

초고속 광 코드분할 다원접속 네트워크용 최적 2차 코드 생성 알고리즘 제안 및 연구

신종윤[†]

한국전자통신연구원 네트워크연구소 광통신연구부

☎ 305-350 대전광역시 유성구 가정동 161

박남규

서울대학교 전기·컴퓨터공학부 광통신시스템연구실

☎ 151-742 서울시 관악구 신림동 산56-1

(2002년 2월 18일 받음, 2002년 9월 23일 수정본 받음)

본 논문에서는 초고속 광 코드분할 다원접속(OCDMA) 네트워크를 위해 최적 2차원 코드 생성 알고리즘을 제안하고, 동시 사용자에 의한 다중접속간섭뿐만 아니라 백색잡음, 스펙트럼 효율을 고려한 성능을 평가하였다. 그 결과 조합론을 이용한 생성 알고리즘으로 얻어 낼 수 있는 최적 2차원 코드는 초고속 광 네트워크를 위한 코드에 적합하며, 기존 제안된 코드들에 비해서 비트 오류율이 같거나 작으면서 코드길이가 짧고 상대적으로 많은 코드 수를 가진다. 이는 WDM 시스템보다도 스펙트럼을 효율적으로 사용할 가능성을 보여준다. 또한 수신단, 채널 등의 백색 잡음을 고려한 보다 정밀한 비트 오류율을 유도하고 이를 이용하여 동시 사용자 수와 적절한 신호 대 잡음비에서 최적의 비트오류율을 얻기 위한 수신단에서의 최적의 문턱값을 찾아낼 수 있다.

주제어 : code division multiple access, optical fiber networks, fiber-optic code division multiplexing, OCDMA systems, OCDMA coding schemes.

I. 서 론

광 코드분할 다중접속방식(OCDMA: Optical Code Division Multiple Access)은 각각의 사용자에게 부여된 고유의 코드를 광 영역에서 생성하고, 해독함으로써 정보를 전송하는 방식이다.^[1-3] 데이터 트래픽이 초고속 비동기적이고 돌발적인 네트워크 상에서 하나의 공유된 매체를 통해서 많은 동시 사용자들을 수용할 수 있다는 점이 광 네트워크에서 중요한 장점이다. 90년대 중반이후에는 과거 로컬 네트워크에만 한정되어 있었던 OCDMA 기술은 장거리 통신 네트워크로까지 확대 연구되어왔다.^[4-6]

이러한 초고속 광 네트워크를 실현하기 위해서는 WDM망 접속 사용자수 이상을 수용해야하는 동시에 2.5 Gb/s 이상의 높은 데이터 전송률을 가지는데 목표를 둔다. 하지만 기존의 제안되었던 OCDMA 코드들은 동시접속 사용자 수를 늘리기 위해서는 코드 길이를 늘려야하며 코드 길이가 길어지면 그만큼 펄스 폭이 작아져야 하므로 많은 대역폭이 소모되는 셈이고 코드를 식별하기 위한 처리 과정이 복잡해지고 시간도 오래 걸리게 되어 고속 통신에는 적합하지 않다. 실제로 기존에 제안되었던 대부분의 OCDMA 코드로 구현된 시스템은 NRZ(nonreturn-to-zero)를 이용한 기존 WDM 시스템과 비교하여 스펙트럼 효율(spectral efficiency)이 나쁘다는 것이 사실이다.^[5,7]

기존에 제안되었던 ‘시간’과 ‘공간’상에서 직교 특성을 지닌 2차원 코드^[8,9]나, ‘시간’, ‘파장’ 상에서 직교 특성을 지닌 2

차원 코드^[10,11]들은 정수론을 통해서 단순히 코드 길이가 줄어든 코드를 만드는 데에만 목표를 두었을 뿐, 제한 조건에 의해서 코드 길이를 줄이는 동시에 동시접속 사용자 수를 늘려주지 못한다는 제한이 있다. 또한 정수론을 따르기 때문에 제안된 코드들마다 다른 생성 조건을 가지고 있어서 구성하는데 제약이 따르며 이들을 하나로 비교하기에도 어려움이 따른다. 초고속 OCDMA 광 네트워크를 구성하기 위해서는 많은 동시 사용자 수를 수용하는 동시에 코드 길이가 짧아야 하므로, 본 논문에서는 코드 길이, 코드 가중치, 파장 수 또는 공간 수 등 코드에 대한 변수 조건이 주어지면 그에 따른 최적의 BER을 동시에 만족시키면서 얻을 수 있는 모든 코드들을 생성해주는 알고리즘을 제시한다. 이를 “최적 2차원 코드”라 하자.

본 논문에서는 초고속 광 네트워크를 위한 최적 2차원 OCDMA 코드에 대한 조건을 제시하고 “최적 2차원 코드” 생성 알고리즘을 간단히 제안하였다. 제안한 코드에 대한 기존 1-2차원 코드들과 최대 동시 가능 인원수, 코드길이, 스펙트럼 효율(spectral efficiency)을 통한 코드 성능을 비교하고, 동시 사용자에 의한 다중접속간섭뿐만 아니라 백색잡음을 고려한 시스템 성능을 분석하였다.

II. OCDMA 2차원 코드 생성

2.1. 최적 2차원 OCDMA 코드 조건

2차원 OCDMA 네트워크에서 모든 사용자는 진폭 변조 방식인 OOK(on-off keying)를 사용하여 RZ(return to zero) 형태

[†]E-mail: jyshin@etri.re.kr

의 광 펄스로 이진 심볼 '0', '1'을 동일한 전송률로 전송하는 것으로 가정한다.^[11] 파장/시간 또는 공간/시간 2차원 코드에 사용하는 변수들은 다음과 같다.

- N (cardinality) : 코드 셋에 속하는 원소의 개수 즉, 2차원 코드 수
- c : 2차원 코드 셋에서 사용되는 파장개수 또는 공간개수, 즉, 2차원 코드에서 행의 수
- T_b : 비트 타임($1/T_b$: 한 사용자당 데이터 전송률)
- T_c : 시간 슬롯(chip)의 폭, 즉, 칩 타임
- L : 비트 타임에 타임 슬롯의 수 즉, 코드 길이로 생각할 수 있다($T_b = LT_c$).

이 때, 사용자의 데이터는 서로 비동기식으로 전송되는 것으로 가정한다. '시간'과 '파장', '공간' 상에서 준직교성을 지닌 2차원 코드 행렬은 일반적으로 다음의 식 (2.1)을 만족시켜야 한다. (2.1a)는 side lobe의 자기상관, (2.1b)는 상호 상관 조건이다.^[10] (단, \oplus 은 modulo- N 덧셈을 의미한다.)

$$R_A(M_i, \tau) = \sum_{n=1}^{c-1} \sum_{m=0}^{L-1} M_i(n, m)M_i(n, m \oplus \tau) \leq \lambda_a$$

$$\tau = 1, 2, \dots, L-1 \tag{2.1a}$$

$$R_C(M_i, M_j, \tau) = \sum_{n=1}^{c-1} \sum_{m=0}^{L-1} M_i(n, m)M_j(n, m \oplus \tau) \leq \lambda_c$$

$$i \neq j, \tau = 0, \dots, L-1 \tag{2.1b}$$

M 은 2차원 code family를, M_i 는 code family M 중의 한 codeword를 의미하는 것으로 한다. 즉, $M_i \in M$ 으로 생각한다. 또한, $n(M)$ 을 code family M 의 cardinality로 생각한다. (cardinality는 '집합에 속하는 원소의 개수'를 뜻한다.) 이때, 임의의 codeword M_i 는 2차원인 행렬의 형태로 표시할 수 있는데, 각각의 행은 할당된 파장 또는 공간을, 각각의 열은 시간 슬롯을 의미한다. $R_A(M_i, 0)$ 는 식 (2.1a)의 정의에서 $\tau=0$ 인 특별한 경우로서, 코드 행렬 M_i 전체의 '1'의 개수와 같으므로, 코드가 올바르게 정합필터 되었을 때의 신호의 최대 크기로 생각할 수 있다. 앞으로 2차원 코드의 가중치(weight)라고 할 수 있는 이 값을 w 라 한다. ($w = R_A(M_i, 0)$) 식 (2.1)의 상관 조건의 최대값인 λ_a 와 λ_c 는 다른 사용자에게는 잡음으로 인식되므로 신호의 크기인 w 보다 매우 작아야 하며, 될 수 있는 한 줄이는 것이 통신 시스템의 성능 향상에 도움이 된다.^[12] 하지만, 단극성(unipolar)을 지닌 광 네트워크에서 사용되는 코드 행렬이므로, 여기에 사용되는 CDMA 코드는 RF환경에서의 CDMA 코드와는 달리 상호상관이 0이 되는 취소 효과를 얻을 수 없다.^[11] 이는 코드 사용자가 늘어나면 날수록 그 크기는 줄어들지 않고 비례해서 다중간섭이 일어남을 의미한다. 따라서 다중접속간섭을 최소화하기 위해서는 코드는 상호상관 값이 1일 경우가 가장 최적이라 할 수 있다. 즉, 최적의 코드이기 위해서는 $\lambda_c = 1$ 이어야 한다.

1차원적으로 코드를 구성할 경우 최적의 코드는 λ_a 와 λ_c 는 모두 1을 만족해야 한다.^[1-3] 특히 이들은 행렬의 모든 원소는 '0' 또는 '1'로 이루어져 있고, 이들의 자기상관과 상호 상관은 0 이상의 정수이다.^[10] 하지만, 2차원적으로 구성된 OCDMA 코

드에서는 위의 식 (2.1)에서 보이는 것과 같이 1차원 코드에 시간과는 달리 파장이나 공간은 시간에 대해서는 어떤 연관성(correlation)을 가지지 않으므로 시간변화 항인 modulo가 없다. 따라서, 2차원 코드에서는 한 행에 한 개의 가중치를 줌으로써 자기 상관 최대 값 λ_a 을 0으로 만드는 것이 가능하다.^[9] 이와같이, 2차원으로 구성된 OCDMA 코드에서는 자기상관 λ_a 를 0으로 만드는 것이 가능하므로 시간 혹은 파장 중 하나만을 이용하여 코드를 구성하는 1차원적인 방법보다 여러 가지 면에서 유리하다.^[13] 즉, 최적 2차 코드가 되기 위해서는 $\lambda_a = 0$, $\lambda_c = 1$ 을 만족시켜야 한다.

초고속 광 네트워크를 위한 OCDMA 시스템을 구현하기 위해서는 OCDMA 코드 셋은 적어도 DWDM(Dense Wavelength Division Multiplexing) 이상의 많은 코드(즉, 8개 코드 이상)를 가져야하며, 또한 높은 데이터전송률(즉, 2.5 Gb/s 이상)에서 동작을 해야한다.^[5] 이를 위해서는 주어진 코드 가중치(weight), 파장과 공간 등의 조건에서 자기상관과 상호상관 조건 ($\lambda_a = 0$, $\lambda_c = 1$)을 만족시키는 최적 코드 수를 늘리는 동시에 코드 길이를 줄여야한다. 코드 길이를 줄인다는 것, 즉, 타임슬롯의 수를 감소시키는 것은 결국 주어진 시간에 대해서 훨씬 높은 데이터 전송률을 가능하게 함을 말한다.

초고속 광 네트워크를 구현하는데 있어서 OCDMA과 WDM을 비교하는 하나의 변수로 스펙트럼 효율(spectral efficiency)을 다음과 같이 정의할 수 있다.^[7]

$$\text{Spectral efficiency} = [\text{number of users (codes)}] \times [\text{data rate per user}] / [2 \times (\text{pulsewidth})] \tag{2.2}$$

위에 정의에 의해서 NRZ 변조 방식을 가진 WDM의 스펙트럼 효율은 0.5 b/s/Hz이다.^[13] 실제 WDM은 RZ 변조 방식과 NRZ 변조 방식에 대해서 0.1에서 0.4의 값을 갖는다.^[14] 따라서, 초고속 광 네트워크를 구현하는데 있어서 OCDMA 시스템은 WDM의 스펙트럼 효율과 같거나 그 이상의 효율을 가져야 한다. 이를 위해 동시 사용자 수에 의한 BER의 영향이 적은 OCDMA 시스템이 구현되어야 하며, 이러한 조건에서 최적의 2차원 코드를 구성한다고 할 때에 스펙트럼 효율(spectral efficiency)이 WDM의 스펙트럼 효율을 증가하기 위한 조건을 찾아보자.

2차원 OCDMA코드의 스펙트럼 효율은 식 (2.2)에 의해서 구해보면 다음과 같다.

$$SE_{2D-code} = [N] \times [1/T_b] / [(2/T_b) \times c] \\ [N] \times [1/T_b] / [(2/T_b) \times L \times c] \\ (1/2) \times (N/Lc)$$

따라서, $SE_{2D-code} > SE_{WDM}$ 이기 위한 조건 즉, WDM 스펙트럼 효율 0.5보다 크기 위한 조건은

$$N/c > L \tag{2.3}$$

이다. 이는 데이터 전송률과 펄스 폭이 정해지면 코드 길이가 주어지며, 코드길이가 주어졌을 때에 WDM의 스펙트럼 효율보다 더 좋은 결과를 얻기 위해서는 한 파장 당 코드 수가

표 1. 1Gbps, 11명의 동시사용자를 수용하기 위한 각각 코드에서 필요한 펄스 폭과 스펙트럼 효율

	1차원 코드		2차원 코드			WDM
	Prime Code	OOC	GMWPC	GMWRSC	YP-Code	NRZ pulse
Pulsewidth	8ps	1.7ps	90ps	111ps	67ps	1000ps=1ns
Spectrum efficiency	0.044	0.009	0.125	0.167	0.1	0.5

코드 길이 수 이상이어야 함을 뜻한다. OCDMA 코드 중에서도 스펙트럼 효율을 최고로 하기 위해서는 주어진 코드 길이에서 한 파장 당 최적의 2차원 코드의 수를 최대로 할 때에 2차원 코드의 스펙트럼 효율이 최대가 되며, 위에 조건을 만족하는 코드를 제안하게 되면 WDM보다 높은 스펙트럼 효율을 얻을 수 있다.

반면에 지금까지 제안되었던 1-2차원 OCDMA 코드들의 스펙트럼 효율에 대해서 살펴보면 다음 표 1과 같다. 1차원 Prime 코드,^[12] 광직교코드,^[1,3] 2차원 코드로는 GMWPC와 GMWRSC^[16] 그리고 YP 코드^[17]에 대해서 1Gb/s로 데이터를 전송하면서 11명의 동시 사용자 수를 포용하도록 할 때의 각각의 코드가 가지는 스펙트럼 효율을 정리하면 다음 표 1과 같다.

수 Gb/s의 데이터를 전송하는데 1차원 코드를 구성하기 위해서 수ps에 해당하는 초단 펄스를 필요로 하게 되며 이는 분산 손상과 분산 보상 전략을 필요로 한다.^[13,18] 초단 펄스와 생성과 링크 손상에 민감하게 영향을 받는 것과 더불어서 WDM과 스펙트럼 효율을 비교했을 때에 너무나 작은 효율을 보임을 알 수 있다. 1차원 코드의 경우에 코드 길이가 10 정도가 넘어가면 이러한 스펙트럼 효율의 문제를 겪게 된다. 1차원 코드에 비해서 코드 길이가 줄어든 2차원 코드의 스펙트럼 효율은 10배 이상으로 좋아짐을 알 수 있다. 하지만 WDM 스펙트럼 효율에 비해서는 여전히 작은 값이며, 어떤 조건에서도 능가하지 못한다. 이와 같이 초고속 광 네트워크를 구현하기 위해서는 기존의 WDM과 동질의 혹은 그 이상의 성능을 가져야 하지만 기존 2차원 OCDMA 코드는 이를 만족시키지 못한다. 따라서, 최대의 스펙트럼 효율을 가져오는 2차원 코드 생성을 제안해야 할 필요가 있다.

하지만 최적의 2차원 코드 수를 늘렸다 하더라도 해결해야 할 문제가 있다. 그것이 바로 다중접속간섭(Multiaccess Interference)이다. 파장/시간 2차원 코드의 경우 스펙트럼 효율은 결국 파장과 시간의 재사용에 달려있는 것이기 때문에 많은 코드들을 사용하면 할수록 OCDMA 코드 준직교성 때문에 비트오류율(BER)이 나빠지는 것이 사실이다. 특히 동시 사용자에 의한 다중접속 간섭의 변화에 따라 신호에 성능저하를 예상할 수 있다. 따라서, 최다수의 코드를 찾았다고 하더라도 대부분의 경우 다중접속간섭에 의해서 모든 코드를 사용할 수 없다. 이론적인 코드가 WDM보다 높은 스펙트럼 효율을 가질 수 있지만, 그러기 위해서는 시스템을 구현하는데 다중접속간섭을 완화시키는 노력이 필요하다. 실제로 다중접속간섭을 줄이거나 제거하기 위한 신호처리 연구가 최근에 진행되어왔다.^[19,20] 본 논문에서 코드 제안은 이러한 다중접속간섭 문제가 해결되었을 때에 최대 성능을 발휘하게 된다.

이상의 조건을 종합해보면, 2차원 코드의 BER을 최대한 줄

이기 위해서는 자기상관조건과 상호상관조건이 각각 0과 1을 만족해야하며, 또한 초고속 OCDMA 광 네트워크를 위해서 WDM 스펙트럼 효율이상의 성능을 내는 코드를 생성하기 위해서는 주어진 코드 길이에 적절한 파장 수에서 최대 2차원 코드 수를 찾아내는 것이 중요하다.

2.2. “최적 2차원 코드” 생성 알고리즘

지금까지 OCDMA 코드에 대해서 일반적인 경우의 Code family를 찾는 방법은 알려지지 않았으며, 몇몇 특수한 경우에 대한 해법만이 알려져 있다. 코드들은 조합론이나 정수론으로부터 생성된다. 정수론을 이용한 방법들은 쉽게 자기상관과 상호상관조건을 만족하면서 정수의 일정한 규칙을 이용하여 쉽게 코드를 생성할 수 있다. 하지만 위에 언급한대로 주어진 조건에 자기상관과 상호상관조건을 만족하는 코드를 최대한 찾아내는 것이 중점이므로 조합론을 사용하여 코드를 생성하는 방법을 택해야한다. 이때에 자기상관조건과 상호상관조건으로 각각 0과 1을 만족시키기 위한 생성 알고리즘은 다음과 같다.

2차원 코드에서 한 행에 한 개의 가중치를 줌으로써 최적 자기상관조건 $\lambda_n=0$ 을 만족시킬 수 있다. 만약에 한 행에 두 개 이상의 펄스가 오도록 MPR(Multiple per Row)코드를 구성하게 된다면 자기상관조건은 1이상이 되어서 최적 조건을 만족시키지 않는다. 따라서 최적의 자기상관조건을 갖는 코드를 구성하기 위해서는 2차원 상에서 SPR(Single per Row)이어야 한다. 여기서 설명을 하기 위한 변수로 d_{ij} 를 각각의 1이 존재하는 i 번째 행과 j 번째 행에서 시간 축 상에서의 거리라 정의하자.^[19] 예를 들어, $d_{12}=3$ 이라면 2차원 코드에서 첫 번째 행에서 존재하는 1과 2번째 행에서 존재하는 1과 시간 축 상에서의 거리가 3이라는 뜻이다. 자기상관조건이 0이 되기 위해서는 한 행에 두 개 이상의 펄스가 존재하지 않으므로 코드 길이 L과 이용하는 파장 수 c가 정해지면 결국 2차원 코드의 행과 열의 수가 정해지는 것이고 결국, d_{ij} 가 가질 수 있는 값은 0에서 L-1이며 하나의 값만을 가진다. (∵ 모든 계산에 modulo-N을 했다고 가정한다.) 또한, $d_{ij}=d_{ji}(i \neq j)$ 와 같고, 한 행에 하나의 1을 가져야 하므로 d_{ii} 와 같은 경우는 존재하지 않는다. 그러므로 행의 수가 c일 때에 d_{ij} 가 다른 조합이 되는 경우 수는 $\binom{c}{2}=c(c-1)/2$ 가 된다.

a) 코드 길이 L과 파장 수 c가 주어졌을 때에 d_{ij} 가 가질 수 있는 경우와 값에 대해서 2차 행렬 $c(c-1)/2 \times L$ 로 표현한다. 그럼 1과 같은 행렬이 얻어진다.

b) 만들어진 2차 행렬 $c(c-1)/2 \times L$ 의 원소에서 코드 가중치가 w개 일 때에 $w(w-1)/2$ 개수만큼의 원소를 중복 없이 선택해야 한다.

한 코드 내에서 d_{ij} 로 표현하게 되는 수는 1의 개수에 따라

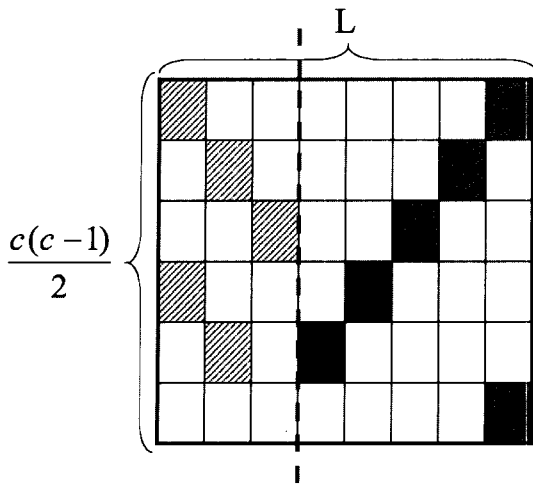


그림 1. $c(c-1)/2 \times L$ 인 d_{ij} 행렬, $w=4$.

정해지게 되는데, 한 코드 내에 가중치는 w 이므로 1의 개수는 w 개이다. 1의 개수가 w 개 일 때에 이들을 표현하는데 한 코드 내에서 필요한 d_{ij} 개수는 $\binom{w}{2} = w(w-1)/2$ 이다. 예를 들어 $w=3$ 이면 이 3개면 코드를 표현할 수 있다.

c) 이때 d_{ij} 와 d_{jk} 의 어떤 값이 선택이 되었다면 자동으로 d_{ji} 의 특정값이 결정이 되어야한다. 즉, $d_{ij}=x, d_{jk}=y, d_{ik}=z$ 라 한다면, $z = x \oplus y$ 를 만족시켜야 한다. $w(w-1)/2$ 가 모두 독립적인 것이 아니라 서로 먹이 사슬처럼 얽혀 있게 된다.

예를 들어 코드 길이 $L=10$ 이고 $w=3$ 인 코드를 구현하는데 d_{ij} 이 3개면 코드를 표현할 수 있는데 이때에 $d_{12}=3, d_{23}=8$ 이라면, $d_{13}=1$ 이어야 한다. 이와 같은 방법으로 코드를 선택할 때에 특정 $d_{ij}=k$ 가 겹치지 않도록 선택을 한다. 결국 행의 거리가 겹치는 것이 한번도 없다는 것은 상관 조건값이 1이하로 된다는 것이므로, 최적의 코드를 얻을 수 있다. 또한 조건을 만족시키면서 최대한의 코드 수를 얻어내는 방법이므로 최적의 코드를 얻으면서 최대의 코드를 얻게된다.

d) 중복 없이 코드를 규칙적으로 형성시키기 위해서 L modulo $[(w(w-1)/2)-1]$ 의 값을 x 라 한다면 2차 행렬 $c(c-1)/2 \times L$ 에서 전체 L 의 열 중에서 앞에 x 만큼 열과 $L-x$ 로 열을 구분하여 선택을 한다. $x=0$ 일 경우에는 전체 열 L 개에서 $w(w-1)/2$ 만큼의 수를 선택하면 된다.

결국은 그림 1에서와 같은 최대 가능한 2차 행렬 $c(c-1)/2 \times L$ 에서 최적의 코드를 얻기 위해 $w(w-1)/2$ 만큼을 중복 없이 선택하게 되는 것이므로 총 가능한 코드의 개수를 N (cardinality)라고 한다면

$$N \leq \left\lfloor \frac{c(c-1)L}{w(w-1)} \right\rfloor \quad (2.4)$$

와 같다. ($\lfloor x \rfloor$ 는 x 보다 작거나 같은 정수들 중 최대의 정수를 말한다.)

표 2. $L=3, w=3$ 일 때에 얻을 수 있는 최적 코드 최대 개수

c	3	4	5	6	7	8	9
N(cardinality)	3 (3)	5 (6)	8 (10)	12 (15)	19 (21)	24 (26)	36 (36)

이때에 w, c, L 값 모두 커지게 되면 그만큼 많은 경우와 제한 조건을 생각하게 되므로 이들의 코드를 얻어내는데 컴퓨터를 이용해서 얻게 된다. 예를 들어 $L=3, w=3, c=3$ 인 최대 2차원 코드 수는 $N = (3 \times 2 \times 3) / (3 \times 2) = 3$ 이며, 위의 Search 알고리즘을 통해서 얻은 코드는 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$L=3$ 과 $w=3$ 으로 고정하고 c 를 변화시킴에 따라 얻을 수 있는 최대 코드 수와 실제 얻을 수 있는 최대 코드를 정리해보면 다음 표 2와 같다.

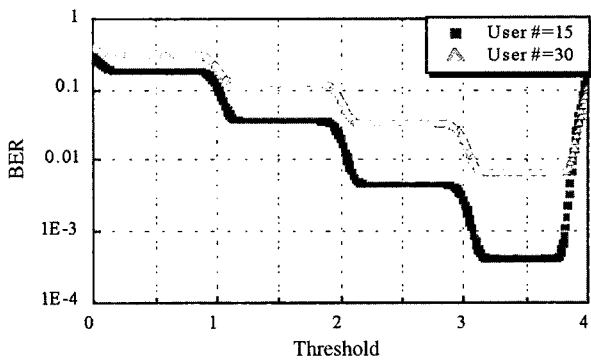
위에 표 2를 살펴보면 괄호 안에 값은 식 (2.4)에 의해서 얻어진 최대 개수이며 search 알고리즘을 통해서 얻을 수 있는 실제 최대의 코드 수는 괄호밖에 값이다. 이는 코드의 상호상관조건을 만족시켜야 하는 조건 때문에 실제로 얻어질 수 있는 값은 식 (2.4)에서 얻을 수 있는 값보다 작거나 같음을 알 수 있다. 위의 표에서 알 수 있듯이 동시 사용자 11명을 수용하기 위해서 코드 길이 L 을 3으로 하고 코드 가중치를 3으로 할 때에 파장의 수를 6개를 사용하게 되면 최대 12명을 수용할 수 있음을 알 수 있다.

III. 최적 2차원 코드 성능 분석

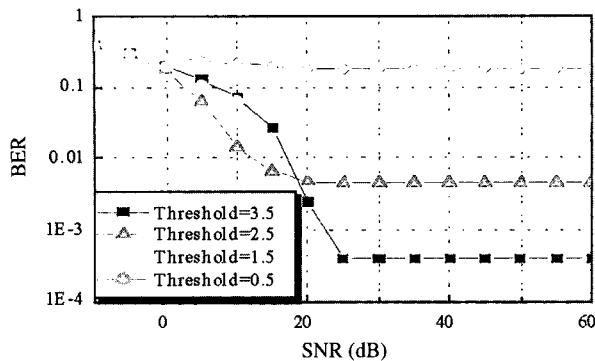
3.1. 코드 수치 해석

1980년 후반부터 현재까지 많은 코드들을 제안하면서 다양한 방법으로 코드에 대한 성능을 비교하기 위해 최대 코드 수 뿐만 아니라 BER을 통해서 성능을 비교하기도 한다.^{19,11,16-17} 그만큼 BER 구하는 방법이 다양하며 고려하는 요소들 또한 다르다. 하지만 2차원 코드에서 $c \leq 2w$ 를 만족시키며 코드 길이와 코드 가중치 조건값이 같다면 자기상관값 0과 상호상관값 1을 만족하는 코드들의 BER은 크게 다르지 않다.

$c \leq 2w$ 조건하에서 만약에 2차원 코드 셋을 행과 열로 이루어진 2차 행렬로 생각해 본다면, 각각의 하나의 행에 펄스의 수가 p 개만큼 있는 2차원 코드 두 개를 상관시켰을 때에 어떤 행에서든지 겹쳐질 수 있는 가능 경우 수는 p^2 이므로 전체 행의 수를 R 이라 한다면 겹쳐질 수 있는 경우의 수는 RP^2 이다. 이때에 2차원 코드의 겹쳐질 확률은 RP^2/L 이라 할 수 있다. 따라서 자기상관값이 0인 하나의 행에 펄스가 하나밖에 없는 코드의 경우에 $p=1$ 이며, 또한 $c \leq 2w$ 일 경우에 1을 가지고 있는 가중치의 w 개만큼 존재하므로, 코드가 겹쳐질 확률은 w/L 이다. 0과 1의 확률이 똑같다고 가정하고 1을 보낼 때에만 부호화 하기 때문에 intensity 변조 방식에 의한 겹쳐지는 확률은 $w/2L$ 이라고 할 수 있다. 반대로 겹쳐지지 않을 확률은 $(1-w/2L)$ 이다. 이를 통해서 동시 사용자 수가 N 명이라고 할 때에 간섭이 일어날 확률 분포를 구할 수 있으면 이를 통해서



(a) L=63, w=4, user#=15,30, SNR=30dB 일때 문턱값에 따른 BER



(b) L=63, w=4, user#=15일 때 SNR에 따른 BER

그림 2. Threshold에 따른 동시사용자와 SNR을 고려한 BER (a) L=63, w=4, user#=15,30, SNR=30dB일 때 문턱값에 따른 BER, (b) L=63, w=4, User#=15일 때 SNR에 따른 BER.

문턱값으로 0을 보냈는데 1로 잘못 받아들이는 경우에 오류가 나므로 이에 따라 BER을 구할 수 있다. 이때 확률분포를 구하기가 어렵기 때문에 타임 칩이 완전히 겹치는 동기화된 경우로 가정하여 구하게 되며 이렇게 구한 BER이 upper bound이다. 수신단의 잡음을 함께 고려하였을 때의 비트 오류 확률은 다음과 같다($c > 2w$ 일 경우, $w/2L$ 은 $w/2Lx(w/c)$ 로 수정하여 계산한다.^[22]).

$$P_E = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} \left(\frac{w}{2L}\right)^i \left(1 - \frac{w}{2L}\right)^{N-1-i} \times \left[Q\left(\frac{w+i-Th}{\sqrt{w\sigma}}\right) + Q\left(\frac{Th-i}{\sqrt{w\sigma}}\right) \right] \quad (3.1)$$

즉, 다중접속간섭(MAI)에 의한 에러뿐만 아니라 AWGN (Additive White Gaussian Noise)를 고려했을 때에 BER이며, 이에 대한 결과는 다음 그림 2와 같다.

그림 2-(a)는 코드 길이 L=63, 사용한 파장 수와 가중치 w=4, SNR을 30dB로 고정하고 문턱값을 변화시키에 따른 BER을 보여준다. 동시 사용자 수가 15명일 경우에 문턱값을 3.48로 하였을 때에 가장 최소의 BER이 나오며, 동시 사용자 수가 30명으로 늘어남에 따라 BER은 나빠지며 문턱값이 3.49에서 최소의 BER을 가진다. 동시 사용자 수가 늘어남에 따라서 최

소가 되게 하는 문턱값은 변하지만 3.5정도에서 최소의 BER을 가짐을 알 수 있다. 또한 그림 2-(b)은 SNR을 변화시키에 따라서 BER의 변화를 살펴본 것이다. 문턱값을 3.5로 가장 최적으로 했을 경우에 SNR이 25dB정도 이후에는 BER이 개선되지 않음을 알 수 있다. 이 때의 BER 값은 수신단에 잡음이 없음을 가정하였을 때에 얻는 값과 유사한 값을 가진다. SNR이 0에서 20dB정도가 되었을 때에는 오히려 문턱값을 2.5로 한 것이 더 좋은 BER을 가지는 것도 또한 알 수 있다. 따라서 동시사용자수와 SNR이 정해진다면 그때에 BER을 최적으로 하기 위한 문턱값을 정할 수 있다.

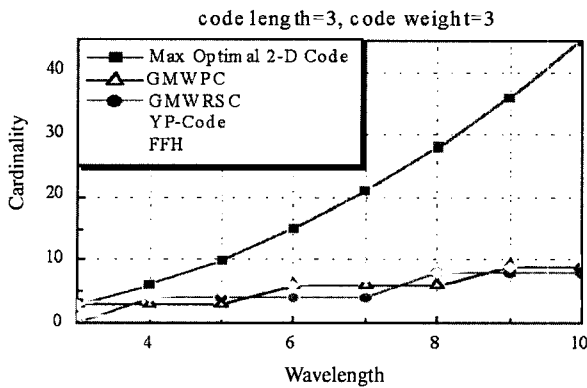
3.2. 코드 비교 분석

식 (3.1)에서 알 수 있듯이 자기상관값이 0이고 상호상관값이 1을 만족하면서 코드 길이와 가중치가 각각 L과 w로 같은 2차원 코드는 모두 같은 상위 BER을 가짐을 알 수 있다. 즉, 자기상관값 0과 상호상관값 1을 만족하는 코드들을 서로 BER을 통해서 성능을 비교할 수 없다. 따라서, 코드의 성능을 비교할 수 있는 요소는 코드 셋의 가능 원소 수가 결정한다고 할 수 있다. 앞에서 제시한 최적 2차원 코드와 같은 조건에서 BER이 같은 2차원 코드로 GMWPC와 GMWRSC,^[16] YP 코드,^[17] Fathallah의 FFH코드,^[21] Shivalaela의 T/S AML코드^[9]에 대해서 비교 분석하며 또한 스펙트럼 효율(spectral efficiency)을 통해서 기존에 제안한 코드들은 물론이고 WDM의 스펙트럼 효율 또한 비교 분석할 수 있다. 다른 2차원 코드로서 E. Park과 Mendez의 T/S SPR 코드는 상호상관값이 최대 $\lambda_c=2$ 이며 MPR코드는 자기상관 값과 상호상관 값 모두 2가 되게 하는 코드로 이 두 코드는 간섭의 영향이 크므로 BER에서 떨어지는 성능을 보이므로 성능비교에서 제외하였다.

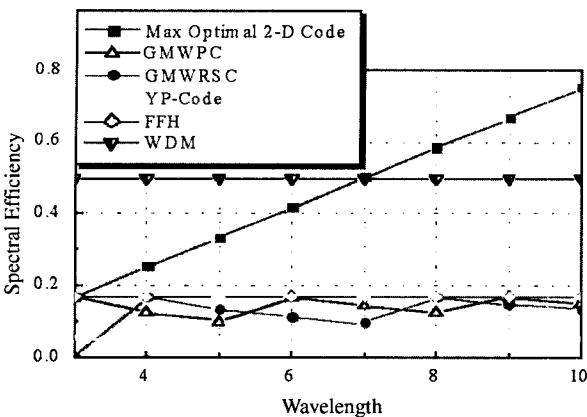
최적 2차원 코드는 식 (2.4)과 같은 N(cardinality)을 가지며 식 (2.3)에 의해서 최적 2차원 코드의 스펙트럼 효율은 $c-1/2w(w-1)$ 이다. 가중치가 정해져 있을 때에 이용 가능한 파장 수를 늘림에 따라서 스펙트럼 효율이 증가한다. 또한 $(c-1) > w(w-1)$ 의 조건을 만족시킨다면 WDM보다 스펙트럼을 효율적으로 사용할 수 있음을 알 수 있다. 이는 어떤 2차원 OCDMA 코드보다도 높은 효율을 가지고 있다. 최적의 2차원 코드에서 사용 가능한 파장 수가 증가하면 증가할수록 정비례 이상의 코드 수를 가져오므로 코드 수를 증가시킬 수 있으며 스펙트럼 효율 또한 높아진다. 이와 같이 이용 가능한 파장 수가 중요한 OCDMA 성능을 좌우하게 된다.

기존에 제안된 2차원 코드 각각이 모두 제안된 조건들이 다르기 때문에 같은 조건에서 cardinality와 스펙트럼 효율을 비교하는데 어려움이 있다. 본 논문에서는 이를 쉽게 알아보기 위해서 코드 길이를 3, 코드 가중치를 3으로 고정하고 사용 가능한 파장 수를 증가시키에 따른 각각 코드 셋의 cardinality와 그때의 스펙트럼 효율을 계산하였으며 그림 3과 같다.

그림 3-(a)에서 볼 수 있듯이 본 논문에서 제안한 최적 2차 코드는 파장 수가 늘어남에 따라서 비례이상으로 코드 수용 수가 늘어나는 반면에 다른 코드들은 모두 비슷비슷한 증가 비율을 갖고 있다. 이는 그림 3-(b)에서 확실해진다. 각각의 코드들의 스펙트럼 효율을 구하였을 때에 기존에 제안되었던



(a) 파장 수에 따른 2차원 코드의 Cardinality



(b) 파장 수에 따른 2차원 코드의 스펙트럼 효율

그림 3. 2차원 코드와의 성능 비교. (a) 파장 수에 따른 2차원 코드의 Cardinality, (b) 파장 수에 따른 2차원 코드의 스펙트럼 효율.

코드의 스펙트럼 효율은 0.2를 넘지 못하고 줄어들었다가 다시 증가하는 등 WDM보다 높은 스펙트럼 효율을 얻지 못했다. 하지만 본 논문에서 제안한 최적 2차원 코드는 사용 가능한 파장 수가 8 이상이 되면 WDM 스펙트럼 효율보다도 더 높은 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 물론 파장 수가 8일 때에 동시사용 가능한 코드 24개이지만 이들 코드를 모두 사용하기 위해서는 다중접속간섭을 줄이기 위한 노력이 필요하다. 이상에서 지금까지 소개되어 왔던 2차원 코드와 본 논문에서 제시한 코드를 비교해보았으며 최적 2차원 코드가 다른 어떤 코드들보다도 같은 조건에서 많은 코드 수를 생성할 수 있는 동시에 스펙트럼 효율 또한 어떠한 코드보다도 좋은 성능을 보임을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 초고속 OCDMA 네트워크 구현을 위해서 최적의 조건을 가지면서 최대 코드 개수를 얻을 수 있는 “최다수 최적 2차 코드” 생성 알고리즘을 제안하고 그 성능을 분석하였다. 초고속 광 네트워크를 구현하기 위해서는 코드 길이를 줄여야하며 이에 따라서 동시 사용자 수를 포함할 수 있는 코드 수는 줄어들게 된다. 지금까지 코드 길이를 줄이거나 2~3차원

코드를 제안했을 뿐 실제로 코드 길이를 줄이면서 동시사용자 수를 늘리기 위한 노력은 거의 없었다. 이에 본 연구에서는 초고속 광 네트워크를 구현하기 위해서 코드길이 짧은 반면에 파장이나 공간을 적절히 사용하여 최적의 코드를 구현할 뿐만 아니라 최대 동시 사용가능 수를 위한 코드를 생성시킨다. 이 코드는 기존에 제안되었던 여러 코드들과 비교하여 최대 동시 가능 인원수, 코드길이, 스펙트럼 효율(spectral efficiency) 면에서 우수성을 보일 뿐만 아니라 WDM 스펙트럼 효율 증가하기 위한 코드 생성 조건도 얻을 수 있다. 또한 수신단, 채널 등의 백색 잡음을 고려한 보다 정밀한 상위 BER을 유도하여 시스템 성능을 분석할 수 있으며, 이를 이용하여 동시 사용자 수와 신호 대 잡음비가 정해졌을 때에 최소의 BER을 얻기 위한 수신단에서의 문턱값을 정할 수 있다. 최적 2차원 코드를 최대한 사용하기 위해서는 다중접속간섭 효과를 최소화하기 위한 시스템 설계가 필요할 것이다.

참고문헌

- [1] J. A. Salehi, “Code division multiple-access technique in optical fiber networks-Part I : Fundamental principles,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 824-833, 1989.
- [2] J. A. Salehi, “Code division multiple-access technique in optical fiber networks-Part II: Systems performance analysis,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 37, pp. 834-842, 1989.
- [3] F. R. K. Chung, J. A. Salehi, and V. K. Wei, “Optical orthogonal codes: Design, analysis, and applications,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, IT-35, pp. 595-604, 1989.
- [4] H. Fathallah, L. A. Rusch, and S. LaRochelle, “Passive optical fast frequency-hop CDMA communications System,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 3, pp. 397-405, 1999.
- [5] A. J. Mendez, R. M. Gagliardi, H. X. C. Feng, J. P. Heritage, and J. M. Morookian, “Strategies for realizing optical CDMA for dense, high-speed, long span, optical network applications,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 18, no. 12, pp. 1685-1696, 2000.
- [6] N. Wada, H.I. Sotobayashi, and K.I. Kitayama, “Error-free transmission of 2-channel 2.5 Gbit/s time-spread/wavelength-hop OCDM using fibre Bragg grating with super-continuum light source,” *ECOC '99*, vol. 2, pp. 230-231.
- [7] A. J. Mendez, R. M. Gagliardi, “Wavelength multiplication and capacity enhancement of optical code division multiplexing (O-CDM) based on wavelength/time (W/T) matrix codes,” in *IEEE/LEOS 2000 Annu. Met.*, paper ThO2.
- [8] E. Park, A. J. Mendez, and E. Garmire, “Temporal/spatial optical CDMA networks-design, demonstration, and comparison with temporal networks,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 4, pp. 1160-1162, 1992.
- [9] E. S. Shivaleela, *et al.*, “Design of a new family of two-dimensional codes for fiber-optic CDMA networks,” *J. Lightwave Technol.*, vol. 16, no. 4, pp. 501-508, 1998.
- [10] L. tancevski and I. Andonovic, “Wavelength hopping/time spreading code division multiple access systems,” *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 17, pp. 1388-1390, 1994.
- [11] G. C. Yang, and W. C. Kwong, “Performance comparison

- of multiwavelength CDMA and WDMA+CDMA for fiber-optic networks,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 45, no. 11, pp. 1426-1433, 1997.
- [12] G. C. Yang and T. E. Fuja, “Optical orthogonal codes with unequal auto- and cross-correlation constraints,” *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 41, no. 1, pp.96-106, 1995.
- [13] R. L. Pickholtz, D. L. Schilling, and L. B. Milstein, “Theory of spread-spectrum communications-A tutorial,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 30, pp. 855-884, 1982.
- [14] H. X. C. Feng, L. R. Thornbley, W. J. Lennon, and J. P. Heritage, “Computer modeling of optical layer impairments on 2.5 Gb/s optical CDMA transmission,” *Opt. Exp.*, vol. 7, pp. 2-9, 2000.
- [15] Y. Miyamoto, “40-Gbit/s transport system: Its WDM upgrade,” OFC’2000, paper THW4.
- [16] W. C. Kwong, P. A. Perrier and P. R. Prunçal, “Performance comparison of asynchronous and synchronous code-division multiple-access techniques for fiber-optic local area network,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 39, no. 11, pp. 1625-1634, 1991.
- [17] K. Yu and N. Park, “Design of a new family of two-dimensional wavelength-time spreading codes for optical code division multiple access networks,” *Elec. Lett.*, vol. 35, no. 10, pp. 830-831, 1999.
- [18] S. Shen and A. M. Weiner, “Complete dispersion compensation for 400-fs pulse transmission over 10 km fiber link using dispersion compensating fiber and spectral phase equalizer,” *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 11, pp. 827-829, 1999.
- [19] J. G. Zhang, “Design of a special family of optical CDMA address code for fully asynchronous data communications,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 47, no. 7 pp. 967-973, 1999.
- [20] H. Sawagashira, K. Kamakura, T. Ohtsuki, and I. Sasase, “Direct-detection optical synchronous CDMA systems with interference canceller using group information codes,” *IEEE GLOBECOM ’00*, vol. 2, pp. 1216-1220, 2000.
- [21] H. Fathallah, L. A. Rusch, S. Larochele, and L. Pujol, “Experimental demonstration of optical fast frequency hopping-CDMA communications,” *ECOC 99*, vol. 1, pp. 190-191, 1999.
- [22] S. Kim, K. Yu, and N. Park, “A new family of three-dimensional space/wavelength/time spread optical code for OCDMA networks,” *Journal of Lightwave Technology*, vol. 18, no. 4, pp. 502-511, 2000.

Analysis on the optimal 2-dimensional code generation algorithm for high-speed optical CDMA network

Jongyoon Shin[†]

Optical Communications Department Network Research Laboratory, ETRI, Daejeon 305-350, KOREA

[†]E-mail: jyshin@etri.re.kr

Namkyoo Park

#015 Optical Communication Systems Laboratory School of Electrical Engineering and Computer Science, Seoul National University, Seoul 151-742, KOREA

(Received February 18, 2002, Revised manuscript received September 23, 2002)

In this paper, we propose an optimal 2-dimensional construction algorithm of a code family for a high-speed optical code division multiple access network. The optimal 2-D code family generated by search algorithm has better spectrum efficiency than previous codes, having relatively many code sets with short code length and the same or lower BER. Using the optimal 2-D code, OCDMA systems make it possible to utilize the spectrum more efficiently than WDM systems. The probability of bit error for high-speed OCDMA transmissions is calculated as a function of the number of users in the presence of receiver and shot noise (additive white Gaussian noise).

Classification code : OC.020.