

1. 서론

21세기 멀티미디어 시대의 도래에 따른 텍스트, 음성, 영상, 동영상 등의 대용량 멀티미디어 정보를 처리하고 저장할 수 있는 초고속, 초대용량, 초소형 그리고 영구적인 데이터 저장 시스템이 필수적이다. 현재 초대용량 메모리를 실현하기 위한 접근방법으로는, 하드디스크의 경우 자기저장 판수를 늘리는 것이고, DVD를 포함한 CD 계열 메모리의 경우 짧은 파장의 레이저를 사용하여 빔을 매우 작게 집속시키고 이에 따라 피트(pit)의 크기를 줄이는 것이다. 이러한 메모리는 2차원 평면에서의 정보저장이 기본구조이므로 기술적으로 극복할 수 없는 한계가 있으며, 데이터를 1비트(bit)씩 또는 몇 비트씩 직렬로 읽어내므로 저장된 메

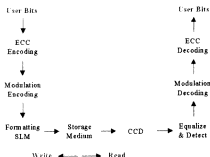


그림 1. HDSS의 데이터 사이클

이 채적에 각/공간/위상/파장 다중화 방법, 혹은 혼합 다중화 방법으로 저장 용량의 극대화를 이룰 수 있으며, 2차원 정보를 병렬적으로 기록하고 재생하는 차세

특집 ─ 홀로그래픽 메모리와 근접장 메모리

디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 위한 기록/판독과정에서의 신호처리 기술

최안식*, 백은식**

모리의 인출이나 검색에 많은 시간이 소요될 수밖에 없다는 점을 고려할 때 새로운 차원의 차세대 데이터 저장 매체에 대한 관심은 커질 수밖에 없을 것이다. 이러한 문제의 해결책으로 최근 큰 관심기술의 하나인 홀로그래픽을 이용한 광 저장장치인 홀로그래픽 데이터 저장 시스템(holographic data storage system : HDSS)이다¹⁾. 이 기술은 저장매체로는 주로 광굴절성 크리스탈(photorefractive crystal) 또는 포토폴리머(photopolymer) 등이 사용되며 기존 메모리장치의 2차원적, 직렬적인 정보저장과는 달리 3차원의 미디

대 대용량 데이터 저장장치이다.

차세대 대용량 데이터 저장장치로 부각되고 있는 디지털 HDSS의 실용화를 위해서는 고밀도의 저장용량과 기록/판독(write/read)되는 데이터의 높은 신뢰성이 요구되며, 이 요구에 부응하고자 본 논문에서는 그림 1의 HDSS의 데이터 사이클에서 기록/판독과정에서 여러 정정을 위한 ECC(error correction codes) 그리고 CCD(charge coupled device)에 의해 감지된 아날로그 영상을 디지털 즉, 0과 1 값으로 변환하는 과정에서 잡음들과 페이지의 빔 세기의 불 균일성과 인접

* 경희대학교 대학원 전자공학파

** 경희대학교 전자정보학부 교수

디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 위한 기록/판독과정에서의 신호처리 기술

픽셀 번짐(ISI : intersymbol interference) 등에 의한 현상을 줄이고 저장밀도를 높이기 위한 modulation 코드들과 등화(equalization)기법 등의 신호처리기술들에 대해 설명하고자 한다.

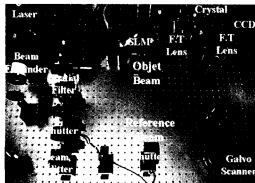
2. 디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템

HDSS는 다음과 같이 동작한다. 그림 2에서 레이저로부터 방출된 빔은 빔 분할기(beam splitter)에 의해 물체빔(object beam)과 기준빔(reference beam)으로 나누어진다. 물체빔은 입력영상이 실린 공간 광 변조기(SLM : spatial light modulator)를 통과한 후, 광 굴절 결정 Fe:LiNbO_3 에 촛점이 맞추어지고, 기준빔과 교차하므로써 간섭패턴을 생성하게 된다. 이러한 영상정보가 실린 물체빔과 기준빔의 교차에 의해 생성된 간섭패턴이 저장 매체 내에 기록되어진다. 이렇게 기록된 후 판독과정에서는 물체빔을 차단하고 기준빔을 기록할 때의 각도로 매질에 조사하면 전자광학(electro-optic) 효과에 의해 원래 기록할 때 진행하던 물체빔의 방향으로 입력 영상이 재생되고, 이를 CCD 카메라로 감지하여 신호처리과정을 통해 원래의 영상을 복원하게 된다.

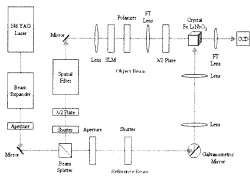
디지털 HDSS의 구성은 입력영상을 그대로 저장하는 대신, 입력영상 각 화소의 그레이레벨(0~255레벨) 값을 이진수로 코딩하여 $\bar{0}$ 은 부과계수가 최저(0)인 정방향 원도우로, '1' 은 부과계수가 최대(1)인

정방향 원도우를 생성하여, 비독판 무늬와 같은 영상을 저장하고, 판독된 비독판 무늬를 컴퓨터에 의해 디코딩하므로써 원래 영상을 재현하는 시스템이다. 입력영상을 그대로 저장·판독하는 대신, 컴퓨터에 의해 부호화된 이진영상을 기록/판독하는 HDSS는 이진영상의 각 픽셀의 그레이레벨 값이 0 이거나 255이므로, 판독시 에러가 발생할 확률이 대단히 적다. 또한 인코딩 과정에서 modulation과 여러 정정 코딩기법을 적용하므로써 에러의 발생을 줄이고 에러 정정 또한 가능하게 된다.

본 실험에서 사용한 광원은 Coherent사의 출력이 100mW인 Diode-pumped Nd:YAG 레이저($\lambda = 532\text{nm}$)이고, PC를 통하여 소프트웨어적으로 인코딩된 데이터 입력은 CRL사의 SLM(1024×768 pixels)을 사용하였으며, 영상 출력은 EG&G사의 CCD(1024×1024 pixels) 카메라로 측정하였다. 레이저로부터 나오는 두 빔 즉, 물체빔과 기준빔은 광굴절 저장매체에 직각으로 입사되는 90° 기록구조를 사용하였으며, 저장물질인 광굴절 결정의 양단에 푸리에 변환 렌즈를 사용하여 푸리에 홀로그래피 기록되도록 하는 4-f 광학계를 사용하였다. 저장물질은 Deltronics사의 Fe가 0.03 mole% 도핑된 체적 1cm^2 크기의 Fe:LiNbO_3 를 사용하였고, 각 다중화는 Cambridge사의 galvanometric mirror를 이용하여 0.01° 간격으로 다중화 하였다. 그림 2는 본 연구실에서 구성한 HDSS의 사진과 블록 다이어그램을 나타내었다.



(a) 본 연구실의 HDSS 실험 사진



(b) HDSS의 블록 다이어그램

그림 2 본 연구실에서 구성된 HDSS 시스템과 블록 다이어그램

3. HDSS를 위한 에러 정정 코드 및 modulation 코드와 등화기법

이 장에서는 그림 1의 HDSS의 기록/판독 데이터의 신뢰도 확보를 위한 에러 정정 코드 및 modulation 코드 그리고 등화기법 등에 대해서 논의한다. HDSS에 있어서 modulation 코드는 페이지 내에서의 공간상의 빔 불균일 분포 및 ISI를 줄일 수 있는 능력을 가져야 한다^{4,5}. 현재 HDSS에 실험적으로 적용하고 있는 modulation 코딩기법으로는 Stanford 대학에서 적용한 Differential 코드³¹, IBM의 DEMON 시스템에 적용된 Balanced block 코드들³⁶⁻⁴¹, CMU(Carnegie Mellon University)에서 제안한 패리티(parity) 코드³⁸ 등이 연구되었고, 에러 정정 코딩기법으로는 HDSS의 산발·연접 에러 정정이 가능한 RS(Reed-Solomon) 코딩기법이 통상적으로 사용되어지고 있으며^{4,5,7,8}, 비트 에러 정정이 가능한 Hamming과 BCH(Bose, Chaudhuri and Hocquenghem) 코드 등도 사용되고 있다^{39,42}. 우리나라의 경우 대우전자에서 개발한 Dual constant weight 코드³⁴ 그리고 Group ECC라는 에러 정정 코드³¹¹와 Viterbi 알고리즘을 응용한 에러 정정 기능을 갖는 9:12 변조 코딩기술을 개발하였다^{33,35}. 9:12 변조 코드 기술은 IBM에서 개발한 8:12 코드보다 코드율(code rate)과 비트 에러율(BER : bit error rate) 성능 측면에서 우수한 기술임을 입증한 바 있으며³³, 서울대학교에서는 Viterbi 알고리즘을 이용한 소프트 결정(soft decision) 방식을 이용하여 재생된 영상의 BER를 개선시키는 연구도 수행하고 있다³². 또한 HDSS에서 2차원의 페이지에 고밀도의 2진 데이터가 SLM에 입력됨으로 사용되므로 기록/판독과정에서 ISI가 팜메모리 시스템의 저장 용량과 BER에 영향을 주는 요인이 되므로^{24,37,38}, HDSS의 저장 용량 증가와 BER 향상을 위해서 ISI를 완화시키는 연구들이 진행되고 있는데 이 연구는 CMU의 M. Keskinoz, V. Vaddie와 B. V. K. Vijaya Kumar에 의해서 주도적으로 연구되었다^{24,37,38}. HDSS의 신호처리기술들은 이미 외국(주목 미국)에서는 많은 연구가 수행되었으며, 이 분야의 기술연구는 단지 HDSS 뿐만아니라 DVD, CD 등과 같은 고밀도 광기록 장치의 신호처리 분야에도 응용될

수 있는 기술들이다. 본 연구실에서는 3.1과 3.2절에서 열거할 에러 정정 코딩기법과 modulation 코딩기법 그리고 등화기법들에 대해 연구한 중이며, 이미 이루어진 소기의 성과들에 대해 발표도 이루어졌다
(10.10.13.19.202).

3.1 에러 정정 코드와 modulation 코드

HDSS에서는 이진영상의 기록/판독과정에서 필연적으로 수반되는 에러를 정정하기 위해 SLM에 입력되는 영상을 코딩하는 과정에서 Hamming(7, 4, 1), Hamming(12, 8, 1) 비트에러 정정 코딩기법과 BCH 코딩기법 등이 이용되며, 산발·연접 에러 정정이 가능한 RS 코딩기법이 통상적으로 사용되어지고 있다. 또한 balanced modulation 코딩기법은 HDSS의 2차원 데이터 페이지에서 공간적 빔 세기의 불균일 분포에 의해 발생하는 검출에러들을 줄이기 위해 2차원 페이지에 입력되는 데이터에 대해 각 코드 블록에 대해 '0'과 '1'의 수를 같게 하는 코딩기법이다. 이 코딩기법은 정보 n 비트를 m 비트로 인코딩하며, 이때 m/n 이며, 정보의 저장 측면에서는 n/m 만큼 줄어들게 된다. 인코딩과정에서는 각 코드 블록(m)에 대해서 '0'과 '1'의 수를 같게 한다. 검출과정에서는 각 코드 블록은 '0'과 '1'의 수가 같으므로 간단한 정렬검출(sort detection)을 이용하여 상대적으로 그레이레벨(gray level) 값이 큰 $m/2$ 픽셀들은 '1'로 결정하고, 나머지 $m/2$ 에 픽셀들은 '0'으로 결정함으로써, 임계치(thresholding) 처리과정 없이 검출과정이 이루어진다. 또한 정렬검출 대신 더욱 신뢰성 있는 데이터 검출을 위한 상관검출(correlation detection)도 이루어지고 있다^{24,38,39}. 이와같이 balanced modulation 디코딩 과정이 각 코드 블록에 대해 지역적(local) 임계치가 적용됨으로 2차원 페이지에서 발생하는 빔 세기의 불균일 분포에 의해 발생하는 BER를 줄일 수 있다. Balanced modulation 코드들에 대한 인코딩/디코딩 방법들은 [20-22]에 자세히 설명되어 있다.

지역적 임계치 적용이 가능한 또 하나의 코딩기법은 패리티 코딩기법이다. 패리티 코딩기법의 장점은 데이터 블록 크기의 변화가 가능하므로 코드율이 가변적이라는 점과 코드율을 0.9 이상으로 달성할 수 있다는

디지털 홀로그래피 데이터 저장 시스템을 위한 기록/판독과정에서의 신호처리 기술

점이다^{4,8}. 이 기법의 인코딩과정은 같은 크기의 데이터 비트들에 포함된 '1'의 수에 해당하는 패리티 비트들이 데이터 비트들에 첨가되어 하나의 코드 블록을 형성한다. 또한 검출과정의 신뢰성을 높이기 위해서 패리티 정보는 differential 인코딩을 하게된다. 디코딩

과정에서는 검출된 패리티 정보로부터 데이터 비트들에 포함된 '1'의 수를 계산한 다음, 패리티 정보로부터 얻어진 '1'의 수만큼 검출된 데이터들을 '1'로 결정하고 나머지는 '0'으로 결정한다. 그림 3은 일반적인 패리티 인코딩 방법을 나타낸 그림이고, 일반적인

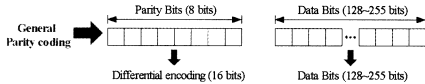


그림 3. 일반적인 패리티 코딩

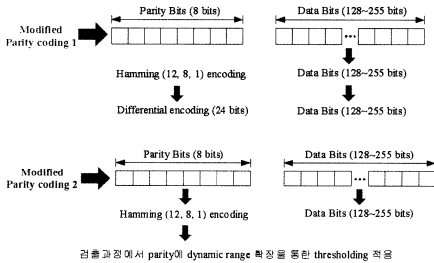


그림 4. 개선된 패리티 코딩

표 1. Modulation 코드 비교

Modulation 코드 종류	코드율 (code rate)	최소 거리 (minimum distance)
1. Raw data	1.0	-
2. Differential(1:2 balanced modulation) 코드	0.5	-
3. 4:6 balanced modulation 코드	0.667	2
4. 4:8 balanced modulation 코드	0.5	4
5. 6:8 balanced modulation 코드	0.75	2
6. 8:10 balanced modulation 코드	0.8	2
7. 8:12 balanced modulation 코드	0.667	4
8. 9:12 변조 코드	0.75	4
9. 패리티 코드	가변적	-

0.9 이상의 코드율을 달성하면서 패리티의 에러 때문에 발생될 수 있는 연접 에러의 가능성을 줄이고, 코드율을 높이기 위한 수정된 패리티 방법을 그림 4에 소개한다. 표 1은 modulation 코딩기법들을 비교하였다.

3.2 HDSS를 위한 등화기법

고밀도 데이터 저장 장치에서의 등화기법의 역할은 데이터의 검출과정에서의 ISI 영향을 줄임으로써 현저한 저장 밀도의 개선을 가져올 수 있다는 점이다²⁰. 그러므로 데이터 저장 장치에서 사용되어지고 있는 등화기법들을 HDSS에 적용함으로써 SLM에 입력된으로 사용되는 고밀도의 2차원의 페이지의 기록/판독과정에서 발생하는 ISI를 완화시키므로써 HDSS의 저장용량과 BER의 개선을 꾀하고자 하는데 큰 목적이 있다. HDSS에서 등화기법의 연구는 CMU의 M. Keskinov, V. Vadde와 B. V. K. Vijaya Kumar에 의해서 연구되었으며, 연구내용으로는 ZF(zero forcing) equalization, MMSE(minimum mean square error) equalization, PR(partial response) equalization, PRML(PR maximum likelihood) detection, DF(decision feedback) equalization, DFE를 기반으로 한 FDTS(fixed-delay tree search) 등의 연구들을 수행하였다^{25,31,38}. 본 연구실에서는 MMSE equalization(=LE : linear equalization)과 DF equalization(DFE), PR equalization 등의 연구를 수행하였으며, equalization를 HDSS에 적용하여 BER과 저장 밀도 개선의 결과를 얻고 있다^{10,13,20}.

실험결과를 살펴보면, 첫째로는 본 연구실의 HDSS를 통해 얻어진 영상과 결과의 신뢰성을 위해 Daewoo Holographic Data Storage Group에서 제공해준 픽셀 매칭된 5개의 영상을 가지고 BER과 저장 밀도 개선 여부를 살펴보았다. 본 시스템에서 SLM:CCD가 1:4 oversampling된 5개의 영상(120×100 pixels)을 가지고 BER 분포를 살펴본 결과 그림 5에 나타낸 바와 같이 페이지 3에 대해서 약 0.00055의 target BER을 기준으로 전역(global) 임계치를 설정하는 것보다 LE와 DFE가 약 5블럭(400×5=2000 bits)과 12블럭(400×12=4800 bits)을 더 저장할 수 있을 것으로 기대되며, 5개의 페이지에 대해 BER 개선은 LE와 DFE가 각각 31.7%, 28.6%가 개선됨을 실험을 통해 알 수 있었다. 또한 데이터의 신뢰성을 위해 Daewoo Holographic Data Storage Group에서 제공해준 픽셀 매칭된 5개의 영상(320×320 pixels)을 가지고 HDSS로부터 판독된 영상에 대한 LE를 통한 후의 영상과 히스토그램 분포를 그림 6에 나타내었다. 그림 7은 LE 적용에 따른 신호 대 잡음비(SNR : signal to noise ratio)³⁶ 분포를 살펴보았으며, BER 분포와 저장 밀도 개선을 살펴본 결과 그림 8에 나타낸 바와 같이 페이지 3에 대해서 약 0.00015의 target BER을 기준으로 전역 임계치보다 LE와 DFE가 약 5블럭(6400×5=32000 bits)과 1블럭(6400 bits)을 더 저장할 수 있을 것으로 기대되며, 5개의 페이지에 대해 BER 개선은 LE와 DFE가 각각 39%, 32.9%가 개선됨을 실험을 통해 알 수 있었다.

등화기법을 데이터의 검출과정에 적용함으로써 HDSS에서 발생하는 잡음 및 ISI를 완화시키므로써

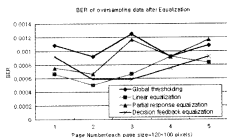
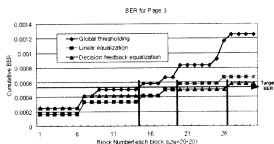
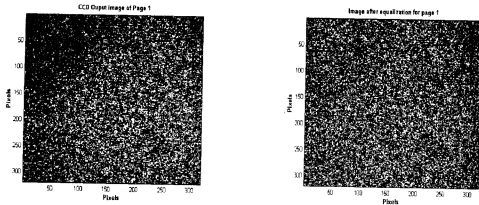


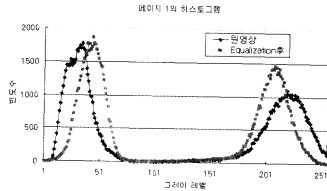
그림 5. Oversampling된 영상에 대한 실험 결과

디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 위한 기록/판독과정에서의 신호처리 기술



(a) HDSS로부터 판독된 영상

(b) 판독된 영상에 대한 LE후의 영상



(c) 판독된 영상과 LE후의 히스토그램 분포

그림 6. HDSS로부터 판독된 영상에 대한 LE후의 영상과 히스토그램 분포

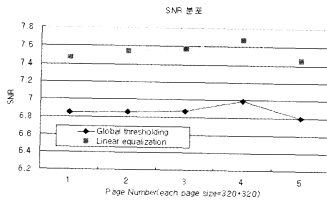


그림 7. LE 적용에 따른 SNR 분포

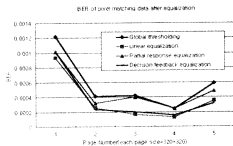
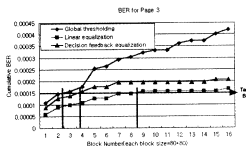


그림 8. 픽셀 배정된 영상에 대한 실험 결과

BER 개선은 물론 페이지에 저장할 수는 있는 픽셀 수도 증가시킬 수 있음을 알 수 있었고, 전체 저장 용량도 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. 페이지에 픽셀 수가 증가하면 할수록 ISI의 영향이 증가할 것이 명백함으로 등화기법이 판독과정에서 중요한 역할을 할 것이며, 데이터 판독과정에서 등화기법을 행한 후 modulation decoding을 수행한다면 훨씬 고 신뢰성의 데이터 복원이 이루어 질 것으로 사료된다. 현재 연구실에서 수행되어진 코딩기법들과 등화기법들에 대한 내용을 간략히 요약하면 아래와 같다.

- Modulation 및 에러 정정 코드(ECC)
 - ① Balanced codes
 - Differential (1:2 balanced) 코드
 - 4:6 balanced 코드
 - 4:8 balanced 코드
 - 6:8 balanced 코드
 - 8:12 balanced 코드
 - ② Parity codes(코드율 0.9 이상)
 - 일반적인 parity 코드
 - 수정된 parity 코드
 - ③ ECC codes
 - Hamming(7, 4, 1), Hamming(12, 8, 1) 코드
 - BCH 코드
 - Reed-Solomon 코드
- Equalization
 - ① 1차원 equalization
 - MMSE(minimum mean square error)

- equalization = LE(linear equalization)
- PR(partial response) equalization
- DFE(decision feedback equalization)
- ② 2차원 equalization

4. 결론

본격적인 멀티미디어 시대의 출현과 함께 고속, 대용량 정보 저장장치의 필요성은 날로 증가되고 있으며, 이러한 요구에 부응하는 기술중의 하나가 HDSS로써 전세계적으로 상용화를 위해서 연구를 활발히 진행되어 오고 있다. 그러므로 본 논문에서는 HDSS의 상용화를 위해 기록/판독과정에서 필수적인 디지털 신호처리기술인 에러 정정 코딩기법, modulation 코드 그리고 데이터 검출을 위한 등화기법들에 대한 연구동향에 대한 논의와 함께, 현재 본 연구실에서 진행되어오고 있는 기술들에 대해 살펴보았다. 이러한 신호처리기술들은 데이터 통신은 물론 DVD, CD 등과 같은 고밀도 광기록 장치의 신호처리기술로도 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

끝으로 본 연구는 산업자원부 차세대 대용량 정보저장 장치개발 사업으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- (1) D. Psaltis and G. W. Burr, "Holographic data storage", Computer, vol. 32, pp. 52-60 (1998).
- (2) V. Vaido, "2-dimensional equalization, detection and coding for volume holographic data storage systems", Ph.D. Dissertation, Department of

Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University (1999).

(3) L. Hessefink, J. F. Heaun and M. C. Bashaw, "Holographic digital data storage systems", *SPIE*, vol. 2778, pp. 410-413 (1996).

(4) G. W. Burr and B. Marcus, "Coding tradeoffs for high-density holographic data storage", *SPIE*, vol. 3802, pp. 18-29 (1999).

(5) H. J. Coufal, D. Psaltis and C. T. Sincrobox, *Holographic Data Storage*, Springer Verlag (2000).

(6) G. W. Burr, J. Ashley, H. Coufal, R. K. Grygier, J. A. Hoffnagle, C. M. Jefferson and B. Marcus, "Modulation coding for pixel-matched holographic data storage", *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 639-641 (1997).

(7) G. W. Burr, W. C. Chou, M. A. Neifeid, H. Coufal, J. A. Hoffnagle and C. M. Jefferson, "Experimental evaluation of user capacity in holographic data storage systems", *Appl. Opt.*, vol. 37, pp. 5431-5443 (1998).

(8) G. W. Burr, J. Ashley, B. Marcus, C. M. Jefferson, J. A. Hoffnagle and H. Coufal, "Optimizing the holographic digital data storage channel", *SPIE*, vol. 3468, pp. 64-75 (1998).

(9) V. Vadde and B. V. K. Vijaya Kumar, "Parity coding for page-oriented optical memories with interpage intensity variation", *Opt. Lett.*, vol. 24, pp. 546-548 (1999).

(10) A. S. Choi and W. S. Baek, "Decision-feedback equalizer and hybrid error correction coding for digital holographic optical memory system", *SPIE*, vol. 4067, pp. 1267-1275 (2000).

(11) 강병복, 노재우, 김근용, 정홍삼, "DOW 부호를 이용한 Hamming Group ECC", *한국광학회 2001년도 동계학술발표회*, pp. 64-65 (2001).

(12) 최인식, 백운식, "Hybrid 코딩과 영상압축방법을 이용한 디지털 홀로그래픽 광 메모리 시스템의 구현", *한국광학회지*, vol. 11, pp. 210-217 (2000).

(13) 산업자원부, "저세대 대용량 정보저장장치 개발사업", 1단계 2차년도 중간요약보고서 (2001).

(14) K. Kim, E. Hwang, J. Roh, J. Park and H. Jung, "Dual constant weight code for holographic data storage", *The Satellite International Symposium on Optical Memory 2000 (ISOM 2000)*, pp. 46-47 (2000).

(15) 박주연, 홍의석, 조장현, "홀로그래픽 정보 저장 장치의 Modulation 코드", *한국광학회 2001년도 동계학술발표회*, pp. 56-57 (2001).

(16) S. Jeon, S. Han, B. Yang, K. M. Byun, B. Lee, "Soft decision decoding for holographic memories with intrapage intensity variations", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 1741-1746 (2001).

(17) M. Keskinöz and B. V. K. Vijaya Kumar, "Application of linear minimum mean-square-error equalization for volume holographic data storage", *Appl. Opt.*, vol. 38, pp. 4387-4393 (1999).

(18) M. Keskinöz and B. V. K. Vijaya Kumar, "Linear minimum mean squared error(LMMSE) equalization for holographic data storage", *IEEE International Conference on Communication*, vol. 3, pp. 1957-1961 (1999).

(19) A. S. Choi, W. S. Baek, J. Y. Park and K. Y. Kim, "Error-correcting balanced modulation codes and normalized least-mean-square equalization for digital holographic memory system", *The Satellite International Symposium on Optical Memory 2000 (ISOM 2000)*, pp. 40-41 (2000).

(20) J. Ashley and B. Marcus, "Encoding and detection of balanced codes", *US Patent 6,016,330* (2000).

(21) D. E. Knuth, "Efficient balanced codes", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. IT-32, pp. 51-53 (1986).

(22) L. G. Tallini, R. M. Capocelli and B. Bose, "Design of some new efficient balanced codes", *IEEE Trans. on Inform. Theory*, vol. 42, pp. 790-802 (1996).

(23) A. S. Choi and W. S. Baek, "Equalization for digital holographic data storage", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 1737-1740 (2001).

(24) X. An and D. Psaltis, "Experimental characterization of an angle-multiplexed holographic memory", *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1913-1915 (1995).

약 령



최인식

근 무 처 : 경북대학교 대학원 전자공학과 박사학위과정
 최종 학력 : 2000, 경북대학교 대학원 전자공학과 박사학위과정수료
 1998, 경북대학교 대학원 전자공학과 공학석사
 1996, 순천대학교 전자공학과 공학사
 주관심분야 : Holographic memory, Digital coding, Channel equalization



백운식

근 무 처 : 경북대학교 전자정보부 교수
 최종 학력 : 1991, Polytechnic Institute of New York 박사
 1981, 연세대학교 전자공학과 공학석사
 1979, 경북대학교 전자공학과 공학사
 주요 경 력 : 1990-1992, (주)현대전자 산업전자연구소 학원연구원
 1981-1984, 해군사관학교 교수부 전염광사
 주관심분야 : Holographic memory, Optical routing, Spectral holeburning