

논문 2014-51-4-4

광 코드분할다중접속을 위한 단위행렬과 Symmetric Balance Incomplete Block Design 부호를 사용한 2차원 하이브리드 부호

(Two-Dimensional Hybrid Codes using Identity Matrix and Symmetric
Balance Incomplete Block Design Codes for Optical CDMA)

지 윤 규*

(Yoon Kyoo Jhee[©])

요 약

단위행렬의 각 행을 공간부호로 사용하고 symmetric balance incomplete block design(BIBD) 부호를 스펙트럼부호로 사용한 2차원(2-D) 하이브리드 부호를 제안한다. 단위행렬의 각 행을 공간부호로 사용함으로써 수신기의 구조가 간단해지고 송수신단을 연결하는 방법도 간단해 짐을 알 수 있었다. 또한 비이상적 BIBD 부호를 스펙트럼부호로 사용하여 입력신호가 작을 때도 효율적으로 동작할 수 있었다. 사용자 수에 따른 비트 오차율(BER) 분석을 통하여 제안하는 2-D 하이브리드 부호가 1차원(1-D) BIBD 부호에 비하여 최대사용자 수를 현저하게 증가시킬 수 있음을 알 수 있었다.

Abstract

Two-dimensional hybrid codewords are generated by using each row of identity matrix for spatial encoding and nonideal symmetric balance incomplete block design(BIBD) code for spectral encoding. This spatial/spectral optical code-division multiple-access (OCDMA) network uses single-balanced detectors to abstract the desired information bits and to eliminate the multiple-access interference(MAI). Analytical results show that the number of simultaneous users increases significantly by using the proposed hybrid codes.

Keywords : identity matrix, BIBD code, phase-induced intensity noise(PIIN), optical CDMA

I. 서 론

Spectral-amplitude-code(SAC) 광 코드분할다중접속 (optical code-division multiple-access(OCDMA)) 방법을 사용하면 부호의 길이도 줄이고 다중접속간섭

(multiple-access interference(MAI))도 제거할 수 있다^[1~6]. 그러나 이 방법 역시 충분한 최대사용자 수를 확보할 수 없어 사용자 수를 증가시키기 위하여 공간/스펙트럼 부호로 사용하는 2차원(two-dimensional(2-D)) 부호를 제안하였다^[7~8].

이 2-D 부호에서는 송수신기를 연결하는 네트워크를 간단히 하기 위하여 공간 부호로 perfect difference 부호를 사용한다. (M, k, λ) 로 나타낼 수 있는 perfect difference 부호는 in-phase 상호 상관관계(cross correlation(CC)) $\lambda = 1$ 이고 $M = k^2 - k + 1$ 의 관계를 가

* 정회원, 이화여자대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Ewha Womans University)

© Corresponding Author(E-mail: ykji@ewha.ac.kr)

접수일자: 2013년8월26일, 수정일자: 2013년12월5일

수정완료: 2014년3월28일

지므로 부호의 길이 M 은 3, 7, 13, 21, ... 등 양의 정수가 된다. 그러나 perfect difference 부호를 공간 부호로 사용할 경우도 송수신기를 연결하는 네트워크가 간단하지 않고 수신기의 구조도 복잡하다.

SAC OCDMA 시스템에서 입력신호가 큰 경우에는 in-phase 상호 상관관계 λ 가 1인 부호를 사용하여 위 상유도 강도잡음(phase-induced intensity noise(PIIN))을 줄여 상대적으로 작은 열잡음과 합해진 전체 잡음을 극소화 시킬 수 있어 이상적이라 할 수 있다. 그러나 입력신호가 작을 경우에는 열잡음이 상대적으로 작지 않아 $\lambda \neq 1$ 인 비이상적 부호를 사용함이 효율적이다. 이를 위하여 symmetric balance incomplete block design(BIBD) 부호를 사용할 수 있다. BIBD 부호는 부호 길이가 $N=v(m) = (q^{m+1}-1)/(q-1)$ 이며 weight는 $k = v(m-1) = (q^m - 1)/(q-1)$ 이고 in-phase 상호 상관관계는 $\lambda = (q^{m-1} - 1)/(q-1)$ 인 (N, k, λ) 부호로 구성되어 있다. 여기서 $q = p^n$ 으로 나타내는 소수 곱이며 p 는 소수고 m 과 n 은 양의 정수이므로 q 와 m 값을 변화시켜 다양한 형태의 부호를 얻을 수 있다. 또한 이를 이용하여 구한 부호는 주기적인 특성을 지니므로 배열 도파로 격자(arrayed-waveguide grating (AWG)) 라우터의 주기적인 특성과 결합하여 보다 간단한 codec을 구성할 수 있는 장점도 지닌다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 수신되는 전력이 작을 경우를 고려하여 $\lambda \neq 1$ 인 비이상적 BIBD 부호를 스펙트럼 부호 시퀀스로 이용하고 단위행렬의 각 행을 공간 부호 시퀀스로 사용한다. 그 결과 공간 부호의 길이 M 값이 임의의 양의 정수를 가질 수 있고 네트워크도 간단하게 구성할 수 있으며 또한 최대 사용자 수도 증가시킬 수 있다.

본 논문은 II절에서 2-D 하이브리드 부호의 구성방법을 설명하고 이를 이용한 OCDMA 네트워크의 구조를 기술한다. III절에서 하이브리드 부호의 주요 잡음인 PIIN과 열잡음을 분석한 결과를 이용하여 최대사용자 수를 증가시킬 수 있음을 보이고 IV절에서 결론을 맺는다.

II. 2-D 공간/스펙트럼 하이브리드 부호

1. 2-D 하이브리드 부호의 구성

본 논문에 사용하는 2-D 하이브리드 부호는 단위행

렬의 각 행을 공간 부호 시퀀스로 사용하고 비이상적 BIBD 부호를 스펙트럼 부호 시퀀스로 사용한다. 입력신호가 작을 경우에 효율적인 $[N, k, \lambda]$ 로 표시되는 비이상적 BIBD 부호를 $X = [x_0, x_1, \dots, x_{N-1}]$ 이라 하고 단위행렬의 각 행을 $[M, 1, 0]$ 로 표시되는 $Y = [y_0, y_1, \dots, y_{M-1}]$ 이라 한다.

X_h 와 Y_g 를 각각 X 와 Y 의 순환자리이동 버전(cyclic-shifted version)이라 할 때 X_h 는 X 를 h 번 순환 자리 이동하여 얻고 Y_g 는 Y 를 g 번 순환 자리 이동하여 구한다. 이 경우 2-D 하이브리드 부호는 $C_{g,h} = Y_g^T X_h$ 를 구함으로써 얻을 수 있다. 한 예로써 비이상적 [15, 7, 3] BIBD 부호와 단위행렬의 각행인 [3, 1, 0] 부호를 결합한 2-D 하이브리드 부호를 <표 1>에 나타내었다. 이때의 2-D 하이브리드 부호 길이는 $M \times N = 45$ 가 된다.

본 논문에서 사용하는 2-D 하이브리드 부호의 상호 상관관계를 구하기 위하여 다음과 같이 $C^{(d)}$, $d=0, 1, 2$ 또는 3으로 정의되는 4 개의 특성 행렬을 정의한다.

$$C^{(0)} = Y^T X \tag{1a}$$

$$C^{(1)} = Y^T \bar{X} \tag{1b}$$

$$C^{(2)} = \bar{Y}^T X \tag{1c}$$

$$C^{(3)} = \bar{Y}^T \bar{X} \tag{1d}$$

위의 식에서 \bar{X} 와 \bar{Y} 는 각각 X 와 Y 의 상보적(complementary) 부호 시퀀스를 나타낸다. $C^{(d)}$ 와 $C_{g,h}$

표 1. 2-D 하이브리드 부호의 예.
Table 1. An example of 2-D hybrid code.

$C_{g,h}$	[111011001010000]	[011101100101000] ...	X_h
$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 111011001010000 \\ 000000000000000 \\ 000000000000000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 011101100101000 \\ 000000000000000 \\ 000000000000000 \end{bmatrix}$...
$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 000000000000000 \\ 111011001010000 \\ 000000000000000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 000000000000000 \\ 011101100101000 \\ 000000000000000 \end{bmatrix}$...
$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 000000000000000 \\ 000000000000000 \\ 111011001010000 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 000000000000000 \\ 000000000000000 \\ 011101100101000 \end{bmatrix}$...
Y_g^T			

표 2. 2-D 하이브리드 부호의 상호 상관관계.
Table 2. Cross-correlations of 2-D hybrid codes.

$C_{g,h}$	$R^{(0)}(g,h)$	$R^{(1)}(g,h)$	$R^{(2)}(g,h)$	$R^{(3)}(g,h)$
$g=0, h=0$	k	0	0	0
$g=0, h \neq 0$	λ	$(k-\lambda)$	0	0
$g \neq 0, h=0$	0	0	k	0
$g \neq 0, h \neq 0$	0	0	λ	$(k-\lambda)$

사이의 상호 상관관계는 다음 식으로 정의 된다.

$$R^{(d)}(g,h) = \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} c_{ij}^{(d)} c_{(i+g)(j+h)}^{(d)} \quad (2)$$

위의 식에서 $c_{ij}^{(d)}$ 는 $C^{(d)}$ 의 요소이고 $c_{(i+g)(j+h)}^{(d)}$ 는 $C_{g,h}$ 의 요소를 나타낸다. 이와 같은 정의에 따른 2-D 하이브리드 부호의 상호 상관관계 $R^{(d)}(g,h)$ 를 <표 2>에 나타내었다.

위의 <표 2>의 결과를 이용하여 다음 식을 구할 수 있다.

$$R^{(0)}(g,h) - \alpha R^{(1)}(g,h) = \begin{cases} k & \text{for } g=0, h=0 \\ 0 & \text{elsewhere.} \end{cases} \quad (3)$$

위의 식에서 $\alpha = \frac{\lambda}{k-\lambda}$ 이다.

2. 2-D 하이브리드 OCDMA 시스템의 구성

그림 1은 2-D 하이브리드 부호를 이용한 공간/스펙트럼 OCDMA 네트워크를 보여준다. 이 네트워크는 $M \times N$ 개의 송수신기와 M 개의 별 모양 광결합기(star coupler)로 구성되어 있고 각 송수신기에는 2-D 하이브리드 부호 $C_{g,h}$ ($g=0, 1, \dots, M-1$ 그리고

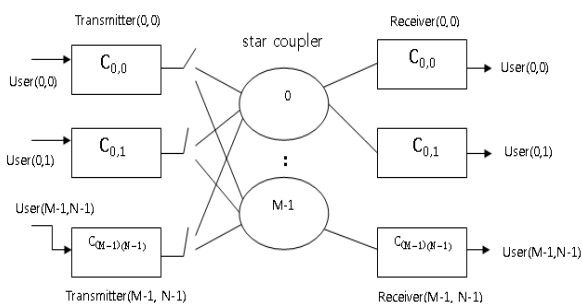


그림 1. 스펙트럼 /공간 OCDMA 네트워크
Fig. 1. Spectral /spatial OCDMA network.

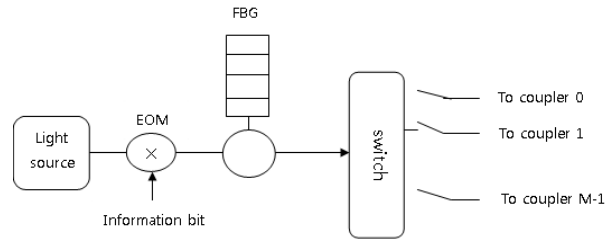


그림 2. 송신기 구조
Fig. 2. Transmitter structure.

$h=0, 1, \dots, N-1$)이 할당되어 있다. 송신기가 입력되는 정보를 수신기의 부호로 부호화한 후에 별 모양 광결합기를 사용하여 방송하면 해당 수신기는 단일 평형 검출기(single-balanced detector)를 사용하여 정보를 추출해 낸다.

그림 2에 그려진 송신기는 비편광 광대역 광원(unpolarized broadband light source)으로부터 온 빛을 전기 광학 변조기(electrooptic modulator(EOM))를 사용하여 ON-OFF 키잉(keying) 방법으로 변조한 후에 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating(FBG))를 이용하여 수신자의 X_h 에 따라 스펙트럼부호화 한다. 다음에 별 모양 광결합기와 연결하는 스위치를 사용하여 수신자의 Y_g 에 따라 공간부호화를 수행한다. 공간부호화를 위하여 스위치는 수신자의 공간 부호 시퀀스의 "1"에 해당하는 하나의 별 모양 광결합기에만 연결한다.

그림 3은 MAI를 제거하는 특성과 정보를 추출해내는 기능을 수행하는 $C_{0,0}$ 수신기의 구조를 보여주고 있다. 이 수신기는 공간 부호 시퀀스의 "1"에 해당하는 0 번 별 모양 광결합기와 연결된다. 이를 통하여 수신된 신호는 FBG1에 의해 스펙트럼 부호 시퀀스의 "1"에 해당하는 파장은 반사되어 PD1에서 수신되고 이 외의 파장은 FBG1을 통과하여 α 배로 감쇄된 후에 PD2에서

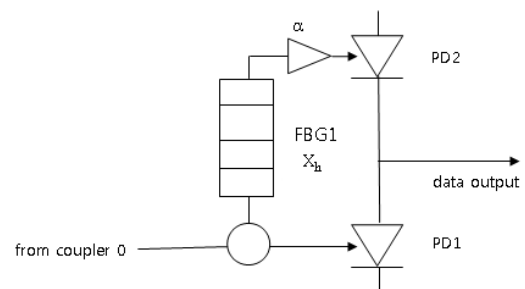


그림 3. 수신기 구조
Fig. 3. Receiver structure.

검출된다. 단일 평형 검출기를 거친 신호의 최종출력은 수식 (3)을 수행된 결과가 되고 따라서 MAI가 제거되고 오직 필요한 정보만 추출해 낸다.

이와 같은 구성은 본 논문에서 사용한 공간 부호 시퀀스가 오직 하나의 "1"을 포함하고 있어 별 모양 광결합기를 사용한 연결이 간편하고 또한 더블(double) 평형 검출기가 아닌 단일 평형 검출기를 사용하여 MAI를 제거하고 오직 필요한 정보를 추출해 낼 수 있는 장점이 있다.

III. 시스템 성능 분석

제안한 시스템의 성능 분석을 위하여 잡음 중에 주로 영향을 미치는 PIIN과 열잡음을 고려한다. $C_{0,0}$ 부호를 사용하는 수신기의 하나의 bit period 동안 PD1(photodiode 1)과 PD2에서 수신되는 파워스펙트럼 밀도(power spectral density(PSD))는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$G_1(\nu) = \frac{P_{sr}}{\Delta\nu} \sum_{k=0}^{K-1} d_k \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} c_{ij}^{(0)} c_{ij}(k) \cdot \left\{ \begin{array}{l} u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N} (-N + 2j) \right] \\ -u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N} (-N + 2j + 2) \right] \end{array} \right\}. \quad (4a)$$

$$G_2(\nu) = \frac{\alpha P_{sr}}{\Delta\nu} \sum_{k=0}^{K-1} d_k \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} c_{ij}^{(1)} c_{ij}(k) \cdot \left\{ \begin{array}{l} u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N} (-N + 2j) \right] \\ -u \left[\nu - \nu_0 - \frac{\Delta\nu}{2N} (-N + 2j + 2) \right] \end{array} \right\}. \quad (4b)$$

여기서 P_{sr} 은 단일 광원으로부터 수신된 전력을 나타내고 $\Delta\nu$ 는 이 신호의 광학적 대역폭(optical bandwidth)를 나타내며 $u[\nu]$ 는 식 (5)로 표시된 단위 계단 함수(unit step function)이다.

$$u[\nu] = \begin{cases} 1, & \nu \geq 0 \\ 0, & \nu < 0. \end{cases} \quad (5)$$

<표 2>가 보여 주듯이 부호 $\mathbf{C}_{g,h}$ 는 $g=0 \cap h=0$, $g=0 \cap h \neq 0$, $g \neq 0 \cap h=0$ 과 $g \neq 0 \cap h \neq 0$ 의 4 그룹으로 나누어지며 각각의 그룹에 속한 부호 수는 1, $(N-1)$, $(M-1)$ 과 $(M-1)(N-1)$ 이다. 따라서

현재 사용자 수가 K 명이라 가정할 경우 각각 그룹의 평균 사용자 수는 1, $\frac{(K-1)(N-1)}{(MN-1)}$, $\frac{(K-1)(M-1)}{(MN-1)}$

과 $\frac{(K-1)(M-1)(N-1)}{(MN-1)}$ 명이다. 각 사용자의 정보 $d_k = 1$ 이라 가정할 경우 PDs 1-2의 평균 전류는 각각 다음 식으로 나타내진다.

$$I_1 = R \int_0^\infty G_1(\nu) d\nu = \frac{RP_{sr}}{N} \left\{ k + \lambda \frac{(K-1)(N-1)}{(MN-1)} \right\} \quad (6a)$$

$$I_2 = R \int_0^\infty G_2(\nu) d\nu = \frac{RP_{sr}\alpha}{N} \left\{ (k-\lambda) \frac{(K-1)(N-1)}{(MN-1)} \right\} \quad (6b)$$

위의 식에서 R 은 PD의 감응도(responsivity)로써 $R = \frac{\eta e}{h\nu_c}$ 이며 η 는 양자 효율(quantum efficiency), e 는 전자의 전하량, h 는 Plank 상수, ν_c 는 광원의 중간 주파수이며 k 는 스펙트럼 부호의 부호 weight이다.

광전류(photocurrent) I 는 식 (7)로 표시될 수 있다.

$$I = (I_1 - I_2) = \frac{RP_{sr}k}{N}. \quad (7)$$

평균 제곱 광전력(mean square optical power)는 각각 식 (8)들로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \int_0^\infty G_1^2(\nu) d\nu &= \frac{P_{sr}^2}{N\Delta\nu} \sum_{j=0}^{N-1} \left[\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{M-1} c_{ij}^{(0)} c_{ij}(k) \right]^2 \\ &= \frac{P_{sr}^2}{N\Delta\nu} k \left[1 + \frac{\lambda(K-1)(N-1)}{k(MN-1)} \right]^2 \\ &= \frac{P_{sr}^2}{N\Delta\nu k (MN-1)^2} [k(MN-1) + \lambda(K-1)(N-1)]^2. \end{aligned} \quad (8a)$$

$$\begin{aligned} \int_0^\infty G_2^2(\nu) d\nu &= \frac{\alpha^2 P_{sr}^2}{N\Delta\nu} \sum_{j=0}^{N-1} \left[\sum_{k=0}^{K-1} \sum_{i=0}^{M-1} c_{ij}^{(1)} c_{ij}(k) \right]^2 \\ &= \frac{\alpha^2 P_{sr}^2}{N\Delta\nu} (N-k) \left[\frac{(k-\lambda)(K-1)(N-1)}{(N-k)(MN-1)} \right]^2 \\ &= \frac{P_{sr}^2}{N\Delta\nu (MN-1)^2 (N-k)} [\lambda(K-1)(N-1)]^2. \end{aligned} \quad (8b)$$

따라서 PIIN은 다음 식이 된다.

$$\begin{aligned} \langle I_{IN}^2 \rangle &= BR^2 \left[\int_0^\infty [G_1^2(\nu) + G_2^2(\nu)] d\nu \right] \\ &= \frac{BR^2 P_{sr}^2}{N\Delta\nu(MN-1)^2} \left\{ \frac{1}{k} [A_1 + A_2]^2 + \frac{1}{(N-k)} [A_2]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

여기서

$$A_1 = k(MN-1)$$

$A_2 = \lambda(K-1)(N-1)$ 을 나타낸다.

‘0’과 ‘1’이 동일한 확률로 전송된다고 가정하면

$$\begin{aligned} \langle I_{IN}^2 \rangle &= BR^2 \left[\int_0^\infty [G_1^2(\nu) + G_2^2(\nu)] d\nu \right] \\ &= \frac{BR^2 P_{sr}^2}{2N\Delta\nu(MN-1)^2} \left\{ \frac{1}{k} [A_1 + A_2]^2 + \frac{1}{(N-k)} [A_2]^2 \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다.

수신단에서 광전류의 분산은 PIIN, 산탄 잡음(shot noise)과 열잡음으로 구성되나 BER에 영향을 미치는 것은 주로 PIIN와 열잡음이므로 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle I^2 \rangle &= \langle I_{IN}^2 \rangle + \langle I_{th}^2 \rangle \\ &= \frac{BR^2 P_{sr}^2}{2N\Delta\nu(MN-1)^2} \left\{ \frac{1}{k} [A_1 + A_2]^2 + \frac{1}{(N-k)} [A_2]^2 \right\} \\ &\quad + \frac{4K_b T_n B}{R_L}. \end{aligned} \quad (11)$$

위의 식에서 K_b 는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant), T_n 은 수신기 잡음 절대온도(absolute receiver noise temperature)이고 R_L 은 수신기 부하 저항(receiver load resistance)이다.

위의 결과를 이용하여 신호 대 잡음비율(signal-to-noise ratio(SNR))을 구하면 다음 식 (12)가 된다.

$$\begin{aligned} SNR &= \frac{I^2}{\langle I^2 \rangle} \\ &= \frac{\left(\frac{RP_{sr}k}{N} \right)^2}{\frac{BR^2 P_{sr}^2}{2N\Delta\nu(MN-1)^2} \left\{ \frac{1}{k} [A_1 + A_2]^2 + \frac{1}{(N-k)} [A_2]^2 \right\} + \frac{4K_b T_n B}{R_L}}. \end{aligned} \quad (12)$$

가우시안 근사(Gaussian approximation)를 가정하고 비트오차율(BER(bit error rate))을 구하면 식 (13)이

표 3. BER 계산에 사용된 값들.

Table 3. Typical parameters used in the BER calculation.

PD quantum efficiency	$\eta = 0.6$
Optical center frequency	$\nu_c = 194 \text{ THz}(1550\text{nm})$
Line-width of source	$\Delta\nu = 3.75 \text{ THz}$
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	$P_{sr} = -25 \text{ dBm}$
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	$R_b = 155 \text{ Mbps}$

된다.

$$P_e = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{SNR}{8}} \right). \quad (13)$$

위의 조건에서 특히 입력신호가 $P_{sr} = -25 \text{ dBm}$ 으로 작은 조건에서 2-D 하이브리드 부호를 사용한 시스템의 성능을 분석한다. 입력신호가 작을 때 효과적인 스펙트럼 부호로는 비이상적 BIBD 부호 (40, 13, 4)를 사용하였고 공간적으로 연결하는 선의 수를 적게 하기

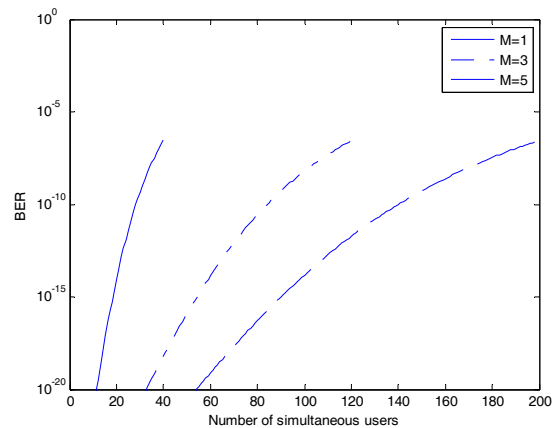


그림 4 $M=1, 3, 5$ 인 경우 동시사용자 수에 따른 BER
Fig. 4. Number of simultaneous users versus BER for $M=1, 3, 5$.

위하여 공간 부호로는 부호의 길이 $M=1, 3, 5$ 인 단위행렬의 각 행을 사용하였다. $M=1$ 인 경우는 공간적으로 확장하지 않은 경우로써 1-D(one dimensional) BIBD 부호에 해당하며 비교를 위하여 기준치로 사용하였다. 그림 4가 보여주는 바와 같이 $M=3$ 과 5인 경우 동시 사용자 수가 현저하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 비이상적 부호로 (121, 40, 13)을 사용하는 경우도 동일한 현상을 발견할 수 있었다.

IV. 결 론

본 논문은 입력신호가 작은 경우에 동시사용자 수를 증가시키기 위하여 단위행렬의 각 행을 공간 부호로 사용하고 비이상적 BIBD 부호를 스펙트럼 부호로 사용한 2-D 하이브리드 부호를 제안하였다. 이 결과 공간 부호의 길이 M 값이 임의의 양의 정수를 가질 수 있고 네트워크도 간단하게 구성할 수 있었다. 또한 이 시스템의 주된 잡음인 위상유도 강도 잡음(PIIN)과 열잡음을 분석하여 동시사용자 수에 따른 BER을 계산한 결과 공간 부호 길이 M 값이 증가하면 동시사용자 수가 현저히 증가함을 알 수 있었다.

REFERENCES

- [1] E. Yang, J. Huang and S. Tseng, "Optical CDMA Network Codecs Structured With M-Sequence Codes Over Waveguide-Grating Routers," IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 16, no. 2, pp. 641-643, Feb. 2004.
- [2] J. Wei and H. Ghafouri-Shiraz, "Codes for Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA Systems," J. of Lightwave Technology, Vol. 20, no. 8, pp. 1284-1291, Aug. 2002.
- [3] M. Noshad and K. Jamshidi, "Bounds for the BER of Codes with Fixed Cross Correlation in SAC-OCDMA Systems," J. of Lightwave Technology, Vol. 29, no. 13, pp. 1944-1950, July 2011.
- [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] Y. Jhee, "Modified Double Weight Code for Spectral-Amplitude-Coding Optical CDMA," J. of

The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 48, no. 4, pp. 1-5, April 2011.

- [6] Y. Jhee, "Spectral Efficiency of Symmetric Balance Incomplete Block Design Code," J. of The Institute of Electronics and Information Engineers, Vol. 50, no. 1, pp. 117-123, Jan. 2013.
- [7] C. Lin, J. Wu and C. Yang, "Noncoherent Spatial/Spectral Optical CDMA System With Two-Dimensional Perfect Difference Codes," J. of Lightwave Technology, Vol. 23, no. 12, pp. 3966-3980, April 2005.
- [8] M. Yeh, C. Lin and J. Wu, "Noncoherent Spectral/Spatial OCDMA System Using Two-Dimensional Hybrid Codes," J. of Optical Communication Network, Vol. 2, no. 9, pp. 653-661, Sep. 2010.

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>