光纤 Sagnac 温度传感器信号检测技术

杨远洪 沈 铭

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用光纤 Sagnac 干涉仪的偏振非互易性 PNR(Polarization Norr Reciprocity)可以实现对单温度点的高精度测量. 传感头周围温度场的变化引起干涉仪光路中两相干光的相位差变化. 通过分析温度传感器的测温原理, 得到其输出的线性化模型. 采用方波调制解调技术实现了对温度传感器光路系统输出的全数字信号检测. 设计了以 C8051F060 混合信号微控制器为核心的全数字信号检测系统, 实现其采样信号和调制信号的相位关系保持. 16 位高精度模/数转换器的电压采样值通过数字滤波及分段函数解算处理, 得到测量温度值的数字输出. 这种技术具有实现方便, 便于数字化处理及时序控制等优点. 通过 -15~55℃的全温扫描实验得到的实验数据和理论曲线近乎重合, 系统输入/输出成很好的线性关系, 线性度达到了 10^{-3} 量级. 实验研究表明这种温度传感器可以实现高精度的温度测量.

关 键 词: 温度传感器; 数字信号检测; 线性化

中图分类号: TP 212.11

文献标识码: A 文 章 编 号: 1001-5965(2006)03-0316-04

Signal detecting technique for Sagnac fiber-optic temperature sensor

Yang Yuanhong Shen Ming

(School of Instrument Science and Optoelectronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A temperature sensor based on polarization norr reciprocity (PNR) in fiber-optic Sagnac interferometer (FSI) can measure the temperature of one point in high precision. The phasic subtraction of two light beams was shifted while temperature field around the probe changed. Analyzing the temperature measuring theory of Sagnac fiber optic temperature sensor, a linear output model was established. The all digital signal detection was based on square-wave modulation and demodulation. An all digital signal detecting system using C8051F060 as its core was completed. It can maintain the phase relation of sampling signal and modulating signal. Sampling signal achieved by 16-bit A/D converter was computed in digital method to get the output of measuring temperature. This technique has the advantages of convenient realization and digital operation. The experimental data achieved by temperature experiments agree with theory well. The input and output of system achieve a linearity of 10^{-3}. Discussion shows that this kind of temperature sensor can reach high precision.

Key words: temperature sensor; digital signal detection; linearization

在众多的传感器中, 温度传感器占有重要的地位, 已形成一个很大的产业, 全球每年直接或间接的产值可达几十亿美元. 光纤温度传感器采用的原理、结构、式样最多, 其潜在的优点是测量精度高、抗电磁干扰、安全防爆、可绕性好, 因此它一直是温度传感器领域中研究最为活跃的领域, 与传统温度传感器相比具有绝对的竞争力. 光纤 Sagnac 干涉仪的偏振非互易对环境温度较敏感, 这一特性已在对光纤陀螺的温度稳定性研究时发现, 实验也证明可以利用这一现象实现温度的高精度测量[1].

本文提出的光纤 Sagnac 温度传感器除了具

收稿日期: 2005-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60207002)

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

有一般光纤传感器的优点, 并且能达到更高的测量精度, 将会为一些需要精确温度测量控制的场合提供高精度的温度测量方法.

1　测量原理及检测方案分析

通过光纤陀螺实验可知, 光纤陀螺的输出对温度很敏感, 温度不同, 探测器接收到的光强也不同. 这是由保偏光纤的双折射和偏振模式耦合引起的, 称为偏振非互易[1]. 随着温度的变化, 光路中两相干光的位相差发生变化, 可以利用这个原理实现温度的传感.

基于光纤 Sagnac 干涉仪中偏振非互易效应对温度的敏感性而设计的光纤 Sagnac 温度传感器是一种新型的高精度温度传感器, 能实现对单温度点的高精度测量. 光路结构主体为一 Sagnac 干涉仪[2], 如图 1 所示, 采用全保偏结构. 超辐射发光二极管 SLD 为其宽谱光源, 发出的光经过保偏光纤耦合器以及集成多功能光学器件 Y 波导 (集成了一个偏振器、一个耦合器和 2 个相位调制器) 分光, 分别从保偏光纤环的 2 个端点入射, 绕光纤环传输一周之后, 在 Y 波导的分光点处汇合, 发生干涉.

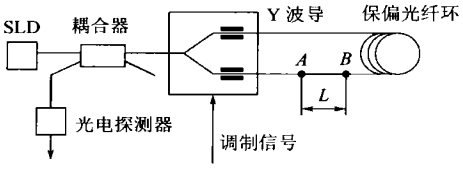


图 1　温度传感器光路结构图

回路方向耦合器把 2 束光的位相差信号转换成光功率的变化, 并最终照射到光电探测器. 图中 A 点和 B 点之间的一段保偏光纤是温度敏感头, 长度为 L, 其偏振主轴与相连的保偏光纤的偏振主轴在 2 个连接点处分别交叉成 45°.

依据参考文献[1]分析可知, 光电探测器输出的电压幅值与温度的变化关系为

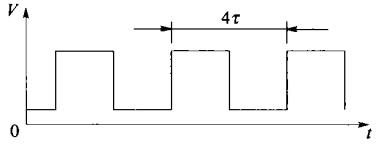
$$V = (a_1 T + a_2) \cdot \cos(a_3 T + a_4) + a_5 \qquad (1)$$

式中, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 为模型系数; T 为被测量的温度值. 在实际测量中, 由于 a_1 很小, 可以忽略. 因此实际的传感方程为

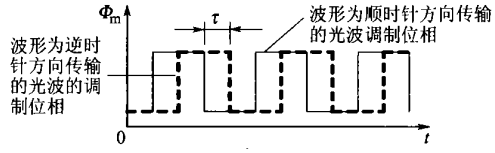
$$T = \left[\arccos\left(\frac{V - a_5}{a_2}\right) - a_4\right] \Big\backslash a_3 \qquad (2)$$

当传感头周围的温度场变化时, 检测 V 值, 根据式(2)解算就可得相应的温度变化.

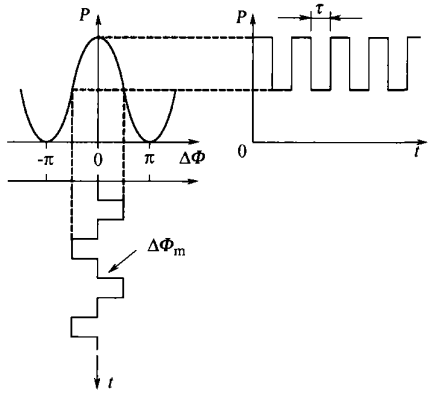
光纤 Sagnac 温度传感器采用方波调制解调的全数字信号检测方案. 调制信号如图 2a, 周期为 4τ(τ 为光纤延迟环的延迟时间). 在 Sagnac 干涉仪中产生调制位相 $\phi_m(t)$[2], 如图 2b. 此时相位差的调制为 $\Delta\phi_m(t)$, 如图 2c. 图 2d 表示探测器的输出波形 $V(t)$, 为倍频(周期为 2τ)的方波信号.



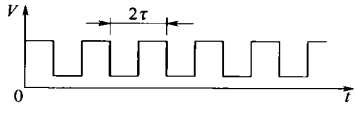
a　调制信号



b　调制相位



c　相位差



d　PIN 输出电压

图 2　信号检测方案主要波形

通过数字方法得到探测器输出波形 $V(t)$ 的幅值, 便可通过式(2)解算测得的温度值.

2　信号检测系统设计

2.1　系统硬件设计

温度传感器的信号检测系统以 Silabs 公司推出的 C8051F060 混合信号 ISP FALSH 微控制器[3]作为信号处理器. 它在一块芯片上集成了构成一个单片机数据采样或控制系统所需要的几乎所有模拟和数字外设及其他功能部件, 减少了外设芯片的数量, 简化电路板的设计, 降低成本, 并且片上集成的 16 位高速 AD 转换器可以满足系统精度要求所示. 信号检测系统结构如图 3 所示.

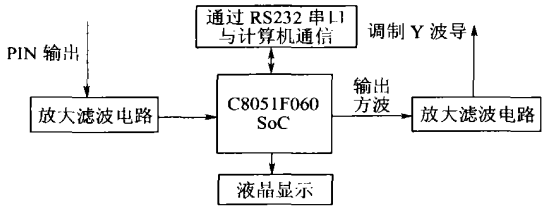


图 3 信号检测系统结构图

检测电路的主要作用有: ①光电探测器(PIN)输出的方波信号经过放大、滤波处理之后, 对其进行 A/D 采样; ②对 A/D 采样值进行数字滤波及线性化处理, 解算成温度值; ③输出方波信号调制 Y 波导; ④通过串行口与计算机通信; ⑤将解算出的温度值送入 LCD 液晶显示器.

2.1.1 调制解调及采样方案设计

经测量, 光纤延迟环的延迟时间为 2.505 μs, 因此所需调制信号的频率为 1/4τ, 即为 99.8 kHz. 本文设置方波频率为 100 kHz, 将使光电探测器的输出信号对温度变化的响应接近于最敏感. 当所加调制方波为 100 kHz 时, 光电探测器的输出电压信号为 200 kHz 的方波.

由 AD 转换器分别对经偏置、放大后的方波信号高低电平进行采样, 并保证采样信号和方波调制信号保持严格的相位关系. 此时 A/D 采样频率应为 400 kHz. 用高电平的采样值减去低电平的采样值, 经过若干个周期的累加和数字滤波后, 送出采样电压值 V, 噪声被有效地抑制. 同时, 通过高低电平相减, 解调出来的信号就不再有由于电路本身造成的偏置漂移分量了.

信号调制及采样的关键是保证采样信号和方波调制信号保持严格的相位关系.

用单片机的定时器 3 溢出启动 A/D 转换, 溢出频率为 400 kHz, 即 AD 转换器的采样频率为 400 kHz. 配置定时器 3 的 T3 引脚输出方波, 由于定时器每次溢出时改变电平, T3 输出方波的频率为 200 kHz. 调制 Y 波导的方波信号由单片机的可编程计数阵列(PCA)产生. 设置 PCA 时基信号为 ECI 引脚上的负跳变, 工作方式为频率输出方式, 将 T3 接到 PCA 的 ECI 引脚, 可从 PCA 的 CEX0 引脚产生频率为 100 kHz 的方波调制 Y 波导.

A/D 采样信号和方波调制信号的产生都可由同一定时器控制, 实现了采样信号和方波调制信号的相位关系的保持. 调制解调及采样方案的时序见图 4.

2.1.2 通信及显示方案设计

C8051F060 通过 UART 串行口引脚与计算机

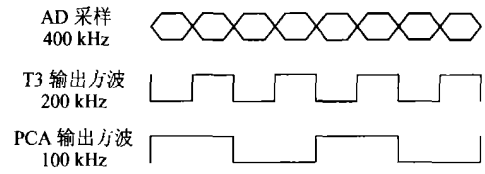


图 4 调制解调及采样方案时序

连接, UART 串行口设置为波特率可变的 10 位异步全双工通信接口方式. 选用 MAX232 芯片实现单片机串口的 TTL 电平信号和 RS-232 的串行通信信号的双向电平转换.

液晶显示器选用点阵字符型 LCD 液晶显示模块. 用 8 位接口的直接访问方式接口电路, 单片机通过 I/O 口与 LCD 连接. 对 LCD 读/写均用虚拟时序实现, 而不采用 MOVX 硬件指令产生时序, 所以 LCD 的 RS, R/W, E 引脚直接与单片机 I/O 相连, 使得硬件设计较为简单, 程序移植性加强.

2.2 系统软件设计

温度传感器信号检测系统的软件部分由单片机 C 语言编写, 通过 Silicon Laboratories IDE V2.2 开发环境编译, 由 JTAG 接口下载到单片机内.

针对具体要求, 软件设计由初始化模块、数字信号处理模块、UART 串行口通信模块、LCD 显示模块 4 部分组成.

2.2.1 初始化模块

初始化模块的功能主要是在系统上电开始运行时, 对系统进行一次复位操作. 初始化过程包括: ①振荡器初始化; ②I/O 端口和交叉开关初始化. C8051F 系列单片机采用开关网络以硬件方式实现 I/O 端口的灵活配置, 允许编程选择通用 I/O 端口和所需内部数字系统资源的组合. I/O 端口引脚分配见表 1; ③DAC 电压输出初始化; ④外部存储器接口初始化; ⑤UART 串行口初始化, 由定时器 1 产生 9 600 bit/s 的串口波特率; ⑥PCA 初始化; ⑦各定时器初始化; ⑧AD 转换器初始化, 配置为由定时器 3 溢出启动, 转换频率为 400 kHz; ⑨DMA 接口初始化.

表 1 I/O 端口引脚分配表

引脚	P0.0	P0.1	P0.2	P0.3	P0.4
分配	TX0	RX0	CEX0	ECI	T3

2.2.2 数字信号处理模块

数字信号处理模块分为数字滤波和线性化输出 2 部分. 数字滤波采用分段平均滤波算法, 连续取 N 个值进行采样, 再将 N 个采样值分为 M 组, 去掉每组数据中的最大值和最小值, 然后计算剩

余数据的平均值, 最后对 M 个平均值再取平均. 此种方法可以对具有随机干扰的信号进行滤波, 并且可以消除由于尖峰脉冲干扰引起的误差[4].

线性化输出的实现需要先通过实验得到一组 - 15~ 55 ℃的"温度 T- 电压 V"数据, 如图 5 所示, 可以看出测量数据曲线和理论曲线完全吻合. 这是一段单调区间, 通过改变温度敏感头的长度 L 可以改变单调区间的大小[1].

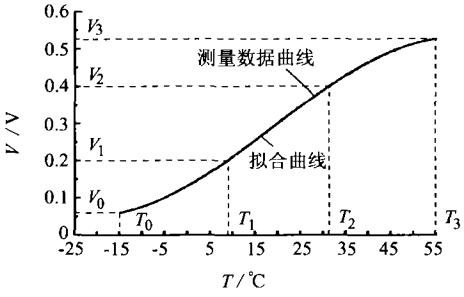


图 5　T- V 曲线图

用 Origin 软件根据式(1) 对实验数据作拟合曲线. 采用非线性最小平方拟合(NLSF) 的方法, 得出式(1) 中的系数值 a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 如表 2 所示. 将系数代入式(2) 即可得到实际传感方程.

表 **2**　拟合曲线系数值

参数	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
数值	0.00008	0.23962	0.03829	3.98642	0.29085

由于拟合曲线中间的一段近似于一直线, 为了加快线性化计算的速度, 采用分段函数法解算 V 所对应的 T. 将 V 分为 3 个区间[V_0, V_1], (V_1, V_2), [V_2, V_3].

对第 1 个区间[V_0, V_1] 和第 3 个区间[V_2, V_3], 用式(2) 计算对应温度值.

对第 2 个区间(V_1, V_2), 采用直线作为其拟合曲线, 方程为

$$V(T) = R_1 T + R_2 \qquad (3)$$

由 Origin 软件计算确定其系数 R_1 和 R_2, 这样可以很容易得到式(3) 的反函数 $T(V)$, 从而计算出对应温度值.

2.2.3　串行口通信模块和 LCD 显示模块

单片机通过串行口向计算机发送数据采用软件握手的方式. 当系统上电复位初始化之后, 查询 UART 控制寄存器的 RI0 位, 如果查询到 RI0 为 1, 表示接收到计算机发送的数据, 接着判断接收到的数据是否为指定的字符, 是则向计算机发送 16 位的数据, 否则进行一次空操作, 返回循环起点.

采用虚拟时序的编程方法通过 I/O 口对 LCD 进行读/写操作, 显示温度值, 分辨率为 0.01 ℃.

3　实验分析

按照上述原理和实验方案, 完成实验样机. 实验用 SLD 光源工作波长为 1 300 nm, 驱动电流为 120 mA. 为了验证整个系统的性能及指标, 进行了全温扫描实验.

将光纤传感头置于温箱内, 传感头附近的温度由高精度的铂电阻温度传感器测得. C8051F060 单片机对光电探测器的输出进行采样, 经过数字滤波及线性化处理, 向计算机输出测量值.

图 6 为系统在 - 15~ 55 ℃时, 系统输出温度随铂电阻温度测量值 T_b 的变化曲线. 输入/输出成很好的线性, 线性度为 0.00426.

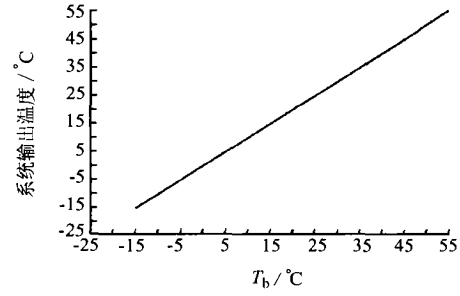


图 6　实验测量数据和拟合曲线

4　结　论

采用数字调制解调方案具有系统实现方便, 便于数字化处理及时序控制等特点. 设计了全数字信号检测系统, 通过一种定时器触发控制的技术, 实现了采样信号和调制信号的相位关系的保持. 完成单点高精度温度传感器的初步样机, 得到其数字式的线性化输出. 实验研究表明实验结果与理论曲线吻合得很好, 系统输入/输出成很好的线性关系.

参考文献 (**References**)

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

[2] Lefevre H. The fiber-optic gyroscope[M]. Boston, London: Artech House, 1993

[3] Silicon Laboratories. C8051F060/1/2/3 mixed-signal ISP flash MCU family [EB/OL]. http://www.xhl.com.cn/xhl/downfile/e C8051F06x.pdf, 2003-12-03

[4] 王幸之, 王　雷, 瞿　成, 等. 单片机应用系统抗干扰技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003
Wang Xingzhi, Wang Lei, Qu Cheng, *et al*. Anti-interference technique of MCU application system [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003(in Chinese)