

홀로그래픽 저장장치를 위한 2차원 SOVA 성능 비교

김진영*, 이재진^o

Performance of Two-Dimensional Soft Output Viterbi Algorithm for Holographic Data Storage

Jinyoung Kim*, Jaejin Lee^o

요 약

본 논문에서는 홀로그래픽 저장장치를 위한 2차원 검출기인 2차원 SOVA와 반복 검출 2차원 SOVA의 검출 성능을 비교하였다. 홀로그래픽 저장장치는 2차원 인접심볼간 간섭이 있는 채널을 가지고 있어서 2차원 검출기를 사용하여야 검출 성능이 좋다. 2차원 SOVA와 반복 검출 2차원 SOVA는 2차원 인접심볼간 간섭이 있는 채널에서 잘 동작하는 검출기이다. 이 두가지 검출기를 분석하고 성능을 비교해 보았다. 2차원 SOVA는 1차원 검출기에 비해 약 2 dB의 성능이득이 있었고, 반복 검출 2차원 SOVA는 2차원 SOVA에 비해 약 1 dB 정도의 성능 이득이 있었다. 반대로, 반복 검출 2차원 SOVA는 2차원 SOVA에 비해 약 2배 정도 복잡도가 늘어나며, 2차원 SOVA도 1차원 검출기에 비해 약 2배 정도 복잡도가 늘어난다.

Key Words : Holographic data storage, Intersymbol interference, Two-dimensional soft output Viterbi algorithm, Viterbi algorithm.

ABSTRACT

We introduce two-dimensional soft output Viterbi algorithm (2D SOVA) and iterative 2D SOVA for holographic data storage. Since the holographic data storage is 2D intersymbol interference (ISI) channel, the 2D detection schemes have good performance at holographic data storage. The 2D SOVA and iterative 2D SOVA are 2D detection schemes. We introduce and compare the two 2D detection schemes. The 2D SOVA is approximately 2 dB better than one-dimensional (1D) detection scheme, and iterative 2D SOVA is approximately 1 dB better than the 2D SOVA. In contrast, the iterative 2D SOVA is approximately twice complex higher than 2D SOVA, and 2D SOVA is approximately twice complex higher than 1D detection scheme.

1. 서 론

홀로그래픽을 이용한 저장기술은 1948년 전자현미경의 해상도를 높이기 위한 기술로 개발된 이후, 레이저의 발명으로 가속화 되었다¹⁻³. 이 홀로그래픽 기술을 이용한 홀로그래픽 매체에 체적으로 데이터를 저장하는 방법이 홀로그래픽 광 저장장치이다. 홀로

그래픽 저장장치의 기본적인 원리는 정보를 담고 있는 데이터를 SLM (Spatial Light Modulator) 에 의해 신호빔으로 바뀌고, 이를 기준빔 (Reference Beam)으로 간섭시켜 생기는 간섭무늬를 홀로그래픽 매체에 기록하고, 반대로 읽을 때는 기준빔을 홀로그래픽 매체에 입사하여 정보 신호를 추출하는 것이다. 다양한 기준빔을 이용하여 여러 페이지를 한 곳

* 본 연구는 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0018016).

• 주저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, kijiyou@ssu.ac.kr, 정회원

^o 교신저자 : 숭실대학교 정보통신전자공학부 정보저장 및 통신 연구실, zlee@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-10-496, 접수일자 : 2012년 10월 16일, 최종논문접수일자 : 2012년 10월 23일

에 저장할 수 있다. 신호빔에 데이터를 페이지 형식으로 보내기 때문에 데이터 전송률이 높고, 여러 페이지를 한 곳에 저장할 수 있기 때문에 저장 용량 또한 매우 높일 수 있다^[4,5].

하지만 홀로그래픽 저장장치는 기존의 저장장치들과는 다른 오류요인이 있다. 그 중 한 가지가 2차원 인접심볼간 간섭 (Intersymbol Interference, ISI) 이다. 기존 저장장치는 트랙을 따라서 저장하며, 서로 다른 트랙에서는 영향을 받지 않는다. 따라서 1차원 ISI만 생기지만, 홀로그래픽 저장장치는 2차원 페이지 형식으로 데이터를 처리하기 때문에, 2차원으로 ISI가 생긴다. 다음으로, 인접페이지간 간섭 (Interpage Interference, IPI) 이 생긴다. 이를 보완하기 위해서는 2차원 검출기를 이용하여야 한다^[6,7]. 이것은 홀로그래픽 저장장치에서만 생기는 오류요인으로, 한 공간에 여러 페이지를 저장하기 때문에 생긴다. IPI를 보완하기 위해서는, 저장되는 데이터의 순서를 바꿔주는 변조 부호를 이용하여야 한다^[8-10]. 본 논문에서는 2차원 ISI를 보완하기 위한 2차원 SOVA (Soft output Viterbi algorithm) 들을 알아보고 성능을 비교한다.

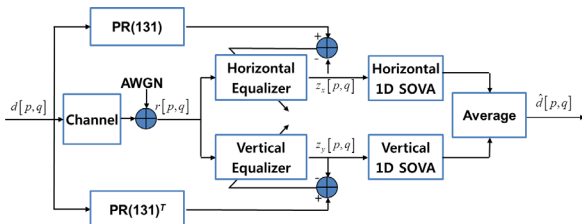


그림 1. 2차원 SOVA 블록다이아그램
Fig. 1. Block diagram of 2-dimensional SOVA

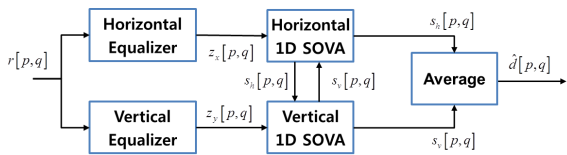


그림 2. 반복 검출 2차원 SOVA 블록다이아그램.
Fig. 2. Block diagram of iteratively detecting 2-dimensional SOVA

II. 2차원 SOVA

기존 저장장치는 1차원 ISI만 생기기 때문에, 일반 Viterbi 알고리즘을 이용하였다. 이를 이용한 것이 PRML (Partial response maximum likelihood) 이다^[11]. 하지만 2차원 ISI가 생기는 상황에서 기존

의 PRML만을 사용하면 제대로 된 성능을 발휘하기 어렵다. 이를 위해서 2차원 SOVA가 제안되었다^[6,7]. 2차원 SOVA는 1차원 SOVA를 수직방향과 수평방향으로 두 번 사용하여 두 값의 평균값을 이용한 방법이다. 그림 1에 2차원 SOVA에 대한 블록 다이어그램이 나와 있다. 먼저 입력데이터 $d[p,q]$ 를 채널에 통과한 후, AWGN (additive white Gaussian noise)를 추가하여 수신된 데이터 $r[p,q]$ 를 만들고 이를 수평방향과 수직방향 두 방향으로 보낸다. 각각의 방향에 맞는 등화기를 통과시키고, 이를 각각에 맞는 1차원 SOVA에 보낸다. 등화기는 2차원으로 구성하며 5×5 로 되어 있고, 2차원 FIR (finite impulse response) 필터로 구현하였다. 계수들은 LMS (least mean square) 알고리즘을 이용하여 업데이트 하였다. 업데이트 하기 위한 PR 타겟 값은 수평방향은 $PR(131)$ 을, 수직방향은 $PR(131)^T$ 을 사용하였다. 한 방향만을 보면 PRML과 비슷한 구조로 볼 수 있다. 각각의 SOVA에서 s_j 에서 s_k 로 천이되는 과정의 가지값은 다음과 같이 계산된다.

$$\lambda_{p,q}(s_j, s_k) = \{z_h[p,q] - (f_h(0)a_{p+1,q}(s_k) + f_h(1)a_{p,q}(s_j) + f_h(2)a_{p-1,q}(s_j))\}^2, \quad (1)$$

$$\lambda_{p,q}(s_j, s_k) = \{z_v[p,q] - (f_v(0)a_{p,q+1}(s_k) + f_v(1)a_{p,q}(s_j) + f_v(2)a_{p,q-1}(s_j))\}^2, \quad (2)$$

수식 1은 수평방향의 1차원 SOVA에 대한 가지 값 계산식이고, 수식 2는 수직방향의 1차원 SOVA에 대한 가지 값 계산식이다. f_h 와 f_v 는 각각 수평방향과 수직방향의 PR 타겟 값이다.

2차원 SOVA는 수평방향과 수직방향의 서로 다른 방향이 독립적으로 검출을 한 결과를 이용한다. 이렇게 하면, 최종 결과값에 두 방향을 모두 고려한 결과를 추출할 수 있으며, 2차원 검출기로서 역할을 수행하게 된다.

반복 검출 2차원 SOVA는 위의 2차원 SOVA의 성능을 좀 더 좋게 하기 위해 제안되었다^[12]. 반복 검출 2차원 SOVA의 블록다이아그램은 그림 2에 나와 있다. 기존의 2차원 SOVA가 1차원 SOVA를 각각의 방향으로 한 번씩만 검출한다면, 반복 검출 2차원 SOVA는 각 방향의 1차원 SOVA를 반복적으로 검출하여, 성능을 더 좋게 하였다. 각각의 검출기의 출력값을 서로 다른 검출기로 보내, 부가정보로 이용하여 새롭게 검출하는 방법이다. 반복 검

출을 위해서는 2차원 SOVA와는 다른 가지값 계산 방법이 필요하다. 반복 검출 2차원 SOVA에서 s_j 에서 s_k 로 천이되는 과정의 가지값 계산은 다음과 같다.

$$\lambda_{p,q}(s_j, s_k) = \{z_h[p, q] - (f_h(0)a_{p+1,q}(s_k) + f_h(1)a_{p,q}(s_j) + f_h(2)a_{p-1,q}(s_j)) - (f_v(0)EV_{p,q+1} + f_v(2)EV_{p,q-1})\}^2, \quad (3)$$

$$\lambda_{p,q}(s_j, s_k) = \{z_v[p, q] - (f_v(0)a_{p,q+1}(s_k) + f_v(1)a_{p,q}(s_j) + f_v(2)a_{p,q-1}(s_j)) - (f_h(0)EV_{p+1,q} + f_h(2)EV_{p-1,q})\}^2, \quad (4)$$

여기서 수식 3은 수평방향의 1차원 SOVA에 대한 가지값 계산식이고, 수식 4는 수직방향의 1차원 SOVA에 대한 가지값 계산식이다. $EV_{p,q-1}$, $EV_{p,q+1}$ 은 수직 방향 1차원 SOVA의 (p, q-1) 지점과 (p, q+1) 지점에서 받은 부가정보이다. 반대로 $EV_{p-1,q}$, $EV_{p+1,q}$ 는 수평 방향 1차원 SOVA의 (p-1, q) 지점과 (p+1, q) 지점에서 받은 부가정보이다. 이 부가정보는 다음과 같은 방법으로 정의한다.

$$EV_{p-1,q} = \begin{cases} -\alpha & s_h[p-1, q] > 0 \\ +\alpha & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (5)$$

$$EV_{p+1,q} = \begin{cases} -\alpha & s_h[p+1, q] > 0 \\ +\alpha & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$$EV_{p,q-1} = \begin{cases} -\alpha & s_v[p, q-1] > 0 \\ +\alpha & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (7)$$

$$EV_{p,q+1} = \begin{cases} -\alpha & s_v[p, q+1] > 0 \\ +\alpha & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (8)$$

진행 방향대로 검출을 하고 있는데, 다른 방향의 부가정보가 너무 크면 진행 방향의 검출에 큰 영향을 끼치게 되어 진행 방향대로의 검출이 제대로 안 이루어진다. 따라서, 감쇠를 두어 부가정보를 더해 주어야 한다.

III. 실험

3.1. 홀로그래픽 채널

홀로그래픽 채널은 CCD (charge-coupled device) 를 통과한 형상으로 모델링 하였다^[13-15]. 데이터가 기준빔을 통과한 후 나온 회절된 신호를 CCD를 이용하여 검출한다. 연속적인 PSF (point spread

function)은 다음과 같이 모델링 된다.

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

여기서 σ_b 는 빛이 블러 (blur) 가 되는 정도이다. 본 논문에서는 이 블러값을 1.85로 설정하였다. $\text{sinc}(x, y)$ 는 다음과 같이 정의한다.

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

(p, q) 지점에서의 이산 PSF $h[p, q]$ 는 다음과 같다.

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

여기서 CCD 배열이 제대로 된 위치에 있지 않고, 어긋난 형태로 위치하게 되는 것을 어긋남 이라 하고, x축의 어긋남을 m_x , y축의 어긋남을 m_y 로 정의할 때 연속적인 PSF는 다음과 같다.

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

한 페이지의 사이즈는 1024×1024로 하였다. SNR (signal to noise ratio) 은 $20\log_{10}1/\sigma$ 로 정의하였다.

3.2. 모의 실험 결과

그림 3에 홀로그래픽 저장장치에서 1차원 비터비와 2차원 SOVA의 결과 비교가 나와 있다. 1차원 비터비는 1차원 PRML 에 대한 결과 이다. PRML 을 사용하지 않을 때는 제대로 검출이 되지 않는다. 하지만 PRML을 사용하게 되면 제대로 검출이 이루어진다. 또한 2차원 SOVA를 사용하게 되면 1차원 검출기를 사용했을 때보다 성능이 더 좋다. BER 이 10^{-5} 에서 2차원 SOVA가 1차원 검출기보다 약 2 dB 정도 성능이 좋다. 복잡도가 두 배 늘어난데 비해, 성능 개선이 큰 것을 알 수 있다.

그림 4에는 2차원 SOVA의 어긋남에 대한 BER 성능이 나와 있다. 여기서 어긋남은 (x축 어긋남, y

축 어긋남)으로 표현되어 있다. 어긋남의 크기를 수평 방향과 수직 방향의 크기를 바꿔가면서 실험을 하였다. 실험 결과 어긋남이 수평방향과 수직방향 모두 30% 이상 있으면 검출 성능이 현저하게 낮아지는 것을 알 수 있다. 어긋남이 두 방향 모두 10% 안에 있으면 성능 열화가 약 1.5 dB 미만으로 생기며, 한 방향이라도 10%를 넘기면 약 4 dB 이상의 성능 열화가 생기는 것을 알 수 있다.

그림 5에 α 에 따른 반복 검출 2차원 SOVA의 결과가 나와 있다. SNR이 15일 때 반복 검출을 2회 실행하였을 때 α 값을 바꿔가면서 실험하였다. α 값이 0.05일 때, 성능이 가장 좋은 것을 알 수 있다. 이 이후의 반복 검출 2차원 SOVA의 실험은 α 를 0.05로 하고 실험 하였다.

그림 6은 1차원 검출기, 2차원 SOVA, 반복 검출 2차원 SOVA에 대한 BER 성능이 나와 있다. BER 10^{-5} 에서 반복 검출 2차원 SOVA는 2차원 SOVA에 비해 약 1 dB 정도 성능이 좋다. 하지만 반복 검출 2차원 SOVA는 한 번 반복 복호한 것과 두 번 반복 복호한 것에 대한 성능이 거의 비슷하다. 패리티를 이용해 반복 복호하는 오류 정정 부호와는 달리 패리티가 없기 때문에, 크게 성능 향상이 이루어지지 않는다.

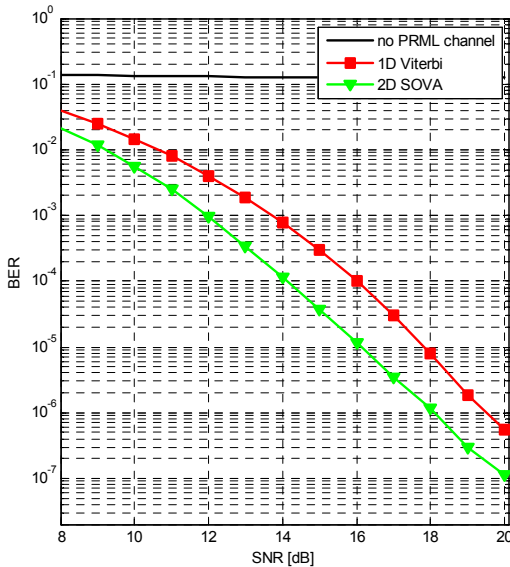


그림 3. 1차원 비터비와 2차원 SOVA의 결과 비교
Fig. 3. Comparison of 1-dimensional and 2-dimensional SOVA

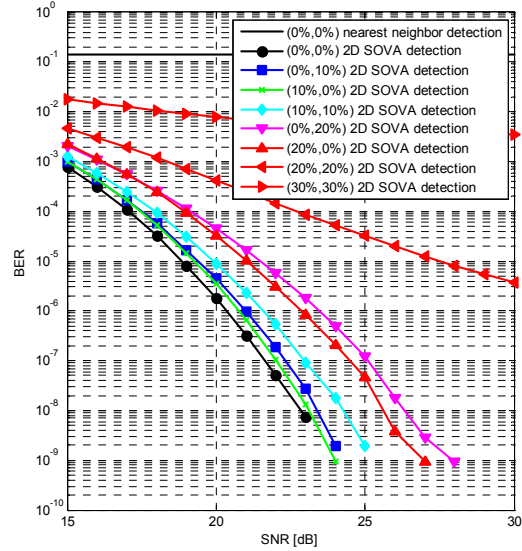


그림 4 2차원 SOVA의 어긋남에 대한 BER 성능
Fig. 4. BER performance of 2-dimensional SOVA for mis-alignment

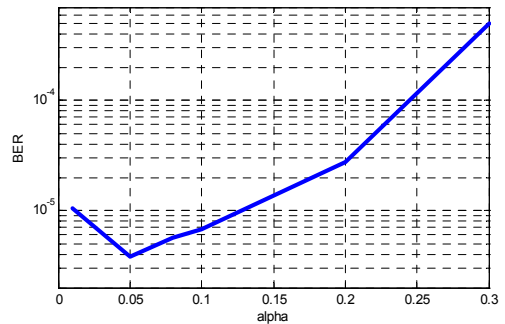


그림 5. α 에 따른 반복 검출 2차원 SOVA의 BER 성능 비교
Fig. 5. BER performance of iteratively detecting 2-dimensional SOVA for various α

IV. 결 론

본 논문에서는 2차원 SOVA와 반복 검출 2차원 SOVA를 알아보았고, 각 검출기의 성능을 비교하였다. 2차원 SOVA는 기존 1차원 검출기에 비해 약 2배의 복잡도가 높아진 반면 약 2 dB 정도의 성능 향상을 보였다. 반복 검출 2차원 SOVA는 2차원 SOVA 보다 약 1 dB 정도의 성능 향상을 보였다. 패리티가 없어 부호율의 손해 없이 큰 성능 향상을 보였다.

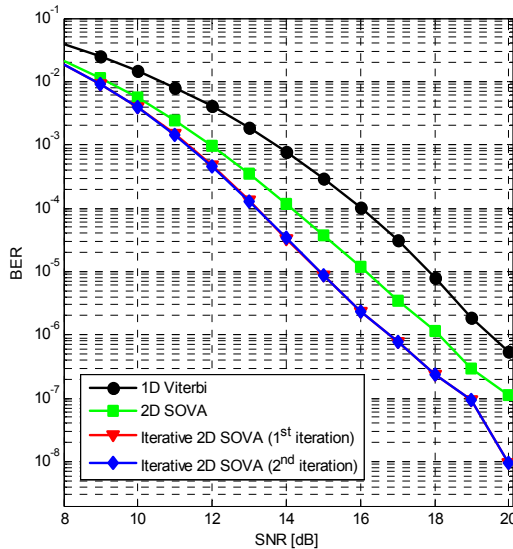


그림 6. 반복 검출 2차원 SOVA의 결과 비교
 Fig. 6. Performance of iteratively detecting 2-dimensional SOVA

참 고 문 헌

[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, pp. 1281-1290, 1982.

[3] A. E. Krasnov, "Thick-film phase holograms recorded by means of coded reference waves," *English transl.: Sov. J. Quantum. Electron.*, vol. 7, 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, Aug. 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, pp. 4374-4386, 1999.

[6] 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, pp. 03A033, 2009.

[7] 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, 2009.

[8] N. Kim and J. Lee, "Two-dimensional codes for holographic data storage systems," *J. KICS*, vol. 31, no. 11, pp. 1037-1043, Nov. 2006.

[9] 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.

[10] 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, Aug. 2010.

[11] R. D. Cideciyan, F. Dolivo, R. Hermann, W. Hirt, and W. Schott, "A PRML system for digital magnetic recording," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 38-56, Jan. 1992.

[12] J. Kim and J. Lee, "Iterative two-dimensional soft output Viterbi algorithm for patterned media," *IEEE, Trans. Magn.*, vol. 47, no. 3, pp. 594-597, March 2011.

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

[14] D. E. Pansatiankul and A. A. Sawchuk, "Multi-dimensional modulation codes and error correction for page-oriented optical data storage," *Proc. SPIE*, vol. 4342, pp. 393-400, 2002.

[15] G. Yang, J. Kim, and J. Lee, "Mis-alignment channel performance of error correcting 4/6 modulation codes for holographic data storage," *J. KICS*, vol. 35, no. 12, pp. 971-976, Dec. 2010.

김진영 (Jinyoung Kim)



2007년 2월 숭실대학교 기계공
학과 학사

2009년 2월 숭실대학교 정보통
신전자공학부 석사

2012년 8월 숭실대학교 정보통
신전자공학부 박사

<관심분야> 스토리지 시스템,
반복 복호 부호, 채널코딩

이재진 (Jaejin Lee)

(2010년 12월호 참조)