

长距离光纤传感系统消光比动态调谐方法

林 炜¹, 刘 波¹, 缪 凯¹, 郭 澎¹, 黄 翔¹, 丁晓铭²

(1. 南开大学 信息技术科学学院 现代光学研究所, 天津 300071;
2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 光纤干涉仪的消光比在很大程度上决定了干涉型光纤传感系统的灵敏度。文章从理论上分析了基于干涉结构的分布式光纤振动传感系统的消光比影响因素, 指出偏振态是影响系统消光比的主要原因。在此基础上, 设计并实现了一种性价比极高的在线偏振调节器。通过对偏振态的调节, 实现了长距离分布式光纤振动传感系统消光比的动态均衡。

关键词: 长距离; 光纤传感系统; 偏振控制器; 消光比

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2011)02-0029-04

Dynamic tuning method for extinction ratio of long-distance fiber-optic sensing systems

Lin Wei¹, Liu Bo¹, Miao Kai¹, Guo Peng¹, Huang Xiang¹, Ding Xiaoming²

(1. College of Information Science and Technology, Institute of modern optics, Nankai University, Tianjin 300071, China;
2. College of Instrumentation Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: The extinction ratio of a fiber-optic interferometer determines to a great extent the sensitivity of the interferometric fiber-optic sensing system. This article theoretically analyzes the factors affecting the extinction ratio of interference structure-based distributed fiber-optic vibration sensing systems and points out that polarization state is the main cause affecting the system extinction ratio. On this basis, a high cost-performance online polarization controller is designed and implemented. By tuning the polarization state, the dynamic equilibrium of the extinction ratio in long-distance distributed fiber-optic vibration sensing system is achieved.

Key words: long distance; fiber-optic sensing system; polarization controller; extinction ratio

0 引言

随着各领域技术的不断发展, 对探测技术精度的要求不断提高。由于受限于器件工艺与探测方法等, 传统的电子器件传感器已不能满足这种高精度、高灵敏度的要求。光纤本身既能传输信息, 亦能感知外界振动应变。光纤传感器通过光波在耦合点的干涉就能传感外界信息, 其采用光波作为传感参量, 故有着极高的灵敏度。因此, 与传统的电子器件传感器相比, 光纤传感技术更能满足这种高精度、高灵敏度的要求。光纤传感技术得到了很大的发展。近年来, 国内外对分布式光纤传感系统的研究较多。

然而, 长距离分布式光纤振动传感系统的灵敏度在很大程度上取决于消光比的大小。在实际传感器的敷设中, 其消光比往往达不到理想值, 并且在时域中很不稳定。不同时间、不同条件下测得的消光比的值是不同的, 这使得传感系统的灵敏度不稳定。从而严重制约了长距离分布式光纤传感器的应用。因此, 需要一种消光比的调谐方法来调谐传感器的

灵敏度。

我们在前期的实验中发现偏振态对系统的消光比有很大的影响。本论文在大量实验的基础上, 从理论上分析了基于干涉结构的分布式光纤振动传感系统中偏振态对消光比的影响, 并将偏振控制器应用于该系统的消光比调谐, 实现了长距离光纤传感系统消光比在一点的调谐, 从而得到了更高的灵敏度。

1 调谐原理

在基于干涉结构的光纤传感系统中, 光波的偏振态发生改变可以引起消光比的改变, 并有着确定的变化关系, 因此通过偏振态的调谐可以调谐消光比的大小。下面分析光纤传感器中光波偏振态与消光比之间的变化关系。

以迈克尔逊干涉仪为例, 在输入耦合器上输入光波的偏振态用 C_i 表示, 当信号臂和参考臂的光波经臂末端的反射镜反射回耦合器时, 它们的偏振态分别以 C_s 和 C_r 表示, 该干涉仪结构如图 1 所示。

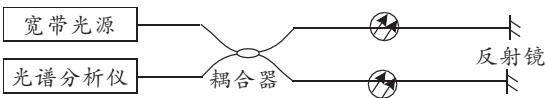


图 1 迈克尔逊干涉仪结构图

光波反射回耦合器后,输出光强可由下式表示^[1-2]:

$$I = I_0 \{ \alpha_r \kappa_1 \kappa_2 + \alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2) + 2 \cos \eta \cdot \sqrt{\alpha_r \alpha_s \kappa_1 \kappa_2 (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} \gamma(\tau) \cos(\varphi_r - \varphi_{s//}) \} , \tag{1}$$

式中, I_0 表示由宽带光源输入干涉仪的光强; α_s 和 α_r 分别表示信号臂和参考臂的光损失系数; κ_1 和 κ_2 分别为 M-Z 干涉仪两个耦合器的耦合比,在迈克尔逊干涉仪中为同一耦合器, $\kappa_1 = \kappa_2$; φ_s 与 φ_r 分别表示信号臂与参考臂的相位; τ 为两个臂的传输时延差; $\varphi_{s//}$ 为信号光的振幅 E_s 与参考光振幅 E_r 平行的分量 $E_{s//}$ 的相位; $\gamma(\tau)$ 为自相干系数,表达式如下:

$$\gamma(\tau) = \exp(-|\tau|/\tau_c) , \tag{2}$$

式中, τ_c 为光源的相干时间。

信号消光比可由下式表示^[1-2]:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} , \tag{3}$$

代入光强表达式得到:

$$V = \frac{2 \cos \eta \sqrt{\alpha_r \alpha_s \kappa_1 \kappa_2 (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} \gamma(\tau)}{\alpha_r \kappa_1 \kappa_2 + \alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} .$$
$$\text{令 } V_0 = \frac{2 \sqrt{\alpha_r \alpha_s \kappa_1 \kappa_2 (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)}}{\alpha_r \kappa_1 \kappa_2 + \alpha_s (1 - \kappa_1)(1 - \kappa_2)} , \tag{4}$$

则当两臂的传输时延远小于光源相干时间时,由式(2)得 $\gamma(\tau) \rightarrow 1$,那么消光比可表示为

$$V = V_0 \cos \eta , \tag{5}$$

式中,角 η 取决于 C_s 和 C_r 在邦加球上的夹角。

由式(5)可以看到,信号消光比与光波的偏振态有着直接的关系,若要达到良好的消光比调谐,通过改变光波偏振态即可实现。

由此,我们将偏振控制器应用于该系统中,调谐信号臂或参考臂的偏振态即可动态调谐系统的消光比,从而得到更高的灵敏度。当动态调谐偏振态使得角 $\eta = 0$ 时,可得到最大的消光比,此时系统的灵敏度最高。

2 消光比调谐实验与结果分析

2.1 消光比调谐实验

根据以上的理论分析设计了一套系统进行消光比调谐实验。以迈克尔逊干涉仪为光纤传感系统,其反射镜采用 Sagnac 环。其中一支干涉臂用偏振

控制器调谐偏振态。系统结构示意图如图 2 所示。图中,宽带光源的中心波长为 1 550 nm,光谱分析仪用于分析干涉谱及测量消光比,其分辨率为 0.1 nm。干涉臂为普通单模光纤,长度为 5 m。Sagnac 环的长度为 0.68 m。B₁ 是 2×2 单模耦合器,B₂、B₃ 均为 1×2 单模耦合器。

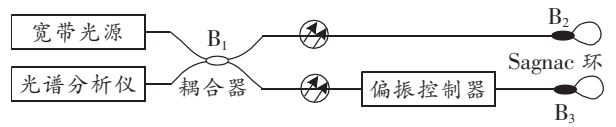


图 2 消光比调谐实验系统结构示意图

我们设计了基于应力双折射的正交径向应力光纤偏振控制器作为光纤传感系统的偏振控制器^[3]。其结构如图 3 所示。

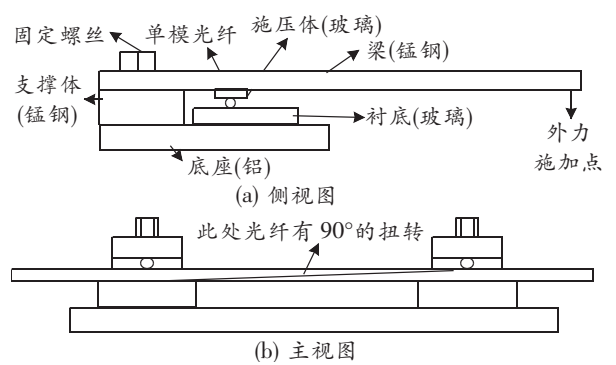


图 3 光纤偏振控制器结构示意图

采用悬臂梁结构,通过改变施予两端悬臂梁的外力来改变施予两端的径向应力,动态调谐光波的偏振态,从而调谐其消光比。调谐原理如下:对光纤干涉仪施加应力会发生应力双折射,从而改变光波的偏振态。径向的应力双折射中本文采用^[4]:

$$O \Omega = \frac{4n^3}{\pi} \cdot \frac{1 + \sigma}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{f}{2A} , \tag{6}$$

那么总的应力双折射的改变量为

$$\int \frac{4n^3}{\pi} \cdot \frac{1 + \sigma}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{f}{2A} dx = \frac{4n^3}{\pi} \cdot \frac{1 + \sigma}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{F}{2A} . \tag{7}$$

式中, $O \Omega$ 表示双折射量即单位长度光纤双折射引起的相位差,在用邦加球描述时表示为偏振态变化所围绕的轴; n 为折射率; Y 为 SiO₂ 的杨氏模量; σ 为 SiO₂ 的泊松比; P_{11} 、 P_{12} 均为弹光系数; A 为光纤半径; f 表示单位长度光纤所受的径向应力; F 表示光纤所受总的径向应力。

由弹性力学的相关知识,我们确定了施予悬臂梁末端的外力 F' 与其提供给光纤的径向应力 F 具有以下关系:

$$F' = \frac{1}{2} F \left(3 \frac{l}{x_0} - 1 \right), \quad (8)$$

式中, l 为悬臂梁的臂长; x_0 为施压体与支撑体间的距离。当满足下式时,

$$\frac{4n^3}{\pi} \cdot \frac{1+\sigma}{Y} (P_{12} - P_{11}) \frac{F'k_0}{A \left(3 \frac{l}{x_0} - 1 \right)} = 2\pi, \quad (9)$$

光波偏振态即可绕邦加球上某一轴转动一周^[5]。若构造两个不同方向的径向应力,则可能使其遍历整个邦加球。

我们采用正交径向应力的调谐方法,取折射率 $n = 1.47$, SiO_2 的杨氏模量 $Y = 6.5 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, SiO_2 的泊松比 $\sigma = 0.16$, 弹光系数 $P_{12} = 0.27$, $P_{11} = 0.12$, 光纤半径 $A = 125 \mu\text{m}$, 悬臂梁的臂长 $l = 85 \text{ mm}$, 施压体与支撑体间的距离 $x_0 = 15 \text{ mm}$ 。

2.2 实验结果与分析

在光纤传感系统的消光比调谐实验中,若固定偏振控制器左端施予的应力,动态改变右端施予的径向应力,则消光比随着右端所加外力的变化曲线如图 4 所示,其呈现了一定的正弦线型,与理论符合较好。波谷中的二次极大是由于传输的光是部分偏

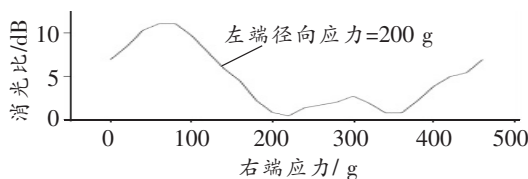
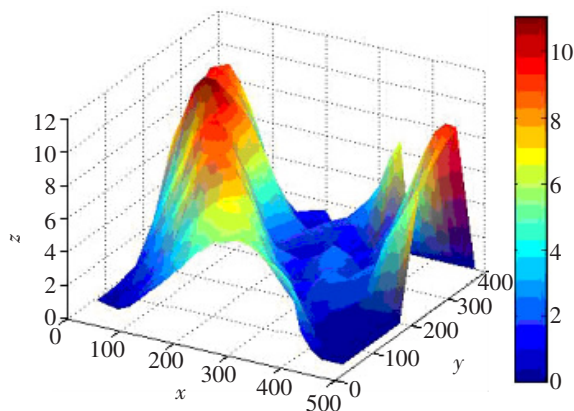


图 4 消光比随右端应力的改变而变化的曲线图

振光引起的。消光比在 $0.47 \sim 11.03 \text{ dB}$ 之间得到调谐,并得到调谐的极大值 11.03 dB 。若同时改变左右两端施予的径向应力,则消光比随两端施予的外力变化的三维曲面图如图 5 所示,偏振态遍历整



x, y 轴分别为左右两端悬臂梁所加应力的大小,单位(g); z 轴为消光比的大小,单位(dB)

图 5 消光比随两端施予的应力的改变而变化的三维曲面图

个邦加球或邦加球上的一个带状区域。消光比在 $0.24 \sim 11.03 \text{ dB}$ 之间得到调谐,并得到偏振态在该区域内消光比的最大值为 11.03 dB ,其干涉谱如图 6 所示;最小消光比 0.24 dB ,其干涉谱如图 7 所示。

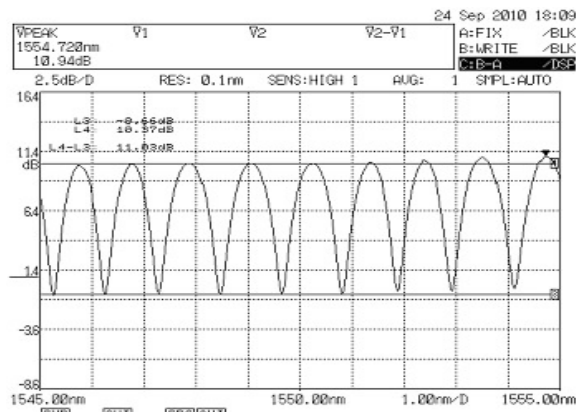


图 6 调节光纤偏振控制器得到最大消光比时的干涉谱

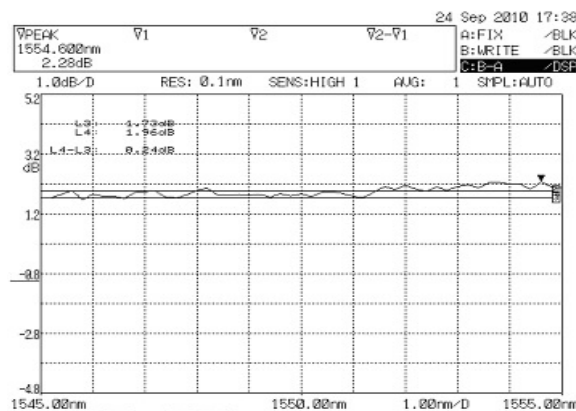


图 7 调节光纤偏振控制器基本达到消光状态时的干涉谱

实验结果分析:我们在消光比调谐实验中得到了消光比的周期性变化,应力致其变化的周期平均为 450 g 。在两臂应力同时动态调整时,我们实现了一个最佳的信号消光比调谐,达到了我们的预期目的。由此可见,通过偏振控制器改变光波偏振态可以实现光纤传感系统消光比在一点的调谐。改变光波偏振态使得消光比达到最大值,就可以使系统的灵敏度达到最佳。

3 结束语

本文分析了干涉型光纤传感器中偏振态对消光比的影响。将偏振控制器应用于该系统,通过改变光波偏振态来调谐消光比,从而调谐其灵敏度。构建了基于迈克尔逊干涉仪的消光比可调谐的光纤传

感系统,实现了消光比在较大范围内的调谐。实验证明,通过光纤偏振控制器改变光波偏振态可以实现系统消光比在一点上的调谐,与理论分析基本一致,并实现了系统消光比在 0.24~11.03 dB 之间的动态调谐。这种基于偏振控制器的长距离光纤传感系统灵敏度的新的调谐方法为系统的消光比调谐提供了新的有效的手段。

参考文献:

[1] Kersey A D, Marrone M J, Dandridge A, et al. Opti-

mization and stabilization of visibility in interferometer fiber-optic sensors using input-polarization control [J]. J Lightwave Technology, 1988,6(10):1599-1609.

[2] 缪凯,刘波. 光纤干涉仪消光比特性研究 [A]. 光学年会 [C]. 天津:天津大学及南开大学,2010.

[3] Shimizu Haruhito, Yamazaki Shuntaro, Ono Takashi, et al. Highly Practical Fiber Squeezer Polarization Controller [J]. Journal of Lightwave Technology, 1991,9(10),1217-1224 .

[4] 罗建花. 光纤光栅有源传感技术的研究 [D]. 天津:南开大学,2005.

[5] 廖延彪. 偏振光学 [M]. 北京:科学出版社,2003.

(上接第 22 页)

解了 ICI 噪声的影响。从仿真数据看出,当考虑所有负面因素时,在误码率为 10^{-4} 下可传输 3 000 km 以上。此相位均衡方法可以降低色散管理的复杂度,改善信号的质量,有效地延长系统的传输距离。

4 结束语

本文分析了 O-OFDM 系统中信号的相位偏移及相位噪声对系统造成的影响;仿真得出了与理论分析相符合的相移规律,并在此基础上提出了简单的相位均衡方法。将该方法应用于仿真中我们得出:采用 16-QAM、传输速率为 40 Gbit/s 的情况下,不加色散补偿光纤,可以在 SSMF 中传输 3 000 km 以上。相对于传统的复用技术来说,降低了色散管理的成本,提高了频谱利用率。由此可以看出,O-OFDM 技术在未来的高速超长距离光通信中有着潜在的研究价值和应用前景。

参考文献:

[1] Shieh W. Maximum-likelihood phase estimation for coherent optical OFDM [A]. Eur Conf Exhibition Opt Commune [C]. Berlin, Germany: IEEE, 2007. 605-607.

[2] Pasandi Mohammad E Mousa , Plant David V . Im -

provement of Phase Noise Compensation for Coherent Optical OFDM via Data-Aided Phase Equalizer [A]. National Fiber Optic Engineers Conference [C]. San Diego, CA:IEEE,2010. 1-3.

[3] Schmidt B J C, Lowery A J, Armstrong J. Experimental demonstrations of electronic dispersion compensation for long-haul transmission using direct-detection optical OFDM [J]. IEEE J Lightwave Technol,2008,26(1):196-203.

[4] Tomba L . On the effect of Wiener phase noise in OFDM systems [J]. IEEE Trans Commun, 1998, 46:580-583.

[5] Yi Xingwen, Shieh William, Ma Yiran. Phase noise effects on high spectral efficiency coherent optical OFDM transmission [J]. IEEE J Lightwave Technol, 2008,26(10):196-203.

[6] Pollet T, Van Bladel M, Moeneclaey M. BER sensitivity of OFDM systems to carrier frequency offset and Wiener phase noise [J]. IEEE Trans Commun, 1995,43:191-193.

[7] Xiong F . Digital Modulation Techniques (2 nd ed) [M]. Boston, MA: Artech House, 2006.

[8] Shieh W, Tucker RS, Chen W, et al. Optical performance monitoring in coherent optical OFDM systems [J]. Opt Express,2007,15:350-356.