

基于重构等效啁啾制作光纤光栅编解码器的 光码分多址系统实现*

张 邨[†] 戴一堂 孙 杰 张冶金 谢世钟

(清华大学电子工程系, 北京 100084)

(2006 年 12 月 27 日收到, 2007 年 5 月 24 日收到修改稿)

在光码分多址(OCDMA)系统中, 光纤布拉格光栅(FBG)编解码器是极具竞争力的核心器件, 满足光接入网低成本、高性能的要求. 将重构等效啁啾(REC)技术制作的FBG作为编解码器运用于OCDMA系统. 实验采用一对511个码片、编码速率为 $6.4 \times 10^9/s$ 的FBG编解码器, 在编码匹配的情况下能恢复出输入信号, 与编码非匹配的情况相比获得了8 dB的功率增益. 这为REC技术制作的编解码光栅在OCDMA系统中的应用提供了实验依据.

关键词: 光纤布拉格光栅, 光码分多址, 重构等效啁啾, 编解码器

PACC: 4281H, 4280S, 4280R, 4281,

1. 引 言

光码分多址(OCDMA)是一种有别于光时分复用以及光波分复用技术的下一代宽带光网络接入技术. 在OCDMA传输系统中, 多个用户通过各自的光识别码^[1]能够在同一个网络中传播. OCDMA技术能够实现资源动态分配、弹性软容量、异步接入和全光网络处理, 能够在同一网络中提供可变用户速率和服务质量的业务, 是应用于未来的高速全光接入网的重要技术之一. 同时, OCDMA的传输信号是一种类似于噪声的高速模拟光信号, 无法采用常规方式进行数据恢复或利用存储介质和高速计算机进行存储、分析和破译^[2]. 因此, OCDMA也是一种重要的高安全性和高速率的通信方式, 在保密通信领域中有重要的应用前景.

在一个OCDMA的传输系统中, 每个用户至少需要一个复用的信道, 而每一个复用信道的接入都需要一对编解码器. 因此, 未来OCDMA传输系统的主要成本将来自OCDMA编解码器. 目前日本冲电气工业株式会社(OKI)等一些企业或研究机构虽然可以提供达到511码片的高性能OCDMA编解码

器^[3], 但采用的精密纳米制作技术无法实现成本大幅度降低以及应用上的普及. 本文使用的是本实验室自主研发的重构等效啁啾(REC)技术制作的光纤布拉格光栅(FBG)^[4], 依托微米级的工艺, 同样实现511码片的OCDMA编解码器, 满足光接入网要求的低成本、高性能的特点.

2. OCDMA 编解码器设计

如图1所示, 在基于OCDMA的多用户全光接入网中, 核心点是用户端的编解码器. 采用REC技术制作的采样布拉格光栅(SBG), 来代替目前较多采用的超结构光纤布拉格光栅(SSFBG), 即是用采样上的等效变化来代替实际模板的相移.

在通常的SSFBG的编解码器中, 调制后的相位可表示为

$$\varphi(z) = \varphi_k \quad (kL \leq z \leq (k+1)L), \quad (1)$$

式中 k 是整数, 且 $0 \leq k < N-1$, 其中 N 是码片总数; L 是每个码片的长度. 为了简单起见, 我们令SBG的周期 $P = L/M$, 其中 M 为整数. 这样可以将坐标 z 表示为

$$z = kL + lP + x$$

* 国家重点基础研究发展规划(批准号: 2003CB314907)国家自然科学基金(批准号: 90604026, 90104003)和清华大学信息科学与技术国家重点实验室基础研究基金资助的课题.

[†] E-mail: zhang-ye02@mails.tsinghua.edu.cn

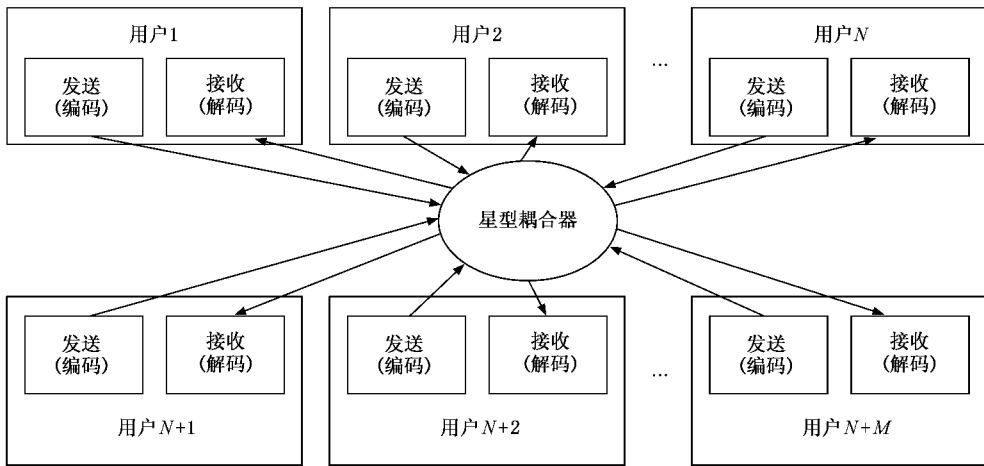


图1 多用户网络结构示意图

$$= (kM + l)P + x, \quad (2)$$

式中 l 是整数,且 $0 \leq l < M$,而 x 满足 $0 \leq x < P$ 。由以上所述可知,SBG 总采样数为 $M \times N$ 。将(1)(2)式代入等效相移的近似解

$$z_k = z_k^0 - \frac{\theta}{2\pi}P, \quad (3)$$

就可以得到各个采样中心点的位置

$$z_{kM+1} = \left(kM + l + \frac{\varphi_k}{2\pi} \right) \frac{L}{M}. \quad (4)$$

由(4)式可知,由于非零的 φ_k 引起 SBG 采样位置的移动,即产生了等效的相位移动。

在 SBG 设计中,一个特殊的情况是采用二进制相位编码,即 φ_k 只取 0 和 π ,这时候 -2 级信道的等效相移为

$$\begin{aligned} \varphi_{-2}(z) &= \frac{-4\pi f(z)}{P} \\ &= 2\varphi(z) \\ &= \begin{cases} 0, \\ \pi. \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

即 -1 级信道的两个相邻信道(0 级和 -2 级)的等效相移都为零,两个子光栅都是均匀的 FBG。如果所需的码片数 N 较大,SBG 较长,那么这两个相邻信道就会很窄,不会对 -1 级信道产生干扰,所以这时候采样周期 P 就可以取得比较大。仿真和实验验证表明,当 $P = L$,即 $M = 1$ 时仍然可以得到理想的编码、解码效果,这时

$$z_k = \left(k + \frac{\varphi_k}{2\pi} \right) L. \quad (6)$$

因此,SBG 的段数和 SSFBG 的段数相等,却无需像 SSFBG 那样做真实的相移。

图 2(a)(b)是 SSFBG 的相位示意图,不同的码片具有不同的相位,因此需要纳米量级的控制精度来实现;而图 2(c)(d)是基于 REC 技术制作的光纤布拉格光栅(REC-FBG)的码片采样位置示意图,各个码片的相位只要通过控制各个码片所在的位置即可等效地实现,这个位置控制只需要微米量级的精度。正是由于 REC 技术在实验仪器上的优势,基于普通微米级的实验装置可以制作码长为 511 个码字或更长的 OCDMA 编解码器^[5]。

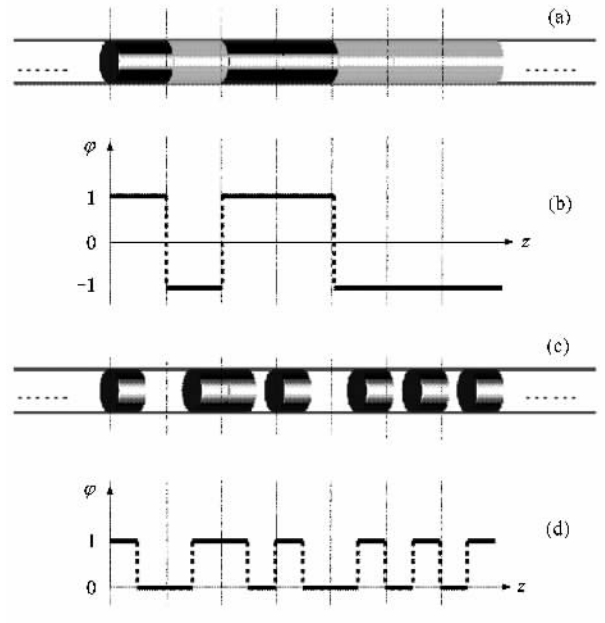


图2 SSFBG 相位变化与 REC-FBG 采样位置间的对应关系 (a)(b)是 SSFBG 的相位变化 (c)(d)是 REC-FBG 的采样位置

设计制作 511 个码片的 SBG,码片长度 L 和编码速率 R 的关系为^[6]

$$L = \frac{c}{2n_{\text{eff}}R} \quad (7)$$

设计的码片长度为 $L = 161 \mu\text{m}$, 则编码速率为 $R = 6.4 \times 10^9/\text{s}$.

OCDMA 编解码器采用直接扩频的编码方式、Gold 序列、511 位的码字. SBG 的每个采样的交流折射率调制都为高斯型, 占空比为 0.5. 编解码器的测试方案如图 3 所示.

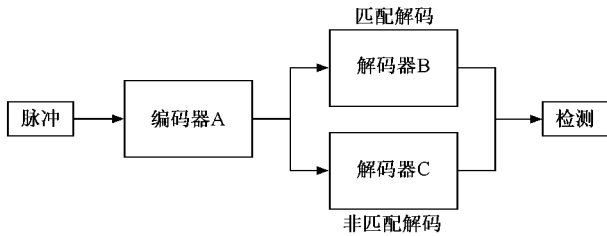


图 3 编解码器的测试方案框图

3. OCDMA 编解码器实验及其结果分析

采用紫外曝光、相位掩模模板的工艺^[7]在载氢的光纤上写入光栅, 由 REC 技术制作、并经过测试得到的 OCDMA 编解码光栅反射谱如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 两个尖峰分别为 0 级峰与 -2 级峰, 而中间为 -1 级峰. 此外, 还可以从图 4 中观察到左右两个光谱非常相似, 这正说明不同编解码器对应的光谱在 -1 级的类噪声信号无法采用常规方式进行破译, OCDMA 系统是一种很好的保密通信方式.

OCDMA 系统实验的设计如图 5 所示, 其中由可调谐频率发生器提供给超短脉冲源外触发的时钟信号, 同时又作为光示波器的触发. 实验中选择 5 GHz 的工作频率, 将编码光栅和解码光栅分别通过光环形器与光路相连. 在通过编码光栅后, 连接一个掺铒光纤放大器 (EDFA), 并进行一定距离的传输. 在接收端由不同的解码光栅接收信号, 解调出来的信号再经过一个 EDFA, 可用光示波器测量解码后的信号.

时域脉冲宽度为 2 ps 的超短脉冲源的时域和频域信号如图 6 所示. 输入脉冲被编码器 A 编码, 经过普通的单模光纤传输后, 分别被解码器 B 匹配解码和解码器 C 非匹配解码, 如图 3 所示. 在此依据文献 [8], 用 η_{sw} 表示匹配解码中信号功率与噪声功率的峰值比, 用 η_{sc} 表示匹配解码的信号功率与非匹

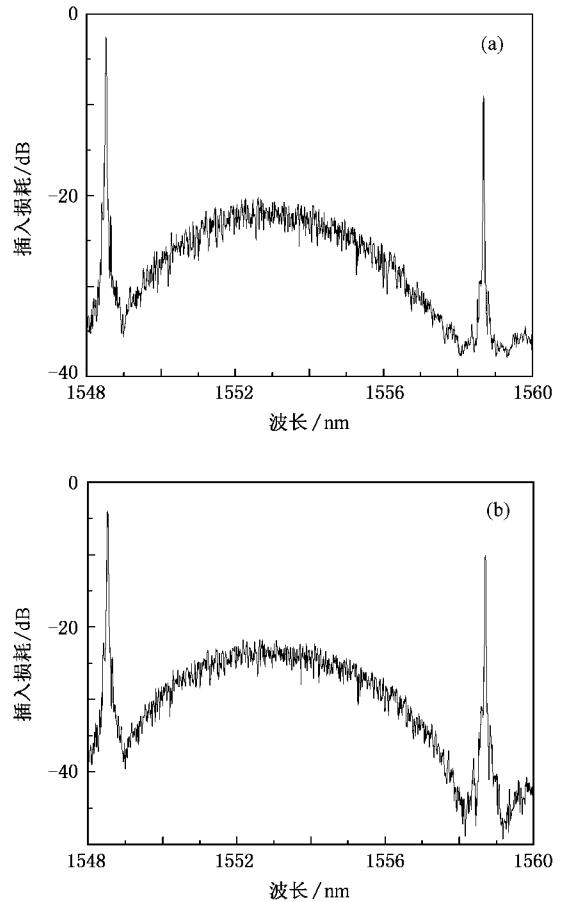


图 4 一对匹配的编解码光栅的反射谱 (a) 编码光栅, (b) 解码光栅

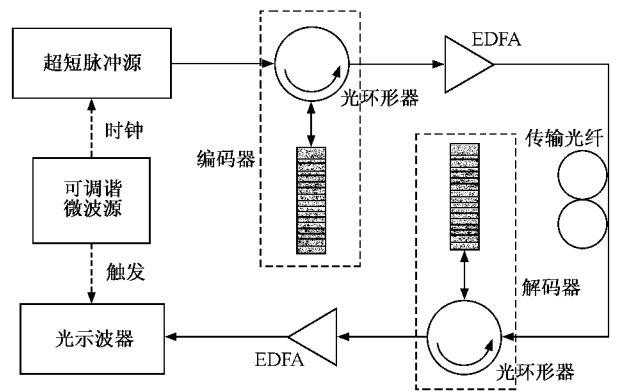


图 5 实验系统原理示意图

配解码的噪声功率的峰值比. 经过解码器后的信号如图 7 所示, 从图中的功率峰值可以计算出 $\eta_{\text{sw}} = 8.4 \text{ dB}$, $\eta_{\text{sc}} = 8.2 \text{ dB}$. 实验结果表明, 利用 REC 技术得到的光栅编解码器同样可以有一定的编码、解码效果, 用此方法设计和制作的 OCDMA 编解码器能够实现简单的单用户一对一传输.

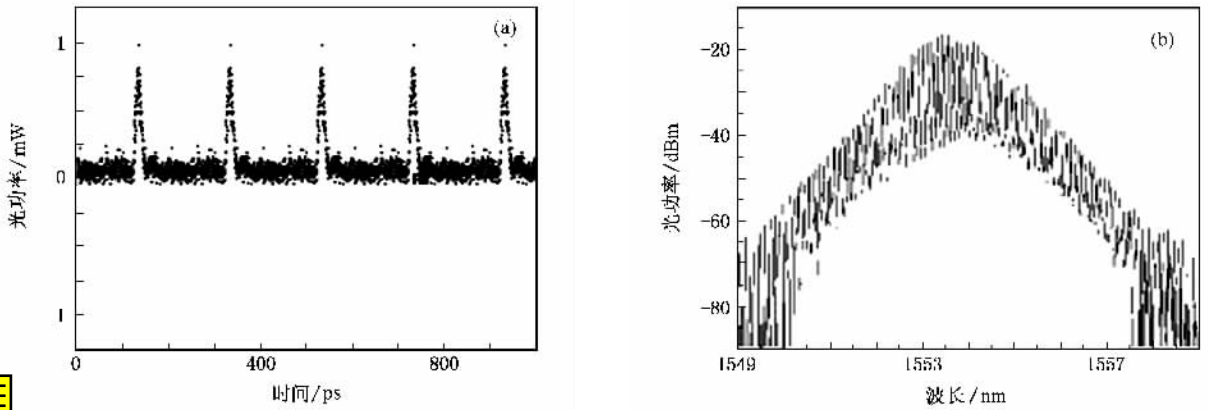


图 6 2 fs 超短脉冲源的时域和频域信号 (a)时域谱 (b)频域谱

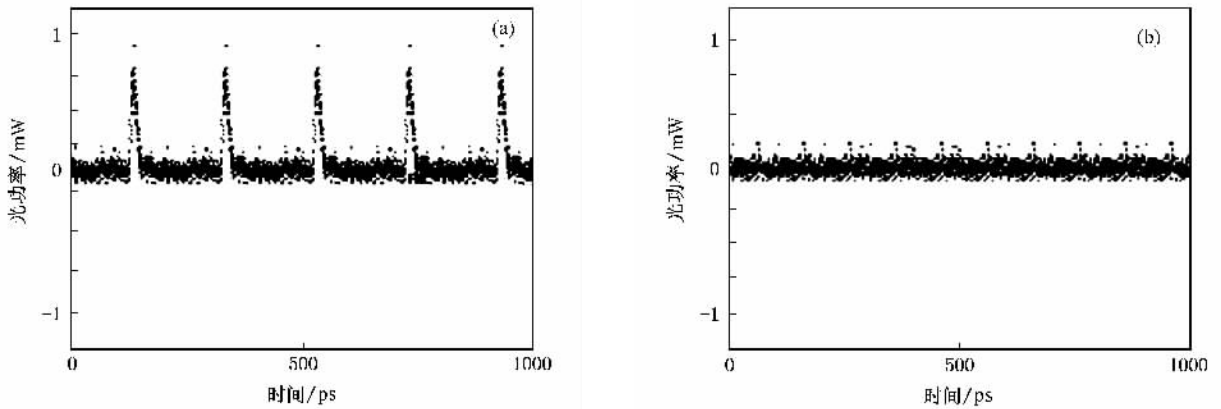


图 7 经过光栅编解码器后的时域波形 (a)匹配光栅 (b)非匹配光栅

4. 结 论

本文针对 REC 技术制作了 511 码长的 FBG 光栅编解码器,进行了系统实验.在实验中,编码后的超短脉冲信号分别通过匹配与非匹配的解码光栅进行编解码的对比测试.实验结果表明,在匹配编解码的情况下,此 OCDMA 系统得到了 8 dB 功率增益,从

而初步实现了 OCDMA 的系统传输.

以往采用精密的纳米制作技术的 OCDMA 系统编解码器,由于制作设备的成本较高而难以实现普及.本文运用 REC 技术与微米级的工艺,同样能够实现 511 码片的编解码能力,以满足光接入网的低成本、高性能要求.实验系统能够初步实现编码后的解码信号的恢复,这为基于 REC 技术的 FBG 编解码器在 OCDMA 系统中的应用提供了实验支持.

- [1] Wada N , Kitayama K 1999 *J. Lightwave Technol.* **17** 1758
 [2] Tsuda H , Takenouchi H , Ishii T , Okamoto K , Goh T , Sato K , Hirano A , Kurokawa T , Amano C 1999 *Electron. Lett.* **35** 1186
 [3] Dai Y T , Chen X F , Sun J , Yao Y , Xie S Z 2006 *Opt. Lett.* **31** 1618
 [4] Dai Y T , Chen X F , Xia L , Zhang Y J , Xie S Z 2004 *Opt. Lett.* **29** 1333
 [5] Dai Y T , Chen X F , Jiang D J , Xie S Z , Fan C C 2004 *IEEE*

Photon. Technol. Lett. **16** 2284

- [6] Dai Y T , Chen X F , Sun J , Xie S Z 2006 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **18** 941
 [7] Wang M G , Wei H , Jian S S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 609 (in Chinese) [王目光、魏 准、简水生 2003 物理学报 **52** 609]
 [8] Wang X , Matsushima K , Kitayama K , Nishiki A , Wada N , Kubota F 2005 *Opt. Lett.* **30** 355

Encoder and decoder of fiber Bragg gratings in optical code division multiple access system based on reconstruction-equivalent-chirp^{*}

Zhang Ye[†] Dai Yi-Tang Sun Jie Zhang Ye-Jin Xie Shi-Zhong

(*Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

(Received 27 December 2006; revised manuscript received 24 May 2007)

Abstract

Fiber Bragg grating (FBG) encoder-decoder is considered as one of the most competent coding components in optical code division multiple access (OCDMA) systems, and high-performance low-cost encoder-decoder is required for its wide application. With the same performance, the reconstruction-equivalent-chirp (REC) technique reduces the complexity of fabrication setup, in which only micron or sub-micron precision control is required in the fabricating process, instead of the nanometer precision of conventional super-structured FBGs (SSFGBs). In this paper, the principle of REC-based encoder-decoders is discussed, and 511 chip $6.4 \times 10^9/s$ encoder-decoders are fabricated. In order to quantitatively evaluate these encoder-decoders, the autocorrelation intensity peak to the maximum wing level ratio and the autocorrelation intensity peak to the maximum cross correlation level ratio are measured in OCDMA system. The experiment results show that these ratios achieved are above 8 dB, which demonstrates the feasibility of the proposed encoder-decoders in practical OCDMA system application.

Keywords : fiber Bragg gratings, optical code division multiple access, reconstruction-equivalent-chirp, encoder-decoder

PACC : 4281H, 4280S, 4280R, 4281

^{*}Project supported by the State Key Development Program for Basic Research of China (Grant No. 2003CB314907), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90604026, 90104003) and the Basic Research Foundation of State Key Laboratory for Information Science and Technology of Tsinghua University, China.

[†] E-mail : zhang-ye02@mails.tsinghua.edu.cn