

홀로그래픽 저장 장치를 위한 2차원 고립 픽셀 제거 변조 부호

준회원 김진영*, 종신회원 이재진*

Two-Dimensional Non-isolated Pixel Modulation Code for Holographic Data Storage

Jinyoung Kim* Associate Member, Jaejin Lee* Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 홀로그래픽 저장 장치에서 가장 큰 문제점인 고립 픽셀을 허용하지 않는 2차원 변조 부호를 제안한다. 제안하는 2차원 변조 부호는 기존에 사용하던 6/8 변조 부호보다 부호화와 복호화가 간단하며 데이터 검출을 어렵게 하는 1 비트의 고립된 형태를 완벽하게 제거한다. 기존에 사용하던 6/8 변조 부호는 약간의 고립 픽셀을 허용한다. 결과를 보면 blur가 1.4일 때 제안한 변조 부호가 6/8 변조 부호보다 전체적으로 성능이 좋다. 제안한 변조 부호는 수신된 값을 4비트로 양자화 하였을 때 최적의 성능을 낸다.

Key Words : Holographic, Two-Dimensional Modulation Code, isolated pattern, 2D ISI, blur

ABSTRACT

In this paper, a two-dimensional (2D) modulation code is introduced. The proposed code does not have any isolated pixel that is the most unwanted problem for holographic data storage. The proposed 2D modulation code is simpler than conventional 6/8 code and removes all the isolated 2D ISI patterns. As a result, when the grade of blur is 1.4, the proposed modulation code has better performance overall than conventional 6/8 modulation code. The proposed code has the optimal performance when 4bit quantization is applied.

I. 서 론

홀로그래픽 데이터 저장 장치(Holographic Data Storage, HDS)는 표면에 정보를 저장하는 광기록 저장 장치(CD, DVD, BD)나 자기기록 저장 장치(Hard Disk Drive, HDD)와는 다르게 매질의 체적에 데이터를 저장하기 때문에 저장 용량을 현저히 증가시킬 수 있다. 이 때문에 NFR(Near Field Recording)이나 Super-RENS(Super-REsolution Near-Field Structure)와 함께 차세대 저장 장치로 부각

되고 있다. 기존의 표면에 정보를 저장하는 장치에서 주요 오류를 범하게 하는 요인이 인접 심볼간 간섭(Intersymbol Interference, ISI)이라면 HDS는 페이지 단위로 매질의 체적에 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭(Inter Page Interference, IPI)가 존재한다^{[1][2]}. 또한 페이지 단위로 데이터를 쓰고 읽기 때문에 ISI가 2차원으로 영향을 준다. 데이터 저장 용량은 한 공간에 많은 페이지를 저장 하면 할수록, 또한 한 페이지에 많은 데이터를 저장 하면 할수록 늘릴 수 있다. 하지만 이때 2차원 ISI와 IPI

* 본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

* 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(kijiyou@paran.com), (zlee@ssu.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-12-541, 접수일자 : 2008년 12월 8일, 최종논문접수일자 : 2009년 1월 6일

문제는 더 심각해지기 때문에 해결해야만 하는 문제이다.

첫 번째로 IPI를 줄이기 위해서는 각각의 페이지의 “0” 비트와 “1” 비트의 비율이 1:1로 거의 비슷하게 있어야 한다^[3]. 두 번째로 2차원 ISI를 줄이기 위해서는 저역 통과 필터 효과를 참작하는 것이다^[4]. 이를 위해 기존에 2차원 변조 부호에 대한 연구가 많이 진행 되어 왔다^{[5]-[7]}.

본 논문에서는 한 페이지에 “0” 비트와 “1” 비트의 비율이 거의 비슷한 2차원 변조 부호를 디자인했다. 이 부호는 ISI를 심각하게 일으킬 수 있는 1비트가 고립된 부호 모양이 없다. 5 비트 입력에 8 비트 출력으로 되어 있으며 따라서 부호율은 5/8(=0.625)이다. 본 논문의 실험은 기존에 많이 사용되고 있는 6/8 변조 부호^[5]와 비교하여 얻은 결과들이다.

II. 제안한 2차원 변조 부호

그림 1은 제안된 2차원 5/8 변조 부호의 부호화 규칙이다. 이 부호의 부호율은 0.625(=5/8)이고 5비트의 입력비트를 받아 4×2 행렬의 8비트 코드워드를 생성한다. 코드워드는 두 부분으로 나뉘어져 있는데 그 중 한 부분은 A, B, G, H 로 이루어져 입력된 두 개의 비트를 이용해 상태를 만든다. 다른 부분은 C, D, E, F 로 이루어져 있으며 입력된 나머지 3개의 비트를 이용해 4비트의 부호화된 2×2 행렬로 표시된다. {A, G}와 {B, H}는 각각 현재 상태와 다음 상태를 나타낸다. 맨 처음에 {A, G}를 0 상태로 초기화 한다. 그리고 5비트의 입력이 들어오면 앞에 입력받은 2비트는 {B, H}에 입력으로 넣



그림 1. 제안된 2차원 고립 픽셀 제거 변조 부호의 부호화 규칙

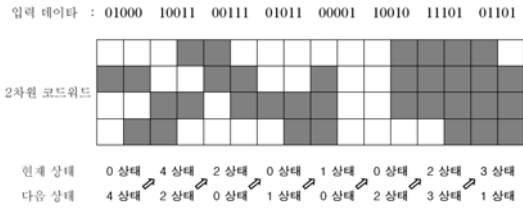


그림 2. 5/8 변조 부호화 예제

는다. 남은 3비트를 이용해 초기 조건 0 상태와 맞는 부호화된 2×2 행렬인 C, D, E, F를 결정한다. 다음에 5비트가 입력이 되면, 전 코드워드에 있던 {B, H}를 현재 코드워드의 {A, G}로 복사한다. 그리고 처음에 2비트를 {B, H}에 넣고 나머지 3비트와 {A, G}에 따른 상태에 맞춰 2×2 행렬 C, D, E, F를 결정한다. 현재 코드워드 상태는 전 코드워드의 {B, H}의 상태에 따라 정해진다. 이렇게 하면 1 비트가 고립되어 있는 부호 모양이 생기지 않는다. 부호화 방법은 다음과 같다.

- (1) 초기의 코드워드는 “0 상태”로 한다. A, G에 0을 입력한다.
- (2) 5비트 입력 중에 앞의 2비트를 B, H에 넣는다.
- (3) 현재의 A, G의 상태에 따라 입력의 나머지 3비트로 2×2 행렬인 C, D, E, F를 결정한다.
- (4) 다음 코드워드의 A, G에 현재 코드워드의 B, H를 복사한다.
- (5) 입력이 남은 경우 (2)번으로 돌아간다.

그림 2에 5/8 변조 부호화의 예제가 있다. 복호화 방법은 유클리디안 거리를 이용해 근접 거리 검출방법을 이용하였다.

III. 실험 환경 및 결과

홀로그래픽 채널은 CCD(charge-coupled detector) 배열을 이용해 모델링 되며^[6], 연속적인 빛 번짐 현상은 다음과 같이 모델링 된다.

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

여기서 σ_b 는 분산된 신호의 희미한 정도(blur)를 나타내며 σ_b 의 값이 클수록 많은 데이터를 저장할 수 있어 저장 용량은 커지겠지만 인접 심볼간 간섭이

증가해 비트 오류 (BER) 성능이 나빠진다. 이산 빛 변집 현상은 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

여기서 m_x 와 m_y 는 각각 수평 방향과 수직 방향의 어긋남을 나타낸다.

채널을 통과한 신호 $r[p, q]$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r[p, q] = d[p, q] \otimes h[p, q] + n[p, q], \quad (3)$$

여기서 $d[p, q]$ 는 입력된 2차원 신호이고, \otimes 는 2차원 콘볼루션 연산자이며, $n[p, q]$ 는 부가적인 백색 가우시안 잡음(AWGN)이다. 불연속 빛 변집 현상에 대한 범위를 5×5 배열 픽셀로 하였다.

본 논문에서 행한 실험의 블록 다이어그램이 그림 3에 나와 있다. 1차원 입력 데이터 $a[p]$ 를 제안된 변조부호나 6/8 변조 부호화를 시키면 2차원 데이터 $d[p, q]$ 가 생성된다. 이 데이터를 홀로그래픽 채널에 통과시키고 AWGN을 더해 $r[p, q]$ 를 만든다. 여기서 근접 거리 검출 방법으로 $\hat{d}[p, q]$ 를 검출하고 변조 부호의 복호화를 진행해 $\hat{a}[p]$ 를 최종 결과 값으로 출력한다. 실험은 한 페이지당 1024×1024 의 크기로 1000 페이지를 하였다. blur는 1.4로 했으며 수직 방향과 수평 방향의 어긋남은 각각 10%씩을 주었다.

신호 대 잡음비(SNR)는 다음과 같이 정의하였다.

$$SNR = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{\sigma_w^2} \right), \quad (4)$$

여기서 σ_w^2 는 AWGN 잡음 전력이다.

그림 4는 비트별 분리 특성을 변조 부호별로 보여주고 있다. 변조 부호를 안 쓴 데이터의 경우 “0”

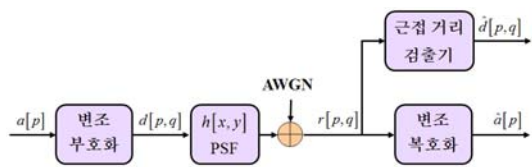


그림 3. 전체 시스템의 블록 다이어그램

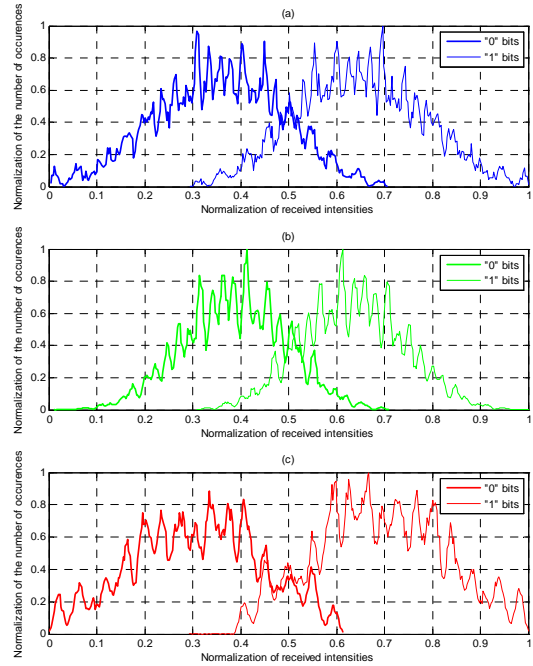


그림 4. blur=1.4일 때 변조 부호별 수신 강도 (a) 변조 부호 안 쓴 경우, (b) 6/8 변조 부호를 쓴 경우, (c) 제안한 5/8 변조 부호를 쓴 경우.

비트와 “1” 비트가 겹치는 부분 (오류 발생 요인)이 변조 부호를 쓴 경우보다 많은 것을 볼 수 있다. ISI가 있으면 “0” 비트의 수신 강도가 커지거나 “1” 비트의 수신 강도가 작아질 수 있다. ISI가 제일 심할 경우는 “1” 비트가 고립 되어 있는 형태인데, 변조 부호를 안 쓴 경우와 6/8 변조 부호를 사용한 경우 “1” 비트 고립 되어 있는 형태가 존재하기 때문에 “0” 비트 수신 강도의 최대값이 0.7과 “1” 비트 수신 강도의 최소값이 0.3이다. 그와는 반대로 5/8 변조 부호를 사용한 경우는 “1” 비트 고립 되어 있는 형태가 존재 하지 않기 때문에 “0” 비트 수신 강도의 최대값이 0.6과 “1” 비트 수신 강도의 최소값의 0.4 정도의 값을 가진다. 이 값들은 순차적으로 검출하는 2차 SOVA에서 큰 에러 값을 가지며 결과적으로 안 좋은 결과를 준다.

6/8 변조 부호를 사용한 경우 인코딩은 1:1 매핑으로 쉽게 할 수 있지만 복호의 경우 26 가지에 대해서 거리를 측정해 최소거리를 선택해야 한다. 이 경우 계산량은 크지만 코드워드를 잘 선택하였을 경우 부호 이득을 얻을 수 있는 장점이 있다. 연판정 값으로 거리를 측정할 경우가 경판정 값으로 거리를 측정할 때 보다 좋은 성능을 보인다. 제안한 5/8 변조 부호를 사용한 경우 복호화할 때 상태

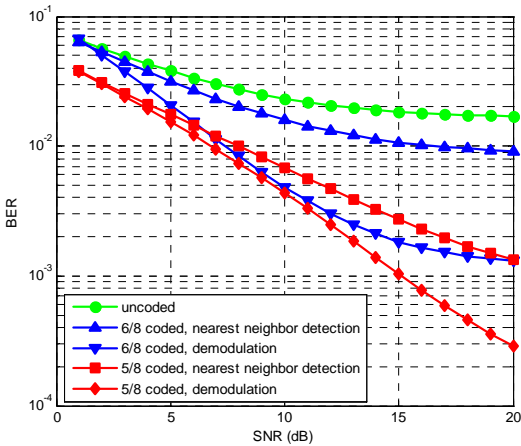


그림 5. 변조 부호별 SNR 대 비트 오류

정보를 구분하는데 22가지, 그 외의 정보를 구분하는데 23가지의 거리를 측정해 최소거리를 선택하면 되므로 6/8 변조 부호보다는 계산량이 많이 감소하지만 부호의 최소거리가 작기 때문에 부호 이득을 얻기에는 무리가 있다. 그렇기 때문에 연판정으로 거리를 측정하는 것과 경판정으로 거리를 측정할 때의 성능 차이가 크지 않다.

그림 5는 검출기별로 SNR 대 비트 오류를 나타낸다. 변조 부호를 사용하지 않은 경우는 전체적으로 안 좋은 성능을 나타낸다. 제안한 5/8 변조 부호가 성능이 제일 좋은 것을 볼 수 있다. 변조 부호를 사용하지 않은 경우에는 비트 오류가 가장 좋았을 때가 0.017정도이고, 6/8 변조 부호의 경우는 0.0013 정도, 5/8 변조 부호의 경우 2.85×10^{-4} 정도의 성능을 보였다.

그림 6은 수신 신호를 양자화를 했을 경우의 비트 오류를 나타낸다. 양자화는 최대값이 +2와 -2사이를 비트로 표현할 수 있도록 값을 나눴다. 만약 1비트 양자화를 했다면 +1 과 -1로, 2비트 양자화 했다면 +1.5, +0.5, -0.5, -1.5로 나눴다. 6/8 부호의 경우 1~2 비트로 양자화를 해서 변조된 부호를 복호할 경우, 근접 거리 검출 방법의 비트 오류보다 오히려 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있으며, 4비트로 양자화 했을 경우보다 양자화를 하지 않고 수신된 값을 그대로 썼을 경우의 성능이 많이 좋다. 반면 제안한 5/8 부호의 경우 1~2 비트로 양자화를 하여도 근접 거리 검출 방법보다 성능이 좋다. 4비트로 양자화 했을 경우와 양자화를 하지 않고 수신된 값을 그대로 변조 복호화 하는데 사용한 경우의 성능이 비슷하다. 5/8 부호는 최대 4비트로 양자화

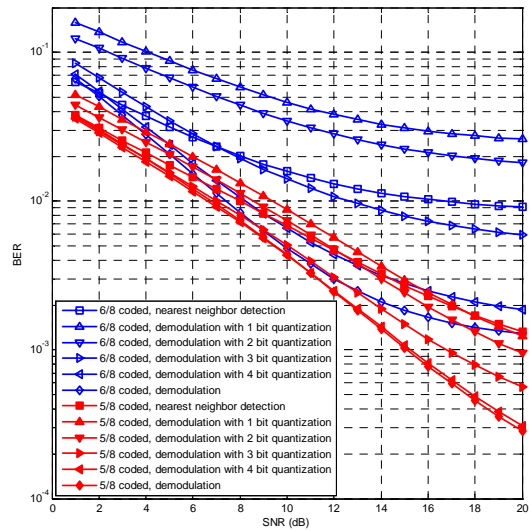


그림 6. 양자화별 SNR 대 비트 오류

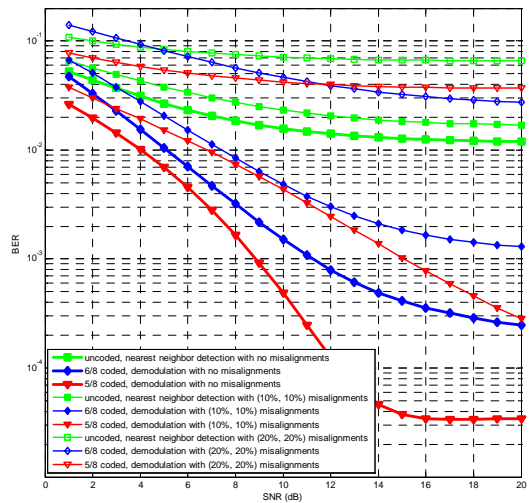


그림 7. 어긋남에 따른 SNR 대 비트 오류

하면 복잡도와 성능을 비교 했을 때 최적의 복호 성능을 낸다고 볼 수 있다.

그림 7은 어긋남 정도에 따른 비트 오류를 나타낸다. 어긋남은 (0%, 0%), (10%, 10%), (20%, 20%)로 하였다. 어긋남이 (20%, 20%)일 경우, 변조 부호를 사용해도 수신된 신호 자체에 잡음이 너무 크기 때문에 비트 오류가 10^{-2} 이상이 된다. 어긋남이 없을 경우에 제안한 변조 부호의 성능이 최저 3.4×10^{-5} 의 성능을 보인다. 6/8 변조 부호는 최저 2.5×10^{-4} 의 성능을 보인다. 어긋남이 없을 경우와 (10%, 10%)일 경우 제안한 5/8 변조 부호의 성

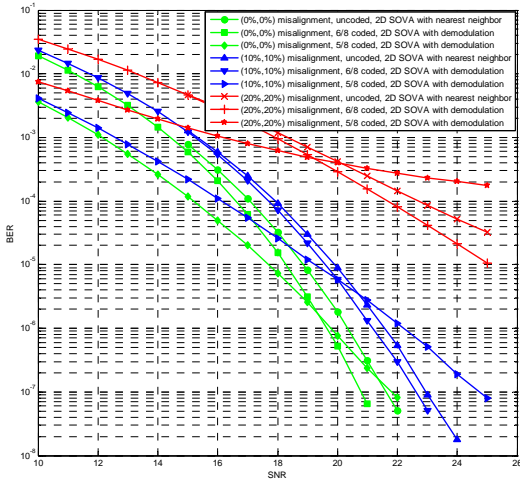


그림 8. PRML 기법을 사용했을 경우 어긋남에 따른 변조 부호별 SNR 대 비트 오류

능이 좋다.

그림 8은 PRML 기법을 사용했을 경우 어긋남에 따른 변조 부호별 비트 오류를 나타낸다. PRML 기법은 1차원 저장 매체에서 많이 사용되고 있는 기법이며^[8] 홀로그래픽 저장 장치에 적용하기 위해 연구 중에 있다^{[9][10]}. 변조 부호별로 어긋남이 있을 때 2차 SOVA를 적용한 비트 오류를 알아봤다. 여기서는 blur를 1.85로 하였고 PR 타겟은 {(010) (181) (010)}로 하였다^[10]. 제안한 5/8 변조 부호의 경우 어긋남이 없었을 경우에는 비트 오류가 2×10^{-6} 이상일 때 6/8 변조 부호보다 성능이 좋고, 어긋남이 (10%, 10%)일 때는 비트 오류가 6×10^{-6} 이상일 경우, 어긋남이 (20%, 20%)일 때는 비트 오류가 5×10^{-4} 이상일 경우 성능이 좋다. PRML 기법을 적용했을 때는 높은 SNR에서는 6/8 변조 부호의 성능이 더 좋았다.

IV. 결 론

본 논문에서는 고립된 픽셀이 없도록 2차원 변조 부호를 제안하였다. 제안한 5/8 변조 부호는 “0” 비트와 “1” 비트의 개수가 거의 비슷한 부호로 IPI 문제를 해결하였고 1비트 고립된 형태가 없는 부호로 극심한 ISI에 대한 문제를 보완하였다. blur가 1.4일 때는 제안한 5/8 변조 부호가 전체적으로 6/8 변조 부호보다 성능이 더 좋았다. 제안한 5/8 변조 부호는 수신된 값을 4비트로 양자화 하였을 때 최적의 성능을 냈다. PRML 기법을 적용했을 때는 아

주 높은 SNR에서는 6/8 변조 부호가 좋았지만 목표 비트 오류가 10^{-6} 이하로 낮지 않다면 제안한 5/8 변조 부호의 성능이 더 좋다. 변조 부호의 부호화와 복호화시 복잡도가 제안한 5/8 변조 부호가 6/8 변조 부호보다 낮다.

참 고 문 헌

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, M. C. Bashaw, “Holographic data storage systems,” *Proceeding IEEE*, Vol.92, No.8, pp.1231-1280, 2004.
- [2] 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.
- [3] W. Y. H. Wilson, K. A. S. Immink, X. B. Xi, and C. T. Chong, “Efficient coding technique for holographic storage using the method of guided scrambling,” *Proceeding SPIE*, Vol.4090, pp.191-196, 1999.
- [4] J. J. Ashley and B. H. Marcus, “Two-dimensional low-pass filtering codes,” *IEEE Trans. Commun.*, Vol.46, No.6, pp.724-727, 1998.
- [5] G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, O. K. Grygier, 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.
- [6] 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, 2002.
- [7] N. Kim, J. Lee, and J. Lee, “Rate 5/9 two-dimensional pseudobalanced code for holographic data storage systems,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.45, No.2B, pp.1293-1296, 2006.
- [8] R. D. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, “A PRML system for digital magnetic recording,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, Vol.10, No.1, pp.38-56, 1992.
- [9] J. Kim, D. Park, J. Lee, “One-dimensional PRML detection with two-dimensional

equalizer for holographic data storage,” *Joint ISON and ODS 2008*, pp.157-159, 2008.

- [10] J. Kim and J. Lee, “Two-dimensional SOVA and LDPC codes for holographic data storage system,” APDSC 2008, P-39, 2008.

김진영 (Jinyoung Kim)

준회원



2007년 2월 숭실대학교 기계공학과 학사

2007년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사과정
<관심분야> 스토리지 시스템, 반복 복호 부호, 채널코딩

이재진 (Jaejin Lee)

중신회원



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 정보통신 연구소 책임 연구원

1997년 3월~2005년 8월 동국대학교 전자공학과 부교수

2005년 9월~숭실대학교 정보통신전자공학부 부교수
<관심분야> 통신이론, 채널코딩, 기록저장 시스템