

文章编号: 1000-8349(2011)02-228-10



# CHAMP 加速仪资料的快速校标研究

熊永清<sup>1,2</sup>, 汪宏波<sup>1,2</sup>, 赵长印<sup>1,2</sup>, 许晓丽<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院 紫金山天文台, 南京 210008; 2. 中国科学院 空间目标与碎片观测重点实验室, 南京 210008; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 对星载加速仪进行校标是有效利用星载加速仪测量数据的基础, 目前校标方法都是建立在星载 GPS 资料处理的基础上, 对处理软件和计算设备的要求都非常高。为了满足高层大气阻力研究的需要, 提出了一种快速高效的校标方法, 即利用 GFZ 公布的 CHAMP 卫星快速轨道作为观测资料, 采用有尺度因子和线性偏差的加速仪测量值代替非引力模型摄动加速度, 采取精密定轨的手段重新进行轨道拟合, 在轨道改进的同时, 解算每一天加速仪的尺度因子和线性偏差, 并通过内部解算和外部符合来说明方法的有效性。这种方法能够提供较高时间分辨率的加速仪参数, 对研究大气密度的短期变化具有较好的价值。

**关键词:** CHAMP; 星载加速仪; 校标

**中图分类号:** P204      **文献标识码:** A

## 1 引 言

由于大气阻力是影响近地卫星运动的一种重要摄动力来源, 受到广大航天工作者的密切关注。但高层大气变化非常复杂, 有一些物理机制到目前为止仍没有被研究清楚, 从而导致多种大气模型被科研人员应用于航天领域; 它们都只能反映出高层大气变化的基本特征, 加上统计资料的分布和精度限制, 所有这些大气模型的精度都普遍不高: 内符合精度有 15% 左右的误差, 外符合精度就更难保证, 有可能达到 200% 之多<sup>[1]</sup>。所以, 继续开展高层大气及其模型的研究仍然是必要的。

CHAMP(CHALLENGING Minisatellite Payload) 是一个利用 GPS 跟踪技术精密反演地球引力场的计划。由于 CHAMP 搭载了三轴静电悬浮星载加速仪, 通过静电悬浮技术来直接测量

收稿日期: 2010-11-11; 修回日期: 2010-12-15

资助项目: 国家自然科学基金 (10773033)

卫星所受到的非引力加速度, 精度非常高, 在卫星飞行方向, CHAMP 精度高达  $10^{-9} \text{ ms}^{-2}$ [2]; 而这个飞行方向的主要非引力加速度就是大气阻力, 所以它对高层大气模型研究非常有利。另外, 这些加速度计被精确安装在卫星的质心(最大误差 2 mm), 同时卫星上还安装了恒星照相仪, 通过对背景恒星拍照实现加速度计三轴的准确定位[3], 保证了星载加速度数据从仪器坐标系到 J2000.0 平赤道坐标系的高精度转换。

CHAMP 卫星星载加速度计上天以后, GFZ (Geo Forschungs Zentrum) 通过授权的方式公布了它的资料, 在国际上掀起了一股重力卫星的研究热潮。由于星载加速度计直接测量卫星所受到的非引力加速度, 加上对科学卫星的形状、姿态等了解得比较精确, 加速度计资料也被应用于高层大气的研究, 很多工作是用加速度计资料研究磁暴对大气的影响[4,5]。

星载加速度资料是通过电信号转换而成的, 测量值对环境比较敏感, 存在着仪器偏差和尺度漂移问题, 其偏差和尺度因子不是固定不变的。国外有关文献显示, 他们校标时都是在星载 GPS 资料处理的基础上进行的[6], 对处理软件和计算设备的要求都非常高, 校标结果也存在很大的弥散[6,7]; 而且官方并没有公布每一天计算的详细校标参数, 只给出了尺度因子和偏差参数的参考值, 这一参考值是在卫星入轨初期, 利用 GPS 轨道解算每天的校标参数, 然后取多天的平均值计算得到。我们在采用参考值进行大气密度反演时, 发现存在着较大的误差。因此, 为了满足高层大气研究的需要, 我们应当研究更高分辨率的加速度计校标参数。

本文将着重讨论一种快速校标方法, 它利用国际上公布的 CHAMP 卫星快速轨道对星载加速度资料进行校标, 可以得到详细的校标参数序列(每天一组校标参数)。

## 2 定标方法和数据选择

本文采用动力学定轨的方法对 CHAMP 卫星星载加速度计资料进行校标, 将卫星星历作为伪观测进行精密定轨, 采用的力学模型如下:

- (1) 地球引力场采用 CHAMP03S,  $140 \times 140$  阶;
- (2) 海潮模型 TOPEX4.0 [8];
- (3) 固体地球潮汐采用 IERS 规范;
- (4) 地球自转参数采用 IERS Bulletin B;
- (5) 行星历表采用 JPL DE403;
- (6) 大气阻力、太阳光压和地球反照辐射压等非引力采用星载加速度计数据校正。

由于加速度计的测量值并非真实的非引力加速度值, 与其他仪器一样, 它也存在系统偏差, 因此在使用时应对其进行校标。CHAMP 卫星的加速度计测量是在加速度计轴系参考系 (Instrument fixed system, IFX) 下进行的, 在卫星组装时就固定了, 它和星固坐标系 SBF 存在如下关系:  $x$  方向反平行于 SBF 系  $z$  轴, 指向天顶;  $y$  方向平行于 SBF 系  $x$  轴, 沿前进方向;  $z$  为  $x \times y$  方向, 见图 1 [9]。图 1 中显示了 IFX 系和 SBF 系的对应关系。

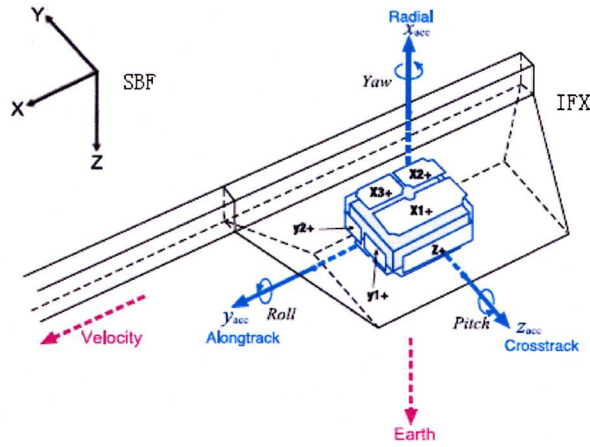


图 1 CHAMP 卫星坐标系示意图

由 SBF 坐标系到 IFX 坐标系的转换矩阵如下:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{IFX}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{SBF}}, \quad (1)$$

同时由于卫星还携带了恒星照相机, 用于测量卫星在恒星背景下的姿态, 用一个 4 元素  $q = [q_1, q_2, q_3, q_4]^T$  表示, 其中前 3 个为 3 维向量, 最后 1 个是尺度, 这样就建立了从 J2000.0 地心平赤道坐标系到星固坐标系 SBF 的转换关系<sup>[10]</sup>:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{SBF}} = \begin{bmatrix} q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ 2(q_1q_2 - q_3q_4) & -q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_2q_3 + q_1q_4) \\ 2(q_1q_3 + q_2q_4) & 2(q_2q_3 - q_1q_4) & -q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 + q_4^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{J2000}}, \quad (2)$$

于是, IFX 坐标系和 J2000.0 平赤道坐标系有如下转换关系:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{IFX}} = \mathbf{M} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{\text{J2000}}, \quad (3)$$

其中

$$\mathbf{M} \equiv \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2(q_1q_3 + q_2q_4) & -2(q_2q_3 - q_1q_4) & q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 - q_4^2 \\ q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 + q_4^2 & 2(q_1q_2 + q_3q_4) & 2(q_1q_3 - q_2q_4) \\ -2(q_1q_2 - q_3q_4) & q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 - q_4^2 & -2(q_2q_3 + q_1q_4) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

由于加速仪测量是在 IFX 参考系的 3 个方向独立进行的, 因此常见的方法是对仪器的 3 个方向测量分别定义尺度因子 (scale) 和线性偏差 (bias), 并作为待估参数, 在实测数据的约

束下解算其他参数的同时解算这 6 个参数, 其定义如下:

$$a_i = scale_i \cdot a_i^0 - bias_i + C_i^{\text{lorentz}}, \quad i = 1, 2, 3, \quad (5)$$

其中  $i$  表示 IFX 的 3 个方向,  $a_i^0$  是加速仪对各方向加速度的测量值,  $C_i^{\text{lorentz}}$  是对应的洛伦兹力改正,  $a_i$  是改正后的加速度值。于是 J2000.0 平赤道坐标系下的加速度对尺度因子和线性偏差的偏导数为:

$$\frac{\partial \alpha_{\text{J2000}}}{\partial (scale)_i} = \begin{bmatrix} M_{i1} \\ M_{i2} \\ M_{i3} \end{bmatrix} \cdot \alpha_i^0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \alpha_{\text{J2000}}}{\partial (bias)_i} = \begin{bmatrix} M_{i1} \\ M_{i2} \\ M_{i3} \end{bmatrix} \cdot \alpha_i^0, \quad i = 1, 2, 3$$

这样在精密定轨过程的轨道积分同时, 也可积分得到状态转移矩阵<sup>[11]</sup>, 然后可以利用统计定轨的方法确定初始历元的轨道根数和加速仪测量的尺度因子及线性偏差。为了避免 GPS 处理的复杂环节, 减少对计算机处理能力的限制, 在满足高层大气研究的前提下, 我们采取从 INTERNET 网<sup>[12]</sup> 上获取 CHAMP 卫星星历作为观测量的办法, 简化了处理程序, 满足了我国对 CHAMP 卫星全部资料进行快速处理的需求。

为了尽量避免加速仪测量误差的干扰, 利用 UNW 坐标系和 IFX 坐标系的相似性, 我们对资料的野值进行了剔除, 其中 UNW 坐标系中  $U$  为切向,  $N$  为法向,  $W$  为轨道面法向。将加速仪在 IFX 系下测量的加速度转换到 UNW 系, 然后利用  $U$  方向的加速度进行野值剔除, 有以下 3 项野值判断准则:

- (1) IFX 坐标系的  $y$  轴测量数据大于零, 判断为野值;
- (2)  $U$  方向的加速度分量大于零, 判断为野值;
- (3)  $U$  方向和  $y$  方向的加速度差值大于  $1.26 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-2}$ , 判断为野值<sup>[13]</sup>。

因为在定轨过程中没有采用大气阻力模型等非引力模型, 而是采用有尺度因子和线性偏差的加速仪测量模型, 经过处理后加速仪测量的采样间隔为 10 s, 加速仪测量资料的长期中断必然会引起很大的轨道误差, 因此我们只能选择加速仪资料比较连续的弧段进行校标的精密定轨过程, 同时认为校标结果可推广到全天资料。经过多次试算, 我们选择的标准是: 相邻两个资料点之间的时间间隔不超过 130 s。这时我们认为连续, 当积分需要中间点时采用 3 点 2 次内插值补充, 在此间隔下, 能够保证插值算法的精度。当然定轨的弧段也不能太短, 否则校标结果误差会很大, 失去校标的意义, 所以我们选择最短的弧长为 0.2 d。

### 3 CHAMP 卫星的定标结果

根据第 2 章介绍的方法, 我们处理了 2001—2008 年的全部 CHAMP 卫星资料, 1 d 作为 1 个弧段, 其中定轨资料段取决于加速仪资料的选取。在 Pentium (R) 4 CPU 2.66G 512M 内

存的计算机上, 对 1 d 数据进行校标的时间几乎都小于 2 min。图 2 显示了各天选择的最长弧段, 其中横坐标表示资料对应的时间, 纵坐标表示连续加速仪资料长度, 可见多数日子的可利用资料还是能够保证在 0.9 d 以上。

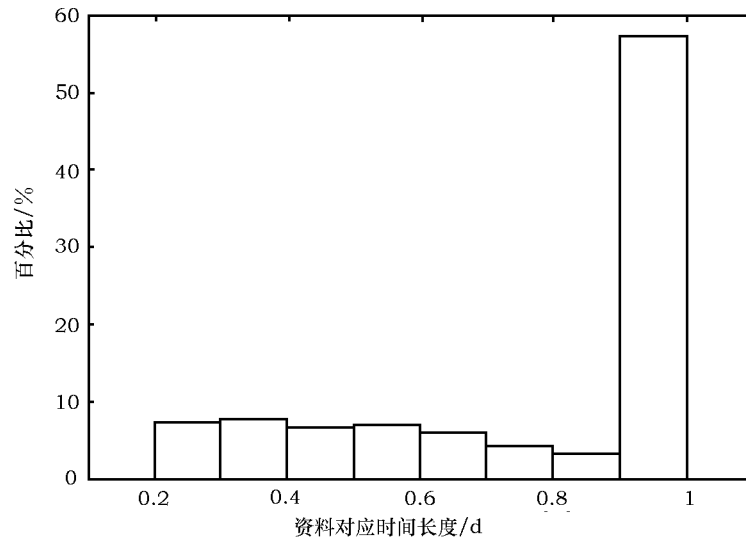


图 2 连续加速仪资料的长度

处理中我们发现加速仪测量的  $x$ 、 $y$  方向的尺度因子与线性偏差相关性非常强, 尤其是  $x$  方向。从公式 (5) 可以看出, 若  $a_i^0$  保持一个常数, 尺度与偏差是完全相关的, 根本没有办法分辨, 所幸的是  $a_i^0$  是有变化的, 但仍然保持了这种强相关性, 特别是  $x$  方向测量本身出现了问题使得相关性更强。图 3 表示了解算  $x$ 、 $y$  方向的尺度因子与线性偏差相关性: 左图和右图分别对应于  $x$  方向和  $y$  方向, 横坐标表示相关系数离 1 相差值用科学计数法表示的指数, 纵坐标表示相应指数区间所占总数的百分比, 可见这两个方向的相关系数都在 0.99 以上; 而解算中还发现  $z$  方向尺度因子与线性偏差相关系数一般在 0.9 以下, 因此未在图中给出。

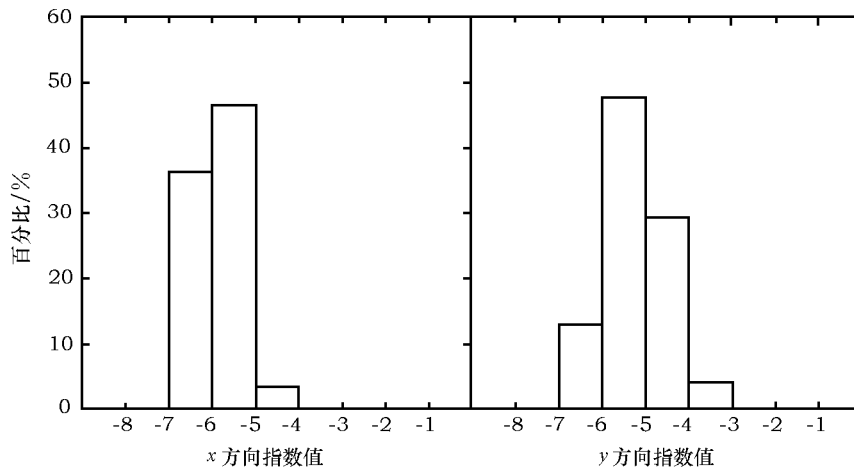


图 3 尺度因子与线性偏差的相关性

尽管如此, 由于解算中采用了 Givens-Gentlemen 正交变换, 解算结果还是比较稳定的。图 4—图 6 分别表示了处理全部 CHAMP 资料得到的  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三个方向尺度因子与线性偏差的解算结果。其中横坐标表示资料对应的时间, 左纵坐标表示尺度因子, 右纵坐标表示解算得到的线性偏差。从中可以发现  $x$  方向的弥散度还是很大的, 这是因为  $x$  轴的数据不可靠, 原因是该方向的一个电极在工作初期曾出现了故障, 尽管在下载的加速仪数据中给出了针对  $x$  轴为弱敏感轴的固有特性而增加的修正, 但并没有完全修复<sup>[14]</sup>。从图 4—图 6 也可以看出尺度因子与线性偏差的相关性; 另外还可以看出, 2005 年之前解算各个参数的弥散度比 2005 年之后的好, 说明 2005 年之前的资料比较稳定, 获得的校标参数当然也较好。

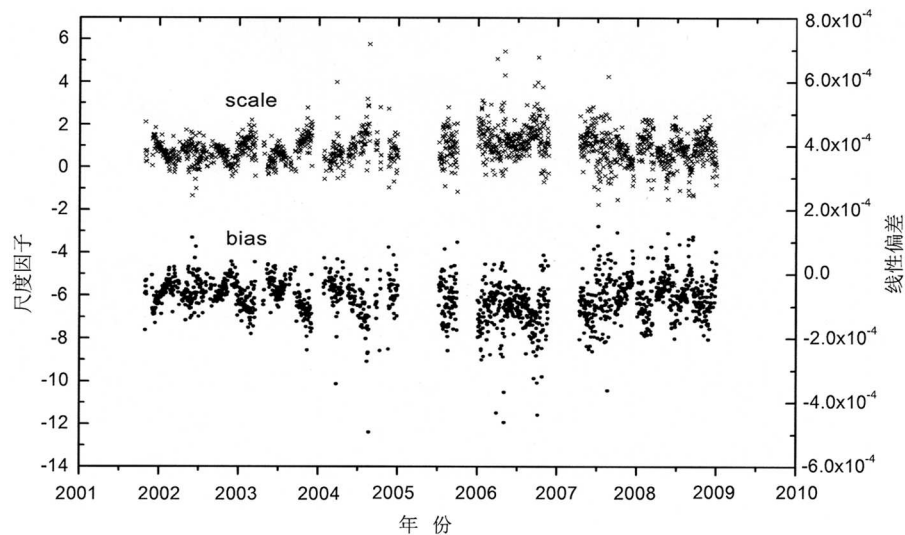


图 4  $x$  方向的尺度因子与线性偏差

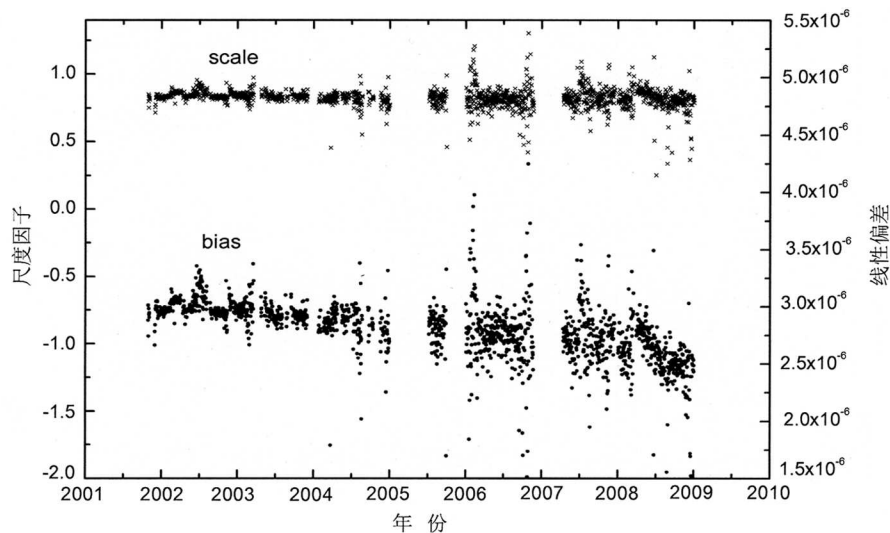
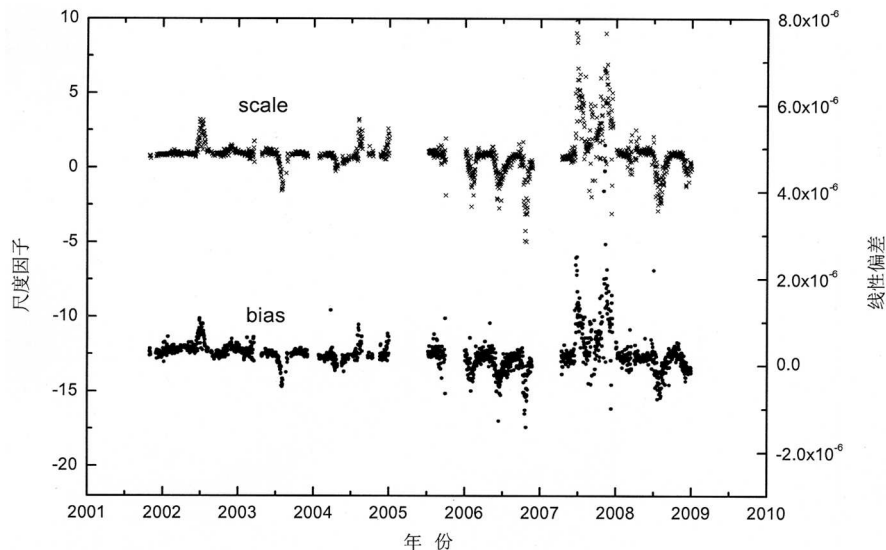


图 5  $y$  方向的尺度因子与线性偏差

图 6  $z$  方向的尺度因子与线性偏差

对图 4—图 6 中前 100 d 三个方向的尺度因子与线性偏差进行平均, 结果对应于表 1 右侧, 对比于表 1 左侧官方参考值, 可见除  $x$  方向外,  $y$  方向与  $z$  方向的尺度因子和线性偏差均值与官方值非常接近, 这也说明我们的结果比较可信。

表 1 CHAMP 卫星尺度因子和偏差值

Ax	官方参考值		前 100 d 平均值	
	Scale	Bias/ms <sup>-2</sup>	Scale	Bias/ms <sup>-2</sup>
$x$	1.000	$-8.400 \times 10^{-5}$	0.713	$-5.945 \times 10^{-5}$
$y$	0.833	$3.555 \times 10^{-6}$	0.834	$2.975 \times 10^{-6}$
$z$	0.875	$4.300 \times 10^{-7}$	0.852	$3.268 \times 10^{-7}$

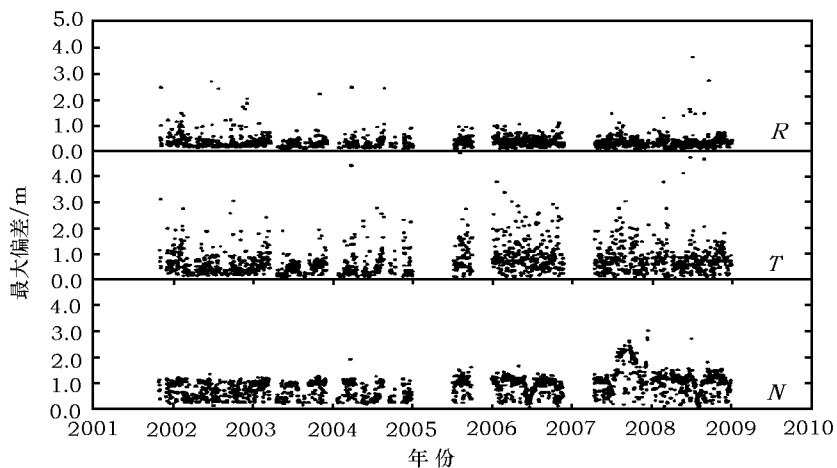


图 7 解算后作为观测轨道的残差

由于精密定轨中观测量采用的是 CHAMP 的精密轨道, 因此解算后资料的残差也能在一定程度上反映解算参数的可信程度, 这里当然包括加速仪的尺度因子和线性偏差参数。图 7 表明了解算后卫星的星历与 GFZ 公布的标准星历在  $R$ 、 $T$ 、 $N$  三个方向的最大偏差,  $R$  与  $N$  方向的最大偏差绝大多数都在 1 m 以下, 而  $T$  方向的最大偏差也大部分保持在 1 m 以下, 可见这种模式很有效, 基本保持了原来的卫星轨道, 从而也证明了定标结果是有效的。

#### 4 定标结果的外部验证

由于得不到大量的可供直接比对的校标参数, 这里的校标结果只能依靠不相关的测量资料来判定。定标结果是建立在单日资料基础上的, 它与下一日的资料没有直接联系, 于是我们可以用下一日的外推轨道精度作为外部手段来验证定标参数的正确性。验证涉及到两个问题, 首先是 CHAMP 卫星初始状态的取值问题。若直接取快速轨道作为初值, 由于给出的快速轨道精度和截断误差的影响, 利用上一日校标参数校正当日星载加速仪来进行轨道外推的结果精度较差,  $T$  方向的最大偏差在 100 m 左右, 所以采用上一日定轨结果作为轨道初值。其次, 既然用上一日定轨结果作为轨道初值, 就必须保证星载加速仪资料的连续性, 它必须从上一日连续到下一日, 并保持间断间隔不超过 130 s。根据以上讨论, 我们利用 2002 年满足以上连续条件的资料来对定标结果进行验证。图 8 给出了利用前一日轨道和校标参数外推下一日轨道在  $R$ 、 $T$ 、 $N$  三个方向与快速标准轨道之差的最大值,  $R$  方向的外推最大偏差大多数仍然保持在 1 m 以下,  $N$  方向的外推最大偏差增长到 3 m 左右,  $T$  方向的外推最大偏差大部分保持在 30 m 以下, 一般为 10 m 左右。可见这种外推是有很有效的, 这应得益于正确地解算了校标参数。

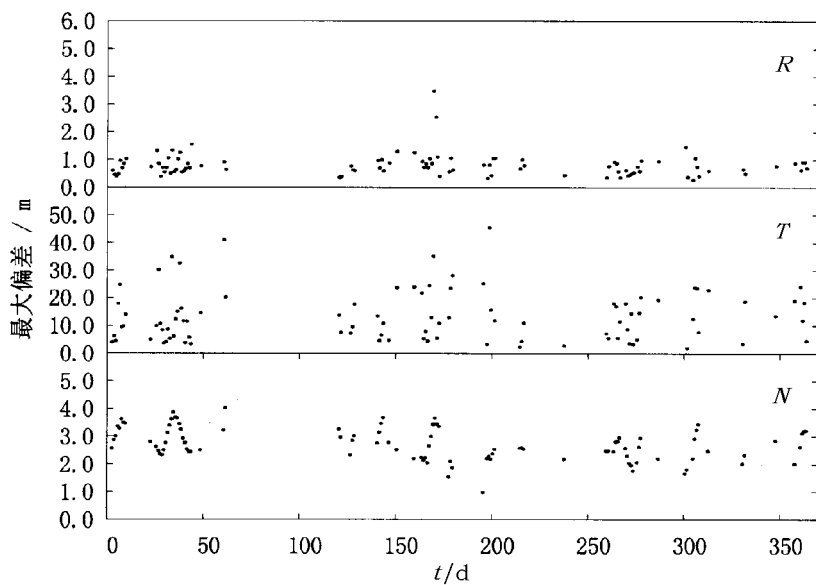


图 8 外推轨道与标准轨道之差



## 5 结 论

本文给出了 CHAMP 卫星星载加速仪的一种快速校标方法, 利用 GFZ 公布的 CHAMP 卫星快速轨道作为观测资料, 采用有尺度因子和线性偏差的加速仪测量值代替非引力模型摄动加速度, 采取精密定轨的手段重新进行轨道拟合, 在确定初始历元的 6 个轨道坐标的同时, 解算了加速仪的尺度因子和线性偏差。

经过加速仪资料的野值剔除和连续性的筛选, 对 CHAMP 历史资料进行了处理。在一台普通微机上处理 1 d 资料的时间小于 2 min, 说明了方法的高效性; 从前 100 d 的校标结果均值与官方值非常接近, 说明我们的结果可信; 从解算后资料的残差发现基本保持原来的卫星轨道, 说明尺度因子和线性偏差的有效性; 最后利用前一日轨道和校标参数外推下一日轨道来验证校标参数, 其中  $R$  和  $N$  方向的外推最大偏差较小,  $T$  方向的外推最大偏差一般也只在 10m 左右, 这对低轨道卫星是一个很好的预报结果, 也说明校标参数解算正确。

由于该方法能够计算详细的校标参数序列 (每天一组参数), 对于反演大气密度, 并研究其短期变化具有很好的价值。

## 致 谢

感谢 GFZ 数据中心提供了 CHAMP 卫星观测数据以及卫星的精密星历, 感谢审稿人的认真审阅以及提出的宝贵意见。

## 参考文献:

- [1] Marcos F A, Bowman B R, Sheehan R E. [http://sol.spacenvironment.net/~JB2006/pubs/JB2006\\_AIAA\\_2006-6167.pdf](http://sol.spacenvironment.net/~JB2006/pubs/JB2006_AIAA_2006-6167.pdf), 2011
- [2] Reigber C, Lühr H, Schwintzer P. *Adv. Space Res.*, 2002, 30: 129
- [3] Reigber C, Luhr H, Schwintzer P. Announcement of Opportunity for CHAMP, <http://op.gfz-potsdam.de/champ>, 2001: 5
- [4] Forbes J M, Lu G, Bruinsma S, et al. *J. Geophys. Res.*, 2005, 101: A122S27
- [5] Bruinsma S, Forbes J M, Nerem R S, et al. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111: A06303
- [6] Helleputte T V, Doornbos P, Visser P. *Adv. Space Res.*, 2009, 43: 1890
- [7] Frommknecht B, Oberndorfer H, Flechtner F, et al. *Advances in Geosciences*, 2003, 1: 57
- [8] <ftp://ftp.csr.utexas.edu/pub/grav/OTIDES.TOPEX4.0>, 2006.9
- [9] Bruinsma S. *Journal of Geodesy*, 2003, 77: 86
- [10] 黄圳圭. 航天器姿态动力学, 长沙: 国防科技大学出版社, 1997: 238
- [11] Tapley B, Schutz B, Born G. Burlington, MA, USA: Elsevier Academic Press, 2004: 159
- [12] <ftp://data.gfz-potsdam.de>, 2010
- [13] 汪宏波, 赵长印. *天文学报*, 2008, 49: 168
- [14] [http://op.gfz-potsdam.de/champ/more/newsletter\\_CHAMP\\_004.html](http://op.gfz-potsdam.de/champ/more/newsletter_CHAMP_004.html), 2001

## A Rapid and Effective Calibration Method for CHAMP Accelerometer

XIONG Yong-qing<sup>1,2</sup>, WANG Hong-bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Chang-yin<sup>1,2</sup>, XU Xiao-li<sup>1,3</sup>,

(1. Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 2. Key Laboratory of Space Object and Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008; 3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract:** A rapid and effective calibration method for CHAMP accelerometer is developed in this work, the rapid CHAMP orbits published by GFZ are used as observations, the in-orbit calibrated accelerometer observations are used to replace the non-gravitation, and the calibration parameters, include scales and biases in the xyz direction of instrument fixed system, are estimated in the process of precise orbit determination, and in the meantime of 6 initial orbit elements estimation.

To improve the reliability of calibration, outlier eliminating and continuity selection are performed, and all the historical data of CHMP are processed. Basically the CHAMP orbits are retained from the orbit processing residuals, and the average of calibration parameters for first 100 days is very close to the official values. Moreover, the next day's orbits is used to show the validity of calibration parameters, the maximum difference in R direction is lower than 1m, and in  $N$  and  $T$  direction are about 3 m and 10 m respectively, it's a satisfied prediction for lower orbit satellite.

The method is fast, for a single-day, it just takes no more than 2 minutes in a typical PC, and can give a pair of calibration parameters for every day, so it can help to improve the air drag model, and promote the study of short-term changes in atmosphere.

**Key words:** CHAMP; accelerometer; calibration