

고밀도 자기기록 채널을 위한 연속적인 천이의 제한을 갖는 코드

준회원 이주현*, 정회원 이재진**

Consecutive transition limited code for high-density magnetic recording channel

Joo-Hyun Lee* Associate Member, Jae-Jin Lee* Regular Member

요약

연속적인 천이의 제한을 갖는 변조 코드는 고밀도 자기기록 채널에서 사용하기 위한 채널 코드 중의 하나이다. 특히, 채널로 입력되는 코드열이 연속적인 천이를 2회 이하로 허용할 경우, 채널 출력에 대한 검출 성능이 월등히 향상될 수 있으나, 이와 반대로 코드율은 현저히 감소되는 단점이 있다. 따라서, 본 논문에서는 각 코드워드에서는 연속되는 천이 길이의 제한(j)을 2로 제한하면서, 코드워드가 연결되는 부분에서는 $j=3$ 까지 허용하는 코드율이 7/8인 런-길이 제한 (RLL) 코드를 제안하였다. 이때, 제안한 코드의 연속적인 '0'의 개수(k)는 7로 제한된다.

Key Words : modulation codes; magnetic recording channels; consecutive transition limited codes.

ABSTRACT

The modulation code with the limitation of consecutive transition length is a type of channel codes in high-density magnetic recording channel. When code sequence has two or less successive transitions, the detection performance of channel outputs can be improved. However, the code rate is reduced considerably. We present a rate 7/8 run-length limited (RLL) code that consecutive transition length of each codeword is limited to 2 ($j=2$), and j is allowed to be 3 when codewords are connected. In addition, the consecutive zeros of the proposed code is limited to 7 ($k=7$).

1. 서론

런-길이 제한 (run-length limited, RLL) 코드는 정보 저장 시스템에서 가장 많이 사용되는 코드이다 [1]. RLL 코드에서 (d , k)-구속 조건은

'1'과 '1' 사이에 연속되는 '0'의 수가 최소 d 개에서 최대 k 개가 되도록 하여, 변조된 NRZI 파형에서 천이의 발생 간격을 제한하게 되어 인접 심벌간 간섭(intersymbol interference, ISI)을 줄이면서 및 타이밍 복구(timing recovery)가 용이하도록 한다.

* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실 (xmas@dongguk.edu), ** 동국대학교 통신 및 정보저장 연구실 (zlee@dgu.ac.kr)
논문번호 : 030357-0814, 접수일자 : 2003년 8월 14일

※ 본 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음. (KRF-2002-041-D00408)

표 1. $j=2$ 인 천이 길이 제한 코드의 용량

| k | Capacity | k | Capacity |
|-----|----------|----------|----------|
| 4 | 0.8376 | 8 | 0.8760 |
| 5 | 0.8579 | 9 | 0.8774 |
| 6 | 0.8680 | 10 | 0.8782 |
| 7 | 0.8732 | ∞ | 0.8791 |

자기기록 시스템 중에서 하드디스크 드라이브에서 대표적으로 사용되고 있는 일반적인 변조 코드로는 코드율이 8/9 또는 16/17인 코드 등이 있다 [1, 2]. 이러한 코드의 경우, 기록 밀도가 증가함에 따라, 연속적인 데이터 천이(transition)의 회수의 증가가 데이터 검출 성능 감소의 가장 큰 원인이 되어 데이터 검출 성능 향상의 한계를 가져온다. 따라서, 최근 몇 년 전부터 이러한 문제점을 해결하기 위해 연속적인 천이 길이의 제한을 갖는 코딩 기술의 개발에 초점이 맞추어지고 있다.

연속적인 천이 길이의 제한을 갖는 코드는 고밀도의 자기 기록 시스템에서 기록 데이터에 대한 최소 거리 (minimum distance) 특성을 향상시켜 기존의 (0, k)인 기록 코드에 비해 검출 성능을 상당히 향상시킨다. 이러한 코드는 검출 성능 이득은 (1, 7) 코드[1]의 이득과 유사하면서도 보다 높은 코드율을 갖는 장점을 가진다. 이때, 최대 허용 가능한 천이의 수(j)가 2인 경우, 연속되는 천이 길이 제한 코드의 용량은 k 값에 따라 표 1과 같이 주어진다 [3]. 기존에는 이러한 검출 성능의 향상을 위해 채널로 기록되는 전체 코드열에서 $j=2$ 를 만족하는 코드율이 4/5, 5/6, 6/7 등의 코딩 기법이 개발되었다[3-5]. 그러나, 기존에 자기기록 채널에서 사용하고 있는 코드율이 8/9인 코드에 비해 코드율이 상당히 감소되어, 기록 밀도의 증가에 제한을 갖는 단점이 있다. 또한, 코드율이 8/9에 근접하면서 $j=2$ 를 만족하는 코드율 7/8인 코드는 실제로 구현이 불가능하다.

본 논문에서는 고밀도 자기기록 채널에서 이러한 문제점을 극복하면서 보다 실제적으로 적용가능한 형태의 코드율 7/8인 코드를 제안하였다. 제안한 코드는 각 코드워드 내에서는 연속

되는 천이 길이의 제한(j)을 2로 제한하면서, 코드워드가 연결되는 부분에서는 $j=3$ 까지 허용한다. 또한, 제안한 코드의 연속적인 '0'의 개수(k)는 최대 7로 제한하였다.

2. 기본 코드워드 구성

그림 1에서는 본 논문에서 제안하는 코드율 7/8인 연속되는 천이 길이의 제한을 갖는 코드의 인코딩 및 디코딩 과정에 대한 전체적인 블록도를 나타내었다.

먼저 인코딩 과정에서는 7비트의 사용자 데이터가 인코더에 입력되어 8비트의 코드워드 (c_{k+1})를 출력시킨다. 이 출력은 이전의 변형된 코드워드 (\hat{c}_k)와 함께 연속되는 최대 천이 길이 구속 조건(j)에 위배되는지를 검사하여 위배되는 경우에는 코드워드의 특정 비트를 변환시키기 위해 "위배 검사 및 변환기 (violation check & converter)"에 입력되어 이전 코드워드에 대한 변형된 형태 ($\hat{c}_k = n_k$)를 출력시킨다. 이때, 인코더로부터 입력된 코드워드는 다음 코드워드와의 연속되는 최대 천이 길이 구속 조건에 대한 위배 검사를 위해 임시 메모리로 입력 (\hat{c}_{k+1})된다. 디코딩 과정에서는 검출기를 통과한 데이터를 8비트 코드워드 단위로 변환 (\hat{n}_{k+1})되어 최대 천이 길이 구속 조건에 대한 "위배 검사 및 변환기"를 통해 이전 코드워드 (c_k)를 복원한 후에, 이 코드워드를 디코더에 입력시켜 원래의 사용자 데이터를 출력시키는 형태로 구성된다.

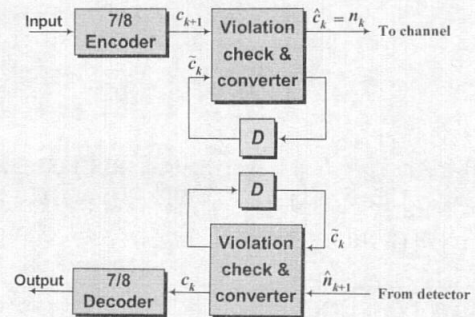


그림 1. 코드율 7/8인 연속되는 천이 길이의 제한을 갖는 코드의 인코딩 및 디코딩 과정

표 2. 코드워드의 구성

| 코드의 앞단 (leading edge) | 코드의 끝단 (trailing edge) | 전체 코드 수 | 사용한 코드 수 | 사용되지 않는 코드 |
|-----------------------|------------------------|---------|----------|---------------------------------|
| 0- | -0 | 44 | 40 | 00000000 00000001 |
| | -01 | 24 | 23 | 00100000 01000000 |
| | -011 | 13 | 13 | 01100000 |
| 소 계 | | 81 | 76 | 5 |
| 10- | -0 | 24 | 22 | 10000000 10100000 |
| | -01 | 13 | 13 | |
| | -011 | 7 | 7 | |
| 소 계 | | 44 | 42 | 2 |
| 110- | -0 | 13 | 5 | 1100-으로 시작하는 코드 13개 11010000 |
| | -01 | 7 | 3 | |
| | -011 | 4 | 2 | |
| 소 계 | | 24 | 10 | 14 |
| 총 계 | | 149 | 128 | 21 |

본 논문에서 제안한 코드의 코드워드 구성 방법은 다음과 같다.

먼저 코드워드의 길이가 8비트이면서 k -구속 조건을 고려하지 않을 경우 ($k=\infty$), 연속적인 최대 천이 회수(j)가 2비트 이하인 유효 코드워드 수는 105가지이다. 이 코드워드는 코드워드가 연속될 경우에도 $j=2$ 를 만족시킬 수 있도록 각 코드워드의 맨 앞과 뒤는 '1'이 한 개 이하로 구성되어 있다. 그러나, 7비트 입력 데이터에 대해 8비트 코드워드로 인코딩하기 위해서는 $128(=2^7)$ 개의 코드워드가 필요하므로 최소 23개의 코드워드가 추가로 요구된다. 이것은 코드워드의 맨 앞이 "110"으로 시작되는 코드워드와 맨 뒤가 "011"로 끝나는 코드워드를 추가함으로써 해결이 가능하다.

코드워드의 맨 앞이 "110"으로 시작되는 코드워드와 맨 뒤가 "011"로 끝나는 코드워드는 총 44개가 존재하는데, "위배 검사 및 변환기

(violation check & converter)"를 통해 코드워드의 경계에서 연속되는 천이 회수를 3비트 이하로 제한할 수 있도록 코딩하기 위해 "1100"으로 시작되는 코드워드 13가지를 배제하였다. 이를 제외한 나머지 가용 코드워드는 총 $136(=105+(44-13))$ 가지이다.

이 중에서 k -구속 조건을 7이 되도록 하기 위해 코드워드의 맨 앞부터 연속적인 0의 개수가 7비트 또는 8비트인 코드워드 2가지와 맨 뒤부터 연속적인 0의 개수가 5비트 이상인 코드워드 5가지 및 "위배 검사 및 변환기"를 통해 코드워드 변형시 k -구속 조건이 7을 초과하게 하는 코드워드 1가지의 사용을 배제하였고, 이러한 총 8가지의 해당 코드워드는 다음과 같다.

00000000, 00000001, 00100000, 01000000,
01100000, 10000000, 10100000, 11010000.

따라서, 본 논문에서 제안한 코드는 128개로써 코드율이 7/8이고, 코드워드 내에서는 연속적으로 발생 가능한 최대 천이 회수가 2비트 이하이며, 코드워드와 코드워드의 경계에서는 연속적인 최대 천이 회수를 3비트까지 허용하는 연속적인 천이의 제한을 갖는 코드이다. 코드워드의 전체적인 구성과 코드 변환 테이블의 일부를 각각 표 2와 표 3에 나타내었다. 그러나, 코드워드 테이블을 통해 단순히 입력에 대한 코드워드를 대응시키는 것만으로는 코드워드 경계에서 $j=3$ 을 항상 만족시킬 수 없고, k -구속 조건도 7이하가 되지 않는 경우가 발생한다. 따라서, 이것은 "위배 검사 및 변환기"를 통해 각각의 조건을 만족시킬 수 있는 코드를 발생시킬 수 있게 된다.

표 3. 코드율 7/8인 연속적인 천이의 제한을 갖는 코드워드 변환 테이블의 일부

| Source | Codeword | Source | Codeword |
|---------|----------|---------|----------|
| 0000000 | 00000010 | 0100000 | 00110101 |
| 0000001 | 00000100 | 0100001 | 00110110 |
| 0000010 | 00000101 | 0100010 | 01000001 |
| 0000011 | 00000110 | 0100011 | 01000010 |
| 0000100 | 00001000 | 0100100 | 01000100 |

3. 연속적인 천이 길이 제한을 위한 위배 검사 및 변환

기존의 코드율이 4/5, 5/6, 6/7인 연속적인 천이 길이의 제한을 갖는 코드와 달리 코드율이 7/8인 경우에는 전체적으로 $j=2$ 인 코딩 기술의 개발이 불가능하기 때문에, 본 논문에서는 코드워드 자체에서는 $j=2$ 를 만족하면서, 코드워드의 경계에서만 $j=3$ 을 허용할 수 있도록 개발하였다.

인코더를 통해 생성된 코드워드의 연속적인 천이에 대한 위배 검사 및 변환 과정에서는 k -구속 조건이 7을 만족하는지의 여부와, 코드워드 경계에서 $j=3$ 이하를 만족하는지를 검사하여 위배될 경우 변환 과정을 거치게 되는데, 변환 과정은 다음과 같고, 그림 2에 나타내었다.

코드워드 위배 검사 및 변환기로 들어오는 현재 코드워드를

$c_k \in \{x_7 \text{ (MSB)}, x_6, \dots, x_0 \text{ (LSB)}\}$ 라 하고, 그 다음으로 들어오는 코드워드를

$c_{k+1} \in \{y_7 \text{ (MSB)}, y_6, \dots, y_0 \text{ (LSB)}\}$ 라 할 때, 현재 코드워드의 끝 부분(LSB 부분) 2비트와 다음 코드워드의 앞 부분(MSB 부분) 4비트에 대한 검사만으로 위배 여부를 판단할 수 있다. 먼저 인코딩 과정에서 k 가 7 이하를 만족하는지를 검사하는 파라미터와 j 가 3을 만족하는지를 검사하는 파라미터를 각각 z_0 와 z_1 이라 하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$z_0 = x_1 + x_0 + y_7 + y_6 + y_5 + y_4 \quad (1)$$

$$z_1 = x_1 \cdot x_0 \cdot y_7 \cdot y_6 \cdot y_4 \quad (2)$$

여기서 "+"는 2진 가산(modulo-2 addition) 연산을 나타낸다. 이때, $z_0=0$ 인 경우, 본 논문에서 제안한 코드의 특성으로 인해 $k=7$ 을 만족하지 않는 경우가 발생하기 때문에, x_0, y_7, y_6 을 '1'로 변환한다. $z_1=1$ 인 경우에는 $j=3$ 을 초과하는 경우를 의미하기 때문에, x_0 와 y_4 를 '0'으로 변환시킨다. 다시 말해서, 다음의 두 가지 경우에만 k 또는 j -구속 조건의 위반으로 인해 변환 과정을 거치게 된다.

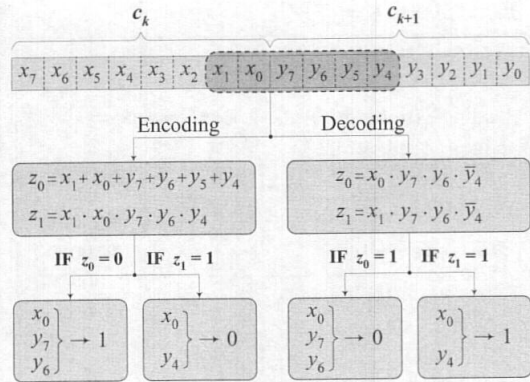


그림 2. 인코딩 및 디코딩을 위한 연속적인 천이 조건 위배 검사 및 변환 과정

...00,0000... ⇒ ...01,1100...
 ...11,1101... ⇒ ...10,1100...

본 논문의 2장에서 코드워드를 선택할 때 코드워드 "11010000"를 배제하였는데, 그 이유는 코드워드 시퀀스 중에서, "...11,11010000,0001..."인 경우 "...10,11000000,0001..."로 변환되어 k -구속 조건이 7을 초과하게 되는 문제점이 발생하기 때문에 이러한 경우를 없애기 위해 위의 해당 코드를 배제하였다.

디코딩 과정을 살펴보면, 인코딩 과정에서 "위배 검사 및 변환기"를 통해 변환된 코드열이 채널에 기록된 후, 다시 재생되어 검출 과정을 거친 후에 디코더에서 사용자 데이터를 복원하기 위해서는 다시 "위배 검사 및 변환기"를 통과시켜야 한다. 이때, 두 파라미터 z_0 와 z_1 은 다음과 같이 구성된다.

$$z_0 = x_0 \cdot y_7 \cdot y_6 \cdot y_4 \quad (3)$$

$$z_1 = x_1 \cdot y_7 \cdot y_6 \cdot y_4 \quad (4)$$

여기서, $z_0=1$ 인 경우, 본 논문에서 제안한 코드의 특성으로 인해 $k=7$ 을 만족하지 않는 경우에 대해 변환되었던 코드워드를 다시 원래대로 변환하기 위해, x_0, y_7, y_6 을 '0'으로 변환한다. $z_1=1$ 인 경우에는 $j=3$ 을 초과하는 경우에 대한 것이므로, x_0 와 y_4 를 다시 '1'로 변환시킨다. "

위배 검사 및 변환기"를 통해 결정된 코드워드는 디코더로 입력되어 코드워드에 해당되는 사용자 데이터를 출력시킨다.

4. 결 론

본 논문에서는 연속적인 천이의 제한을 갖는 코드율이 7/8인 자기기록을 위한 변조 코드를 제안하였다. 이 코드는 코드워드 자체에서는 $j=2$ 를 만족시킨다. 또한, 코드워드와 코드워드의 경계에서는 k 와 j -구속 조건에 대해 단순한 구조의 "위배 검사 및 변환기"를 통과시킴으로써 $(d, k)=(0, 7)$ 을 만족시키면서 $j=3$ 까지만 허용하는 구조로 되어 있다. 이와 같이 제안한 코드는 기존의 연속적인 천이의 제한을 갖는 않는 코드에 비해서는 낮은 코드율을 갖고 있으나, 연속적인 천이의 길이가 최대 2인 코드에 비해서는 상대적으로 매우 높은 코드율을 가진다. 따라서, 본 논문에서 제안한 코드는 채널의 기록 밀도가 높아지면서 기존의 연속적인 천이의 제한을 갖지 않는 기존의 코드를 대체할 수 있는 코드라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] K. A. S. Imminck, *Codes for Mass Data Storage Systems*, Shannon Foundation Pub., 1999.
- [2] P. H. Siegel and J. K. Wolf, "Modulation and coding for information storage," *IEEE Communications Magazine*, vol. 29, pp. 68-86, Dec. 1991.
- [3] J. Moon and B. Brickner, "Maximum transition run codes for data storage systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 32, no. 5, pp. 3992-3994, Sept. 1996.
- [4] L. Fu and A. L. Kok, "Rate 5/6 maximum transition run code for read channel," *U. S. Patent 6,278,748*, Aug. 21, 2001.
- [5] B. Brickner and J. Moon, "Design of a rate 6/7 maximum transition run code," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp. 2749-2751, Sept. 1997.

이 주 현(Joo-Hyun Lee)

준회원



2000년 2월: 동국대학교 전자공학과 학사
2002년 2월: 동국대학교 전자공학과 석사
2002년 9월~현재: 동국대학교 전자공학과 박사과정

<주관심분야> 통신이론, 변조코드, 검출 기법 연구

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

<주관심 분야> 통신 이론, 기록저장 시스템