

星载测高仪交叉点数据定轨研究

张荣之¹ 周凤歧¹ 熊 菁²

(1 西北工业大学航天学院 西安 710072)

(2 西安卫星测控中心 西安 710043)

摘要 从海洋测高卫星的发展状况入手,介绍了用测高仪数据进行定轨的意义.然后,分析了测高仪数据的误差修正模型及交叉点数据计算方法,详细介绍了 JASON-1 测高数据文件中所涉及的误差修正量和采用的模型.最后,通过仿真数据和实测数据的计算,分析了单用测高仪数据和交叉点数据进行轨道确定所能达到的精度,为未来的实际应用提供了有价值的参考.

关键词 仪器仪表; 其它诸多方面, 天体力学: 轨道确定与精度分析, 方法: 数值

中图分类号: P 111; **文献标识码:** A

1 引言

1969 年 Kaula 在 Williamstown 的研讨会上提出卫星测高的构想, 1973 年美国宇航局发射升空第 1 颗带有测高仪的卫星 — 天空试验室, 时至今日, 世界上已相继发射了 10 多颗这样的卫星^[1-3]. 最早期的测高仪卫星只能称为试验星, 目的是不断改进和实现海洋测高的理念. 直至 1978 年发射了 Seasat 卫星, 测高仪的数据才真正可用于科学研究. 从 1985 年发射的 Geosat 卫星起, 测高仪卫星所提供的数据被广泛地应用于对全球海洋和大气的的项目研究中. 精确的海洋测高卫星改变了我们研究地球和海洋的方法, 使得我们可以从整体的、系统的角度来观测海平面的变化.

一方面由于测高仪数据的精度较高, 另一方面由于地球上海洋面积远大于陆地面积, 测高仪数据的量很大, 为减少地面测控网的工作压力, 需要尽可能充分地利用测高仪数据. 因此可以将测高数据用于卫星的轨道估值, 作为轨道确定的一种补充手段.

本文从我国未来海洋卫星的实际应用需求出发, 借鉴国外公布的实际测高数据, 对单独的测高仪数据的定轨精度和交叉点数据的定轨精度进行了细致的研究, 为未来的应用提供了有价值的参考.

2 测高仪数据的误差修正模型

测高仪所测量的距离是卫星到星下点实际海平面的距离. 实际海平面与大地水准面之间的差值称为动态海面高. 我们通常所指的卫星高度是卫星到参考椭球上星下点的距

2009-10-27 收到原稿, 2009-12-20 收到修改稿

† rongzhizhang@sina.com

离. 卫星高度与测高仪测距之间的差值就是海平面的高度. 目前国外海洋卫星的精确轨道高度一般通过星载 GPS、Doris 系统及激光测距等高精度测量数据的联合定轨来确定. 测高仪所用的电磁波在途经空气传播的过程中必然会因电离和水蒸汽的吸收而造成衰减和延迟, 而在实际海平面未知的情况下, 我们通常用大地水准面近似的平均海平面来代替. 因此, 测高仪的误差源主要来自仪器、卫星轨道、大气传输和海况扰动 4 个方面.

用星载测高仪数据进行轨道确定需要首先将陆地上空的数据剔除, 再对相关误差源进行修正. 通常所用的星载测高仪的误差修正公式为^[4]

$$\Delta h = -\Delta H_G - \Delta H_{TD} - \Delta H_{SS} + \Delta H_W + \Delta H_{TR} - \Delta H_{OF}, \quad (1)$$

其中 ΔH_G 为大地水准面高程修正, ΔH_{TD} 为海潮高度修正, ΔH_{SS} 为海面地形修正, ΔH_W 为波高修正, ΔH_{TR} 为对流层折射修正, ΔH_{OF} 为天线偏置修正.

3 交叉点数据的计算

虽然星载测高仪数据有着数据全球分布的明显优势, 但用其直接定轨也存在不足. 从其误差源考虑, 海洋特性中的长波部分、海洋地形中与时间无关的项等都会被吸收到定轨结果中, 极大地影响定轨精度. 而使用交叉点数据^[5]可以消除与时间无关的海洋地形学误差项, 可以提高定轨精度. 所谓交叉点数据指地面轨迹交叉点所对应的不同的测高仪测量数据.

实际上在交叉点处正好有测量数据的情况十分罕见, 因此在计算中需要用到内部插值法来得到交叉点处的伪测量数据. 然后将交叉点的两组测量数据编号, 再按时间顺序排序, 生成交叉点的测量文件以用于定轨. 交叉点测量数据的计算和有关偏导数的计算与测高仪数据的计算方法相同, 只分步进行计算^[4]. 若弧段 1 在交叉点 t_1 时刻的残差为 y_1 、偏导数为 H_1 , 弧段 2 在交叉点 t_2 时刻的残差为 y_2 、偏导数为 H_2 , 则交叉点所对应的残差为 $y = y_1 - y_2$ 、偏导数为 $H = H_1 - H_2$.

4 JASON-1 测高仪数据分析

实测的测高仪数据来自 AVISO 网站上所提供的 JASON-1 GDR (Geophysical Data Record) 文件. 它是 30 d 后的延迟数据文件, 经过了事后的修正处理, 包括精密弹道信息、测量信息、地球物理修正信息、潮汐信息等^[6].

(1) 精密轨道

GDR 中的 JASON-1 精密轨道是由地面激光测距、Doris 和 GPS 跟踪数据联合定轨来确定的, 其径向轨道精度优于 2.5 cm (RMS). 精密轨道在文件中以经度、纬度、高度的形式给出.

(2) 测高数据

JASON-1 上的双频高度仪能够同时进行 Ku 波段和 C 波段的距离测量, 由于 Ku 波段的测量精度优于 C 波段, 因此, 我们只考虑利用 Ku 波段测量数据 (rang_ku) 进行定轨. GDR 中提供的测高仪测高数据已经经过一系列与设备有关的误差修正, 包括定标

误差、指示偏差、质心改正以及与测高仪加速度有关的诸如多普勒频移和振荡漂移。

(3) 地球物理修正

此部分修正包括两方面的内容, 一个是大气和电离层对电磁波传播的延缓作用; 另一个是海平面的波高和风速等海况对反射波的影响。干燥大气对测高数据的影响一般为常数, 约为 -2.3 m; 而对流层中的水蒸汽变化很大, 其造成测高数据的误差在 $-40\sim-6$ cm 范围变化。对流层干、湿修正的模型参数分别用 `model_dry_tropo_corr` 和 `rad_wet_tropo_corr` 来表示。电离层中自由电子的密度对电磁波的传播速度有成比例的延缓作用, 这种影响的大小可以通过测高仪携带的两种不同频段电波 (Ku 和 C) 的共同测量来预知。电离层修正的模型参数 `iono_corr_alt_ku` 在典型的 2 m 有效波高时精度能达到 0.5 cm。海况偏差包括了电磁偏差、偏斜偏差和跟踪偏差。电磁偏差指因实际海平面的粗糙造成对雷达反射波的影响, 它通常为负值。偏斜偏差的存在是由于在计算中假设了高度的概率密度函数是对称的所引起的, 而实际上存在偏斜。跟踪偏差是一种纯设备效应。海况偏差的参数 `sea_state_bias_ku` 由经验模型得到, 对于 2 m 的有效波高来说, 其误差在 $1\sim 2$ cm 范围。

(4) 大地水准面

GDR 中提供的大地水准面参数 `geoid`, 它是根据 EGM96 地球重力势模型计算而得。此模型的球谐函数的级数和阶数达到了 360 , 网格的密度达到了 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 纬度的计算范围为 $-85^\circ\sim 85^\circ$ 。

(5) 平均海平面

GDR 中提供了平均海平面参数 `mss`, 它是根据多颗海洋测高卫星数据产生的全球平均海平面模型 CLS01 得到的。

(6) 潮汐

潮汐分为海潮、固体潮、附加潮、极移潮。前 3 项都与太阳和月球的引力有关, 其中前 2 项是直接相关, 而附加潮是由海潮引起的。极移潮只与地极的变化有关。GDR 文件中给出的地心海潮参数 `ocean_tide_sol1` 或 `ocean_tide_sol2`, 分别由 GOT99.9 和 FES99 模型计算而来, 它包含了海潮和附加潮两项。固体潮由参数 `solid_earth_tide` 表示; 而极移潮由参数 `pole_tide` 表示, 扰动周期大约为 433 d 或 1 yr。

(7) 逆气压效应

根据流体静力学原理, 大气压力的增加或降低会导致海平面的降低或增高, 这种效果就称为逆气压效应。通常, 大气压增加 1 mbar 导致海平面降低约 1 cm。GDR 中逆气压效应由参数 `inv_bar_corr` 表示。参数 `hf_fluctuations_corr` 是对 `inv_bar_corr` 的修正, 它所反映的是海洋对高频风和压力 (去除了逆气压部分) 的响应。

为减少定轨中的模型误差, 实际定轨中所采用的测高数据由 (2) 式得到。精密定轨得到的卫星高度与计算高度之间的偏差如图 1 所示, 偏差范围在 ± 0.4 m, 这包括了测量误差、定轨误差、模型误差和海面异常 4 个方面的因素。

$$\begin{aligned} \text{卫星高度计算值} = & \text{测量值} + \text{对流层湿修正} + \text{对流层干修正} + \text{电离层修正} + \text{海况偏差} \\ & + \text{平均海平面} + \text{潮汐修正} + \text{逆气压效应} + \text{高频风响应} \end{aligned} \quad (2)$$

5 定轨精度分析

5.1 力学模型

定轨中所采用的摄动力模型有：(1) 地球非球形摄动 (JGM-3 地球引力场模型, 70×70); (2) 第三体引力摄动 (日、月及其余七大行星); (3) 固体潮、海潮摄动; (4) 大气阻力摄动 (MSIS-90); (5) 太阳光压摄动 (锥形地影及月影); (6) 地球辐射压摄动; (7) 广义相对论摄动; (8) 经验 RTN 周期加速度摄动.

5.2 仿真数据

为了考察定轨精度与测高仪测量精度的关系, 我们针对 1 300 km 卫星 (JASON-1 的高度就在此范围), 利用 1 d 测量精度分别为 5 m、50 cm 和 5 cm 的仿真数据进行定轨, 定轨结果改进量见表 1. 表中给出了定轨结果与准确结果在 J2000.0 惯性坐标系下的位置和速度误差.

表 1 不同精度仿真数据定轨误差

Table 1 Orbit determination errors for simulated data with different random errors

	Random error		
	5 m	0.5 m	0.05 m
X(m)	-14.20	-1.45	-0.17
Y(m)	-426.80	-42.15	-4.02
Z(m)	-14.43	-1.45	-0.15
DX(m/s)	0.9908	0.0979	0.0093
DY(m/s)	0.0416	0.0041	0.0004
DZ(m/s)	0.0068	0.0007	0.0001

从表 1 可以看出, 随着测量精度的提高, 定轨精度也会提高. 目前国际上的测高仪测量精度接近 5 cm 的量级, 因此, 理论上定轨精度可达米级.

另外, 按卫星定轨弧段从 0.2 d 到 3 d, 以 0.2 d 的增量进行定轨, 目的是为发现弧段长短与定轨精度的关系, 结果如图 2 所示. 从图中可以看出, 对于不同弧段长度的测高仪数据, 定轨误差会相应地发生变化. 基本上, 弧段太短, 定轨误差比较大; 弧段越长, 定轨误差逐渐减小并趋向于稳定. 对于卫星高度 1 300 km、测量精度 50 cm 的测高仪数据, 选择 2~3 d 弧长的数据定轨, 其误差能达到几十米的量级.

由于仿真的测高仪数据中不存在模型误差, 仿真的交叉点数据也就无法体现其消除与时间无关的海洋地形学误差项方面的优势, 因此没有必要进行仿真交叉点数据的定轨分析.

5.3 实测数据

实测数据处理结果与精密弹道的偏差如图 1 所示, 测高仪测量数据进行定轨的原始残差在 1 m 以内, 均值 4.61 cm, 均方差为 10.45 cm. 根据仿真结果分析, 定轨精度应该在几十米的量级. 由于定轨中的模型误差以及实测数据本身分布的复杂性, 实际的定轨

结果可能会更差一点. 通过实际运算, 改进量如表 2 所示, 表中各列依次为 J2000.0 惯性系下的位置和速度误差、RTN 坐标系下的位置和速度误差和 6 个轨道根数误差. 由表 2 可知, 定轨误差在百米量级, 径向 (R) 误差能保持在厘米量级, 主要是法向 (N) 和沿迹方向 (T) 的误差, 观测数据定轨的内符合误差 RMS 为 12.4 cm.

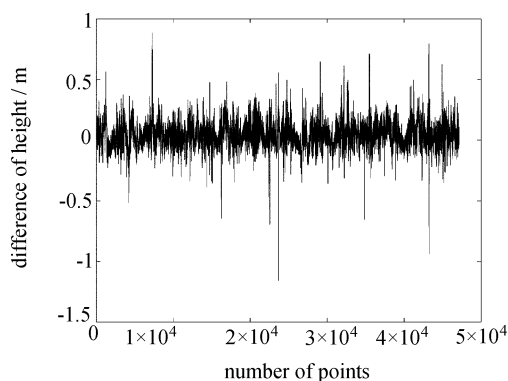


图 1 卫星的精密定轨高度与计算高度之间的偏差
Fig. 1 Difference of satellite's height between the result of precise orbit determination and the calculational result

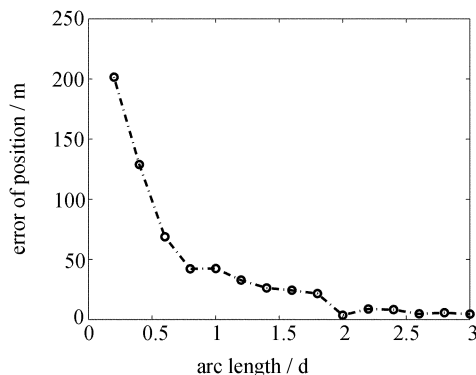


图 2 卫星定轨误差随弧段长度的变化 (测量精度 50 cm)
Fig. 2 The variation of orbit determination error with arc length (measuring precision is 50 cm)

表 2 JASON-1 实测单测高仪数据定轨误差

Table 2 Orbit determination errors using altimeter data of JASON-1

Case 1	Error	Case 2	Error	Case 3	Error
X(m)	142.57	R(m)	-0.08	a(m)	-0.04
Y(m)	164.43	T(m)	-181.25	e	-0.004881×10^{-6}
Z(m)	-3.50	N(m)	120.51	i(")	0.320485
DX(m/s)	-0.1313	DR(m/s)	0.1687	Ω (")	-12.163137
DY(m/s)	0.3855	DT(m/s)	0.00004	ω (")	0.526570
DZ(m/s)	0.0044	DN(m/s)	0.3706	M(")	-0.429815

利用单测高仪数据定轨后的卫星星历与精密卫星星历进行比较, 从图 3 可知, 定轨后位置误差均值为 329.96 m, 均方差 94.75 m, 最大值为 453.73 m, 最小值为 175.21 m.

采用交叉点测量数据定轨的结果如表 3 所示, 定轨精度在几十米的量级, 观测数据定轨的内符合误差 RMS 只有 6.2 cm. 交叉点数据定轨后的卫星星历与精密星历的位置偏差如图 4 所示, 定轨后位置误差均值为 88.80 m, 均方差 31.41 m, 最大值为 134.62 m, 最小值为 14.35 m. 与单测高仪数据相比, 定轨精度有了很大提高.

表 3 JASON-1 实测交叉点数据定轨误差

Table 3 Orbit determination errors using crossover data of JASON-1

Case 1	Error	Case 2	Error	Case 3	Error
X(m)	14.94	R(m)	-15.46	a(m)	0.054
Y(m)	33.31	T(m)	-17.13	e	-1.899520×10^{-6}
Z(m)	23.33	N(m)	36.67	i(")	-0.236314
DX(m/s)	-0.0346	DR(m/s)	0.0206	Ω (")	-2.608427
DY(m/s)	0.0702	DT(m/s)	0.0144	ω (")	186.181997
DZ(m/s)	0.0173	DN(m/s)	0.0761	M(")	0.070450

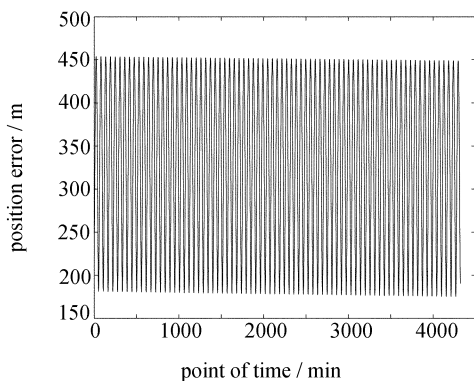


图 3 单测高仪数据定轨的卫星星历位置误差
Fig. 3 Satellite's ephemeris error determined by altimeter data

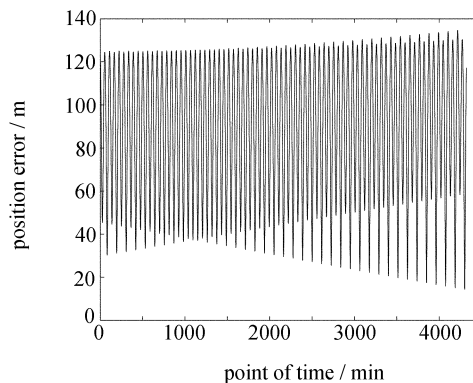


图 4 测高仪交叉点数据定轨的卫星星历位置误差
Fig. 4 Satellite's ephemeris error determined by crossover data

6 小结

从仿真数据看,利用测高仪数据进行轨道确定的精度主要取决于测高仪的测量精度,对于 5 cm 的测量精度,定轨精度能够达到米级,而实际上,由于剩余海面高和模型误差等的影响,用于定轨的测高仪数据测量精度基本在几十厘米.通过 JASON-1 实测数据的定轨计算,定轨精度在百米量级.而采用交叉点数据定轨可以极大地消除与时间无关的海面地形等误差的影响,定轨精度提高了将近一个量级,基本能达到同等测量精度仿真的测高仪数据的定轨精度.

虽然单独使用交叉点数据定轨的轨道位置确定精度在法向和沿迹方向与目前的 USB 设备定轨精度相当,但在轨道径向的确定精度远高于 USB 设备定轨精度,此外测高仪数据属于天基测控,不用全球布站即可达到全球测控的效果;而且数据量大,只要星下点

在海平面, 就有测高仪数据. 因此, 它可以作为节约测控资源条件下, 轨道确定的有效补充, 同时可大幅提高轨道径向的确定精度, 满足某些特定卫星用户轨道径向确定高精度要求.

参 考 文 献

- [1] 李建成, 宁津生, 晁定波, 等. 测绘科学, 2006, 31: 19
- [2] 翟国君, 黄谟涛, 谢锡君, 等. 卫星测高数据处理理论与方法. 北京: 测绘出版社, 2000: 1-14
- [3] 陈俊勇, 党亚民. 测绘科学, 2005, 30: 9
- [4] 李济生. 人造卫星精密轨道确定. 北京: 解放军出版社, 1995: 65-76
- [5] Tapley B D, Schutz B E, Born G H. Statistical Orbit Determination. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004: 145-147
- [6] Picot N, Case K, Desai S, et al. AVISO and PODAAC User Handbook-IGDR and GDR Jason Products. SMM-MU-M5-OP-13184-CN. 2005

Using Crossover Data from Satellite Altimeter for Orbit Determination

ZHANG Rong-zhi¹ ZHOU Feng-qi¹ XIONG Jing²

(1 *Space Institute, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072*)

(2 *Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043*)

ABSTRACT Beginning from the development status of oceanic altimeter satellites, the significance of orbit determination using altimeter data is introduced. Then, the error correcting model of altimeter data and the calculation method of crossover data are analyzed. The error correcting parameters and the adopted models which are concerned in the altimeter data files of JASON-1 are also introduced in detail. Finally, through the calculations of the simulated data and observational data, the orbit determination accuracies which can be reached by using the altimeter data and crossover data are analyzed. This work provides a valuable reference to the practical applications in future.

Key words instrumentation: miscellaneous, celestial mechanics: orbit determination and precision analysis, methods: numerical