

文章编号: 0258-7025(2010)05-1284-06

多级联线性啾啾光纤光栅梳状滤波器的优化设计

马伟涛¹ 周 骏¹ 徐铁峰² 张玲芬¹ 苑红伟³

¹ 宁波大学理学院物理系, 浙江 宁波 315211
² 宁波大学信息科学与工程学院电子与电气工程系, 浙江 宁波 315211
³ 江苏大学机械工程学院光信息科学与技术系, 江苏 镇江 212013

摘要 提出一种新的多级联线性啾啾光纤光栅密集梳状滤波器, 该结构由多个相同的线性啾啾光纤光栅(LCFBG)组成, 并对其光谱特性进行了模拟和分析。研究表明, 滤波通道间隔由单元光栅构成的法布里-珀罗(F-P)谐振腔的长度确定, 通过选择合适的光栅总啾啾量、光栅折射率调制深度和光栅级联数, 可以获得反射率高、响应谱宽的多通道滤波效果。采用多级联方式, 在较小折射率调制深度的情况下, 可以实现高反射率, 降低了通常对光栅折射率调制深度的要求。该结构由相同的线性啾啾光纤光栅级联而成, 可以采用同一个光栅模板制作, 容易实现。

关键词 光纤光栅; 啾啾光纤光栅; 梳状滤波器; 法布里-珀罗谐振腔

中图分类号 TN929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1284

Design of Optical Comb Filter with Multi-Concatenated Linearly Chirped Fiber Gratings

Ma Weitao¹ Zhou Jun¹ Xu Tiefeng² Zhang Lingfen¹ Yuan Hongwei³

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

² Department of Electronic and Electric Engineering, School of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo, Zhejiang 315211, China

³ Department of Optical Engineering, School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China

Abstract A novel optical dense comb filter is proposed, which is composed of many identical linearly chirped fiber Bragg gratings (LCFBG). The spectral characteristics of optical dense comb filter are numerically simulated and analyzed. The results show that the channel spacing of filter is controlled by the length of Fabry-Perot (F-P) cavity which is equal to that of unit grating. By choosing optimal structure parameters of grating, for example, the total chirp, the index modulation depth of unit grating and the concatenated grating number, the reflection spectrum of the filter shows the characteristics of high reflectivity, large bandwidth and multi-channels. For the multi-concatenated gratings, which are easy to be made with a single grating mask, the high reflection of filter can be achieved with a low index modulation depth.

Key words fiber grating; chirped fiber grating; comb filter; Fabry-Perot cavity

1 引 言

随着光通信网络的飞速发展, 对高性能的密集梳状滤波器有迫切的需求, 而光纤光栅型梳状滤波

器因其体积小, 插入损耗低, 与光纤兼容和波长选择性好等特点而受到人们的普遍重视。目前已提出多种采用光纤光栅制作梳状滤波器的方案: 一种为取

收稿日期: 2009-06-29; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(60677015, 60977048)、浙江省“钱江人才”项目(2007R10015)、宁波市重点实验室基金(2007A22006)、宁波市自然科学基金(2008A610001)和浙江省教育厅科研项目(20070971)资助课题。

作者简介: 马伟涛(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事导波光学、光通信器件设计与制备技术等方面的研究。

E-mail: maweitao1017@163.com

导师简介: 周 骏(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事非线性光学、光电子材料与器件制备技术等方面的研究。

E-mail: ejzhou@yahoo.com.cn(通信联系人)

样光纤光栅型滤波器^[1~7],如啁啾取样光纤布拉格光栅和相移取样光纤布拉格光栅,光栅的折射率受到取样函数的调制,其反射谱形成分离的周期性的波长通道,通道数目越多需要的折射率调制越大。文献[8]给出 M 通道取样光纤布拉格光栅的折射率调制深度是单通道的 $\sqrt{M/\mu}$ 倍;另一种是采用重叠写入啁啾光纤光栅^[9~12],即在光纤的相同部位写入多个光纤光栅,制成啁啾光纤光栅带通型光滤波器,具有大的反射带宽,但是在光纤的同一位置写入多个光栅并保持良好特性,技术要求高;还有一种是超结构光纤光栅^[13,14],需要复杂取样函数调制和折射率调制,制作难度大。因此,利用光纤光栅获得多通道梳状滤波需要较高的折射率调制,本文提出一种多级联线性啁啾光纤光栅梳状滤波器结构,在光栅折射率调制较小的情况下,可以得到很好的梳状谱。实际制作多级联光纤光栅时,利用相位模板法可以在制备好一个单元光栅后,精确移动光纤到下一写入位置制作而成^[15]。

2 模型与理论

多级联线性啁啾光纤光栅(LCFBG)结构如图1所示,由多个相同的线性啁啾光纤光栅级联构成,每

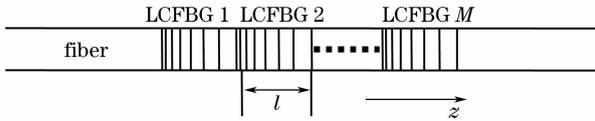


图1 多级联线性啁啾光纤布拉格光栅示意图

Fig.1 Schematic of multi-concatenated linearly chirped fiber Bragg gratings

个线性啁啾光纤光栅称为单元光栅,单元光栅的数目 M 称为级联数。每个单元光栅对应的相同位置可以看作反射同一波长光的反射镜,相邻的镜面构成法布里-珀罗(F-P)谐振腔,则多级联光纤光栅形成多F-P腔干涉^[16],其效果使透射峰展宽,反射通道宽度变窄,形成反射率大、通道平坦和等间隔的反射光谱。

利用传输矩阵方法^[17]分析级联光纤光栅的光谱特性。取图1所示坐标系,LCFBG1左边界为坐标原点,光的传输方向从左向右,单元光栅长度为 l ,在 $0 \leq z \leq l$ 范围内,即第一个单元光栅的有效折射率调制 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 表示为

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

式中 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 为直流有效折射率变化(即一个周期内的平均有效折射率变化), s 为折射率调制的条纹可见度, Λ 为光栅周期, $\varphi(z)$ 为光栅啁啾。第 m 个单元光栅有效折射率调制 $\delta n_{\text{eff}}(z)$ 表示为

$$\delta n_{\text{eff}}(z) = \delta n_{\text{eff}}[z - (m-1)l], \quad (m = 1, 2, 3, \dots, M) \quad (2)$$

将单元光栅分为 N 段,每一段近似为均匀光栅,那么单元光栅的传输矩阵可以用 N 段均匀光栅的矩阵相乘得到。光栅中的光场表示为沿 $+z$ 方向和沿 $-z$ 方向传播场的叠加,用 R_i, S_i 分别表示穿过第 i 段均匀光栅时向前和向后传播的模场振幅,则其振幅传输关系为

$$\begin{bmatrix} R_i \\ S_i \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} R_{i-1} \\ S_{i-1} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中 \mathbf{F}_i 为第 i 段均匀光栅的传输矩阵,可表示为

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_B \Delta z_i) - j \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z_i) & -j \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z_i) \\ j \frac{k}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z_i) & \cosh(\gamma_B \Delta z_i) + j \frac{\hat{\sigma}}{\gamma_B} \sinh(\gamma_B \Delta z_i) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 Δz_i 为第 i 段均匀光栅的长度, $j = \sqrt{-1}$, $\gamma_B = \sqrt{k^2 - \hat{\sigma}^2}$, 直流自耦合系数 $\hat{\sigma}$ 和交流耦合系数 k 分别定义为

$$\hat{\sigma} = \delta + \sigma - \frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz}, \quad (5)$$

$$k = \frac{\pi}{\lambda} s \overline{\delta n_{\text{eff}}}, \quad (6)$$

式中 δ 为失谐率,且 $\delta = 2\pi n_{\text{eff}}(\lambda^{-1} - \lambda_D^{-1})$, λ 为光波长, λ_D 为光纤光栅的设计波长,直流耦合系数 $\sigma = 2\pi \overline{\delta n_{\text{eff}}}/\lambda$ 。

对于啁啾光纤光栅,有

$$\frac{1}{2} \frac{d\varphi}{dz} = -\frac{4\pi n_{\text{eff}} z}{\lambda_D^2} \frac{d\lambda_D}{dz}. \quad (7)$$

对于线性啁啾光纤光栅,啁啾率 $c = d\lambda_D/dz$, 为常数。总啁啾表示光栅设计波长 λ_D 沿单元光栅的总变化量,用 C 表示,则有 $C = cl$ 。

单元光栅的矩阵为 $\mathbf{F} = \mathbf{F}_N \cdot \mathbf{F}_{N-1} \cdots \mathbf{F}_1$, 则 M 个相同的单元光栅级联后的总传输矩阵为

$$\mathbf{T} = \mathbf{F}^M. \quad (8)$$

级联光栅的总长度为 $L = Ml$, 对于光纤光栅,

采用初始条件 $R(L) = 1, S(L) = 0$, 可得

$$\begin{bmatrix} R(0) \\ S(0) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} R(L) \\ S(L) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

反射率表示为

$$R = \left| \frac{S(0)}{R(0)} \right|^2 = \left| \frac{T_{21}}{T_{11}} \right|^2, \quad (10)$$

这里 T_{11} 和 T_{21} 分别为矩阵 \mathbf{T} 的元素。

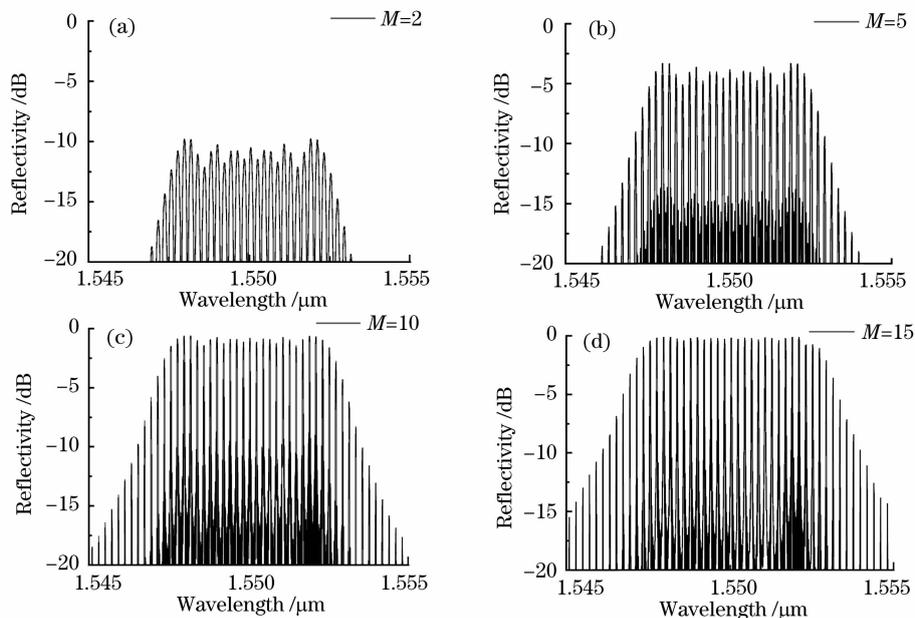


图 2 不同级联数下光栅的反射谱

Fig. 2 Reflection spectrum of the grating with different concatenated numbers

从图 2(a) 可以看到, 当级联数 $M=2$ 时, 由于光栅长度短, 折射率调制深度小, 光栅的反射率很小, 光基本上都透射过光栅, 但由于 F-P 效应, 仍然表现出梳状型谱。从图 2(b), (c), (d) 可以看出随着级联数的增加, 反射率增加, 通道变得尖锐, 但通道间隔没有变化。因为光栅的通道间隔由光栅的长度决定, 这样可以通过选择光栅长度来获取不同的通道间隔。

为清楚起见, 图 3 给出了 $M=10$ 的光谱精细图, 其光谱波长范围为 $1.549 \sim 1.551 \mu\text{m}$ 。从图 3 可以得到, 通道宽度为 0.02867 nm , 通道间隔为 0.207 nm , 而腔长为 4 mm 的 F-P 干涉腔的自由光谱范围为 0.207 nm , 两者一致, 说明多级联线性啁啾光栅的滤波特性可以看作多个 F-P 腔干涉形成的等间隔分布的多通道反射谱。另一方面, 级联数增加使光栅总长度增加, 从而使反射率增大。通过分析更大级联数 M 情况下的光栅输出光谱特性发现, M 增大时, 通道的反射率增大, 单通道顶部平坦, 但当级联数很大时, 光谱基本上没有变化。因此, 虽然增加级联数 M 会使反射率增加, 也不能过

3 模拟结果与分析

3.1 光栅级联数 M 对光谱的影响

选取有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.45$, 中心光纤布拉格光栅设计波长 $\lambda_D = 1.55 \mu\text{m}$, 线性啁啾光纤光栅的总啁啾量 $C = 2 \text{ nm}$, 折射率调制深度为 0.0002 , 单元光栅的长度 $l = 4 \text{ mm}$, 则多级联线性啁啾光纤光栅的级联数 M 对光谱特性的影响如图 2 所示。

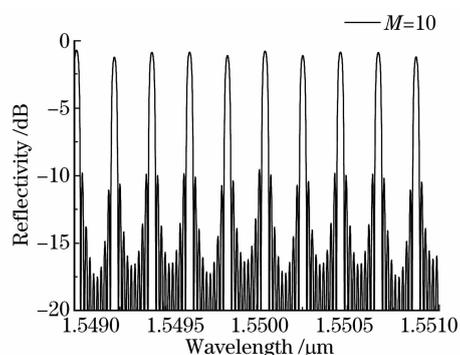


图 3 级联数 $M=10$ 的光谱精细图

Fig. 3 Detail of reflection spectrum of the grating with concatenated number $M=10$

大, 因为这样光栅的总长度变得很大, 制作困难, 而且 M 过大, 会使级联光栅效率变低。

3.2 总啁啾量对光谱的影响

增加光栅的总啁啾量, 可以增加反射谱带宽, 因此在通道间隔不变的情况下, 可以获得更多通道数。按照 3.1 节中相同的模拟参量, 选取级联数 $M=10$, 在不同总啁啾量情况下, 总啁啾量对反射谱的影响如图 4 所示。

从图 4 可以看出,随着总啁啾量的增加,反射谱带宽迅速变宽,啁啾光栅的反射谱带宽 $\Delta\lambda_{\text{chirp}}$ 与总啁啾量有如下关系^[18]: $\Delta\lambda_{\text{chirp}} = 2n_{\text{eff}}C$, 可得图 4(a), (b), (c) 和 (d) 中反射谱所对应的带宽分别为 2.9, 5.8, 8.7 和 11.6 nm。另一方面,在光栅反射谱带宽范围内,通道间隔相等,通道反射率相同,从图 4(d)

可见,在 1.545~1.555 nm 范围内,通道数达到 50 个。但是随着总啁啾量的增加,通道反射率也在降低,由 3.1 节结果可知,通过增加级联数 M ,可以增加反射率,从而可以弥补因增加总啁啾量引起的反射率的降低。

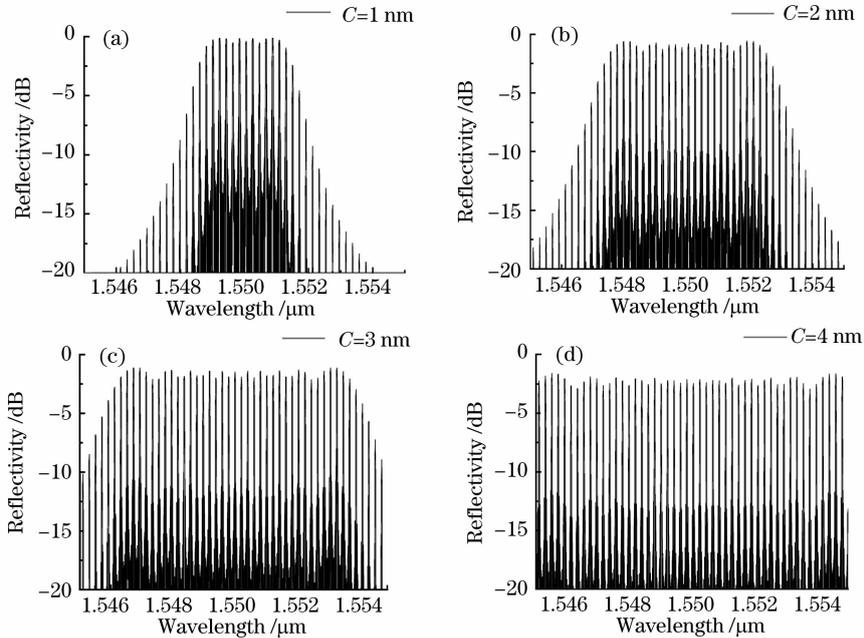


图 4 不同总啁啾量时的光栅反射谱

Fig. 4 Reflection spectrum of grating with different total chirps

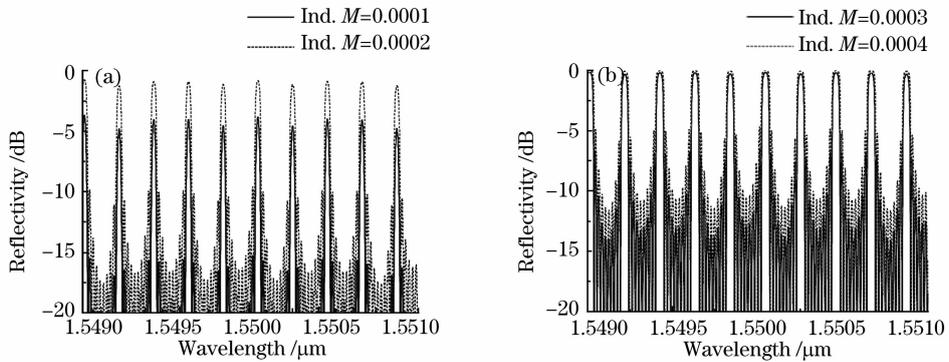


图 5 不同折射率深度的光栅反射谱

Fig. 5 Reflection spectrum of grating with different index modulation depths

3.3 光栅折射率调制深度对光谱的影响

图 5 给出单元光栅总啁啾量 $C=3$ nm 和级联数 $M=10$ 时,折射率调制与反射谱的关系,从中可以看出当折射率调制深度从 0.0001 变为 0.0004 时,通道的反射率迅速增大,在很小的折射率变化范围内,就能达到很高的反射率,甚至接近 0。但从图 5(b) 可以看出,当折射率调制深度从 0.0003 变到 0.0004 时,最大反射率非常接近,说明当折射率调制深度达到一定值后再继续提高,对反射率影响不大,反而会

使反射谱的旁瓣增强,滤波效果变差。因此通常取小的折射率调制深度,以保证获得高的通道隔离度,反射率的提高可以通过提高级联数的方法达到。

3.4 单元光栅长度对光谱的影响

对于不同的单元光栅长度,级联光栅反射谱通道的间隔不同。图 6 给出在级联数 $M=10$ 和单元光栅总啁啾量 $C=1$ nm 情况下,单元光栅长度 $l=8$ mm 与 $l=4$ mm 时的光栅光谱。从图中可以明显地看出, $l=8$ mm 情况下的反射峰个数是 $l=4$ mm

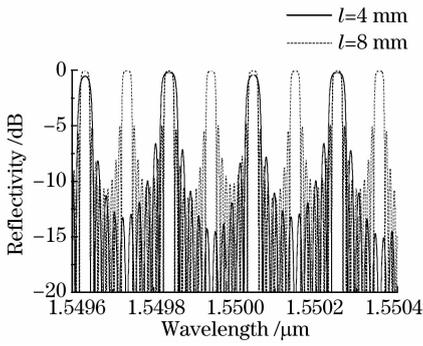


图6 不同单元光栅长度的光栅反射谱

Fig. 6 Reflection spectrum of grating with different unit grating lengths

的反射峰个数的1倍,并且在长度 $l=4$ mm光栅的相邻反射峰中间增加一个反射峰。 $l=8$ mm的光谱通道宽度稍微比 $l=4$ mm的光谱通道窄。这是由于在单元光栅总啁啾不变的情况下,增加其长度,单元光栅啁啾率就会减小,从而改变光栅对波长的反射率,影响通道宽度,同时还会使光谱通道的隔离度降低。但是,在单元光栅长度较大时,比较容易实现较大的总啁啾,获得大带宽窄通道的滤波性能。

3.5 相移对光栅光谱的影响

在实际写入级联光栅时,很难保证各单元光栅之间的距离为0,从而在各单元光栅之间将引入相移,如果单元光栅间的距离为 Δz ,那么相移可以表示为 $\varphi = 2\pi n_{\text{eff}} \Delta z / \lambda_D$,并且相移存在随机误差,对光栅光谱产生影响^[19,20]。

为了讨论随机相移对光栅光谱的影响,使模拟结果更接近实际情况,假设各单元光栅之间的相移相等,即单元光栅之间有一固定距离。从前面的讨论知道,级联光栅光谱的通道间隔由形成的F-P腔的长度确定,因此,单元光栅之间的距离将使F-P腔的长度发生改变,从而影响通道间隔。计算表明,

在单元光栅长度 $l=4$ mm,单元光栅间距小于4个光栅周期时,对光谱通道间隔大小的影响很微弱,可以忽略,但对光谱峰值位置产生影响。对于更长的单元光栅,允许引入的单元光栅间的距离也会增大。

图7给出对应不同固定相移量的光栅反射谱,光栅参量与图3的相同。由图可见,相移量从 0.25π 到 π 变化时,光栅光谱整体发生平移,但通道间隔没有发生变化。对比图3还可以看出, $\varphi=\pi$ 的反射谱与 $\varphi=0$ 的反射谱重合,所以光谱曲线以 π 相移量为周期,仅使光栅光谱形状整体平移。

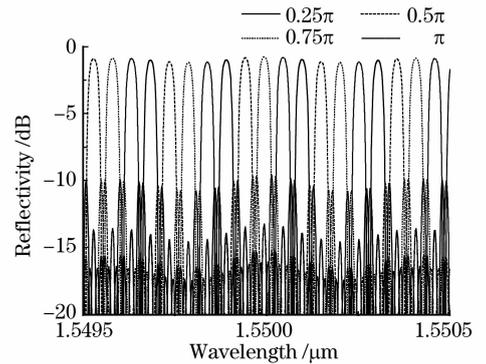


图7 不同固定相移量对应的光栅反射谱

Fig. 7 Reflection spectrum of grating with different stationary phase shifts

在一定的相移范围内考虑随机相移的影响。图8给出随机相移分别在 $0\sim 0.1\pi$, $0\sim 0.25\pi$, $0\sim 0.5\pi$ 范围内对应的光栅反射谱,相移量由计算机生成。对比图8(a)和图3,可见随机相移在 $0\sim 0.1\pi$ 范围内的反射谱与相移为0的反射谱很接近,随着随机相移的范围增大,旁瓣增加,光谱滤波效果变差,但仍表现出梳状滤波特性,如图8(b)和图8(c)所示。如果随机相移的取值范围过大,模拟表明,将失去梳状滤波效果。因此,在实际制作中,应尽量减小随机相移的范围,控制在 0.5π 以内为好。

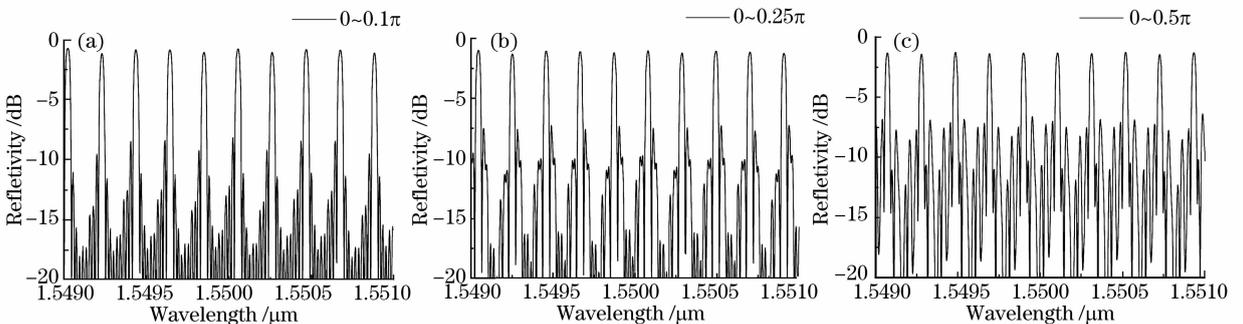


图8 不同范围随机相移的光栅反射谱

Fig. 8 Reflection spectrum of grating with random phase shifts under different phase-shift ranges

4 结 论

对多级联线性啾啾光纤光栅的反射谱特性进行了数值模拟和分析, 讨论了级联数、总啾啾量、折射率调制深度、单元光栅长度和相移对光栅光谱的影响。通过选择单元光栅的长度来控制 F-P 谐振腔的长度, 从而得到不同的通道间隔。选取大的总啾啾量, 可以得到较大的带宽; 通过增加级联数和折射率调制深度, 可以得到较高的反射率, 但是增加级联数, 降低了对大的折射率调制深度的要求, 可以在较小折射率调制深度范围内实现多通道滤波; 在多级联光栅制作时, 各单元光栅间引入的相移应控制在 $0 \sim 0.5\pi$ 范围内为好。总之, 上述因素都对光栅的反射率产生影响, 进而影响到通道的谱宽和通道间的隔离度。合理选择和优化设计级联光栅参量值, 可以实现通道间隔窄和高反射率的密集梳状滤波效果, 从而在密集波分复用光通信系统中得到应用。

参 考 文 献

- Xihua Zou, Fei Wang, Wei Pan. Flat-top and ultranarrow bandpass filter designed by sampled fiber Bragg grating with multiple equivalent phase shifts [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(4):691~694
- José Azaña, Chinhua Wang, Lawrence R. Chen. Spectral self-imaging phenomena in sampled Bragg gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(9):1829~1841
- Lawrence R. Chen, José Azaña. Spectral Talbot phenomena in sampled arbitrarily chirped Bragg gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2005, **250**(5):302~308
- Xiangfei Chen, Chongcheng Fan, Y. Luo *et al.*. Novel flat multichannel filter based on strongly chirped sampled fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2000, **12**(11):1501~1503
- Isa Navruz, N. Fatma Guler. A novel technique for optical dense comb filters using sampled fiber Bragg gratings [J]. *Optical Fiber Technology*, 2008, **14**(2):114~118
- Yusuke Nasu, Shinji Yamashita. Densification of sampled fiber Bragg gratings using multiple-phase-shift (MPS) technique [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4):1808~1817
- Hojoon Lee, G. P. Agrawal. Add-drop multiplexers and interleavers with broadband chromatic dispersion compensation based on purely phase-sampled fiber gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2004, **16**(2):635~637
- Hongpu Li, Ming Li, Yunlong Sheng *et al.*. Advances in the design and fabrication of high-channel-count fiber Bragg gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(9):2739~2750
- Xu Ou, Lu Shaohua, Dong Xiaowei. Research progress for filters based on superimposed chirped fiber Bragg gratings [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(3):63~68
- 许 鸥, 鲁韶华, 董小伟. 重叠写入啾啾光纤光栅型滤波器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(3):63~68
- Suresh Pereira, Sophie LaRochelle. Field profiles and spectral properties of chirped Bragg grating Fabry-Perot interferometers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(6):1906~1915
- Radan Slavik, Sophie LaRochelle. Large-band periodic filters for DWDM using multiple-superimposed fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(12):1704~1706
- Xu Xinhua, Wang Qing. Theoretical analysis of linearly chirped Moiré fiber grating [J]. *Acta Photonic Sinica*, 2007, **36**(9):1618~1623
- 徐新华, 王 青. 线性啾啾莫尔光纤光栅的理论研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9):1618~1623
- Jia Baohua, Sheng Qiuqin, Feng Danqin *et al.*. Study on the theory of super-structured fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):247~251
- 贾宝华, 盛秋琴, 冯丹琴 等. 超结构光纤布拉格光栅的理论研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(3):247~251
- Cao Hui, Sun Junqiang, Zhang Xinliang *et al.*. A novel design methodology for superstructure fiber Bragg grating comb filter [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(9):3077~3082
- 曹 辉, 孙军强, 张新亮 等. 一种新颖的超结构光纤 Bragg 光栅梳状滤波器的设计[J]. *物理学报*, 2004, **53**(9):3077~3082
- Adel Asseh, Helge Storøy, Bengt E. Sahlgren *et al.*. A writing technique for long fiber Bragg gratings with complex reflectivity profiles [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1419~1423
- Herman van de Stadt, Johan M. Muller. Multimirror Fabry-Perot interferometers [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1985, **2**(8):1363~1370
- T. Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1277~1294
- Raman Kashyap. *Fiber Bragg Gratings*[M]. London: Academic Press, 1999. 312~314
- Lu Shaohua, Xu Ou, Dong Xiaowei *et al.*. Analysis for the reflective spectrum characteristics of chirped phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(4):577~581
- 鲁韶华, 许 鸥, 董小伟 等. 啾啾相移光纤光栅的反射谱特性[J]. *中国激光*, 2008, **35**(4):577~581
- Cai Lulu, Wu Fei, Wang Yutian. Analysis for the reflective spectrum characteristics of phase-shifted fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(8):2070~2075
- 蔡璐璐, 吴 飞, 王玉田. 相移光纤光栅的反射谱特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(8):2070~2075