

多信道梳状滤波器信道间的相移补偿*

侯奋飞[†] 杨 宏

(南京师范大学物理科学与技术学院, 南京 210096)

(2008 年 10 月 14 日收到; 2009 年 7 月 24 日收到修改稿)

采样大啁啾光纤光栅理论(LCSBG)是实现超高信道数梳状滤波器的理想方案,但实际制作时存在信道间隔不准确、多信道无法同时对齐的问题,文中通过对多信道梳状滤波器反射谱特性的数值模拟分析以及信道间隔误差进行了理论计算,指出问题的来源为 LCSBG 要求的光栅为周期倒数线性啁啾,并不是简单的线性啁啾.对此,提出了相移补偿方案,并以 100 信道,40 GHz 梳状滤波器为例进行了仿真验证,得到了理想的结果.这为实际制作高信道、高准确度的多信道梳状滤波器打下了良好的理论基础.

关键词: 光纤光栅, 采样大啁啾, 相移, 多信道梳状滤波器

PACC: 4280R, 4281, 4281H

1. 引 言

随着波分复用(WDM)系统的发展,多通道梳状滤波器已经引起了人们的广泛关注.光纤光栅器件由于成本低,损耗低,易于与 WDM 系统接入等特点,也成为梳状滤波器制作的一个热点.随着 WDM 信道间隔的减小及信道数的增加,梳状滤波器需要更高的通道数和更小的通道间隔,对此,文献[1,2]提出了含相移的采样大啁啾光纤光栅(sampled Bragg grating with large chirp, LCSBG)方案.含相移的 LCSBG 理论有很多优点,比如制作简单,插损小,信道间隔任意,并且在相位模板足够长的情况下可以得到任意多的信道数.但是实际制作时发现,随着信道数的增加,信道间隔逐渐出现偏差,多信道透过峰难于同时与标准频率对齐,这一点可以从文献[3—9]的实际制作结果中看出.

本文主要针对上面提出的问题进行分析讨论.首先简单介绍 LCSBG 理论,然后分析问题的原因,最终提出相移解决方案,并以 100 信道 40 GHz 信道间隔滤波器为例,利用传输矩阵法^[10,11]进行仿真验证,得到了理想的结果.

2. 含相移的 LCSBG 理论

根据 LCSBG 制作多通道梳状滤波器时,光栅的

折射率调制函数可以表示为

$$s(z) = \sum_k f(z - kP) \exp\left(-j \frac{\pi C}{\Lambda_0^2} z^2\right) \times \exp\left[-j \frac{k(k-1)}{2} \varphi\right], \quad (1)$$

其中 $f(z)$ 是单个采样的切趾, P 为采样周期, Λ_0 为啁啾光栅中心的周期, C 为光栅的啁啾系数, $k\varphi$ 为第 k 个采样后引入的相移,同样根据一维周期性结构中光学 Talbot 效应的数学基础^[5],当满足以下关系式时,光栅的反射谱将呈现多信道的形式.当这些参数满足

$$\frac{2\pi CP^2}{\Lambda_0^2} + \varphi = \frac{2\pi}{T} \quad (2)$$

T 可以取正整数.此时,光栅信道间隔变为原来的 $1/T$,可以得到信道间隔为

$$\Delta\lambda = \frac{1}{T} \frac{c}{2n_{\text{eff}}P}, \quad (3)$$

式中 c 为真空中光速.

文献[3,4]报道了一种在啁啾模板上进行振幅采样,当采样周期与模板啁啾满足一定关系时会出现顶部平坦的多信道滤波器的形状,即梳状滤波器.

可以看出只要有合适的模板,LCSBG 可以实现任意信道数,任意信道间隔的梳状滤波器.从折射率调制函数可以看出,LCSBG 的制作非常简单,只需要采样和采样间的相移即可实现.并且 LCSBG 得

* 国家自然科学基金(批准号:60272048)资助的课题.

[†] E-mail: houfenfei@njnu.edu.cn

到的信道间隔在频率上是严格相等的,这一点很符合 ITU-T 中 WDM 的有关标准^[10],也给 LCSBG 的实际应用带来了更大的潜力.图 1 是用一块模板设计各种信道间隔的 FBG 的反射谱仿真结果.仿真参数是:假设 $n_{\text{eff}} = 1.455$,根据 ITU-T 标准^[10],中心波长为 194.3 THz,那么模板中心周期为 1061.265 nm,根据 LCSBG 理论,设相移为零,通道间隔 40 GHz, $T = 4$,我们得到 $P = 0.535464$ mm, $C = 2.6343$ nm/cm.此时 LCSBG 的各个参数满足多信道条件(见(2)式).

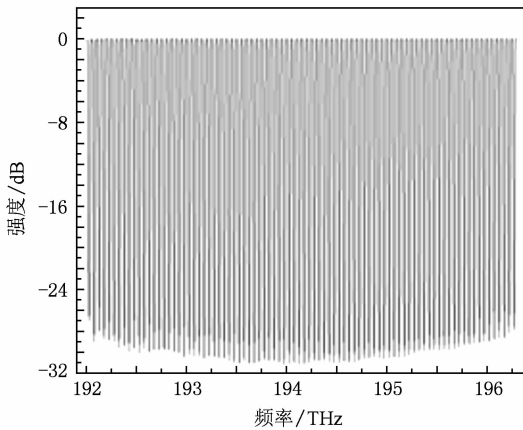


图 1 LCSBG 反射谱示意图

3. LCSBG 实际存在的问题

3.1. LCSBG 误差引入的原因

LCSBG 理论有很多优点,但是实际用 LCSBG 理论制作的梳状滤波器时发现,多信道无法同时与标准波长对齐,这一点也可以从文献[2]给出的实际制作结果中看出.这就在很大程度上限制了有效信道数的增加. LCSBG 的折射调制函数(1)式的第二项 $\exp\left(-j\frac{\pi C}{\Lambda_0^2}z^2\right)$ 为模板啁啾引入的相位调制.根据瞬时频率的定义我们可以导出光栅周期的啁啾情况为

$$\begin{aligned} \Lambda(z) &= \Lambda_0 \frac{1}{1 - Cz/\Lambda_0} \\ &= \Lambda_0 + Cz + C^2z^2/\Lambda_0 + C^3z^3/\Lambda_0^2 + \dots, \end{aligned} \quad (4)$$

可以看出,这里的光栅并不是文献[2]中所说的线性啁啾光栅,而应具有无穷高阶啁啾,并且各阶啁啾系数有严格的对应关系.观察(4)式及多信道条

件(2)式,我们可以定义 $-C/\Lambda_0^2$ 为模板周期倒数的线性啁啾系数,记为 D ,单位为 cm/nm^2 .由此我们得出:LCSBG 理想光栅为周期倒数线性啁啾,而实际光栅为线性啁啾.因此在实际制作中由于啁啾的非理想,必然会引起误差.

3.2. 误差实际计算

下面我们简单计算相移为零时,用线性啁啾光栅制作滤波器引起的信道偏移.当满足多信道条件时,由多信道条件(2)式和信道间隔(3)式可以得到,信道间隔为

$$\begin{aligned} \Delta\nu &= \frac{CP}{2n_{\text{eff}}}D, \\ D(z) &= \left(\frac{1}{\Lambda(z)}\right)', \end{aligned} \quad (5)$$

(5)式中采样周期 P 为固定常数,可以得出 D 的误差即为信道间隔的误差.另一方面,对于啁啾系数为 C 的线性啁啾光栅,其周期倒数的一阶线性啁啾系数为

$$D(z) = \left(\frac{1}{\Lambda(z)}\right)' = -\frac{C}{(\Lambda_0 + Cz)^2}, \quad (6)$$

由此可以得到信道间隔的误差.同样可以得到实际中我们更关心的最边缘信道的相对于信道间隔偏差为(以中心信道为基准)

$$\begin{aligned} \delta\Delta\nu(i) &= \frac{-2\Lambda_0 C P i - C^2 P^2 i^2}{(\Lambda_0 + C P i)^2} \\ & \quad (-N/2 < i \leq N/2), \end{aligned} \quad (7)$$

假设 $n_{\text{eff}} = 1.455$,根据 ITU-T 标准^[10],中心波长为 194.1 THz,那么模板中心周期为 1062.265 nm,根据 LCSBG 理论,设相移为零,通道间隔 40 GHz, $T = 4$,我们得到 $P = 0.535464$ mm, $C = 2.6543$ nm/cm.以 100 信道为例,计算得到最边缘信道间隔误差约为 2.2%,而信道偏移达到 45%.下面我们给出一个仿真的结果,如图 2.

观察信道偏移,给出两者在中心频率,低频高频处的具体透射谱如下(图 3):

通过测量发现,实际模板仿真结果最边缘信道间隔误差为 2.2%,偏移误差约为 43%,与理论计算结果符合.显然,边缘信道已无法与标准波长对齐,消光比也很差.结合图 1,可以得出问题的原因是:各个 FP 腔的各级反射峰不能完全对齐,因此 LCSBG 制作高信道准确的滤波器的难点就在于如何让各个 FP 腔的各级反射峰真正对齐.

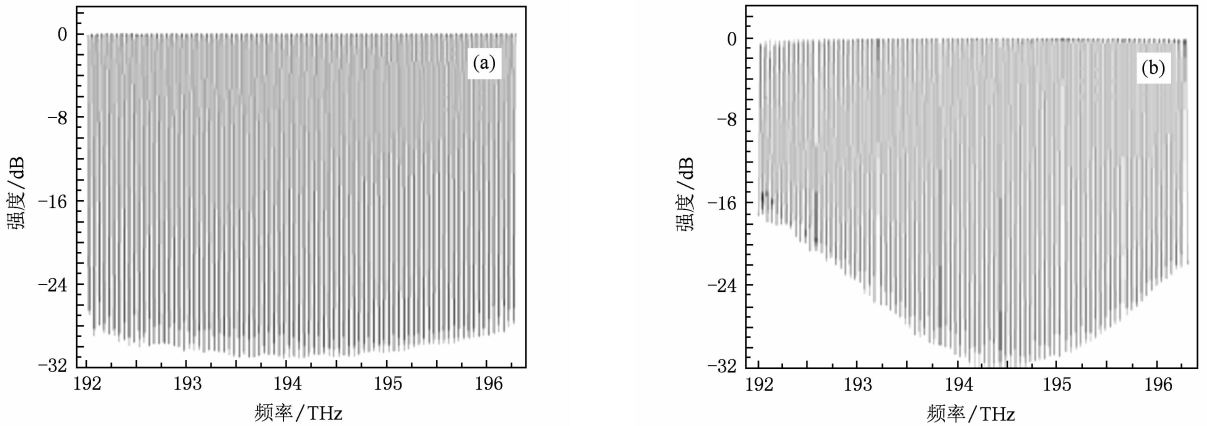


图2 信道间隔 40 GHz,100 信道的梳状滤波器实际结果 (a)理想结果,(b)线性啁啾模板结果

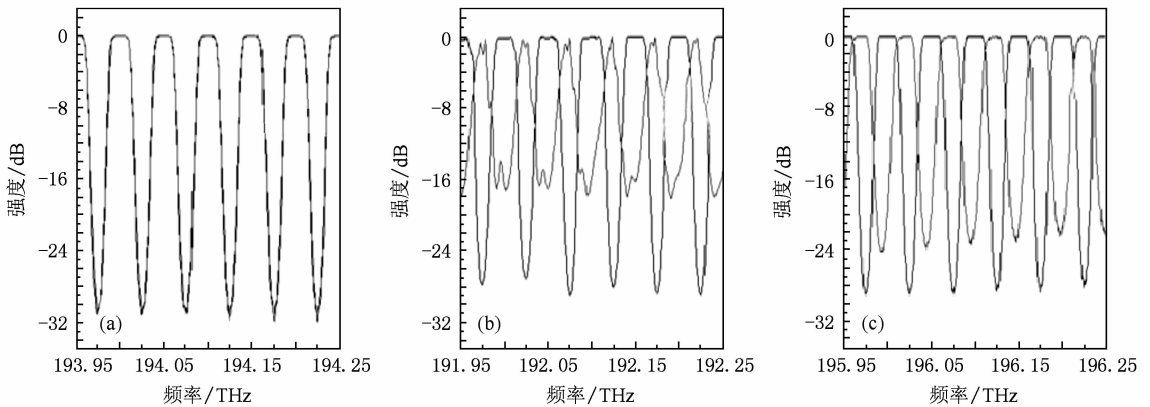


图3 信道间隔 40 GHz,100 信道的梳状滤波器理想与实际放大比较 (a)中间信道,(b)最低频信道,(c)最高频信道,实线为实际模板,虚线为理想模板

4. 解决方案

从上面的分析可以看出,LCSBG 对光栅的啁啾,即对相位模板的啁啾要求很苛刻,实际中很难得到这种理想的模板,并且实际模板也难免会存在一定的误差.对此,我们提出,LCSBG 各采样周期 P 必须固定,而适当改变采样间的相移,就可以使各个 FP 腔的各级反射峰对齐,得到透过峰准确的梳状滤波器.

根据多信道条件(2)式,考虑到 D 为随 z 变化(或考虑离散的长度 Pi),(2)式可变为(考虑到边缘信道, N 要大于实际需要的信道数)

$$\varphi_i = \frac{2\pi}{T} + 2\pi D(Pi)P^2 \quad (-N/2 < i \leq N/2), \quad (8)$$

即只要改变在每个采样后面引入的相移来补偿 D

(Pi)所引入的误差,使得在每个采样处(8)式成立,就能得到优化的结果.

相移 φ 改变的是每个采样反射峰的整体位置,这里的 φ_i 只是相对于理想情况下需要引入的相移,显然前面反射峰的移动会对后面产生影响.我们考虑相对于中心采样为基准进行的相移,可以得出,光栅制作时每个采样后真正要引入的相移为

$$\Psi_i = \sum_{j=-N/2}^{j=i} \varphi_j - \sum_{j=-N/2}^{j=0} \varphi_j \quad (-N/2 < i \leq N/2), \quad (9)$$

这样只要改变 LCSBG 的相移参数,即用 ψ_i 代替 φ ,我们就可以得到高信道准确度的梳状滤波器了.下面我们利用图 2 中的参数再次进行仿真,得到结果如图 4.从仿真结果可以看出,补偿的效果非常理想,所有的信道都与标准波长对齐,信道特性也大大改善,与理想结果非常接近.

利用上面的思路,仿真了当光栅存在非线性啁

啾的情况,同样得到了比较理想的结果.因此,我们认为上面的相位补偿方法是普适的.只要知道模板

(光栅)的啾,就可以对其进行补偿,得到信道间隔准确的梳状滤波器.

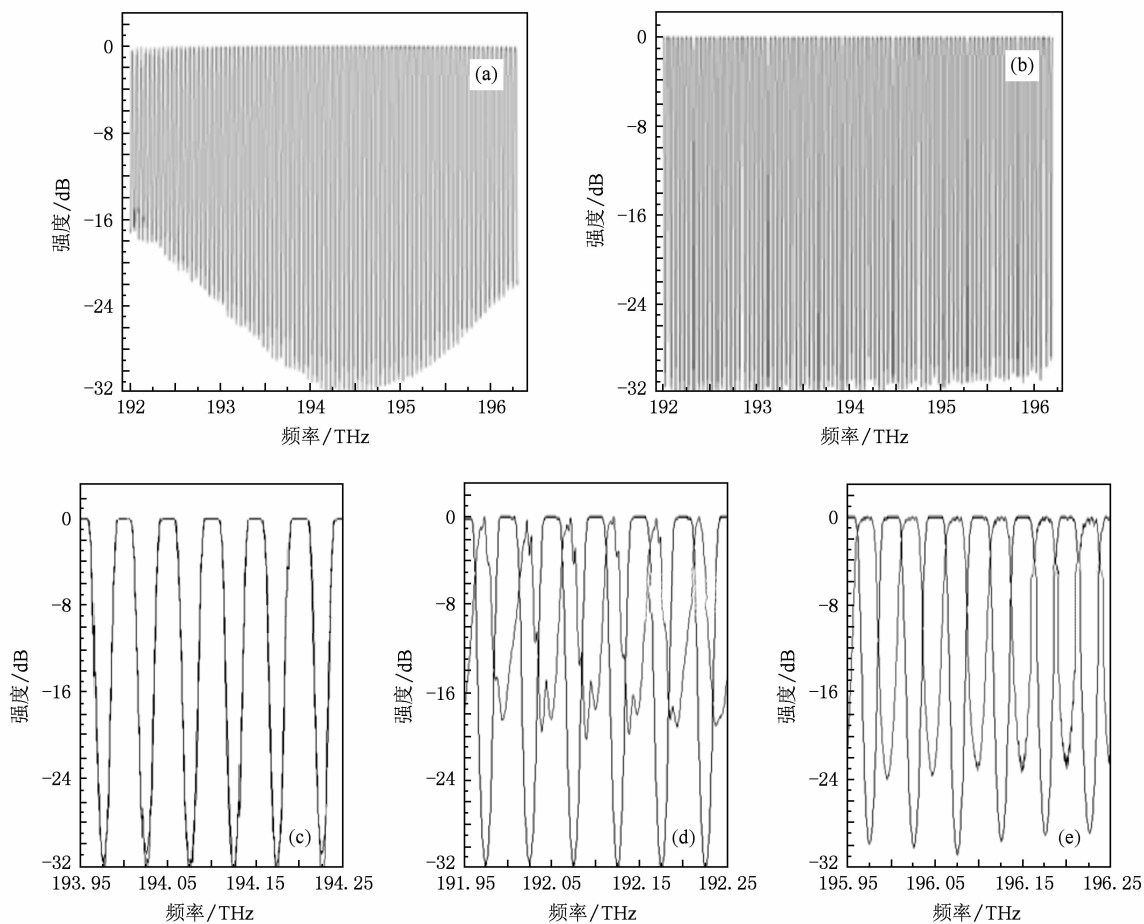


图4 信道间隔 40 GHz,100 信道的梳状滤波器补偿结果 实线为补偿后,虚线为补偿前.(a),(b)为整体,(c)为中心信道,(d)为低频信道,(e)为高频信道

5. 结 论

LCSBG 是实现超高信道数梳状滤波器的理想解决方案,但实际制作时存在信道间隔不准确、多信道无法同时对齐的问题.本文通过讨论指出:问

题的来源为 LCSBG 要求的光栅为周期倒数线性啾,并不是简单的线性啾.对此,我们提出了相移补偿方案,并以 100 信道 40 GHz 梳状滤波器为例进行了仿真验证,得到了理想的结果.这对以后实际制作高信道高精度的多信道梳状滤波器打下了良好的理论基础.

- [1] Chen X F, Fan C C, Luo Y 2000 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **12** 1501
- [2] Dai Y T, Chen X F, Xu X M 2005 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **17** 1040
- [3] Dai Y T, Chen X F, Xie S Z 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 2284
- [4] Wang C, Azana J, Chen L R 2004 *IEEE Photon. Technol. Lett.* **16** 1867

- [5] Wang C, Azana J, Chen L R 2004 *Opt. Lett.* **29** 1590
- [6] Wang M G, Wei Z, 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]
- [7] Wang X, Matsushima K, Kitayama K, Nishiki A, Wada N, Kubota F 2005 *Opt. Lett.* **30** 355
- [8] Zhang Y, Dai Y T, Sun J, Zhang Y J, Xie S Z 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 7034 (in Chinese) [张 邴、戴一堂、孙 杰、张冶金、谢世钟 2007 物理学报 **56** 7034]

- [9] Li D, Zhang X L, Huang D X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2223
(in Chinese) [李 达、张新亮、黄德修 2007 物理学报 **56**
2223]
- [10] ITU-T Recommendation G. 692 International Telecommunication
Union
- [11] Hamanaka T, Wang X, Wada N 2006 *J. Lightwave Technol.* **24** 95

Phase-shifted compensation of channel-space on fiber grating comb filter*

Hou Fen-Fei[†] Yang Hong

(School of Physics and Technology, Nanjing Normal University, Nanjing 210096, China)

(Received 14 October 2008; revised manuscript received 24 July 2009)

Abstract

As the channel-space of the comb filter based on chirped sampled fiber Bragg grating and phase shift is not accurate and the multi-channel is unable to channel the standard frequency, we discussed and calculated the error between theory and practice, which has been verified by simulation. Then a compensation method by introducing phase shift between the samples was proposed, and a 100 channel comb filter with accurate 40 GHz channel-spacing was simulated, which lays a good foundation for fabricating comb filters with accurate transmission peak in the future.

Keywords: fiber Bragg grating, chirped sampled fiber Bragg grating, phase shift, comb filter

PACC: 4280R, 4281, 4281H

已撤稿

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60272048).

[†] E-mail: houfenfei@nju.edu.cn