

# 多点磁场协同探测反演电离层电流密度<sup>\*</sup>

高睿<sup>1,2</sup> 李磊<sup>1</sup> 张艺腾<sup>1</sup> 刘学旺<sup>1,2</sup> 李明涛<sup>1</sup>

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要** 相对于传统的单点磁场探测, 多点磁场协同探测可以同时获得各测点磁场, 消除探测磁场随时间的变化, 能更好地计算空间电流密度. 根据由多点磁场反演计算空间电流密度的计算方法, 开展数值仿真, 分析卫星编队数量、卫星编队构型、卫星定位偏差、卫星姿态测量误差、磁场测量误差、外部磁场强度及外部电流密度等对电流反演误差的影响. 仿真结果表明, 5星编队优于4星编队. 在5星编队条件下, 卫星姿态测量误差、卫星编队构型和外部磁场强度是反演误差的主要来源. 根据仿真结果, 当卫星姿态误差为 $0.001^\circ$ , 卫星编队尺度约为100 km时, 赤道区域电流密度的反演相对误差约为24%.

**关键词** 多点探测, 磁场探测, 电离层电流密度

**中图分类号** P 353

## Inversion of the Ionospheric Current Density by Multi-point Synchronous Magnetic Field Measurements

GAO Rui<sup>1,2</sup> LI Lei<sup>1</sup> ZHANG Yiteng<sup>1</sup> LIU Xuewang<sup>1,2</sup> LI Mingtao<sup>1</sup>

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

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

**Abstract** Compared with the traditional single-point measurements, multi-point synchronous magnetic field measurements can give more accurate space current density because multi-point measurement can eliminate the temporal change in the magnetic field. Based on the current density inversion method for multi-point magnetic field measurements, the inverse current density and its error is simulated, and the effects of some factors, on the space current density inversion are analyzed. These factors conclude the number of satellites, satellite formation configuration, satellite positioning precision, satellite attitude determination error, magnetic field measurement accuracy, external magnetic field intensity, and external current density and so on. Simulation results show that 5-point measurements are better than 4-point measurements, and satellite attitude determination error, satellite

\* 国家重点研发计划项目资助 (2016YFB0501503)

2016-03-27 收到原稿, 2016-10-26 收到修定稿

E-mail: 1007586048@qq.com

formation configuration and external magnetic field intensity are the main factors causing the error of current density. According to the simulation, the maximum error of current density near the equator is about 24% as the attitude determination error is  $0.001^\circ$  and the satellite formation scale is about 100 km.

**Key words** Multi-point observation, Magnetic field measurement, Ionospheric current density

## 0 引言

根据空间磁场探测结果可建立磁场模型, 开展空间磁场变化响应的研究, 例如建立地球主磁场模型, 研究磁场在扰动过程中的变化以及对上游空间事件的响应, 开展与空间等离子体的相关研究等<sup>[1-3]</sup>. 传统空间磁场探测多采用单颗卫星原位探测的方式, 随着卫星运动, 磁场探测结果耦合了磁场随时间的变化及磁场在空间的分布. 例如采用卫星路径上各点的测量磁场计算电流密度, 由于电流密度只与磁场的空间分布有关<sup>[4]</sup>, 因此必须忽略磁场随时间的变化. 但是通过多颗卫星编队实现多点协同磁场探测, 可以消除磁场随时间的变化.

随着卫星编队技术的发展, 开展多点协同探测已经成为磁场探测的一项重要手段, 其中最具代表性的是 Cluster 计划<sup>[5]</sup>. 2000 年发射的 Cluster 由 4 颗卫星组成, 携带了磁强计等 11 种科学仪器. 通过其四面体构形, 开展等离子体边界、立体结构和电流密度等一系列观测. Cluster 促成了多项重要科学发现, 开启了利用分布式卫星组网开展科学研究的新纪元. 中国随后开展的双星计划与 Cluster 计划配合, 开展人类历史上首次 6 点立体探测, 对地球磁层进行多时空、多尺度探测研究<sup>[6]</sup>. 分布式卫星组网观测反映的是卫星编队空间尺度内的平均电流密度. Cluster 计划各星间距约 600~20 000 km, 而双星计划由一颗极轨星和一颗赤道星组成, 二者联合不能对较小尺度的物理现象开展有效观测. 2007 年发射的 THEMIS 由 5 颗卫星组成, 采用了大尺度连线组网, 远地点分别为  $10 R_e$ ,  $20 R_e$  和  $30 R_e$ , 每 4 天会在磁尾连成一条直线. 这种大尺度的组网有利于研究全球性物理过程及磁尾物理过程, 包括用来研究磁尾物理过程的时序<sup>[7]</sup>, 但同样不适合研究精细结构及电流密度分布.

在极区附近, 磁场结构变化较大且电流分布复杂, 其内部通常存在尺度较小的物理现象<sup>[8]</sup>. 通常,

极区场向电流密度在  $1 \mu\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$  以上, 电流片厚度约几百公里<sup>[9]</sup>. 通过多点协同探测消除磁场随时间的变化, 根据磁场的空间分布, 可以获得较高精度的电流密度分布. 开展极区附近小尺度的磁场结构和电离层电流密度分布等研究对于研究磁层电离层耦合及电离层对上游太阳风的响应等问题具有重要意义.

电离层中电子和离子在各种力的驱动下向不同方向运动会产生电流. 电离层中主要的驱动力来源于中性风与带电粒子的碰撞, 重力以及压强梯度. 因此, 电离层中的主要电流形式包括中性风电流、重力漂移电流和压强梯度电流 (抗磁电流). 其中, 中性风电流主要集中在 E 层 (发电机层) 约 90~150 km 的高度范围内, 在 150 km 以上随着高度增加而迅速减小. 重力漂移电流和压强梯度电流在 E 层较小, 随着高度增加而逐渐增大, 在约 400 km 高度达到极大值, 是 F 层中主要的电流形式. 综合来看, 电离层电流密度在日间的低纬度较大, 在 E 层可达几千  $\text{nA}\cdot\text{m}^{-2}$ , 在 400 km 高度约为几十  $\text{nA}\cdot\text{m}^{-2}$ <sup>[10,11]</sup>, 具体强度与电离层活动及太阳活动强度密切相关.

本文重点研究多点磁场探测反演计算电离层电流密度的方法及影响电流密度反演误差的关键因素.

## 1 计算方法

空间等离子体中的位移电流通常可以忽略. 根据安培定律, 计算空间电流密度, 有  $\mu_0 \mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B}$ . 根据多颗卫星的磁场观测数据, 计算处于各测量点几何重心处的磁场梯度张量, 从而得到磁场旋度和电流密度<sup>[12,13]</sup>.

磁场的梯度张量可表示为

$$\nabla \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \frac{\partial B_x}{\partial x} & \frac{\partial B_x}{\partial y} & \frac{\partial B_x}{\partial z} \\ \frac{\partial B_y}{\partial x} & \frac{\partial B_y}{\partial y} & \frac{\partial B_y}{\partial z} \\ \frac{\partial B_z}{\partial x} & \frac{\partial B_z}{\partial y} & \frac{\partial B_z}{\partial z} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

在以各卫星位置的几何重心为原点的坐标系内, 假设各卫星的空间位置为  $\mathbf{r}_\alpha$ , ( $\alpha = 1, 2, \dots, N$ ), 则有  $\frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{r}_\alpha = 0$ . 将各卫星测得的磁场值在八点处展开, 有

$$\mathbf{B}_{\alpha i} = \mathbf{B}_{ci} + (\partial_j \mathbf{B}_i)_c \mathbf{r}_{\alpha j} + \frac{1}{2} (\partial_j \partial_k \mathbf{B}_i)_c \mathbf{r}_{\alpha j} \mathbf{r}_{\alpha k} + \dots \quad (2)$$

其中, 下标  $c$  表示该量在八点处的值,  $i, j, k$  代表三个方向,  $\partial_j \mathbf{B}_i$  表示磁场的  $i$  方向分量在  $j$  方向的偏导数,  $\alpha$  表示卫星编号.

将式 (2) 两边同时乘以  $\mathbf{r}_{\alpha l}$ ,  $l$  代表三个方向, 再进行求和平均, 则有

$$\begin{aligned} \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{B}_{\alpha i} \mathbf{r}_{\alpha i} &= \mathbf{B}_{ci} \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{r}_{\alpha i} + \\ &(\partial_j \mathbf{B}_i)_c \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{r}_{\alpha j} \mathbf{r}_{\alpha i} + \\ &\frac{1}{2} (\partial_j \partial_k \mathbf{B}_i)_c \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{r}_{\alpha j} \mathbf{r}_{\alpha k} \mathbf{r}_{\alpha i} + \dots \end{aligned} \quad (3)$$

令  $\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2 \ \dots \ \mathbf{B}_N]$ , 其中  $\mathbf{B}_\alpha$  为列向量,  $\mathbf{B}_\alpha = [\mathbf{B}_{\alpha i} \ \mathbf{B}_{\alpha j} \ \mathbf{B}_{\alpha k}]^T$  表示  $\alpha$  卫星测得的磁场值. 令  $\mathbf{r} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \dots \ \mathbf{r}_N]^T$ , 其中  $\mathbf{r}_\alpha$  为列向量,  $\mathbf{r}_\alpha = [\mathbf{r}_{\alpha i} \ \mathbf{r}_{\alpha j} \ \mathbf{r}_{\alpha k}]^T$  表示  $\alpha$  卫星的位置, 上标  $T$  表示转置. 定义卫星编队构型的体积张量  $\mathbf{R} = \frac{\mathbf{r}^T \mathbf{r}}{N}$ , 即

$$\mathbf{R}_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{r}_{\alpha i} \mathbf{r}_{\alpha j}. \quad (4)$$

根据  $\frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \mathbf{r}_\alpha = 0$  并省略高阶项, 有

$$\frac{1}{N} \mathbf{B} \mathbf{r} = \mathbf{g} \mathbf{R}, \quad (5)$$

即

$$\mathbf{g} = \frac{1}{N} \mathbf{B} \mathbf{r} \mathbf{R}^{-1}. \quad (6)$$

其中  $\mathbf{g}$  表示几何重心处的磁场梯度张量,  $\mathbf{g}_{ij} = (\partial_j \mathbf{B}_i)_c$ .

省略的高阶项量级为  $O\left(\frac{L}{D^2}\right)$ , 这里  $D$  为磁场变化的空间尺度,  $L$  为测量点间距的尺度. 可以看出, 当  $L \ll D$  时, 可利用上述方法求磁场梯度.

## 2 数值仿真

在仿真过程中, 预设卫星编队的轨道、背景磁场及背景电流密度分布, 仿真磁场的探测数据, 并据此反演空间电流密度, 考察影响反演误差的相关要素.

卫星编队采用近地点 500 km, 远地点 1500 km 的椭圆极轨, 星间距 10~100 km, 通过 13.5 个轨道周期覆盖全部地方时. 所采用的地理坐标系  $x$  轴在地球的赤道平面上, 通过零经度子午圈,  $z$  轴平行自转轴,  $y$  轴由右手关系确定, 卫星编队中心的飞行轨迹如图 1 所示.

卫星编队采用了非扁平化设计, 在 4 颗卫星构成 4 面体构型的基础上, 增加 1 颗星作为行星伴飞. 由于轨道及编队构型的演化, 4 面体编队在一定区域内会退化到同一平面内. 通过设计伴飞的行星, 可以维持 5 颗星编队在所有区域内均保持较好的立体构型.

背景磁场为地磁场与电离层磁场之和, 地磁场采用 IGRF 地磁模型<sup>[14]</sup>, 电离层磁场根据 Engels 等<sup>[15]</sup>提出的磁场与电流耦合的模型计算, 该模型同时提供了空间磁场与空间电流的解析表达式, 且磁场的分布满足由本模型电流分布计算的毕奥萨伐定律的结果, 非常适合对反演结果进行验算. 该磁场模型在球坐标中可写为

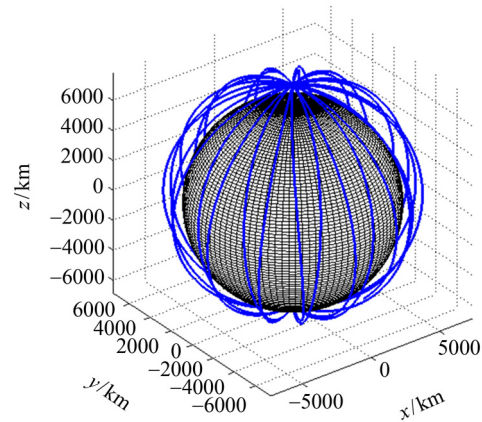


图 1 卫星编队中心的飞行轨迹

Fig. 1 Orbit of the center of the satellite cluster

$$\left\{ \begin{aligned} B_r(r, \theta, \lambda) &= \frac{i\mu_0 J_0 R_e}{4\sqrt{3}} \left\{ -2 \left[ \left( \frac{R_e}{r} \right)^3 - \frac{6}{5} \left( \frac{R_e}{r} \right)^4 \right] P_2^2 e^{2i\lambda} \right\}, \\ B_\theta(r, \theta, \lambda) &= \frac{i\mu_0 J_0 R_e}{4\sqrt{3}} \left\{ \left[ \left( \frac{R_e}{r} \right)^3 - \frac{4}{5} \left( \frac{R_e}{r} \right)^4 \right] \frac{dP_2^2}{d\theta} e^{2i\lambda} \right\}, \\ B_\lambda(r, \theta, \lambda) &= \frac{i\mu_0 J_0 R_e}{4\sqrt{3}} \left\{ \left[ \left( \frac{R_e}{r} \right)^3 \cos^2 \theta - \frac{4}{5} \left( \frac{R_e}{r} \right)^4 \right] \frac{2i}{\sin \theta} P_2^2 e^{2i\lambda} \right\}; \end{aligned} \right.$$

$$r \geq R_e. \tag{7}$$

其中,  $P_2^2$  为施密特形式缔合勒让德函数,  $R_e$  为地球半径,  $\theta$  为余纬,  $\lambda$  为经度. 由于地磁场无旋, 所以背景电流均来自电离层, 上述模型中的电流模型在球坐标中可写为

$$\left\{ \begin{aligned} J_r(r, \theta, \lambda) &= J_0 \left( \frac{R_e}{r} \right)^4 \sin^2 \theta \cos \theta e^{2i\lambda}, \\ J_\theta(r, \theta, \lambda) &= \frac{1}{2} J_0 \left( \frac{R_e}{r} \right)^4 \sin^3 \theta e^{2i\lambda}, \\ J_\lambda(r, \theta, \lambda) &= 0; \end{aligned} \right.$$

$$r \geq R_e. \tag{8}$$

其中  $J_0$  为控制系数. 沿着飞行轨迹的背景电流密度分布如图 2 所示. 根据 Engels 电流模型的设计, 电流密度分别在  $\lambda = 0^\circ, 180^\circ, \pm 90^\circ; \theta = 90^\circ$  处最强.

多点磁场协同探测反演电离层电流密度的误差

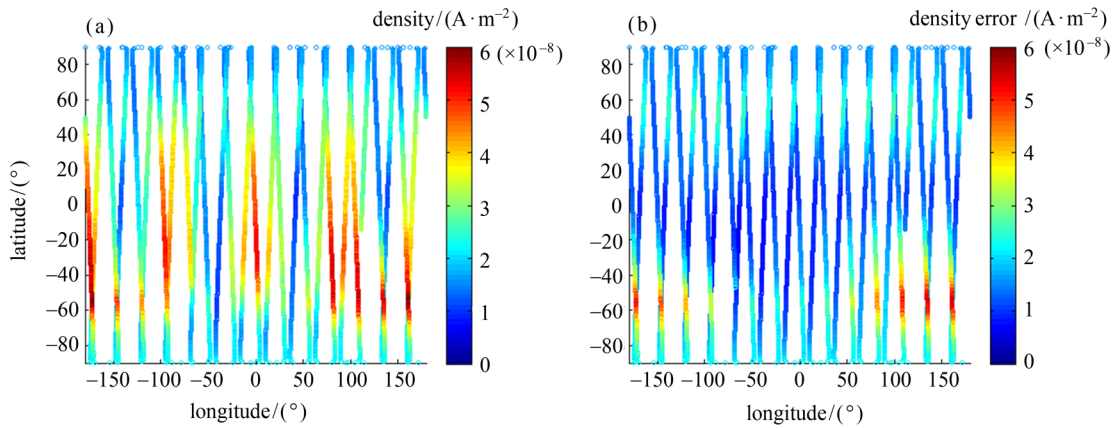


图 3 反演电流密度的分布 (a) 和反演误差分布 (b)

Fig. 3 Distributions of the inverse current density (a) and its error (b)

受到很多探测要素的影响. 在预设的卫星编队及轨道和各测量参数误差的典型值条件下 (卫星姿态测量误差  $0.001^\circ$ , 卫星定位误差 1 cm, 磁场探测误差 0.1 nT), 反演的电流密度分布及误差分布如图 3 所示. 反演误差为随机误差条件下反演电流密度与背景电流密度之差的模的数学期望. 反演电流密度同样呈现 4 个集中分布的电流区域, 基本反映了电流密度的整体分布. 反演误差整体较低, 较大误差出现在南纬  $60^\circ$  附近.

### 3 误差分析及讨论

影响磁场反演电流密度误差的因素包括卫星编

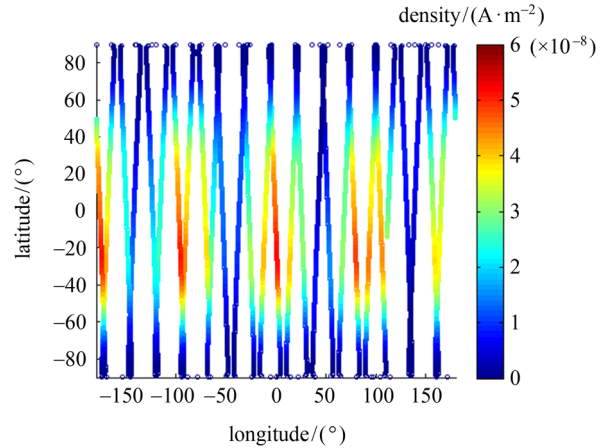


图 2 模型计算的卫星轨道上电流密度强度分布

Fig. 2 Distribution of the strength of current density on the orbit obtained by Engels model

队构型、卫星数量、卫星姿态测量误差、卫星定位误差、磁场探测误差、外部磁场强度及外部电流密度强度等.

### 3.1 卫星编队构型的影响

卫星编队构型体积张量  $R$  的特征值由大到小依次为  $a^2, b^2, c^2$ , 分别代表编队构型在三个方向上的空间尺度.  $E$  为延长度,  $E = 1 - b/a$ .  $P$  为平面度,  $P = 1 - c/b$ . 在卫星编队飞行过程中, 构型是不断演化的. 当卫星构型在某一个方向上逐渐扁平化时, 该方向磁场三分量的空间偏导数计算误差将会变大, 从而影响磁场旋度中其他两个方向的计算精度, 导致其他两个方向电流密度分量的误差变大. 通常构型的评价指数为  $E-P$  组合, 图 4 给出了 Robert 等<sup>[16]</sup> 根据不同构型得出的电流密度截断误差, 圈的大小和颜色表示相对误差的大小.

从图 4 可以看出,  $E$  和  $P$  越大, 反演误差越大, 且反演误差随  $E$  和  $P$  值大致呈弧形分布. 因此, 这里采用  $d = \sqrt{E^2 + P^2}$  作为构型指数, 对卫星编队构型进行评价.  $d$  较小时构型饱满,  $d$  较大时构型扁平. 通常, 卫星编队构型越饱满电流反演误差越小, 构型越扁平误差越大.

### 3.2 卫星数量的影响

卫星编队构型饱满程度对电流密度反演误差有明显影响. 反演计算三维电流密度矢量, 应保持至少 4 颗卫星编队, 并组成饱满的四面体构型. 在不进行轨道控制的条件下, 一般 4 颗距离较近的卫星编队构型在轨道周期内存在构型的扁平区. 在扁平区

内四面体构型可退化为平面构型, 这种构型的退化将极大地增加空间电流密度的反演误差. 通过增加第 5 颗星, 可改善扁平区时的构型指数. 图 5(a) 给出了 3 个轨道周期内不同卫星数量下卫星编队的构型指数变化, 图 5(b) 为不同卫星数量下电流密度反演误差的变化.

从图 5 可以看出, 4 星编队的构型指数在极区较大, 赤道较小; 5 星编队的构型指数在极区较小, 赤道较大. 在 4 星编队的构型指数最小的一段轨道内 (赤道附近), 4 星编队的构型较为理想. 增加第 5 颗星

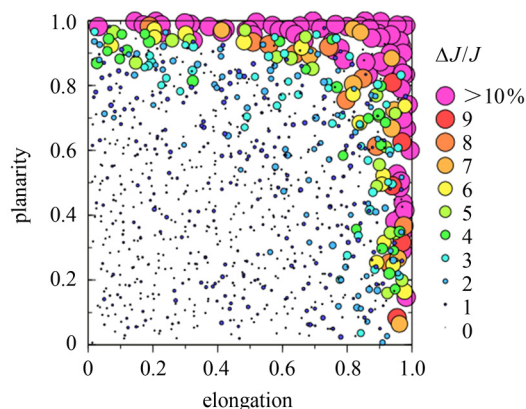


图 4 不同  $E-P$  下的电流密度截断误差分布 (圈的大小和颜色表示相对误差的大小)

Fig. 4 Relative truncation errors of the current density (The size and color of the circle represent the relative error with different  $E-P$  values)

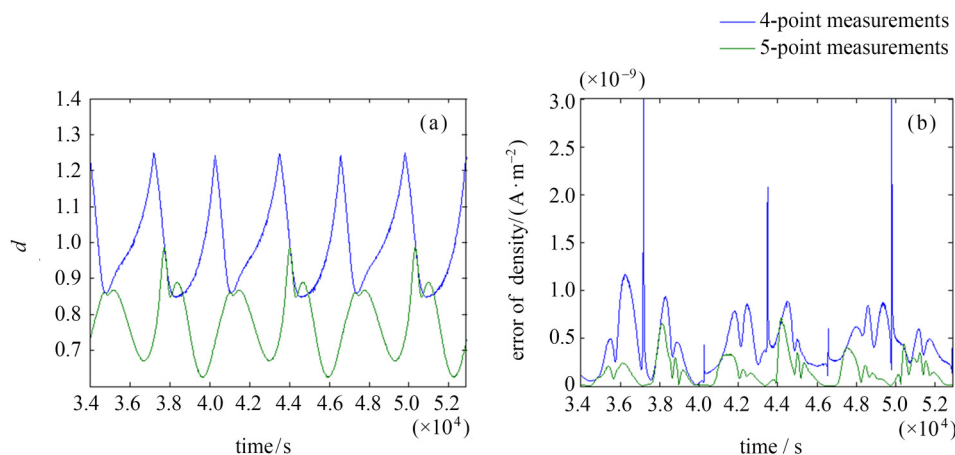


图 5 三个轨道周期内不同卫星数量下的构型指数 (a) 和反演误差 (b)

Fig. 5  $E-P$  values (a) and errors of the inverse current density (b) with different number of satellites in 3 orbital periods

后, 短时间内构型指数增大, 但是在其他大部分区域, 尤其在 4 颗星编队的扁平区内, 5 星编队的反演误差明显小于 4 星编队. 因此 5 星编队的构型指数明显优于 4 星编队的构型指数. 此外, 极区附近的 4 星编队构型指数快速增大, 相应的反演误差也快速增大, 而 5 星编队构型指数减小, 相应的反演误差也减小; 赤道附近的 4 星编队与 5 星编队的构型指数接近, 反演误差也接近. 因此, 卫星编队的反演误差变化与构型指数变化具有较强的正相关性.

### 3.3 其他因素的影响

在实际测量中, 卫星姿态测量误差、卫星定位误差、磁场探测误差、外部磁场强度及外部电流密度的强度等因素都存在测量典型值, 且对电流密度反演误差都有影响. 针对轨道上的一点 (东经 158.52°, 南纬 17.94°, 高度 695.10 km), 在不考虑其他因素影响的情况下, 某一个因素在其典型值的一定范围内变化, 其对电流密度反演误差的影响如图 6 所示.

由图 6 可见, 卫星姿态测量误差, 磁场测量误差, 外部磁场强度及卫星定位误差等参数与反演误差基本呈线性关系. 由于外部磁场强度的影响是通过卫星姿态测量误差体现的, 所以二者典型值对应的反演误差相同. 此外, 卫星定位误差对反演误差的影响最小, 卫星姿态测量误差与外部磁场强度对反演误差的影响最大. 外部电流密度的强度变化导致的反演电流密度相对误差基本不变, 因此, 外部环境如极区中出现较强的电流时, 利用多点磁场协同探测反演电流密度仍然可以获得较好的精度.

按上述误差源的仿真结果, 由某一特定测量参数导致的电流密度反演误差分别为: 卫星定位误差

为 0.01 m 时, 反演相对误差约为  $2.8 \times 10^{-5}\%$ ; 卫星姿态测量误差为  $0.001^\circ$ , 外部磁场的强度为  $3.3 \times 10^4$  nT 时, 反演的相对误差约为 23.8%; 磁场测量误差为 0.1 nT 时, 反演相对误差约为 6.7%; 外部电流密度强度不同时, 反演相对误差约为 2.6%.

### 3.4 主要误差来源

由图 3(b) 可看出, 南半球有一处明显的误差相对较大区域. 通过上述误差分析可知, 反演误差与外部条件的变化有关. 当卫星数量、卫星姿态测量误差、卫星定位误差及磁场测量误差等因素确定时, 反演误差与卫星编队构型及外部磁场强度有关. 图 7 给

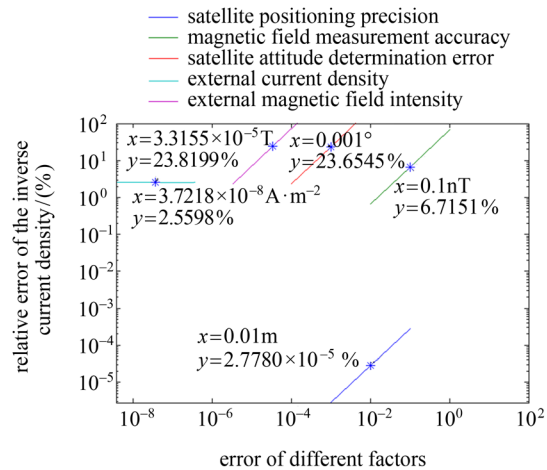


图 6 不同参数导致的电流密度反演误差 (星号处为各参数的典型值)

Fig. 6 Errors of the inverse current density induced by different factors. Asterisks stand for typical values

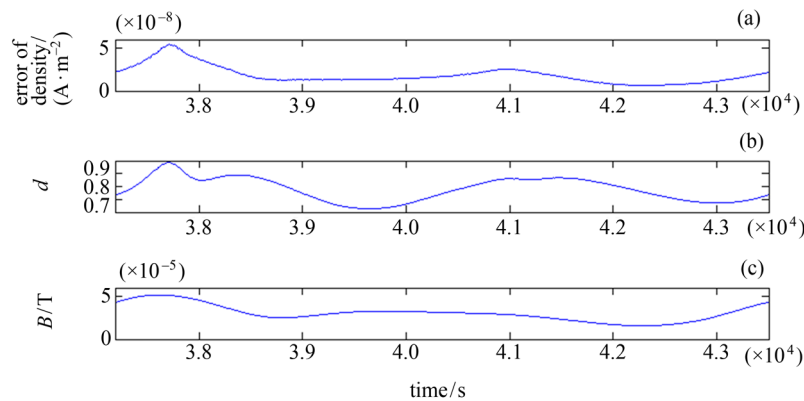


图 7 一段轨道内的反演误差 (a)、构型指数 (b) 及外部磁场强度 (c)

Fig. 7 Errors of the inverse current density (a), the  $E$ - $P$  values (b) and the magnetic field strength (c) on a part of the orbit

出了一段轨道上相关参数的变化曲线, 该段轨道跨过误差相对较大的区域.

由图 7 可见, 反演误差变化与构型指数及外部磁场强度变化有较强的相关性, 相关系数分别为 0.6432 与 0.8586, 与二者的复相关系数为 0.9625. 南纬 60° 区域的反演误差相对偏大的主要原因是外部磁场强度较大, 次要原因是卫星编队构型指数较差.

## 4 结论

依据多点磁场协同探测反演电离层电流密度的方法, 即通过计算卫星编队几何重心处的磁场梯度张量获得该处的电流密度, 对探测过程的数值仿真及仿真结果误差进行分析, 进而对卫星编队构型、编队卫星数量、卫星定位误差、卫星姿态测量误差、磁场测量误差、外部磁场强度及外部电流密度强度等因素对反演误差的影响进行分析, 可以得到如下结论.

(1) 卫星编队构型越饱满反演误差越小, 反之越差; 卫星编队为 5 星时的反演误差相对于 4 星时有明显改善.

(2) 卫星姿态测量误差和外部磁场强度是反演误差的主要来源. 姿态误差为  $0.001^\circ$  且外部磁场强度为  $3.3 \times 10^4$  nT 时, 反演相对误差约为 23.8%. 高质量的卫星姿态测量是实现电离层电流密度准确测量的保证.

(3) 在设计卫星编队时, 强磁场区应尽量保持较好的编队构型.

根据仿真结果, 采用 5 星编队, 当卫星姿态误差为  $0.001^\circ$  且编队尺度为 100 km 时, 赤道区域电流密度反演误差约为  $8.86 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$ , 此时外部电流密度为  $37.22 \text{ nA} \cdot \text{m}^{-2}$ , 相对误差约 24%. 本文所述方法可以较好地反演电离层电流密度.

## 参考文献

[1] BALOGH A, DUNLOP M W, COWLEY S W H, *et al.* The Cluster magnetic field investigation [M]//The Cluster and Phoenix Missions. Netherlands: Springer, 1997: 65-91

[2] DU J, WANG C, ZHANG X X, *et al.* Magnetic field fluctuations in the solar wind, foreshock and magnetosheath: Cluster data analysis [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(5): 368-373

[3] BAI Chunhua, XU Wenyao, KANG Guofa. Main geomag-

netic field models [J]. *Prog. Geophys.*, 2008, **23**(4): 1045-1057 (白春华, 徐文耀, 康国发. 地球主磁场模型 [J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(4): 1045-1057)

[4] ZHAO Kaihua, CHEN Ximou. Electromagnetics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2011 (赵凯华, 陈熙谋. 电磁学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2011)

[5] ESCOUBET C P, FEHRINGER M, GOLDSTEIN M. Introduction the Cluster mission [J]. *Ann. Geophys.*, 2001, **19**(10/11/12): 1197-1200

[6] LIU Zhenxing. International cooperation of Geospace double star exploration program [J]. *Bull. Chin. Acad. Sci.*, 2003, **18**(4): 309-312 (刘振兴. 地球空间双星探测计划的国际合作 [J]. 中国科学院院刊, 2003, **18**(4): 309-312)

[7] ANGELOPOULOS V. The THEMIS mission [M]. New York: Springer, 2009

[8] 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)

[9] CHENG Zhengwei. Study of the Field-Aligned Currents in the Magnetosphere-Ionosphere Coupling System [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2007 (程征伟. 磁层电离层耦合场向电流研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2007)

[10] LÜHR H, AYLWARD A, STOLLE T, *et al.* Ionospheric Current Quantification and Modelling for Improved Magnetic and Electric Field Analyses for Swarm [R]. Final Report of ESTEC Contract No 20943/07/NL/JA, 2008: 62-76

[11] ALKEN P, MAUS S, RICHMOND A D, *et al.* The ionospheric gravity and diamagnetic current systems [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2011, **116**(A12): A12316

[12] HARVEY C C. Spatial gradients and the volumetric tensor [M]//Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Reports Series, 1998: 307-322

[13] SHEN C, LI X, DUNLOP W, *et al.* Analyses on the geometrical structure of magnetic field in the Current sheet based on cluster measurements [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2003, **108**(A5): 1168

[14] XU Wenyao. Physics of Electromagnetic Phenomena of the Earth [M]. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 2009 (徐文耀. 地球电磁现象物理学 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009)

[15] ENGELS U, OLSEN N. Computation of magnetic fields within source regions of ionospheric and magnetospheric currents [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, **60**(16): 1585-1592

[16] ROBERT P, DUNLOP M W, ROUX A, *et al.* Accuracy of current density determination [M]//Analysis Methods for Multi-Spacecraft Data. ISSI Scientific Reports Series, 1998: 395-418