

논문 2011-48SD-8-2

Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA를 위한 Modified Hadamard Code

(Modified Hadamard Codes for Spectral-Amplitude-Coding Optical
CDMA)

지 윤 규*

(Yoon Kyoo Jhee)

요 약

Hadamard code를 이용한 spectral-amplitude-coding optical code-division multiple-access(OCDMA) 시스템은 2^n 개의 code length만을 갖는 특성을 지니어 최대 사용자 수의 조절이 어렵고 phase-induced intensity noise(PIIN)가 커서 효율적인 시스템 구성이 어렵다. 이의 한계성을 극복할 수 있는 modified Hadamard codes를 제안하고 잡음 분석을 통하여 향상된 시스템 특성을 보인다.

Abstract

Spectral-amplitude-coding optical CDMA systems using codes based upon Hadamard matrices have very restrictive code lengths of 2^n and high phase-induced intensity noise(PIIN). In this paper a new code family, namely modified Hadamard code, is proposed to relax the code length restriction and the number of simultaneous users. The improved performance of the proposed system is analysed with the consideration of noise.

Keywords : modified Hadamard code, phase-induced intensity noise, optical CDMA

I. 서 론

아주 낮은 전파손실과 고속의 정보를 전달할 수 있는 특성으로 인하여 single-mode 광섬유는 고속의 장거리 통신링크에 널리 사용되고 있다. 또한 이 광섬유를 이용한 local area networks(LAN's)의 발전이 급속히 이루어지고 있어 각 사용자가 효율적으로 network resources를 공유하는 연구가 중요하다. 이 연구의 한 방향인 optical code-division multiple access(OCDMA)는 엄격한 파장제어 없이 네트워크에 비동기적으로 접속할 수 있는 장점이 있다.

이상적인 spectral-amplitude-coding OCDMA 시스템은 bandwidth $\Delta\nu$ 구간에서 평평한 unpolarized source spectrum을 가정한다. 전송된 spectrum은 N개의 직사각형조각으로 나누어지고 사용자의 code에 따라서 amplitude masking된다. 수신기에 수신되는 신호에는 필요한 정보와 더불어 불필요한 multiple-access interference(MAI)가 공존하고 있어 이를 제거하기 위하여 orthogonal code를 사용함이 필수적이다^[1~5]. Orthogonal code의 하나인 Hadamard code를 이용하여 효율적인 optical CDMA 시스템을 구현할 수 있으나 이 방법은 동시 사용자 수가 많아지면 phase-induced intensity noise(PIIN)가 증가하여 최대 사용자 수를 제한하는 요인으로 작용한다. 이를 극복하기 위하여 codeword의 autocorrelation peak와 fixed in-phase

* 정회원, 이화여자대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Ewha Womans University)
접수일자: 2011년2월24일, 수정완료일: 2011년7월10일

cross correlation의 비를 증가시켜 signal-to-noise (SNR)를 향상시키는 방법을 사용한다. 이와 같은 노력은 codeword 안에 '0'의 비가 증가하여 입력신호가 약할 때는 thermal noise로 인하여 SNR이 나빠지는 결과를 초래하여 Hadamard code보다 시스템 성능이 떨어진다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 최대 사용자 수를 더 유연하게 조절할 수 있고 시스템 성능을 향상시키는 modified Hadamard code를 제안하고 phase-induced intensity noise(PIIN), shot noise와 thermal noise를 분석하여 향상된 시스템 성능을 보임을 기술한다.

II. Modified Hadamard Code Designs

1. Modified Hadamard Code의 구성

Modified Hadamard code의 구성은 Hadamard code를 다음과 같이 mapping 함으로서 얻을 수 있다. H_M 을 Hadamard matrix의 첫 행을 제거한 후에 1에 "0"을 (-1)에 "1"을 대입한 (0,1)로 이루어진 $M \times (M+1)$ normalized Hadamard matrix라고 할 때 modified Hadamard matrix H_{2M} 은 식 (1)과 같이 H_M 을 기본으로 modify하여 얻을 수 있다.

$$H_{2M} = \begin{bmatrix} 0 & H_M \\ H_M & 0 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

4×4 Hadamard matrix를 사용하여 $M=3$ 인 modified Hadamard code를 생성하는 과정을 예로 들어 설명하기로 한다. 4×4 Hadamard matrix

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

의 각 element에 1대신에 0을 -1대신

표 1. M=3인 경우의 modified Hadamard codewords
Table 1. Modified Hadamard codewords when M=3.

k	codeword C_k
1	00000101
2	00000011
3	00000110
4	01010000
5	00110000
6	01100000

matrix는 다음과 같이 3×4 의 normalized Hadamard

$$matrix \ H_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

가 되며 각 행은 normalized Hadamard code가 된다.

이 H_3 matrix를 변형시킨 H_6 matrix는 식 (2)와 같다.

$$H_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

이 matrix의 각 행은 <표 1>의 codeword C_k 에 나타나 있는 modified Hadamard code가 된다. 위에서 설명한 예에서 Hadamard matrix의 각 행을 취한 normalized Hadamard code의 길이는 4이었으나 modified Hadamard codeword의 길이는 $4 \times 2 = 8$ 로 증가하게 되며 codeword의 개수도 두 배로 증가한 6이 된다. 동일한

$$방법으로 H_3 를 기본으로 하여 $H_9 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & H_3 \\ 0 & H_3 & 0 \\ H_3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 를 얻$$

을 수 있으므로 modified Hadamard codeword의 길이와 사용 가능한 codeword 수를 유연하게 조절할 수 있다. 최대 사용자 수 K_m 와 codeword 길이 N 간의 관계는 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$N = \frac{4}{3} K_m. \quad (3)$$

2. 시스템 구성

Modified Hadamard code를 이용한 fiber-optic CDMA 네트워크는 그림 1과 같이 구성할 수 있다. K_m 개의 송수신기가 star couple를 통하여 서로 연결되어 있다. k 번째 사용자 송신기의 광대역 incoherent optical source인 LED(light emitting diode)로부터 나오는 빛에 electro-optic modulator(EOM)를 이용하여 on-off keying형태로 사용자의 정보를 실는다. 각 데이터에 해당하는 광신호는 fiber Bragg grating(FBG)에서 spectral slicing 형태로 encoding된다. FBG에서 반사된 spectrum은 사용자의 modified Hadamard code에 해당되는 code vector $C_k = (c_{k,1}, \dots, c_{k,N})$ 로 나타난다. 여기서 N 은 code의 길이가 되며 $c_{k,n} \in \{0,1\}$ for $1 \leq n \leq N$ 은

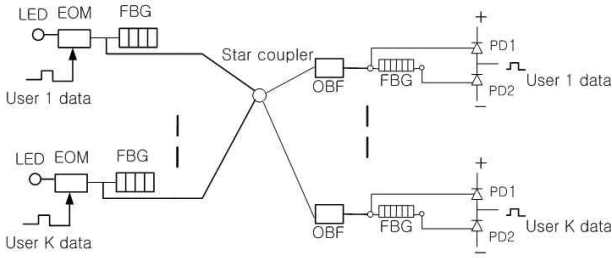


그림 1. Spectral-amplitude OCDMA 시스템
Fig. 1. Spectral-amplitude OCDMA system.

k 번째 사용자의 spectral code가 된다.

$K_m \times K_m$ 의 passive star coupler는 이 시스템에서 local network 사용자를 연결하는 역할을 하므로 각 사용자의 송신기는 spectrum encoded 신호를 모든 수신기에게 broadcast하게 된다. 따라서 수신된 신호 spectrum은 모든 사용자가 송신한 신호의 합으로서 $r = \sum_{k=1}^K d_k C_k$ 이 된다. 이 식에서 $d_k \in \{0,1\}$ for $k=1, \dots, K$ 는 k 번째 사용자의 information bit이고 K 는 현재 송수신하고 있는 사용자 수이다. 수신단은 optical bandpass filter(OBF)를 사용하여 C_k 중에서 '0'으로만 구성된 block을 제거하고 FBG로 구성된 optical correlator와 balanced receiver를 사용하여 수신된 전체 합로부터 원하는 신호를 추출해 낸다. Correlator의 출력에는 원하는 신호와 원하지 않는 신호인 multiple-access interference(MAI)가 혼재되어 있으므로 MAI를 줄이기 위하여 orthogonal code를 사용한다. 본 논문에서는 orthogonal code로 modified Hadamard code를 사용하고 FBG와 balanced receiver를 decoder로 사용한다.

이 시스템의 동작을 자세히 설명하기 위하여 수신기 1번이 <표 1>의 첫 번째 codeword를 사용한 경우를 예로 든다. 수신기의 앞쪽에 위치한 OBF는 앞의 4 bit를 제거하므로 4, 5와 6번 codeword를 사용하는 MAI를 미리 제거하여 phase-induced intensity noise(PIIN)를 감소시키는 기능을 해준다. FBG1 (2와 4번 신호는 반사시키고 나머지는 통과 시킴)은 C_1 의 앞 4 bit를 제거한 data '1'에 해당하는 '0101'을 PD(photodiode)1에서 수신하도록 한다. 사용자 1 번($k=1$)에게 신호를 보내기 위해서는 C_1 의 codeword를 사용해야 하므로 나머지 code들은 사용자 1번에게는 모두 interference가 된다. k 값이 4, 5와 6의 경우는 OBF에서 모두 제거되고 k 값이 2와 3인 경우는 FBG1에서 각각 1단위 씩 반사 또는 통과되어 서로 다른 PD에서 수신되어 balanced detector 에서 서로 상쇄되므

로 interference들이 모두 제거되는 구조이다.

3. 시스템 성능 분석

Encoding process 이후 passive star coupler에서 합해진 후 optical bandpass filter를 지난 codeword의 길이를 N 이라 할 때 그 특성은 $N/2$ 개의 '0'과 $N/2$ 개의 '1'로 구성되어 있고 각 codeword간에는 정확히 $N/2$ 개의 위치에서 동일한 값을 갖고 나머지 $N/2$ 개의 위치에서는 다른 값을 갖는다. $c_k(i)$ 를 k 번째 codeword의 i 번째 요소라 하면 codeword의 특성은 식 (4)로 나타난다.

$$\sum_{i=1}^N c_k(i)c_\ell(i) = \begin{cases} \frac{N}{2}, & k = \ell \\ \frac{N}{4}, & k \neq \ell \end{cases} \quad k, \ell \in 1, \dots, K_m. \quad (4a)$$

$$\sum_{i=1}^N c_k(i)\overline{c_\ell(i)} = \begin{cases} 0, & k = \ell \\ \frac{N}{4}, & k \neq \ell \end{cases} \quad k, \ell \in 1, \dots, K_m. \quad (4b)$$

ℓ 번째 수신기의 PD1과 PD2에서 power spectral density(PSD)는 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$G_1(v) = \frac{P_{sr}}{\Delta\nu} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^N c_k(i)c_\ell(i) \cdot \left\{ u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N}(-N+2i-2) \right] - u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N}(-N+2i) \right] \right\} \quad (5a)$$

$$G_2(v) = \frac{P_{sr}}{\Delta\nu} \sum_{k=1}^K d_k \sum_{i=1}^N c_k(i)\overline{c_\ell(i)} \cdot \left\{ u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N}(-N+2i-2) \right] - u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N}(-N+2i) \right] \right\} \quad (5b)$$

여기서 P_{sr} 은 single source로부터 OBF를 통과한 후에 수신된 전력을 나타내고 $\Delta\nu$ 는 이 신호의 optical bandwidth를 나타내며 $u[\nu]$ 는 식 (6)으로 표시된 unit step function이다.

$$u[\nu] = \begin{cases} 1, & \nu \geq 0 \\ 0, & \nu < 0. \end{cases} \quad (6)$$

Total incident optical power와 mean square optical power는 각각 식 (7)들로 나타낼 수 있다.

$$\int_0^\infty G_1(\nu)d\nu = \frac{P_{sr}}{4}(K+d_\ell). \quad (7a)$$

$$\int_0^\infty G_1^2(\nu) d\nu = \frac{P_{sr}^2}{N\Delta\nu} \sum_{i=1}^N \left\{ c_i(i) \left[\sum_{k=1}^K d_k c_k(i) \right] \cdot \left[\sum_{m=1}^K d_m c_m(i) \right] \right\}. \quad (7b)$$

$$\int_0^\infty G_2(\nu) d\nu = \frac{P_{sr}}{4} (K - d_l). \quad (7c)$$

$$\int_0^\infty G_2^2(\nu) d\nu = \frac{P_{sr}^2}{N\Delta\nu} \sum_{i=1}^N \left\{ \bar{c}_i(i) \left[\sum_{k=1}^K d_k c_k(i) \right] \cdot \left[\sum_{m=1}^K d_m c_m(i) \right] \right\}. \quad (7d)$$

Photocurrent I 는 식 (8)로 표시될 수 있다.

$$I = I_1 - I_2 = R \int_0^\infty G_1(\nu) d\nu - R \int_0^\infty G_2(\nu) d\nu \\ = \frac{RP_{sr}d_l}{2}. \quad (8)$$

식 (8)에서 R 은 PD의 responsivity로써 $R = \frac{\eta e}{h\nu_c}$ 이

며 η 는 quantum efficiency, e 는 electron's charge, h 는 Plank 상수, ν_c 는 optical source의 중간주파수이다.

수신단에서 photocurrent의 variance는 PIIN, shot noise와 intensity noise로 구성되며 식 (9)로 나타낼 수 있다.

$$\langle I^2 \rangle = \langle I_{sh}^2 \rangle + \langle I_{IN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle \\ = 2eB(I_1 + I_2) + BI_1^2\tau_{c1} + BI_2^2\tau_{c2} + \frac{4K_bT_nB}{R_L}. \quad (9)$$

$$\text{식 (9)에서 coherence time } \tau_c = \frac{\int_0^\infty G^2(\nu) d\nu}{\left[\int_0^\infty G(\nu) d\nu \right]^2}$$

로 나타낼 수 있으며 K_b 는 Boltzmann's constant, T_n 은 absolute receiver noise temperature이고 R_L 은 receiver load resistance이다. 따라서 식 (10)이 된다.

$$\langle I^2 \rangle = 2eBR \left[\int_0^\infty G_1(\nu) d\nu + \int_0^\infty G_2(\nu) d\nu \right] \\ + BR^2 \left[\int_0^\infty G_1^2(\nu) d\nu + \int_0^\infty G_2^2(\nu) d\nu \right] + \frac{4K_bT_nB}{R_L}. \quad (10)$$

모든 사용자가 데이터 '1'을 전송한다고 가정하고 참

$$\text{고문헌 [1]의 식 (14) } \langle I_{IN}^2 \rangle = \frac{BR^2P_{sr}^2K(K+1)}{4\Delta\nu}$$

와 $I_1 + I_2 = \frac{RP_{sr}K}{2}$ 를 대입하면 noise power는 식 (11)로 주어진다.

$$\langle I^2 \rangle = eBRP_{sr}K + \frac{BR^2P_{sr}^2K(K+1)}{4\Delta\nu} + \frac{4K_bT_nB}{R_L}. \quad (11)$$

실제로 각 사용자가 '1'을 전송할 확률은 $\frac{1}{2}$ 이므로 noise power는 식 (12)가 된다.

$$\langle I^2 \rangle = \frac{eBRP_{sr}K}{2} + \frac{BR^2P_{sr}^2K(K+1)}{8\Delta\nu} + \frac{4K_bT_nB}{R_L}. \quad (12)$$

위의 결과를 이용하여 signal-to-noise(SNR)을 구하면 다음 식 (13)이 된다.

$$SNR = \frac{(I_1 - I_2)^2}{\langle I^2 \rangle} \\ = \frac{\frac{R^2P_{sr}^2}{4}}{\frac{eBRP_{sr}K}{2} + \frac{BR^2P_{sr}^2K(K+1)}{8\Delta\nu} + \frac{4K_bT_nB}{R_L}}. \quad (13)$$

Gaussian approximation을 가정하고 BER(bit error rate)을 구하면 식 (14)가 된다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{8}} \right). \quad (14)$$

<표 2>에 있는 값들을 이용하여 각 single source로부터 수신기에 도달한 입력 값이 -10 dBm, -20 dBm 그리고 -25 dBm인 경우 동시 사용자 수 K 를 변화시켜가며 BER을 계산한 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 동시사용자 수가 $K=15$ 일 때는 세 가지 경우의 입력에 대해서 $P_e = 10^{-9}$ 을 만족시키므로 $M=15$ 을 기본으로 하여 modified Hadamard code를 이용한 spectral-amplitude-coding OCDMA 시스템을 효과적으로 구현할 수 있다.

이와 같은 결과는 modified Hadamard code의 제안으로 optical bandpass filter를 시스템에 추가하여 참고 논문 [1]에서와 같이 사용자 수가 증가함에 따라 BER

표 2. BER 계산에 사용된 값들.
Table 2. Typical parameters used in the BER calculation.

PD quantum efficiency	$\eta = 0.6$
Optical center frequency	$\nu_c = 194 \text{ THz}(1550\text{nm})$
Electron's charge	$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ (C)}$
Plank's constant	$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$
Responsivity	$R = \frac{\eta e}{h\nu_c} = 0.7477$
Effective power	$P_{sr} = -10, -20, -25 \text{ dBm}$
Optical bandwidth	$\Delta\nu = 3.75 \text{ THz}$
Receiver electrical bandwidth	$B = 80 \text{ MHz}$
Boltzmann's constant	$K_b = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$
Absolute receiver noise temperature	$T_n = 300^\circ \text{ K}$
Receiver load resistor	$R_L = 1030\Omega$
Data bit rate	$R_b = 155 \text{ Mbps}$

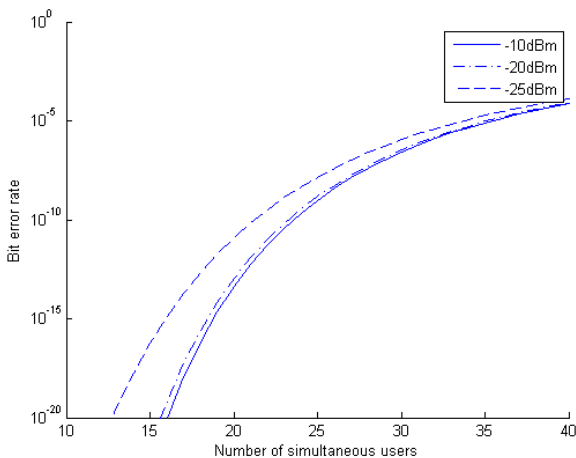


그림 2. $P_{sr} = -10 \text{ dBm}, -20 \text{ dBm}$ and -25 dBm 일 때 동시사용자 수에 따른 BER

Fig. 2. BER versus number of simultaneous users when $P_{sr} = -10 \text{ dBm}, -20 \text{ dBm}$ and -25 dBm .

이 증가하여 동시 사용자 수를 제한하는 문제를 해결함과 아울러 입력신호가 -25dBm 까지 작아짐에도 BER이 크게 나빠지지 않는 특징을 지님을 알 수 있었다

III. 결 론

본 논문에서는 최대 사용자 수를 유연하게 조정할 수 있고 BER도 우수한 modified Hadamard code를 제안하였다. 이 시스템의 잡음인 phase-induced intensity noise(PIIN), shot noise와 thermal noise를 분석하여 입

력 값의 변화에도 시스템 특성이 안정됨을 보일 수 있었다

참 고 문 헌

- [1] E. Smith, R. Blaikie and D. Taylor, "Performance Enhancement of Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Using Pulse-Position Modulation," IEEE Trans. on Communications, Vol. 46, no. 9, pp. 1176-1185, Sep. 1998.
- [2] C. Lin, J. Wu, H. Tsao and C. Yang, "Spectral Amplitude-Coding Optical CDMA System Using Mach-Zehnder Interferometers," J. of Lightwave Technology, Vol. 23, no. 4, pp. 1543-1555, April. 2005.
- [3] C. Yang, "Spectral Amplitude Coding Optical CDMA Networks using $2^m \times 2^m$ Waveguide Gratings," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 22, no. 24, pp. 1835-1837, Dec. 2010.
- [4] M. Noshad and K. Jamshidi, "Code Family for Modified Spectral-Amplitude-Coding OCDMA Systems and Performance Analysis," J. of Optical Communication Network, Vol. 2, no. 6, pp. 344-354, June. 2010.
- [5] 지윤규, "Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA를 위한 변형된 Modified Double Weight Code," 전자공학회논문지, 제48권 SD편, 제4호, 1-5쪽, 2011년 4월

저 자 소 개



지 윤 규(정회원)

1978년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.

1980년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업.

1984년 The University of Texas at Austin 전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야 : 광통신, 광정보처리>