

# 2-D OCDMA LAN에서의 검출기와 간섭 모델의 성능에 대한 비교 연구

정희원 윤용철\*, 최진우\*, 성원진\*

## A Study on Detectors and Interference Models for 2-D OCDMA Networks

Yong-Chul Yun\*, Jin-Woo Choe\*, Won-Jin Sung\* *Regular Members*

요 약

2-D OCDMA는 근거리 광통신망의 구현을 위한 유력한 기술적 해법으로 고려되고 있으며, 다양한 2-D OCDMA 기법/기술에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 단극부호를 사용하는 2-D OCDMA 통신망의 성능분석을 위한 새로운 다중접속 간섭모델을 제안하고 이 간섭모델을 기초로 하는 최대공산검출기를 유도한다. 또한, 이들 최대공산검출기와 기존에 제안된 보다 단순한 구조를 갖는 검출기의 검출성능을 컴퓨터 모의실험을 통해 비교한다. 상대적으로 복잡한 연산이 어려운 순수 광통신망에서의 적용을 고려하여 각 검출기의 구현복잡도를 평가하고, 그 결과 Pulse-Binomial 모델과 Pulse-Poisson 모델로부터 유도된 최대공산 검출기와 AND 검출기가 검출성능과 구현용이성측면에서 최적균형점에 있음을 확인한다.

키워드: OCDMA, 간섭모델, 검출기, 구현난이도

### ABSTRACT

2-D OCDMA is considered to be a viable technical solution for optical LANs, and a considerable amount of research effort has been devoted to various 2-D OCDMA techniques. In this paper, we propose two new interference model for 2-D OCDMA LANs employing unipolar random codes, and derive maximum-likelihood detectors based on these interference models. The BER performance of the maximum likelihood detectors and that of other existing detectors are compared through extensive computer simulations. In addition, the complexity of high-speed implementation of the detectors is assessed, and as a result, we found that the AND detector and the maximum-likelihood detectors for the pulse-binomial and the pulse-Poisson model offer the best trade-off between the BER performance and the facility of high-speed implementation.

### I. 서론

광통신기술은 장거리 통신망에서 전자통신기술을 빠른 속도로 대체하고 있는 반면, 단거리 통신망의 발전은 많은 부분 여전히 전자통신기술에 의해 주도되고 있다. 예를 들면, 근거리망(local area network) 규모에서 광통신기술을 효과적으로 적용하기 위한 연구도 상대적으로 최근에 활기를 띠었다고 할 수 있으며, 이는 근거리망이 필요로 하는 대

역폭이 비교적 작고 상대적으로 제한된 예산으로 구축되는 경우가 일반적이기 때문으로 판단된다. 한편, 멀티미디어나 3-D 그래픽 응용프로그램과 같이 방대한 대역폭을 요구하는 새로운 응용프로그램들이 속속 개발되어 빠르게 확산되고 있으며, 이들은 기존의 응용프로그램들과는 달리 소수의 사용자들만으로도 엄청난 양의 정보유동을 촉발하고, 전자통신기술에 의존하여 구축된 근거리망에서 심각한 정체를 야기할 수 있다. 따라서, 근거리 광통신망에 대한

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

논문번호: 020343-0805, 접수일자: 2002년 8월 5일

※ 본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 R01-2001-000-00542-0(2002) 지원으로 수행되었음.

수요는 가까운 미래에 크게 증가할 것으로 기대되고, 또한 근거리 광통신망의 대중화 시기는 비용의 적합성과 설치/조작의 용이성에 크게 좌우될 것으로 예상된다.

시분할다중화(TDM)와 파장분할다중화(WDM)는 장거리/광대역 광통신망에서 성공적으로 도입되고 있는 반면, 근거리망에서는 기존의 구리선기반의 기술보다 가격대비 성능면에서 유리한 해법으로 인지되지 못하고 있다[1]. 이는 수 Gbps이상의 전송속도에서 패킷스위칭이 현재의 광/전자통신기술로는 어렵기 때문이며, 또한 최신의 광/전자통신기술 및 소자를 사용하여 수 Gbps의 패킷스위칭을 구현할 수 있을지라도 그 비용은 통상적인 근거리망 구축 예산을 훨씬 상회하게 될 것으로 예상된다. 아울러, 파장기반 스위칭 기술이나 버스트스위칭(burst switching)과 같은 순수 광영역 스위칭기술은 통신망 전체에 걸친 체계적 계획과 정교한 자원배치기술을 필요하며, 따라서 잦은 구조변화와 불규칙하고 간헐적인 정보유동이 발생하는 근거리망에서는 적합하지 않다. 이와 같은 이유로, 무선통신과 공유매체(shared medium)통신분야에서 개발된 다중접속기술은 광통신영역에서 다시 평가되고 있으며, 특히 광부호분할다중접속(OCDMA)에 대한 관심과 연구노력이 증가하고 있다.

광신호의 위상변조/검출의 기술적 어려움으로 인해, OCDMA에 관련한 연구는 많은 경우 진폭변조/검출이 전제되고 있으며, 특히 단속변조(on-off keying)을 통한 Intensity Modulation and Direct Detection (IM/DD) 기법이 그 구현의 용이성으로 인해 집중적으로 연구되고 있다. 즉, 이는 송신노드에서 특정부호를 비트주기동안 송신하거나 또는 송신하지 않음으로써 한 비트의 정보(즉, '1' 또는 '0')를 수신노드로 송신하게 된다는 것을 의미하며, 부호는 다른 칩주기 또는 파장에 하나 이상의 광펄스를 배치함으로써 생성된다. 파장축과 시간축의 다른 위치에 다수의 광펄스를 위치시켜서 구성된 일반적인 형태의 OCDMA기법을 2-D OCDMA라고 통칭하며[2-6], 2-D OCDMA의 기술적 문제는 부호설계[3-5], 비트검출[2], 그리고 구현문제[7-9]로 분류할 수 있다. 본 논문에서는 단극부호의 IM/DD를 전제로 다중접속에 의해 발생하는 간섭신호의 통계적 특성화와 비트검출문제에 초점을 맞춘다.

광통신망에서의 광대역 정보전송을 고려하여 OCDMA 검출에 대한 대부분의 초기 연구결과들은

비교적 단순한 구조의 검출기가 제안 또는 전제되고 있다[2,10]. 그러나, 2-D OCDMA 통신망에서 단순한 구조의 검출기는 확률적 간섭모델을 기반으로 한 최대공산(Maximum Likelihood, ML)검출기에 비해 대역폭 효율을 저하할 수 있음이 밝혀졌으며[2], 일반적으로 ML 검출기의 검출성능은 이를 유도하기 위해 사용된 간섭모델에 크게 의존하게 된다. 이에 본 논문에서는 [2]에서 사용된 간섭모델과 함께 다른 2가지의 추가적인 2-D OCDMA 간섭모델을 제안하고 이들 모델로부터 ML 검출기를 유도함으로써 기존 2-D OCDMA 검출 문제에 대한 연구결과를 확장한다. 본 논문의 연구목적은 다양한 간섭모델에서 유도된 ML 검출기와 비교적 간단한 구조를 갖는 기존의 검출기들을 비트검출오류확률(BER)과 예상되는 구현난이도의 관점에서 비교/평가함으로써 검출성능과 구현비용간의 최선의 타협점을 강구하는데 있다.

본 논문의 이후 구성은 다음과 같다. 2절은 본 연구에서 전제하는 2-D OCDMA 근거리망의 시스템모델과 기존의 간섭모델을 포함한 세가지 간섭모델을 소개한다. 3절에서는, 다른 간섭모델에 대한 ML 검출기를 유도하고, 아울러 비교적 간단한 구조를 가진 검출기들을 소개 또는 제안한다. 4절에서는, 다양한 2-D OCDMA 근거리망 환경에서 검출기들의 BER 성능을 광범위한 모의실험을 통해 비교/평가하였다. 마지막으로, 5절에서는 검출기들의 구현난이도를 고려하여 4절에서의 결과와 함께 검출기들의 실질적 가치를 평가하고 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템모델과 간섭모델

### 2.1 2-D OCDMA 근거리망의 시스템모델

본 논문에서는 [1,2]에서와 동일한 OCDMA LAN 구조를 전제한다. 즉, 모든 네트워크의 노드는 그림 1에 예시된 바와 같이 하나 이상의 성형접속기(star coupler)를 통해 연결되어 있다고 가정하고, 또한 비간섭성(incoherent) 광원과 이상적인 광접속(즉, 0dB 감쇠와 잡음)을 가정한다. 따라서, 모든 수신기는 모든 송신기에 의해 통신망으로 주입되는 광신호에 노출되고, 수신된 신호는 정확히 전송된 모든 광신호들의 중첩으로 표현되며, 다중접속 간섭(Multi-Access Interference, MAI)이 검출오류의 유일한 원인이 된다.

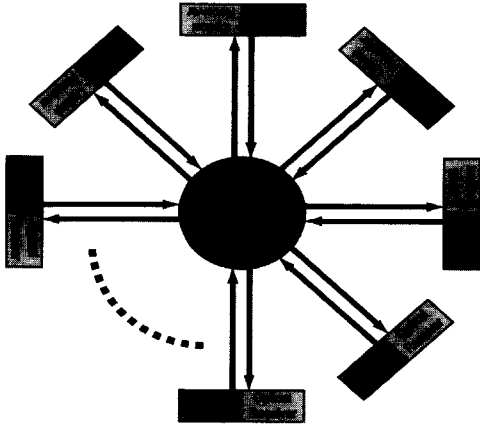


그림 1. 전형적인 OCDMA LAN 의 논리적 구조

일반적인 2-D OCDMA 부호는 그림 2와 같은  $L \times M$  행렬로 표현될 수 있으며, 여기서  $L$  과  $M$  은 각각 OCDMA에서 사용되는 파장의 수와 한 비트주기내의 칩주기의 수(즉, spreading factor)를 나타낸다. OCDMA 부호를 나타내는 행렬  $C$ 의  $i$ 번째 행,  $j$ 번째 열의 성분  $c_{i,j}$ 는  $(i, j)$  번째 격자, 즉  $i$ 번째의 파장으로  $j$ 번째 칩주기에 전송될 광펄스의 강도를 나타내며, 본 논문에서는 [2]에서와 마찬가지로 2-D OCDMA 부호에 단속 변조를 적용하는 것으로 가정한다; 즉, '0'이 전송될 때는 송신노드에서 어떤 광신호도 전송되지 않고, '1'이 전송될 때에는  $i$ 번째 파장에서의  $j$ 번째 칩주기동안에 강도  $c_{i,j}$ 인 광펄스가 전송된다. 마지막으로, [2]에서의 기본적인 전제는 다음의 조건들을 포함하며, 본 연구도 동일한 조건하에서 진행된다.

- 2-D OCDMA 부호는 모든 부호가 같은 수의 단위강도를 갖는 펄스들로 구성되고, 따라서 오직 펄스의  $L \times M$  행렬상의 위치에 의해 구별되며, 송신기에서 항상 임의로 생성된다; 즉,  $c_{i,j}=0$  혹은  $c_{i,j}=1$ 이고 모든 OCDMA 부호는  $\sum_{(i,j) \in E} c_{i,j} = W$ 를 만족하며, 여기서  $E = \{1, \dots, L\} \times \{1, \dots, M\}$ 는 부호상의 모든 격자위치를,  $W$ 는 2-D OCDMA 부호의 중량(즉, 부호내 총 펄스의 수 또는 강도)을 의미한다.
- 모든 송수신 노드쌍은 완전한 비트동기상태에 있다.

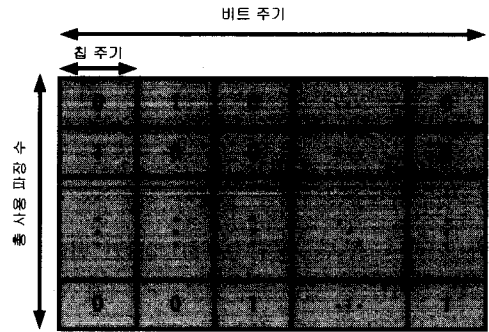


그림 2. 2-D OCDMA 코드와 신호의 행렬 표현

- 통신망으로 주입되는 모든 광신호는 (즉, 간섭신호를 포함해서) 칩동기상태에 있다.

### 2.2 간섭 모델

이 절에서는 기존의 발표된 1가지의 간섭모델과 새로 제안하는 2가지의 다른 간섭모델을 소개한다. 시스템 모델에서의 많은 이상적인 가정에도 불구하고 간섭신호를 정확하게 확률적 모델로 유도하는 일은 여전히 어려운 문제이다. 따라서, 보다 간단한 확률적 모델의 유도를 위해 많은 내부적 동작의 단순화와 근사의 과정을 수행함으로써 다음과 같은 다양한 간섭모델을 유도할 수 있다.

User-Binomial (UB) 모델 : UB 모델은 [2]에서 제안된 간섭모델로서, 각각의 송신노드는 각 격자위치  $(i, j) \in E$ 에서  $\frac{W}{2LM}$ 의 확률로 단위강도를 가지는 펄스를 전송함으로써 간섭을 발생시킨다는 근사적 해석으로부터 유도된다. 여기서  $1/2$ 은 '1'을 보낼 확률을 의미하고,  $\frac{W}{LM}$ 은  $L \times M$ 부호행렬의 서로 다른 격자위치에  $W$ 개의 펄스가 임의로 배치될 때 각 격자위치에서의 펄스배치확률을 의미한다. 결과적으로, 간섭을 발생시키는 송신기들 사이에서의 독립성을 가정하면  $(i, j)$ 의 격자위치에서의 간섭신호의 강도  $X_{i,j}$ 의 확률 분포가 다음과 같이 유도된다.

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

여기서,  $N_j$ 는 간섭을 발생시키는 노드의 수이다. 앞 절에서 언급했던 실제적 2-D OCDMA 시스템에서 각각의 간섭노드들은 서로 다른 격자위치에서 최대  $W$  개의 펄스를 전송하므로 서로 다른 격자위치에서의 간섭펄스의 강도, 즉  $\{X_{i,j} | (i,j) \in E\}$ 는 서로 확률적 의존성을 가지게 된다. 그러나  $N_j$ 나  $W$ 가 충분히 크다면 이러한 의존도는 무시할 수 있는 수준으로 작아지게 되고, 이러한 상황에서는  $\{X_{i,j} | (i,j) \in E\}$  독립성을 가정함으로써 간섭신호행렬  $X$ 의 결합분포(joint distribution)는 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$P[X=x] = \prod_{(i,j) \in E} \binom{N_j}{x_{i,j}} \left(\frac{W}{2LM}\right)^{x_{i,j}} \left(1 - \frac{W}{2LM}\right)^{N_j - x_{i,j}} \quad (2)$$

단, 여기서  $x$ 는  $x_{i,j}$ 를 성분으로 하는  $L \times M$ 행렬이다.<sup>1)</sup>

Pulse-Binomial (PB) 모델 : 두 번째 모델인 PB 간섭모델을 유도하는 기본적 가정은  $N_j$ 개의 간섭노드가 발생시킬 수 있는 최대  $N_jW$ 개의 간섭펄스가 각각 1/2의 확률을 가지고 독립적으로 단속(on-off) 되고, 또한 각 간섭펄스의 위치도 독립적으로  $E$ 에서 선택이 된다는 것이다. 독립적으로 발생하는 펄스는 최대  $N_jW$  개가 있고  $LM$ 개의 서로 다른 격자위치에 배치되므로 조합적인 분석에 의해 다음과 같이 간섭신호  $X$ 의 확률분포를 얻을 수 있다.

$$P[X=x] = \frac{s! \binom{N_jW}{s}}{(LM)^s 2^{N_jW} \prod_{(i,j) \in E} x_{i,j}!} \quad (3)$$

여기서  $s = \sum_{(i,j) \in E} x_{i,j}$ 는 간섭신호의 총 펄스 수 또는 강도를 나타낸다. UB 모델과 비교해 PB 모델이 갖는 장점은 서로 다른 격자위치의 간섭신호들 사이에 존재하는 상호의존성이 반영된다는 점

1)  $\{X_{i,j} | (i,j) \in E\}$ 의 독립성을 가정하는 것은 실제 간섭신호에 대한 타당한 근사화로 볼 수 있으나, 이로 인해 UB 간섭모델에서는 간섭신호의 전체 펄스 수가  $N_jW$ 보다 더 클 수 있다는 문제가 발생한다.

이다. 즉, PB 모델에서  $\{X_{i,j} : (i,j) \in E\}$ 는 더 이상 독립적이라고 가정되지 않으며, 간섭신호에서 펄스강도의 총 합은 최대  $N_jW$ 로 제한된다.

Pulse-Poisson (PP) 모델 : PB 모델에서는 최대  $N_jW$ 의 간섭펄스가 마치  $N_jW$ 개의 독립적인 노드로부터 전송된 것과 같은 형태로 간섭신호를 구성하게 된다. 따라서, 앞서 언급된 바와 같이 각 격자위치에서의 펄스강도는 확률적으로 상호의존성을 갖게되며, 이와 같은 상호의존성은  $N_j$ 가 증가함에 따라 점차 약화된다. 이러한 점근적 현상은 각 간섭노드가 '0' 또는 '1'을 전송할 확률을 0으로 감소시키면서 동시에 잠재적 간섭노드의 모집단을 무한하게 증가시킴으로써 PB 간섭모델에서도 확인할 수 있다. 우선,  $N$ 과  $p_a$ 를 단일 간섭펄스를 전송할 가능성이 있는 잠재적 간섭노드의 총수와 하나의 잠재적 간섭노드가 실제로 간섭펄스를 전송할 확률로 각각 정의하면, 간섭펄스 강도의 결합분포는 다음과 같이 유도된다.

$$P[X=x] = \frac{s! \binom{N}{s} p_a^s (1-p_a)^{N-s}}{(LM)^s \prod_{(i,j) \in E} x_{i,j}!} \quad (4)$$

여기서,  $p_a N = \alpha > 0$ 로 유지하면서<sup>2)</sup>  $N$ 을  $\infty$ ,  $p_a$ 를 0으로 각각 증가 또는 감소시키면 식 (4)로 주어진  $X$ 의 확률분포는 다음의 분포로 수렴한다.

$$P[X=x] = \frac{e^{-\alpha} \left(\frac{\alpha}{LM}\right)^s}{\prod_{(i,j) \in E} x_{i,j}!} \quad (5)$$

이와 같은 분석결과는 그림 1과 같은 OCDMA 근거리망에서 프레임(frame)을 비교적 작은 확률로 간헐적으로 전송하는 다수의 노드가 있을 때 각 격자위치에서의 펄스강도는 독립적인 Poisson 확률변수로 정확히 표현됨을 보여준다. 근거리망에서 임의의 시점에 다수의 노드들 중에 극히 일부만이 실제로 프레임을 전송하는 것은 아주 일반적인 상황이다. 따라서 OCDMA 근거리망에서도 기존의 근거리망에서와 같은 간헐적 정보전송이 주로 이루어진다면, PP 모델이 실제의 다중접속간섭현상을 효

2) 매개변수  $\alpha$ 는 펄스/비트주의 단위를 갖는 간섭신호의 펄스밀도로 해석될 수 있다.

과적으로 특성화할 것으로 기대된다.

### III. OCDMA 검출기

#### 3.1 최대 공산(ML) 검출기

임의의 수신노드에서 1 비트주기 동안 수신된 신호를 행렬  $R$ , 수신노드가 검출하고자 하는 (즉, 해당 송수신 노드쌍이 사용하고 있는) 2-D OCDMA 부호를 행렬  $C$ 라 하자. 행렬  $R$ 은 송신노드에서 해당 비트주기에 '0' 또는 '1'을 전송하는가에 따라 다음과 같이 간섭신호를 나타내는 행렬  $X$  또는  $X$ 와  $C$ 의 합으로 표현된다.

$$R = \begin{cases} X & \text{if '0' is sent,} \\ C + X & \text{if '1' is sent.} \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)과 같이 주어진  $R$ 과  $X$ 사이의 관계를 이용함으로써  $R$ 의 조건부 확률분포는 다음과 같이 간섭신호  $X$ 의 결합분포로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P[R = r \mid \text{'0' is sent}] &= P[X = r] \quad \text{and} \quad (7) \\ P[R = r \mid \text{'1' is sent}] &= P[X = r - C]. \end{aligned}$$

따라서,  $X$ 의 확률분포로 주어진 ML 검출규칙은 다음과 같다 (단, 동률은 임의의 방법으로 동등하게 분기하는 것으로 가정한다).

$$P[X = r] \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} P[X = r - C]. \quad (8)$$

이와 같이 ML 검출규칙은 간섭신호의 확률분포로부터 결정되므로, ML 검출기의 실질적 형태는 기반으로하는 간섭모델에 의해 좌우되고, 앞 절에서 소개된 세 가지 다른 간섭모델에 대해 ML 검출규칙을 유도하면 어렵지 않게 다음과 같은 검출규칙을 얻을 수 있다.

UB 간섭 모델에 대한 ML 검출기

$$\prod_{(i,j) \in E_1} \frac{r_{i,j}}{N_I - r_{i,j} + 1} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} \left( \frac{W}{2LM - W} \right)^W. \quad (9)$$

PB 간섭 모델에 대한 ML 검출기

$$\frac{(N_I W - s)! \prod_{(i,j) \in E_1} r_{i,j}}{((N_I + 1)W - s)!} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} (LM)^{-W}. \quad (10)$$

PP 간섭 모델에 대한 ML 검출기

$$\prod_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} \left( \frac{\alpha}{LM} \right)^W. \quad (11)$$

단, 위 식들에서  $s$ 와  $E_1$ 은  $s = \sum_{(i,j) \in E} r_{i,j}$   $E_1 := \{(i,j) \in E : c_{i,j} \neq 0\}$ 로 각각 정의된다.

일견 UB, PB, PP 간섭 모델에 대한 ML 검출기들이 서로 매우 다른 형태로 보일 수 있다. 그러나,  $N_I$ 가 크고 부호중량  $W$ 가  $LM$ 에 비해 작은 값을 가지면 세가지 ML 검출규칙 모두가  $E_1$ 에서의 펄스강도의 곱인  $\prod_{(i,j) \in E_1} r_{i,j}$ 에 기초하고 있다는 점에서 근본적으로 다르지 않다고 할 수 있다. 보다 섬세한 비교를 위해서는 통상적으로  $r_{i,j}$ 의 값이  $N_I$ 와 비교해 매우 작다는 점에 주목해야 한다. 이는 (9)에서  $W / (2LM - W) \approx W / 2LM$ 과  $N_I - r_{i,j} + 1 \approx N_I$  같은 근사화를 가능하게 하며, 그 결과 UB 간섭모델에 대한 ML 검출규칙은 다음과 같이 근사적으로 표현될 수 있다.

$$\prod_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} \left( \frac{N_I W}{2LM} \right)^W. \quad (12)$$

여기서,  $N_I W / 2$ 은 UB 간섭모델에서 비트주기당 평균 간섭펄스의 수로 해석될 수 있기 때문에 식 (12)의 근사화된 ML 검출기는 근본적으로 PP 간섭모델을 기반으로 한 ML 검출기, 즉 식 (11)과 근본적으로 동일함을 알 수 있다. 마찬가지로, PB 간섭모델을 기반으로한 ML 검출기에 대해서도 비슷한 결론을 도출할 수 있다. 즉,

$$\frac{(N_I W - s)!}{((N_I + 1)W - s)!} = \frac{(N_I W)^{-W}}{\left(1 - \frac{s}{N_I W} + \frac{1}{N_I W}\right) \cdots \left(1 - \frac{s}{N_I W} + \frac{1}{N_I}\right)}$$

라는 사실과 함께, 대수의 법칙(law of large

number)로부터 (즉,  $N_f$ 가 증가함에 따라  $\frac{s}{N_f W} \rightarrow \frac{1}{2}$ )

$$(1 - \frac{s}{N_f W} + \frac{1}{N_f W}) \cdots (1 - \frac{s}{N_f W} + \frac{1}{N_f W}) \approx 2^{-W}$$

임을 알 수 있다. 이 식들을 PB 간섭모델에 대한 ML 검출기 (즉, 식 (10))에 대입할 경우 PB 간섭 모델에 대한 ML 검출기 또한 (12)에 의해 근사적으로 표현됨을 알 수 있다.

### 3.2 단순한 검출기

다른 간섭모델에 대한 ML 검출규칙인 식 (9)-(11)에서 공통적으로 좌변은 수신신호  $R$ 로부터 추출된 통계수치, 우변은 그 통계수치와 비교될 문턱값(threshold)으로 해석될 수 있다. 따라서, 어떠한 간섭모델을 사용하더라도 ML 검출과정에서  $R$ 로부터 필요한 통계수치를 계산하기 위해서는 최소  $W-1$ 번의 곱셈을 필요로 하게된다. 한편, 수 Gbps의 속도로 이러한 ML 검출기를 구현하는 것은 용이하지 않으며, OCDMA 통신망과 관련한 기존의 연구에서는 이러한 구현상의 어려움을 경감하고자 AND 검출기, SUM 검출기 등, 비교적 간단한 구조의 검출기가 주로 제안/고려되었대[2,10,11]. 본 절에서는 앞 절에서 유도된 ML 검출기에 비해 간단한 형태로 표현되고 또한 구현이 용이한 OCDMA 검출기를 소개한다.

AND 검출기는 [10]에서 최초로 제안되었고, 명칭에서 알 수 있듯이 AND 검출기의 결정과정은 논리적인 'AND' 연산과 같다. 다시 말하면, 광펄스가  $E_1$ 의 모든 격자위치에서 검출되면 AND 검출기는 '1'이 수신된 것으로 판별하고 아니면 '0'이 수신된 것으로 판별한다.

#### AND 검출기

$$\bigwedge_{(i,j) \in E_1} "r_{i,j} > 0" \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ = \\ \text{"0 detected"} \\ \neq \end{matrix} \text{TRUE.} \quad (13)$$

SUM 검출기는 AND 검출기와는 달리  $E_1$ 의 격자위치에서 수신된 펄스의 강도를 산술적으로 합함으로써 수신신호의 통계수치를 추출한다. 바꾸어 말하면,  $E_1$ 에서의 모든 펄스강도의 합이  $W$ 와 같거나

크면 SUM 검출기는 '1'이 수신된 것으로, 그렇지 않으면 '0'이 수신된 것으로 판별한다.

#### SUM 검출기

$$\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} W. \quad (14)$$

[2]에서 SUM 검출기에 비해 AND 검출기가 더 우수한 BER 성능을 제공한다는 사실을 확인하였으나, SUM 검출기에서  $W$ 가 모든 상황에 대해 항상 최적의 문턱값이 아님을 인지해야 할 필요가 있다. 따라서, 기존의 SUM 검출기에서 문턱값만을 최적화함으로써 SUM 검출기의 BER 성능은 개선의 여지를 가진다. 최적의 문턱값을 찾기 위해서는 먼저  $\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j}$ 의 조건부 확률분포를 유도하는 과정이 필요하다. PP 간섭모델을 전제한다면,  $\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j}$ 의 조건부 분포는 다음과 같다.

$$P[\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} = s_1 | '0' \text{ is sent}] = e^{-\frac{\alpha W}{LM}} \frac{(\frac{\alpha}{LM})^{s_1}}{s_1!},$$

$$P[\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} = s_1 | '1' \text{ is sent}] = e^{-\frac{\alpha W}{LM} (\frac{\alpha}{LM})^{s_1 - W}} / (s_1 - W)!.$$

따라서, 통계수치  $\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j}$ 에 기초를 둔 최적 검출규칙은 다음과 같이 주어진다.

#### 최적 SUM 검출기

$$\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} \begin{matrix} \text{"1 detected"} \\ > \\ \text{"0 detected"} \\ < \end{matrix} T_0. \quad (15)$$

여기서,  $T_0$ 는 다음 방정식에서의 가장 큰 실근을 의미한다.

$$x(x-1)(x-2)\cdots(x-W+1) = \left(\frac{\alpha}{LM}\right)^W. \quad (16)$$

문턱값을 최적화한 후에도 SUM 검출기는 여전히 다음에 설명될 결정적인 약점을 가진다. 만약,

$E_1$ 의 격자위치 중에서 펄스가 검출되지 않은 격자 위치가 존재한다면 명백하게 '1'이 전송되었을 가능성은 없다. 이와 같은 사실은 ML 검출기 (9)-(11)과 AND 검출기에는 반영되어 있기 때문에  $E_1$ 의 격자위치 중 단 한 곳에서라도  $r_{i,j}=0$ 이면 결코 수신된 비트가 '1'로 판별되지는 않는다. 그러나, SUM 검출기는 0이 아닌 확률로 이와 같은 명백한 오류를 발생시킬 수 있으며, 이를 개선하는 간단한 방법은 SUM 검출기를 AND 검출기와 결합하는 것이다. 다시 말해서, AND 검출기로 '1'이 전송되었을 가능성을 우선 판별한 후에 SUM 검출기를 사용하여 AND 검출기에서 판정을 확정한다. 이러한 형태로 AND 검출기와 최적 SUM 검출기를 결합할 경우 다음과 같은 검출규칙이 도출된다.

최적 AND-SUM 검출기

$$\begin{aligned}
 & \left( \sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} > T_0 \right) \wedge \bigwedge_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} > 0 \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{"1 detected"} \\
 & \qquad \qquad \qquad = \\
 & \qquad \qquad \qquad \text{"0 detected"} \neq \text{TRUE.}
 \end{aligned} \tag{17}$$

#### IV. 수치적 실험

본 절에서는 3절에서 소개 또는 제안되었던 다양한 2-D OCDMA 검출기의 BER 성능을 수치적 실험을 통해 비교한다. 간단명료하게 실험결과를 나타내기 위해, 앞서 언급된 7개의 다른 검출기를 표 1과 같이 약어로 나타낸다.

실험에서는  $L=10, M=10$ 과  $L=10, M=20$ 의 두 가지 경우에 대해서 6개의 다른 부호중량  $W$  (즉,  $W=2, 4, 7, 10, 15, 20$ )과 활성노드 개수의 변화에 따른 다양한 검출기의 BER 성능변화를 컴퓨터 모의실험을 통해 측정하였다.<sup>3)</sup> 모의실험으로 측정된 BER의 신뢰도를 보장하기 위해 BER의 99%의 신뢰구간이 추정 BER 값의 20%를 넘지 않을 때까지 모의실험을 수행하였다. 앞서 언급되었던 대부분의 검출기가  $L, M, W, N_f$  등의 시스템상수에 대한 정보를 필요로 하고, 이에 모의실험에서는

3) 여기서 "활성노드"는 근거리망용 통해 프레임용 전송하고 있는 노드를 의미한다. 따라서, N개의 활성노드가 있다면 각 활성노드의 관점에서는 NI=N-1개의 간섭노드가 있는 것으로 해석할 수 있다.

표 3. 4절에서 사용된 7개의 검출기의 약어

AND	(13)에서 주어진 AND 검출기
SUM	(14)에서 주어진 SUM 검출기
OPTSUM	(15)에서 주어진 최적 문턱값을 갖는 SUM 검출기
ANDSUM	(17)에서 주어진 AND-SUM이 결합된 검출기
MLUB	(9)에서 주어진 UB 간섭모델에 대한 ML 검출기
MLPB	(10)에서 주어진 PB 간섭모델에 대한 ML 검출기
MLPP	(11)에서 주어진 PP 간섭모델에 대한 ML 검출기

이들 상수의 실제값이 검출기에 제공되는 것으로 가정하였으며, 특히  $\alpha$ 의 값은 그 물리적 해석이 '비트주기당 평균 간섭펄스 밀도'라는 점에 착안하여 다음과 같이 설정되었다.

$$\alpha = \frac{N_f W}{2}$$

그림 3과 4는 각각  $L=10, M=10$ 과  $L=10, M=20$ 일 때의 실험결과이고, 이로 부터 7개의 검출기는 BER 성능에 따라 크게 3개의 집단으로 분류될 수 있음을 알 수 있다. SUM 검출기와 OPTSUM 검출기로 구성된 첫 번째 집단은 3개의 집단 중에서 최저성능을 보여주고 있다. 여기서, 흥미로운 점은 문턱값이 최적화된 OPTSUM 검출기가 그렇지 못한 SUM 검출기와 비교하여 뚜렷한 BER 성능의 개선을 보여주지 못한다는 점이다. 이는 비트주기당 평균간섭펄스밀도  $N_f W/2$ 가 비트주기내의 격자 수, 즉  $LM$ 보다 작거나 비슷한 경우, 식 (16)으로부터 결정되는 최적 문턱값  $T_0$ 가  $W-1$ 와  $W$ 사이의 값을 취하는 것으로부터 기인한다. 바꾸어 말하면, 간섭펄스밀도가 낮아  $T_0 \in [W-1, W]$ 인 경우에는 OPTSUM 검출기의 검출규칙 (15)가 사실상 SUM 검출기의 검출규칙 (14)과 동일한 결과를 낳게된다. 한편,  $T_0$ 가  $W$ 보다 큰 값을 취하게 되는 높은 간섭펄스밀도 상황에서는 OPTSUM 검출기가 SUM 검출기보다 미세하게 우수한 BER 성능을 보이기 는 하지만, 이러한 과도한 간섭상태에서의 BER은 이미 한계치 0.5에 매우 근접하게 되므로 BER 성능의 개선은 실질적 의미가 없으며 가시적이지도 않게 된다.

AND와 ANDSUM 검출기는 두 번째로 저조한 BER 성능을 보이는 집단을 구성한다. ANDSUM 검출기는 AND 검출부와 SUM 검출부으로 구성되는데 간섭 상황에 따라 각각의 검출부는 전체 BER 성능에 다른 영향을 준다. 즉, 모든 노드가 칩동기 상태에 있다는 전제하에서  $\bigwedge_{(i,j) \in E_1} "r_{i,j} > 0"$  은 " $\sum_{(i,j) \in E_1} r_{i,j} > W$ "의 충분조건이므로 최적 문턱값  $T_0$ 이 부호중량  $W$ 보다 작은 상태(즉, 낮은 간섭펄스밀도 상황)에서는 ANDSUM 검출기는 AND 검출기와 동일하게 동작한다. 한편, 높은 간섭펄스밀도 상황에서는  $T_0$ 가  $W$ 보다 큰 값을 취하게 되고 ANDSUM 검출기의 SUM 검출부(즉, 식 (15))는 '0'이 전송되었을 때 '1'을 검출하는 오류를 줄여줌으로써 BER 성능을 개선하게 된다. 그러나, 앞서 언급된 바와 같이 높은 간섭펄스밀도 상황에서는 이미 AND 검출기와 ANDSUM 검출기의 BER이 0.5에 근접하게 되어 ANDSUM 검출기의 성능개선 효과는 상대적으로 미미하다고 볼 수 있다. 한가지 주목할 만한 사항은 비교적 간단한 구조에도 불구하고 AND 검출기와 ANDSUM 검출기는 낮은 간섭펄스밀도에서 ML 검출기들과 대동한 수준의 BER 성능을 보인다는 점이며, 간섭펄스밀도가 증가함에 따라 (즉, 활성노드수가 증가함에 따라) ML 검출기와의 성능격차는 증가하게 된다.

마지막 집단인 ML 검출기들은 단순한 구조의 검출기보다 모든 부호중량과 활성노드의 수에서 낮은 BER을 보이며, 3절에서 예상하였던 바와 같이 ML 검출기들 간의 성능차이는 크지 않다. 특히, MLUB 검출기의 BER과 MLPP의 BER은 그림 3과 4에서 볼 수 있듯이 매우 유사하다. 반면에, MLPB 검출기는 MLPP와 MLUB 검출기에 비해 근소하지만 가시적인 BER 성능 개선을 보인다. 이는 UB 모델과 PP 모델에는 기본적으로 서로 다른 격자위치에 배치되는 펄스강도 사이에 독립성이 전제되는 것과는 달리, PB 모델에서는 상호의존성이 반영된 것에 기인한다. 다시 말해서, MLPB 검출기의 결정 과정에는  $E$ 의 모든 격자위치에서의 펄스강도가 반영되는데 반해 MLUB와 MLPP 검출기에서는  $(i,j) \in E_1$ 에 있는 펄스강도만이 결정과정에서 사용된다. 현실적으로 유한한 수의 사용자를 지원하게 될 2-D OCDMA 근거리망에서 서로 다른 격자위치에서의 펄스강도 간에는 어느 정도의 상호의존성이 존재할 것으로 예상되므로, 다른 ML 검출기에

대한 MLPB의 성능개선효과는 실질적인 가치가 있을 것으로 기대된다.

마지막으로 실험결과를 요약하면, 7개의 검출기의 BER 성능을 다음과 같이 요약할 수 있다.

낮은 펄스 밀도(즉,  $\frac{N_r W}{2LM} < 1$ )

MLPB  $\approx$  MLPP  $\approx$  MLUB  $\approx$  AND  $\approx$  ANDSUM < OPTSUM  $\approx$  SUM

높은 펄스 밀도(즉,  $\frac{N_r W}{2LM} > 1$ )

MLPB < MLPP  $\approx$  MLUB < AND  $\approx$  ANDSUM < OPTSUM  $\approx$  SUM

### V. 결론

본 논문에서, 2-D OCDMA 근거리망에서 간섭 신호의 확률적 특성화를 위해 [2]에서 전제된 UB 모델을 대체할 수 있는 2개의 새로운 간섭모델을 제안하였고, 이를 기반으로 하는 ML 검출기를 유도하였다. 아울러, 이들 새로운 ML 검출기의 성능을 실험을 통해 MLUB 검출기의 BER 성능과 비교/분석하였다. 또한, 전통적인 AND와 SUM 검출기를 포함하는 비교적 단순한 구조를 갖는 검출기들을 소개하고 이들의 ML 검출기에 대한 상대적 성능을 실험을 통해 평가하였다. 결과적으로, MLPB 검출기가 일관되게 다른 검출기보다 우수한 BER 성능을 보였고, MLUB와 MLPP 검출기는 MLPB 검출기에 상당히 근접한 결과를 나타냈다. 비교적 단순한 구조를 가진 검출기들 중에는 AND 검출기와 ANDSUM 검출기가 ML 검출기에 견줄 수 있는 수준의 BER 성능을 보였으며, 특히 낮은 간섭펄스밀도(즉,  $\frac{N_r W}{2LM} < 1$ )에서는 ML 검출기들과 동일한 BER 성능을 과시하였다.

본 논문에서 제안/소개된 검출기의 BER 성능분석은 구현측면에서의 비용 및 복잡도와 함께 고려될 때 실질적 의미를 가진다. 3절에서 짧게 언급되었듯이 2-D OCDMA 검출기는 일반적으로 통계추출부(statistic extractor)와 판별부(threshold)라고 불리는 2개의 주요한 부분으로 구성된다 할 수 있다. 통계추출부는 통계수치를 수신신호로부터 계산하는 역할을 하고, 판별부는 상황에 따라 변화할 수 있는 문턱값과 통계추출부에서 계산된 통계수치를 비교함으로써 수신 신호가 '0'인지 '1'인지를 판별하는 역할을 한다. 비록 이론적으로는 이와 같은



검출과정이 비트전송속도로 수행되지만, 실질적으로는 송신기와 동기화를 위해 통계추출부와 판별부는 보통 비트전송속도보다 빠른 칩전송속도로 동작해야 한다. 여기서, 판별부는 문턱값과 통계수치의 비교와 같은 고속구현에 용이한 작업을 수행하는 반면에, 상대적으로 많은 연산을 수행하는 통계추출부는 전체 검출과정상의 병목으로 볼 수 있다. 이러한 측면에서 합산기(mixer)와 제한회로(hard-limiter)와 같이 간단한 광·전자장치를 통해 필요한 통계수치의 추출이 가능한 SUM, OPTSUM, AND, ANDSUM 검출기들이 통계수치 추출에 많은 수의 곱셈을 수반하는 ML 검출기에 대한 구현난이도나 비용측면에서 우위가 예상된다. 아울러, ML 검출기 중에서 MLUB와 MLPB 검출기는 통계수치가 통상적으로 시간에 따라 심하게 변하는 간섭노드의 수,  $N_j$ 에 의존하고 있다는 치명적인 약점도 가진다. 다시 말해서, MLUB와 MLPB 검출기의 경우의  $N_j$ 의 변화에 따라 수신신호로부터 추출해야 할 통계수치도 함께 변화하게 되고, 이는 고속처리를 위해 통계추출부를 고정회로(hardwired)로 구현해야 할 경우 중대한 걸림돌이 될 수 있다. 따라서 미세하나마 MLPP 검출기는 MLUB 와 MLPB 검출기에 비해 구현난이도 측면에서 우위가 예상된다.

본 논문에서 수행된 7개의 검출기에 대한 연구를 요약하면 밑에 정리한 바와 같이 AND, MLPB, MLPP 검출기가 BER 성능과 구현의 용이성 사이의 최적균형에 도달하는 OCDMA 검출기의 구조라고 판단할 수 있다.

#### AND 검출기

- 낮은 간섭펄스밀도( $\frac{N_j W}{2LM} < 1$ )에서 ML 검출기와 유사한 BER 성능
- 높은 간섭펄스밀도( $\frac{N_j W}{2LM} > 1$ )에서 중간정도의 BER 성능
- 고속구현에 매우 적합

#### MLPP 검출기

- 낮은 간섭펄스밀도에서 가장 우수한 BER 성능
- 높은 간섭펄스밀도에서는 MLPB 다음으로 우수한 BER 성능
- 고속구현을 위해서 펄스강도의 곱을 구할 수 있는 광·전자장치 필요

#### MLPB 검출기

- 모든 간섭상황에서 가장 우수한 BER 성능
- 상황에 따라 유동적인 통계수치를 필요로 하여 고속구현에 부적합

### 참 고 문 헌

- [1] A. Stok, E.H. Sargent, "Lighting the local area: optical code-division multiple access and quality of service provisioning," *IEEE Network* 14, pp. 42-46, 2000.
- [2] F.T.W. Chang, E.H. Sargent, "Optical CDMA using 2-D codes: the optimal single-user detector," *IEEE Communications Letters* 5, pp. 169-171, 2001.
- [3] E.S. Shivaleela, K.N. Sivarajan, A. Selvarajan, "Design of a new family of two-dimensional codes for fiber-optic CDMA networks," *Journal of Lightwave Technology* 16, pp. 501-508, 1998.
- [4] L. Tancevski, I. Andonovic, M. Tur, J. Budin, "Hybrid wavelength hopping/time spreading code division multiple access system," *Proceeding of IEE Optoelectronics* 143, pp. 161-166, 1996.
- [5] G.C. Yang, W.C. Kwong, "Two-dimensional spatial signature patterns," *IEEE Transactions on Communications* 44, pp. 184-191, 1996.
- [6] G.C. Yang, W.C. Kwong, "Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA+CDMA for fiber-optic networks," *IEEE Transactions on Communications* 45, pp. 1426-1434, 1997.
- [7] L.R. Chen, "Flexible fiber Bragg grating encoder/decoder for hybrid wavelength-time optical CDMA," *IEEE Photonics Technology Letters* 13, pp. 1233-1235, 2001.
- [8] S. Yegnanarayanan, A.S. Bhushan, B. Jalali, "Fast wavelength-hopping time-spreading encoding/decoding for optical CDMA," *IEEE Photonics Technology Letters*

rs 12, pp. 573-575, 2000.

[9] H. Yu, L. Breslau, S. Shenker, "A scalable web cache consistency architecture," in *Proceedings of ACM SIGCOMM '99 Comp. Commun.*, pp. 163-174, 1999.

[10] J.A. Salehi, "Emerging optical code-division multiple access communications systems," *IEEE Networks* 3, pp. 31-39, 1989.

[11] J.A. Salehi, "Code division multiple access techniques in optical fiber networks - Part I: Fundamental principles," *IEEE Transaction on Communications* 37, pp. 824-833, 1989.

성원진 (Won-Jin Sung)

정회원

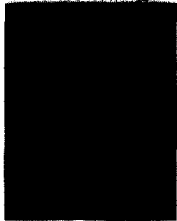


1990년 2월 : 서울대학교 전자공학과 학사  
 1992년 5월 : University of Michigan 전기공학과 석사  
 1995년 12월 : University of Michigan 전기공학과 박사  
 1996년 1월~2000년 8월 : Hughes Network Systems사 책임연구원  
 2000년 9월~현재 : 서강대학교 전자공학과 조교수

<주관심분야> 디지털통신, 전송기술, 채널코딩

윤용철 (Yong-Chul Yun)

정회원

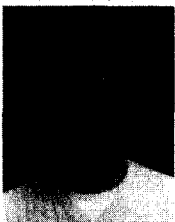


2002년 2월 : 서강대학교 전자공학과 졸업  
 2002년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 석사과정

<주관심분야> 광통신망, 트래픽 모델링

최진우 (Jin-Woo Choe)

정회원



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

1998년 11월~2001년 1월 : University of Toronto 전기컴퓨터공학과 조교수  
 2001년 3월~현재 : 서강대학교 전자공학과 조교수

<주관심분야> 통신망 설계 및 성능해석, 광통신망, 멀티미디어 캐싱

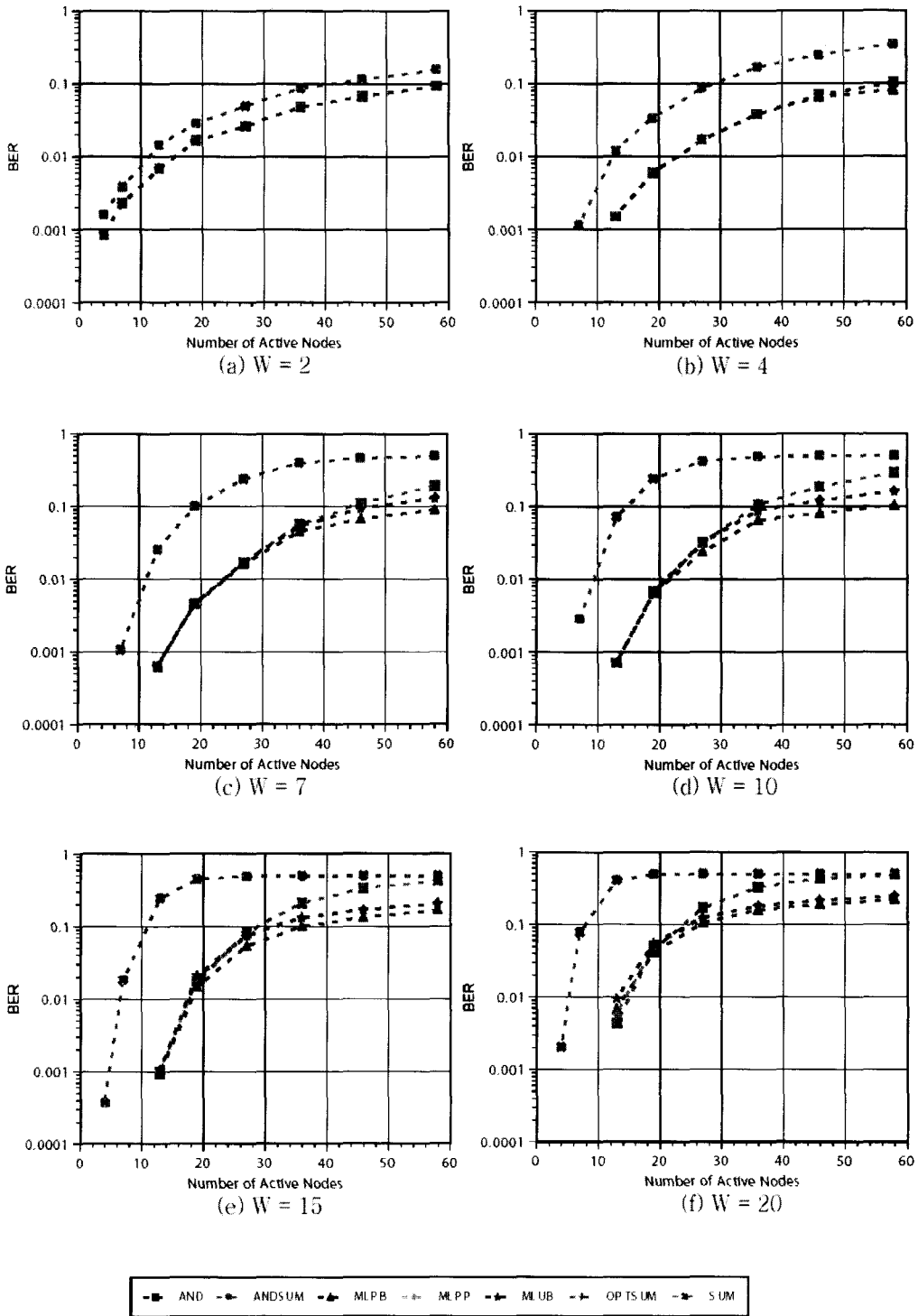


그림 3.  $L = 10, M = 10$ 에 대한 7개의 검출기의 BER 성능 비교

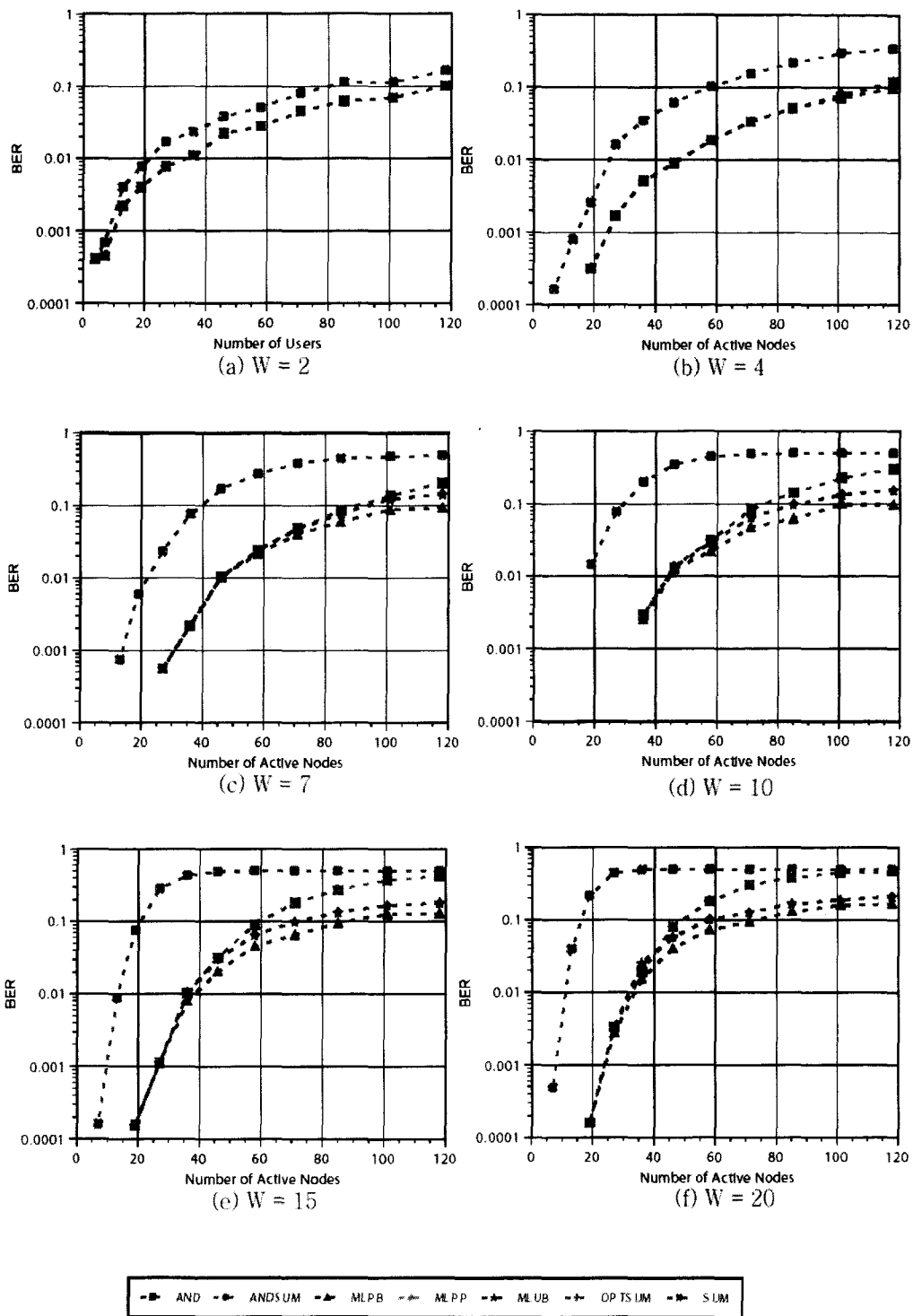


그림 4.  $L = 10, M = 20$ 에 대한 7개의 검출기의 BER 성능 비교