논문 2016-53-9-2

홀로그래픽 데이터 저장장치에서 2차원 심볼 간 간섭을 완화하기 위한 4-레벨 균형 변조부호

(4-Level Balanced Modulation Code for the Mitigation of Two-Dimensional Intersymbol Interference in Holographic Data-Storage Systems)

박 근 환*, 이 재 진**

(Keunhwan Park and Jaejin Lee°)

요 약

홀로그래픽 데이터 저장 장치(HDSS)는 페이지 단위로 저장 매체의 체적에 데이터를 저장 및 관독하고 2차원으로 데이터를 처리하기 때문에 데이터 전송 속도 및 저장 용량이 증가한다. 게다가, 멀티레벨 HDSS는 한 픽셀에 한 비트이상을 저장할 수 있다. 하지만 2차원으로 페이지를 처리하므로 기존의 데이터 저장 시스템과 달리 2차원으로 인접한 심볼 간 간섭(ISI) 및 인접 페이지 간 간섭(IPI)가 발생한다. 기존에 발표된 논문들은 멀티레벨 HDSS 환경에서 2차원 ISI 완화에 관한 연구에 초점을 두 었지만 멀티레벨 HDSS 환경에서 2차원 ISI와 IPI를 동시에 완화하는 연구는 진행되지 않았다. 본 논문에서는 2차원 ISI 및 IPI를 동시에 완화하는 4-레벨 균형 변조부호를 제안하였다.

Abstract

In the holographic data storage system (HDSS), the data regarding the volume of a storage medium are recorded and read by the page, and the transmission rate and storage capacity can be increased because of two-dimensional, page-oriented data processing; furthermore, the multi-level HDSS can store more than one bit per pixel. For this same reason, however, and unlike conventional data-storage systems, the HDSS is hampered by two-dimensional (2D) intersymbol interference (ISI) and interpage interference (IPI). Progress regarding the published papers on 2D ISI, which is more severe in the multi-level HDSS, continues; however, mitigation of both 2D ISI and IPI in terms of the multi-level HDSS has not yet been studied. In this paper, we therefore propose a 4-level balanced-modulation code that simultaneously mitigates 2D ISI and IPI.

Keywords: Balanced-Modulation Code, Multi-level, Inter-symbol interference, Inter-page interference

I.서 론

정보화 시대의 발전과 함께 대용량 저장 장치 시장의 성장 속도가 증가하고 있다. 데이터베이스는 상당한 양 의 정보를 저장 및 관리가 필요하므로 새로운 데이터베

Received ; August 12, 2016 Revised ; August 23, 2016 Accepted ; August 31, 2016 이스 저장 장치의 개발이 요구된다. 그 동안 대용량의 데이터를 수용하기 위해 CD (Compact Disc), DVD (Digital Versatile Disc) 및 BD (Blu-ray Disc)와 같은 상업적 저장 장치들이 개발되었다. 그러나 저장 장치 시스템이 더 발전하려면 고밀도 저장 장치에 대한 요구 를 충족해야한다^[1~3]. 홀로그래픽 데이터 저장 장치 (Holographic Data Storage System, HDSS)는 평면이 아닌 매질의 체적에 데이터를 저장하고 페이지 단위로 데이터 처리가 가능하기 때문에 주목받고 있다. 게다가 멀티레벨 HDSS는 하나 이상의 비트를 한 픽셀에 저장 가능하여 용량의 관점에서 큰 이점이 있다.

^{*} 학생회원, ** 정회원, 숭실대학교 전자정보공학 (School of Electronics Engineering, Soongsil University) [©] Corresponding Author (E-mail: zlee@ssu.ac.kr)

[※] 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).

Burr는 HDSS에서 그레이스케일 (Gray Scale)과 멀 티레벨 (Multi Level)의 데이터 페이지를 실험하였다. 실험 결과 한 픽셀 당 3-레벨로 변조된 데이터 용량이 이진 변조 데이터 용량보다 30% 더 큰 향상을 보였다. 게다가, 데이터 전송 속도도 30% 더 높았다^[4]. King과 Neifeld 역시 비슷한 결과를 보였다^[5].

그러나 이와 관련하여 두 가지 주요한 문제가 남아있다. 첫째. HDSS는 페이지 단위로 데이터를 기록 및 판독하 기 때문에 2차원 인접 심볼 간 간섭(ISI)가 생긴다. 가 장 작은 레벨의 픽셀이 가장 큰 레벨의 픽셀과 인접할 경우 심각한 ISI가 발생한다^[6~8]. 둘째, HDSS는 저장 매질의 체적에 페이지 단위로 저장하기 때문에 인접 페 이지 간 간섭(IPI)이 발생한다^[9~10]. IPI를 완화하기 위 해 각각의 페이지들의 신호 밀도를 비슷하게 하고 각 페이지의 밀도를 균일하게 분포해야한다^[9~11]. 예를 들 어, 이진 비트일 경우에는 0 픽셀과 1 픽셀의 발생 확률 을 동일하게 균형 변조하면 신호빔의 밀도의 변화가 줄 어들어 모든 페이지들이 같은 밀도를 갖게 된다^[12~13]. 지금까지 2차원 ISI와 IPI의 완화에 관한 많은 연구 논 문이 제안되었다. 하지만 이진 변조에서의 IPI를 고려하 지 않은 2차원 ISI 고립 패턴 제거 변조부호나 IPI 완화 만을 고려한 방식들이다^[14~18].

본 논문에서는 멀티레벨 환경에서 2차원 ISI와 IPI를 동시에 완화하는 4-레벨 균형 변조부호를 제안하였다. Ⅱ장에서는 제안된 4-레벨 균형 변조부호에 대해서 설 명한다. Ⅲ장에서는 실험 환경 및 결과를 제시하여 성 능을 비교하였다. Ⅳ장에서는 실험 결과에 관한 결론을 제시한다.

Ⅱ.본 론

제안된 균형 변조부호는 4-레벨 변조부호로써 3개의 입력 심볼을 6개의 출력 심볼로 내보낸다. 4-레벨 변조 부호는 두 비트(예: 00, 01, 10, 11)를 하나의 심볼(예: 0, 1, 2, 3)로 만든다. 출력 코드워드는 3×2 배열로 변조 되며 그림 1은 변조된 코드워드 구조이다. 제안된 균형 변조부호의 코드율은 1.0(bit/pixel)이며, 4-레벨 6픽셀 코드워드에 저장 가능한 심볼의 평균은 9이므로 제안된 균형 변조부호의 각 코드워드의 레벨의 합으로 정의된 무게는 9이다. 변조된 모든 코드워드들은 9의 무게를 가지므로 저장된 체적의 모든 페이지의 무게 또한 같다. 이는 각 페이지의 밀도가 같다고 볼 수 있다.



그림 1. 제안된 균형 변조부호 구조

Fig. 1. Structure of proposed balanced-modulation scheme.

C ₀₀	C ₀₁	C ₀₂	C ₀₃	C ₀₄	C ₀₅	C ₀₆	C ₀₇
0 1	0 1	0 1	0 1	0 1	0 1	0 1	0 1
1 2	1 3	1 3	2 1	2 2	2 2	2 3	2 3
2 3	1 3	2 2	2 3	1 3	2 2	1 2	2 1
C ₀₈	C ₀₉	C10	C ₁₁	C12	C13	C14	C15
0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2	0 2
1 1	1 2	1 2	1 3	1 3	2 1	2 1	2 2
2 3	1 3	2 2	1 2	2 1	1 3	2 2	1 2
C16	C17	C18	C19	C ₂₀	C ₂₁	C22	C ₂₃
0 2	0 2	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1
2 2	2 3	1 1	1 2	1 2	1 3	1 3	2 1
2 1	1 1	2 3	1 3	2 2	1 2	2 1	1 3
C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉	C ₃₀	C ₃₁
1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1	1 1
2 1	2 2	2 2	2 3	3 1	3 1	3 2	3 2
2 2	1 2	2 1	1 1	1 2	2 1	1 1	2 0
C ₃₂	C ₃₃	C ₃₄	C35	C36	C37	C38	C ₃₉
1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2	1 2
1 1	1 1	1 2	1 2	1 3	2 1	2 1	2 2
1 3	2 2	1 2	2 1	1 1	1 2	2 1	1 1
C40	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃	C44	C45	C46	C47
1 2	1 2	1 2	1 2	2 1	2 1	2 1	2 1
2 2	3 1	3 1	3 2	1 1	1 1	1 2	1 2
2 0	1 1	2 0	1 0	1 3	2 2	1 2	2 1
C48	C49	C ₅₀	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C54	C55
2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1	2 1
1 3	2 1	2 1	2 2	2 2	3 1	3 1	3 2
1 1	1 2	2 1	1 1	2 0	1 1	2 0	1 0
C56	C ₅₇	C ₅₈	C ₅₉	C ₆₀	C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃
2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 2
1 1	1 1	1 2	1 2	2 1	2 1	2 2	3 1
1 2	2 1	1 1	2 0	1 1	2 0	1 0	1 0
그리 ᠀		입드 테	이블		<u> </u>		
Fig. 2.	List o	f codev	vords.				

제안된 균형 변조부호는 다음과 같이 생성하였다. 첫째, 발생 가능한 모든 6픽셀 코드워드 중 무게가 9인 코드

13



그림 3. 심볼 분포도 Fig. 3. Distribution of the symbols.

워드 패턴을 생성하였다. 둘째, 제안된 균형 변조부호는 4-레벨 환경이므로 인접해있는 픽셀의 최대 레벨차이 는 3이다. 코드워드 내부 픽셀 중 인접한 픽셀들의 레 벨 차이가 3인 코드워드들을 제거하였다. 마지막으로 각각의 코드워드들끼리 변조 후에 인접할 수 있으므로 코드워드들이 인접했을 때 레벨 차가 3이 발생하지 않 는 코드워드들의 집합을 선택한다. 제안된 6픽셀 4-레 벨에서 다음을 만족하는 코드워드들의 76개이다. 3개의 심볼을 입력 심볼로 변조되기 때문에 변조부호에 필요 한 64개의 코드워드들을 선택하였다. 그림 2는 선택된 64개의 코드워드들이다. 예를 들어, 입력 심볼이 {0, 0, 0}이면 그림 2의 C00인 {0, 1, 1, 2, 3, 3}으로 변조된다. 홀로그래픽 저장 장치는 2차원으로 인접 심볼 간 간 섭을 만들기 때문에 가장 큰 레벨과 가장 작은 레벨이 인접하면 큰 오류 값이 발생하여 정정이 어렵다. 2차원 ISI를 완화하기 위해 제안된 균형 변조부호는 가장 큰 레벨과 가장 작은 레벨이 인접하는 최악의 2차원 ISI를 제거하였다. 그림 3는 제안된 균형 변조부호와 랜덤 데 이터와의 심볼 별 분포도이다. 랜덤 데이터는 제안된 균 형 변조부호에 비해 균일하게 분포되어 있다. 제안된 균 형 변조부호는 랜덤 데이터보다 심볼 간의 겹치는 구간 이 적음으로 심볼 간의 간섭이 적음을 확인할 수 있다. 제안된 균형 변조부호는 복조를 위해 ML(Maximum Likelihood) 검출기를 사용하였다. ML 검출기는 채널을 통과 한 코드워드의 각 심볼들의 유클리디안 거리를 얻 기 위해 다음과 같이 계산된다.

$$d(C_i^*, C_i) = \sum_{j=0}^{5} (C_{ij}^* - C_{ij})^2$$
(1)

여기서 $C_i^* \leftarrow i$ 번째 채널 통과한 코드워드, $C_i \leftarrow i$

번째 변조된 코드워드, $C_{ij}^* 는 i 번째 채널 통과한 코드$ $워드에서 j 번째 심볼, <math>C_{ij} 는 i 번째 변조된 코드워드에$ 서 j 번째 심볼을 의미한다. ML 검출기를 통해 얻은 데이터를 이용하여 최소 거리를 갖는 코드워드를 찾는다.

Ⅲ.실 험

1. HDSS 채널 모델

홀로그래픽 채널은 CCD (charge-coupled detector) 배열을 통해 출력 데이터를 만든다. 신호의 희미한 정 도를 모델링 하기 위해 입력 페이지에서 (x, y)위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.^{[9} ~10]

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

여기서 σ는 분산된 신호의 퍼짐 정도를 나타내는 블 러(Blur)를 의미하며, 블러가 커지면 2차원 ISI가 증가 한다.

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

배열을 통해 출력된 데이터가 제대로 된 위치에 있지 못하게 된 상태를 어긋남이라 한다. 이 어긋남은 데이 터의 신호 품질에 영향을 미친다.^[9] *x*축의 어긋남을 *m_x*라하고 *y*축의 어긋남을 *m_y*로 정의한 연속적인 PSF는 다음과 같다.^[6~8]

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

실험은 한 페이지당 1024×1024의 크기로 1000 페이 지를 하였다. 신호대 잡음비(SNR)는 다음과 같이 정의 하였다.

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

또한 성능을 향상시키기 위하여 PRML (partial response maximum likelihood) 시스템을 HDSS에 적용 하였다. 등화기는 유한 임펄스 응답에 의한 5×5 계수와 PR 타겟은 (131)을 사용하였다. 먼저 입력 데이터를 무 작위로 생성한다. 4-레벨의 심볼은 변조기를 통하여 데 이터 변조 홀로그램 채널을 통하고 부가 백색 가우시안 잡음 (AWGN)이 추가된다. 잡음이 섞인 데이터는 등화 기와 비터비 검출기 (Viterbi dedector)를 지나 복조 (demodulator)된다. 마지막으로 복조된 4-레벨 심볼들 은 이진 데이터로 복조된다.

2. 실험 결과

면밀한 실험 결과를 얻기 위해 같은 코드율을 갖는 랜덤 데이터와 비교할 필요가 있다. 제안된 균형 변조 부호의 코드율이 1.0 (bit/pixel) 이므로 1/2 (symbol/ pixel)을 갖는 반복 변조부호를 생성하였다. 그림 4는 1/2 반복 변조부호의 구조이다. 그림 4에서 하나의 심볼 은 2개의 픽셀을 갖는다. 예를들어, 랜덤 입력 심볼 {0, 0, 1}은 {00, 00, 11}로 변조된다.



그림 4. 반복 변조부호 코드워드 구조 Fig. 4. Codeword structure of repetition modulation code.



Fig. 5. BER comparison according to SNR at Blur = 1.0.

그림 5는 제안된 균형 변조부호와 랜덤 데이터 및 1/2 반복 변조부호의 SNR 대비 BER (Bit Error Rate) 성능 결과이다. 향상된 성능 비교를 위해 채널 통과 후 데이터, 비터비 검출 후 데이터 및 복조 후 데이터를 비 교하였다. SNR 13 dB에서 제안된 균형 변조부호는 랜 덤 데이터보다 4 dB 이상 더 좋은 성능을 보였다. 또한 비터비 검출기 통과 후 제안된 균형 변조부호는 1/2 반 복 변조부호에 비해 약간의 성능 향상 차이를 보였다. 하지만 복조 후 큰 성능 향상을 확인하였다. 게다가, SNR이 증가 할수록 그 차이는 더 커졌다.



그림 6. SNR = 14dB 일 때 블러에 따른 BER 성능 Fig. 6. BER comparison according to blur at SNR=14dB.

그림 6은 SNR 14 dB에서 블러의 변화에 의한 BER 성능을 나타내는 그래프이다. 제안된 균형 변조부호는 블러가 1.3 까지 랜덤 데이터보다 좋은 성능을 보였다. 또한 블러 1.4 까지는 제안된 균형 변조부호의 성능이 1/2 반복 변조부호의 성능보다 비슷하거나 높은 성능을 보였다.

그림 7은 페이지의 어긋남이 존재할 때 성능 비교 그 래프이다. SNR 12 dB에서 제안된 균형 변조부호는 랜 덤 데이터보다 1 dB 이상 좋은 성능을 보인다. 또한 제 안된 균형 변조부호의 성능은 1/2 반복 변조부호의 성 능과 비슷하지만 SNR 11 dB 이후 성능 차이는 더 커 졌다. 어긋남 (10%, 10%)과 어긋남 (0%, 0%)에서의 제 안된 균형 변조부호의 성능은 랜덤 조건의 데이터들의 성능과 비슷하지만 어긋남 (20%, 20%) 에서의 성능은 더욱 증가한다.



그림 7. 어긋남 정도에 따른 BER 성능 비교 Fig. 7. BER comparison according to misalignment.

Ⅳ.결 론

본 논문에서는 홀로그래픽 데이터 저장장치에서 부

호율이 1.0 (bit/pixel)인 4-레벨 6픽셀 균형 변조부호를 제안하였다. 제안된 균형 변조부호는 가장 큰 심볼과 가장 작은 심볼이 인접하지 않음으로써 2차원 ISI를 완 화하고, 또한 균형 변조부호로써 페이지간의 밀도를 일 정하게 하여 IPI를 완화할 수 있다. 제안된 균형 변조부 호의 성능은 랜덤 데이터 및 1/2 반복 변조부호에 비해 좋은 성능을 보였다.

REFERENCES

- 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] 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, April 2013.
- [3] S. Jeong and J. Lee, "Multilevel Modulation Codes for Holographic Data Storage," Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 52, no. 6, pp. 1581–1586, September 2015.
- [4] G. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. Hoffnagle, C. Jefferson, and M. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," Opt. Lett, Vol. 23, no. 15, pp. 1218, August. 1998.
- [5] B. King, G. Burr, and M. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage," Appl. Opt., Vol. 42, no. 14, pp. 2546–2559, May. 2003.
- [6] 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, April 2013.
- [7] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Günter, R. M. Macfalane and G. T. Sincerbox, "Pixel-matched holographic data storage with megabit pages," Opt. Lett, Vol. 22, no. 19, pp. 1509, August. 1997.
- [8] 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. 8–12, September 2015.
- [9] N. Kim and J. Lee, "Two-dimensional codes for holographic data storage systems," J. KICS, Vol. 31, no. 11, pp. 1037–1043, November. 2006.
- [10] 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, Jul. 2010

- [11] 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.
- [12] 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, October 2012.
- [13] 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.
- [14] J. Lee and J. Lee, "4-level Error Correcting Modulation Codes for Holographic Data Storage System," J. KICS, Vol. 39, no. 10 pp. 610–612, September 2014.
- [15] K. Yang, J. Kim and J. Lee, "Mis-alignment Channel Performance of Error Correcting 4/6 Modulation Codes for Holographic Data Storage," J. KICS, Vol. 35, no. 12 pp. 971–976, December 2010.
- [16] 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, March 2011.
- [17] 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.
- [18] 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. 08KB03-1-08KB03-5, 2010.
- [19] N. Kim, J. Lee, and J. Lee, "Rate 5/9 two-dimensional pseudo-balanced code for holographic data storage systems," Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 45, no. 2B, pp. 1293–1296, 2006.



- 저 자 소 개 -

전자공학부 학사

보통신공학과 석사과정

이 재 진(정회원) 1983년 2월 연세대학교 전자공학과 1984년 12월 U. of Michigan, Dept.

1994년 12월 Georgia Tech. Sch. of ECE 박사

학사

of EECS 석사

1995년 1월~1995년 12월 Georgia Tech. 연구원

1996년 1월~1997년 2월 현대전자 정보통신연구소 책임 연구원

1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수

2005년 9월~현재 숭실대학교 전자정보공학부 교수 < 주관심분야: 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스템>