

文章编号 1004-924X(2012)03-0468-09

双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统中的偏振衰落控制

曾周末, 张溪默*, 封皓, 靳世久, 安 阳

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:针对偏振衰落现象导致信号关联的二义性使分布式双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统难以实现高精度定位的问题,提出了一种控制偏振衰落的方法来保持系统检测信号的稳定性。利用系统的偏振模型分析了偏振衰落的来源,指出传感光纤偏振特性的不一致使系统检测信号对输入偏振态敏感是造成信号相关性恶化的根本原因,据此提出控制输入偏振态、搜索偏振态工作点的抗偏振衰落思想。在此基础上通过分析输入偏振态的两个参量对信号相关系数的作用进一步明确偏振控制对算法的要求,并利用模拟退火算法进行了验证。现场实验表明,该算法可快速搜索偏振态工作点,持续稳定系统检测信号的相关性;结果证实了提出的偏振衰落控制方法可行且有效。

关键词:相干光学; Mach-Zehnder 干涉仪; 干涉传感; 偏振衰落; 偏振控制; 相关系数; 模拟退火算法

中图分类号: TH744. 3; O436. 3 **文献标识码:** A **doi:** 10. 3788/OPE. 20122003. 0468

Control of polarization fading for dual Mach-Zehnder fiber interferometric sensing system

ZENG Zhou-mo, ZHANG Xi-mo*, FENG Hao, JIN Shi-jiu, AN Yang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

* Corresponding author, E-mail: zxm2514@163.com

Abstract: In a dual Mach-Zehnder fiber interferometric sensing system, the high locating accuracy is hardly obtained due to the discrepancy of two detection signals resulting from polarization fading. To keep the stability of the detection signals, a method to control the polarization fading was proposed in this paper. A optical polarization model was established to analyze the origin of polarization fading in the system. It points out that the basic reason for the discrepancy of the detection signal correlation is from that the inconsistency of the polarization characteristics between two sensing fibers results in the effect of the input polarization on detection signals. Based on the analysis, the solutions of controlling the input polarization and searching for the working points of polarization state were put forward to eliminate the polarization fading. Furthermore, the requirements of polarization control were further determined by analyzing the relation between signal correlation coefficients and two parameters of in-

收稿日期: 2011-08-26; 修订日期: 2011-10-27.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 60974110); 国家教育部博士点基金资助项目 (No. 200800560020)

put polarization, and simulated annealing was applied to the verification of this theory. Field test results show that the algorithm can make a fast search for the working points of polarization state, and can maintain a steady signal correlation. It is proved that the polarization fading control method is feasible and effective.

Key words: coherence optics; Mach-Zehnder fiber interferometer; interferometric sensing; polarization fading; polarization control; correlation coefficient; simulated annealing

1 引言

在油气管道安全监测系统和现代安全防范系统中,入侵行为的实时检测及其精确定位具有重要的现实意义。分布式双 Mach-Zehnder(MZ)光纤干涉传感系统将干涉仪的高灵敏探测特性与分布式传感技术的高精度定位特性有机结合,使它具有抗电磁干扰能力强、灵敏度高、定位准确等显著优点,因而成为探测和定位入侵行为的理想手段,并得到了广泛研究与应用。基于双 Mach-Zehnder 结构的检测定位系统通常对信号强度没有特别要求,因为定位可以采用互相关函数估计时延的方法;但该方法对信号相关性的要求很高,只有信号具备了足够好的相关性,才能达到理想的定位精度^[1-2]。而在实际应用中,该系统常常因偏振衰落现象而出现信号相关性不稳定的问题,从而造成定位时误差较大,甚至无法定位^[3]。

本文从研究 MZ 光纤干涉仪中偏振衰落的来源入手,建立了系统光路的琼斯矩阵偏振模型,通

过定性分析偏振衰落对系统信号的影响,指出传感光纤偏振特性的不一致使系统检测信号对输入偏振态敏感是造成信号相关性恶化的根本原因。根据双臂检测信号相关系数随输入偏振态方位角 θ 和椭圆率角 ϵ 的变化趋势,得到了控制输入偏振态,搜索偏振态工作点是可行的抗偏振衰落方法,并指出偏振控制算法必须具备全局搜索以及跳出局部最优并最终趋于全局最优的能力。最后,利用模拟退火算法作为偏振控制算法进行实验验证,结果表明,该算法可实现对偏振态工作点的快速搜索,持续稳定系统检测信号的相关性,从而证实了该偏振衰落控制思路的可行性和所具备的抗偏振衰落能力。

2 单 Mach-Zehnder 干涉信号

图 1 为双 MZ 光纤干涉传感系统的等效光路图。考虑顺时针方向的单 MZ 干涉仪,把分布在单模光纤全长上的双折射以及光波所经光学元件的双折射集中表示为一个等效的偏振器

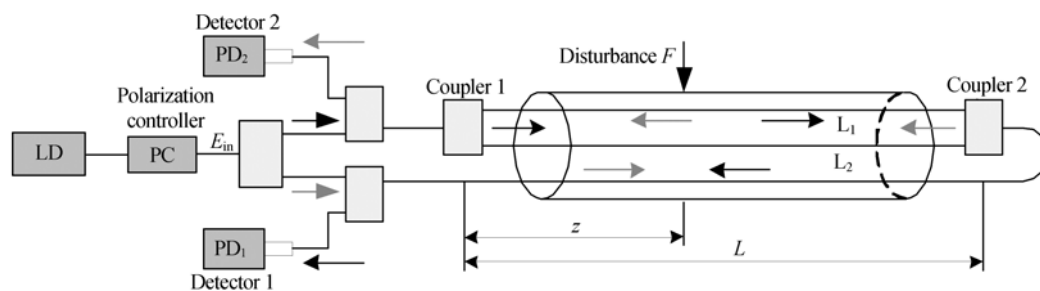


图 1 双 Mach-Zehnder 系统结构示意图

Fig. 1 Structure of conventional dual Mach-Zehnder system

件,而将其它元件还原成理想光学器件。两传感臂 L_1, L_2 则分别等效为偏振器件 G_1, G_2 , 其琼斯矩阵为^[4-7]:

$$G_1 = \begin{bmatrix} e^{j\epsilon} \sin^2 x + \cos^2 x & (e^{j\epsilon} - 1) \sin x \cos x \\ (e^{j\epsilon} - 1) \sin x \cos x & e^{j\epsilon} \cos^2 x + \sin^2 x \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\mathbf{G}_2 = \begin{bmatrix} e^{j\xi} \sin^2 x' + \cos^2 x' & (e^{j\xi} - 1) \sin x' \cos x' \\ (e^{j\xi} - 1) \sin x' \cos x' & e^{j\xi} \cos^2 x' + \sin^2 x' \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(1)中 x 为等效偏振器件快轴与 X 轴的夹角, 光纤不同, 该夹角一般不同; ξ 为等效光纤双折射相位差, 可表示为:

$$\xi = (\delta\beta_{\text{TE}} + \delta\beta_{\text{SE}} + \delta\beta + \delta\beta_1) \times L, \quad (3)$$

式(3)中波导形状双折射 $\delta\beta_{\text{TE}}$ 与光纤形状有关; 应力双折射 $\delta\beta_{\text{SE}}$ 与光纤所受应力成正比; 光纤弯曲双折射 $\delta\beta$ 和扭曲双折射 $\delta\beta_1$ 分别与光纤的弯曲半径和每米平均扭转数成正比。由于传感臂的长度 L 很大, 两条光纤在首末端光缆接续盒中的缠绕圈数、偏转角度、弯曲角度以及在光缆中的应力分布、波导形状等不同, 造成两臂之间的 $\delta\beta_{\text{TE}}$, $\delta\beta$, $\delta\beta_1$ 及 $\delta\beta_{\text{SE}}$ 不同, 与 L 累计在一起, 使得两臂的光纤双折射不同。这就导致了两根传感光纤的偏振特性的不一致。

$$E_{1x} = 0.5 \left\{ \begin{aligned} & 0.5 \sin(2x) [\sin(\xi) \cos(\theta) \sin(\epsilon) + \sin(\theta) \cos(\epsilon) - \cos(\xi) \sin(\theta) \cos(\epsilon)] \\ & - \sin^2(x) [\cos(\xi) \cos(\theta) \cos(\epsilon) + \sin(\xi) \sin(\theta) \sin(\epsilon)] - \cos^2(x) \cos(\theta) \cos(\epsilon) \end{aligned} \right\} +$$

$$0.5j \left\{ \begin{aligned} & 0.5 \sin(2x) [\cos(\theta) \sin(\epsilon) - \cos(\xi) \cos(\theta) \sin(\epsilon) - \sin(\xi) \sin(\theta) \cos(\epsilon)] \\ & + \sin^2(x) [\cos(\xi) \sin(\theta) \sin(\epsilon) - \sin(\xi) \cos(\theta) \cos(\epsilon)] + \cos^2(x) \sin(\theta) \sin(\epsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

$$E_{1y} = 0.5 \left\{ \begin{aligned} & 0.5 \sin(2x) [\cos(\theta) \cos(\epsilon) - \cos(\xi) \cos(\theta) \cos(\epsilon) - \sin(\xi) \sin(\theta) \sin(\epsilon)] \\ & + \cos^2(x) [\sin(\xi) \cos(\theta) \sin(\epsilon) - \cos(\xi) \sin(\theta) \cos(\epsilon)] - \sin^2(x) \sin(\theta) \cos(\epsilon) \end{aligned} \right\} +$$

$$0.5j \left\{ \begin{aligned} & 0.5 \sin(2x) [\cos(\xi) \sin(\theta) \sin(\epsilon) - \sin(\xi) \cos(\theta) \cos(\epsilon) - \sin(\theta) \sin(\epsilon)] \\ & - \cos^2(x) [\cos(\xi) \cos(\theta) \sin(\epsilon) + \sin(\xi) \sin(\theta) \cos(\epsilon)] - \sin^2(x) \cos(\theta) \sin(\epsilon) \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

出射光 E_1 的方位角 θ_1 和椭率角 ϵ_1 可由式(9)计算得到:

$$\begin{cases} \epsilon_1 = \frac{1}{2} \arcsin \left[\frac{2 \operatorname{Im}(X_1)}{1 + |X_1|^2} \right] \\ \theta_1 = \arctan \left[\frac{X_1 - j \tan \epsilon_1}{j X_1 \tan \epsilon_1 + 1} \right] \end{cases}, X_1 = \frac{E_{1y}}{E_{1x}}. \quad (9)$$

则 E_1 可表示为:

$$\mathbf{E}_1 = \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} = E_0 \exp(j\delta) \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \cos \epsilon_1 - j \sin \theta_1 \sin \epsilon_1 \\ \sin \theta_1 \cos \epsilon_1 + j \cos \theta_1 \sin \epsilon_1 \end{bmatrix}. \quad (10)$$

同理, 入射光经传感臂 L_2 后的出射光 E_2 为:

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{k}_s \times \mathbf{G}_2 \times \mathbf{k}_s \times \mathbf{E}_{\text{in}} = E_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_2 \cos \epsilon_2 - j \sin \theta_2 \sin \epsilon_2 \\ \sin \theta_2 \cos \epsilon_2 + j \cos \theta_2 \sin \epsilon_2 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

不考虑插入损耗和附加损耗, 2×2 耦合器的分光比为 $1:1$, 其直接耦合 (\mathbf{k}_s) 和跨接耦合 (\mathbf{k}_a) 的琼斯矩阵分别为:

$$\mathbf{k}_s = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}, \mathbf{k}_a = \begin{bmatrix} j \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 \\ 0 & j \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

系统输入光 E_{in} 为:

$$\mathbf{E}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = E_0 \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \epsilon - j \sin \theta \sin \epsilon \\ \sin \theta \cos \epsilon + j \cos \theta \sin \epsilon \end{bmatrix}. \quad (5)$$

其中 E_0 是光波振幅; θ 和 ϵ 分别是方位角和椭率角。设外界振动引起的传感臂 L_1 与 L_2 之间的干涉相位差为 δ , 则入射光经传感臂 L_1 后在耦合器 2 处的出射光 E_1 为:

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{k}_a \times \mathbf{G}_1 \times \mathbf{k}_a \times e^{j\delta} \times \mathbf{E}_{\text{in}}. \quad (6)$$

其正交分量 E_{1x} , E_{1y} 分别为:

其中, 方位角 θ_2 和椭率角 ϵ_2 可参考式(9)计算得到。

由于两条传感光纤的偏振特性不一致, 使得入射光 E_{in} 经传感臂 L_1 和 L_2 传输后, 在耦合器 2 处成为两路不同偏振态的光波 E_1 与 E_2 , 二者叠加后的场强可表示为:

$$\mathbf{E}_{\text{out}} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \begin{bmatrix} E_{1x} \\ E_{1y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{2x} \\ E_{2y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{1x} + E_{2x} \\ E_{1y} + E_{2y} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

只考虑叠加场强的干涉项, 则探测器 PD_1 接收的干涉光强 I_{out} 为:

$$I_{\text{out}} = |\mathbf{E}_{\text{out}}|^2 = |E_x|^2 + |E_y|^2 = 2E_0^2 [\cos(\delta) \cos(\theta_1 - \theta_2) \cos(\epsilon_1 - \epsilon_2) + \sin(\delta) \sin(\theta_1 - \theta_2) \sin(\epsilon_1 + \epsilon_2)] = 2E_0^2 \cdot \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \cos(\delta - \varphi), \quad (13)$$

式中, $a = \cos(\theta_1 - \theta_2) \cos(\epsilon_1 - \epsilon_2)$, $b = \sin(\theta_1 - \theta_2) \cdot$

$\sin(\epsilon_1 + \epsilon_2)$, 附加相位差 $\varphi = \arctan(b/a)$ 。

在理想情况下, MZ 光纤干涉仪中两根传感光纤的偏振特性完全一致, 即 $\xi = \xi', x = x'$, 此时在耦合器 2 处发生干涉的两路光波偏振态相同, 干涉光强为:

$$I'_{out} = 2E_0^2 \cos(\delta). \quad (14)$$

对比式(13)和(14)可知, 由于单模光纤的偏振特性不一致, 光纤双折射不仅会引起干涉光强的幅值变化, 而且还引入了附加相位差, 导致相位的变化。

在无外界扰动情况下, 两条传感光纤的结构是基本稳定的, 在一定时间内, 光纤双折射可视为常量。为了便于分析, 假设传感臂 L_1 的等效偏振器件为: $\xi = 1.56\pi, x = 0.8\pi$; 传感臂 L_2 的等效偏振器件为: $\xi' = 0.36\pi, x' = -1.14\pi$; 入射光分别为线偏振光 ($\theta = 0.25\pi, \epsilon = 0$), 圆偏振光 ($\theta = 0.25\pi, \epsilon = 0.25\pi$) 和椭圆偏振光 ($\theta = 0.25\pi, \epsilon = 0.125\pi$)。当振动引起的两臂干涉相位差 δ 在 $-2\pi \sim 2\pi$ 之间变化时, 探测器 PD_1 接收到的干涉光强如图 2 所示。

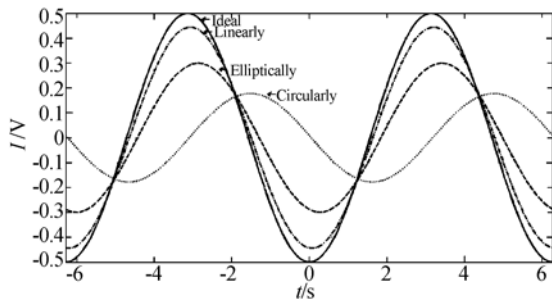


图 2 不同输入偏振态下的干涉光强

Fig. 2 Interference light intensity in different input polarizations

由图 2 可知, 在理想情况下, 两臂的偏振特性一致, 此时干涉光强幅度最大且与输入偏振态无关。而实际中传感光纤偏振特性的不一致使得输出光强对输入偏振态敏感, 其幅度会随着输入偏振态发生变化。同时, 在不同的输入偏振态下, 干涉光强波形也有明显的相位超前、滞后现象。所以, 传感光纤偏振特性的不一致不仅降低了干涉输出信号的质量, 造成了“偏振诱导信号衰落”, 而且给干涉输出的相位引入了额外的误差, 造成“偏振诱导相位偏移”。

根据式(7)~(9), 干涉仪的输出偏振态由两

类参量共同决定:

(1) 单模光纤的光纤双折射, 包括等效双折射相位差 ξ 和等效偏振器件快轴与 X 轴的夹角 x 。

(2) 入射光的偏振态, 即方位角 θ 和椭圆率角 ϵ 。

因此, “偏振诱导信号衰落”和“偏振诱导相位偏移”也是由这两类参量决定的。

3 双 Mach-Zehnder 干涉信号的相关性

在图 1 所示的双 MZ 系统中, 由式(13)可知, 探测器 PD_1 和 PD_2 接收到的光强 I_{out1}, I_{out2} 分别为:

$$\begin{cases} I_{out1} = |E_{out1}|^2 = f_1(\xi, x, \xi', x', \theta, \epsilon, \delta) = \\ \quad 2E_0^2 \cdot \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \cdot \cos(\delta - \varphi_1) \\ I_{out2} = |E_{out2}|^2 = f_2(\xi, x, \xi', x', \theta, \epsilon, \delta) = \\ \quad 2E_0^2 \cdot \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \cdot \cos(\delta - \varphi_2) \end{cases} \quad (15)$$

当外界振动引起的干涉相位差为 $\delta = 4 + \sin(t)$ 时, 不同输入偏振态下信号的波形与相关系数如图 3 所示。

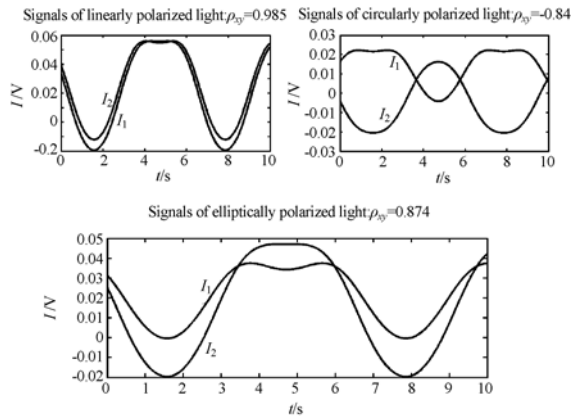


图 3 不同输入偏振态时的双臂信号

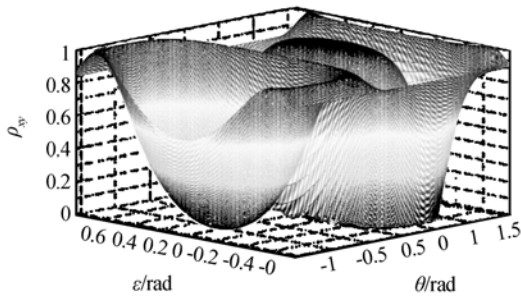
Fig. 3 Two-way signals in different input polarizations

由图 3 可知, 在同一输入偏振态下, 系统双臂检测信号的幅度、相位均不相同; 而在不同输入偏振态下, 各系统双臂检测信号的相关性也存在很大差异。在双 MZ 光纤干涉系统中, 任一单 MZ 光纤干涉仪的信号失真必然会对双路信号的相关性产生影响, 因此系统双臂检测信号相关性的恶化也是由“偏振诱导信号衰落”和“偏振诱导相位偏移”中的一种或二者导致的。

取时间长度为 t 的双臂检测信号序列, 相关系数可由下式计算得到:

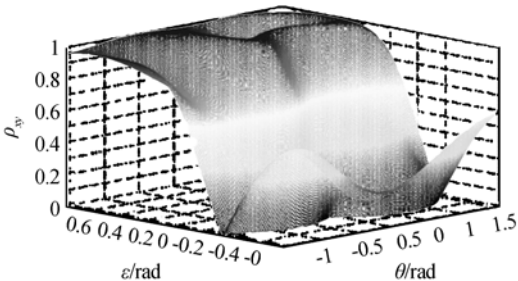
$$\rho_{xy} = \frac{\int_0^t I_{out1}(t) I_{out2}(t) dt}{\left[\int_0^t I_{out1}^2(t) dt \int_0^t I_{out2}^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}} = \frac{\int_0^t \cos(\delta(t) - \varphi_1) \cdot \cos(\delta(t) - \varphi_2) dt}{\left[\int_0^t \cos^2(\delta(t) - \varphi_1) dt \cdot \int_0^t \cos^2(\delta(t) - \varphi_2) dt \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (16)$$

式(16)表明, 相关系数与信号幅度无关, 主要由两路信号的相位决定, 因此“偏振诱导相位偏移”引入的附加相位差正是导致信号相关性恶化的直接原因。已知信号的附加相位差是由传感光纤的偏振特性和系统输入的偏振态共同决定的, 所以通过搜索找到与当前光纤偏振特性匹配的输入偏振态, 补偿由偏振特性不一致带来的影响是改善信号相关性的有效途径。



(a) 原始条件

(a) Original polarization



(b) 改变传感臂 L_1, L_2 的偏振特性后

(b) After changing polarization of L_1 and L_2

图 4 相关系数与输入偏振态的关系

Fig. 4 Relation between correlation coefficient and input polarization

图 4(a) 是原条件下信号相关系数 ρ_{xy} 与输入偏振态的关系; 图 4(b) 是改变传感臂 L_1, L_2 的偏振特性后 ($\xi = 0.25\pi, x = 1.25\pi; \xi' = \pi, x' = 1.75\pi$), 相关系数随输入偏振态的变化趋势。对于基于双 MZ 结构的检测定位系统, 当双臂检测信号的相关系数 $\rho_{xy} \geq 0.9$ 时, 即可保证较高的定位精度。由图 4 可见, 相关系数值是随着方位角 θ 和椭圆率角 ϵ 的改变而变化的, 而满足定位要求的输入偏振态也是存在的, 因此, 利用合适的偏振控制算法配合偏振控制器, 通过搜索与当前光纤偏振特性匹配的最优输入偏振态, 使附加相位差减小到可接受的范围, 从而消除偏振衰落造成的影响, 保持信号良好的相关性是可行的, 此时的输入偏振态就称为系统偏振态工作点。

直接设定相关系数 ρ_{xy} 为目标函数, 则系统的偏振控制模型为:

$$\max(\rho_{xy}) = f(x), x \in \Theta, \quad (17)$$

其中, x 是偏振控制器的延迟量 $x_i (i=1, 2, 3, 4)$ 的一种组合, Θ 是各延迟量的取值范围。偏振控制器的控制算法在数学上就是要使相关系数的目标函数最大, 因此是一个寻优问题。

4 对偏振控制的要求

偏振控制的对象为入射光的方位角 θ 和椭圆率角 ϵ 。当仅考虑方位角 θ 的作用效果时, 入射光经单根传感臂传播后在耦合器处出射光的正交分量如式(7)~(8)所示, 其垂直分量和水平分量均是非奇非偶函数, 而且反正弦、反正切函数在定义域上是奇函数, 因此出射光的方位角和椭圆率角式(9)在定义域上不具备奇偶性^[8]。进一步计算可得, 探测器接收到的干涉光强函数式(13)也不具备奇偶性, 故以方位角 θ 为变量时, 由式(16)计算得到的双 MZ 系统双臂检测信号的相关系数在定义域上是非奇非偶函数。

方位角 θ 的定义域为 $[-0.5\pi, 0.5\pi)$, 在此区间内三角函数不是周期函数, 因此入射光经单根传感臂传播后其垂直分量和水平分量在定义域内均不具备周期性, 即出射光的方位角和椭圆率角函数不具备周期性。根据复合函数周期性的传递性质^[9], 双臂检测信号干涉后的光强信号也不具备周期性, 故以方位角 θ 为变量时, 双 MZ 系统双臂检测信号的相关系数在定义域上是非周期函数。

式(7)所示单臂出射光水平分量的导数为:

$$E_{1x} = 0.5 \left\{ \begin{aligned} &0.5 \sin(2x) [-\sin(\xi) \sin(\theta) \sin(\epsilon) + \cos(\theta) \cos(\epsilon) + \cos(\xi) \cos(\theta) \cos(\epsilon)] \\ &-\sin^2(x) [-\cos(\xi) \sin(\theta) \cos(\epsilon) + \sin(\xi) \cos(\theta) \sin(\epsilon)] + \cos^2(x) \sin(\theta) \cos(\epsilon) \end{aligned} \right\} + 0.5j \left\{ \begin{aligned} &0.5 \sin(2x) [-\sin(\theta) \sin(\epsilon) + \cos(\xi) \sin(\theta) \sin(\epsilon) - \sin(\xi) \cos(\theta) \cos(\epsilon)] \\ &+\sin^2(x) [\cos(\xi) \cos(\theta) \sin(\epsilon) + \sin(\xi) \sin(\theta) \cos(\epsilon)] + \cos^2(x) \cos(\theta) \sin(\epsilon) \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

该式的实部和虚部与 0 的大小关系不确定,因此二者在定义域上均不具有单调性。又已知出射光的方位角和椭率角函数在定义域上不具备奇偶性和周期性,可得在该区间内二者也不具备单调性。故以方位角 θ 为变量,双 MZ 系统双臂检测信号的相关系数在定义域上不具备单调性。

同理,以入射光椭率角 ϵ 为变量时,双 MZ 系统双臂检测信号的相关系数在定义域上也不具备奇偶性、周期性和单调性。

图 5 是以入射光方位角 θ 或椭率角 ϵ 作为单一变量时双臂检测信号的相关系数曲线,其中波形 1,2 分别与图 4(a)、(b)的条件相同。由图可知,以方位角 θ 或椭率角 ϵ 为变量,相关系数均不具备奇偶性、周期性和单调性,而且不同条件下相

关系数值的分布也不同。因此为了找出偏振态工作点,偏振控制算法必须具备全局搜索能力。

另外,在系统目标函数的多参量空间中可能存在多个极值。图 5 中的某些驻点,如 A, B 两点,虽然是相关系数的局部极值点,但在整个定义域上并不是极值点。因此,为了实现对有多驻点的全局收敛性,偏振控制算法应该有能力辨识这些不是极值点的驻点,跳出鞍点而转向其它区域继续搜索,避免陷入局部最优的“陷阱”而导致算法失效。

根据以上分析,为了实现控制目标,偏振控制算法必须具备:(1)全局搜索能力;(2)跳出局部最优并最终趋于全局最优的能力。任何算法只要具备了上述两种能力,都可实现对偏振态工作点的成功搜索。

5 算法验证

模拟退火算法^[10-12]是一种全局搜索算法,且可依据 Metropolis 准则以一定概率从局部最优的“陷阱”中跳出,最终得到全局最优解,因此满足偏振控制的要求。利用基于模拟退火算法的偏振控制算法进行现场实验,实验系统为本课题组研发的基于双 MZ 光纤干涉仪的分布式光纤油气管道泄露检测及预警系统。该系统能够对威胁管道安全的事件进行实时监测、预警及定位,应用于大港-枣庄输油管线,监测距离约 35 km。在野外自然环境下,对地表土层进行人工挖掘试验,在大港输油站实时监测信号波形。

图 6(a)和(b)分别是未进行偏振控制和启动模拟退火算法后,搜索到偏振态工作点时得到的两路信号波形。对比控制前后的波形,可见经模拟退火算法控制后,信号的相关性得到了很大改善,相位畸变基本消除。

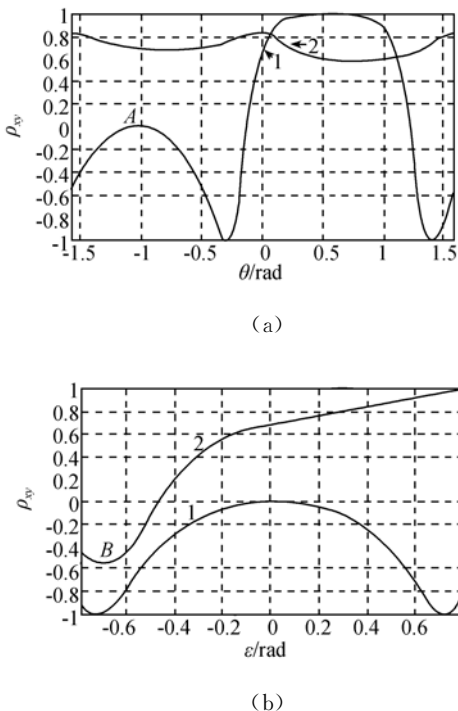


图 5 (a) $\epsilon=0$ 时,相关系数与方位角 θ 的关系;(b) $\theta=-1$ rad 时,相关系数与椭率角 ϵ 的关系

Fig. 5 (a) When $\epsilon=0$, relation between correlation coefficient and azimuth θ ; (b) When $\theta=-1$ rad, relation between correlation coefficient and ellipticity ϵ

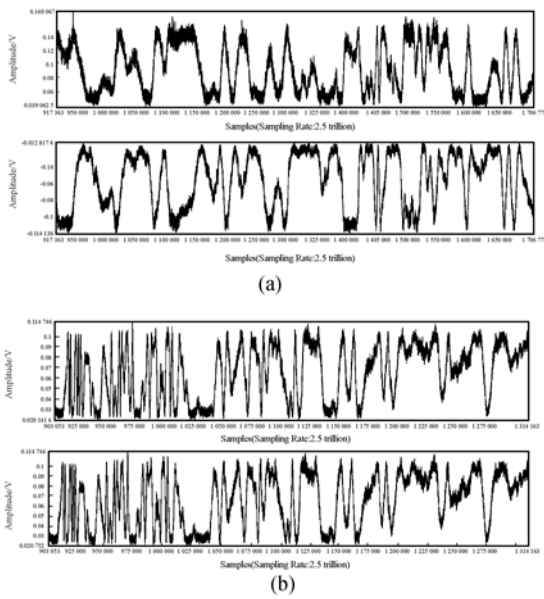


图 6 (a)原始两路波形;(b)偏振控制后的两路波形
Fig. 6 (a)Original waveforms;(b)Waveforms under polarization control

利用模拟退火算法对输入偏振态进行实时控制,对信号的相关性进行连续监控。图 7,8 分别是偏振控制前后一个月内相关系数每天的均值与标准差。

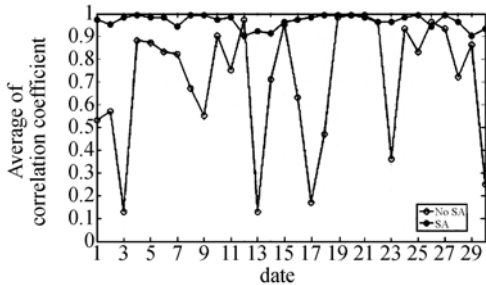


图 7 偏振控制前后相关系数每天的均值
Fig. 7 Daily average of correlation coefficient before and after polarization control

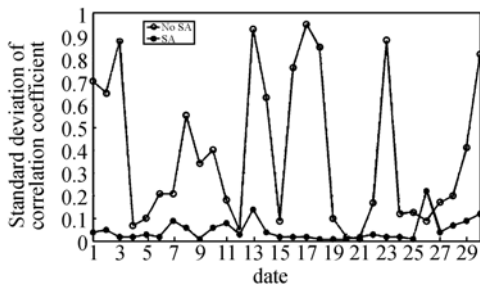


图 8 偏振控制前后相关系数每天的标准差
Fig. 8 Standard deviation of correlation coefficient before and after polarization control

根据信号记录,在未进行偏振控制时,信号相关性不能保持稳定。施加偏振控制后,信号相关系数能够持续稳定在 0.9 以上,系统的稳定性非常好;即使因外界激振和输入偏振态漂移而导致了偏振态工作点的变化,算法也能在较短时间内搜索到新的偏振态工作点,恢复信号良好的相关性。

图 9 是分别利用局部搜索算法(LSA)^[10]、遗传算法(GA)^[13]和模拟退火算法(SA)时,一个月的偏振控制记录。

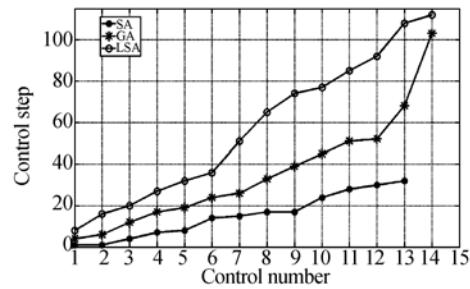


图 9 3 种算法的控制记录

Fig. 9 Control records of three algorithms

通过对比可知,局部搜索算法对有多驻点的全局收敛性不敏感,不完全满足偏振控制要求,在一个月中有两次搜索失败,而在控制成功时搜索效率也非常低。遗传算法虽然满足偏振控制要求,但它需要一定的种群数量,并且随着杂交代数的增加种群多样性减小,削弱了跳出局部最优解的能力,因此其搜索速度相对要慢。根据记录,遗传算法平均需要 3 个算法历程,最多历经 103 次控制循环才能实现对偏振态工作点的搜索。而模拟退火算法完全满足了偏振控制要求,体现出更高的控制效率,一般只需 1 次流程就能搜索到新的工作点,其中最多经历 32 次循环,最少只需 1 次循环,即可恢复信号的一致性,重新稳定系统。由此可见,算法是否具备偏振控制所要求的两种能力是偏振控制成功的关键。

6 结 论

本文提出了一种偏振衰落控制方法以保持双 Mach-Zehnder 光纤干涉传感系统中信号的稳定性。首先通过分析该系统的偏振模型,发现“偏振诱导相位偏移”是导致系统信号相关性下降及定位误差的直接原因,而传感光纤偏振特性的不一

致使系统检测信号对输入偏振态敏感是造成该问题的根本原因,继而提出了对系统输入偏振态进行控制、搜索偏振态工作点的抗偏振衰落思路。在此基础上,根据系统双臂检测信号相关系数随输入偏振态的变化关系,指出了偏振控制算法所必需的两种能力,并利用模拟退火算法作为偏振

控制算法进行验证。长期的现场实验表明,该算法可在不超过两次工作流程(即40个状态跳转)内找到系统的偏振态工作点,并使信号的相关系数持续稳定在0.9以上,明显提高了系统的工作稳定性,从而说明该方法切实有效,适用于消除双MZ光纤干涉传感系统的信号二义性。

参考文献:

- [1] 周琰, 靳世久, 曾周末, 等. 分布式光纤管道安全检测定位技术研究[J]. 光电子·激光, 2008, 19(7): 922-924.
ZHOU Y, JIN SH J, ZENG ZH M, *et al.*. Study on the distributed optical fiber sensing technology for pipeline safety detection and location [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, 19(7): 922-924. (in Chinese)
- [2] 封皓, 靳世久, 曾周末, 等. 基于琼斯矩阵建模的管道泄漏检测及预警系统的定位误差分析[J]. 光学学报, 2009, 29(3): 723-727.
FENG H, JIN SH J, ZENG ZH M, *et al.*. Locating error analysis in pipeline leakage detection and prewarning system based on modeling using Jones matrix[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(3): 723-727. (in Chinese)
- [3] FENG H, ZHU L, JIN S J, *et al.*. Modeling of pipeline leakage detection and prewarning system for locating error analysis based on Jones matrix [J]. *Journal of the Japan Petroleum Institute*, 2009, 52(3): 114-119.
- [4] 谭靖, 陈伟民, 付玉梅. 琼斯矩阵在分布式光纤传感器偏振态分析中的应用[J]. 光电工程, 2007, 34(5): 120-125.
TAN J, CHEN W M, FU Y M. Application of Jones matrix in the research of polarization effects of the distributed optic fiber sensor[J]. *Opto-electronics Eng.*, 2007, 34(5): 120-125. (in Chinese)
- [5] 孙刚, 金世龙. 双折射晶体琼斯矩阵分析[J]. 应用光学, 2005, 26(4): 17-21.
SUN G, JIN SH L. Analyses of Jones matrix of birefringent crystals[J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(4): 17-21. (in Chinese)
- [6] 张靖华. 双折射光纤琼斯矩阵的一般表达式及反射传输特性[J]. 光子学报, 1997, 26(6): 527-531.
ZHANG J H. General expression of Jones matrix in birefringent fibers and reflective transmission characteristics[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1997, 26(6): 527-531. (in Chinese)
- [7] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [8] 陈玄令, 沈国荣. 复合函数奇偶性的判断方法[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2008, 29(2): 158-160.
CHEN X L, SHEN G R. Method to judge whether composite functions are even or odd [J]. *Journal of Bohai University (Natural Science Edition)*, 2008, 29(2): 158-160. (in Chinese)
- [9] 曾喜萍. 复合函数周期性[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2004, 29(3): 190-192.
ZENG X P. The periodicity of composite functions [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2004, 29(3): 190-192. (in Chinese)
- [10] 康立山, 谢云, 尤矢勇, 等. 非数值并行算法(第一册)模拟退火算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
KANG L SH, XIE Y, YOU SH Y, *et al.*. *Non-numerical Parallel Algorithms (The first volume) Simulated Annealing*[M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
- [11] 黄平. 最优化理论与方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
HUANG P. *Optimal Theories and Methods*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. (in Chinese)
- [12] 高贯斌, 王文, 林铿, 等. 应用改进模拟退火算法实现关节臂式坐标测量机的参数辨识[J]. 光学精密工程, 2009, 17(10): 2499-2505.
GAO G B, WANG W, LIN K, *et al.*. Parameter identification based on modified annealing algorithm for articulated arm CMMs[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(10): 2499-2505. (in Chinese)
- [13] 刘勇, 康立山, 陈毓屏, 等. 非数值并行算法(第二册)遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
LIU Y, KANG L SH, CHEN Y P, *et al.*. *Non-numerical Parallel Algorithms (The Second Volume) Genetic Annealing* [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)

作者简介:



曾周末(1962—),男,湖南人,教授,博士生导师,主要从事检测技术及仪器,系统集成与智能化,微电子机械系统等方面的研究。E-mail: zhmzeng@tju.edu.cn



安 阳(1986—),男,山东烟台人,博士研究生,主要从事无损管道检测技术,测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: anyang1986@163.com



封 皓(1982—),男,河北衡水人,博士研究生,主要从事测试技术及仪器等方面的研究。E-mail: fhlele@tju.edu.cn

通讯作者:



张溪默(1986—),男,湖北当阳人,硕士研究生,主要从事偏振控制、自动测控系统等方面的研究。E-mail: zxm2514@163.com



靳世久(1946—),男,河北衡水人,教授,博士生导师,主要从事管道检测与故障诊断技术,无损检测技术,现代传感技术,信号处理技术等方面的研究。E-mail: shjjin@tju.edu.cn

●下期预告

多零件选区激光熔化成型效率优化

刘 杰,杨永强,苏旭彬,肖冬明

(华南理工大学 机械工程学院,广东 广州 510640)

为提高成型效率,进行了多零件选区激光熔化成型效率优化研究。首先,分析了多零件选区激光熔化成型过程的时间消耗,并以减少时间消耗为目标建立了3维零件在3维成型空间中的2.5维排料优化规则。然后,研究了2.5维自动排料,提出利用3维零件模型在2维平面区域的投影将2.5维排料转化为2维排料的简化方法,并研究了一种利用切片数据进行投影生成的算法。最后,为验证所述方法的有效性,以手术模板模型为例,在虚拟选区激光熔化系统 VDimetal280 上进行了优化实验。结果表明,与优化前相比,优化后的成型次数从4次降为3次,在600 mm/s扫描速度、0.035 mm切片层厚、0.08 mm扫描间距的工艺参数下,总铺粉次数从3 892次降为2 231次,预计加工时间从91 276 341 ms降为69 917 632 ms,时间消耗有明显减少。