

折射率周期分布取样光纤 Bragg 光栅的快速分析方法*

周志, 潘炜, 罗斌, 邹喜华, 张伟利

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

摘 要: 基于 Chebyshev 恒等关系, 提出了一种分析折射率周期分布取样光纤 Bragg 光栅 (Sampled Fiber Bragg Grating, SFBG) 的快速方法. 这类 SFBG 由许多结构一致的折射率分布周期构成, 对应计算过程中多次重复的幺模矩阵运算, 计算效率低; 利用 Chebyshev 关系可将传输矩阵的幂运算简化为一次矩阵运算, 因而这种快速算法能有效地简化计算. 应用此方法分析两种典型的周期性结构光栅 (周期啁啾 SFBG 和二元相位 SFBG), 数值结果充分验证了其计算速度上的优势.

关键词: 光纤光学; 取样光纤 Bragg 光栅 (SFBG); 传输矩阵法; Chebyshev 恒等关系

中图分类号: TN253; TN929.11

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2007)12-2266-4

0 引言

作为光电子学的前沿课题之一, 光纤光栅的研究和应用已深入到光通信、光传感、光计量、微波技术等众多领域^[1-2]. 近年, 随着密集波分复用 (DWDM) 技术的成熟和波长信道的密集化, 具有多信道处理功能的器件备受关注. 由于 SFBG 的反射 (或透射) 特性具备多信道梳状滤波功能^[3-8], 因而这类特殊结构的光纤光栅的研制技术也迅速发展.

SFBG 的分析方法源自光纤光栅, 目前主要的分析方法包括耦合模方程、波束传播法、傅里叶变换、干涉理论、以及传输矩阵法等^[3-11]. 其中, 传输矩阵法是一种处理光纤光栅 (尤其是非均匀型光纤光栅) 的经典数值方法, 国内外诸多文献已有介绍^[3-6, 9-11]. 在课题组的前期工作中, 已应用传输矩阵法对各种光栅型器件的滤波特性进行分析和设计^[9-11], 取得了较好的成效. 在此基础上, 本文着重针对折射率周期分布 SFBG 的结构特点, 利用 Chebyshev 恒等关系^[12] 简化传输矩阵的幂运算, 有效提高了计算和分析的速度. 此快速分析方法在周期性啁啾 SFBG 和二元相位 SFBG 两个应用实例中

都体现了很高的效率.

1 器件结构及方法描述

1.1 传输矩阵与折射率周期分布 SFBG

传输矩阵法在处理非均匀光栅 (切趾光栅、啁啾光栅、取样光栅等) 时采用均匀分段的思路^[3]. 如图 1 中的子图, 将非均匀光栅划分为 m 个子区域 (m 根据具体情况来确定); 每一子区域都视为均匀光栅, 对应一系列独立的传输矩阵 ($F_1, F_2, F_3, \dots, F_m$).

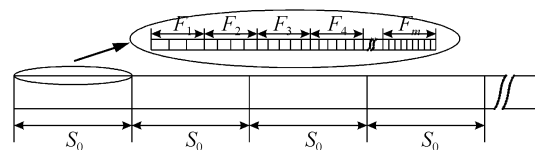


图 1 折射率周期分布 SFBG 的结构

Fig. 1 Structure of an SFBG with periodic index distribution

设定 A, B 和 A_0, B_0 分别表示光栅首端正向、反向传输的光场和光栅末端正向、反向传输的光场, 则反射特性 (或传输特性) 可用传输矩阵连乘的方式来计算, 表示为

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = F_1 F_2 F_3 \dots F_m \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_j = \begin{bmatrix} \cosh(r_j \Delta z) - i(\hat{\sigma}_j / r_j) \sinh(r_j \Delta z) & -i(k_j / r_j) \sinh(r_j \Delta z) \\ i(k_j / r_j) \sinh(r_j \Delta z) & \cosh(r_j \Delta z) + i(\hat{\sigma}_j / r_j) \sinh(r_j \Delta z) \end{bmatrix} \quad (1 \leq j \leq m) \quad (2)$$

*国家自然科学基金 (10174057, 90201011)、教育部科学技术研究重点项目 (105148)、四川省应用基础研究项目 (03JY029-048-1) 和宽带光纤传输与通信网技术教育部重点实验室开放基金 (KF2006) 资助
Tel: 028-87600235 Email: zhouzhi@home.swjtu.edu.cn
收稿日期: 2006-09-25

式中: $i = \sqrt{-1}$, $r_j = \sqrt{k_j^2 - \hat{\sigma}_j^2}$, $\hat{\sigma}_j = \delta + \sigma_j - (1/2)(d\phi/dt)$, $\delta = 2\pi n(1/\lambda - 1/\lambda_B)$, $\sigma_j = 2\pi \Delta n_j / \lambda$, $k_j = \pi \nu \Delta n_j / \lambda$, 各参量的定义和说明见文献^[3].

上述均匀分段过程中, 在保证耦合作用有效的前提下, 子区域越小, 计算结果的准确度就越高, 尤

其体现在是强切趾效应或强啁啾效应作用下. 因而,分析光栅特性时计算量显著增大,此时需要在准确度和速度之间进行合理取舍. 但注意到在 SFBG 中存在一大类折射率分布呈周期性的光栅,充分利用这种周期性对矩阵运算进行等效的简化处理,便能同时改善分析方法的准确度和速度,此即本文的快速分析方法. 下面简要介绍折射率周期分布 SFBG.

图 1 给出了折射率周期分布 SFBG 的结构,其显著特点是具有周期性——由许多相同的折射率分布周期构成. 定义单个折射率分布周期的传输矩阵为 S_0 , SFBG 的反射和传输特性可由式(3)得到

$$\begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = S_0 S_0 S_0 \dots S_0 \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} = (S_0)^N \begin{bmatrix} A_0 \\ B_0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $S_0 = F_1 F_2 F_3 \dots F_m$, N 表示折射率分布周期的数目.

1.2 基于 Chebyshev 恒等关系建立快速分析方法

在式(3)中,需要对传输矩阵 S_0 进行多重运算,因而降低了计算速度. 由于 S_0 是么模矩阵,借助 Chebyshev 关系可将 S_0 的幂运算简化为一次运算,对应的表达式为^[12]

$$(S_0)^N = S = \begin{bmatrix} S_1 U_{N-1} - U_{N-2} & S_2 U_{N-1} \\ S_3 U_{N-1} & S_4 U_{N-1} - U_{N-2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $S_0 = \begin{bmatrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \end{bmatrix}$, $U_N = \frac{\sin(N+1)K\Lambda}{\sin K\Lambda}$, $K\Lambda = \cos^{-1}(\frac{S_1+S_4}{2})$, K 为布洛赫波数, Λ 表示光栅周期.

结合式(4),可知式(3)的计算速度能得到极大改善. 由上文分析可知,折射率周期分布 SFBG 的数值模拟分两步进行:1)利用均匀分段思路得到折射率分布周期的传输矩阵 S_0 ;2)利用式(4)采用快速分析方法.

显然,这种快速分析方法充分地利用了结构上的周期性. 均匀分段时子区域划分越多,节省的时间就越多;折射率分布周期越多,计算时间降低的倍数就越大(约原来的 $1/N$). 需说明的是:均匀 SFBG 是最简单的折射率周期性分布型光栅^[5],但因种子光栅(均匀光栅)不需要作分段处理而不能充分体现快速算法的优势. 下文将以两种非均匀 SFBG(周期性啁啾 SFBG 和二元相位 SFBG)为例,阐述该算法在计算速度上的优势.

2 应用实例

周期性啁啾 SFBG 和二元相位 SFBG 都具有典型的周期性折射率分布,并且每一取样光栅区内都是不均匀的(相位变化也可视为不均匀),不同于简

单均匀 SFBG. 显然,这些条件都有利于充分展示快速算法的性能.

周期啁啾 SFBG 可用作密集型多信道滤波器,其结构如图 2^[11]. $P, M \times P$ 分别表示取样周期和啁啾周期的长度. 结构上,它由众多结构一致的啁啾周期组成,具有良好的周期性;性能上,它基于周期啁啾效应实现频域自成像,显著提高了信道的密集程度,能满足多信道滤波或多信道色散补偿的需求. 以 $N=10$ 个啁啾周期为例,利用快速分析方法分别计算了 $M=3$ 和 $M=5$ 时周期啁啾 SFBG 的反射谱,见图 3. 此快速分析方法与矩阵连乘方法得到的反射谱完全一致,而计算时间(CPU 时间)降低到约 $1/10$ (即 $1/N$).

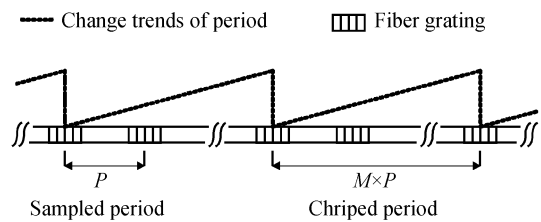


图 2 周期啁啾 SFBG 的结构
Fig. 2 Structure of periodically chirped SFBG

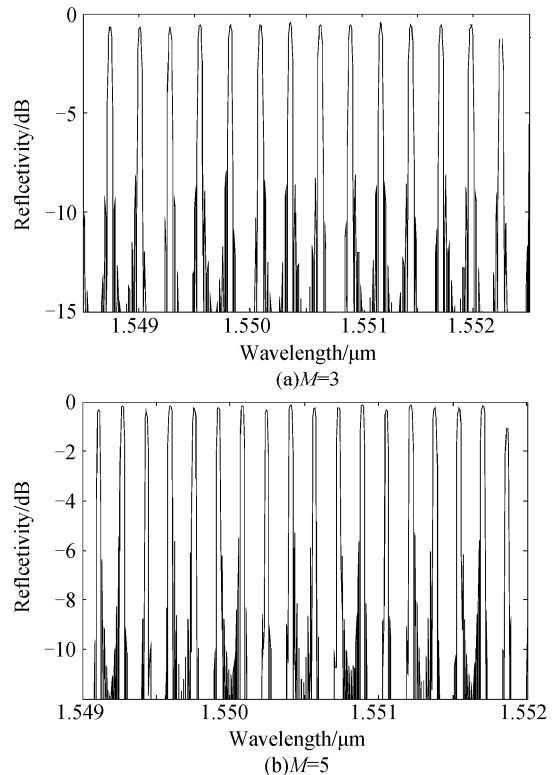


图 3 周期啁啾 SFBG 的反射谱
Fig. 3 Reflection spectra of periodically chirped SFBG

二元相位 SFBG 通过在取样周期内设定一系列的相位跳变点来获得均匀多信道的滤波性能^[13-14]. 它的任一取样周期内都划分为若干子区域,而每一取样周期都具有相同的结构. 因而,二元相位 SFBG 有着更多的重复周期,意味着更能体现快速

方法的效率. 根据文献[13]的设计结果, 设定取样周期数目为 30, 采用快速分析方法模拟 9 信道光栅的反射谱. 如图 4, 不仅保证了计算结果的准确度, 而且极大地降低了运算时间(下降到约 1/30).

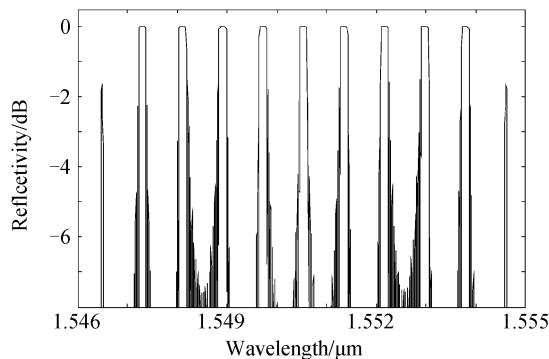


图 4 二元相位 SFBG 的反射谱

Fig. 4 Reflection spectrum of binary-phase SFBG

上述应用实例充分展示了快速分析方法的高准确度、高效率, 验证了在分析折射率周期分布光栅时此方法的优势. 另外, 在此类光栅的优化设计中, 如需利用反射谱或时延谱来确定优化的适应度时, 该快速分析方法能显著加快寻优的速度, 从而提高优化算法或优化方案的效率.

3 结论

折射率周期分布 SFBG 在结构上具有良好的周期性, 其反射或传输特性可通过传输矩阵的幂运算来获得. 为同时保证计算的准确度和速度, 基于 Chebyshev 恒等关系, 将重复的幺模矩阵运算简化为一次矩阵运算, 从而构造出一种快速分析方法. 该方法为分析和优化这类光栅提供了方便, 文中给出了周期啁啾 SFBG 和二元相位 SFBG 反射特性的计算实例, 对应的计算时间减少至约 $1/N$ (N 为周期结构的数目).

参考文献

- [1] HE Xiao-ying, HUANG De-xiu, LI Wei. Analysis of a Fiber Bragg grating external-cavity semiconductor laser by multi-parameter optimization[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(7):961-965.
何晓颖, 黄德修, 李蔚. 光纤光栅外腔半导体激光器的多参量优化分析[J]. *光子学报*, 2006, **35**(7):961-965.
- [2] HU Zhi-xin, ZHU Jun, ZHANG Ling. A new type of fiber grating pressure sensing system with high accuracy[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(5):709-711.
胡志新, 朱军, 张陵. 新型高精度光纤光栅压力传感系统[J]. *光子学报*, 2006, **35**(5):709-711.
- [3] ERDOGAN T. Fiber Bragg spectraspectra[J]. *J Lightwave Technol*, 1997, **15**(8):1277-1294.
- [4] QU Rong-hui, DING Hao, ZHAO Hao, *et al.* Sampled Fiber Bragg grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(2):226-229.
瞿荣辉, 丁浩, 赵浩, 等. 取样光纤布拉格光栅[J]. *光学学报*, 1999, **19**(2):226-229.
- [5] JIA Bao-hua, SHENG Qiu-qin, FENG Dan-qin, *et al.* Study on the theory of super-structured Fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of 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.
- [6] WU Qiang, YU Chong-xiu, WANG Kui-ru, *et al.* Research of chirped-sinc-sampled Fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(3):404-408.
吴强, 余重秀, 王葵如, 等. 啁啾 sinc 取样光纤光栅研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(3):404-408.
- [7] DAI Y T, CHEN X F, XU X M, *et al.* High channel-count comb filter based on chirped sampled Fiber Bragg grating and phase shift[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2005, **17**(5):1040-1042.
- [8] AZAÑA J, WANG C, CHEN L R. Spectral self-imaging phenomena in sampled Bragg gratings[J]. *J Opt Soc Am B*, 2005, **22**:1829-1841.
- [9] ZOU Xi-hua, PAN Wei, LUO Bin, *et al.* Effects of tilt angle on the performances of OADM using Fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(8):910-913.
邹喜华, 潘炜, 罗斌, 等. 倾角对光纤 Bragg 光栅型 OADM 性能的影响[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(8):910-913.
- [10] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al.* Accurate analytical expression for reflection-peak wavelengths of sampled Bragg grating[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, **18**(3):529-531.
- [11] ZOU X H, PAN W, LUO B, *et al.* Periodically chirped sampled Fiber Bragg gratings for multichannel comb filters [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, **18**(12):1371-1373.
- [12] YEH P, YARIV A, HONG C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media. i. general theory[J]. *J Opt Soc Am*, 1977, **67**(4):423-438.
- [13] LI H, SHENG Y, LI Y, *et al.* Phased-only sampled Fiber Bragg gratings for high-channel-count chromatic dispersion compensation[J]. *J Lightwave Technol*, 2003, **21**(9):2074-2083.
- [14] LIU Yu-min, YU Zhong-yuan, YANG Hong-bo, *et al.* Application of dispersion and dispersion slope compensation based on optimization of binary phase-sampled Fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(11):1701-1705.
刘玉敏, 俞重远, 杨红波, 等. 优化二元相位取样光纤布拉格光栅及对色散和色散斜率补偿的应用[J]. *光子学报*, 2005, **34**(11):1701-1705.

A Fast Simulation Method for Sampled Fiber Bragg Gratings with Periodic Index Distribution

ZHOU Zhi, PAN Wei, LUO Bin, ZOU Xi-hua, ZHANG Wei-li

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Received date: 2006-09-25

Abstract: Aided with the Chebyshev identity, a fast simulation method for sampled fiber Bragg gratings (SFBG) with periodic index distribution was proposed. Such gratings consist of many identical index-distribution periods, which correspond to lots of repeated unimodular-matrix operations, resulting in low efficiency in computation. The employment of the Chebyshev identity can establish a fast method between the unimodular matrix and its power operation, namely the improvement on computation. For two analysis instances of periodically chirped SFBG and binary-phase SFBG, the numerical results have fully verified the excellent speed of the method.

Key words: Fiber optics; Sampled Fiber Gratings (SFBG); Transfer matrix method; Chebyshev identity



ZHOU Zhi was born in 1980. He received the Master's degree from the School of Information Science and Technology of Southwest Jiaotong University in 2006, and now he is a teaching assistant at the same university. His main research interests are optical communications and optical devices.