《연구논문》 Hankook Kwanghak Hoeji, Volume 13, Number 6, December 2002

초고속 광 가입자망 구축을 위한 PN 부호와 FBG를 이용한 광 CDMA의 특성분석

김봉규† · 연영희 · 김병휘
한국전자통신연구원 액세스기술연구부
㉮ 305-350 대전시 유성구 가정동 161번지

박상조
서원대학교 컴퓨터정보통신공학부
㉮ 361-742 충북 청주시 흥덕구 모충동 231번지

(2002년 9월 26일 받음, 2002년 12월 3일 수정본 받음)

본 논문에서는 광 가입자망에서 동시 가입자의 수를 늘이는 방법 중의 하나인 광 CDMA 방식에서 PN 부호를 사용한 FBG형 광 CDMA에 대하여 광원의 spectral power distortion에 의한 특성변화를 수치적으로 분석하였다. 코드의 길이가 길어질수록 두 채널간의 간섭은 작아지며, 코드길이 만큼의 가입자수가 동시에 사용되기 위하여 광원의 spectral power distortion이 최소한 15%이내이어야 함을 확인하였다. 그리고 15% 이상의 spectral power distortion에서는 동시 가입자의 수가 급격히 감소함을 알 수 있었다. 즉, PN 부호를 사용한 FBG형 CDMA를 이용하여 초고속 광 가입자망을 구성하는데 있어서 광원의 spectral power distortion이 출력특성에 매우 중요함을 알 수 있었다.

주제어 : optical communications, optical CDMA, PN code, optical access network, fiber bragg grating.

I. 서 론

최근의 인터넷은 고화질 주문형 영상, 고속 데이터, 음성 등의 대용량 멀티미디어 서비스가 요구되고 있을 뿐만 아니라 사용자의 수가 급증하고 있으며, 보다 많은 정보를 보다 많은 가입자에게 전송하기 위한 광 가입자망이 도입되어 일본에서는 FTTH(Fiber To The Home)이 서비스되고 있다.[1] 이러한 광 가입자망에서 많은 가입자가 동시에 사용할 수 있도록 하는 방법에는 WDMA(Wavelength Division Multiple Access), TDMA(Time Division Multiple Access), SCM(SubCarrier Modulation), CDMA(Code Division Multiple Access)가 있다. 이중에서 1980년대 무선 CDMA 기술을 광통신에 도입한 광 CDMA 기술은 비동기, 우수한 보안성, 여러 개의 동일한 파장의 광원을 사용할 수 있는 등 많은 장점을 지니고 있어서, 향후 고속의 데이터를 많은 인터넷 가입자에게 보내주는 방법 중의 하나로 각광받고 있다. 특히 최근에는 광소자 기술의 급속한 발달로 OKI사, APN사 등 광 CDMA 시스템을 상용화하려는 업체들이 하나둘 생겨나기 시작하고 있다.

광 CDMA 기술에는 시간지연을 이용한 방법,[2] 광 스위치를 이용한 방법,[3] 공간필터를 이용한 방법,[4] FBG(Fiber Bragg Grating)/AWG(Arrayed Waveguide Grating)을 이용한 방법,[5-8] 간섭계형 필터를 이용한 방법[9] 등이 있으며, 이중에서 코드 추출을 위한 동기가 필요 없는 FBG형 광 CDMA에 관한 연구가 최근에 가장 활발히 진행되고 있다. 한편, 광 CDMA에서 사용되는 코드에는 PN(Pseudo random Noise) 코드, prime code와 같은 광학적 직교부호(OOC: Optical Orthogonal Code), 시간 및 파장을 동시에 사용하는 2D-code 등이 있다. 광학적 직교부호를 사용한 광 CDMA 방식은 부호화를 위한 광 손실이 크며 부호의 계열수가 적은 단점이 있으며, 2D-code를 사용한 광 CDMA 방식은 동시 사용자수가 많다는 장점을 지니고 있지만, 고가의 초단펄스 광원이 사용되며 채널가변이 상대적으로 어려운 단점을 지니고 있다. 이에 반하여 무선 CDMA에서 많이 사용되는 PN 부호를 사용한 FBG형 광 CDMA 방식은 상대적으로 간단한 구조와 부호화를 위한 광 손실이 적은 장점을 지니고 있다. PN 부호를 무선에서 적용시키는 방법은 주로 시간영역에서 암호화하기 때문에 수신부의 decoder에서 동기화가 필요하지만 광학적 파장영역에서의 암호화 방법은 특별히 동기화가 필요없는 장점을 지닌다. 하지만, 무선 CDMA에서는 '1'과 '-1'의 양극성부호로 암호화가 가능하지만 광 CDMA에서는 양극성부호로 암호화하는 것이 불가능하기 때문에 수신단에서 balanced detection 방법이 주로 사용되고 있다.[10]

향후, LED와 FBG의 가격은 기존의 광원과 필터에 비하여 저가로 될 가능성이 매우 높으며, 또한 FBG를 이용한 광 CDMA는 FBG 사이의 간격을 좁게하여 10 Gbps이상의 전송속도를 제공할 수 있다.[10] 본 논문에서는 가입자당 100Mbps이상의 전송속도를 가지는 저가의 초고속 광 가입자망을 구축하기 위하여 PN 코드를 사용한 파장영역에서 암호화하는 FBG형 광 CDMA 시스템을 분석하였다. 여기서, 실제적으로 사용되어질 광원이 파장에 따라 광원의 출력세기가 일정하지 않기 때문에,

†E-mail: bongkim@etri.re.kr

이 경우에 대하여 SIR(Signal to Interference Ratio)를 계산하였고, 계산된 SIR 값을 이용하여 BER(Bit Error Rate) 특성 및 사용 가능한 동시가입자의 수를 분석하였다.

II. CDMA 구조

N개의 가입자가 동시에 중앙 집중국(CO: central office)의 OLT(Optical Line Termination)에 연결된 광 CDMA 방식 가입자망의 전형적인 구조는 그림 1과 같다. OLT에는 광 CDMA encoder(OCE)와 광 CDMA decoder(OCD)가 내장된 n개의 광 송수신 모듈이 있으며, 가입자의 ONU에는 각 ONU당 하나의 광 송수신 모듈이 있다. OLT 및 ONU에 있는 각각의 광 송수신 모듈은 광 결합기(OC: Optical Coupler)로 결합이 되며, 광 가입자의 모듈들은 위치에 따라 서로 다른 여러 개의 광 결합기를 통하여 결합되어 질 수도 있다. 결합된 신호들은 하나의 광섬유를 통하여 OLT와 ONU간에 데이터가 전송이 된다.

PN 부호를 이용한 FBG형 광 CDMA의 encoder와 decoder의 구조는 그림 2와 같다. 넓은 스펙트럼을 갖는 LED/SLED를 광원으로 사용하고, 광 변조기를 이용하여 On-off shift keying 방식으로 데이터를 생성한다. 생성된 광 신호를 FBG를 이용하여 부호화하며, 반사되어 나오는 부호화된 광 신호는 서큘레이터 등과 같은 광소자를 이용하여 전송매질의 광섬유로 전달된다. 이때 레이블된 FBG의 반사파장들 사이의 간격은 일정한 간격을 가지며, 사용되는 FBG의 레이블은 PN 부호에 의하여 결정이 된다. 그림 2의 (a)에서 출력되는 광 신호는 코드길이 7인 PN코드 중의 하나인 1110010를 사용하였을 때 출력모양이다. 전송 데이터가 '1'인 경우 파장 λ_0, λ_1, λ_2 및 λ_5는 출력이 되고, λ_3, λ_4 및 λ_6는 출력이 되지 않는다.

그림 2의 (b)는 balanced detection을 이용한 decoder 구조도이다. Encoder에서 생성된 광신호가 decoder에 입력이 되면 FBG의 반사파장과 일치하는 파장은 반사되어 광 서큘레이터를 통하여 광 검출기 PD1에 입력되고, FBG의 반사파장과 다른 파장은 FBG를 통과하여 광 검출기 PD2에 입력이 된다. 여기서 사용된 FBG의 레이블은 encoder와 마찬가지로 PN 부호에 의하여 결정된다. 만약, encoder와 decoder에 사용된 PN 부호가 동일하다면 광 신호는 광 검출기 PD1에만 입력이 되고 PD2에는 입력이 되지 않고, encoder와 decoder의 PN 부호가 서로 동일하지 않다면 광 신호는 광 검출기 PD1과 PD2에 나누어져서 입력되게 된다. 이때, 두 광 검출기에서 출력되는 전기신호의 크기는 PN 부호의 특성상 동일하게 된다. 따라서, 두 광 검출기에서 출력되는 전기신호의 차이 신호를 저대역필터(LPF: Low Pass Filter)를 통과시키면, 동일한 PN 부호의 경우에는 데이터가 정상적으로 출력이 되고, 동일한 PN 부호가 아닌 경우에는 두 광 검출기에 출력되는 신호의 크기가 같기 때문에 아무런 출력이 되지 않는다. 즉, 다른 부호를 가진 encoder에서 생성된 신호는 출력신호에 아무런 영향을 미치지 않게 된다. 그러나, 광원에서 출력되는 광 세기가 파장에 따라 동일하지 않거나, 여러 개의 FBG의 광 입력손실이 서로 다른 경우에는 두개의 광 검출기에 검출되는 신호크기가 같지 않기 때문에 잡음으로 작용하게 된다.

III. 신호 대 잡음비 분석

본 절에서는 광원의 출력이 파장에 따라 일정하지 않은 경우에 대하여 이론적으로 분석하여 보았다. 각각 파장에 따른 광 출력세기가 P_k(여기서, k는 0에서 n-1이며, 특정한 파장에 해당됨)인 광원을 이용하여 i번째 ONU에서 길이가 n인 PN 코드(C_{i0}, C_{i1}, ···, C_{in-1})로 암호화하면, i번째 ONU encoder에서 출력되는 광 신호 PE_k는 다음과 같이 표현된다.

$$PE_k = P_k \times C_{ik} \tag{1}$$

여기서, PN 코드 C_{ik}는 0과 1의 값을 가진다. i번째 ONU encoder에서 출력되는 신호가 decoding 부호 C_{jk}를 지닌 수신단의 OLT의 j번째 decoder에 입력되면 광 검출기 PD1과 PD2에서 검출되는 전기신호 i_1, i_2는

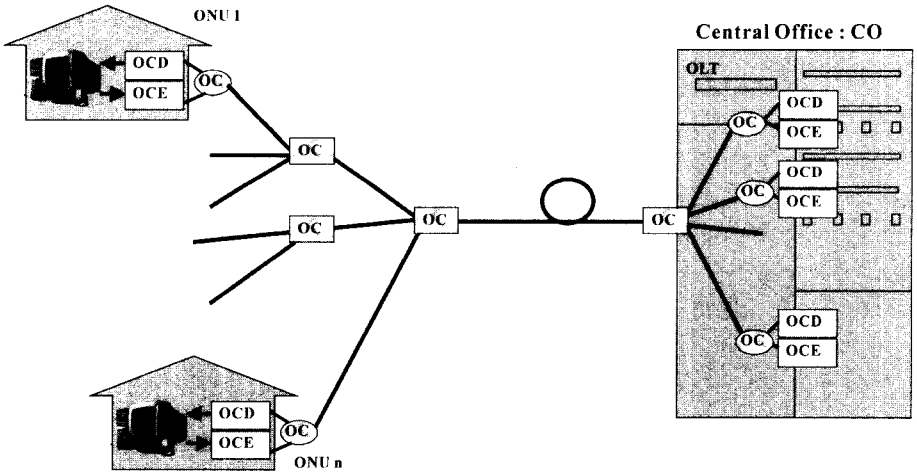

그림 1. 광 CDMA를 이용한 광 가입자망 형상도. 여기서, OC: 광 결합기, OCE: 광 CDMA encoder, OCD: 광 CDMA decoder, OLT: optical line termination, 및 ONU: optical network unit이다.

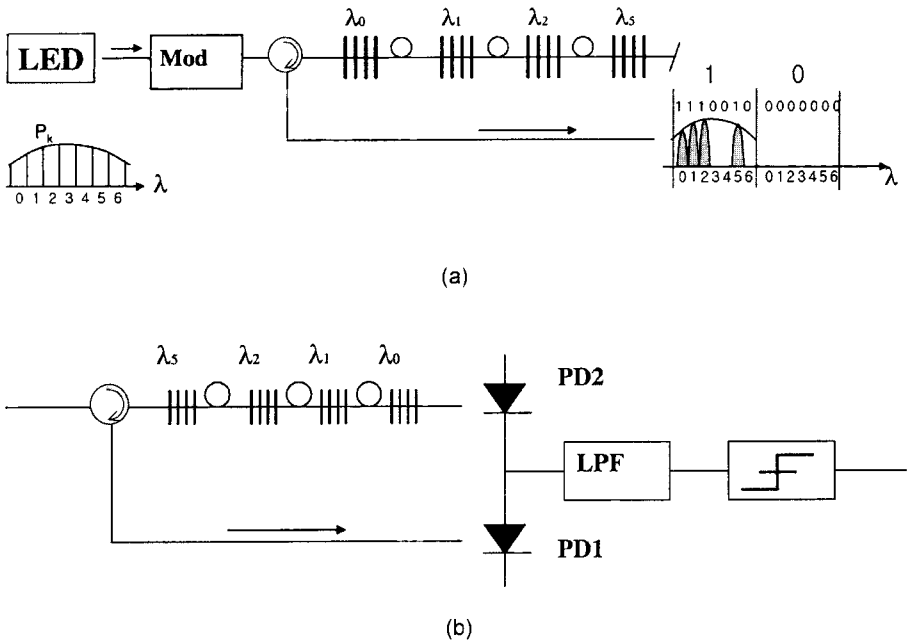

그림 2. PN 부호를 이용한 FBG형 광 CDMA 구조도. (a) encoder 구조도 (b) decoder 구조도. 여기서, Mod는 광 변조기, LPF는 저대역 필터 및 PD는 광 검출기이다.

$$i_1=\alpha\sum_{k=0}^{n-1}P_k\times C_{ik}\cdot C_{jk}$$

$$i_2=\alpha\sum_{k=0}^{n-1}P_k\times C_{ik}\cdot \overline{C_{jk}} \tag{2}$$

로 표시된다. 여기서, α는 광 검출기의 광전변환계수이며, $\overline{C_{jk}}$는 C_{jk}의 상보부호로써 $(1-C_{jk})$로 나타난다. 파장에 따른 광원의 출력세기가 일정(P_k=constant)하고, encoder와 decoder가 같은 경우(i=j)에는 광 검출기 PD2에서 출력되는 전기신호 i_2 값은 '0'이며, PD1에서 출력되는 전류값 i_1은 PN 코드의 특성상 $P_k\cdot(n+1)/2$이 된다. 한편, 파장에 따른 광원의 출력세기가 일정하고, encoder와 decoder가 다른 경우($i\neq j$)에는 i_1과 i_2의 값은 각각 $P_k\cdot(n+1)/4$의 값을 가지기 때문에 두 광 검출기에서 출력되는 전기신호의 차이 값은 '0'이 되며, CDMA에서 서로 다른 채널에 의한 간섭이 생기지 않는다. 그러나, 파장에 따른 광원의 출력세기 P_k가 일정하지 않으면 간섭이 생기게 된다.

같은 채널에 의하여 생기는 신호의 크기와 다른 두 채널에 의하여 생기는 간섭의 크기를 수식으로 표시를 하면

$$i_{S_i}=i_1-i_2=\alpha\sum_{k=0}^{n-1}P_k\times C_{ik}$$

$$i_{I_{ij}}=i_1-i_2=\alpha\sum_{k=0}^{n-1}P_k\times C_{ik}\cdot(C_{jk}-\overline{C_{jk}}) \tag{3}$$

가 된다. 따라서 동시 사용자수가 M일 때 신호 대 잡음비 SIR은 다음과 같이 주어진다(i<M인 경우).

$$SIR=\frac{i_{S_i}^2}{\sum_{j=0,j\neq i}^{M-1}i_{I_{ij}}^2} \tag{4}$$

한편, PIN 광 검출기와 같이 열잡음(thermal noise)지수가 shot noise 지수보다 매우 큰 광 검출기에서, 데이터 '0'의 검출전류가 '0'으로 출력되는 경우에는 BER과 SIR의 관계는 다음과 같이 표시된다.[11]

$$BER=\frac{1}{2}erfc\left(\sqrt{\frac{SIR}{8}}\right) \tag{5}$$

여기서, erfc는 error function을 나타낸다.

IV. 수치분석

FBG를 사용한 광 CDMA는 LED(light emitting diode)와 같은 넓은 선폭을 가지는 광원을 사용한다. 이때, 실제적인 광원의 출력의 세기는 그림 2의 LED의 출력 스펙트럼처럼 파장에 따라 일정하지 않다. 본 절에서는 광원의 출력 스펙트럼 모양이 파장변화에 따라 Gaussian 형태로 변하는 경우, 즉 수식 (1)의 P_k의 값이 중심파장(k=(n-1)/2)에 대하여 Gaussian 분포를 가지는 경우에 대하여 간섭특성을 수치적으로 분석하였다. 그림 3은 동시사용 채널수가 두 개인 경우에 대하여 spectral power distortion에 따른 SIR값과 BER값을 계산한 결과이다. 여기서, spectral power distortion은 중심파장의 최대출력 세기에 대한 최대출력세기와 최소출력세기 차의 비율, 즉, [P((n-1)/2)-P(0)]/P((n-1)/2)를 나타낸다. 코드의 길이 n이 커질수록 SIR값이 커지며, 광원의 spectral power distortion

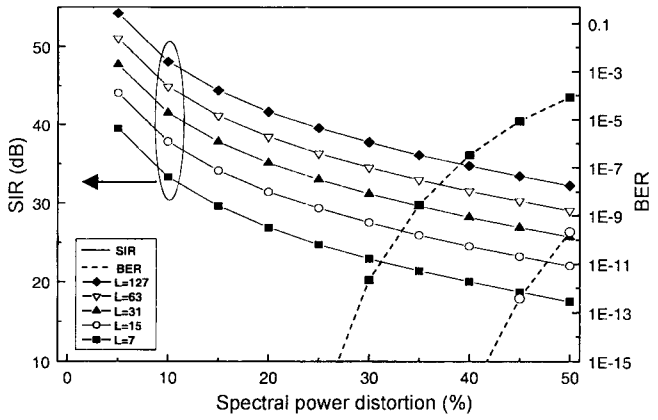

그림 3. Spectral power distortion에 따른 2채널을 동시에 사용시 SIR 및 BER 특성.

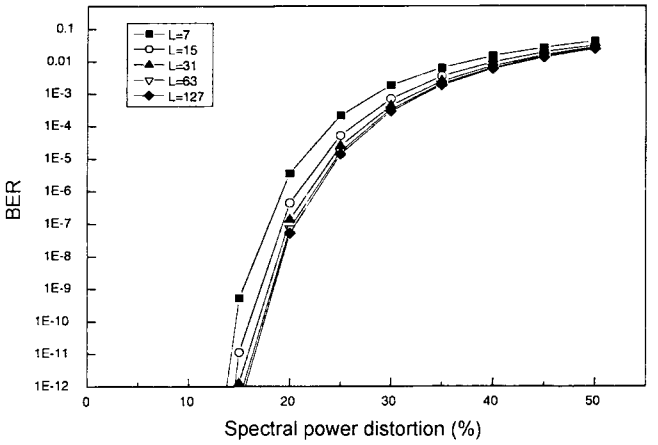

그림 4. Spectral power distortion에 따른 전 채널을 동시에 사용시 BER 특성.

이 증가할수록 SIR값이 작아진다. 두 채널만 사용하는 경우에도 코드의 길이가 7인 경우 가입자망에 사용하기 위하여 BER 값이 10^{-9} 이상이 되려면 spectral power distortion은 34% 이내이어야 한다. 그 이상의 코드 길이에서는 두 채널을 사용하는 경우 50%의 spectral power distortion으로도 문제가 없음을 알 수 있었다.

그림 4는 전 채널(코드 길이와 동일)을 동시에 사용하는 경우에 대하여 spectral power distortion에 따른 BER 값을 계산한 결과이다. 코드 길이가 증가함에 따라 BER 특성이 좋아지지만 그 차이는 거의 없다. 그리고, 전체 채널을 가입자망에 사용하기 위하여(BER<10^{-9}) 코드길이에 관계없이 spectral power distortion이 15% 이하여야 함을 알 수 있다.

그림 5는 spectral power distortion에 따른 동시사용 가능한 채널의 수를 계산한 결과이다. 여기서, 동시사용 가능한 채널의 수는 광 가입자망에 적합하기 위하여 BER을 10^{-9}을 기준으로 하였다. 그림 4와 동일하게 모든 채널을 광 가입자 망에 사용하기 위하여 15% 이내의 spectral power distortion이 필요하고, 그 이상의 spectral power distortion에서는 distortion이 증가함에 따라 동시 사용 채널수가 급격히 감소하는 것을 알 수 있었다.

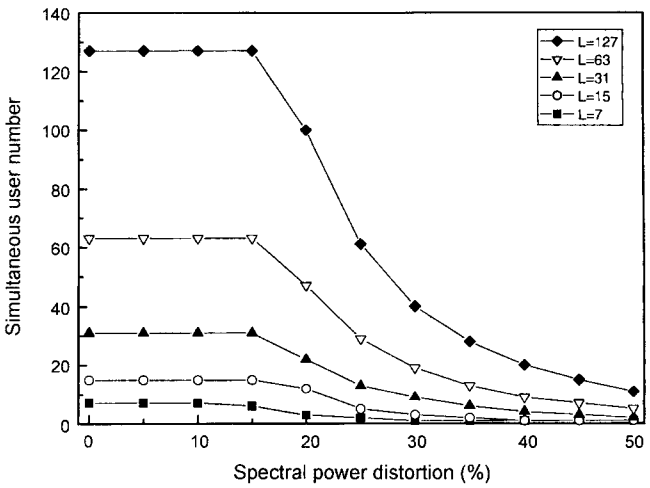

그림 5. Spectral power distortion에 따른 동시 가입자 수. 여기서, 기준 BER 값은 10^{-9}이다.

V. 결 론

본 논문에서는 광 가입자망에서 동시 가입자의 수를 늘이는 방법 중의 하나인 광 CDMA 방식에서 PN 부호를 사용한 FBG 형 광 CDMA에 대하여 광원의 spectral power distortion에 의한 특성변화를 수치적으로 분석하였다. 코드의 길이가 길어질수록 두 채널간의 간섭은 작아지며, 코드길이가 7인 경우 spectral power distortion이 34% 이내, 그 외의 경우에는 50% 이상에서 가입자망에 사용하기 위한 10^{-9}이상의 BER 특성을 가짐을 알 수 있었다. 한편, 광원의 spectral power distortion이 15%이내에서는 코드의 길이와 동일한 가입자 수를 동시에 사용할 수 있으며, 그 이상의 spectral power distortion에서는 동시 사용가능한 가입자의 수가 급격히 줄어듦을 확인하였다. 향후 실제적인 시스템에 광 CDMA를 적용하기 위하여 광검출기 및 광소자로 인한 노이즈에 대한 분석이 필요하다.

참고문헌

[1] 박상조, 김봉규, 김병휘, "양극성 PN 부호와 광 스위치를 이용한 광 가입자 액세스용 광 CDMA 방식의 제안," 정보처리학회논문지[C] (2002, submitted).

[2] K. Kitayama, H. Sotobayashi, and N. Wada, "Optical code division multiplexing (OCDM) and its applications to photonic networks," *IEICE Trans. Fundamentals*, vol. E82-A, no. 12 pp. 2616-2626, 1999.

[3] S. Park, K. Tsukamoto, and S. Komaki, "Polarity-reversing type photonic receiving scheme for optical CDMA signal in radio highway," *IEICE Trans. Electron.*, vol. 81-C. no. 3, pp. 462-467, 1998.

[4] T. Dennis and J. F. Young, "Optical implementation of bipolar codes," *IEEE J. of Quantum Electronics*, vol. 35, no. 3, pp. 287-291, 1999.

[5] H. Fathallah, L. A. Rusch, and S. LaRochelle, "Passive optical fast frequency-hop CDMA communications system," *IEEE J. of Lightwave Tech.*, vol. 17, no. 3, pp. 397-405, 1999.

[6] K. Yu, J. Shin, and N. Park, "Wavelength-time spreading optical CDMA system using wavelength multiplexers and mirrored fiber delay lines," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 1278-1280, 2000.
[7] S. Kim, "Cyclic optical encoders/decoders for compact optical CDMA networks," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 12, no. 4, pp. 428-430, 2000.
[8] L. R. Chen, "Flexible fiber Bragg grating encoder/decoder for hybrid wavelength-time optical CDMA," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 13, no. 11 pp. 1233-1235, 2001.
[9] M. J. L. Cahill, G. J. Pendock, and D. D. Sampson, "Hybrid coherence multiplexing/coarse wavelength-division multiplexing passive optical network for customer access," *IEEE Photonics Lett.*, vol. 9, no. 7, pp. 1032-1034, 1997.
[10] J. Huang and D. Hsu, "Fiber-grating-based optical CDMA spectral coding with nearly orthogonal M-sequence codes," *IEEE Photonics Tech. Lett.*, vol. 12, no. 9, pp. 1252-1254, 2000.
[11] G. P. Agrawal, Fiber-Optic Communication Systems, 2nd edition, (John willey & Sons Inc., 1997), pp 170-172.

The characteristics of optical CDMA systems using PN codes and FBGs for ultra-fast optical access networks

Bong Kyu Kim†, Younghee Yeon, and Byoung Whi Kim
Access Network Department, Electronics and Telecommunications Research and Institute, Daejeon, 305-350, KOREA
†*E-mail: bongkim@etri.re.kr*

Sangjo Park
School of Computer, Information & Communication, Seowon University, Cheongju 361-742, KOREA

(Received September 26, 2002, Revised manuscript December 3, 2002)

We have numerically analysed the effects of the light source spectral power distortion in an optical CDMA system using PN codes and FBGs for ultra-fast multi-access optical networks. The interference between two CDMA channels decreases with an increase in the code length and the simultaneous access number is equal to the code length in the region of 0 to 15% spectral power distortion. As a result, the spectral power distortion with optical spectrum is very important in designing the optical CDMA systems.

Classification code : OC.030.