고밀도 자기기록을 위한 $j=2$ 구속 조건을 갖는 코드율 13/15인 MTR 코드

준회원 이 규 석*, 정회원 이 주 현*, 정회원 이 재 진*

Rate 13/15 MTR code with j=2 constraint for high-density magnetic recording

Kyusuk Lee* *Associate Member*, Joohyun Lee*, Jaejin Lee* *Regular Members*

요 약

저장 장치의 고밀도화로 인한 인접 심벌간의 간섭 현상은 연속되는 천이 길이에 의해 가장 큰 영향을 받게 된다. 따라서, 본 논문에서는 천이 회수를 2, k-구속조건을 8로 제한한 새로운 MTR 변조 코드를 제안하였다. 이 코드에 대해 수직 자기기록 장치에서 저주파 대역에 존재하는 매체 잡음으로 인한 성능 감소를 방지하기 위해서 GS(Guided Scrambling) 방법을 이용한 DC-억압을 수행하였다. 또한, 기존의 자기기록 채널에서 사용되던 코드율 8/9인 코드와의 검출 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 비교 분석하였다.

Key Words : MTR code; magnetic recording; PRML; guided scrambling.

ABSTRACT

Since the major reason of the detection failure is from the consecutive data transitions, it is desirable to limit the MTR(maximum transition run) within two. Therefore, we propose a new MTR code that limits the MTR constraint to 2 and *k*-constraint to 8. In addition, DC-free coding is performed to overcome the media noise that exits in low frequency of perpendicular recording system. We use a GS (Guided Scrambling) for DC-free coding, and the performance of the code is compared with that of the rate 8/9 code used in the conventional recording channel by a computer simulation.

I. 서 론

변조 코드는 디지털 저장 장치에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 변조 코드의 주요 목적은 채널 특성에 맞게 입력 신호를 일정한 제한 조건을 갖는 시퀀스로 만들어 채널과 입력 신호의 특성을 일치시킴으로써 성능을 향상시키는데 있다. 기존의 자기기록 장치에서 사용되던 일반적인 변조코드로는 코드율이 8/9 또는 16/17인 코드 등이 있는데, 이러한 코드는 기록 밀도가 증가함에 따라 연속적인 데이터 천이(transition) 회수의 증가로 인하여 데이터 검출 성능이 감소되고, 기록 밀도 증가의 한계를 가져온다. 기록 저장 매체에서 이러한 변조 코드는 런-길이 제한(run length limited, RLL) 코드라고도 불린다. RLL 코드란 입력 데이터의 시퀀스를 '1' 과 '1' 사이의 '0' 의 개수가 최소 d개 이상, 최대 k개로 제한한다. 이러한 구조를 지닌 코드는 천이 간격을 제한함으로써 인접 심벌간의 간섭을 감소시켜 기록 밀도를 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 위와 같은 코드보다 높은 기록 밀도에서 인접 심벌간의 간섭을 줄이고 높은 코드율을 유지하면서도 성능을 향상시킬 수 있는 코드를 고안하였다. 최대 천이

* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실(jinrho@naver.com; xmas@dongguk.edu; zlee@dongguk.edu)
논문번호 : 040051-0202, 접수일자 : 2004년 2월 3일
※ 이 연구는 2003학년도 동국대학교 연구년 지원에 의하여 이루어졌음.

표 1. j=2 MTR 코드의 구성

코드의 앞단 (leading edge)	코드의 끝단 (trailing edge)	사용 가능한 코드	사용한 코드	비 고
0-	-0	3136	2938	코드의 앞단과 끝단에서 연속된 0의 개수는 6개까지 허용
	-01	1705	1622	
	-011	927	742	
소 계		5768	5302	
10-	-0	1705	1601	
	-01	927	885	
	-011	504	404	
소 계		3136	2890	
총 계		8904	8192	

런-길이(maximum transition run-length, MTR)를 제한하는 변조 코드는, 최대 천이 회수를 제한함으로써 고밀도의 기록 장치에서도 우수한 성능을 나타낼 수 있게 된다[1].

따라서, 본 논문에서 제안한 새로운 MTR 코드는 코드열에서의 최대 천이 회수(j)를 2회로 제한하고, k-구속조건을 8이하로 제한함으로써 일반적인 변조 코드에 비해 향상된 성능을 나타냄과 동시에 기존에 개발된 MTR 코드 중 가장 높은 코드율을 갖는 코드율이 6/7인 MTR 코드보다 상대적으로 높은 코드율을 갖게됨을 확인하였다. 또한, 기존의 자기기록 채널에서 사용되던 코드율 8/9인 코드와의 검출 성능을 컴퓨터 모의 실험을 통해 비교 분석하였다.

Ⅱ. j=2인 13/15 MTR 코드의 구성

본 논문에서는 코드율 13/15인 MTR 코딩 기술을 이용하여 최대 천이 회수(j)가 2이고 k-구속 조건이 8인 MTR(2;8) 코드를 제안하였다. 본 논문에서 제안한 코드의 코드워드 구성은 표 1과 같다. 이에 대한 구성 방법은 다음과 같다.

먼저 k-구속 조건과는 상관없이 j=2인 구속 조건을 만족시키면서 코드워드의 길이가 15비트인 코드의 개수는 8674개이다. 이때 코드워드를 연결한 경우에 j=2를 만족시키기 위해서 앞단(leading edge)과 끝단(trailing edge)의 '1' 의 개수가 1개인 코드 7473개를 선택하였다. 그러나 13비트의 입력 데이터에 대해 15비트의 코드워드로 인코딩하기 위해서 필요한 코드의 개수는 8192(213)개이므로 719개의 코드가 부족하게 된다. 따라서 부족한 코드의 개수를 만족시키기 위해서 끝단이 '11' 인 코드를 추가로 사용하였다. '11' 로 끝나는 코드는 1431개가 존재하는데 변조 코딩 과정 중 코드 경계에서 연속되는 천이 회수가 3회인 경우를 방지하기 위해서 '11011' 로 끝나는 코드워드 230개를 배제하였다. 이렇게 해서 사용 가능한 코드워드의 총 개수는 8674 (=7473+(1431-230)) 개가 된다.

위의 조건을 만족하는 코드워드 중에서 k-구속 조건이 8을 만족하도록 구성하기 위해 연속된 '0' 의 개수가 8개 이상인 코드워드 442개를 배제하고, 앞단과 끝단의 연속된 '0' 의 개수가 7개인 코드워드 22개를 배제하였다. 그 결과 코딩 변조 과정에서 이용할 수 있는 코드의 개수는 8232 (=8674-442 -22)개가 된다. 이와 같은 방법으로 선택된 코드워드 중 임의의 코드워드 40개를 배제하고 8192개의 코드를 선택한 결과 표 2에서 보는 것처럼 코드율이 13/15이고, 전체 코드 열에서 연속적으로 발생하는 최대 천이 회수가 2회 이하이며, k-구속조건이 8인 MTR 코드를 제안하였다. 그러나, 입력 데이터에 대해서 코드워드 테이블을 통한 단순대응 방식으로는 코드 경계에서 j=2이거나 k=8인 경우를 항상 만족시킬 수 없다. 따라서, 코드 경계에서는 항상 "MTR 위반 검사 및 변환기"를 통해 j=2이거나 k=8인 경우를 만족시킬 수 있는 코드를 발생시키기 위한 과정이 필요하다.

Ⅲ. MTR 위반 검사 및 코드 변환

본 절에서는 단순대응 방식에 의한 코드 생성 과정 중 코드 경계에서 최대 천이 회수가 3이 되는 경우와 k-구속 조건이 9이상이 되는 경우를 방지하기 위하여 "MTR 위반 검사 및 변환기"를 통한 코드 변환 과정을 제안한다.

데이터 인코딩은 코드 변환 테이블을 이용하여 변조 코딩하는 단계와 이렇게 변조된 두 개의 코드가 연결되었을 때, 코드 경계에서 j=2, k=8을 만족하는지를 조사하는 단계를 통해 위의 조건을 만족하지 못하는 특정한 코드에 대해 본 논문에서 제시하는 변환과정을 통한 변조 코딩 단계로 이루어져 있다. 특정코드에 대한 변환 방법은 다음과 같다.

우선 끝단이 '011'이고, 연결되는 코드의 앞단이 '100', '101'인 경우 j=3이 되므로 코드 구성에서 배제하였던 앞단이 '110'으로 시작하는 코드를 이용하여 아래와 같이 변환하였다.

표 2. R=13/15인 MTR(2:8) 코드 변환 테이블 (look-up table)의 일부

Source	Codeword
0000000000000	000000100000001
0000000000001	000000100000010
0000000000010	000000100000011
0000000000011	000000100000100
0000000000100	000000100000101
0000000000101	000000100000110
0000000000110	000000100001000

$$\cdots 011,100\cdots \Rightarrow \cdots 100,110\cdots$$
$$\cdots 011,101\cdots \Rightarrow \cdots 010,110\cdots$$

또한, 끝단이 '000'으로 끝나고 다음 코드의 앞단이 '000'으로 시작하는 경우에는 코드의 특성상 k=8을 만족하지 못할 수 있기 때문에 다음과 같이 변환하였다

$$\cdots 000,000\cdots \Rightarrow \cdots 000,110\cdots$$

위와 같은 변환 방법을 블록도로 나타내면 그림 1과 같다.

현재 코드워드를 $c_k \in \{x_{14}(\mathrm{MSB}), x_{13}, \cdots, x_0(\mathrm{LSB})\}$라하고, 다음 코드워드를 $c_{k+1} \in \{y_{14}, y_{13}, \cdots, y_0\}$ 라 할 때, 위와 같은 변환 과정이 이루어지면 아래와 같은 경우가 발생하게 된다. 이 경우를 제외한 모든 코드에 대해서는 j=2, k=8인 조건을 만족하게 된다.

$$x_1 \cdot x_0 \cdot y_{14} \cdot y_{12} = 1 \quad (1)$$
$$x_1 \cdot x_0 \cdot y_{14} \cdot \overline{y_{12}} = 1 \quad (2)$$
$$x_2 + x_1 + x_0 + y_{14} + y_{13} + y_{12} = 0 \quad (3)$$

따라서 위와 같은 변조 코딩 과정을 통하여 코드 경계에서도 항상 j=2, k=8을 만족하는 MTR 코드를 구성할 수 있다. 디코딩에 대한 MTR 위반 검사 및 변환 과정은 인코딩에 대한 과정을 역으로 수행한다.

Ⅳ. 13/15 MTR 코드를 이용한 DC-억압 실험

본 모의 실험에서는 새롭게 제안된 코드율 13/15인 MTR 코드에 의한 변조 코딩으로 고밀도 자기 기록채널에서 발생하는 저주파 대역에서의 매체 잡음을 제거하기 위해서 DC-억압 방법을 통한 모의 실험을 실시하였다. DC-억압 방법으로는 단순 프리코더(precoder)를 통과시킨 런-디지털 합(running digital sum, RDS) 조사방법과 룩-어헤드(look-ahead)를 이용한 방법, 그리고 GS(guided scrambling)를 이용한 RDS 조사 방법을 통해 분석하였다[2]. 또한 RDS 조사 방법으로는 기존에 사용되던 최소 런-디지털 합(minimum running digital sum, MRDS)을 이용한 방법이 아닌, 최소 제곱 크기(minimum squared weight, MSW) 조사 방법을 사용하였다. MRDS에서는 RDS의 누적된 합에 대한 절대 값을 비교하여 최소 값을 갖는 코드워드를 선택하는 방법을 이용하는데 반해, MSW는 누적된 RDS에 대한 제곱 값의 합을 이용하여 최소 값을 갖는 코드워드를 선택하는 방법을 이용하고 있다. 이때 MSW는 MRDS에서와 같이 무한히 누적된 합을 이용하는 것이 아니라 일정한 코드워드의 길이만큼 RDS에 대한 제곱 값의 합을 이용하고 있다.

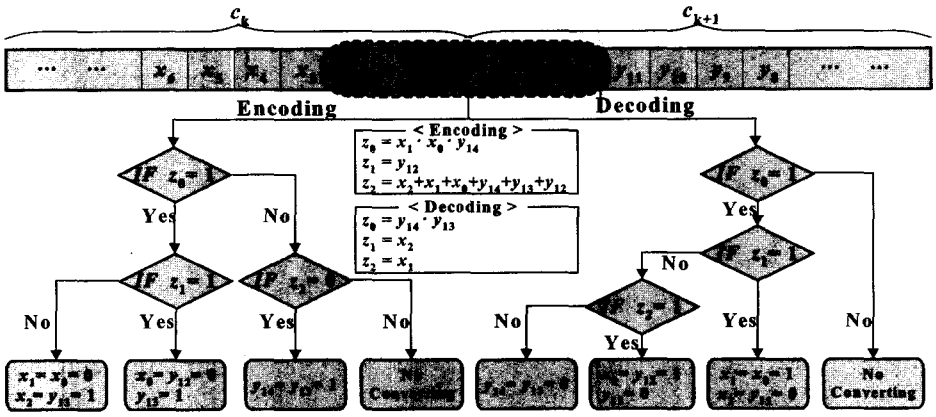

그림 1. 13/15 MTR 코드의 인코딩 및 디코딩에 대한 블록도

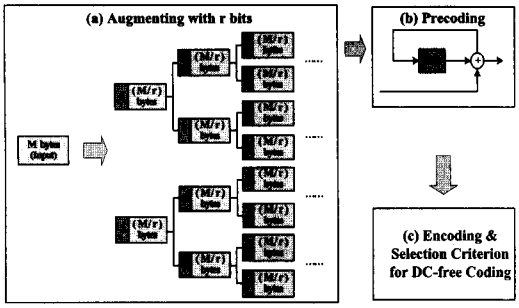

그림 2. Look Ahead DC-억압 방식의 블록도

이에 대한 수식은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\{x_i\}=\{\cdots, x_{-1}, x_0, \cdots, x_i, \cdots\}, \quad x_i \in \{-1, 1\} \tag{4}$$

$$y_i = \sum_{j=-\infty}^{i} x_j = y_{i-1} + x_i \ \text{(RDS)} \tag{5}$$

$$z_i = \sum_{j=i-n}^{i} y_i^2 \ \text{(MSW)} \tag{6}$$

이때, n은 코드워드 길이를 나타낸다. 단순 프리코더를 통과시킨 경우는 8바이트의 소스 코드에 1비트의 DC-제어 비트를 삽입하여 그에 대한 DC-억압 정도를 확인하였고, 룩-어헤드 방법에서는 그림 1에서와 같은 방법을 이용하여 4비트의 DC-제어 비트를 삽입하여 모의 실험을 실행하였다.

또한 GS 방법을 이용한 경우에는, 그림 3에서와 같이 소스 코드에 3비트의 DC-제어 비트를 삽입하고 아래의 수식과 같은 스크램블러 다항식(scrambler polynomial)을 통과시킨 뒤 다시 앞단에 DC-제어 비트를 1비트 삽입하는 방법을 이용하였다.

$$1+x+x^7 \tag{7}$$

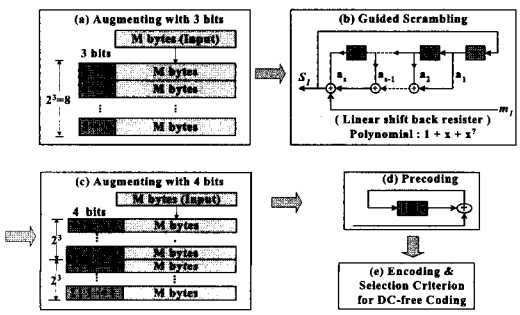

그림 3. GS DC-억압 방식의 블록도

그 결과 그림 4에서와 같이 DC-제어 방법에 대한 파워 스펙트럼(power spectrum density, PSD)을 나타내고 있다. 그 중 GS 방식의 DC-제어 방법이 f_c=10^{-4}에서 -29dB로 가장 좋은 성능을 나타내고있는 것을 볼 수 있다. 이는 GS 방식이 다른 두 방식에서처럼 단순히 소스 코드 앞단에 제어 비트를 삽입하여 DC를 제어하는 것이 아니라 스크램블러를 통해서 소스 코드를 DC-억압이 효율적으로 이루어질 수 있도록 코드를 변형해 주기 때문이다. 따라서 새롭게 제안한 13/15 MTR 코드를 사용함으로써 현재 DC-억압의 기준이 되는 -25dB 이하로 DC-억압이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

V. 자기기록 채널에서의 성능 분석

본 모의 실험에서 제안한 MTR 코드와 4차의 PRML 검출기에 대한 성능과 기존의 코드율 8/9인 변조 코드에 대한 검출 성능을 수평 및 수직 자기기록 시스템에서 비교, 분석하였다. 이때 사용한 수평 자기기록 채널은 다음과 같은 로렌찌안 펄스(Lorentzian pulse)로 표현된다[3].

$$g(t)=\frac{1}{1+\left(\frac{2t}{PW_{50}}\right)^2} \tag{8}$$

이때, PW_{50}은 최대 진폭의 1/2이 되는 지점의 펄스의 폭을 나타내고, 기록되는 정규화된 밀도(normalized density)는 $D=PW_{50}/T_b$로 정의한다.

MTR 코드의 특성상 천이회수 제한에 따라 '1111'과 같은 특정 데이터 시퀀스는 사라지게 된다. 이에 따라 트렐리스 상에서도 사라지는 가지 메트릭이 발생하게 된다. 따라서 MTR 코드의 경우 낮은 기록 밀도 보다 인접 심벌간의 간섭이 심해지

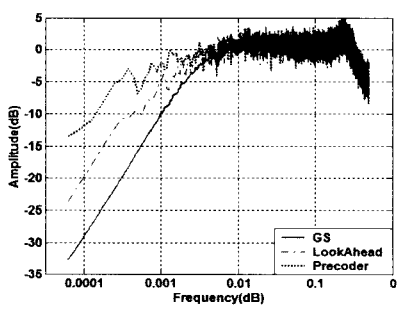

그림 5. DC-억압 방법에 따른 파워 스펙트럼

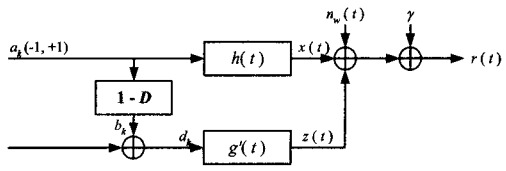

그림 4. 수직 자기 기록을 위한 비선형 채널 블록도

는 높은 기록 밀도에서 다른 기존의 코드에 비해 상당히 우수한 성능을 보이게 된다. 또한 검출기의 종류는 저장 장치의 밀도에 따라 그에 맞게 결정해야 한다. 만약 기록 밀도를 고려하지 않고 무조건 고차의 검출기를 선택한다면 오히려 낮은 기록 밀도의 경우 기존의 검출기에서 보다 낮은 성능을 보이게 될 것이다. 따라서 본 모의실험에서는 기록 밀도 $D=2.5$에서 이에 가장 적합한 EEPR4ML 검출기를 사용하였다. 그 결과 그림 6에서 보는 바와 같이 10^{-5} BER을 기준으로 본 논문에서 제시한 13/15 코드에 대한 성능이 코드율 8/9인 코드에 대한 검출 성능에 비해 상대적으로 1.5dB이상 향상된 것을 볼 수 있다. 이러한 원인은 8/9인 코드의 경우, 연속되는 천이가 최대 12비트까지 발생될 수 있기 때문에, 기록밀도가 높아질수록 인접 심벌간의 간섭이 심해져서 검출 성능의 감소를 나타내기 때문이다. 따라서 최대 천이 회수를 제한하는 MTR 코드에서 상대적으로 더 우수한 성능을 나타낼 수 있었다.

또한, 선형 수직 자기기록 채널에서는 다음과 같은 채널 모델을 사용하였다[4].

$$g(t) = A \tanh\left(\frac{2t}{0.579\pi \cdot T_{50}}\right) \qquad (9)$$

여기서 A는 재생 파형 $g(t)$의 진폭을 나타내며 T_{50}은 재생 파형의 진폭이 1/2이 되는 지점에서의 펄스의 폭을 나타낸다. 또한 정규화 선형 밀도는 $D = T_{50} / T_b$ 로 정의한다. 모의실험에서는 사용자 비트에 대한 정규화된 밀도가 1.5인 경우에 대해 PR(12321)ML 검출기를 사용하였다. 그 결과 그림 7에서 보는 바와 같이 고밀도에서 10^{-5} BER을 기준으로 본 논문에서 제시하는 13/15 코드에 대한 성능이 코드율 8/9인 코드에 비해 상대적으로 1dB 이상 성능이 향상되었다.

비선형 수직 자기기록 채널의 실험에서는 그림 5와 같이 기존의 선형 채널에 천이지터와 DC-offset이 부가된 형태로 모델링 할 수 있다. 이때, b_k, Δ_k, $n_w(t)$는 각각 천이 시퀀스, 천이 이동, AWGN

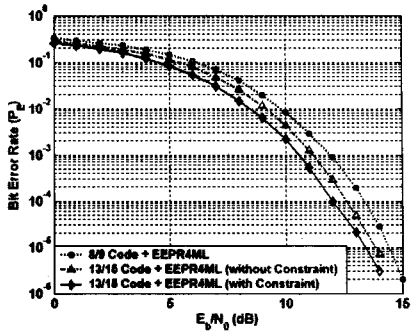

그림 6. 선형 수평 자기기록 채널의 BER

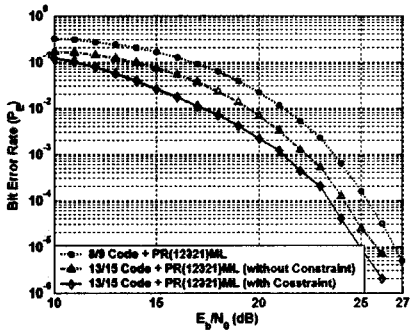

그림 7. 선형 수직 자기기록 채널에서의 BER

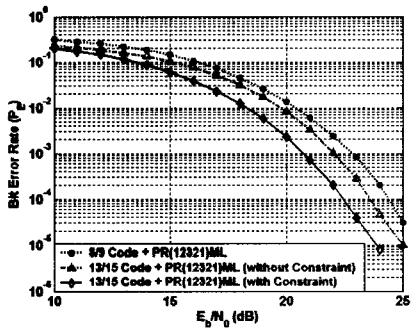

그림 8. 비선형 수직 자기기록 채널에서의 BER

을 나타낸다. DC-offset (γ)의 양은 신호 전력의 비율로 나타낸다. 따라서 비선형 채널을 통과한 재생 신호 $r(t)$는 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} r(t) &= \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_k h(t - kT_s) \\ &\quad + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_k g'(t - kT_s) + n_w(t) + \gamma \\ &= x(t) + z(t) + n_w(t) + \gamma \end{aligned} \qquad (10)$$

천이 지터로 모델화 되는 천이 이동은 a_k와 b_k가 독립인 가우시안 분포를 갖는 불규칙 변수로 가정하였다. 여기서 기록 밀도는 선형 수직 자기기록 채널에서와 마찬가지로 1.5로 하였고, PR(12321)ML 검출기를 사용하였다. 또한 천이 지터의 비율은 15%로 하였다. 그 결과, 그림 8에서 보는바와 같이 코드율 8/9인 코드에 비해 대략 2dB정도의 성능을 향상시킬 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문에서는 고밀도 자기기록 채널에서의 DC-억압과 검출 성능 향상을 위한 코드율 13/15인 새로운 MTR 코드의 코딩 방법에 대해 기술하였고, 모의 실험을 통하여 DC-억압과 검출 성능을 분석하였다. 모의 실험 결과 본 논문에서 제시한 코드를 통해 대략 -29dB의 성능을 나타냄으로써 DC-억압 능력을 만족하였고, 기존의 자기기록 채널에서 사용된 코드율 8/9인 코드와의 성능 분석에서 선형 수평 자기기록 채널에서는 1.5dB이상, 선형 수직 자기기록 채널에서는 1dB이상 성능이 향상되는 것을 확인하였다. 또한 비선형 수직 자기기록 채널에서도 2dB이상 성능이 향상되는 것을 입증하였다. 이는 새롭게 제시한 MTR 코드에서 자체적으로 최대 천이 회수를 2회로 제한함으로써 고밀도 기록 채널에서 나타나는 심벌간의 간섭을 줄여 기존에 사용되던 코드율 8/9인 코드보다 검출 성능을 향상시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 본 논문에서 제시한 코드율 13/15인 MTR(2:8) 코드는 기존의 코드율 6/7인 MTR 코드에 비해 높은 코드율을 갖으면서, DC-억압 성능을 만족한다. 그리고, 기존의 코드율 8/9인 변조 코드보다 고밀도의 자기기록 채널에서 검출 성능 또한 우수하게 나타나는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Barrett Brickner and Jaekyun Moob, "Design of rate a 6/7 maximum transition run code," *IEEE Trans. on Magn.* pp. 2794-2751, 1997.

[2] A. Schouhamer Immink, *Codes for Mass Data Storage System*, Shannon Foundation Publisher, pp. 261-265, 1999.

[3] Paul H. Siegel and Jack K. Wolf, "Modulation and Coding for Information Storage", *IEEE Communication Magazine*, pp. 68-86, 1991.

[4] H. Sawaguchi, Y. Nishida, H. Takano and H. Aoi, "Performance analysis of modified PRML channels for perpendicular recording systems," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, pp. 265-272, 2001.

이 규 석(Kyusuk Lee) 준회원

2004년 2월:동국대학교 전자공학과 학사 졸업

2004년 3월~현재:동국대학교 전자공학과 석사과정

<관심 분야> 변조코드, 검출 기법 연구

이 주 현(Joohynu Lee) 정회원

2000년 2월:동국대학교 전자공학과 학사 졸업

2002년 2월:동국대학교 전자공학과 석사 졸업

2002년 9월~현재:동국대학교 전자공학과 박사과정

<관심 분야> 채널 코딩, 검출 기법 연구

이 재 진(Jaejin Lee) 정회원

한국통신학회 논문지 제29권 1C호 참조