

文章编号: 0253-2239(2004)07-961-4

利用布拉格光栅阵列实现二维光码分多址的研究

付晓梅 于晋龙 李恩邦 朱德鹏 李亚男 戴居丰 杨恩泽

(天津大学电子信息工程学院光纤通信实验室 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要: 利用布拉格光栅阵列, 实现了在波长和时间上的素数跳频码的编解码。利用该编解码器, 完成了在两个发送用户和一个接收用户的条件下, 传输速率从 20 Mb/s 到 1.4 Gb/s 的光码分多址通信系统。研究了当系统传输速率超过相邻布拉格光栅间距限制条件时, 系统的性能变化情况。结果表明当用户数不超过 $(3/2)P_s$ (素数跳频码的扩展因子) 时, 速率超限对系统性能基本无影响。在同样误码率要求条件下, 地址码较长的系统, 传输速率可以达到限制速率的 2~3 倍而不会造成明显的系统性能下降。这表明相邻布拉格光栅间距条件所限制的系统速率并非不可逾越的。

关键词: 光纤通信技术; 光码分多址; 二维编解码; 布拉格光栅阵列

中图分类号: TN929.11 文献标识码: A

The Study of Time/Frequency Encoding Optical Code Division Multi-Access Communication with Bragg Grating Arrays

Fu Xiaomei Yu Jinlong Li Enbang Zhu Depeng Li Yanan Dai Jufeng Yang Enze
(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science, College of Electronic Information Engineering, Tianjin University, Ministry of Education, Tianjin 300072)

(Received 22 September 20003; revised 30 December 2003)

Abstract: Optical code-division multiple-access system, usually known as OCDMA, can provide very attractive features, such as asynchronous access, privacy and security in transmission, ability to support variable bit rate and scalability of the network. A time/frequency encoding/decoding OCDMA system with high quality Bragg grating arrays is developed, and transmission rates up to 1.4 Gb/s per user can be achieved. The effects of data rate on the performance of the system are studied theoretically and experimentally. It is proved that even if the data rate is beyond the critical value determined by the distance between Bragg gratings essential for the prevention of code overlapping, the performance of the system can still be satisfying, when the user number is lower than $(3/2)$ times of P_s (pulse number of time in a code) or the code length is larger than 289, the system's error rate will not increase obviously as the data rate exceeds the critical value.

Key words: optical fiber communication technology; optical code division multi-access; time/frequency encoding and decoding; Bragg grating arrays

1 引言

在目前的全光接入技术中, 多址技术主要有波分复用(WDM)技术、时分多址(TDMA)技术, 以及光码分多址(OCDMA)技术。光码分多址与波分复

用、时分多址相比, 具有无需时间同步和波长控制, 抗干扰性强、保密性好以及用户接入灵活等优点, 成为当前全光接入技术的研究热点^[1]。目前实现光码分多址的主要技术方案有三种: 1) 利用延时线实现的时域编码方案^[2], 2) 利用频谱分割实现的频谱编码方案^[3], 3) 利用时间和波长二维分割实现的混合编码方案。方案三采用了波长和时间的二维编码方式, 在选择光地址码的灵活性和增大系统用户容量

上有较大优势^[4]。因此采用二维编码的光码分多址更适合于高性能、多用户、接入灵活的全光接入网。

这种二维混合编码方案最早是在 1996 年由 Tanceveskiza^[5]提出的,随后 Kyoungsik Yu 和 Yu K 等^[6]分别利用阵列波导和波长选择器光滤波器^[7]实现二维编码的光码分多址系统。Ben H^[8,9]利用布拉格光栅编解码器实现的二维编码光码分多址系统,由于编解码器的灵活性好、性价比占优而倍受关注。国内也开展了相关技术的研究,并取得了积极的研究成果^[10,11]。

上述工作都是在相邻布拉格光栅间距限制条件下讨论和研究的。而此限制条件所决定的系统传输速率一般被认为是不可超越的。本文研究了系统速率超过限定速率后性能的变化,利用了布拉格光栅阵列进行了在时域和频域的二维编码的光码分多址实验,实验系统包括两个发送端(一个作为发送用户,另一个为干扰用户)和一个接收端,速率从 20 Mb/s 至 1.4 Gb/s。理论计算和实验结果表明超过限定的速率几倍后,系统仍然可以达到较好性能。

2 编解码器设计原理

设计布拉格光栅编解码器主要在确定各光栅的反射波长以及相邻光栅的间距。反射波长的选择主要依赖于光码分多址系统所采用的地址码,而光栅间距则影响系统数据传输速率。

首先地址码可以选择二维光正交码、二维素数跳频码等,下面以构造时域/频域相结合的二维素数跳频码为例,在时域扩展中的比特“1”采用不同的波长进行传输, p 使用线性同余装置可以得到,为一素数,区组中放置脉冲的规则如下^[4]:

$$a_{ij} = [i \cdot j], \quad i, j = 0, 1, 2, \dots, p-1, \quad (1)$$

其中, $[\cdot]$ 表示以 p 为模的操作, i 表示该序列在这一组序列中的序号, j 表示某一特定序列中区组的序号。以上运算法则决定了一个码字序列中脉冲的位置。在跳频模式中,不同的波长采用不同的数字表示。这样跳频模式的数目为 $p-1$,扩展模式的数目为 p ,因此可用的混合码字的数目即最大用户容量为 $p(p-1)$,码长为 p^2 。素数跳频码自相关旁瓣最大值为 0,互相关最大值为 1。

其次是确定相邻光栅间距。假定系统所采用的扩频码的码长为 L_c ,系统的数据传输速率为 R_b ,码片间隔为 D , β 是光纤纤芯中光波的传播常量。光纤中光波的传输群速率为^[10]

$$v = -\frac{2\pi c}{\lambda^2} \left[\frac{d\beta(\lambda)}{d\lambda} \right]^{-1}, \quad (2)$$

$$D = v / (L_c R_b), \quad (3)$$

所以编解码光栅间距应为 $D/2$ 的倍数。

3 实验原理及装置

实验装置如图 1 所示。

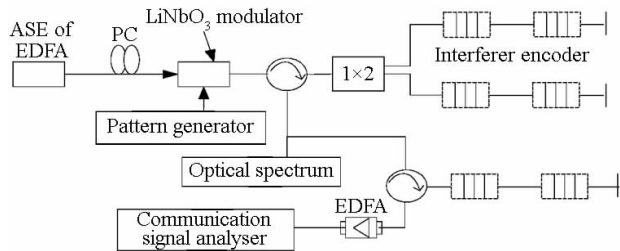


Fig. 1 Experimental setup of a Time/Frequency encoding optical CDMA system. ASE: Amplified spontaneous emission; EDFA: erbium-doped fiber amplifier

掺铒光纤的自发辐射作为光源,信号源由 Anritsu ME522A 误码仪产生 20 Mb/s 至 1.4 Gb/s 信号,经 LiNbO_3 调制器进行外调制,产生宽带、非相干的短脉冲,脉冲为半占空的归零码。脉冲信号经过环形器后的 2×2 耦合器分配给两个编码器,每个编码器由两个级联的布拉格光栅组成,以进行时域/频域二维编码,采用两个反射波长分别为 1529.1 nm 和 1529.5 nm,谱宽 0.4 nm 的光栅级联做编码器,相邻光栅间距离为 1 m。另一个地址不同的编码器,采用两个反射波长分别为 1559.2 nm 和 1559.6 nm,谱宽 0.4 nm 的光栅级联做编码器,光栅间距离为 1 m,将其作为干扰用户。反射信号由环形器输出,即为携带用户地址的编码后的信号。经过背对背传输,收端环型器 2 端连接的解码器结构与第一个编码器是共轭的。即地址码只与发端的第一个用户的编码器地址相同。环形器 3 端输出的解码后信号经过掺铒光纤放大后,用 HP 83480A 通信分析仪观测。光谱仪为 Agilent 86142B,其最高分辨率为 0.06 nm。

4 实验结果及分析

采用 $p=2$,可用波长为 4 的素数跳频码为地址码,根据素数跳频码理论,可以产生两组码字,每组使用两个波长进行编码,两组码字的码长都为 4,因此使用的用户地址码为 $\lambda_1 0 \lambda_2 0$,干扰用户的地址码为 $\lambda_3 0 \lambda_4 0$ 。图 2 给出了编码后第一个用户信号光谱

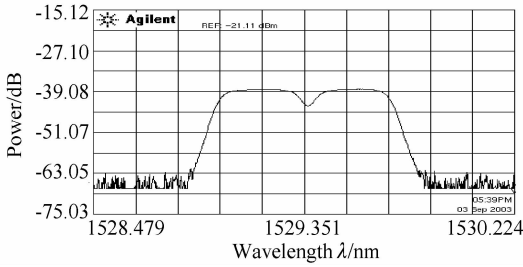


Fig. 2 Spectrum of encoded data

图。根据(3)式可得系统最大的传输速率为 50 Mb/s, 半占空归零码的脉冲宽度最大为 10 ns, 编码后波形的时延相差 10 ns。为了观察时域编码波形, 信号需选用窄脉冲, 实验采用了 150 Mb/s, 归零码, 码型为 100000001 的信号作为用户信号, 相当于 20 Mb/s 速率信号。图 3 可以看出在两个 1 码元之间多一个脉冲, 邻近脉冲的时延差接近 10 ns, 两个

时延差为 10 ns 脉冲正是编码后的波形。旁边的很小的起伏是因为环行器不理想漏光造成的, 但不影响正确解码。

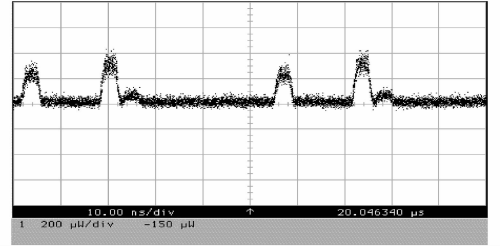


Fig. 3 Encoded data pulse

因为编解码器相邻光栅间距限定的最大传输速率为 50 Mb/s, 从理论和实验两方面研究了速率超过限定值的情况。

设用户地址码采用素数跳频码, 在用户数据 0, 1 等概率条件下, 系统的误码率 P_e 为^[11]

$$P_e = \sum_{i=1}^{K-1} \binom{K-1}{i} 2^{-(K-1)} \sum_{j=0}^i \binom{i}{j} \left(\frac{\langle \mu_\lambda \rangle}{P_s^2} \right)^j \left(1 - \frac{\langle \mu_\lambda \rangle}{P_s^2} \right)^{i-j}, \quad (4)$$

其中 K 为并发用户数, P_s 是素数码扩展因子, P_h 为可用波长数, θ 为判决门限, 设 $\theta = P_s$, $\langle \mu_\lambda \rangle$ 是素数序列中平均公共波长数:

$$\langle \mu_\lambda \rangle = \frac{1}{P_h/P_s} \left[\left(\frac{P_h-1}{P_s-1} \right) \frac{(P_s-1)(P_s-2) + (P_h-2)}{P_h-2} + \left(\frac{P_h-1}{P_s} \right) \frac{P_s(P_s-1)}{P_h-2} \right], \quad (5)$$

由于 $\langle \mu_\lambda \rangle / P_s^2$ 表示原来系统中某用户对特定用户产生的干扰, 由于素数跳频码的最大互相关为 1, 则速率超限后, 相同波长脉冲的叠加情况会加重, 因此在原来的干扰基础上增加互相关因子 $1/P_s(P_s-1)$, 使干扰加重从而降低了系统性能。图 4 给出了不同码长, 系统速率没有超限、速率超限为原来速率的 3 倍和 5 倍时系统误码率与并发用户数关系曲线。图中参量为 $P_s = P_h = 13$, 可以看出, 当用户数小于 P_s 时, 不管速率超限与否, 系统误码率理论上都是零。当用户数超过 P_s , 但小于 $(P_s + P_s/2)$ 时, 速率超限前后系统性能差异不大。随着

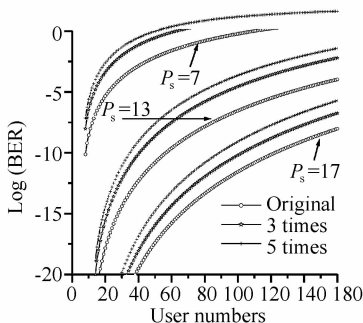


Fig. 4 BER verse exceed data rate. BER; bit error rate

用户地址码码长的增加(如扩展因子为 17, 码长超过 289 时), 速率超限后的性能恶化量在逐渐减小, 即在相同误码率要求条件下, 地址码较长系统可以突破速率的限制约 2~3 倍而不会造成明显的系统性能下降, 考虑到用户随机接入概率服从泊松分布, 影响会进一步减小。

对单个用户和两个并发用户的系统进行了实验研究。图 5 和图 6 分别给出了速率为 500 Mb/s(超限 10 倍)和 1.4 Gb/s(超限近 30 倍)信号背对背传输在编码前和解码后的光信号波形对比图, 可以看出速率至 1.4 Gb/s 接收端仍能正确解码。

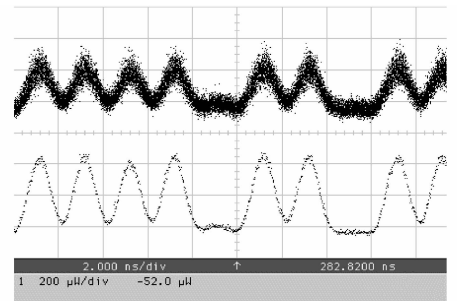


Fig. 5 500 Mb/s waveform of transmit and receive

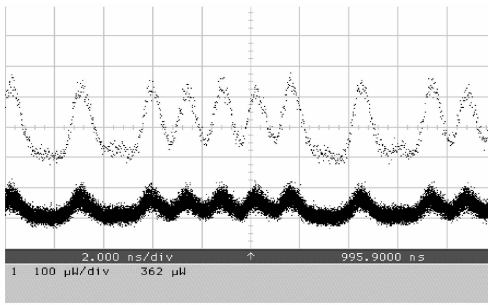


Fig. 6 1.4 Gb/s waveform of transmit and receive

图 7 和图 8 分别给出了速率为 500 Mb/s 和 1.4 Gb/s 时有两个并发用户的情况, 其中一个用户作为干扰用户。可以看出两个并发用户, 用户数等于扩展因子, 速率超限 30 倍时, 接收端仍能正确解码。与图 4 的理论结果吻合。当用户数小于 $(P_s + P_s/2)$ 时, 速率超限基本无影响。说明速率限制条件是考虑扩展后的信号码片在时域不重叠, 在多用户同时接入情况下不造成码间干扰为前提。因为速率超限只会使码字的重叠概率增加, 并不会使相应的系统误码率成倍增加。

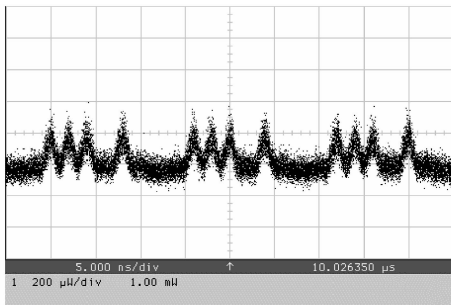


Fig. 7 500 Mb/s decoded waveform with a interference user

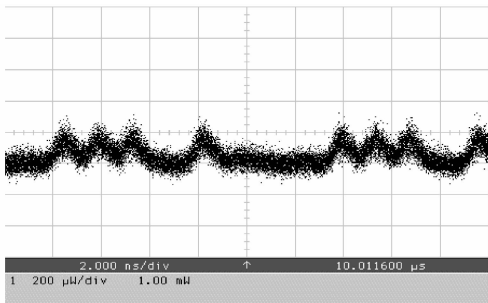


Fig. 8 1.4 Gb/s decoded waveform with a interference user

总结 成功利用布拉格光栅阵列实现了在两个发送用户和一个接收用户的条件下, 每用户采用素数跳频码在波长和时间上进行时域/频域二维编解码的光码分多址通信。传输速率从 20 Mb/s 到 1.4 Gb/s。

研究了系统速率超过相邻布拉格光栅间距所限定速率后性能的变化, 结果表明在当用户数小于 P_s 时, 不管速率超限与否, 系统误码率理论上都是零。当用户数小于 $(P_s + P_s/2)$ 时, 速率超限基本无影响。相同误码率要求条件下, 地址码较长的系统, 可以突破速率的限制 2~3 倍而不会造成明显的系统性能恶化, 考虑到用户随机接入概率是服从泊松分布的, 影响将会进一步减小。实验结果也表明在两个并发用户时(用户数等于扩展因子时), 速率超过限定速率 30 倍后, 系统仍然可以达到较好性能。

参 考 文 献

- 1 Yang Guu-Chang. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for fiber-optic networks. *IEEE Transactions on Communications*, 1997, **45**(11):1426~1434
- 2 Sampson D D, Dove W T. High band-width optical fiber delay line multichannel digital correlator. *J. Appl. Opt.*, 1993, **32**(3):3905~3916
- 3 Kavehad M. An optical CDMA system based on spectral amplitude encoding of spectrum encoding of nochoerent sources. *J. Lightwave Technol.*, 1995, **13**(3):534~545
- 4 Tanceveski L, Andonovic I. Hybrid wavelength hopping/time spreading schemes for use in massive optical network with increased security. *IEEE J. Lightwave Technol.*, 1996, **14**(12):2636~2647
- 5 Yu Kyoungsik. Novel wavelength-time spreading optical CDMA system using array-waveguid grating. 2000 *OFC*, FD6-1:71~74
- 6 Yu K. Wavelength-time spreading optical CDMA system using wavelength multiplexers and mirrored fiber delay lineds. *IEEE Photon. Lett.*, 2000, **12**(9):1278~1280
- 7 Ben H. 1.25 Gbit/a transmission of optical FFH-OCDMA signals over 80 km with 16 users. 2000 Optical Society of America
- 8 Teh P C, Ibsen M, Richardson D J. Demonstration of a full-duplex bidirectional spectrally interleaved OCDMA/DWDM system. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2003, **15**(3):482~484
- 9 Zuo Chao. Performance analysis of FFH-OCDMA system based on DS/FH OOC code. *J. China Institute of Communication*, 2002, **23**(11):29~34
- 10 Ding Meiling, Zhang Xiamnin. The hybrid direct sequence/frequency hopping optical CDMA system with FBGS based encoder/decoder. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2002, **22**(7): 842~846 (in Chinese)
- 11 Tanceveski L. Impact of the beat noise on performance of 2-D optical CDMA systems. *IEEE Commun. Lett.*, 2000, **4**(8):264~268