

## 用于色散补偿的线性啁啾光纤光栅光学特性的仿真研究

黄平,陈旭

(桂林师范高等专科学校 物理与工程技术系,广西 桂林 541199)

**摘要:**为了说明线性啁啾光纤光栅能成为色散补偿技术发展的重要方向,介绍了一种光纤光栅的耦合模理论模型,提出了用于色散补偿的自构变迹函数线性啁啾光纤光栅,并对线性啁啾光纤光栅与用于色散补偿的高斯变迹函数线性啁啾光纤光栅的反射谱及时延特性进行了数值仿真。仿真结果表明,自构变迹函数下的线性啁啾光纤光栅对光纤色散具有更好的补偿效果。

**关键词:**光纤光栅;色散补偿;啁啾;变迹

**中图分类号:**TN914 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)03-0089-04

**DOI:**10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.03.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Simulation research on optical characteristics of linearly chirped fiber grating for dispersion compensation

HUANG Ping, CHEN Xu

(Department of Physics and Information Technology, Guilin Normal College, Guilin Guangxi 541199, China)

**Abstract:** In order to demonstrate that linearly chirped fiber gratings can be an important development direction of dispersion compensation technology, a coupling mode theoretical model of fiber gratings is introduced in this paper, and a linear chirped fiber gratings with self-constructed apodized functions is proposed for dispersion compensation. The reflection spectrum and delay characteristics of linearly chirped fiber gratings with Gaussian apodized functions used for dispersion compensation and self-constructed apodized functions are simulated numerically. The simulation result shows that the effect of linearly chirped fiber grating with self-constructed apodized functions is better for dispersion compensation.

**Key words:** fiber grating, dispersion compensation, chirp, apodization

## 0 引言

社会信息化的快速发展促进光纤通信朝着高速度、大容量方向发展,为了充分利用普通单模光纤<sup>[1]</sup>,需要处理其在 1550 nm 波长处存在的色散问题。线性啁啾光纤光栅不仅具有插入损耗小、与偏振无关、无源、参数易于调整、不受非线性影响及体积小等优点,还能形成很大的反射带宽和稳定的色散,已成为色散补

偿技术发展的重要方向。为了较好地评判一个线性啁啾光纤光栅的色散补偿能力,需要对其光学特性(反射谱、时延和色散)进行深入研究。因此,本文对基于高斯变迹函数和自构变迹函数的啁啾光纤光栅的光学特性进行仿真。

## 1 光纤光栅原理

1.1 线性啁啾光纤光栅<sup>[2-4]</sup>

线性啁啾光纤光栅是一种非均匀光纤光栅,其周期沿轴向线性变化,栅格周期不同,对应的布喇格反射波长也不同,入射到啁啾光纤光栅的光的波长不同,就会在不同的位置产生反射。因此,布喇格反射波长  $\lambda_B$  与光纤光栅的位置  $z$  密切相关,它们的关系为

$$\lambda_B(z) = 2n_{\text{eff}}(z)\Lambda(z) \quad (1)$$

其中,  $n_{\text{eff}}(z)$  为有效折射率的空间包络;  $\Lambda(z)$  为光栅周期分布函数,可以表示为

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \Delta\Lambda(z) \quad (2)$$

收稿日期:2021-11-11。

基金项目:广西教育科学“十三五”规划课题(项目编号:2017C537)资助。

作者简介:黄平(1971—),男,湖南永州人,硕士,副教授,广西光学学会会员,主要研究方向是光纤光栅传感和光纤通信技术。主持完成了广西教育厅科研项目1项,同时参与多项科研及教改项目;多次指导学生参加大学生电子设计竞赛并获得一、二等奖。

\*通信作者:陈旭(1985—),男,硕士,高级工程师,广西光学学会会员,主要研究方向是光纤通信技术及光纤传感。



其中,  $\Lambda_0$  为光栅中点处的周期,  $\Delta\Lambda(z)$  为周期的变化。

线性啁啾光纤光栅根据栅格周期与反射波长之间的关系, 能产生很大的反射带宽和稳定的色散, 因此可应用于波分复用通信系统的色散补偿。图 1 为线性啁啾光纤光栅色散补偿原理示意图, 对于现有的用掺铒光纤放大器(EDFA)补偿损耗的传输系统, 常规单模光纤处在反常色散区, 即蓝移分量(B)比红移分量(R)传播得快, 会引起脉冲展宽。对于线性啁啾光纤光栅, 其光栅周期是沿轴向线性变化的。根据上文的分析可知, 不同波长的光进入光栅将在不同的位置反射。因此, 设置光栅的参数使红移分量在光栅的近端反射, 蓝移分量在光栅的远端反射, 这样就使得经光纤反射后的脉冲蓝移分量走得远, 时间延迟长, 红移分量走得近, 时间延迟短, 从而实现将展宽的脉冲压窄, 恢复原始脉冲。

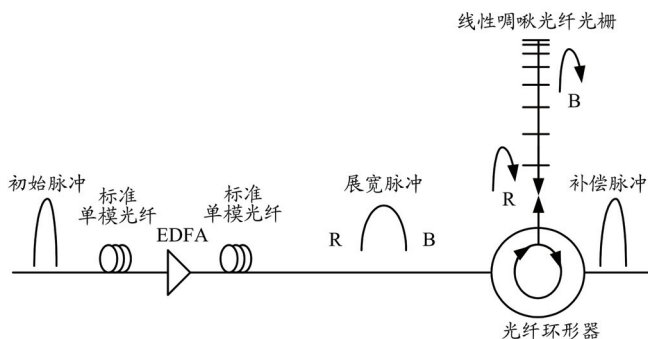


图 1 线性啁啾光纤光栅色散补偿原理示意图

## 1.2 变迹光纤光栅

光纤光栅的光学特性决定了它的应用范围, 其中可以用作色散补偿器的光学特性包括反射谱、时延和色散特性曲线。但是, 线性啁啾光纤光栅反射谱不平滑且有着一定的起伏, 反射带宽内时延曲线线性度很差, 色散曲线也存在强烈的振荡。针对线性啁啾光纤光栅这些光学特性不佳的情况, 可通过对线性啁啾光栅作变迹处理来进行改善。变迹是指折射率调制的振幅沿着光栅有一个钟形函数的形状变化。变迹技术的发展带来了不同函数形式的变迹光纤光栅, 常用的变迹函数形式有 Gaussian 型、Hamming 型、Blackman 型、Tanh 型、Sinc 型和 Cauchy 型等。其中, Hamming 型、Blackman 型和 Cauchy 型变迹函数不常用, Tanh 型和 Sinc 型变迹函数变迹线性啁啾光栅的反射谱略有抖动, 而高斯变迹函数常用且变迹效果良好。因此, 本文选择高斯变迹函数做参考。

高斯变迹光纤光栅的光致折射率变化大小沿光纤轴向呈高斯函数分布, 如图 2 所示。其反射谱在长

波边缘光谱平滑, 在短波边缘存在边模振荡结构, 呈现不对称性, 而且光纤光栅越长振荡间隔越密, 折射率调制越大, 震荡幅度也越大。

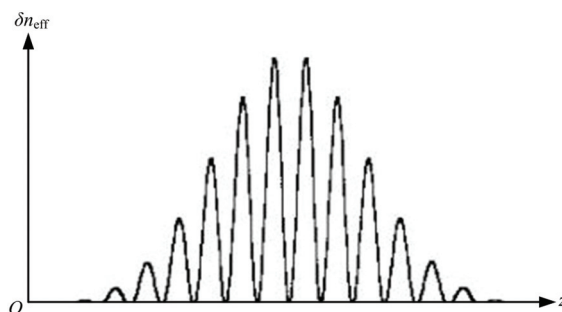


图 2 高斯变迹光纤光栅折射率调制波形

## 2 耦合模理论模型

基于耦合模理论的传输矩阵法是一种快速数值模拟非均匀光纤光栅光学特性的方法, 它为研究变迹线性啁啾光栅的反射谱曲线、时延特性曲线等光学特性奠定了理论基础, 本文基于耦合模理论模型对光纤光栅光学特性进行研究。

由紫外光曝光形成的光纤光栅的总导模有效折射率<sup>[5]</sup>可表示为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) \left[ 1 + s \cos \left( \frac{2\pi}{\Lambda_e} z + \varphi(z) \right) \right] \quad (3)$$

其中,  $\Lambda_e$  表示光栅中点处的周期,  $\varphi(z)$  表示光栅啁啾,  $s$  表示折射率调制的条纹可见度,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z)$  描述的是光栅折射率调制幅度。对于线性啁啾光纤光栅,  $\varphi(z) = F \left( \frac{z}{L} \right)^2$ ,  $F$  为啁啾系数,  $L$  光栅长度。

光纤光栅的主要作用是把波长在布喇格波长附近的光波耦合为模式相同但传播方向相反的模式, 其中光纤布喇格光栅是反向耦合的光栅模式, 通过耦合模方程可描述其前向和后向光场, 耦合模方差为

$$\frac{dA^+}{dz} = i\xi^+ A^+(z) + i\kappa B^+(z) \quad (4)$$

$$\frac{dB^+}{dz} = -i\xi^+ B^+(z) - i\kappa^* A^+(z) \quad (5)$$

其中,  $A^+(z) = A(z) \exp \left( i\delta_d z - \frac{\varphi}{2} \right)$ ,  $B^+(z) = B(z) \exp \left( i\delta_d z + \frac{\varphi}{2} \right)$ ;  $\kappa$  表示交流耦合系数;  $\xi^+$  表示直流自耦合系数, 其表达式为

$$\xi^+ = \delta_d + \xi - \frac{1}{2} \times \frac{d\varphi}{dz} \quad (6)$$

其中,  $\delta_d$  表示模式间的失谐量, 它与  $z$  无关, 其表达式为

$$\delta_d = \beta - \frac{\pi}{\Lambda} = 2\pi n_{\text{eff}} \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_d} \right] \quad (7)$$

其中,  $\lambda_d = 2n_{\text{eff}}\Lambda$  是光纤布喇格光栅的初始谐振波长, 为有效折射率调制无限小 ( $\delta n_{\text{eff}} \rightarrow 0$ ) 的弱光栅的谐振波长。

由于线性啁啾光栅为非均匀光栅, 本文采用传输矩阵法<sup>[6]</sup>求解式(4)、式(5)。假设把光栅分成  $M$  个小的均匀光栅, 一般要求  $\Delta z \geq \Lambda$ , 即

$$M \leq \frac{2n_{\text{eff}}}{\lambda_d} \quad (8)$$

则非均匀光栅传输矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} R_M \\ S_M \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} R_0 \\ S_0 \end{bmatrix}, F = F_M \cdot F_{M-1} \cdots F_1 \cdots F_1 \quad (9)$$

其中,  $F$  为非均匀光栅的传输矩阵。

### 3 数值计算结果及分析

为了得到一种对光纤色散补偿效果更好的线性啁啾光纤光栅, 本文提出自构变迹函数, 并将自构变迹函数与高斯变迹函数变迹线性啁啾光栅的反射谱曲线、时延特性曲线进行比较。2 种函数的公式如下:

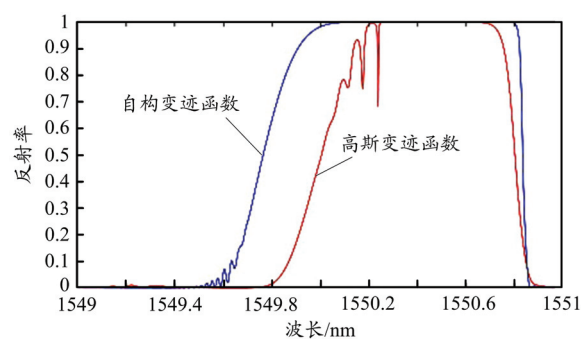
$$\begin{aligned} \text{高斯函数: } \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) &= \overline{\delta n_{\text{eff}}} \exp \left[ - \left( \frac{Gz}{FWHM} \right)^2 \right], \\ -L/2 \leq z \leq L/2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{自构函数: } \overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) &= \overline{\delta n_{\text{eff}}} \cdot \left[ \frac{4}{L^2} (Lz - z^2) \right]^m, \\ 0 \leq z \leq L \end{aligned} \quad (11)$$

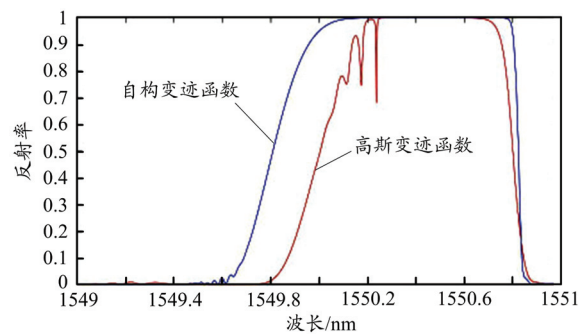
本文取如下光纤光栅参数<sup>[7]</sup>: 光栅折射率调制幅度  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}(z) = 5 \times 10^{-4}$ , 光栅长度  $L = 45$  mm, 啁啾系数  $d\lambda_B/dz = 0.055$  nm/mm, 中心反射波长  $\lambda_0 = 1550$  nm, 高斯变迹系数  $G = 8$ , 半峰全宽  $FWHM = L$ 。采用 Matlab 编程、计算, 当自构变迹函数指数系数  $m$  为 2、3、5 时, 本文绘制了高斯和自构变迹函数的变迹线性啁啾光纤光栅反射谱曲线和时延特性曲线, 分别如图 3 和图 4 所示。

变迹是为了让光纤光栅反射谱的旁瓣消失, 使反射谱平滑, 并且能够使反射带宽内的时延特性曲线的振荡得到控制, 从而确保时延曲线有较高的线性度和相对大的色散补偿带宽; 同时, 保证时延量满足补偿光纤引起的时延量的需要。

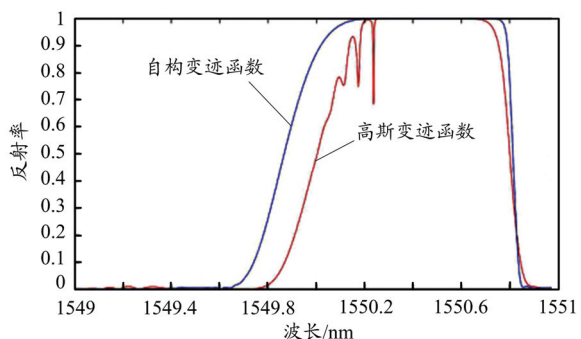
从图 3 可以看出, 相对于高斯变迹函数变迹线性啁啾光栅的反射谱, 自构变迹函数变迹线性啁啾光栅的反射带宽更大; 随着  $m$  从 2 增大到 5, 自构变迹函数变迹线性啁啾光栅反射谱曲线逐渐趋于平滑。从图 4 可以看出, 相对于高斯变迹函数变迹线性啁啾光栅的时延谱, 自构变迹函数变迹线性啁啾光栅的时延曲线线



(a)  $m=2$

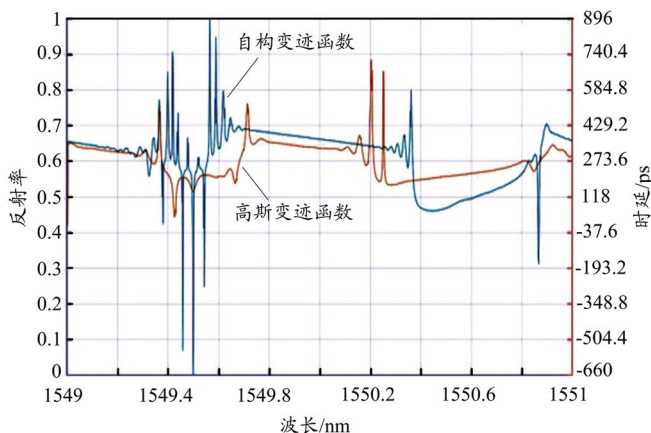


(b)  $m=3$

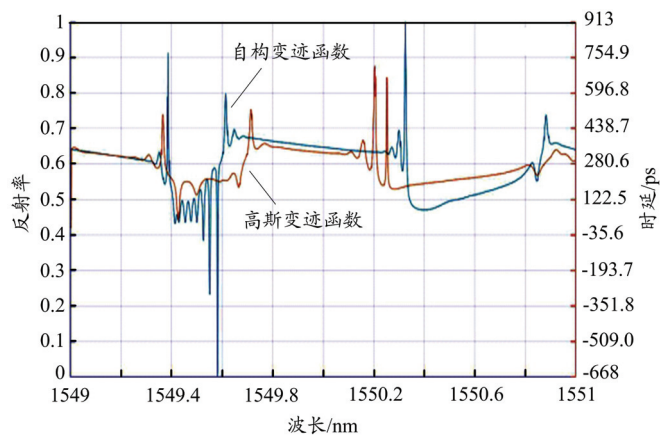
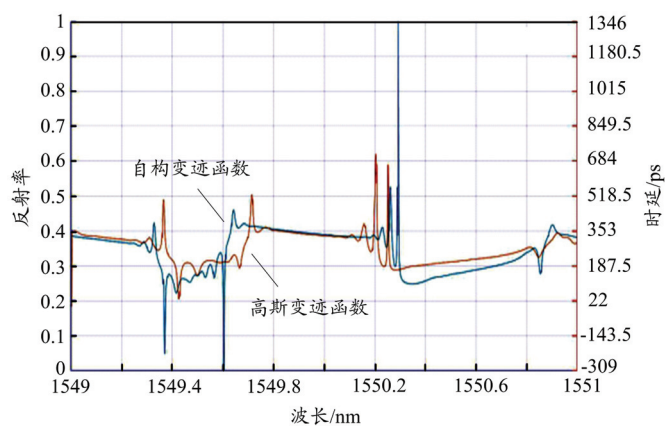


(c)  $m=5$

图 3  $m$  取不同值时高斯变迹函数和自构变迹函数的变迹线性啁啾光栅反射谱曲线



(a)  $m=2$

(b)  $m=3$ (c)  $m=5$ 图4  $m$ 取不同值时高斯变迹函数和

自构变迹函数的变迹线性啁啾光栅时延特性曲线

性度更高;随着  $m$  增大,自构变迹函数变迹线性啁啾光栅时延曲线线性长度有所减少。对比图 3 和图 4 可以看出,2 种变迹函数下的线性啁啾光纤光栅都能达到变迹的目的。相对于高斯变迹函数变迹线性啁啾光

栅的反射谱 3 dB 带宽及带宽内时延特性曲线的平滑度,自构变迹函数变迹线性啁啾光栅的光学性能更优。

#### 4 结束语

本文在耦合模理论的基础上,利用传输矩阵法,数值仿真出高斯变迹函数及自构变迹函数的变迹线性啁啾光纤光栅的反射谱和时延特性曲线。仿真结果表明,可知自构变迹函数变迹结果具有比高斯变迹更好的光学特性。因此,自构变迹函数下的线性啁啾光纤光栅将对光纤色散具有更好的补偿效果。本文的研究具有重要现实意义,能为制作应用于色散补偿的线性啁啾光纤光栅产品提供参考价值。

#### 参考文献:

- [1] 刘增基,周洋溢,胡辽林,等. 光纤通信[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2016.
- [2] SAHOTA J K, GUPTA N, DHAWAN D. Fiber Bragg grating sensors for monitoring of physical parameters: a comprehensive review [J]. Optical Engineering, 2020, 59(6): 060901-1-060901-35.
- [3] FELIPE A, SOUZA A L N D. Chirp-filtering for low-complexity chromatic dispersion compensation[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(11): 2954-2960.
- [4] 任丽,孙博,马丽,等. 线性啁啾光纤光栅局部点加热光谱特性的研究[EB/OL]. [2022-02-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1261.TN.20211015.0723.004.html>.
- [5] MIZRAHI V, SIPE J E. Optical properties of photosensitive fiber phase gratings[J]. IEEE Journal of Lightwave Technology, 1993, 11: 1513-1517.
- [6] 叶志清,邹道文,邹柳娟,等. 变迹啁啾 Bragg 光纤光栅的矩阵分析[J]. 光子学报,2001,30(2):184-187.
- [7] 汤树成. 光纤光栅谱特性的数值研究[J]. 现代有线传输,2002,6(2): 23-27.