

线性啁啾光纤光栅的 optical 切趾包络函数、 最佳包络和最佳长度的数值研究*

秦子雄^{1,2} 杜卫冲¹ 曾庆科³ 刘 宁¹ 郭 旗¹ 廖常俊¹ 刘颂豪¹ 孙 健⁴ 余重秀⁴

¹. 华南师范大学量电所 广州 510631; ² 中国科学技术大学 合肥 230026
³ 广西师范大学 桂林 541001; ⁴ 北京邮电大学 北京 100876

提要 从自行构造的 optical 切趾包络函数出发, 找到了光栅的最佳包络, 并发现一构造函数在旁瓣抑制中有其特色。特例中的数值分析表明, 补偿 85 km 光纤色散的最佳光栅长度是 45 mm。

关键词 optical 切趾, 最佳包络, 最佳长度, 旁瓣抑制, 光纤光栅

1 引 言

自从发现单模光纤中光敏性并制造出了光纤光栅以来, 制造技术不断改进和发展, 现已可制造各种参数的光纤光栅^[1,2]。光纤光栅有许多应用, 由于它与光纤的相容性、无源、相对易于制造、有着大的色散、各种参数易于调整, 从而作为色散补偿器, 已引起人们的极大重视。

理想的色散补偿器要求在补偿带宽内有线性的时延特征, 然而线性啁啾的光纤光栅的时延特性是振荡的。人们发现 optical 切趾能减少时延特性的振荡^[3], 提供一个更为线性的时延响应, 同时还减小了光栅反射谱中的旁瓣。光纤光栅的 optical 切趾是指: 在光栅中, 光感折射率调制的振幅是沿着光栅长度有一个钟形函数的形状变化。optical 切趾已引起人们的关注^[4]。一般钟形函数取为高斯型或传统滤波器理论中的窗口函数, 但在有些情况下这是不充分的。本文从我们构造的几种切趾包络函数出发, 比较了各种函数, 数值分析了光栅长度、啁啾度、旁瓣抑制与包络函数之间的一些关系。

2 optical 切趾包络函数

光纤光栅是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的一种微扰^[5], 于是有

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z) \left[1 + V \cos \left[\frac{2\pi}{\Lambda} Z + \Phi(Z) \right] \right]$$

$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z)$ 为光栅周期内空间平均的折射率变化, V 为折射率变化的条纹可见度, Λ 为平均光栅周期, $\Phi(Z)$ 为描述光栅的啁啾。

* 国家高科技 863-317 基金、广东省 96 重点攻关项目及国家自然科学基金资助项目。

收稿日期: 1998-08-11; 收到修改稿日期: 1998-11-05

为了模拟光学切趾的光栅,从耦合模方程出发,使用传输矩阵方法^[6],光栅分为若干段,每一段都可以看成是均匀光栅,在每段中点取值, $\delta n_{\text{eff}}(Z)$ 可取任意形状的函数,形成不同的光学切趾包络,从而可计算出反射率、时延等。

我们构成如下各种 $\delta n_{\text{eff}}(Z)$ 的切趾包络函数

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z) = \begin{cases} \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left[1 + \frac{T_1}{4} - T_1 \left| \frac{Z - (1-F)\frac{L}{2}}{LF} \right|^2 \right] \left/ \left[1 + \frac{T_1}{4} \right] \right. & Z > \frac{L}{2}(1-F) \\ \overline{\delta n_{\text{eff}}} & |Z| \leq \frac{L}{2}(1-F) \\ \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left[1 + \frac{T_1}{4} - T_1 \left| \frac{Z + (1-F)\frac{L}{2}}{LF} \right|^2 \right] \left/ \left[1 + \frac{T_1}{4} \right] \right. & Z < -\frac{L}{2}(1-F) \end{cases} \quad (1)$$

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}} \exp \left[- \left[\frac{4 \ln 2 \cdot Z^2}{T_0^2} \right]^m \right] \quad (2)$$

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z) = \begin{cases} -\overline{\delta n_{\text{eff}}} \tanh T_1 \left[Z - \frac{L}{2} \right] & Z \geq 0 \\ \overline{\delta n_{\text{eff}}} \tanh T_1 \left[Z + \frac{L}{2} \right] & Z < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$\overline{\delta n_{\text{eff}}}(Z) = \begin{cases} \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left[0.5 + 0.5 \cos \frac{2\pi}{FL} \left[Z - \frac{L}{2}(1-F) \right] \right] & Z > \frac{L}{2}(1-F) \\ \overline{\delta n_{\text{eff}}} & |Z| \leq \frac{L}{2}(1-F) \\ \overline{\delta n_{\text{eff}}} \left[0.5 + 0.5 \cos \frac{2\pi}{FL} \left[Z + \frac{L}{2}(1-F) \right] \right] & Z < -\frac{L}{2}(1-F) \end{cases} \quad (4)$$

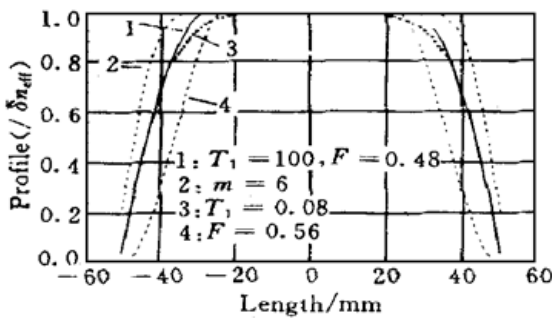


图 1 包络函数曲线

Fig. 1 The curves of profile functions

与上述函数(4)类似地可以有传统窗口函数^[7]的扩展(包括海明窗、巴特利窗和布莱克曼窗)。上述四种函数曲线示意在图 1 中。 F 参数实际上是光栅折射率扰动包络变化的部分($0 < F \leq 1$)。例如曲线 4, 函数在 $\pm \frac{L}{2}$ 时为零, 在 $\pm (1-F)\frac{L}{2}$ 到达 δn_{eff} 。 $F = 1.0$ 时, 曲线 4 变为海明窗口函数; $F \rightarrow 0$, 成为没有光学变迹的矩形窗口。曲线 2, 3 中的 m 和 T_1 作用与 F 具有类似性质, 只不过 m 和 T_1 越大, 包络边沿越陡。曲线 1 中 T_1 越大, 在光栅两端, 曲线的值越接近于零。在本文计算中, 曲线 2 中的 $T_0 = 0.8L$ 。

3 光栅的最佳包络、最佳长度及旁瓣压抑

3.1 光栅的最佳光学切趾包络

对于一定量啁啾度 $\frac{d\lambda_0}{dz}$ 和长度 L 的光栅系统, 最佳切趾包络应满足下述条件: 在该切趾包络函数下, 光栅的时延谱应具有相对大的线性和相对大的色散补偿带宽。

从一特例* 出发, $L = 100.0 \text{ mm}$, $\delta n_{\text{eff}} = 0.00002$, $\frac{d\lambda_D}{\lambda z} = 0.0022 \text{ nm/mm}$, $V = 1.0$, 中心波长 $\lambda_0 = 1550.0 \text{ nm}$, $\overline{\delta n_{\text{eff}}(Z)}$ 取切趾包络函数曲线 1。依照最佳切趾包络函数的条件, 发现对于曲线 1 ($T_1 = 100$), 最佳包络在 $F = 0.48$ 。图 2(a) 是没有光学切趾 ($F \rightarrow 0$) 的时延, (b) 是完全光学切趾 ($F \rightarrow 1.0$) 的时延, (c) 是部分光学切趾 ($F = 0.48$) 的时延。基本相同的过程对曲线 2 可得 $m = 6$, 曲线 3 可得 $T_1 = 0.08$, 曲线 4 可得 $F = 0.56$ 。对于扩展的三角窗、布莱克曼窗、海明窗分别可得 $F = 0.39, 0.59, 0.56$ 。在所有这些最佳包络中, 又以曲线 1, 2, 3 的最佳包络所得到的时延特性具有更为好的线性。这可从图 3(曲线 4 的最佳包络对应的时延) 与图 2(c) 的比较可见一斑, 比较时应注意到既要线性好, 带宽也应尽可能大。严格比较应是同时考虑到各自两组包络的发展趋势, 其他图的比较与此类似。

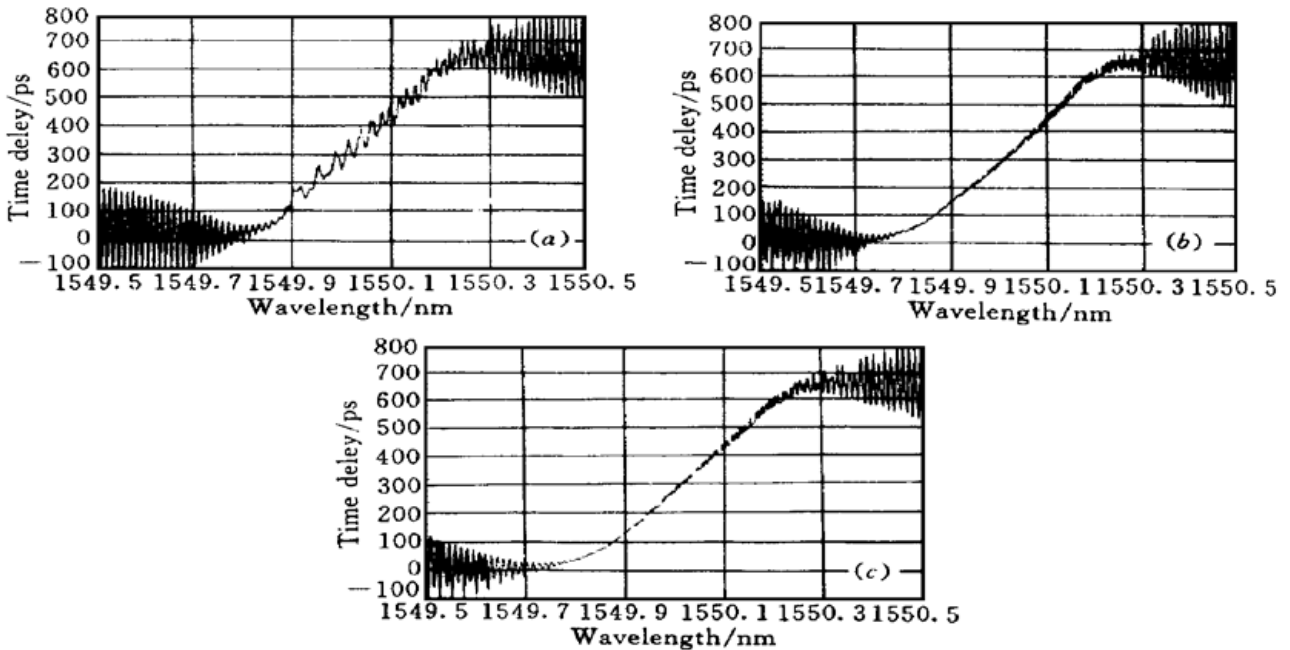


图 2 (a) 没有光学切趾的时延特性; (b) 完全光学切趾的时延特性; (c) 部分光学切趾的时延特性

Fig. 2 (a) The time delay characteristic without apodization; (b) The time delay characteristic with full apodization; (c) The time delay characteristic with fractional apodization

3.2 最佳光栅长度

现在考虑让光栅长度变化, 其他各参数不变。发现对曲线 1 ($T_1 = 100$), 随着 L 变小, 最佳包络的 F 变大。在 $L = 45 \text{ mm}$ 时, $F = 1.0$, 见图 4。这意味着, 对于 $L < 45 \text{ mm}$, 对于曲线 1 ($T_1 = 100$), 将找不到最佳包络。对于其他包络也存在类似的情况, 这意味着对于一定量的啁啾, 有着与之相应的最佳长度。

在本特例的情形下, 对于曲线 1 ($T_1 = 100$) 最佳长度范围在 45~ 100 mm, 最佳包络的参数 F 由 1.0 变化到 0.48。从实际应用的观点来看, 考虑到光栅制作长度, 对于啁啾度为 0.0022 nm/mm 的光栅来说, 最佳长度为 45 mm。光栅再长, 也不会对色散补偿距离有所改善。

3.3 旁瓣抑制

在图 5 中为清楚起见, 只画出了曲线 1 ($T_1 = 100, F = 0.48, F = 1.0$), 曲线 2 ($m = 6$), 曲

* 我们已用这些参数的光栅, 在色散值为 18 ps/nm · km 的光纤中实现了超过 100 km, 10 Gb/s 的色散补偿信号的传输。

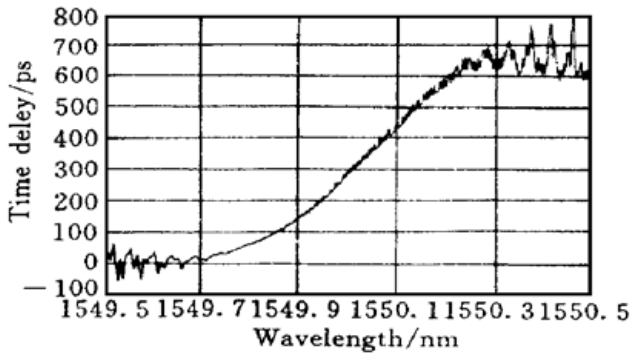


图3 对应于曲线4的最佳包络的时延特性

Fig. 3 The time delay characteristic corresponding to the optimal profile of the curve 4 in Fig. 1

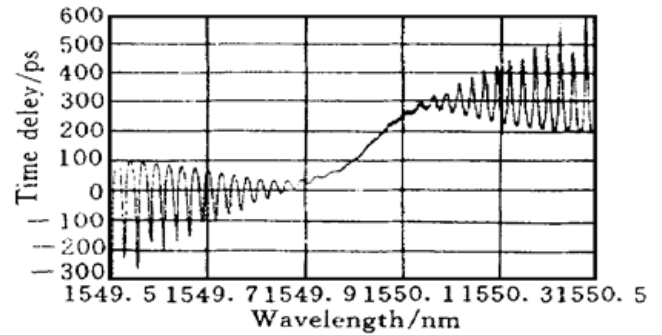


图4 对应于 $L = 45$ mm 最佳包络的时延特性

Fig. 4 The time delay characteristic corresponding to the optimal profile when $L = 45$ mm

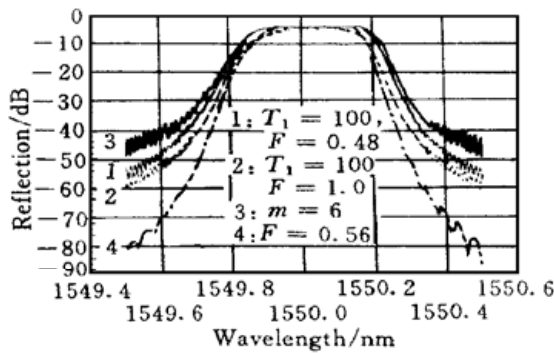


图5 不同包络的旁瓣抑制

Fig. 5 The sidelobe suppression of different profiles

线4 ($F = 0.56$) 四条曲线。在四条曲线中, 由上到下, 旁瓣抑制越来越好。下面三条曲线的旁瓣抑制已小于 -30 dB, 基本已适合作为波分复用的器件。曲线1 在 T_1 更大的时候, 旁瓣抑制将更好, T_1 给曲线1 一个旁瓣抑制的调节参数, 这是优于其他几条曲线的一个特点。至于要求有多大的旁瓣抑制将视实际问题而定。图5中只画四条曲线, 我们的数值计算表明, 对各最佳包络相应的旁瓣抑制的结果从差到好依次是曲线2 ($m = 6$), 扩展的海明窗 ($F = 0.56$), 曲线1 ($F = 0.48, T_1 = 100$), 曲线3 ($T_1 = 0.08$), 扩展的巴特利窗 ($F = 0.39$), 曲线4 ($F = 0.56$) 和扩展的布莱克

曼窗 ($F = 0.59$)。

旁瓣抑制实际上与包络函数在光栅边沿接近零的方式有关^[8], 从本文可以清楚地看到时延特性振荡的平滑与 F 参数有关。在设计色散补偿元件的时候, 考虑到这些因素是非常具有实际意义的。

参 考 文 献

- 1 W. H. Loh, M. J. Cole, M. N. Zervas *et al.*. Complex grating structures with uniform phase masks based on the moving fiber-scanning beam technique. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(20): 2051~ 2053
- 2 Qin Zixiong, Du Weichong, Liao Changjun *et al.*. Progress in fiber Bragg grating technology and its applications in dispersion compensation. *Semiconductor Optoelectronics* (半导体光电), 1998, **19**(3): 150~ 157, 166 (in Chinese)
- 3 K. O. Hill, F. Bilodeau, B. Malo *et al.*. Chirped in-fiber Bragg gratings for compensation of optical-fiber dispersion. *Opt. Lett.*, 1994, **19**(17): 1314~ 1316
- 4 P. L. Mason, R. V. Penty, I. H. White. Multiple stage dispersion compensation in long haul optical fibre systems using chirped fibre Bragg gratings. *Electron. Lett.*, 1994, **30**(15): 1244~ 1245
- 5 T. Erdogan. Fiber grating spectra. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~ 1294
- 6 M. Yamada, K. Sakuda. Analysis of almost-periodic distributed feedback slab waveguides via a fundamental matrix approach. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(16): 3474~ 3478
- 7 A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer. Digital Signal Processing Prentice-Hall. Englewood Cliffs. N. J., 1975. 239~ 250
- 8 P. S. Cross, H. Kogelnik. Sidelobe suppression in corrugated-waveguide filters. *Opt. Lett.*, 1977, **1**

(1): 43~ 45

Numerical Study of Apodization Profile Functions and Optimal Profiles and Lengths of a Linearly Chirped Fiber Bragg Grating

Qin Zixiong^{1,2} Du Weichong¹ Zeng Qingke³ Liu Ning¹
 Guo Qi¹ Lian Changjun¹ Liu Songhao¹ Sun Jian⁴ Yu Chongxiu⁴

¹South China Normal University, Guangzhou 510631
²University of Science and Technology of China, Hefei 230026
³Guangxi Normal University, Kweilin 541001
⁴Beijing University of Posts and Communications, Beijing 100876

Abstract Starting from our defined apodization profile functions, the optimal profiles and the characteristics of a defined function in sidelobe suppression were found. In a specific instance, it is shown by a numerical analysis that the optimal length of a grating is 45 mm to compensate the dispersion induced by an 85 km-fiber.

Key words apodization, optimal profile, optimal length, sidelobe suppression, fiber Bragg grating

线形腔窄线宽掺 Yb³⁺ 光纤激光器

我们利用一只带通滤波器和一段作为饱和吸收体的掺杂光纤获得了 3 dB 带宽小于 0.07 nm 的窄线宽激光输出。

实验中所用增益光纤长度约 15 m, 掺 Yb 浓度以吸收系数表示, 即在 920 nm 波长处的吸收为 6.6 dB/m。抽运源为一带尾纤输出的半导体激光器(LD), 其中心波长约为 976 nm。实验中使用的其他器件为: 一只波分复用器(WDM), 一只中心波长位于 1054 nm, 带宽 3 nm 的带通滤波器, 一段作为饱和吸收体的 5 m 长掺 Yb 光纤, 一只作为前腔镜的光纤圈反射器(对 1054 nm 激光反射率约 99%) 和一片作为输出耦合用的双色镜(对 1054 nm 激光反射率约 95%)。采用线形腔结构, 以 WDM 为核心。WDM 的一臂用于与 LD 的尾纤连接, 其与 LD 异侧的一臂连接增益光纤再连接带通滤波器, 然后与输出镜耦合。WDM 与 LD 同侧的另一臂与饱和吸收体及光纤圈反射器相连。该激光器阈值为 14 mW, 斜率效率约为 3%, 当抽运功率为 40 mW 时, 获得 0.66 mW 的激光输出。用精度为 0.07 nm 的 MS9710B 光谱仪分析输出的激光光谱。记录到的激光光谱的中心波长为 1054.2 nm, 3 dB 带宽约为 0.07 nm。实验中作为饱和吸收体的 5 m 长掺 Yb 光纤处于未抽运状态, 因线形腔结构所造成的空间烧孔效应使它产生饱和吸收效应, 即越强的信号光所受到的吸收损耗越小。实验中, 除输出耦合镜外所有器件都通过熔接而连接在一起, 以降低腔损耗。

中国科学院上海光机所

陈 柏 陈兰荣 范 薇 李学春 林尊琪 1999-12-01 收稿