

하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템

正會員 朴 珍 培*, 康 彰 植**, 朱 鎮 晚*

Optical Code Division Multiple Access System Utilizing Hadamard Transforms

Jin Bae Park*, Chang Sig Kang**, Jin Man Joo* *Regular Members*

※본 연구는 정보통신부 대학기초연구지원 사업 연구비에 의한 결과임.(과제번호 : 96097-CT-12)

요 약

본 논문에서는 하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템을 제안한다. 제안된 시스템은 하다마드 변환에 의해 광부호를 생성하는 광부호기와 하다마드 역변환을 통해 정보를 복원하는 광복호기로 구성되며 광부호화 과정 및 광복호화 과정은 개폐 특성을 갖는 하다마드 마스크에 의해 구현된다. 본 논문에서 제안하는 하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템은 하다마드 마스크의 광학적 특성(on/off)을 이용하기 때문에 시스템 전체가 광학적으로 구현되며 병렬처리가 가능하여 신속한 데이터 전송을 할 수 있다는 장점을 갖는다.

ABSTRACT

In this paper, the optical Code Division Multiple Access(CDMA) system utilizing Hadamard transforms is proposed. The proposed system consists of an optical encoder which generates the optical encoded signal in the Hadamard transform and an optical decoder which detects the specific user's data in the inverse Hadamard transform. A Hadamard mask is used for the proposed encoder and decoder. Because the proposed optical CDMA system use the on/off property of the Hadamard mask, it has merits of being systematically optical and providing fast data transmissions due to optical parallel processing.

I. 서 론

광부호 분할 다중 접속 시스템(Optical Code Division Multiple Access; Optical CDMA)은 90년대초 J. A. Salehi 등에 의해 제안된 시스템[1-3]으로 광채널 상에서 여러 사용자가 동시에 접속하여 통신하는 시스템을 말한다. Optical CDMA는 부호를 할당하는 영역

*연세대학교 전기공학과
**삼성전자 반도체사업부
論文番號:97266-0731
接受日字:1997年 7月 31日

에 따라 시간적(temporal) Optical CDMA[4, 5], 시·공간적(temporal/spatial) Optical CDMA[6, 7]와 스펙트럼적(spectral) Optical CDMA[8]로 나눌 수 있다. 시간적 Optical CDMA에서는 시간축 상에서 광 탭 지연선을 이용하여 부호화 및 복호화를 수행하는데 많은 사용자의 다중 접속에 필요한 광부호를 생성하기 위해서는 광 탭 지연선 길이의 연장이 대단히 크기 때문에 시스템 성능이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 공간적 Optical CDMA에서는 다중 경로 즉 여러 개의 광섬유를 통해 부호화를 시행한다. 시간적 개념과 공간적 개념을 접목한 시·공간적 Optical CDMA에서는 시간적 Optical CDMA의 단점을 공간적 개념인 여러 가닥의 광섬유 사용으로 극복할 수 있으나 여러 가닥의 광섬유를 사용해야 한다는 비용적인 단점을 가지고 있다. 스펙트럼적 Optical CDMA는 위상 마스크를 이용하여 주파수축 상에서 부호화를 수행하는 시스템으로서 위상 마스크의 랜덤한 위상 전이를 통해 광원 신호를 부호화하고 이에 상응되는 상관 검출기를 통해서 복호화를 수행한다. 스펙트럼적 Optical CDMA인 경우 위상 마스크의 정렬에 있어 상당한 기술이 요구되므로 하드웨어 설계에 어려움이 있다.

본 논문에서는 시간적 Optical CDMA의 부호 길이 연장 문제와 공간적 Optical CDMA에서의 다중 경로 문제 및 스펙트럼적 Optical CDMA의 하드웨어 문제를 극복하기 위해서 하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템을 제안하고자 한다. 하다마드 변환은 하다마드 마스크를 이용하여 구현되며 하다마드 마스크는 개폐(on/off) 특성을 갖는 광학 장치 [9-11]로서 마스크 제어 신호에 의해 제어된다. 하다마드 마스크를 이용한 광부호화 과정은 광원 신호의 스펙트럼에 S 행렬(simplex matrix)부호를 곱하는 하다마드 변환으로 표현되며 마스크의 출력값인 광부호는 주파수 개폐 키잉 변조(frequency on/off keying)된 신호 형태를 갖는다. 복호화 역시 부호화와 마찬가지로 하다마드 마스크를 사용하는데 복호화 과정에서의 정보 복원은 하다마드 마스크에 의한 하다마드 역변환으로 표현되며 특정 주파수 대역의 반송파 성분만을 추출하는 광필터링 과정으로 특징지어진다. 하다마드 역변환에 의한 정보 복원 과정은 특정 사용자 신호의 세기와 전체 신호 세기의 비교로 나타난다.

본 논문에서는 제안된 시스템의 구조 및 동작 특성을 분석하고 광부호의 신호대 잡음비를 구하여 전체 시스템의 비트 오류율을 구한다. 또한 다중 접속 가능한 최대 사용자 수를 결정하는 마스크 셀의 갯수와 비트 오류율과의 관계를 모의실험을 통해 알아본다.

II. 하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템 구조

1. 하다마드 마스크

1) 하다마드 마스크의 구조

제안된 시스템은 하다마드 마스크에 의해 동작한다. 그림 1은 하다마드 마스크의 구조를 보이고 있다. 하다마드 마스크는 PDLC(polymer-dispersed liquid crystal)를 재료로 사용한 전자광학 마스크[15]로서 마스크 셀의 개폐(on/off)는 마스크 제어 신호(전압 인가 여부)에 의해 결정된다. 마스크 제어 신호가 '1'인(전압 인가) 경우 마스크 셀은 투과 상태가 되며 제어 신호가 '0'인(전압 불인가) 경우 마스크 셀은 비투과 상태가 된다. 분광기에 의해 분광된 분광 신호(스펙트럼)은 마스크 셀의 개폐 여부에 의존하므로 결국 마스크 제어 신호 '1'이 인가된 셀만을 통과한 빛이 렌즈를 통해 모여지게 된다.

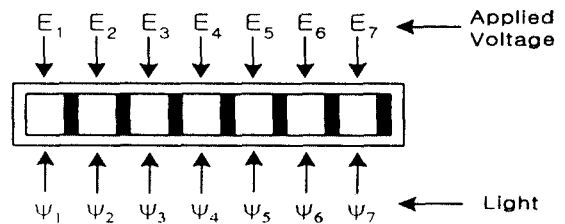


그림 1. 하다마드 마스크의 구조
Fig. 1. The Structure of a Hadamard mask

2) 마스크 제어 신호

본 논문에서 마스크 제어 신호로는 S 행렬 부호를 사용한다. S 행렬 부호는 S 행렬의 각각의 열을 의미한다. S 행렬은 하다마드 행렬의 첫 번째 열과 첫 번째 행을 제거하고 단위요소 '1'을 '0'으로 '-1'을 '1'로 바꾸어 만든 행렬로서 길이가 M인 하다마드 행렬을 사용할 경우 S 행렬의 길이는 M-1=N이 되며 열의

갯수 역시 $M-1=N$ 이 된다. S 행렬 부호는 식 (1)와 같은 직교성을 갖는다.

$$\langle S_i, S_j \rangle = \begin{cases} \frac{M}{2} & (i=j) \\ \frac{M}{4} & (i \neq j) \end{cases} \quad (1)$$

S 행렬 부호는 자기 상관값(auto-correlation)은 하다마드 행렬 길이의 $\frac{1}{2}$ 이 되며 교차 상관값(cross-correlation)은 항상 하다마드 행렬 길이의 $\frac{1}{4}$ 이 된다.

단위요소가 모두 '1'인 행렬 부호를 전투과 부호(all pass code) S_0 로 나타내면 전투과 부호는 S 행렬 부호의 합으로 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며 S 행렬 부호와의 교차 상관값은 식 (3)과 같다.

$$S_0 = \frac{2}{M} \sum_{i=1}^{M-1} S_i \quad (2)$$

$$\langle S_0, S_i \rangle = \frac{M}{2} \quad (3)$$

2. 제안된 시스템 시스템의 구조

하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템의 구조는 그림 2와 같다.

그림 2에서 광부호기(optical encoder)와 광복호기(optical decoder)는 기본적으로 전자광학 마스크로 구성된다.

1) 제안된 광부호기의 구조

제안된 광부호기는 그림 3과 같이 광원, 분광기, 전자광학 마스크, 마스크 제어 신호 발생기와 렌즈로 구성된다. 광원 신호는 입력 신호(전송하고자 하는 디지털 정보)에 따라 발생되며 분광기를 통과하게 되면 파장(주파수)별 굴절율의 차이에 의해 분광되게 된다. 마스크 제어 신호 발생기는 마스크 셀의 on/off 상태를 결정하는 전기 신호를 발생시키며 발생된 마스크 제어 신호는 전자광학 마스크를 부호화시킨다. 렌즈는 마스크를 통과한 분광 신호를 광섬유로 모으는 역할을 한다. 광부호는 여러 주파수 성분들로 구성된 다중 반송파(multi carrier) 형태를 띠고 있으며 마스크에 의해 주파수 개폐를 결정하므로 반송파간의 간섭현상(intercarrier interference)이 없다는 특징을 갖는다.

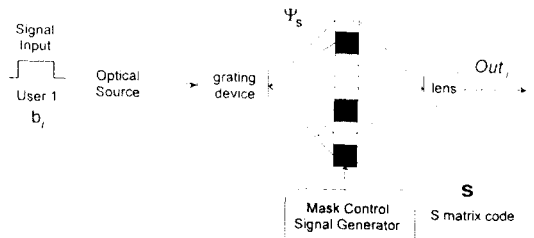


그림 3. 제안된 광부호기의 구조
Fig. 3. The structure of the proposed encoder

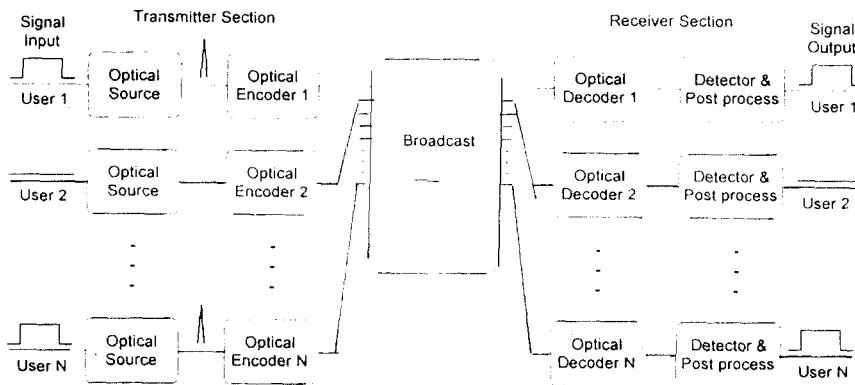


그림 2. 제안된 시스템의 구조
Fig. 2. The structure of the proposed system

2) 제안된 광복호기의 구조

제안된 광복호기는 그림 4와 같이 분광기, 전자광학 마스크, 마스크 제어 신호 발생기, 렌즈와 광검출기로 구성된다. 광복호기의 입력 신호는 광채널 신호이며 분광기를 통해 특정 주파수 반송파는 각각 해당 마스크 셀에 정렬된다.

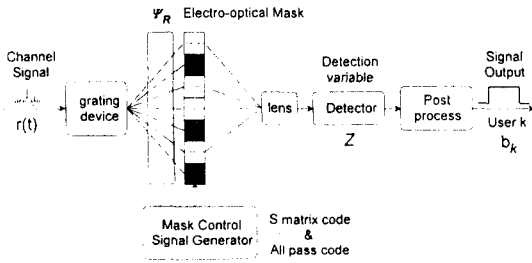


그림 4. 제안된 광복호기의 구조
Fig. 4. The structure of the proposed decoder

복호화 과정에서의 하다마드 마스크는 하다마드 역변환을 수행하는 장치이며 하다마드 역변환은 특정 사용자 신호의 세기를 측정하는 과정과 전체 신호의 세기를 측정하는 과정으로 나눌 수 있다. 광검출기(photodetector)는 마스크 출력값의 세기를 측정하는 장치이다. 복호화 과정은 마스크 제어 부호에 의해 부호화된 마스크를 통과한 신호들 즉 마스크에 의해 광필터링된 신호들의 세기를 광검출기에서 검출하는 광필터링 과정과 필터링된 값들의 비교 과정인 판단 과정으로 나타난다.

Ⅲ. 하다마드 변환을 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템 동작 특성

1. 광부호화 과정

단일 반송파 신호가 대역 제한된 스펙트럼을 갖는다고 가정하면 단일 반송파 신호의 스펙트럼은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$A_n(\omega) = \frac{\sqrt{P_0}}{W} \{ \prod(-\omega_n, \Omega) + \prod(\omega_n, \Omega) \} \quad (4)$$

여기서, $\prod(a, b) = \prod((\omega - a)/b)$, $\omega_n = (2n - 1)\Omega$ 를 나타내고 Ω 는 칩폭(chip width)이다. P_0 는 피크 전력을

나타내며 W 는 식 (5)를 만족시키는 값으로 광원 신호의 대역폭을 의미한다.

$$W = 2N\Omega \quad (5)$$

식 (4)의 역푸리에 변환을 통해 시간축 상의 단일 반송파 신호는 식 (6)과 같이 쓸 수 있다.

$$a_n(t) = \frac{\sqrt{P_0}}{N} \text{sinc}(\omega_n t) \cos \omega_n t \quad (6)$$

여기서 $\text{sinc}(x) = \sin x/x$ 를 의미한다.

단일 반송파 신호의 에너지는 Parseval 정리에 의해 식 (7)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} E_{a_n} &= \int_{-\infty}^{\infty} |a_n(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |A_n(\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{P_0}{WN} = \frac{E_S}{N} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $E_S = P_0/W$ 로서 광원 신호의 에너지를 의미한다.

따라서 전체광원 신호는 서로 다른 주파수 대역을 사용하는 여러 개의 단일 반송파의 합으로 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} A(\omega) &= \sum_{n=1}^N \frac{\sqrt{P_0}}{W} \{ \prod(-\omega_n, \Omega) \prod(\omega_n, \Omega) \} \\ &= \frac{\sqrt{P_0}}{W} \prod\left(\frac{\omega}{W}\right) \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)를 역푸리에 변환을 하게 되면 식 (9)와 같이 시간축상의 광원 신호를 구할 수 있다.

$$a(t) = \sqrt{P_0} \text{sinc}\left(\frac{W}{2}t\right) \quad (9)$$

광원 신호의 에너지는 Parseval 정리에 의해 식 (10)과 같다.

$$\begin{aligned} E_S &= \int_{-\infty}^{\infty} |a(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |A_S(\omega)|^2 d\omega \\ &= \frac{P_0}{W^2} \times 2N\Omega = \frac{P_0}{W} \end{aligned} \quad (10)$$

광원 신호는 식 (11)과 같이 벡터 표기로 표현할 수 있다.

$$A(\omega) = \langle S_0, \Psi_S \rangle \quad (11)$$

여기서 Ψ_S 는 광원 신호 스펙트럼의 벡터 표기로서 식 (12)와 같다.

$$\Psi_S = [A_1(\omega) A_2(\omega) \dots A_N(\omega)]^T \quad (12)$$

Ψ_S 의 역푸리에 변환에 해당하는 신호를 $\psi_S(t)$ 라 하면, $\psi_S(t)$ 는 식 (13)과 같다.

$$\psi_S(t) = [a_1(t) a_2(t) \dots a_N(t)]^T \quad (13)$$

광원 신호는 마스크 제어 신호로 진부와 부호를 사용한 반면에 광부호는 마스크 제어 신호로 S 행렬 부호를 사용한다. 그림 5에서는 우반면의 칩으로 길이가 7인 S 행렬의 5번째 부호를 사용하였을 때의 부호

화된 스펙트럼을 보여주고 있다. 광부호의 스펙트럼을 $A_c(\omega)$ 라 할 때 $A_c(\omega)$ 는 식 (14)와 같이 나타난다.

$$A_c(\omega) = \langle S, \Psi_S \rangle \quad (14)$$

광부호 스펙트럼의 시간축 상의 신호를 $C(t)$ 로 나타내면 $C(t)$ 는 식 (14)의 역푸리에 변환을 통하여 식 (15)와 같이 나타난다.

$$C(t) = \langle S, \psi_S(t) \rangle \quad (15)$$

마스크 제어 부호로 S 행렬 부호를 사용할 경우 투과 상태를 나타내는 마스크 셀은 S 행렬 부호의 가중치 (1의 갯수)만큼 생기므로 결국 광부호의 에너지는 식 (16)과 같이 광원 신호 에너지의 약 50%가 된다.

$$E_c = \int_{-T}^T |a_c(t)|^2 dt = \int_{-\Omega}^{\Omega} |A_c(\omega)|^2 d\omega \quad (16)$$

$$= \frac{P_0}{W^2} \times 2\Omega = \frac{M}{2} = \frac{P_0 M}{2N} \approx \frac{E_S}{2}$$

광부호는 접합기에 의해 광채널로 모여지게 되며 이때의 광채널에 모여진 신호를 광채널 신호 $r(t)$ 로 나타내면 $r(t)$ 는 식 (17)과 같다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^N b_i \cdot \langle S_i, \psi_S(t) \rangle \quad (17)$$

여기서 b_i 는 각 사용자의 전송 정보를 나타내며, S_i 는 각 사용자의 인식 부호로서 할당된 마스크 제어 부호인 S 행렬 부호를 의미한다.

2. 광복호화 과정

복호기에서의 분광기는 입력 신호 즉 광채널 신호로부터 광채널 신호의 스펙트럼을 얻는데 이용되며 광채널 신호의 분광 신호를 벡터 표기 $\psi_R(t)$ 로 나타낼 때 $\psi_R(t)$ 는 식 (18)를 만족시킨다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^N \langle S_0, \psi_R(t) \rangle \quad (18)$$

$\psi_R(t)$ 의 n번째 단위 요소 $\psi_{Rn}(t)$ 은 광채널 신호에 주파수 ω_n 를 갖는 반송파를 의미하며 그 광학적 강도를 Ψ_{Rn} 이라 나타내면 Ψ_{Rn} 는 식 (19)와 같다.

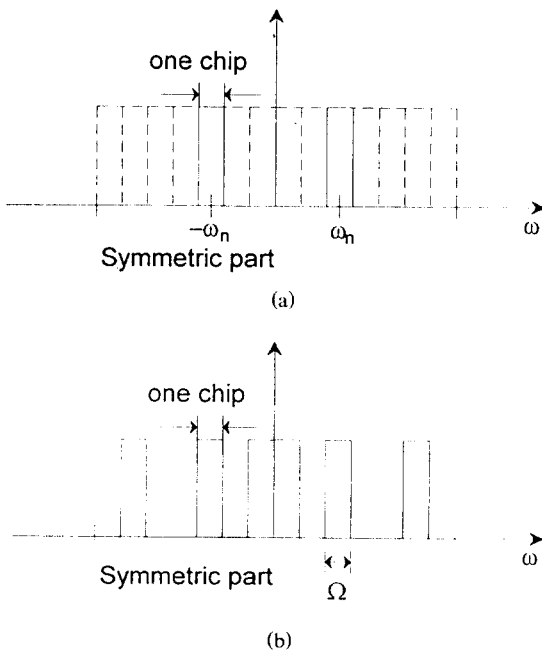


그림 5. 스펙트럼

(a) 단일 반송파의 스펙트럼

(b) 광부호의 스펙트럼

Fig. 5. Spectrum

(a) Spectrum of single carrier signal

(b) Spectrum of an optical encoded signal

$$\begin{aligned} \Psi_{Rn} &= \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_i(n) | \psi_{S_n}(t) | \\ &= \frac{\sqrt{P_0}}{N} \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_i(n) \end{aligned} \quad (19)$$

광채널 신호는 분광기를 통해 식 (20)과 같은 Ψ_R 의 광학적 크기를 갖는 스펙트럼으로 분광된다.

$$\begin{aligned} \Psi_R = [\Psi_{Rn}] &= \frac{\sqrt{P_0}}{N} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_i(1) \\ \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_i(2) \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^N b_i \cdot s_i(N) \end{bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{P_0}}{N} \mathbf{S} \mathbf{B} \end{aligned} \quad (20)$$

여기서 \mathbf{S} 는 $N \times N$ 인 행렬을 나타내며, \mathbf{B} 는 $N \times 1$ 인 데이터 벡터로서 식 (21)과 같으며 각각의 단위요소는 각 사용자의 전송 정보를 의미한다.

$$\mathbf{B} = [b_1 \ b_2 \ \dots \ b_N]^T \quad (21)$$

하다마드 역변환은 식 (22)와 같으므로

$$\mathbf{S}^{-1} = \frac{2}{M} (2\mathbf{S} - \mathbf{J}) \quad (22)$$

복원 정보의 벡터 표기를 $\hat{\mathbf{B}}$ 이라 할 때 $\hat{\mathbf{B}}$ 의 k번째 단위요소인 k번째 사용자의 복원 정보 b_k 는 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{B}} &= \mathbf{S}^{-1} \Psi_R \\ \hat{b}_k &= \frac{2N}{M\sqrt{P_0}} (2Z_{code} - Z_{all}) \\ &\approx \frac{2}{\sqrt{P_0}} (2Z_{code} - Z_{all}) \end{aligned} \quad (23)$$

식 (22)와 식 (23)에서 \mathbf{J} 는 $N \times N$ 정방행렬로서 모든 단위요소가 '1'이며 Z_{code} 와 Z_{all} 은 식 (24)와 같이 마스크 제어 신호로 특정 행렬 부호를 사용했을 경우 광필터링된 광채널 스펙트럼의 광학적 강도를 나타낸다.

$$\begin{aligned} Z_{code} &= \langle \mathbf{S}_k, \Psi_R \rangle \\ Z_{all} &= \langle \mathbf{S}_0, \Psi_R \rangle \end{aligned} \quad (24)$$

광검출기는 잡음의 영향을 고려할 경우 광필터링된 값의 랜덤 변수 Z 는 식 (25)와 같이 표현할 수 있다.

$$Z = a_i + n_0 \quad (25)$$

여기서 a_i 는 검출 잡음이 없을 때의 광필터링된 복원 정보에 대한 랜덤 변수로서 a_1 은 전송 정보 '1'을 보냈을 때의 복원 정보의 강도 $\sqrt{P_0}/2$ 이며, a_2 는 전송 정보 '0'을 보냈을 때의 복원 정보의 강도 0이다. 검출 잡음이 가우시안 랜덤 프로세스를 갖는다고 가정하면 n_0 의 확률 밀도 함수는 식 (26)과 같다.

$$p(n_0) = \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{n_0}{\sigma_0} \right)^2 \right] \quad (26)$$

여기서 σ_0^2 는 잡음 분산을 나타낸다.

비트 오류율 P_B 는 전송 정보 '1'을 보냈을 경우 복원 정보의 강도가 문턱 수위보다 작을 확률과 전송 정보 '0'을 보냈을 경우 복원 정보의 강도가 문턱 수위보다 클 경우의 확률의 합이므로 식 (27)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P_B &= p(e|b_k=1)p(b_k=1) + p(e|b_k=0)p(b_k=0) \\ &= p(e|b_k=1) \\ &= \int_{\gamma_0}^{\infty} p(z|b_k=0) dz \\ &= \int_{\gamma_0}^{\infty} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-a_2}{\sigma_0} \right)^2 \right] dz \end{aligned} \quad (27)$$

최적 문턱 수위(optimal threshold level)를 γ_0 라 하면 $\gamma_0 = (a_1 + a_2)/2 = \sqrt{P_0}/4$ 가 된다. 비트 오류율은 Q 함수[16]로 나타내면 식 (28)과 같이 나타어진다.

$$P_B = Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right) \quad (28)$$

여기서 E_b 는 전송 정보 당 평균 에너지를 나타낸다.

본 논문에서 제안한 하다마드 마스크를 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템에서는 $E_b = E_s/2$ 이 되므

로 신호대 잡음비가 부호화하지 않을 경우와 비교했을 때 3dB 만큼 감소하게 된다.

IV. 모의 실험 및 결과 고찰

1. 광부호화 및 복호화 실험

본 논문에서 제안한 시스템 성능 평가에 있어서 모든 사용자가 동일한 bit rate를 가지고 있으며 신호 초기화와 광자의 효과 및 열잡음을 무시한다고 가정하였다. 또한 광부호화 과정에서 광원 신호의 스펙트럼은 그림 5와 같이 제한된 대역폭을 갖으며 균일하다(uniform)고 가정하였다. 마스크 제어 부호로는 길이가 $M-1=N_0=15$ 인 S 행렬 부호를 사용하였다.

개폐 특성을 갖는 하나마드 마스크의 출력값은 의사 다중 캐리어 신호(pseudo multi carrier signal)를 가지며 정보 값 즉 '0'과 '1'의 개폐 키잉에 의해 정보를 전송하게 된다.

정보 값이 만일 '0'이면 광원은 신호를 발생시키지 않으므로 하나마드 마스크 부호기의 출력은 '0'이 된다. 만일 정보 값이 '1'이면 광원은 지속 시간(duration time)이 τ_c 인 광 펄스를 발생하게 되므로 하나마드 마스크 부호기에 의해 광신호는 주파수 개폐 키잉되어서 광채널로 전송되게 된다. 주파수 개폐 키잉의 결과는 입력 광원 신호를 의사 다중 캐리어 신호로 변화시키며 각각의 캐리어는 입력 광원 신호 파워(power)의 $1/N_0$ 를 갖는다. 모의 실험에서 광원 신호의 초기 파워의 크기를 1 Watt로 하였고 광원 스펙트럼의 대역폭을 $W=200$ 으로 하였다. 광원 스펙트럼의 크기는 $\sqrt{P_0}/W=0.0050$ 이며 주파수 개폐 키잉에 사용되는 S 행렬 부호의 칩 너비는 $\Omega=W/2N=6.667$ 이 된다.

그림 6-(a)는 광원 신호의 스펙트럼을 single sided에 대하여 나타내고 있으며 그림 6-(b)는 광원 신호의 시간축상의 형태를 보이고 있다. 그림 6-(b)의 신호는 지속 시간 $\tau \approx 2\pi/W=0.0314$ 를 갖는다. 그림 7-(a)는 5번째 S 행렬 부호로 부호화된 광부호의 single sided 스펙트럼을 나타내고 있으며 그림 7-(b)는 광부호의 시간축상의 신호 형태를 보이고 있다. 그림 7-(b)의 신호는 지속 시간 τ_c 과 주기 $T=2\pi/\Omega=0.9425$ 을 갖으며 스펙트럼 크기는 $\sqrt{P_0}/W=0.0050$ 을 갖는다. 그림 6-(b)의 광원신호와 비교했을 때 의사 다중 캐리어의 피크(peack) 파워는 $\sqrt{P_0}/N_0 \cdot M/2=0.5333$ Watt

를 가지며 주파수 개폐 키잉에 의해 부호화된 광부호는 광원 신호 파워의 $1/N_0$ 를 갖는 $M/2$ 개의 캐리어로 이루어 집을 알 수 있다.

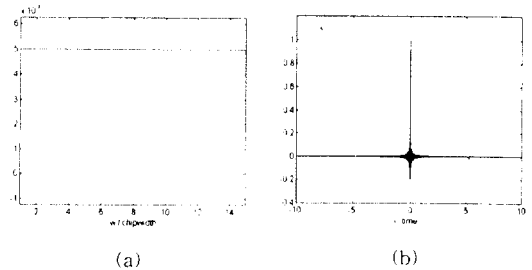


그림 6. 광원 신호
(a) 광원 신호의 스펙트럼
(b) 광원 신호의 시간축상의 신호 형태

Fig. 6. The optical Source
(a) Spectrum of the optical source
(b) Temporal shaping of the optical source

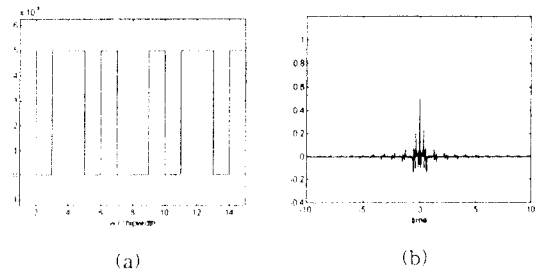


그림 7. 광부호 신호
(a) 광부호의 스펙트럼
(b) 광부호의 시간축상의 형태

Fig. 7. An Optical encoded signal
(a) Spectrum of the optical encoded signal
(b) Temporal shaping of the optical encoded signal

그림 8은 길이가 15인 S 행렬 부호를 사용할 때 최대 사용자인 15명의 랜덤한 정보 전송에 의해 광채널에 모여진 광채널 신호의 시간축상의 형태를 보이고 있다.

그림 9는 복호기의 분광기를 통과한 광채널 신호의 스펙트럼을 나타내고 있다. 그림 9에서 x축의 각 주파수 대역을 나타내며 y축은 광채널 신호의 스펙트럼

의 크기를 나타내고 있다. 주파수 개폐 키잉변조에 의해 발생된 광채널 신호의 스펙트럼은 각 사용자의 출력값들의 스펙트럼의 합과 같다.

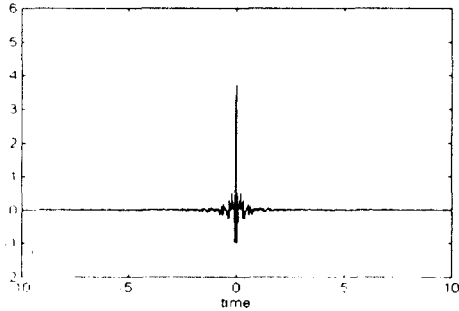


그림 8. 광채널 신호의 시간축상의 형태
Fig. 8. 3 Temporal shaping of an optical channel signal

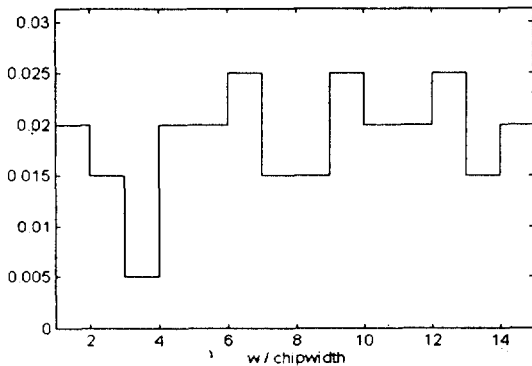


그림 9. 광채널 신호의 스펙트럼
Fig. 9. Spectrm of an optical channel signal

표 1은 길이가 15인 S행렬 부호를 사용했을 때 최대 사용자인 15명의 전송하고자 하는 디지털 정보 값과 검출 데이터 비트와의 비교를 나타내고 있다. 표 1에서 알 수 있듯이 전체 사용자 15명 중에 '1'을 전송하는 사용자는 10명이며 각 사용자에 대해 검출된 데이터 비트는 전송 데이터 비트와 동일함을 알 수 있다.

표 1. 전송 데이터 비트와 검출 데이터 비트와의 비교
Table 1. Comparison between transmitted data bits and detected data bits

User Code	data bit	detected data bit
S ₁	0	0
S ₂	1	1
S ₃	1	1
S ₄	1	1
S ₅	1	1
S ₆	1	1
S ₇	0	0
S ₈	1	1
S ₉	0	0
S ₁₀	1	1
S ₁₁	1	1
S ₁₂	1	1
S ₁₃	0	0
S ₁₄	0	0
S ₁₅	1	1

2. 비트 오류율 검증 실험

제안된 시스템 성능 분석을 위해서 우선 광채널을 가우시안 채널로 모델링하였다.

광검출기의 난특성을 $N(0, \sigma_0^2)$ 인 가우시안 잡음이며 부호화 및 복호화에 사용되는 하다마드 마스크 셀의 갯수가 상당히 크다고 가정하면 광검출기의 검출 잡음에 의한 비트 오류율은 식 (29)와 같이 쓸 수 있다.

$$P_E = Q\left(\sqrt{\frac{E_b}{\sigma_0^2}}\right) \approx Q\left(\sqrt{\frac{E_S}{2\sigma_0^2}}\right) \quad (29)$$

그림 10은 식 (29)의 결과적인 신호대 잡음비에 대한 비트 오류율을 보이고 있다. 식 (29)와 그림 10에서 알 수 있듯이 전송 정보의 에너지는 광원 에너지의 반만을 사용하기 때문에 광원 에너지를 모두 사용하는 광통신 시스템에 비해 신호대 잡음비가 3dB만큼 감소됨을 알 수 있다.

$$P_B = Q \left(\sqrt{\frac{E_b}{\sigma_0^2} \frac{M}{N}} \right) \quad (30)$$

식 (30)은 하다마드 마스크 셀의 갯수와 비트 오류율과의 관계를 보이고 있다. 모의 실험에서 N 은 S 행렬 부호의 길이가 아닌 일반적인 마스크 셀의 갯수에 대해 실험을 하였다.

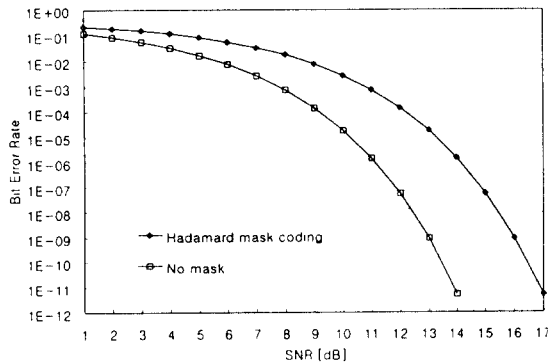


그림 10. 신호대 잡음비에 대한 비트 오류율
Fig. 10. Bit Error Rate versus SNR

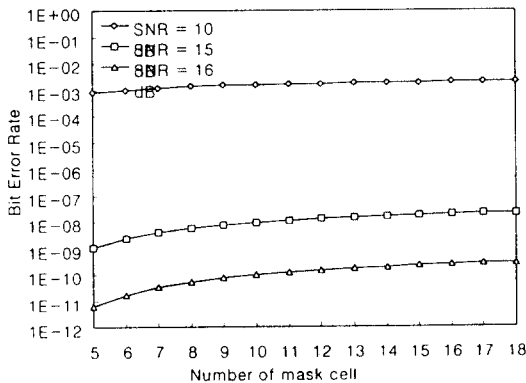


그림 11. 마스크 셀의 갯수에 대한 비트오류율
Fig. 11. BER versus the number of mask cells

다중 접속 가능한 최대 사용자의 수는 할당 가능한 S 행렬 부호의 수와 동일하며 S 행렬 부호의 수는 마스크 셀의 갯수와 같으므로 결국 마스크 셀의 갯수는 다중 접속 가능한 최대 사용자의 수가 된다. 그림 11은 마스크 셀의 갯수와 비트 오류율과의 관계를 보이

고 있다. 하다마드 마스크 셀의 갯수가 어느 정도 클 경우 비트 오류율은 하다마드 마스크 셀의 갯수에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안된 시스템은 마스크 셀의 갯수를 늘리므로써 다중 접속 가능한 최대 사용자의 수를 늘릴 수 있다는 장점을 갖는다.

V. 결론

본 논문에서는 광채널 상에서 다중 사용자의 동시 접속을 구현하는 광부호 분할 다중 접속 시스템을 위하여 하다마드 마스크의 이용을 제안하였고 하다마드 마스크를 통한 광신호의 하다마드 변환 및 하다마드 역변환 과정을 서술하였다. 본 논문에서 제안한 하다마드 마스크를 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템은 기존의 다른 광 통신 시스템과 비교했을 때 다음과 같은 장점을 갖는다.

1. 광원으로 튜너블(tunable) 레이저를 사용하지 않고 한 광원만으로 원하는 주파수 대역의 캐리어를 갖는 광신호를 만들 수 있다.
2. 복호화 과정에서 하다마드 마스크는 일정 주파수 대역내의 신호 정보를 추출하는 광필터 역할을 하므로 기존의 다중캐리어 시스템에서 사용했던 튜너블 광검출기를 필요로 하지 않는다.
3. 하다마드 마스크를 이용한 광부호 분할 다중 접속 시스템은 마스크 개폐에 의한 빛의 투과성 및 비투과성의 광학적 성질(on/off)를 이용하기 때문에 시스템 전체가 광학적으로 구성될 수 있고 병렬처리가 가능하다.
4. 분광기, 마스크, 렌즈의 간단한 구조를 바탕으로 하고 있으며 마스크 제어 또한 간단하기 때문에 고속 정보 처리 기술로서 가치가 높다.
5. 마스크 셀의 개수만을 늘리므로써 다중 접속 가능한 최대 사용자의 수를 늘릴 수 있으므로 대용량 광통신 시스템에 적합하다.

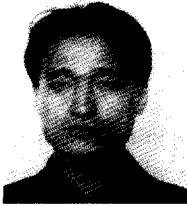
참고 문헌

1. J. A. Salehi, "Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part I:

- Fundamental Principles," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 37, No. 8, pp. 824-833, Aug. 1989.
2. J. A. Salehi, "Code Division Multiple-Access Techniques in Optical Fiber Networks-Part II : Systems Performance Analysis," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 37, No. 8, pp. 834-842, Aug. 1989.
 3. F. R. K. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, "Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis and Applications," *IEEE Int. Symp. on Inform. Theory*, Ann-Arbor, MI, 1986; also *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol. 35, No. 3, pp. 595-604, May 1989.
 4. Andrew S. Holmes and Richard R. A. Syms, "All-Optical CDMA Using Quasi-Prime Codes," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 10, No. 2, Feb. 1992.
 5. Paul R. Prucnal, Mario A. Santoro, and Sanjay K. Shegal, "Ultrafast All-Optical Synchronous Multiple Access Fiber Networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. SAC-4, No. 9, Dec. 1986.
 6. Amer A. Hassan, John E. Hershey, and Nabel A. Riza, "Spatial Optical CDMA," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 13, No. 3, Apr. 1995.
 7. B. Moslehi, J. W. Goodman, M. Tur, and H. J. Shaw, "Fiber-optic Lattice Signal Processing," Special Issue on Optical Computing, *Proc. IEEE*, pp. 909-913, Jul. 1984.
 8. Jawad A. Salehi, Andrew M. Weiner, and Jonathan P. Heritage, "Coherent Ultrashort Light Pulse Code-Division Multiple Access Communication Systems," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol. 8, No. 3, Mar. 1990.
 9. Martin Harwit, and Neil J. A. Sloane, *Hadamard Transform Optics*, Academic Press, Inc., 1979.
 10. Brian K. Harms, Ruth A. Dyer, Stephen A. Dyer, Timothy W. Johnson, and Jin Bae Park, "An Introduction to Hadamard Spectrometry and the multiplex advantage," *Proceedings of IMTC/89*.
 11. Ruth A. Dyer, Stephen A. Dyer, Brian K. Harms, Timothy W. Johnson, and Jin Bae Park, "Implementation Problems in Hadamard Transform Spectrometry," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 39, No. 1, pp. 163-167, Feb. 1990.
 12. S. A. Dyer and J. B. Park, "The Effect of a Single Defective Mask Element on the Multiplex Advantage in Hadamard Transform Spectroscopy," *Applied Spectroscopy*, vol. 43, no. 2, pp. 278~282, 1989.
 13. J. B. Park, T. W. Johnson, S. A. Dyer, B. K. Harms, and R. A. Dyer, "On the Mean-square Error of Various Spectrum-Recovery Techniques in Hadamard Transform Spectrometry," *Applied Spectroscopy*, vol. 44, no. 2, pp. 219~228, 1990.
 14. 박진배, 김현규, "하다마드 분광계측기의 최적 마스크 설계," *의공학회지*, 16권, 제2호, 1995.
 15. N. A. Vaz, G. W. Smith, and G. P. Montgomery, Jr., "A Light Control Film Composed of Liquid Crystal Droplets Dispersed in an Epoxy Matrix," *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* vol. 146, pp. 17-34, 1987.
 16. P. O. Borjesson, and C. E. Sundberg, "Simple Approximations of the Error Function Q(x) for Communications Applications," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM27, pp. 639-642, Mar. 1979.



박진배(Jin Bae Park) 정회원
 1977년:연세대학교 전기공학과 졸업(공학사)
 1985년:미국 Kansas State University 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학석사)
 1990년:미국 Kansas State University 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사)
 1997년 9월~현재:연세대학교 전기공학과 학과장
 1992년 3월~현재:연세대학교 전기공학과 부교수



강 창 식(Chang Sig Kang) 정회원

1971년 11월 출생

1995년:연세대학교 전기공학과
졸업(공학사)

1997년:동대학원 전기공학과 졸
업(공학석사)

현재:삼성전자 반도체 사업부 주
임연구원



주 진 만(Jin Man Joo) 정회원

1970년 10월 출생

1993년:연세대학교 전기공학과
졸업(공학사)

1995년:동대학원 전기공학과 졸
업(공학석사)

현재:동대학원 전기공학과 박사
과정