

논문 2015-52-9-3

홀로그래픽 데이터 저장장치에서의 멀티레벨 변조부호

(Multilevel Modulation Codes for Holographic Data Storage)

정 성 권*, 이 재 진**

(Seongkwon Jeong and Jaejin Lee[Ⓢ])

요 약

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 한 픽셀에 1비트 이상을 저장할 수 있기 때문에 용량에 대한 큰 장점을 갖는다. 본 논문에서는 (1) 레벨의 수, (2) 코드워드 내에서 픽셀의 수, (3) 최소 유클리디안 거리에 따른 코드워드들의 개수를 보여준다. 픽셀당 레벨의 수의 증가는 용량을 증가시키지만 노이즈 마진이 감소함에 따라 많은 에러를 발생시킨다. 코드워드에서 픽셀 개수의 증가는 코드율을 증가시키며 용량을 늘리지만, 코드의 인코더와 디코더의 복잡도를 증가시킨다. 코드의 최소 거리 증가는 검출 에러를 줄이지만 코드율을 감소시킨다. 위와 같이 시스템 디자인은 항상 장·단점을 가지고 있지만, 시스템의 요구사항을 위해 주어진 상황에서 효과적인 방법을 찾아야 한다. 그러므로 본 논문에서 조사된 코드워드의 수는 효과적인 코드 디자인을 위한 가이드라인을 제시한다.

Abstract

The multilevel holographic data storage offers considerable advantage for capacity, since it can store more than one bit per pixel. In this paper, we search the number of codewords for each code depending on three conditions: (1) the number of levels, (2) the number of pixels in a codeword, and (3) the minimum Euclidean distance of a code. Increasing the number of levels per pixel creates more capacity, while causing more errors, by reducing the noise margin. Increasing the number of pixels in a codeword can increase the code rate, which means more capacity, but increases the complexity of the encoder/decoder of the code. Increasing the minimum distance of a code reduces the detection error, while reducing the code rate of the code. In such a fashion, a system design will always have pros and cons, but our task is to find out an effective one under the given conditions for the system requirements. Therefore, the numbers we searched can provide some guidelines for effective code design.

Keywords : holographic data storage, modulation code, multilevel, error correction

I. 서 론

홀로그래픽을 이용한 저장기술은 1948년 전자현미경의

해상도를 높이기 위한 기술로 개발된 이후, 레이저의 발명으로 가속화 되었다^[1~3]. 이 홀로그래픽 기술을 이용한 홀로그래픽 매체에 체적으로 데이터를 저장하는 방법이 홀로그래픽 데이터 저장장치(holographic data storage, HDS)이다. HDS의 기본원리는 정보를 담고 있는 데이터를 SLM(spatial light modulator)에 의해 신호빔으로 바뀌고, 이를 기준빔(reference beam)으로 간접시켜 생기는 간섭무늬를 홀로그래픽 매체에 기록하고, 반대로 읽을 때는 기준빔을 홀로그래픽 매체에 입사하여 정보 신호를 추출하는 것이다. 다양한 기준빔을 이용하여 여러 페이지를 한 곳에 저장할 수 있다. 신호빔에 데

* 학생회원, ** 정회원, 숭실대학교 전자정보공학부
(School of Electronics Engineering, Soongsil University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: zlee@ssu.ac.kr)

※ 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF-2013R1A1A2059077).

Received ; July 28, 2015 Revised ; August 17, 2015

Accepted ; September 3, 2015

이터를 페이지 형식으로 보내기 때문에 데이터 전송률이 높고, 여러 페이지를 한 곳에 저장할 수 있기 때문에 저장 용량 또한 매우 높일 수 있다^[4-5]. HDS가 저장용량 및 빠른 전송율을 갖고 있지만, 2차원 픽셀 이미지를 읽기 때문에, 블러(blur)효과, 즉 2차원 인접 심볼간 간섭(inter-symbol interference, ISI)이 생긴다. 또한 HDS는 여러 페이지를 같은 공간에 저장하기 때문에 인접 페이지간 간섭(inter-page interference, IPI)이 생긴다. 이런 문제들을 해결하기 위해 여러 가지 2차원 변조 부호를 연구해왔다^[6-8].

멀티레벨 홀로그래픽 데이터 저장장치는 픽셀당 1비트 이상을 저장할 수 있다. M-Level을 갖는 HDS라면, 한 픽셀이 나타낼 수 있는 심볼의 수는 M가지가 되고 이것은 용량에서 큰 이점을 갖는다^[9-10]. G. Burr은 HDS에 대해서 그레이 스케일 데이터 페이지를 조사하였는데, 그의 실험 결과 3-레벨 인코딩 매핑은 기존 용량보다 30% 향상된 성능을 보였으며, 또한 2진 인코딩 방식보다 30% 향상된 데이터 전송률을 보였다^[10]. B. King 또한 유사한 결과를 소개하였다^[11]. 용량의 이점 이외에도 멀티레벨 심볼은 비트의 경우보다 다양한 코드워드를 제공하기 때문에 최소거리를 크게 선택할 때마다 여러 정정 능력이 좋아진다.

본 논문에서는 멀티레벨 변조 부호를 위해 (1) 레벨의 수, (2) 코드워드 내에서 픽셀의 수, (3) 최소 유클리디안 거리에 따른 코드워드 개수를 조사하였다. 픽셀당 레벨의 수의 증가는 용량을 증가시키지만 노이즈 마진이 감소함에 따라 많은 에러가 발생한다. 코드워드에서 픽셀 개수의 증가는 코드율을 증가시키며 용량을 늘리지만, 인코더와 디코더의 복잡도를 증가시킨다. 또한 코드워드간의 최소 거리 증가는 검출 에러를 줄이지만 코드율을 감소시킨다. 위와 같이 시스템 디자인은 항상 장·단점을 가지고 있지만, 시스템의 요구사항을 위해 주어진 상황에서 효과적인 방법을 찾아야 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 (1) 픽셀의 개수가 2, 3, 4, 5개 일 때, (2) 코드의 최소 유클리디안 거리가 3, 4, 5일 때, (3) 코드워드에서 픽셀의 개수가 4~19개 일 때에 대한 각각의 코드워드의 수를 조사한다. III장에서는 홀로그래픽 채널에서의 시뮬레이션 환경 및 실험결과를 보여주며, IV장에서는 앞 장을 결과를 바탕으로 결론을 내린다.

II. HDS를 위한 멀티레벨 변조부호

HDS의 코드워드는 2차원 배열의 다양한 모양일 수 있으며, 이 때 픽셀의 개수는 P 개라고 가정한다. 멀티레벨 HDS에서 각 픽셀은 L 개의 심볼값 중 하나이다. 그러므로 L^P 개의 코드워드가 가능하다. L^P 개의 코드워드들 중에서 변조코드는 요구된 HDS를 위해 비용과 성능을 고려하여 조건을 만족하는 코드워드의 집합이다. 부호 성능의 중요한 조건중의 하나는 BER을 낮추는 것이며, 코드워드의 여러 정정 능력이 BER을 감소시킨다. 임의적으로 선택된 코드워드보다 코드워드들간의 거리가 가능한 멀리 있는 코드워드가 더 큰 노이즈 마진을 갖기 때문에, 이러한 코드워드를 선택함으로써 정정 능력을 높일 수 있다.

코드워드 x 를 다음과 같이 $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)$ 로 정의하고, 각 픽셀은 $x_i = 0, 1, \dots, L-1$ 의 심볼값을 갖는다고 하자. 두 개의 코드워드 x 와 y 사이의 거리 d 는 다음과 같이 정의한다.

$$d(x, y) = \sum_{i=1}^P |x_i - y_i| \tag{1}$$

여기서 P 는 코드워드당 픽셀의 수이다. 모든 코드워드들간의 거리차들 중에서 가장 작은 거리를 d_{\min} 이라고 하면, d_{\min} 이 클수록 노이즈 마진이 크므로 효과적

표 1. 픽셀과 최소거리에 따른 2-레벨 코드워드의 수
Table 1. The number of 2-level codeword patterns according to the pixels/codeword and minimum distance of the code.

		$d_{\min} \geq 5$	$d_{\min} \geq 4$	$d_{\min} \geq 3$
2L	6P	2	4	8
	8P	4	16	16
	9P	4	16	32
	10P	8	32	64
	11P	16	64	128
	12P	16	128	256
	13P	32	256	512
	14P	64	512	1024
	15P	128	1024	2048
	16P	256	2048	2048
	17P	512	2048	4096
	18P	512	4096	8192

표 2. 픽셀과 최소거리에 따른 3-레벨 코드워드의 수
Table 2. The number of 3-level codeword patterns according to the pixels/codeword and minimum distance of the code.

		$d_{\min} \geq 5$	$d_{\min} \geq 4$	$d_{\min} \geq 3$
3L	6P	12	38	55
	8P	50	241	368
	9P	109	523	949
	10P	244	1339	2473
	11P	560	3539	6544
	12P	1305	9472	17468

표 3. 픽셀과 최소거리에 따른 4-레벨 코드워드의 수
Table 3. The number of 4-level codeword patterns according to the pixels/codeword and minimum distance of the code.

		$d_{\min} \geq 5$	$d_{\min} \geq 4$	$d_{\min} \geq 3$
4L	4P	9	20	29
	5P	19	50	88
	6P	47	166	281
	7P	129	513	941
	8P	359	1761	3168
	9P	1032	5948	27027

표 4. 픽셀과 최소거리에 따른 5-레벨 코드워드의 수
Table 4. The number of 5-level codeword patterns according to the pixels/codeword and minimum distance of the code.

		$d_{\min} \geq 5$	$d_{\min} \geq 4$	$d_{\min} \geq 3$
5L	4P	17	49	68
	5P	50	153	247
	6P	154	578	984
	7P	514	2327	4135
	8P	1762	9746	17437

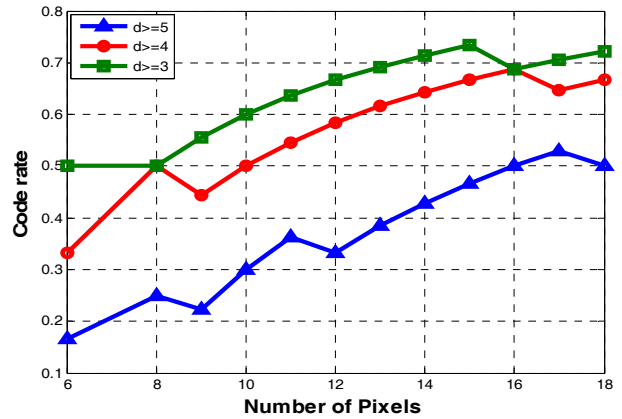


그림 1. 코드워드에서 픽셀 수 변화에 따른 2-레벨 변조부호 코드율

Fig. 1. Code rates of 2-level modulation code by varying the number of pixels in a codeword.

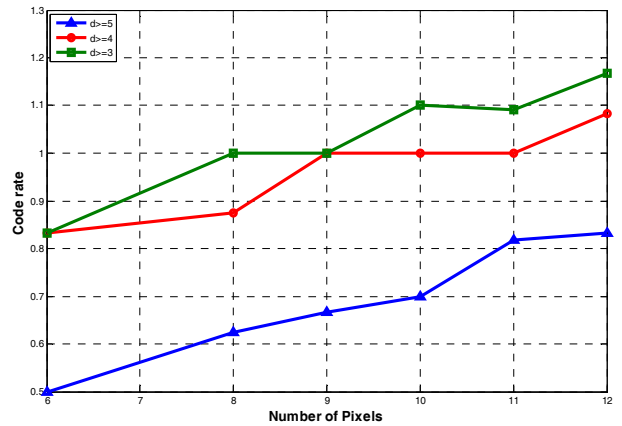


그림 2. 코드워드에서 픽셀 수 변화에 따른 3-레벨 변조부호 코드율

Fig. 2. Code rates of 3-level modulation code by varying the number of pixels in a codeword.

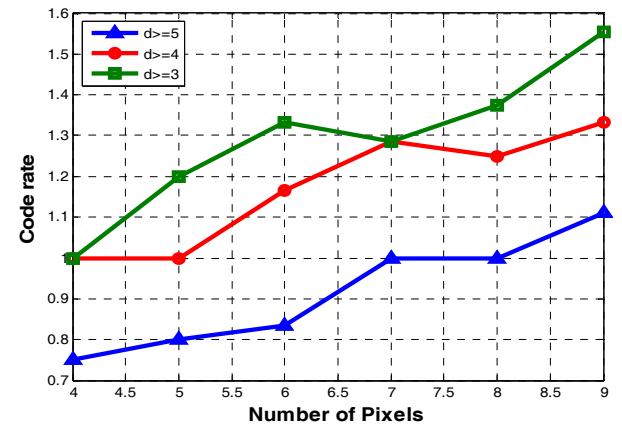


그림 3. 코드워드에서 픽셀 수 변화에 따른 4-레벨 변조부호 코드율

Fig. 3. Code rates of 4-level modulation code by varying the number of pixels in a codeword.

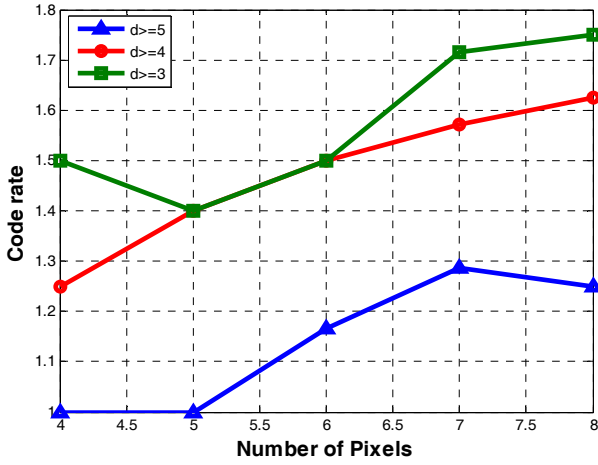


그림 4. 코드워드에서 픽셀 수 변화에 따른 5-레벨 변조부호 코드율

Fig. 4. Code rates of 5-level modulation code by varying the number of pixels in a codeword.

으로 에러를 줄일 수 있다. 표 1~4는 d_{\min} 에 따른 코드워드 개수를 보여준다. 표 1은 레벨이 2일 때, 즉 비트 단위로 저장할 때이며, 표 2는 레벨이 3일 때, 표 3은 레벨이 4일 때, 표 4는 레벨이 5일 때 픽셀의 수에 따른 코드워드 개수를 보여준다.

그림 1~4는 각각의 픽셀 개수의 변화와 d_{\min} 에 따른 코드율을 2-레벨부터 5-레벨까지 보여준다. 입력 비트의 개수를 픽셀의 수로 나눠서 코드율을 계산할 수 있으며 작은 최소 거리를 갖는 코드는 가능한 코드워드 패턴이 더 많으므로 d_{\min} 이 큰 코드보다 높은 코드율을 갖는다. 그러므로 픽셀개수의 증가는 코드율을 높여 주며 높은 저장밀도를 가질 수 있다.

1. 멀티레벨 변조부호 예제

코드간의 최소거리가 각각 4, 5일 때 4-레벨이고 코드워드가 4개의 픽셀로 구성될 때의 예제를 보여준다. 표 3을 보면 d_{\min} 이 각각 4와 5일 때의 가능한 코드워드 패턴은 20개와 9개이다. $d_{\min}=4$ 일 때, $2^4 < 20$ 이고 4개의 입력 비트는 16가지의 경우가 가능하므로 20개의 가능한 코드워드 중에서 16개를 선택한다. 이와 마찬가지로 $d_{\min}=5$ 일 때, $2^3 < 9$ 이므로 3개의 입력 비트는 8가지의 경우가 가능하므로 9개의 가능한 코드워드 중에서 8개를 선택한다. 각각의 코드율은 4/4, 3/4(bits/pixel)이다. 표 5와 6은 최소거리가 4, 5일 때의 각각 코드워드 리스트를 보여준다.

표 5. 4-레벨, 4픽셀, $d_{\min}=4$ 일 때의 코드워드 할당
Table 5. Codeword assignment of 4-level, 4 pixel, and $d_{\min}=4$.

Input symbol	Output	Input symbol	Output
0	0000	8	1313
1	0013	9	1331
2	0031	10	2002
3	0202	11	2020
4	0220	12	2033
5	0233	13	2222
6	1111	14	3100
7	1300	15	3113

표 6. 4-레벨, 4픽셀, $d_{\min}=5$ 일 때의 코드워드 할당
Table 6. Codeword assignment of 4-level, 4 pixel, and $d_{\min}=5$.

Input symbol	Output
0	0000
1	0023
2	0230
3	0302
4	1333
5	2031
6	2103
7	2310

III. 실험

그림 5는 제안된 변조코드를 위한 시뮬레이션 모델의 블록 다이어그램이다. 홀로그래픽 채널을 모델링하는 (x,y) 위치의 연속적인 PSF(point-spread function)은 다음과 같다.

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

여기서 σ_b 는 분산된 신호의 희미한 정도인 블러를 의미한다. 블러가 커지면 2차원 ISI가 증가한다. $\text{sinc}(x,y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

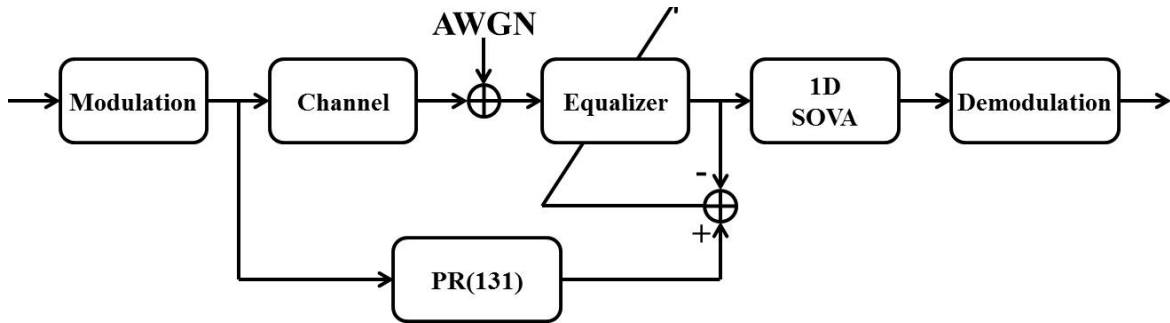


그림 5. 시뮬레이션 모델의 블록 다이어그램
Fig. 5. Block diagram of the simulation model.

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

$[p,q]$ 위치의 이산 PSF는 다음과 같이 정의한다.

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

여기서 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. x 축의 어긋남 m_x , y 축의 어긋남 m_y 로 정의한 연속적인 PSF는 다음과 같다.

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

인코더에 의해 2차원 멀티레벨 변조코드로 변환된 데이터는 홀로그래픽 채널을 통과하고, 부가백색 가우시안 잡음(Additive white Gaussian Noise, AWGN)이 더해진다. 신호대잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)는 $10\log_{10}(1/\sigma_w^2)$ 과 같이 정의하였으며, 여기서 σ_w^2 는 AWGN의 잡음전력이다. 채널 등화기에서 사용되는 부분응답(partial response, PR) 타겟은 PR(131)을 사용하였다. 등화기로부터 나온 출력은 연판정 출력 비터비 알고리즘(soft output Viterbi algorithm, SOVA)에 전달되어 검출 한 후, 멀티레벨 심볼을 이진 비트로 복조한다. 본 실험에서는 한 페이지의 크기가 1024×1024 이고, 10페이지에 대하여 실험하였다.

그림 6은 2.1장에서 4-레벨 변조부호와 랜덤 데이터에 대한 BER 성능을 보여준다. 랜덤 데이터는 SNR=18dB 에서도 에러가 발생하지만, $d_{\min} \geq 4$,

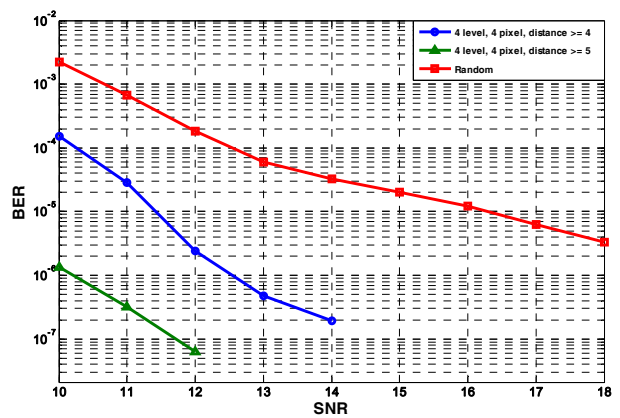


그림 6. $d_{\min} = 4, 5$ 에서 4-레벨 변조부호의 BER 성능
Fig. 6. BER performance of the 4-level modulation codes with $d_{\min} = 4$ and 5.

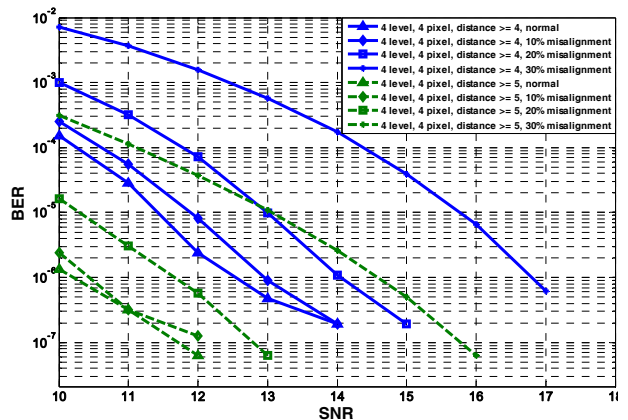


그림 7. 어긋남에 대한 4-레벨 변조부호의 BER 성능
Fig. 7. BER performance of the 4-level modulation codes with misalignment.

$d_{\min} \geq 5$ 일 때는 각각 SNR=14dB, SNR=12dB 이상부터는 에러가 발생하지 않는다. 또한 BER=10⁻⁵ 일 때 $d_{\min} \geq 4$ 는 랜덤 데이터 보다 약 4.6dB 정도 성능이

좋은 것을 볼 수 있으며, BER=10⁻⁶일 때 $d_{\min} \geq 5$ 는 $d_{\min} \geq 4$ 보다 약 2.3dB 성능이 좋아지는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 어긋남이 존재할 때 SNR에 따른 4-레벨 변조부호의 BER 성능을 비교한 결과이다. 어긋남의 증가에 따라 BER 성능이 나빠지는 것을 볼 수 있으며, $d_{\min} \geq 5$ 와 $d_{\min} \geq 4$ 의 부호이득은 각각의 어긋남 정도와 비슷한 성능을 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 멀티레벨 HDS를 위한 다양한 변조부호를 조사하였다. 조사된 코드워드 수, 픽셀당 레벨 수, 코드워드당 픽셀 수, 최소 거리에 대해 조사하였다. 변조부호의 개수를 이용하여 요구된 HDS를 위해 주어진 디자인 조건에 맞추어 시스템 디자이너는 효과적인 멀티레벨 변조부호를 찾을 수 있다.

REFERENCES

- [1] D. Gabor, "Associative holographic memories," IBM J. Res. Develop., pp.156-159, 1969.
- [2] E. L. Kral, J. F. Walkup, and M. O. Hagler, "Correlation properties of random phase diffusers for multiplex holography," *Appl. Opt.*, Vol. 21, no.7, pp. 1281-1290, April 1982.
- [3] A. E. Krasnov, "Thick-film phase holograms recorded by means of coded reference waves," *Sov. J. Quantum. Electron.*, Vol. 7, no. 9, pp. 1147-1148, 1977.
- [4] L. Hesselink, S. S. Orlov, and M. C. Bashaw, "Holographic data storage systems," *Proc. IEEE*, Vol. 92, no. 8, pp. 1231-1280, August 2004.
- [5] 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, July 1999.
- [6] N. Kim and J. Lee, "Two-dimensional codes for holographic data storage systems," *J. KICS*, Vol. 31, no. 11, pp. 1037-1043, November 2006.
- [7] 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, March 2009.

- [8] J. Kim, J. Wee, and J. Lee, "Error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 49, no. 8, pp. 08KB04, August 2010.
- [9] J. Kim and J. Lee, "Partial response maximum likelihood detections using two-dimensional soft output Viterbi algorithm with two-dimensional equalizer for holographic data storage," *Jpn. J. Appl. Phys.*, Vol. 48, no. 3, pp. 03A033, Mar. 2009.
- [10] G. Burr, G. Barking, H. Coufal, J. Hoffnagle, C. Jefferson, and M. Neifeld, "Gray-scale data pages for digital holographic data storage," *Opt. Lett.*, Vol. 23, no. 15, pp. 1218-1220, August 1998.
- [11] B. King, G. Burr, and M. Neifeld, "Experimental demonstration of gray-scale sparse modulation codes in volume holographic storage," *Appl. Opt.*, Vol. 42, no. 14, pp. 2546-2559, May 2003.

저 자 소 개



정 성 권(학생회원)
2015년 2월 숭실대학교 정보통신
전자공학부 학사
2015년 3월~현재 숭실대학교 정
보통신공학과 석사과정

<주관심분야 : 채널코딩, 고밀도 저장장치 시스템>



이 재 진(정회원)
1983년 2월 연세대학교 전자공학
과 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~현재 숭실대학교 전자정보공학부
교수

<주관심분야 : 통신이론, 채널코딩, 기록저장시스
템>