

새로운 다중파장 광직교 코드 생성기법

정회원 이쌍수*, 서승우*

A New Construction of Multi-Wavelength Optical Orthogonal Codes

Ssang-soo Lee*, Seung-woo Seo* *Regular Member*

요 약

광 코드분할 다중접속(CDMA)을 위한 다중파장 광직교 코드(MWOOC)가 연구된다. MWOOC는 좋은 상관성을 지니는 (0,1)의 음이 아닌 펄스와 파장들로 구성되어 있는 2차원 수열이다. 이러한 2차원 코드는 같은 상관성 조건 하에서 혼합 WDMA+CDMA 방식에서 사용되는 1차원 코드보다 그 수가 더 많다. 따라서, MWOOC를 사용함으로써, 많은 사용자들이 신호 동기화 없이도 정보를 효율적이고 안전하게 전송할 수 있다. 본 논문에서는, 사용 가능한 광파장의 수를 m , 코드워드(Codeword)의 길이를 n , Hamming Weight를 $\lambda+2$, 상관도를 λ 라고 할 때, $(m, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC 생성기법을 제안한다. 제안된 생성기법은 사용 가능한 광파장의 수와 코드워드의 길이 사이에 제약조건이 없으며, 상관도가 1 뿐만 아니라 1 보다 클 때에도 적용이 가능하다. 특히, 상관도가 1 일 때, 생성된 MWOOC는 최적이라는 것을 보인다. 또한, 생성된 MWOOC 코드워드간의 간섭확률을 혼합 WDMA+CDMA 방식과 비교하여 분석한다.

ABSTRACT

Multi-wavelength optical orthogonal codes (MWOOC's) for optical code-division multiple-access (CDMA) are investigated. An MWOOC is a family of two-dimensional sequences consisting of (0,1) non-negative pulses and wavelengths with "thumbtack" shaped autocorrelation and low cross-correlation properties. This kind of two-dimensional codes has larger cardinality than the one-dimensional codes used in the hybrid WDMA+CDMA scheme under the same correlation constraints. The use of MWOOC's enables a large number of asynchronous users to transmit information efficiently and reliably. In this paper, we present a new construction method for $(m, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC's with available wavelengths m , codeword length n , and constant Hamming weight $\lambda+2$ that have autocorrelation and cross-correlation values not exceeding λ . In this proposed scheme, there is no dependency between available wavelengths and codeword length, and it is also possible to set λ to be larger than as well as equal to 1. Specially, we show that the constructed code is optimal for $\lambda=1$. We also analyze its interference probability comparing with the hybrid WDMA+CDMA scheme.

I. 서론

광섬유 기술의 발전은 기존의가능하였던 많은 새로운 서비스를 가능하게 한다. 이것은 광섬유가 동

축케이블 보다 훨씬 더 큰 단위 길이당 대역폭 (Bandwidth)을 가지기 때문이다. 따라서, 광 코드분할 다중접속은 미래의 고속 광섬유 네트워크를 위해 제안되어 왔다.

광직교 코드(OOC)는 좋은 상관성을 가지는 (0,1)

* 서울대학교 전기공학부

논문번호: 98050-0206, 접수일자: 1998년 2월 6일

※ 본 연구는 기초전력공학공동연구소를 통한 한국전력의 지원에 의해 수행된 것임(97-중-04)

수열 즉, 코드워드의 집합이다. 같은 코드워드간의 상관도인 Autocorrelation은 서로 동기가 되었을 때 높은 값을 가지고 동기가 되지 않았을 때 낮은 값을 가지며, 서로 다른 코드워드간의 상관도인 Cross-correlation은 동기/비동기에 관계없이 낮은 값을 가진다. OOC에 관한 연구는 기존의 코드분할 다중접속(CDMA)의 기술을 광 섬유 채널에 응용하려는 시도에서 비롯되었다. OOC의 사용은 사용자가 광섬유 채널을 통하여 정보를 비동기로 효율적이고 안전하게 전송하게 한다. 네트워크 동기화의 요구가 없기 때문에 이러한 광통신 네트워크 시스템의 유연성은 크다. 지금까지 OOC는 참고 문헌 [1]-[3]과 같이 광범위하게 연구되어 왔다. 다중접속을 위한 OOC는 참고 문헌 [4], [5]에서 기술되어 있다. 동시에 많은 사용자를 지원하기 위해서는 광 코드분할 다중접속용 코드가 좋은 상관성을 가질 필요가 있다. 그러한 코드의 성질은 대개 큰 대역폭 확장을 통해 가능하다. 즉, 코드워드의 길이가 길어져야 한다. 그러나, 긴 길이의 코드워드는 그 만큼 빠른 암호화/해독화 하드웨어를 요구하기 때문에, 실제 구현 가능한 코드워드의 길이는 한계가 있다.

코드워드 길이의 확장 없이 많은 수의 코드워드를 생성하기 위해 여러 가지 방식이 제안되어 왔다. 혼합 WDMA+CDMA 방식은 [6] 1차원 코드워드를 사용하여 광 CDMA 네트워크 상에서 다중파장을 사용한다. 이 방식에서는 사용자 수가 적을 때, 이론적으로 에러 없이 전송하는 것이 가능하다. 시간-공간 광 CDMA 네트워크는 [7] 2차원 코드를 사용하는데, 각 코드워드는 시간과 공간상에서 동시에 코딩된다. 그러나 그 구조가 Multiple Star이고 Fiber Ribbon을 필요로 하므로 이 방식은 복잡하고 구현하기가 어렵다. 최근에 G. Yang과 W. C. Kwong은 [8] 사용 가능한 광파장의 수를 n , 코드워드(Codeword)의 길이를 n , Hamming Weight를 w , 상관도를 1이라 할 때, $(mn, w, 1)$ MWOOC 생성기법을 제안하였다. 이 방식은 임의의 Hamming Weight에 대해 적용할 수 있으며, 같은 조건하에서 혼합 WDMA+CDMA 방식보다 많은 수의 코드워드를 생성할 수 있다. 그러나 이 방식은 상관도가 1이고 사용 가능한 광파장의 수와 코드워드의 길이가 같을 때에만 적용할 수 있으므로 생성된 MWOOC의 최대 코드워드 수는 제한된다.

본 논문에서는, 사용 가능한 광파장의 수를 m , 코드워드(Codeword)의 길이를 n , Hamming Wei-

ght를 $\lambda+2$, 상관도를 λ 라고 할 때, $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC 생성기법을 제안한다. 이 기법은 보다 광범위한 상관도를 고려한다는 점에서 기존의 MWOOC 생성기법과 다르다. 제안된 생성기법은 사용 가능한 광파장의 수와 코드워드의 길이 사이에 제약조건이 없으며, 상관도가 1 뿐만 아니라 1보다 클 때에도 적용이 가능하다. 상관도가 1보다 클 때가 상관도가 1일 때 보다 비록 생성되는 MWOOC의 코드워드의 수는 더 많지만 MWOOC의 성능은 더 나쁘다. 그럼에도 불구하고, 실제 구현 가능한 하드웨어의 상세 요건상 사용되는 광파장의 수와 광대역폭은 제한되기 때문에, 요구되는 수의 사용자가 동시에 정보를 비동기로 전송하는 것을 지원하기 위해서는 광파장의 수와 광대역폭의 증가 없이 MWOOC의 코드워드의 수를 증대시켜야 하는 경우가 있다. 제안된 MWOOC 생성기법은 그러한 경우를 위해 효율적으로 사용될 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 2 장에서는 새로운 MWOOC 생성기법이 제시된다. 3 장에서는 생성된 $(mn, 3, 1)$ MWOOC 코드워드간의 간섭확률을 혼합 WDMA+CDMA 방식과 비교하여 분석한다. 끝으로, 4 장에서 결론을 맺는다.

II. MWOOC의 설계

이 장에서는 사용 가능한 광파장의 수를 m , 코드워드(Codeword)의 길이를 n , Hamming Weight를 w , 상관도를 λ 라고 할 때, (mn, w, λ) MWOOC 생성기법을 제안한다. 본 논문에서는 (n, w, λ, λ) OOC와 $(mn, w, \lambda, \lambda)$ MWOOC 표기 대신에 각각 (nw, λ) OOC와 (mn, w, λ) MWOOC의 단축된 표기를 사용하기로 한다. $(n, w, \lambda_a, \lambda_c)$ OOC와 $(mn, w, \lambda_a, \lambda_c)$ MWOOC의 정의는 [1], [2], [8]등에 잘 기술되어 있다. 특히, $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC에 있어서, Hamming Weight와 상관도의 관계를 기술하는 Lemma 1과 Lemma 2의 결과를 사용하여 $w=\lambda+2$ 일 때 MWOOC의 생성기법을 제안한다. 또한, $(mn, 3, 1)$ MWOOC의 최적성에 대해서 기술한다.

가. $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 생성
우선, Lemma 1과 Lemma 2에서 사용되는 연산자 '⊙'과 임의의 코드워드에 해당되는 위치 블록(Position Block)에 대해 정의한다.

정의: $f^p = (f_0^p, f_1^p, \dots, f_{w-1}^p)$
 $g^p = (g_0^p, g_1^p, \dots, g_{w-1}^p)$ 그리고

$\bar{a}^p = (a_0^p, a_1^p, \dots, a_{w-1}^p)$ 라고 하자. 단, 임의의 $t \in [0, w-1]$ 에 대해서 다음과 같은 관계가 있다.

$$a_t = f_t^p \odot g_t^p \quad (1)$$

그러면, $f_t^p = g_t^p$ 이면 $a_t = 1$ 이고, 그렇지 않다면 $a_t = 0$ 이다.

주의: 양의 정수 β 에 대해 $[0, \beta]$ 의 표기는 0, β 와 두 값 사이에 속한 정수로 구성된 집합이다.

정의: $x = (x_0, x_1, \dots, x_{n-1})$ 를 Hamming Weight가 w 이고 길이가 n 인 코드워드라고 하고, $x_{i_0} = x_{i_1} = \dots = x_{i_{w-1}} = 1$ 라고 가정하자. 단, $0 \leq j, k \leq w-1$ 에 대해 $0 \leq i_j, i_k \leq n-1$ 이고, $j \neq k$ 에 대해 $i_j \neq i_k$ 이다. 그러면, x 에 대응하는 위치 블록은 $x^p = (i_0, i_1, \dots, i_{w-1})$ 으로 정의된다. 예를 들면, $w=3$ 이고 $n=13$ 인 경우 $x = (1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 라고 하자. 그러면, x 에 대응하는 위치 블록은 $x_0 = x_1 = x_4 = 1$ 이기 때문에 $(0, 1, 4)$ 이다. 즉, 위치 블록은 코드워드의 단속 표기이다.

위의 두 정의는 Lemma 1, Lemma2 그리고 Theorem 1에서 사용된다.

Lemma 1: $f = (f_0, f_1, \dots, f_{m-1})$ 를 $w = \lambda + 2$ 일 때, (m, w, λ) OOC의 코드워드라 하고

$f^p = (f_0^p, f_1^p, \dots, f_{w-1}^p)$ 를 f 에 해당하는 위치 블록이라 하자. 그리고 $g^p = (g_0^p, g_1^p, \dots, g_{w-1}^p)$ 과 $h^p = (h_0^p, h_1^p, \dots, h_{w-1}^p)$ 이 다음을 만족한다고 하자.

$$g^p, h^p \in \{(f_{k,0} \oplus l, f_{k,1} \oplus l, \dots, f_{k,w-1} \oplus l)\} \quad (2)$$

여기서, $k \in [0, w-1]$ 과 $l \in [0, m-1]$ 에 대해서 $\{f_{k,0}, f_{k,1}, \dots, f_{k,w-1}\} \in \Pi f^p$ 이다. 즉,

$\{f_{k,0}, f_{k,1}, \dots, f_{k,w-1}\}$ 은 f^p 의 반복 없는 순열 조합의 집합에 속한다. 그리고 ‘ \oplus ’ 연산자는 m 으로 나누었을 때 나머지(Modulo- m Addition)를 나타낸다. 그러면, 다음의 부등식이 성립한다.

$$\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \lambda \quad (3)$$

증명: g^p 와 h^p 은 서로 다르기 때문에, $g_i^p \neq h_i^p$ 을 만족하는 어떤 $i \in [0, w-1]$ 가 존재한다. 이리하

여, $\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) < w$ 이다. 우선, $h^p \in \Pi g^p$ 에 대해서 $\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \lambda$ 이 성립함을 보인다.

$h^p \in \Pi g^p$ 은 $\{g_0^p, g_1^p, \dots, g_{w-1}^p\} = \{h_0^p, h_1^p, \dots, h_{w-1}^p\}$ 을 의미한다. 임의의 $i \neq j, l \in [0, m-1]$ 에 대해 $f_l^p \neq f_j^p, f_l^p \oplus l \neq f_j^p \oplus l$ 이기 때문에 임의의 $i \neq j$ 에 대해 $g_i^p \neq g_j^p, h_i^p \neq h_j^p$ 이 성립한다.

$\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) = w-1$ 라고 가정하자. 그러면, $g_i^p \neq h_i^p$ 을 만족하는 g_i^p, h_i^p 이 존재한다. 따라서, $\{g_0^p, g_1^p, \dots, g_{w-1}^p\} \neq \{h_0^p, h_1^p, \dots, h_{w-1}^p\}$ 이고 이것은 $h^p \in \Pi g^p$ 이라는 사실에 모순이다. 이리하여, $h^p \in \Pi g^p$ 에 대해 $\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq w-2 = \lambda$

이다. 다음, $h^p \notin \Pi g^p$ 에 대해 $\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \lambda$ 임을 보인다. 어떤 $i_g \neq i_h$ 에 대해 $h^p \notin \Pi g^p$ 이기 때문에 다음의 등식이 성립한다.

$$\{g_0^p, g_1^p, \dots, g_{w-1}^p\} = \quad (4)$$

$$\{f_{i_g}^p \oplus l_g, f_{i_g}^p \oplus l_g, \dots, f_{i_g}^p \oplus l_g\} \quad (5)$$

$$\{h_0^p, h_1^p, \dots, h_{w-1}^p\} =$$

$$\{f_{i_h}^p \oplus l_h, f_{i_h}^p \oplus l_h, \dots, f_{i_h}^p \oplus l_h\}$$

g 와 h 를 각각 위치 블록 g^p 와 h^p 에 대응하는 m 차 이진 수열이라 하자. 그러면, 적어도 $g_i^p \odot h_i^p = 1$ 을 만족하는 i 에 대해 $g_i = h_i = 1$ 이므로 다음의 부등식이 성립한다.

$$\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \sum_{i=0}^{w-1} g_i h_i \quad (6)$$

(m, w, λ) OOC의 Autocorrelation 상관성 제약에 의해 $0 < \tau (= i_h - i_g) \leq m-1$ 에 대해 다음이 성립한다.

$$\sum_{i=0}^{w-1} g_i h_i = \sum_{i=0}^{w-1} g_i g_{i \oplus \tau} = \sum_{i=0}^{w-1} f_i f_{i \oplus \tau} \leq \lambda \quad (7)$$

이리하여, $\sum_{i=0}^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \lambda$ 이 성립한다. <증명 끝>

Lemma 2: $f_x = (f_{x,0}, f_{x,1}, \dots, f_{x,m-1})$ 와

$f_y = (f_{y,0}, f_{y,1}, \dots, f_{y,m-1})$ 을 (m, w, λ) OOC의 서로 다른 코드워드라 하고, $f_x^p = (f_{x,0}^p, f_{x,1}^p, \dots, f_{x,w-1}^p)$

와 $f_y^p = (f_{y,0}^p, f_{y,1}^p, \dots, f_{y,w-1}^p)$ 을 각각 f_x 와 f_y 에 해당하는 위치 블록이라 하자.

$k \in [0, w-1], l_x, l_y \in [0, m-1]$ 에 대해

$$(f_{k,x,0}, f_{k,x,1}, \dots, f_{k,x,w-1}) \in$$

$$\prod f_x^p, (f_{k,y,0}, f_{k,y,1}, \dots, f_{k,y,w-1}) \in \prod f_y^p$$

일 때, 아래의 수식을 만족한다고 한다고 하자.

$$g^p \in \tag{8}$$

$$\{(f_{k,x,0} \oplus l_g, f_{k,x,1} \oplus l_g, \dots, f_{k,x,w-1} \oplus l_g)\}$$

$$h^p \in \tag{9}$$

$$\{(f_{k,y,0} \oplus l_h, f_{k,y,1} \oplus l_h, \dots, f_{k,y,w-1} \oplus l_h)\}$$

그렇다면, 다음의 부등식이 성립된다.

$$\sum_0^w (g_i^p \odot h_i^p) \leq \lambda \tag{10}$$

증명: g^p 와 h^p 은 서로 다르기 때문에 $g_i^p \neq h_i^p$ 을 만족하는 어떤 $i \in [0, w-1]$ 가 존재한다. 따라서,

$$\sum_0^w (g_i^p \odot h_i^p) < w \text{이다.}$$

$$(f_{k,x,0}, f_{k,x,1}, \dots, f_{k,x,w-1}) \in \prod f_x^p \text{와}$$

$(f_{k,y,0}, f_{k,y,1}, \dots, f_{k,y,w-1}) \in \prod f_y^p$ 은 다음을 의미한다.

$$\{f_{k,x,0}, f_{k,x,1}, \dots, f_{k,x,w-1}\} = \tag{11}$$

$$\{f_{x,0}^p, f_{x,1}^p, \dots, f_{x,w-1}^p\}$$

$$\{f_{k,y,0}, f_{k,y,1}, \dots, f_{k,y,w-1}\} = \tag{12}$$

$$\{f_{y,0}^p, f_{y,1}^p, \dots, f_{y,w-1}^p\}$$

그렇다면,

$$\{g_0^p, g_1^p, \dots, g_{w-1}^p\} = \tag{13}$$

$$\{(f_{x,0}^p \oplus l_g, f_{x,1}^p \oplus l_g, \dots, f_{x,w-1}^p \oplus l_g)\}$$

$$\{h_0^p, h_1^p, \dots, h_{w-1}^p\} = \tag{14}$$

$$\{(f_{y,0}^p \oplus l_h, f_{y,1}^p \oplus l_h, \dots, f_{y,w-1}^p \oplus l_h)\}$$

이다. g 와 h 를 각각 위치 블록 g^p 와 h^p 에 대응하는 m 차 이진 수열이라 하자. 그러면, 적어도 $g_i^p \odot h_i^p = 1$ 을 만족하는 i 에 대해 $g_i = h_i = 1$ 이므로 다음의 부등식이 성립한다.

$$\sum_0^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \sum_0^{w-1} g_i h_i \tag{15}$$

(m, w, λ) OOC의 Cross-correlation 상관성 제약에 의해 $0 \leq \tau (= l_h - l_g) \leq m-1$ 에 대해 다음이 성립한다.

$$\sum_0^{w-1} g_i h_i = \sum_0^{w-1} f_{x,t} f_{y,t \oplus \tau} \leq \lambda \tag{16}$$

이리하여, $\sum_0^{w-1} (g_i^p \odot h_i^p) \leq \lambda$ 이 성립한다. <증명 끝>

Lemma 1과 Lemma 2의 결과를 이용하여, 사용

가능한 광파장의 수를 m , 코드워드(Codeword)의 길이를 n , Hamming Weight를 $\lambda+2$, 상관도를 λ 라고 할 때, $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC 생성기법을 다음과 같이 제안한다.

$$\{(a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1}) \mid q \in [0, s-1]\} \text{과}$$

$$\{(b_{r,0}, b_{r,1}, \dots, b_{r,w-1}) \mid r \in [0, t-1]\} \text{을 각각}$$

$(m, \lambda+2, \lambda)$ OOC와 $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 코드워드 집합에 대응하는 위치 블록의 집합이라고 하자.

$$s \leq \frac{(m-1)(m-2)\dots(m-\lambda)}{w(w-1)(w-2)\dots(w-\lambda)}, \tag{17}$$

$$t \leq \frac{(n-1)(n-2)\dots(n-\lambda)}{w(w-1)(w-2)\dots(w-\lambda)}$$

여기서, $w = \lambda+2$ 이고 s 와 t 는 각각 $(m, \lambda+2, \lambda)$ OOC와 $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC에 속하는 코드워드의 최대 수(Cardinality)이며 Johnson Bound에 [1] 의해 상위값이 제한된다. $(a_{k,q,0}, a_{k,q,1}, \dots, a_{k,q,w-1})$ 이

$$\prod (a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1}) \text{으로 표기되는}$$

$(a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1})$ 의 순열 조합의 집합에 속한다고 하자. 그러면, $\prod (a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1})$ 에는 $w!$ 개의 서로 다른 원소가 존재한다.

$w = \lambda+2, k \in [0, w!-1], q \in [0, s-1], l \in [0, m-1]$, 이라 할 때, 위치 블록 집합인 C 는 다음과 같이 구성된다.

$$C_0 = \{((a_{k,q,0} \oplus l, b_{r,0}), (a_{k,q,1} \oplus l, b_{r,1}), \dots, (a_{k,q,w-1} \oplus l, b_{r,w-1}))\} \tag{18}$$

$$C_1 = \{((a_{q,0} \oplus l, 0), (a_{q,1} \oplus l, 0), \dots, (a_{q,w-1} \oplus l, 0))\} \tag{19}$$

$$C_2 = \{((l, b_{r,0}), (l, b_{r,1}), \dots, (l, b_{r,w-1}))\} \tag{20}$$

여기서, 각 쌍의 (v, h) 은 2차원 코드워드를 matrix로 나타냈을 때, 좌상위 기준으로 이진수 1의 수직 변위와 수평 변위를 나타낸다 [8].

Theorem 1: $C = C_0 \cup C_1 \cup C_2$ 라고 하자. 그러면, 위치 블록 집합 C 에 해당하는 코드워드의 집합은 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC이다.

증명: 부록 참조

나. $(mn, 3, 1)$ MWOOC의 최적성(Optimality)

이 부분에서는 제안된 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC에 속한 코드워드의 최대 수와 $(mn, 3, 1)$ MWOOC의 최적성에 대해 논한다. $|C_0|, |C_1|, |C_2|$ 을 각각 Theorem 1에서 정의된 C_0, C_1, C_2 에 해당하는 코

드워드 집합의 최대 수라고 하면, 다음의 등식이 성립한다.

$$|C_0| = mstw!, \quad |C_1| = ms, \quad |C_2| = mt \quad (21)$$

$$C_0 \cap C_1 = C_0 \cap C_2 = C_1 \cap C_2 = \emptyset \text{ 이기 때문에}$$

Theorem 1에서 제시된 C에 의해 생성된 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 최대 코드워드 수는 다음과 같다.

$$|C| = \sum_{i=0}^2 |C_i| = mstw! + ms + mt \quad (22)$$

m과 n이 6으로 나누었을 때 나머지가 1이 되는 정수라면, [1]의 Theorem 5에 의해서 s와 t는 다음과 같이 주어진다.

$$s = \frac{m-1}{6}, \quad t = \frac{n-1}{6} \quad (23)$$

이러하여, Theorem 1에서 C에 의해 생성된 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 최대 코드워드의 수는 다음과 같이 계산된다.

$$|C| = m \left(\frac{m-1}{6} \right) \left(\frac{n-1}{6} \right) 3! + m \left(\frac{m-1}{6} \right) + m \left(\frac{n-1}{6} \right) \quad (24)$$

$$= \frac{m(m-1)(n-1) + m(m-1) + m(n-1)}{6} = \frac{m(mn-1)}{6}$$

$\Phi(mn, w, \lambda)$ 을 [1], [3], [9]에서와 같이 (mn, w, λ) MWOOC의 최대 코드워드의 수라고 정의하면, [8]의 수식 (4)에 의해 다음의 수식이 성립한다.

$$|C| = \Phi(mn, 3, 1) \leq \frac{m(mn-1)}{6} \quad (25)$$

따라서, m과 n이 6으로 나누었을 때 나머지가 1이 되는 정수라면, Theorem 1에서 C에 의해 생성된 $(mn, 3, 1)$ MWOOC는 최적이다.

보기 1: $m=7, n=13, w=3, \lambda=1$ 이라 하자. $(7,3,1)$ OOC와 $(13,3,1)$ OOC의 위치 블록은 [1]에 의해 각각 $(0,1,3)$ 과 $(0,1,4), (0,2,7)$ 로 구할 수 있다. 그러므로, 최적 MWOOC는 105개의 코드워드를 가지며, 대응하는 위치 블록 집합 C는 다음과 같다.

$$C = C_0 \cup C_1 \cup C_2$$

$$C_0 = \{[(0 \oplus 1, 0), (1 \oplus 1, 1), (3 \oplus 1, 4)], [(0 \oplus 1, 0), (3 \oplus 1, 1), (1 \oplus 1, 4)], [(1 \oplus 1, 0), (0 \oplus 1, 1), (3 \oplus 1, 4)], [(1 \oplus 1, 0), (3 \oplus 1, 1), (0 \oplus 1, 4)], [(3 \oplus 1, 0), (0 \oplus 1, 1), (1 \oplus 1, 4)], [(3 \oplus 1, 0), (1 \oplus 1, 1), (0 \oplus 1, 4)], [(0 \oplus 1, 0), (1 \oplus 1, 2), (3 \oplus 1, 7)], [(0 \oplus 1, 0), (3 \oplus 1, 2), (1 \oplus 1, 7)], [(1 \oplus 1, 0), (0 \oplus 1, 2), (3 \oplus 1, 7)], [(1 \oplus 1, 0),$$

$$(3 \oplus 1, 2), (0 \oplus 1, 7)], [(3 \oplus 1, 0), (0 \oplus 1, 2), (1 \oplus 1, 7)], [(3 \oplus 1, 0), (1 \oplus 1, 2), (0 \oplus 1, 7)],$$

$$C_1 = \{[(0 \oplus 1, 0), (1 \oplus 1, 0), (3 \oplus 1, 0)]\}$$

$$C_2 = \{[(1, 0), (1, 1), (1, 4)], [(1, 0), (1, 2), (1, 7)]\}$$

여기서, $l \in [0, 6]$ 이다.

III. 성능 분석

이 장에서는 $(mn, 3, 1)$ MWOOC에 있어서, 기준 사용자에 대한 다른 사용자의 간섭 확률을 분석한다. 단, 광을 감지할 때 발생하는 각종 잡음 신호는 무시하기로 한다. 수학적 분석의 편의상 전송 데이터는 칩(Chip) 단위로 동기화되어 있다고 가정하고, 별도의 제한기가 없는 감지기(Soft-limiting Detector)를 사용한다고 하자. 각 사용자는 $(mn, 3, 1)$ 에 있는 서로 다른 코드워드를 할당받는다. 사용자 i 를 기준 사용자라 하고 사용자 j 를 사용자 i 와 다른 임의의 사용자라 하자. 데이터를 전송할 때, 사용자 j 가 사용자 i 에 간섭을 일으킬 확률은 동일하지 않으며, 사용자에 따라 다르다. $\bar{P}_r(i, j)$ 를 사용자 j 의 전송 데이터가 사용자 i 의 전송 데이터에 간섭할 확률이라고 하자. 각 사용자가 전송하는 데이터는 동일한 확률로 0 또는 1이 전송된다고 가정한다. 그러면, 조건 확률 이론에 의해 [10], $\bar{P}_r(i, j)$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\bar{P}_r(i, j) = P_r(j \text{가 1을 전송함}) \cdot \bar{P}_r(i, j | j \text{가 1을 전송함}) \quad (26)$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \sum_{i \in C_i} \sum_{j \in C_j} \bar{P}_r(i, j | i \in C_i, j \in C_j, j \text{가 1을 전송함}) \cdot P_r(i \in C_i, j \in C_j)$$

$$\frac{3}{2mn} < \bar{P}_r(i, j) < \frac{9}{2mn} \text{ for } t \geq 2 \quad (27)$$

여기서, 각 항은 다음과 같다.

$$\sum_{i \in C_i} \sum_{j \in C_j} P_r(i \in C_i, j \in C_j) = 1. \quad (28)$$

$$s \leq \frac{m-1}{6}, \quad t \leq \frac{n-1}{6} \quad (29)$$

$$\left(\frac{6ms-1}{6mst-1} \right) \left(\frac{1}{m} \right) \left(\frac{6}{n} \right) + \left(\frac{6ms(t-1)}{6mst-1} \right) \left(\frac{1}{m} \right) \left(\frac{9}{n} \right)$$

$$\bar{P}_r(i, j | i \in C_0, j \in C_1, j \text{가 1을 전송함}) \quad (30)$$

$$= \bar{P}_r(i, j | i \in C_1, j \in C_0, j \text{가 1을 전송함}) = \left(\frac{3}{m} \right) \left(\frac{3}{n} \right)$$

$$\bar{P}_r(i, j | i \in C_0, j \in C_2, j \text{가 1을 전송함}) \quad (31)$$

$$= \overline{P}_r(i, j | i \in C_2, j \in C_0, j \text{가 } 1\text{을 전송함}) \\ = \binom{3}{m} \binom{3}{n}$$

$$\overline{P}_r(i, j | i \in C_1, j \in C_1, j \text{가 } 1\text{을 전송함}) \quad (32)$$

$$= \binom{m-1}{ms-1} \binom{6}{m-1} \binom{1}{n} \\ + \binom{m(s-1)}{ms-1} \binom{9}{m} \binom{1}{n}$$

$$\overline{P}_r(i, j | i \in C_1, j \in C_2, j \text{가 } 1\text{을 전송함}) \quad (33)$$

$$= \overline{P}_r(i, j | i \in C_2, j \in C_1, j \text{가 } 1\text{을 전송함}) \\ = \binom{3}{m} \binom{3}{n}$$

$$\overline{P}_r(i, j | i \in C_2, j \in C_2, j \text{가 } 1\text{을 전송함}) \quad (34)$$

$$= \binom{t-1}{mt-1} \binom{9}{n}$$

$$P_r(i \in C_0, j \in C_0) \quad (35)$$

$$= \binom{6mst}{6mst+ms+mt} \binom{6mst-1}{6mst+ms+mt-1}$$

$$P_r(i \in C_0, j \in C_1) = P_r(i \in C_1, j \in C_0) \quad (36)$$

$$= \binom{6mst}{6mst+ms+mt} \binom{ms}{6mst+ms+mt-1}$$

$$P_r(i \in C_0, j \in C_2) = P_r(i \in C_2, j \in C_0) \quad (37)$$

$$= \binom{6mst}{6mst+ms+mt} \binom{mt}{6mst+ms+mt-1}$$

$$P_r(i \in C_1, j \in C_1) = \quad (38)$$

$$\binom{ms}{6mst+ms+mt} \binom{ms-1}{6mst+ms+mt-1}$$

$$P_r(i \in C_1, j \in C_2) = P_r(i \in C_2, j \in C_1) \quad (39)$$

$$= \binom{ms}{6mst+ms+mt} \binom{mt}{6mst+ms+mt-1}$$

$$P_r(i \in C_2, j \in C_2) = \quad (40)$$

$$\binom{mt}{6mst+ms+mt} \binom{mt-1}{6mst+ms+mt-1}$$

표 1. $w=3, \lambda=1$ 일 때, WDMA+CDMA와 MWOOC의 M 과 q

m	n	WDMA+CDMA의 M	MWOOC[8]의 M	제시된 MWOOC의 M	WDMA+CDMA의 q	MWOOC[8]의 q	제시된 MWOOC의 q
7	13	14	구현 불가능	105	0.266×10^{-1}	.	0.490×10^{-1}
7	61	70	구현 불가능	497	0.962×10^{-2}	.	0.105×10^{-1}
7	121	140	364	987	0.508×10^{-2}	.	0.531×10^{-2}
13	13	26	구현 불가능	364	0.138×10^{-1}	0.374×10^{-1}	0.265×10^{-1}
13	61	130	구현 불가능	1,716	0.515×10^{-2}	.	0.567×10^{-2}
13	121	260	구현 불가능	3,406	0.273×10^{-2}	.	0.286×10^{-2}
25	13	50	구현 불가능	1,350	0.706×10^{-2}	.	0.138×10^{-1}
25	61	250	구현 불가능	6,350	0.267×10^{-2}	.	0.295×10^{-2}
25	121	500	구현 불가능	12,600	0.142×10^{-2}	.	0.149×10^{-2}
61	13	122	구현 불가능	8,052	0.286×10^{-2}	.	0.567×10^{-2}
61	61	610	37,820	37,820	0.109×10^{-2}	0.131×10^{-2}	0.121×10^{-2}
61	121	1,220	구현 불가능	75,030	0.580×10^{-3}	.	0.610×10^{-3}

T_k 와 M 을 각각 수신단의 감지 임계값(Detection Threshold)과 광통신 시스템의 총 사용자 수라고 하자. 각 사용자의 전송 에러 확률은, 기준 사용자가 0을 전송하고 그 외 사용자들의 간섭이 감지 임계값 이상인 모든 경우를 고려하여 계산된다. 왜냐하면, 사용자가 1을 전송할 때에는 최소한 감지 임계값이 보장되므로 수신단에서 0으로 감지할 수는 없기 때문이다. 그러므로, $q = \overline{P}_r(i, j)$ 라고 하면, 각 사용자의 전송 에러 확률 P_e 는 다음과 같다.

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{K-1} \binom{M-1}{k} q^k (1-q)^{M-1-k} \quad (41)$$

IV. 결론

본 논문에서는 (m, w, λ) OOC와 (n, w, λ) OOC에 기초하여 새로운 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC 생성 기법을 제안하였다. 또한, 상관도 λ 값을 변화시켜 데이터 전송 대역폭을 확장하지 않고서도 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC에 있는 코드워드의 수를 선택할 수 있다. 특히, m 과 n 이 6으로 나누었을 때 나머지가 1이 되는 정수라면, 제시된 생성기법에 의한 $(mn, 3, 1)$ MWOOC는 최적(Optimal)이다.

$(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC는 혼합 WDMA+CDMA 방식에서 사용된 1차원 코드 보다 더 많은 코드워드를 가지며, 임의의 m 과 n 그리고 $\lambda \geq 1$ 에 대해 폭 넓게 적용될 수 있다.

그러므로, 제시된 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 생성 기법을 사용하면, 같은 전송 대역폭과 상관성 제약 조건 하에서 더 많은 코드워드를 만들 수 있어서, 더 많은 사용자의 데이터 전송을 지원한다. $(mn, 3, 1)$ MWOOC의 성능을 분석하였으며, 종래의 혼합 WDMA+CDMA 방식, $(mn, 3, 1)$ MWOOC [8]와 비교하였다. 그럼에도 불구하고 $(mn, w(\neq \lambda+2), \lambda)$ MWOOC의 생성기법과 성능 분석은 앞으로 연구해야 할 과제로 남아있다. 또한, 제안된 기법은 다중파장간의 간섭으로 인하여 광섬유의 비선형 효과에 민감할 수 있는데 인접하는 파장에 제약조건을 두어 파장의 급격한 변화를 줄이게 함으로써 비선형의 영향을 덜 받게 할 수 있다.

부 록

이 부록에서는 Theorem 1에 대한 증명을 기술한

다.

Theorem 1의 증명: 우선, C에 속한 임의의 위치 블록에 대응하는 코드워드에 대하여, $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 Autocorrelation 제약조건을 만족함을 보인다. x, y, z를 각각

$x^p \in C_0, y^p \in C_1, z^p \in C_2$ 의 위치 블록에 대응하는 코드워드라고 하자. 여기서, x^p, y^p, z^p 은 $w = \lambda+2, k \in [0, w!-1], q \in [0, s-1], l \in [0, m-1]$, $r \in [0, \tau-1]$ 에 대하여 다음과 같이 주어진다.

$$x^p = ((a_{k,q,0} \oplus l, b_{r,0}), (a_{k,q,1} \oplus l, b_{r,1}), \dots, (a_{k,q,w-1} \oplus l, b_{r,w-1})) \quad (42)$$

$$y^p = ((a_{q,0} \oplus l, 0), (a_{q,1} \oplus l, 0), \dots, (a_{q,w-1} \oplus l, 0)) \quad (43)$$

$$z^p = ((l, b_{r,0}), (l, b_{r,1}), \dots, (l, b_{r,w-1})) \quad (44)$$

$$f = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$$

을 위치 블록 $f^p = (b_{r,0}, b_{r,1}, \dots, b_{r,w-1})$ 에 대응하는 $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 코드워드라 하자. $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 Autocorrelation 제약조건에 의해, $0 < \tau \leq n-1$ 에 대해 다음의 수식이 성립한다.

$$R_H(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} f_i f_{i \oplus \tau} \leq \lambda \quad (45)$$

$$(a_{k,q,0}, a_{k,q,1}, \dots, a_{k,q,w-1}) = \prod (a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1})$$

은 $(a_{k,q,0}, a_{k,q,1}, \dots, a_{k,q,w-1}) = (a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1})$ 을 의미한다. 임의의 $i \neq j, l \in [0, m-1]$ 에 대해, $a_{q,i} \neq a_{q,j}, a_{q,i} \oplus l \neq a_{q,j} \oplus l$ 이기 때문에 $a_{k,q,i} \oplus l \neq a_{k,q,j} \oplus l$ 이다. 그러면, $0 < \tau \leq n-1$ 에 대해 다음의 수식이 성립한다.

$$R_{xx}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} x_{i,j} x_{i \oplus \tau, j} \leq R_H(\tau) \leq \lambda \quad (46)$$

$$R_{yy}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} y_{i,j} y_{i \oplus \tau, j} = 0 \leq \lambda \quad (47)$$

$$R_{zz}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} z_{i,j} z_{i \oplus \tau, j} = \sum_{i=0}^{\tau-1} z_{i,j} z_{i \oplus \tau, j} = R_H(\tau) \leq \lambda$$

여기서, $x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j}$ 은 각각 x, y, z를 Matrix로 표현할 때, 좌상위를 기준으로 i번째 열과 j번째 행의 원소를 나타낸다. 그러므로, C에 속하는 모든 위치 블록에 대응하는 각 코드워드는 $(mn, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 Autocorrelation 제약조건을 만족한다.

두 번째, C에 속하는 위치 블록에 대응하는 임의의 서로 다른 두 코드워드가 $(mn, \lambda+2, \lambda)$

MWOOC의 Cross-correlation 제약조건을 만족함을 보인다. x, y, z를 각각

$x^p \in C_0, y^p \in C_1, z^p \in C_2$ 의 위치 블록에 대응하는 코드워드라고 하자. 여기서, x^p, y^p, z^p 은 $w = \lambda+2, k \in [0, w!-1], q_x, q_y \in [0, s-1],$

$l_x, l_y, l_z \in [0, m-1], r_x, r_z \in [0, t-1]$ 에 대하여 다음과 같이 주어진다.

$$r \in [0, \tau-1], (a_{k,q_x,0} \oplus l_x, b_{r_x,0}), \dots, (a_{k,q_x,w-1} \oplus l_x, b_{r_x,w-1})) \quad (49)$$

$$y^p = ((a_{q_y,0} \oplus l_y, 0), (a_{q_y,1} \oplus l_y, 0), \dots, (a_{q_y,w-1} \oplus l_y, 0)) \quad (50)$$

$$z^p = ((l_x, b_{r_z,0}), (l_x, b_{r_z,1}), \dots, (l_x, b_{r_z,w-1})) \quad (51)$$

임의의 $i \neq j, l_x \in [0, m-1]$ 에 대해,

$$a_{k,q_x,i} \oplus l_x \neq a_{k,q_x,j} \oplus l_x, b_{r_x,i} \neq b_{r_x,j},$$

$b_{r_x,i} \neq b_{r_x,j}$ 이기 때문에 $a_{k,q_x,i} \oplus l_x \neq a_{k,q_x,j} \oplus l_x$ 이다. 그러면, $0 \leq \tau \leq n-1$ 에 대해 다음의 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} x_{i,j} y_{i \oplus \tau, j} \leq 1 \leq \lambda \quad (52)$$

$$R_{xz}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} x_{i,j} z_{i \oplus \tau, j} \leq 1 \leq \lambda \quad (53)$$

$$R_{yz}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} y_{i,j} z_{i \oplus \tau, j} \leq 1 \leq \lambda \quad (54)$$

x, y는 각각 위치 블록 $x^p \in C_0, y^p \in C_0$ 에 해당하는 두 개의 서로 다른 코드워드라 하자.

x^p, y^p 은 다음과 같이 표시된다.

$$x^p = ((a_{k,q_x,0} \oplus l_x, b_{r_x,0}), \dots, (a_{k,q_x,w-1} \oplus l_x, b_{r_x,w-1})) \quad (55)$$

$$(a_{k,q_x,1} \oplus l_x, b_{r_x,1}), \dots, (a_{k,q_x,w-1} \oplus l_x, b_{r_x,w-1})) \quad (56)$$

$$y^p = ((a_{q_y,0} \oplus l_y, b_{r_y,0}), \dots, (a_{q_y,w-1} \oplus l_y, b_{r_y,w-1}))$$

$$(a_{q_y,1} \oplus l_y, b_{r_y,1}), \dots, (a_{q_y,w-1} \oplus l_y, b_{r_y,w-1}))$$

$f = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$ 과

$$g = (g_0, g_1, \dots, g_{n-1})$$

$f^p = (b_{r_x,0}, b_{r_x,1}, \dots, b_{r_x,w-1})$ 을 각각 위치 블록

과 $g^p = (b_{r_y,0}, b_{r_y,1}, \dots, b_{r_y,w-1})$ 에 해당하는

$(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 코드워드라 하자. $f \neq g$ 라고

하면, $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 Cross-correlation 제약조건에 의해, $0 \leq \tau \leq n-1$ 에 대해 다음 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{\tau-1} \sum_{j=0}^{\tau-1} x_{i,j} y_{i \oplus \tau, j} \leq R_H(\tau) \leq \lambda \quad (57)$$

$f = g$ 라 하면, $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 Autocorrelation 제약조건과 Lemma 1, Lemma 2의 결과에 의해,

0 < τ ≤ n-1에 대해서 다음 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(0) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j} \quad (58)$$

$$\leq \sum_{i=0}^{n-1} (a_{k,q,i} \oplus l_x) \odot (a_{k,q,i} \oplus l_y) \leq \lambda$$

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} \leq R_H(\tau) \leq \lambda \quad (59)$$

x, y는 각각 위치 블록 $x^p \in C_1, y^p \in C_1$ 에 해당하는 두 개의 서로 다른 코드워드라 하자. x^p, y^p 은 다음과 같이 표시된다.

$$x^p = ((a_{q,0} \oplus l_x, 0), (a_{q,1} \oplus l_x, 0), \dots, (a_{q,w-1} \oplus l_x, 0)) \quad (60)$$

$$y^p = ((a_{q,0} \oplus l_y, 0), (a_{q,1} \oplus l_y, 0), \dots, (a_{q,w-1} \oplus l_y, 0)) \quad (61)$$

$$f = (f_0, f_1, \dots, f_{m-1})\text{과}$$

$g = (g_0, g_1, \dots, g_{m-1})$ 을 각각 위치 블록

$$f^p = (a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1})\text{과}$$

$g^p = (a_{q,0}, a_{q,1}, \dots, a_{q,w-1})$ 에 해당하는

$(m, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 코드워드라 하자. $f \neq g$ 라고 하면, $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 Cross-correlation 제약조건에 의해,

$0 \leq \tau \leq n-1, 0 \leq \tau' (= l_y - l_x) \leq m-1$ 에 대해 다음 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} \quad (62)$$

$$\leq R_{fg}(\tau') \leq \lambda$$

$f = g$ 라 하자. x와 y가 서로 다른 코드워드이기 때문에 $l_x \neq l_y$ 이다. $(m, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 Autocorrelation 제약조건에 의해,

$0 < \tau \leq n-1, 0 < \tau' (= l_y - l_x) \leq m-1$ 에 대해서 다음 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(0) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j} \quad (63)$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} x_{i,0} y_{i,0} \leq R_H(\tau') \leq \lambda$$

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} = 0 \leq \lambda \quad (64)$$

x, y는 각각 위치 블록 $x^p \in C_2, y^p \in C_2$ 에 해당하는 두 개의 서로 다른 코드워드라 하자.

x^p, y^p 은 다음과 같이 표시된다.

$$x^p = ((l_x, b_{r,0}), (l_x, b_{r,1}), \dots, (l_x, b_{r,w-1})) \quad (65)$$

$$y^p = ((l_y, b_{r,0}), (l_y, b_{r,1}), \dots, (l_y, b_{r,w-1})) \quad (66)$$

$f = (f_0, f_1, \dots, f_{n-1})$ 과 $g = (g_0, g_1, \dots, g_{n-1})$ 을

각각 위치 블록 $f^p = (b_{r,0}, b_{r,1}, \dots, b_{r,w-1})$ 과

$g^p = (b_{r,0}, b_{r,1}, \dots, b_{r,w-1})$ 에 해당하는

$(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 코드워드라 하자. $f \neq g$ 라고 하면, $(n, \lambda+2, \lambda)$ OOC의 Cross-correlation 제약조건에 의해, $0 \leq \tau \leq n-1$ 에 대해 다음 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} \leq R_{fg}(\tau) \leq \lambda \quad (67)$$

$f = g$ 라 하자. x와 y가 서로 다른 코드워드이기 때문에 $l_x \neq l_y$ 이다. 이리하여, $0 \leq \tau \leq n-1$ 에 대해서 다음 수식이 성립한다.

$$R_{xy}(\tau) = \sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} = 0 < \lambda \quad (68)$$

그러므로, C에 속한 임의의 두 위치 블록에 대응하는 서로 다른 두 개의 코드워드는

$(m, \lambda+2, \lambda)$ MWOOC의 Cross-correlation 제약조건을 만족한다. <증명 끝>

참고 문헌

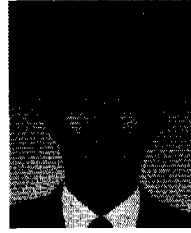
- [1] F.R.K. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, "Optical Orthogonal Codes: Design, Analysis, and Applications," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 35, pp. 595-604, May 1989.
- [2] G.-C. Yang and T. Fuja, "Optical Orthogonal Codes with Unequal Auto- and Cross-Correlation Constraints," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, pp. 96-106, Jan. 1995.
- [3] H. Chung and P. V. Kumar, "Optical Orthogonal Codes---New Bounds and an Optimal Construction," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 36, pp. 866-873, July 1990.
- [4] J. A. Salehi, "Code division multiple access techniques in optical fiber networks--part I: Fundamental principles," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 824-833, Aug. 1989.
- [5] J. A. Salehi, and C. A. Brackett, "Code division multiple access techniques in optical fiber networks--part II: System performance analysis," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 834-850, Aug. 1989.
- [6] P. A. Perrier and P. R. Prucnal, "Wavelength-division integration of services in fiber-optic networks," *International J. Digital and Analog Cabled Syst.*, vol. 1, pp. 149-157,

1988.

- [7] E. Park, A. Mendez, and E. Garmire, "Temporal/spatial optical CDMA networks--design, demonstration, and comparison with temporal networks," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, no. 10, pp. 1160-1162, 1988.
- [8] G.-C. Yang and W. C. Kwong, "Performance Comparison of Multiwavelength CDMA and WDMA+CDMA for Fiber-Optic Networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, pp. 1426-1434, Nov. 1997.
- [9] M. Azizoğlu, J. Salehi, and Y. Li, "Optical CDMA via Temporal Codes," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 40, pp. 1162-1170, July 1992.
- [10] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1984.

이 쌍 수(Ssangsoo Lee)

정회원

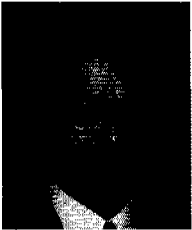


1988년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과 학사
1990년 2월 : 서울대학교 제어
계측공학과 석사
1990년~현재 : (주)LG 미디어
통신연구소 선임연구원

1998년~현재 : 서울대학교 전기공학부 박사과정(2기)

서 승 우(Seungwoo Seo)

정회원



1987년 2월 : 서울대학교 전기
공학과(학사)
1989년 2월 : 서울대학교 대학원
전기공학과(석사)
1990년 3월~1991년 6월 : 서울
대학교 기초전력 연구소
및 제어계측 공학과 연구원

1993년 12월 : 미국 펜실베니아 주립대학 전기공학
과 (박사)

1993년 8월~1994년 7월 : 미국 펜실베니아 주립대
학 전산기공학과 조교수

1994년 8월~1996년 7월 : 미국 프린스턴 대학 전
기공학과 및 POEM연구소 연구원(미
국 과학 재단 선발 연구원)

1996년 9월~현재 : 서울대학교 공과대학 전기공학
부 조교수

<주관심 분야> 고속 통신망, 광 통신망, 유/무선 교
환 시스템