

# 고밀도 수직자기기록을 위한 저복잡도 잡음 예측 최대 유사도 검출 방법

준회원 김성환\*, 이주현\*, 정회원 이재진\*

## Low Complexity Noise Predictive Maximum Likelihood Detection Method for High Density Perpendicular Magnetic Recording

Seonghwan Kim\*, Joohyun Lee\* Associate Members, Jaejin Lee\* Regular Members

### 요 약

잡음 예측 최대 유사도(noise predictive maximum likelihood, NPML) 검출기는 잡음 예측/백색화 과정을 비터비 검출기의 가지 메트릭 계산 과정에 삽입하여 데이터 검출의 신뢰성을 높이게 된다. 따라서 기존의 PRML 검출기에 잡음 예측기를 포함시킴으로써 그것의 실제 성능이 향상되고 복잡도가 줄어드는 이점이 있다. 본 논문에서는 선형 채널과 비선형 채널 하에서 랜덤 시퀀스와 런-길이 제한 (1,7) 시퀀스를 적용하여, 고밀도 수직 자기 기록 ( $1.0 \leq K_b \leq 3.0$ )에서 잡음 예측 PR-등화 신호에 의한 NP(1221)ML 검출 시스템이 보다 높은 차수의 PR(12321)ML 시스템보다 복잡도가 낮으면서 우월한 성능을 나타냄을 모의 실험을 통해 분석, 검증하였다.

### ABSTRACT

Noise predictive maximum likelihood(NPML) detector embeds noise prediction/whitening process in branch metric calculation of Viterbi detector and improves the reliability of branch metric computation. Therefore, PRML detector with a noise predictor achieves some performance improvement and has an advantage of low complexity. This paper shows that NP(1221)ML system through noise predictive PR-equalized signal has less complexity and better performance than high order PR(12321)ML system in high density perpendicular magnetic recording. The simulation results are evaluated using (1) random sequence and (2) run length limited (1,7) sequence, and they are applied to linear channel and nonlinear channel with normalized linear density  $1.0 \leq K_b \leq 3.0$ .

### I. 서론

부분 응답(partial response, PR) 신호와 결합한 최대-유사도 시퀀스 검출(maximum likelihood sequence detection, MLSD) 기법은 고밀도 수평 자기 기록을 위한 신호처리 방법으로 가장 널리 연구되고 있다. 이러한 수평 자기 기록 시스템에 사용되는 PRML 기술은 기록밀도( $D \geq 2$ )가 높아짐에 따라 PR-등화된 신호의 잠재적인 잡음 확장(noise enhancement)이 발생하게 되고<sup>[1]</sup>, 이로인해 PRML 시스템의 성능에 상당한 영향을 미친다. 고밀도 기

록에 적합하게 설계된 EPRML(extended PRML)에서는 어느 정도 이 문제를 감소시킬 수 있으나 이런 검출기들의 목표 다항식(target polynomial)은 채널 변화에 적응할 수 없다는 점에서 고정된 구조를 가지게 되어 성능 향상의 한계를 지니면서 높은 복잡도를 가지게 된다. 이러한 문제점을 극복하기 위한 방법으로, 잡음 예측(noise predictive) PR-등화에 기초한 MLSD 기법, 즉 잡음 예측 최대 유사도(noise predictive maximum likelihood, NPML) 검출 방법이 연구되고 있다. 이를 통해 수평 자기 기록 시스템에 대해 성능과 기록 밀도 측면에서

\* 동국대학교 전자공학과  
논문번호 : 020091-0226, 접수일자 : 2002년 6월 26일

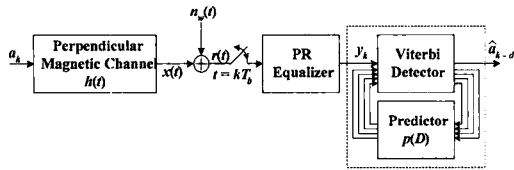


그림 1. NPML 시스템의 전체 블록 다이어그램

PRML과 EPRML 보다 매우 실질적인 성능 향상을 이룩하였다<sup>[2]</sup>. 그러나 수평 자기 기록 시스템은 기록 매질의 물성상 초자성 효과로 인해 NPML 검출기를 사용하더라도 기록 용량 향상의 한계가 존재하게 된다.

따라서, 본 논문에서는 수직 기록 매체(perpendicular recording medium)를 이용하여 수평 자기 기록 시스템보다 고밀도 기록 용량을 갖는 PRML 시스템에 잡음 예측 과정을 적용하여 성능을 분석 평가하였다. 수직 자기 기록을 위한 NPML 검출기는 잡음 예측/백색화(noise prediction/whitening) 과정을 비터비 검출기의 가지 메트릭(branch metric) 계산에 삽입하여 구성하게 된다. NPML 검출기를 구현함에 있어 전체적으로는 새로운 채널을 구현하거나 개발할 필요 없이 기존의 PRML 시스템을 그대로 적용함으로써 비용이나 복잡도 문제에 있어서 상당한 이점을 가지게 될과 동시에 보다 개선된 성능 향상이 기대된다<sup>[2]</sup>. 본 논문에서는, 목표 다항식을 갖는 NPML 시스템의 기록 코드로는 랜덤 시퀀스와 코드율이 2/3인 (1,7) 시퀀스가 각각 이용되었다. 또한, 채널 모델로는 선형 채널 모델인 추가적인 백색 가우시안 잡음(additive white Gaussian noise, AWGN) 채널과 이러한 백색 가우시안 잡음에 천이 지터(transition jitter) 및 DC-offset 갖는 비선형 채널 모델로 각각 나누어 모의 실험을 하였다. 이와 같은 실험 환경 하에서 수직 자기 채널과 부분 응답 목표 다항식 사이의 주파수 특성, 등화기의 학습 곡선, 잡음 백색화 정도 등의 영향을 분석하였으며, 비트 에러율(bit error rate, BER) 성능은 컴퓨터 모의 실험에 의해 평가되었다. 또한 각 목표 다항식에 대해 NPML 검출을 수행함에 있어 선형 밀도의 변화에 따른 SNR 향상과 목표 다항식의 차수와 시스템 복잡도의 상관관계를 연구하였다.

## II. 채널 모델

### 1. 선형 채널

일반적으로, 수직 자기 기록 채널의 고립 재생

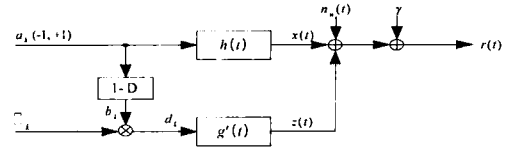


그림 2. 수직 자기 기록을 위한 비선형 채널 블록 다이어그램

파형은 식 (1)과 같다<sup>[1]</sup>.

$$g(t) = A \tanh \left( \frac{2t}{0.579 \pi \cdot T_{50}} \right) \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 재생 파형  $g(t)$ 의 진폭을 나타내며  $T_{50}$ 은 고립 재생 신호 진폭의 절반이 되는 지점에서 펄스의 폭을 나타낸다. 수직 자기 기록 채널에서 정규화 선형 밀도는  $K_b = T_{50}/T_b$ 로 정의한다. 또한 수직 자기 채널의 임펄스 응답(impulse response)  $h(t)$ 는 식 (2)와 같다.

$$h(t) = g(t) - g(t - T_b) \quad (2)$$

따라서, 데이터 입력 시퀀스  $a_k$ 는 수직 자기 채널의 임펄스 응답  $h(t)$ 를 통과하여 잡음이 추가된 재생 신호  $r(t)$ 를 재생하는 형태로 모델링할 수 있고, 식 (3)과 같다.

$$r(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - kT_b) + n_w(t). \quad (3)$$

여기서  $n_w(t)$ 는 평균이 0인 백색 가우시안 잡음(WGN)으로 가정하였다. 이때, 재생 지점에서의 신호대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)는 식(4)와 같이 나타내었다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{E[x^2(t)]}{\sigma_w^2} \quad (4)$$

여기서,  $x(t)$ 와  $\sigma_w^2$ 는 각각 채널  $h(t)$ 를 통과한 출력값과 WGN의 잡음 전력을 나타낸다.

### 2. 비선형 채널

그림 2는 수직 자기 기록을 위한 비선형 채널 모델로는 기존의 선형 채널에 천이지터와 DC-offset이 추가된 형태로 모델링 된다. 그림 2에서 보이는 바와 같이  $b_k, \Delta_b, n_w(t)$ 는 각각 천이 시퀀스, 천이 이동, AWGN을 나타낸다. DC-offset  $\gamma$ 의 양은 신호 전력의 퍼센트율로 나타낸다. 따라서 비선형 채널을 통과한 재생 신호  $r(t)$ 는 식 (5)와 같다.

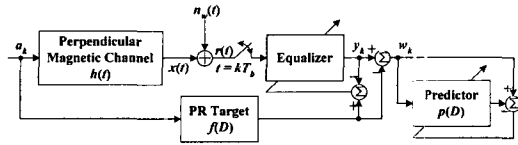


그림 3. NPML 등화기의 학습과정 블록 다이어그램

$$\begin{aligned}
 r(t) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - kT_s) \\
 &+ \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k g'(t - kT_s) + n_w(t) + \gamma \\
 &= x(t) + z(t) + n_w(t) + \gamma \quad (5)
 \end{aligned}$$

천이 지터로 모델화 되는 천이 이동은  $a_k$ 와  $b_k$ 가 독립인 가우시안 분포를 갖는 불규칙 변수로 가정하였다. 따라서 재생 지점에서의 SNR은 식 (6)과 같다.

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{E[x^2(t)]}{\sigma_w^2 + \sigma_z^2 + \sigma_o^2} \quad (6)$$

여기서  $\sigma_z^2 = 4\sigma_{\Delta}^2 |g'(t)|^2$ 이고  $\sigma_w^2$ ,  $\sigma_{\Delta}^2$ ,  $\sigma_o^2$ 은 각각 AWGN, 천이 이동과 DC-offset에 대한 전력을 나타낸다.

### III. 목표 다항식에 의한 PR-등화된 NPML 검출기

NPML 학습과정에 대한 블록 다이어그램은 그림 3와 같이 나타낼 수 있다. 그림 1에서 재생 신호  $r(t)$ 는 PR-등화기의 입력 시퀀스가 되며 PR 목표 다항식 값에 맞는 신호로 등화되어 PR-등화기의 출력 신호  $\{y_k\}$ 를 만들게 된다. PR-등화기의 전달 함수는 채널 임펄스 응답  $h(t)$ 에 대한 등화기의 출력  $\{y_k\}$ 를 PR 목표 다항식인 식 (7)과 같이 근사화시키는 것이다<sup>[2][4]</sup>.

$$f(D) = (f_0 + f_1 D^1 + \dots + f_{M-1} D^{M-1}) \quad (7)$$

PR 목표 다항식 값에 근사한 등화기의 출력  $\{y_k\}$ 는 PR 신호에 잉여 잡음신호가 더해진 신호가 된다. 예를 들어 PR(121) 시스템을 위한 다항식은  $f(D) = (1 + 2D + D^2)$ 를 사용한다. 즉, 식 (8)과 같다.

$$y_k = a_k + 2a_{k-1} + a_{k-2} + w_k \quad (8)$$

이때,  $w_k$ 는 잉여 잡음을 의미하며, 신호간 잉여 간섭(residual interference)과 유색 잡음(colored noise)이 포함되어 있다. 위 식을 일반화하면 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = \sum_{i=0}^{M-1} a_{k-i} f_i + w_k \quad (9)$$

이러한 잉여 잡음 중에 유색 잡음은 잡음 예측기를 통과시켜 백색화 할 수 있다.

$p(D) = (p_1 D^1 + \dots + p_N D^N)$ 가 잉여 잡음  $w_k$ 에 대해  $N$ 개의 탭을 갖는 잡음 예측기 전달 함수를 나타낸다. 등가적으로 예측 에러 필터의 전달 다항식을  $[1 - p(D)]$ 로 나타낼 수 있고, 예측 에러에 대해 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 e_k &= w_k - \hat{w}_k = w_k - \sum_{i=1}^N w_{k-i} p_i \\
 &= \left( y_k - \sum_{i=0}^{M-1} a_{k-i} f_i \right) \\
 &- \sum_{i=1}^N \left( y_{k-i} - \sum_{j=0}^{M-1} a_{k-i-j} f_{i-j} \right) p_i \quad (10)
 \end{aligned}$$

즉,  $\{e_k\}$ 는 PR-등화된 출력 신호  $\{y_k\}$ 의 백색화 잡음 성분을 나타낸다. 따라서, 예측기를 갖는 PR-등화기를 잡음 예측 PR 등화기(noise predictive PR equalizer)라 한다.

비터비 알고리즘으로 구현되는 시퀀스 결정 시스템이 잡음 예측/백색화 과정에 의해 신뢰성 있는 연산을 하기 위해서는 검출기의 각 상태와 연관된 과거 경로가 기억된 결정값에 의해 결정되어야 한다. 이러한 이유로 NPML 검출기는 예측기가 삽입된 PR 신호를 위한 시퀀스 결정 검출기라 할 수 있다.

상태를  $s_x$ 라 가정하고  $x \in \{1, 2, \dots, 2^{M-1}\}$ 를 상태수라 하면, 식 (9)와 (10)에 의해 NPML 검출기에 대해 현재 상태  $s_x$ 에서 다음 상태  $s_x$ 로 가는 상태 변화에서의 가지 메트릭 계산은 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \text{BM}_k(s_x, s_x) &= \left[ y_k - \sum_{j=1}^M (y_{k-j} - \sum_{i=0}^{M-1} a_{k-i-j} \right. \\
 &\left. (s_x) f_{i-j} \right) p_i - \sum_{i=0}^{M-1} a_{k-i} f_i \Big]^2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

여기서  $a_{k-i-j}(s_x) f_{i-j}$ 는 상태  $s_x$ 와 연관된 경로로부터 가지는 과거 결정값을 나타내고  $a_{k-i} f_i$ 은 상태  $s_x$ 에서 다음 상태  $s_x$ 로 상태 변화가 될 경우를

가정한 결정값이 된다. 따라서, 비터비 알고리즘을 이용하는 NPML 검출기는 잡음 예측 과정을 갖는 가지 메트릭 연산에 의해 명확하게 구현되며, 이를 통해 예측기의 연산은 잔여 잡음  $w_k$ 가 0에 근사한 값을 갖도록 한다. 이러한 과정을 통해 NPML 검출기는 이진 결정 시퀀스  $\{\hat{a}_{k-d}\}$ 를 출력시키게 된다.

#### IV. 실험 방법 및 모의 실험 결과

모의 실험을 위해 사용된 채널 입력 신호는 랜덤 시퀀스와 2/3 (1,7) RLL 시퀀스이다. PR-등화기 및 잡음 예측기에 대해 탭은 각각 10개와  $N$ 개를 사용하였고, MMSE 알고리즘을 적용하였다. PR 목표 다항식으로는 기존의 수직 자기 기록 채널에서 주로 연구되어 왔던 PR(121), PR(1221)과 PR(12321)을 사용하였으며<sup>[1][3]</sup>, 선형 밀도  $K_p$ 는  $1 \leq K_p \leq 3$  범위에서 실험하였다. 또한, 실험에서 선형 채널 모델을 위해 AWGN을 사용하였고, 비선형 채널 모델을 위해 DC-offset, AWGN, 천이 지터가 첨가된 채널을 모델로 사용하였다. 비선형 채널에서 DC-offset의 잡음 전력은 10%로 고정하였고, 전체 잡음에서 DC-offset 잡음을 제외한 AWGN과 천이 지터의 잡음 전력비는  $\sigma_w^2 : \sigma_j^2 = 85\% : 15\%$ 로 하였다. 그림 4는  $K_p=2.5$

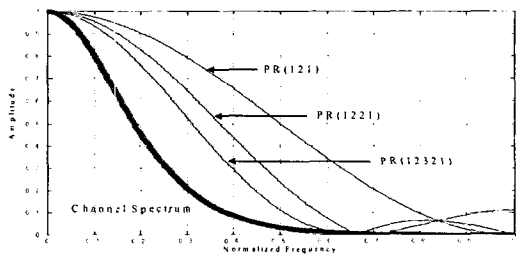


그림 4.  $K_p=2.5$ 에서 채널과 PR 목표 값 사이의 주파수 스펙트럼 특성 비교

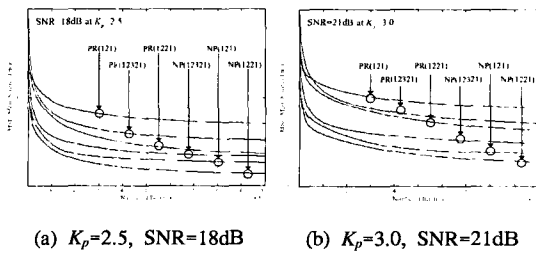


그림 5. PRML과 NPML의 MSE

에서 잡음 예측/백색화 과정을 수행하지 않는 기존의 PR 목표 다항식의 주파수 특성과 실제 채널 전달 함수의 특성을 비교한 것으로 PR(12321)의 주파수 특성이 채널 전달 함수 특성과 가장 근사함을 보이고 있다. 이는 잡음 예측기를 사용하지 않을 경우, 고밀도 기록에서 고차인 PR 다항식이 필요함을 의미한다. 그림 5은  $K_p=2.5$ 와  $K_p=3.0$ 에서 일반적인 PR-등화기와 잡음 예측을 갖는 PR-등화기에 대해 학습 훈련 모드에서의 평균 제곱 에러(mean squared error, MSE)를 비교한 그림으로 잡음 예측을 갖는 PR-등화기의 MSE가 일반적인 PR-등화기에 비해 전체적으로 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

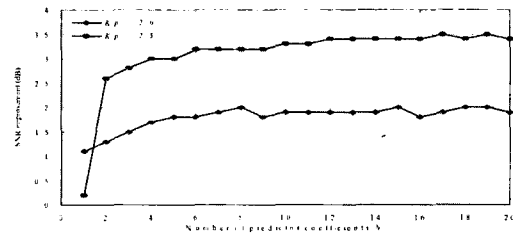


그림 6. 잉여잡음 백색화에 의한 SNR 향상

그림 6에서는 잡음 예측기 계수  $N$ 을 조정함에 따른 성능 차이와 밀도가 높아질수록 잡음 예측기가 PRML 시스템에 미치는 영향이 어느 정도인지를 나타내고 있다. 이것은 두 선형밀도  $K_p=2.0$ 과  $K_p=2.5$ 에서 실험을 하였다. 그림 6에서와 같이 SNR이 잡음 예측기 탭의 수가  $N>4$ 에서는 성능 향상의 정도가 적으며 추가적인 복잡도를 고려할 때 실제 시스템 구현에서는 고려 대상이 되지 못한다. 따라서, 이후의 모의 실험에서는 잡음 예측기 탭의 수  $N=4$ 로 고정시켜 수직 자기 기록 채널에서 NPML 및 기존의 PRML 검출기의 BER 성능을 보였다. 그림 7은 선형 채널에서 랜덤 시퀀스와 2/3 (1,7) RLL 시퀀스를 이용할 때의 성능을 각각 나타낸다. 그림 7(a)에서 보는 바와 같이  $K_p=2.5$ ,  $BER=10^{-5}$ 인 경우에서 PR(12321)ML은 NP(121)ML보다 SNR이 약 2.5dB정도 좋지만 NP(1221)ML보다는 1dB 이상 성능이 좋지 않음을 볼 수 있으며, NP(1221)ML의 차수는 3차인데 반해 PR(12321)ML은 4차이므로, 잡음 예측기의 탭의 수를  $N=4$ 로 제한한 이상 NP(1221)ML의 복잡도가 PR(12321)ML보다 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 반면 NP(1221)ML과 NP(12321)ML의 SNR 차이는 약 0.18dB정도로

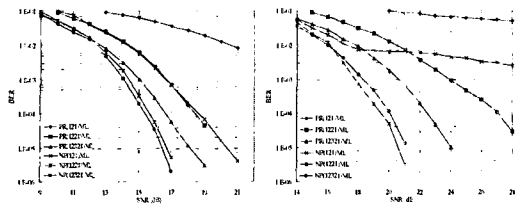


그림 (a)  $K_p=2.5$  일 때 랜덤 시퀀스의 SNR

그림 (b)  $K_p=3.0$  일 때 랜덤 시퀀스의 SNR

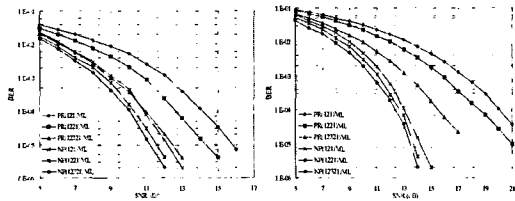


그림 (c)  $K_p=2.5$  일 때 (1,7) 시퀀스의 SNR

그림 (d)  $K_p=3.0$  일 때 (1,7) 시퀀스의 SNR

그림 7. 선형 수직 자기 기록 시스템에서 선형 밀도에 따른 BER 성능

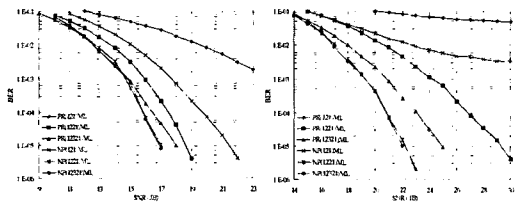


그림 (a)  $K_p=2.5$  일 때 랜덤 시퀀스의 SNR

그림 (b)  $K_p=3.0$  일 때 랜덤 시퀀스의 SNR

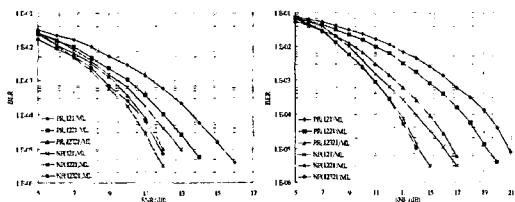


그림 (c)  $K_p=2.5$  일 때 (1,7) 시퀀스의 SNR

그림 (d)  $K_p=3.0$  일 때 (1,7) 시퀀스의 SNR

그림 8. 비선형 수직 자기 기록 시스템에서 선형 밀도에 따른 BER 성능

NP(12321)ML이 우수하지만 복잡도를 고려하였을 때 간과할 수 있을 정도의 이득을 보이고 있다. 그림 7(b)의 경우,  $K_p=3.0$ ,  $BER=10^{-5}$ 에서 NP(1221)ML은 PR(12321)ML과 비교하여 PR 목표 다항식의 차수가 같은 경우에서도 3dB 이상의 이득을 보이고 있다. 따라서 고밀도에서는 고차의 PR(12321)

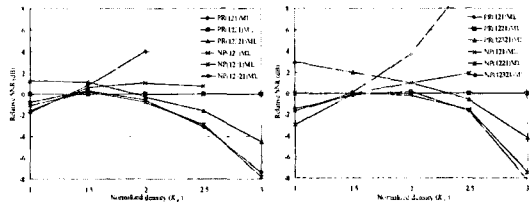


그림 (a) 선형 수직 자기 기록 시스템

그림 (b) 비선형 수직 자기 기록 시스템

그림 9.  $BER=10^{-5}$ 에서 상대적 SNR

목표 다항식을 필요로 하게 되는데, 잡음 예측을 적용하였을 경우 NP(1221)ML이 다른 것들에 비해 SNR 성능이 월등히 좋으면서도 더 낮은 복잡도를 가짐을 알 수 있다. 그림 7(c), (d)의 경우는 (1,7) RLL 시퀀스를 사용하였을 때의 성능을 나타내는데 마찬가지로 NP(1221)ML이 PR(12321)ML 보다  $K_p=2.5$ ,  $BER=10^{-5}$ 에서 약 1dB의 이득이 있으며 NP(12321)ML 보다는 약 0.5dB 이하의 성능 차이를 보인다.  $K_p=3.0$ 에서는 NP(1221)ML이 PR(12321)ML 보다 2.5dB 이상의 성능이득을 나타내며, NP(12321)ML 보다는 약 0.25dB 정도의 미묘한 차이를 가진다. 따라서 2/3 (1,7) RLL 시퀀스에서도 NP(1221)ML이 성능과 복잡도를 고려하였을 때 다른 목표 다항식보다 고밀도 기록에 적합함을 나타낸다. 그림 8은 비선형 채널에서 랜덤 시퀀스와 2/3 (1,7) RLL 시퀀스를 이용할 때의 성능을 각각 나타낸다. 선형 채널에서의 마찬가지로 그림 8(a), (b)를 각각 보면  $BER=10^{-5}$ 에서 NP(1221)ML이 PR(12321)ML 보다 약 1dB와 2.5dB의 이득을 가지며 NP(12321)ML과는 성능 차이가 거의 없으면서 낮은 복잡도를 가지게 된다. (1,7) RLL 시퀀스를 사용한 그림 8(c), (d)에서도 랜덤 시퀀스를 사용하는 BER 성능과 비슷한 경향을 보이며 역시 NP(1221)ML이 SNR 이득과 복잡도면에서 우수한 성능을 나타낸다. 그림 7과 그림 8에 의해 PR(12321)ML을 기준으로 한 NP(1221)ML과 NP(12321)ML의 SNR 성능 개선율은 표 1과 같이 나타난다.

그림 9은  $BER=10^{-5}$ 에서 선형 채널과 비선형 채널의 기록 밀도의 변화에 따른 PRML과 NPML의 상대적 SNR 성능을 보이고 있다. 따라서 NP(1221)ML이 다른 목표 다항식을 갖는 시스템에 비해 고밀도에서도 매우 우수한 성능과 낮은 복잡도를 가지는 것을 알 수 있다.

