基于功率取样的光纤光源平均波长控制技术

杨远洪 申 彤 赵冠成

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院,北京 100191)

摘 要:为提高宽谱光纤光源温度稳定性,对平均波长温度稳定性进行了分析;对不同泵浦功率下输出光的平均波长与输出功率的变化进行了仿真和实验研究,揭示了宽谱光纤光源平均波长与输出功率的相关性;提出并实现了一种基于数学模型的平均波长控制技术.从光源输出取出小部分功率作为反馈信号,通过调整泵浦激光器电流实现了中心波长的精确控制.对研制的样机进行了实际测试,结果表明控制方案是可行的,在-45~70 ℃的温度范围内,宽谱光纤光源的平均波长稳定性达到 0.3×10^{-6} ℃$^{-1}$.

关 键 词:宽谱光纤光源;温度模型;平均波长控制

中图分类号:O 43

文献标识码:A **文 章 编 号**:1001-5965(2009)03-0304-04

Broadband fiber source mean-wavelength control with optical power feedback

Yang Yuanhong Shen Tong Zhao Guancheng

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: To promote the broadband fiber source temperature stability, the mean-wavelength stability of broadband fiber source was analyzed and the dependence between the mean-wavelength and the output optical power was revealed based on the simulation and experiment study on the change of mean-wavelength and output power under different pump optical power. A mean-wavelength control scheme was proposed based on the dependent mathematical model among with mean-wavelength, feedback power and environmental temperature by temperature experiment. The mean-wavelength precision control was realized by taking small part power from fiber source output as feedback signal and adjusting the pump power by changing drive current. A prototype fiber source was made and tested. The result approves this scheme and 0.3×10^{-6} ℃$^{-1}$ mean-wavelength stability within -45~70 ℃ was achieved.

Key words: broadband fiber source; temperature model; mean-wavelength control

基于掺铒光纤(EDF,Er-doped Fiber)的放大自发辐射(ASE,Amplified Spontaneous Emission)的超荧光光纤光源(SFS,Superfluorescent Fiber Source)是一种相干长度短、单横模的宽带光源,具有较好的温度稳定性和宽的荧光谱宽,平均波长位于1 550 nm波段而且输出光功率大[1],成为光纤陀螺(FOG,Fiber Optic Gyroscope)、光学相干层析(OCT,Optical Coherence Tomography)和偏光干涉型光纤温度传感器等光纤传感系统的首选光源[2-3].但是,由于EDF的荧光光谱的平均波长温度稳定性一般为 1×10^{-5} ℃$^{-1}$ 量级,面对一些特殊的应用,如高精度光纤陀螺(需要优于 1×10^{-6} ℃$^{-1}$ 的平均波长稳定性)的要求,还需要采取特殊的措施,进一步提高其平均波长温度稳定性.

目前,改善SFS的平均波长稳定性的措施大都集中在光路上,如通过仿真和实验获取优化结构和优化参数[4]、通过光栅补偿[5]、采用波长相关

收稿日期:2008-03-14

作者简介:杨远洪(1969-),男,湖北武汉人,教授,yhyang@263.net.cn.

反射技术[6]等.通过光路优化和补偿技术可提高宽谱光纤光源的平均波长温度稳定性,但在宽的温度范围(如 $-45\sim70$ ℃),都没能突破 1×10^{-6} ℃$^{-1}$的水平.

数字信号处理技术在参数控制方面具有较大的优势,本文对一种直接取样反馈控制的 SFS 进行了细致的全温实验研究,发现了输出光平均波长与取样探测器输出间具有确定的关系,在此基础上,利用基于模型的数字控制技术,提出了一种新的平均波长控制技术,提高了 SFS 平均波长的全温稳定性.

1　SFS 平均波长稳定性分析

图 1 为一种波长选择反射型双程超荧光光纤光源 DP-SFS(Double Pass-SFS)的基本结构.

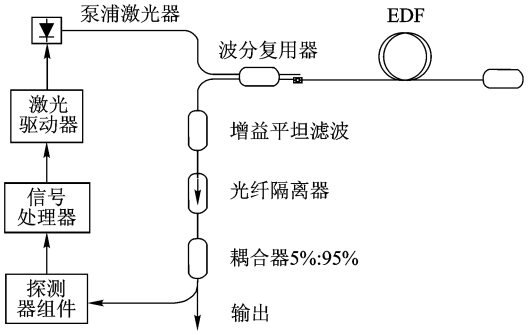

图 1　波长选择反射型 SFS 结构

由半导体泵浦激光器发出的 980 nm 激光通过波分复用器进入 EDF 激发出 1 550 nm 波段的荧光,沿 EDF 向前后传输.后向传输光直接进入波分复用器,前向传输光经反射器反射再次经过 EDF 进入波分复用器,合光经滤波器和隔离器输出.将输出光的光谱按波长均分为 n 等份,可得到输出光平均波长与各细分光谱分量的关系:

$$\bar{\lambda}=\frac{\sum_{}^{n}\lambda_i P_i}{\frac{1}{P_{\text{tot}}}} \tag{1}$$

式中,$\bar{\lambda}$ 为宽谱光平均波长;P_i 和 λ_i 为第 i 个光谱细分波段对应的功率和波长;P_{tot} 为总功率;n 为整数.式(1)表明,输出光的平均波长为输出光谱中各光谱分量波长相对其强度的加权平均,各光谱分量的强度直接影响平均波长的值.在实际工作条件下,环境温度变化是引起平均波长变化的主要原因,一般用单位温度变化时平均波长的相对变化来描述 SFS 的温度稳定性.采用高分辨率的光谱仪测量 SFS 的平均波长在设定温度点的平均波长,再通过下式可计算出 SFS 的温度稳定性:

$$\eta=\frac{\lambda_{\max}-\lambda_{\min}}{\lambda_{\text{mean}}\cdot\Delta T} \tag{2}$$

式中,$\lambda_{\max}$,$\lambda_{\min}$ 和 λ_{mean} 分别表示设定温度点的平均波长的最大值、最小值和所有测试温度点平均波长的平均值;ΔT 为测量温度范围.

图 1 中,SFS 由泵浦激光器、波分复用器、隔离器、滤波器等组成,其中任何一个环节发生变化都会引起其整体输出性能的变化,综合这些影响,引起输出光中心波长变化的主要因素可用式(3)描述:

$$\Delta\bar{\lambda}=\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial T_{\text{Er}}}\Delta T_{\text{Er}}+\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial P_{\text{P}}}\Delta P_{\text{P}}+\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial\lambda_{\text{P}}}\Delta\lambda_{\text{P}}+\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial P_{\text{FB}}}\Delta P_{\text{FB}}+\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial\lambda_{\text{F}}}\Delta\bar{\lambda}_{\text{F}} \tag{3}$$

式中,T_{Er}为 EDF 温度;P_{P} 为泵浦光功率;λ_{P} 为泵浦光波长;P_{FB}为反射光功率;$\bar{\lambda}_{\text{F}}$ 为滤波器的波长参数.式(3)中各项分别表示由 EDF 固有的温度特性、泵浦光功率、泵浦光波长、反馈光和滤波器光谱等因素的变化引起的平均波长变化,而且环境温度变化是引起这些参数变化的主要原因.对图 1 所示的 DP-SFS,由于采用布拉格光栅稳定了泵浦激光器光频率,加入隔离器保证了信号的单向传输,实验表明采用的薄膜光谱滤波器在全温下其透射光谱几乎没有变化,具有很好的温度稳定性,因此式(3)中等号右侧第 3、第 5 项的影响可以忽略,所以式(3)可重写为

$$\Delta\bar{\lambda}=\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial T_{\text{Er}}}\Delta T_{\text{Er}}+\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial P_{\text{P}}}\Delta P_{\text{P}}+\frac{\partial\bar{\lambda}}{\partial P_{\text{FB}}}\Delta P_{\text{FB}} \tag{4}$$

在 DP-SFS 结构中,F_{FB}为反射器反射回 EDF 光纤的前向荧光,一般随泵浦功率的增加而增大.由式(3)可看出,EDF 的固有温度特性导致的光谱的变化和泵浦光功率引起的光谱变化是这种 DP-SFS 的输出光平均波长变化的主要原因.前者由采用的 EDF 决定,一旦选定,其温度特性所引起的波长变化(式(4)中等号右侧第 1 项)就已确定,不可改变.式(1)和式(3)都表明,通过调整泵浦光功率,可以改变输出光的平均波长.因此,通过调整泵浦光功率,可以补偿由 EDF 固有温度特性导致的光谱的变化,进而实现 SFS 的平均波长的精确控制.

2　仿真及实验研究

依据图 1 所示结构,研制出 DP-SFS 原理样机,其输出谱如图 2 所示,为平坦的宽谱.为了研究 SFS 平均波长与泵浦光功率的关系,利用 Optiwave 公司的仿真软件对不同泵浦功率下 SFS

的输出光平均波长和功率进行了仿真. 图1所示光源结构通过光谱匹配的方式保证输出光光谱的平坦度,因此在保证光谱平坦的情况下,泵浦光功率只能在一定范围内变化,以保证最佳匹配,图3给出了仿真结果,泵浦光功率范围为50～100 mW. 同时设计了相应的实验系统对不同泵浦功率下SFS的输出光平均波长和功率进行了实际测试. 实验系统通过一个单模宽带耦合器将SFS的输出光分为2部分,分别由功率计测量功率,由光谱分析仪测量光谱. 实验测量结果如图4所示.

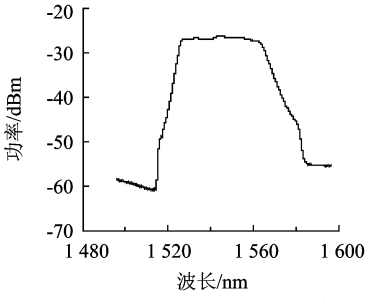

图2 DP-SFS输出光谱

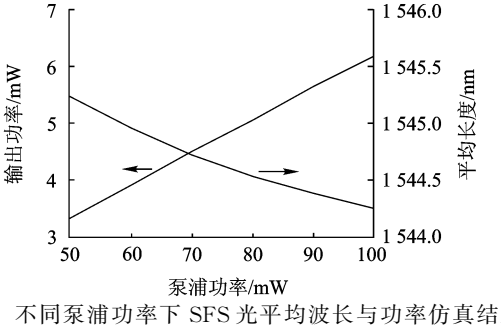

图3 不同泵浦功率下SFS光平均波长与功率仿真结果

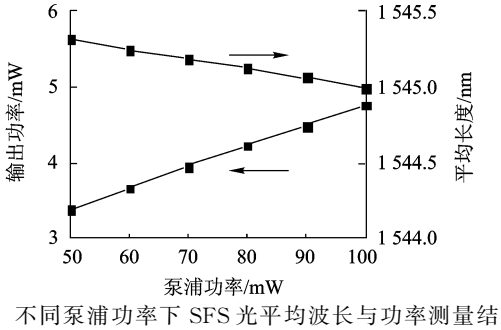

图4 不同泵浦功率下SFS光平均波长与功率测量结果

比较图3和图4,可发现仿真结果与实测结果的变化趋势是一致的. 图3和图4曲线表明,在设定的参数范围内,输出光平均波长和功率都与泵浦光功率成确定的单调关系. 图4所示的实验曲线还表明实际的SFS的平均波长和输出功率随泵浦功率的变化率比仿真曲线小,但整体的变化规律是一致的. 由于仿真过程中未考虑温度影响,实验也是在实验室条件下进行的,泵浦光功率是引起平均波长变化的唯一原因. 参考式(3)可知,设计的SFS的平均波长随泵浦光功率的增加而减小,而输出功率则相反. 这个结果显示 $\partial\bar{\lambda}/\partial P_P$ 为负系数,而且在这种情况下,式(3)中右侧第2项,即泵浦功率的变化是影响光源平均波长的主要因素.

3 SFS平均波长控制方案

图4所示曲线表明,泵浦光功率与SFS平均波长和输出功率均成线性关系,表明平均波长与输出功率也成确定的线性关系. 基于这个规律,以输出功率的变化信息作为反馈信号,通过改变泵浦光功率,可以实现SFS平均波长的控制. 如图1所示,在SFS的输出端接入分光比为5%∶95%的耦合器,其中5%的光作为取样光反馈信号接入探测器组件,95%的光作为光源输出光. 由于在实际的温度变化环境下,有很多因素会导致输出光功率的变化,取样耦合器和探测器本身的温度特性也会引起反馈信号的变化,因此采用简单的线性控制技术不能实现SFS输出功率的精确控制. 因此,需要得出探测器输出的温度模型,进而引入了基于模型的非线性数字控制技术,其基本过程为:通过实验建立输出功率、平均波长与环境温度的数学模型,再以采集到的环境温度信息和取样光功率信息确定泵浦光源驱动电流,改变泵浦光功率抑制平均波长的变化.

图5为信号采集与控制系统的结构图,由微处理器MPU(Micro-processing Unit)、多路A/D转换器、D/A转换器、比较电路、探测器组件、温度传感器、数字驱动电路组成. D/A、探测器组件、比较器、MPU和驱动器组成闭环控制回路,温度传感器探测的温度值用于修正不同温度下的数学模型的参数.

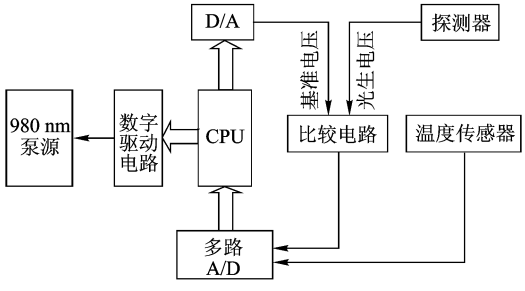

图5 信号采集及控制系统结构框图

4 SFS平均波长控制实验研究

根据图1所示SFS光路结构和图5所示的控制系统方案,制作了SFS实验样机并进行了平均波长控制实验研究和验证,在样机中集成安装

了图 1 和图 2 所示的所有器件和电路,以保证实验样机与下一步需要研制的工程样机状况一致.实验系统如图 6 所示,实验时,双程后向 SFS 被安装在温控箱中,输出光经过耦合器分光,由功率计和宽谱仪测量功率和平均波长.温度箱内温度由高精度数字温度计测量,功率、平均波长和温度均通过 GPIB(General Purpose Interface Bus)口,由计算机记录.具体的实验过程如下:

1) 在 MPU 中装入开环测试程序,进行第 1 次温度实验,在 -45～ 70 ℃温度范围内测试 SFS 的平均波长和输出功率随环境温度的变化情况;

2) 以测得的数据为样本,辨识出数字模型的参数并将得到的参数集成到闭环控制程序中,装入样机的 MPU 中;

3) 进行第 2 次温度实验,测量 SFS 的输出功率和平均波长;

4) 在平均波长变化偏大的情况下,重复1)～3)步的实验.

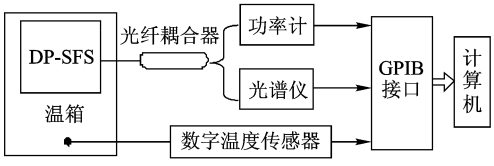

图 6　SFS 平均波长控制实验系统框图

由于本单位的 SFS 制作工艺较为成熟,实际的实验基本是一次完成.图 7 为采用平均波长控制技术前后 SFS 的平均波长的稳定性测量结果.没有控制的情况,平均波长温度变化为 4.44×10^{-6} ℃$^{-1}$;加入控制后的平均波长稳定性为 -0.293×10^{-6} ℃$^{-1}$,平均波长的稳定性提高了一个多数量级.

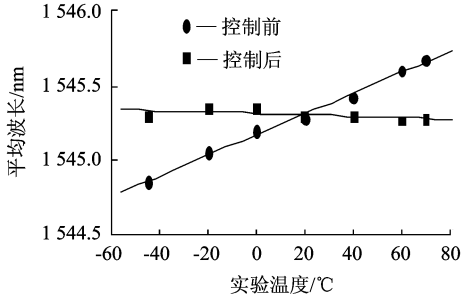

图 7　控制前后平均波长稳定性

由于输出功率与平均波长的温度变化不一致,本文在进行平均波长控制技术研究时,没有考虑输出光功率的变化,实际上,采用电控的小型可变衰减器,可以方便的实现输出功率的独立控制而不影响平均波长.

5　结 束 语

在综合分析一种双程后向 SFS 的输出功率、平均波长随泵浦光功率变化规律的情况下,揭示了平均波长与输出功率的必然联系.在此基础上,提出并实现了平均波长的高精度控制方案.分析、仿真和实验研究表明,在不明显增加光路实现难度的情况下,采用非线性的数字控制技术,可实现 SFS 平均波长的高精度控制.实验研究结果表明,采用这种控制技术后,大大提高了 SFS 的平均波长稳定性,在相当宽的温度范围(-45～70 ℃)内 SFS 的平均波长稳定性达到了 0.3×10^{-6} ℃$^{-1}$.

参考文献 (References)

[1] Herve Lefevre. The fiber-optic gyroscope[M]. London: Artech House, 1993

[2] Yang Yuanhong. Temperature sensor based on PNR in Sagnac interferometer[J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(5): 259－261

[3] 杨远洪,王峥,伊小素,等.基于掺铒超荧光光纤光源的高精度光纤陀螺[J].北京航空航天大学学报,2005,31(11):1159－1162
Yang Yuanhong, Wang Zheng, Yi Xiaosu, et al. High precision fiber optic gyroscope based on Er-doped superfluorescent fiber source[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(11): 1159－1162(in Chinese)

[4] Wysocki P F, Digonnet M J F, Kim B Y, et al. Broadband fiber sources for gyros[C]//Shaoul Ezekiel. Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA: SPIE, 1992, 1585: 371－382

[5] Patrick H J, Kersey A D, Burns W K, et al. Erbium-doped superfluorescent fiber source with long period fiber grating wavelength stabilization[J]. Electronics Letters, 1997, 33(24): 2061－2063

[6] Guillaumond D, Meunier J P. Novel method of gain flattening of an Erbium superfluorescent fiber source for fiber-optic gyroscope applications[C]//Mignani A G. Proceeding of SPIE—The International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA: Society of Photo-Optial Instrumentation Engineers, 2000, 4185: 532－535

(责任编辑:文丽芳)