

홀로그래픽 저장장치를 위한 오류 정정 4/6 변조 부호의 어긋남 채널 성능

정회원 양기주*, 김진영**, 종신회원 이재진**

Mis-alignment Channel Performance of Error Correcting 4/6 Modulation Codes for Holographic Data Storage

Giju Yang*, Jinyoung Kim** *Regular Member*, Jaejin Lee** *Lifelong Member*

요약

본 논문은 홀로그래픽 저장장치를 위한 오류 정정 4/6 변조 부호에 대해서 알아보고, 어긋남이 존재하는 상황에서 성능을 알아보았다. 홀로그래픽 저장장치는 2차원 인접 심볼간 간섭이 생기는 채널로, 읽기 성능을 높이기 위해 변조 부호를 사용해야 한다. 이러한 변조 부호에 길썩 구조가 더해지면 오류 정정 능력을 가지게 된다. 오류 정정 4/6 변조 부호는 기존의 변조 부호보다 성능이 우수하였고, 어긋남에 대해서도 강한 성능을 보여준다.

Key Words : Holographic Data Storage, Modulation Code, Two-dimensional Intersymbol Interference

ABSTRACT

We introduce an error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage, and simulate under adding mis-alignment noise. The holographic data storage has two-dimensional intersymbol interference. To increase the channel performance, it is necessary to use modulation code. Furthermore, if the modulation code has trellis structure, error correcting capability is added. The error correcting 4/6 modulation code shows better performance than conventional modulation codes with and without mis-alignment noise.

1. 서론

홀로그래픽 저장장치는 미디어의 체적에 페이지 단위로 기록과 재생을 하는 광기록 저장장치이다. 이는 미디어의 표면에 정보를 저장하는 다른 광기록 저장장치(CD, DVD)나 자기기록 저장장치(HDD)와는 다르게 체적에 정보를 기록하기 때문에 저장 용량을 현저히 증가시킬 수 있다. 이 때문에 차세대 저장장치 후보로 거론되는 여러 저장방식보다 더욱 부각되고 있다. 또 페이지 단위로 정보를 처리하기 때문에 데이터 처리 속도 및 전송률이 매우 높다는

장점을 가지고 있다^[1]. 하지만 기존과는 다른 여러 요인이 생긴다. 기존에 오류를 범하게 되는 주된 요인이 라인으로 정보를 저장하고 읽음으로서 생기는 인접 심볼간 간섭(Intersymbol Interference, ISI) 이라면, 홀로그래픽 저장장치는 CCD(charge-coupled devices)를 통해 페이지 단위로 읽기 때문에 블러(blur) 효과, 즉, 2차원 ISI가 생긴다^[2]. 이렇게 되면 기존에는 앞과 뒤의 데이터만 생각하고 신호처리를 하면 되었지만 홀로그래픽 저장장치는 앞과 뒤의 데이터뿐만 아니라 위와 아래의 데이터도 생각해야만 한다. 1차원에서 2차원으로 신호처리를 해야 하기 때문에 에러가 더 많이 생기게 되며, 에러를 제

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

* 동국대학교 정보통신공학과(gijyang@dgu.ac.kr)

** 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실(kijjiyou, zleej@ssu.ac.kr)

논문번호: KICS2010-10-507, 접수일자: 2010년 10월 22일, 최종논문접수일자: 2010년 12월 10일

어하기도 쉽지 않다. 또한 홀로그래픽 저장장치는 페이지를 같은 공간에 저장하기 때문에 인접 페이지 간 간섭(Interpage Interference, IPI)이 생긴다³⁾. 페이지를 여러 개 겹쳐서 저장하는 여러 가지 멀티플렉싱 기법이 존재하며, IPI를 최소로 할 수 있는 멀티플렉싱 기법이 다양하게 제안되고 있지만 IPI를 완전히 제거하는 기법은 없다. 따라서 2차원 ISI와 IPI가 존재하기 때문에 이를 줄일 수 있는 알고리즘이 필요하다.

홀로그래픽 저장장치를 위한 변조 부호는 페이지 내에서 공간상의 빔의 불균일 분포 및 인접 심볼간 간섭을 줄일 수 있다. 즉, 위에서 언급한 새로운 잡음 요인들의 영향을 줄일 수 있다. 신뢰성 있는 정보를 검출하기 위해 사용되는 변조 부호는 다음과 같은 사항이 고려되어야 한다. 먼저, 정보 데이터가 SLM(spatial light modulation)에 의해 빛의 양으로 기록되는데, 이 때 생기는 IPI를 줄일 수 있어야 한다. 각 페이지마다 신호에서 발생하는 빛의 양이 비슷하면, 즉 “0”픽셀과 “1”픽셀의 분포가 50%씩 비슷하다면 신호빔의 세기(intensity)에 의한 변화가 적기 때문에 기록조건이 유사하게 되어 IPI를 줄일 수 있다^{4,5)}. 다음으로 저역통과 필터링(low-pass filtering) 효과를 고려하는 것이다^{6,7)}. 이 특성을 갖는 부호는 2차원 ISI를 줄일 수 있다. 이를 위한 2차원 변조 부호에 대한 연구가 많이 진행 되어왔다. 하지만 이런 장점에 비해 변조 부호는 부호율이 낮기 때문에 높은 부호율을 가지는 변조 부호의 연구가 필요하다.

변조 부호에 길쌈 구조를 가지도록 부호화를 하게 되면 부호 이득을 가지는 오류 정정 변조 부호를 만들 수 있다⁸⁾. 본 논문에서는 한 페이지에 “0” 픽셀과 “1”픽셀의 분포가 거의 비슷하면서도 부호 이득을 가지는 2차원 오류 정정 4/6 변조 부호의 어긋남 채널에 대한 성능을 알아보려고 한다. 홀로그래픽 저장장치에서 데이터를 읽을 때 CCD 배열의 위치가 정확하게 일치하지 않을 경우 어긋남(mis-alignment)이 발생하게 된다. 이러한 어긋남은 비트 오류율(bit error rate, BER) 성능을 나쁘게 한다. 변조 부호를 복호할 때 연관정 입력값을 받기 위해서 2차원 SOVA(soft output Viterbi algorithm)를 적용하였다^{9,10)}.

II. 오류 정정 4/6 변조 부호

오류 정정 4/6 변조 부호는 4비트를 입력으로 받아 6비트의 2×3 행렬의 코드워드를 내보낸다. 따

라서 기본적인 부호율은 4/6(≈ 0.66)이 된다. 그림 1은 제안하는 변조 부호가 가질 수 있는 16개의 코드워드이다. 2×3 행렬의 코드워드로 표현할 수 있는 코드워스 수는 총 64개이다. 하지만 4비트만 표현할 수 있으면 되므로 16개의 코드워드만 선택하면 된다. 이 16개의 코드워드를 보면 1비트가 서로 다른 비트들로 둘러싸이게 되는 패턴이 없다. 1비트가 서로 다른 비트들로 둘러싸이게 되면, 반대되는 방향으로 영향력을 최대로 받게 되어 에러가 많이 생기게 된다. 이 코드워드들을 사용하면, 이러한 패턴이 없으므로 에러 요인이 줄어들어 BER 성능이 좋아진다. 다음에 설명하는 변조 부호는 이 16개의 코드워드를 사용하여, 길쌈 구조를 적용한다.

2.1 첫 번째 변조 부호화(상태가 없는 변조 부호)

이 변조 부호화는 제일 간단한 방법으로 심볼을 일대일로 매핑하는 방법이다. 이 변조 부호화는 부호 이득을 가지고 있지 못하다. 다만, 부호 이득을 가지는 변조 부호들과 성능 비교를 위해서 적용해 보았다. 심볼 매핑은 그림 1에 나와 있는 것과 같이 차례대로 적용하였다.

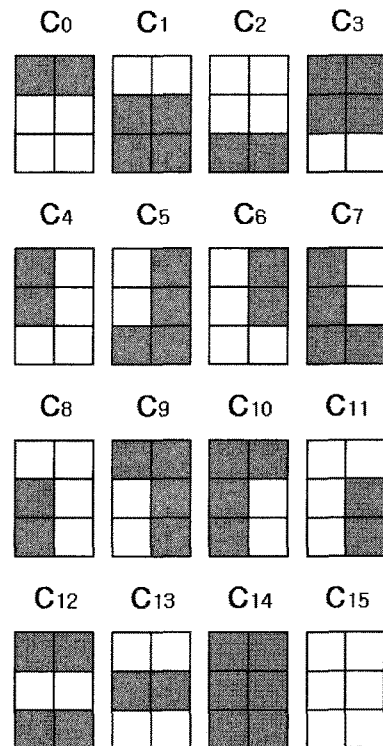


그림 1. 심볼 리스트

2.2 두 번째 세 번째 변조 부호화 (8개의 상태를 가지는 변조 부호)

이 두 개의 변조 부호는 8개의 상태를 가지며, 이 부호의 심볼 매핑에 대한 규칙은 그림 2에 나와 있다. 심볼 매핑을 하는데 표시를 간단하게 하기 위해서 C_k 코드워드를 k 로 표시했다. 즉, C_0 코드워드는 0으로, C_1 코드워드는 1 등으로 표시하였다. 그림 3은 각각의 상태에서 가지값들에 코드워드를 할당하는 방법에 대한 예이다. 각각의 괄호 안에 있는 숫자는 하나의 가지에 대응되는 값을 말하며, 이 경우 하나의 가지는 두 개의 할당되는 값을 가지고 있다. 상태마다 연결되어 있는 가지 숫자마다 괄호가 있으며, 위에서부터 각각 할당하면 그림 3과 같다. 마찬가지로, 그림 2에서 보면 위에서부터 차례대로 8개의 상태(0상태~7상태)가 있으며, 각 상태마다 두 종류의 코드워드들이 있다. 일반 숫자로 표현되어 있는 것이 두 번째 변조 부호화에 대한 방법이고 굵은 숫자로 표시되어 있는 것이 세 번째 변조 부호화 방법이다. 두 변조 부호화의 차이점은 할당되는 심볼이 다르다는 것에 있다. 그림 3과 같이 숫자들은 위에서부터 차례대로 할당된다. 각각의 상태에 따라서 입력에 대한 출력 심볼이 달라지며, 친이될 수 있는 상태가 다르기 때문에 거리차를 얻어

서 부호 이득을 얻을 수 있다. 예를 들어, 두 번째 변조 부호의 경우, 0상태에서 “0000”을 입력으로 받았다면 각각의 상태에서 첫 번째 괄호의 첫 번째 심볼인 0심볼을 출력하고 다시 0상태로 가며, “0011”을 입력으로 받았다면 두 번째 괄호의 첫 번째 1심볼을 출력하고 1상태로 가면 된다. k 번째 상태에서 할당되는 심볼값이 두 번째 변조 부호화는 $(k, k+8), (k+1, k+9), \dots, (7, 15), (0, 8), \dots, (k-1, k+7)$ 과 같고, 세 번째 변조 부호화는 $(2k, 2k+1), (2k+2, 2k+3), \dots, (14, 15), (0, 1), \dots, (2k-2, 2k-1)$ 과 같다. 하지만 부호 이득을 얻기 위해서는 일정한 간격마다 0상태로 돌아가는 종료 패리티 심볼을 추가하여야 한다. m 을 종료 패리티 심볼을 추가하는 간격이라고 한다면, 두 번째와 세 번째 부호화의 실제 부호율은 $4m/6(m+1)$ 이 된다.

부호화 순서는 다음과 같이 한다. 첫 번째로 초기 상태를 0상태로 한다. 다음으로는, 4개의 비트를 입력으로 받아 현재의 상태와 입력 데이터에 대응되는 심볼을 출력하고 그에 맞게 상태를 움직인다. 이러한 작업을 m 번 반복 한 후에, 0상태로 가게끔 하는 종료 패리티 심볼을 추가한다. 입력 데이터가 남아 있다면 이와 같은 작업을 반복적으로 수행하여 코드워드를 만들어 낸다.

이 변조 부호의 복호는 유클리디안 거리를 이용한 비터비 알고리즘을 이용한다. 가지의 에러값은 다음과 같이 계산한다.

$$\lambda_i(s_a, s_b) = \sum_{j=1}^6 [z_{ji} - u_{ji}^{(k)}(s_a)]^2 \quad (1)$$

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 가지에 할당된 코드워드의 j 번째 심볼을 의미한다. 각각의 상태는, 16개의 거리값들 중에 가장 작은 값을 선택하고, 나머지 선택되지 않은 값들은 제거하며 진행한다. m 번째 까지 진행이 되고 나면, 마지막 0상태에서 거리값이 가장 작은 길은 선택하고 그에 대응되는 값을 출력으로 내보낸다. 이러한 작업을 수신된 코드워드가 없을 때까지 진행한다.

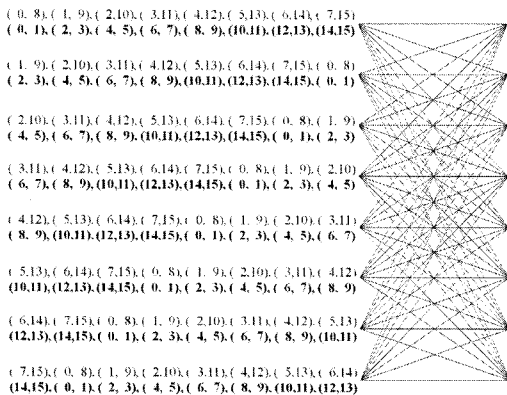


그림 2. 길쌈 구조와 심볼 할당 방법, (a) 두 번째 변조 부호 (일반 숫자), (b) 세 번째 변조 부호 (굵은 숫자).

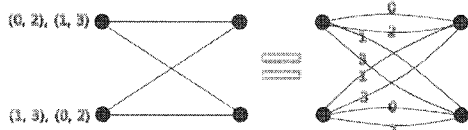


그림 3. 상태에 표시되어 있는 코드워드가 그에 대응하는 가지에 매핑되는 표기법.

2.3 네 번째 변조 부호화 (16개의 상태를 가지는 변조 부호)

네 번째 변조 부호화는 앞서 설명한 두 번째, 세 번째 변조 부호화와 매우 흡사하다. 차이점은 상태

가 16개이며 상태에서 천이될 때 하나의 값만 존재한다는 것이다. 그러므로 k번째 상태에 대해서 할당되는 심볼값은 k, k+1, ..., 15, 0, ..., k-1 이다. 이 외에 부호화 복호화 방법 및 종료 패리티 심볼에 대한 것은 두 번째, 세 번째 변조 부호화와 같다.

III. 홀로그래픽 저장장치의 채널 모델링

3.1 홀로그래픽 저장장치의 기본 채널 모델링

홀로그래픽 채널 모델은 CCD 배열을 통해 입력 데이터를 출력 데이터로 만든다^{3,5}. 입력페이지에서 (x, y)위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.

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

여기서 σ 는 분산된 신호의 회미한 정도, 즉 블러이고, 블러가 커지면 2차원 ISI가 증가한다. $\text{sinc}(x,y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{sinc}(x,y) = \left(\frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \frac{\sin(\pi y)}{\pi y}\right) \quad (3)$$

[p, q] 위치의 이산 PSF는 다음과 같이 정의한다.

$$h[p,q] = \int_{q-\frac{1}{2}}^{q+\frac{1}{2}} \int_{p-\frac{1}{2}}^{p-\frac{1}{2}} h(x,y) dx dy \quad (4)$$

3.2 홀로그래픽 저장장치의 어긋남 채널 모델링

CCD 배열이 제대로 된 위치에 있지 못하게 된 상태로 어긋남은 홀로그래픽 데이터의 신호 품질에 영향을 미친다. 이는 자기 자신의 신호의 크기를 감소시킬 수 있지만 옆에 다른 위치의 신호를 크게 만들 수 있기 때문이다. x축의 어긋남 m_x , y축의 어긋남 m_y 로 정의한 연속적인 PSF는 다음과 같다.

$$h(x,y) = \frac{1}{\sigma^2} \text{sinc}^2\left(\frac{x+m_x}{\sigma}, \frac{y+m_y}{\sigma}\right) \quad (5)$$

IV. 실험 결과 비교

실험은 다음과 같은 조건에서 시행하였다. 한 페이지의 크기는 1024×1024 픽셀로 하였고, 이러한

페이지를 1000페이지를 실험하였다. 블러는 1.85인 상황에서 하였다. 그리고 채널 등화기에서 사용되는 부분응답(Partial response, PR) 타겟은 PR(131)을 사용하였다. 채널에 주어지는 잡음 환경은 신호대 잡음비(signal-to-noise ratio, SNR)를 변화하면서 하였고, SNR은 $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 로 정의하였다. σ_w^2 은 부가백색 가우시안 잡음(Addictive white Gaussian noise, AWGN) 전력이다. 그리고 비교를 위해서 0과 1의 비율이 똑같은 4/6 변조 부호와, 6/8 변조 부호와 같이 실험하였다¹¹.

먼저 m의 크기에 따라서 성능이 어떻게 변화하는지 알아보았다. 그림 4를 보면, 검은색 점선은 첫 번째 변조 부호화 방식으로 m과는 상관없이 없는 변조 부호이다. 나머지 변조 부호는 m에 따라서 성능 차이가 나는데, m이 30일 때는 부호율이 약 0.645 정도로 상대적으로 가장 낮지만, 성능 이득은 다른 부호에 비해 큰 것을 알 수 있다. m이 커지면 낮은 SNR에서는 첫 번째 변조 부호화 방식보다 오히려 성능이 안 좋은 부분이 생기며, 높은 SNR에서는 첫 번째 변조 부호화보다 성능이 좋다. 따라서 목표 BER에 맞추어서 m의 크기를 결정해야 한다. 그리고 나머지 두 번째, 세 번째, 네 번째 변조 부호화 방식은 m이 같을 때 성능 차이가 크지 않지만, m이 작을 때는 16개의 상태를 가지는 네 번째 변조 부호화가 높은 SNR에서 성능이 약간 더

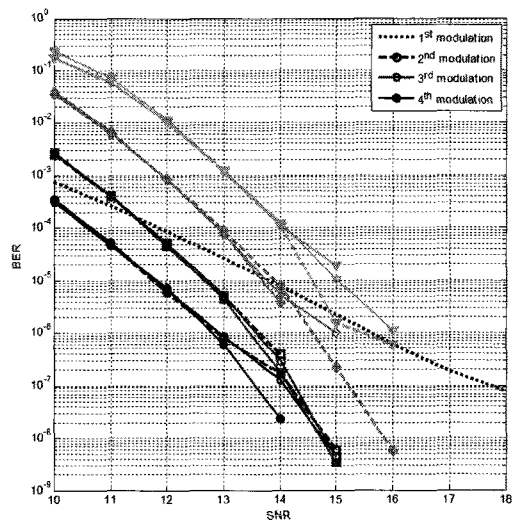


그림 4. BER 성능. 원형, 사각형, 마름모, 삼각형 마커는 각각 m이 30, 100, 500, 2000 일 때를 나타낸다. 점선, 일점쇄선, 속이빈 마커에 실선, 속이 찬 마커에 실선은 각각 첫 번째, 두 번째, 세 번째, 네 번째 변조 부호화를 나타낸다.

좋다. 반대로, m 이 클 때는 8개의 상태를 가지는 두 번째와 세 번째의 변조 부호화가 성능이 약간 더 좋은 것을 볼 수 있다.

그림 5는 일반적인 AWGN 상황에서 여러 가지 변조 부호들의 성능을 비교한 결과이다. 기존에 사용하던 6/8, 4/6 변조 부호는 “0” 비트와 “1” 비트의 비율이 50:50인 코드워드들만 가지는 부호이다. 두 부호는 부호율의 차이는 있지만, 비슷한 성질을 가지고 있기 때문에 검출기를 통과한 후에는 비슷한 성능을 보여준다. 이 두 변조 부호보다 첫 번째 제안한 변조 부호화는 BER이 10^{-6} 을 기준으로 봤을 때 약 3 dB 정도 성능이 좋은 것을 볼 수 있다. 첫 번째 제안한 변조 부호화는 모든 코드워드의 “0”비트와 “1”비트의 비율이 50:50을 만족하지는 않지만, 저역 통과 필터 효과가 더 큰 부호이기 때문에 성능이 더 좋아진 것을 볼 수 있다. 여기에 상태를 가지고 있는 다른 세 가지 제안한 부호화는 거의 성능이 비슷하며 첫 번째 제안한 변조 부호화보다 약 2 dB 정도 성능이 좋은 것을 보여준다. 상태를 가지고 거리차를 만들어주었을 때 부호 이득이 있음을 보여주는 결과이다. 여기서 m 은 30으로 하였다.

그림 6과 7은 두 번째 변조 부호에서 m 이 각각 30, 500일 때 어긋남에 대한 성능을 보여준다. 비교를 위해서 부호율이 비슷한 기존에 사용하던 4/6 변조 부호를 같이 실험하였다. 그림 6에서 보듯이, m 이 30일 때는 어긋남이 커질수록 성능이 나빠지는 정도가 제안한 변조 부호가 더 작은 것을 볼 수 있으며, 성능도 많이 좋다. m 이 500일 때는 어긋남

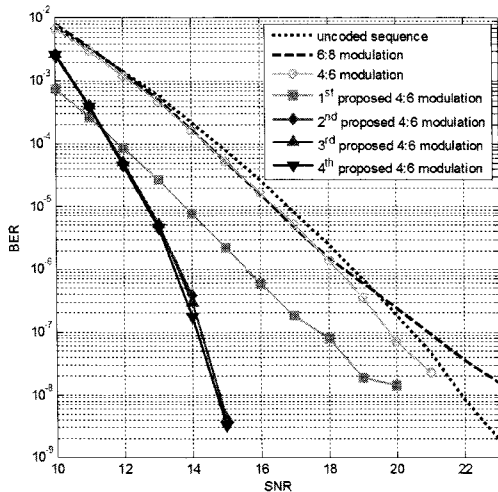


그림 5. AWGN 상황에서 BER 성능

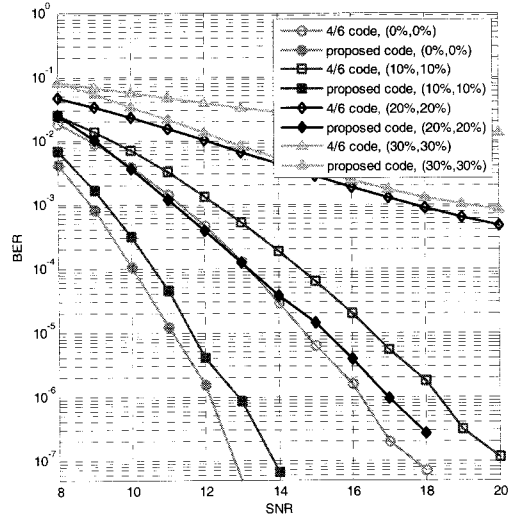


그림 6. 기존의 4/6 변조 부호와, m 이 30인 제안한 변조 부호의 BER 성능 비교

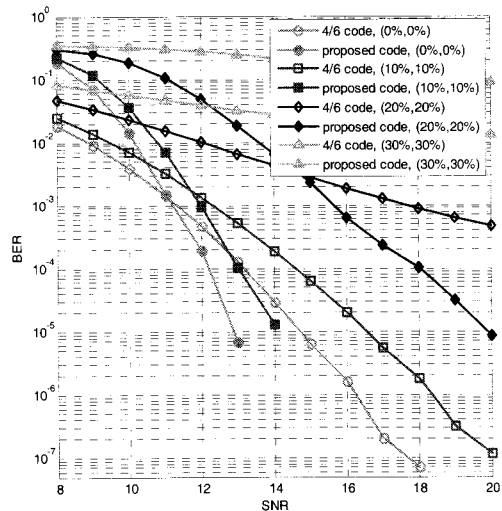


그림 7. 기존의 4/6 변조 부호와, m 이 500인 제안한 변조 부호의 BER 성능 비교

이 (20%, 20%)일 때까지는 성능이 좋아지지만 그 이상 어긋남이 많아지면 오히려 기존의 4/6 변조 부호보다 성능이 더 나쁘다. 이는 채널 환경이 너무 나쁘기 때문에 부호 이득을 얻지 못하고 오히려 잘 못된 결과를 돌려주어서 성능이 매우 안 좋은 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문은 홀로그래픽 저장장치를 위한 오류 정

정 4/6 변조 부호의 어긋남 채널에 대해서 성능을 알아보았다. 오류 정정 4/6 변조 부호는 부호 이득을 가지는 변조 부호로서 어긋남이 작은 상황에서는 성능이 좋으며, m 값이 클수록 부호율은 높아지지만 성능이 안 좋아지는 것을 알 수 있다. 또한 극한 어긋남이 생기게 되면 거의 에러 정정을 못 할 뿐만 아니라, 성능이 매우 안 좋다.

참 고 문 헌

[1] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, Vol.92, 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] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," *Proc. SPIE*, Vol.4342, No.393, pp. 393-400, 2002.

[4] W. Y. H. Wilson, K. A. S. Immink, X. B. Xi, and C. T. Chong, "An efficient coding technique for holographic storage with the method of guided scrambling," *Proc. SPIE*, Vol.4090, pp.191-204, 2000.

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

[6] 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, 2009.

[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] J. Lee and V. K. Madiseti, "Error correcting un-length limited codes for magnetic recording," *IEEE Trans. Magn.*, Vol.31, No.6, pp.3084-3086, 1995.

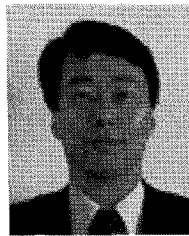
[9] J. Kim and J. Lee, "Partial response maximum likelihood detections using two-dimensional equalizer for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol.48, No.3, 03A033, 2009.

[10] 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.

[11] G. W. Burr, J. Ashley, et al., "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage," *Opt. Lett.*, Vol.9, No.9, pp.639-641, 1997.

양 기 주(Giju Yang)

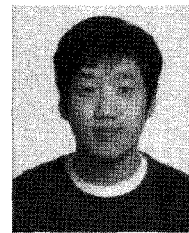
정회원



1984년 University of Wisconsin, 전산학 학사
 1986년 University of Michigan, EECS 석사
 1991년 University of Delaware 전산학 박사
 1992년 KT 연구소 선임연구원
 1995년~현재 동국대학교 정보통신공학과 교수
 <관심분야> 통신 신호처리

김 진 영(Jinyoung Kim)

정회원



2007년 2월 숭실대학교 기계공학과 학사
 2009년 2월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 석사
 2009년 3월~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부 박사과정
 <관심분야> 스토리지 시스템,

반복 복호 부호, 채널코딩

이 재 진(Jaejin Lee)

종신회원

[2010년 12월호 참조]