

海水两点温度同时测量的理论模型及数值模拟

王鑫 王晶 周宏祖 杨红娟 廖毅鹏

中国海洋大学信息科学与工程学院, 山东 青岛 266100

摘要 海水温度是海洋动力学以及海洋与大气相互作用中起关键作用的基本参数,是研究海洋现象时最重要的依据。为了实现两点海水温度的同时测量,构建了由两段椭圆高双折射光纤萨尼亚克(Sagnac)环形腔的理论模型,利用琼斯矩阵方程对该结构进行理论上的推导,获得了该模型的透射光谱,并得到了透射光谱与该结构各个部分参数的关系。通过 Matlab 编程进行模型的数值模拟,研究该结构两段椭圆高双折射光纤长度的比例变化、偏转角的变化以及温度的变化对光谱的影响。计算结果表明,两段椭圆高双折射光纤的最佳长度比为 1:2,两个偏振控制器的偏转角应该分别为 $\pi/6$ 和 $\pi/3$,温度增加时光谱向短波方向移动。得到利用光谱峰波长移动计算两段椭圆高双折射光纤温度变化的公式。另外,两段椭圆高双折射光纤之间普通单模光纤的长度以及光源的偏振特性对透射光谱的形状以及温度灵敏度没有影响。该模型可以为椭圆高双折射光纤 Sagnac 环形腔海水温度传感器的实际应用提供理论支持与指导。

关键词 光纤光学; 椭圆高双折射光纤; Sagnac 环形腔; 灵敏度; 海水温度

中图分类号 TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.010601

Theoretical Model and Numerical Simulation of Simultaneous Measurement of Two Points Seawater Temperature

Wang Xin Wang Jing Zhou Hongzu Yang Hongjuan Liao Yipeng

College of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

Abstract Seawater temperature is one of the basic parameters of ocean dynamics and it plays a key role in the interaction between the ocean and atmosphere. What's more, seawater temperature is the most important parameter of all marine phenomenon research. In order to achieve the simultaneously measurement of seawater temperature at two points, a theoretical model of Sagnac ring with two high birefringence elliptical fibers is constructed. The transmission spectrum of the theoretical model is obtained by Jones matrix equation, and the relationship between the transmission spectra and the various parts of the structure parameters is also obtained. By the numerical simulation of the theoretical model with Matlab software, the impact of the transmission spectra is studied on the changes of two high birefringence elliptical fibers length proportion, deflection angle and temperature. The results show that the optimum length ratio of two high birefringence elliptical fibers is 1:2. The polarization angles of the polarization controllers should be $\pi/6$ and $\pi/3$, respectively. The transmission spectra shift to shorter wavelength when the temperature increases. The formula is obtained to calculate the temperature changes of two high birefringence elliptical fibers by the wavelength shifts of spectral peaks. In addition, the length of single-mode fiber between the two high birefringence elliptical fibers has no effect on the shape of transmission spectrum and temperature sensitivity. The model can theoretically support and guide the practical application of high birefringence fiber Sagnac ring temperature sensor.

Key words fiber optics; high birefringence elliptical fiber; Sagnac ring; sensitivity; seawater temperature

OCIS codes 280.6780; 120.5790; 060.2300; 060.2420

1 引言

海洋面积占地球表面面积的比例高达 70%,并且海水有着热容量大、比热高的特点,可以存储和传输大

收稿日期: 2015-07-20; 收到修改稿日期: 2015-08-01; 网络出版日期: 2015-11-03

基金项目: 国家自然科学基金(61171161)

作者简介: 王鑫(1991—),男,博士研究生,主要从事光纤光学方面的研究。E-mail: wxin@foxmail.com

导师简介: 王晶(1962—),女,博士,教授,博士生导师,主要从事非线性光学及其应用方面的研究。

E-mail: wjing@ouc.edu.cn(通信联系人)

量的热量,影响海面与大气的热量、动量和水汽的交换,对天气和气候有着巨大的影响。因此,海水温度是海洋-大气系统中一个十分关键的物理参数,为海洋学相关课题的研究提供了一种非常直观的指示量。此外,海水温度也因对海洋的运输、海洋的污染、海上油气资源开发以及海滨核电站建设等方面的巨大影响,在近年来引起广泛的关注。但是现阶段测量海水温度的手段较少,并且在灵敏度和测量海水温度的地理范围上具有很多限制,所以构建一种高灵敏度的全光纤结构的海水温度传感器具有重要的意义^[1-3]。

全光纤传感器发展于20世纪70年代,它具有绝缘、高灵敏度、抗电磁干扰、耐腐蚀等诸多优点,受到了越来越多的关注,并取得了较快的发展。在萨尼亚克(Sagnac)提出Sagnac效应并进行了一系列的实验之后,人们又在其基础上制成了Sagnac环形谐振腔^[4-6]。并应用在光纤传感领域,在偏振态^[7]、应变^[8]、温度^[9]、弯曲度^[10]、振动^[11]和气体种类^[12]等测量传感方面具有独特的优势。

2006年,Frazao等^[13]在Sagnac环形腔中插入高双折射光纤和长周期光纤光栅,实现了对温度和应变力的测量,并且其测量误差最大为 $\pm 21 \mu\text{e}$ 和 $\pm 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。2008年,Li等^[14]构建了超宽带光脉冲Sagnac环形腔,利用频率到强度的映射实现了正负极性的超宽带脉冲输出,其结构为在一个电光相位调制器(EOPM)内嵌入另一个EOPM的光纤Sagnac环形腔可调谐梳状滤波器。2009年,冯素春等^[15]利用两段保偏布拉格光纤光栅(PMFBG)与Sagnac环形腔组成了一个四波长激光器结构,并且将直接写在保偏光纤上的光纤布拉格光栅(FBG)作为波长选择器,制成了多波长掺铒激光器。此光纤激光器有工作原理简单、结构简单、性能稳定等诸多优点。2012年,邵敏等^[16]为了实现同时对温度和折射率的同时测量,他们把长周期光纤光栅嵌入到保偏光纤做成的Sagnac环形腔中,其温度灵敏度和折射率灵敏度分别达到了 $0.1286 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 和 49.38 dB/RIU ,具有极好的应用前景。

本文将椭圆高双折射光纤与Sagnac环形腔结合起来,得到一种新型的全光纤结构传感器,具有结构简单稳固、灵敏度高和价格低廉的特点。该模型可以同时满足海水温度测量的大范围和高精度的要求,并为以后在理论和实验上拓展到多点海水温度测量奠定基础。

2 海水两点温度同时测量的理论模型

两段椭圆高双折射光纤Sagnac环形腔原理图如图1所示。它是由两段椭圆高双折射光纤HBF₁和HBF₂(粗线表示)、两个偏振控制器(PC)、一个3 dB耦合器组成。这些器件之间都是用普通的单模光纤连接的。图中 θ_1 和 θ_2 为偏振控制器的偏转角度,OSA为光谱分析仪。

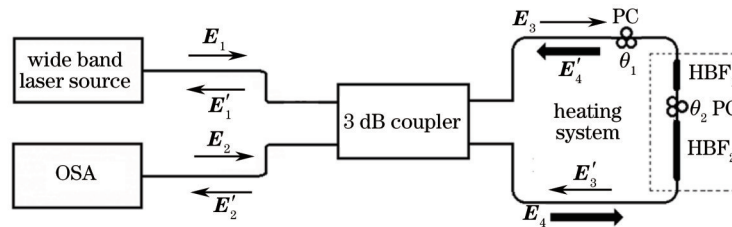


图1 两段椭圆高双折射光纤Sagnac环形腔原理图

Fig.1 Schematic diagram of two high-birefringence elliptic fibers Sagnac loop

如图1所示,超连续激光 E_1 经过3 dB耦合器后分成了两束光,分别为 E_3 和 E_4 , E_3 沿着Sagnac环形腔顺时针传输,而 E_4 则沿着环形腔逆时针传输,两束光在分别经过HBF₁和HBF₂后在耦合器相遇并且发生干涉,这两束光经过相干干涉后输出 E_1' 和 E_2' 。

利用琼斯矩阵来描述发生在全光纤结构中的过程,当超连续的入射光进入后经过3 dB耦合器($k=0.5$),忽略耦合器对光偏振状态的影响,可得到光场矢量:

$$E_3 = \sqrt{1/2} E_1, \quad (1)$$

$$E_4 = \sqrt{1/2} E_1. \quad (2)$$

这两个光场矢量分别沿着顺时针和逆时针方向传播,首先分析 E_3 的传播,可以得到下列结果:

$$E_3' = \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_2) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} E_3, \quad (3)$$

式中 $\varphi_1 = \pi L_1 \Delta n_1 / \lambda$, $\varphi_2 = \pi L_2 \Delta n_2 / \lambda$ 分别为光在HBF₁和HBF₂中传播产生的相位差。 L_1 和 L_2 分别为HBF₁和

HB F_2 的长度, Δn_1 和 Δn_2 分别为HB F_1 和HB F_2 的两个正交模式有效折射率的差, λ 为入射光的波长, 令:

$$\mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_2) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

则 \mathbf{E}'_3 可简写为

$$\mathbf{E}'_3 = \mathbf{M}_T \mathbf{E}_3, \quad (5)$$

\mathbf{E}_4 沿着逆时针传播时可得到如下结果:

$$\mathbf{E}'_4 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_2) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) \end{bmatrix} \mathbf{E}_4, \quad (6)$$

同样的, 令:

$$\mathbf{M}_R = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_1) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \exp(-j\varphi_2) & 0 \\ 0 & \exp(j\varphi_2) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

则 \mathbf{E}'_4 可简写为

$$\mathbf{E}'_4 = \mathbf{M}_R \mathbf{E}_4. \quad (8)$$

\mathbf{E}'_3 和 \mathbf{E}'_4 在耦合器相遇经过再次耦合, 分别从3 dB耦合器中输出, 得到 \mathbf{E}'_1 和 \mathbf{E}'_2 , 可表示为

$$\mathbf{E}'_1 = \sqrt{1/2} \mathbf{E}'_4 + j\sqrt{1/2} \mathbf{E}'_3, \quad (9)$$

$$\mathbf{E}'_2 = j\sqrt{1/2} \mathbf{E}'_4 + \sqrt{1/2} \mathbf{E}'_3. \quad (10)$$

将(9)式和(10)式分别代入(5)式和(8)式, 然后再代入(1)式和(2)式, 可得:

$$\mathbf{E}'_1 = \frac{1}{2} j \mathbf{E}_1 (\mathbf{M}_T + \mathbf{M}_R), \quad (11)$$

$$\mathbf{E}'_2 = \frac{1}{2} j \mathbf{E}_2 (\mathbf{M}_T - \mathbf{M}_R). \quad (12)$$

由此可以得到两段椭圆光纤 Sagnac 环形腔的反射率 R 和透射率 T 如下:

$$R = 1 - [\cos(\varphi_1 + \varphi_2) \cos \theta_2 \sin \theta_1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \sin \theta_2 \cos \theta_1]^2, \quad (13)$$

$$T = [\cos(\varphi_1 + \varphi_2) \cos \theta_2 \sin \theta_1 + \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \sin \theta_2 \cos \theta_1]^2. \quad (14)$$

通过(13)式和(14)式可以看出两段椭圆高双折射光纤 Sagnac 环形腔的反射率和透射率是关于波长 λ 的函数, 且入射光的偏振态并不影响其反射率和透射率。值得注意的是, 在公式中HB F_1 和HB F_2 之间的普通单模光纤长度并不影响透射光谱, 由于海水温度测量所要求的空间范围比较大, 所以这个特性在两点海水温度实际测量上非常重要。

由于该 Sagnac 环形腔中有两段椭圆高双折射光纤, 所以它的反射率和透射率是由 φ_1 和 φ_2 共同决定的。其中 φ_1 和 φ_2 的变化取决于 Δn_1 和 Δn_2 , 外界温度的变化在物理上引起椭圆高双折射光纤纤芯的形变以及长度的改变。这种变化引起椭圆高双折射光纤快慢轴有效折射率数值的变化, 使得 Sagnac 环形腔内的有效折射率差 Δn_1 和 Δn_2 发生改变, 进而使透射光谱产生移动。通过观测光谱的移动量便可计算出温度的变化, 达到测温的目的。

3 海水两点温度同时测量的光谱特征的数值模拟

利用第2节推导出的透射光的方程即(14)式, 利用 Matlab 对其进行仿真, 分析公式中各个参数对输出光谱的影响, 并通过对光谱的分析验证实验的可行性。

3.1 不同长度比例的椭圆光纤对输出光谱谱型的影响

当温度为 15 °C 时, $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 1.904 \times 10^{-4}$ (该参数取自加拿大 IVG 公司的 PME1300-10 型椭圆高双折射光纤), 令 $\theta_1 = \pi/6$, $\theta_2 = \pi/3$ 。首先, 分别设 $L_1 = 10$ cm, L_2 分别为 15, 20, 30, 40 cm, 得到的光谱如图 2~5 所示。

对图 2 和图 3 的模拟输出的光谱进行比较, 可以看出, 图 3 的光谱测量两点温度变化相比图 2 的光谱是更理想的。构建本模型的目的是同时测海水表面两点的温度, 从图 2 所示的光谱可以看到, 图中在一个周期内有不同的三种峰, 而图 3 中正好是有两种不同的峰, 所以图 3 的光谱更适合同时测量两点的海水温度。因此, 在确定两段椭圆光纤的长度时, 应该保证两段椭圆光纤呈整数倍关系。下面再讨论 L_1 与 L_2 之间更为合适的倍数关系。

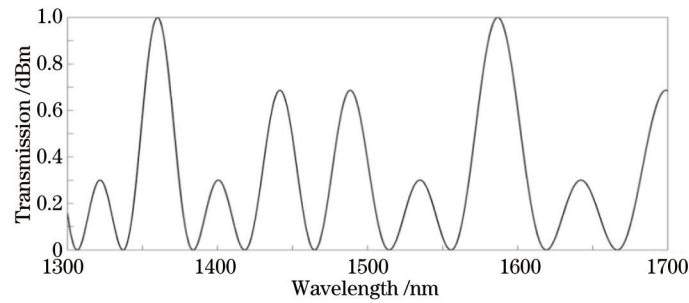
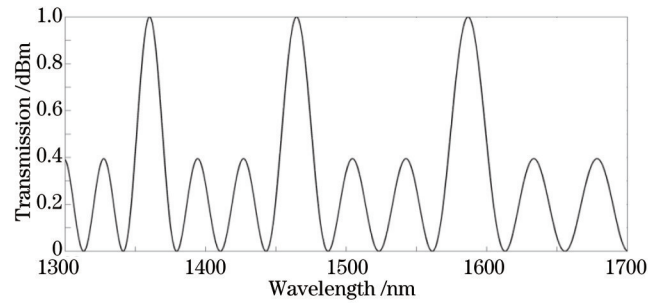
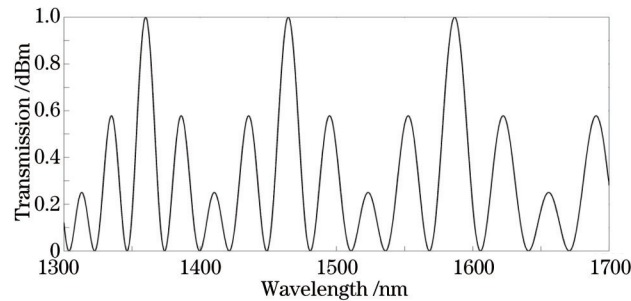
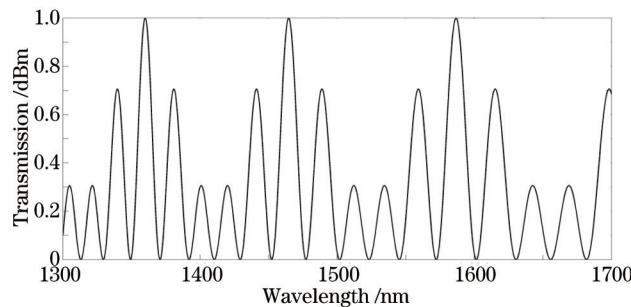
图2 $L_1=10$ cm, $L_2=15$ cm时的模拟光谱Fig.2 Simulated spectra with $L_1=10$ cm and $L_2=15$ cm图3 $L_1=10$ cm, $L_2=20$ cm时的模拟光谱Fig.3 Simulated spectra with $L_1=10$ cm and $L_2=20$ cm图4 $L_1=10$ cm, $L_2=30$ cm时的模拟光谱Fig.4 Simulated spectra with $L_1=10$ cm and $L_2=30$ cm图5 $L_1=10$ cm, $L_2=40$ cm时的模拟光谱Fig.5 Simulated spectra with $L_1=10$ cm and $L_2=40$ cm

图3是 L_1 与 L_2 为两倍关系时的光谱图。比较图3、图4和图5发现,图4光谱图中在一个周期内有三个不同的峰,图5中同样有三个不同的峰,峰值多会带来两点温度变化的复杂性,不宜区分不同点的温度变化。因此,可以确定两个不同椭圆光纤的长度之间最好是2倍的关系。通过分析图2~5可以看出,随着椭圆高双折射光纤总长度的增加,两个相邻光谱峰的间距自由光谱范围(R_{fs})是减小的, R_{fs} 的减小会使温度的测量范围减小。实际应用中,在椭圆高双折射光纤长度比例固定为2倍关系后,具体长度应该根据实际温度测量范围选择。椭圆高双折射光纤总体长度越大,温度测量的灵敏度越高,但是温度的测量范围会变小。相反的,当椭圆高双折射光纤总体长度越小,测温范围会变大,代价是温度灵敏度下降。

3.2 偏振控制器对输出光谱的影响

已知 $15\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\Delta n_1 = \Delta n_2 = 1.904 \times 10^{-4}$, 令 $L_1 = 10\text{ cm}$, $L_2 = 20\text{ cm}$, 为了方便研究, 取 $\theta_2 = \pi/3$ 不变, 分别取 $\theta_1 = \pi/6$, $\theta_1 = \pi/3$, $\theta_1 = \pi/2$ 时, 得到仿真图如图 6 所示。

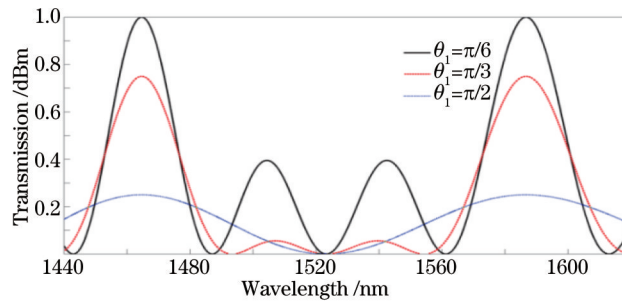


图 6 θ_1 分别为 $\pi/6$ 、 $\pi/3$ 和 $\pi/2$ 的模拟光谱

Fig.6 Simulated spectra when θ_1 are $\pi/6$, $\pi/3$ and $\pi/2$, respectively

从图 6 中我们可以看到在 $\theta_1 = \pi/2$ 时光谱的两个小峰湮灭了, 不能满足对两点温度变化的需求。而在 $\theta_1 = \pi/6$ 和 $\theta_1 = \pi/3$ 时, 输出的透射光谱都是呈现一个大峰、两个小峰的周期性变化, 满足实验的需求。因为是两段不同长度的椭圆光纤接在 Sagnac 环中的, 所以, 光谱在一个周期内必须要保证有两个不同的峰。同时, 通过对光谱的分析可以得到, 在 $\theta_1 = \pi/6$, $\theta_1 = \pi/3$ 时的光谱的峰的深度更为理想。

3.3 温度变化对输出光谱的影响

3.3.1 Δn_1 对输出光谱的影响

已知 $L_1 = 10\text{ cm}$, $L_2 = 20\text{ cm}$, 令 $\theta_1 = \pi/6$, $\theta_2 = \pi/3$, $\Delta n_2 = 1.913 \times 10^{-4}$ ($0\text{ }^\circ\text{C}$), Δn_1 分别取 1.913×10^{-4} ($0\text{ }^\circ\text{C}$), 1.907×10^{-4} ($10\text{ }^\circ\text{C}$), 1.901×10^{-4} ($20\text{ }^\circ\text{C}$), 1.895×10^{-4} ($30\text{ }^\circ\text{C}$)。所用的温度范围, 即 $0\text{ }^\circ\text{C} \sim 30\text{ }^\circ\text{C}$ 为常用的海水温度范围。通过模拟计算可得如图 7 所示的光谱。

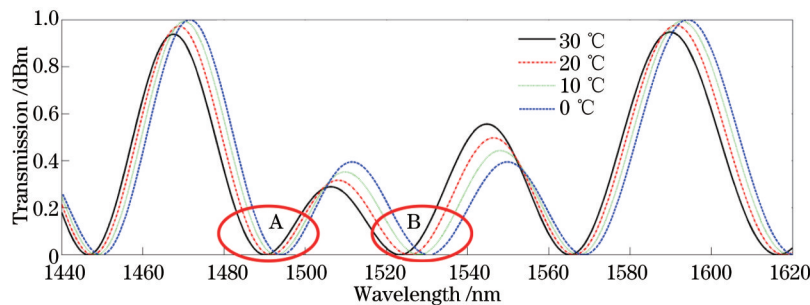


图 7 L_1 分别处于 $0\text{ }^\circ\text{C}$, $10\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$, $30\text{ }^\circ\text{C}$, 而 L_2 的温度保持为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ 时的模拟光谱

Fig.7 Simulated spectra when L_1 is under $0\text{ }^\circ\text{C}$, $10\text{ }^\circ\text{C}$, $20\text{ }^\circ\text{C}$, $30\text{ }^\circ\text{C}$ and L_2 is under $0\text{ }^\circ\text{C}$, respectively

观察如图 7 所示的光谱图, 可以看到随着 Δn_1 值的逐渐减小 (温度逐渐增加), 光谱的 A 和 B 峰 (波谷) 会有向左的移动量。但是, 在 A 峰的移动量要明显小于 B 峰的移动量。由此可以确定, 虽然当 Δn_1 改变时会对整个光谱都有影响, 但不同位置的峰的影响程度不同。 L_1 温度变化时, A 峰的温度灵敏度为 $0.131\text{ nm}/^\circ\text{C}$, 而 B 峰的温度灵敏为 $0.235\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

3.3.2 Δn_2 对输出光谱的影响

令 $L_1 = 10\text{ cm}$, $L_2 = 20\text{ cm}$, 令 $\theta_1 = \pi/6$, $\theta_2 = \pi/3$, $\Delta n_1 = 1.913 \times 10^{-4}$ ($0\text{ }^\circ\text{C}$), Δn_2 分别取 1.913×10^{-4} ($0\text{ }^\circ\text{C}$), 1.907×10^{-4} ($10\text{ }^\circ\text{C}$), 1.901×10^{-4} ($20\text{ }^\circ\text{C}$), 1.895×10^{-4} ($30\text{ }^\circ\text{C}$), 通过计算机仿真可以得到如图 8 所示的光谱。

观察如图 8 所示的光谱, 图 8 的光谱变化与图 7 的光谱变化有着同样的规律, 即随着温度的增加光谱都有向短波方向的偏移, 有所不同的是: 当 L_2 温度变化时, A 峰随温度变化要明显大于 B 峰。 L_2 温度变化时, A 峰的温度灵敏度为 $0.360\text{ nm}/^\circ\text{C}$, 而 B 峰的温度灵敏为 $0.243\text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。

3.4 结构优化设计

利用数值模拟得到椭圆高双折射光纤 Sagnac 环形腔各个结构参数对透射光谱的影响。计算结果表明, 两段测温所需要的椭圆高双折射光纤的长度比为 $1:2$, 并且 $\theta_1 = \pi/6$, $\theta_2 = \pi/3$ 时, 输出光谱的谱型更利于测量两点温度的变化。当两段椭圆高双折射光纤 HBF_1 (10 cm) 和 HBF_2 (20 cm) 的温度分别变化时, 反映到光

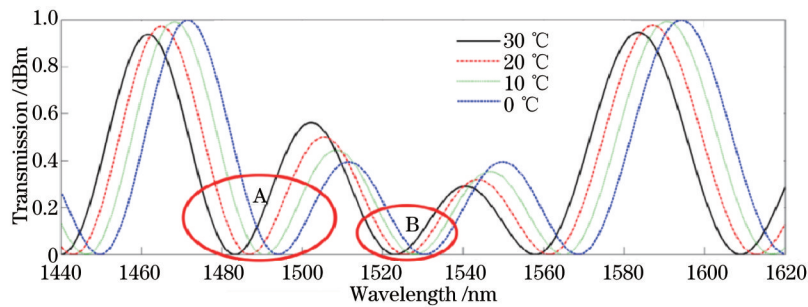


图8 L_2 分别处于0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C, 而 L_1 的温度保持为0 °C时的模拟光谱

Fig.8 Simulated spectra when L_2 is under 0 °C, 10 °C, 20 °C, 30 °C and L_1 is under 0 °C, respectively

谱A峰和B峰的响应是不同的。当 HBF_2 的温度恒定在0 °C, HBF_1 的温度从0 °C到30 °C时, A峰的光谱移动量明显小于B峰, A峰的温度灵敏度为0.131 nm/°C, 而B峰的温度灵敏为0.235 nm/°C; 而当 HBF_1 的温度恒定在0 °C, HBF_2 的温度从0 °C到30 °C时, B峰的光谱移动量明显小于A峰, A峰的温度灵敏度为0.360 nm/°C, 而B峰的温度灵敏度为0.243 nm/°C。可以看出, 当温度变化时, HBF_2 对A峰和B峰的影响均大于 HBF_1 , 这是由于长度较大的 HBF 的温度变化所引起的光程差变化较大引起的, 使得在相同的温度变化下, 光谱移动的距离更大, 即得到了更高的灵敏度。数值模拟也验证了当长度比相同时, 由于不同长度 HBF 温度变化对光谱A峰以及B峰的影响, 可以得到矩阵方程:

$$\begin{bmatrix} \Delta\lambda_A \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.131 & 0.36 \\ 0.235 & 0.243 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 ΔT_1 和 ΔT_2 为 HBF_1 和 HBF_2 的温度变化, $\Delta\lambda_A$ 和 $\Delta\lambda_B$ 为A峰和B峰的移动(波长变化均取向短波方向为正值, 温度增加时取 ΔT 为正值)。

进行变换可得

$$\begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.131 & 0.36 \\ 0.235 & 0.243 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta\lambda_A \\ \Delta\lambda_B \end{bmatrix}. \quad (16)$$

如果通过测量得到A、B峰的光谱移动值, 可以通过计算得到计算 HBF_1 和 HBF_2 处的温度变化。所以该模型如果在实验室中组建, 可以用来同时测量两点的温度变化且具有较高的温度灵敏度。

通过上面的模型可以看出该Sagnac环形腔结构在测量两点温度的变化时具有较好的复用性。实际上, 通过在Sagnac环形腔上增加不同长度段的椭圆高双折射光纤后, 透射光谱的波形会进一步变化展开, 这样就可以将复用性扩展到多点。

4 结 论

通过对两段椭圆高双折射光纤Sagnac环形腔理论模型的建立及数值模拟, 证实了该结构在理论上可以实现同时测量两点海水温度。在此基础上, 通过数值模拟变换各个结构参数, 得到了该模型的最佳结构参数: 两段椭圆高双折射光纤的最佳长度比为1:2, 两个偏振控制器的偏转角应该分别为 $\pi/6$ 和 $\pi/3$, 且该结构具有较高的温度灵敏度, 最高达0.36 nm/°C。由此可以看出, 利用该模型进行具体实验, 可以通过测量实际光谱的移动情况, 计算出两点海水温度的变化情况。并且, 通过对结构参数的进一步调整, 可以使其对其他温度范围物质温度进行测量。该模型具有结构简单稳固、灵敏度高、价格低和抗干扰能力强的特点, 也为同时测量多点海水温度奠定了理论基础。

参 考 文 献

- 1 Kyung Jae Lee, Jonggeun Choe. Numerical modeling of the effect of seawater and circulation rates for seafloor mudline temperature[J]. Geosystem Engineering, 2011, 14(3): 153-156.
- 2 Mcclanahan T R, Ateweberhan M, Muhando C A, *et al.*. Effects of climate and seawater temperature variation on coral bleaching and mortality[J]. Ecological Monographs, 2007, 77(4): 503-525.
- 3 Yang H, Wang S, Wang X, *et al.*. Temperature sensing in seawater based on microfiber knot resonator[J]. Sensors, 2014, 14(10): 18515-18525.

- 4 Sun Guoxin, Zhou Kejiang. Virtual optical-fiber Sagnac interferometer and analog-digital mixed demodulation system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(1): 213-218.
孙国鑫, 周柯江. 虚拟光纤 Sagnac 干涉仪及其数模混合解调系统[J]. *光学学报*, 2009, 29(1): 213-218.
- 5 Shi Nuannuan, Gu Yiying, Hu Jingjing, *et al.*. Study of the tunable optical comb filter based on Sagnac interferometer loop[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0306001.
石暖暖, 谷一英, 胡晶晶, 等. 基于 Sagnac 环可调谐光梳状滤波器特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0306001.
- 6 Wang Jufeng, Zhuang Linling, Liu Shiwei, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor demodulation technology with high stability by using Sagnac loop filter[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0905004 .
王巨锋, 庄琳玲, 刘士伟, 等. 基于光纤 Sagnac 环滤波器的高稳定光纤布拉格光栅传感解调技术[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0905004.
- 7 Karima Chah, Nicolas Linze, Christophe Caucheteur, *et al.*. Temperature-insensitive polarimetric vibration sensor based on HiBi microstructured optical fiber[J]. *Appl Opt*, 2012, 51(25): 6130-6138.
- 8 Frazao O, Baptista J M, Santos J L, *et al.*. Temperature-independent strain sensor based on a Hi-Bi photonic crystal fiber loop mirror[J]. *IEEE Sens J*, 2007, 7(10): 1453-1455.
- 9 Wang X, Yang H J, Wang S S, *et al.*. Seawater temperature measurement based on a high-birefringence elliptic fiber Sagnac loop[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2015, 27(16): 1772-1775.
- 10 Frazao O, Baptista J M, Santos J L, *et al.*. Curvature sensor using a highly birefringent photonic crystal fiber with two asymmetric hole regions in a Sagnac interferometer[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(13): 2520-2523.
- 11 Han Ping, Xie Yongquan, Liu Yang. Research of all-fiber micro-vibration multiplexing sensors[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(3): 0305004.
韩屏, 谢涌泉, 刘阳. 分布式全光纤微振动传感器研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(3): 0305004.
- 12 Yang Yuanhong, Wang Huan, Yang Fuling, *et al.*. Polarization-maintaining photonic crystal fiber hydrogen sensor based on sagnac interferometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(8): 0806004.
杨远洪, 王欢, 杨福铃, 等. 基于 Sagnac 干涉仪的保偏光子晶体光纤氢气传感器[J]. *光学学报*, 2014, 34(8): 0806004.
- 13 Frazao O, Marques L M, Santos S, *et al.*. Simultaneous measurement for strain and temperature based on a long-period grating combined with a high-birefringence fiber loop mirror[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2006, 18(22): 2407-2409.
- 14 Li J, Xu K, Fu S, *et al.*. Photonic polarity-switchable ultra-wideband pulse generation using a tunable Sagnac interferometer comb filter[J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2008, 20(15): 1320-1322.
- 15 Feng Suchun, Xu Ou, Lu Shaohua, *et al.*. Multi-wavelength erbium-doped fiber laser using polarization-maintaining fiber Bragg gratings in symmetrical linear cavities[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(7): 1886-1889.
冯素春, 许鸥, 鲁韶华, 等. 基于保偏光纤光栅的对称腔多波长掺铒光纤激光器[J]. *中国激光*, 2009, 36(7): 1886-1889.
- 16 Shao Min, Qiao Xueguang, Fu Haiwei, *et al.*. Simultaneous measurement of temperature and refractive index based on LPFG and Sagnac loop[J]. *J Optoelectronics·Laser*, 2012, 23(8): 1442-1446.
邵敏, 乔学光, 傅海威, 等. 基于长周期光纤光栅和 Sagnac 环的温度与折射率的区分测量[J]. *光电子·激光*, 2012, 23(8): 1442-1446.

栏目编辑: 王晓球