0254-6124/2014/34(6)-843–06 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Zhou Bin, Cheng Bingjun, Zhang Yiteng, Zhang Zhenqi, Wang Jindong, Li Lei. Magnetic field detection method of China seismo-electromagnetic satellite (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 843-848, doi:10.11728/cjss2014.06.843

电磁监测试验卫星矢量磁场探测方法

周 斌[1] 程炳钧[1] 张艺腾[1]
张镇祁[1,2] 王劲东[1] 李 磊[1]

1(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘 要 电磁监测试验卫星是中国第一颗近地轨道电磁场科学探测试验卫星, 探测空间背景磁场是其重要任务之一. 空间背景磁场探测需要在卫星平台上对空间矢量磁场进行长期稳定准确探测, 电磁监测试验卫星采用磁通门磁强计和基于 CPT 效应的绝对磁场校准装置 (Coupled Dark State Magnetometer, CDSM) 分别探测空间相对矢量磁场以及绝对标量磁场, 通过数据处理, 使最终的矢量磁场探测数据具有准确性. 这种数据处理方法在理想模型下拥有解析解, 实施过程中载荷的噪声、准确度及稳定性影响模型的准确性, 会产生数据校准误差. 通过对在轨磁场探测的模拟确定了这种数据处理方法的性能, 验证了在载荷设计性能的基础上电磁监测试验卫星的磁场探测可以实现 1 nT 的准确度.

关键词 电磁监测试验卫星, 高精度磁强计, 磁场校准

中图分类号 P 353.1, V 44

Magnetic Field Detection Method of China Seismo-electromagnetic Satellite

ZHOU Bin[1] CHENG Bingjun[1] ZHANG Yiteng[1]

ZHANG Zhenqi[1,2] WANG Jindong[1] LI Lei[1]

1(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES) is the first domestic satellite for electromagnetic science experiment in near Earth orbit. Space magnetic field detection is one of the primary scientific objectives of CSES, which is based on long-term steady vector magnetic measurement. Flux-gate magnetometer and Coupled Dark State magnetometer are employed to detect vector and scalar magnetic field respectively. Using fitting method, we could get absolute accuracy data of vector magnetic field. A method about flux-gate magnetometer vector data calibration is introduced using scalar magnetic field data, and it ensures the accuracy of vector magnetic field data. The

2014-02-10 收到原稿, 2014-03-26 收到修定稿

E-mail: zhoubin@nssc.ac.cn

performance of this method is evaluated by simulation, and it gives an accuracy of 1 nT.

Key words China Seismo-Electromagnetic Satellite (CSES), High accuracy magnetometer, Magnetic field calibration

0 引言

电磁监测试验卫星 (China Seismo-Electromagnetic Satellite, CSES) 是中国第一颗近地轨道电磁场科学探测试验卫星, 其科学目标是在实时监测空间电磁环境状态变化的基础上, 研究地球系统特别是电离层与其他各圈层的相互作用和效应, 初步探测地震前后电离层响应变化的信息特征及其机理. 该卫星探测目标包括近地轨道电场、磁场、高能粒子、低能等离子体环境, 此外还通过掩星和三频信标机等方式探测电离层和大气层. 对磁场探测的带宽覆盖了 DC 20 kHz 左右频段, 其中 DC 15 Hz 附近磁场采用高精度磁强计进行探测, 要求探测矢量磁场且探测准确度优于 1 nT.

在空间探测研究领域, 磁通门传感器由于体积小、重量轻、可靠性高, 是矢量磁场探测的传统载荷 [1]. 其基本原理是法拉第电磁感应定律, 采用交变电流周期性驱动磁性材料, 磁性材料的饱和特性使其在外部磁场作用下内部交变磁通发生畸变, 形成与外部磁场强度成正比的二次谐波, 这就是磁通门的基本工作过程 [2].

磁通门原理决定了这种磁强计不具有绝对准确性. 早期在空间探测领域对磁通门磁强计的应用主要关注相对准确性、噪声和分辨率, 例如欧空局 Cluster 卫星 [3]、美国 GOSE 系列气象卫星和中欧合作的双星计划 [4] 等. 而关注准确性的磁场测绘卫星任务, 例如 Ørsted, CHAMP 等卫星, 在部署了磁通门磁强计的同时还增加了基于量子效应的磁场探测载荷进行辅助测量 [5], 利用它的标量磁场探测准确性校正磁通门矢量磁场探测结果.

根据电磁监测试验卫星的特殊需求, 高精度磁强计同时采用磁通门传感器 (Fluxgate Senser) 和基于 CPT 效应的绝对标量传感器 (CDSM)[6], 结合相应数据校准方法实现任务目标.

1 电磁监测试验卫星磁场探测载荷

电磁监测试验卫星高精度磁强计 (High Precision Magnetometer, HPM) 由两个磁通门传感器和一个基于 CPT 效应的标量磁场传感器以及电子学箱构成. 为避免卫星平台的剩磁干扰, 卫星平台剩磁控制在 0.5 A·m^2 条件下, 传感器安装在一个约 4.5 m 长的伸杆上, 其安装位置如图 1 所示.

CDSM 准确性影响到最终数据的准确性, 将其部署在伸杆顶端可以最大程度地准确反映空间磁场大小. 磁通门传感器分别部署在大约 3.6 m 和 4 m 处, 一方面二者可以互为备份, 另一方面通过梯度测量可以一定程度上计算剩磁大小并消除其影响.

1.1 磁通门传感器

高精度磁强计的磁通门传感器设计参考了萤火一号磁通门磁强计相关技术, 采用三分量传感器独立安装的模式, 其工作原理如图 2 所示 [7].

每个分量传感器由反馈线圈、信号线圈和激励线圈构成. 采取反馈工作模式, 传感器内部轴向上保持零场的工作状态, 这可以大大提高传感器的线性度. 传感器处理电路采取传统的磁通门处理电路, 包括交流激励部分, 前置放大、带通滤波、移相器、积分器和反馈等模块.

电磁监测试验卫星的磁通门磁强计性能指标列于表 1. 相比萤火一号, 电磁监测试验卫星要求磁场探测的量程增加了 256 倍, 动态范围要求增加 10 倍, 带宽增加 5 倍. 在实际研制过程中, 通过激励电路、前置放大电路和反馈电路的改进, 磁通门传感器信号调理后的模拟量带内总噪声在 0.05 nT 以下, 1 Hz 频点处功率谱密度优于 0.01 nT·Hz$^{-1/2}$. 高精度磁强计的数据信号采集采用基于 Sigma-delta 原理的 24 bit ADC 芯片, 可以实现带内 20 bit 的有效分辨率, 最终可实现 15 Hz 带内 0.15 nT 的磁场分辨率.

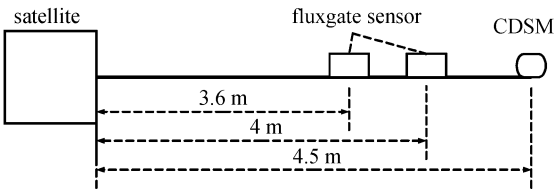


图 1 电磁监测试验卫星传感器部署示意

Fig. 1 CSES HPM sensors mounted on the boom

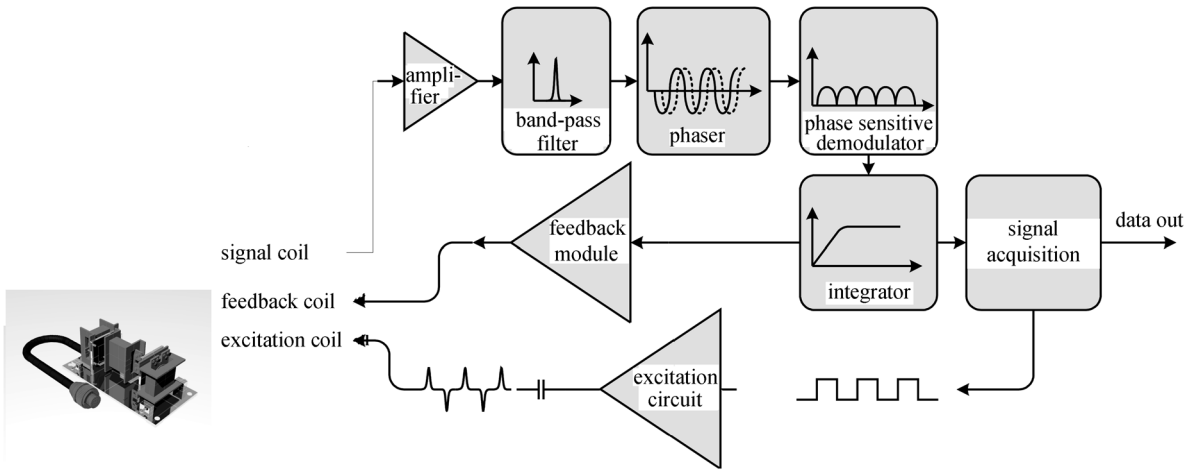


图 2　磁通门磁强计工作原理

Fig. 2　Diagram of fluxgate magnetometer signal processing

表 1　磁通门磁强计性能指标表

Table 1　HPM fluxgate magnetometer performance

参数	性能
测量范围	优于 ±65 000 nT
线性度	优于 0.002% (全量程)
分辨率	优于 0.15 nT
噪声	优于 0.01 nT·Hz$^{-1/2}$(模拟量)
	优于 0.04 nT·Hz$^{-1/2}$ (数字采样)
	优于 0.05 nT·Hz$^{-1/2}$ (最终输出)
模拟带宽	优于 100 Hz
采样率	60 Hz
稳定性	优于 0.5 nT·d^{-1}, 10 nT·a^{-1}
温漂系数	优于 0.1 nT·K^{-1}

1.2　基于 CPT 效应的标量磁场传感器

分析采用的标量磁场探测传感器由奥地利空间研究所 (IWF) 研制, 这一传感器是利用原子塞曼效应进行磁场探测的. 利用经特定频率调制的激光照射铷 87 气体, 当调制频率与塞曼分裂的精细能级间跃迁能量匹配时, 铷 87 原子产生相干布居囚禁效应, 原子大量吸收光子能量被激发到高能级, 激光光强变暗, 通过检测激光光强确定产生这一物理效应对应的频率, 再根据铷 87 原子磁旋比即可计算磁场大小, 其工作原理如图 3 所示. 这一传感器为 Coupled Dark State Magnetometer (CDSM), 其性能指标列于表 2.

表 2　CDSM 标量磁场传感器性能指标表

Table 2　CDSM sensor performance

参数	性能
测量范围	0∼100 000 nT
准确度	优于 0.3 nT
噪声	优于 0.03 nT·Hz$^{-1/2}$
分辨率	优于 12 pT
采样率	30 Hz

CDSM 在实现时采用双边调制的激光, 产生双 CPT 效应, 可以实现无死区和高温度适应性的标量测量. 根据原子磁旋比计算磁场, 可以保证磁场测量的绝对准确性.

为保证 CPT 效应传感器的准确性, 需要有足够的测量积分时间, 采样频率设为 30 Hz, 是磁通门传感器的一半. 仪器实现时, CPT 效应传感器测量积分时间覆盖两个磁通门采样时间, 起始时间与磁通门采样同步, 确保每个 CPT 传感器的测量值对应两个磁通门传感器的测量.

2　绝对矢量磁场校准原理

磁通门传感器的非准确性主要体现在两方面, 即基准漂移和正交性. 磁通门磁强计的基准是地面标校的结果, 与电路电子学特性和传感器材料的磁特性相关, 这些特性随时间、温度和其他空间特殊环境等因

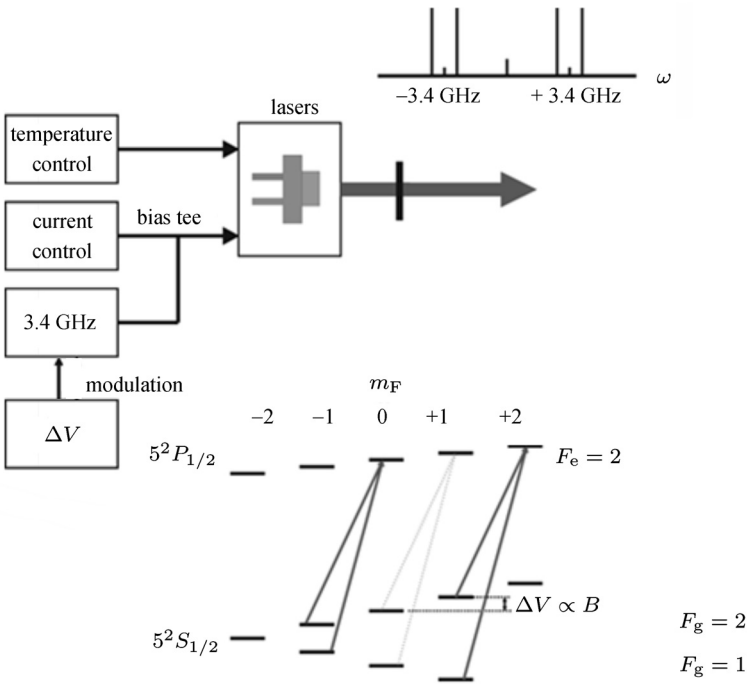


图 3 CDSM 标量磁场传感器原理示意

Fig. 3 Principle of the CDSM sensor

素的改变而改变. 一旦载荷在轨运行, 除温度特性可监测外, 其他因素影响很难预知, 测量基准会漂移且无法监控. 磁通门传感器的原理和工艺决定了其正交性很难满足地磁场准确矢量测量的要求, 考虑到地磁场约 60 000 nT 的总量, 要实现 1 nT 的准确矢量测量, 正交度要达到 0.001°. 磁通门传感器的磁轴与机械轴无法保证完全一致, 加上传感器不超过 150 mm 的结构基线, 目前组装工艺很难保证内部磁轴正交度优于 0.001°, 常规地面标校测量精度只能达到 0.05° 量级.

空间准确矢量磁场探测普遍采用磁通门矢量磁场传感器和标量传感器相结合的探测模式, 可以利用二者数据的关联性, 借助标量磁场的绝对准确性, 对矢量磁场准确性进行校正. 实际空间正交的磁场与磁通门磁场探测数据之间的关系可表示为

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} 1 & \sin\theta_{11} & \sin\theta_{21}\sin\theta_{22} \\ 0 & \cos\theta_{11} & \sin\theta_{21}\cos\theta_{22} \\ 0 & 0 & \cos\theta_{21} \end{bmatrix} \cdot \left(\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} \right). \quad (1)$$

其中, θ_{11} 为传感器 y' 轴与正交坐标 y 轴之间的夹角; θ_{21} 为传感器 z' 轴在 xy 平面投影与 x 轴的夹角; θ_{22} 是传感器 z' 轴与 z 轴之间的夹角; B_x, B_y, B_z 为空间正交三分量磁场; X, Y, Z 为传感器测量值, b_x, b_y, b_z 为传感器测量基准.

利用绝对标量磁场探测数据可以对磁通门测量的矢量磁场数据进行总场大小约束, 二者平方和相等, 即

$$B_s^2 = B_x^2 + B_y^2 + B_z^2. \quad (2)$$

其中, B_s 为磁场标量.

联立式 (1) 和式 (2) 构成一个以非正交性偏角和基准偏差为未知数的非线性方程. 一个点的测量数据无法解这一方程, 但是当有多个不同方向磁场的测量数据时, 这一方程可解.

电磁监测试验卫星是一个三轴稳定卫星, 每一轨地球磁场相对于卫星旋转一周, 磁场数据可以用来解这一方程. 这一方法实施的前提条件包括矢量磁场数据与标量磁场数据同步, 矢量磁场数据的非正交偏差角和基准偏差在这些数据中是固定的.

电磁监测试验卫星的轨道高度为 500 km, 一轨时间约为 90 min, 在这样短的时间里磁通门参数可

认为没有变化, 因此算法假设条件成立.

3　模拟试验及分析

为验证绝对矢量磁场校准算法的可行性, 研究传感器噪声及标量磁场准确度对结果的影响, 需要进行模拟试验. 试验流程如图 4 所示.

地球磁场采用的是 IGRF 模型, 轨道参数设定为 500 km, 97°, 升交点为 14:00 LT, 发射时间定为 2016 年 4 月 1 日, 运行时间 2 h. 图 5 给出的是卫星轨迹以及卫星坐标系上显示的三分量磁场. 卫星磁强计传感器设定性能指标列于表 3. 如不进行校准, 矢量单分量误差最大可达 200 nT.

利用绝对矢量磁场校准算法处理后, 三分量的误差分别如图 6 所示, 矢量单分量最大误差不超过 0.2 nT. 这一结果表明, 对最终绝对准确性影响最大的是标量传感器的数据准确性, 因为这一参数直接影响到式 (2) 的正确性, 这是不能用多数据拟合方式

表 3　模拟试验中传感器参数设置

Table 3　Sensor parameters setting

参数	性能
矢量传感器噪声	0.15 nT (RMS)
矢量传感器基准	$x = 30$ nT
	$y = 20$ nT
	$z = 50$ nT
矢量传感器正交性	$\theta_{11} = 0.5°$
	$\theta_{21} = 30°$
	$\theta_{22} = 0.3°$
标量磁场准确度	0.3 nT
标量磁场噪声	0.15 nT (RMS)

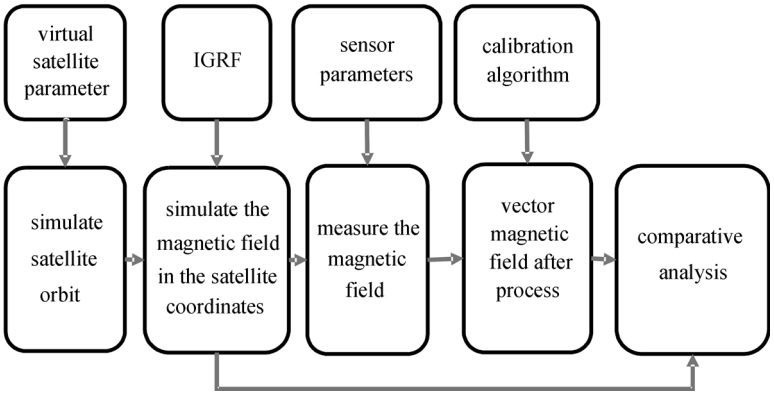


图 4　模拟试验流程示意

Fig. 4　Simulation flow diagram

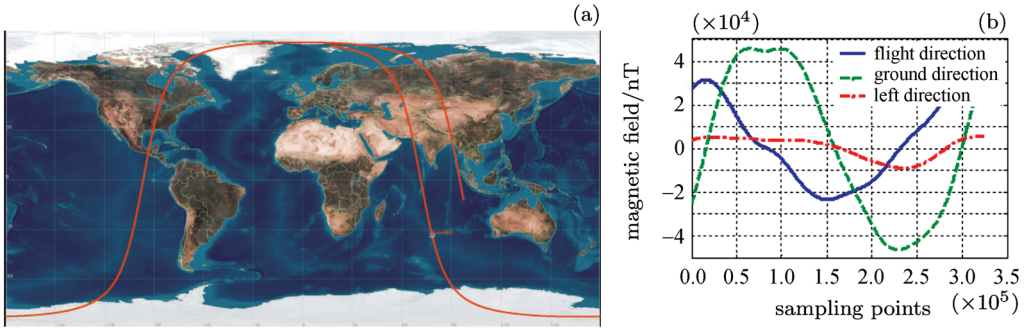


图 5　模拟轨道 (a) 和卫星坐标系下磁场测量 (b)

Fig. 5　Satellite orbit simulation (a) and magnetic field measurement on the satellite (b)

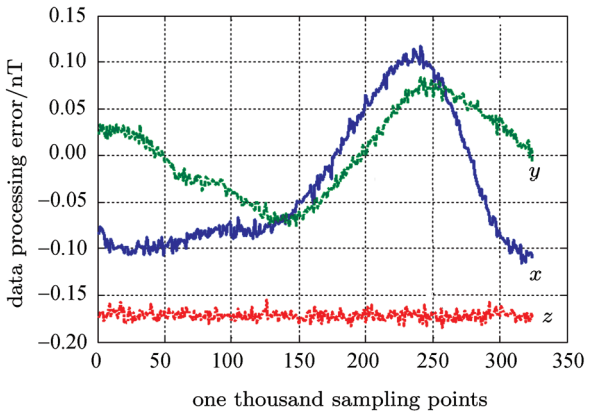


图 6 校准误差

Fig. 6 Data processing error

修正的. 传感器噪声会增大结果的随机误差, 这是可以预见的, 多数据拟合可以有效地减小其对准确度的影响.

4 结论

电磁监测试验卫星上同时部署磁通门矢量磁场探测传感器和 CDSM 标量磁场探测传感器, 结合绝对矢量磁场校准方法可以有效实施在轨准确矢量磁场探测任务, 有助于任务科学目标的实现. 这一探测方案符合磁场探测准确度越来越高的趋势, 对于中国未来即将开展的磁场测绘、深空探测等任务具有借鉴作用.

参考文献

[1] Acuna M H. Space-based magnetometers [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 2002, **73**:3717-3736

[2] Tang S C, Duffy M C, Ripka P. Excitation circuit for fluxgate sensor using saturable inductor [J]. *Sens. Act.: A*, 2004, **113**:156-165

[3] Balogh A, Dunlop M W, Cowley S W H. The Cluster magnetic field investigation: Scientific objectives [J]. *Space Sci. Rev.*, 1997, **79**:65-91

[4] Carr C, Brown P, Zhang T L. The Double Star magnetic field investigation: instrument design, performance and highlights of the first year's observations [J]. *Ann. Geophys.*, 2005, **23**:2713-2732

[5] Duret D, Bonzom J, Brochier M, Frances M. Overhauser magnetometer for the Danish Oersted satellite° [J]. *IEEE Trans. Magnet.*, 1995, **31**:3197-3199

[6] Andreas P, Roland L, Werner M, *et al.* CDSM–A New Scalar Magnetometer[C]// EGU General Assembly 2010. Vienna, Austria, 2010

[7] Zhou Bin, Zhao Hua, Wang Jindong. Martian space environment magnetic field investigation-High accuracy magnetometer [J]. *J. Space Sci.*, 2009, **29**(5):467-474. In Chinese (周斌, 赵华, 王劲东. 火星磁场探测研究—高精度磁强计 [J]. 空间科学学报, 2009, **29**:467-474)