

文章编号: 1002-2082(2009)02-0313-04

# 基于非均匀取样布拉格光纤 光栅 Interleaver 的设计

张兴娇, 叶志清

(江西师范大学 物理通信与电子学院, 江西 南昌 330022)

**摘要:** 对于光纤通信领域有限的带宽资源, 波分复用与解复用器件 Interleaver 是未来密集型波分复用 (DWDM) 光纤通信网中的关键器件。为此结合非均匀取样光栅 Interleaver 的基本设计原理, 运用耦合模理论和矩阵传输方法对非均匀取样光纤布拉格光栅的传输特性进行了数值模拟计算, 并设计了信道间隔为 0.8 nm 的设计实例, 反射谱峰值均匀达到 80%~95%, 传输通道间隔稳定均匀, 时延和色散均匀, 时延抖动小于 200 ps。

**关键词:** 非均匀取样; 取样布拉格光纤光栅; Interleaver; 矩阵传输方法

中图分类号: TN253

文献标志码: A

## Design of optical Interleaver based on non-uniformly sampled FBG

ZHANG Xing-jiao, YE Zhi-qing

(Institute of Physics Communication & Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

**Abstract:** The Interleaver used in the multiplexer or de-multiplexer is a key device of the future DWDM for the limited bandwidth resources in fiber-optic communication. Based on the coupling-mode theory, the transmission properties of non-uniformly sampled FBGs are numerically simulated with the transfer matrix method. The basic principle of optical Interleaver based on non-uniformly sampled fiber gratings (SFBG) is introduced. The design example, whose channel interval is 0.8 nm and the peak reflectivity is 80%~95%, is presented. The channel intervals are steady and uniform. The delay spectra of each channel are congruous, and the delay dither is less than 100 ps.

**Key words:** non-uniform sampling; sampled Bragg fiber grating; Interleaver; transfer matrix method

## 引言

光纤光栅具有体积小、成本低、与光纤系统兼容性很好、插入损耗低以及光学性能优越等特点, 利用它制作的光学器件在光纤传感和光纤通信领域发挥着越来越重要的作用。在带宽就是资源的时代, 为了充分利用有限的带宽资源, 小波道间隔

已成为发展趋势<sup>[1]</sup>。而取样光纤光栅, 因其具有极好的波长选择性, 在它的反射谱图中可得到精细的阻带通带相间排列的谱特性, 且传输通道间隔稳定、带通窄, 用这种特殊结构的取样光栅制作的波分复用与解复用器件 Interleaver 是未来大容量高速率密集型波分复用 (DWDM) 光纤通信网中的关

收稿日期: 2008-09-15; 修回日期: 2008-10-22

作者简介: 张兴娇 (1986—), 女, 江西萍乡人, 硕士研究生, 主要从事光电子器件方面的研究工作。

E-mail: zhangxingjiao521@163.com

键器件<sup>[2]</sup>。

从目前国内通信系统的发展状况看,160 波 100 GHz 波道间隔的器件商用化将是 DWDM 系统的一个热点,而间隔为 50 GHz 的交错复用器是关键器件之一,这对于利用光纤频带资源、扩展通信系统容量、提高传输效率具有重要意义。波长交错复用技术(Interleaver)的运用将大大降低系统的成本,缓解 DWDM 系统对滤波器件的压力。

## 1 非均匀取样光纤光栅理论

光纤光栅是根据光纤光栅的光敏特性,用空间变化的紫外光照射光纤形成的。假定形成光栅的结果仅是对研究的光纤导模有效折射率  $n_{\text{eff}}$  的一种微

扰,于是有

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \delta n_{\text{eff}} \{1 + v \cos[(2\pi/\Lambda)z + \varphi(z)]\} \quad (1)$$

式中:  $\delta n_{\text{eff}}$  为光栅周期内空间平均的折射变化;  $v$  为折射率变化的条纹可见度;  $\Lambda$  为平均光栅周期;  $\varphi(z)$  描述光栅的啁啾。

普通单模布拉格光纤光栅,模式耦合发生在传输方向相反的模式间。设  $R(z)$  和  $S(z)$  分别表示前向、后向传输模的复振幅,则

$$\begin{bmatrix} R(-L/2) \\ S(-L/2) \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} R(+L/2) \\ S(+L/2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\mathbf{F}$  为二维传输矩阵。对于均匀光栅,每个光栅周期的  $2 \times 2$  传输矩阵都是一样的。对非均匀光栅,每段光栅  $i$  的传输特性用传输矩阵  $\mathbf{F}_i$  来描述,表示为

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cos h(\gamma_B z) + j \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B z) & j \frac{k}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B z) \\ -j \frac{k}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B z) & \cos h(\gamma_B z) - j \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sin h(\gamma_B z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, M-1, M$ ,  $\mathbf{F} = \mathbf{F}_M, \mathbf{F}_{M-1}, \dots, \mathbf{F}_2, \mathbf{F}_1$ , 对于大部分啁啾光栅,每段光纤光栅划分的段数  $M$  取 100 就足够了;  $z \in [-a/2, a/2]$  表示每小段光栅的位置; 互耦合系数  $k = \pi v \delta_n T(z) / \lambda_D$ ,  $T(z)$  为切趾函数;  $\lambda_D$  为布拉格中心波长;  $\delta_n$  为折射率调制系数。

对于取样光纤布拉格光栅,就相当于整个光栅看成是多个均匀布拉格光栅间引入多个非曝光区,光栅所分段数  $N$  由实际光栅长度及采样周期决定。非曝光区只对传输的光模式造成相位的延迟,传输的矩阵元为

$$\mathbf{F}_q = \begin{bmatrix} \exp(-j\beta b) & 0 \\ 0 & \exp(j\beta b) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\beta = 2P_i n_{\text{eff}} / \lambda$ ;  $b$  为两光栅间的非曝光区的长度。 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_q, \mathbf{F}_1, \mathbf{F}_q, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{F}_{N-1}, \mathbf{F}_q, \mathbf{F}_N, \mathbf{F}_q$ , 为最终变换矩阵,其中  $\mathbf{F}_N$  代表取样光纤光栅取的第  $N$  段的矩阵元,  $\mathbf{F}_N = \mathbf{F}_{NM}, \mathbf{F}_{N(M-1)}, \dots, \mathbf{F}_{N2}, \mathbf{F}_{N1}$ 。功率反射系数为

$$R = |r^2| = |S(-L/2)/R(-L/2)|^2 = |F_{21}/F_{11}|^2 \quad (5)$$

式中  $F_{11}$  和  $F_{21}$  分别为最终变换矩阵  $\mathbf{F}$  中第一列的元素。非均匀取样光纤布拉格光栅是对均匀光栅按照一定的规律在空间上进行非均匀采样。采样过程中,如图 2 所示光栅长度为  $L$ ,  $a_1, a_2, \dots, a_n$  为光栅

区,  $b$  为非曝光区,取样函数周期为  $p_i = a_i + b$ , 占空比为  $T = a_i / p_i$ , 取样的个数为  $N$ 。与均匀取样不同,  $a$  的长度不是恒定值,呈现递增或递减的趋势,增量为  $da$ ,  $a_n = a_{n-1} + da$  或者  $a_n = a_{n-1} - da$ 。

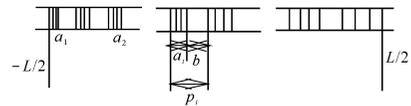


图 1 非均匀取样光栅结构分布图

Fig. 1 Structural diagram of non-uniformly sampled fiber gratings

## 2 Interleaver 的原理

Interleave 技术是一种可把 1 列频率间隔为  $f$  的光信号分成 2 列频率间隔为  $2f$  的光信号,分别从 2 个信道输出的光滤波技术,称其中一个信道为奇信道,另外一个为偶信道<sup>[3]</sup>。也称之为群组滤波,即光学梳状滤波<sup>[4-5]</sup>。通常将 Interleave 技术制作的器件也称之为 Interleaver。如果采用 Interleaver 级联技术,信道的间隔可以更大。

图 2 为一个 50 GHz 的 Interleaver 工作示意图。它的功能是将一列 50 GHz 频率间隔的光信号分成 2 列频率间隔为 100 GHz 的光信号,或者反过来将 2 列频率间隔为 100 GHz 的光信号复用成一

列 50 GHz 频率间隔的光信号。

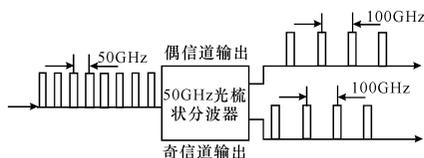


图2 50 GHz Interleaver 的工作示意图

Fig. 2 Schematic diagram of 50 GHz Interleaver

虽然目前已经研发的结构有双折射晶体型、Mach-Zehnder 干涉仪型以及光纤光栅组合型等,但是在材料、工艺性能的可靠性、对温度的稳定性等方面都存在一些问题,所以很难实现大规模的工业化生产,更好的 Interleaver 设计仍然在不断探索之中。

Interleaver 具有分波的功能,基于 Mach-Zehnder 干涉仪的非均匀取样光栅波分解复用器如图3所示。它由在光纤 Mach-Zehnder 干涉仪的2个臂上具有2个完全相同的取样光栅及2个具有3 dB 耦合率的耦合器组成,引入的紫外微调均衡器可以改变光纤纤芯的折射率,从而使两干涉臂的长度满足 OADM 的工作条件输入,信号从入口1输入后,若取样光栅的反射波长为  $\lambda_2, \lambda_4, \lambda_6, \lambda_8$ , 则由于取样光栅的反射作用,信号将在端口2出现;不是取样光栅的反射波长信号光从端口1输入后,信号光将由第一个3 dB 耦合器均匀地分开,通过2个不同的光路到第二个3 dB 耦合器,重新组合后

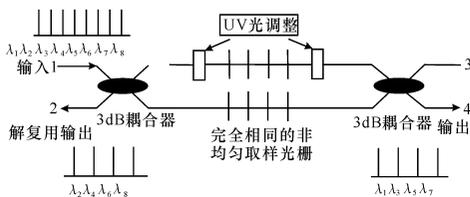


图3 非均匀取样光栅波分解复用器结构图

Fig. 3 Structure diagram of wavelength de-multiplexer of non-uniformly sampled fiber gratings

从端口4输出,这时仿佛取样光栅并不存在。如果用一般的光纤光栅同时输出或解复用多个不同波长的信号,则在 Mach-Zehnder 干涉臂处放置具有不同共振频率的成对光栅,这样构成的波分复用/解复用器不可避免地会引入附加损耗,体积庞大,不便设计制造。

### 3 仿真

根据以上分析,为了验证设计的可行性,用传

输矩阵方法利用 MATHEMATICA 4.0 进行仿真。国际电信联盟 (ITU) 对各个波长之间的间隔规定为: 0.8 nm (100 GHz) 或 0.8 nm 的整数倍 (如 1.6 nm (200 GHz) 或 0.8 nm 的 1/2 倍数。我们知道可以改变取样个数  $N$  和光栅纯长度的增量  $da$  来调节信道间隔的大小,为了使得信道间隔为 0.8 nm,非均匀取样过程中数值计算参数如下:  $v=1, M=100, n_{eff}=1.46, \lambda_D=1550 \text{ nm}, T=0.2, L=1.5 \text{ cm}, N=14, \delta_n=5 \times 10^{-4}, c=-0.5 \text{ nm/cm}, \text{FWHM}=0.8L$ , 采用高斯切趾。输出波长的范围为 1547 nm ~ 1553.5 nm, 从而显示有 8 个通道的基于非均匀 SFBG 的 Interleaver, 如图 4 所示。

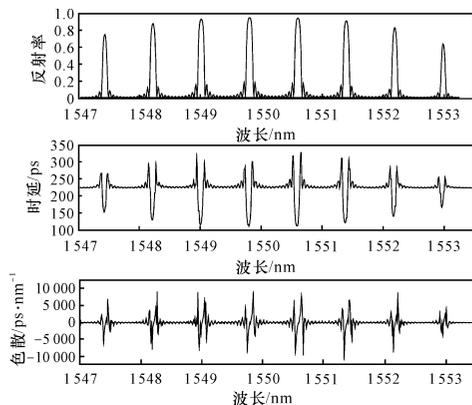


图4 实验设计的非均匀取样光栅反射谱、时延和色散曲线

Fig. 4 Reflection spectrum, time delay and dispersion of non-uniformly sampled fiber gratings designed for experiment

从图4中可以看出,反射谱峰值均匀且保持很高,峰值反射率达到 80% ~ 95%, 传输通道间隔稳定均匀,旁瓣干扰小,带通窄,时延和色散均匀,色散量小于 7500 ps/nm,时延抖动小于 200 ps。

### 4 总结

从非均匀取样光纤光栅的仿真结果可以看出,利用它的平坦带宽、通道间串扰特性良好、低插入损耗、低色散和信道间隔均匀等特点,设计的 Interleaver 是可行的。总之, Interleaver 以其优越性,将随着通信容量的不断增大,有着非常好的潜在市场前景。

参考文献:

[1] LOH W H, ZHOU F Q, PAN J J. Novel designs for

sampled grating-based multiplexers-demultiplexers [J]. Optics Letters, 1999,24(21):1457-1459.

- [2] 付建伟,肖立志,于慧俊. 基于干涉原理的光纤 Bragg 光栅反射光谱特性分析[J]. 应用光学, 2008, 29(增刊):117-119.

FU Jian-wei, XIAO Li-zhi, YU Hui-jun. Reflection spectrum characteristics of FBG based on interference principle[J]. Journal of Applied Optics, 2008,29(sup):117-119. (in Chinese)

- [3] 张婷,盛秋琴,董孝义. Interleaver 技术[J]. 光电子技术,2004,24(1): 61-67.  
ZHANG Ting, SHENG Qiu-qin, DONG Xiao-yi.

The technology of interleaver [J]. Optoelectronic Technology, 2004,24(1): 61-67. (in Chinese)

- [4] JIANG Ze, LIU Li-li. Design of optical interleaver based on sampled FBG for all-optical networks[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006,33(1):54-58.

蒋泽,刘丽莉. 应用于全光网络的取样布拉格光纤光栅 Interleaver 设计[J]. 光电工程, 2006,33(1): 54-58. (in English)

- [5] ERDOGAN T. Fiber grating spectra[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1997, 15 (8): 1277-1294.