

광 기록 저장 장치를 위한 새로운 패리티 보존형 런-길이 제한 코드

준회원 홍 현 선*, 정회원 이재 진**

A New Parity Preserving Run-length Limited Code for Optical Recording System

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

요 약

본 논문에서는 광 기록 저장 시스템을 위한, 천이가 발생하는 최소 및 최대 런-길이 조건이 각각 2와 7이고 RMTR(repeated minimum transition run)을 4로 제한하는 새로운 패리티 보존형 런-길이 제한 (parity preserving run-length limited) 코드를 제안한다. 제안된 코드는 차세대 광 기록 시스템으로 주목받고 있는 (1,7) PP 코드나 현재 저장 시스템에 적용되고 있는 (2,10) 코드에 비해 밀도율과 RMTR, DC 성분 억제, 비트 에러율(BER), 시스템 복잡도 등의 측면에서 더 나은 성능을 보인다. 본 논문은 몇 가지 모의실험을 통해 제안된 코드의 특성을 설명하고, 앞에서 언급된 코드와 비교하여 성능의 우위를 예시하였다.

key Words : optical storage, RLL (2,7) PP, RMTR

ABSTRACT

We propose a new RLL(run length limited) (2,7) PP(parity preserving) code with 4 RMTR(repeated minimum transition run) for optical recording. The proposed code has better characteristics in terms of density ratio, RMTR, DC(direct current) component suppression, BER(bit error rate) and system complexity than (2,10) code that currently applied in storage systems and (1,7) PP code that highly recommended as the next generation optical recording system. Some characteristics of the code are described with several simulations. And the proposed code's superiorities in performance is illustrated as compared with the other codes.

I. 서론

모듈레이션 코드는 기록 저장 시스템을 구성하는 기본적인 구성 요소 중의 하나이다. 본 논문에서 제안한 새로운 코드의 특성을 설명하기 위해, 먼저 모듈레이션 코드의 성능을 결정짓는 몇 가지 측면을 소개한다.

코드화 된 채널 데이터에 포함된 DC(direct current) 성분의 효과적인 조절은, 데이터 전송과 기록에 이용되는 모듈레이션 코드에 대한 매우 중요

한 관심사이다. DC 성분의 억압이 제대로 이루어지지 않으면, 전체 신호 level이 감소되거나 증가된다. DC 성분을 조절하는 한 방법은, 소스 워드(source word)와 그에 대응하는 코드 워드(cord word) 한 쌍이 같은 패리티를 갖도록 PP(parity preserving) 코드 워드를 할당하는 것이다. 즉, 소스 워드가 홀수/짝수의 패리티를 갖는다면, 그와 짝을 이루는 코드 워드도 역시 홀수/짝수의 패리티를 갖도록 모듈레이션 코드를 구성한다.

모듈레이션 코드를 설명하는 또 다른 특징으로 RLL(run length limited) (d,k) 조건을 들 수 있다.

* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실(honggun2@hotmail.com), ** 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실(zlee@dongguk.edu)

논문번호 : 030425-0930, 접수일자 : 2003년 9월 30일

최소의 런 길이 제한(run length limite) d 는 모듈레이션 파형에서 연속하는 천이(transition) 사이의 최소 비트수를 의미하며, ISI(intersymbol interference)를 어느정도 방지하는 작용을 한다. 최대 런 길이 k 는 1 사이의 0의 개수가 k 를 넘지 않도록 제한하며, k 의 제한은 모듈레이션 파형의 모든 $k+1$ 비트 주기 내에서 적어도 한 번의 천이가 일어나도록 보장한다. 즉, 기록 시스템은 $k+1$ 비트 주기 안에 타이밍 신호를 회복할 수 있게된다. 따라서, 충분한 시간 정보를 얻기 위해서는 k 의 길이가 최소가 되도록 모듈레이션 코드를 설계하여야 한다.

한편 데이터를 기록 시스템으로부터 검출할 때 발생하는 에러의 대부분은, 코드화 된 데이터열 중에서 최소 천이 길이(minimum transition run)가 연속해서 나타날 때 발생한다. 최소 천이 길이의 신호는 다른 길이의 신호보다, 신호를 교란시키는 잡음이나 기타 방해요인에 의해 쉽게 영향을 받는다. 따라서, 반복되는 최소 천이 길이(RMTR : repeated minimum transition run)를 제한하려는 많은 연구가 진행되어 왔다.

본 논문에서는, RLL 조건이 (2,7)이고 RMTR을 4로 제한하는 새로운 PP 코드를 제안한다. 제안된 코드는 기록 저장 시스템에서 일반적으로 사용되고 있는 (2,10) 코드[1]나, 차세대 광 기록 시스템으로 주목받고 있는 (1,7) 코드[2]와 비교하여, 밀도율, RMTR, DC 성분 억압, 기록/재생 시스템에서 널리 쓰이는 PRML(partial response maximum likelihood)[3] 시스템의 유연한 적용, BER(bit error rate) 등의 측면에서 우수한 성능을 보인다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II장에서 RMTR, DC 성분 억압, 코드율(code rate) 등 제안된 코드의 기본적인 성질에 대해 설명한다. III장에서는 몇 가지 모의실험을 통해 앞서 언급된 다른 코드들과의 성능 우열을 예시하고, IV장에서 결론을 내렸다.

II. 새로운 RLL (2,7) PP 4-RMTR 코드

표 1은 코드율이 1/2인 기존의 RLL (2, 7) PP 코드를 나타내고 있다[1]. 먼저 코드의 최소 천이 간격을 $3T$ (T : 비트 주기) 이상이 나타나는 것을 식별할 수 있도록 구성하기 위해서는 코드워드에 대해 최소 4비트(입력 : 2비트)를 확인해야 한다.

표 1. 간단한 형태의 (2,7) PP 코드[1]

No.	Source Data	Codewords
1	10	0100
2	01	1000
3	001	001000
4	000	100100
5	111	000100
6	1101	00001000
7	1100	00100100

표 2. 제안된 RMTR 4, RLL (2,7) PP 코드(코드율 1/2)

No.	Source Data	Codewords
1	01	0100
2	10	1000
3	001	001000
4	111	000100
5	0000	00100100
6	0001	00001000
7	11000	0000100100
8	11001	1001000100
9	11010	1001001000
10	110111	100100000100
11	1101100	10010000100100
12	11011011	1001000010001000
13	110110100	100100001000100100
14	110110101	100100001000000100

이와 유사하게 최대 발생될 수 있는 '0'의 개수가 7비트 이하로 발생되는 것을 확인하려면 최소 8비트를 고려해야 된다. 따라서, 256가지의 8비트 코드워드 중에서 '1'의 개수가 최소 1개이면서, $(d, k)=(2, 7)$ 조건을 만족시키는 코드는 총 27가지이다. 이때, 코드워드를 연결했을 경우에도 위의 조건을 만족해야 하므로, 최하위의 2비트가 모두 '0'인 12가지의 코드워드를 우선적으로 선택하였다. 이 중에서 1)최상위 4비트가 "xx00" 형태를 갖는 코드워드가 2가지가 존재하고(모두 '0'인 경우 제외), 2)최상위 6비트에 대해 "xxxx00" 형태를 갖는 코드워드가 3가지이고, 3)서로 다른 8비트 코드워드가 3가지가 존재한다. 따라서, 표 1에서 나타낸 바와 같이 4비트, 6비트 및 8비트의 가변 길이 형태로 각 코드워드에 대해 입력 데이터를 할당하였다. 이때, $k=7$ 을 만족시키기 위해 코드워드 '00000100'는 배제하였고, 입력 데이터의 패리티와 코드워드의 패리티가 동일하도록 임의 할당하였다.

표 1과 같은 코드는 광 기록 시스템에서 DC 성분을 제거하기 위한 기존의 여러 가지 다른

방법보다 구성이 간단하면서도 효율적인 성분 제거가 가능하다. 그러나, 입력 데이터로 '0'이 연속적으로 여러회 반복될 경우, 출력단에서 "100100100100..."과 같이 최소 천이 길이가 계속 반복되어 발생되어 데이터 검출시 연접에러가 발생할 수 있는 확률이 높아지게 되는 단점이 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 RMTR 조건을 4 이하로 제한된 형태의 개선된 (2, 7) PP 코드를 제안한다. 이 코드는 기존의 코드와 동일한 코드율을 가지며, RMTR 조건을 제한하기 위해 최대 18비트까지 코드워드를 고려하고, 표 2에 나타내었다. 이러한 RMTR 조건을 제한하는 PP 코드를 설계함에 있어서 앞서 설명한 기존의 (2, 7) PP 코드와 마찬가지로 체계적인 설계 방법은 존재하지 않기 때문에, 본 논문에서 제안된 RMTR 제한 조건이 4인 새로운 (2, 7) PP 코드는 표 1로부터 여러 차례의 시행착오를 거쳐 완성되었고, 고려한 방법은 18비트까지 비트 수를 늘려가면서 표 1에 의한 방법과 유사하게 진행하였다. 제안한 코드가 RMTR 조건을 4회 이하로 만족하는지를 확인하면, 각 할당된 코드워드 중 코드워드의 뒷 부분에서 최소 천이 길이의 반복 회수는 최대 2회이고, 코드워드의 시작 부분에서도 최대 2회 반복됨을 알 수 있다. 따라서, 어떠한 경우에도 RMTR 조건은 4회로 제한되도록 구성되어 있다. 본 논문에서는 코드율 1/2을 만족시키도록 구성하였으나, 표 2의 14번째 입력 데이터에 대한 코드워드 '100100001000000100(18비트)'를 '1001000010000100(16비트)'로 변경할 수도 있어 코드율 증가도 가져올 수 있다.

III. 실험 1

제안된 코드의 특성을 설명하기 위한 모의실험에 서는, 10^7 의 소스 비트(source bit)를 10번 발생시키고 그 결과를 평균하였다. 표 3은 제안된 코드에서 발생할 수 있는 각각의 런 길이의 상대적인 빈도수를 나타낸다. 짧은 런 길이가 자주 발생하여, 3T와 4T가 50% 이상을 차지하고 있다. 타이밍 신호를 회복하기 위한 정보가 보다 빈번하게 제공되고 있는 것이다.

표 3. 제안된 (2,7) PP 코드에서 각각의 런 길이의 상대적인 발생 빈도수

Run-length	3T	4T	5T	6T	7T	8T
Freq. %	31.45	25.29	18.06	13.30	8.41	3.49

표 4. RMTR의 상대적인 발생 빈도수

Number of RMTR	1	2	3	4
Freq. %	68.97	23.03	6.93	1.07

표 5. RLL code들의 비교 (NP : no parity preserving)

(d,k)	Code rate R	Efficiency R/C	Density ratio DR=(1+d)R	Maximum RMTR
(1,7)	2/3[1]	98.1%	1.33	NP
	2/3 PP[5]	98.1%	1.33	6
(2,7)	1/2 PP	96.6%	1.50	4
(2,10)	8/17 (EFM)	86.9%	1.41	NP
	8/16 (EFMPlus)	92.3%	1.50	NP

표 4에서는 RMTR 수의 분포를 나타내었다. 표 4로부터, RMTR이 4인 경우는 거의 일어나지 않으며, 에러가 발생할 수 있는 확률이 그만큼 줄어들었다고 볼 수 있다. 표 5는 제안된 (2,7) PP 코드의 몇 가지 성질들을 1절에서 설명된 (2,10) 코드, (1,7) PP 코드와 비교하였다. 제안된 코드는 밀도율과 RMTR 측면에서 더 좋은 특성을 보인다.

IV. 실험 2

본 논문에서 제안된 (2,7) PP 코드를 실제 시스템에 적용시키기 위한 모의실험을 수행하기 위해, 27.5 Gbyte 광 디스크 기록 시스템의 채널 모델을 이용하였다. 차세대 광 기록 시스템으로 기대되는 (1,7) PP 코드와 제안된 코드를 비교하므로써 성능의 우위를 예시하였다. (모의 실험에서 (1,7) PP 코드와 제안된 (2,7) PP 코드 각각에 대한 AWGN과 Transition Jitter의 노이즈(noise) 파워 비율은, 최소 천이 길이가 각각 2T, 3T인 점을 고려하여 93%:7%, 89%:11%로 고정하였다.)

1. PSD 분포

그림. 1은 (1,7) PP 코드와 제안된 (2,7) PP 코드의 PSD(power spectral density)를 나타낸다. 제안된 (2,7) PP 코드의 DC 성분은 (1,7) PP 코드의 DC 성분과 비교하여 현저히 감소하였음을 볼 수 있다. 즉, 그림. 2에서 보이는 바와 같이 제안된 (2,7) PP 코드는 (1,7) PP 코드에 비해 고주파수 영역이 상당히 줄어든 형태이므로, 여러 가지 PR 타겟에 대해 좋은 성능을 보일 것을 예측할 수 있다.

2. BER(bit error rate) 성능비교

제안된 (2,7) PP 코드와 (1,7) PP 코드에 대해, 몇 가지 PR 타겟에 따른 BER(bit error rate)을 그림. 3에 나타내었다. (1,7) PP 코드는 PR 타겟에 매우 민감하여, 각 PR 타겟에 대해 BER 성능 차이가 심한 것을 볼 수 있다. 그러나, 제안된 (2,7) PP 코드는 여러 PR 타겟에 잘 적응하여 BER의 차이가 거의 없다. 즉, 두 개 이상의 채널을 포괄해야 하는 시스템을 설계하거나, 잡음이 심하여 PR타겟의 등화기 출력 형태가 일그러지는 등 시스템이 안정적이지 못할 경우, 보다 유연하게 대응할 수 있다.

또한, (1,7) PP 코드는 최소 천이 길이가 2T로써 매우 짧은 편이므로, 한번 비트 에러가 발생하면 그 에러가 비교적 긴 데이터 열에 영향을 미치게 되고 이로 인해 모듈레이션 파형이 일정 시간동안 쉬프트되어, 결과적으로 에러가 전파되는 경향이 있다. 이러한 특성 때문에, 최소 천이 길이가 3T인 (2,7) PP 코드는 (1,7) PP 코드에 비해 에러 발생 빈도가 줄어든다. 그림. 3에서 이러한 특성을 볼 수 있다. (1,7) PP 코드에 대해 가장 우수한 BER 성능을 보이는 PR(1,2,2,2,1) 타겟 조차도, (2,7) PP 코드에 적용된 모든 PR 타겟에 대한 BER 성능보다 열등함이 예시되었다.

그림. 3에서 각 코드에 적용된 PR 타겟중 가장 우수한 성능을 나타내는 타겟을 선택하여, SNR(signal to noise ratio)을 변화시키면서 BER 성능을 분석하였다. 그림. 4는 제안된 (2,7) PP 코드가 (1,7) PP 코드와 비교하여, BER이 10^{-4} 일 때 약 0.5dB의 성능 이득을 얻고 있음을 나타낸다. 각각의 SNR dB에서, 제안된 (2,7) PP 코드는 (1,7) PP 코드에 비해 대략 절반의 비트 에러를 발생시키고 있다.

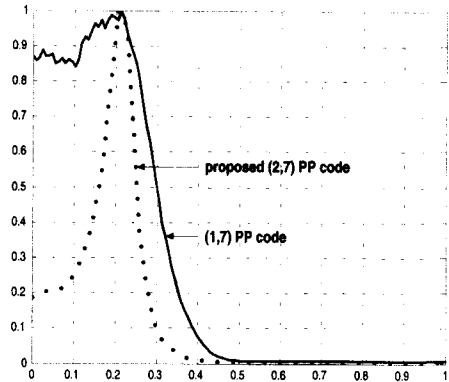


그림. 1. (1,7) PP 코드와 제안된 (2,7) PP 코드의 PSD

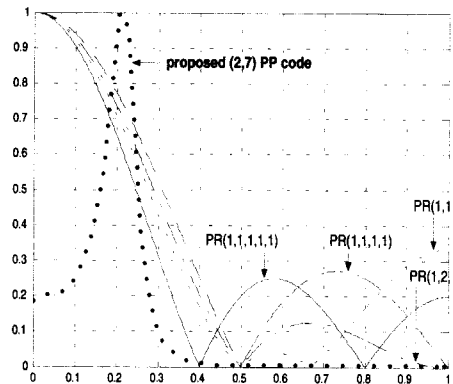


그림. 2. 제안된 (2,7) PP 코드의 PSD와 PR 타겟들

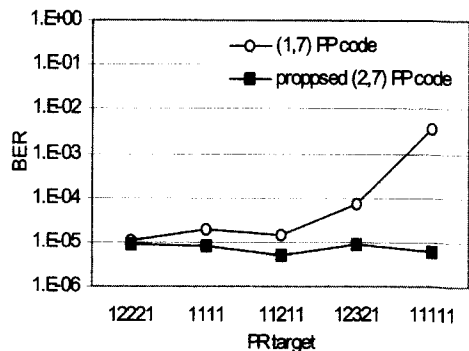


그림. 3. (1,7) PP 코드와 제안된 (2,7) PP 코드에 대한 각 PR 타겟의 BER (SNR 16dB)

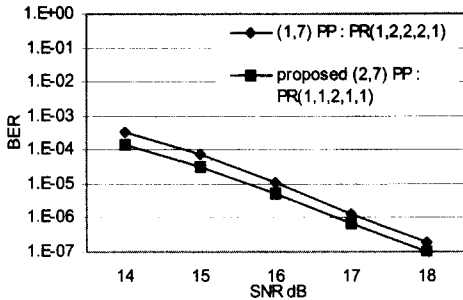


그림. 4. SNR의 변화에 따른 각 코드의 BER 변화

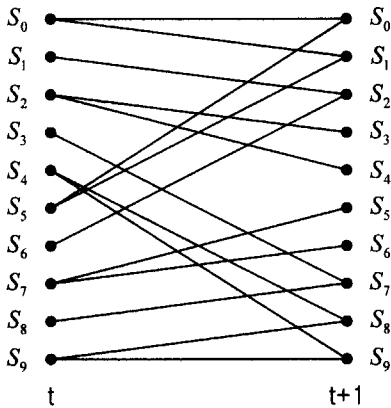


그림. 5. (1,7) PP 코드의 트렐리스(EEPR-IV)

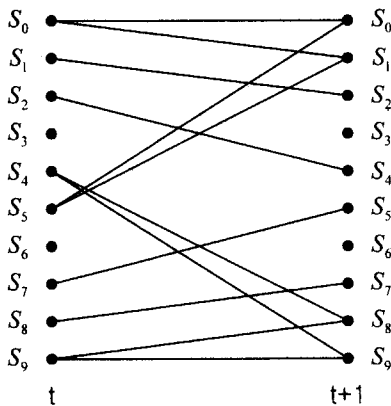


그림. 6. 제안된 (2,7) PP 코드의 트렐리스(EEPR-IV)

3. 비터비 디코더의 트렐리스 계산과정

두 시스템의 하드웨어 구현시, 비터비 디코더 트렐리스의 계산량 비교를 위해, EEPR-IV의 트렐리스[4]를 기본으로 각 코드의 (d,k) 조건을 적용하여 변형된 트렐리스를 그림.5, 6에 나타내었다. 제안된 (2,7) PP 코드의 트렐리스는 (1,7) PP 코드의 트렐리스에 비해, 두 개의 상태(state)와 네 개의 가지(branch)가 줄어들었다. 즉, t 에서 $t+1$ 로 진행할 때의 계산량은 $3/4$ 로 감소하였다.

V. 결론

본 논문에서는 광 기록 저장 시스템을 위한 새로운 RLL (2,7) PP 4 RMTR 코드를 설계, 제안하였다. 제안된 코드는 채널 데이터에 포함된 DC 성분을 조절할 수 있는 PP 코드이고, ISI를 방지하고 타이밍 신호를 회복할 수 있도록 하는 RLL 코드이며, RMTR을 4로 제한하므로써 데이터 검출시에 에러발생을 감소시키는 새로운 코드이다.

코드 자체의 특성을 설명하기 위한 모의실험을 통해, 제안된 (2,7) PP 코드는 우수한 밀도율을 가지며, RMTR을 매우 적은 수로 제한함을 증명하였다.

본 논문에서 제안된 코드를 광 기록 시스템에 적용하기 위해서, 차세대 광 기록 시스템으로 주목받고 있는 (1,7) PP 코드와의 비교 모의 실험을 수행하여, 제안된 (2,7) PP 코드는 (1,7) PP 코드에 비해 스펙트럼 분포에서 DC 성분이 현저히 줄어들었음을 예시하였다. 비트 에러율 실험을 통해, 제안된 코드는 PR 타겟에 유연하게 대응하며, (1,7) PP 코드에 비해 SNR 0.5dB 정도의 이득을 얻을 수 있음을 예증하고, 하드웨어 설계시 비터비 디코더의 트렐리스 구현에 있어서, 제안된 (2,7) PP 코드는 (1,7) 코드에 비해 계산량을 약 $3/4$ 로 줄일 수 있음을 보였다.

참고 문헌

- [1] K. A. S. Immink, "Codes for Mass Data Storage Systems", *Shannon Foundation Publishers*, 1999
- [2] T. Narahara, S. Kobayashi, M. Hattori, Y. Shimpuku, G. van den Enden, J. Kahlman, M. van Dijk and R. van Woudenberg, "Optical disc system for digital video

- recording", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 39, no. 2B, pp. 912-919, 200
- [3] Roy D. Cideciyan, Francois Dolivo, Reto Hermann, Walter Hirt, Wolfgang Schott, "A PRML System for Digital Magnetic Recording", *IEEE journal on selected areas in communications*, vol. 10, no. 1, January 1992
- [4] Kyoko Tsukano, Takushi Nishiya, Tatsuya hirai, Takashi Nar, "Simplified EEPV Viterbi Detector Based on a Transformed Radix-4 Trellis for a Disk Drive", *IEEE transactions on magnetics*, vol. 35, no. 5, September 1999
- [5] K. A. S. Immink, J. Kahlman, G. Van Den Enden, T. Nakagawa, Y. Shinpuku, T. Naohara and K. Nakamura, "Apparatus and Method for Modulation/Demodulation with Consecutive Minimum Runlength Limitation", *International Application Published under the Patent Cooperation Treaty*, WO 99/63671, Dec. 1999

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