

# 다중 사용자 환경에서의 광 CDMA 시스템 성능 분석

정희원 전 상 영\*\*\*, 김 영 일\*\*, 이 주 희\*

## Performance Analysis of an Optical CDMA System for multi-user Environment

Sang Young Jin\*\*\*, Young Il Kim\*\*, Choo Hee Lee\* *Regular Members*

### 요 약

본 논문에서는 광 코드분할 다중접속(optical code division multiple access)시스템을 구현하고 그 구현된 시스템의 성능을 분석한다. 구현된 OCDMA 시스템에서 송신단은 레이저 다이오드를 이용하여 데이터를 광 펄스로 변환하며, 4단의 지연선으로 구성된 인코더를 이용하여 펄스 열로 확산한다. 수신단에서는 인코더의 지연선 구조와 동일한 구조의 디코더에서 펄스를 지연시킨 후 결합하여 수신된 신호를 복원한다. 성능분석에 있어서는, 먼저 단일 사용자 및 다중 사용자 환경 하에서 광 CDMA 신호의 auto-correlation과 cross-correlation을 분석하고, 실험을 통해 시뮬레이션 결과를 검증하였다. 또한 광섬유 지연선의 단 수 및 코드 길이 등 시스템의 성능에 영향을 미치는 파라메타를 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석하였다. 실험 결과는 인코더와 디코더의 지연선 구조가 동일한 경우 펄스 열의 중앙에서 피크값의 펄스가 발생하는 auto-correlation 특성에 의해 데이터를 복원할 수 있었고, 지연선 구조가 동일하지 않은 경우 cross-correlation 특성에 의해 데이터를 복원할 수 없었다. 성능 분석 결과는 코드 길이가 감소하거나, 지연단의 단 수를 증가시키면 비트 에러 확률이 감소하지만 요구되는 레이저 광원의 펄스폭이 점차로 감소하므로 시스템 구현이 어렵게 된다. 이러한 실험 및 분석 결과를 이용하면 CDMA 기술을 광 통신 네트워크로 적용할 수 있다.

### ABSTRACT

In this paper, we implement an optical code division multiple access(OCDMA) system and analyze the performance of the implemented system. In the implemented system, a transmitter encodes input data into optical pulses by using laser diode, and spreads the encoded pulses in an encoder which consists of 4 stage delay lines. The decoder which is the same structure as that of encoder delays and combines the spreaded pulses, and thus recovers the original data. At first, we discuss the auto- and cross-correlations of OCDMA signals under both environments of single user and multi-users, and then verify the simulation results with experimental results. We also evaluate the effect of a number of stages of delay line and code length on the system performance through computer simulations. As experimental results we can see that if the decoder have the same configuration as that of encoder, the peak auto-correlation characteristics can be achieved, and thus we can recover the original data from received data. As simulation results we can see that although bit error rate decreases as code length decreases or the number of stage of delay line increases, it is difficult to implement the system because the pulse width becomes narrow. From the results, we can apply CDMA technologies to optical communication networks.

### I. 서론

확산 스펙트럼(Spread Spectrum) 통신에 기초한

\* 경희대학교 전자공학과 및 레이저공 학연구소

\*\* ETRI 무선방송기술연구소 이동통신기술부

논문번호 : 98356-0814, 접수일자 : 1998년 8월 14일

코드분할 다중접속 방식(CDMA : Code Division Multiple Access)은 대용량, 고품질의 서비스, 통화 비밀 보호 등의 장점으로 인해 최근 디지털 이동통신, 개인휴대 통신(PCS : Personal Communication Service) 및 WLL (Wireless Local Loop) 등에 활발히 응용되고 있다<sup>[1],[2]</sup>.

이러한 CDMA 기술을 유선 네트워크에 적용하는 경우 각 사용자의 어드레스를 다른 코드를 할당하여 구분하므로 대역폭이 필연적으로 증가하게 되어 많은 가입자를 수용하기 위해 광통신 기술의 도입이 필요하다<sup>[3]</sup>. 이에 따라 20THz이상의 대역 사용이 가능하고, 적은 손실로 먼거리의 전송이 가능한 화이버의 특성을 이용하여 코드분할 다중접속 기술을 광통신 네트워크에 응용하는 연구가 활발히 진행되고 있다<sup>[4]</sup>.

이와 같은 CDMA기술을 LAN등의 유선 네트워크에 응용하면 다음과 같은 장점을 갖게 된다. 첫째, 다수의 사용자가 채널을 동시에 공유하는 비동기식 다중 구조이므로 효율적이다. 둘째, scheduling이 필요없고 새로운 사용자 채널의 중설이 쉽다. 셋째, 트래픽 부하가 높고 전송속도가 빠른 네트워크에 적합하다. 넷째, TDMA 방식의 경우 각 사용자는 채널 액세스를 하기 위해 채널이 빈 상태를 기다려야 하지만 CDMA의 경우 다수의 사용자가 동시에 채널 접속이 가능하다<sup>[3],[5]</sup>.

그러나 광 CDMA 시스템에서는 다수의 사용자가 동시에 데이터를 전송하므로 수신측에서는 다른 사용자의 데이터로부터 자신의 데이터를 복원 하는데 적합한 auto-correlation, cross-correlation 특성을 가져야 한다<sup>[6]</sup>.

따라서 본 논문에서는 광섬유로 다단의 지연선(delay line)을 구성한 정합형 필터(matched filter) 방식의 인코더를 이용하여 데이터를 확산시키고, 이를 광섬유를 통해 전송한 후 수신단에서는 송신단의 지연선과 동일한 구조의 지연선을 이용하여 데이터를 역확산시키는 광 CDMA시스템의 구현에 대해 서술한다. 또한 광 CDMA 시스템의 기본이 되는 auto-correlation, cross-correlation 특성을 분석하고, 최적의 시스템을 구성하기 위해 시스템의 성능에 영향을 주는 코드 weight(지연선의 단 수), 코드 길이(code length) 등의 파라메타 영향을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석한다<sup>[7]</sup>.

## II. 광 CDMA기술의 원리

전형적인 광 CDMA 시스템은 광원(light source)을 이용하여 정보 데이터를 광으로 변환하고 이를 고속의 광 데이터 열로 인코딩하여 단일모드 광섬유를 통해 전송하는 구조이다.

수신단에서는 상관(correlation)과정을 거쳐 복원된 신호의 임계값 레벨을 비교하여 정보 데이터를 복원하게 된다.

광 CDMA 시스템에서 code sequence를 광학적으로 구성하는 방법은 크게 광섬유 지연선(delay line)을 이용한 정합형 필터방식과 주파수 영역에서의 code sequence 구성방식이 있는데<sup>[8]</sup>, 본 논문에서는 전자에 초점을 맞추어 설명한다.

정합형 필터 방식은 그림-1과 같이 송신단에서 광섬유 지연선의 길이 및 갯수를 조정하여 n개의 펄스열로 구성하여 전송한다. 수신단에서 송신단에서와 같은 구조의 지연선 구조를 사용하면 비동기 방식의 가산이 이루어져 그림과 같이 펄스열의 중심에서 피크값의 펄스를 얻을 수 있다. 이러한 방식은 구조가 매우 간단한 장점이 있는 반면 code sequence의 수가 한정되기 때문에 사용자의 수가 제한을 받으며, 사용자의 수를 늘리기 위해 code sequence의 길이를 길게 하면 전송품질이 나빠지는 단점이 있다.

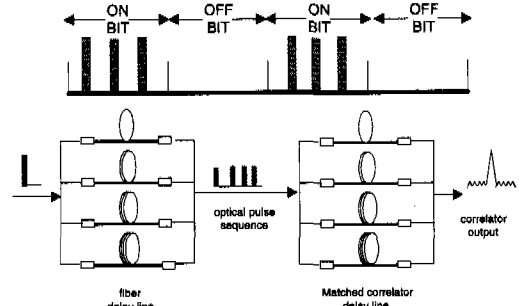


그림 1. 광섬유 지연선을 이용한 정합형 필터 방식

본 논문에서 광 CDMA 시스템에 적용한 On-Off Keying을 이용한 변조방식은 각 사용자의 정보가 그림 1과 같이 정보 비트가 '1'일때는 코드 열로 전송되며, '0'일때는 신호가 전송되지 않는 방식이다.

i번째 사용자가 전송한 신호를  $S_i(t)$ 라고 하면 (1)식과 같이 표현된다. 여기서  $I(t)$ 는 광원의 세기이며,  $d_i(t)$ 는 데이터 열을 나타내고,  $C_{s_i}(t)$ 는 코드 열을 나타낸다.

$$S_i(t) = I(t)d_i(t)Cs_i(t) \quad (1)$$

(1)식에서 각 사용자를 구별하기 위한 코드열은  
 (2) 식과 같이 표현되는데 여기서  $P_{Tc}(t)$ 는 주기가  $T_c$ 인 단위진폭의 펄스를 나타낸다.

$$Cs_{i(t)} = \sum_{m=0}^L c_i(m)P_{Tc}(t - mT_c) \quad (2)$$

$c_i(m)$ 은  $i$ 번째 사용자에게 할당된 코드의  $m$ 번째 심볼로써 0 또는 1 값을 갖는다. 원하는 사용자측의 상관기에서 수신한 신호는 (3)식과 같이 표현되며, 신호검출 에러에서 다른 사용자의 간섭효과를 결정하기 위해  $d_i(t)$ 를 복원하기 위한 데이터로 가정하면  $n-1$ 은 나머지 신호가 간섭신호로 작용하므로 사용자 1의 상관기 출력은 (4)식으로 표현된다<sup>9)</sup>.

$$S_R(t) = I(t) \sum_{i=1}^n d_i(t - \tau_i) Cs_i(t - \tau_i) \quad (3)$$

$n$  : 사용자수  
 $\tau_i$  :  $(0, T_b)$  사이에 분포하는 랜덤지연

$$S_A(t) = I(t)S_R(t)C_{S_i}(t) \quad (4)$$

### III. 광 CDMA 시스템의 구성

광섬유 지연선을 이용한 광 CDMA 시스템의 구성도는 그림-2와 같다. 코드 열은 광섬유를 이용한 병렬 지연선에 의해 발생된다. 수신단에서는 각 사용자가 전송하는 펄스들이 합해진 신호가 입력되며, 이 중에서 원하는 정보를 복원하기 위해서는 송신단에서 사용한 지연선 구조와 같은 구조를 수신단에서 사용함으로써 auto-correlation 을 이용하여 신호를 복원하게 된다. 반면에 수신단의 지연선 구조가 송신단과 다를 경우 cross-correlation 특성에 의해 신호를 검출할 수 없게 된다.

사용자가 2명인 경우를 가정하였고, splitter 와 광섬유 지연선 사이의 연결 등에는 시스템 제작시 연결이 용이한 SC 형태의 커넥터를 사용하였으며, 각 사용자의 데이터는 star coupler를 통해 합해진 후 각 사용자의 디코더로 입력된다.

그림-2에 나타난 바와 같이 코드 발생기로부터 발생된 임의의 데이터 열은 송신 모듈로 입력되어 송신 모듈의 레이저 다이오드를 트리거시켜 OOK

광 신호를 발생시킨다. 발생된 광 데이터는 splitter 를 통해 분산되어 인코더로 입력된다. 인코더는 길이가 다른 광섬유를 원형으로 감은 형태로 제작되며, 이 인코더에 의해 각 사용자별 데이터는 다른 코드 sequence로 확산된다.

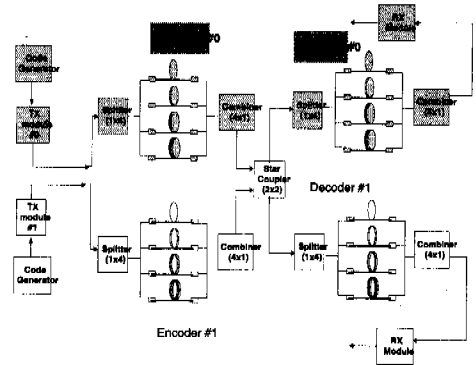


그림 2. OCDMA 시스템의 구성도

인코더에 의해 지연된 각각의 광 펄스는 combiner에 의해 결합되어 확산된 형태의 데이터 열로 바뀌며, 각 사용자 별 데이터 열은 다시 star coupler에 의해 결합되어 광섬유를 통해 전송된다. 전송된 데이터 열은 수신단의 각 디코더에 입력되어 본래의 펄스로 복원된다. 이때 디코더의 구조가 송신단의 구조와 다르면 데이터가 잡음의 형태로 복원되므로 본래의 데이터 복원이 불가능하며, 송신단의 구조와 같으면 데이터 열의 중앙에서 피크 펄스가 형성되어 본래의 신호로 복원이 가능해진다. 따라서 다수의 사용자가 동시에 데이터를 전송하여도 수신단에서 디코더의 구조에 따라 각각의 신호를 복원할 수 있게 된다.

### IV. 시뮬레이션 및 실험결과 분석

광 CDMA 시스템을 실제 광통신 네트워크에 적용하는데 있어서 시스템에 영향을 미치는 파라미터를 분석하기 위하여 시뮬레이션을 2단계로 구성하였다.

제1단계는 최적의 지연선 길이를 찾는 과정으로, 각 사용자에게 임의의 지연선 길이를 할당한 후 auto-correlation 및 cross-correlation 값을 계산하여 임의의 임계값을 넘는 auto-correlation 값과 임계값 이하의 cross-correlation 값을 갖는 지연선 구조의 배열을 찾게 된다.

제2단계는 1단계에서 찾은 지연선 구조를 다수의 사용자에게 할당한 후 auto-correlation 및 cross-correlation 값을 계산하여 실제 다수의 사용자가 동시에 이용하게 될 시스템의 성능에 대해 분석하였다.

또한 시스템의 성능에 영향을 주는 파라미터를 분석하기 위하여 각 파라미터 변화에 따른 비트 에러 확률을 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 계산하였다<sup>[10]</sup>. 시뮬레이션에서 사용한 입력펄스는 레이저 다이오드의 광 펄스(펄스폭 : 7nsec) 출력을 입력 데이터로 사용하였으며, 광섬유 지연선의 접속손실 중 삽입손실은 -20dB로, 반사손실은 -40dB로 하였다. 그리고 전체 광 펄스가 지나가는 광섬유의 총 길이가 길지 않으므로 광 펄스의 분산에 대하여는 고려하지 않았다.

1. 단일 사용자 환경에서의 실험 및 시뮬레이션 결과

먼저 단일 사용자에게 대해 구한 최적의 지연선 구조 중에서 표-1과 같은 임의의 구조를 적용하였을 때의 시뮬레이션 결과는 그림-3~그림-5와 같다. 송신단을 지나 확산된 광 펄스는 그림-3과 같고 이 광 펄스가 수신단에서 송신단과 같은 구조의 광섬유 지연선을 통과하였을 때의 결과는 그림-4와 같이 auto-correlation 특성의 광 펄스 파형을 나타나며, 수신단에서 다른 구조의 광섬유 지연선 구조로 수신하였을 때는 광 펄스 파형이 그림-5와 같은 cross-correlation 특성이 나타난다. 그림-4의 경우 펄스의 피크값이 1.7이므로 threshold를 1.5이상으로 하면 데이터를 복조할 수 있으나 그림-5와 같은 경우는 피크값이 1.0이므로 데이터를 정확히 복조할 수 없게 된다.

표 1. 단일 사용자에게 대한 송·수신단 지연선 길이  
Table 1. The length of fiber delay line (m)

	TX단 지연선 길이	RX단 지연선 길이
auto-correlation	0, 1.44	0, 1.44
cross-correlation	0, 1.44	0, 2.88

그림-6과 그림-7은 단일 사용자 환경에서 2단의 광섬유 지연선 구조로 시스템을 구성하였을 때의 실험 결과를 나타낸다. 그림-6은 auto-correlation 특성을, 그림-7은 cross-correlation 특성을 나타내는데 위에서 설명한 시뮬레이션 결과와 일치함을 알 수 있다.

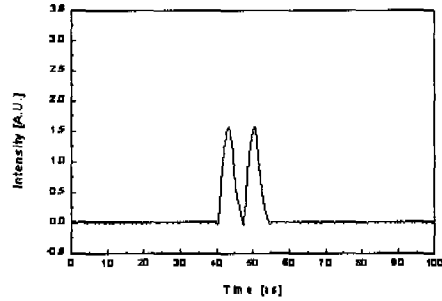


그림 3. 송신단에서 확산된 광 펄스 파형

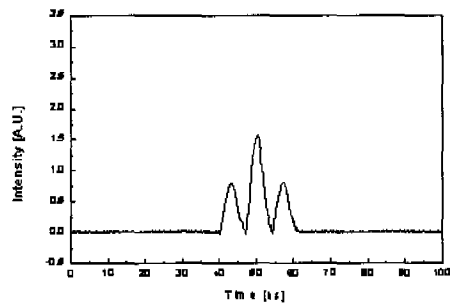


그림 4. 수신단에서 역 확산된 광 펄스 파형 (auto-correlation)

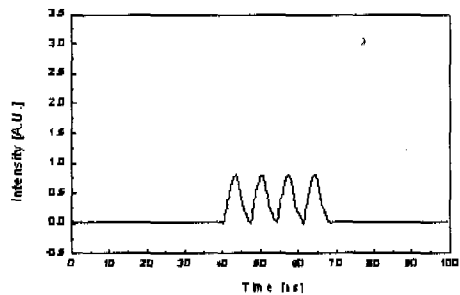


그림 5. 수신단에서 역 확산된 광 펄스 파형(cross-correlation)

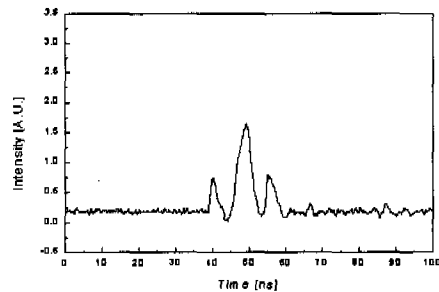


그림 6. 수신단에서 역 확산된 광 펄스 파형(Auto-Correlation)

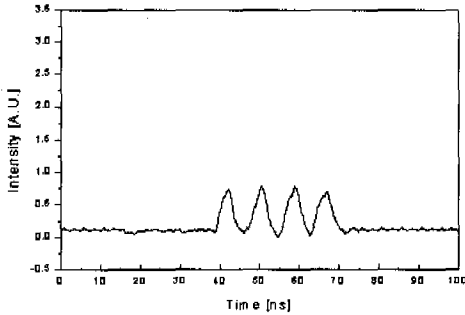


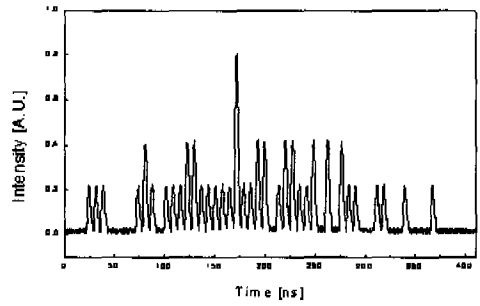
그림 7. 수신단에서 역 확산된 광 펄스 파형(Cross-Correlation)

이와 같이 디코더의 구조를 설계할 때는 auto correlation 특성에서 피크값과 두번째 피크값의 차이가 크도록, cross-correlation 특성에서는 피크 값이 작은 값을 갖도록 설계하는 것이 중요하며, 다수 사용자 환경에서는 이러한 특성이 더욱 중요하게 된다.

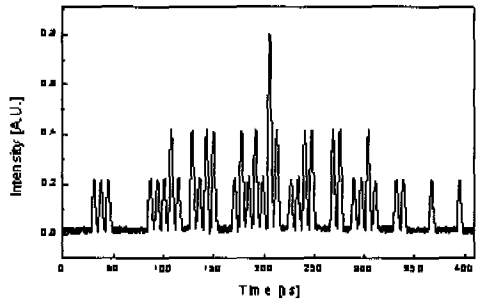
2. 다중 사용자 환경에 대한 시뮬레이션 결과

그림-8~그림-9는 사용자가 세명인 경우( A, B, C) 4단 지연선 구조로 시스템을 구성하였을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 단일 사용자에서 나타난 auto-correlation과 cross-correlation 특성이 동일하게 나타나지만 auto-correlation의 경우 두번째 피크값을 갖는 펄스들이 사용자가 증가함에 따라 증가하므로 사용자 수가 더 증가하면 이와 같은 펄스들이 겹쳐져서 첫 번째 피크값과의 차이가 줄어들어 데이터 복원이 어려워 질것으로 예측된다. 이러한 예측은 사용자 수가 10명인 경우 더욱 명확하게 나타남을 알 수 있다.

10명의사용자에 대한 시뮬레이션 결과는 그림-10~그림-11과 같다. 시뮬레이션 결과에 대한 그림은 1번 사용자에 대해 auto-correlation 과 cross-correlation 결과를 대표로 보여주고 있다.

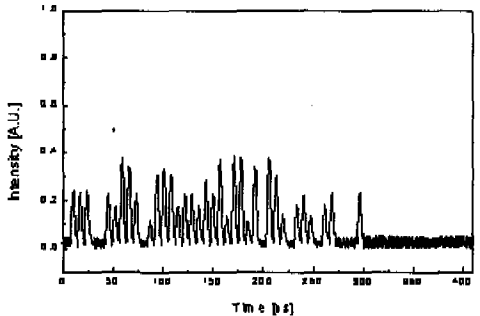


(b) 사용자 B

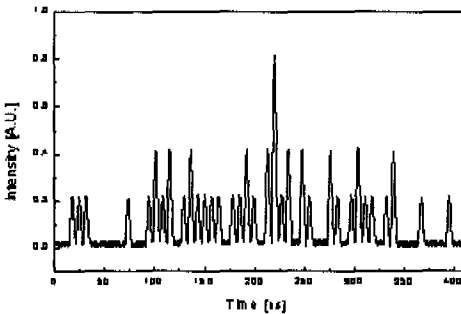


(c) 사용자 C

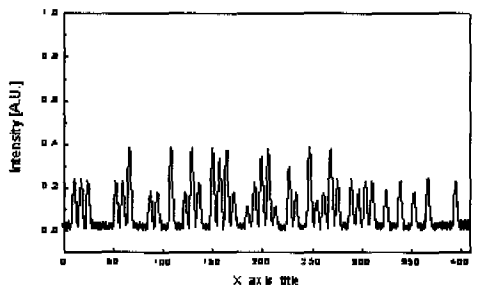
그림 8. 각 사용자 A, B, C의 수신단에서 역확산된 광 펄스 파형 (auto-correlation)



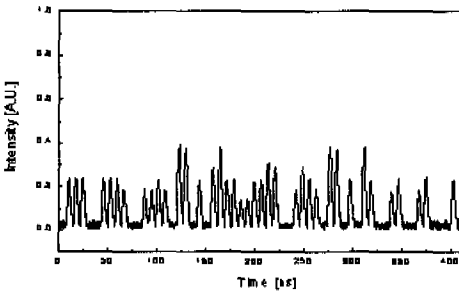
(a) 사용자 A



(a) 사용자 A



(b) 사용자 B



(c) 사용자 C

그림 9. 각 사용자 A, B, C의 수신단에서 역확산된 광 펄스 파형(cross-correlation)

그림-10에 나타난 바와 같이 auto-correlation 피크 값이 1.9이고, cross-correlation 피크 값이 1.4로써 데이터를 검출하기 위한 임계값의 범위가 사용자 수가 증가할수록 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 4.3절에서 설명하고 있는 에러 확률 시뮬레이션 결과와도 일치함을 알 수 있다.

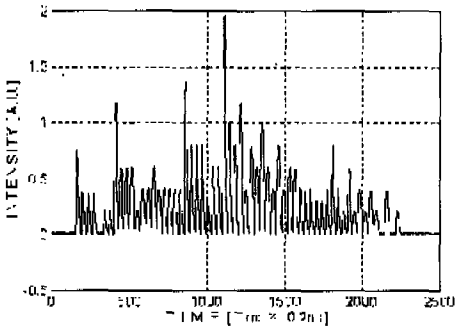


그림 10. 10명의 사용자 중 1번 사용자의 자체상관 특성

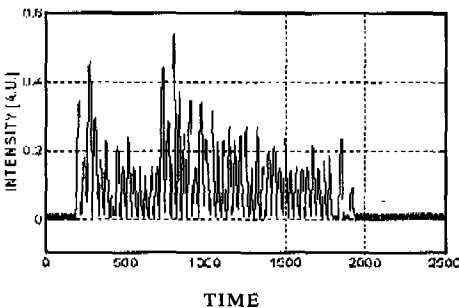


그림 11. 10명의 사용자 중 1번 사용자의 상호상관 특성

### 3. 다수 사용자 환경에서의 비트 에러 확률

그림-12는 사용자의 수와 코드길이가 각각 10명, 1,000으로 고정되어 있는 경우 weight(k)에 따른 에러확률 PE의 변화를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 weight를 증가시켜야 함을 알 수 있다. 그러나 weight를 증가시키면 cross-correlation의 피크 값이 증가하므로 threshold가 낮은 경우 오히려 PE가 증가함을 알 수 있으므로 weight 증가시 threshold도 같이 증가시켜야 한다.

또한 그림-13은 사용자의 수와 weight가 각각 10명, 8단으로 고정되어 있는 경우 코드 길이에 따른 에러확률 PE를 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 코드길이가 감소할 수록 시스템의 성능이 저하됨을 알 수 있으므로 시스템의 성능을 개선하기 위해서는 코드 길이를 길게하는 것이 필요하다<sup>17)</sup>.

그러나 코드 길이를 길게하기 위해서는 그림-14에 나타난 바와 같이 펄스폭이 좁은 광원이 요구된다. 예로 128Mbps의 경우 코드길이가 1000인 경우는 수십 ps의 펄스폭을 갖는 광원이 요구되므로 실용적이지 못하게 된다. 따라서 코드길이와 요구되는 광원의 펄스폭 사이에 trade-off가 형성되므로 설계시 이를 고려해야 한다.

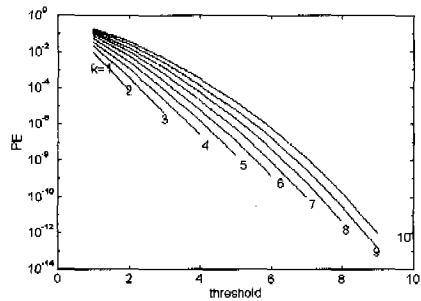


그림 12. weight에 따른 PE의 변화

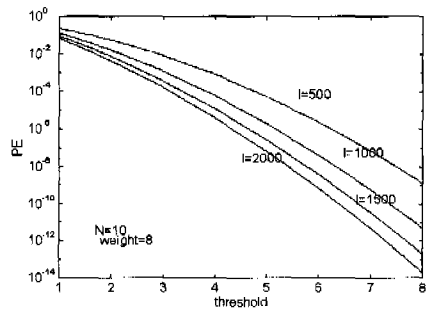


그림 13. 코드길이에 대한 PE의 변화

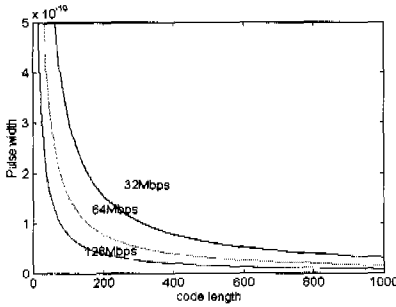


그림 14. 코드길이에 대한 레이저 광원의 선폭 변화

### V. 결론

본 논문에서는 광통신 네트워크 등에 응용하기 위한 광 CDMA 시스템의 구현 및 구현된 시스템의 성능분석을 위해 다중 사용자 환경에 대한 시뮬레이션 결과를 서술하였다. 데이터를 광펄스로 변환하기 위해 OOK 방식을 사용하였고, 데이터 확산은 광섬유 지연선을 사용하여 코드를 확산하는 구조로 구성하였다.

먼저 광 CDMA 신호의 auto, cross-correlation 특성을 분석하기 위해서 최적의 지연선 구조를 시뮬레이션을 통해 찾고, 얻어진 2단 및 4단의 지연선 구조를 이용하여 송신단 및 수신단을 구성하였다. 수신단에서 송신단과 같은 구조의 지연선 구조를 사용한 경우 수신단의 파형은 피크가 n개의 펄스를 합한 값으로 표현되는 auto-correlation 특성으로 인해 수신한 데이터를 본래의 데이터로 복조할 수 있으며, 다른 구조의 지연선을 구성하였을 경우 지연선에 의해 확산된 펄스가 수신단에서 겹쳐지는 부분이 적기 때문에 펄스의 피크값이 작아지는 cross-correlation 특성에 의해 데이터를 복조할 수 없게 된다.

또한 다중 사용자 환경에 대해 시스템의 성능을 시뮬레이션한 결과 단일 사용자에서 나타난 auto-correlation과 cross-correlation 특성이 동일하게 나타나지만 auto-correlation의 경우 두번째 피크값을 갖는 펄스들이 사용자가 증가함에 따라 증가하므로 auto-correlation 피크값과의 차이가 줄어들어 데이터 복원이 어려워질 것으로 분석되었다.

또한 다른 사용자 신호에 의한 에러확률을 분석하였고, 최적의 시스템 설계를 위해 각 파라미터에 대한 에러확률을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 시뮬레이션 결과 시스템의 성능을 향상시키기 위해서

는 지연선의 단 수를 증가시키고, 코드길이를 감소시켜야 함을 알 수 있었으나 이러한 경우 레이저 광원의 펄스폭이 점차로 줄어들기 때문에 구현상의 어려움이 있음을 알 수 있었다.

이러한 시뮬레이션 결과를 이용하여 최적의 시스템을 설계한다면 CDMA기술의 광 네트워크로의 응용은 많은 분야에 적용이 가능할 것으로 예측된다.

### 참고 문헌

- [1] A.Baier, W.Granzow, W.Koch, P.Teder, J.Thielecke, "Design Study for a CDMA - Based Third - Generation Mobile Radio System," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol.12, No.4, 733-743, May, 1994.
- [2] P.Jung, P.W. Baier, A.Steil, "Advantages of CDMA and Spread Spectrum Techniques over FDMA and TDMA in Cellular Mobile Radio Applications," IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No.3, 357-364, August, 1993.
- [3] P.R.Prucnal, M.A.Santoro, T.R.Fan, "Spread Spectrum Fiber-Optic Local Area Network Using Optical Processing," Journal of Lightwave Technology, Vol.LT-4, No.5, 547-554, May, 1986.
- [4] D. Hampicke, J. Muckenheim, K. Iversen, "Noncoherent Optical CDMA for Future High-Speed Computer Networking; Systems, Sequences, And Realization Aspects," International Conf. on Fiber Optics and Photonics, "PHOTONICS -96", 518-523, Dec., 1996
- [5] W.C.Kwong, P.R.Prucnal, "Ultrafast all-optical code-division multiple-access (CDMA) fiber-optic networks," Computer Networks and ISDN Systems 26, 1063-1086, 1994
- [6] P.R.Prucnal, Y.M. Liu, "Ultrafast all-optical code-division multiple-access networks," SPIE Vol. 1787 Multigigabit Fiber Communications, 121-132, 1992
- [7] 이진영, 전상영, 이주희, "광 통신 네트워크용 OCDMA 시스템에 관한 연구", 한국통신학회 하계종합학술발표회, 1998,7.

