

# 광 기록 시스템을 위한 멀티모드 변조 코드의 DC-억압 코드 선택 방법

준회원 이 명 진\*, 이 준\*, 정회원 이 재 진\*

## DC-Suppression Selection Criteria of Multimode Modulation Code for Optical Recording

Myoung-Jin Lee\*, Jun Lee\* Associate Member, Jae-Jin Lee\* Regular Member

요 약

신뢰할 수 있는 DC-억압(DC-suppression) 방법으로 멀티모드 코딩 방법이 있다. 멀티모드 코드의 DC-억압 성능을 향상시키는 방법에는 스크램블러(scrambler)의 성능을 개선하는 방법과 후보 코드워드의 선택 기준(selection criteria)을 개선하는 방법이 있다. 후보 코드워드의 선택 기준으로 흔히 사용되는 MRDS(minimum running digital sum) 기준은 계산 및 구현이 쉬운 반면에 후보 코드워드의 길이가 길어질수록 성능이 저하되는 단점이 있다. 코드워드 길이에 무관하게 최고의 성능을 갖는 MSW(mean squared weight) 기준은 구현상의 복잡도가 높다는 단점을 가진다. 본 논문에서는 이론상으로 가장 효율이 우수한 MSW의 성능에 근접하면서, 하드웨어 구현이 용이한 MPRDS(minimum peak RDS)와 ABSRDS(absolut RDS)라는 새로운 선택 기준을 제시하였고, 기존의 선택 기준과 함께 사용 시 보조적인 역할을 하여 성능 향상을 도모할 수 있는 SC(sign change) 알고리즘을 제시하였다.

ABSTRACT

Multi-mode coding method is a reliable DC-suppression method. There are two ways to improve the DC-suppression performance. One is improving scrambler's performance, and the other is improving selection criteria. The latter uses the MRDS(minimum running digital sum) criterion. It is easy to calculate, but its performance goes down when the length of codeword is getting longer. The MSW(mean squared weight) criterion that is known as the best so far regardless of the length of codeword has the high complexity. In this paper, we present the new selection criteria, MPRDS(minimum peak RDS) and ABSRDS(absolut RDS). Their performance are close to the MSW, implementation is simple. And also we present the SC(sign change) that has a subsidiary role with the original selection criteria and improve the capacity.

### I. 서론

광 기록 저장 기기에서는 정보의 추적 및 추출이 가능하도록 하기 위해 기록되어지는 데이터 시퀀스의 저주파수 성분이 충분히 제거될 것을 요구한다. 신뢰할 수 있는 DC-억압 코딩 방법중의 하나로 멀티모드 코딩 방법이 있다.

멀티모드 코딩 방법은 약한 구속 코드에 속하는 코딩 방법으로 스크램블러와 후보 코드워드의 DC 기여도를 평가하고 코드워드를 고르는 선택기준으로 구성되어 있다. 멀티모드 코드의 DC-억압 성능은 스크램블러와 선택기준에 의해서 좌우된다.

멀티모드 코드의 DC-억압 능력을 개선하기

\* 동국대학교 전자공학과 통신 및 정보저장 연구실(zlee@dgu.ac.kr)

논문번호 : 020364-0822, 접수일자 : 2002년 8월 22일

위한 방법으로는 우수한 스크램블러를 개발하는 방법과 정교한 선택기준을 제안하는 방법이 있다. 본 논문에서는 후자에 초점을 맞추었다.

멀티모드 코드의 후보 코드워드 중에서 DC 기여도가 적다고 생각되어지는 코드워드 선택 시 가장 성능이 좋은 방법으로는 MSW[4]가 있다. 그러나, 이 방법은 하드웨어적으로 구현함에 있어서 복잡도가 매우 크기 때문에 이와 비슷한 효율성을 나타내면서도 구현이 쉬운 선택 기준들이 연구되고 있다.

본 논문에서는 구현상의 복잡도는 단순하고 성능은 MSW에 근접하는 ABSRDS, MPRDS 방법을 제안하였다. 이와 더불어 후보 코드워드 선택 시 주어진 선택기준의 조건을 만족하는 코드워드가 두 개 이상 존재할 경우 적용할 수 있는 부 선택기준인 SC방법을 제안하였다. 제안한 방법은 멀티모드 코드 디자인시 대표적으로 사용되는 가이드드 스크램블을 비롯하여 폴라리티-비트와 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코드에 적용해 그 성능을 확인하였다.

## II. 멀티모드 코딩 방법

멀티모드 코드의 기본은 소스워드  $x$ 와 그것의 선택집합(selection set)  $C_x$  사이의 1-대- $L$  가역대응(one-to- $L$  invertible mapping)이다. 멀티모드 코드의 인코딩 블록도를 그림 1에 나타내었다. 스크램블러에 의한 가역대응은 선택집합이 충분히 랜덤(random)한 코드워드를 포함하도록 해야하며,  $C_x$ 는 DC 기여도가 충분히 구별되는 코드워드를 포함하고 있어야 한다.

이렇게 형성된 선택집합  $C_x$ 에서 DC-역압 성능이 우수하다고 생각되어지는 코드워드를 골라내는 선택 기준 또한 멀티모드 코드의 성능

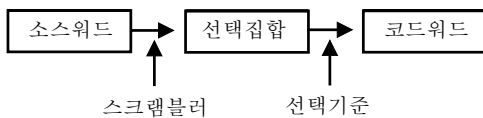


그림 4. 멀티모드 코드의 인코딩 블록도를 좌우하는 중요한 요소이다.

### 1. 가이드드 스크램블

가이드드 스크램블은 멀티모드 코드를 디자인하기 위한 가장 좋은 방법으로 각 소스워드

$x$ 는  $L$ 개의 후보 코드워드로 구성된 선택집합  $C_x$ 중 한 구성원에 의해 표현된다. 인코더 쪽에서는 소스워드를 랜덤한 경향을 가진 후보 코드워드로 변환하기 위한 기법과 그로 인해 생성된 후보 코드워드에 대한 DC-역압 성능을 판단하기 위한 기법만이 필요하다.

소스워드  $x=(x_1, \dots, x_m)$ 를 후보 코드워드로 변환하기 위한 중간과정으로서 식 (1)과 같이 중간 집합(intermediate set)  $B_x=\{b_1, \dots, b_L\}$ 을 만들기 위해 길이가  $r$ 인 모든 가능한 이진 시퀀스를 소스 워드 앞에 삽입한다.

$$\begin{aligned} b_1 &= (0_1, \dots, 0_{r-1}, 0_r, x_1, \dots, x_m) \\ b_2 &= (0_1, \dots, 0_{r-1}, 1_r, x_1, \dots, x_m) \\ &\vdots \\ b_L &= (1_1, \dots, 1_{r-1}, 1_r, x_1, \dots, x_m) \end{aligned} \quad (1)$$

선택집합  $C_x=\{c_1, \dots, c_L\}$ 는 중간집합  $B_x$ 에서 모든 벡터들의 스크램블링에 의해 얻어진다. 일반적으로 스크램블러 다항식(scrambler polynomial)은 입력에 대한 지연된 상태가 쉬프트 레지스터 입력으로 궤환(feedback)되는 형태로 식 (2)와 같이 표현하며, 본 논문에서는 스크램블러 다항식으로  $x^7+x+1$ 을 적용하였다.

$$p(n) = x^s + \sum_{k=1}^s a_k x^{s-k} \quad (2)$$

이때,  $a_k \in \{0, 1\}$ ,  $k=1, \dots, s$  이고, 스크램블러 계수(coefficients)라 한다. 스크램블러에 의해 발생하는 시퀀스는 주기적이며, 주어진 시프트 레지스터의 길이  $s$ 에 대해, 주기는 최대  $2^s-1$ 까지 될 수 있다.

스크램블러는 식 (3)을 이용하여 각각의 벡터  $b=(b_1, \dots, b_{r+m}) \in B_x$ 를  $c=(c_1, \dots, c_{r+m})=f(b) \in C_x$ 로 변환시킨다. 여기서  $A$ 는  $a_k=1$ 일 때의 정수  $k$ 에 대한 집합이다.

$$c_i = b_i \oplus \sum_{k \in A} c_{i-k} \quad (3)$$

이 때,  $C_x$ 의 코드워드 중 DC 기여도가 가장 작은 코드워드가 전송된다. 수신쪽에서는

$b=f^{-1}(c)$ 인 역의 연산(inverse operation)을 수행하고, 처음의  $r$ 비트를 삭제함으로써 소스 워드를 복원한다.

### 2. 폴라리티 비트

폴라리티-비트를 이용한 인코딩 방법은 두 단계에 의해서 수행이 된다. 후보 코드워드  $C_x$  는 소스워드  $x$ 에 DC-억압을 위한 잉여비트 삽입에 의해 형성된다. 삽입한 잉여비트는 0 또는 1이 될 수 있으며, 소스워드 맨 앞에 붙게 된다. 잉여 비트가 1이라는 것은 소스워드의 모든 0의 원소는 1로, 모든 1의 원소는 0으로 컨버전 (conversion)하라는 것을 의미한다. 결과적으로 소스워드 한 개당 두 개의 후보 코드워드로 구성된 선택집합이 생성되어 진다. 선택집합 중 DC-억압 능력이 우수한 코드워드를 판단해서 내보내면 된다.

디코딩 방법은 코드워드에서 앞의 한 비트를 살펴본 후 0일 경우는 컨버전 과정을 거치지 않고, 1일 경우에는 컨버전 과정을 거친 후 앞의 한 비트 제거를 통해 소스 워드를 얻을 수 있다.

### 3. 하다마드 매트릭스

지수가  $n$ 인 하다마드 매트릭스의 모든 원소(entry)는 -1과 1로 구성이 되며 식 (4)를 만족한다.

$$HH^T = nI \quad (4)$$

지수  $n$ 에 대한 정의는 아직까지 명확하지 않지만,  $n$ 은 1, 2, 4 또는 4의 배수이어야 한다[2]. 하다마드 매트릭스의 형성 방법 중에는 Copeland & Tezcan이 제안한 Fast(Walsh-)Hadamard Transform (FHT)이 있다[3]. 이 방법은 계산의 복잡도를 상당히 줄인 방법으로 지수  $n$ 을 가지는 하다마드 매트릭스의 원소들은 식 (5)와 같이 표현된다.

$$h_n[i, j] = (-1)^{\sum_{k=1}^n i_k j_k} \quad (5)$$

여기서  $i_k$ 와  $j_k$ 는 정수  $i$ 와  $j$ 의 이진수(binary)를 의미하며,  $i_k \in \{0, 1\}$   $j_k \in \{0, 1\}$  이다. 이 방법에 의한  $n=4$ 일 때의 하다마드 매트릭스는 식 (6)과 같다.

$$H_4 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

식 (5)에 의해 형성된 하다마드 매트릭스의 지수  $n$ 은 정의한 것과 같이 1, 2, 4 또는 4의 배수이어야 한다. 지수  $n$ 과 개수가 같은 소스워드  $x = (x_1, \dots, x_n)$ 를 하다마드 매트릭스를 사용해 멀티모드 코드를 만들기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요하다.  $x_{-1}$ 을  $x$ 의 모든 0의 원소를 -1로 바꾸어준 것이라 정의하자. 중간 집합  $B_x^T = [b_1, \dots, b_n]$ 는 식 (7)와 같이 정의 된다.

$$B_x = H_n \circ (x_{-1})^T \quad (7)$$

식 (7)에서 연산기호  $\circ$ 는 식 (8)로 정의된다.

$$b_k = h \circ (x_{-1})^T = (h_1 x_1, \dots, h_r x_n), \quad k=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

식 (7)에 의해 형성된 중간 집합  $B_x$ 에 디코딩을 할 수 있도록 하다마드 매트릭스의 행 정보를 첨가 해야한다. 행 정보 첨가 비트수  $r$ 은 식 (9)와 같다.

$$r = \log_2(n) \quad (9)$$

행 정보 첨가 비트를  $B_x$  앞에 첨가해 식 (10)과 같이 선택집합  $C_x$ 를 형성하고, 이 중에서 DC-억압 성능이 좋은 코드워드가 선택되어 전송되어 진다.

$$C_x = \begin{bmatrix} 0_1 \cdots 0_{r-1} 0_r & b_1 \\ 0_1 \cdots 0_{r-1} 1_r & b_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1_1 \cdots 1_{r-1} 1_r & b_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

디코딩 방법은 코드 열 앞에 첨가된 행 정보를 이용해 하다마드 매트릭스의 몇 번째 행이 선택되어졌는지를 알아내고 선택된 행과 행 정보 비트를 떼어낸 코드열을 식 (8)의 연산을 통해 소스워드를 얻을 수 있다.

### III. DC-제어 방법

선택집합  $C_x$ 에서 코드워드를 선택하는 기준으로 어느 것을 사용하느냐는 DC-억압의 성능을 좌우할 수 있는 매우 중요한 요인이다. 가장 간단한 선택 방법으로는 각 인코딩된 시퀀스의

끝단에서 RDS 값을 비교하여 결정하는 MRDS [4] 방법이 있다. 하지만, 이 방법은 시퀀스의 길이가 길어질수록 성능이 급격하게 떨어진다.

DC-제어를 위한 또 다른 기준으로는 코드워드의 각 비트 위치에서 RDS 값을 제공한 후 해당 시퀀스의 마지막 비트까지 모두 합하여 가장 작은 값을 갖는 시퀀스를 선택하는 MSW 방법이 있다. 이 기준은 현재 가장 성능이 좋은 방법으로 알려져 있지만, 구현상의 복잡도가 매우 높다. 따라서, 본 논문에서는 제공의 연산을 없애 구현상의 복잡도를 줄이고, 성능은 MSW에 근접하는 ABSRDS 및 MPRDS와 후보 코드워드 선택시 주어진 선택기준의 조건을 만족하는 코드워드가 두 개 이상 존재할 경우 적용할 수 있는 부 선택 기준인 SC 방법을 제시한다.

1. ABSRDS

ABSRDS는 MSW 계산 방법과 매우 유사한 방법이며, MSW의 단순화된 버전이다. MSW 계산 방법과의 차이점은 코드워드의 각 비트 위치에서 RDS의 제공이 아닌 RDS의 절대값을 취한다는 점이다. MSW와 마찬가지로 이러한 절대값들을 해당 시퀀스의 마지막 비트까지 모두 합하여 가장 작은 값을 갖는 시퀀스를 선택하는 방법이다.

2. MPRDS

DSV가 작은 값을 가지려면 RDS가 0의 근처에서 유지되는 것이 좋다. RDS가 0의 근처에서 유지되려면 0에서 멀어지는 RDS 절대치의 최대값이 작을수록 유리하다. 이러한 생각을 바탕으로 제안한 MPRDS는 코드워드의 각 비트 위치에서 RDS 값의 절대값을 취한 후 해당 시퀀스의 마지막 비트까지 모두 조사하여 최대의 절대값 하나를 기억하고, 그 최대의 절대값들 중에서 가장 작은 값을 갖는 시퀀스를 선택하는 방법이다

3. SC

코드워드를 비교하고 선택하는 기존의 방식은 코드워드 선택에서 비교하고자 하는 값이 동일한 후보 코드워드가 여러 개 존재할 경우 임의의 하나를 선택했다. 이는 선택집합  $C_x$ 에서 선택된 코드워드보다 DC-제어 측면에서 성능이 더 좋은 코드워드를 선택할 수 있는 가능

성이 남아 있음을 시사한다.

DSV가 작은 값을 가지기 위해서는 RDS의 값들은 0의 값에서 크게 벗어나지 않아야 하며, RDS의 값은 +와 -값을 좀 더 많이 번갈아 가며 가져야 할 것으로 생각된다. 따라서, DC-억압 성능이 좋은 코드워드는 RDS 상에서 좀 더 많은 부호의 변화(sign change)가 일어날 것이다.

제안한 부(sub) 선택 기준 SC(sign change)는 주(main) 선택 기준방법에 의해 비교하고자 하는 값들이 동일한 후보 코드워드가 여러 개 존재할 경우, 그 중에서 좀 더 DC-기여도가 적은 즉, 더 많은 부호의 변화가 있는 시퀀스를 선택하는 방법이다. 부 선택 기준은 MRDS, MSW, ABSRDS, MPRDS의 보조 역할을 한다.

IV. 실험 결과

본 실험에는 제안된 ABSRDS, MPRDS 방법과 기존에 제안된 MRDS, MSW를 가지고 가이드드 스크램블과 폴라리티-비트 그리고 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코딩 방법에 적용하였다. 그 결과 DC-억압 효율로 새롭게 제안된 DC-제어 방법인 ABSRDS, MPRDS의 성능이 MSW에 못지 않게 뛰어난을 확인하였고, 제안한 부 기준 방법인 SC(sign change)도 주 기준 방법들과 함께 쓰일 경우 DC-억압의 효과가 있음을 PSD를 통해 확인하였다.

가이드드 스크램블과 폴라리티-비트를 이용한 멀티모드 코드의 DC-억압 효율 비교시 잉여비트의 비는 1/46이고, 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코드는 지수가  $2^k(k=4, \dots, 9)$ 인 것을 사용해 DC-억압 효율을 조사하였다. DC-제어 효율  $E$ 는 근사화된 식 (11)이 사용되었다[1].

$$E = \frac{0.2326}{s^2(1-R)} \tag{11}$$

여기서  $R$ 은 잉여비트율이고,  $s^2$ 은 총합의 편차(sum variance)이며 식 (12)와 같고,  $z_i$ 는 RDS이다. 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코드의 잉여비트율은 하다마드 매트릭스의 지수  $n$ 에 의해 가변적이다.

$$s^2 = E\{z_i^2\} \tag{12}$$

$n = 396(4 \times 99)$ ;  $n$ 은 4의 배수일 경우 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코드의 잉여비트

표 1. 잉여 비트 수가 9일 때 DC 제어 효율 비교

기준(criterion)	DC 제어 효율		
	가이드드 스크램블 잉여비트율=9	폴라리티 비트 잉여비트율=9	하다마드 매트릭스 잉여비트율≈9(n=396)
MRDS	0.146	0.037	0.159
MSW	0.947	0.526	0.936
ABSRDS	0.924	0.501	0.899
MPRDS	0.809	0.441	0.790
MRDS/SC	0.379	0.063	0.169
MSW/SC	0.947	0.526	0.936
ABSRDS/SC	0.924	0.502	0.900
MPRDS/SC	0.858	0.450	0.795

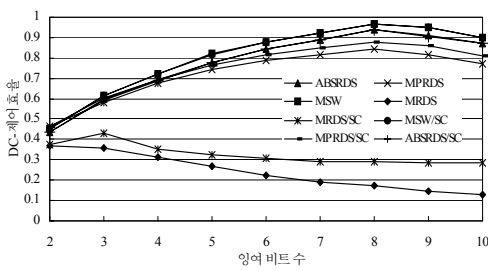


그림 2. 잉여비트율=1/46일 때 가이드드 스크램블을 이용한 멀티모드 코드의 DC-억압 효율

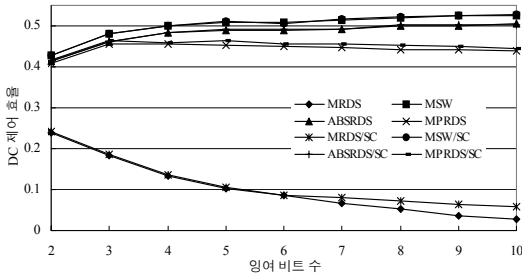


그림 3. 잉여비트율=1/46일 때 폴라리티-비트를 이용한 멀티모드 코드의 DC-억압 효율

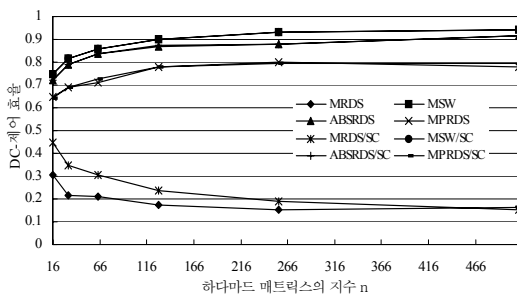


그림 4. 잉여비트율=  $n/(2^n + n)$  일 때 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코드의 DC-억압 효율

표 2. 잉여비트 수=6일 때 폴라리티-비트의 효율 차이

기준(criterion)	DC-제어 효율 차이
MRDS와 MRDS/SC	0.014991
MSW와 MSW/SC	0.000954
MPRDS와 MPRDS/SC	0.00948

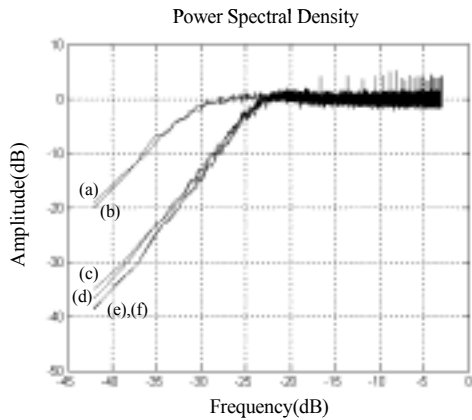


그림 5. 잉여비트수=6일 때 폴라리티-비트를 이용한 멀티모드 코드에서 DC-제어 방법에 따른 비교 (a)MRDS (b)MRD S/SC (c)MPRDS (d)MPRDS/SC (e)MSW (f)MSW/SC

율은 1/46과 유사해지며, 이 경우 하다마드 매트릭스의 잉여비트의 수는  $\log_2(396) = 8.63 \approx 9$ 가 된다. 표 1은 그림 2,3,4에서 잉여비트의 수가 9일 때 DC-제어 효율을 나타낸 것이다.

표 1을 통해 가이드드 스크램블을 이용한 멀티모드 코드의 DC-억압 능력이 우수함을 확인할 수 있다. 그림 4에서 하다마드 매트릭스의 지수  $n$ 이 작을 경우 DC-제어 효율이 우수하게 나오는 것은 잉여비트율 증가에 의한 것이다.

표 1을 통해 DC-제어 방법으로 새롭게 제시한 ABSRDS와 MPRDS의 성능이 우수함을 확인할 수 있다. 그러나, 그림 2, 3, 4에는 MSW

와 MSW/SC, ABSRDS와 ABSRDS/SC가 거의 겹쳐 있다. 이는 주 선택 기준과 더불어 제안한 SC가 사용되어도 성능 이득이 매우 미세함을 보여준다.

따라서, SC의 성능을 확인하기 위해 SC의 성능 이득이 거의 매우 미세한 폴라리티-비트를 이용한 멀티모드 코딩 방법에서 잉여비트의 수가 6일 경우 MRDS, MSW, MPRDS와 MRD S/SC, MSW/SC, MPRDS/SC의 PSD를 그림 5에 나타내었다. 이 경우 DC-제어 효율의 차이는 표 2와 같이 미세하지만 그 미세한 차이를 PSD(Power Spectrum Density)를 통해서 확인한 결과 1dB~2dB 정도의 이득을 얻을 수 있음을 확인하였다. 그림 5에서 MSW/SC가 MSW에 비해 이득을 보이지 않고 거의 같게 나온 것은 MSW 방법에 의해 선택된 코드워드와 동일한 비교값을 가지는 다른 코드워드가 존재하는 경우가 드물어 SC가 쓰이는 경우가 적음을 의미한다.

### V. 결론

가이드드 스크램블과 폴라리티-비트 그리고 하다마드 매트릭스를 이용한 멀티모드 코딩 방법의 DC-억압 효율을 기존에 있는 MRDS, MSW와 제안된 ABSRDS, MPRDS 방법을 이용해 비교한 결과 새롭게 제안된 DC-제어 방법인 ABSRDS, MPRDS의 성능이 MSW에 못지않게 뛰어난함을 확인하였고, SC 또한 DC-제어 방법들과 함께 쓰일 경우 PSD를 통해 DC-억압의 효과가 있음을 확인하였다.

### 참고문헌

[1] K. A. S. Immink, Codes for Mass Data Storage Systems, Shannon Foundation Pub., 1999.  
 [2] S. B. Wicker, Error Control Systems for Digital Communication and Storage, Prentice Hall International, Inc., pp. 129-135, 1995.  
 [3] G. Copeland and B. Tezcan "Disparity and Transition Density Control System and Method", U.S. Patent 6,304,196, Oct. 2001.

[4] K. A. S. Immink and L. Patrovics, "Performance assessment of DC-free multimode code," IEEE Trans. on Commun, vol. COM-45, no. 3, pp. 293-299, March 1997.

이 명 진(Myoung-Jin Lee)

준회원



2002년 2월 : 동국대학교 전자공학과 학사  
 2002년 3월 ~ 현재 : 동국대학교 전자공학과 석사

<주관심분야> PLL, 검출기

이 준(Jun Lee)

준회원



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

<주관심분야> 기록저장시스템 및 채널 코드(R SPC, Turbo Code)

이 재 진(Jae-Jin Lee)

정회원



통신학회논문지 제 27권. 제 1A호 참조.