

# 一种分析光纤传感串扰效应的蒙特卡罗方法

李平川<sup>1</sup> 赵学增<sup>1</sup> 夏新林<sup>2</sup>

(<sup>1</sup>哈尔滨工业大学机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)  
(<sup>2</sup>哈尔滨工业大学能源学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 为提高光纤传感系统的复用能力,常将多个谱型重叠的传感器串联,由此引发的串扰效应会导致测量误差的产生,从而需要对串扰效应进行深入分析。将蒙特卡罗法引入到由多个谱型重叠传感器串联组成系统的研究中,该方法能考虑到光谱阴影、任意阶多次反射的串扰效应,计算出系统总反射率谱等信息。为验证方法的可靠性,使用蒙特卡罗法对由两个谱型重叠的传感器串联所组成系统的总反射率谱进行了仿真,并与其数学解析解比较,结果显示两者吻合度高,在选择光线数为  $5 \times 10^6$  时,计算误差量级在  $10^{-3}$  左右,证实了该方法的准确性。在此基础上,采用蒙特卡罗法对无解析解的多个传感器串联所组成系统的总反射率谱进行了仿真计算。

**关键词** 光纤光学;串扰;蒙特卡罗法;光纤传感器;光谱

**中图分类号** TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0505002

## Monte-Carlo Method Analyzing Crosstalk Effect in Fiber Sensing

Li Pingchuan<sup>1</sup> Zhao Xuezheng<sup>1</sup> Xia Xinlin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> School of Mechatronic Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)  
(<sup>2</sup> School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** In order to improve the multiplexing capacity of fiber sensing system, several sensors with overlapped spectra are always connected in series. However, crosstalk effects introduced by serial connections will lead to measurement errors, which means that crosstalk effects between sensors should be well researched. The Monte-Carlo method is introduced to analyze the system composed of several serial sensors with overlapped spectra. This method can take crosstalk effects like spectrum shadowing and arbitrary-order multiple reflections into account and calculate the reflectivity spectrum of the system. In order to verify the reliability of the Monte-Carlo method, reflectivity spectra of a system composed of two serial sensors are calculated by the analytic solution and the Monte-Carlo method, respectively. As the number of light beams set to be  $5 \times 10^6$ , the calculate error level is about  $10^{-3}$ . The comparison indicates that the two methods have a good agreement, approving the accuracy of the Monte-Carlo method. The reflectivity spectrum of a system composed of more than two serial sensors which have no analytic solution is also analyzed by the Monte-Carlo method.

**Key words** fiber optics; crosstalk; Monte-Carlo method; fiber optics sensor; spectrum

**OCIS codes** 060.2310; 060.2370; 060.4230

## 1 引 言

近年来,各类光纤传感器得到迅速的发展<sup>[1~4]</sup>。这些传感器通常采用串联或并联等方式组网,并通过波分复用(WDM)、时分复用(TDM)等技术来实现光纤传感系统的准分布式测量<sup>[5]</sup>。由于传感器并联会造成入射光强减弱、信噪比降低等问题,串联的组网方式逐渐成为研究的热点<sup>[6]</sup>。然而传感器串联

时,它们的谱型重叠会引起光谱阴影和多次反射<sup>[7]</sup>,这些效应会使表征某传感器检测的信号中混入其他传感器的信号,即各传感器的信号间发生串扰。可以认为光谱阴影和多次反射是一种串扰效应,此串扰效应随发生谱型重叠的传感器的数量及反射率的增加而增强。

为了提高传感系统的复用能力,大量学者对由

收稿日期: 2010-11-29; 收到修改稿日期: 2011-02-15

作者简介: 李平川(1981—),女,博士研究生,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: lipc303@hit.edu.cn

导师简介: 赵学增(1961—),男,教授,博士生导师,主要从事传感与测控方面的研究。E-mail: zhaoxz@hit.edu.cn

多个谱型重叠的传感器串联组成的传感系统展开了研究<sup>[7~14]</sup>。对 WDM 系统而言,通过傅里叶变换<sup>[8]</sup>、小波变换<sup>[9]</sup>、最小均方算法(LMS)<sup>[10]</sup>等信号分离方法<sup>[11]</sup>可近似地分离重叠的光谱信号,从而允许传感器的谱型重叠,但需要评估串扰效应引起的误差大小,目前已有学者理论分析了光谱阴影所引起的串扰误差<sup>[12]</sup>。TDM 系统同样需要评价串扰效应引入的误差,目前有学者对光谱阴影<sup>[13]</sup>和低阶多次反射<sup>[7,14]</sup>的串扰误差分析进行了理论研究,其中低阶多次反射的分析建立在各传感器距离相同等假设前提下,且未能建立高阶多次反射的模型。上述研究显示,多个谱型重叠的光纤传感器串联时,由于同时考虑光谱阴影和任意阶多次反射串扰效应的检测解析解难以获得,目前并未有上述串扰效应的完整理论分析。因此,深入研究串扰效应已成为光纤传感复用技术的一个重要课题。目前各类信号分离方法均通过分析光谱来获取传感器信息,如果能准确计算出发生串扰时系统的光谱,通过对比设定的传感器信息与利用某分离方法分析计算光谱得到的传感器信息,即能得到理论上某分离方法串扰误差的大小。

蒙特卡罗法是通过随机变量的统计实验来求解数学物理或工程技术问题的一种统计数值方法<sup>[15,16]</sup>。该方法计算灵活,物理意义清晰,计算精度较好,因而其结果常被作为一种验证标准<sup>[13]</sup>。本文将蒙特卡罗法引入到多个谱型重叠的传感器串联组成的传感系统的仿真分析中,该方法能考虑到任意阶多次反射和光谱阴影的影响,获得系统总反射率谱等重要信息,为分析研究串扰效应,评价各种信号分离方法的串扰误差大小提供判定标准。本研究的模型建立及验证均基于 WDM 传感系统。

## 2 基于蒙特卡罗法的模型建立

光纤传感系统内影响光传播的主要因素包括传感器的反射率谱、透射率谱及传感器间的链路损耗。若以连接器  $C_i$  表征传感器  $S_{i-1}$  与  $S_i$  间的链路损耗(包括光纤损耗、连接损耗、熔接损耗等),则由若干个谱型重叠的光纤传感器串联组成的传感系统如图 1(a)所示,设光强为 1 的宽谱光入射至传感器阵列,则其反射谱  $R(\lambda)$  即为系统的总反射率谱。将光纤传感器  $S_i$  在物理尺寸上视为一个点,忽略光在传感器内的传播,即可将图 1(a)系统离散后转化为图 1(b)的系统,设波长为  $\lambda_x$ 、光强为 1 的激光入射至传感器阵列,则反射光强  $R$  是波长为  $\lambda_x$  时系统的

总反射率。从而将分析图 1(a)系统转化为分析不同波长  $\lambda_x$  下的图 1(b)系统,如图 1(a)系统的总反射率谱  $R(\lambda)$  可通过求解不同  $\lambda_x$  下图 1(b)系统的总反射率  $R$  来获取。其中传感器  $S_i$  的反射率谱为  $r_i(\lambda)$ ,透射率谱为  $t_i(\lambda)$ ,连接器  $C_i$  的光损耗为  $\alpha_i$ , $\lambda_x$  下分光镜  $B_i$  的反射率固定为  $r_i(\lambda_x)$ ,透射率固定为  $t_i(\lambda_x)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ )。

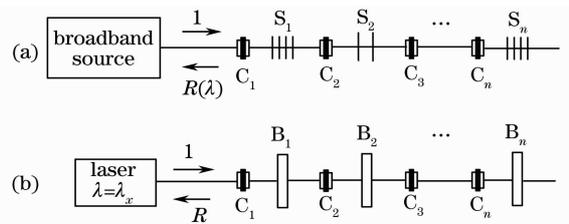


图 1 (a) 传感系统示意图, (b) 离散后的传感系统  
Fig. 1 (a) Schematic plan of the sensing system, (b) discrete sensing system

光线在系统内部的传播过程包括吸收、反射、透射等,发生在上述某个给定物理过程中的行为分布是已知的。例如:已知某表面的反射率为 0.1,吸收率为 0.9,则当发射 100 条光线到该表面时,理论上应吸收 90 条,反射 10 条。通过建立该表面的概率模型,分别追踪每一条光线,判断每条光线在该表面是被吸收,或被反射,最终可统计出该表面上光线的吸收数和反射数。

应用蒙特卡罗法对图 1(b)所示系统进行分析时,认为入射传感阵列的光由足够数量的光线组成,每一条光线在系统内部的传播过程可视为随机过程,即光线在分光镜  $B_i$  或连接器  $C_i$  的吸收、反射、透射等事件都由服从特定分布函数的随机数确定。这种特定分布的函数为概率模型,根据相应的光学定律和部件性质构造建立。根据蒙特卡罗法基本原理,如果某一连续随机变量  $\xi$  在取值区间  $[\xi_{\min}, \xi_{\max}]$  内的概率分布密度函数为  $\phi(\xi)$ ,该变量在取值区间取得某值  $\xi^*$  的随机分布为

$$D_{\xi^*} = \int_{\xi_{\min}}^{\xi^*} \phi(\xi) d\xi / \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \phi(\xi) d\xi, \quad (1)$$

(1) 式为随机变量  $\xi$  取值分布的概率模型隐函数表达式,每个具体的随机数值  $D_{\xi^*}$  就对应一个随机变量值  $\xi^*$ 。

依据图 1(b)将光纤传感系统内各部件表面简化为几类典型光学性质表面,并用一假想平面封闭系统出入口,这样整个光学系统可视为由若干个具有典型光学性质表面构成的封闭系统。入射传感阵列的光线在该封闭系统各表面间按几何光学的性质

传播。

对于图 1(b)的系统可视为由多层表面组成,蒙特卡罗法可跟踪光线在系统内经过多次反射、透射后的行径,并基于概率统计获得系统的反射、透射及吸收光线数。数量为  $K$  的光线入射到图 1(b)的离散传感系统后,各光线在系统内传播的概率模型由  $B_i$  的反射率  $r_i(\lambda_x)$ 、透射率  $t_i(\lambda_x)$ 、 $C_i$  的损耗  $\alpha_i$  等参数确定。光线到达分光镜  $B_i$  时,若反射随机数  $D_{\xi_i} < r_i(\lambda_x)$ ,则光线被反射,否则光线透射穿过分光镜  $B_i$ ;光线到达连接器  $C_i$  时,若损耗随机数  $D_{\xi_i} < \alpha_i$ ,则光线被损耗掉,否则光线通过连接器。认为传感器  $S_i$  之间的距离远大于光源的相干长度,因此可不考虑相位因素的影响,最终通过统计光线数即可获取系统总反射率等信息。具体处理如下:若某光线在连接器中被损耗掉,则传播中止,统计损耗光线数  $K_a$ ;若某光线在系统内经过多次反射和透射后,光线透射到达传感系统出口,传播中止,统计透射光线数  $K_t$ ;若光线在系统内经过多次反射和透射后,光线反射回传感系统入口,传播中止,统计反射光线数  $K_r$ 。则波长  $\lambda_x$  下的系统总反射率为

$$R = K_r / K. \quad (2)$$

通过变化  $\lambda_x$  更新分光镜  $B_i$  的反射率和透射率,使用蒙特卡罗法可计算出不同  $\lambda_x$  下图 1(b)系统的总反射率,从而获得图 1(a)总反射率谱的离散数

值解。同样总透射率谱等信息也可以通过如此方式获得。

### 3 模型的可靠性验证

#### 3.1 两个谱型重叠传感器的总反射率谱解析解推导

图 2 为两个谱型重叠的传感器串联所组成的系统。正向或反向到达  $S_i$  的光依据  $r_i(\lambda)$  和  $t_i(\lambda)$  ( $i = 1, 2$ ) 会分裂为传播方向相反的两束光,因此光入射到图 2 系统后会分裂为无穷束。但由于光只能在  $S_1$  与  $S_2$  之间来回反射,光的传播光路有规律可循,总反射率谱  $R(\lambda)$  的解析解仍是可推导的。

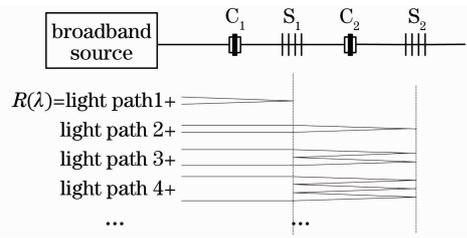


图 2 两个传感器串联组成的系统及光路

Fig. 2 System and light path of two serial sensors

如图 2 所示,  $R(\lambda)$  是从光源出发再回到光源的光路  $1 \sim m$  ( $m \rightarrow \infty$ ) 光谱的代数和。光路  $j$  与光路  $j-1$  相比 ( $j \geq 3$ ), 仅增加了一段  $S_1 \rightarrow C_2 \rightarrow S_2 \rightarrow C_2 \rightarrow S_1$  的光路, 对应光谱增加了  $(1 - \alpha_2)^2 r_1 r_2$  的乘法项。因此  $R(\lambda)$  可表达为

$$R(\lambda) = (1 - \alpha_1)^2 r_1 + (1 - \alpha_1)^2 t_1^2 (1 - \alpha_2)^2 r_2 + (1 - \alpha_1)^2 t_1^2 r_1 (1 - \alpha_2)^4 r_2^2 + (1 - \alpha_1)^2 t_1^2 r_1^2 (1 - \alpha_2)^6 r_2^3 + \dots = (1 - \alpha_1)^2 \left\{ r_1 + (1 - \alpha_2)^2 t_1^2 r_2 \left\{ \sum_{j=0}^{\infty} [(1 - \alpha_2)^2 r_1 r_2]^j \right\} \right\} = (1 - \alpha_1)^2 r_1 + \frac{(1 - \alpha_1)^2 (1 - \alpha_2)^2 t_1^2 r_2}{1 - (1 - \alpha_2)^2 r_1 r_2}. \quad (3)$$

(3)式即为传感器数量  $n=2$  时,总反射率谱  $R(\lambda)$  的解析表达式。

#### 3.2 蒙特卡罗法计算结果与解析解的比较

分别采用蒙特卡罗法和(3)式来获取图 2 系统的总反射率谱,并通过两者计算结果的对比来验证蒙特卡罗法的可靠性。假设传感器  $S_1$ 、 $S_2$  均为光纤布拉格光栅(FBG),其反射率谱服从高斯分布

$$r(\lambda) = r_{\max} \exp \left[ -4 \ln 2 \times \left( \frac{\lambda - \lambda_B}{B_G} \right)^2 \right], \quad (4)$$

式中  $S_1$ 、 $S_2$  的具体参数设为带宽  $B_{G1} = B_{G2} = 0.2 \text{ nm}$ ,  $r_{\max 1} = r_{\max 2} = 0.9$ , 布拉格波长  $\lambda_{B1} = \lambda_{B2} = 1550 \text{ nm}$ 。连接器  $C_1$ 、 $C_2$  的损耗  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ 。此时  $S_1$  和  $S_2$  的谱型完全重叠且两传感器间无损耗,串扰效应最为强烈,因此主要选择该典型状态进行仿真

验证。

由于蒙特卡罗法是一种统计数值方法,其得到的解是多次抽样结果的平均值,理论上增加发射光线数,能获得更精确的解。以蒙特卡罗法与(3)式计算结果的绝对差值作为该方法的计算误差,图 3 给出了  $\lambda = 1550.1 \text{ nm}$  时不同光线数下蒙特卡罗法计算误差的大小。可见该方法的计算误差随光线数的增加而减小,并逐渐趋近于 0。在光线数增至一定数量后,误差趋于平稳。最终选择光线数为  $5 \times 10^6$ 。

图 4(a)为光线数等于  $5 \times 10^6$  时分别采用蒙特卡罗法与(3)式计算得到的总反射率谱,从图中可以看出两种方法的结果完全吻合;图 4(b)为蒙特卡罗法的计算误差,误差随反射率的增加而不断振荡增

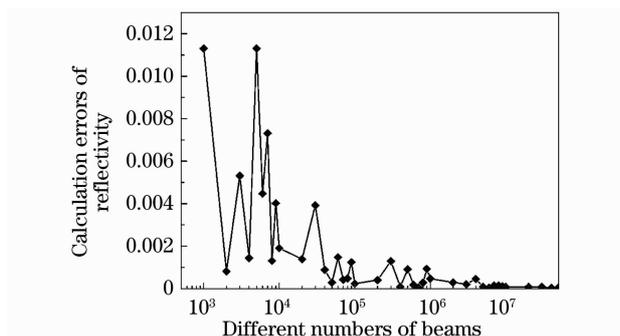


图 3 不同光线数下蒙特卡罗法的计算误差

Fig. 3 Calculation errors of the Monte-Carlo method

under different numbers of beams

加,误差最大为  $1.08 \times 10^{-3}$ 。在其他参数相同,但损耗  $\alpha_2$  分别取 0.1、0.2 和 0.3 时,蒙特卡罗法计算误差的最大值分别为  $0.46 \times 10^{-3}$ 、 $0.53 \times 10^{-3}$  和  $0.42 \times 10^{-3}$ 。可见,在不同的损耗下蒙特卡罗法的误差能保持在  $10^{-3}$  量级。以上仿真结果显示,蒙特卡罗法可以准确地计算出谱型重叠的串联传感器的总反射率谱,从而证明了基于蒙特卡罗法模型的精确度与可靠性。

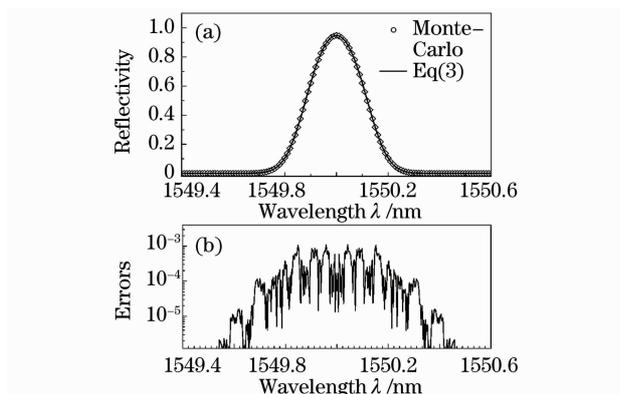


图 4 (a)蒙特卡罗法与(3)式计算得到的总反射率谱,

(b)蒙特卡罗法的计算误差

Fig. 4 (a) Reflectivity spectra calculated by the Monte-Carlo method and Eq(3), (b) calculation errors of the Monte-Carlo method

### 3.3 多个传感器的总反射率谱的计算

对于多个谱型重叠的传感器串联所组成的系统,受数学手段限制,无法推导考虑光谱阴影和任意阶多次反射串扰效应下传感器信号的解析表达式。蒙特卡罗法能运用于分析多个谱型重叠的传感器串联组成的系统,能完全考虑串扰效应而不受传感器数量的限制。以仿真计算 6 个传感器所构成系统的总反射率谱为例,假设图 1 系统中的传感器为 FBG,传感器数量  $n=6$ ,  $S_1 \sim S_6$  的  $\lambda_B$  以步长 0.1 nm 从 1550.0 nm 增至 1550.5 nm,其他参数设置和 3.2

节中一样。采用蒙特卡罗法仿真得到的系统总反射率谱及  $S_1 \sim S_6$  的反射率谱如图 5 所示。

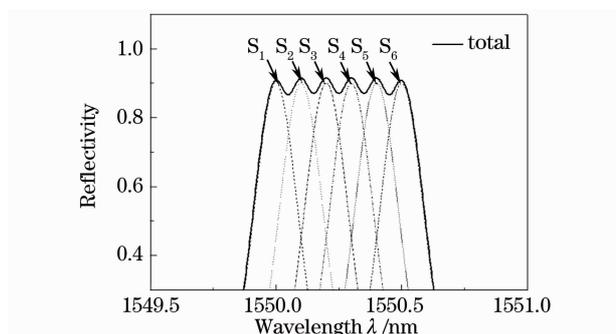


图 5 多个传感器的反射率谱及其构成系统的总反射率谱

Fig. 5 Total reflectivity spectrum of the system and individual reflectivity spectrum of each sensor

## 4 结 论

将蒙特卡罗法引入到发生串扰的光纤传感系统的分析中。蒙特卡罗法能考虑光谱阴影和任意阶多次反射串扰效应,计算出系统总反射率谱等重要信息,从而为研究串扰效应、评价现有的信号分离方法提供判定标准。对由两个谱型重叠的传感器串联组成的系统,比较分析了总反射率谱的数学解析解与蒙特卡罗法的仿真结果,发现蒙特卡罗法计算结果与解析解相吻合,计算误差的量级在  $10^{-3}$  左右,从而证实了该方法的准确性。同时,采用了蒙特卡罗法分析了无解析解的多个谱型重叠的传感器构成系统的总反射率谱,仿真结果说明该方法不受传感器数量限制。

## 参 考 文 献

- 1 B. Lee. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2003, **9**(2): 57~79
- 2 Ke Tao, Zhu Tao, Rao Yunjiang *et al.*. Accelerometer based on all-fiber Fabry-Perot interferometer formed by hollow-core photonic crystal fiber[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 171~175  
柯 涛, 朱 涛, 饶云江 等. 基于空芯光子晶体光纤的全光纤布里-珀罗干涉式加速度传感器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 171~175
- 3 Jia Ziguang, Ren Liang, Li Hongnan *et al.*. Application of fiber Bragg grating sensors in monitoring curing process of carbon fiber composite[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1298~1303  
贾子光, 任 亮, 李宏男 等. 应用光纤光栅传感器监测复合材料固化过程[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1298~1303
- 4 Zhang Xiaojing, Zhang Boming, Chen Ji'an *et al.*. Design and fabrication of micro-cantilever beam fiber Bragg grating hydrogen sensor based on coated-palladium film[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1784~1788  
张晓晶, 张博明, 陈吉安 等. 基于镀钯薄膜的微悬臂梁型光纤光栅氢传感器的设计和制备[J]. *中国激光*, 2010, **37**(7):

- 1784~1788
- 5 Wang Yubao, Lan Haijun. Study of fiber Bragg grating sensor system based on wavelength-division multiplexing/time-division multiplexing[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2196~2201  
王玉宝, 兰海军. 基于光纤布拉格光栅波/时分复用传感网络研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2196~2201
- 6 H. Y. Fu, A. C. Wong, P. A. Childs *et al.*. Multiplexing of polarization-maintaining photonic crystal fiber based sagnac interferometric sensors [J]. *Opt. Express*, 2009, **17** (21): 18501~18512
- 7 D. J. F. Cooper, T. Coroy, P. W. E. Smith. Time-division multiplexing of large serial fiber-optic Bragg grating sensor arrays [J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(16): 2643~2654
- 8 Rao Yunjiang, Zhou Changxue, Ran Zengling *et al.*. SFDM/WDM for large number of fiber-optic F-P sensor based on chirped fiber Bragg gratings [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33** (5): 631~635  
饶云江, 周昌学, 冉曾令 等. 啁啾光纤光栅布里-珀罗传感器波分频分复用[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5): 631~635
- 9 A. C. L. Wong, P. A. Childs, G. D. Peng. Multiplexing technique using amplitude-modulated chirped fiber Bragg gratings [J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(13): 1887~1889
- 10 P. Childs, K. Gao, G. D. Peng. Multiplexed moiré long period grating temperature sensors[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(17): 3173~3180
- 11 Zhang Lei, Yu Qingxu. An improved demodulation method for F-P and FBG multiplexing system[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2009, **20**(8): 1008~1011  
张磊, 于清旭. 光纤 F-P 腔与 FBG 复用传感器精确解调方法研究[J]. *光电子·激光*, 2009, **20**(8): 1008~1011
- 12 P. Childs, Y. B. Liao. On the multiplexed limit capacity of spectrally overlapped continuous wave fibre Bragg grating sensor networks[J]. *J. Opt.*, 2010, **12**(1): 1~7
- 13 L. C. S. Nunes, B. S. Olivieri, C. C. Kato *et al.*. FBG sensor multiplexing system based on the TDM and fixed filter approach [J]. *Sens. Actuators A*, 2007, **38**(2): 341~349
- 14 C. C. Chan, W. Jin, D. N. Wang *et al.*. Intrinsic crosstalk analysis of a serial TDM FBG sensor array by using a tunable laser[J]. *Microwave Opt. Technol. Lett.*, 2003, **36**(1): 2~4
- 15 Xu Zhongji. Monte Carlo Method [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1985  
徐钟济. 蒙特卡罗方法[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985
- 16 Y. Yadin, M. Shtaf, M. Orenstein. Bit-error rate of optical DPSK in fiber systems by multicanonical Monte Carlo simulations [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(6): 1355~1357