등이 존재한다¹⁻³⁾. 특히, ISI의 경우 페이지 단위의 기록 방식으로 ISI가 2차원으로 생기며, 이를 블러(blur) 효과라고 한다. 이와 같은 에러를 제어하는 방법으로, 부분 응답 최대 유사 (Partial Response Maximum Likelihood, PRML) 검출 방법이나 2차원 변조부호에 대한 연구가 진행되어 왔다⁴⁻⁷⁾.

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우, 한 픽셀이 1 비트 이상의 정보를 나타낸다. M-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우, 한 픽셀이 나타낼 수 있는 심볼의 경우는 M가지이다. 이 때문에 멀티레벨로 저장할 경우 저장용량이 증가한다⁶⁾. 하지만 M 레벨로 저장될 경우, 블러 효과가 심해져 시스템의 성능이 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우보다 저하될 수 있다. 이와 같은 인접 심볼간 간섭을 완화시키기 위하여 다양한 2차원 변조 부호가 연구되고 있다⁸⁻¹³⁾.

본 논문에서는 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서의 2차원 인접 심볼간 간섭과 인접 페이지간 간섭을 보완해주는 2/3 변조부호를 제안한다. 제안된 변조부호는 간단히 일대일 대응을 하는 변조 방법과, 에러 정정 능력을 갖도록 하는 변조 방법의 2가지 부호로 나뉜다. 에러 정정 능력을 갖는 2/3 변조부호는 변조부호에 콘볼루션 코드와 비터비 디코더의 최대 유사 검출을 적용함으로써 일대일 대응 방식의 2/3 변조 코드보다 더 좋은 성능을 얻을 수 있다. 또한, 본 논문에서는 제안된 2/3 변조 코드를 위한 비터비 알고리즘을 새롭게 제안한다. 제안된 코드워드의 상태에 따라 사용하지 않는 트렐리스 상태를 제거함으로써 비터비 디코더의 에러율을 감소시킬 수 있다.

II. 제안된 4-레벨 2/3 변조부호

홀로그래픽 저장장치의 인접 페이지간 간섭을 줄이기 위해서는, 사용된 변조부호에서 각 심볼이 발생하는 횟수가 균등해야한다. 홀로그래픽 저장장치에서는 정보 데이터가 SLM(spatial light modulation)에 의해 빛의 양으로 기록된다. 각 페이지마다 신호에서 발생하는 빛의 세기가 비슷하다면, 기록조건이 유사하게 되어 인접 페이지간 간섭을 줄일 수 있다.

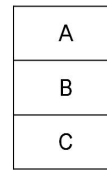


그림 1. 코드워드의 구성
Fig. 1. Codeword structure.

표 1. 코드워드 할당
Table 1. Codeword assignment.

입력 심볼	코드워드 (ABC)	입력 심볼	코드워드 (ABC)
00	C ₀ 001	20	C ₈ 021
01	C ₁ 133	21	C ₉ 113
02	C ₂ 003	22	C ₁₀ 023
03	C ₃ 131	23	C ₁₁ 111
10	C ₄ 010	30	C ₁₂ 030
11	C ₅ 122	31	C ₁₃ 102
12	C ₆ 012	32	C ₁₄ 032
13	C ₇ 120	33	C ₁₅ 100

2.1. 일대일 대응 변조부호

제안된 2/3 변조부호는 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치에서의 성능 저하를 보완하는 부호로, 2 심볼을 입력으로 받아 3 심볼을 그림 1과 같은 1×3 행렬의 코드워드로 내보낸다. 1×3 행렬의 코드워드로 표현할 수 있는 코드워드 수는 총 64개이며, 이 중 16개의 코드워드가 선택된다. 선택된 코드워드는 아래의 표 1과 같다. A 위치에는 0과 1만 할당될 수 있고, 나머지 위치는 0부터 3까지의 심볼을 모두 사용한다. 이 때 B 위치에 나타나는 0부터 3까지 각 심볼의 발생 빈도수가 4로 모두 같다. 또한 C 위치에서도 마찬가지이다. A에서는 발생할 수 있는 심볼이 0과 1뿐이지만, 각각 8의 발생 횟수를 가져 각 심볼의 발생 빈도수가 비슷하게 된다. 이와 같은 특성은 제안된 변조부호가 인접 페이지간 간섭을 줄여주는데 도움이 된다.

2/3 변조 코드의 복조 방법은 유클리디안 거리를 계산하여 최소 값을 갖는 코드워드를 선택하여 복원한다. 16개의 가능한 모든 코드워드에 대하여 복조기 입력과 유클리디안 거리를 식 (1)과 같이 계산한다.

$$d = \sum_{i=0}^2 [y_i - c_i] \tag{1}$$

이렇게 계산한 d 값 중 가장 작은 값에 해당하는 코드워드를 복조기 출력으로 내보낸다.

2.2. 오류정정 능력을 갖는 변조부호

상태를 갖는 2/3 변조부호는 현재 상태와 다음에 들어올 입력 심볼 값에 따라 코드워드를 선택하는 방식이 다르다. 이 변조부호는 입력에 따라 16개의 상태를 가지며, 각 상태에 들어오는 입력 심볼 값의 경우에 따라 출력 심볼을 내보내며 상태가 변화한다. 천이될 수 있는 상태가 다르기 때문에 거리차를 얻어서 부호 이득을 얻을 수 있다. 부호 이득을 위하여 코드워드를 설계할 때, 제안된 부호의 최소 거리가 2가 되도록 설계하였다. 이와 같은 방식으로 변조부호에 비터비 디코더 알고리즘을 적용함으로써 단순한 일대일 매핑 방법의 2/3 변조부호보다 더 좋은 성능을 기대할 수 있다.

제안된 변조부호는 표 2와 같이 16개의 상태를 갖는다. 출력되는 현재 변조부호의 상태와 입력되는 심볼에 따른 출력 코드워드의 심볼 매핑 규칙은 표 3과 같다. 표를 간단하게 표시하기 위하여 코드워드 C_i 를 i (0, 1, 2, ..., 15)로 표시하였다. 부호화 순서는 다음과 같다. 우선 초기 상태를 S_0 라고 한다. 임의의 상태 S_i 에 대하여 입력 심볼에 따라 표 3에 따른 출력 코드워드를 내보내고 입력 심볼에 해당하는 다음 상태로 바뀐다. 그 예로, 만약 상태 S_0 일 때, 입력 심볼로 33이 들어왔다면, 변조기는 출력 코드워드를 코드워드 15에 해당하는 C_{15} 인 221을 출력한 후, 상태를 S_{15} 로 바꿀 것이다. 변조부호에 비터비 알고리즘을 적용하기 위하여 송신 데이터의 마지막에 심볼 00을 전송하여 상태를 초기 상태로 만들어준다.

제안된 변조부호의 복호화 방법은 유클리디안 거리를 이용한 비터비 알고리즘을 사용한다. 가지의 에러 값은 다음과 같이 계산한다.

$$\lambda_i(s_a, s_b) = \sum_{j=0}^2 [z_{ji} - u_{ji}^{(k)}(s_a)]^2 \quad (2)$$

여기서 s_a 는 현재 상태, s_b 는 다음 상태를 나타내며, z_{ji} 는 i 번째 수신된 코드워드에 j 번째 심볼값이며, $u_{ji}^{(k)}$ 는 k 번째 송신이 가능한 코드워드에서 i 번째 심볼을 의미한다. 각각의 상태는, 16개의 거리 값들 중에 가장 작은 값을 선택하고, 나머지 선택되지 않은 값들은 제거하며 진행한다. 마지막 S_0 상태

에서 거리 값이 가장 작은 길을 선택하고 그에 대응되는 값들을 출력으로 내보낸다.

표 2. 제안된 2/3 변조부호의 상태 표시
Table 2. State representation of the proposed code.

상태기호 (S_i)	상태	상태기호 (S_i)	상태
S_0	00	S_8	20
S_1	01	S_9	21
S_2	02	S_{10}	22
S_3	03	S_{11}	23
S_4	10	S_{12}	30
S_5	11	S_{13}	31
S_6	12	S_{14}	32
S_7	13	S_{15}	33

표 3. 제안된 2/3 변조부호의 심볼 매핑 규칙
Table 3. Symbol mapping rule for the proposed code.

입력 심볼	각 상태에서의 출력 코드워드						다음 상태
	S_0	S_1	S_2	...	S_{14}	S_{15}	
00	0	1	2		14	15	S_0
01	1	2	3		15	0	S_1
02	2	3	4		0	1	S_2
03	3	4	5		1	2	S_3
10	4	5	6		2	3	S_4
11	5	6	7		3	4	S_5
12	6	7	8		4	5	S_6
13	7	8	9		5	6	S_7
20	8	9	10	...	6	7	S_8
21	9	10	11		7	8	S_9
22	10	11	12		8	9	S_{10}
23	11	12	13		9	10	S_{11}
30	12	13	14		10	11	S_{12}
31	13	14	15		11	12	S_{13}
32	14	15	0		12	13	S_{14}
33	15	0	1		13	14	S_{15}

III. 제안된 변조부호를 위한 비터비 검출기

기존의 비터비 디코더는 주어진 모든 가능한 상태에 대하여 트렐리스를 구성하고 경로 메트릭을 구하여 데이터를 복호한다. 4-레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치의 경우 비터비 트렐리스는 그림 2와 같다.

하지만 제안된 변조 코드에서 A는 0이나 1 심볼만 출력으로 내보낸다. 즉 A가 포함된 위치에서는 비터비 검출기가 실제로 가능한 상태는 00, 10, 01, 11의 4가지 경우뿐이다. 하지만, 비터비 검출기는 모든 가능한 상태에 대해서 계산을 수행하므로 만약 어느 부분에서의 오류가 크게 났다면, 그 부분에서 0과 1 이외의 다른 출력 값이 나올 수 있다. 따라서, A 위치의 경우 거기에 적합한 비터비 트렐리스를 갖는 검출기가 필요하게 된다. 제안된 비터비 검출기는 A를 검출할 때 비터비 검출기가 트렐리스를 {00, 10, 01, 11}의 4가지 경우만 갖도록 수정하였다. 이에 해당하는 비터비 트렐리스는 그림 3과 같다.

IV. 모의 실험

홀로그래픽 데이터 저장장치의 페이지 수는 총 100페이지로 실험하였고, 한 페이지는 가로 1024, 세로 1024 픽셀의 크기를 갖는다. 실험을 위한 PR 목표값은 PR(131)로 정하여 실험하였다.

그림 4는 제안된 부호화 방법의 성능을 보여준다. 그림에서 random은 부호화하지 않은 데이터를 사용한 경우이고, Modulation 1은 제안된 부호 중 상태가 없는 변조 방식인 경우, Modulation 2는 오류정정 능력이 있는 부호를 나타낸다. Channel out은 채널의 출력을 문턱값 검출 기준으로 성능을 평가한 것이며, Viterbi out과 Demodulation out은 각각 비터비 출력과 복조 출력의 성능을 평가한 것이다. 제안된 변조부호의 2가지 방법 모두 랜덤한 데이터를 전송했을 때와 비터비 출력에 대한 성능은 거의 같은 것을 볼 수 있다. 하지만 제안된 오류정정 능력을 갖는 부호를 사용하였을 때, 복조 후 SNR 12dB 이상에서 성능이 급격히 향상하는 것을 확인할 수 있다. 제안된 오류정정 부호를 사용할 경우 SNR이 17dB 이상에서 모든 오류를 정정할 수 있다.

그림 5는 오류 정정 능력을 갖는 2/3 변조부호를 사용했을 경우, 기존의 비터비 디코더와 제안된 비터비 디코더의 SER 성능을 비교한 그래프이다. 비터비 출력 값에 따른 제안된 비터비 디코더의 성능은 기존 디코더의 성능과 최대 0.5dB의 성능 이득이 있다. 제안된 비터비 디코더를 사용할 경우 변조부호의 복호시 10^{-7} 에서 약 1dB 이상의 성능 이득을 얻는다. 또한, 기존의 비터비 디코더를 사용할 경우, 변조부호의 복호시 17dB 이상에서 오류가 모두 정

정되었으나, 제안된 비터비 디코더는 복호시 15dB 이상에서 오류가 모두 정정되었다.

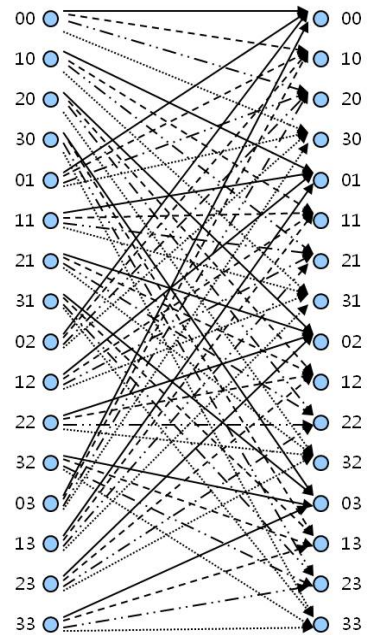


그림 2. 기존의 4-레벨 비터비 트렐리스
Fig. 2. Conventional 4-level Viterbi trellis.

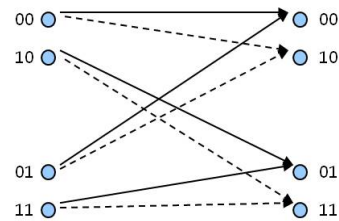


그림 3. 수정된 A의 비터비 트렐리스
Fig. 3. Modified Viterbi trellis of A.

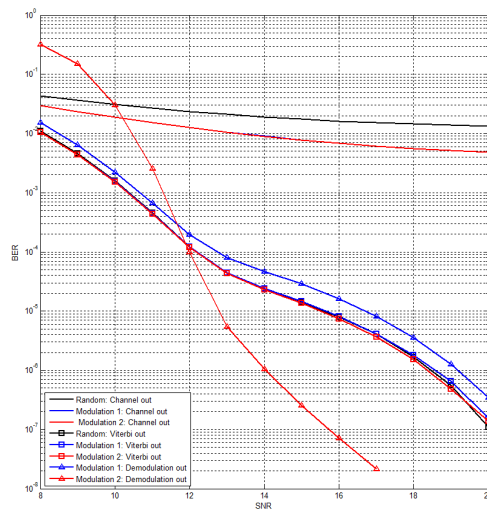


그림 4. 각 변조 방법에 따른 BER 성능
Fig. 4. BER of each modulation scheme.

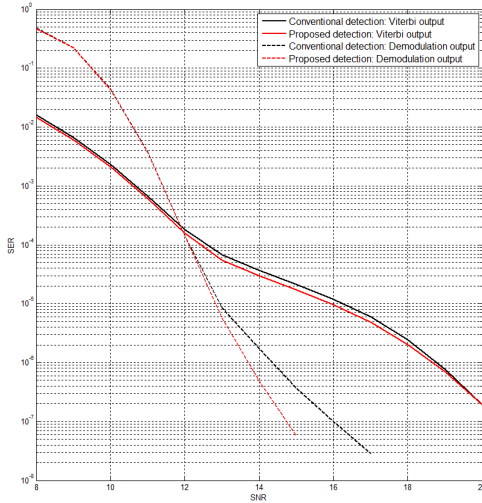


그림 5. 수정된 비터비 트렐리스의 성능
Fig. 5. SER of modified Viterbi trellis.

V. 결론

본 논문에서는 비터비 알고리즘을 이용한 상태를 갖는 2/3 변조부호 방법과 제안된 부호에 적용할 수 있는 새로운 비터비 트렐리스를 제안하였다. 제안된 변조부호 방식은 SNR이 높을수록 성능이 우수했지만, 12dB 이하의 SNR에서는 부호를 사용하지 않을 경우보다 성능이 낮다. 이는 변조기에 들어오는 입력 값이 연판정 값이 아니라 경판정 값을 사용했기 때문이다. 변조기에 들어오는 입력 값을 연판정 값으로 바꿔준다면, 더 좋은 성능을 기대할 수 있을 것이다. 그리고 2/3 변조부호를 위한 새로운 비터비 알고리즘 또한 대체적으로 기존의 비터비 알고리즘과 비교해 더 좋은 성능 이득을 얻는 것을 확인하였다.

References

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

[2] E. L. Kral, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Correlation properties of random phase diffusers for multiplex holography," *Applied Optics*, vol. 21, no. 7, pp. 1281-1290, Apr. 1982.

[3] 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, July 2010.

[4] M. Keskinoz and B. V. K. V. Kumar, "Efficient modeling of volume holographic storage channels (VHSC)," *Proc. SPIE*, vol. 4090, pp. 205-210, Sep. 2000.

[5] V. Vadde and B. V. K. V. Kumar, "Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage," *Applied Optics*, vol. 38, no. 20, pp. 4374-4386, July 1999.

[6] 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," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 48, no. 3, pp. 03A033, March 2009.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

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

[11] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional 5:8 modulation code for holographic data storage," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 48, no. 3, pp. 03A031, Mar. 2009.

[12] J. Kim, J. Wee, and J. Lee, "Error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *Japanese J. Applied Physics*, vol. 49, no. 8, pp. 08KB04, Aug. 2010.

[13] 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, Jan. 2002.

김 국 희 (Gukhui Kim)



2011년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사
2013년 2월 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사
<관심분야> 스토리지 시스템을 위한 부호 및 신호처리

이 재 진 (Jaejin Lee)



1983년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
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, 기록저장 시스템