

고밀도 광 기록 채널을 위한 터보 코드와 터보 등화기를 연접한 데이터 복호 방법

정회원 이준*, 이재진*

Serially Concatenated Turbo Code/Turbo Equalizer Detection Method for High Density Optical Storage Channels

Jun Lee*, Jaejin Lee* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 고밀도 광 기록 시스템에서 런길이 제한 조건이 없는 채널 비트로 인해 발생하는 심각한 ISI와 비선형 왜곡을 극복하기 위한 방법으로 트렐리스를 바탕으로한 등화기(Trellis-Based Equalizer, TBE)와 터보 코드를 연접한 TE(Turbo Equalization)/ TC(Turbo Code) 검출 방법을 제안한다. 모의 실험은 채널 밀도 S=4.6과 S=7에서 지터의 양이 15% 존재할 때 코드율을 4/5, 8/9, 16/17로 변화시켜가며 행하였다. TE/TC 구조는 비트 에러율 10^{-5} 를 24dB이상에서 만족함을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a serially concatenated turbo code/turbo equalizer scheme for optical storage systems. Without modulation coding, a random data sequence is directly passed through the optical channel. In simulation, the channel includes jitter of 15% and AWGN. The densities of the channel are S=4.6 and S=7.0. The code rates of turbo code are 4/5, 8/9 and 16/17. All code rates, the bit error probability is less than 10^{-5} at 24dB when we add jitter of 15%.

1. 서 론

채널 밀도가 증가함에 따라 디지털 데이터가 광 기록 시스템을 통과할 때 채널에는 극심한 비선형 왜곡이 발생한다. 광 기록 시스템에서 비선형 왜곡의 주된 요소로는 도메인 불륨 현상^[1]이 있다. 도메인 불륨 현상은 마크가 매체에 기록될 때 원하는 영역보다 크게 또는 작게 기록되어지는 현상으로서 매체에 기록된 데이터가 재생될 때 천이 지터를 발생시키는 주된 원인이 된다. 천이 지터는 광 기록 시스템의 대부분을 차지하는 비선형 천이 잡음으로

데이터 복호 능력을 크게 저하시키는 비선형 천이 이동을 발생시킨다.

광 기록 시스템에서는 데이터를 매체에 기록할 때 인접 심벌 간섭, DC의 흔들림, 천이 잡음 등의 비선형 왜곡을 줄이기 위한 방법으로 변조 코드(EFM+)를 사용한다. 그러나 변조 코드는 많은 양의 데이터를 매체에 기록하고자 할 때 부가 비트에 의해 기록 밀도의 한계를 가져올 뿐 만 아니라, 고밀도 채널에서 비선형 왜곡을 줄이는데 한계가 있다. 고밀도 기록을 위해서는 런길이 제한 조건이 없는 $(0, \infty)$ 코드의 사용이 필요하며, 또한 런길이 제한 조건이 없는 채널 비트로 인해 발생하는 심각한 비

* 동국대학교 전자공학과 (leejun@dgu.ac.kr)

논문번호 : 99376-0913, 접수일자 : 1999년 9월 13일

* 이 논문은 한국과학재단의 '98 특정기초 연구과제(98-0101-01-01-3) 연구비에 의해 수행되었음.

선형 왜곡을 극복할 수 있는 우수한 등화기와 검출기가 필요하다.

집적 기술의 빠른 발전으로 시스템 전체의 성능을 향상시키기 위해 기존의 선형 등화기나, 결정 궤환 등화기를 좀더 정교한 등화기로 대체하는 것이 가능하게 되었다. 대체 가능한 정교한 등화기는 터보 코드 또는 컨벌루션 코드와 연계하여 반복 등화를 수행할 수 있는 터보 등화기이다. 터보 등화기는 이동 무선 통신 시스템에서 다중 패스 페이딩에 의한 극심한 인접 심벌 간섭을 제거하기 위해 Douillard 등^[2]에 의해 제안되었다.

터보 코드는 두 개의 복호기에 의해 반복 복호를 수행하여 AWGN 채널에서 Shannon 채널 용량에 가까운 성능을 발휘할 수 있는 이진 입력을 기본으로 한 채널 코드로서 1993년 Berrou 등^[3]에 의해 처음 소개되었다. 최근 자기 기록 시스템에서는 터보 코드의 우수한 반복 복호 능력 때문에 데이터 검출기로 많이 연구되고 있다^{[4][5]}.

Ryan은 PR4 신호로 근사화된 신호를 PRML^[6] 검출기로 복호한 후, 복호한 데이터를 터보 코드에 의한 반복 복호를 수행하므로써 1에 가까운 코드율에서 우수한 성능을 발휘하는 데이터 검출 방법을 제안하였고, Mc Pheters 등은 직렬로 연결한 인쪽 코드 디코더와 바깥 코드 디코더의 반복 복호에 의해 1에 가까운 코드율에서 우수한 성능을 발휘하는 검출 방법을 제안하였다. 인쪽 코드는 precoded PR4 다항식을 생성 다항식으로 가지는 인코더와, 생성 다항식의 입력력 관계를 나타내는 트렐리스를 바탕으로한 APP (A Posteriori Probability)검출기^[3]로 구성되어 있고, 바깥 코드는 높은 코드율을 가지는 컨벌루션 인코더와 APP 검출기로 구성되어 있다.

본 논문은 Ryan과 McPheters와는 달리 PRML 방법을 사용하지 않으면서 고밀도 광 기록 시스템에서 런길이 제한이 없는 채널 비트로 인해 발생하는 심각한 ISI와 비선형 왜곡을 극복하기 위한 방법으로 TBE와 RSC코드의 연계를 통하여 우수한 성능을 발휘하는 TE/TC검출 방법을 제안한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 터보 등화기에 대하여 소개하였고, 3장에서는 TE/TC의 구성 요소에 대하여 설명하였다. 4장에서는 비선형 광 채널과 SNR(Signal-to-Noise)의 정의를 살펴보았다. 5장에서는 변조 코드를 사용한 기존의 검출 방법과 제안한 검출기의 성능을 비교 및 분석하였으며, 6장에서 결론을 내렸다.

II. 터보 등화기

터보 등화 시스템을 구성하기 위한 가장 중요한 요소로는 트렐리스를 바탕으로 등화를 수행하는 TBE가 있다. TBE는 형태의 $G(D)=1+C_1D+C_2D^2+\dots+C_nD^n$ 다항식을 사용하여 인코더를 구성한다. TBE의 생성 다항식에서 확인할 수 있듯이 현 입력 심벌에 이전 심벌들의 간섭이 포함된 출력, 즉 ISI가 포함된 출력을 내보내게 된다. TBE 인코더의 구조는 그림 1과 같다. 여기서 C_n 은 채널의 샘플링된 임펄스를, D 는 지연을 의미한다. TBE의 등화는 의 입력에 대한 ISI가 포함된 출력의 모든 조합을 가진 트렐리스를 이용하여 수신 데이터와 ML (Maximum Likelihood)을 수행함으로써 이루어진다. TBE는 트렐리스를 바탕으로 등화를 하기 때문에 기존의 등화기 즉, 선형 등화기나 결정 궤환 등화기와는 달리 혼련 모드가 필요 없으며, 또한 다른 복호기와의 연계를 통해 반복적인 등화, 즉 터보 등화를 수행함으로써 우수한 성능을 발휘한다. 터보 등화기의 성능 이득은 연계한 다른 복호기로부터 부가 정보를 공급받아 가지 천이 확률(Branch Transition Probability, BMP) 계산을 반복적으로 수행하므로써 얻을 수 있다. 광 기록 시스템은 채널 임펄스가 알려져 있고 채널 임펄스가 정적이기 때문에 이동 통신 시스템에서 사용하는 채널 추정 알고리즘 없이 터보 등화 방법을 적용할 수 있다.

III. 시스템 구성 요소

A. MAP 검출기

MAP 검출기^[3]는 수신 데이터를 바탕으로 수신 데이터가 전송된 데이터일 확률(APP)에 자연 로그를 취한 값이 0보다 크면 1로, 그렇지 않으면 0으로 검출하는 검출기이다. LLR(Log-Likelihood Ratio)을 수식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$\Lambda(d_k) = \ln \frac{p(d_k=1/Observation)}{p(d_k=0/Observation)} \quad (1)$$

여기서 d_k 는 전송 데이터를 나타내고, Observation은 모든 수신 데이터를 의미한다. 시간 k 에서 메모리 상태를 m 이라 하고 $k-1$ 의 메모리 상태를 m' 라 하자. 이 때 m 과 m' 값은 0 과 2^{M-1} 사이의 값을 가진다. 여기서 M 은 인코더의 메모리

개수를 나타낸다. LLR 계산을 위한 자세한 수식 표현은 식 (2)와 같다.

$$L(d_k) = \ln \frac{\sum_{m=1}^{2^m} \sum_{m'=1}^{2^m} r_1(R_k, m', m) a_{k-1}(m') \beta_k(m)}{\sum_{m=1}^{2^m} \sum_{m'=1}^{2^m} r_0(R_k, m', m) a_{k-1}(m') \beta_k(m)} \quad (2)$$

여기서 $R_k = (x_k, y_k)$ 는 시간 k 에서 수신한 데이터를 의미한다. MAP 검출기의 포워드 메트릭 확률(Forward Metric Probability, FMP)은 식 (3)과 같다.

$$a_k(m) = \frac{\sum_{m'=1}^{2^m} \sum_{i=0}^{2^m} r_i(R_k, m', m) a_{k-1}(m')}{\sum_{m=1}^{2^m} \sum_{m'=1}^{2^m} \sum_{i=0}^{2^m} r_i(R_k, m', m) a_{k-1}(m')} \quad (3)$$

FMP를 계산하기 위한 MAP 검출기의 초기화는 다음과 같다.

$$a_0(m) = 1 \quad m = 0$$

$$a_0(m) = 0 \quad \forall m \neq 0$$

MAP 검출기의 백워드 메트릭 확률(Backward Metric Probability, BMP)은 식 (4)와 같다

$$\beta_k(m) = \frac{\sum_{m'=1}^{2^m} \sum_{i=0}^{2^m} r_i(R_k, m', m) \beta_{k-1}(m')}{\sum_{m=1}^{2^m} \sum_{m'=1}^{2^m} \sum_{i=0}^{2^m} r_i(R_k, m', m) a_{k-1}(m')} \quad (4)$$

BMP를 계산하기 위한 MAP 검출기의 초기화는 다음과 같다.

$$\beta_0(m) = 1 \quad m = 0$$

$$\beta_0(m) = 0 \quad \forall m \neq 0$$

MAP 검출기의 가지 천이 확률(Branch Transition Probability, BTP)은 식 (5)와 같다.

$$r_i(R_k, m', m) = a \times b \times c \quad (5)$$

여기서 우변 $a = P(R_k/d_k = i, S_k = m, S_{k-1} = m')$ 는 채널 천이 확률을, $b = P(d_k = i/S_k = m, S_{k-1} = m')$ 인코더가 결정되면 미리 결정되는 확률을, $c = P(S_k = m/S_{k-1} = m')$ 는 상태 천이 확률을 의미한다.

B. 인터리버와 디인터리버

인터리버(π_1, π_2)는 데이터를 혼합하여 인접 데이

터끼리의 연관성을 작게 하거나, 코드 워드의 자유 거리를 증가시켜 성능의 향상을 가져오는 데이터 혼합 방법이다^[3]. 또한 인터리빙된 정보 비트에 대해 패리티 비트를 하나 더 생성함으로써 디코딩시에러 정정 능력을 향상시키는 역할을 한다. 디인터리버는(π_1^{-1}, π_2^{-1}) 인터리빙된 데이터를 원래의 데이터로 돌려놓는 역할을 한다. 인터리버의 종류로는 블록 인터리버(Block Interleaver), 대각 인터리버(Helical Interleaver), 랜덤 인터리버(Random Interleaver) 등이 있다^[3].

C. 평처링과 먹스(또는 디평처링과 디먹스)

평처링^[7]과 먹싱이란 사제 매트릭스를 이용해 인코딩된 데이터를 부분적으로 삭제하여 코드율을 향상시킨후 데이터를 직렬화 하는 방법이다. 디코딩은 삭제된 부분에 0을 삽입하는 디평처링 과정과 데이터를 정보 데이터와 인코딩된 데이터로 분리함으로써 수행된다.

IV. 비선형 광 채널과 신호대 잡음비

A. 비선형 광 채널

매질에 기록된 데이터가 재생될 때 데이터들 사이에는 인접 심벌 간섭이 발생한다. 인접 심벌 간섭은 채널 밀도가 증가함에 따라 비선형적으로 증가한다^[1]. 광 채널의 비선형 인접 심벌 간섭의 주된 발생원인은 데이터를 매질에 기록하는 과정에서 발생하는 도메인 불분현상이다. 도메인 불분현상은 광 기록 시스템 잡음의 대부분을 차지하는 천이 지터를 발생시키며, 천이 지터는 재생된 데이터에 더해지는 요소이다. 그 외에도 레이저 빔의 강도변화에 따라 재생신호의 진폭을 랜덤으로 변하게 하는 레이저 잡음, 디스크 박막 두께 변화의 불균일과 박막 회전시 디스크의 기울어짐에 의해 발생하는 디스크 잡음, 전자 회로의 열잡음 등이 있다^[1]. 광 채널 모델링을 위해 비선형 잡음은 그 대부분을 차지하는 천이 지터로 가정하고, 기타의 잡음은 AWGN로 가정하여 비선형 채널을 모델링 하였다^[1]. 지터와 AWGN 잡음이 더해진 MTF 채널의 재생신호를 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

$$y(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - (k + \Delta_k)T) + n(t) \quad (6)$$

$$= \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - (k + \Delta_k)T) + n(t)$$

여기서 $b_k = a_k - a_{k-1} \in (-2, 0, 2)$, Δ_k 는 천이의 위치를 랜덤하게 변하게 하는 평균이 0이면서 b_k 와 통계적으로 독립인 랜덤 천이 지터를 나타낸다, $g(t)$ 는 천이 응답을 나타내고, T 는 심벌 주기를 나타내며, S 는 정규화된 채널 밀도를 나타낸다.

$h(t) = g(t) - g(t - T)$ 는 심벌 응답을 나타내고, $n(t)$ 는 가우시안 잡음을 나타낸다. $g(t)$ 의 대역폭이 한정되어 있고, $|\Delta_k|$ 가 작다면 식 (6)을 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$y(t) \approx \sum_{k=-\infty}^{\infty} b_k g(t - kT) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k g'(t - kT) + n(t) \approx x(t) + z(t) + n(t) \quad (7)$$

$$g'(t) = \frac{2}{ST\sqrt{\pi}} \exp\left(-\left(\frac{2t}{ST}\right)^2\right)$$

여기서 $d_k \equiv -b_k \Delta_k$ 은 랜덤 잡음을 나타내고, $g'(t) \equiv Tg'(t)$ 는 정규화된 임펄스 응답을 나타내며, $z(t)$ 는 d_k 에 의해 결정되는 천이 지터를 나타낸다. 레이저 빔은 가우시안 분포 모양을 가지기 때문에 Δ_k 를 평균이 0이고 가우시안 분포를 갖는 잡음이라고 가정한다.

B. 신호대 잡음비

기록 채널 모델에서 SNR은 식 (8)과 같이 정의한다^[5].

$$SNR = 10 \times \log\left(\frac{S_{ms}}{N_{ms}}\right) \quad (8)$$

여기서 S_{ms} 는 신호 전력을, N_{ms} 는 잡음 전력을 나타낸다.

V. 모의 실험 결과

모의 실험은 광 기록 시스템의 주된 비선형 요소인 천이 지터와 가우시안 잡음이 존재하는 채널하에서 행해졌다. RSC 코드의 생성 다항식은 구속장이 3인 (7,5)코드를, 인터리버는 랜덤 인터리버를, 반복 등화 및 검출 회수는 3번으로 고정하였다. 또한 사용자 비트의 프레임 사이즈는 624로, TBE의 트래리스를 구성하기 위한 탭은 MTF 채널의 75%를 사용하였다. 그림 4와 6은 채널 밀도 $S=4.6$ 과 $S=7$ 에서 천이 지터의 양이 15%일때 코드율의 변화에 따른 TE/TC의 성능을 나타낸 그림으로 코드율의 변화에 따라 성능 차이가 거의 없음을 확인할

수 있다. 성능 차이가 없는 이유로는 각 코드율에 따른 최적의 펄처링 행렬을 찾지 않고 임의의 행렬을 사용했기 때문이다. 그림 4와 6에서 TE/TC는 10^{-5} 비트 에러를 각각 20dB, 24dB 이후에서 만족함을 확인할 수 있다. 그림 5와 7은 채널 밀도 $S=4.6$ 과 $S=7$ 에서 천이 지터의 양이 15%일때 코드율이 1/2 즉, EFM+ 코드를 사용한 기존의 검출 방법을 모의 실험한 결과이다. 그림 5와 7에서 확인할 수 있듯이 채널 밀도에 관계없이 FDTS/DF가 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다. 그러나 제안한 TE/TC의 모의 실험 결과와 비교할 때 6~7dB 성능 열화가 있음을 확인할 수 있다. 특히 채널 밀도가 큰 경우($S=7$) EFM+ 코드를 사용한 기존의 검출 방법은 10^{-4} 도달하는데 많은 SNR을 필요로 하는 것을 예상할 수 있다. TE/TC의 6~7dB 성능 이득은 코드율이 16/17인 TE/TC와 코드율이 1/2인 FDTS/DF와 비교하여 얻은 성능 이득이다. TE/TC와 FDTS/DF를 동일한 코드율에서 성능을 비교한다면 TE/TC가 더 많은 성능 이득이 있을 것이다.

VI. 결론

광 기록 시스템에 적용한 TE/TC의 구조는 채널 밀도 $S=4.6$ 과 $S=7$ 에서 천이 지터의 양이 15%일 때 반복 등화와 반복 검출을 통해 1에 가까운 코드율에서 아주 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다. 또한 우수한 검출 능력을 바탕으로 TE/TC는 기존의 검출 방법과는 달리 변조 코드를 사용하지 않고 펄처링 행렬을 이용하여 사용자 밀도를 현저하게 늘릴 수 있게 되었다. TE/TC구조의 반복 등화 및 반복 검출 방법은 생성 다항식의 선택, 인터리버 크기, 반복 디코딩의 횟수, 코드율을 높이기 위한 펄처링 행렬의 선택, TBE의 탭 개수, 구현시 복잡성 등의 최적화를 통하여 더 좋은 성능을 나타낼 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. Bergmans, Digital Baseband Transmission and Recording, KAP 1996.
- [2] C. Douillard, M. Jezequel, C. Berrou, A. Picart, P. Didier, and A. Glavieux, Iterative correction of ISI: Turbo equalization, European Transactions onTelecoms, vol. 6, no. 5, pp. 507-511, Sep 1995.

- [3] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimajshima, Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes, Proc. of ICC, pp. 1064-1070, May 1993.
- [4] W. Ryan, "Performance of high rate turbo codes on a PR4 equalizer magnetic recoding channel, Proc. of ICC, pp. 947-951, June 1998.
- [5] L. McPheters and S. McLaughlin, Preceded PRML, serial concatenation, and iterative decoding for digital magnetic recording, IEEE Trans. on Magnetics, vol. 35, no. 5, Sep. 1999.
- [6] J. Moon and L. R. Carly, Performance comparison of detection methods in magnetic recording, IEEE Trans. on Mag. vol. 26, pp. 3155-3172, Nov. 1990.
- [7] J. Hagenauer, Rate compatible punctured convolutional codes (RCPC-codes) and their application, IEEE Trans. on com. vol. 36, pp. 389-400, 1988.

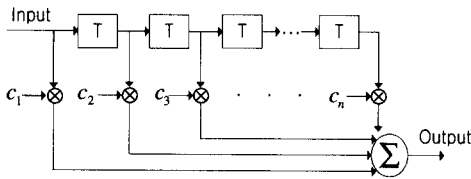


그림 1. TBE의 인코더

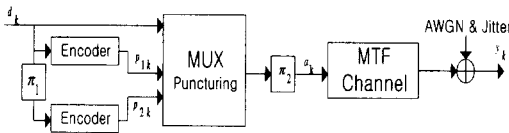


그림 2. TE/TC의 인코더

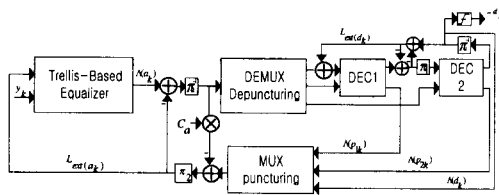


그림 3. TE/TC의 디코더

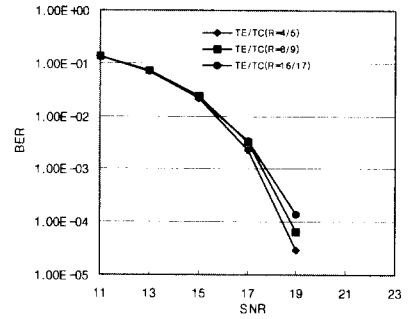


그림 4. S=4.6, Jitter=15%에서 TE/TC의 성능

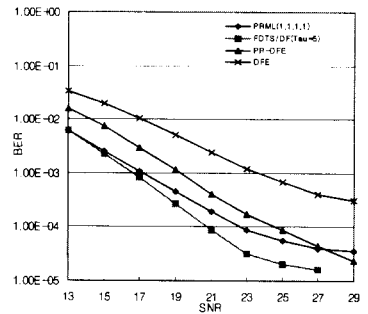


그림 5. S=4.6, Jitter=15%에서 EFM+ Coded 검출기의 성능

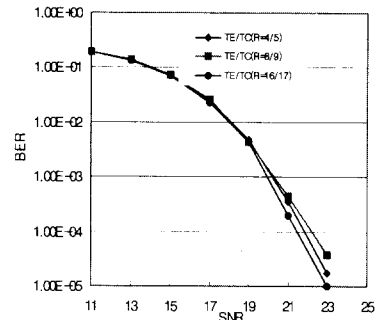


그림 6. S=7, Jitter=15%에서 TE/TC의 성능

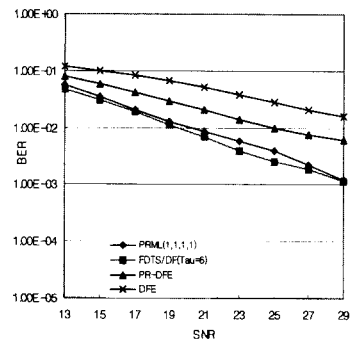



그림 7. S=7, Jitter=15%에서 EFM+ Coded 검출기의 성능

이 준(Jun Lee)

준회원



1998년 2월: 동국대학교 전자공학과 학사 졸업
2000년 2월: 동국대학교 전자공학과 석사 졸업
2000년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정

<주관심 분야> 기록저장시스템 및 채널 코드
(RSPC, Turbo Code)

이 재 진(Jaejin Lee)

정회원

1983년 2월: 연세대학교 전자공학과 졸업
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 정보통신연구소, 책임연구원
1997년 3월~현재: 동국대학교 전자공학과 조교수
<주관심 분야> 통신이론, 비밀통신, 기록저장시스템