

文章编号: 0258-7025(2004)09-1099-04

弱非周期性相位取样啁啾光栅的 优化方法

黄力群¹, 黄卫平², 陈根祥², 王 里¹

(¹ 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044; ² Electrical and Computer Engineering Dept. McMaster Univ. CA)

摘要 取样光栅可以同时多个信道进行滤波或色散补偿,所以在波分复用(WDM)系统中有广泛的应用,其中周期相位取样光栅是一种很有前途的设计方法,但周期取样的方法会使取样光栅的所有信道具有相同的色散补偿能力。提出设计弱非周期性相位取样啁啾光栅的优化方法,通过引入一组与信道色散补偿量有关的啁啾控制参数,可使不同信道的色散补偿量存在差异。运用该方法设计出弱非周期的取样光栅后,可用传输矩阵法来模拟该光栅的复反射谱,结果显示通过调整啁啾控制参数,可方便地控制不同信道的色散补偿能力,从而能实现对光纤链路色散与色散斜率的同时补偿,而且取样函数的幅度值的起伏则被完全消除。

关键词 光电子学;取样啁啾光栅;色散补偿;多信道;弱非周期性

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A

Optimization of Weakly Aperiodic Phase-Only Sampled Chirp Gratings

HUANG Li-qun¹, HUANG Wei-ping², CHEN Gen-xiang¹, WANG Li¹

(¹ *Institution of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China*
² *Electrical and Computer Engineering Dept. McMaster Univ. CA*)

Abstract Sampled fiber Bragg gratings (FBG) have many applications in wavelength division multiplexed (WDM) systems, and can be filtering or chromatic dispersion compensating simultaneously in multiple channels. Periodic phase-only sampling is a preferable approach to the design of multi-channel FBG, which facilitates the fabrication of multi-channel FBG. However the periodic sampling function replicates a given chromatic dispersion function, as a result, all the channels are identical and the resulting device cannot compensate for the dispersion slope. An optimization method is presented to design weakly aperiodic phase-only sampled gratings, and a set of chirp controlling parameters, which are related to chromatic dispersion in each channel, are introduced to compensate the chromatic dispersion and the dispersion slope simultaneously. By using the simulated annealing method, an optimized set of the relative channel phases can be found to reducing the difference between the minimum and the maximum values of the amplitude modulation of the sampling function. Then, an iterative procedure, called the Gerchberg-Saxton algorithm, is applied to remove the amplitude modulation of the sampling function, and the aperiodic phase-only sampled grating is synthesized successfully. Finally, the complex reflection spectrum of the aperiodic phase-only sampled grating is simulated by using the transfer matrix method. All time delay curves in all channels are overlapped in one figure for a visible comparison of their slope, and the result shows that the dispersion compensation capacity in each channel can match with the dispersion slope of fiber link exactly. However, as a price of the Gerchberg-Saxton algorithm, the additional channels appear at both sides of the reflection spectrum.

Key words optoelectronics; sampled chirp grating; dispersion compensation; multi-channel; weak aperiodicity

收稿日期: 2003-06-16; 收到修改稿日期: 2003-08-28

作者简介: 黄力群(1970—), 男, 湖北鄂州人, 北京交通大学博士研究生, 主要从事光纤光栅和光放大器方面的研究工作。

E-mail: persistent_hlq@sina.com

1 引 言

随着密集波分复用(DWDM)系统在光传送网中占据主导地位,光纤光栅作为窄带滤波器的缺点逐渐显现出来,这已成为光纤光栅在 DWDM 系统中广泛应用的主要障碍。用多个光纤光栅的级联或并联来扩展滤波器带宽的方法,既会降低器件的整体性能^[1],同时也是非常不经济的。在此背景下,取样光纤光栅因其固有的宽带性质和潜在的广泛应用前景而在最近几年成为新的研究热点。用取样光纤光栅可以制作成宽带准连续可调的半导体外腔激光器^[2]、全光纤滤波器^[3]或光纤光栅激光器,同样,用取样光纤光栅还能实现宽带的色散补偿^[4]。

1998年,M. Ibsen 等用 sinc 取样函数制作出均匀的梳状光纤光栅滤波器^[5],但所需的最大折射率调制幅度是单个同样光纤光栅的 N 倍(N 为滤波器的信道数),这对于高信道数的滤波器来说是难于实现的。然后,W. H. Loh 等用交错(interleaved)信道组的技术降低了取样光栅所需的折射率最大调制幅度^[6]。最近 A. V. Buryak 等提

出了相位取样光栅的优化方法^[7];J. Rothenberg 等则用完全的相位取样方法制作出均匀的梳状滤波器^[8],折射率调制幅度约等于同样单个光栅的 \sqrt{N} 倍,而且该方法降低了取样光栅写入的技术难度,是一种很有前途的取样光栅制作方法。

因常用的 G. 652 和 G. 655 单模光纤都存在色散斜率,而周期取样的啁啾光栅各信道有完全相同的色散补偿量,显然这种啁啾光栅不能完成精确的色散补偿。本文在前人工作的基础上,总结出弱非周期性相位取样啁啾光栅的优化方法,使取样光栅各信道的色散值完全由设计参数所控制,并能实现色散和色散斜率的同时补偿。

2 弱非周期性相位取样啁啾光栅的优化模型

在参考文献[7]的公式(6)中引入啁啾控制参数,频率间隔相等的 N 个信道的弱非周期取样啁啾光栅的折射率调制函数可表示为

$$\sum_{n=1}^N A(z) \cdot \exp\{i[K_0 z + c_0 z^2 + (2n - N - 1)\Delta kz/2 + c_n z^2 + \phi_n]\} = A(z) \cdot \exp[i(K_0 z + c_0 z^2)] \cdot S(z) \quad (1)$$

其中, A 为与折射率调制幅度有关的单个光栅的切趾函数; K_0 , c_0 和 Δk 分别为与光栅周期、啁啾系数和信道频率间隔有关的物理量; c_n 表征第 n 个信道的啁啾系数与中心信道啁啾系数之间的差别,其数值大小会影响到该信道的色散补偿量; ϕ_n 则是第 n 个信道光栅的相对相位, $S(z) = Q(z) \cdot \exp(i\psi)$,它便是需要优化的取样函数。根据式(1)可知

$$Q(z) = \sqrt{N + \sum_{n_2=1 \neq n_1}^N \sum_{n_1=1}^N \cos[(n_1 - n_2)\Delta kz + c_{n_1} z^2 + \phi_{n_1} - c_{n_2} z^2 - \phi_{n_2}]} \quad (2)$$

$$\psi(z) = \tanh \left[\frac{\sum_{n=1}^N \sin[(2n - N - 1)\Delta kz/2 + c_n z^2 + \phi_n]}{\sum_{n=1}^N \cos[(2n - N - 1)\Delta kz/2 + c_n z^2 + \phi_n]} \right] \quad (3)$$

根据信道的频率间隔和光纤的色散斜率可计算出 Δk 和 c_n ,然后,运用模拟退火算法可以搜索到一组 ϕ_n ,使得取样函数的幅度值 $Q(z)$ 的最大值与最小值之差取得最小值。最后可以通过 Gerchberg-Saxton 迭代算法进一步减小取样函数的幅度调制,这类类似于普通的相位取样光栅的优化方法,在允许带外附加信道的幅度值不为零的条件下,可以完全消除取样幅度的调制,从而得到弱非周期性的相位取样啁啾光栅。

3 9 信道弱非周期性取样啁啾光栅的数值模拟结果

通过以上方法,设计了一个 9 信道弱非周期性的取样啁啾光栅,信道频率间隔 100 GHz,中心波长为 1550 nm,取样光栅的长度为 10 cm,它的两端使用升余弦函数切趾。根据式(2),采用模拟退火算法可使取样函数幅度值有最小的起伏范围,图 1 显示了优化结果,为了清晰显示只选取了 0.4 cm 的光栅来观察,此时该幅度值的最大差值只有 0.81,平均

值约等于 \sqrt{N} 。然后根据式(3),可以计算出取样函数的相位值沿光栅的分布情况,如图 2 所示,同样为清晰显示,图中只取了 0.4 cm 的光栅来观察。需要指出的是,因为所计算的光栅具有弱的非周期性,取样函数的幅度和相位沿光栅的分布并不具备完全的周期性,但因为各信道的色散补偿量差异很小,单凭计算的图样很难分辨出取样函数的弱非周期性。

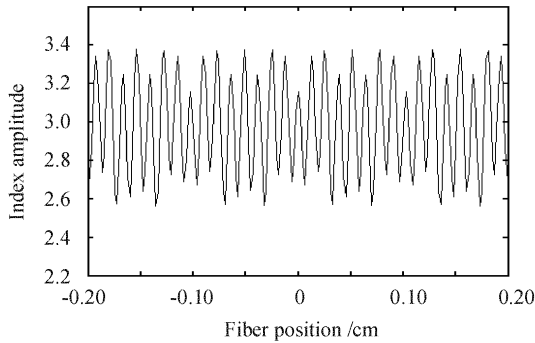


图 1 通过退火算法得到的取样函数幅度值

Fig. 1 Index amplitude of sampling function obtained by annealing algorithm

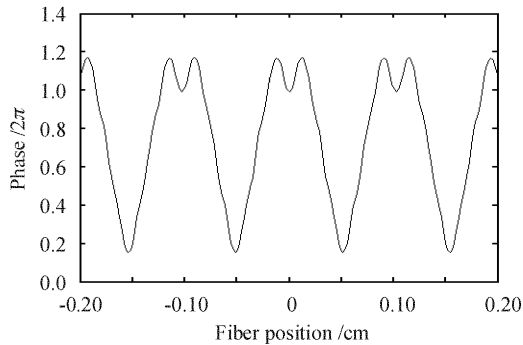


图 2 通过退火算法得到的取样函数相位值

Fig. 2 Phase of sampling function obtained by annealing algorithm

在优化的基础上,可以采用 Gerchberg-Saxton 迭代算法来消除取样函数幅度值的起伏,该算法的思想是:用渐近值 \sqrt{N} 来代替取样函数的幅度值,并对它进行傅里叶变换取得对应的谱响应。然后根据设计所需的带内谱响应来修正所得结果,再作傅里叶逆变换,得到新的取样函数。然后重复第一步,并连续迭代,从而最终消除取样函数的幅度起伏。和普通的相位取样光栅不同的是,对于弱非周期性的相位取样光栅来说,它的频谱响应不是完全分离的值,也就是说,在各信道中心频率附近也存在着微弱的谱响应。图 3 是通过迭代法最终获得的取样函数的相位值,此时,该函数的幅度值变为一个约等于

\sqrt{N} 的常数,它的起伏被完全消除。图 3 中的点线是迭代前由模拟退火算法所取得的相位值,可见两者之间差异很小。图 4 是对优化设计后的取样函数作傅里叶变换的结果,在 9 个主峰的两侧产生了微弱的谐频。

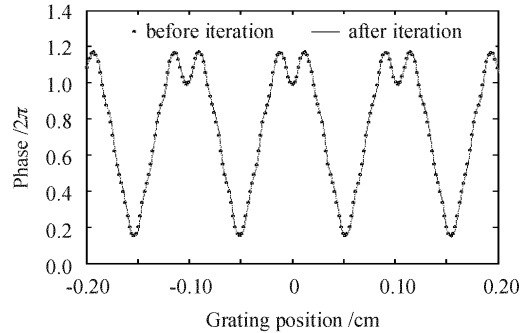


图 3 经过迭代法消除幅度取样后的相位取样函数
Fig. 3 Phase after Gerchberg-Saxton iteration to reduce modulation amplitude

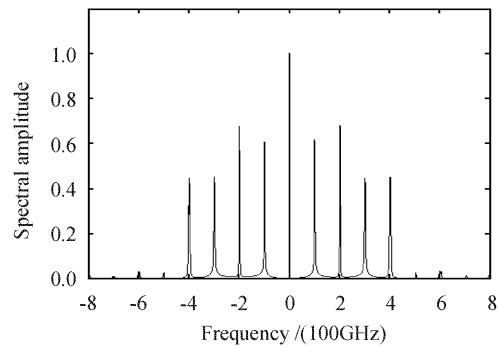


图 4 取样函数的傅里叶变换

Fig. 4 Fourier transform of sampling function

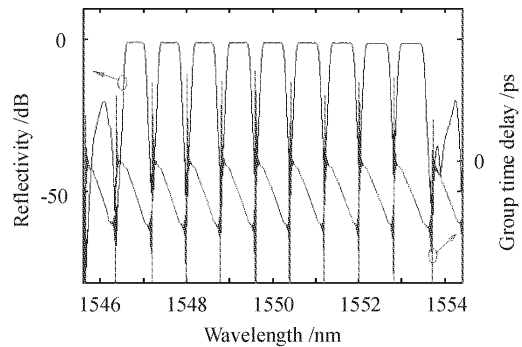


图 5 弱非周期性的取样光栅反射谱和时延曲线

Fig. 5 Reflectivity and group delay of weakly aperiodic phase-only sampled chirp gratings

根据所取得的取样函数可以计算光栅的谱响应,图 5 显示了弱非周期性取样啁啾光栅的反射谱和时延曲线,可见所取得的取样光栅的 9 个反射峰

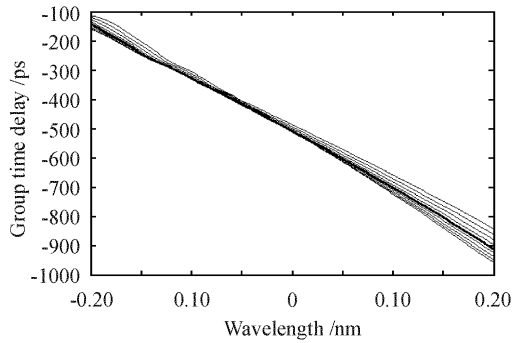


图 6 时延曲线叠加在一起的相互比较

Fig. 6 Comparison among group delay curves of nine channels

有几乎完全相等的峰值反射率。图 6 是将 9 个信道的时延曲线叠加到一个图中显示,以利于比较,其中粗黑线对应第 5 个信道,它的中心频率为 1550 nm。图 6 显示的各信道的时延曲线存在明显的差异,对应短波长信道的时延曲线有较小的斜率绝对值,对应长波长信道的时延曲线则相反,它们有较大的斜率绝对值。也即短波长信道有较小的色散补偿量,而长波长信道有较大的色散补偿量。

模拟计算中,并没有针对具体光纤的色散斜率来设计弱非周期性的相位取样啁啾光栅,而是取了一个较大的值。如果需要精确的设计,可以根据实际的色散斜率来计算各信道的参数 c_n ,从而取得色散和色散斜率的同时补偿。

4 讨 论

相位取样的啁啾光栅完全消除了取样函数幅度值的起伏,所以能简化取样光栅的写入过程;同时它大幅度地降低了光栅折射率的最大调制幅度,这非常有利于制作高信道数的取样光栅,目前已实际制作出来的相位取样光栅的信道数达到了 45 个^[4]。

但相位取样光栅也带来了一个缺点,它产生了附加的带外信道,这使得它的配置灵活性不高,只有在附加的带外信道不产生影响的条件下才能使用,这一缺点有待克服,所幸的是,频率间隔为 100 GHz,信道数为 45 的相位取样光栅已能覆盖整个 C 波段。

在相位取样方法的基础上,引入了参数 c_n 来控制各信道的色散补偿量,根据具体的光纤色散斜率可计算这一参数,从而能实现取样光栅对色散和色散斜率的同时补偿,这进一步增强了相位取样啁啾光栅的色散补偿能力。虽然只对 9 个信道的弱非周期性取样啁啾光栅作出了优化,但所提供的方法完全适用于高信道数取样光栅的设计。

参 考 文 献

- 1 D. Pastor, A. Martínez, J. Capmany *et al.*. Impact of fiber Bragg grating based OADM outband dispersion in DWDM-SCM systems [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(4):567~569
- 2 A. Bergonzo, J. Jacquet, D. De. Gaudemaris *et al.*. A very simple and efficient widely tunable sampled fiber Bragg grating external cavity laser [C]. *OFC*, 2003, **2**:462~464
- 3 Cai Haiwen, Huang Rui, Qu Ronghui *et al.*. All fiber interleaved filter using Mach-Zehnder based sampled fiber gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(3):243~246
蔡海文,黄锐,瞿荣辉等.基于马赫-曾德尔干涉仪和取样光纤光栅的全光纤梳状滤波器[J].*中国激光*, 2003, **30**(3):243~246
- 4 J. Rothenberg, F. Babian, Z. Brodzeli *et al.*. Phase-only sampling for fabrication and design of high channel-count fiber Bragg gratings [C]. *OFC*, 2003, **2**:516~517
- 5 M. Ibsen, M. K. Durkin, M. J. Cole *et al.*. Sinc-sampled fiber Bragg gratings for identical multiple wavelength operation [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, **10**(6):842~844
- 6 W. H. Loh, F. Q. Zhou, J. J. Pan. Sampled fiber grating based-dispersion slope compensator [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(10):1280~1282
- 7 A. V. Buryak, K. Y. Kolossovski, D. Stepanov. Optimization of refractive index sampling for multichannel fiber Bragg gratings [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(1):91~98
- 8 J. E. Rothenberg, H. Li, Y. Li *et al.*. Dammann fiber Bragg gratings and phase-only sampling for high channel counts [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(9):1309~1311