

고밀도 자기 기록 채널의 비선형 왜곡 추정 기법

正會員 이 남 진*, 오 대 선*, 조 용 수*, 김 기 호**

An Estimation Technique for Nonlinear Distortion in High-Density Magnetic Recording Channels

Nam Jin Lee*, Dae Sun Oh*, Yong Soo Cho*, Ki Ho Kim** *Regular Members*

※이 연구는 96년도 한국과학재단(과제번호: 961-0921-110-2)과 삼성종합기술원의 연구비 지원에 의한 결과임.

요 약

디지털 자기 기록 채널의 기록 밀도가 증가하면 기록 채널의 비선형 왜곡이 발생하고, 이로 인해 PRML이나 DFE와 같은 디지털 검출 방식의 성능이 급격히 저하된다. 고밀도 기록을 저해하는 요소는 비선형 천이 이동과 부분 삭제로 분류되는데, 이 중 비선형 천이 이동은 사전 보상 기법에 의해 보상 가능하고, 부분 삭제 현상의 보상을 위해서는 정교한 비선형 등화 기법이 필요하다. 고밀도 기록을 달성하기 위해서는 이러한 비선형 왜곡과 관련된 파라미터의 정확한 추정이 매우 중요하다. 본 논문에서는 시간 영역에서 제안된 적응 알고리즘을 사용하여 위의 두 비선형 왜곡 영향을 분리할 수 있는 새로운 추정 기법을 논하고, 제안된 적응 방식으로 비선형 파라미터를 바이어스 없이 추정할 수 있음을 컴퓨터의 실험을 통해 확인하였다.

ABSTRACT

As recording densities increase in digital magnetic recording channels, the performances of digital detection techniques such as PRML and DFE degrade significantly due to nonlinear distortion in recording channels. The primary impediments for high-density recording are generally classified as nonlinear transition shift, which can be reduced substantially by the precompensation technique, and partial erasure which usually requires sophisticated nonlinear equalization techniques. In order to achieve the highest density recording, accurate estimation of the parameters associated with these two nonlinear distortions is crucial. In this paper, a new estimation technique to distinguish these two different nonlinear effects using a proposed adaptive algorithm in time domain is presented.

*중앙대학교 전자공학과

**삼성종합기술원 전송기술연구실

論文番號: 97074-0224

接受日字: 1997年 2月 24日

The effectiveness of the proposed adaptive approach to identify uniquely the nonlinear parameter without bias is demonstrated by computer simulation.

I. 서 론

멀티미디어 시대를 맞이하여 문자, 음성, 화상 등의 대용량 데이터를 기록·재생할 수 있는 HDD(hard disk drive), DVCR(digital video cassette recorder), DVD(digital video disk) 등의 저장 시스템이 필수적인 요소가 되고 있다. 많은 양의 데이터를 기록·재생하기 위해서는 채널의 기록 밀도를 높여야 하는데, 고밀도 기록 시스템의 경우 매체에서 발생하는 비선형 왜곡이 성능 향상의 가장 큰 제한 요소로 알려져 있다[1]-[4]. 따라서 고밀도 기록을 위해서는 이러한 비선형 왜곡을 보상할 수 있는 사전 보상기 또는 비선형 등화기가 요구되며, 이를 설계하기 위해서는 왜곡을 발생시키는 비선형 파라메타의 값을 정확히 추정하는 작업이 선행되어야 한다.

HDD, DVCR 등의 디지털 자기 기록 채널에서 발생하는 비선형 왜곡은 비선형 천이 이동과 부분 삭제 현상으로 분류할 수 있다. 기록 밀도가 낮은 경우에는 자기 기록 매체를 선형 채널로 볼 수 있으나 기록 밀도가 높아짐에 따라 비선형 천이 이동과 부분 삭제 현상이 두드러지게 나타나므로 선형 채널로는 모델링을 할 수 없게 된다. 비선형성의 영향으로 인해 신호의 기록 위치가 변하고 자화의 크기가 감소됨으로써, 채널의 출력 신호는 선형 심볼간 간섭(linear intersymbol interference)에 의한 출력과는 다른 형태로 왜곡된다. 그 결과 선형 심볼간 간섭을 보상하기 위해 사용하는 기존의 등화기(선형 등화기: linear equalizer, 결정 궤환 등화기: decision feedback equalizer, PRML: partial response maximum likelihood)로는 재생 신호를 보상할 수 없게 된다. 비선형 왜곡을 보상하기 위한 방법으로는 기록 데이터의 위치를 비선형 천이 이동의 반대 방향으로 미리 이동시키는 사전 보상 방법[5]-[7]과 재생 단에서 비선형 등화기를 사용하여 보상하는 방법[8]-[11]이 있다. 비선형 천이 이동의 경우 사전 보상 방법에 의해 어느 정도 보상이 가능한데, 이 방법을 적용하기 위해서는 채널에서 발생하는 천이 이동의 양을 정확히 알고 있어야 한다.

비선형 천이 이동에 관련된 파라메타를 추정하기

위한 기법으로는 특정한 주기를 갖는 PRBS(pseudo-random binary sequence) 신호의 성질을 이용하여 주파수 영역에서의 전달 함수를 구하는 에코 추출 기법(echo extraction method)[6][12][13], 출력 신호의 상관성을 이용한 상관 기법(correlation method)[14][15], 주파수 영역에서 고조파(harmonic) 성분의 상대적인 크기를 비교하여 비선형 파라메타를 추정하는 주파수 기법(frequency method)[17] 등이 있다. 그러나 비선형 천이 이동과 부분 삭제에 의한 왜곡이 모두 존재할 경우 두 왜곡은 Volterra 모델에서 하나의 Kernel로 나타나게 되고, 기존의 방법으로는 두 파라메타를 분리하여 추정할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 고조파 관계에 있는 두 주파수로 데이터를 매체에 기록한 후, 각 고조파 성분의 크기를 비교하여 부분 삭제 파라메타를 추정하는 방법이 제안되었다[17]. 이 방법으로는 부분 삭제 파라메타만을 추정할 수 있으며, 천이 이동 파라메타를 추정하기 위해서는 기존의 주파수 기법을 이용하여 전체 비선형 왜곡 성분을 추정한 후, 그로부터 부분 삭제에 의한 비선형 왜곡 성분을 제거하는 두 단계를 거치게 된다. 또한 이 방법은 주파수 영역에서 이루어지기 때문에 임출력 신호에 대한 DFT 연산을 수행해야 하는 단점을 갖는다.

본 논문에서는 비선형 천이 이동 파라메타와 부분 삭제 파라메타를 시간 영역에서 독립적으로 분리하여 추정하는 적응 알고리즘 기법을 제안한다. II절에서는 비선형 천이 이동과 부분 삭제 현상을 갖는 비선형 자기 기록 채널을 모델링하고, III절에서 고밀도 자기 기록 채널에서 비선형 파라메타를 독립적으로 추정할 수 있는 적응 알고리즘 기법에 대하여 기술한다. IV절에서는 모의 실험을 통해 제안된 적응 알고리즘의 성능과 수렴 특성을 분석하고, V절에서 결론을 맺는다.

II. 비선형 자기 기록 채널

저밀도 기록 시스템의 전체 출력은 고립 천이 응답(isolated transition response)의 선형 중첩 이론으로

설명할 수 있지만 기록 밀도가 높아짐에 따라 인접 천이의 영향으로 인한 비선형 왜곡 효과를 무시할 수 없게 된다. 고밀도 자기 기록 채널에서 발생하는 비선형 왜곡 파라메타를 추정하기 위해서는 우선 비선형성을 포함하는 채널에 대한 정확한 모델이 필요하다. 본 절에서는 비선형 천이 이동과 부분 삭제 현상에 대하여 간략히 기술하고, 두 왜곡 성분을 모두 포함하는 일반적인 고밀도 비선형 자기 기록 채널 모델을 정의한다.

디지털 자기 기록 시스템에서는 기록 매체가 갖고 있는 히스테리시스(hysteresis) 특성 때문에 ±의 양극 신호를 기록하는 포화 기록(saturation recording) 방식이 사용된다. 입력 데이터는 0과 1의 이진 신호이며 데이터가 1인 경우에만 기록 전류의 극성이 바뀌게 된다. 기록 전류는 헤드에 감겨 있는 코일에 흐르며 기록 전류의 극성에 해당하는 자속(magnetic flux)이 헤드의 공극에서 발생하게 된다. 이렇게 발생된 자속에 의해 매체에 자화가 유도되는데 기록 전류의 극성이 바뀌면 자화의 방향도 바뀌게 된다. 따라서 기록 전류의 극성이 변하는 경우에만 자화의 천이(magnetization transition)가 형성된다. 재생시에는 매체에 기록된 자속의 변화가 헤드에 의해 유기되어 출력 전압으로 나타나게 된다. 일반적으로 매체의 단일 천이 응답은 다음과 같은 Lorentzian 함수로 모델링 된다[18].

$$s(kT) = \frac{1}{1 + (2kT/PW_{50})^2} \quad (1)$$

여기서 PW_{50} 은 최대 출력값의 50%에 해당하는 펄스의 폭이며 PW_{50}/T 으로 채널의 기록 밀도를 표시한다. T 는 신호의 샘플링 간격을 나타낸다. 또한 펄스 응답은

$$p(kT) = s(kT) - s(kT - T) \quad (2)$$

로 주어지며, 이 때 재생 신호는 다음 식으로 나타내어진다.

$$y(kT) = \sum_m x_{k-m} p(mT) + n(kT) \quad (3)$$

입력 데이터 x_k 는 ±1의 값을 가지는 이진 NRZI(binary non-return to zero inverse) 신호열이고, $n(t)$ 는 수신 필터에 의해 대역 제한된 가산성 백색 가우스

잡음(AWGN; additive white gaussian noise)이라고 가정한다.

고밀도 자기 기록 채널에서 발생하는 비선형 천이 이동의 원인은 크게 다음의 세 가지로 구분할 수 있다.

첫째, 인접 천이의 영향을 들 수 있다. 기록 밀도가 증가하여 천이의 간격이 작아지면 인접한 천이의 영향으로 현재 기록하려는 천이의 위치와 형태가 변하게 되며[2][3], 이 때 변화의 정도는 입력 데이터의 패턴에 의해 결정된다. 그림 1에 나타난 바와 같이 현재 기록하려는 천이의 이전에 천이가 기록되어 있다면 그 천이에 의해서 자계가 발생한다. 이를 감자화계(H_d)라 하며, 이 자계는 현재 기록하려는 천이의 자계(H_h)에 영향을 주어 자계의 크기를 변화시킨다. 자화의 천이는 기록 자계의 크기가 매체의 보자력(coercivity, H_c)을 초과하는 순간에 발생하므로 자계의 크기 변화는 천이의 기록 위치를 이동시키는 원인으로 작용한다. 예를 들어 현재 천이의 1비트 이전에 천이가 발생했다면 두 천이의 부호는 항상 반대가 되고, 이전 천이의 감자화계와 기록 자계는 동일한 방향으로 형성된다. 따라서 두 자계의 크기가 더해진 값이 최종 자계가 되어 천이의 기록 위치는 실제 기록하려는 위치보다 앞서게 된다. 2비트 이전 천이의 경우 현재 천이와 방향이 다르면 기록하려는 위치의 앞에, 방향이 같으면 뒤에 천이가 발생한다.

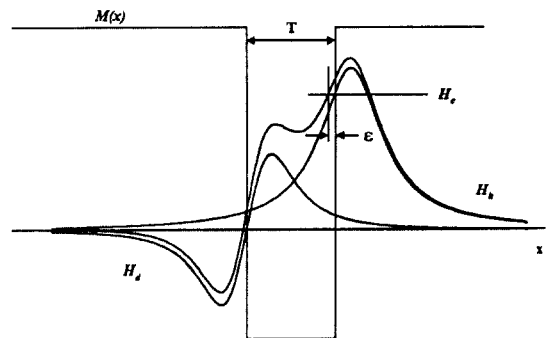


그림 1. 인접 천이의 감자화계에 의한 비선형 천이 이동
Fig. 1 Nonlinear transition shift due to demagnetization of adjacent transitions

둘째, 자화의 천이 이동은 overwrite 효과에 의해서도 발생한다[6]. 데이터를 기록하기 이전에 기록 매체

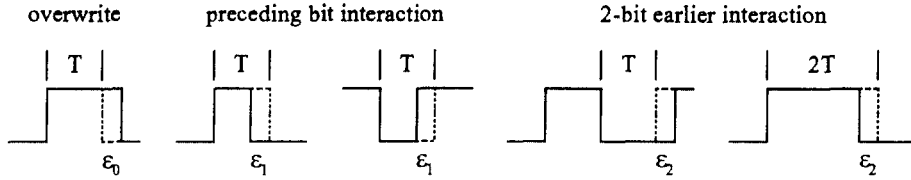


그림 2. 입력 데이터 패턴에 따른 천이 이동
Fig. 2 Transition shift due to input data pattern

가 이미 자화되어 있었다면 그로부터 발생하는 자계에 의해 현재 기록하려는 자계의 크기가 변하게 되고, 따라서 자화의 천이 위치가 이동된다. 기존 자화의 방향이 (+)로 되어 있다면 (-) 방향의 천이는 원래 위치보다 뒤에 기록되며, (+) 방향의 천이는 변하지 않는다. 기존 자화의 방향이 (-)로 되어 있다면 반대 현상이 일어난다. 인접 천이와 overwrite 영향에 의한 비선형 천이 이동의 예를 그림 2에 보였다.

마지막으로 헤드의 특성에 의한 비선형 천이 이동이 존재한다[19]. 기록 전류의 극성이 바뀌면 헤드에서 발생하는 자계의 방향이 변하게 되는데, 이상적인 경우에는 기록 전의 반전과 헤드 자계의 반전이 동시에 발생해야 한다. 그러나 실제로 헤드의 특성은 이상적이지 못하며, 헤드의 응답이 최대값에 도달하기까지는 시간 지연이 존재한다. 특히 고주파 영역에서 이러한 현상이 두드러지게 나타나기 때문에 고속 데이터 기록시 헤드 특성에 의한 천이 이동을 반드시 고려해야 한다. 헤드의 특성에 기인하는 비선형 왜곡은 인접 천이에 의한 왜곡 효과에 포함시킬 수 있다.

지금까지 살펴본 비선형 왜곡은 선형 심불간 간섭에 의한 왜곡으로 간주할 수 없으므로 채널을 정확히 표현하기 위해서는 비선형 모델이 필요하다. 비선형 천이 이동에 의한 왜곡을 고려한 자기 기록 채널의 펄스 응답은 다음과 같다[20].

$$p(kT) = s(kT) - s(kT - T + \epsilon_{k-1}) \quad (4)$$

여기서 ϵ_k 는 비선형 천이 이동의 크기를 나타내는 파라메타이다. 기록 밀도가 낮은 경우에는 비선형 왜곡 발생하지 않으므로 ϵ_k 는 0이 되고, 채널의 펄스 응답은 단순히 식 (2)와 같아진다. 그러나 고밀도로 데이

터를 기록하는 경우 ϵ_k 는 앞서 설명한 것처럼 데이터의 입력 패턴에 의해 그 값이 결정되며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다[6][21].

$$\epsilon_k = \frac{1}{8} \{ \epsilon_0 a_k (a_k + 2) - 2\epsilon_1 a_k a_{k-1} - 2\epsilon_2 a_k a_{k-2} \} \quad (5)$$

여기서 a_k 는 $x_k - x_{k-1}$, 즉, 입력 신호의 천이를 나타내며 $\{-2, 0, +2\}$ 의 값을 갖는다. ϵ_0 는 overwrite 효과에 의한 비선형 천이 이동의 정도를, ϵ_1 과 ϵ_2 는 각각 1비트와 2비트 이전의 천이에 의한 비선형 천이 이동의 정도를 나타내는 파라메타인데 각 파라메타의 값은 자기기록 채널의 물리적인 특성과 데이터의 기록 밀도에 따라 결정된다. Overwrite의 효과를 고려하기 위해 기록 매체가 (-) 방향으로 자화되어 있다고 가정하였다.

자화의 천이 영역을 자세히 살펴보면 천이가 지그재그(zigzag) 형태로 구성되어 있다[4]. 지그재그 천이는 기록 밀도가 낮은 경우 즉, 천이 사이의 간격을 클 경우에는 상호 간에 영향을 주지 않으므로 선형 천이로 간주할 수 있다. 그러나 기록 밀도가 높아져서 천이 사이의 간격이 작아지면 인접 천이의 지그재그가 서로 간섭을 일으키게 되고 천이 폭(transition width)이 감소하여 출력 진폭이 줄어드는 결과를 가져온다. 이러한 현상이 그림 3에 나타나 있다.

이와 같은 부분 삭제 현상은 다음의 식으로 나타내는 비선형 채널 펄스 응답으로 모델링할 수 있다[22].

$$p(kT) = r_k \cdot s(kT) - r_{k-1} \cdot s(kT - T) \quad (6)$$

여기서 r_k 는 천이 폭 감소율을 나타낸다. 저밀도에서는 r_k 가 1이므로 식 (6)은 선형 채널의 펄스 응답과 같

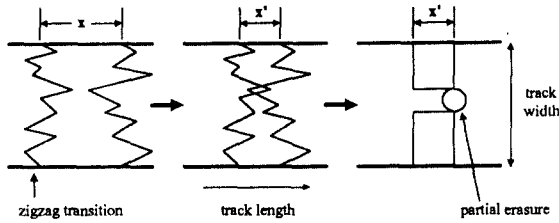


그림 3. 지그재그 천이의 상호 간섭에 의한 천이 폭 감소
Fig. 3 Partial erasure due to zigzag transitions interaction

아진다. 그러나 고밀도로 데이터를 기록하는 경우 r_k 의 값은 ϵ_k 와 마찬가지로 데이터의 입력 패턴에 의해 결정된다. 일반적으로 r_k 는 다음과 같이 이웃하는 천이의 수에 좌우된다[23][24].

$$r_k = \begin{cases} 1, & \text{이웃에 천이가 존재하지 않는 경우} \\ \gamma, & \text{이웃에 1개의 천이가 발생한 경우} \\ \gamma^2, & \text{이웃에 2개의 천이가 발생한 경우} \end{cases} \quad (7)$$

여기서 γ 는 부분 삭제 현상에 의해 발생하는 비선형 왜곡의 정도를 표시하는 파라메타로 선형 펄스에 대한 상대적인 비율을 나타내고 있다. 식 (7)을 달리 표현하면 다음과 같다.

$$r_k = 1 - \left(\frac{1-\gamma}{16} \right) a_k^2 \{ a_{k+1}^2 + a_{k-1}^2 - (1-\gamma) a_{k+1} a_{k-1} \} \quad (8)$$

예를 들어 a_{k-1} 가 '0', a_{k+1} 이 '-2'이면 r_k 의 값은 γ 가 된다.

기록 밀도가 매우 높아지면 자기 기록 채널은 지금까지 설명한 비선형 천이 이동과 부분 삭제 현상에 의한 왜곡 성분을 모두 포함하게 되며, 이 때 채널의 펄스 응답은 다음과 같이 나타낼 수 있다[22][25].

$$p(kT) = r_k \cdot s(kT) - r_{k-1} \cdot s(kT - T + \epsilon_{k-1}) \quad (9)$$

그림 4에 비선형 왜곡이 포함되지 않은 선형 펄스와 식 (9)의 비선형 펄스가 각각 나타나 있다. 여기서 부분 삭제 파라메타 γ 는 0.65, 비선형 천이 이동 파라메타 ϵ_1 은 0.3361T, 채널의 기록 밀도는 2.58로 가정하였다. 이 그림으로부터 비선형 펄스의 응답의 최대값 위치가 선형 펄스 응답과는 다르며 펄스의 크기가 많

이 감소되었음을 확인할 수 있다.

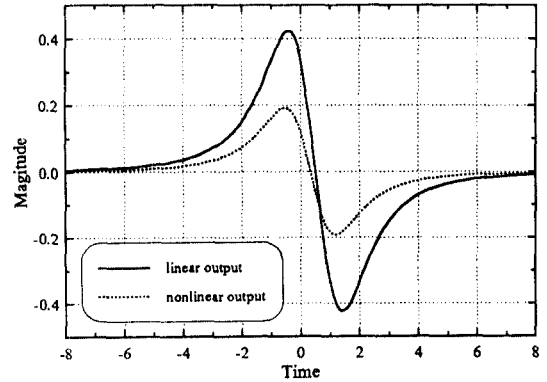


그림 4. 선형 펄스 응답과 비선형 펄스 응답의 비교
Fig. 4 Comparison between nonlinear pulse response and linear pulse response

III. 디지털 자기 기록 채널의 비선형 왜곡 추정

본 절에서는 II절에서 기술한 자기 기록 채널의 모델로부터 비선형 왜곡에 관련된 파라메타를 추정하는 방법을 설명한다. 적응 알고리즘을 이용한 추정 기법에서는 기준 신호(desired signal)와 적응 처리기(adaptive processor) 출력 신호 간의 평균 자승 오차를 이용하여 시스템을 추정한다. 적응 처리기로는 일반적으로 단일 입력을 갖는 선형 결합기(single-input linear combiner)를 사용하지만, 본 논문에서 제안된 방식에서는 선형 결합기 대신 식 (3)의 비선형 자기 기록 채널 모델을 적응 처리기로 사용한다. 채널의 비선형 파라메타는 선형 결합기의 계수에 대응하며,

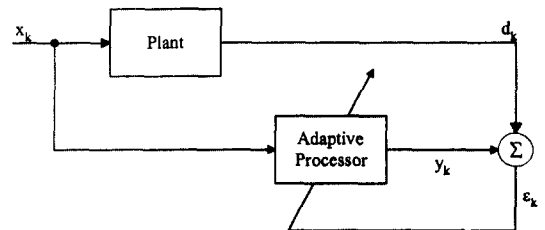


그림 5. 시스템 추정 알고리즘의 블록도
Fig. 5 Block diagram of system identification

기존의 적응 알고리즘과 마찬가지로 평균 자승 오차를 최소화하도록 비선형 파라메타를 갱신한다. 그림 5는 시스템 추정 알고리즘의 일반적인 형태를 보이고 있다. 그림에서 d_k 는 실제 자기 기록 채널의 출력 신호를, y_k 는 식 (3)에서 정의된 채널 모델의 출력 신호를 각각 나타내고 있다.

오차 신호를 최소화하기 위해서는 추정 오차의 순시 기울기가 '0'에 근접하도록 비선형 파라메타를 갱신해야 한다. 계수 갱신식을 유도하기 위하여 먼저 채널의 추정 오차를 다음과 같이 정의한다.

$$e_k = d_k - y_k \quad (10)$$

식 (10)으로부터 비선형 파라메타에 대한 추정 오차의 순시 기울기(instantaneous gradient)를 구하면 다음과 같다[26].

$$\frac{\partial e_k^2}{\partial w} = 2(y_k - d_k) \frac{\partial y_k}{\partial w} = -2e_k \frac{\partial y_k}{\partial w} \quad (11)$$

여기서 w 는 추정하고자 하는 비선형 왜곡 파라메타를 나타낸다. 선형 채널의 경우 출력 신호는 계수 벡터와 입력 신호열의 선형적인 결합으로 이루어지며 따라서 계수 벡터에 대한 추정 오차의 기울기는 단순히 입력 신호와 오차의 곱으로 표현된다. 그러나 고밀도 자기 기록 채널에서는 비선형 왜곡 파라메타를 고려해야 하므로 주어진 비선형 모델로부터 식 (11)에 포함된 편미분 항을 구해야 한다. 부분 삭제 파라메타 γ 에 대한 출력 신호 y_k 의 편미분 항을 계산할 결과는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial y_k}{\partial \gamma_k} = \frac{1}{4} \cdot \sum_m a_{k-m} \{ a_{k-m+1}^2 + a_{k-m-1}^2 - 2(1-\gamma_k) a_{k-m+1} a_{k-m-1} \} \cdot s(mT + \epsilon_{k-m}) \quad (12)$$

마찬가지로 비선형 전이 이동 파라메타 ϵ 에 대한 편미분 항을 계산하면

$$\frac{\partial y_k}{\partial \epsilon_{i,k}} = -8 \cdot \sum_m \frac{r_{k-m} a_{k-m} (mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}^2}{[1 + \{2(mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}\}^2]^2} \frac{\partial \epsilon_{k-m}}{\partial \epsilon_{i,k}}, \quad i = 0, 1, 2 \quad (13)$$

의 결과를 얻을 수 있다. 식 (13)에서 각각의 비선형 이동 파라메타 $\epsilon_{0,k}, \epsilon_{1,k}, \epsilon_{2,k}$ 에 대한 $\epsilon_{i,k}$ 의 편미분 항은 다음과 같이 입력 신호열의 조합으로 주어진다.

$$\frac{\partial \epsilon_k}{\partial \epsilon_{0,k}} = \frac{a_k (a_k + 2)}{8} \quad (14)$$

$$\frac{\partial \epsilon_k}{\partial \epsilon_{1,k}} = -\frac{a_k a_{k-1}}{4} \quad (15)$$

$$\frac{\partial \epsilon_k}{\partial \epsilon_{2,k}} = -\frac{a_k a_{k-2}}{4} \quad (16)$$

위의 결과를 이용하면 자기 기록 채널의 비선형 파라메타를 추정하기 위한 적응 알고리즘의 계수 갱신식을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 일반적으로 널리 쓰이고 있는 LMS 알고리즘을 적용하였다. LMS 알고리즘의 계수 갱신식은 다음과 같이 주어진다[26].

$$\mathbf{W}_{k+1} = \mathbf{W}_k - \mathbf{u} \hat{\mathbf{V}}_k \quad (17)$$

자기 기록 채널의 비선형 왜곡 추정 문제에서 각 비선형 파라메타는 식 (17)의 계수 벡터 \mathbf{W}_k 에 대응하고 계수 벡터에 대한 평균 자승 오차의 추정 기울기(gradient estimate) $\hat{\mathbf{V}}_k$ 는 비선형 파라메타에 대한 추정 오차의 순시 기울기로 대체할 수 있다. 따라서 식 (17)의 벡터 \mathbf{W}_k 와 $\mathbf{u}, \hat{\mathbf{V}}_k$ 는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$\mathbf{W}_k = [\gamma_k \quad \epsilon_{0,k} \quad \epsilon_{1,k} \quad \epsilon_{2,k}]^T \quad (18)$$

$$\mathbf{u} = \text{diag}(\mu_r, \mu_{\epsilon 0}, \mu_{\epsilon 1}, \mu_{\epsilon 2}) \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{V}}_k = -\frac{e_k}{2} \begin{bmatrix} \sum_m \frac{a_{k-m} \{ a_{k-m+1}^2 + a_{k-m-1}^2 - 2(1-\gamma_k) a_{k-m+1} a_{k-m-1} \}}{1 + \{2(mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}\}^2} \\ -4 \cdot \sum_m \frac{r_{k-m} a_{k-m}^2 (a_{k-m} + 2)(mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}^2}{[1 + \{2(mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}\}^2]^2} \\ 8 \cdot \sum_m \frac{r_{k-m} a_{k-m}^2 a_{k-m-1} (mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}^2}{[1 + \{2(mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}\}^2]^2} \\ 8 \cdot \sum_m \frac{r_{k-m} a_{k-m}^2 a_{k-m-2} (mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}^2}{[1 + \{2(mT + \epsilon_{k-m}) / PW_{50}\}^2]^2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

식 (19)는 각 비선형 파라메타에 대한 수렴 상수를 대각 행렬로 구성한 것인데, 계수 갱신식 각각의 파라

메타에 대하여 서로 다른 상수 값을 대입할 수 있도록 함으로써 수렴 속도와 정밀도를 독립적으로 조절할 수 있도록 하였다. 유도된 결과식의 계산량은 식 (20)에서 알 수 있듯이 기록 채널의 길이에 의존한다. 고려해야 하는 채널 길이와 기록 밀도는 비례관계를 가지므로 기록 밀도가 높아짐에 따라 계산량이 증가한다.

IV. 모의 실험

본 절에서는 모의 실험을 통하여 제안된 비선형 파라메타 추정 알고리즘의 수렴 특성을 분석한다. 모의 실험에서 채널의 계단 응답은 Lorentzian 함수를 사용하였다. 채널의 기록밀도 PW_{50}/T 은 2.58로 가정하였으며, 비선형 채널에 존재하는 천이 이동 파라메타와 부분 삭제 파라메타는 각각 $\epsilon_0=0.0001$, $\epsilon_1=0.3361$, $\epsilon_2=0.0761$, $\gamma=0.65$ 로 하였다. 입력 데이터 주기 T는 1로 정규화 하였다.

그림 6은 비선형 채널에서 왜곡 파라메타의 변화에 따른 3차원 평균 자승 오차 곡선을 나타낸다. 즉, 3차원 공간에서 수평의 가로축과 세로축은 비선형 천이 이동 파라메타 $\epsilon_{1,k}$ 와 부분 삭제 파라메타 γ_k 를 나타내며, 수직축은 $\epsilon_1=0.3361$, $\gamma=0.65$ 로 주어진 비선형

채널의 출력 신호와 파라메타 ϵ_1 과 γ 의 값을 변화시킬 경우 출력 신호 사이의 평균 자승 오차를 나타낸다. 이 그림으로부터 주어진 비선형 왜곡 파라메타와 일치하는 단일 해가 존재하며, 각 파라메타를 독립적으로 추정할 수 있음을 알 수 있다. 나머지 비선형 왜곡 파라메타에 대해서도 비슷한 결과를 얻을 수 있다.

그림 7은 비선형 왜곡 파라메타의 수렴 특성을 보여준다. SNR = 50dB인 비선형 채널에서 파라메타의 추정값 γ_k 와 $\epsilon_{0,k}$, $\epsilon_{1,k}$, $\epsilon_{2,k}$ 는 약 30,000개의 데이터가 지난 후에 모두 바이어스 없이 수렴되며, 매우 정확하게 비선형 왜곡 파라메타를 추정함을 확인할 수 있다. 비선형 파라메타 추정을 위한 적용 알고리즘은 식 (17), (18), (19), (20)에 주어진 적용 알고리즘을 사용하였으며, 적용 수렴 상수는 비선형 천이 이동의 경우에는 $\mu_{\epsilon_0}=0.003$, $\mu_{\epsilon_1}=0.008$, $\mu_{\epsilon_2}=0.015$, 부분 삭제 파라메타의 경우에는 $\mu_\gamma=0.002$ 를 각각 사용하였다. $\epsilon_{2,k}$ 의 경우 다른 파라메타에 비해 상대적으로 큰 μ 값을 사용하였기 때문에 수렴 과정에서의 진동이 비교적 크다.

그림 8(a)는 그림 6(b)에 주어진 평균 자승 오차의 등고선 상에서 비선형 천이 이동과 부분 삭제 파라메타가 동시에 수렴되어가는 궤적을 보여준다. 이 그림에서 비선형 천이 이동은 1비트 이전의 천이에 의한 영향만을 고려하였다. 또한 그림 8(b)는 이 때의 오차

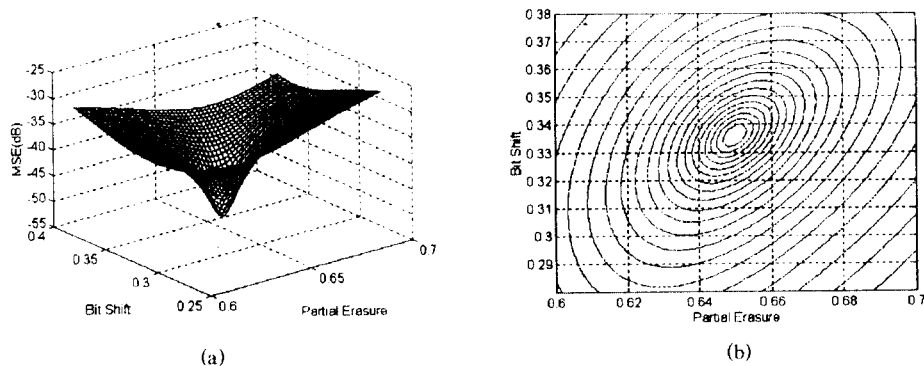


그림 6. 비선형 파라메타 γ 와 ϵ_1 의 변화에 따른 평균 자승 오차

(a) 평균 자승 오차의 3차원 평면 곡선

(b) 평균 자승 오차의 등고선

Fig. 6 MSE when nonlinear parameters, γ and ϵ_1 , vary

(a) Performance surface (b) Contour plot

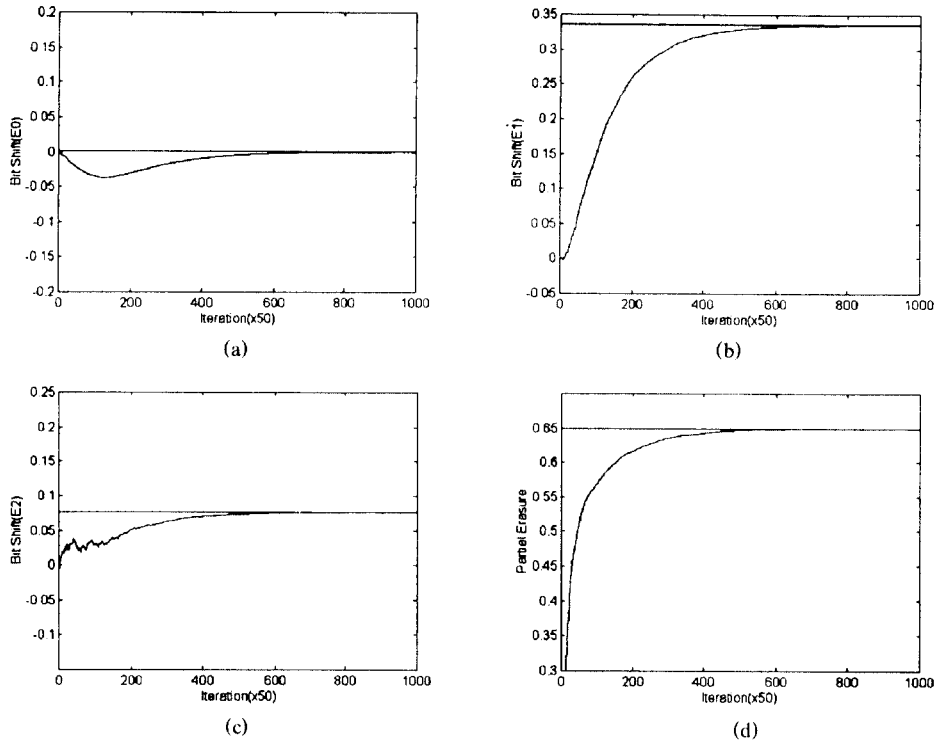


그림 7. 제안된 알고리즘을 사용한 경우 비선형 파라메타의 수렴 특성 (SNR = 50dB)

(a) ϵ_0 (b) ϵ_1 (c) ϵ_2 (d) γ

Fig. 7 Convergence behavior of nonlinear parameter when the proposed algorithm is used (SNR = 50dB)

(a) ϵ_0 (b) ϵ_1 (c) ϵ_2 (d) γ

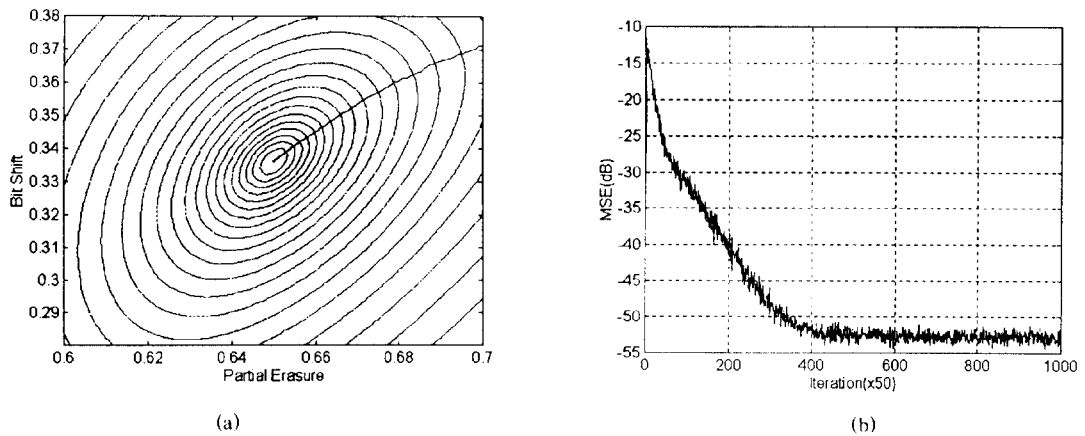


그림 8. 비선형 파라메타의 수렴 궤적과 학습 곡선(SNR = 50dB)

(a) 비선형 파라메타의 수렴 궤적 (b) 학습 곡선

Fig. 8 Nonlinear parameter tracking and learning curve (SNR = 50dB)

(a) Convergence paths of nonlinear parameters

(b) Learning curve

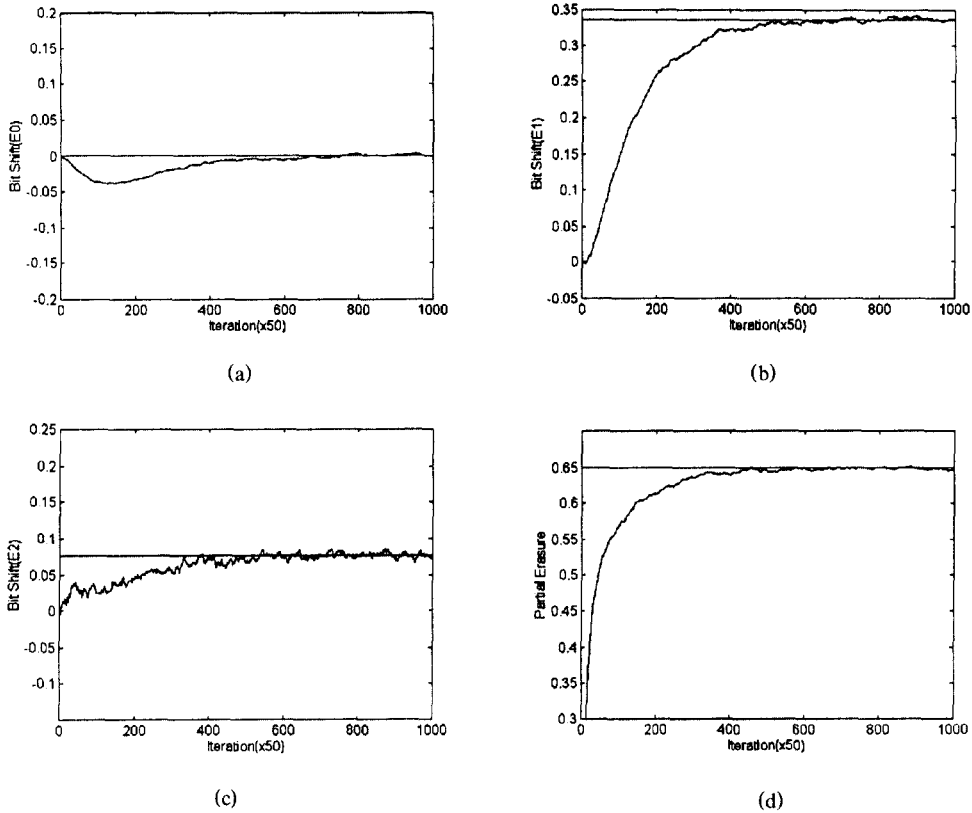


그림 9. 제안된 알고리즘을 사용한 경우 비선형 파라메타의 수렴 특성 (SNR = 20dB)

(a) ϵ_0 (b) ϵ_1 (c) ϵ_2 (d) γ

Fig. 9 Convergence behavior of nonlinear parameter when the proposed algorithm is used (SNR = 20dB)

(a) ϵ_0 (b) ϵ_1 (c) ϵ_2 (d) γ

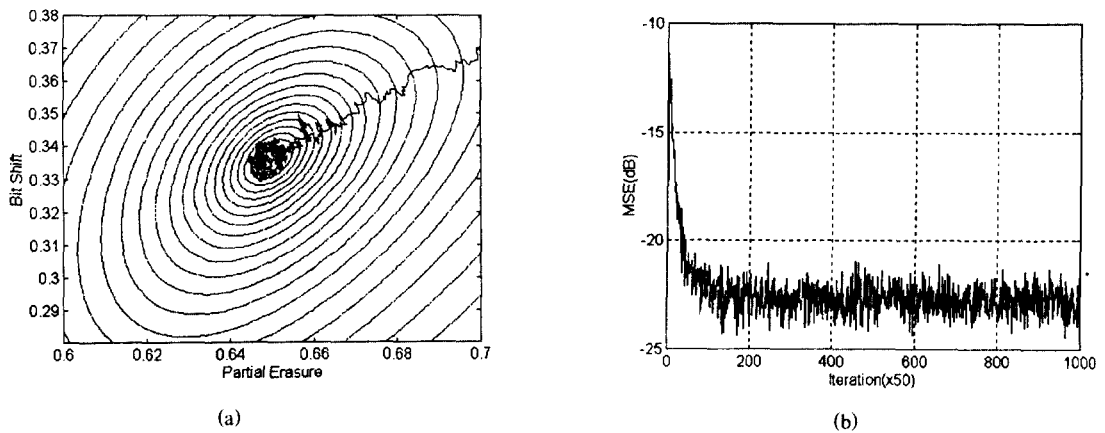


그림 10. 비선형 파라메타의 수렴 궤적과 학습 곡선 (SNR = 20dB)

(a) 비선형 파라메타의 수렴 궤적 (b) 학습 곡선

Fig. 10 Nonlinear parameter tracking and learning curve (SNR = 20dB)

(a) Convergence paths of nonlinear parameters

(b) Learning curve

학습곡선(learning curve)을 나타내며, Monte-Carlo 방식에 의해 100회 반복한 뒤 평균한 것이다. 평균 상승 오차는 -50dB 이하로 수렴되며, 따라서 제안된 추정 기법이 비선형 채널의 왜곡 파라메타를 매우 작은 오차로 추정함을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 $\text{SNR} = 20\text{인}$ 채널에 대해 모의 실험을 반복하여 얻은 결과이다. 이 결과로부터 제안된 추정 기법이 비교적 잡음이 심하게 존재하는 비선형 채널에서도 왜곡 파라메타를 비교적 정확하게 추정하는 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 고밀도 자기 기록 채널에서 발생하는 비선형 천이 이동 및 부분 삭제에 의한 왜곡과 관련된 파라메타들을 동시에 추정할 수 있는 새로운 기법을 제안하였다. 일반적으로 이러한 파라메타들은 Volterra 모델에서 하나의 kernel로 나타나기 때문에 분리하여 추정하기가 매우 어려운 것으로 알려져 있으나, 제안된 방식에서는 시간 영역에서 적응 알고리즘을 사용하여 직접 추정하였다. 비선형 왜곡 성분을 포함하는 고밀도 자기 기록 채널 모델을 이용하여 비선형 천이 이동과 부분 삭제에 관한 파라메타를 독립적으로 추정해가는 계수 갱신식을 유도하였고, 그 결과 두 비선형 왜곡 성분을 바이어스 없이 동시에 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한 모의 실험을 통하여 잡음이 어느 정도 존재하는 채널에 대해서도 제안된 추정 기법이 비선형 왜곡 파라메타를 비교적 정확하게 추정함을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 방식은 비대칭적인 펄스 응답을 갖는 채널에 대해서도 적용이 가능하다.

참 고 문 헌

1. C. Coleman, D. Lindholm, D. Peterson and R. Wood, "High Data Rate Magnetic Recording in a Single Channel," *J. of IEEE*, Vol. 55, No. 6, pp. 229-236, Jun. 1985.
2. A. Barany and H. Bertram, "Transition Noise for Longitudinal Thin-Film Media," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 23, No. 2, pp. 1776-1788, Mar. 1987.
3. R. Barndt, A. Armstrong, H. Bertram, and J. Wolf, "A Simple Statistical Model of Partial Erasure in Thin Film Disk Recording Systems," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 27, No. 6, pp. 4978-4980, Nov. 1991.
4. T.C. Arnoldussen and H.C. Tong, "Zigzag Transition Profiles, Noise, and Correlation Statistics in High Oriented Longitudinal Film Media," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 22, No. 5, pp. 889-891, Sep. 1986.
5. P. Newby and R. Wood, "The Effects of Nonlinear Distortion on Class IV Partial Response," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 22, No. 5, pp. 1203-1205, Sep. 1986.
6. D. Palmer, P. Ziperovich, R. Wood, and T. Howell, "Identification of Nonlinear Write Effect Using Pseudorandom Sequences," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 23, No. 5, pp. 2377-2379, Sep. 1987.
7. Y. Tang, R. L. Galbraith, J. D. Coker, P. C. Arnett, and R. W. Wood, "Precompensation Value Determination in a PRML Channel," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 32, No. 3, pp. 2011-2014, May 1996.
8. K. D. Fisher, J. M. Cioffi, W. L. Abbott, P. S. Bednarz, and C. M. Melas, "An Adaptive RAM-DFE for Storage Channels," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 39, No. 11, pp. 1559-1568, Nov. 1991.
9. S. K. Nair and J. Moon, "Simplified Nonlinear Equalizers," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 6, pp. 3051-3053, Nov. 1995.
10. Y. Lin and M. F. Yuan, "Post Compensation for Nonlinear Distortions in PRML Recording Channel," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 6, pp. 3033-3035, Nov. 1995.
11. J. Fitzpatrick and J. K. Wolf, "A Maximum Likelihood Detector for Nonlinear Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 27, No. 6, pp. 4816-4818, Nov. 1991.
12. Y. Lin and R. Wood, "An Estimation Technique for An Estimation Technique for Accurately Modeling the Magnetic Recording Channel including Nonlinearities," *IEEE Trnas. on Magn.*,

- Vol. 25, No. 5, pp. 4084-4086, Sep. 1989.
13. D. Palmer, J. Hong, D. Stanek, and R. Wood, "Characterization of the Read/Write Process for Magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 2, pp. 1071-1076, Mar. 1995.
 14. X. Che and P. A. Ziperovich, "A Time-Correlation Method of Calculating Nonlinearities Utilizing Pseudo-Random Sequences," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 30, No. 6, pp. 4239-4241, Nov. 1994.
 15. G. Mian, "An Algorithm for a Real Time Measurement of Nonlinear Transition Shift by a Time Domain Correlation Analysis," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 1, pp. 816-818, Jan. 1995.
 16. Y. S. Tang and C. Tsang, "A Technique for Measuring Nonlinear Bit Shift," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 27, No. 6, pp. 5316-5318, 1991.
 17. X. Che, "Nonlinearity Measurements and Write Precompensation Studies for a PRML Recording Channel," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 31, No. 6, pp. 3021-3026, Nov. 1995.
 18. A.S. Hoagland and J.E. Monson, *Digital Magnetic Recording*, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1991.
 19. D. Palmer, J. Coker, M. Meyer, and P. Ziperovich, "Overwrite in Thin Media Measured by the Method of Pseudorandom Sequences," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 24, No. 6, pp. 3096-3098, Nov. 1988.
 20. N. Sands and J. Cioffi, "Nonlinear Channel Models for Digital magnetic Recording," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 29, No. 6, pp. 3996-3998, Nov. 1993.
 21. N. Sands, *Nonlinear Intersymbol Interference in Digital Magnetic Recording*, Ph. D. Thesis, Stanford Univ., 1993.
 22. T. Yamauchi and J. M. Cioffi, "A Nonlinear Model for Thin Film Disk Recording Systems," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 29, No. 6, pp. 3993-3995, Nov. 1993.
 23. I. Lee, T. Yamauchi, and J.M. Cioffi, "Performance Comparison of Receivers in a Simple Partial Erasure Model," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 30, No. 4, pp. 1465-1469, Jul. 1994.
 24. I. Lee and T. Yamauchi, "Modified Maximum Likelihood Sequence Estimation in a Simple Partial Erasure Model," *ICC '94*, pp. 245-249, May 1994.
 25. William E. Ryan and Nan-Hsiung Yeh, "Viterbi Detector for PR4-Equalized Magnetic Recording Channels with Transition Shift and Partial-Erasure Nonlinearities," *IEEE Trnas. on Magn.*, Vol. 32, No. 5, Sep. 1996.
 26. B. Widrow and S. D. Sterns, *Adaptive Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., 1985.



李南鎮(Nam Jin Lee) 정희원
 1971年 1月 3日生
 1996年 2月:中央大學校 電子工學科 卒業(工學士)
 1996年 3月~現在:中央大學校 電子工學科 大學院 碩士課程
 ※주관심분야:디지털통신시스템, 적응신호처리, 고밀도저장시스템



金基鎬(Ki Ho Kim) 정희원
 1980年 2月:漢陽大學校 工科大學 電子工學科(工學士)
 1982年 2月:KAIST 電氣 및 電子科(工學碩士)
 1982年 3月~1987年 7月:KBS 技術研究所(研究員)
 1987年 9月~1991年 8月:The University of Texas at Austin, Department of Electrical and Computer Engineering(Ph.D)
 1991年 9月~現在:三星綜合技術院 디지털통신 LAB (LAB 장)
 ※주관심분야:적용신호처리, 통신신호처리, 디지털통신



趙 鏞 洙(Yong Soo Cho) 정희원

1959年 9月 15日生

1984年 2月:中央大學校 電子工學
科 卒業(工學士)

1987年 8月:延世大學校 電子工學
科 大學院 卒業(工學
碩士)

1991年 5月:The University of
Texas at Austin, Department of Electrical and Com-
puter Engineering(Ph.D)

1994年 1月~1984年 7月:金星電氣(株) 研究員

1992年 3月~現在:中央大學校 電子工學科 副教授

※주관심분야:통신신호처리, 고속무선모델, 고밀도
기록·재생