

論文96-33B-3-16

I.I.D. 신호를 이용한 고밀도 자기 기록 채널의 비선형 왜곡 추정

(Identification of Nonlinear Distortion for a High-Density Magnetic Recording Channel Using an I.I.D. Signal)

全元奇*, 趙鏞洙*

(Won-Gi Jeon and Yong-Soo Cho)

요약

디지털 자기 기록 채널의 기록 밀도가 증가함에 따라 부적절한 상승 시간, 감자화계, 덮어쓰기 영향 등에 의해 발생하는 비선형 왜곡이 증가하고 이는 기록 속도를 제한하는 결과를 가져온다. 이 논문에서는 i.i.d.(independent, identically distributed) 신호를 사용하여 고밀도 자기 기록 채널의 비선형 왜곡을 추정하는 새로운 방식에 대하여 기술한다. 제안된 방식에서는 기존의 방식에서 꼭 필요한 큰 크기의 역 행렬 연산이 필요 없으며 비선형 매개 변수를 독립적으로 추정할 수 있다. 제안된 방법으로 비선형 천이 이동을 추정하고 이를 이용하여 비선형 왜곡을 보상할 수 있는 가능성을 컴퓨터 모의 실험을 통하여 확인한다.

Abstract

As the recording density of digital magnetic recording channels increased, the nonlinear distortion caused by inadequate rise-times, demagnetizing field, and overwrite effect during the recording process becomes significant, resulting in limitation on the recording rate. In this paper, a new method for identifying the nonlinear distortion in high-density magnetic recording channel using an i.i.d. (independent, identically distributed) input is described. The proposed method does not require the operation of large-size matrix inversion which are necessary for the conventional method, and it enables us to estimate nonlinear parameters independently. The feasibility of applying the proposed method to estimation of nonlinear transition shifts, which can be used to compensate the nonlinear distortion, is demonstrated by computer simulations.

I. 서론

최근 들어 처리해야 하는 정보의 양이 급격히 증가하면서 방대한 양의 정보를 기록·재생할 수 있는 저

장 시스템에 대한 필요성이 증대되고 있다. 많은 정보를 저장하기 위해서는 저장 매체의 기록 밀도를 높여야 하며 기록된 데이터를 오류없이 재생하기 위해서는 기록 채널의 정확한 모델링과 이를 고려한 재생 기술이 필요하다. 이러한 고밀도 디지털 자기 기록을 위하여 많은 연구들이 최근 이루어지고 있으며 많은 제품과 논문들이 발표되고 있다.

디지털 자기 기록에는 기록 매체가 갖고 있는 히스테리시스(hysteresis) 특성 때문에 ± 1 의 양극 신호를 기록하는 포화 기록 방식이 사용된다. 그림 1의 기록 회로에 기록 전류가 흐르게 되면 헤드의 공극에서

* 正會員, 中央大學校 電子工學科

(Dept. of Electronic Engineering Chung-Ang University, Seoul, Korea)

* 이 연구는 92년도 한국과학재단의 연구비 지원에 의한 결과임

接受日字: 1995年5月19日, 수정완료일: 1996年2月13日

기록 전류의 극성에 해당하는 자속이 발생하여 기록 매체를 자화시킨다. 이 때, 기록 전류의 극성이 변하는 경우에만 자화의 방향이 바뀌며 매체에 자화의 천이가 일어난다. 재생시에는 매체에 기록된 자화의 천이가 그림 1의 재생 회로와 헤드에 의해 재생 전압으로 유기되며, 이 때 매체의 단일 천이 응답은 Lorentz 함수로 모델링 할 수 있다. 저밀도의 경우 자기 기록 채널의 출력은 단일 천이 응답의 선형 중첩 이론으로 설명할 수 있다.

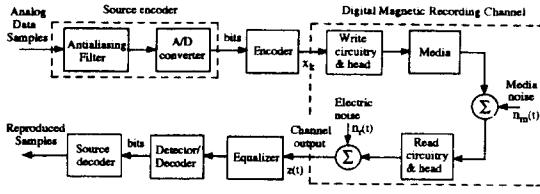


그림 1. 디지털 자기 기록 시스템의 블럭도
Fig. 1. A Block Diagram for a Digital Magnetic Recording System.

그러나 선형 기록 밀도가 증가하게 되면 인접 천이의 간섭으로 인해 비선형 왜곡이 발생하게 된다. 비선형 형성에 의한 왜곡은 기존의 등화기(PRML, 결정 캐환 등화기 등)로는 보상할 수 없으므로 이는 시스템의 성능을 떨어뜨리는 중요한 원인이 된다¹¹. 따라서 고밀도 디지털 자기 기록 시스템의 성능을 높이기 위해서는 비선형 왜곡을 일으키는 성분을 정확히 추정하여 그 영향을 제거 또는 감소시키는 것이 필요하다. 디지털 자기 기록 채널의 비선형 왜곡을 추정하는 방법으로서 PRBS(Pseudo-Random Binary Sequence)를 입력 신호로 사용하는 메아리 추출 기법이 있는데, 이 방법을 사용하면 최대 길이를 갖는 PRBS의 고유한 성질에 의해 주 펄스 응답 주위의 특정한 위치에 비선형 왜곡의 영향이 주 펄스의 메아리 형태로 나타나며 이 메아리의 크기로부터 비선형 천이 이동의 정도를 추정할 수 있다^{12, 13}. 또한 Volterra 급수에 의한 모델¹⁴과 FSM에 의한 모델¹⁵이 발표되어 최근 널리 사용되고 있는데 FSM 모델과 Volterra 모델은 Hadamard 변환에 의해 서로 변환될 수 있으므로 동일한 비선형 모델로 볼 수 있다¹⁶.

이 논문에서는 입력 신호가 i.i.d. 신호의 통계적 특성을 갖는 경우에 이러한 Volterra 계수를 추정하는 방법을 제안한다. 기존의 방식에 비해 매우 적은 계산량으로도 비교적 정확하게 Volterra 계수를 추정할 수

있으며, 추정된 계수로부터 비선형 왜곡을 발생시키는 비선형 성분의 각 매개 변수를 구할 수 있음을 보인다. II절에서는 비선형 왜곡을 갖는 채널을 Volterra 급수로 근사화하는 방법을 설명한다. III절에서는 i.i.d. 신호의 특성을 살펴본 뒤 그 특성을 이용하여 Volterra 계수를 추정하는 방법을 설명하며, IV절에서 모의 실험 결과를 논한 뒤, V절에서 결론을 맺는다.

II. 비선형 채널의 Volterra 모델

자기 기록 시스템의 재생 전압은 매체에 기록된 자화의 천이로부터 유기되며, 고밀도에서 발생하는 비선형 형성의 원인은 크게 인접 천이의 영향에 의한 천이의 위치의 이동^{17, 18}, 덮어쓰기 효과에 의한 천이 위치의 이동¹², 헤드 자계의 부적절한 상승 시간에 의한 천이 위치의 이동으로 구분할 수 있다.

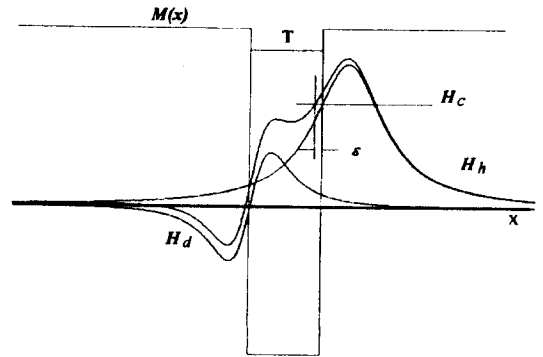


그림 2. 인접 천이의 감자화계에 의한 비선형 천이 이동
Fig. 2. Nonlinear transition shifting due to demagnetization of adjacent transition.

인접한 천이에 의한 천이의 변화는 천이의 이동과 천이 형태의 변화로 구분할 수 있다. 그림 2에서 보듯이 현재 기록하려는 천이의 이전에 천이가 기록되어 있다면 그 천이에 의해 발생하는 감자화계(H_d)는 현재 기록하려는 천이의 자계(H_h)에 영향을 주어 자계의 크기를 바꾼다. 기록 자계의 크기가 매체의 보자력(coercivity, H_c)을 초과하는 순간에 자화의 천이가 발생하므로 자계의 크기 변화에 의해 천이 위치가 변하게 된다. 이러한 인접 천이의 영향에 의한 비선형 천이 이동의 보기를 그림 3에 나타내었는데 천이 이동 매개 변수는 기록 매체, 기록 밀도 등에 의해 결

정된다¹³⁾.

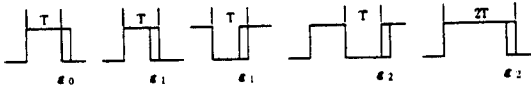


그림 3. 입력 데이터 패턴에 따른 천이 이동
Fig. 3. Transition shifting due to input data pattern.

데이터를 기록하기 이전에 기록 매체가 이미 자화되어 있다면 그로부터 발생하는 자계에 의해 현재 기록하려는 자계의 크기가 변하여 자화 천이의 위치가 이동한다. 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.

또한, 헤드의 특성(부적절한 상승 시간)에 의해 비선형 천이 이동이 발생된다¹⁹⁾. 기록 전류의 극성이 바뀌면 헤드에서 발생하는 자계의 방향이 바뀌게 되며, 이상적인 경우에는 기록 전류의 반전과 헤드 자계의 반전이 동시에 일어나야 한다. 그러나 실제로 헤드의 특성은 이상적이지 못하기 때문에 헤드의 응답이 최대 값에 도달하기까지 시간 지연이 발생하게 된다. 이러한 현상은 특히 고속 데이터 기록시에 두드러지게 나타나며, 이는 그림 3의 1-비트 또는 2-비트 이전의 천이에 의한 천이 이동으로 나타낼 수 있다.

위에서 살펴본 비선형성에 의한 왜곡은 선형 심볼간 간섭에 의한 왜곡으로 볼 수 없으므로 비선형 모델에 의한 추정 방법이 필요하게 된다. 이 논문에서는 위에서 설명한 세가지 현상 즉, 그림 3에 나타난 덮어쓰기 효과에 의한 비선형 천이 이동과 인접 천이에 의한 비선형 천이 이동에 관련된 매개 변수 $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$ 를 추정하는 방법에 대해서 논한다. 채널의 비선형성에 의한 왜곡을 일반적으로 표현하면 다음과 같다¹⁶⁾

$$y(t) = \sum_k (x_k - x_{k-1}) s(t - kT + f(\mathbf{x}_k)) \quad (1)$$

여기서 $x_k, y(t)$ 는 각각 디지털 입력 전류, 아날로그 재생 전압을 나타내며, $s(t)$ 는 천이 응답을 나타낸다. 또한 $f(\mathbf{x}_k)$ 는 입력 데이터 패턴 \mathbf{x}_k 에 따른 천이 이동의 정도를 나타내는 비선형 함수이다. 식(1)을 Taylor 급수 전개하면,

$$y(t) = y_{lin}(t) + \sum_k (x_k - x_{k-1}) h(t - kT) f(\mathbf{x}_k) \quad (2)$$

이 된다¹⁰⁾. 여기서 $y_{lin}(t)$ 는 선형 응답이다. $h(t)$ 는 채널의 임펄스 응답이며 이는 다음과 같이 정의된다.

$$h(t) = s'(t) \approx \frac{s(t+T/2) - s(t-T/2)}{T} = \frac{1}{T} p(t+T/2)$$

여기에서 $p(t)$ 는 펄스 응답을 나타낸다. 위에서 기술한 덮어쓰기 효과와 인접 천이에 대한 비선형 함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

- 덮어쓰기 : $f(\mathbf{x}_k) = \frac{\epsilon_0}{2} (x_k - x_{k-1})$
- 1 비트 이전의 천이 : $f(\mathbf{x}_k) = -\frac{\epsilon_1}{4} (x_k - x_{k-1}) (x_{k-1} - x_{k-2})$
- 2 비트 이전의 천이 : $f(\mathbf{x}_k) = -\frac{\epsilon_2}{4} (x_k - x_{k-1}) (x_{k-2} - x_{k-3})$

일반적인 기록 채널에서는 1비트 또는 2비트전의 인접 천이에 의한 영향이 대부분이며 이 이전의 천이에 의한 영향은 무시할 수 있다. 이 때 $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$ 는 각각의 비선형성에 의한 천이 이동의 정도를 나타내는 매개 변수이다. 위 비선형 함수 $f(\mathbf{x}_k)$ 를 식(2)에 대입하여 정리하면 다음과 같다¹⁰⁾.

- 덮어쓰기 효과에 의한 재생 응답

$$y(t) = y_{lin}(t) - \epsilon_0 \sum_k x_k x_{k-1} h(t - kT)$$

- 1 비트 이전의 천이에 의한 재생 응답

$$y(t) = y_{lin}(t) + \frac{\epsilon_1}{2} \sum_k (x_k - x_{k-1} x_{k-2}) h(t - kT)$$

- 2 비트 이전의 천이에 의한 재생 응답

$$y(t) = y_{lin}(t) + \frac{\epsilon_2}{2} \sum_k (x_k x_{k-1} x_{k-2} - x_k x_{k-1} x_{k-3}) h(t - kT)$$

즉, 디지털 자기 기록 채널의 응답에는 선형 응답과 천이 이동에 의한 비선형 응답이 함께 포함되어 있으며, 2비트전 까지의 인접 천이 효과를 고려할 경우 비선형 응답은 위에 나타난 바와 같이 3차까지의 Volterra 급수로 표현할 수 있다. 위의 결과로부터 1차부터 3차까지의 Volterra 계수를 정리하면 다음과 같다.

$$\sum_k x_k p_1(t-kT) = \sum_k x_k p(t-kT) + \frac{\epsilon_1}{2} \sum_k x_k h(t-kT) \quad (3)$$

$$\sum_k x_k x_{k-1} p_2(t-kT) = -\epsilon_0 \sum_k x_k x_{k-1} h(t-kT) \quad (4)$$

$$\sum_k x_k x_{k-1} x_{k-2} p_{31}(t-kT) = -\frac{\epsilon_1}{2} \sum_k x_k x_{k-1} x_{k-2} h(t-kT) \quad (5)$$

$$+ \frac{\epsilon_2}{2} \sum_k x_k x_{k-1} x_{k-2} h(t-kT)$$

$$\sum_k x_k x_{k-1} x_{k-3} p_{32}(t-kT) = -\frac{\epsilon_2}{2} \sum_k x_k x_{k-1} x_{k-3} h(t-kT) \quad (6)$$

여기서 $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_{31}(t)$, $p_{32}(t)$ 는 각각 1차, 2차, 3차의 Volterra 계수이다.

일반적으로, 채널의 비선형 정도를 나타내는 Volterra 계수를 구하기 위하여 최소 제곱법이 널리 이용된다. 이 방식에서는 모델의 출력과 실제 채널 출력과의 오차를 구했을 때 평균 제곱 오차가 최소가 되도록 하는 모델의 계수를 구한다. 즉, 메모리 N 을 갖는 비선형 자기 기록 채널의 출력을 y_k 라고 하면 모델의 출력 \hat{y}_k 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{y}_k = \mathbf{w}^T \mathbf{x}_k \quad (7)$$

여기서

$$\mathbf{x}_k = [x_k \cdots x_{k-N+1} \quad x_k x_{k-1} \cdots x_{k-N+1} x_{k-N} \quad x_k x_{k-1} x_{k-2} \cdots x_{k-N+1} x_{k-N} x_{k-N-1} \quad x_k x_{k-1} x_{k-3} \cdots x_{k-N+1} x_{k-N} x_{k-N-2}]^T$$

$$\mathbf{w} = [w_{1,0} \cdots w_{1,N-1} \quad w_{2,0} \cdots w_{2,N-1} \quad w_{31,0} \cdots w_{31,N-1} \quad w_{32,0} \cdots w_{32,N-1}]^T$$

즉, 벡타 \mathbf{w} 와 \mathbf{x}_k 는 메모리 N 을 갖는 1차, 2차, 3차 계수와 이에 해당하는 1차, 2차, 3차 입력 데이터로 구성되어 있다. 이 때, 출력 오차 e_k 는 다음과 같이 정의되며

$$e_k = y_k - \hat{y}_k = y_k - \mathbf{w}^T \mathbf{x}_k \quad (8)$$

평균 제곱 오차는 다음과 같이 표현된다.

$$E\{e_k^2\} = E\{y_k^2\} - 2\mathbf{w}^T \mathbf{P} + \mathbf{w}^T \mathbf{R} \mathbf{w} \quad (9)$$

여기서 $\mathbf{P} = E\{y_k \mathbf{x}_k\}$ 이고 $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}_k \mathbf{x}_k^T\}$ 이다. 식(9)는 입·출력 데이터에 대해서는 비선형적으로 결합되어 있으나, 가중 벡타 \mathbf{w} 에 대해서는 선형적으로 결합되어 있으므로 양변을 \mathbf{w} 에 관해 gradient를 취하고 정리하면 \mathbf{w}_{opt} 는 다음의 행렬식으로 표현된다.

$$\mathbf{w}_{opt} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{P} \quad (10)$$

즉, 채널의 비선형성을 규정짓는 Volterra 계수를 결

정하기 위해서는 식(10)에 주어진 $[4N \times 4N]$ 의 역행렬을 계산해야 하지만 이 과정에서는 많은 계산량과 시간이 필요하다. 다음절에서는 이러한 역행렬의 계산 없이 비교적 간단하게 Volterra 계수를 추정하는 제안된 방법에 대하여 기술한다.

III. I.I.D. 입력 신호를 이용한 Volterra 계수 추정

디지털 자기 기록 채널의 입력 신호 x_k 는 일반적으로 $\{-1, +1\}$ 의 값을 갖고 평균이 0인 i.i.d. 신호라 할 수 있다. 즉, x_k 는 통계적으로 독립적인 신호가 되므로 다음과 같은 특성을 갖는다.

$$E\{x_k\} = 0 \quad E\{x_k^2\} = 1$$

$$E\{x_k^{2n+1}\} = 0 \quad \forall n \geq 0 \quad E\{x_i x_j\} = \delta_{i-j} \quad (11)$$

식(11)을 이용하여 다음의 성질을 유도할 수 있다^[11].

$$E\{\prod_{i=1}^n x_{m_i}\} = 0, \text{ 서로 다른 } m_i \text{의 경우}$$

$$E\{\prod_{i=1}^n x_{m_i}\} = 0, \text{ } n \text{이 홀수인 경우}$$

$$E\{\prod_{i=1}^n x_{m_i}\} = 1, \text{ } m_i \text{가 쌍(pair)으로 구성되어 있는 경우} \quad (12)$$

또한, 출력 y_k 는 식(3)-(5)에 주어진 비선형 왜곡을 포함하고 있으므로 일반적으로 다음의 Volterra 급수 모델로 표현된다.

$$y_k = \sum_i x_{k-i} p_{1,i} + \sum_i x_{k-i} x_{k-i-1} p_{2,i} + \sum_i x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-i-2} p_{31,i} + \sum_i x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-i-3} p_{32,i} + \cdots \quad (13)$$

식(13)의 양변에 구하고자 하는 Volterra 계수의 입력 신호를 곱해서 평균을 취하면 다음과 같이 주어진다.

$$E\{y_k x_{k-j}\} = E\{\sum_i p_{1,i} x_{k-i} x_{k-j}\} + E\{\sum_i p_{2,i} x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-j}\} + E\{\sum_i p_{31,i} x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-i-2} x_{k-j}\} + E\{\sum_i p_{32,i} x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-i-3} x_{k-j}\} \quad (14)$$

$$E\{y_k x_{k-j} x_{k-j-1}\} = E\{\sum_i p_{1,i} x_{k-i} x_{k-j} x_{k-j-1}\} + E\{\sum_i p_{2,i} x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-j} x_{k-j-1}\} + E\{\sum_i p_{31,i} x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-i-2} x_{k-j} x_{k-j-1}\} + E\{\sum_i p_{32,i} x_{k-i} x_{k-i-1} x_{k-i-3} x_{k-j} x_{k-j-1}\} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 E[y_k x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2}] &= E[\sum \rho_{1,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2}] \\
 &+ E[\sum \rho_{2,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3}] \\
 &+ E[\sum \rho_{3,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3} x_{k-j-4}] \\
 &+ E[\sum \rho_{4,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3} x_{k-j-4} x_{k-j-5}]
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 E[y_k x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2}] &= E[\sum \rho_{1,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2}] \\
 &+ E[\sum \rho_{2,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3}] \\
 &+ E[\sum \rho_{3,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3} x_{k-j-4}] \\
 &+ E[\sum \rho_{4,j} x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3} x_{k-j-4} x_{k-j-5}]
 \end{aligned} \tag{17}$$

여기서 j 는 $\{0, 1, \dots, N-1\}$ 의 값을 가지며, 이 때 N 은 앞에서와 같이 채널의 길이를 나타낸다. 식(11)과 (12)에 주어진 i.i.d. 성질을 이용하여 위 식을 간략화한 뒤 다시쓰면, 각 차수의 Volterra 계수는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$\rho_{1,j} = E[y_k x_{k-j}] \tag{18}$$

$$\rho_{2,j} = E[y_k x_{k-j} x_{k-j-1}] \tag{19}$$

$$\rho_{3,j} = E[y_k x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2}] \tag{20}$$

$$\rho_{4,j} = E[y_k x_{k-j} x_{k-j-1} x_{k-j-2} x_{k-j-3}] \tag{21}$$

식(18)-(21)의 우변에 주어진 항들은 각각 상관, 이차 상관, 삼차 상관이라 불리며, 이러한 고차 통계는 채널의 임·출력간의 선형, 비선형성을 추출 가능하게 한다^[12].

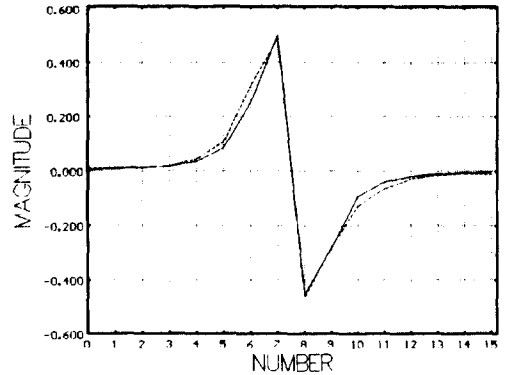
II절에서 언급된 바와 같이 기존의 방식에서는 비선형 채널의 Volterra 모델 계수를 구하기 위해서 최소 제곱법을 사용한다. 최소 제곱법은 모델링 오차를 최소로 하는 Volterra 계수를 구할 수 있으므로 매우 정확한 방법이라 할 수 있지만 식(10)에서 알 수 있듯이 계수를 구하는 과정에서 역 행렬 연산을 수행해야 하는 단점이 있다. 또한 특정 차수와 메모리의 Volterra 계수를 구하는 경우에도 전체 계수에 대한 행렬 연산이 필요하기 때문에 많은 계산량이 필요하며 비선형 천이 이동 매개 변수의 추정을 위해서는 비효율적이라 할 수 있다. 그러나 i.i.d. 신호를 사용하여 Volterra 계수를 구할 경우에는 식(18)-(21)에서와 같이 입력 데이터와 출력 데이터만을 사용하여 고차 통계를 계산하면 되므로 계산 과정이 매우 간단하다. 또한 특정 차수와 메모리 j 에서의 Volterra의 계수를 구할 경우에 그 차수와 메모리에 해당하는 입력 데이터와 출력 데이터간의 고차 통계만이 필요하므로 다른 차수와 메모리의 계수와 상관없이 각각의 계수를 독립적으로 구할 수 있는 장점이 있다. 그러나 정확한 계수값을 얻기 위해

서는 고차 통계의 특성상 일정량 이상의 데이터가 요구된다.

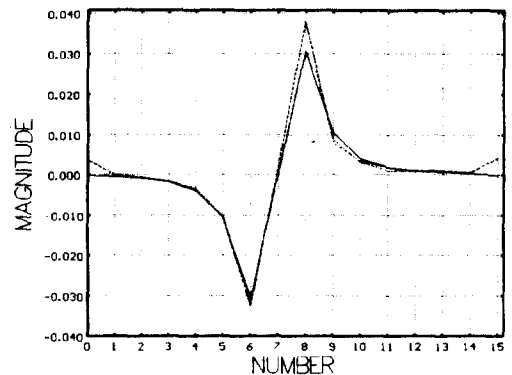
IV. 모의 실험

이 절에서는 자기 기록 채널에서 발생하는 비선형 천이 이동 현상의 Volterra 모델 근사화에 대한 타당성과 제안된 Volterra 계수 추정 방식의 성능을 모의 실험을 통하여 확인한다. 입력 데이터열에 따라 발생하는 자화의 천이 이동 매개 변수는 ε_0 ($2/16T$), ε_1 ($3/16T$), ε_2 ($1/16T$)로 가정하였으며 여기서 T 는 데이터 입력 주기를 나타낸다. 입력 신호는 i.i.d. 성질을 갖는 컴퓨터에서 발생하는 확률 신호와 PRBS를 사용하였다.

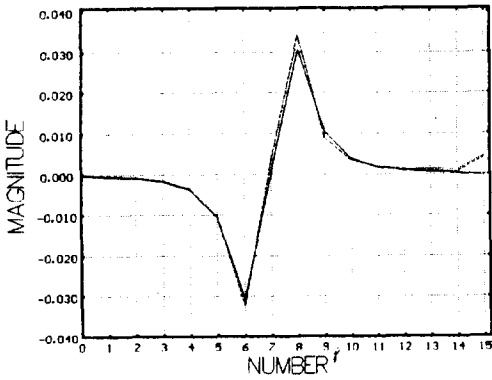
우선 Volterra 급수에 의한 모델의 타당성을 확인하기 위해 비선형 천이 이동 채널의 Volterra 계수를 구하였다.



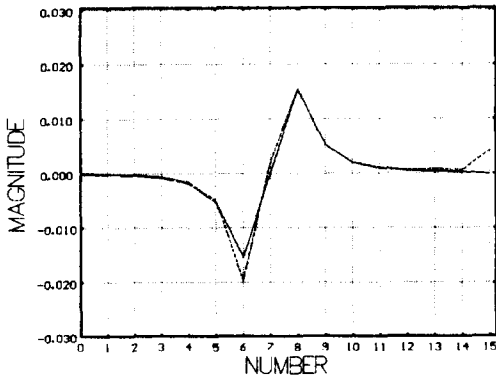
(a) 1차 Volterra 계수 $\sum_k x_k \rho_1(t-kT)$



(b) 2차 Volterra 계수 $\sum_k x_k x_{k-1} \rho_2(t-kT)$



(c) 3차 Volterra 계수 $\sum_k x_k x_{k-1} x_{k-2} \hat{p}_{31}(t-kT)$



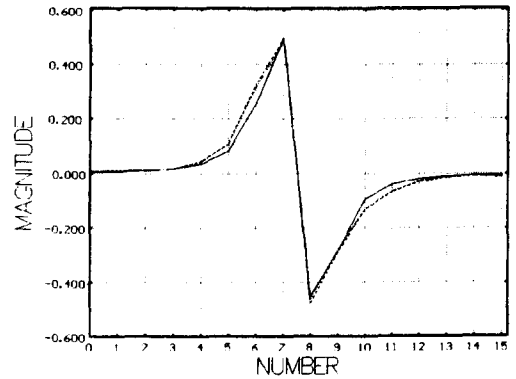
(d) 3차 Volterra 계수 $\sum_k x_k x_{k-1} x_{k-3} \hat{p}_{32}(t-kT)$

그림 4. 비선형 천이 이동을 갖는 디지털 자기 기록 채널의 Volterra 계수: 계산치(실선), 최소 제곱법에 의한 추정치(점선), LMS 적응 알고리즘에 의한 Volterra 모델의 추정치(파선)

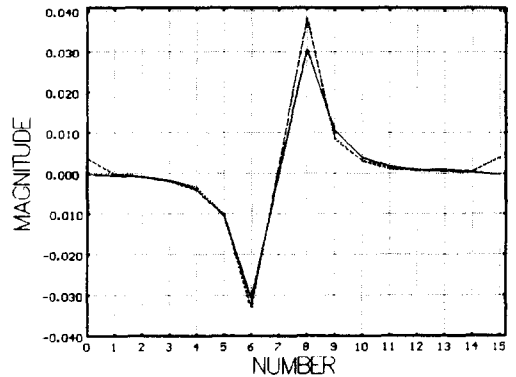
Fig. 4. Volterra coefficients of a digital magnetic recording channel with non-linear transition shifts: analytic value(solid line), estimated value by the least square method(dotted line), estimated value of Volterra model by the LMS adaptive algorithm(broken line)

그림 4에 식(3)-(6)에 의한 계산 결과(실선)와 비선형 천이 이동 모델을 식(10)의 최소 제곱법을 사용하여 추정한 Volterra 계수(점선), 그리고 Volterra 모델을 LMS 적응 알고리즘에 의해 추정한 Volterra 계수(파선)가 나타나 있다. 계산치(실선)와 추정치(점선, 파선)가 약간의 오차를 제외하고 대부분의 영역에서

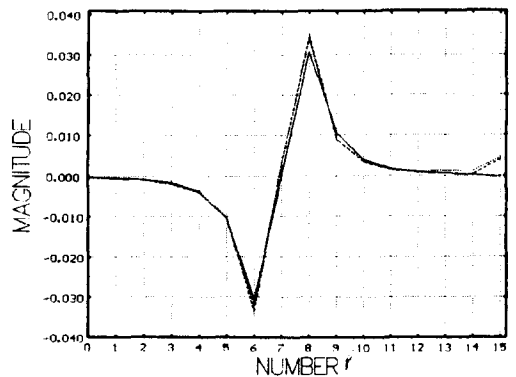
거의 동일함을 알 수 있다. 특히 비선형 천이 이동 모델을 사용하여 발생한 데이터로부터 추정한 Volterra 계수(점선)와 Volterra 모델을 사용하여 추정한 Volterra 계수(파선)가 거의 동일하여 그림으로는 구별하기 힘든 부분이 많음을 알 수 있다. 이는 비선형 천이 이동을 갖는 비선형 채널이 Volterra 급수 또는 FSM에 의해 비교적 잘 모델링됨을 확인하여 준다.



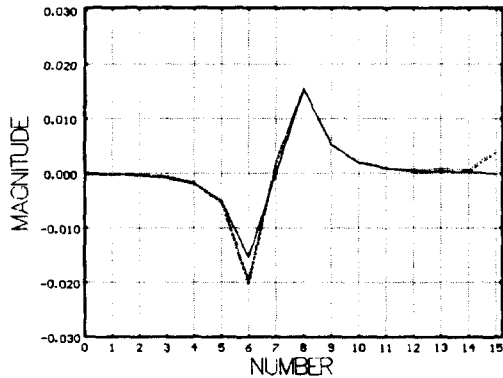
(a) 1차 Volterra 계수 $\sum_k x_k \hat{p}_1(t-kT)$



(b) 2차 Volterra 계수 $\sum_k x_k x_{k-1} \hat{p}_2(t-kT)$



(c) 3차 Volterra 계수 $\sum_k x_k x_{k-1} x_{k-2} \hat{p}_{31}(t-kT)$



(d) 3차 Volterra 계수 $\sum_k x_k x_{k-1} x_{k-3} p_{32}(t-kT)$

그림 5. 비선형 천이 이동을 갖는 자기 기록 채널의 Volterra 계수: 계산치(실선), 최소 제곱법에 의한 추정치(점선), i.i.d. 입력 신호 방식에 의한 추정치(파선)

Fig. 5. Volterra coefficients of a digital magnetic recording channel with nonlinear transition shifts: analytic value (solid line), estimated value by the least square method(dotted line), estimated value by the i.i.d. input method(broken line)

그림 5에서는 이 논문에서 제안된 방법으로 추정된 Volterra 계수(파선)와 기존의 최소 제곱법을 사용하여 추정한 Volterra 계수(점선)를 비교하였다. 기존의 최소 제곱법을 사용할 경우 식(10)의 64×64 의 역 행렬을 계산해야 하는 반면, 제안된 i.i.d. 방식에서는 이러한 연산이 필요하지 않으며 식(18)-(21)에 의해 매우 간단하게 Volterra 계수를 구할 수 있다. 그림 5로부터 제안된 방식(파선)이 이러한 계산량의 이득에도 불구하고 기존의 방식(점선) 또는 계산치에 의한 결과(실선)와 거의 동일함을 알 수 있다. 제안된 방식을 사용할 경우에 필요한 데이터량을 조사하기 위하여 그림 6에 데이터수를 변화시키며 각 방식의 출력 MSE를 나타내었다. 채널의 입력 신호로는 확률 신호와 PRBS를 사용하여 비교하였는데 일반적으로 PRBS 신호를 사용할 경우 수렴이 빨라짐을 알 수 있다. 주어진 채널의 비선형 왜곡 정도와 메모리 길이에 따라 요구되는 데이터량이 변하지만 제안된 i.i.d. 방식을 사용할 경우 데이터의 갯수가 약 7,000에서 수렴함을 확인할 수 있다. 그림 7에서는 i.i.d. 방식으로 구한 Volterra 계수를 사용한 경우의 출력 신호와 선형 모델을 사용한

경우의 출력 신호를 채널 출력과 비교하여 보여준다. 아래 그림에 나타나 있는 오차 신호로부터 Volterra 모델의 출력이 선형 모델에 비해 적은 오차로서 보다 정확히 비선형 천이 이동 채널을 모델링함을 알 수 있다.

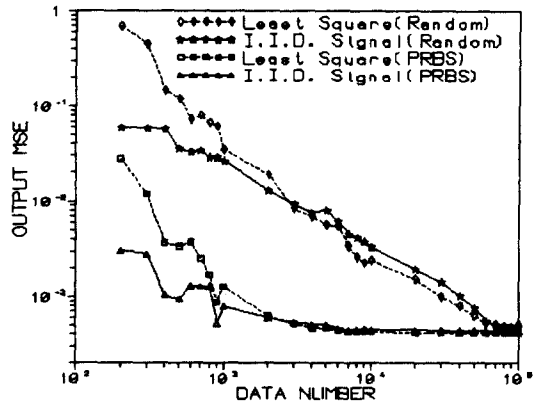


그림 6. 데이터 수에 따른 MSE 비교
Fig. 6. Data number vs. MSE.

식(3)-(6)을 이용하면 제안된 i.i.d. 방식에 의해 구한 Volterra 계수로부터 비선형 천이 이동 매개 변수를 간단하게 계산할 수 있다. 이때의 각각의 매개 변수를 계산하여 비선형 천이 이동 채널의 천이 이동 매개 변수와 비선형 메아리 추출 기법에 의해 구한 매개 변수를 비교해서 표 1에 나타내었다.

표 1. i.i.d. 방식과 메아리 추출 기법에 의해 추정된 천이 이동 매개 변수의 비교

Table 1. A comparison of transition shift parameters estimated by the i.i.d. method and echo extraction method.

	ϵ_0	ϵ_1	ϵ_2
모델	0.1250	0.1875	0.0625
i.i.d. 방식	0.1335	0.1996	0.0631
메아리 추출 기법	0.1357	0.2163	0.082

이 표로부터 i.i.d. 방식을 사용하여 구한 추정치가 주어진 천이 이동 매개 변수를 비교적 잘 추정함을 알 수 있다. 비선형 메아리 추출 기법에 의해 구한 매개 변수의 값도 주어진 값을 잘 추정하지만 별도의 계산

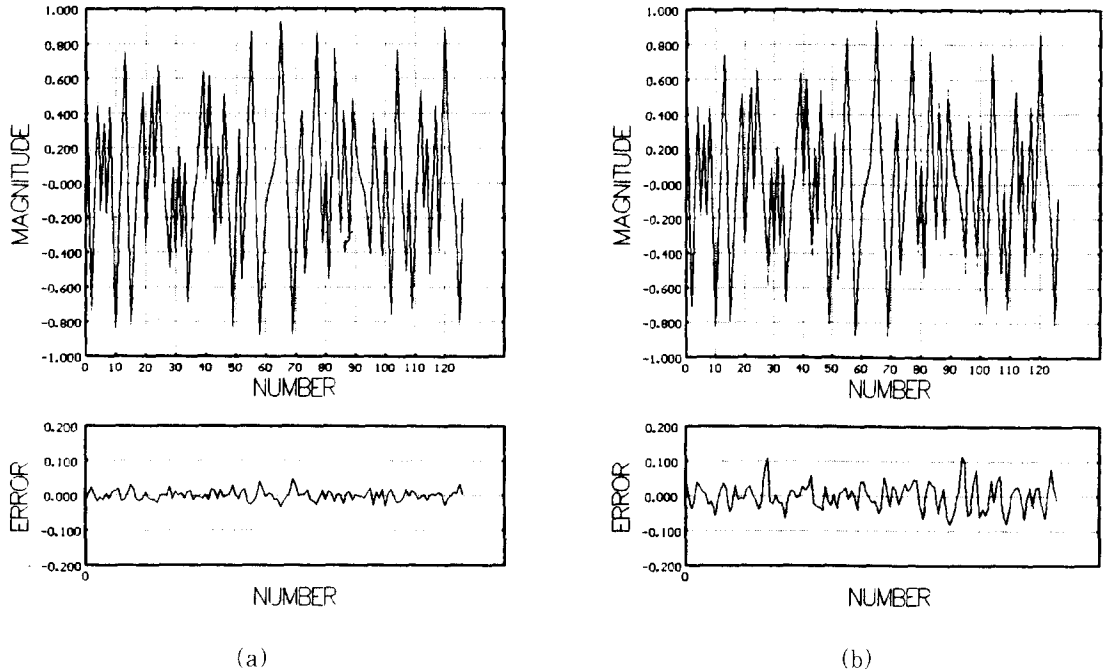


그림 7. 비선형 천이 이동을 갖는 디지털 자기 기록 채널의 출력값 비교: (a) i.i.d. 방식으로 구한 Volterra 계수를 사용할 경우의 출력과 오차 신호, (b) 선형 모델 경우의 출력과 오차 신호

Fig. 7. Comparison of output signals for a digital magnetic recording channel with nonlinear transition shifts: (a) output and error signal for the case where Volterra coefficients obtained by the i.i.d. method are used, (b) output and error signal for the linear model case.

과정이 필요하므로 계산과정이 제안된 방법에 비해 복잡하다. 따라서 비선형 천이 이동을 갖는 자기 기록 채널의 천이 이동 매개 변수를 추정하고자 할 경우, 제안된 i.i.d. 방식에서는 몇 개의 Volterra 계수를 독립적으로 추정 가능하므로 비교적 간단한 방법으로 추정된 계수로부터 천이 이동 매개 변수를 계산할 수 있다.

V. 결 론

이 논문에서는 디지털 자기 기록 시스템에서 발생하는 비선형 왜곡을 추정하기 위한 비선형 채널 추정 기법을 제안하였다. 자기 기록 채널에서 발생하는 비선형 천이 이동 왜곡은 Volterra 급수로 표현할 수 있으며 각각의 Volterra 계수를 독립적으로 구하기 위해 i.i.d. 입력 신호의 통계적 특성을 이용하였다. 기존의 최소 제곱법이 제안된 i.i.d. 방법에 비해 적은 데이터 양으로 Volterra 계수를 구할 수 있지만 이를 위해서는 역 행렬을 계산해야 하며 특정 차수와 메모리의

Volterra 계수를 독립적으로 구할 수 없는 단점이 있다. 반면에 제안된 방법에서는 추정하고자 하는 특정 차수와 메모리의 Volterra 계수를 다른 차수와 메모리의 계수와 관계없이 독립적으로 구할 수 있으며 행렬 연산이 필요 없다. 즉, 특정 차수와 지연의 입력 신호와 해당 출력 신호를 이용하여 간단하게 원하는 계수를 구할 수 있으며 그 계수로부터 비선형 천이 이동 매개 변수를 쉽게 구할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 비선형 왜곡이 두드러지는 디지털 고밀도 자기 기록 채널에서 고차의 Volterra 계수를 구하고 비선형 왜곡을 발생시키는 비선형 천이 이동 매개 변수를 추정하는데 적합한 방법이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] P. Ziperovich, "Performance Degradation of PRML Channels Due to Nonlinear Distortions," *IEEE Trans. on*

- Magn.*, Vol. 27, No. 6, pp. 4825~4827, Nov. 1991.
- [2] 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.
- [3] Y. Lin and R. Wood, "An Estimation Technique for Accurately Modeling the Magnetic Recording Channel Including Nonlinearities," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 25, No. 5, pp. 4084~4086, Sep. 1989.
- [4] R. Hermann, "Volterra Modeling of Digital Saturation Recording Channels," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 26, No. 5, pp. 2125~2127, Sep. 1990.
- [5] K. Fisher, J. Cioffi, and H. Thapar, "Modeling Thin-Film Storage Channels," *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 25, No. 5, pp. 4081~4083, Sep. 1989.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] C. Coleman, D. Lindholm, D. Peterson, and R. Wood, "High Data Rate Magnetic Recording in a Single Channel," *J. of IERE*, Vol. 55, No. 6 pp. 229~236, June 1985.
- [10] N. Sands, *Nonlinear Intersymbol Interference in Digital Magnetic Recording*, Ph. D. Thesis, Stanford Univ., 1993.
- [11] Y. S. Cho and E. J. Powers, "Quadratic System Identification Using Higher-Order Spectra of I.I.D. Signals," *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 42, No. 5, pp. 1268~1271, May 1994.
- [12] C. L. Nikias and A. P. Petropulu, *Higher-Order Spectral Analysis*, Englewood Cliffs, N. J. : Prentice-Hall, 1993.

— 저 자 소 개 —



全元奇(正會員)

1994년 2월 중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1996년 2월 중앙대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1996년 3월 ~ 현재 중앙대학교 전자공학과 대학원 박사과정. 주관심 분야는 디지털 통

신 및 신호처리, 디지털 recording



趙鏞洙(正會員)

1984년 2월 중앙대학교 전자공학과 졸업(공학사). 1987년 8월 연세대학교 전자공학과 대학원 졸업(공학석사). 1991년 5월 The University of Texas at Austin, Department of Elec-

trical and Computer Engineering(Ph. D). 1992년 3월 ~ 현재 중앙대학교 전자공학과 조교수. 주관심 분야는 디지털 recording, 비선형 필터, 적응 신호 처리, 고차 스펙트럼