

디지털 고밀도 기록기술

이재진
동국대학교 전자공학과

1. 서론

90년대에 들어서면서 개인용 컴퓨터의 급속한 보급과 인터넷 등의 통신이 활발해지면서 데이터를 저장할 일이 많아졌다. 이에 부응하기 위해 데이터 저장 시스템도 많은 발전을 하여 왔다.

데이터 저장 시스템을 크게 분류하면 자기기록 저장 장치와 광기록 저장장치로 나눌 수 있는데 광기록 저장 장치는 그 매체의 특성상 고난도의 기록 기술을 필요로 한다기보다는 광의 파장이나 데이터를 담을 매체에 의해 그 밀도가 결정되어 왔다.

예를 들어, 최근에 많은 각광을 받는 DVD(digital versatile disc) 시스템에서도 특별한 신호처리 기술이 필요없다. 이에 반해 자기기록 저장 시스템은 광기록 저장 시스템에 비해 훨씬 어려운 기록 기술을 필요로 하고 있다. 따라서 본 고에서 기술되는 고밀도 기록 기술들은 자기기록 저장 시스템에서 이미 90년대 초에 상용화되었거나 현재 상용화되고 있거나 앞으로 곧 상용화 될 기술들이다.

고밀도 기록기술은 단위면적당 얼마나 많은 데이터를 기록할 수 있는가와 그 기록된 데이터를 얼마나 오류 없이 복원해내느냐의 두가지 측면으로 볼 수 있다. 얼마나 많이 쓸 수 있는가의 문제는 기록매체나 writing processor 그리고 read-head의 개발에 주로 관계되는 반면, 본 고에서 기술하고자 하는 고밀도 기록기술들은 고밀도로 쓰여진 데이터를 오류없이 복원하는 데 필요한 기술이다. 이 외에도, 고밀도 기록을 위하여 데이터의 코딩이 필요한데, 본 고에서는 이 변조코드에 관한 설명은 하지 않았다.

■ 데이터 저장채널과 데이터 전송채널

모든 기록 저장 시스템(storage system)은 ①쓰기 부분(write-head 와 pre-processing 회로), ②미디어

(예를 들어 HDD 또는 마그네틱 테이프) 그리고 ③읽기 부분(read-head 와 관련된 데이터 검출 회로)의 세부분으로 크게 나누어진다. 이것은 디지털 통신의 전송, 채널, 수신에 세가지 요소에 각각 해당한다고 볼 수 있다.

즉, 데이터를 저장하거나 전송하기 위해서 우리는 데이터 스토리지 채널과 데이터 전송 채널에서 모두 부호화된 데이터를 출력에서 검출하여 복호화 한다. 또한 두 채널 모두의 목표는 가능한 많은 정보를 정확하게 전달하는 것이다. 단지, 전송채널이 높은 데이터율을 추구하는 것이라 한다면, 스토리지 채널은 고밀도를 추구하는 것이 다른 점이라 할 수 있겠다.

한편 정보를 신호로 바꾸는 과정에서의 가장 큰 차이점은 전송채널에서 사용되는 변조방식과는 달리 스토리지 채널에서의 신호화 방식은 단지 두 레벨만을 사용한다는 점이다. 예를 들어, 자기기록 저장장치의 경우 자기기록 매체(magnetic media)에서 생기는 히스테리시스(hysteresis) 현상에 의해 높은 레벨(high level)이나 낮은 레벨(low level)의 두 가지 레벨을 갖는다. 따라서, 정보는 자기장의 방향이 어떤 한 방향에서 다른 방향으로 변할 때, 즉 어떤 시간에서 전이(transition)가 일어나느냐 안 일어나느냐를 이용하여 데이터를 표현할 수 있다. 따라서, 스토리지 채널에서 선형밀도를 증가시킬 수 있을 지 없을 지는 이들 전이 간의 간격을 얼마만큼 가깝게 만들 수 있는가 없느냐에 달려있다고 볼 수 있다. 반대로 전송 채널은 히스테리시스 현상이 없으므로 멀티레벨(multilevel) 변조로써 전송 데이터율을 높일 수 있다. 따라서 고밀도 저장장치에서는 심볼간 간섭(ISI, intersymbol interference)이 중요한 영향을 미치며 고밀도 기록기술의 연구개발에 꼭 고려되어야 할 사항이다.

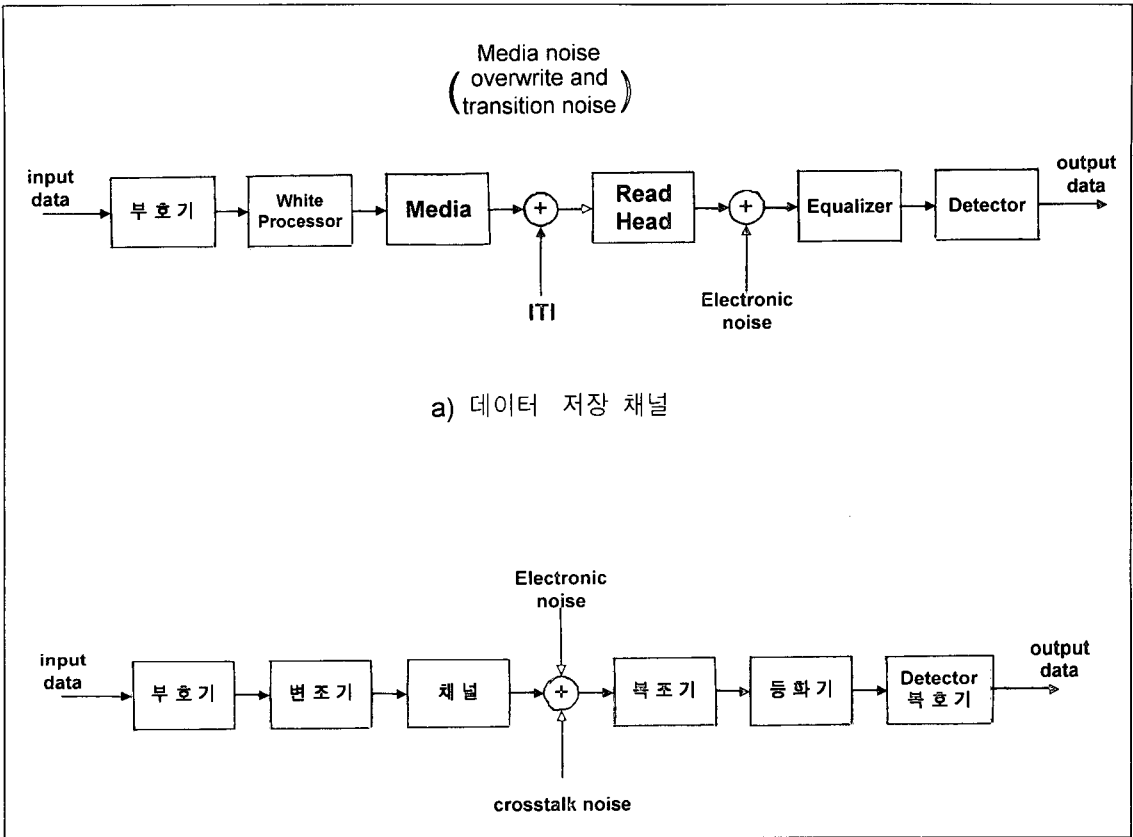


그림 1. 데이터 저장 채널과 데이터 전송채널의 비교

■ 스토리지 채널 모델

스토리지 채널은 일반적으로 Modified Lorentzian 으로 모델링 되고 있다.

$$s(t) = \frac{1}{1 + (2t/\tau)^{2x}} \quad (1)$$

여기서 τ 는 전력이 1/2 이 되는 펄스폭을 말하며, $x=1$ 일 때 우리는 Lorentzian 펄스라고 한다. 그러면 채널 펄스 응답(channel pulse response)은

$$p(t, T) = s(t) - s(t - T) \quad (2)$$

가 되는데, T 는 클럭간격을 말한다. 한편, 밀도 $1/T$ 의 데이터 입력이 bipolar 시퀀스, $a_k = \pm 1$ 이라면, 전이 시퀀스(sequence of transitions)는

$$b_k = a_k - a_{k-1} \quad (3)$$

즉, $b_k = \pm 2, 0$ 이 된다. 만일 잡음(noise)이 없

다고 가정하면 신호는

$$v(t) = \sum_k a_k p(t - kT) \quad (4)$$

가 되며, $p(t)$ 는 (2)식과 같이 정의된다. 이것을 다르게 표현하면

$$p(t, T) = h(t) * g(t, T) \quad (5)$$

라 할 수 있는데, 여기서 $h(t)$ 는 채널의 임펄스 응답 (impulse response)이며 $g(t)$ 는 다음과 같은 구형파이다.

$$g(t, T) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t \leq T \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

스토리지 채널의 경우에 있어서 선형밀도를 높이기 위해서는 T 를 줄여야 한다. 고립 전이 응답(isolated transition response) $s(t)$ 와 임펄스 응답 $h(t)$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$s(t) = \int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau \quad (7)$$

즉, 식(7)과 같은 시스템의 응답을 식(1)로써 모델링할 수 있다.

II. 고밀도 기록 검출기술

■ 최고치(Peak detection) 검출방식

만일 T 가 심볼간 간섭(intersymbol interference)의 영향을 받지 않을 정도로 충분히 크다면, 출력 신호 $y(t)$ 는 flux의 방향 변화에 대응되는 스텝응답(step response) $s(t)$ 와 같게 된다. 이것은 스토리지 시스템에 입력되는 데이터가 차등 부호화(differentially encoded) 되어 있기 때문이다. 즉 양으로부터 음으로 또는 음으로부터 양으로 전이가 일어나면 1로 복호되고, 전이가 없으면 0으로 복호된다. 따라서 최고치 검출(peak detection) 방식은 그림 2와 같이 행해진다.

헤드의 출력신호 $y(t)$ 를 정류(rectify)하여 임계치(threshold) 통과 유무를 zero-crossing detector의 enable로 삼아서 $y(t)$ 를 미분한 신호가 enable 신호가 high인 동안에 zero-crossing을 하면 그 출력 $z(t)$ 는 high가 된다. 따라서 최종 출력 데이터 비트들을 $z(t)$ 가 high일 때는 '1'에 대응시키고, 아니면 '0'에 대응시킬 수 있다.

peak detection 방식에서 가장 많이 일어나는 오류는 missing-bit 오류와 peak-shift 오류이다. missing-bit 오류(또는 extra-bit 오류)는 ISI나 잡음에 의해 채널 출력신호를 정확하게 sampling하지 못해서 생기는 것이

며, peak-shift 오류는 ISI나 잡음에 의해 zero-crossing되는 점이 다른 이웃한 timing window에 나타나서 생기는 것이다. 이러한 오류들을 줄이기 위해서는 timing window를 줄이면 되는데 이것은 런 길이 제한 부호(run-length limited code)를 써서 연속된 전이가 더 먼 간격에서 일어나게 해주면 된다.

■ 런 길이 제한 부호(Run-length Limited Codes)

런 길이 제한 부호(Run-length Limited Codes, RLL 코드)는 일종의 변조 코드로서 이진 데이터 전송에 쓰이는 line 코드와 비슷하다. 하지만 RLL 코드는 저장시스템의 동기(synchronization)목적 외에도 ISI를 줄이거나 없애기 위해 고안된 것으로 1970년대 초에 그 연구가 시작되었다. RLL 코드를 연구하기 시작한 동기는 자기 매체(magnetic medium)에서 전이가 가깝게 일어날수록 ISI나 비선형왜곡(nonlinear distortion) 등 여러 전이와 관련된 잡음이 발생한다는 것이다. 입력 데이터에서 1을 하나의 전이로 표현할 때 RLL 코드는 d 와 k 파라미터를 써서 (d, k) 코드라고도 하는데 d 는 이웃한 1과 1사이 들어가는 최소한의 0의 개수를 뜻하며, k 는 최대한의 0의 개수를 뜻한다. 따라서 최소한 d 개의 0을 이웃한 1과 1사이 넣어줌으로써 전이와 전이간의 간격을 넓혀주게 되어 ISI를 줄일 수 있고, 최대 k 개까지의 0을 이웃한 1과 1사이 넣어줌으로써 타이밍 신호를 적절하게 추출할 수 있게 된다.

부호화하지 않은 peak detection 방식에서는 missing-bit 오류가 전체 오류 발생의 많은 부분을 차지하고 있는데, RLL 코드를 사용하므로써 이 missing-bit 오류를 줄일 수 있다. 그 원리는 magnetic-flux의 전이간 간격을 넓혀 줄 수 있기 때문이다. 반면 RLL 코

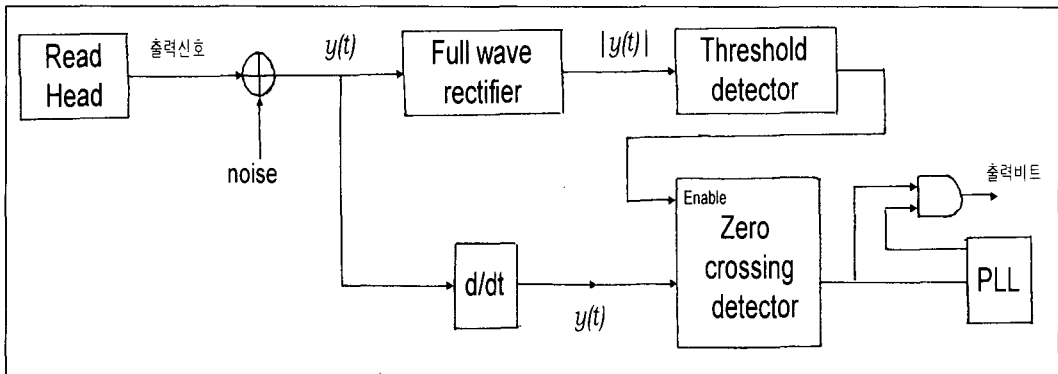


그림 2 최고치 검출 방식

드를 사용하므로써 생기는 데이터 양의 손실을 보상하기 위해 timing window를 줄여야 하는데, 이 때문에 peak-shift 오류 발생이 늘어난다. 그러나 전체적으로 볼 때 RLL 코드를 씌으로써 선형 밀도를 증가시킬 수 있다. 표 2에서, R(d+1)을 그 코드의 density ratio라 하는데 그 값이 1보다 크면 기록 밀도의 증가를, 1보다 작으면 기록 밀도의 감소를 의미한다. RLL 코드에서 가장 일반적인 코드는 (1, 3), (1, 7) 그리고 (2, 7) 코드인데 각각의 코드율은 1/2, 2/3 그리고 1/2 이다.

표 1. (d, k) 코드의 최대 코드율

	d=0	d=1	d=2
k=1	0.6942		
k=2	0.8792	0.4057	
k=3	0.9468	0.5515	0.2878
k=4	0.9752	0.6175	0.4057
k=5	0.9881	0.6509	0.4650
k=6	0.9942	0.6690	0.4979
k=7	0.9971	0.6793	0.5174

표 2. 대표적인 (d, k) 코드들

d	k	R	R(1, -d)
0	2	4/5	0.8
1	3	1/2	1.0
1	7	2/3	1.33
2	7	1/2	1.5

■ Digital Sampling detection

Digital detection 방식은 read-head의 출력 신호를 샘플링하고 디지털 신호처리를 통해 peak detection보다 더 ISI를 줄일 수 있도록 하기 위한 것으로써 결과적으로 기록 밀도를 증가시킬 수 있게 된다.

Digital detection의 가장 대표적인 방식으로는 partial response와 Decision feedback 방식이 있다.

Partial response 방식은 디지털 통신 시스템에 쓰이고 있는 것과 유사하다. 이것은 채널을 (d, k) 코드 방식처럼 전이와 전이 사이의 간격을 멀리 떨어뜨리는 것이 아니라 가깝게 하는 반면에, 우리가 이미 알고 있는 ISI 패턴으로 만들어 줌으로써 detection 방식을 간단하게 해줄 수 있다. 여기서 detection 방식은 maximum likelihood sequence

estimator를 쓰는데 자기기록채널의 특성상 통신 채널과 비교할 때 간단한 Viterbi detector로 구현할 수 있다. 샘플된 펄스 응답(sampled pulse response)은 대개 P(D)라는 다항식 변환(polynomial transform)으로 표현하는데, 예를 들어 P(D)=1-D²은 sampled pulse response가 P(0, T)=1, P(T, T)=0, P(2T, T)=-1 그리고 P(kT, T)=0 (k>2일 때) 임을 의미한다. 특히, 우리는 P(D)=1-D²로 표현되는 채널을 class IV partial response (PR4) 채널이라 한다. 현재 상용되고 있는 HDD 제품 수준의 밀도에 적당한 채널 모델이다. 기록 밀도가 높아짐에 따라, 일반적인 partial response polynomial P(D)=(1-D)(1+D)ⁿ에서 n의 값이 1보다 크게 해줌으로써 채널에 잘 맞도록 해줄 수 있다. 예를 들어 기록 밀도 PW₅₀/T_b 가 약 2.25일 때 가장 적당한 n의 값은 2이다. 이때의 채널을 EPR4(extended class IV partial response) 채널이라 하며 P(D)=1+D-D²-D³이 된다. PR IV 채널인 Modified duo binary 채널에서는 인접한 신호의 ±1 샘플들이 서로 더해져서 ±2 또는 0의 값을 갖게 되는데, 간단한 심볼 detector에서는 ±2값은 1로 0값은 0으로 디코딩하면 된다. 1971년에 Kobayashi가 처음으로 magnetic flux의 전이응답과 P(D)=1-D²인 modified duo binary partial response 시스템 사이에 유사성이 많다는 점을 밝혀내면서, Viterbi detection을 쓸 경우 3dB의 detection gain을 얻을 수 있다고 발표하였다. 이 방법은 기본적으로 그림 3에 있는 트렐리스(trellis) 다이어그램이라는 time-indexed finite state machine을 사용하여 실제의 채널 출력과 가장 비슷한 path를 찾아 내는 것이다.

기록밀도가 증가하여 EPR4채널과 유사해지는 경우에는 그림 4와 같은 8개의 state를 갖는 trellis를 사용하여 Viterbi detection을 한다.

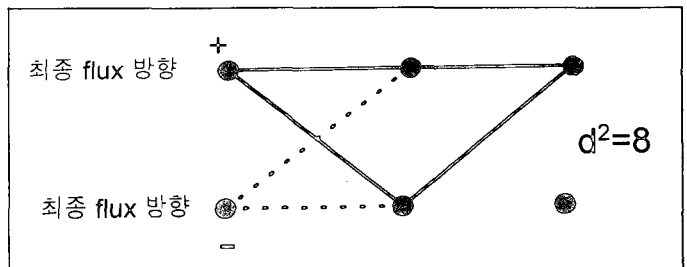


그림 3. Modified duo binary system의 sequence detection을 위한 trellis diagram

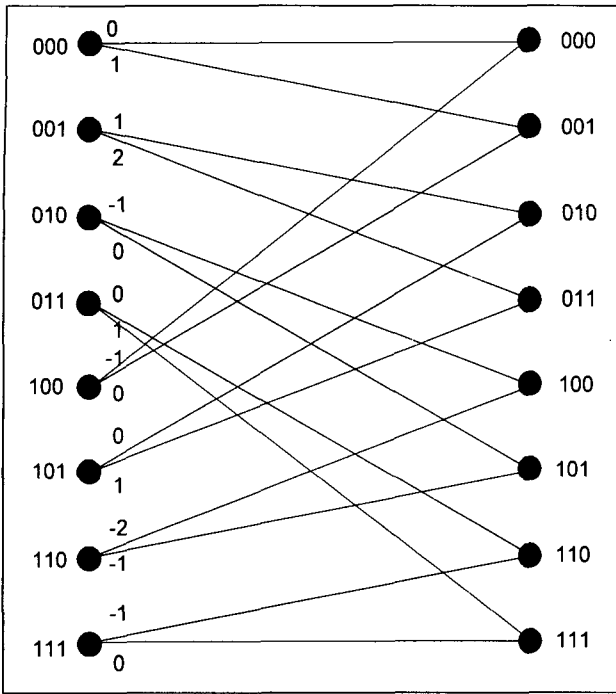


그림 4. EPR4 채널을 위한 trellis

■ Decision Feedback 방법

이것은 그림5와 같은 구조를 가지는 데 feedforward 부분은 ISI가 causal이 되도록 하면서 현재의 펄스 높이가 나머지 ISI(trailing ISI)보다 가능한 크도록 read-channel의 펄스 응답 P(t,T)의 모양을 만들어 주는 선형 필터이다. 이렇게 하면 나머지 ISI는 feedback부분에서 없어지게 된다.

한편, 그림 6과 같이 고정된 feedback filter 1-P(D)

를 사용하여 에러신호를 만들어서 detector로 들어가는 신호가 순수하게 우리가 원하는 partial response 꼴이 되도록 해줌으로써 Viterbi detector의 성능을 높일 수 있게 된다. 이렇게 하면 PR4채널에서 3 dB, EPR4채널에서 6 dB정도의 detection 이득이 생긴다.

또, 출력에서 펄스의 모양이 여러 형태로 변형되므로, 일반적으로는 feedforward와 feedback 부분에서 adaptive한 필터를 사용한다.

Adaptive구조를 갖는 decision feedback 방법이 그림 7에 나타나 있다. Adaptive decision feedback detection은 adaptive partial response detection과 다르게 feedback filter B(D)가 decision된 값에 의해 결정된다.

한편 그림 7에서 feedback transversal filter B(D)를 look-up 테이블이나 RAM으로 대체시킬 수도 있는데, 이렇게 변형된 DFE(Decision feedback equalizer)를 RAM-DFE라고 한다(그림 8 참고). 이 RAM-DFE는 매체의 특성상 일어날 수 있는 신호의 종류가 한정되어 있기 때문에 가능하며, 이것은 구현이 쉽고 비선형 ISI를 보상해줄 수 있다.

이 외에도 심볼 detection 과 sequence detetion의 중간 구조라 할 수 있는 FDTS(Finite depth tree search) 방법이 있는데 그림 9와 같은 구조를 갖는다.

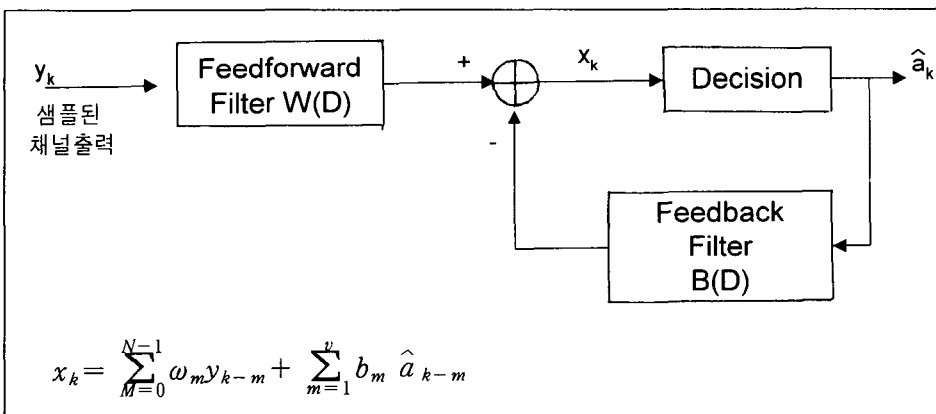


그림 5. Decision Feedback detection

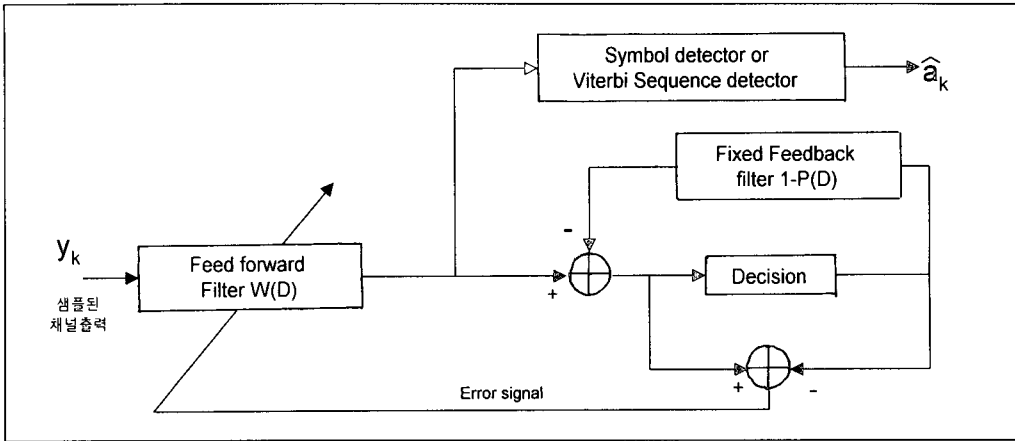


그림 6. Adaptive partial response detection

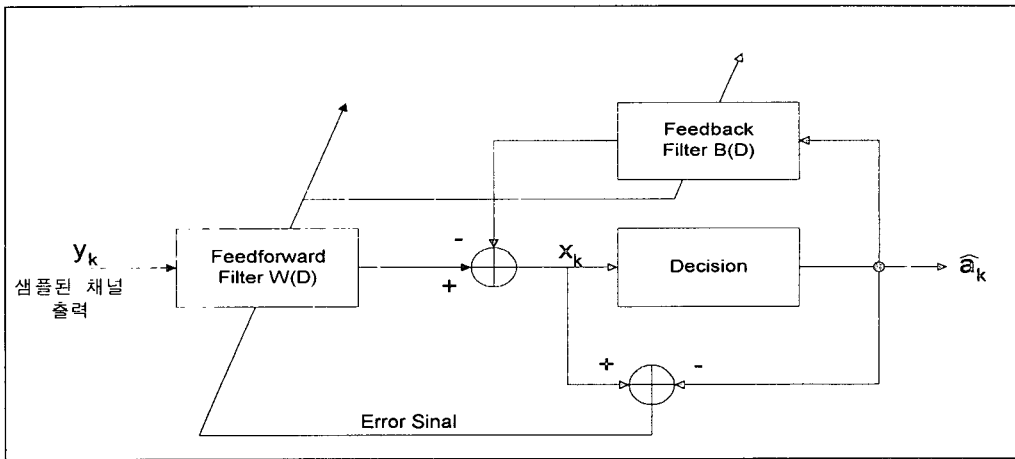


그림 7. Adaptive decision feedback detection

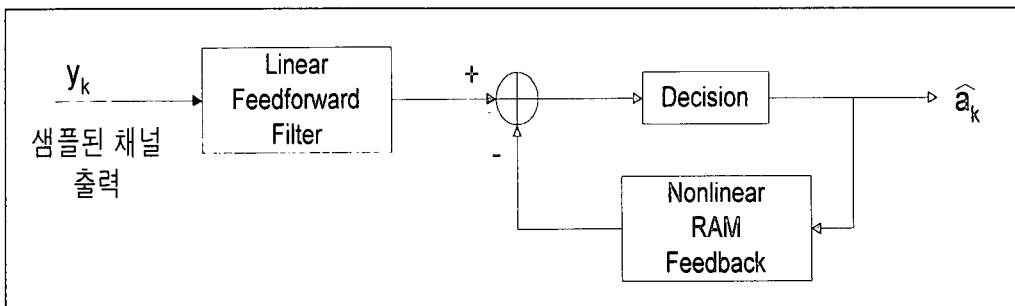


그림 8. RAM-DFE Detection

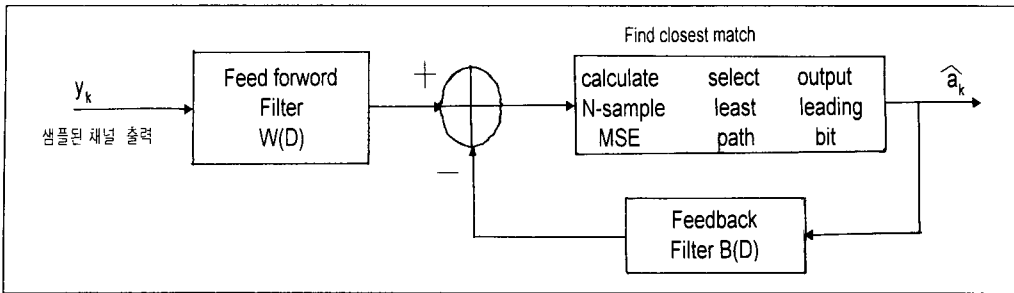


그림 9. FDTS-DFE detection

III. 결 론

본 고에서는 디지털 고밀도 기록 기술을 간략하게 소개하였다. 기록 저장 시스템으로 자기기록 저장장치와 광기록 저장 장치를 대표적으로 꼽을 수 있는데, 광기록 저장장치에서는 자기기록 저장장치보다 출력 신호가 선명하여 본 고에 기술한 디지털 고밀도 기록 기술이 아직까지는 필요치 않고 있다.

반면 자기 기록 저장 장치는 매년 60% 이상의 밀도를 높여야만 경쟁력을 유지할 수 있기 때문에 새로운 고밀도 기록 기술을 필요로 하고 있다. 고밀도 기록 기술은 변조 코드와 신호 검출 방식의 적절한 조화로써 이루어질 수 있는데 본 고에서는 신호 검출 방식을 위주로 기술하였다.

데이터 저장 채널은 데이터 전송 채널과 유사하며 통신 및 신호처리 이론을 바탕으로 고밀도 기록이 가능하다. 채널 특성은 일반적으로 Lorentzian 펄스로 모델링되며, 밀도가 증가함에 따라서 partial response로 등화시킬 수 있게 된다. 따라서 현재 많이 쓰이고 있는 고밀도 기록 기술로는 PRML(Partial response maximum likelihood) 방식이 있는데, 그 변형으로는 RAM-DFE가 있다. 그리고 ML detection 과 심볼 detection의 중간 형태인 FDTS 방식을 이용한 FDTS-DEF detection도 많이 쓰이고 있다.

이 외에도 신경망 이론을 이용한 신호 검출 방식들도 학계에서 많은 연구를 하고 있으나 아직까지 상용화 되고 있지는 않다.

참 고 문 헌

- [1] R. W. Wood and D. A. Peterson, "Viterbi detection of class IV partial response on a magnetic recording channel," IEEE Transactions on Communications, vol. 34, no. 5, pp. 454-461, May 1986.
- [2] P. A. Franzaszek, "Sequence state methods of run-length-limited coding," IBM J. of R&D, vol. 14, no. 4, July 1970.
- [3] H. Kobayashi, "Application of probabilistic decoding to digital magnetic recording systems," IBM J. of R&D, vol. 15, no. 1, Jan. 1971.
- [4] F. Dolibo, "Signal processing for high-density digital magnetic recording," Proc. VLSI and Comp. Peripherals, pp. 1.91-1.96, May 1989.
- [5] J. W. M. Bergmans, "Partial response equalization," Philips J. of Res., vol.42, no. 2, pp. 209-245, 1987.
- [6] K. D. Fisher, J. M. Cioffi and C. M. Melas, "An adaptive DFE for Storage channels suffering from nonlinear ISI," Proc. 1989 ICC, June 1989.
- [7] G. Ungerboeck, "Adaptive maximum likelihood receiver for carrier modulated data-transmission system," IEEE Trans. on Communications, vol. 22, no. 5, pp. 624-636, May 1974.
- [8] J. J. Moon and L. R. Carley, "Performance comparison of detection methods in magnetic recording," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 26, no. 6, pp.3155-3172, Nov. 1990.

필자소개

이 재 진

- 1983. 2. 연세 대학교 전자공학과 학사
- 1984. 12. 미시간 대학 (University of Michigan) 석사
- 1994. 12. 조지아 공과대학 (Georgia Institute of Technology) 박사
- 1995. 1. - 1995. 12. 조지아 공과대학 Research Associate
- 1996. 1. - 1997. 2. 현대전자 정보통신 연구소 책임연구원
- 1997. 3. - 현재 동국대학교 전자공학과 교수
- 연구관심분야: 채널 코딩, 통신 이론 및 전송 방식, 비밀 통신, 스토리지 시스템