

文章编号 1004-924X(2012)06-1194-07

化学镀 Ni-P 光纤布拉格光栅的均匀轴向拉力响应

饶春芳^{1,2*}, 张 华¹, 冯 艳¹, 肖丽丽¹, 叶志清²

(1. 南昌大学 机电工程学院 机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031;
2. 江西师范大学 物理与通信电子学院 光电子与通信重点实验室, 江西 南昌 330022)

摘要:研究了化学镀 Ni-P 涂敷后光纤布拉格光栅(ENFBG)的均匀轴向拉力响应特性。利用其轴对称特性,分析了光栅的应力及应变状态;采用有限元方法数值分析了光栅应变,并实验验证了数值分析结果。数值分析表明:处于纤芯处的光栅被均匀拉伸,剪应变远小于正应变,可忽略;正应变与轴向拉力成正比,ENFBG 中心波长的变化正比于均匀轴向拉力变化;但由于化学镀层与光纤力学特性的差异,镀层对 FBG 轴向均匀拉力响应起去敏作用。当化学镀层厚度为 7.25 μm 时,ENFBG 的均匀轴向拉力实测灵敏度为 12.45 pm/MPa,相关系数为 0.999 6,理论计算值为 12.744 pm/MPa,但随着镀层厚度的增加,灵敏度呈下降趋势。镀层在为 FBG 提供良好保护的同时,ENFBG 中心波长对于轴向拉力保持线性响应。实验显示 ENFBG 是性能良好的轴向拉力传感器。

关键词:光纤光学;化学镀 Ni-P 布拉格光纤光栅;均匀轴向拉力传感;灵敏度

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122006.1194

Uniform axial tension effect of electroless plating Ni-P coated fiber Bragg grating

RAO Chun-fang^{1,2*}, ZHANG Hua¹, FENG Yan¹, XIAO Li-li¹, YE Zhi-qing²

(1. Key Laboratory of Robot & Welding Automation, School of Mechatronics Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China;

2. Key Laboratory of Optoelectronics & Communication, College of Physics and Communication Electronics, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China)

* Corresponding author, E-mail: rcf0322@163.com

Abstract: To research the uniform axial tension effect of an Electroless plating Ni-P coated Fiber Bragg Grating (ENFBG), the stress and strain properties of the ENFBG were analyzed based on its axial symmetry. The finite element method was used for theoretical calculations, then it was verified by following experiments. Theoretical calculation shows that under uniform axial tension, the core of the ENFBG is drawn uniformly, the shearing strain is far less than normal strain and can be omitted. The normal strain is proportional to the axial tension, and the change of center wavelength of ENFBG is proportional to that of the tension too. However, because of the difference of mechanic parameters between electroless plating Ni-P coating and optical fiber, the metal coating reduces the uniform axial

收稿日期:2012-02-09;**修订日期:**2012-03-05.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61067003, 60967002, 50905082);江西省自然科学基金资助项目(No. 20114BAB205067);江西省教育厅青年科学基金资助项目(No. GJJ11035);江西省研究生创新专项资金资助项目(No. 20093559060)

tension sensitivity of the FBG. In sensor experiment, when the thickness of the coating is $7.25 \mu\text{m}$, the sensitivity is 12.45 pm/MPa , R-square is 0.9996 , and the theoretical calculation value is 12.744 pm/MPa . Moreover, the sensitivity is decreased with the increase of the thickness of metal coating. The ENFBG is an excellent uniform axial tension sensor, because its center wavelength shows high linearity to uniform axial tension and its metal coating can provide good protection.

Key words: fiber optics; electroless plating Ni-P coated fiber Bragg grating; uniform axial tension sensor; sensitivity

1 引言

使用金属对光纤及光纤器件进行涂敷的研究一直伴随着光纤光学的发展:一方面,相对于丙烯酸盐涂层,金属涂层能给光纤提供更好的强度、延长光纤的寿命并提高其性能的稳定性的稳定性,使光纤适用于恶劣环境,如超导装置中的低温,航天领域中的高温,海底光纤通信时的恶劣环境^[1];另一方面,由于金属与石英光纤的材料性能不同,金属作为固化在光纤器件上的功能材料层,拓展了光纤器件的功能^[2-5]。其中,由于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)集信息传输与传感于一体,并具有径细、质轻、免电磁干扰、以及优良的可埋入性等特性^[6],一直是金属涂敷光纤器件的研究重点。BIALIAYEU A 等在倾斜光纤光栅上化学镀金,制成高质量的表面等离子波传感器^[2];郭明金、LUPI C 等利用金属层的热膨胀系数大于石英光纤这一特性,使温度传感范围扩大到低温^[7]、超低温(小于 40 K)^[8]。申人升等^[9]和本文研究小组^[10]将 FBG 使用在高温及高压环境中;由于表面的金属层为 FBG 提供了良好的可焊性,李玉龙等将它用钎焊的方法嵌入 42CrMo 钢中^[11],ZHU Z Q 等用超声波焊接的方法将其埋入 Al 6061 基质中^[12],埋入后的 FBG 均表现出良好的温度传感特性。在理论方面,本研究小组对金属涂敷 FBG(MFBG)温度传感特性进行了分析,研究表明,温度变化时,由于金属层与光纤间热膨胀系数的差异产生了热应力,MFBG 温度灵敏度比 FBG 提高了近一倍^[13-14]。然而,FBG 具有温度及应力的交叉敏感性,已有的研究集中于 MFBG 的温度传感^[7-14],但在很多情况下,同时存在温度与应力的同时变化,而目前还未见有关 MFBG 应力传感的全面报导。

本文从理论和实验两方面研究了化学镀 Ni-P 光纤布拉格光栅(ENFBG)的轴向拉力响应,理论分析了 ENFBG 轴对称的应力应变特点,给出了其力学关系式。由于轴向拉力作用在两种力学性质完全不同的材料上,存在连接处的边界效应,有必要对它进行计算机分析。本研究通过有限元方法进行了仿真计算,证明了 ENFBG 在均匀轴向拉力作用下,中心波长的漂移与拉力成正比。接下来的实验与理论值符合得较好,并且随着金属层厚度的增加,轴向拉力灵敏度呈下降的趋势。本研究为 ENFBG 轴向应力传感研究提供了理论与实验依据。

2 理论与数值分析

2.1 均匀轴向拉力作用下 ENFBG 的应力应变分析

图 1 为 ENFBG 结构及轴向拉力作用下的受力示意图。各处的应力、应变和位移分量都对称于 z 轴,这些物理量只是半径 r 和 z 的函数。所以,在轴坐标下,只有径向正应力 σ_r 、环向正应力 σ_θ 、轴向正应力 σ_z 、沿着 z 轴方向且垂直于 r 方向的剪应力 τ_{rz} 和沿着 r 方向且垂直于 z 轴方向的剪应力 τ_{rz} 不为零,且根据剪应力互等定律 $\tau_{rz} = \tau_{rz}$,并满足平衡微分方程^[15]:

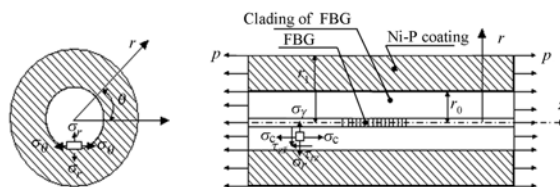


图 1 化学镀 Ni-P 涂敷 FBG 均匀轴向受力示意图
Fig. 1 Schematic diagram of stress for electroless plating Ni-P coated FBG under uniform axial pressure

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{ri}}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{zri}}{\partial z} + \frac{\sigma_{ri} - \sigma_{\theta i}}{r} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{zi}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{rzi}}{\partial r} + \frac{\tau_{rzi}}{r} = 0 \end{cases}, i=0,1. \quad (1)$$

其中 $i=0$ 表示光纤, $i=1$ 表示金属层。同样, 对于轴对称问题, 只有径向正应变 ϵ_r 、环向正应变 ϵ_θ 、轴向正应变 ϵ_z 、及 r 与 z 方向之间的剪应变 γ_{zr} 不为零, 且只存在径向位移 u 和轴向位移 w , 它们之间满足几何方程:

$$\{\epsilon_i\} = \begin{Bmatrix} \epsilon_{ri} \\ \epsilon_{\theta i} \\ \epsilon_{zi} \\ \gamma_{zri} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \partial u_i / \partial r \\ u_i / r \\ \partial w_i / \partial z \\ \partial w_i / \partial r + \partial u_i / \partial z \end{Bmatrix}, i=0,1. \quad (2)$$

根据广义虎克定理, 应力和应变间有以下物理方程:

$$\begin{cases} \epsilon_{ri} = \frac{1}{E_i} [\sigma_{ri} - \mu_i (\sigma_{\theta i} + \sigma_{zi})] \\ \epsilon_{\theta i} = \frac{1}{E_i} [\sigma_{\theta i} - \mu_i (\sigma_{zi} + \sigma_{ri})] \\ \epsilon_{zi} = \frac{1}{E_i} [\sigma_{zi} - \mu_i (\sigma_{ri} + \sigma_{\theta i})] \\ \gamma_{zri} = \frac{2(1+\mu_i)}{E_i} \tau_{zri} \end{cases}, i=0,1. \quad (3)$$

其中, E 和 μ 分别为弹性模量和泊松比。FBG 与金属层相互接触, 即不互相脱离也不互相滑动。则接触面上 $r=r_0$, 就有应力和位移两方面的接触条件。

应力方面的接触条件是:

$$\sigma_{r0} = \sigma_{r1}, \sigma_{\theta 0} = \sigma_{\theta 1}, \sigma_{z0} = \sigma_{z1}. \quad (4)$$

位移方面的接触条件是:

$$u_0 = u_1, w_0 = w_1. \quad (5)$$

令 ENFBG 两端面受到均匀轴向面力载荷 p 。由于其作用在两种力学性质完全不同的材料上, 因此连接处存在边界效应, 有必要用计算机对它进行数值分析。

2.2 有限元计算方案及结果

本文对 ENFBG 在均匀轴向拉力作用下的应力应变进行有限元分析。根据问题的轴对称性, 选用过 ENFBG 圆柱体剖面的一半建立平面有限元模型。由于 ENFBG 几何尺寸均为微米级, 故采用 μMKS 单位, 即长度单位为 μm , 压强单位为 MPa , 所用力学参数如表 1 所示。

所使用的 FBG 为标准通信光纤 (SME-28) 紫外曝光写入, 光纤半径为 $62.5 \mu\text{m}$, 纤芯半径为

$4.15 \mu\text{m}$, 剥栅长度为 3 cm , 化学镀金属层厚度设为 d , 剥栅部分全部由化学镀层保护, 光栅部分位于中部, 光栅长度为 1 cm , 因此, 建立的几何模型如图 2 所示。选择化学镀金属层厚度为 $12.5 \mu\text{m}$,

表 1 光纤及化学镀 Ni-P 保护层力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of optical fiber and electroless plating Ni-P coatings

	Elasticity modulus/MPa	Poisson's ratio
Optical fiber	7.4×10^4	0.17
Electroless plating Ni-P coating	1.96×10^5	0.31

数值计算结果如图 3 所示。由图 3(a) 可知, 光纤纤芯 ($r \leq 4.15 \mu\text{m}$) 在均匀轴向拉力作用下

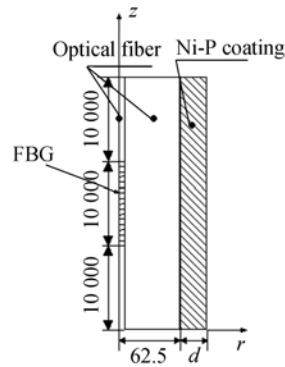


图 2 有限元分析的几何模型

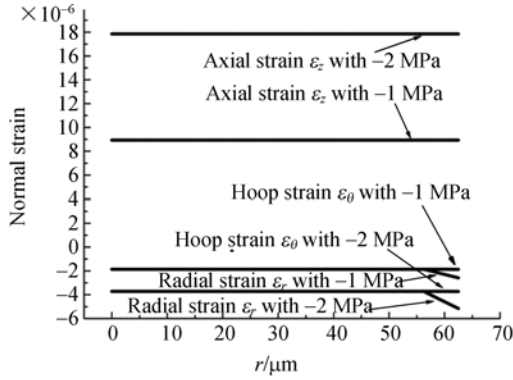
Fig.2 Model for finite element analysis

径向应变 ϵ_r 、环向应变 ϵ_θ 、轴向应变 ϵ_z 均保持为常数, 且 $\epsilon_r = \epsilon_\theta$ (图中力为负值, 表示拉力)。石英光纤与金属包层连接处的边界效应仅发生在紧临边界处 ($r=62.5 \mu\text{m}$), 因此, 对 FBG 纤芯没有影响。而剪应变 λ_{zr} 与正应变相比小近 10 个数量级 (如图 3(b)), 可忽略不计。由于金属涂敷层足够长, 由材料的不同而产生的边缘效应不影响写有 FBG 的整个范围 ($10\,000 \mu\text{m} \leq z \leq 20\,000 \mu\text{m}$), 所有正应力均保持恒定 (如图 3(c) 所示)。因此, 可以认为在图 2 所示的模型中, 在均匀轴向拉力作用下 ENFBG 在写有光栅的位置发生的是均匀拉伸。线性增加轴向均匀载荷, 计算出的 $\epsilon_r, \epsilon_\theta$ 和 ϵ_z 也以同样的比例线性增加 (如图 3(a) 所示)。因此, 可将纤芯处 $\epsilon_{r0}, \epsilon_{\theta 0}$ 和 ϵ_{z0} 与均匀轴向拉力 p

的关系表示为:

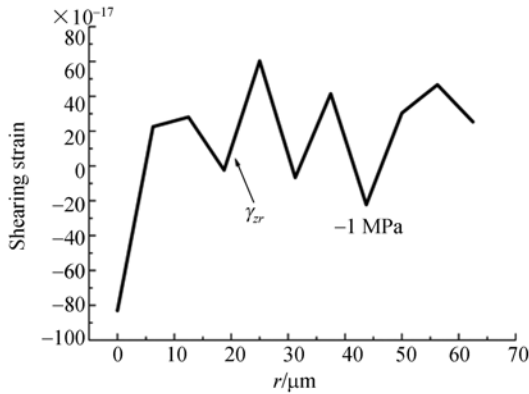
$$\begin{cases} \epsilon_{r0} = \epsilon_{\theta 0} = \kappa_1 p \\ \epsilon_{z0} = \kappa_2 p \end{cases}, \quad (6)$$

其中, κ_1, κ_2 分别为纤芯处的外加轴向拉力与各正应变之间的比例常数。



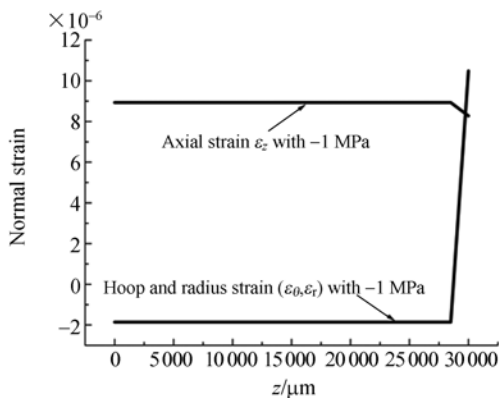
(a) 径向正应变(取 $z=20\ 000\ \mu\text{m}$)

(a) Radial normal strain ($z=20\ 000\ \mu\text{m}$)



(b) 径向剪应变(取 $z=20\ 000\ \mu\text{m}$)

(b) Radial shearing strain ($z=20\ 000\ \mu\text{m}$)



(c) 轴向正应变(取 $r=0\ \mu\text{m}$)

(c) Axial normal strain ($r=0\ \mu\text{m}$)

图 3 均匀轴向拉力下光纤应变分析曲线

Fig. 3 Strains of optical fiber under uniform axial tension

2.3 ENFBG 轴向拉力传感灵敏度

轴对称条件下均匀 FBG 在均匀拉伸条件下, 初始波长为 λ_B 时, FBG 波长漂移 $\Delta\lambda_{BZ}$ 可表示为:

$$\Delta\lambda_{BZ} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \lambda_B [(p_{11} + p_{12}) \epsilon_{r0} + p_{12} \epsilon_{z0}] + \epsilon_{z0} \lambda_B. \quad (7)$$

代入式(6)可得:

$$\Delta\lambda_{BZ} = \left[-\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \lambda_B (p_{11} + p_{12}) \kappa_1 \right] p + \left[\left(-\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} \lambda_B p_{12} + \lambda_B \right) \kappa_2 \right] p. \quad (8)$$

因此, ENFBG 对均匀轴向拉力保持良好的线性响应。取纯熔融石英参数: $p_{11} = 0.121, p_{12} = 0.270, n_{\text{eff}} = 1.4648$, 初始波长为 $1.54\ \mu\text{m}$ 。金属层厚度为 $12.5\ \mu\text{m}$, 其灵敏度为 $10.97\ \text{pm/MPa}$ 。由式(7)可得裸 FBG 的灵敏度为 $16.25\ \text{pm/MPa}$ 。因此, 金属层降低了 FBG 的轴向拉力响应灵敏度。

3 实验及分析

FBG 化学镀 Ni-P 实施步骤参照参考文献 [14]。ENFBG 截面如图 4 所示, 镀层厚度为 $7.25\ \mu\text{m}$, 数值计算其灵敏度为 $12.744\ \text{pm/MPa}$ 。轴向应力实验装置如图 5(a) 所示, ENFBG 中心波长响应如图 5(b) 所示。实测灵敏度为 $12.45\ \text{pm/MPa}$, 相关系数为 0.999 以上; 实测裸 FBG 的灵敏度为 $16.84\ \text{pm/MPa}$ 。以上误差主要由于镀层厚度的非精确测量及所用参数与实际参数的误差造成。

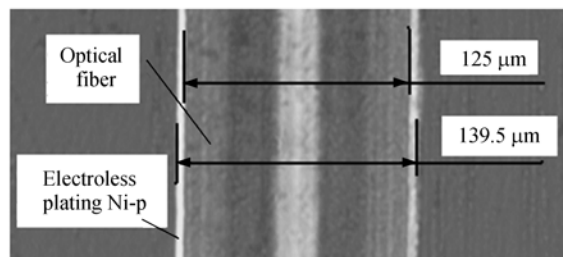
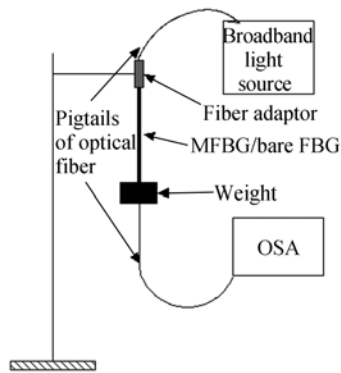


图 4 ENFBG 轴向截面图

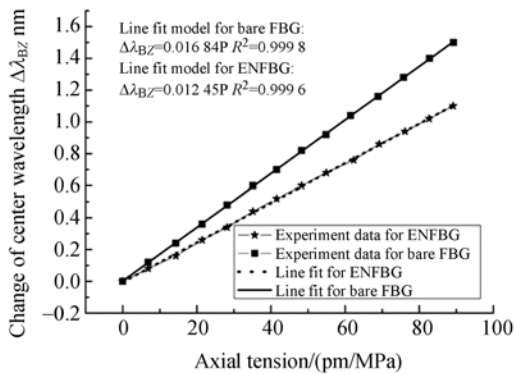
Fig. 4 Axial cross-section of ENFBG

进一步研究了金属保护层厚度与 ENFBG 轴向灵敏度的关系, 如图 6 所示, 开始灵敏度下降迅速, 当金属层达到一定厚度时, 灵敏度下降趋势变缓。



(a) 传感装置

(a) Sensor equipment



(b) 中心波长响应

(b) Center wavelength dependence of uniform axial tension

图 5 均匀轴向拉力传感

Fig. 5 Experiments for sensor under uniform axial tension

由以上分析可知,化学镀 Ni-P 层对 FBG 的传感特性有直接影响。已有的报道中^[14],化学镀 Ni-P 层对于 FBG 的温度响应有增敏的作用(如图 6 所示),这是由于化学镀 Ni-P 层的热膨胀系数($1.3 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)大于光纤的热膨胀系数($0.55 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),在温度变化过程中产生的热应力,使 ENFBG 温度响应灵敏度增加;从增敏的效果来看,起初,温度灵敏度迅速上升,当金属层达到一定厚度后,温度灵敏度上升趋势变缓^[14]。而它对于均匀轴向拉力的响应,结果正相反。由于金属层与光纤力学特性的差异(主要是金属层较大的弹性模量),化学镀 Ni-P 层对于 FBG 的轴向拉力响应有去敏的作用;起初,光纤的应变受金属层的限制,轴向灵敏度迅速下降,当金属层达到一定厚度后,拉

伸引起的应变更更多地由金属力学性质决定,轴向拉力灵敏度下降趋势变缓。其次,由于材料的不一致,当 ENFBG 受到均匀轴向拉力时,在受力边缘及材料连接处必然会出现非均匀拉伸现象(如图 3(a),径向在 $62.5 \mu\text{m}$ 附近,图 3(c),轴向距离在接近 $30\,000 \mu\text{m}$ 处),如果光栅轴向处在接近金属保护层一端的位置,必将引起光栅周期的啁啾,给传感带来误差;另外,金属层厚度的不均匀也将产生光栅处的不均匀拉伸,因此,在金属涂敷 FBG 时要注意镀层厚度的均匀性、足够的镀层长度及 FBG 在镀层中的位置。

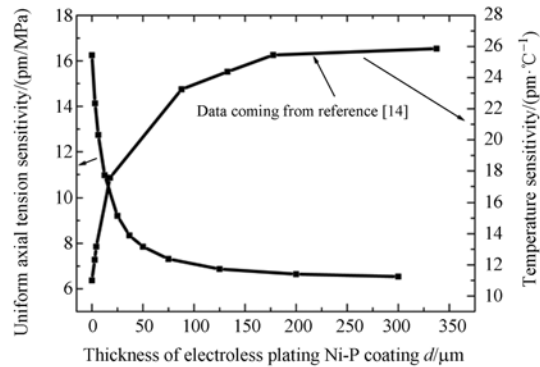


图 6 ENFBG 均匀轴向拉力灵敏度与化学镀 Ni-P 保护层厚度的关系曲线

Fig. 6 Sensitivity dependence of electroless plating Ni-P coating's thickness

4 结 论

本文研究了 ENFBG 的轴向拉力响应特性。从理论与实验两方面证实 ENFBG 对均匀轴向拉力可保持良好的线性响应;但与温度响应中金属层的增敏效果相反,这种金属层对于轴向拉力响应起到去敏的作用。实验证明,化学镀层厚度为 $7.25 \mu\text{m}$ 时,ENFBG 的均匀轴向拉力灵敏度为 12.45 pm/MPa ,相关系数为 $0.999\,6$;理论计算值为 12.744 pm/MPa 。本研究为 ENFBG 轴向应力传感提供了理论与实验依据,为 ENFBG 传感器的设计、应用提供了基础,完善了 MFBG 传感体系,特别为同时存在温度和应力变化环境中 ENFBG 的传感特性研究提供了基础。

参考文献:

- [1] SEO H S, PAEK U C. Melt coating of tin on silica optical fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1998,16(12):2355-2364.
- [2] BIALIAYEU A, CAUCHETEUR C, AHAMAD N, *et al.*. Self-optimized metal coatings for fiber plasmonics by electroless deposition [J]. *Opt. Express*, 2011,19:18742-18753.
- [3] 刘炳辉,杨立军,王扬. 镀膜光纤探针近场捕获的模拟与实验 [J]. *光学精密工程*, 2011,19(10):2355-2365.
- LIU B H, YANG L J, WANG Y. Simulation and experiments of near-field trapping using metal-coated optical fiber probe [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(10):2355-2365. (in Chinese)
- [4] SONG N, MU J W, HUANG W P. Application of the complex coupled-mode theory to optical fiber grating structures [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010,28,761-767.
- [5] WADE S A, WALLBRINK C D, MCADAM G, *et al.*. A fiber optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres [J]. *Sensors and Actuators B*, 2008,131:602-608.
- [6] CHENG C H, CHANG M C, LIU W F. Electrical power sensor based on fiber Bragg grating and piezo-electric transducer [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9):2255-2262.
- [7] 郭明金,姜德生. 镀金光纤光栅温度传感器的低温特性 [J]. *低温物理学报*, 2006, 28(2):138-141.
- GUO M J, JIANG D SH. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensor with plating gold [J]. *Chinese Journal of Low Temperature Physics*, 2006,28(2):138-141. (in Chinese)
- [8] LUPI C, FELLI F, BROTZU A, *et al.*. Improving FBG sensor sensitivity at cryogenic temperature by metal coating [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2008,8(7):1299-1303.
- [9] SHEN R S, ZHANG J, WANG Y, *et al.*. Study on high-temperature and high-pressure measurement by using metal-coated FBG [J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2008, 50(5):1138-1140.
- [10] 饶春芳,张华,冯艳,等. 镍金属保护光纤布拉格光栅的热处理及高温传感 [J]. *光学精密工程*, 2011,19(9):2006-2013.
- RAO CH F, ZHANG H, FENG Y, *et al.*. Heat treatment on fiber Bragg grating with Ni coating for elevated temperature sensor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,19(9):2006-2013. (in Chinese)
- [11] 李玉龙,冯艳,张华,等. 光纤光栅传感器金属化保护及钎焊嵌入 42CrMo 钢 [J]. *焊接学报*, 2008,29(3):69-72.
- LI Y L, FENG Y, ZHANG H, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor metallization and embedding into 42CrMo steel by soldering [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008,29(3):69-72. (in Chinese)
- [12] ZHU Z Q, CHEN Y J, ZHANG Y F. The temperature sensitivity of fiber Bragg gratings embedded in an Al 6061 matrix by ultrasonic welding [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2011, 22(18):2173-2179.
- [13] FENG Y, ZHANG H, LI Y L, *et al.*. Temperature sensing of metal-coated fiber Bragg grating [J]. *IEEE / ASME Transactions on Mechatronic*, 2010,15(4):511-519.
- [14] LI Y L, FENG Y, ZHANG H, *et al.*. Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization [J]. *Optical Fiber Technology*, 2009,15:391-397.
- [15] 徐芝纶. 弹性力学 [M]. 第4版. 北京: 高等教育出版社, 2006:206-208.
- XU ZH L. *Elasticity* [M]. The Fourth Version. Beijing: High Education Press, 2006:206-208. (in Chinese)

作者简介:



冯 艳(1976—),女,江西南昌人,博士,副教授,1997 年于浙江大学获学士学位,2006 年、2010 年于南昌大学分别获硕士、博士学位,主要从事光纤传感及光纤涂覆层的研究, E-mail: confirm-fyan@163. com



肖丽丽(1983—),女,江西南昌人,硕士研究生,2005 年于南昌大学获学士学位,主要从事 FBG 传感器的研究。E-mail: liudongcheng@126. com



叶志清(1960—),男,浙江建德人,教授,硕士导师,1984 年于江西师范大学获学士学位,1990 于北京邮电大学获硕士学位,主要从事光纤光栅、光纤激光器、光纤传感方面的研究。E-mail: yezhiqing2008@163. com

通信作者:



饶春芳(1975—),女,江西进贤人,博士研究生,副教授,1995 年于中国计量学院获学士学位,2005 年于江西师范大学获硕士学位,主要从事光纤智能金属结构及光波导传感方面研究。E-mail: rcf0322@163. com

导师简介:



张 华(1964—),男,江西余干人,教授,博士生导师,1987 年于江西大学获学士学位,1990 年于哈尔滨工业大学获硕士学位,1997 年于清华大学获博士学位,目前主要从事光纤智能金属结构,焊接自动化,工业机器人智能化和 水下移动焊接机器人技术方面的研究。E-mail: Zhanghua_lab@163. com

● 下期预告

复杂背景成像条件下运动点目标的轨迹提取

丛明煜,何文家,逯力红,鲍文卓,张 寅

(哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心,黑龙江 哈尔滨 150001)

为实现空间目标天基实时监视的能力,美国在空间中段实验卫星上搭载了具有对空间目标进行在轨检测与跟踪的信号处理器,该处理器在目标运动轨迹提取阶段采用了先二元速度滤波再能量累积判决的“筛选-确认”解决方案。在对上述方案进行深入分析的基础上,提出了自己的两点改进方法:一是在“筛选”阶段增加了运动速度约束条件,二是在“确认”阶段增加了样本均差约束条件,在降低虚警概率的同时提高了检测概率,使其普遍适用于复杂背景成像条件下运动点目标轨迹提取的工程应用背景。最后,利用实际获取的云层背景图像数据库仿真生成包含多运动目标的时序图像序列,并以此作为输入信号源分析比较了原算法与改进算法的性能差异。仿真实验结果表明:改进算法在二元速度滤波后候选条痕减少到原算法的 50% 以下,处理器运行时钟周期数从 8.0×10^6 次降低到 7.1×10^6 次,从最终检测结果来看,改进算法判决门限的合理取值范围增加到 20 左右,可以实现对多运动目标的实时检测。