

M 알고리즘을 이용한 간소화된 PRML

준회원 홍 현 선*, 정회원 이재 진**

Simplified PRML with *M*-algorithms

Hyun-Sun Hong* *Associated Member*, Jae-Jin Lee** *Regular Member*

요 약

본 논문에서는 자기 기록 채널 PRML 시스템의 복잡도 감소를 통한 전반적인 효율 향상을 위해 *M*-알고리즘의 적용을 제안한다. *M*-알고리즘은 상태수의 일부를 생략하여 복호하는 기법으로, PR 타겟이 증가함에 따라 지수적으로 증가하는 시스템의 복잡도를 감소시켜 준다. 본 논문은 채널의 밀도에 따라 우수한 성능을 내는 PRML 채널 모델을 결정하고, *M*-알고리즘의 적용으로 발생하는 성능의 감소와 복잡도의 감소 관계를 적절히 검토하여 최적의 PRML 시스템 모델을 제시하였다.

key Words : storage channel, PRML, *M*-algorithm

ABSTRACT

This paper proposes the *M*-algorithm for overall efficiency rise with complexity decrease in magnetic recording channel PRML system. The *M*-algorithm is decoding method that omits some parts of state numbers. So it can decrease system's complexity that is increased according to channel density. This paper determines PRML channel model that shows good capacity for each channel density, and proposes the most suitable PRML system model with the relation of efficiency and complexity.

I. 서 론

고밀도 기록 시스템에서 사용되는 디지털 검출 방식 중, 부분 응답 등화기(partial response equalizer)와 비터비 검출기(Viterbi detector)를 결합한 PRML(partial response maximum likelihood) 방식은, 이미 알고 있는 신호 간 간섭(intersymbol interference)을 허용하고, 수신단에서 이를 보상함으로써 원래 신호를 복원해 내는 기술이다. 이러한 PRML 시스템에는 PR 타겟에 따라 여러 가지 채널 모델이 존재하는데, 각 채널 밀도에 대해 우수한 성능을 보이는 채널 모델들이 다르며, 채널 모델의 차수가 높아질수록 복잡도가 증가하기도 한다. 본 논문에서는 채널 모델과 채널 밀

도의 변화에 따른 시스템의 전체적인 재구성을 피하고, 복잡도 증가를 극복하기 위해 *M*-알고리즘의 적용을 제안한다.

M 알고리즘은 비터비 복호과정에서 매 단계마다 정해진 개수로 상태수를 감소시킨 후 역 추적(trace back)하는 방식으로, 복호기의 복잡도를 저하시켜 전체적인 시스템의 효율을 높이는 복호 방식이다. 본 논문에서는 *M*-알고리즘을 이용하여 PRML 시스템을 구현하고, 각 채널 모델에 따른 성능의 저하 정도와 복잡도 감소 정도, 적절한 역 추적 길이(trace back length)와 *M*의 선택을 검토하였다. 이를 통해, LSI 등 하드웨어 구현시에 각 PR 타겟의 상태수를 고려하지 않음으로써 얻어지는 구현의 일관성, 메모리의 절약, 복잡도와 계산량의 저하를 가져올 수 있을 것으로 기대된다.

* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실(honggun2@hanmail.net), ** 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실(zlee@dgu.ac.kr)

* 본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음 (KRF-2002-041-D00408)
 논문번호 : 020308-0718, 접수일자 : 2002년 7월 22일

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 자기기록 채널과 PRML 시스템 모델에 대해 간략히 설명하고, III장에서 M-알고리즘의 구현 과정을 예시하였다. IV장에서는 모의 실험결과를 통해 M-알고리즘을 이용한 복잡도 감소를 증명하고, 최적의 PRML 시스템 구현 방법을 모색하였다.

II. 채널과 PRML 시스템 모델

1. 채널모델

그림 1에서 자기 시스템의 등가 채널 모델을 도하였다. 채널 모델은 이중 비트 응답 또는 PR(-1,1)과 로렌치안 펄스의 결합으로 구성되어 있으며, 채널의 재생 신호는 (+1, -1)로 구성된 입력 데이터(a_k)와 샘플된 자기 채널의 응답을 컨벌루션하여 얻을 수 있다.

재생 신호를 표현하는데 이론적인 모델이 되는 로렌치안 펄스의 수식적인 표현은 (1)과 같으며, 재생 신호의 모양은 천이 구간에 존재하는 자화량의 미분 형태이다.

$$g(t) = \frac{1}{\pi} \frac{1}{1 + \left(\frac{2t}{DT}\right)^2} \quad (1)$$

T는 해당 비트의 주기이며, D는 채널 밀도이다. D의 증가는 채널밀도의 증가를 의미한다. 그림 2와 3은 채널 밀도의 증가에 따른 고립 펄스 및 이중 비트 응답곡선을 나타낸다. 그림으로부터 채널 밀도가 증가함에 따라 천이 데이터 간에 ISI가 심해짐을 예측할 수 있으며, 연속적으로 천이가 발생할 경우 재생신호는 인접 심벌에 의해 왜곡되어 진폭이 감소됨을 알 수 있다.

2. PRML 시스템 모델

부분응답(partial response)전송 방식은 제한된 양의 ISI를 허용함으로써 대역폭 효율을 증가시키

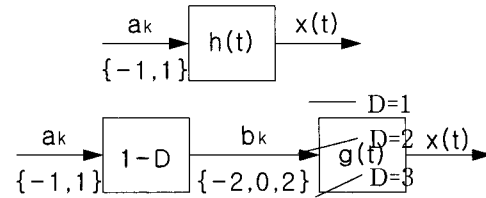


그림 1. 자기 기록 시스템 채널 모델

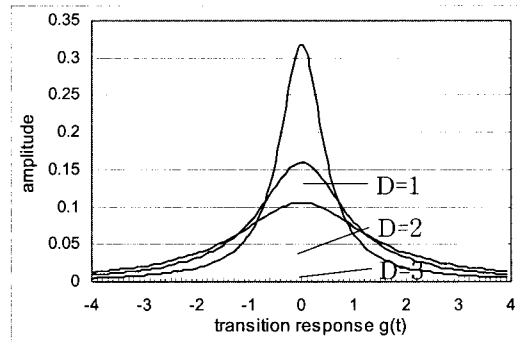


그림 2. D의 증가에 따른 고립 펄스 응답

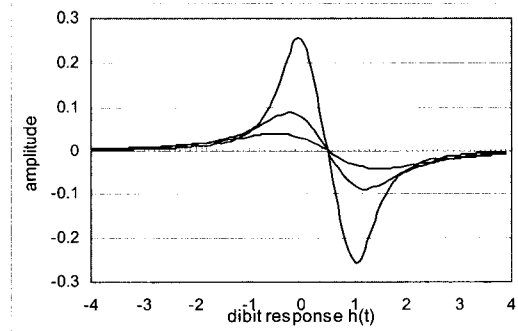


그림 3. D의 증가에 따른 이중 비트 응답

며, ML 검출 기법과 결합되어 기록 시스템에서 신뢰할 수 있는 데이터 검출방법으로 인식되고 있다. 효율적인 등화기의 설계를 위해서는 채널과 유사한 주파수 특성을 보이는 부분응답 다항식의 선택이 필수적이며, 자기기록 시스템에서는 다음과 같은 부분응답 다항식을 사용한다.

$$P(D) = (1 - D)(1 - D)^n \quad (2)$$

식(2)에서 n이 1,2,3...의 정수 형태로 변환에 따라 PR 타겟의 차수가 2,3,4...로 결정된다. PR 채널 모델은 위와 같이 D 변환을 이용한 부분응답 다항식으로 표현이 가능하고, 이에 따라 PR-4,

EPR-4(extended PR-4), EEPR-4(extended EPR-4) 등 여러 가지 채널 모델이 존재한다. 자기 기록 채널에서 PR-4, EPR-4, EEPR-4의 부분 응답 다항식은 각각 $(1-D)(1+D)$, $(1-D)(1+D)^2$, $(1-D)(1+D)^3$ 과 같으며, 기록 밀도에 따른 적절한 PR 채널 모델을 선택함으로써 시스템의 최대 성능을 이끌어 낼 수 있다.

III. M-알고리즘

M-알고리즘은 비터비 복호 트렐리스의 각 단계에서 정해진 M개의 생존 경로만을 유지하는 방법으로, 비터비 알고리즘에 비해 복잡도를 크게 감소시킬 수 있으며 고정된 계산량을 필요로 하게 되므로 복호기의 효율적 구현에 있어 큰 장점이 된다. 그러나 트렐리스 상에서 올바른 경로가 생존 경로에 포함되지 않는 경우 복호 과정에서 연속된 오류를 생성하는 단점을 가진다. 그림 4에 PRML(타겟: PR-4) 시스템에서 M이 2인 경우의 복호 절차를 예시하였다.

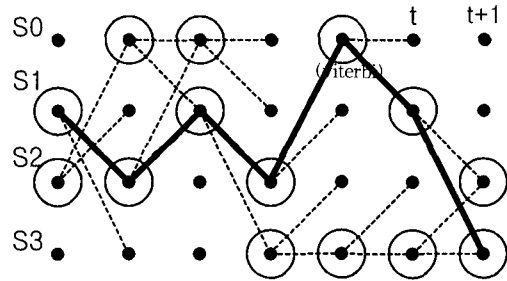


그림 4. M-알고리즘의 복호 트렐리스 예

- 1) 단계 t에서 기본적으로 확장 가능한 경로는 8 개지만, M이 2 이므로 선택된 두 개의 상태 (S1, S3)에서 확장 가능한 경로만을 선택하고 나머지 경로는 제거한다.
- 2) 단계 t+1에서 가지값(Branch Metric) 및 경로 값(Path Metric)은 살아남은 네 개의 경로만을 고려하여 계산한다.
- 3) t+1에서 계산된 경로값을 정렬하여 두 개의 상태(S2, S3)를 선택한다.
- 4) PR-4 채널을 위한 트렐리스도를 참고하면서, 계산된 경로값 중 가장 작은 상태(state)에서 역추적하여, 입력된 비트를 결정한다.

IV. 실험 및 고찰

1. 실험 결과

그림 5, 6, 7, 8은 PRML 시스템에서 타겟을 각각 PR-4, EPR-4, EEPR-4, EEEPR-4로 맞추고 채널 밀도는 각각 2, 2, 3, 4로 하여 실험한 결과이다.

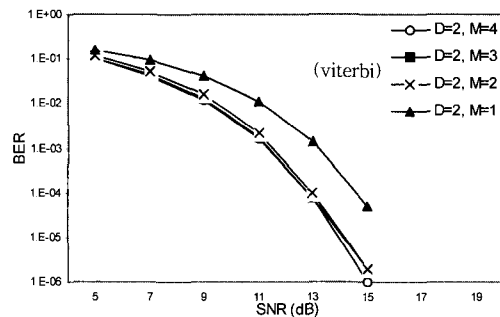


그림 5. PR-4, D=2일 때 M의 변화에 따른 BER

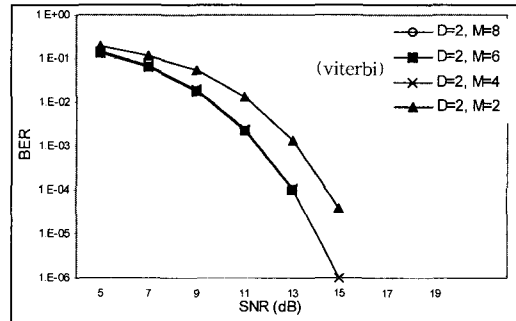


그림 6. EPR-4, D=2일 때 M의 변화에 따른 BER

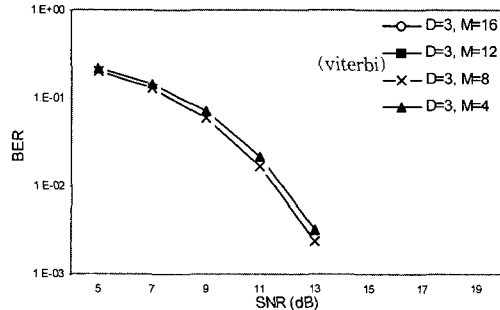


그림 7. EEPR-4, D=3일 때 M의 변화에 따른 BER

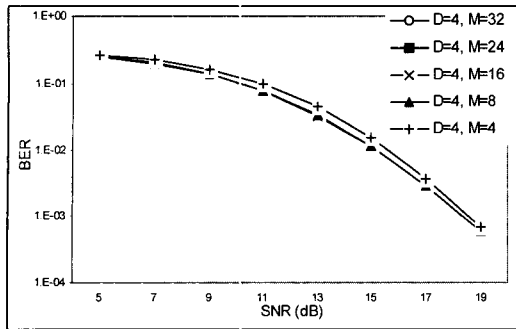


그림 8. EEEPR-4, D=4일 때 M의 변화에 따른 BER

M을 각 타겟 상태수의 3/4, 2/4, 1/4로 줄여서 실험하여 얻은 BER을 보면, M이 원래 상태수의 1/4이 되어도 M이 일정 상태 개수 이상이면(약 2) 원래의 성능과 거의 차이가 없이 그래프가 일치한다. 특히 EEEPR-4의 경우에는 네 개의 BER 곡선이 완전히 일치하는 경향을 볼 수 있으며, M을 1/8로 줄일 때부터 성능저하가 나타난다.

2. 시스템 복잡도

비터비 복호 알고리즘을 상태수 감소 없이 이용하면, PR 타겟의 차수가 증가함에 따라 복잡도가 지수적으로 증가하는 것과는 달리, M-알고리즘을 적용했을 때의 복잡도는 M에 따른 상수로 고정된다[2]. 비터비 알고리즘을 변화 없이 이용하면 트렐리스의 각 단계에서 다음 단계로 진행될 때 $2 \times 2^\alpha$ (α : PR 타겟의 차수) 번의 가지 값 계산이 필요하지만[1], M-알고리즘을 이용한 경우에는 $2 \times M$ 번만의 가지 값 계산이 필요하다. 한 개의 입력 비트를 복호하기 위해 필요로 하는 경로값을 저장하기 위한 메모리 양의 경우, 비터비 알고리즘은 $TBL \times 2^\alpha$ (TBL : trace back length = 역 추적 길이)개의 메모리 단위가 필요한 반면, M-알고리즘은 $TBL \times M$ 개의 메모리 단위가 필요하다.

그림 8은 역 추적 길이를 20으로 하여 시뮬레이션 한 결과인데, M이 32, 24, 16, 8일 때, 네 개의 BER 곡선이 성능차이를 거의 보이지 않지만, 한 단계에서 가지값 계산량을 비교해 보면, 각각 64, 48, 32, 16으로, 성능의 저하없이 계산량을 약 1/4로 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그림 9는 PRML 시스템의 타겟이 EEPF4 일 때 M을 원래 상태 개수의 절반으로 줄이고, 역추적 길이를 두배로 하여

실험한 결과이다. 한 개의 비트를 복호하기 위해 필요한 메모리 단위는 160으로 동일하지만, 성능은 M=8인 경우가 16인 경우보다 우수하게 나타난다.

실험 결과로부터, 복잡도가 매우 높은 EEEPR-4와 같은 시스템을 설계할 때 계산량과 메모리 양을 줄여서 설계해도 M이 매우 큰 쪽으로 줄어들지 않으면, 성능에는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또한, PRML 시스템에서 두개 이상의 타겟에 영향을 받지 않는, 고정된 상태 개수를 가지는 복호기의 설계가 가능할 것으로 기대된다. 예를 들면, 타겟이 EEPF-4, EEEPR-4 인 두 가지 시스템이 모두 필요할 때, M을 두 타겟에 관 없이 8로 고정시켜 하나

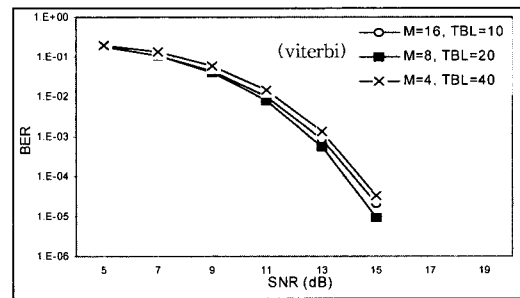


그림 9. EEPF4, D2에서 같은 메모리 양을 사용할 때 성능차이 BER

의 시스템으로 설계하여 비용은 줄이면서도, 두 시스템 모두 최대 성능에는 거의 영향을 받지 않을 것을 예측할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 PRML 시스템의 전체적인 개요와 PR 타겟에 따른 변화에 대해 설명한 후, M-알고리즘의 적용을 검토하였다. M-알고리즘은 PRML 시스템의 복호과정에서 정해진 M으로 상태수를 줄여서 복호하는 기법으로, 설계시에 계산량과 메모리를 현저하게 줄일 수 있으며, 하드웨어 구현의 일관성을 보장할 수 있게 한다.

시스템의 채널이 고밀도가 될수록 이에 적절하게 대응하는 PRML 시스템의 복잡도는 지수적으로 증가하는데, 이를 극복하기 위해 M-알고리즘을 적용함으로써 저밀도의 시스템과 동일하게 복잡도를 유지할 수 있음을 확인하였다. 채널의 기록밀도를 증가시켜 효율은 높이면서, 복호과정의 상태 개수를

낮은 차수의 PR 타겟과 동일하게 유지시키는 방법을 이용하여, LSI 등 하드웨어 구현시 PR 타겟과 무관한 시스템의 구현 가능성을 보이고, 시스템의 전체적인 효율 향상을 예시하였다.

참 고 문 헌

- [1] A.D. Rizos, J.G. Proakis, "Reduced-Complexity Sequence Detection Approaches for PR-shaped, Coded Linear Modulations", *IEEE, GLOBECOM '97*, vol. 1, pp. 342-346, 1997
- [2] 천진영, 최규호, 성원진, "M-알고리즘을 이용한 컨벌루션 부호의 복호 성능 평가", *한국통신 학회논문지*, 3A, pp. 188-195, 2002

홍 현 선(Hyun-Sun Hong)

준회원



2002년 2월 : 동국대학교
전자 공학과 학사
2002년 3월~현재 : 동국대학교
전자공학과 석사과정

<주관심분야> 통신, 정보저장

이 재 진(Jae-Jin Lee)

정회원



1983년 2월 : 연세대학교
전자공학과 학사
1984년 12월 : U. of Michigan,
Dept. of EECS 석사
1994년 12월 : Georgia Tech.
Sch. of ECE 박사

1995년 1월~1995년 12월 : Georgia Tech. 연구원
1995년 1월~1997년 2월 : 현대전자 정보통신
연구소 책임연구원
1997년 3월~현재 : 동국대학교 전자공학과 부교수

<주관심분야> 통신 이론, 기록저장 시스템