http://dx.doi.org/10.7840/kics.2014.39A.10.574

홀로그래픽 데이터 저장장치를 위한 4레벨 6/9 변조부호

김 병 선◆, 박 근 환*, 이 재 진°

4-level 6/9 Modulation Code for Holographic Data Storage

Byungsun Kim◆, Keunhwan Park*, Jaejin Lee°

요 약

홀로그래픽 데이터 저장장치는 높은 저장용량, 빠른 전송 능력, 그리고 짧은 접근 시간 등의 장점을 가진다. 하지만 홀로그래픽 데이터 저장장치는 페이지 단위로 데이터를 처리하기 때문에 생기는 2차원 인접 심볼간 간섭과 하나의 체적에 여러 면의 페이지를 기록하여서 생기는 인접 페이지간 간섭의 심각한 성능 열화의 요소가 존재한다. 본 논문에서는 한 픽셀에 여러 레벨의 심볼을 저장하는 경우 발생할 수 있는 인접 심볼간 간섭을 줄이기 위한 4-레벨 6/9 변조부호를 제안한다.

Key Words : Holographic data storage, Multi-level 6/9 Modulation code, 2D Inter-symbol interference

ABSTRACT

A holographic data storage (HDS) has some advantages of high storage capacity, fast transmission, and short access time. However, there are two major concerns with the system which are two-dimensional (2D) inter-symbol interference (ISI) and inter-page interference (IPI). Thus, this paper proposes a 4-level 6/9 modulation code which mitigate inter-symbol interference (ISI).

Ⅰ. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장시스템 (holographic data storage system, HDS)은 표면에 정보를 저장하는 광기록 저장장치(CD, DVD, BD)나 자기기록 저장 장치(hard disk drive, HDD)와는 다르게 매질의 체적에 데이터를 저장하기 때문에 저장용량을 현저히 증가시킬 수 있다. 이 때문에 근접장 기록(near field recording, NFR)이나 SUPER_RENS (Super - REsolusion Near-Field Structure)와 함께 차세대 광기록 저장장치로 연구되고 있다. HDS는 기록과 재생이 페이지 단위로 이루어지므로 한 페이지가 가지는 총 비트 수와 다중화된 홀로그램 수의 곱으로 저장 매질의 총 저장용량이 결정된다. 입력 데이터가 홀로그램의 체적 내에서 2차원 페이지의 단위로 기록하고 읽기 때문에 저장용량을 크게 증가시킬 수 있다. (즉, 데이터 저장용량은 한 공간에 많은 페이지를 저장하면 할수록, 그리고 한 페이지에 많은 데이터를 저장하면 할수록 증가한다.) 또한 2차원 페이지 단위로 신호처리가 가능하기 때문에 데이터 전송속도 또한 매우 증가시킬 수 있다. 기존의 데이터 저장장치와 같이 표면에 정보를 저장하는 데이터 저장장치에서 주로 오류를 범하게 하는 요인이 인접심볼간 간섭 (inter-symbol interference, ISI)이라면 HDS는 페이지 단위로 매질의 체적에 겹쳐 쓰면서 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭 (inter-page interference, IPI)이 존재한다[1-3]. 그리고

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).
◆ First Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, kimbs@ssu.ac.kr, 학생회원
° Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원
* Soongsil University, School of Electronic Engineering, pkhroma@gmail.com
논문번호 : KICS2014-09-359, Received September 25, 2014; Revised October 1, 2014; Accepted October 1, 2014.

페이지 단위로 데이터를 쓰고 읽기 때문에 ISI가 2차원으로 영향을 준다. 이진 픽셀의 경우 가장 큰 ISI를 일으키는 상황은 0 (혹은 1) 픽셀이 1 (혹은 0) 픽셀들로 둘러싸인 경우와 같은 고립된 픽셀 패턴(isolated pixel patterns)이다[4-10]. HDS가 멀티레벨인 경우는 최하위 레벨과 최상위 레벨이 인접한 경우 최상위 레벨의 심볼이 최하위 레벨의 심볼에게 심한 간섭을 일으키게 된다. 따라서 멀티레벨의 경우에 ISI를 줄이기 위해서는 최상위 레벨 심볼과 최하위 레벨 심볼이 인접하지 않게 하여야 한다. 그림 1은 4-레벨 심볼인 경우, 0 픽셀과 3 픽셀이 인접하여 이웃한 픽셀에 큰 ISI를 발생하는 예이다.

본 논문에서는 그림 1과 같이 레벨 0 심볼과 레벨 3 심볼이 인접하는 상황이 발생하지 않도록 하기 위한 변조부호를 제안하였다. Ⅱ장에서는 본 논문에서 제안된 4-레벨 6/9 변조부호에 대하여 설명한다. Ⅲ장에서는 시뮬레이션 환경 및 결과를 보여주고, 마지막 Ⅳ장에서는 앞 장의 결과를 바탕으로 결론을 내린다.

Ⅱ. 제안된 4-레벨 6/9 변조부호

한 픽셀이 가질 수 있는 심볼의 종류가 4-레벨이므로 입력되는 두 비트 (예: 00, 01, 10, 11)를 하나의 심볼로 만든다. 그림 2는 3×3 배열의 코드워드 구조와 제안된 변조부호의 구성 방법을 보여준다. 6개의 심볼 데이터가 입력되어 9개의 심볼 데이터로 3×3 배열의 형태로 출력되게 되며, 한 코드워드는 두 부분으로 나뉘어져 있다. (a, e, i) 위치의 픽셀들은 {0, 1, 2, 3} 레벨의 심볼이 올 수 있다. 나머지 픽셀들은 {1, 2} 레벨의 심볼만 가능하다. 이렇게 하면 인접한 픽셀이 그림 1과 같이 0 심볼과 3 심볼이 이웃하는 경우가 생기지 않게 된다.

그림 3은 두 코드워드를 연결하였을 때, 제안된 변조부호로 이루어진 코드워드가 인접한 어느 심볼도 레벨 0과 레벨 3이 인접하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 제안된 변조부호는 2D-ISI를 완화할 수 있다. 제안된 변조부호의 코드율은 0.667(=6/9)이며 픽셀당 4/3비트를 기록한다.

6 심볼 (12 비트)의 입력 데이터는 그림 4와 같이 9 픽셀의 출력 코드워드로 변조된다. 먼저, a_0, a_1, a_2는 B_0, B_4, B_8에 각각 순서대로 1-1 대응되고, 표 1에 있는 매핑 규칙에 따라 a_3은 B_1과 B_3 픽셀에 해당하는 심볼들을 할당하고, a_4는 B_2와 B_6에, a_5는 B_5와 B_7에 각각 표 1과 같이 각 픽셀의 심볼값이 정해진다. 복조 과정은 데이터 변조 과정이 1:1 맵핑 방식이므로 변조 과정의 역순으로 진행된다.

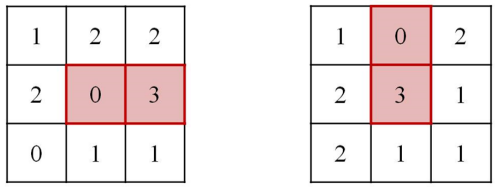

Fig. 1. Examples of severe ISI in four-level HDS

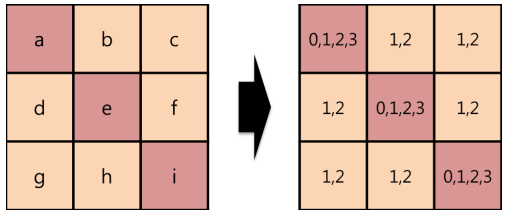

Fig. 2. Structure of a codeword in the proposed modulation code

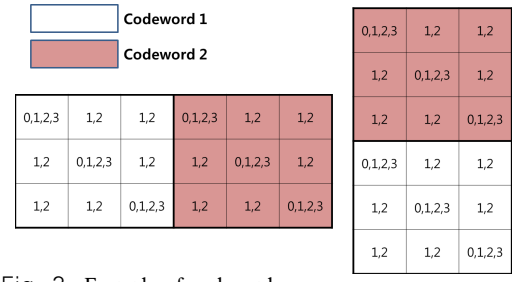

Fig. 3. Example of codewords

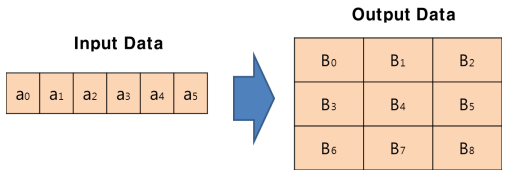

Fig. 4. Structure of encoding scheme.

Table 1. Symbol mapping rule

a_3, a_4, a_5	(B_1, B_3), (B_2, B_6), (B_5, B_7)
0	(1, 1)
1	(1, 2)
2	(2, 1)
3	(2, 2)

Ⅲ. 시뮬레이션 및 결과

3.1 채널 모델

제안된 변조부호의 성능을 확인하기 위해 HDS 채

널 모델을 구현하여 시뮬레이션 하였다. HDS 채널은 charge-coupled detector (CCD) 배열을 이용해 모델링 되며, 연속적인 point-spread function (PSF) 은 식 (1)과 같이 모델링 된다.

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

여기서 σ_b는 신호의 분산 정도를 나타내는 블러(blur)를 의미하며, 실험에서는 1로 하였다. 이 값이 클수록 많은 데이터를 저장할 수 있게 되지만, 반대로 ISI는 증가하여 성능이 악화된다.

채널을 통과하여 나온 신호 $r[p, q]$는 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$r[p,q] = d[p,q] \otimes h[p,q] + n[p,q] \quad (2)$$

여기서 $d[p, q]$는 2차원 입력신호를 의미하며, $\otimes$는 콘볼루션 연산자이다. 그리고 $n[p, q]$는 부가백색 가우시안 잡음 (additive white Gaussian noise, AWGN)을 의미한다. 신호대 잡음비 (signal-to-noise ratio, SNR)는 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10}(1/\sigma^2) \quad (3)$$

또한 어긋남 채널의 PSF는 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$h[p,q] = \int_{q-\alpha/2+m_y}^{q+\alpha/2+m_y} \int_{q-\alpha/2+m_x}^{q+\alpha/2+m_x} h(x,y)\,dx\,dy \quad (4)$$

여기서 m_x와 m_y는 각각 x축과 y축으로의 어긋남을 의미한다[11].

그림 5는 시뮬레이션의 전체 블록도를 나타낸다. 신호검출을 위하여 부분응답 최대유사도 (partial response maximum likelihood, PRML) 시스템을 HDS에 적용하였다. 채널의 부분응답 신호로 수직방향과 수평방향 모두 PR(1, 3, 1) 신호를 사용하였으며, 등화기(equalizer)는 유한 임펄스 응답에 의한 5×5 계수로 구현하였다. 최대유사도 검출기는 연판정출력 비터비 알고리즘 (soft output Viterbi algorithm, SOVA)으로 구현하였다[6]. 시뮬레이션 과정은 먼저 4-레벨 입력 데이터 $a[k]$를 랜덤하게 생성한다. 그 후 변조기를 통하여 인코딩된 코드워드들이 한 페이지를 구성하게 되면 각 픽셀에 해당하는 $d[p, q]$가 홀로그램 채널을 통하여 전달되고 AWGN이 추가된다. AWGN은 전송신호에 잡음을 더하여 이루어지는데 일정한 밀도의 잡음이 전체대역에 균일하게 분포한다. 잡음이 섞인 수신된 신호 $r[p, q]$는 2차원 등화기와 비터비 검출기(Viterbi dedector)를 지나게 된다.

3.2 시뮬레이션 결과

실험은 한 페이지당 1024×1024의 크기로 1000 페이지를 시뮬레이션 하여 비트오류율 (bit error rate, BER)을 구하였다. 그림 6은 SNR 대비 제안된 4-레벨 변조부호와 랜덤 신호의 BER 성능비교 결과이다. SNR=12dB 이후부터 랜덤한 경우보다 BER 성능이 우수해진다. 랜덤한 경우는 완만하게 성능이 좋아지는데 반해 제안된 변조부호는 급격하게 성능이 향상됨을 볼 수 있다. 그림 7은 블러의 변화에 따른 BER 그래프이다. 블러가 1.4 보다 작은 경우 제안된 4-레벨 변조부호의 성능이 랜덤한 경우보다 우수하며 그 이후로는 비슷한 성능을 보임을 알 수 있다. 이것은 블러가 어느 한계를 벗어나도록 커지면 레벨간의 애매함이 점점 커져서 신호검출의 한계를 보이기 때문이다. 하지만 블러의 크기가 어느 정도의 한계 이내에서는 제안된 변조부호를 사용하므로써 부호이득 (coding gain)을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 그림 6, 7을 통해 제안된 4-레벨 6/9 변조부호가 어느 정도 보장된 채널 환경에서 임의의 데이터 시퀀스보다 좋은 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 페이지 어긋남 (misalignment)이 존재할 때의 성능을 비교한 결과이다. 제안된 변조부호가 대체적으로 임의의 데이터 보다 높은 성능을 보임을 알 수 있다.

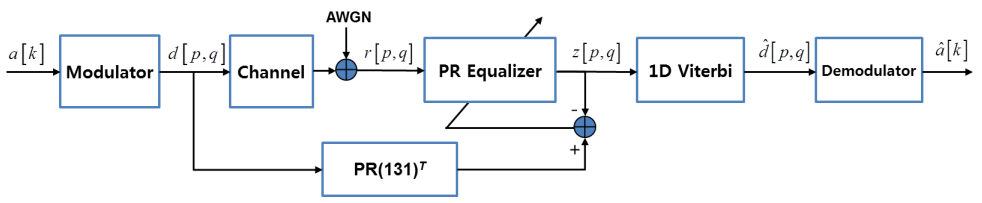

Fig. 5. Simulation model

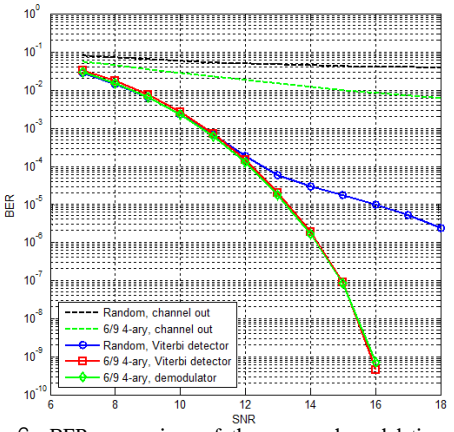

Fig. 6. BER comparison of the proposed modulation code according to SNR

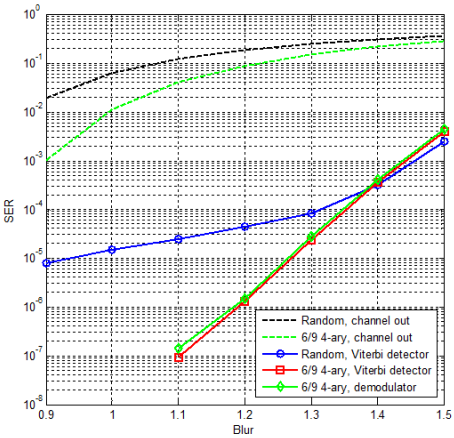

Fig. 7. BER comparison of the proposed modulation code according to blur

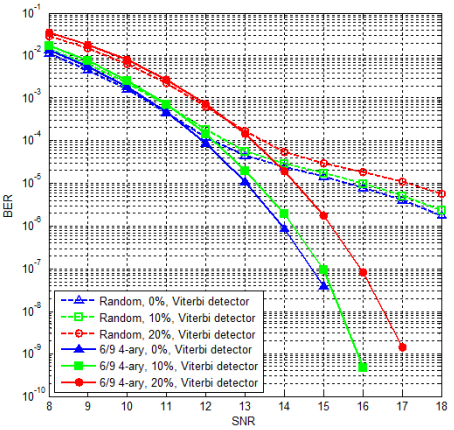

Fig. 8. Mis-alignment performance of the proposed modulation code according to SNR

그림 9는 제안된 변조부호와 임의의 데이터간의 심볼 분포도이다. 제안된 변조부호의 심볼들이 서로간의

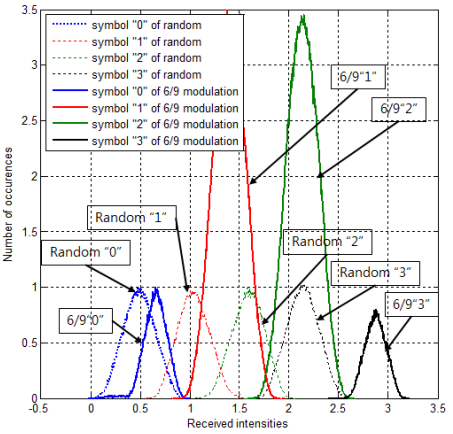

Fig. 9. Distribution of the proposed modulation code symbols

겹치는 구간이 적은 것을 볼 수 있으며, 이것은 심볼간의 간섭이 적음을 나타낸다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 HDS에서 데이터의 ISI를 완화하여 검출 성능을 향상시킬 수 있는 4-레벨 6/9 변조부호를 제안하였다. 제안된 변조부호는 채널의 상태가 아주 열악하지 않은 상황에서는 랜덤한 데이터 시퀀스보다 우수한 성능을 보인다. 또한 심볼의 어긋남(Misalignment)을 주었을 때도 높은 성능 이득을 확인할 수 있었고 각 심볼간의 분포도를 통해 랜덤한 심볼들의 경우보다 심볼간의 간섭이 적음을 확인할 수 있다.

References

[1] R. M. Shelby, J. A. Hoffnagle, G. W. Burr, C. M. Jefferson, M.-P. Bernal, H. Coufal, R. K. Grygier, H. Gunter, R. M. Macfalane, and G. T. Sincerbox, “Pixel matched holographic data storage with megabit pages,” *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 19, pp. 1509-1511, 1997.

[2] D. Psaltis, A. Pu, M. Levene, K. Curtis, and G. Barbastathis, “Holographic storage using shift multiplexing,” *Opt. Lett.*, vol. 20, no. 7, pp. 782-784, 1995.

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

[4] 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, 1999.

[5] J. Kim and J. Lee, "Two-dimensional non-isolated pixel modulation code for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 34, no. 2, pp. 163-168, Feb. 2009.

[6] J. Kim and J. Lee, "Performance of two-dimensional soft output Viterbi algorithm for holographic data storage." *J. KICS*, vol. 37, no. 10, pp. 815-820, Oct. 2012.

[7] G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, O. K. Greygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson, and B. Marcus, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 639-641, 1997.

[8] G. Kim and J. Lee, "2/3 modulation code and its Vterbi decoder for 4-level holographic data storage," *J. KICS*, vol. 38, no. 10, pp. 827-832, Oct. 2013.

[9] 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, Feb. 2006.

[10] S. Lee, "Two-dimensional 6/9 code for holographic data storage," Undergraduate Thesis for School of Electronics, Soongsil University, May 2013.

[11] G. Yang, J. Kim, and J. Lee, "Mis-alignment channel performance of error correcting 4/6 modulation code for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 971-976. Dec. 2010.

김 병 선 (Byungsun Kim)

2012년 2월 : 정보통신공학과 학사

2012년 9월~현재 : 숭실대학교 정보통신공학과 석사 재학 중

<관심분야> 스토리지 시스템, 오류정정부호, 채널코딩

박 근 환 (Keunhwan Park)

2012년 2월 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 학사

2014년 9월~현재 : 숭실대학교 대학원 정보통신공학과 석사 재학 중

<관심분야> 스토리지 시스템, 통신시스템, 채널코딩

이 재 진 (Jaejin Lee)

(2014년 9월호 참조)