

文章编号: 0258-7025(2008)12-1901-05

光码分多址系统可调谐编/解码器研究

李传起¹ 朱迎春² 周 谔²

(¹ 南京信息工程大学数理学院, 江苏 南京 210044; ² 南京信息工程大学电子与信息工程学院, 江苏 南京 210044)

摘要 介绍了光码分多址(OCDMA)系统和常用的几种编/解码器(E/D)。研究了基于光纤延时线(OFDL)和基于光纤布拉格光栅(FBGs)的可调谐编/解码器,讨论了两种基于光纤延时线的可调方案,对它们的结构和性能进行了分析。讨论了基于光纤布拉格光栅(FBGs)的编/解码器,介绍了光纤布拉格光栅编/解码器的原理和利用压电陶瓷(PZT)调谐光纤布拉格光栅的参数选择。给出了一种基于光纤布拉格光栅阵列的可调谐二维编/解码器结构,并分析了它的主要优点。介绍了基于超结构光纤布拉格光栅(SSFBG)的二进制相移键控(BPSK)编/解码器和可调谐四进制相移键控(QPSK)超结构光纤布拉格光栅编/解码器的构造方法,探讨了光码分多址系统编/解码器的发展前景。

关键词 光码分多址; 编/解码器; 可调谐; 光纤延时线; 光纤布拉格光栅; 超结构光纤布拉格光栅

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1901

Tunable Encoder/decoder for Optical Code Division Multiple Access Networks

Li Chuanqi¹ Zhu Yingchun² Zhou Xu²

¹ College of Mathematics and Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

² College of Electronics and Information Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Optical code division multiple access (OCDMA) networks and several typical encoder/decoder (E/D) are introduced. The tunable E/D based on optical fiber delay line (OFDL) and on fiber Bragg gratings (FBGs) have been emphatically investigated. Two schemes of tunable OFDL are presented and their performance is analyzed. The principle of the E/D based on FBGs and the selection of parameters with piezoelectric ceramic (PZT) to tune FBGs are introduced. A two-dimensional tunable structure of E/D based on FBGs arrays are presented, whose merits are analyzed. The construction method of binary phase shift keying (BPSK) and tunable quaternary phase shift keying (QPSK) E/D based on super-structured fiber Bragg grating (SSFBG) are introduced, and the development prospects for OCDMA E/D are analyzed.

Key words optical code division multiple access; encoder/decoder; tunable; optical fiber delay line; fiber Bragg gratings; super-structured fiber Bragg grating

1 引 言

光码分多址(OCDMA)系统融合码分多址接入和光纤通信的优点,以光编/解码器(E/D)为高速光信号处理器,从而实现无延时异步接入,且网络控制

简单、业务透明性好,成为未来宽带接入和高速局域网(LAN)的最佳方案之一^[1,2]。光编/解码器是OCDMA的核心部件之一,编/解码器的结构和特性直接影响着OCDMA系统的功率损耗、设计成本、

收稿日期: 2008-08-01; 收到修改稿日期: 2008-10-09

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2008437)和江苏省高校自然科学基金(07KJB510066)资助课题。

作者简介: 李传起(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事光纤通信OCDMA网络技术方面的研究。

E-mail: leecq@nuist.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: zyc84001@163.com

用户容量、误码率以及系统的灵活性^[2,3]。

OCDMA 作为一种多址技术,要求其编/解码器具备变址灵活的特性,因此设计并实现变址灵活、性能可靠的可调谐编/解码器对 OCDMA 系统的实际应用具有重要价值。

2 OCDMA 系统

图 1 所示为典型的 OCDMA 系统,OCDMA 融合码分多址接入和光纤通信的优点,具有安全性强、抗干扰和抗多径衰落、随机接入、协议简单等技术优势,成为光通信技术领域新的研究热点。

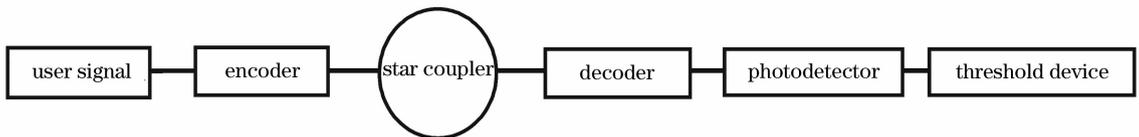


图 1 典型的 OCDMA 系统结构原理图

Fig. 1 Constructional schematic of OCDMA networks

表 1 常用编/解码器的比较

Table 1 Comparison of typical encoder/decoder

Encoder/Decoder	OFDL	SLM	PLC	AWG	FBGs/SSFBG
Applied range	Coherent/Incoherent TS coding	Coherent/Incoherent frequency domain coding	Coherent TS coding	Incoherent TS, 2-D coding, coherent frequency domain coding	Coherent/Incoherent TS coding, frequency domain/2-D coding
Performance of generating super-long optical codes	Low	High	Middle	Middle	High
Overall performance	Low	Middle	Middle	Middle	High
Insertion loss	Middle	Middle	High	High	Low
Reconfigurability	Difficulty	Simple	Simple	Average	Average
Reliability	Low	High	Middle	Middle	High
Complexity	Middle	Middle	Middle	High	Low
Cost	Low	Middle	Middle	High	Low

3 可调 OFDL 编/解码器

1978 年, E. Marom 等^[5]提出在光信号处理中采用光纤延时线 (OFDL), 被认为是大部分 OCDMA 系统实现和应用的基础。OFDL 编/解码器是时域编/解码技术, 在发送端, 根据给定的地址码进行不同的延时, 得到由不同延迟的短光脉冲合成的脉冲序列; 在接收端, 解码器把输入信号与它包含的标志序列作相关运算、相关识别, 通过阈值判断, 从而在混有众多用户信号的接收信号中识别并拣出某用户的数据。

光纤延时线的长度由 OCDMA 系统的传输速率、系统选用的地址码码长及具体的地址码决定; 光

OCDMA 对不同的用户分配不同的、互相关性较小的准正交的地址码, 在发送端, 根据地址码由编码器将数据比特转换成扩频序列, 对信息进行编码, 在接收端, 解码器对收到的扩频码序列进行相关运算和相应的相关判决及处理, 将扩频序列恢复为数据比特, 最后恢复各自的原始信号, 从而实现多址通信。

常用的编/解码器有光纤延迟线 (OFDL)、空间光调制器 (SLM)、平面光波导 (PLC)、阵列波导光栅 (AWG)、光纤布拉格光栅 (FBGs)、超结构光纤布拉格光栅 (SSFBG) 等^[2~5]。表 1 为常用编/解码器的比较。

纤长度等于码位序数、切谱 (chip) 宽度、光脉冲的群速率之积。

3.1 并行可调式 OFDL 编/解码器

图 2 是典型的并行 OFDL 变地址方案。该方案中, 对每个不同的码字分别设计制作出光纤延时线编码器, 然后由光开关矩阵来选择应输出哪个编码器的信号。解码器和编码器结构一样, 根据每个不同的码字选择光延迟线解码器, 然后由光开关矩阵来选择应输出哪个解码器的信号。

这种方案可实现变址, 但随着码字数增多, 编/解码器的个数越多, 光开关矩阵也越大, 不便于系统集成。

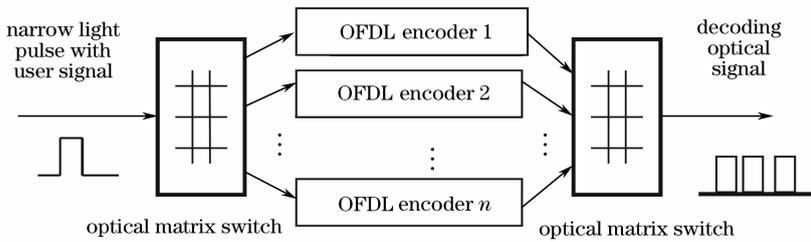


图 2 并行可调式光纤延时线编/解码器

Fig. 2 Parallel tunable encoder/decoder of optical fiber delay line

3.2 串行可调式 OFDL 编/解码器

为了实现 OFDL 编/解码的灵活性,使地址码灵活可调,串行可调 OFDL 由电子控制的 2×2 光开关和 OFDL 组成如图 3 所示。先把用户地址序列发送给延时控制器,延时控制器根据码字中的“1”的位置控制可调 OFDL 中 2×2 光开关 K 的状态决定延时长短,当控制线为“0”时,交换单元处于直通状态;当控制线为“1”时,交换单元则为交叉状态,因此可实现对不同用户的地址码进行编解码。

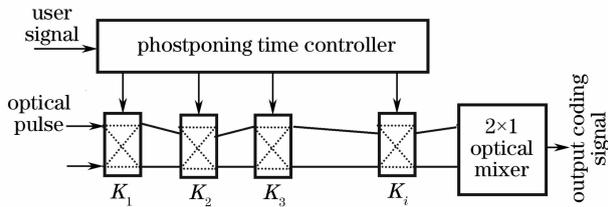


图 3 串行可调式光纤延时线编/解码器

Fig. 3 Serial tunable encoder/decoder of optical fiber delay line

该方法适用的扩频序列较多,编解码灵活,由于采用了光电开关,可以使用计算机程序控制系统配置,但是当可用的码字增多时,会导致不同长度的 OFDL 随之增多,光开关数目增大,光路损耗增大,控制电路也会随之复杂。

4 可调 FBGs 编/解码器

灵活可调谐的编/解码器是 OCDMA 系统需要研究的主要问题之一。基于 FBGs 编/解码器具有制作工艺简单、成本低、体积小、插入损耗低、光纤参数易于调整可实现变址功能,便于在全光纤的环境下使用等优点,成为目前的研究热点。

4.1 FBGs 编/解码器原理

FBG 是短周期光栅中利用其反射特性的一种,折射率沿光纤轴向方向周期(或非周期)变化,反射波段的中心波长为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中 n_{eff} 为光纤光栅的有效折射率, Λ 为光栅的周

期。

根据麦克斯韦方程组直接推导出的耦合模理论,光纤光栅折射率的变化可反映在有效折射率 n_{eff} 的基础上增加了一个微扰^[6]

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \bar{\delta} n_{\text{eff}} \left\{ 1 + v \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} z + \varphi(z) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中 $\bar{\delta} n_{\text{eff}}$ 为有效折射率扰动的平均值, v 为折射率调制度, $\varphi(z)$ 为光栅的啁啾。

则反射谱的带宽 $\Delta\lambda$ 为^[6]

$$\Delta\lambda = \left| \frac{\lambda_B^2}{n_{\text{eff}} L} \right| \times \sqrt{\left| 1 + \left(\frac{v \bar{\delta} n_{\text{eff}} L}{\lambda_B} \right)^2 \right|}, \quad (3)$$

式中 L 为光栅长度,光栅的最大反射率 γ_M 为^[6]

$$\gamma_M = \tanh^2 \left(\frac{\pi}{\lambda_B} v \bar{\delta} n_{\text{eff}} L \right). \quad (4)$$

由此可知单个 FBG 具有选频作用,能按设计的反射率反射特定波长的光信号,并且可以对光信号的相位产生影响^[6],那么,在空间上按一定关系排列的 FBG 序列就能实现对输入光信号多个频谱成分的提取,而 FBGs 所处的不同位置将实现对输入信号时域的编码;反之,编码信号的解码过程也可以通过 FBGs 加以实现。解码器包含和编码器相同波长的 FBGs,但排列次序正好相反。

4.2 压电陶瓷(PZT)调谐 FBGs 的参数选择

FBGs 对温度和应力的变化较敏感,可以方便地利用温度和应力来改变光栅的中心波长。在同一根光纤上等距离制作若干个同样参数的子光纤光栅,PZT 作用在子光栅上,改变 PZT 的电压来改变子光纤光栅中心波长,从而可以达到任意变址的目的。

设定两个邻近的子光栅中心间距为 l , 每个子光栅长度为 l_c , 任意两子光栅间的空间距离为 l_s , 则有 $l = l_c + l_s$, 码片(即编码后的光脉冲间时间间隔) $T_c = n_g \times 2l/c$, 其中 n_g 为有效群速系数, c 为光速, T_c 确定最大码片速率。假定子光栅的中心波长为 λ , 则其带宽 $\Delta\lambda = \lambda^2 \sqrt{1 + (kl_c/\pi)^2} / (n_{\text{eff}} l_c)$, 式中 k 是耦合效率,根据文献^[7],光栅的中心反射波长偏

移最大波长 $\Delta\lambda_s = 0.8 \times \lambda \times \Delta l / l_c$, 式中 Δl 是 PZT 的长度改变量, 最大的可用于一次编码的子光栅的数目 $m = \Delta\lambda_s / \Delta\lambda_b$, 也即确定了此编码器所能采用的地址码的最大码重为 m 。假设地址码的码长为 N , 则光纤光栅阵列的长度为 $l_{\text{total}} = (N-1)l$, 即需要在同一根光纤上制作 N 个子光栅。目前, 已经研制出了 Bragg 波长漂移范围达到 40 nm 的 FBG^[8]。

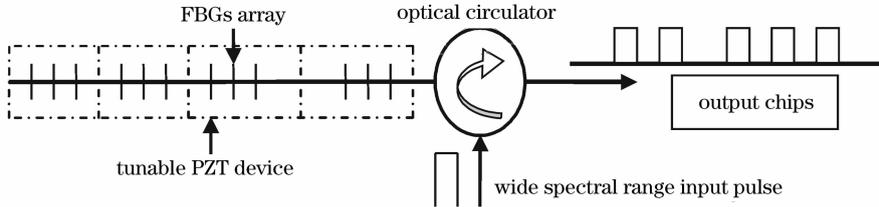


图 4 基于 FBGs 阵列的可调谐二维编/解码器

Fig. 4 Tunable two-dimensional encoder/decoder based on FBGs array

图中, FBGs 阵列的每个均匀子光栅都使用 PZT 进行调谐, 当某个子光栅的中心波长被调为 λ_i 时, 且 λ_i 被包含在输入脉冲的宽光谱中, 则该子光栅将反射波长为 λ_i 的脉冲成分; 当 λ_i 在输入脉冲的宽光谱之外时, 则该子光栅对输入脉冲没有反射作用, 它犹如一段光纤, 仅起到延时作用。因而采用调谐装置后, 光纤光栅阵列能够实现可变码字的编码, 其码长也可以变化, 可实现多比特率编码。解码器的结构和编码器相对应, 即可实现二维可变码字的编/解码。

基于 FBGs 阵列的可调谐编/解码器易于调谐, 可实现“不同时片不同波长”的二维码字的编/解码; 编/解码器匹配比较简单; 不需要同步信号, 能实现码字的自同步; 能实现多比特率编码; 由于每个子光栅都是一个带通滤波器, 因而能够滤除许多带宽外噪声。

5 基于 SSFBG 的可调谐编/解码器

根据超结构光纤光栅随温度和应力变化的特性, 利用基于 SSFBG 的编/解码器很容易实现变址。SSFBG 编/解码器是基于取样光纤光栅设计的, 目前主要用于相位编码中。SSFBG 由于低插入损耗和产生超长光学码的能力, 成为最受关注的编/解码器件。目前已经报道的实现方案有基于 SSFBG 的二进制相移键控 (BPSK)、差分相移键控 (DPSK) 和四进制相移键控 (QPSK) 等 OCDMA 编/解码方案^[9~11]。

5.1 二进制相移键控 (BPSK) SSFBG 编/解码器

基于 SSFBG 的编/解码器能够产生具有良好

4.3 基于 FBGs 的可调谐二维编/解码器

光纤光栅的 Bragg 反射波长可以调谐, 从 (1) 式可见, 改变光栅有效折射率 n_{eff} 和光栅周期 Λ , 均可改变 λ_B 。因此, 如果在每个子光纤光栅加上调谐装置, 就可以实现可变码字的二维编码器, 从而实现 OCDMA 系统的多比特率编码。图 4 是基于 FBGs 阵列的可变码字二维编码器的结构。

自相关/互相关特性的双极性编码。码长越长, 编/解码器的相关特性越好。SSFBG 可以通过在光纤的不同段上对折射率调制附加 0 或 π 的相移即可实现相位调制^[12]。

2006 年, Hamanaka 等^[9] 报道了基于 SSFBG 编/解码器的全异步 OCDMA 系统实验, 该系统用户数为 10, 各个用户的码字为 511 chip 二进制相移键控 Gold 序列, 码片速率为 640 Gbit/s。由于编/解码器的码片长度很长, 系统的差拍噪声得到了显著抑制, 但是对光源、器件的制作精度要求非常高。2008 年, 又报道了 8 用户差分相移键控 (DPSK) OCDMA 系统, 传输速率为 10 Gbit/s, 使用 16 相移 SSFBG 和 AWG 器件的混合编/解码 OCDMA 系统^[11]。

5.2 四进制相移键控可调谐 SSFBG 编/解码器

利用 FBGs 折射率随温度变化的特性, 通过温控使其折射率产生变化, 进而产生一个附加相移, 来实现相位调制。相移与折射率调制的关系为^[10]

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda_B} \int \delta n_{\text{dc}}(x) dx,$$

式中 $\delta n_{\text{dc}}(x)$ 为有效直流折射率的附加变化, 利用这种方式可以产生连续相位分布。若将相移设为 $k\pi/4$ ($k = 0, 1, 2, 3$), 即可实现 QPSK 调制。

2007 年, Zhang 等^[10] 利用可调谐的连续相移 SSFBG 完成了 16 信道的系统实验, 通过在 FBG 上等间隔放置一些钨丝, 给钨丝通入电流加热来调谐 FBG 的相移, 产生连续相位分布。与离散相移器件相比, 连续相移器件对输入信号的脉宽具有更大的容量, 所以能节约带宽, 变址容易, 但是由于光纤光栅对温度和应力的变化非常敏感, 故其精度不易控

制,且当码长继续增加时有一定的困难。

6 结 论

介绍了基于 OFDL 和 FBGs 的可调谐编/解码器,灵活的可调谐编/解码器是 OCDMA 系统需要研究的主要问题之一。OCDMA 技术有着广阔的应用前景,从现阶段的情况来看,基于 FBGs 和 SSFBG 的可调谐编/解码器显示了其在未来宽带接入网中良好的应用前景。可调谐光编/解器是实现 OCDMA 的重要部件,如何构造性能优良的光地址码,以及用这些光地址码对要传输和交换的数据进行光的编/解码,是 OCDMA 走向实际应用需要解决的关键问题。

参 考 文 献

- 1 Stock A, Sargent E H. The role of optical CDMA in access networks[J]. *IEEE Commun. Mag.*, 2002, **40**(9): 83~87
- 2 Li Chuanqi, Sun Xiaohan *et al.*. Analysis of the net-structure and key-apparatus of fiber-optic networks[J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(3): 326~333
李传起,孙小茜等 OCDMA 系统组网技术和核心部件的分析研究[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(3): 326~333
- 3 Dong Haifeng. New development of OCDMA communication technology[J]. *Photon Technology*, 2003, (1): 52~57
董海峰. OCDMA 通信技术及其新发展[J]. *光子技术*, 2003, (1): 52~57
- 4 Yin Xiaoli, Wang Yu, Lin Shu *et al.*. OCDMA encoder/decoder based on fiber Bragg grating [J]. *Optical Communication Technology*, 2008, **29**(3): 29~31
尹霄丽,王宇,林舒等. 基于光纤布拉格光栅的光 CDMA 编/解码器[J]. *光通信技术*, 2008, **29**(3): 29~31
- 5 Jackson K P, Newton S A, Moslehi B *et al.*. Optical fiber delay line signal processing [J]. *IEEE Trans. Microwave Theory Technology*, 1985, **MTT33**: 193~210
- 6 Erdogan T. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 7 Djordjevic I B, Vasic B. Novel combinatorial constructions of optical orthogonal codes for incoherent optical CDMA systems [J]. *Lightwave Technology*, 2003, **21**(9): 1869~1875
- 8 Set S Y, Dabarsyah B, Goh C S *et al.*. A widely tunable fiber bragg grating with a wavelength tenability over 40 nm[C]. OFC 2001, 2001, 1-MC4_1~MC4_3
- 9 Taro Hamanaka, Xu Wang, Naoya Wada *et al.*. Ten-user truly asynchronous gigabit OCDMA transmission experiment with a 511-chip SSFBG en/decoder[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 95~102
- 10 Zhang Z W, Tian C, Petropoulos P *et al.*. Distributed-phase OCDMA encoder/decoders based on fiber Bragg gratings[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2007, **19**(8): 574~576
- 11 Wang X, Kataoka N, Wada N *et al.*. Flexible 10 Gb/s, 8-user DPSK-OCDMA system with 16×16 ports encoder and 16 level phase-shifted SSFBG decoders [C]. OFC/NFOEC '08, USA, 2008
- 12 The P C, Petropoulos P, Ibsen M *et al.*. A comparative study of the performance of seven-and 63-chip optical code-division multiple-access encoders and decoders based on superstructured fiber Bragg gratings[J]. *Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9): 1352~1365

2008 年度“大珩杯”*Chinese Optics Letters* 优秀论文名单

论 文 题 名	作 者	发表时间
Approximate formulas of temperature and stress distributions and thermal induced effects in a heat capacity slab laser	董 玥; 祖继锋; 侯立群等	2006
Study on silicon micro-resonators by using a novel optical excitation and detection apparatus	刘英明; 王向朝; 王学锋	2006
Study on the interaction of anticancer drug mitoxantrone with DNA by fluorescence and Raman spectroscopies	汤玲娟; 孙真荣; 郭建宇等	2006
Diode pumped injection seeded Nd:YAG laser	周 军; 余 婷; 毕进子等	2006
Diode-pumped CW Tm:GdVO ₄ laser at 1.9 μm	李玉峰; 姚宝权; 王月珠	2006
High efficient diode-pumped Tm:YAP laser at room temperature	李玉峰; 姚宝权; 王月珠等	2007
Study on the noise from multiple reflections in the high power attenuation system	李小燕; 朱健强	2007
Simple Strehl ratio based method for pupil phase mask's optimization in wavefront coding system	张文字; 陈燕平; 赵廷玉等	2006
High power single-mode large-mode-area photonic crystal fiber laser with improved Fabry-Pérot cavity	李 康; 王屹山; 赵 卫等	2006
Restoration of solar and star images with phase diversity-based blind deconvolution	李 强; 廖 胜; 魏宏刚等	2007