

单模光纤振动信号监测

尚秋峰, 管帅*, 李玉洁

(华北电力大学 电子与通信工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 分布式光纤传感技术应用广泛, 为了利用单模光纤中的双折射变化规律进行振动信号监测, 综合考虑了单模光纤中波导形状双折射、应力双折射以及振动引起的动态应变双折射等因素, 建立了基于琼斯矩阵和斯托克斯矢量分析方法的单模光纤振动监测模型, 仿真和实验分析了模型对 10 Hz 正弦与方波振动信号的响应。仿真实验结果表明: 该模型可以识别光纤所受振动信号的类型和频率。

关键词: 单模光纤; 双折射; 琼斯矩阵; 振动

中图分类号: TN256 文献标志码: A 文章编号: 1002-5561(2022)01-0012-04

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Single mode fiber vibration signal monitoring

SHANG Qiufeng, GUAN Shuai*, LI Yujie

(Department of Electronic and Communication Engineering, North China Electric Power University, Baoding Hebei 071003, China)

Abstract: Distributed optical fiber sensing technology is widely used. In order to use the variation law of birefringence in single mode fiber for vibration signal monitoring, considering the factors such as waveguide shape birefringence, stress birefringence and dynamic strain birefringence caused by vibration in single mode fiber, a single mode fiber vibration monitoring model based on Jones matrix and Stokes vector analysis method is established, the response of the model to 10 Hz sinusoidal and square wave vibration signals is analyzed by simulation and experiment. The simulation results show that the model can identify the type and frequency of vibration signal received by optical fiber.

Key words: single mode fiber, birefringence, Jones matrix, vibration

0 引言

在实际应用中, 光纤自身结构、外界环境变化等因素使得光纤中 2 个相互垂直的偏振模式的相位常数发生变化, 引起光纤双折射效应, 导致光波偏振态随机变化, 对光纤传感技术的性能产生影响^[1-3]。因此, 双折射是光纤的重要物理特性。一方面, 对光纤中双折射现象引起的偏振态进行控制可以很好地提高传感性能; 另一方面, 双折射变化灵敏, 对传感光纤外部

环境变化十分敏感, 可以利用单模光纤中双折射的变化规律进行监测外界振动信号。因此, 本文利用单模光纤中的双折射效应建立斯托克斯矢量模型、数值仿真模型, 监测不同的振动信号。

1 单模光纤振动监测模型

由光波导理论可知, 单模光纤含有 2 种正交的偏振模式 LP_{01}^x 模和 LP_{01}^y 模, 单模光纤横向电场的 2 个正交主轴被称为慢轴和快轴, 分别设为平面直角坐标系的 x 轴和 y 轴。理想情况下, 光纤的纤芯是标准的圆形, 具有圆对称的折射率, 输入到光纤中的线偏振光分解为 2 种互相垂直的偏振模式, 两偏振模式的相位常数相同。但是, 实际单模光纤因为存在纤芯内部残余应力和外部环境的变化使其传播常数不同, 进而导致 2 种相互垂直的偏振模式传播速度不同, 经过一段距离传播后光波在快、慢轴上产生相位差, 即引起双折射现象^[4-7]。单模光纤可等效为在快、慢轴间存在相位差且

收稿日期: 2021-05-05。

基金项目: 河北省自然科学基金项目(E2019502179)资助; 国家自然科学基金项目(61775057)资助。

作者简介: 尚秋峰(1968—)女, 博士, 教授, 中国光学学会高级会员, 主要研究方向为光电子与光传感方向。负责了国家“863”计划 1 项、国家自然科学基金 2 项、河北省自然科学基金项目 1 项、高等学校博士学科点专项科研基金 1 项和电力公司科技促进项目 1 项, 获得国家专利授权 6 项。

* 通信作者: 管帅(1995—), 女, 研究生, 主要研究方向为光纤传感。



与距离相关的偏振器件,其琼斯矩阵^[8-9]可表示为:

$$J = \begin{bmatrix} e^{i\delta} \sin^2\theta + \cos^2\theta & (e^{i\delta} - 1)\cos\theta\sin\theta \\ (e^{i\delta} - 1)\cos\theta\sin\theta & e^{i\delta} \cos^2\theta + \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中, θ 是等效琼斯矩阵的旋转角, δ 是相位延迟角。造成实际单模光纤动态双折射变化的原因有:波导形状双折射 $\delta\beta_{GE}$ 、应力双折射 $\delta\beta_{SE}$ 和光纤动态应变双折射 $\delta\beta$, 在光纤长度为 L 的距离上, δ 可表示为: $\delta = (\delta\beta_{GE} + \delta\beta_{SE} + \delta\beta) \times L$ 。

外界振动干扰会引起光纤动态双折射变化,导致局部偏振态改变。因此,通过分析检测到的斯托克斯矢量的偏振变化信息就可以实现光纤沿线振动信号的监测^[10]。

振动引起的光纤弯曲模型^[10]如图 1 所示, L_M 表示弯曲光纤段的横向长度, R 表示弯曲光纤段的曲率半径,假设振动函数为正弦型振动信号 $h = h_0 + h_0 \cos(\omega t)$, h_0 为振动的幅度, ω 为振动的频率。由图 1 中的几何关系以及振动函数可得双折射的相位差^[10]:

$$\delta_M = \Delta\beta \cdot L_M = \frac{0.093\bar{\beta}^2 r}{L_M^3} [h_0 + 2h_0^2 \cos(\omega t) + h_0^2 \cos^2(\omega t)] \quad (2)$$

其中 $\Delta\beta$ 为振动引起的双折射, $\bar{\beta}$ 为平均传播常数, r 为光纤半径, t 为振动时间。

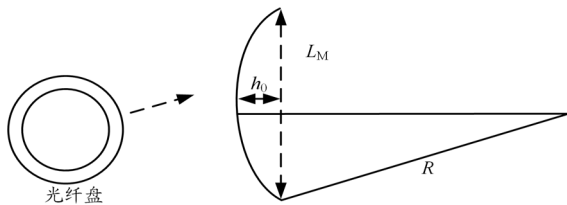


图 1 振动光纤段的弯曲示意图

图 2 为光纤受扰动示意图,假设光纤总长度为 L 。理想情况下,将传感光纤受到振动干扰的部分等效为双折射元件 M ,剩余的传感光纤部分等效为双折射元件 A_1 和 A_2 。

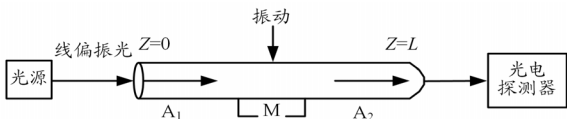


图 2 光纤受扰动示意图

将式(2)代入式(1),可得双折射元件 M 的等效琼斯矩阵 T 为:

$$T = \begin{bmatrix} e^{i\delta_M} \sin^2\theta + \cos^2\theta & (e^{i\delta_M} - 1)\cos\theta\sin\theta \\ (e^{i\delta_M} - 1)\cos\theta\sin\theta & e^{i\delta_M} \cos^2\theta + \sin^2\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

不受振动干扰的光纤段,传感光纤在制作过程中

产生的 $\delta\beta_{GE}$ 和 $\delta\beta_{SE}$ 共同构成传感光纤段相位总延迟差 δ_A ,在光路搭建完成后 δ_A 不受外界环境干扰,只随传感距离发生变化。根据式(1)可知,无振动干扰的传感光纤等效双折射元件 A_1 、 A_2 的琼斯矩阵 B_1 、 B_2 可表示为:

$$B_1 = \begin{bmatrix} e^{i\delta_{A_1}} \sin^2\theta_1 + \cos^2\theta_1 & (e^{i\delta_{A_1}} - 1)\cos\theta_1\sin\theta_1 \\ (e^{i\delta_{A_1}} - 1)\cos\theta_1\sin\theta_1 & e^{i\delta_{A_1}} \cos^2\theta_1 + \sin^2\theta_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} e^{i\delta_{A_2}} \sin^2\theta_2 + \cos^2\theta_2 & (e^{i\delta_{A_2}} - 1)\cos\theta_2\sin\theta_2 \\ (e^{i\delta_{A_2}} - 1)\cos\theta_2\sin\theta_2 & e^{i\delta_{A_2}} \cos^2\theta_2 + \sin^2\theta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中, δ_{A_1} 和 δ_{A_2} 分别为双折射元件 A_1 、 A_2 的相位总延迟差。

设入射光的琼斯矩阵为 E_{in} , 经过传感光纤后,输出光的琼斯矩阵可表示为:

$$E_{out} = B_1 \times T \times B_2 \times E_{in} \quad (6)$$

使用斯托克斯矢量法^[4,11]表示输出光偏振态为:

$$S_1 = E_x^2 - E_y^2 \quad (7)$$

其中, S_1 为斯托克斯矢量, E_x 和 E_y 分别为输出光 E_{out} 在 x 、 y 方向上的偏振分量。

本文对 S_1 进行仿真分析,可获得输出光功率和振动信号之间的关系。

2 仿真研究

仿真参数设置如下:2 段传感光纤长度分别为 21.5 km、24.5 km,输入偏振角度为 j 的线偏振光,传感光纤等效琼斯矩阵的旋转角 $\theta = \pi$ 、 $\theta_1 = 1.28\pi$ 。

当 $j = 45^\circ$ 时,不同振动信号作用下输出光的斯托克斯矢量 S_1 时域图如图 3 所示。可以看出,传感光纤不受振动干扰时, S_1 的幅值随时间几乎无变化,不存在突变位置。与无振动相比,在光纤中添加频率为 10 Hz 的正弦和方波振动信号后,时域波形随振动信号发生明显变化,波形与添加的振动信号一致,呈正弦和方波状态,周期均为 100 ms。这说明建立的仿真模型能够识别振动信号,对振动信号有较好的响应。

为了进一步分析该模型对施加在光纤上的振动信号的响应,改变方波振动信号的频率分别为 40 Hz 和 70 Hz,得到方波信号的斯托克斯矢量时域波形图如图 4 所示。可以看出,波形周期符合振动频率。因此,根据斯托克斯矢量模型的波形和信号周期,可以判断光纤所受振动类型及频率。

为了分析输入光偏振角度对斯托克斯矢量的影响,设入射光的偏振角度在 $0 \sim 2\pi$ 之间变化,得到 S_1

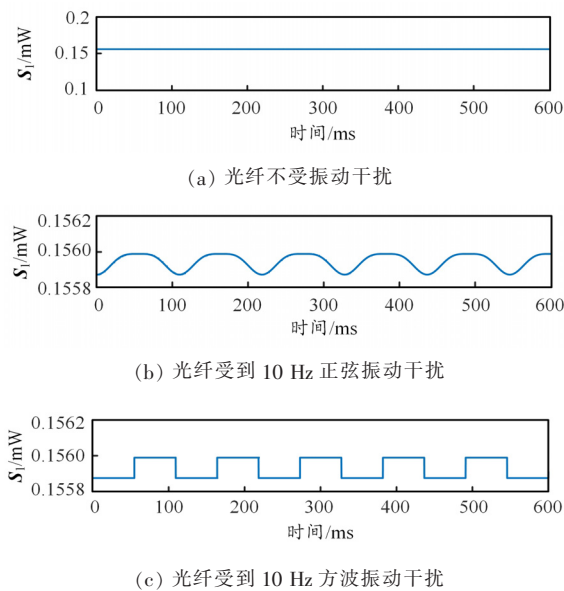
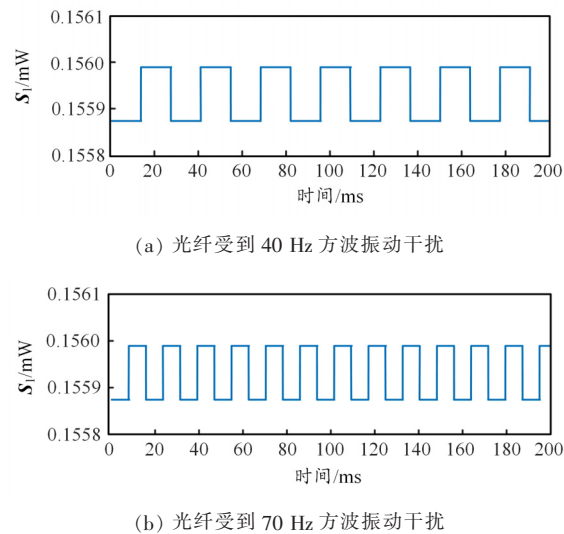
图3 不同振动信号时输出光的斯托克斯矢量 S_1 时域仿真结果图

图4 光纤受到不同频率的方波振动干扰时的时域波形图

时域波形如图5所示。可以看出, S_1 时域波形随入射光偏振角度的变化呈正弦关系。

3 实验及数据分析

本文搭建了如图6所示的振动模拟实验光路,验证建立的矢量模型对振动信号的响应情况。在2段长度分别为21.5 km、24.5 km的单模光纤中间利用振动台模拟外界振动事件对光纤的扰动作用,振动光纤段为50 m的光纤盘。光路中使用AP3350A可调谐激光器输出稳定的线偏振光,经过起偏器调节偏振角度后进入传感光纤,利用偏振分束器(PBS)对输出光的光强进行分解,得到x分量和y分量的光强,分别由光电探测器(PD1)和PD2采集2路光强信息。对采集数据进

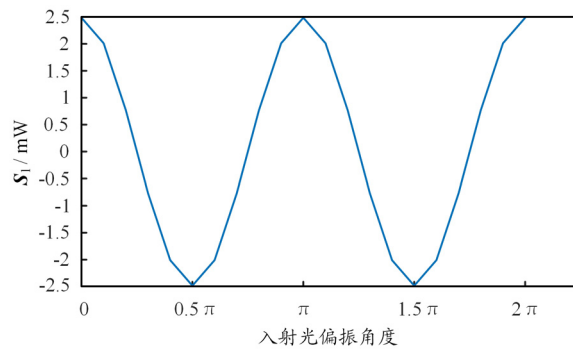


图5 不同入射光偏振角度对时域波形的影响

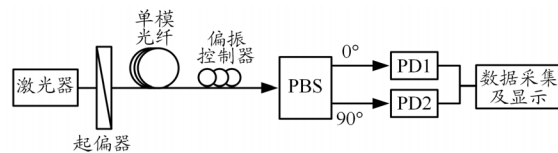
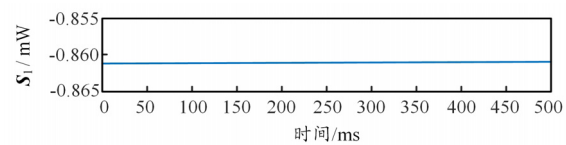


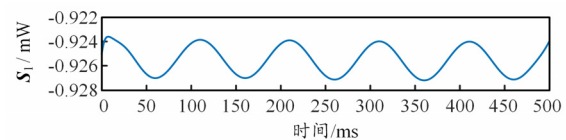
图6 振动模拟实验装置图

行数据处理和降噪拟合,得到不同振动信号时输出光的斯托克斯矢量 S_1 时域实验结果图如图7所示。可以看出, 光纤在未受到外界振动的情况下, S_1 时域波形几乎为一条直线, 无明显的波形起伏; 加入振动信号进行模拟外界振动, 光纤分别受到频率为10 Hz的正弦和方波振动, 输出光的斯托克斯矢量 S_1 时域波形与振动信号波形一致, S_1 时域波形周期分别为100 ms。

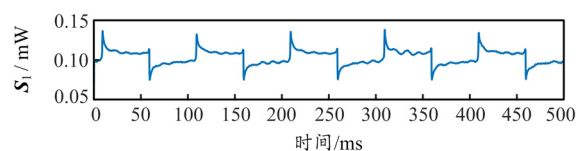
改变方波信号振动频率为40 Hz、70 Hz时, S_1 时域波形周期分别为25 ms、15 ms。这说明本文所建立的模型能够有效识别光纤发生的振动, 实验测量结果与仿真情况接近。



(a) 光纤无振动干扰时



(b) 光纤受到 10 Hz 正弦振动干扰时



(c) 光纤受到 10 Hz 方波振动干扰时

图7 不同振动信号时输出光的斯托克斯矢量 S_1 时域实验结果图

4 结束语

本文基于单模光纤中的双折射变化规律,建立了琼斯矩阵和斯托克斯矢量分析方法的振动监测模型,根据该模型中振动信号与受振动影响的输出光斯托克斯矢量 S_i 之间的关系,获得了 S_i 对不同频率的正弦和方波振动信号的响应。同时,仿真分析发现输入光的偏振角度的改变也会对 S_i 峰值产生影响。仿真和实验结果均表明:该模型能够识别光纤所受振动信号的类型和频率,可以监测到外界振动的发生。

参考文献:

- [1] 谢尚然. 光纤布里渊散射与干涉中的偏振问题及其分布式传感应用[D]. 北京:清华大学,2013.
- [2] 赵晗祺,连伟华,吴斌,等. 风振对 OPGW 偏振态和通信的影响[J]. 光通信技术,2021,45(3):58-62.
- [3] 王峰,潘运,王威,等. 偏振光时域反射技术对多点扰动检测的研究进展[J]. 集成技术,2016,5(5):1-10.
- [4] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2010.
- [5] 吴重庆. 光波导理论[M]. 北京:清华大学出版社,2000.
- [6] 高超,于晋龙,刘佳,等. 基于偏振态变化时延估计的分布式光纤传感系统[J]. 光电子·激光,2012,23(1):28-34.
- [7] 郑光浩. 基于布里渊自相干检测的分布式振动传感技术研究 [D]. 成都:电子科技大学,2016.
- [8] 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.
- [9] 谭靖,陈伟民,符欲梅. 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(2):120-125.
- [10] 王祥传,王峰,张旭苹. 光纤振动对光偏振态影响的研究[J]. 光电子技术,2009,29(3):186-190.
- [11] 孙明璇,王健,邱敏,等. 全光纤高速模拟信号偏振态测量系统的研究[J]. 光电技术应用,2015,30(2):17-22.