

# 基于 Matlab 的三轴感应式磁力仪 数据预处理软件系统设计<sup>\*</sup>

陈昱 韩潇 王越 王鹏飞

(北京航空航天大学空间与环境学院 北京 100191)

**摘要** 感应式磁力仪是用于 0.01~20 kHz 空间交流磁场探测的载荷,其传感器由三轴正交的探头组成。由于卫星平台及载荷的独特性和多样性,目前没有通用的地面测试软件。为在发射前对载荷进行全面测试,设计了基于 Matlab 的数据预处理软件系统,集成波形、幅度和相位多种显示界面,并针对感应式磁力仪信号频带宽、三轴正交等特点研发了多分辨率快速傅里叶变换、滑动平均滤波、相位差计算等数据处理功能。经多阶段实验验证,软件满足对载荷全方位检测及验证要求。

**关键词** 感应式磁力仪, Matlab, 多分辨率, 滑动平均, 相位差

**中图分类号** TP 319

## Design of Data Preprocessing System Based on Matlab for Triaxial Intersecting Induction Magnetometer

CHEN Yu HAN Xiao WANG Yue WANG Pengfei

(School of Space and Environment, Beihang University, Beijing 100191)

**Abstract** The induction magnetometer is an instrument for detecting AC magnetic field from 10 Hz to 20 kHz in space. The probes are three-axis orthogonal coordinated. Because of the uniqueness and diversity, there is no general ground testing software for specified satellite platforms or payloads at present. In order to test in detail before launch, a data preprocessing software system based on Matlab is designed for induction magnetometer. The software system integrates waveform, amplitude and phase display interfaces. Meanwhile, plenty of data processing functions are designed for the characteristics of wide frequency band and three-axis orthogonal, such as multi-resolution fast Fourier transform, moving average filtering, phase difference calculation. Experiments prove that it can meet the requirements of all-directional load testing and verification.

**Key words** Induction magnetometer, Matlab, Multi-resolution, Moving average filter, Phase difference

---

\* 国家自然科学基金项目资助 (41074130, 41327802)

2017-06-01 收到原稿, 2017-07-25 收到修定稿

E-mail: chenyu2010@buaa.edu.cn

## 0 引言

感应式磁力仪工作原理是基于法拉第电磁感应定律, 主要用于空间交流磁场探测, 其工作频率范围为 0.010~20 kHz, 主要组成包括传感器、模拟放大器和电子学处理单元<sup>[1]</sup>. 其中, 传感器由三路两两正交的探头组成, 能够探测空间中的三维交流磁场信号; 模拟放大器将感应电流信号进行处理放大后由电子学处理单元采集传送至地面. 目前感应式传感器在法国 DEMETER<sup>[2]</sup>、美国 THEMIS<sup>[3]</sup> 和中国双星计划<sup>[4]</sup> 等卫星上已有应用.

由于卫星平台的多样性和卫星载荷的专用性, 不同卫星载荷定义了不同的数据包格式和数传接口, 没有通用的地面处理及显示软件, 因而需要针对载荷特性进行专用设计, 例如具有空间环境仿真功能的激光器地面测试与验证系统<sup>[5]</sup> 以及具有高精度数据计算及校正功能的重力探测数据处理软件系统<sup>[6]</sup> 等. 本文基于 Matlab 设计适用于感应式磁力仪载荷设备的数据预处理软件 (Data Transmission and Processing Program, DTPP). 感应式磁力仪数据具有多频段、多参数、多模式等特点. 根据数据特性, 采用多分辨率快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transformation, FFT) 方法对数据进行处理, 同时集成滑动平均滤波 (Moving Average Filter, MAF)、相位差计算、指定频点连续平均数据作图等多种算法处理与图形显示功能. 该软件代码使用 Matlab 语言, 用户能够在安装有 Matlab 软件的电脑上实现所有处理功能而不需要额外的软件辅助. 这里对该程序的集成功能和相关算法进行说明, 解析并展示两组通过感应式磁力仪实际采集数据的处理结果及图形.

## 1 软件系统设计

### 1.1 数据特点及导入

感应式磁力仪载荷数据文件由包头、载荷信息、科学数据和校验码等组成. 由于仪器有详查和巡查等多种工作模式, 而不同模式下数据包的组成也有区别, 造成载荷数据文件内容的多样性. 图 1 给出了不同模式下数据文件的组成结构, 其中低频段范围为 10~200 Hz, 中频段为 0.2~2.2 kHz, 全频段为 0.01~20 kHz.

DTPP 软件在导入多帧数据文件时, 通过查询包头找到每帧的起始位, 并根据载荷信息中工作模式和包大小判断本帧数据的结构, 进而对科学数据进行相应处理并存储. 感应式磁力仪原始数据文件为二进制代码存储格式, 其中科学数据为 ADC (Analog-to-Digital Converter) 芯片采集得到的 16 位带符号二进制数. 在数据导入阶段, 为得到 ADC 采集前端电压, 即经传感器放大后的感应电压信号, 还需将数据转换为十进制存储, 以便进行后续计算和显示, 转换公式为

$$V = \begin{cases} \frac{D_{HL}}{32767} \times 10, & D_{HL} \leq 32767; \\ \frac{D_{HL} - 65536}{32767} \times 10, & D_{HL} > 32767. \end{cases} \quad (1)$$

其中  $V$  为还原后的 ADC 采集电压值, 单位为 V.

### 1.2 三轴正交数据处理与可视化

对信号进行频谱分析可得到频率成分、分布范围、幅度分布等信息, 有助于载荷故障诊断、环境噪声、谐波分析及相位信息提取等<sup>[7,8]</sup>. 感应式磁力仪原始数据为时域波形信号, 因此软件设计采用多分辨率 FFT、AMAF、相位差、指定频点连续平均显示等方法对数据进行处理并可视化.

#### 1.2.1 多分辨率 FFT 处理

傅里叶变换是一种将信号从时域变换到频域的方法, 使信号识别、卷积、滤波处理更直观和易于实现. 由 Cooley 和 Tukey 首次提出的快速算法极大减少了实际计算量, 是当前信号分析中最常用的处理方法之一. 感应式磁力仪的搭载卫星运行于高度约 500 km 的太阳同步轨道, 可探测地球电离层的磁场扰动<sup>[9,10]</sup>, 探测信号主要从频域进行分析, 同时由于仪器采集信号频段范围宽, 软件设计可选用不同分辨率的 FFT 函数进行处理显示.

由于数据是按包读取并存储的, 不同分辨率需要的计算数据长度不同, 因此对于分辨率较高的选择需要进行拼包处理.

设  $f_s$  为仪器采样率,  $f_0$  为选择处理显示的频率分辨率,  $P_{\text{pack\_length}}$  为单包数据的包长度, 则需要拼接的包数  $P_{\text{pack\_number}} = f_s/f_0/P_{\text{pack\_length}}$ . 设当前数据矩阵为  $D_{\text{data\_seril}}$ ,  $D_{\text{data\_pack}}$  为下一包相邻数据, 通过循环  $P_{\text{pack\_number}}$  次的矩阵拼接  $D_{\text{data\_seril}}[ ] = [D_{\text{data\_seril}}[ ], D_{\text{data\_new\_pack}}]$  后得到足够的采样点, 然后进行 FFT 变换得到频谱幅度值

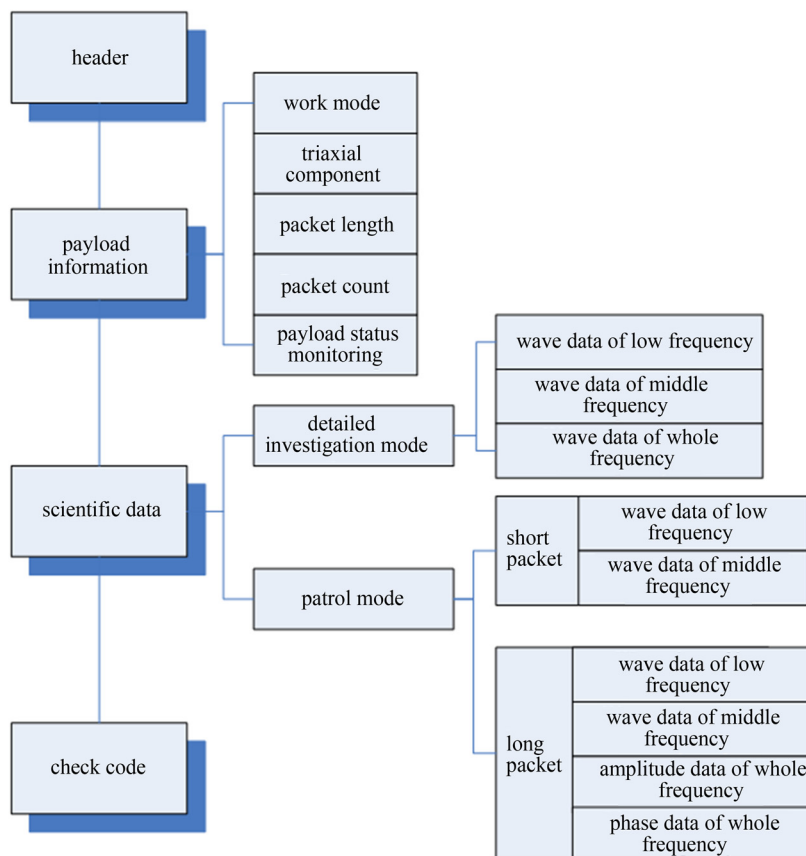


图 1 感应式磁力仪不同模式下单帧数据组成

Fig. 1 Single frame data composition of induction magnetometer in different modes

$A_{amp\_fft}$ . 理论上通过连续拼接数据包可使分辨率趋于无穷高, 即  $f_0$  的范围为  $0 < f_0 < f_s/2$ . 在实际应用中, 由于计算机性能的限制, 设计最高选用了 0.5 Hz 的分辨率进行计算 (拼接 25 包数据). 图 2 显示了输入为 200 Hz, 0.1 V 的信号时, 分辨率分别为 12.5, 5 和 0.5 Hz 的频谱.

1.2.2 MAF 处理

滑动平均滤波是一种能够有效抑制周期性干扰降低噪声的方法 [11]. 软件设计对 FFT 的频谱数据进行滑动平均滤波处理, 设平均次数为输入的任意值  $n$ , 当前幅度谱数据为  $A_{amp\_fft}^i$ , 滑动平均后的频谱数据

$$A_{avg\_fft} = \left( \sum_{j=i-n+1}^i A_{amp\_fft,j} \right) / n.$$

图 3 给出了一组三分量信号 FFT 结果经过滑动平均滤波处理前后的对比. 由图 3 可见, 平均谱线越多, 对信号随机起伏的平缓作用越明显, 越能够提高确定信号的辨识程度.

1.2.3 相位差计算

为计算不同分量信号在同频率上的相位差值, 目前已有方法包括数字相关法、过零点法和 FFT 谱分析法等 [12]. 由于系统采集信号为时域的波形数据, 因此软件设计采用 FFT 谱分析法进行相位差计算. FFT 谱分析法为时域与频域的对映映射, 其误差主要源自信号截取时的时域信号截断. 感应式磁力仪系统为三个分量同时采集数据, 截取的各分量波形为同一时间段, 因此在此时间段内各分量时域信号的相位延迟可以认为是相同的.

假设三分量输入同频信号, 其离散时域信号为

$$\begin{aligned} x(n) &= A \cos(2\pi f n T_s + \varphi_x), \\ y(n) &= B \cos(2\pi f n T_s + \varphi_y), \\ z(n) &= C \cos(2\pi f n T_s + \varphi_z), \\ n &= 0, 1, \dots, m - 1. \end{aligned} \tag{2}$$

式中  $A, B, C$  分别表示各分量信号不同频率的幅度,

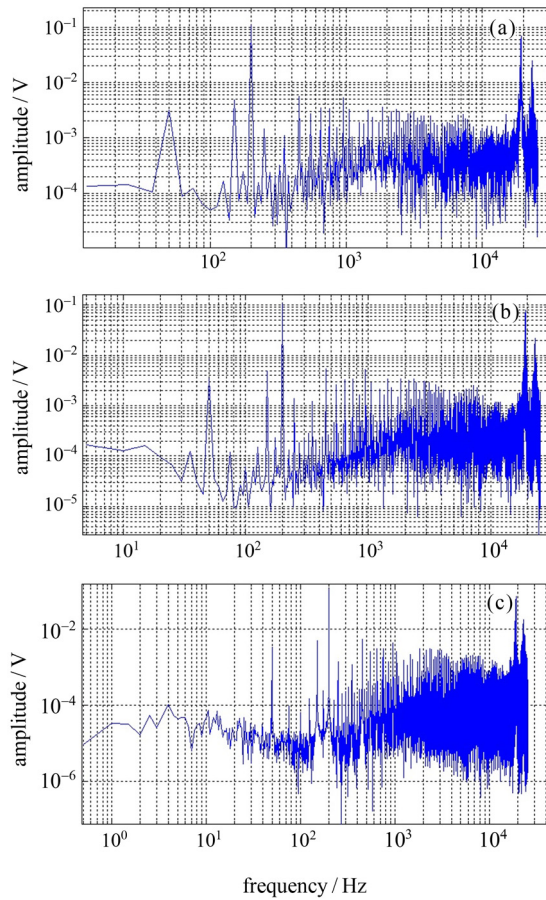


图 2 某分量不同分辨率频谱. (a) 12.5 Hz, (b) 5 Hz, (c) 0.5 Hz  
Fig. 2 Spectrum of different resolutions. (a) 12.5 Hz, (b) 5 Hz, (c) 0.5 Hz

$f$  为信号的实际频率,  $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$  为信号的初始相位,  $T_s$  为采样周期,  $m$  为采样点数. 对  $x(n)$  进行  $m$  点 FFT 得到的离散频谱为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{m-1} \left\{ x(n) \exp \left[ -j \left( \frac{2\pi}{L} \right) nk \right] \right\} = A_{xk} e^{j\varphi_{xk}}. \quad (3)$$

其中,  $A_{xk}$  和  $\varphi_{xk}$  为  $X(k)$  的幅度与相位,  $k = 0, 1, 2, \dots, m/2 - 1$ .  $x$  分量的相位为

$$\varphi_{xk} = \varphi_x + \pi(1 - 2/m)(fT_s/2 - k). \quad (4)$$

同理对  $y$  和  $z$  方向计算得到相位

$$\begin{aligned} \varphi_{yk} &= \varphi_y + \pi(1 - 2/m)(fT_s/2 - k), \\ \varphi_{zk} &= \varphi_z + \pi(1 - 2/m)(fT_s/2 - k). \end{aligned} \quad (5)$$

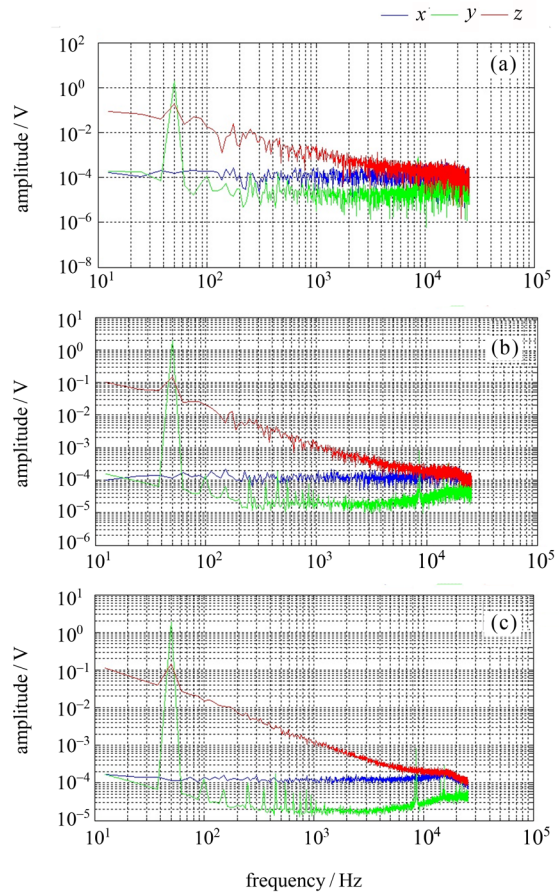


图 3 不同平均点数的 MAF 处理结果. (a) 未经过 MAF 处理的三分量信号频谱, (b) 经过  $n = 5$  的 MAF 处理后三分量信号频谱, (c) 经过  $n = 25$  的 MAF 处理后三分量信号频谱

Fig. 3 MAF processing results with different average points. (a) Frequency spectrums of three component signals without MAF, (b) frequency spectrums of three component signals with  $n = 5$  MAF, (c) frequency spectrums of three component signals with  $n = 25$  MAF

因此分量两两之间的相位差为

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_{x-y} &= \varphi_{xk} - \varphi_{yk} = \varphi_x - \varphi_y, \\ \Delta\varphi_{y-z} &= \varphi_{yk} - \varphi_{zk} = \varphi_y - \varphi_z, \\ \Delta\varphi_{z-x} &= \varphi_{zk} - \varphi_{xk} = \varphi_z - \varphi_x. \end{aligned} \quad (6)$$

根据式 (6) 可知, 信号两两之间的相位差仅与初始相位有关. 因此在软件设计时, 可通过对信号进行 FFT 处理后得到的相位值进行简单的相减运算, 得到各分量间的相位差值.

### 1.2.4 指定频点连续数据包显示

为便于对某频点进行连续观察, 软件设计了对指定频点的幅度统计画图的功能. 当系统对数据进行 FFT 处理时, 判断软件界面是否勾选单频点分布显示输入功能并读取各分量输入的频率值, 提取对应频点的幅度值存储为递增变量, 当数据包处理完毕时弹出图形框显示统计结果. 设  $A_{\text{science\_data}}\{i\}$  为第  $i$  包科学数据包的幅度谱数据,  $f_x$  为输入的指定频率

值,  $f_s$  为显示的频率分辨率, 则递增变量  $X_{\text{ave}}(i) = A_{\text{science\_data}}\{i\}(f_x/f_s + 1)$ .

## 2 测试数据验证

数据预处理软件包括可选择处理数据的数传文件操作区, 可选择显示分量、内容、FFT 滑动平均点数, 指定频点连续数据和分辨率设置的图形显示操

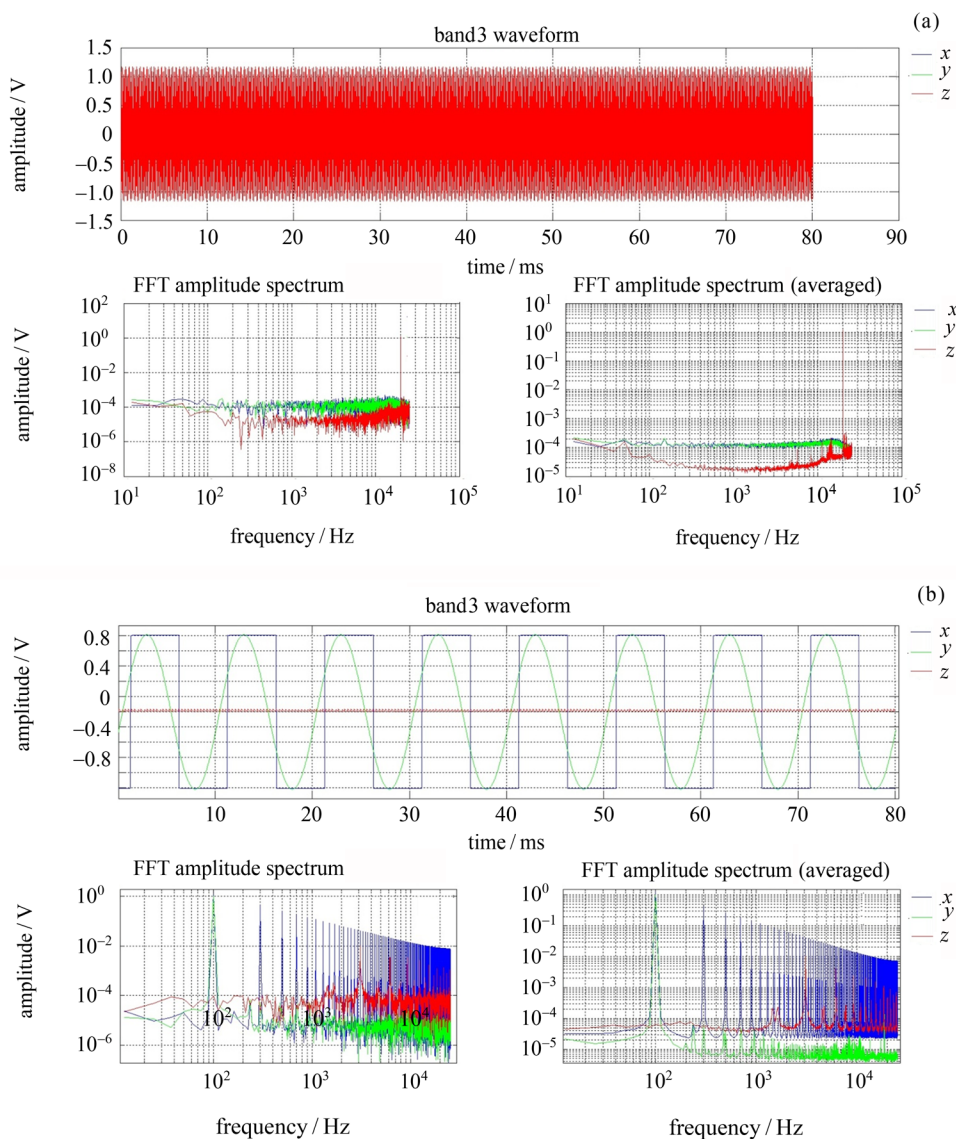


图4 数据解析后显示的波形(上中)、FFT(左下)及  $n = 25$  的 MAF(右下)图形. (a)  $x, y$  分量无输入,  $z$  分量输入 20 kHz, 1 V 正弦波. (b)  $x$  分量输入 100 Hz, 1 V, 初始  $0^\circ$  方波;  $y$  分量输入 100 Hz, 1 V, 初始  $30^\circ$  正弦波;  $z$  分量无输入

Fig. 4 Waveform after data analysis (upper, middle), FFT spectrums (left lower) and  $n = 25$  MAF results (bottom right). (a)  $x, y$  without input,  $z$  with 20 kHz, 1 V sine wave input. (b)  $x$  with square wave input of 100 Hz, 1 V and  $0^\circ$ ;  $y$  with sine wave input of 100 Hz, 1 V and  $30^\circ$ ;  $z$  without input



作区, 以及提取的相关参数并显示的参数显示区.

在软件测试中, 选择两组数据感应式磁力仪实测数据进行验证. 其中, 第一组数据为感应式磁力仪  $z$  分量输入频率为 20 kHz、幅度为 1 V 的正弦波,  $x$  和  $y$  分量无信号输入的采集数据; 第二组为感应式磁力仪的  $x$  分量输入峰值为 1 V, 频率为 100 Hz, 初始相位为  $0^\circ$  的方波;  $y$  分量输入峰值为 1 V, 频率为 100 Hz, 初始相位为  $30^\circ$  的正弦波,  $z$  分量无信号输入. 在此测试条件下采集得到的数据包经过数据预处理软件系统解析, 得到输入波形、频谱及  $n = 25$  的 MAF 处理图形, 如图 4(a) 和图 4(b) 所示. 其中各图左下为 FFT 幅度谱, 右下为经过  $n = 25$  点滑动平均处理的 FFT 幅度谱图形. 由图 4 可见, 经过 MAF 处理后

的幅度谱不会改变信号的峰值大小且信号更加直观清晰.

图 5 显示的相位差为第二组测试数据中  $x$  相位减去  $y$  相位得到的差值图形. 由于输入  $x$  初始相位为  $0^\circ$ ,  $y$  为  $30^\circ$ , 因此  $x$  与  $y$  的相位差为  $-30^\circ$ .

输入信号为 100 Hz 时, 对测试指定显示 100 Hz 与 1000 Hz 频点的各分量幅度值进行连续观察与比较, 结果如图 6 所示. 其中  $x$  分量为 100 Hz 的方波, 根据傅里叶级数展开公式<sup>[13]</sup>

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left[ \sin(\omega t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega t) + \dots \right]. \quad (7)$$

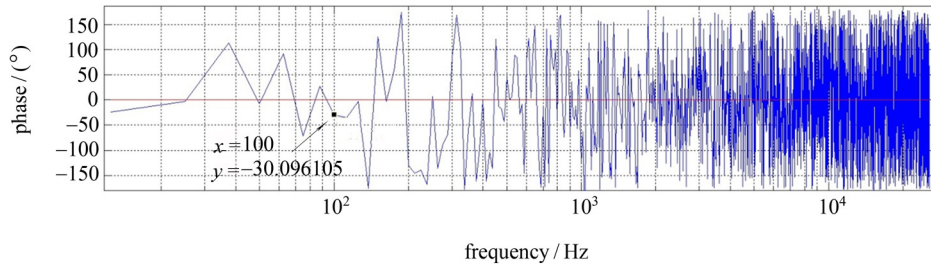


图 5 初始相位  $x$  为  $0^\circ$ ,  $y$  为  $30^\circ$  的相位差  
Fig. 5 Phase difference ( $x$  is  $0^\circ$  and  $y$  is  $30^\circ$ )

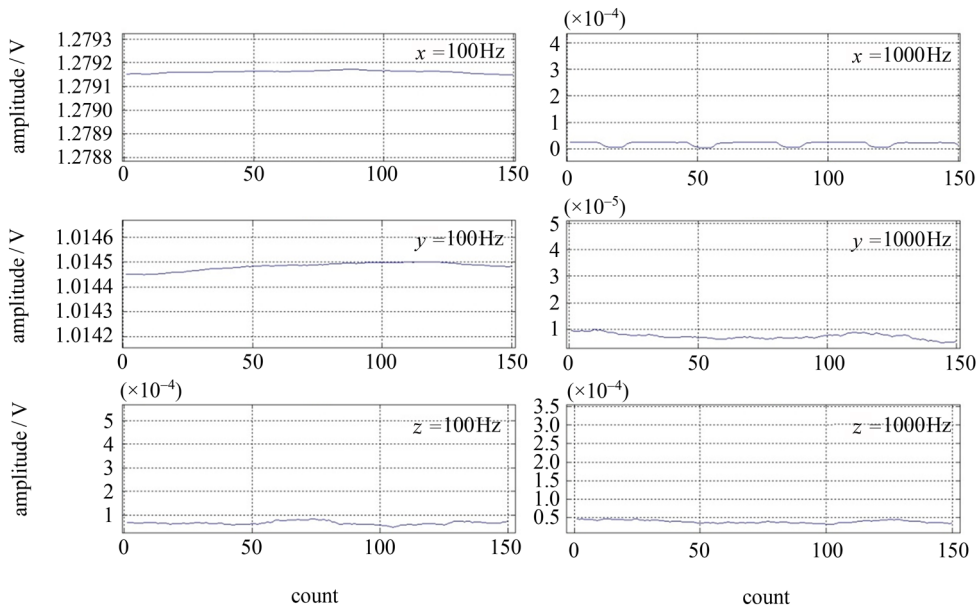


图 6 指定频点连续数据包  
Fig. 6 Continuous data of specified frequency

可得 100 Hz 频点、峰值 1 V 的方波幅值约为 1.274 V; 1000 Hz 频点的幅值理想值为 0, 实际测试值为  $10^{-4}$  V;  $y$  分量为正弦波, 因此 100 Hz 的幅值约为 1 V; 1000 Hz 的幅值为  $10^{-5}$  V;  $z$  分量没有信号输入, 因此两个频点幅度均较小, 为  $10^{-4}$  V 左右. 可见实测数据与理论值相符.

### 3 总结

设计了一种适用于感应式磁力仪载荷设备的数据预处理软件系统, 通过 FFT、MAF 和相位差等多种算法处理, 在时域、频域对数据进行了详细分析. 软件操作简单, 图形效果直观易见, 功能全面, 经过实际的科学数据验证运行正确, 具有良好的适应性和实用性, 为载荷的调试验证提供了支持.

**致谢** 曹晋滨和师雨杰对本文工作给予了帮助, 曾立和任海燕对实验测试和数据提供了支持.

### 参考文献

- [1] ZHU Wanhua, DI Qingyun, LIU Leisong, *et al.* Development of search coil magnetometer based on magnetic flux negative feedback structure [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2013, **56**(11): 3683-3689 (朱万华, 底青云, 刘雷松, 等. 基于磁通负反馈结构的高灵敏度感应式磁场传感器研制 [J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(11): 3683-3689)
- [2] SÉRAN H C, FERGEAU P. An optimized low-frequency three-axis search coil magnetometer for space research [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2005, **76**(4): 044502
- [3] LE CONTEL O, ROUX A, ROBERT P, *et al.* First results of the THEMIS search coil magnetometers [M]//BURCH J L, ANGELOPOULOS V. The THEMIS Mission. New York: Springer, 2009: 509-534
- [4] LIU Zhenxing. Geospace double star exploration project [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2001, **44**(4): 573-580 (刘振兴. 地球空间双星探测计划 [J]. *地球物理学报*, 2001, **44**(4): 573-580)
- [5] WANG J M, LI F C, LIU Y D, *et al.* Design of data communication and management system for ground test and verification devices of space laser communication [J]. *Optik-Int. J. Light Electron Opt.*, 2014, **125**(8): 1937-1941
- [6] CATTIN R, MAZZOTTI S, BARATIN L M. GravProcess: an easy-to-use MATLAB software to process campaign gravity data and evaluate the associated uncertainties [J]. *Comput. Geosci.*, 2015, **81**: 20-27
- [7] XIE Ming, ZHANG Xiaofei, DING Kang. A phase difference correction method for phase and frequency correction in spectral analysis [J]. *J. Vibrat. Eng.*, 1999, **12**(4): 454-459 (谢明, 张晓飞, 丁康. 频谱分析中用于相位和频率校正的相位差校正法 [J]. *振动工程学报*, 1999, **12**(4): 454-459)
- [8] YANG Lijuan, ZHANG Baihua, YE Xuzhen. Fast Fourier transform and its applications [J]. *Opto-Electron. Eng.*, 2004, **31**(S): 1-3, 7 (杨丽娟, 张白桦, 叶旭桢. 快速傅里叶变换 FFT 及其应用 [J]. *光电工程*, 2004, **31**(S): 1-3, 7)
- [9] ZEREN Zhima, SHEN Xuhui, CAO Jinbin, *et al.* Statistical analysis of ELF/VLF magnetic field disturbances before major earthquakes [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2012, **55**(11): 3699-3708 (泽仁志玛, 申旭辉, 曹晋滨, 等. 强震前 ELF/VLF 磁场的扰动特征统计研究 [J]. *地球物理学报*, 2012, **55**(11): 3699-3708)
- [10] YAN Xiangxiang, SHAN Xinjian, CAO Jinbin, *et al.* Statistical analysis of electron density anomalies before global  $M_W \geq 7.0$  earthquakes (2005—2009) using data of DEMETER satellite [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2014, **57**(2): 364-376 (闫相相, 单新建, 曹晋滨, 等. 利用 DEMETER 卫星数据统计分析全球  $M_W \geq 7.0$  地震的电离层电子浓度异常 [J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(2): 364-376)
- [11] GOLESTAN S, RAMEZANI M, GUERRERO J M, *et al.* Moving average filter based phase-locked loops: performance analysis and design guidelines [J]. *IEEE Trans. Power Electron.*, 2014, **29**(6): 2750-2763
- [12] XIE Changling, SUN Hong, LI Xiao. Phase difference measurement of sweep signal with rapid cycling mode based on Labview [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2015, **27**(6): 065104 (谢长玲, 孙虹, 李晓. 基于 Labview 的快循环扫频信号相位差测量算法实现 [J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(6): 065104)
- [13] HU Zhongyu, YUE Qiang, XU Dongxia. Square wave's decomposition and composition design of experiment based on Matlab simulation [J]. *Exp. Technol. Manage.*, 2014, **31**(9): 44-46, 49 (胡中玉, 岳强, 徐东霞. 基于 Matlab 的方波分解与合成仿真实验设计 [J]. *实验技术与管理*, 2014, **31**(9): 44-46, 49)