

光码分多址中编解码器和阈值器件的研究

周 诤¹ 李传起² 朱迎春¹

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

摘要 介绍了光码分多址(OCDMA)系统的相关进展。论述了基于光纤光栅的二维非相干 OCDMA 系统和相干 OCDMA 系统编解码器,分别采用光纤光栅阵列和超结构光纤光栅作为编解码器,有可能应用于实用系统。并分析了新出现的等效相移超结构光纤光栅制作技术,该技术只需采用亚微米精度的制作工艺,可大幅降低编解码器的制作成本。重点讨论了非线性光学环境、色散平坦光纤、周期极化铌酸锂波导三种光阈值器件的工作原理及性能对比。光阈值器件可起到压缩解码信号脉宽,消除多址干扰,优化检测性能,提高误码率(BER)性能的作用。相干 OCDMA 系统能实现超长的多极性光学码,而二维非相干 OCDMA 系统重构性好,可调谐,使得这两种系统方案将有潜力应用在未来宽带接入网中。

关键词 光通信; 光码分多址; 光阈值器件; 编解码器; 等效相移; 超结构光纤光栅

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200929s1.0017

Investigation on Optical Code-Division Multiple Access En/Decoder and Optical Threshold Devices

Zhou Xu¹ Li Chuanqi² Zhu Yingchun¹

¹ College of Electronic & Information Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China
² College of Physics & Maths, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China

Abstract Recent progresses of optical code-division multiple access (OCDMA) system are introduced. En/decoders based on fiber Bragg grating (FBG) for 2-dimensional incoherent OCDMA and coherent OCDMA are addressed, using fiber grating arrays and superstructured FBG (SSFBG) as en/decoders respectively, which is most likely to be practical. A novel equivalent phase shift SSFBG is analyzed, the method requires only submicrometer precision to be in control, which reduces the production cost of en/decoder greatly. The principle and comparison of three kind of optical threshold devices, such as nonlinear optical loop mirror, periodically-poled lithium niobate waveguide and dispersion-flattened fiber are emphatically discussed. Optical threshold devices can compress the decoding signal, eliminate the multiple access interference, optimize the detection capability and improve the bit error rate (BER) performance. Coherent OCDMA can produce extremely long and multipolar optical code, while incoherent OCDMA is tunable and have good reconstruction, these two schemes will have great potential application for broadband access network in future.

Key words optical communications; optical code-division multiple access; optical threshold devices; encoder/decoder; equivalent phase shift; super-structured fiber Bragg grating

1 引 言

光码分多址(OCDMA)具有支持完全异步传输、网络容量有弹性、用户接入方便、信息安全性高、

抗干扰性强等优点,被认为是下一代宽带接入网的最佳解决方案。随着光学器件制作技术的不断发展和光纤入户服务的推广,OCDMA 技术受到越来越

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

作者简介: 周 诤(1985—),男,硕士研究生,主要从事光码分多址编解码器方面的研究。E-mail:zhouxusean@126.com

导师简介: 李传起(1964—),男,博士,教授,主要从事光纤通信光码分多址方面的研究。E-mail: leecq@nuist.edu.cn

多的关注。其中二维非相干扩时 OCDMA 系统和相干扩时/跳频 OCDMA 系统被认为最有可能应用于实用系统^[1,2]。编解码器实现方案在 OCDMA 技术的研究中占有举足轻重的地位,直接影响到系统的成本、用户容量、系统误码率等,是 OCDMA 系统能否实用化的关键。光纤布拉格光栅(FBG)编解码器具有体积小、插入损耗低、成本低、易集成、可灵活变化等优点,成为目前的研究热点。二维非相干 OCDMA 系统的编解码器主要采用了布拉格光栅阵列(FBGs)编解码器,国内外相关实验证明了其对光信号编解码的可行性^[3~5]。近年来,基于超结构光纤光栅(SSFBG)的时域相位编解码器以其产生超长光学码的能力和低插入损耗受到广泛关注。应用 SSFBG 编解码器的相干 OCDMA 系统可以使用双极性码或多极性码,因而相关性更好,具有更大的用户能量。P. C. Teh 等^[6,7]通过实验论证了相位编解码器的可行性,相应传输系统实验也取得了相应的成功。其后高反射率高性能的 SSFBG 编解码器被成功制作,并且实现了 10 用户数,码片速率高达 640 Gchip/s 的完全异步传输系统^[8,9]。值得注意的是,我国自主研发的一种等效相移技术,通过对取样光栅周期进行啁啾,可制作出与真实相移 SSFBG 性能相当的编解码器,并且大大降低对位移控制精度的要求,使得制作成本更低,更利于实用化^[10,11]。在高速 OCDMA 系统的光检测端,需要在码片速率级别消除多用户干扰,且不能影响系统的异步传输,因此光阈值器件作用十分关键。本文主要分析了布拉格光栅阵列和超结构光纤光栅编解码器,以及一种新的等效相移技术。重点讨论和比较了非线性光学环境、色散平坦光纤、周期极化铌酸锂波导三种光阈值器件。对比分析了二维非相干 OCDMA 系统和相干 OCDMA 系统的优势与缺陷。

2 光纤光栅编解码器

2.1 FBGs 扩时/跳频编解码器

二维非相干 OCDMA 系统是利用时间和波长二维分割实现的混合编码方案。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,能更有效地抑制 OCDMA 系统中的多用户干扰。因此二维非相干系统更适合于高性能、多用户、接入灵活的全光接入网。图 1 为 FBGs 扩时/跳频编解码器工作原理。FBGs 具有可调性好,重构性强等特点。

FBG 对特定波长的光进行反射,实现了对频率

的选择性。布拉格光栅的间距使得各反射脉冲在时域上扩展,间距的变化可实现时域上的编码。FBGs 编解码器设计的关键在于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。但实验证明光栅间距所限制的速率并非系统的最大传输速率^[5]。

在此系统中还有几点问题需要考虑:1) 编码器和解码器中的光栅间距必须一致,严格控制误差,否则会导致解码信号的劣化、解码脉冲展宽及信号强度下降;2) 在高信息速率和波长间隔较大的情况下,色散效应会严重影响解码信号的质量,必须考虑到色散补偿问题^[4]。

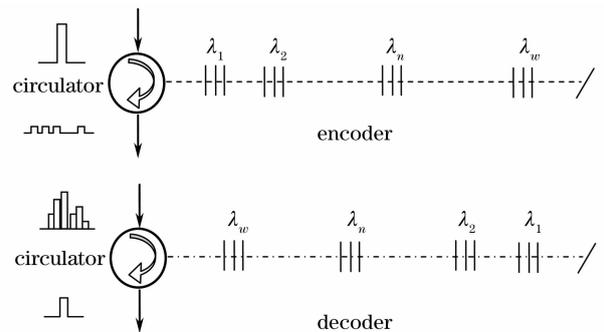


图 1 布拉格光栅阵列编解码器原理图

Fig. 1 Principle of encoding/decoding based on Bragg grating arrays

2.2 SSFBG 时域相位编解码器

相干 OCDMA 系统根据光脉冲序列的相位变化进行编解码,光学码可以双极性(+1, -1)甚至多极性地工作,因而有较好的相关特性。SSFBG 编解码器是基于取样光纤光栅设计的。取样光栅是对均匀光栅按照特定的周期采样函数在空间上采样而成的,可认为是多个性能相近的光栅周期性的组合。SSFBG 编解码器根据系统所采用的编解码方式和地址码的比特模式确定不同的相移值,并在不同段间插入相应的相移。当超短光脉冲射入后,SSFBG 编码器可以产生一系列相干光脉冲,这些脉冲的相位由 SSFBG 编码器中的相移模式所决定。图 2 为双极性光学码产生的工作原理。需注意的是,SSFBG 编码器所产生的光脉冲序列并非对一个特定波长的多次反射,而是在整个光栅内多次反射的综合作用,在频域较宽范围内对光脉冲序列的相位附加了“0”或者“ π ”的信息。

作为最有可能投入实用化的两种 OCDMA 系统方案,一维相干 OCDMA 和二维非相干 OCDMA 各自具有其优势。表 1 为两种 OCDMA 系统及编

解码器的性能比较。SSFBG 编解码器可以方便地实现双极性编码,甚至多极性编码,并且具有产生超长光学码的能力。相对于单极性编码,能降低通道

间多用户串扰,增加用户数,达到更好的数据速率。但 FBGs 成本低廉,可重构性强,当有优良的 OCDMA 二维码时,可获得良好的性能。

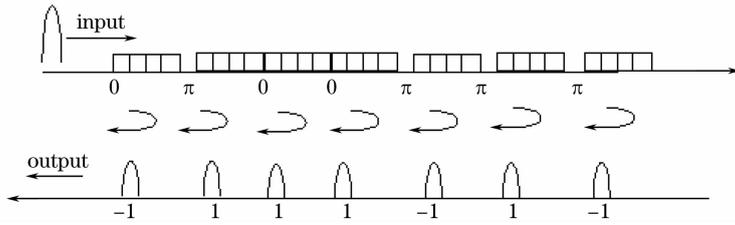


图 2 双极性光学码产生的工作原理

Fig. 2 Working principle of the generation of the bipolar optical phase coding

表 1 两种 OCDMA 系统及编解码器性能比较

Table 1 Performance comparison of two OCDMA schemes

OCDMA scheme	Power efficiency	Data speed	En/Decoder	Reconstruction Ability for long code	Ability for long code	Cost
Incoherent TS/FH	Low	Low	FBGs	Good	Low	Low
Coherent TS	High	High	SSFBG	Bad	High	Midding

2.3 等效相移技术

等效相移技术通过改变采样布拉格光栅(SBG)的取样周期,在一阶($m = \pm 1$)信道引入等效相移,产生与真实相移 SSFBG 相当的编解码性能^[10]。均匀采样光纤光栅可以等效为无穷多个鬼栅的叠加,如果在采样光栅的某个位置 Z_0 处光栅采样周期增加了 ΔP ,会导致采样函数和 m 级鬼栅的折射率均发生变化。当 ΔP 和 m 取值合适时,即可以在此鬼栅中引入特定的相移。由此可知通过改变光栅采样周期 P ,可以使相位变化带有码字的信息。两相和四相等效相移 SSFBG 编解码器的可行性及基于等效相移 SSFBG 编解码器的光码分多址传输系统均已被实验所验证^[10,11]。

真实相移超结构光纤光栅通常采用逐点写入法,需要纳米级精度的光栅制作设备,工艺要求高,因此无法实现成本大幅度降低以及应用上的普及。而等效相移技术制作 SSFBG 编解码器只需采用亚微米精度的制作工艺,却可以达到与真实相移超结构光纤光栅相当的性能,降低了 SSFBG 编解码器的制作成本,更利于 OCDMA 系统的实用化,并且是我国自主创新的技术。

3 光阈值器件

无论何种系统方案,在理想的 OCDMA 网络中,信息速率极高,码片速率达到数百 Gchip/s。接收机通常无法满足在此高速率条件下的检测要求,会导致系统误码率的性能下降。所以需要阈值器件在此高速率条件下消除多用户干扰,提高误码率性能^[2]。

3.1 非线性光学环境

非线性光学环境(NOLM)是根据光纤的萨尼亚克环形干涉原理制成的。非线性光学环境最初是由 N. J. Doran 提出,根据光学克尔效应,光纤环内两路反向传播的光束绕环一周后产生不同的相移。两束光波的相位差 $\Delta\Phi = (1 - 2x)\nu P_0 L$ 与输入光功率 P_0 ,耦合器耦合比 x ,光纤的非线性系数 ν 以及长度 L 有关。当 $\Delta\Phi = \pi$ 时,自相位调制引起的非线性相移就会使输入信号透射。非线性光学环境的透射率和 P_0 有关,具有非线性开关功能:反射低强度信号而透射高强度信号。这样经过非线性光学环境后,解码输出信号高强度的自相关峰可以透射,而低强度的自相关旁瓣和互相关峰被滤掉^[12]。同时光学环境中光纤的非线性效应会使信号脉冲被压缩。

NOLM 被应用到 OCDMA 系统的光检测器中,能在码片速率级别对解码脉冲信号的性能进行改善和消除干扰噪声。图 3 为非线性光学环境的结构图。在 NOLM 前一般需要一个掺铒光纤放大器(EDFA),将解码信号的功率增大到所需的大小,使

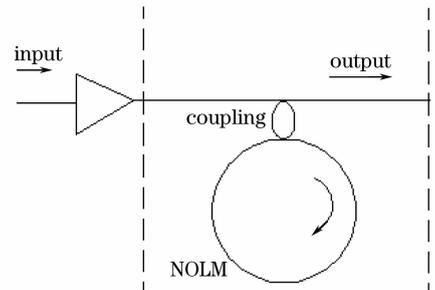


图 3 非线性光学环境结构图

Fig. 3 Structure of nonlinear optical loop mirror

得 NOLM 能够正常工作。已通过理论和实验共同验证了 NOLM 可以将解码信号的输出脉冲压缩,使其能再次进行光编码。还可以抑制脉冲的基座噪声,消除 OCDMA 系统中的多用户干扰噪声^[13,14]。

3.2 色散平坦光纤

超连续谱(SC)是超短光脉冲在色散平坦光纤(DFF)中频谱被展宽的一种现象。利用 DFF 中产生超连续谱的现象可以制作 OCDMA 系统的阈值器件^[15]。图 4 为基于 DFF 的阈值器件的结构图和原理图。解码信号首先被 EDFA 放大到一个合适的水平,再进入到 DFF 中。匹配解码信号具有高强度的自相关峰和良好定义的脉冲形状,能够在 DFF 中产生超连续谱。而非匹配解码信号(即多用户干扰,MAI)只有低的互相关峰值并且被展宽在很长的时域内,从而无法产生超连续谱。信号通过光带通滤波器(BPF),只有超连续谱信号能够通过,原始信号则被阻拦。因此,在通过带通滤波器之后,多用户干扰被消除,并重新得到解码信号。但需要注意的是,相比于 NOLM,解码信号的波长在通过此阈值器件后发生了漂移,并且此方案的工作功率更低。

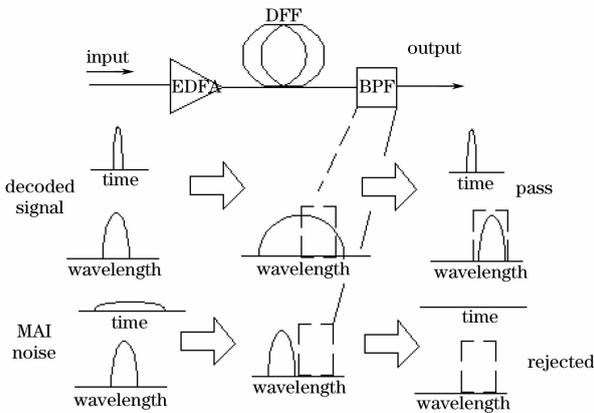


图 4 DFF 阈值器件结构及原理图

Fig. 4 Structure and principle of optical threshold devices based on dispersion flattened fiber

3.3 周期极化铌酸锂波导

基于周期极化铌酸锂(PPLN)的全光频率转换技术受到越来越多的关注。利用其原理可以制作出应用于 OCDMA 系统的阈值器件。图 5 为基

于 PPLN 的阈值器件的结构及原理图。输入信号和抽运光经过 EDFA,再通过偏振控制器(PC),在 PPLN 波导混合,经 BPF 后输出差频光信号(DFG)。此阈值器件中,需要调整 PPLN 的相位匹配波长,使其与解码信号的中心波长(λ_{signal})一致。当具有高功率的匹配解码信号进入 PPLN 波导时,会在 $\lambda_{\text{signal}}/2$ 处产生二次谐波(SHG)。同时输入的抽运光(λ_{pump})和二次谐波混合,发生差频效应(DFG),在 $2\lambda_{\text{signal}} - \lambda_{\text{pump}}$ 处产生差频光信号。最终通过带通滤波器,将差频光信号输出,从而消除了多用户干扰^[16]。

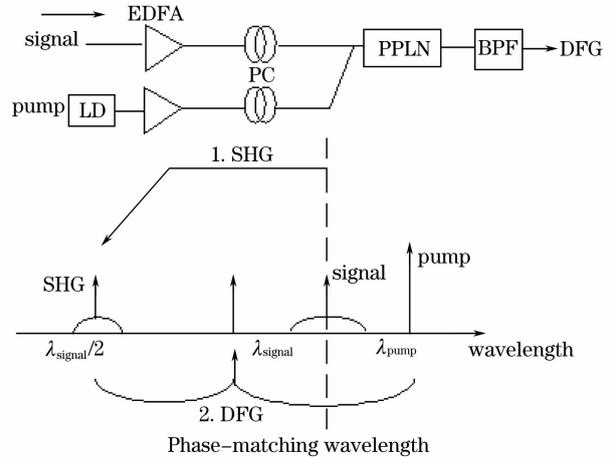


图 5 PPLN 阈值器件结构及原理图

Fig. 5 Structure and principle of optical threshold based on PPLN

不同于 NOLM 和 DFF(SC),此方法中输出信号会被展宽,但具有更低的工作功率和更紧凑的构造,体积更小。但是基于 PPLN 的装置具有偏振依赖性,从而会导致额外的偏振模式噪声,这个问题在异步系统中会变得更加严重。与 DFF(SC)相同的是,此方案也会产生波长的漂移。

阈值器件是 OCDMA 系统实用化的关键之一。以上三种阈值器件均能在码片速率级别消除多用户噪声。但是它们各自具有自己的优缺点,因此根据实际情况选择合适的阈值器件非常重要。表 2 为三种光阈值器件的性能对比以及在实验中的参数。随着新技术的应用和制作工艺的提高,将会不断有性能更好的阈值器件出现。

表 2 三种光阈值器的性能对比

Table 2 Performance comparison of three kinds of optical threshold devices

Optical threshold device	Data speed /GHz	Pulse width	Work power	Bulk	Pulse shape	Polarization	Wavelength shift
NOLM ^[13]	1.25~2.5	2.5 ps	High	Big	Compress	Independent	No
DFF(SC) ^[15]	1.25	2 ps	Midding	Big	Compress	Independent	Yes
PPLN ^[17]	2.5	400 fs	Low	Small	Spreading	Dependent	Yes

4 结 论

研究了布拉格阵列编解码器和 SSFBG 编解码器,并介绍了一种新的等效相移 SSFBG 编解码器制作方法。分析和对比了三种光阈值器件的工作原理和性能特点。作为最有希望投入实用化的两种 OCDMA 方案,二维非相干 OCDMA 系统虽然在信息速率、产生超长光学码的能力上有所欠缺,但其重构性好,并具有可调谐的特点,是其走向实用的优势所在。相干扩时 OCDMA 系统能实现超长的多极性光学码,其码字相关性能良好,但其设备复杂,成本较高,在高速情况下差拍噪声干扰严重。两种系统均具有实用优势和应用缺陷。随着对光器件研究的深入和制作工艺的进步,OCDMA 在未来宽带接入网中显示出良好的应用前景。

参 考 文 献

- Li Chuanqi, Sun Xiaohan, Zhang Mingde *et al.*. Analysis of the net-structure and key-apparatus of fiber-optic networks [J]. *Chin. J. Quant. Electron.*, 2005, **22**(3): 326~333
李传起,孙小茜,张明德等. 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
- Wang Xu, Wang Xuhua, Sun Yanbin *et al.*. Recent progresses of OCDMA networks and related devices [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(2): 451~457
王旭,王旭华,孙燕斌等. OCDMA 系统和相关器件研究进展[J]. 半导体光电, 2007, **28**(2): 451~457
- L. Tancevski, I. Andonovic. Wavelength hopping/time spreading code division multiple access systems [J]. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(17): 1388~1390
- X. Wang, K. T. Chan, Y. Liu *et al.*. Novel temporal/spectral coding technique based on fiber Bragg gratings for fiber optic CDMA application[C]. OFC/IOOC '99, San Diego, CA, USA, 1999
- Fu Xiaomei, Yu Jinlong, Li Enbang *et al.*. The study of time/frequency encoding optical code division multi-access communication with Bragg grating arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7): 961~964
付晓梅,于晋龙,李恩邦等. 利用布拉格光栅阵列实现二维光码分多址的研究[J]. 光学学报, 2004, **24**(7): 961~964
- P. C. Teh, P. Petropoulos, M. Ibsen *et al.*. A comparative study of the performance of seven- and 63-chip optical code-division multiple-access encoders and decoders based on superstructure fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(9): 1352~1365
- P. C. Teh, M. Ibsen, J. H. Lee *et al.*. Demonstration of a four channel WDM/OCDMA system using 255-chip 320Gchip/s quaternary phase coding gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(2): 227~229
- X. Wang, K. Matsushima, A. Nishiki *et al.*. High reflectivity superstructured FBG for coherent optical code generation and recognition [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(22): 5457~5468
- Taro Hamanaka, Xu Wang, Naoya Wada *et al.*. Ten-user truly asynchronous gigabit OCDMA transmission experiment with 511-chip SSFBG en/decoder [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(1): 95~102
- Y. Dai, X. Chen, D. Jiang *et al.*. Equivalent phase shift in a fiber Bragg grating achieved by changing the sampling period [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(10): 2284~2286
- Lu Lin, Wu Weilei, Fang Tao *et al.*. 2.5 Gbit/s 60 km optical code division multiple access transmission experiment based on equivalent phase shift super structured fiber Bragg grating en/decoder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 418~421
卢麟,吴伟磊,方涛等. 基于等效相移超结构光纤光栅编解码器的 2.5 Gbit/s 60 km 光码分多址传输实验 [J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 418~421
- Chen Xiaogang, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Suppression of interchannel interference noise in 40 Gb/s optical code division multiplexing system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1570~1574
陈小刚,黄德修,元秀华. 抑制信道间干涉的 40Gb/s 光码分复用系统 [J]. 光学学报, 2007, **27**(9): 1570~1574
- J. H. Lee, P. C. Teh, P. Petropoulos *et al.*. A grating-based OCDMA coding-decoding system incorporating a nonlinear optical loop mirror for improved code recognition and noise reduction [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(11): 36~46
- Xiaogang Chen, Dexiu Huang, Xiuhua Yuan *et al.*. Experimental study on all optical coding and decoding of short pulses at 40 Gbit/s [J]. *Microwave and Opt. Technol. Lett.*, 2007, **49**(10): 2409~2412
- X. Wang, N. Wada, T. Hamanaka *et al.*. Dispersion-flattened-fiber based optical threshold for multiple-access interference suppression in OCDMA system [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**: 5499~5505
- T. Hamanaka, X. Wang, N. Wada *et al.*. Compound data rate and data-rate-flexible 622 Mb/s~10 Gb/s OCDMA experiments using 511-chip SSFBG and cascaded SHG-DFG-based PPLN waveguide optical threshold [J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2007, **13**(5): 1516~1521
- Z. Jiang, D. S. Seo, S. D. Yang *et al.*. Four-user 10-Gb/s spectrally phase-coded O-CDMA system operating at ~30 fJ/bit [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 705~707