논문 2013-50-1-14

# Symmetric Balance Incomplete Block Design Code의 Spectral Efficiency

## ( Spectral Efficiency 0f Symmetric Balance Incomplete Block Design Codes )

지 윤 규*

( Yoon Kyoo Jhee )

요 약

본 논문은 symmetric balance incomplete block design(BIBD) code의 BER=$10^{-9}$을 만족하는 spectral efficiency를 구하였다. 이 계산 결과 effective power가 큰 경우 ($P_{sr}=-10$ dBm)는 $m$=2로 고정시키고 $q$값을 변화시키는 ideal BIBD code 구성이 효율적이었다. 이와 반대로 effective power가 작은 경우 ($P_{sr}=-25$ dBm)는 ideal BIBD code 구성 보다는 $q>2$인 값을 취하고 $m$값을 변화시키는 설계가 더 효율적임을 알 수 있었다

Abstract

By calculating the spectral efficiency of symmetric balance incomplete block design(BIBD) codes satisfying BER=$10^{-9}$, it can be found that ideal BIBD code design with $m=2$ and various $q$'s is effective when effective power is high($P_{sr}=-10$ dBm). But BIBD code design with $q>2$ and various $m$'s can be effective when effective power is low($P_{sr}=-25$ dBm).

**Keywords** : spectral efficiency, BIBD code, phase-induced intensity noise(PIIN), optical CDMA

## Ⅰ. 서 론

간헐적으로 나타나면서 또한 비교적 낮은 bit rate(<1Gb/s)를 내보내는 local area network(LAN)에서 optical code-division multiple-access(OCDMA)는 asynchronous high-capacity 통신수단을 제공할 수 있어 유용하다. 초기의 CDMA 시스템은 신호를 time-domain에서 encode하기 위하여 pseudoorthogonal sequence를 사용하였으나 사용자 수가 증가하면 code의 길이가 매우 길어지며 multiple-access interference (MAI)가 증가하여 시스템 성능을 제한하는 요소가 된다. 이러한 문제를 해결하고 사용자간의 quasior-thogonality를 유지하기 위하여 spectral- amplitude-code(SAC) OCDMA가 제안되었고 이 방법을 이용하면 code의 길이도 줄이고 MAI를 제거할 수 있다[1, 4~6].

이와 같은 특성을 이용하기 위한 code로는 maximal-length sequential code(M-sequence codes), Hadamard codes, modified quadratic congruence codes와 symmetric balance incomplete block design(BIBD) code등이 사용되고 있다. 이 중에서 BIBD code는 code length가 $N=v(m)=\frac{q^{m+1}-1}{q-1}$이며 weight는

* 정회원, 이화여자대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering, Ewha Womans University)
접수일자: 2012년5월15일, 수정완료일: 2012년12월28일

$w = v(m-1) = \frac{q^m - 1}{q-1}$이고 in-phase cross correlation(CC)은 $\lambda = \frac{q^{m-1} - 1}{q-1}$인 $(N, w, \lambda)$ code로 구성되어 있다. 여기서 $q = p^n$으로 나타내는 prime power이며 $p$는 prime number이고 $m$과 $n$은 양의 정수이므로 $q$와 $m$값을 변화시켜 다양한 형태의 code를 얻을 수 있다. 또한 이를 이용하여 구한 code는 주기적인 특성을 지니므로 arrayed-waveguide grating(AWG) router의 주기적인 특성을 이용하여 보다 간단한 codec을 구성할 수 있는 장점도 지닌다.

광통신 시스템의 성능을 평가하는 기본적인 수단은 spectral efficiency($\eta_s$)이다. 이는 주어진 bit-error-rate (BER)를 만족하는 조건에서 단위 optical bandwidth에 대한 시스템의 throughput을 나타내므로 시스템의 성능이 우수하다는 것은 주어진 BER에서 spectral efficiency가 높다는 것을 의미한다[2].

본 논문은 Ⅱ장에서 일반적인 BIBD code와 ideal BIBD code의 구성방법을 설명한다. Ⅲ장에서 BIBD code의 주요 잡음인 phase-induced intensity noise (PIIN)와 thermal noise를 분석한 결과를 이용하여 BER=$10^{-9}$인 조건에서 spectral efficiency를 구하여 effective power의 조건에 따른 효율적인 시스템의 구현 방법을 기술하고 Ⅳ장에서 결론을 맺는다.

## Ⅱ. Symmetric Balance Incomplete Block Design(BIBD) Codes의 구성

### 1. 일반적인 BIBD Code의 구성

일반적인 BIBD code의 구성은 다음과 같이 projective geometry를 이용한다. Projective geometry PG$(m, q)$의 hyperplane과 point를 이용하여 symmetric $(v, b, r, k, \zeta)$ block design을 할 수 있다[3]. 이 block design은 $v = b = \frac{q^{m+1} - 1}{q-1}$, $r = k = \frac{q^m - 1}{q-1}$ 그리고 $\zeta = \frac{q^{m-1} - 1}{q-1}$로 이루어진다. 그리고 $v$개의 object와 $b$개의 block으로 구성되며 각 object는 $r$개의 block에 포함되어 있으며 각 block은 $k$개의 object를 포함한다. $v = b$이고 $r = k$인 경우 symmetric이라 부르며 이 경우 각각의 두 blocks은 $\zeta$개의 object에서 교차한다. 이를 이용한 code는 code length가 $N = v(m) = \frac{q^{m+1} - 1}{q-1}$이며 weight는 $w = v(m-1) = \frac{q^m - 1}{q-1}$이고 in-phase cross correlation(CC)은 $\lambda = \frac{q^{m-1} - 1}{q-1}$인 $(N, w, \lambda)$ code로 구성되어 있다. 여기서 $q = p^n$으로 나타내는 prime power이며 $p$는 prime number이고 $n$은 양의 정수이다. 그리고 $m(m \geq 2)$은 finite vector space의 dimension을 나타낸다.

이를 이용한 cyclic symmetric code design은 다음과 같은 방법으로 한다. $\overline{\alpha} = (\alpha_0, \alpha_1, \ldots \alpha_{m-1}, \alpha_m)$은 $\alpha_j (j \in \{0, 1, \ldots, m\})$가 Galois field GF$(q)$의 element인 $(m+1)$-tuple을 나타낸다. Tuple set S를 $\alpha_j$가 모두 "0"이 아닌 경우를 고려하면 S는 $(q^{m+1} - 1)$개의 member를 가지게 된다. 임의의 nonzero tuple $\overline{\alpha} \in$ S를 선택하여 $\overline{\alpha} \bullet x' = 0$을 풀면 $(q^m - 1)$개의 group으로 이루어진 근들을 얻을 수 있다.

이 중에서 $(q-1)$개는 서로 equivalent하므로 전체적으로 $v(m-1) = \frac{q^m - 1}{q-1}$ 종류의 equivalent class들을 얻을 수 있다. 여기서 $x \in$ S이며 $x'$는 $x$의 transpose를 의미한다. 각 equivalent class에서 한 group의 근을 택하여 $q$-ary number $(x_0, x_1, \ldots x_m)$을 mapping하여 얻은 $v(m-1) = \frac{q^m - 1}{q-1}$개로 이루어진 set를 $R$로 표시한다.

Set $R$에서 $D(R) = \{i : 0 \leq i < v(m), \beta^i \in R\}$ 식을 이용하여 하나의 decimal number sequence를 얻을 수 있다. 여기서 $\beta$는 GF$(q^{m+1})$의 primitive element이다.

다음으로 방정식 $D_k = D + k$, where $k \in \{0, 1, 2, \ldots, v(m) - 1\}$ 식을 이용하여 $v(m)$개의 number sequences를 얻을 수 있으며 이렇게 얻은 number sequences가 BIBD이다. 각각의 number sequences $D_k$로부터 다음 식을 이용하여 binary sequence $s(i)$를 얻는다.

$$s(i) = \begin{cases} 1, & \text{if } i \in D_k \\ 0, & else. \end{cases} \quad (1)$$

이 $v(m)$개의 $s(i)$ sequence가 최종적으로 얻은 code sequence가 된다.

하나의 예로 $q=2, m=4$인 경우 cyclic symmetric BIBD code sequence를 생성해 본다. GF($q^{m+1}$)=GF($2^5$)의 irreducible polynomial은 $x^5+x^2+1$이다. 이 경우 tuple set S는 (00001), (00010), (00011), (00100), ..., (11111)이다. 임의로 $\overline{\alpha}=(00101)$을 선택하여

표 1. BIBD code의 예.
Table 1. An example of BIBD code.

| $k$ 값 | $s(i)$ |
|---|---|
| $k=0$ | 10100110000011100100010101111101 |
| $k=1$ | 11010011000001110010001010111110 |
| $k=2$ | 01101001100000111001000101011111 |
| $k=3$ | 10110100110000011100100010101111 |
| $k=4$ | 11011010011000001110010001010111 |
| $k=5$ | 11101101001100000111001000101011 |
| $k=6$ | 11110110100110000011100100010101 |
| $k=7$ | 01111011010011000001110010001010 |
| $k=8$ | 10111101101001100000011100100010 |
| $k=9$ | 01011110110100110000011100100010 |
| $k=10$ | 10101111011010011000001110010001 |
| $k=11$ | 01010111101101001100000111001000 |
| $k=12$ | 00101011110110100110000011100100 |
| $k=13$ | 00010101111011010011000001110010 |
| $k=14$ | 10001010111101101001100000111001 |
| $k=15$ | 01000101011110110100110000011100 |
| $k=16$ | 00100010101111011010011000001110 |
| $k=17$ | 10010001010111101101001100000111 |
| $k=18$ | 11001000101011110110100110000011 |
| $k=19$ | 11100100010101111011010011000000 |
| $k=20$ | 01110010001010111101101001100000 |
| $k=21$ | 00111001000101011110110100110000 |
| $k=22$ | 00011100100010101111011010011000 |
| $k=23$ | 00001110010001010111101101001100 |
| $k=24$ | 00000111001000101011110110100110 |
| $k=25$ | 10000011100100010101111011010011 |
| $k=26$ | 11000001110010001010111101101001 |
| $k=27$ | 01100000111001000101011110110100 |
| $k=28$ | 00110000011100100010101111011010 |
| $k=29$ | 10011000001110010001010111101101 |
| $k=30$ | 01001100000111001000101011110110 |

$\overline{\alpha}\cdot x'=0$을 구하면 $(00101)\begin{pmatrix}x_0\\x_1\\x_2\\x^3\\x^4\end{pmatrix}=0$ 이므로 $x_2+x_4=0$을 만족해야 한다. 이를 만족하는 set $R$은 (00010), (01000), (01010), (00101), (00111), (01101), (01111), (10000), (10010), (11000), (11010), (10101), (10111), (11101), (11111)이다. $\beta^5=\beta^2+1$을 이용하여 $D(R)$을 구하면 (1, 3, 6, 7, 13, 14, 15, 18, 22, 24, 26, 27, 28, 29, 31)이 된다. $D_k=D+k$, where $k\in\{0,1,2,...,30\}$와 (1)식을 이용하여 구한 cyclic symmetric BIBD code의 예가 <표 1>에 나타나 있다.

### 2. Ideal BIBD Code의 구성

In-phase CC가 1인 경우 PIIN을 줄일 수 있는 특성이 있어 thermal noise를 무시한 경우 SNR을 극대화 시킬 수 있어 이상적이라 할 수 있다. 이는 BIBD code의 경우 $m=2$일 때에 해당하며 이 경우 code의 특성은 $(q^2+q+1, q+1, 1)$이 된다. $q=3, m=2$인 경우의 $(13, 4, 1)$ ideal code 생성과정은 다음과 같다. 우선 $\overline{\alpha}=(1\ 0\ 1)$이라 가정하면

$$(1\ 0\ 1)\begin{pmatrix}x_0\\x_1\\x_2\end{pmatrix}=0 \tag{2}$$

식 (2)이 만족되어야 하고 그 결과 $x_0+x_2=0$을 얻는다. 이를 만족하는 equivalence class들은 $(010, 020)$ $(102, 201)$ $(112, 211)$ $(122, 211)$이며 각 equivalence class에서 하나씩 뽑아 구성한 $R=(010,\ 102,\ 112,\ 122)$가 된다.

$GF(q^{m+1})=GF(3^3)$에서 irreducible polynomial $x^3+2x+1$을 활용하여 구한 $D(R)=(3, 7, 8, 10)$이므로 $k=0$일 때 얻은 $s(i)=0010001101000$이고 $k=9$일 때는 $s(i)=1101000001000$을 얻을 수 있다.

## Ⅲ. 시스템 성능 분석

본 시스템의 성능 분석을 위하여 잡음 중에 주로 영향을 미치는 PIIN과 thermal noise를 고려한다. Encoding process 이후 passive star coupler에서 합해

진후 decoder를 지난 $(N, w, \lambda)$ code word의 $c_k(i)$를 $k$번째 code word의 $i$번째 요소라 하면 code word의 특성은 식 (3)으로 나타난다.

$$\sum_{i=1}^{N} c_k(i)c_\ell(i) = \begin{cases} w, & k=\ell \\ \lambda, & k\neq\ell \end{cases} \quad k,\ell\in 1,\cdots,K. \tag{3a}$$

$$\sum_{i=1}^{N} c_k(i)\overline{c_\ell(i)} = \begin{cases} 0, & k=\ell \\ w-\lambda, & k\neq\ell \end{cases} \quad k,\ell\in 1,\cdots,K. \tag{3b}$$

$\ell$번째 수신기의 PD1 (photodiode 1)과 PD2에서 power spectral density (PSD)는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} G_1(v) = \frac{P_{sr}}{\triangle\nu}\sum_{k=1}^{K} d_k \sum_{i=1}^{N} c_k(i)c_\ell(i) \cdot \\ \left\{u\left[\nu-\nu_0-\frac{\triangle\nu}{2N}(-N+2i-2)\right]\right\} \\ -u\left[\nu-\nu_0-\frac{\triangle\nu}{2N}(-N+2i)\right]. \end{aligned} \tag{4a}$$

$$\begin{aligned} G_2(v) = \frac{\alpha P_{sr}}{\triangle\nu}\sum_{k=1}^{K} d_k \sum_{i=1}^{N} c_k(i)\overline{c_\ell}(i) \cdot \\ \left\{u\left[\nu-\nu_0-\frac{\triangle\nu}{2N}(-N+2i-2)\right]\right\} \\ -u\left[\nu-\nu_0-\frac{\triangle\nu}{2N}(-N+2i)\right]. \end{aligned} \tag{4b}$$

여기서 $P_{sr}$은 single source로부터 decoder를 통과한 후에 수신된 전력을 나타내고 $\triangle\nu$는 이 신호의 optical bandwidth를 나타내며 $u[\nu]$는 식 (5)로 표시된 unit step function이다.

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

Total incident optical power와 mean square optical power는 각각 식 (6)들로 나타낼 수 있다.

$$\int_0^\infty G_1(\nu)d\nu = \frac{P_{sr}}{N}(d_\ell w + \lambda\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq\ell}}^{K} d_k). \tag{6a}$$

$$\begin{aligned} \int_0^\infty G_1^2(\nu)d\nu = \frac{P_{sr}^2}{N\triangle\nu} \\ \sum_{i=1}^{N}\left\{c_\ell(i)\left[\sum_{k=1}^{K} d_k c_k(i)\right]\cdot\left[\sum_{m=1}^{K} d_m c_m(i)\right]\right\}. \end{aligned} \tag{6b}$$

$$\int_0^\infty G_2(\nu)d\nu = \frac{P_{sr}}{N}\lambda\sum_{\substack{k=1 \\ k\neq\ell}}^{K} d_k). \tag{6c}$$

$$\begin{aligned} \int_0^\infty G_2^2(\nu)d\nu = \frac{P_{sr}^2}{N\triangle\nu} \\ \sum_{i=1}^{N}\left\{\overline{c_\ell}(i)\left[\sum_{k=1}^{K} d_k c_k(i)\right]\cdot\left[\sum_{m=1}^{K} d_m c_m(i)\right]\right\}. \end{aligned} \tag{6d}$$

Photocurrent $I$는 식 (7)로 표시될 수 있다.

$$\begin{aligned} I = I_1 - I_2 = R\int_0^\infty G_1(\nu)d\nu - R\int_0^\infty G_2(\nu)d\nu \\ = \frac{RP_{sr}wd_\ell}{N}. \end{aligned} \tag{7}$$

식 (7)에서 $R$은 PD의 responsivity로써 $R = \frac{\eta e}{h\nu_c}$이며 $\eta$는 quantum efficiency, $e$는 electron's charge, $h$는 Plank 상수, $\nu_c$는 optical source의 중간주파수이다.

수신단에서 photocurrent의 variance는 PIIN, shot noise와 thermal noise로 구성되나 BER에 영향을 미치는 것은 주로 PIIN와 thermal noise이므로 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle I^2\rangle = \langle I_{IN}^2\rangle + \langle I_{th}^2\rangle \\ = BI_1^2\tau_{c1} + BI_2^2\tau_{c2} + \frac{4K_bT_nB}{R_L}. \end{aligned} \tag{8}$$

식 (8)에서 coherence time $\tau_c = \dfrac{\int_0^\infty G^2(\nu)d\nu}{\left[\int_0^\infty G(\nu)d\nu\right]^2}$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 (9)가 된다.

$$\langle I^2\rangle = BR^2\left[\int_0^\infty G_1^2(\nu)d\nu + \int_0^\infty G_2^2(\nu)d\nu\right] + \frac{4K_bT_nB}{R_L}. \tag{9}$$

모든 사용자가 데이터 '1'을 전송한다고 가정하고 $\sum_{m=1}^{K} c_m(i) = \frac{Kw}{N}$을 이용하면 다음 식이 된다.

$$\int_0^\infty G_1^2(\nu)d\nu = \frac{P_{sr}^2 Kw}{N^2\triangle\nu}[w+\lambda(K-1)].$$

$$\int_0^\infty G_2^2(\nu)d\nu = \frac{\alpha^2 P_{sr}^2 Kw}{N^2\triangle\nu}(K-1)(w-\lambda).$$

따라서 PIIN은 다음 식이 된다.

$$\langle I_{IN}^2\rangle = BR^2\left[\int_0^\infty G_1^2(\nu)d\nu + \int_0^\infty G_2^2(\nu)d\nu\right] = \frac{BR^2P_{sr}^2Kw^2}{N^2\triangle\nu}\left[1+(K-1)\frac{\lambda}{w-\lambda}\right].$$

위의 식을 대입하면 noise power는 식 (10)으로 주어진다.

$$\langle I^2\rangle = \frac{BR^2P_{sr}^2Kw^2}{N^2\triangle\nu}\left[1+(K-1)\frac{\lambda}{w-\lambda}\right]+\frac{4K_bT_nB}{R_L}. \quad (10)$$

실제로 각 사용자가 '1'을 전송할 확률은 $\frac{1}{2}$이므로 noise power는 식 (11)이 된다.

$$\langle I^2\rangle = \frac{BR^2P_{sr}^2Kw^2}{2N^2\triangle\nu}\left[1+(K-1)\frac{\lambda}{w-\lambda}\right]+\frac{4K_bT_nB}{R_L}. \quad (11)$$

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

$$SNR = \frac{(I_1-I_2)^2}{\langle I^2\rangle} = \frac{\frac{R^2P_{sr}^2w^2}{N^2}}{\frac{BR^2P_{sr}^2Kw^2}{2N^2\triangle\nu}\left[1+(K-1)\frac{\lambda}{w-\lambda}\right]+\frac{4K_bT_nB}{R_L}}. \quad (12)$$

Gaussian approximation을 가정하고 BER(bit error rate)을 구하면 식 (13)이 된다.

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

위의 조건에서 BER=$10^{-9}$를 만족하기 위한 SNR=143.9 이다. Spectral efficiency는

$$\eta_s = \frac{N_uB_b}{\Delta\nu} \quad (14)$$

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

| | |
|---|---|
| PD quantum efficiency | $\eta = 0.6$ |
| Optical center frequency | $\nu_c = 194$ THz(1550nm) |
| Electron's charge | $e = 1.602\times10^{-19}$ (C) |
| Plank's constant | $h = 6.626\times10^{-34}$ J.s |
| Responsivity | $R = \frac{\eta e}{h\nu_c} = 0.7477$ |
| Effective power | $P_{sr}$ =-10 dBm, -20 dBm, -25 dBm |
| Receiver electrical bandwidth | $B$=80 MHz |
| Boltzmann's constant | $K_b = 1.38\times10^{-23}$ J/K |
| Absolute receiver noise temperature | $T_n = 300^o$ K |
| Receiver load resistor | $R_L = 1030\Omega$ |
| Data bit rate | $R_b$ = 155 Mbps |

로 표시되는데 여기서 $N_u$는 동시사용자 수이고 $B_b$는 data bit rate이며 $\Delta\nu$는 optical bandwidth를 나타낸다. 이를 구하기 위하여 <표 4>에 주어진 바와 같이 data bit rate를 155 Mbps로 고정시키고 이를 만족시키기 위한 receiver electrical bandwidth를 80 MHz로 가정하였다. $q$와 $m$값을 변화시켜가며 구한 다양한 BIBD code에서 최대 동시사용자 수 $N_u$가 code의 길이 $N$과 같게 하여 (12)식을 이용하여 각 조건에서 optical bandwidth $\Delta\nu$를 구하고 이 결과를 (14)식에 대입하여 spectral efficiency $\eta_s$를 구하였다.

그림 1은 effective power $P_{sr}$ =-10 dBm인 조건에서 $q$의 값을 2, 3 또는 4로 고정시키고 $m$값을 변화시켜 code의 길이와 최대사용자수를 변화시켜가며 spectral efficiency를 구하였다. 또한 비교를 위하여 $m$=2로 고정시키고 $q$값을 변화시키며 구한 결과도 그림에 포함시켰다. $m=2$인 경우는 in-phase CC가 1이 되어 PIIN이 최소화되어 이상적이라 할 수 있다. 그림 1이 보여 주듯이 effective power $P_{sr}$ =-10 dBm인 경우는 $m$=2로 고정시키고 $q$값을 변화시키며 구한 결과가 가장 높은 spectral efficiency를 보여 주었다. 따라서 effective power가 충분이 큰 경우는 $m=2$로 고정시키고 $q$값을 변화시켜 최대사용자수를 증가시키는 방법 즉 ideal BIBD code 구성 방법이 효과적이다.

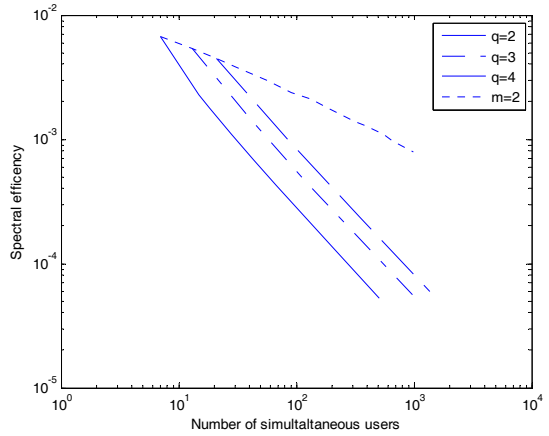


그림 1. $P_{sr}$=-10 dBm 일 때 동시사용자 수에 따른 spectral efficiency

Fig. 1. Spectral efficiency versus number of simultaneous users when $P_{sr}$=-10 dBm.

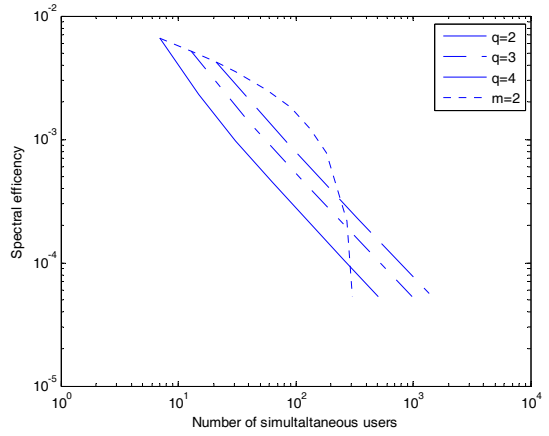


그림 2. $P_{sr}$=-20 dBm 일 때 동시사용자 수에 따른 spectral efficiency

Fig. 2. Spectral efficiency versus number of simultaneous users when $P_{sr}$=-20 dBm.

그림 2는 그림 1을 구한 경우와 같은 조건에서 effective power만 $P_{sr}=-20$ dBm으로 낮추어 계산한 결과를 나타내었다. 이 경우 최대사용자수 $N_u$가 큰 경우는 오히려 $m$=2로 고정시키고 $q$값을 변화시키며 구한 ideal BIBD code 구성 방법이 비효율적임을 알 수 있다.

그림 3은 그림 2와 동일한 조건에서 effective power를 $P_{sr}=-25$ dBm으로 더 낮추어 계산한 결과를 나타내었다. 이 결과 역시 $N_u$가 큰 경우는 오히려 $m$=2로 고정시키고 $q$값을 변화시키며 구한 ideal BIBD

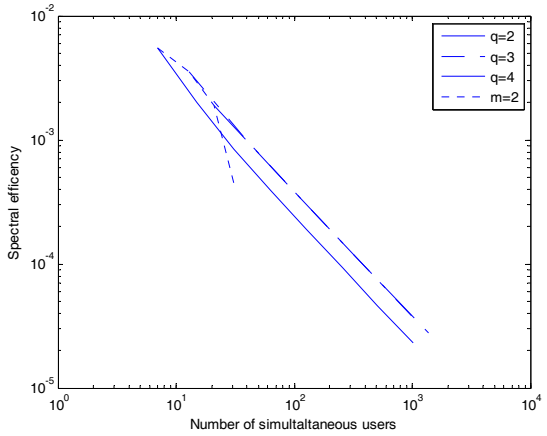


그림 3. $P_{sr}$=-25 dBm 일 때 동시사용자 수에 따른 spectral efficiency

Fig. 3. Spectral efficiency versus number of simultaneous users when $P_{sr}$=-25 dBm.

code 구성 방법이 훨씬 더 비효율적임을 알 수 있다. Effective power를 $P_{sr}=-25$ dBm으로 낮춘 경우는 thermal noise를 무시할 수 없어 $m$=2로 고정시키고 $q$ 값을 변화시키는 ideal BIBD code 구성 방법보다는 오히려 $q>2$인 값을 취하고 $m$값을 변화시키는 설계가 더 효율적임을 알 수 있다.

## IV. 결 론

본 논문은 $q$와 $m$값을 변화시켜가며 다양한 구성을 할 수 있는 BIBD code들의 spectral efficiency를 구하였다. 이 시스템의 주된 잡음인 phase-induced intensity noise(PIIN)와 thermal noise를 분석하여 BER=$10^{-9}$을 만족시키는 spectral efficiency를 계산한 결과 effective power가 큰 경우 ($P_{sr}=-10$ dBm)는 $m$=2로 고정시키고 $q$값을 변화시키는 ideal BIBD code 구성이 효율적이었다. 이와 반대로 effective power가 작은 경우 ($P_{sr}=-25$ dBm)는 ideal BIBD code 구성 보다는 $q>2$인 값을 취하고 $m$값을 변화시키는 설계가 더 효율적임을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

[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] H. Rochette, S. Ayotte and L. Rusch, "Analysis of the Spectral Efficiency of Frequency-Encoded OCDMA Systems with Incoherent Sources," J. of Lightwave Technology, Vol. 23, no. 4, pp. 1610-1619, April 2005.
[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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>