

基于 DSP 的光纤电流传感器设计与分析

苏立国, 刘振宇, 董小鹏, 游佰强
(厦门大学 电子工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 在传统光纤电流传感基础上提出了一种新型基于 DSP(digital signal processor) 的光纤电流传感器设计方式, 并对其工作原理及特性进行了详细的分析和讨论。这种基于 DSP 的光纤电流传感器为高强电流的测量提供一种新的途径。

关键词: 数字信号处理; 电流传感器; 光纤

中图分类号: TP212; TN253

文献标识码: A

文献编号: 1000 - 9787(2001)09 - 0027 - 03

Analysis and design of optical fiber current sensor based on DSP

SU Li-guo, LIU Zhen-yu, DONG Xiao-peng, YOU Bai-qiang
(Dept. of Electronic Engin., Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: A novel optical fiber current sensor based on DSP is described. This technique is based on traditional optical fiber current sensor rationale. The working principles and features at this sensor are analyzed in details. It provides a new approach for large current measurement.

Key words: digital signal processor(DSP); current sensor; optical fiber

0 引言

光纤电流传感器(optical fiber current sensor)以其高绝缘性、抗高电磁噪声、高线性度响应等诸多优点, 在高电压强电流的测量领域中得到广泛的重视和研究。

传统光纤电流传感器的测量原理是根据 Faraday 效应, 由电流传感元件输出的线偏振光在通过一个 Wollaston 棱镜之后, 分成两束偏振态互相正交的线偏振光。这两束光的强度被分别检测出来。随后相应的输出信号被送到一个模拟电路作如下处理^[1]

$$S = (I_1 - I_2) / (I_1 + I_2), \quad (1)$$

式中 I_1 和 I_2 分别是两束偏振光的强度。当将 Wollaston 棱镜的偏振方向与起偏器的偏振方向之间预置一个 45° 的偏置角时, 式(1) 成为

$$S = \sin 2 F,$$

式中 $F = VN_F N_c I_c$. I_c 为载流导体的电流; N_F 为绕在导体上的光纤匝数; N_c 为螺线管的匝数; 当载流导体为直导线时 $N_c = 1$. 当 Faraday 偏振角 F 比较小时, 输出信号正比于输出线偏振光的 Faraday

偏转角。

但是, 由于光纤中存在的固有双折射以及光纤中扭应力产生的圆双折射引起的传感器信号偏置漂移会使光纤电流传感器在实际应用时遇到困难。为克服这一困难, 作者在分析传感光纤在存在线双折射和圆双折射输出特性的基础上, 提出了一种新的信号处理方法——利用 DSP 进行输出结果的数值分析补偿, 一定程度上解决了传感光纤的线双折射和圆双折射扰动变化而引起的检测信号漂移问题, 这种检测方法适用于交变电流的检测。相对于常用的信号处理方法, DSP 具有速度快、准确度高、便于进行嵌入式设计等特点, 将 DSP 与电流光纤传感器结合有利于实现光纤电流传感器的小型化和普及化。设计结果表明这种新型基于 DSP 的光纤电流传感器在实际应用领域, 特别是实时高强电流检测场合具有广泛的应用价值^[2]。

1 普通电流传感光纤的输出等效模型分析

考虑普通传感光纤的模拟等效情况: 即当光纤存在固有双折射以及扭转力引起的圆双折射、Faraday 效应的情形, 如图 1 所示。

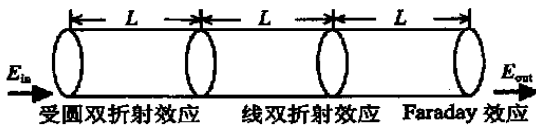


图 1 电流传感光纤等效模型

Fig. 1 Equivalent model of fiber used for OFCS

假设光纤原长为 L ; x 方向的线双折射率为 x , y 方向的线双折射率为 y ; 左旋圆偏振光的传输常数为 L_L , 右旋圆偏振光的传输常数为 L_R ; 将光纤等效成三段, 长度各为 L , 分别受圆双折射、线双折射和 Faraday 效应作用^[3]。

输入、输出光的偏振态用 Jones 矩阵表示为

$$E_{out} = e^{-j\frac{p+1}{2}L_1} \begin{bmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jxL} & 0 \\ 0 & e^{-jyL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{bmatrix} E_{in}$$

$$F = VNI ; \quad = \frac{R-1}{2} L ,$$

式中 E_{in} 、 E_{out} 分别为输入 / 输出光分量; F 为 Faraday 效应偏转角度; 为假定参数; V 为光传输媒质的费尔德 (Verdet) 常数; N 为电流线圈的匝数; I 为电流强度。第一个矩阵及前式为光纤存在圆双折射的等效 Jones 矩阵; 第二个矩阵为光纤存在线双折射的等效 Jones 矩阵; 第三个矩阵为光纤在 Faraday 效应作用下的等效矩阵。这表明普通传感光纤可看作等长的圆双折射光纤、线双折射光纤和受 Faraday 效应作用的光纤的三段连接等效。据此可以在基于 DSP 的光纤电流传感器中的输出进行相应设计。

2 基于 DSP 的光纤电流传感器

2.1 原理

由于引入了圆双折射与线双折射, 光纤电流传感器的输出便受其影响。为了消除这种影响, 传感器输出结果进行基于 DSP 的快速傅立叶变换, 在所测频率点上的功率变化明显, 再对经过快速傅立叶变换得到的频谱处理, 进而得到所测的电流信号。系统框图如图 2 所示。

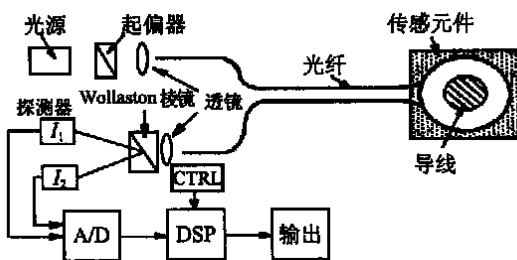


图 2 基于 DSP 的光纤电流传感器系统框图

Fig. 2 Block diagram of DSP based OFCS system

DSP 芯片采用 TMS320 C542, A/D 转换采用

AD0809 芯片, 输出为可扩充模块, 可以扩展成为 LED 屏幕实时显示形式, 也可以外接 D/A 转换器, 然后送至示波器直接观察结果。令 α_1 、 α_2 分别为起偏器及 Wollaston 棱镜的光轴与光纤入射及出射端线双折射轴的夹角, 均为 45° 。经过 Wollaston 棱镜分束的两路光分别由各自探测器接收, 经过 A/D 变换送至 DSP 芯片进行快速傅立叶变换, 从而根据频谱进行电流强度的数值计算。DSP 芯片可由外接控制模块进行参数输入与选择。

假设光纤中传输的总功率为 1, 得到的光强度分别为 I_1 、 I_2 , 进行归一化计算得^[4]

$$E_{out} = \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_2 & \sin \alpha_2 \\ \sin \alpha_2 & \cos \alpha_2 \end{bmatrix} e^{-j\frac{p+1}{2}L_1} \begin{bmatrix} \cos & -\sin \\ \sin & \cos \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{-jxL} & 0 \\ 0 & e^{-jyL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos F & \sin F \\ -\sin F & \cos F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_1 \\ \sin \alpha_1 \end{bmatrix} E_{in}$$

$$I_1 = E_1 \cdot E_1^* = 1 + \sin 2(\alpha_1 - F) \cos[(\alpha_2 - \alpha_1)L];$$

$$I_2 = E_2 \cdot E_2^* = 1 - \cos(\alpha_1 - F) \cos[(\alpha_2 - \alpha_1)L].$$

检测 I_1 及 I_2 时直流分量被抑制, 剩余交流分量为

$$S_1 = \sin 2(\alpha_1 - F) \cos[(\alpha_2 - \alpha_1)L];$$

$$S_2 = \cos 2(\alpha_1 - F) \cos[(\alpha_2 - \alpha_1)L].$$

可以看出, S_1 、 S_2 其频谱为 $\sin(\cdot)$ 、 $\cos(\cdot)$ 形式, 为对称谱线, 又 $F = VNI$, 因此由频谱谱线距离即可求出电流强度 I 。

2.2 DSP 模块设计

DSP 模块核心芯片采用 TMS320 C542。TMS320 C542 的运算速度为 100MIPS (10^6 条指令 / s), 采用先进的修正哈佛结构。指令为 6 级深度流水线作业。在同一机器周期可有 1 到 6 条不同指令并行工作^[5,6]。此外还含有两个带缓冲的串口, 6 个 DMA 控制器, 2 个 16 位可编程定时器, 8 位并行主机接口 HPI。片内资源包括 2 K 的 ROM 和 10 K 的 DARAM。C542 的指令功能强大, 为快速傅立叶变换 (FFT) 算法提供了特殊的位倒序寻址方式, 同时还提供了并行操作, 使其实现速度更快。系统其他硬件包括 A/D 转换芯片 AD0809, 主要完成 A/D 变换, 然后通过串口将光电探测器转成的光电信号送入 DSP 进行实时数值处理。

软件设计是 DSP 模块的核心。为了计算频谱, 采用快速傅立叶变换的方法。快速傅立叶变换公式为

$$X(k) = \sum_{n=1}^N x(n) e^{-j2\pi(k-1)(\frac{n-1}{N})}, \quad 1 \leq k \leq N$$

程序执行采用中断方式。DSP 及时响应来自控制模块的中断和控制命令,实时调用相应的算法模块更改参数、计算并输出结果。FFT 的软件流程如图 3 所示。

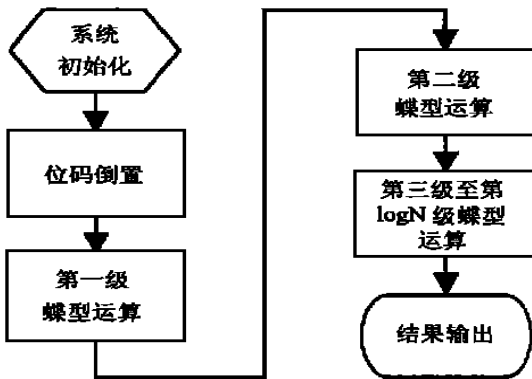


图 3 FFT 软件流程

Fig.3 Flowchart of FFT

在实现正余弦计算时可采用查表法,可将正余弦系数表放置数据空间中。其模块软件部分由下面几个程序组成:

电流检测尽量要求快的响应,因此在编程时还须注重辅助存储器的合理使用,以利提高代码效率。I/O 口分配为:PA0—输出口;PA1—输入口。程序空间占用程序存储器 e000h - ffffh;数据空间占用数据存储器 0060h - 9400h。

3 结果与讨论

根据以上的设计分析,在 C54x DSP Simulator 上面进行了仿真,实验采用 1.3 μm 单模光纤,长度为 4 m,圈数 $N = 11$,内在线双折射率 $x - y = 1.5 \text{ rad/m}$,Verdet 常数 $V = 1.1 \times 10^{-6} \text{ rad/A}$, $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha/4$,交变电流为 900 A,50 Hz,光纤圈弯曲半径大于 5 cm,圆双折射可视为小量近似。经采集卡 A/D 转换,实测电流波形图如图 4 所示。

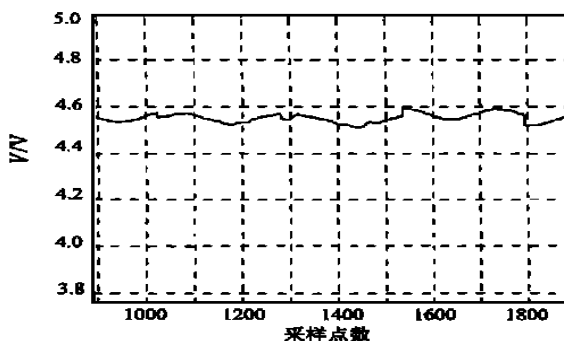


图 4 900A 电流实测曲线

Fig.4 Current(900A) detecting curve

利用 C54x DSP Simulator 的归一化模拟输出如

图 5 所示。

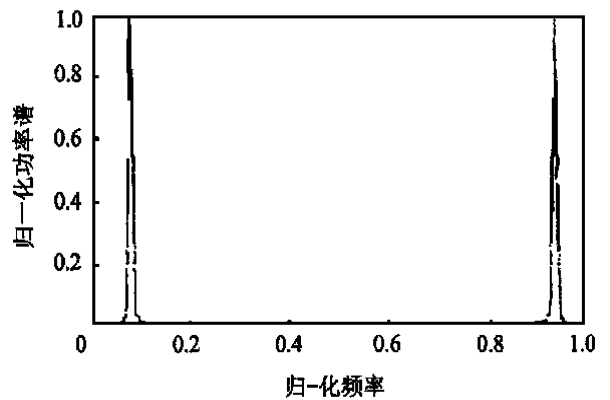


图 5 归一化输出结果

Fig.5 Normalized signal output

可以看出,在两个频点的能量变化集中且明显,可以断定这就是频谱参量 $2(\alpha - F)$,对应的电流强度 900 A。

采用 DSP 设计的光纤电流传感器,从一定程度上解决了线双折射和圆双折射对传感结果的干扰,这种新型的光纤电流传感器设计方法为数字信号处理技术在光纤技术中的运用开辟了一条新的途径,同时也为光纤电流传感器的嵌入式小型化、普及化应用提供了崭新的思路。

参考文献:

- [1] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000. 191 - 196.
- [2] 靳伟,廖延彪,张志鹏,等. 导波光传感器:原理与技术[M]. 北京:科学出版社,1998. 181 - 213.
- [3] 范崇澄,彭吉虎. 导波光[M]. 北京:北京理工大学出版社,1988. 226 - 236.
- [4] Wang Zhaobing, Liao Yanbiao, Lai Shurong, et al. A novel method for simultaneous measurement of current and voltage using one low-birefringence fiber[J]. Optics & Laser Technology, 1998, (30): 257 - 262.
- [5] Texas Instruments Incorporated. TMS320C54x DSP applications guide[Z]. Owensville, Missouri, U. S. A.: Custom Printing Company, 1996. 1 - 28.
- [6] Texas Instruments Incorporated. TMS320C54x DSP CPU and Peripherals[Z]. Owensville, Missouri, U. S. A.: Custom Printing Company, 1997. 18 - 24.

作者简介:

苏立国(1976 -)男,辽宁彰武人,厦门大学电子工程系硕士研究生。目前主要从事光纤电流传感器,光纤激光器的研究。