

디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 위한 1차원 및 2차원 최소 평균-제곱-에러 등화에 관한 연구

최안식 · 전영식 · 정종래 · 백운식[†]

경희대학교 전자정보학부

☎ 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지

(2002년 6월 28일 받음, 2002년 12월 3일 수정본 받음)

본 논문에서는 디지털 홀로그래픽 데이터 저장 시스템에서 2차원 데이터의 저장과 복원 동안에 발생하는 상호 픽셀에 의한 간섭(intersymbol interference:ISI)을 완화하고 bit-error-rate(BER) 성능개선을 위해 1차원 및 2차원 최소 평균-제곱-에러(minimum mean-squared-error:MMSE) 등화(equalization)를 적용하였다. 홀로그래픽 저장 시스템으로부터 복원된 10개의 페이지에 대해서 등화 수행전보다 1차원 및 2차원 MMSE 등화 적용 후, BER과 signal-to-noise ratio(SNR)이 향상됨을 보였다.

주제어 : holographic memory, channel equalizer, MMSE equalization.

I. 서 론

볼륨 홀로그래픽 데이터 저장 시스템(holographic data storage system:HDSS)은 높은 저장 용량, 빠른 전달속도 그리고 짧은 접근시간을 동시에 달성할 수 있는 저장 시스템이다.^[1,5] 다른 저장 시스템과 마찬가지로 HDSS에서 저장 밀도는 가장 중요한 요소 중 하나이며, 그림 1은 홀로그래픽 시스템의 저장 밀도 최적화를 위한 접근 방법을 보여주며, 주어진 구조와 다중화 조건에서 저장 밀도를 증가시키기 위한 두 가지 방법이 있다.^[2]

첫 번째는 각 데이터 페이지의 픽셀 수를 증가시키는 것이다. 이는 SLM(spatial light modulator)과 CCD(charge coupled device) 사이의 픽셀 매칭 수행이 어려운 단점이 있다. 다른 접근 방법은 푸리에(Fourier)면에 aperture를 사용하여 3차원 저장 매질에서 스택(stack)의 수를 증가시키거나 각 홀로그램

스택에서 페이지의 수를 증가시키는 방법이 있다. 각 스택에서의 데이터 페이지 N 의 증가는 회절효율이 $1/N^2$ 로 감소하며, 감소된 회절효율은 더 낮은 SNR을 유발하고, BER을 높게 하므로 저장 매체의 서브-볼륨 또는 스택의 다중화된 홀로그램 수를 제한하게 된다. 그림 2에서는 aperture와 저장 밀도 사이의 관계를 나타내었으며, aperture는 산란을 막고 상호 스택 사이의 간섭을 막아주므로 작은 aperture는 홀로그램 스택 간에 밀접하게 하고 밀도를 증가시킨다.^[2] 그러나 작은

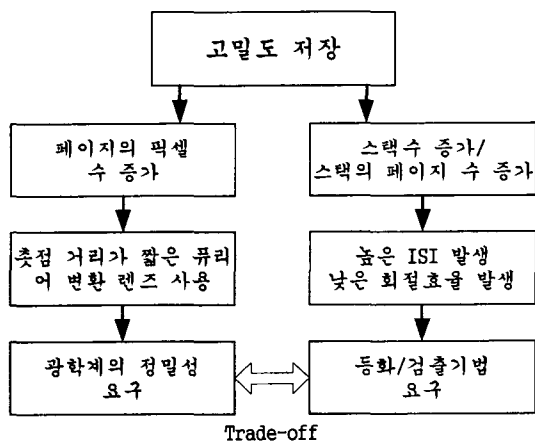


그림 1. 홀로그래픽 저장 시스템의 저장 밀도를 증가시키기 위한 두 가지 접근 방법.

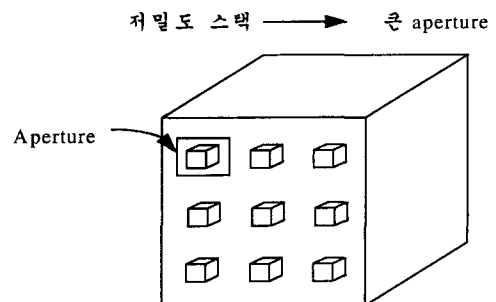
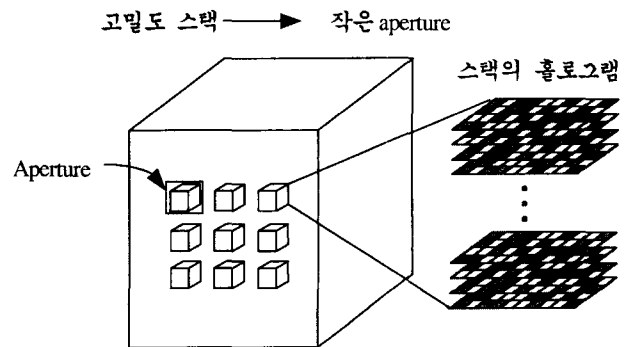


그림 2. Aperture와 저장 밀도 사이의 관계.

[†]E-mail: wsbaek@khu.ac.kr

aperture가 상호 스택간의 간섭을 줄이는 반면에 상호 픽셀간의 간섭(ISI)을 증가시키는 결과를 야기한다.^[2] HDSS에서 증가된 ISI의 완화와 SNR의 강등에 대한 받아들일 수 있는 BER을 가지고 높은 저장 밀도를 획득하기 위한 검출기법과 등화 기법들이 요구된다.^[2-5]

그러므로, 본 논문에서는 두 번째 접근 방법을 위해 디지털 HDSS에 적용 가능한 최소 평균-제곱-에러 등화를 구성하고, 이 등화를 HDSS 데이터 복원과정에 적용하여 고밀도의 2차원 페이지의 기록/판독과정에서 발생하는 ISI를 완화시키므로써 HDSS의 저장용량과 BER의 개선을 이루었다.

II. 최소 평균-제곱-에러(Minimum Mean-Squared-Error) 등화

2.1. 1차원 최소 평균-제곱-에러(Minimum Mean-Squared-Error:MMSE) 등화

MMSE 등화에 대한 1차원의 기본적인 개념을 소개한다.^[4] SLM 입력영상을 a_k , CCD 출력 영상을 x_k 그리고 광학 시스템에 대한 이산 point-spread-function(PSF)를 h_k 로 나타낸다. 그러면 HDSS에서의 입출력 관계를 수식 (1)처럼 나타낼 수 있으며,^[2,4,5]

$$x_k = |a_k \otimes h_k + n_k|^2 \quad (1)$$

여기에서 \otimes 는 이산 컨벌루션(convolution)이며, n_k 는 광학적·전기적 잡음을 포함하는 백색잡음(white-Gaussian noise)이다.

등화 구조는 $2N-1$ 의 탭 수를 가지는 제한 임펄스 응답(finite-impulse response)이며, 등화된 출력 y_k 는 수식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며, w_k 는 등화 계수이다.

$$y_k = \sum_{i=-N+1}^{N-1} w_i x_{k-i} \quad (2)$$

등화 구조에서 계수들은 평균-제곱-에러 $E\{\epsilon_k^2\}$ 가 최소가 되는 시점에서 구할 수 있으며, 에러 신호는 수식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\epsilon_k = a_k - y_k \quad (3)$$

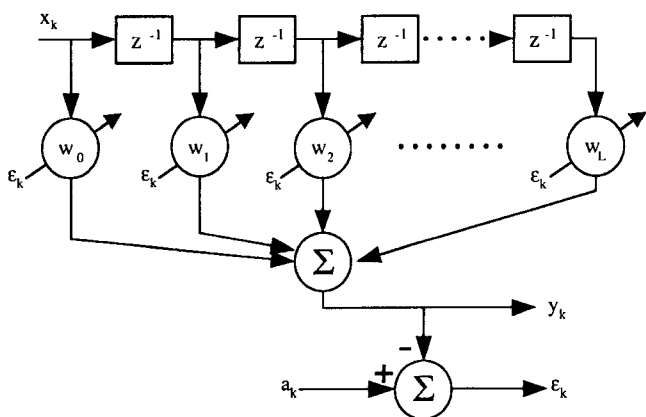


그림 3. x축과 y축의 등화 계수를 구하기 위한 블럭도.

x축과 y축에 대해 각각 간단한 least-mean-square(LMS) 알고리즘^[6]을 이용하여 계수들을 찾았으며, x축과 y축에 대해 MMSE 등화 계수들을 찾기 위한 방법으로, 그림 3의 블럭다이어그램을 이용하였다.

페이지 1에 대해 이미 알고 있는 SLM 입력영상과 CCD 출력영상을 가지고 LMS 알고리즘을 사용하여 평균-제곱-에러가 최소가 되는 시점(본 결과에서는 마지막 픽셀 후)을 선택하여 등화 계수들을 구했고, LMS 알고리즘은 수식 (4)와 같으며, μ 는 적응상수로써 수렴속도 및 시스템의 안정성을 나타내는 상수이다.

$$w_{k+1} = w_k + 2 \mu \epsilon_k x_k \quad (4)$$

일단 페이지 1에 대해서 등화 계수들이 결정되면, 모든 CCD 출력 데이터를 페이지 1의 등화 계수들을 가지고 컨벌루션을 수행하였으며, 등화된 영상에 대한 임계값 설정은 BER이 최소가 되는 값을 선택하였다.

2.2. 2차원 최소 평균-제곱-에러 등화

참고문헌 [3-5]의 2차원 MMSE 등화 기법은 1차원 MMSE 등화의 확장이며, 평균-제곱-에러 $E\{\epsilon_k^2\}$ 가 최소가 되는 시점에서 수식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며,^[3,5,7]

$$R_{DI}(n_1, n_2) = w(n_1, n_2) \otimes R_{II}(n_1, n_2) \quad (5)$$

여기에서, $R_{DI}(n_1, n_2)$ 은 SLM 입력과 CCD 출력의 상호상관 함수이며, $R_{II}(n_1, n_2)$ 은 CCD 출력의 자기상관 함수이다. 그러므로 푸리에 변환을 이용하여 수식 (5)을 (6)과 같이 나타낼 수 있으며, 수식 (6)을 역 푸리에 변환을 함으로써 우리가 원하는 MMSE 등화 계수들을 찾을 수 있다.

$$FT[w(n_1, n_2)] = \frac{FT[R_{DI}(n_1, n_2)]}{FT[R_{II}(n_1, n_2)]} \quad (6)$$

MMSE 계수들을 구하기 위해 전체 영상을 일정한 블럭(블럭 크기=3×3)으로 나누어 각각의 블럭에 대해 MMSE 등화 계수들을 찾은 후에 CCD 출력을 이 계수들로 컨벌루션한 후 BER 성능이 가장 좋은 MMSE 계수들을 찾았다. 일단 페이지 1에 대해서 등화 계수들이 결정되면, 모든 CCD 출력 데이터를 페이지 1의 등화 계수들을 가지고 컨벌루션을 수행하였으며, 등화된 영상에 대한 임계값 설정은 BER이 최소가 되는 값을 선택하였다.

III. 실험결과 및 분석

본 논문의 실험 데이터는 대우전자의 홀로그래픽 데이터 저장 시스템을 이용하였다. 대우전자의 홀로그래픽 저장 시스템은 200 mW($\lambda = 532$ nm)의 파워를 갖는 Nd:YAG 레이저에서 나온 빔은 일차적으로 광 감쇄기를 통과하게 하여 기록/재생 과정에서 전체 빔 광량을 조절할 수 있도록 하였다. 레이저에서 나온 빔은 빔 확대기(beam expander)에 의해 일차적으로 확대된다. 신호 광 쪽으로 분주된 빔은 공간 필터(spatial filter)와 렌즈를 사용하여 다시 한번 확대함으로써, 앞단의 광

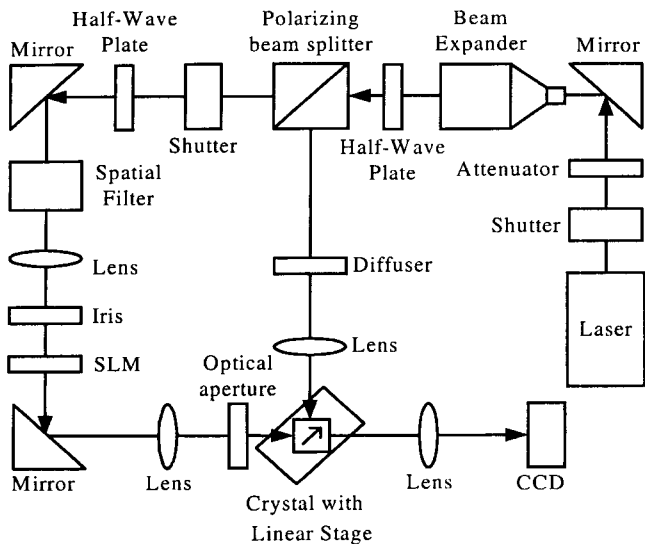


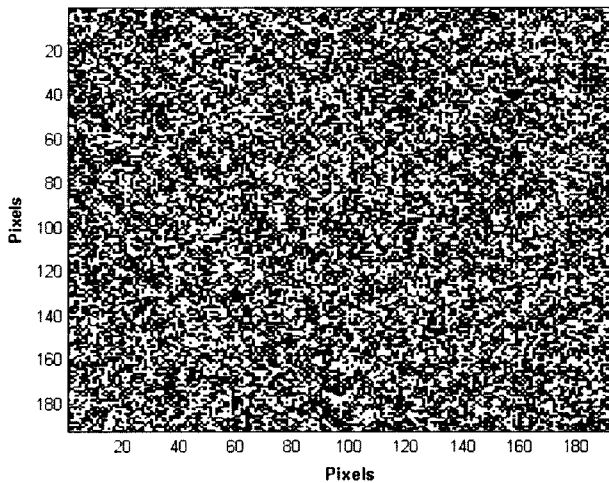
그림 4. 실험 구성도.

학계를 통과하며 발생된 노이즈들을 필터링하여 SLM에 입사하는 빔의 광 분포를 비교적 균일하게 하였다. 시스템에서 사용한 SLM은 CRL사의 투과형 LCD 모듈을 사용하였으며, 이 SLM은 1024×768 픽셀의 수를 가지며 픽셀 피치는 36 μm, 픽셀 크기는 25×33 μm이므로 이 SLM의 fill factor는 약 64%이다. CCD로는 픽셀 피치는 9 μm, 픽셀 크기는 1536×1024를 가지는 Kodak KAF1602E가 사용된 Photometrics Sensys CCD를 사용하였다. 본 실험의 홀로그래픽 저장 시스템은 푸리에 홀로그래프를 기록/재생하는 4-f 구조를 갖고 있으며 이때 SLM의 픽셀을 CCD 픽셀에 정확히 1대 4매칭시키기 위해 동일한 초점거리를 갖는 두 개의 렌즈를 사용하였다. 사용한 렌즈는 Newport사의 Triplet 렌즈이며 초점거리는 125 mm, 구경은 38 mm이며 저장 밀도를 높이기 위해 푸리에 면에 Nyquist aperture(≈1.85 mm)를 사용하였다. 시스템에서 다중화는 분해능 50 nm를 가지는 linear stage를 이용하여 Speckle-Shift 방법을 사용하였으며, 다중화시 15 μm씩 이동하며 기록/재생하였고, 저장 매질로는 Fe가 0.03% 도핑된 LiNbO₃(20×20×5 mm)를 사용하였다. 전체 70 페이지(페이지 크기=192×192 픽셀)를 기록/재생하여 그중 첫 번째 10페이지만을 실험 데이터로 사용하였으며, 기록시간은 2초로 고정하였다. 전체 실험 구성도를 그림 4에 그리고 페이지 1에 대한 SLM 입력 영상과 복원된 영상을 그림 5에 나타내었다.

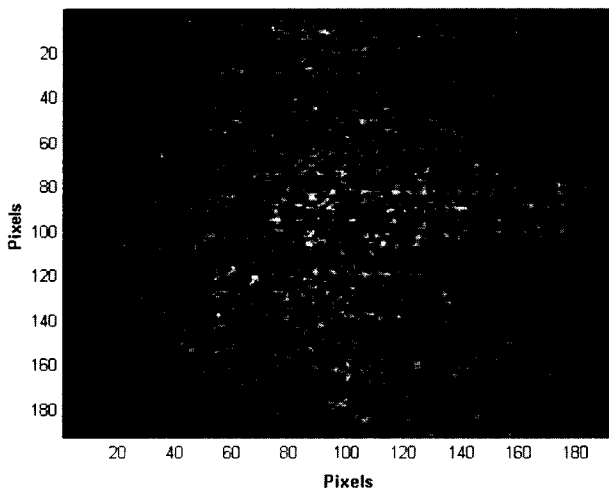
실험방법으로는 2장에서 설명한 방법들로 아래와 같이 등화를 수행하였으며, k 와 l 은 등화 계수 수이다.

방법 1: $w_x[k]$ 을 가지고 x 축에 대해서 등화 수행

방법 2: $w_y[l]$ 을 가지고 y 축에 대해서 등화 수행



(a) SLM 입력영상



(b) 복원된 영상

그림 5. SLM 입력영상과 복원된 영상.

표 1. 방법 1에서 페이지 1에 대한 계수 수에 따른 정규화된 MMSE 등화 계수 값

계수	계수 수 3	계수 수 5	계수 수 7
w_0	1.0	1.0	1.0
w_1	-0.1036	-0.1262	-0.1267
w_2	-0.0049	-0.0187	-0.0197
w_3		-0.0222	-0.0228
w_4		-0.0294	-0.0239
w_5			-0.0299
w_6			-0.0209

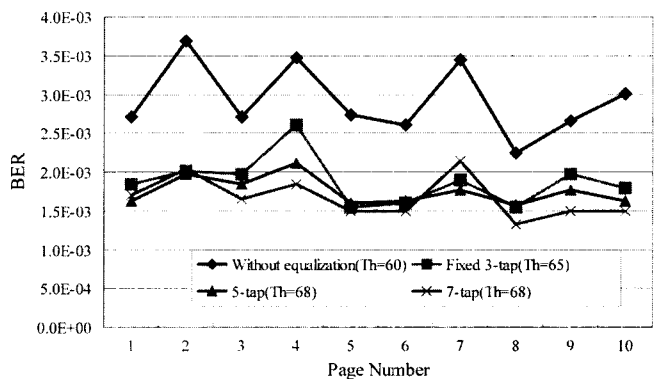


그림 6. 방법 1에서 등화 계수 수에 따른 BER 분포.

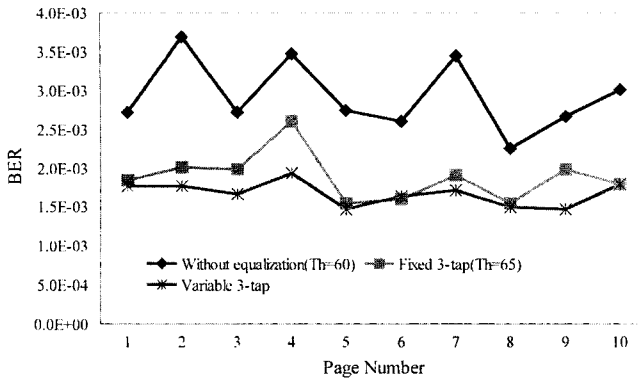


그림 7. 방법 1에서 10개 페이지에 대한 서로 다른 MMSE 등화 계수에 따른 BER 분포.

방법 3 : $w_y[l]$ 을 가지고 y 축에 대해서 등화를 수행한 후 다시 $w_x[k]$ 을 가지고 x 축에 대해서 등화 수행

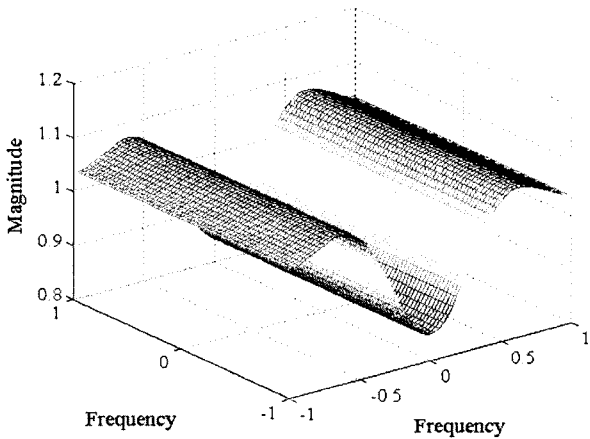
방법 4 : 2차원 필터 $w[k, l] = w_x[k] \cdot w_y[l]$ 을 가지고 등화 수행

방법 5 : 2차원 MMSE 등화 수행

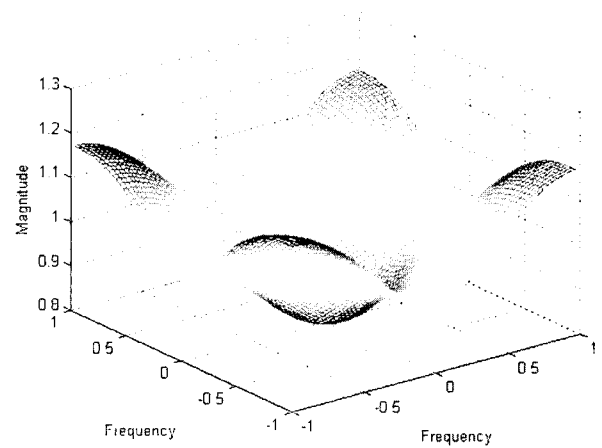
일반적으로 영상처리 분야에서 방법 3과 4는 적용되지 않으나,^[8] 우리는 HDSS의 데이터 복원과정에 적용하여 BER의 성

표 3. 페이지 1에 대한 방법 1과 2의 정규화된 MMSE 등화 계수 값

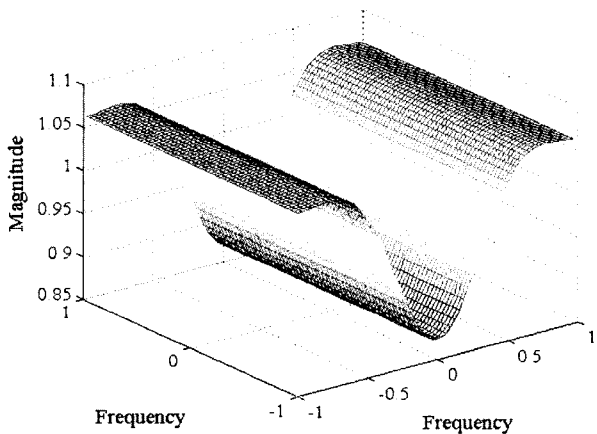
축 \ 계수	w_0	w_1	w_2
x	1.0	-0.1036	-0.0049
y	1.0	-0.0840	-0.0151



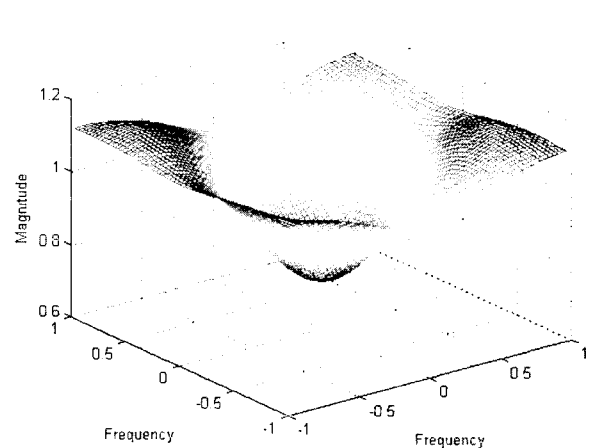
(a) 방법 1에 대한 정규화된 등화 계수의 주파수 응답



(a) 표 4의 정규화된 등화 계수에 대한 주파수 응답



(b) 방법 2에 대한 정규화된 등화 계수의 주파수 응답



(b) 표 5의 정규화된 등화 계수에 대한 주파수 응답

그림 8. 표 3의 방법 1과 2의 등화 계수에 대한 주파수 응답.

그림 9. 표 4와 5의 정규화된 등화 계수에 대한 주파수 응답.

표 2. 방법 1에서 10개의 페이지에 대한 서로 다른 정규화된 MMSE 등화 계수 값

페이지번호 \ 계수	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
w_0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
w_1	-0.1036	-0.1045	-0.1039	-0.1151	-0.1012	-0.1029	-0.1208	-0.0979	-0.0919	-0.0876
w_2	-0.0049	-0.0210	-0.0068	-0.0082	0.0023	-0.0019	-0.0083	0.0564	0.0169	-0.0007

표 4. 방법 4의 정규화된 등화 계수 값

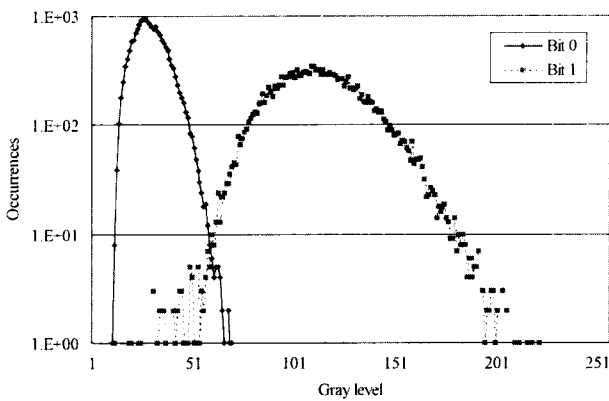
		x축		
		w_0	w_1	w_2
y축	w_0	1.0	-0.1036	-0.0049
	w_1	-0.0840	0.0087	0.0004
	w_2	-0.0151	0.0016	0.0001

표 5. 방법 5의 정규화된 등화 계수 값

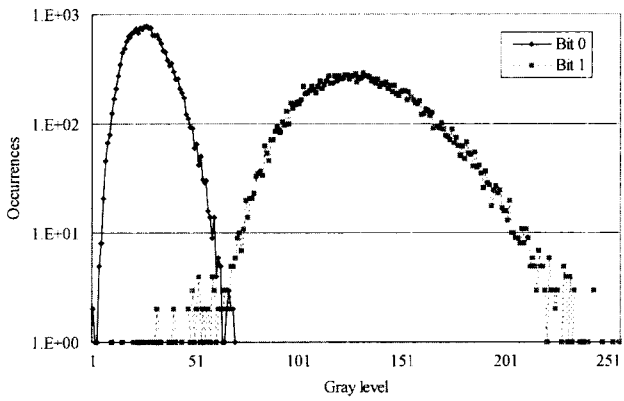
		x축		
		w_0	w_1	w_2
y축	w_0	0.0376	-0.0771	-0.0423
	w_1	-0.0772	1.0	-0.0359
	w_2	-0.0258	0.0028	-0.0326

능 개선을 이루고자 사용하였다. 본 논문에서 10 페이지 대해 등화 계수는 x축과 y축에 대해 3개를 선택하였으며, 방법 1에서 페이지 1에 대한 계수 수에 따른 정규화된 값들을 표 1에 나타내었다. 3개를 선택한 이유를 방법 1에서 고려해 보면, 그

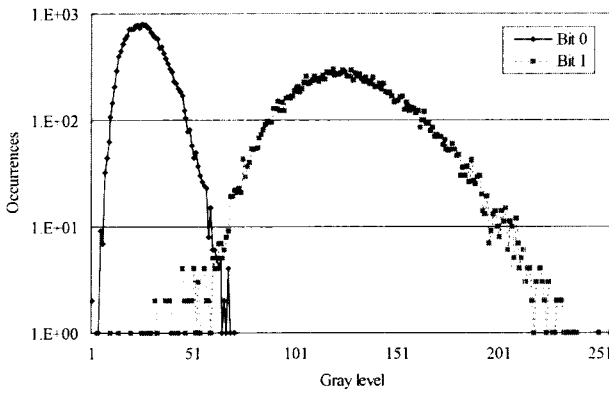
림 6에서 보는바와 같이 등화 계수 수가 증가하였을 때 BER 개선을 볼 수 있었으나, 등화 수행 시간을 고려해 등화 계수를 3개로 설정하였으며, 그림에서 T_h 는 전역적 임계값이다. 표 2는 방법 1에서 10개의 페이지에 대해 서로 다른 등화



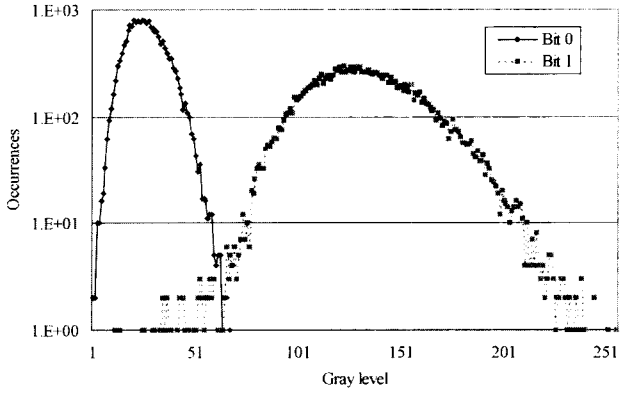
(a) 등화 전의 히스토그램



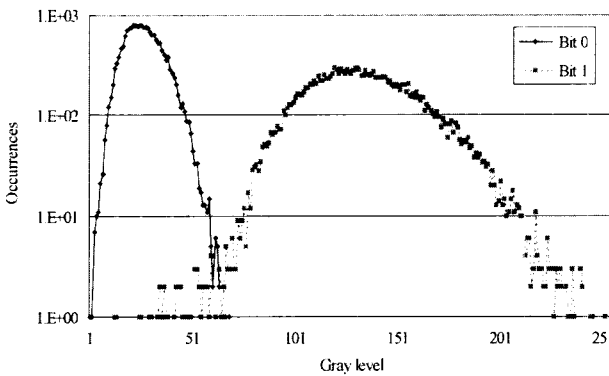
(b) 방법 1이 적용된 히스토그램



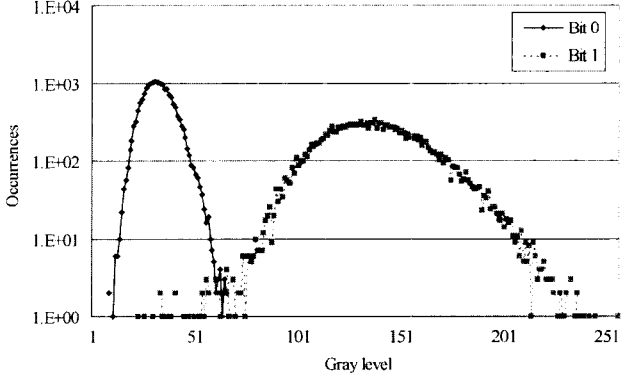
(c) 방법 2가 적용된 히스토그램



(d) 방법 3이 적용된 히스토그램



(e) 방법 4가 적용된 히스토그램



(f) 방법 5가 적용된 히스토그램

그림 10. 페이지 1에 대한 등화 전·후의 히스토그램.

계수들을 나타내었고, 10개 페이지에 MMSE 등화 계수가 고정되었을 때와 서로 다른 등화 계수가 설정되었을 때의 BER 분포를 그림 7에 나타내었다. 그림 7에서보면, 각 페이지에 다른 등화 계수가 사용되어질 때 BER이 보다 향상됨을 확인할 수 있었으나, 시스템 구현에서 볼 때 MMSE 등화 방법으로 각 페이지에 서로 다른 등화 계수를 적용한다는 것은 부적합할 것으로 판단되기 때문에 모든 페이지에 대해 같은 등화 계수를 가지고 등화를 수행하였다.

표 3은 등화 계수 수를 3으로 고정되었을 때 방법 1과 2에 대한 등화 계수 값을 나타내었다. 이때 $\mu = 0.0000001$ 로 설정하였으며, μ 는 최적의 등화 계수들이 선택되었을 때의 값이다. 또한 표 3의 등화 계수들의 주파수 응답을 살펴본 결과 그림 8에서처럼 고주파 통과 특성을 가짐을 알 수 있었으며, 이는 퓨리에 평면의 aperture에 의해 발생하는 복원 영상의 픽셀 번짐 현상 즉, 저주파 응답에 대한 역이 성립함을 보여준다고 할 수 있다.

표 4와 5에는 방법 4와 5의 정규화된 등화 계수 값을 나타내었으며, 이들의 주파수 응답을 그림 9에 나타내었다.

그림 9 또한 등화 계수들의 주파수 응답이 고주파 통과 특성을 확인하였다. 그림 10은 페이지 1에 대한 등화 전·후의 히스토그램을 나타내었으며, 히스토그램으로부터 등화를 수행했을 경우 0과 1이 겹치는 부분이 좁아짐을 알 수 있었으며, 방법 5가 0과 1이 겹치는 부분이 가장 적음을 확인할 수 있었다.

각 등화 방법에서 페이지 1의 등화 계수 값을 가지고 10개의 페이지에 적용한 후 발생한 전체 에러 수를 표 6에 나타내었으며, 그림 11에는 등화 전·후의 BER 분포를 나타내었다. 이때 임계값은 각 방법에서 10 페이지에 대해 같은 값으로 설정하였다. 그림 11에서 보면 2차원 MMSE 등화가 가장 좋은 BER 성능을 가짐을 알 수 있었고, 다른 등화 방법들도 등화를 수행하지 않았을 경우보다 BER 성능이 개선됨을 확인하였다.

그림 12는 각 방법에 대해 BER이 최소일 때 SNR 분포를 나타내었으며, SNR은 아래 수식을 이용해 계산하였으며,^[9]

$$SNR = \frac{\mu_1 - \mu_0}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}}$$

여기에서 μ_1 과 μ_0 은 ON과 OFF 픽셀의 평균이며, σ_1^2 과 σ_2^2 은 ON과 OFF 픽셀의 분산이다.

실험결과로부터, 등화를 수행하면 히스토그램 분포에서 0과 1의 겹치는 부분이 좁아지므로 등화를 수행하지 않은 경우보다 0과 1을 잘 분리할 수 있음을 알 수 있었고, 각 방법을

표 6. 등화 전·후 10개의 페이지에 발생한 전체 에러 수

	전체 에러수	개선율
등화 전	1080	-
방법 1	693	≒ 36%
방법 2	850	≒ 21%
방법 3	569	≒ 47%
방법 4	540	≒ 50%
방법 5	388	≒ 64%

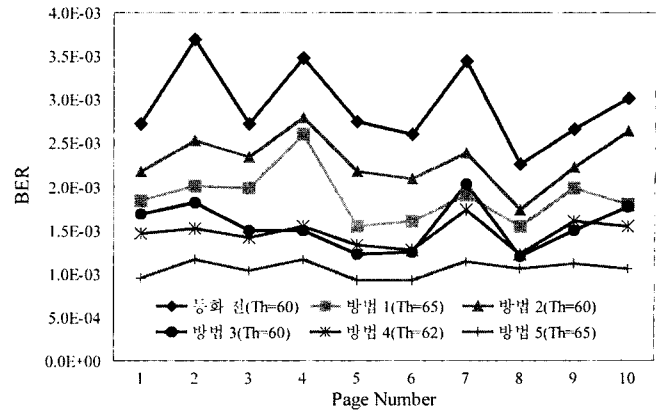


그림 11. 각 등화 방법에 대한 BER 분포.

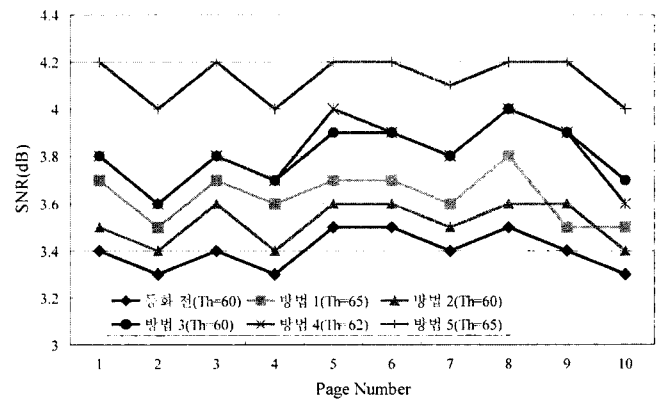


그림 12. 각 등화 방법에 대한 SNR 분포.

적용한 경우 등화 수행 전보다 BER과 SNR이 개선됨을 확인할 수 있었으며, 방법 5가 가장 큰 BER 성능 개선이 이루어졌다. 그림 11로부터 분명한 사실은 HDSS의 데이터 복원 과정에 등화를 수행하면 BER 개선뿐만 아니라 페이지에 저장될 수 있는 픽셀 수 그리고 전체 저장용량의 증가 효과를 가져올 수 있음을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문에서는 HDSS에 실질적으로 적용 가능한 최소 평균-제공-에러 등화를 구성하고, 이 등화를 HDSS의 데이터 복원 과정에 적용하여 고밀도의 2차원 페이지의 기록/판독과정에서 발생하는 ISI를 완화시킴으로서 HDSS의 BER과 저장용량 개선을 이룰 수 있음을 알 수 있었다. 또한 등화 계수들의 주파수 응답이 고주파 통과 특성을 알 수 있었고, 최소 평균-제공-에러 등화를 적용한 실험결과 등화 수행전보다 BER 성능이 개선됨을 확인하였다. 최소 평균-제공-에러 등화는 BER 개선 정도에서도 만족할 만한 효과를 얻을 수 있으므로 HDSS의 데이터 복원과정에서 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구에 도움을 주신 대우전자의 홀로그래픽 데이터 저장

그룹에 감사 드리며, 본 연구는 산업자원부주관 '99 산업기반 기술개발사업 중 차세대 대용량 정보저장장치개발사업의 부분적인 결과임을 밝힙니다.

참고문헌

- [1] D. Psaltis and G. W. Burr, "Holographic data storage," *Computer*, vol. 32, pp. 52-60 (1998).
- [2] V. Vadde, "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] H. J. Coufal, D. Psaltis and C. T. Sincerbox, *Holographic Data Storage*, Springer Verlag (2000), pp. 309-317.
- [4] M. Keskinoz 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).
- [5] M. Keskinoz 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).
- [6] S. Haykin, *Adaptive Filter theory, 3rd Ed.*, Prentice-Hall (1996), Chapter 9.
- [7] J. S. Lim, *Two-dimensional signal and image processing*, Prentice-Hall (1990), Chapter 6, pp. 352-356.
- [8] A. K. Jain, *Fundamentals of digital image processing*, Prentice-Hall (1989), Chapter 8, pp. 267-284.
- [9] X. An and D. Psaltis, "Experimental characterization of an angle-multiplexed holographic memory," *Opt. Lett.*, vol. 20, pp. 1913-1915 (1995).

A study on 1 & 2 dimensional minimum mean-squared-error equalization for digital holographic data storage system

An Sik Choi, Young Sik Jun, Jong Rae Jeong, and Woon Sik Baek[†]

School of Electronics and Informations, KyungHee University, Yongin-si 449-701, KOREA

[†]*E-mail: wsbaek@khu.ac.kr*

(Received June 28, 2002, Revised manuscript December 3, 2002)

In this paper, we presented 1 & 2 dimensional minimum mean-squared-error (MMSE) equalization scheme in a digital holographic data storage system to improve bit-error-rate (BER) and to mitigate inter-symbol interference (ISI) which were generated during the data storage and retrieval processes. We showed experimentally for ten data pages retrieved from the holographic storage system that BER and signal-to-noise ratio (SNR) were improved by adopting MMSE equalization.

Classification code : IP.010.