

引用格式:李晨霖,王仕成,李婷,等.基于无人机的区域地磁场测试与校正技术研究[J].电光与控制,2018,25(7):14-18. LI C L, WANG S C, LI T, et al. UAV based regional geomagnetic field test and correction technology[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):14-18.

## 基于无人机的区域地磁场测试与校正技术研究

李晨霖, 王仕成, 李婷, 张作宇  
(火箭军工程大学测控工程系, 西安 710025)

**摘要:**以天璇III无人机作为飞行平台,设计了无人机遥感载荷存储设备,针对在测量过程中存在磁力仪误差和载体磁干扰的问题,提出了基于粒子群优化的磁场测量误差补偿方法。以三轴磁力仪测得的数据作为系统输入,利用粒子群算法对磁干扰补偿模型进行参数求解,得到目标信号磁场数据后,以光泵磁力仪测量的地磁场作为真实标量值进行对比。实验结果表明,采用粒子群优化的磁场测量误差补偿方法具有较高的补偿精度和一定的工程应用价值。

**关键词:**无人机; 数据存储; 粒子群优化算法; 捷联三轴磁力仪

中图分类号: V249.32 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.003

## UAV Based Regional Geomagnetic Field Test and Correction Technology

LI Chen-lin, WANG Shi-cheng, LI Ting, ZHANG Zuo-yu

(Measurement & Control Engineering Department, Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**Abstract:** A UAV remote sensing load storage device was designed by taking a certain type of UAV as the flight platform. Considering the problems of magnetometer errors and carrier magnetic interference in measurement, we proposed a method for magnetic field measurement error compensation based on Particle Swarm Optimization (PSO). The data measured by the triaxial magnetometer was taken as the system input, and PSO was used to solve the magnetic interference compensation model. After the magnetic field data of the target signal was obtained, it was compared with the geomagnetic field data obtained from the optical pump magnetometer, which was taken as the real scalar value. The experimental results showed that the PSO based error compensation method in magnetic field measurement has higher compensation precision and certain value for engineering application.

**Key words:** UAV; data storage; Particle Swarm Optimization algorithm (PSO); strap-down triaxial magnetometer

### 0 引言

地磁匹配导航在现代导航技术中占有比较重要的位置,具有广阔的应用前景,在国内外导航领域得到了重视。地磁匹配是现阶段飞行器导航实现自主定位的主要手段之一<sup>[1]</sup>。执行任务时,飞行器处于一种全自主的工作状态,根据既定的路线进行自主导航,地磁场数据的获取是地磁匹配导航的基础<sup>[2]</sup>。地磁匹配的精度很大程度上取决于地磁测量的精度,利用无人机

搭载磁力仪的数据采集过程需要解决两个最根本的问题:一是磁场数据的实时存储;二是对载体磁场的干扰进行实时补偿。

目前市场上可供选择的数据存储设备较多,主要是对硬件的数据接口、通信协议等进行设计。曹丽剑等利用 NAND FLASH 芯片的固态硬盘设计了无人机遥感载荷存储系统<sup>[3]</sup>,对地磁测量精度的修正主要通过对地磁干扰的补偿和优化设计;李季对载体干扰磁场补偿方法进行研究,提出了基于线性测量模型和半参数模型的补偿方法<sup>[4-5]</sup>;张滢、吴志添基于总体最小二乘的方法进行磁场误差补偿<sup>[6-7]</sup>;于振涛、张晓明提出一种基于椭圆约束的新型载体磁场补偿技术<sup>[8-9]</sup>。

在实际测量中,捷联在载体内部的三轴磁力仪测量的地磁场数据不仅包括真实的地磁矢量,还包括载

收稿日期:2017-08-07

修回日期:2017-08-22

基金项目:国家自然科学基金(11602296,61673017);中国博士后科学基金特别资助项目(2014T70974)

作者简介:李晨霖(1992—),女,黑龙江鸡西人,硕士生,研究方向为导航、制导与仿真。

体内部各种电子设备的干扰信号,这严重影响了地磁场的测量精度<sup>[4]</sup>。本文利用购置的天璇Ⅲ四旋翼无人机和三轴磁力仪获取目标地点的地磁数据,设计并实现了无人机遥感磁测存储系统,提出了一种基于粒子群算法的磁干扰补偿方法。首先对磁力仪误差和载体磁干扰进行统一建模,然后利用粒子群优化算法对干扰补偿模型参数进行解算。经实测数据验证,该方法具有较高的补偿精度和一定的工程应用价值。

## 1 无人机测量系统硬件构架

### 1.1 硬件系统设计

磁力仪的输出接口为 RS232 接口, GPS 的输出接口为 TTL232 接口,因此需要使用协议芯片实现通信协议。

硬件总体结构如图 1 所示。FPGA 为 Cyclone IV 系列 EP4CE6F29C8。其中:高速 SDRAM 可作为软嵌入式系统的程序运行空间;SRAM 作为数据的缓冲区,其对时钟同步的要求不高,可以在相对低速下运行<sup>[10]</sup>;RTC 提供时间的查询和修改操作;WDT 为系统提供了稳定性;FLASH 作为软嵌入式系统的程序存储空间,用以在系统上电时将 SOPC 硬件网表烧写到 FPGA 和将 NIOS II 程序引导加载到内存中<sup>[11]</sup>。数据交换单元在 CPU 的控制下,对输入、输出接口,SD 卡和 SDRAM 缓存进行数据交换。磁力仪的 RS232 接口的输出,通过 max232 转换为 TTL 电平后输入 FPGA。GPS 输出的 TTL 电平直接输入 FPGA。SD 卡的内存为 8 GB。SDRAM 缓存由 4 片 MT48LC4M32 组成。

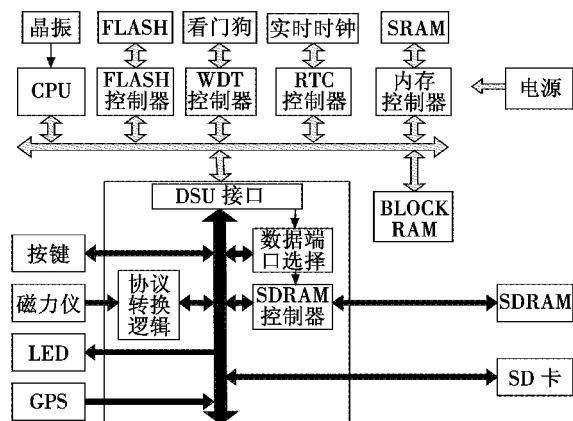


图 1 硬件总体结构

Fig. 1 Hardware architecture

### 1.2 软件系统设计

在编程中,采用了分层模块化的编程方法,一定程度减小系统开发以及调试的难度。软件系统划分为板级支持包 BSP、UART 串口驱动、SD 卡 SDIO 驱动、FAT32 文件系统和应用程序 5 个分层模块。

板级支持包包括硬件驱动程序、bootloader 和初始化代码。Altera 的集成开发环境 NIOS II IDE 在生成

SOPC 系统时,会自动导入硬件,生成底层的驱动程序,调用数据口,大大减少了硬件驱动开发的工作量。

UART 串口的驱动工作流程如图 2 所示。

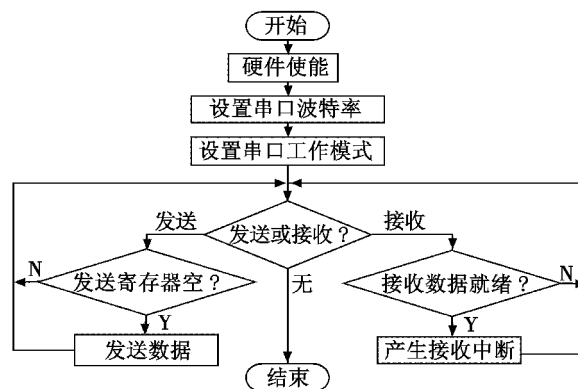


图 2 UART 串口的驱动工作流程图

Fig. 2 Flow chart of UART serial port drive

SDIO 驱动程序主要进行 SD 卡与 EP4CE6F29C8 之间的数据传输。首先将 SDIO 接口初始化(如图 3 所示),上电后对插入的 SD 卡执行识别和分类等程序。SDIO 在 4 位数据总线模式下,输出数据和命令使能信号。SDIO 的所有命令和响应都由 SDIO\_CMD 引脚传输,并且命令只可以通过主机即 EP4CE6F29C8 的 SDIO 控制器发出。

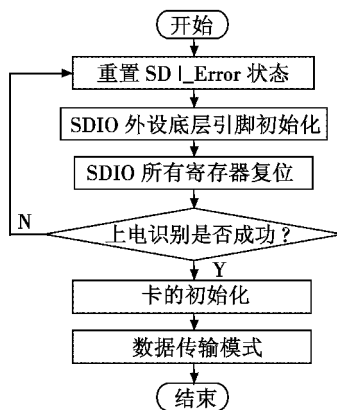


图 3 SDIO 初始化流程图

Fig. 3 Flow chart of SDIO initialization

SD 卡数据写入和读取最小单位是块,每块大小 512 Byte。对 SD 卡的操作是大吞吐量的数据传输,采用 DMA 提高效率。写操作时,CMD 信号线发送多块写命令,SDIO 接收到正常响应后,数据从 4 根 DAT 线传输出去,数据块传输结束后是 CRC 校验码。CRC 显示正常,要检测忙状态。当数据传输到 SD 卡,启动内部程序保存数据,此时,SD 卡将 DAT0 信号线拉低,表示处于“忙”状态,“忙”状态结束,主机再发送下一个数据块数据。

文件系统的作用是管理存储空间,为应用程序提供一系列抽象的接口,做到按名存取文件。本文使用

的文件系统是 FAT32, 数据存储格式为 TXT 文档, 方便在 Windows 操作系统下查看。

在系统上电复位后应用程序进行系统初始化, 检测文件系统一致性, 之后进入待机状态。其中, 有 4 盏 LED 灯被系统调用, LED4 指示 GPS 是否能接收到经纬度信息, 当 LED4 点亮时, 表示可以接收到经纬度信息。按下开始按钮后, 启动存数系统, LED1 点亮, 系统打开数据通道、创建 TXT 文件并记录数据。当磁力仪与 GPS 内能接收到正常数据时, LED2 和 LED3 分别被点亮。

程序的运行采用循环形式, 如图 4 所示。CPU 不断发送命令试探是否接收到数据, 即判断是否有以 \$ 开头的字段, 将以 \$ 开头的字段存入创建的文件, 其中: UART:0 负责接收磁力仪的数据, 当判断指令头 \$ 之后的字符段是有效数据时, 进行存储, 反之舍弃; UART:1 负责接收 GPS 的数据, 当判断指令头 \$ 之后的字符段为 ZDA, GGA, VTA 字头的有效数据时, 进行存储, 反之舍弃; 其中所有的数据存储都是先缓存在缓存区域, 当接收到有效的 GGA 数据时, 并行地将缓存中的数据存入 SD 卡, 完成一次存储, 进入下一次存储。当再次按下开始按键时, 表示结束存储, 系统断电, 程序停止运行。

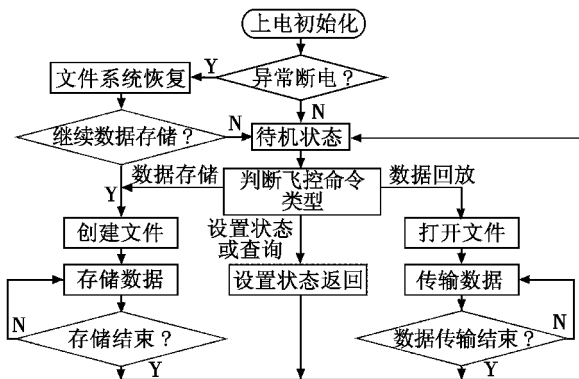


图 4 应用程序流程图

Fig. 4 Flow chart of the application program

## 2 基于粒子群算法的磁干扰补偿方法

### 2.1 输入输出模型

三轴磁力仪在测量时受到来自两个方面的影响: 1) 磁力仪误差; 2) 载体磁干扰。这两类误差同时影响输出, 在载体坐标系下, 捷联三轴磁力仪的输出模型为<sup>[12]</sup>

$$\hat{B}^s = C_{N0} C_{SF} (B_e^s + B_{III}^s + B_{SI}^s) + b_0^s + w^s \quad (1)$$

式中: 上标  $s$  表示传感器坐标系;  $B_e^s$  表示地理坐标系下的地磁矢量;  $C_{N0}$  为非正交误差矩阵;  $C_{SF}$  为刻度因子误差矩阵;  $B_{III}^s$  为硬磁误差;  $B_{SI}^s$  为软磁误差;  $b_0^s$  为磁力仪的零偏误差;  $w$  为高斯白噪声。

#### 2.1.1 磁力仪误差分析

理想情况下, 磁力仪捷联在载体内部, 安装误差矩

阵  $C_M$  为单位矩阵。假设  $O-XYZ$  为理想坐标系,  $O-X'Y'Z'$  为实际的三轴磁传感器坐标系, 假设两个坐标系的  $X$  轴重合,  $OY'$  与  $XOY$  共面, 且与  $OY$  轴之间的夹角为  $\beta$ ,  $OZ$  与平面  $YOZ$  之间的夹角为  $\alpha$ ,  $OZ'$  在平面  $YOZ$  的投影与  $OZ$  轴之间的夹角为  $\gamma$ , 如图 5 所示。

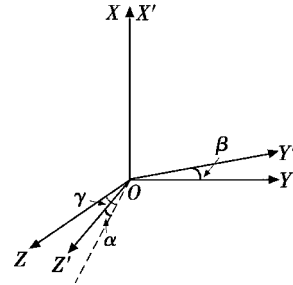


图 5 三轴磁力仪空间误差

Fig. 5 Spatial error of triaxial magnetometers

则非正交矩阵  $C_{N0}$  可表示为

$$C_{N0} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ \sin \beta & \cos \beta & 0 \\ \sin \gamma & \sin \alpha \cos \gamma & \cos \alpha \cos \gamma \end{pmatrix}. \quad (2)$$

刻度因子误差和零偏误差可以表示为

$$\begin{cases} C_{SF} = \text{diag}(s_x & s_y & s_z)^T \\ b_0^s = (b_{0x} & b_{0y} & b_{0z})^T \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $s_i, b_{0i}$  ( $i = x, y, z$ ) 表示刻度因子和零偏在 3 个轴上的误差。

#### 2.1.2 载体干扰磁场分析

按误差来源可将载体磁干扰分为硬磁干扰、软磁干扰和随机磁干扰。

硬磁误差主要来源于载体硬磁材料受外界磁场磁化后保留的磁性, 常见的有永磁体和高碳钢。硬磁材料一经磁化后, 剩磁可以较长时间保持不变, 可表示为  $B_{III}^s = (B_{IIIx}^s \ B_{IIIy}^s \ B_{IIIz}^s)^T$ 。

软磁误差是软磁材料受到外部磁场的激励而产生的磁场, 其分布与激励磁场的方向和幅值有关, 当载体连续运动时, 软磁磁场也会连续发生变化, 软磁误差可表示为

$$B_{SI}^s = C_{SI} (B_e^s + B_{III}^s) \quad (4)$$

式中,  $C_{SI}$  为软磁系数矩阵。

由载体内部电子设备、输电线等产生的干扰磁场以及一些难以建模的杂散磁场构成了随机干扰磁场。有效抑制随机干扰磁场的方法有两个: 1) 尽量通过低磁材料和磁屏蔽技术降低磁干扰; 2) 利用低通滤波器对磁干扰进行初步处理。实际操作过程中, 随机干扰能够通过一定方法减弱且相对于系统误差较小,  $w$  可忽略。

将式(4)代入式(1), 可得

$$\hat{B}^s = AB_e^s + b^s + w^s \quad (5)$$

式中： $\mathbf{A}$ 是一个 $3 \times 3$ 矩阵， $\mathbf{A} = \mathbf{C}_{\text{NO}} \mathbf{C}_{\text{SF}} (\mathbf{I}_{3 \times 3} + \mathbf{C}_{\text{SI}})$ ； $\mathbf{b}^s$ 是 $3 \times 1$ 矢量， $\mathbf{b}^s = \mathbf{A} \mathbf{B}_{\text{H}}^s + \mathbf{b}_0^s$ 。

## 2.2 校正模型

忽略测量噪声，校正模型以传感器的输出矢量 $\hat{\mathbf{B}}^s$ 作为输入，以校正后的地磁矢量 $\mathbf{B}_c^s$ 作为输出，则有

$$\mathbf{B}_c^s = \mathbf{A}^{-1} (\hat{\mathbf{B}}^s - \mathbf{b}^s) = \mathbf{U} \mathbf{K} (\hat{\mathbf{B}}^s - \mathbf{b}^s) \quad (6)$$

式中： $\mathbf{B}_c^s$ 为标定后载体坐标系下的地磁矢量； $\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{U} \mathbf{K}$ ，表示正交三角分解为酉矩阵 $\mathbf{U}$ 和上三角矩阵 $\mathbf{K}$ 。定义 $\mathbf{c} = \mathbf{K} \mathbf{b}^s$ ，可得

$$r = \|\mathbf{B}_c^s\| = \|\mathbf{K} \hat{\mathbf{B}}^s - \mathbf{c}\| \quad (7)$$

这意味着标量检验方法无法将校准参数区分为正交矩阵。 $\mathbf{c}$ 矢量和 $\mathbf{K}$ 矩阵的表达式分别是： $\mathbf{c} = (c_1 \ c_2 \ c_3)^T$ ，

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} \\ 0 & k_{22} & k_{23} \\ 0 & 0 & k_{33} \end{pmatrix}.$$

在校准模型中估计有9个要素，这些元素是所有磁力计读数误差的复合效应。校正过程如图6所示。

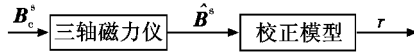


图6 三轴磁力仪校正模型

Fig. 6 Calibration model of the triaxial magnetometer

## 2.3 目标函数

标量检测是基于测量矢量的大小独立于坐标系的事实。假设地磁场的大小为 $r_0$ ，则存在以下等式

$$r_0 = \|\mathbf{K} \hat{\mathbf{B}}_i^s - \mathbf{c}\| \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (8)$$

式中， $\hat{\mathbf{B}}_i^s (i = 1, 2, \dots, N)$ 是传感器输出向量，下标 $i$ 表示样本索引， $N$ 表示样本总数。

目标函数定义为

$$\arg \min f(\mathbf{K}, \mathbf{c}) = \sum_{i=1}^N (\|\mathbf{K} \hat{\mathbf{B}}_i^s - \mathbf{c}\| - r_0)^2 \quad (9)$$

显然，参数 $(\mathbf{K}, \mathbf{c})$ 最小化指标函数(式(9))就是最佳参数估计值。通过该函数，校准问题已经转化为参数最优化问题。

## 2.4 粒子群算法基本原理

假设在一个 $D$ 维搜索空间中，种群中有 $m$ 个粒子，在第 $k$ 次迭代时，第 $i$ 个粒子的速度和位置可分别表示为 $\mathbf{V}_i(k) = (v_{i1}(k) \ v_{i2}(k) \ v_{i3}(k) \ \dots \ v_{iD}(k))$ ， $\mathbf{X}_i(k) = (x_{i1}(k) \ x_{i2}(k) \ x_{i3}(k) \ \dots \ x_{iD}(k))$ 。

每一个粒子的历史最优个体 $P_{\text{best}}$ 记为 $\mathbf{P}_i(k) = (p_{i1}(k) \ p_{i2}(k) \ p_{i3}(k) \ \dots \ p_{iD}(k))$ ，种群最优个体 $G_{\text{best}}$ 为 $\mathbf{G}_i(k) = (g_{i1}(k) \ g_{i2}(k) \ g_{i3}(k) \ \dots \ g_{iD}(k))$ 。所有粒子根据式(10)和式(11)更新当前的速度和位置

$$v_{iD}(k+1) = wv_{ij}(k) + c_1 r_1 (\mathbf{P}_{ij}(k) - \mathbf{X}_{ij}(k)) + c_2 r_2 (g_{ij}(k) - \mathbf{X}_{ij}(k)) \quad (10)$$

$$x_{ij}(k+1) = x_{ij}(k) + v_{iD}(k+1) \quad (11)$$

式中： $i = 1, 2, \dots, m$ 表示种群中的第 $i$ 个粒子； $j = 1, 2, \dots, D$ 表示每个粒子中的第 $j$ 维度； $c_1$ 和 $c_2$ 为学习因子； $r_1$ 和 $r_2$ 表示 $(0, 1)$ 之间的随机数。此外，粒子的速度被限制在 $[-V_{\text{max}} \ V_{\text{max}}]$ 来保证算法的收敛。

基于PSO算法进行干扰补偿的流程如下。

1) 参数初始化。设定粒子维数 $D$ ，种群大小 $m$ ，粒子的速度和位置范围，最大迭代次数，参数设置参照文献[13]。

2) 以随机速度和位置初始化 $m$ 个粒子。将当前位置设置为初始最优 $P_{\text{best}}$ 。设置当前迭代次数 $k = 0$ 。计算每个粒子的适应度函数(式(9))的每个适应度值，然后选择最佳位置作为初始 $G_{\text{best}}$ 。

3) 根据式(10)、式(11)更新每个粒子的速度和位置。限制每个粒子的速度在 $[-V_{\text{max}} \ V_{\text{max}}]$ 的区间搜索范围。

4) 计算所有粒子的适应度值。对于每个粒子，如果新的拟合值小于其 $P_{\text{best}}$ 的适应度值，则按当前位置替换 $P_{\text{best}}$ ，否则保持 $P_{\text{best}}$ 。

5) 比较每个粒子的适应度值，并选择最小值。如果该最小值小于 $G_{\text{best}}$ 的适应度值，则将 $G_{\text{best}}$ 替换为具有最小适应度值的粒子的位置。

6) 继续迭代， $k = k + 1$ 。如果 $G_{\text{best}}$ 的适应度值小于设定的阈值或达到最大迭代次数，终止迭代并输出 $G_{\text{best}}$ ；否则，转到步骤3)。

## 3 实验及结果分析

实验对无人机遥感载荷数据存储系统进行测试并对三轴磁力仪进行校正，实验系统包括天璇Ⅲ四旋翼无人机、华硕笔记本电脑(含飞控系统)、无人机遥感载荷数据存储系统、三轴磁力仪和光泵磁力仪，通过Matlab进行数据处理，以光泵磁力仪测量的地磁场作为真实标量值，利用本文提出的方法对包含磁力仪误差和载体磁干扰的综合磁测误差进行补偿。

为获取相关磁场数据，将三轴磁阻磁力仪捷联在无人机载体上，使无人机在其机动范围内尽可能全方位地机动，测量机动过程中光泵磁力仪输出的总场值和三轴磁阻磁力仪输出的三轴数据，并利用无人机遥感载荷数据存储系统进行存储。

在地面设备中回放数据，利用粒子群算法对磁干扰补偿模型进行参数求解，参数如表1所示。

表1 参数估计结果

Table 1 Results of parameter estimation

待估计参数	结果	待估计参数	结果
P11	1.0117	P13	0.0184
P21	0.0028	P23	-0.0119
P31	-0.0067	P33	0.9972
P12	0.0079	O1/nT	1576.1
P22	1.0010	O2/nT	-604.3794
P32	-0.0166	O3/nT	-41.7471

补偿结果如图7所示。其中,红色直线表示由光泵磁力仪测得的地磁总场值,绿色曲线表示由三轴磁力仪测得的分量的模值,总场峰峰值高达53 700 nT,这表明磁力仪受到了强磁干扰,磁场测量误差很大,蓝色曲线表示补偿后的磁场值。

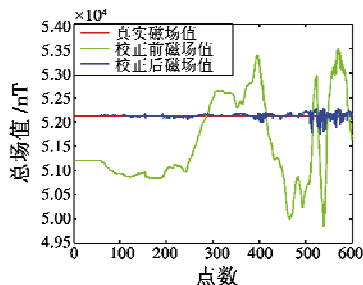


图7 误差补偿

Fig. 7 Error compensation

将三轴磁力仪测得的数据进行计算得到总磁场值,将此组数据代入粒子群算法程序中,求解出最优补偿参数。从实验结果可知,本文设计的无人机遥感载荷数据存储系统符合实验要求,将本文存储系统存储的数据代入粒子群算法可稳定求出有效的系统补偿参数,补偿后曲线更接近真值,效果较为理想。

#### 4 结束语

经实验得出以下结论。

1) 本文研究了无人机遥感载荷数据存储系统设计问题,采用FPGA作为硬件基础,基于SOPC进行实现,采用Quartus并利用现有IP核对硬件系统进行搭建,再利用eclipse进行软件的编译与调试。针对双输入需要被并行写入存储设备的问题,将SDRAM作为数据缓存;采用SD卡作为存储介质,以4线制SDIO为数据传输协议,大大提高了SD卡读写速度;应用FAT32文件管理系统,数据存储格式为TXT文档,方便在Windows操作系统下查看。经过实验验证,设计满足对载荷数据的存储需求,且具有开发周期短和可扩展性强的优点。

2) 本文针对三轴磁力仪存在磁力仪误差和在测量过程中存在载体磁干扰的情况,采用了基于粒子群算法的航磁补偿方法进行补偿。导出传感器误差的完整建模,然后使用基于PSO的算法将校准问题转化为优化问

题,以搜索校准参数。该算法不需要很好的初始猜测,并且使用原始的非线性成本函数。实验结果表明,采用粒子群算法的航磁补偿方法具有较高的补偿精度。

综上所述,利用本文设计的无人机搭载遥感载荷存储系统存储数据并对遥感数据进行航磁补偿可使补偿后曲线更接近真值,获得更好的实验结果,具有一定的工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] 张金生, 乔玉坤, 王哲, 等. 几种插值方法在地磁匹配导航基准图构建中的应用研究[C]//国家安全地球物理专题研讨会, 武汉, 2009: 71-76.
- [2] 冯龙. 地磁匹配导航算法仿真研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2014.
- [3] 曹丽剑, 苏建, 王江峰, 等. 无人机遥感载荷数据存储系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(10): 2400-2402.
- [4] 李季. 地磁测量中载体干扰磁场特性及补偿方法研究[D]. 合肥: 国防科学技术大学, 2013.
- [5] 李季, 潘孟春, 罗诗途, 等. 半参数模型在载体干扰磁场补偿中的应用研究[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(9): 2147-2152.
- [6] 张滢, 杨任农, 李明阳, 等. 基于截断总体最小二乘算法的车载三轴磁力仪标定[J]. 兵工学报, 2015, 36(3): 427-432.
- [7] 吴志添, 武元新, 胡小平, 等. 基于总体最小二乘的捷联三轴磁力仪标定与地磁场测量误差补偿[J]. 兵工学报, 2012, 33(10): 1202-1209.
- [8] 于振涛, 吕俊伟, 稍绍康. 基于椭球约束的载体三维磁场补偿方法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(6): 731-734.
- [9] 张晓明, 赵剡. 基于椭圆约束的新型载体磁场标定及补偿技术[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(11): 2438-2443.
- [10] 杨俊雄, 徐亚军, 何峰, 等. 时钟同步精度对TTE实时性影响研究[J]. 电光与控制, 2016, 23(8): 33-38.
- [11] 赵亚慧, 金龙旭, 陶宏江, 等. 基于NANDFlash的高速大容量存储系统的设计[J]. 电光与控制, 2016, 23(5): 71-75.
- [12] 冯春妮, 胡小平, 何晓峰, 等. 组合导航系统中一种三轴磁强计误差建模与补偿方法[C]//第五届中国卫星导航学术年会, 南京, 2014: 1-5.
- [13] BRATTON D, KENNEDY J. Defining a standard for particle swarm optimization[C]//Swarm Intelligence Symposium, IEEE, 2007: 120-127.