

Optical CDMA 근거리망을 위한 최적 코드 설계

정회원 김 태 원*, 성 원 진*, 최 진 우*

Optimal Code Design for 2-D Optical CDMA LANs

Taewon Kim*, Wonjin Sung*, Jinwoo Choi* *Regular Members*

요 약

본 논문에서는 최근 주목받고 있는 부호분할다중화 방식의 근거리 광통신망에서, 칩의 길이(M), 파장의 수(L), 송신중인 노드의 수(N) 등의 설계 변수에 대해 비트검출오류확률(BER)을 최소화하는 최적 단극부호설계기법을 연구한다. 특히, 단극부호를 이용한 근거리 광통신망에서 부호의 중량(W)은 BER에 큰 영향을 미칠 수 있음을 실험을 통해 확인하고, 분석적인 방법을 통해 일반적으로 예견되는 근거리 광통신망환경에서 BER이 최소가 되도록 하는 부호의 중량은 $W \approx 1.4LM/N$ 과 같이 결정됨을 유도한다. 이 분석결과의 정확성을 포괄적인 모의실험을 통해 검증하고, 또한 실제 환경에서의 적용을 위해 정보를 전송중인 활성노드의 수가 알려지지 않은 상태에서 수신신호에만 의존하여 활성노드의 수를 추정하는 방법을 제안하고 이때의 오차범위를 측정주기와 관찰되는 격자의 수의 합수로 분석적으로 유도한다.

ABSTRACT

In this paper, we study the optimal code design for the OCDMA LANs with given system parameters such as the chip length (M), the number of wavelengths (L), and the number of active nodes (N). In particular, we verify that the weight (W) of the OCDMA code has a significant impact on the bit error rate (BER) performance of the system, and show that the optimal weight that minimizes the BER is determined as $W \approx 1.4LM/N$ via analytic derivation. Comprehensive simulation results are attached to support the accuracy of the derivation. We also present a simple technique to estimate the number of active nodes on a LAN only based on the optical signal measured on the shared medium, and its error characteristics is further investigated analytically and numerically.

1. 서 론

광통신기술은 광대역 기간망에서의 성공에 힘입어 멀티미디어, 3-D 그래픽, 가상현실 응용프로그램과 같은 다양한 네트워크 응용프로그램을 지원하기 위해 가까운 미래에 근거리통신망(LAN)에까지 그 응용범위를 넓힐 것으로 예상된다. 그러나 근거리통신망은 구조의 변화가 빈번하고 일반적으로 구성노드들 사이의 정보교환이 산발적으로 이루어진다는 점에서 광역 통신망(WAN)이나 국가/지역 기간망과는 큰 차이가 있다. 그 결과, 섬세한 구조계획과 자원의 할당을 필요로 하는 파장분할다중화(WDM)기

법과 시분할다중화(TDM)기법은 광대역 통신망에서처럼 성공적으로 근거리통신망에 적용될 것으로 기대하기 어렵다. 이에 [1,2]에서 제안된 광부호분할다중화 (Optical Code-Division Multiple Access, OCDMA)기법이 근거리통신망에 보다 적합한 해법으로 고려되고 있으며, 상당한 연구 노력이 OCDMA LAN에 있어서 부호설계와 검출에 집중되고 있다^[3-5].

광신호의 위상 변복조에 있어서의 기술적인 한계로 인해 대부분의 OCDMA LAN에 대한 연구는 Intensity Modulation and Direct Detection (IM/DD)기법을 전제로 하고 있다 (coherent OCDMA와

* 서강대학교 전자공학과 (wsung@sogang.ac.kr, xinu@sogang.ac.kr)

논문번호 : 020344-0805, 접수일자 : 2002년 8월 5일

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd. 이 논문은 한국과학기술정보연구원(KIST)의 지원으로 수행되었음.

incoherent OCDMA의 비교는 [6, Table I]을 참조. 즉, OCDMA 부호는 시간축 또는 파장축의 다른 위치에 광펄스를 배치함으로써 생성되며, 송신노드에서 부호를 전송하거나 전송하지 않음으로써 한 비트의 정보(즉, '1' 또는 '0')를 수신노드로 전송하게 된다^[2,7]. 특히, 2차원적인 펄스배치에 기반한 OCDMA 부호 및 이를 기반으로 하는 전송/검출기법을 2-D OCDMA로 통칭한다^[8,9]. 일반적으로 2-D OCDMA에서의 부호는 그림 1에서와 같이 행렬로 표시할 수 있으며, 이 행렬의 i 행 j 열 성분은 (i, j) 번째 격자(즉, i 번째 파장의 j 번째 칩주기)에 위치한 펄스의 강도를 나타낸다. 2-D OCDMA 부호의 이차원적 구조와 단극성으로 인해 기존의 무선 CDMA 시스템에서의 부호 설계와 검출 기법을 2-D OCDMA의 부호 설계와 검출에 직접 적용하기에는 어려움이 있다^[8]. 이에 2-D OCDMA를 위한 여러 가지 새로운 부호생성기법과 이를 검출하기 위한 기법들이 제안되었다^[5,10]. 특히, 광범위의 OCDMA LAN환경에서 적용될 수 있는 최대공산(Maximum-Likelihood, ML) 검출기가 이상적 다원 접속간섭(Multi-Access Interference, MAI)모델에 기반하여 제안되었으며, 이의 검출성능이 분석적/실험적으로 연구되었다^[10-12].

본 논문에서는 [10,11]에서 이루어진 연구를 동일한 기본 가정 하에서 확장하고 부호중량(code weight, 즉 2-D OCDMA 부호의 모든 격자에서 광펄스의 총 수 또는 강도)과 ML 검출기의 비트검출 오류확률(BER) 사이의 관계를 조명한다. 특히, BER을 최소로 하는 최적부호중량이, 이미 [10]에서 유도된 BER식을 근사화함으로써 쉽게 분석적으로 유도됨을 보이고, 모의실험을 통해 이를 실험적으로도 검증한다. 본 논문에서 유도된 최적부호중량은 활성노드(즉, 데이터 프레임 전송중인 노드)의 수 (N) , 2-D OCDMA에서 사용되는 파장의 수 (L) , 하나의 비트 주기 동안의 칩의 수 (M) 의 함수로 매우 간단히 표현되며, L 과 M 은 일반적으로 사전에 주어지는 2-D OCDMA LAN의 시스템상수로 간주할 수 있는 것과는 달리 일반적으로 활성노드의 수 N 은 시간에 따라 변화한다. 따라서, 활성노드 수를 정확히 추정하여 각각의 활성 노드에서 사용될 OCDMA 부호의 중량을 적응적으로 조절함으로써 최적의 검출성능을 유지할 수 있다. 한편, [10,11]에서 제안된 ML 검출기는 검출식에 N 을 포함하고 있고, 따라서 이론적인 ML 검출기의 검출성능을 보장하기 위해서는 N 의 정확한 추정이 이루어져야

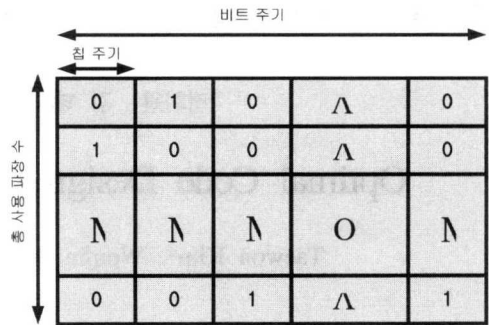


그림 1. 2-D OCDMA 코드의 행렬 표현

한다. 이와 같은 이유에서 OCDMA LAN에서의 활성 노드들의 수에 대한 추정은 LAN의 전송효율을 극대화하기 위한 중요한 사안으로 고려되어야 한다. 본 논문에서는 다른 활성 노드들과의 어떤 정보 교환 없이 각각의 노드들에서 관찰된 광 신호에만 기반하여 N 을 추정하기 위한 기법을 제안하고, 추정된 활성노드수의 동적 오차특성, 즉 측정주기의 길이와 신호의 지속적 측정이 이루어지는 격자의 수의 변화에 따른 측정치의 신뢰도 변화를 분석적/실험적 방법으로 조명한다.

II. 2-D OCDMA 간섭 모델과 ML 검출기

본 장에서는 2-D OCDMA 시스템 성능에 대해 [10]에서 제시된 간섭모델을 포함한 기본적인 전제와 연구결과 중 본 연구와 관련된 부분을 간략히 소개한다. 우선 [10]에서 전제된 2-D OCDMA LAN 구조에서는 모든 노드들이 하나(또는 둘 이상)의 이상적인 성형접속기(star coupler)를 통해 연결된 것으로 전제되었다. 이것은 임의의 노드가 다른 모든 노드들에 의해 송신된 광신호에 노출되어 있다는 것을 의미하고, 접속기를 통해 수신된 광신호는 모든 노드들이 송신한 광신호의 중첩으로 표현할 수 있다. 또한, [10]에서는 분석의 용이함을 위해 모든 노드들 간에는 칩 동기를 전제하고 있으며, 특히 교신중인 노드 사이에는 완벽한 비트주기의 동기화를 가정하고 있다. 그 결과 임의의 노드에서 한 비트 주기에 걸쳐 수신된 광신호는 음이 아닌 정수 성분의 $L \times M$ 행렬 R 로 표현할 수 있다. R 은 교신 중인 노드에 의해 전송된 비트가 '1' 또는 '0'인가에 따라, 부호와 간섭 광펄스들의 중첩이거나 혹은 순수 간섭 광펄스들의 중첩이 될 수 있다.

즉, IM/DD를 전제로 하는 OCDMA LAN에서 수신신호 R은

$$R = \begin{cases} C + X & \text{if '1' transmitted,} \\ X & \text{if '0' transmitted,} \end{cases} \quad (1)$$

로 표현된다. 여기서 C는 송신노드에서 비트 '1'이 송신될 때 전송되는 OCDMA 부호를 나타내는 행렬이며, X는 송신노드 이외의 다른 노드에 의해 전송되는 간섭 광신호의 합으로 다원접속으로 인한 간섭신호를 나타내는 행렬이다. 따라서, 최적검출기법은 간섭 신호 X에 대한 다양한 확률적인 모델에 따라 다르게 유도될 수 있으며^[12], 본 논문에서는 [10]에서 적용된 간섭모델을 수정 없이 사용한다. $R_{i,j}$, $C_{i,j}$, $X_{i,j}$ 는 각각 행렬 R, C, X의 위치 (i, j)에 해당하는 원소를 나타낸다.

[10]에서 사용된 간섭모델은 기본적으로 다음의 근사화를 통해 간섭신호를 표현한다: (1) 각각의 간섭노드가 1/2의 확률로 '0' 또는 '1'을 전송한다; (2) '1'을 전송하는 간섭노드는 행렬 X에서 총 LM개의 격자 중에서 임의로 선택된 위치에 W개의 광펄스를 전송하는 형태로 간섭신호를 발생시킨다. W는 각 2-D OCDMA 부호를 구성하는 펄스의 총 수, 즉 부호중량을 나타내며, 간섭노드들 간의 확률적 독립성을 전제하면, 위치 (i, j)에서의 간섭신호 $X_{i,j}$ 의 분포는 다음과 같은 이항분포(binomial distribution)로 주어진다.

$$P\{X_{i,j} = x_{i,j}\} = \binom{N-1}{x_{i,j}} \left(\frac{W}{2LM}\right)^{x_{i,j}} \times \left(1 - \frac{W}{2LM}\right)^{N-x_{i,j}-1} \quad (2)$$

한편, 식 (2)로부터 행렬 X의 분포를 얻기 위해서 [10]에서는 N이 매우 큰 값일 때 $X_{i,j}$ 사이의 확률적 의존도가 무시할 수 있을 정도로 작아지는 것에 착안하여 X의 확률분포를 다음과 같이 근사하고 있다.

$$P\{X = x\} = \prod_{j=1}^M \prod_{i=1}^M P\{X_{i,j} = x_{i,j}\} = \prod_{j=1}^M \prod_{i=1}^M \binom{N-1}{x_{i,j}} \left(\frac{W}{2LM}\right)^{x_{i,j}} \times \left(1 - \frac{W}{2LM}\right)^{N-x_{i,j}-1} \quad (3)$$

수식 (1)과 X의 분포로부터 '0' 또는 '1'이 전송되었다는 조건하에 R의 조건부분포를 쉽게 얻어낼

수 있고, 이들을 비교함으로써 ML 검출기는 다음과 같이 유도된다.

$$\prod_{(i,j) \in E_1} \frac{N-R_{i,j}}{R_{i,j}} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ \text{"0 detected"} \end{matrix} \left(\frac{2LM}{W} - 1\right)^W \quad (4)$$

단, 식 (4)에서 $E_1 = \{(i, j) : C_{i,j} = 1\}$ 로 정의되며 이는 교신 중인 노드쌍이 사용하는 부호에서 W개 광펄스의 위치를 나타낸다.

식 (4)와 같이 주어진 ML 검출기는 NW 가 $2LM$ 보다 작거나 비슷한 값일 때 E_1 의 위치에서 펄스의 유무에 대한 논리적인 'AND' 연산과 동일하며^[10], 바꾸어 말하면, 평균적으로 LM보다 작거나 비슷한 수의 광펄스가 전체 활성노드에 의해 전송되는 상황에서는 ML 검출기법은 사실상 다음의 AND 검출기법으로 정확하게 근사할 수 있다.

$$\bigwedge_{(i,j) \in E_1} "R_{i,j} > 0" \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ \text{"0 detected"} \end{matrix} \neq \text{TRUE} \quad (5)$$

식 (5)에 의해 표현되는 AND 검출기는 엄밀한 의미의 ML 검출기보다 간단한 구조를 가지며, 따라서 구현에 용이하다. 또한, 실험을 통해서도 AND 검출기는 더 복잡한 구조의 ML 검출기와 BER 측면에서 유사한 성능을 나타내는 것으로 검증되어, ML 검출기의 BER은 수식 (5)로 주어진 AND 검출기의 BER을 분석함으로써 예측할 수 있다^[10,12]. AND 검출기의 검출오류는 송신노드로부터 '0'이 전송된 상황에서 하나 이상의 간섭 광펄스가 E_1 의 모든 위치에 존재할 때 발생하며, 그 확률은 쉽게 다음과 같이 유도된다^[10].

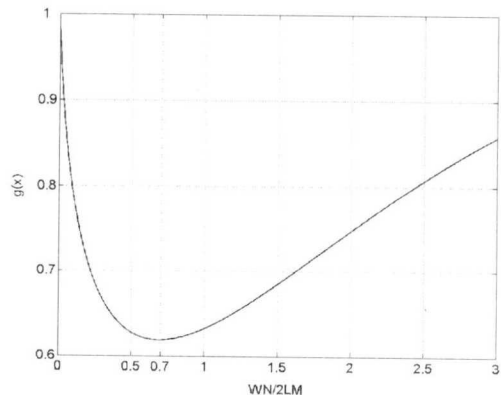


그림 2. 함수 $g(x) = (1 - e^{-x})^x$ 의 그래프

$$BER = \frac{1}{2} \prod_{(i,j) \in E_i} \sum_{k=1}^{N-1} \binom{N-1}{k} \left(\frac{W}{2LM} \right)^k \times \left(1 - \frac{W}{2LM} \right)^{N-k-1} \quad (6)$$

III. 최적부호중량 (Optimal Code Weight)

본 장에서는 [10]에서 유도된 ML 검출기의 BER 을 보다 간단한 형태로 표현되는 L, M, N, W 의 함수로 근사하고, 이를 이용하여 주어진 OCDMA LAN 환경(즉, L, M, N)에서 검출오류를 최소화하기 위한 부호중량 W 를 유도한다.

식 (6)의 BER은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$BER = \frac{1}{2} \left(1 - \left(1 - \frac{W}{2LM} \right)^{N-1} \right)^W \quad (7)$$

널리 알려진 대부분의 2-D OCDMA 부호체계에서 일반적으로 부호중량 W 는 2-D 부호의 전체 격자의 수 LM 보다 상당히 작은 값을 갖는다. 따라서, 작은 x 에 대해 $(1-x) \approx e^{-x}$ 임을 이용하여, 식 (7)에 주어진 ML 검출기의 BER을 다음과 같이 근사할 수 있다.

$$BER \approx \frac{1}{2} \left(1 - e^{-\frac{W(N-1)}{2LM}} \right)^W = \frac{1}{2} \left[g \left(\frac{W(N-1)}{2LM} \right) \right]^{\frac{2LM}{N-1}} \quad (8)$$

단, 여기서 $g(x) = (1 - e^{-x})^x$ 이며, 식 (8)로부터 L, M, N 이 주어진 상태에서 부호중량 W 의 변화에 따른 BER의 상대적 변화는 함수 g 에 의해 결정됨을 알 수 있다. 바꾸어 말하면, 식 (8)은 주어진 L, M, N 에 대해 $g\left(\frac{W(N-1)}{2LM}\right)$ 이 최솟가 되도록 W 를 선택함으로써 BER을 최소화할 수 있음을 의미한다. 함수 g 가 최솟값을 취하는 점을 알아보기 위해 함수 $g(x)$ 의 그래프를 $x \in [0, 0.3]$ 에서 그림 2에 나타내었고, 이 그림으로부터 $x=0.7$ 부근에서 함수 g 가 최솟가 됨을 알 수 있다. 실제로 함수 g 의 최솟점은 이를 미분함으로써 분석적으로도 쉽게 구할 수 있으며, 정확한 최솟점은 $x = \log 2 \approx 0.69$ 이다. 따라서, ML 또는 AND 검출기의 검출오류를 최소화하는 부호중량 W_{opt} 는 $\frac{W(N-1)}{2LM}$ 이 0.7 부근의 값을 취하도록 하는 값, 즉, $N \gg 1$ 이라 가정할 때 다음과 같이 주어진다.

$$W_{opt} \approx 1.4 \times \frac{LM}{N} \quad (9)$$

여기서 주목해야 할 점은 최적의 검출성능이 $\frac{WN}{2LM} \approx 0.7$ 일 때 얻어진다는 사실로서, $\frac{WN}{2LM}$ 은 물리적으로 그림 1의 각 격자에 전송될 펄스의 수 또는 강도의 평균값으로 해석될 수 있다. 즉, ML 검출기 또는 AND 검출기를 도입한 2-D OCDMA LAN에서 최적의 검출성능을 얻기 위해서는 사용된 파장의 수(L), 비트주기 당 칩의 수(M), 활성 노드의 수(N), OCDMA 부호의 중량(W)을 각각 독립적인 성능인자로 고려할 필요가 없으며, 단일 격자에 평균적으로 발견될 광펄스의 수만을 성능인자로 고려하여 이를 평균 0.7개가 되도록 유지하는 것으로 충분하다는 것을 알 수 있다. 또한, 성능인자 $\frac{WN}{2LM}$ 이 부호중량 W 에 비례하므로, 2-D OCDMA LAN에서 부호중량의 변화에 따른 BER의 변화는 기본적으로 그림 2에 나타난 곡선의 모양을 따르게 될 것을 예상할 수 있다.

위에서 도출된 이론적 결과를 검증하기 위하여, 그림 3에 식 (7)로 주어진 이론적 BER을 다섯 가지 다른 OCDMA LAN 상황에 대해 부호중량을 변화시켜가며 계산하고 그 결과를 그래프로 도시하였다. 그림 3에서 $LM=400$ 로 고정되었으며 활성 노드의 수(N)를 다섯 가지 다른 값(40, 80, 160, 320, 640)으로 변화시켜가며 각각의 경우에 대해 부호중량의 변화에 따른 BER의 변화를 그래프로 표현하였다. 식 (8)으로부터 이미 예견되었듯이 각각의 그래프는 기본적으로 그림 2의 그래프와 같은

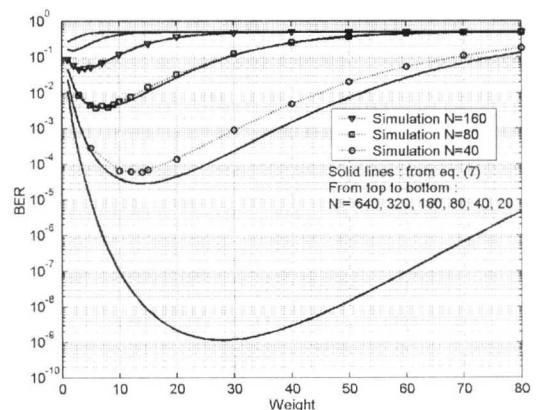


그림 3. 부호중량의 변화에 따른 BER 성능 (LM = 400)

형태이며, 활성노드의 수가 변화함에 따라 그 크기만이 확대/축소됨을 그림 3에서 확인할 수 있다. 앞에서 소개된 간섭모델을 기반으로 추정된 BER의 정확성을 알아보기 위해 검출성능에 대한 모의실험 결과도 $N=40, 80, 160$ 인 경우에 대해 그림 3에 함께 비교하였다. 모의실험에서는 N 개의 활성 노드가 각각 무작위로 중량이 W 인 2-D OCDMA 부호를 생성하여 1/2의 확률로 '0' 또는 '1'을 전송하도록 하였으며, 식 (4)에서 기술한 ML 검출기법을 적용해서 이를 검출하는 것으로 상황을 설정하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이 이론값과 모의실험 결과는 같은 형태의 BER 곡선에 의해 나타내어지며 N 이 증가함에 따라 두 값은 매우 근접해 짐을 확인할 수 있다. 또한 식 (9)로 주어진 최적부호중량 부근에서 실제로 최소의 BER을 가짐을 볼 수 있다. 그림 4에서는 $LM=900$ 인 경우에 대해 이론적 BER과 모의실험결과를 도시하였다. 그림 4에서도 그림 3에서와 마찬가지로 BER의 이론적 추정치가 실험 결과에 근접하고, 사실상 같은 점(즉, W_{opt})에서 최소값을 취하는 것을 확인할 수 있다.

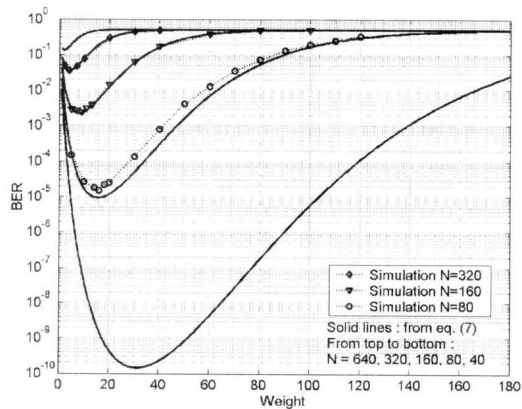


그림 4. 부호중량의 변화에 따른 BER 성능 ($LM=900$)

앞서 언급된 바와 같이 식 (9)의 물리적 의미는 격자당 0.7개의 광펄스가 평균적으로 전송될 때 최저 BER을 얻게 된다는 것으로 이를 실험적으로 확인하기 위해 다양한 LM 값과 N 값에 대해 실험적으로 최적부호중량을 구하여 표 1에 정리하였다. 식 (9)가 의미했던 바와 같이, 격자당 펄스밀도가 0.7 전후일때 최저 BER을 달성할 수 있음을 실험을 통해서도 쉽게 알 수 있다.

다음은 본 장의 마지막 실험을 통해 최저 BER(즉, 부호중량이 최적화 되었을 때의 BER)과 L, M, N 과의 관계를 조명한다. 그림 3과 4에서 주어진 LM 값에 대해 활성노드의 수가 증가함에 따라 최저 BER이 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 3과 4를 비교하면 활성노드의 수가 고정된 상태에서 LM 이 증가함에 따라 최저 BER이 감소할 수 있다. 이는 N 의 증가와 LM 의 감소가 모두 개별 활성노드에 할당되는 대역폭의 감소와 같은 효과를 갖기 때문에 발생하는 현상으로 이해할 수 있으며, 식 (8)은 이를 정량적으로 설명한다. 즉, 부호의 중량이 식 (9)에 의해 주어지는 최적값으로 선택된다고 가정하면, 식 (9)에서 함수 g 는 언제나 그 최소값 $2^{-\log 2} \approx 0.62$ 을 취하게 된다. 따라서, 이 경우 BER은 L, M, N 의 함수로서 다음과 같이 근사된다.

$$BER \approx \frac{1}{2} \cdot 0.38 \frac{LM}{N} \quad (10)$$

위 식으로부터 최적중량의 부호가 사용된 2-D OCDMA LAN에서의 BER은 실질적으로 부호 생성을 위해 사용된 격자의 수와 활성노드의 수 사이의 비에 의해 결정됨을 알 수 있다. 이를 실험을 통해 확인하기 위해 그림 5에 LM/N 를 일정한 값으로 유지하면서 LM 과 N 의 값을 변화시켰을 때의 BER을 식 (10)과 모의실험을 통해 추정하여 비교하였다. 앞선 실험결과와 마찬가지로 이론적 추정치는 모의실험결과와 부합하고, LM 과 N 이 증가함에 따라 모의실험결과가 이론적 추정치로 더욱 접근하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 식 (10)에서 예상되었던 바와 같이 BER은 실질적으로 LM/N 에 의해 결정되고, 따라서 LM 과 N 의 비가 유지될 때 BER은 큰 변화를 보이지 않음을 확인할 수 있다.

표 1. 실험적으로 추정된 최적부호중량과 이에 해당하는 평균펄스밀도

LM	N	최적 부호중량	격자당 펄스밀도
50	10	7	0.700
100	20	7	0.700
200	40	7	0.700
400	80	7	0.700
900	160	8	0.711
100	10	14	0.700
200	20	14	0.700
400	40	14	0.700
900	80	16	0.711
10000	500	28	0.700

IV. 활성 노드의 수 추정

최적부호중량의 결정에 있어서 활성노드의 수에 대한 정보가 필요하지만, 간헐적인 정보의 전송이 주로 이루어지는 LAN환경에서 노드간 정보교환을 통해 활성노드의 수를 지속적으로 추적하여 개개의 노드에 이를 제공하는 것은 매우 비효율적이다. 한편, 각 노드에서 수신되는 광신호를 기반으로 활성노드의 수를 추정할 수 있다면 빈번한 노드간 정보교환을 배제할 수 있으므로 보다 효율적인 부호의 최적화를 기대할 수 있다. 그러나, 활성 노드의 수는 시간에 따라 변화하고, 그 변화의 폭과 속도는 LAN을 구성하는 노드들의 활동성향과 밀접하게 연관되어 있기 때문에 수신된 광신호에만 의존하여 활성노드의 수를 정확히 추정/추적하기 위해서는 노드들의 활동성향분석과 이에 따른 추정방식의 최적화가 이루어져야한다. 본 절에서는 그 첫 걸음으로 활성노드의 수를 수신된 광신호로부터 추정하는 매우 간단한 기법에 대해 오차특성을 분석하고, 이를 이용하여 부호중량의 최적화를 시도할 경우의 동적 BER 특성을 모의실험을 통해 조사한다.

LAN 노드들이 사용하고 있는 부호의 중량 W 와 한 비트주기 동안 수신된 총광펄스의 수(또는 강도)가 주어질 경우 활성노드 중 약 반 정도가 '1'을 전송한다고 가정하면, 한 비트주기 동안 수신된 광펄스의 총수에 $2/W$ 를 곱하여 활성노드의 수를 추정하는 것이 가장 간단하고 직관적인 추정방법이라 할 수 있다. 이러한 추정방법은 하나 이상의 비트주기 동안 임의의 격자들에서 수신된 광펄스의 수를 이용하여 활성노드의 수를 추정하는 방법으로 일반화가 가능하다. 즉, N 의 추정을 위해 n_c ($\leq LM$)개의 다른 격자위치를 선택하여 n_b 비트주기 동안 수신 광신호를 선택된 격자위치에서만 측정하여 m 번째 비트주기에 총 K 개의 광펄스가 감지되었다고 가정하자. 활성노드의 수(N)가 측정주기 동안 변하지 않았다고 가정하면, 활성노드의 수는 다음의 식을 통해 추정할 수 있다.

$$\hat{N} = \frac{2LM}{n_b n_c W} \sum_{i=1}^{n_b} K_i \tag{11}$$

여기서, \hat{N} 의 오차특성분석을 위해 다시 2장에서 가정(즉 모든 활성노드는 서로 독립적으로 동작하며 각 활성노드는 LM 개의 격자 중 임의로 W 개를 선

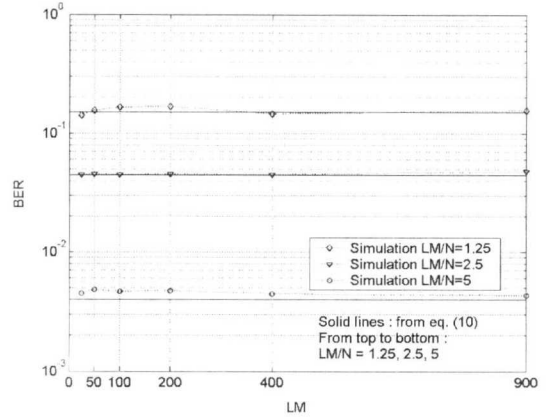


그림 5. LM과 N의 비에 따른 BER

택하여 광펄스를 배치함으로써 각자의 부호를 생성한 후 '0'과 '1'을 각각 1/2의 확률로 선택하여 전송한다는 가정)을 전제하면, K_i 의 평균과 자기상관함수(autocorrelation function)는 다음과 같이 유도할 수 있다.¹⁾

$$\overline{K} = E\{\hat{K}\} = \frac{n_c W N}{2LM} \tag{12}$$

$$C_{K}(m) = Cov(K_i, K_{i+m}) = \begin{cases} c+v & \text{if } m=0, \\ c & \text{if } m \neq 0. \end{cases} \tag{13}$$

단, 여기서

$$c = \frac{n_c W N (LM - n_c)(LM - W)}{4L^2 M^2 (LM - 1)} \tag{14}$$

$$v = \frac{n_c W N}{4LM} \left(1 + \frac{(n_c - 1)(W - 1)}{LM - 1} \right) \tag{15}$$

로 정의되며, 식 (12)와 (13)로부터 \hat{N} 의 평균과 표준편차를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E\{\hat{N}\} = \frac{2LM}{n_b n_c W} \cdot n_b \overline{K} = N. \tag{16}$$

1) K_i 의 자기상관함수 $C_K(m)$ 은 모든 활성노드의 비트 주기가 동기화 되어있다는 가정 하에서 유도되었다. 이러한 비현실적 가정에 기반한 \hat{N} 의 오차분석결과와 실제상황에서의 \hat{N} 의 오차특성과 차이가 있을 수 있으나, n_b 가 충분히 큰 값을 취하게 되면 (즉, 측정시간이 비트주기보다 매우 길어짐에 따라) 그 차이는 무시할 수 있는 수준으로 작아진다.

$$\begin{aligned} \text{STD}\{\hat{N}\} &= \frac{2LM}{n_b n_c W} \sqrt{\sum_{l=1}^{n_b} \sum_{r=1}^{n_c} \text{Cov}\{K_l, K_r\}} \quad (17) \\ &= \frac{2LM}{n_b n_c W} \sqrt{n_b v + n_b^2 c}. \end{aligned}$$

식 (16)은 \hat{N} 이 비편향(unbiased) 추정값임을 말해 주며, 식 (17)은 N 을 중심으로 하는 \hat{N} 의 오차의 폭을 n_b 와 n_c 의 함수로 표현한다. 여기서, 주목하여야 할 것은 n_b 와 n_c 의 변화에 대한 \hat{N} 의 오차특성이며, 이를 기반으로 하여 궁극적으로 노드활동성향, 광수신기 구조 등의 실제 통신상황에 따른 n_b 와 n_c 의 최적선택이 이루어져야한다. 우선, n_c 의 변화에 따른 \hat{N} 의 오차특성을 살펴보면, 식 (14), (15), (17)로부터 n_c 의 증가가 추정값의 정확도를 증가시킴을 알 수 있으며, $n_c = LM$, 즉 모든 격자위치에서의 수신 광펄스 수를 측정하여 활성노드의 수를 추정할 때 아래의 식으로 주어지는 최소 편차폭을 얻게 된다.

$$\text{STD}\{\hat{N}\}_{n_c=LM} = \sqrt{\frac{N}{n_b}}. \quad (18)$$

그러나, 2장에서 언급된 ML 검출기가 오직 일부의 격자위치, 즉 E_1 에서만 측정된 광신호로 수신 데이터를 검출하는 것을 고려하면, 활성노드의 수를 추정하기 위해 모든 격자위치를 상시 감시하는 것은 수신기 구현비용에 과도한 추가부담이 될 수 있다. 이러한 구현상의 추가부담을 방지하기 위해 수신노드의 검출기가 광신호를 추출하는 격자위치 E_1 에서만 광펄스를 셀 경우 편차폭은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{STD}\{\hat{N}\}_{n_c=W} & \quad (19) \\ &= \sqrt{\frac{N}{n_b} \left(1 + \frac{(LM-W)^2 (n_b+1)}{W^2 (LM-1)} \right)}. \end{aligned}$$

n_b 가 활성노드의 수를 추정하기 위한 측정주기의 길이라는 사실로부터, n_b 가 증가하면 \hat{N} 의 정확도가 향상될 것을 기대할 수 있다. 실제로, (18)과 (19)에서 $\text{STD}\{\hat{N}\}$ 은 n_b 가 증가함에 따라 감소한다. 특히, $n_c = LM$ 으로 설정된 경우, n_b 가 증가함에 따라, \hat{N} 의 편차는 $n_b^{-1/2}$ 의 속도로 0으로 수렴하게 된다. 그러나, 여기서 흥미로운 사실은 \hat{N} 의 편차가 0으로 수렴하는 현상은 오직 $n_c = LM$ 인 경우에만 발생한다는 것이며, 이는 식 (17), 또는 (19)를

통해 쉽게 확인 할 수 있다. 즉,

$$\begin{aligned} \lim_{n_c \rightarrow \infty} \text{STD}\{\hat{N}\} & \quad (20) \\ &= \sqrt{\frac{N(LM-n_c)(LM-W)}{n_c W(LM-1)}}. \end{aligned}$$

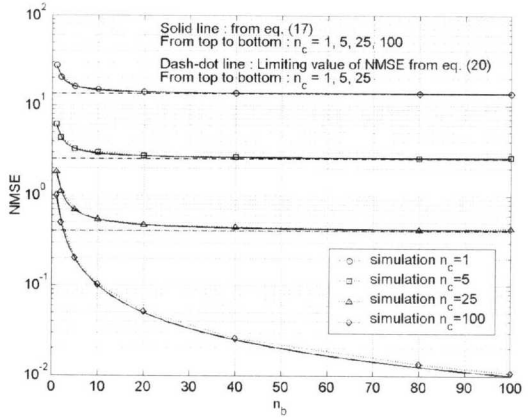


그림 6. $LM=100$, $N=20$, $W=W_{opt}$ 인 경우 n_b 의 변화에 따른 NMSE (즉, $\text{Var}\{\hat{N}\}/N$)의 변화

이와 같이, n_b 를 무한히 증가시켜도 \hat{N} 의 정확도가 식 (20)에 의해 주어진 한계이상 향상되지 않는 현상은 LM 개의 격자위치 중 일부분만을 감시할 경우 각각의 활성노드에 의해 전송되는 W 개의 광펄스 중 일부가 측정주기의 길이와 무관하게 지속적으로 K 에 반영되지 않음으로써 나타나는 것으로 이해할 수 있다. 이를 실험적으로 확인하기 위해 그림 6에 \hat{N} 의 정규화된 평균제곱오차 (Normalized Mean-Square Error, NMSE), 즉 $\text{Var}\{\hat{N}\}/N$ 을 식 (17)과 모의실험을 통해 계산하여 도식적으로 비교하였다. 그림 6으로부터 비교적 큰 값의 n_b 에 대해 모의실험 결과가 식 (17)로 계산된 NMSE와 부합함을 확인할 수 있으며, 또한, n_b 가 증가함에 따라 NMSE가 식 (20)에 의해 계산된 점근선으로 접근하는 것도 알 수 있다.

n_b 와 n_c 의 궁극적 최적화 목표가 N 의 추정값 \hat{N} 의 오차를 최소화하는 것이라고 전제하면, 식 (17)과 (20)은 주어진 통신망 환경에 대해 n_b 와 n_c 의 최적값을 찾는 데 유용하게 활용될 수 있다. 예를 들어, n_c 의 최적값은 N -추정기(N -estimator)의 구현 비용과 식 (20)로부터 결정할 수 있다. n_c 는 1부터 LM 의 값을 취하며, 그림 7에 예시된 바와 같이 \hat{N} 의 정확도는 n_c 와 함께 증가한다. 반면, n_c 개의 격

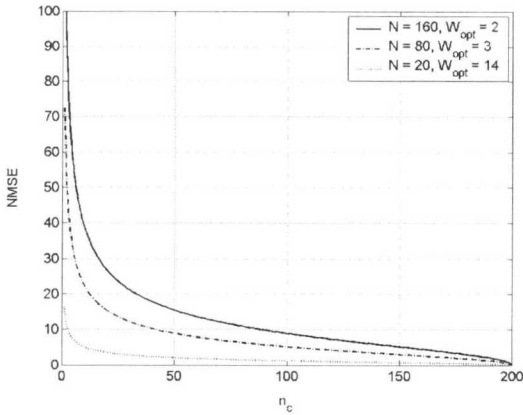


그림 7. $LM=200$, $W=W_{opt}$ 에서 n_c 의 변화에 따른 한계 NMSE (즉, $\lim_{n_b \rightarrow \infty} \text{Var}\{\hat{N}\}/N$)의 변화

자위치를 지속적으로 감시하기 위한 비용도 n_c 와 함께 증가하게 되는 것이 일반적이며, 따라서 예산이 허용하는 범위에서 최대의 n_c 값을 취하거나 비용대비성능이 최대가 되는 n_c 값을 취하는 등의 방법으로 n_c 의 최적화가 가능하다.

일단 n_c 의 최적값이 결정되면, n_b 는 N 추정기의 동적특성을 노드들의 활동성향에 대해 최적화하기 위한 매개변수로 활용될 수 있다. 바꾸어 말하면, N 이 시간에 따라 변하지 않는 경우, 식 (17)로부터 \hat{N} 의 정확도가 n_b 와 함께 증가함을 알 수 있다. 그러나, 실제 근거리망에서는 간헐적인 프레임전송이 이루어지고, 따라서 활성노드의 수 N 은 시간에 따라 변하고 그 변화의 통계적 특성은 노드들의 활동성향에 의존하게 된다. 이와 같이 N 이 시간에 따라 변하는 상황에서 n_b 를 증가시킬 경우 \hat{N} 를 추정하기 위한 측정주기가 길어지고, 이와 함께 추정값 \hat{N} 의 N 의 변화에 대한 반응속도는 느려진다. 즉, n_b 를 필요이상 증가시킬 경우, \hat{N} 의 반응속도 저하로 인한 오차증가요인이 측정주기 연장으로 인한 \hat{N} 의 정확도 향상요인을 능가할 수 있으며, 그 결과 실제 추정성능은 저하될 수 있다. 따라서, 노드의 활동성향 또는 N 의 시간에 따른 변화에 대한 확률적 모델이 주어질 경우, 이와 함께 식 (17)을 이용하여 n_b 의 증가로 인한 정확도 향상요인이 이로 인한 오차증가요인과 상쇄되는 점에서 n_b 를 선택함으로써 추정값 \hat{N} 의 정확도를 극대화 할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 2-D OCDMA 근거리망에서 BER을 최소화하기 위한 최적부호중량을 분석적으로 유도했으며, 이를 실험적으로 검증하였다. BER을 최소화하기 위한 최적부호중량 W_{opt} 는 격자당 평균 펄스의 강도가 0.7이 되도록 하는 부호중량이라는 의외로 간단한 물리적 해석을 도출하였으며, 부호중량이 최적화 되었을 때의 BER은 격자당 활성노드의 수 (즉, W/LM)에 의해 사실상 결정된다는 사실을 분석적/실험적으로 확인하였다. 실질적이고 효율적인 부호중량의 최적화기법을 도출하기 위한 첫걸음으로 수신된 광신호에만 의존하여 활성노드의 수를 추정하기 위한 일반적이고 간결한 비편향 추정기법을 제안하였으며 그 오차특성을 분석하였다. 오차특성 분석결과는 실험적으로도 검증되었으며, 이를 이용하여 활성노드의 수를 추정하기 위한 측정주기 및 격자수의 변화에 따른 추정기의 성능변화를 이해할 수 있었다. 따라서, 본 논문의 결과는 최적화의 대상이 되는 2-D OCDMA 근거리망의 시스템상수(즉, L, M , 비활성 노드를 포함한 노드의 총수 등)와 노드활동성향 등이 주어졌을 때 전체적인 전송효율을 극대화하는 총체적 부호분할다중전송기법을 도출하는데 활용될 것으로 기대된다.

참고 문헌

- [1] J. A. Salehi, "Code division multiple access techniques in optical fiber networks - Part I: Fundamental principles," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 37, no. 8, pp. 824-833, Aug. 1989.
- [2] J. A. Salehi, "Emerging optical code-division multiple access communication systems," *IEEE Network*, vol. 3, pp. 31-39, Mar. 1989.
- [3] F. R. K. Chung, J. A. Salehi, V. K. Wei, "Optical orthogonal codes: Design, analysis, and applications," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol. 35, no. 3, pp. 595-604, May. 1989.
- [4] L. B. Nelson, H. V. Poor, "Performance of multiuser detection for optical CDMA - Part I: Error probabilities," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 43, no. 11, pp. 2803-2811, Nov. 1995.

[5] E. S. Shivaleela, K. N. Sivarajan, A. Selvarajan, "Design of a new family of two-dimensional codes for fiber-optic CDMA networks," *IEEE Journal of Lightwave Technology*, vol. 16, no. 4, pp. 501-508, Apr. 1998.

[6] K. Kitayama, "Code division multiplexing lightwave networks based upon optical code conversion," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, no. 7, pp. 1309-1319, Sep. 1998.

[7] G. C. Yang, W. C. Kwong, "Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA+CDMA for fiber-optic networks," *IEEE Trans. on Commun.*, vol. 45, no. 11, pp. 1426-1434, Nov. 1997.

[8] A. Stok, E. H. Sargent, "Lighting the local area: Optical code-division multiple access and quality of service provisioning," *IEEE Network*, vol. 14, pp. 42-46, Nov.-Dec. 2000.

[9] E. K. H. Ng, E. H. Sargent, "Mining the fiber-optic channel capacity in the local area: maximizing spectral efficiency in multiwavelength optical CDMA networks," in *Proc. ICC 2001*, vol. 3, Helsinki, Finland pp. 712-715, 2001.

[10] F. T. W. Chang, E. H. Sargent, "Optical CDMA using 2-D codes: The optimal single user detector," *IEEE Commun. Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 169-171, Apr. 2001.

[11] T. W. F. Chang, "Optical Code-Multiple Access Networks: Quantifying and Achieving the Ultimate Performance," *Master's thesis*, University of Toronto, 2000.

[12] Y.-C. Yun, J. Choe, W. Sung, "A comparative study on the performance of detectors and interference models for OCDMA LANs," *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 2402, pp. 223-238, Aug. 2002.

김 태 원(Tae-won Kim)

정회원



2002년 2월 : 서강대학교 전자공학과 졸업
2002년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 석사과정
<주관심 분야> 광부호분할다중화 방식 및 코딩

성 원 진(Wonjin Sung)

정회원



1990년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사
1992년 5월 : University of Michigan 전기공학과 석사
1995년 12월 : University of Michigan 전기공학과 박사

1996년 1월~2000년 8월 : Hughes Network Systems사 책임연구원

2000년 9월~현재 : 서강대학교 전자공학과 조교수
<주관심 분야> 디지털통신, 전송기술, 채널코딩

최 진 우(Jinwoo Choe)

정회원



1990년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 학사
1992년 2월 : 서울대학교 제어계측공학과 석사
1998년 12월 : Purdue University 전기컴퓨터공학과 박사

1998년 11월~2001년 1월 : University of Toronto 전기컴퓨터공학과 조교수

2001년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 조교수
<주관심 분야> 통신망 설계 및 성능해석, 광통신망, 멀티미디어 캐싱