

홀로그래픽 저장장치용 5/8 변조 부호의 어긋남 특성

Characteristics of 5/8 Modulation Code of Misalignments

for Holographic Data Storage

김진영*, 이재진†

Jinyoung Kim and Jaejin Lee

(2010년 9월 6일 접수; 2010년 9월 10일 심사완료; 2010년 9월 15일 게재확정)

Abstract

We investigate misalignment characteristics of 5/8 modulation code for holographic data storage. The 5/8 modulation code does not have any isolated patterns that is the most unwanted problem for holographic data storage. As the results, the 5/8 modulation code showed a strong side of misalignments, and the code has the best performance among uncoded, 5/9, and 6/8 modulation codes when there are large misalignments.

Key Words : Modulation code, Intersymbol interference, Soft output Viterbi algorithm

기호설명

IPI : Interpage interference
ISI : Intersymbol interference
PRML : Partial response maximum likelihood
SOVA : Soft output Viterbi algorithm
BER : Bit error rate

1. 서 론

홀로그래픽 저장 장치 (Holographic Data Storage System) 는 차세대 광 정보 저장 장치로서 매질의 체적에 데이터를 저장한다. 이 방법은 기존의 하드 디스크나 CD, DVD, BD 등과 같이 표면에 정보를 저장 하는 방식과는 다르게 저장 용량을 현저히 증가 시킬 수 있다 [1],[2]. 또한 페이지 단위로 데이터를 쓰고 읽기 때문에 비트 단위로 처리하는 기존의 저장 장치보다 데이터 처리 속도 및 전송률에 있어서도 장점을 가지고 있다.

하지만 홀로그래픽 저장 장치에도 주요한 두 가지 오류 요인이 있다. 그 중 하나는 한 공간에 여러 페이지를 겹쳐서 저장 하기 때문에 다른 페이지

지가 현재의 페이지에 영향을 주는 IPI 이다. IPI 는 한 공간에 많은 페이지를 저장하면 할수록 더 심해지며 이를 제어하기는 쉽지 않다. 두 번째로는 2 차원으로 영향을 미치는 ISI 이다. 기존의 저장 장치의 경우는 앞뒤의 데이터의 간격이 짧아져서 ISI 가 생기지만 위아래, 즉 트랙간의 간격은 충분하기 때문에 1 차원으로만 ISI 가 생겼었다. 하지만 홀로그래픽 저장장치는 페이지 형식으로 저장하기 때문에 앞뒤 데이터 간격과 위아래 데이터 간격이 같다. 이는 앞뒤의 데이터로 인해서 생기는 ISI 와 위아래의 데이터로 인해서 생기는 ISI 크기가 같고 어느 한쪽을 무시할 수 없는 2 차원 ISI 가 생기게 되는 것이다. 데이터의 용량을 늘리기 위해서는 한 비트가 차지하는 공간이 작아져야만 하고 한 페이지에 많은 데이터를 저장하게 되면 2 차원 ISI 가 더 심해진다. 이처럼 2 차원으로 ISI 가 생기면 신호의 품질도 나빠지며, 검출하기도 어렵게 된다.

1.1 변조 부호의 필요성

홀로그래픽 저장 장치는 위와 같이 기존과는 다른 여러 요인을 가지고 있기 때문에 신호 품질이 많이 나빠며, 검출 또한 여의치가 않다. 홀로그래픽 저장 장치에서 IPI 의 경우, 밝고 (on) 어두운 (off) 곳의 비율이 같으면 IPI 에 대한 영향이 가장 적다고 한다 [3]. 즉, “1”인 비트와 “0”인 비트의 비율을 일정하게 유지하게 되면 IPI 의 영향을 줄

† 송실대학교 정보통신전자공학부
E-mail : zlee@ssu.ac.kr
TEL : (02)820-0901

* 송실대학교 정보통신전자공학부

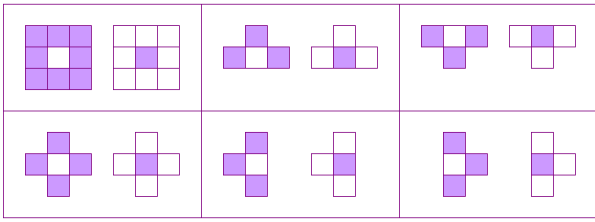


Fig. 1 2 차원 ISI 의 예

일 수 있다. 이렇게 데이터의 “0” 비트와 “1” 비트의 비율을 조절하기 위해서 변조부호를 사용해야 한다. 또한, 홀로그래픽 저장 장치에서 에러가 많이 생기는 패턴이 그림 1 과 같이 존재하게 된다. 원하지 않는 패턴이 2 차원으로 고려해야 하기 때문에 2 차원 변조부호를 고려해야 한다. 변조 부호는 부호율에서 손해를 많이 보지만 이렇듯 신호 품질과 데이터 검출을 위해서 꼭 필요한 부호이다. 이를 위해 2 차원 변조 부호에 대한 연구가 많이 진행 되어 왔다 [4]-[6].

본 논문에서는 홀로그래픽 저장 장치에서 사용하는 변조 부호에 대해서 어긋남 특성을 알아보고자 한다. 어긋남의 정도가 크면 클수록 데이터에 비선형이 증가하게 되며 이런 상황에서 제안한 변조 부호의 성능을 알아본다.

2. 5/8 변조 부호

5/8 변조 부호는 기본적으로 5 비트의 입력을 받아 8 비트 4x2 행렬로 출력을 내보낸다. 기본적으로 이 부호의 부호율은 0.625(=5/8) 이다. 그림 2 에 제안한 2 차원 5/8 변조 부호의 부호화 규칙이

	0 상태	1 상태	2 상태	3 상태
□ : 0	A B C D	A B C D	A B C D	A B C D
■ : 1	E F G H	E F G H	E F G H	E F G H

	000	001	010	011	100	101	110	111
0 상태	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F
1 상태	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F
2 상태	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F
3 상태	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F	C D E F

Fig. 2 제안된 2 차원 5/8 변조 부호의 규칙

나와 있다. 코드워드는 크게 두 부분으로 나뉘어져 있다. A, B, G, H 의 4 비트 쌍은 상태 조건에 대한 부분, C, D, E, F 는 상태에 따른 코드워드를 만들어 낸다. 5 비트의 입력 중에 2 비트 입력으로 4 비트의 상태 조건을 만들며, 나머지 3 비트로 4 비트의 코드워드를 만들어 8 비트 4x2 행렬 출력을 완성한다. 먼저 5 비트 중에 2 비트의 입력은 1 비트씩 각각 B, H 에 채워 넣는다. 그리고 다음 코드워드를 만들 때 A 를 B 와 같게 만들고, G 를 H 와 같게 만든다. 이렇게 하면 현재 입력 받은 두 비트는 다음 코드워드의 상태가 된다. 현재 상태의 B 와 다음상태의 A 가 같기 때문에 같은 비트가 연달아 두 개가 나오게 되어서 한 비트가 다른 종류의 비트들로 둘러싸여 있는 패턴이 없어지게 된다. 나머지 3 비트로는 상태 조건에 맞는 2x2 코드워드를 넣는다. 5/8 변조 부호의 부호화 방법은 다음과 같다.

- (1) 초기의 코드워드는 “0 상태”로 한다. (A, G 에 0 을 입력한다.)
- (2) 5 비트의 입력 중에 2 비트로 B, H 를 정한다.
- (3) 현재의 상태에 따라 나머지 3 비트로 2x2 행렬을 결정한다.
- (4) 다음 코드워드의 A, G 에 현재 코드워드의 B, H 를 복사한다.
- (5) (2)번으로 돌아가 끝날 때까지 반복한다.

그림 3 에 5/8 변조 부호의 부호화 예제가 있다. 복호시에는 현재 코드워드의 B 와 다음 코드워드의 A 를 묶고, 현재의 H 와 다음의 G 를 묶고, C, D, E, F 를 묶어서 유클리디안 거리를 이용해 근접 거리 검출 방법으로 검출하였다.

3. 실험 환경 및 결과

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

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

여기서 σ_b 는 분산된 신호의 희미한 정도 (blur)를 나타내며 $\text{sinc}(x, y) = (\sin(\pi x) / \pi x)(\sin(\pi y) / \pi y)$ 이다. 많은 데이터를 저장하기 위해서는 비트들 간의 간격이 좁아지게 되고 σ_b 의 값이 커진다. 이렇게 되면 ISI가 증가되고 성능이 나빠진다. 본 논문에서는 σ_b 를 1.85로 하였다. 여기에 어긋남 특성을 추가하면 다음과 같은 식이 된다.

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

여기서 m_x 와 m_y 는 각각 수평 방향과 수직 방향의 어긋남을 나타낸다. 이 수식을 이산 빛 번짐 현상으로 나타내면 다음과 같다.

$$h[p, q] = \int_{q-1/2}^{q+1/2} \int_{p-1/2}^{p+1/2} h(x, y) dx dy. \quad (3)$$

채널을 통과한 신호 $r[p, q]$ 는 다음과 같다.

$$r[p, q] = d[p, q] \otimes h[p, q] + n[p, q], \quad (4)$$

여기서 $d[p, q]$ 는 2차원 입력신호이고, \otimes 는 2차원 컨볼루션 연산자, $n[p, q]$ 은 백색 가우시안 잡음 (Additive White Gaussian Noise, AWGN)이다. 불연속 빛 번짐 현상에 대한 범위를 5x5 배열 픽셀로 고려했다. 신호대 잡음비 (Signal to Noise Ratio, SNR)는 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10}(1 / \sigma_w^2), \quad (5)$$

여기서 σ_w^2 는 AWGN의 잡음 전력이다. 채널을 통과한 데이터는 등화기와 검출기를 통과한다. 이 방법은 기존의 저장 장치에서 사용하던 신호처리 방법인 PRML 방법과 유사하다 [7], [8]. PRML은 ISI를 알고 있는 값으로 등화를 시켜서 검출을 용이하게 하는 방법이다. PRML 방법은 부분응답 등화기 (Partial Response Equalizer)와 최대 유사도 검출기 (Maximum Likelihood Detector)로 이루어져 있다. 최대 유사도 검출기는 보통 Viterbi detector를 사용한다. 홀로그래픽 저장 장치의 데이터는 2차

원 ISI의 영향을 받으므로 2차원 PR 등화기를 사용하였다. 하지만 2차원 등화기의 검출이 용이하지 않기 때문에 1차원 등화기를 이용한 2차원 검출 방법이 제안되었다 [9], [10]. 이 방법은 각각 방향이 다른 1차원 PR 타겟을 가지는 두 개의 등화기에 연판정 출력을 가지는 두 개의 1차원 검출기를 이용해 2차원 데이터를 검출하는 방법이다. 본 논문에서는 이 방법을 이용해서 두 개의 2차원 등화기와 두 개의 SOVA를 이용했다. SOVA는 Viterbi 알고리즘에 연판정 출력을 더하는 알고리즘이다 [11].

그림 3은 랜덤 신호와 5/8 변조 부호의 BER 결과를 비교한 것이다. 속이 빈 마크는 랜덤 신호를 나타내며, 속이 채워진 마크는 5/8 변조 부호를 나타낸다. 제안한 5/8 부호는 전체적으로 랜덤 신호보다 좋은 결과를 보여준다. 특히 어긋남이 많이 있어도 랜덤 신호보다 좋은 결과를 보여준다. 그림 4는 5/9 변조 부호와 BER을 비교하였다. 5/9 변조 부호는 4/9 변조 부호를 변형하여 부호율을 높이고 저역 통과 필터 구조를 가지며, "1"비트와 "0"비트의 비율이 같은 부호이다 [6]. 어긋남이 없을 때는 부호율이 낮은 5/9 변조 부호의 성능이 더 좋지만 어긋남이 커지면 커질수록 제안한 5/8 변조 부호는 5/9 변조 부호보다 성능이 더 좋은 것을 볼 수 있다. 그림 5는 6/8 변조 부호와 비교

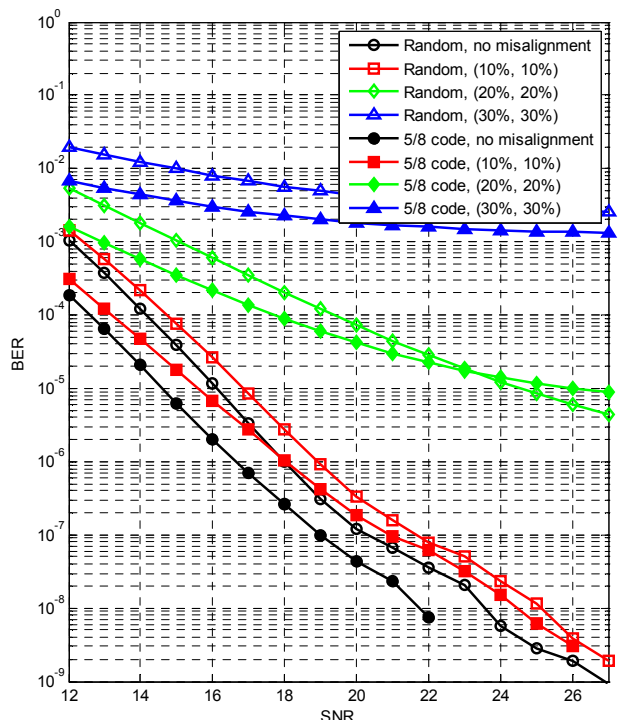


Fig. 3 랜덤 신호와 BER 비교

한 것이다. 6/8 변조 부호는 모든 코드워드가 “1”과 “0”의 비율이 같은 것으로만 이루어진 부호이다. 제안한 부호는 이 부호보다 부호율이 낮지만 어긋남이 적을 때, 낮은 SNR 에서는 오히려 더 좋은 성능을 내며, 어긋남이 클 때는 전체적으로 성능이 더 좋은 것을 볼 수 있다. 결과를 보듯이 제안한 5/8 부호는 랜덤 신호나 다른 변조 부호보다 어긋남이 클 때 성능이 더 좋다.

4. 결론

본 논문에서는 “0”과 “1”의 비율이 같은 5/8 변조 부호의 어긋남 채널에서 성능을 비교해 보았다. 5/8 변조 부호는 5/9 변조 부호처럼 한 비트가 종류가 다른 비트로 둘러싸인 패턴을 없앤 부호이며, 5/9 변조 부호보다 부호율이 높은 장점 있다. 결과에서 볼 수 있듯이, 전체적으로 어긋남에 대해서는 5/8 변조 부호가 강한 면을 보였다. 하지만 변조 부호마다 부호율이 다르다는 면에서 정확한 비교를 했다고 보기 어렵다. 오류 정정 부호를 사용하여 유저 비트가 같은 상황에서 연구를 진행해야 하는 것이 앞으로의 과제이다.

Acknowledgement

이 논문은 2010 년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0014344).

참고문헌

- [1] L. Hesselink, S. S. Orlov, M. C. Bashaw, 2004, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280.
- [2] V. Vadde and B. V. K. V. Kumar, 1999, "Channel modeling and estimation for intrapage equalization in pixel-matched volume holographic data storage," *Appl. Opt.*, vol. 38, no. 20, pp. 4374-4386.
- [3] W. Y. H. Wilson, K. A. S. Immink, X. B. Xi, and C. T. Chong, 1999, "Efficient coding technique for holographic storage using the method of guided scrambling," *Proc. SPIE*, vol. 4090, pp. 191-196.
- [4] G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, O. K. Grygier, J. A. Hoffnagle et al., 1997, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage," *Opt. Lett.*, vol. 22, no. 9, pp. 639-641.
- [5] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, 2002, "Multi-dimensional modulation codes and error

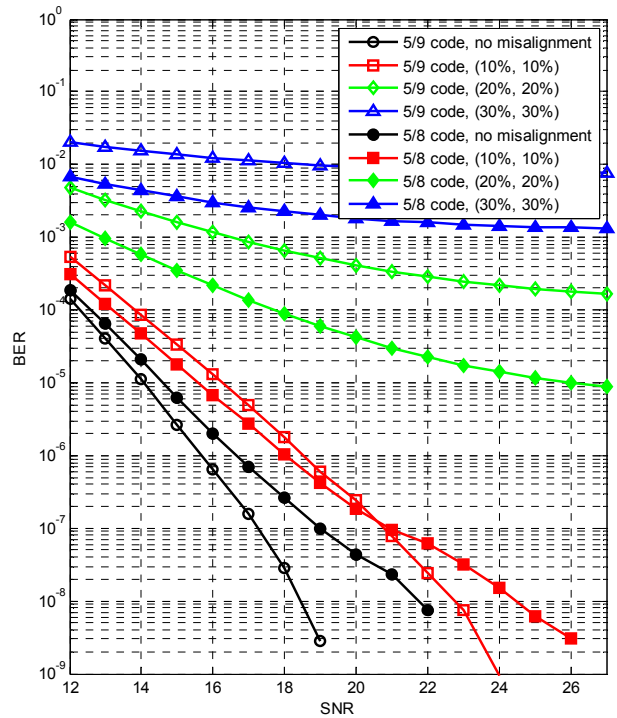


Fig. 4 5/9 변조 부호와 BER 비교

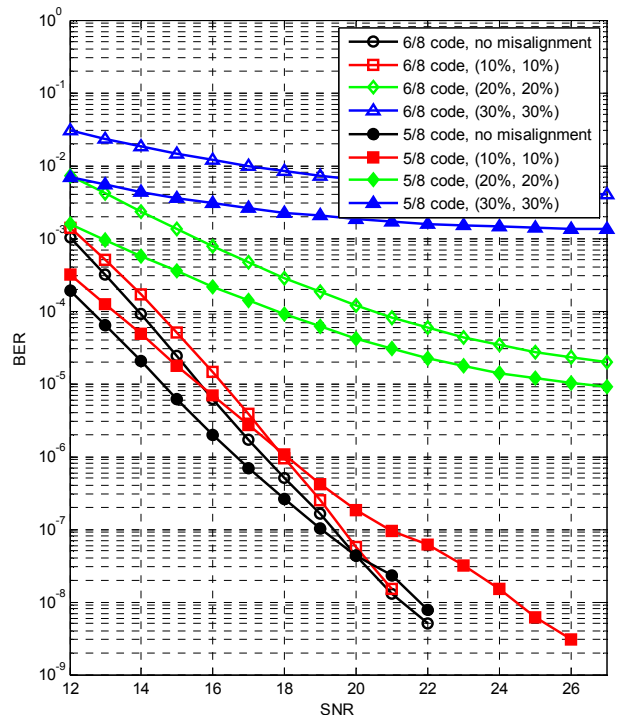


Fig. 5 6/8 변조 부호와 BER 비교

- [6] correction for page-oriented optical data storage," *Proc. SPIE*, vol. 4342, pp. 393-400.
- [7] N. Kim, J. Lee, and J. Lee, 2006, "Rate 5/9 two-dimensional pseudobalanced code for holographic data storage systems," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 45, no. 2B, pp. 1293-1296.

- [8] C. Lee and Y. Cho, 1999, "A PRML detector for a DVDR system," *IEEE Trans. Consum. Electron.*, vol. 45, no. 2, pp. 278–285.
- [9] T. Masakazu and I. Haruhiko, 1999, "PRML readout system for optical disk," U.S. Patent 5 986 987, Nov. 16.
- [10] J. Kim and J. Lee, 2009, "Partial response maximum likelihood detections using two-dimensional equalizer for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48, no. 3, 03A033.
- [11] J. Kim and J. Lee, 2009, "Two-dimensional SOVA and LDPC codes for holographic data storage system," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 5, pp. 2260-2263.
- [12] J. Hagenauer and P. Hoehner, 1989, "A Viterbi algorithm with soft-decision outputs and its applications," *Proc. IEEE Globecom*, vol. 3, pp. 1680-1686.