

Geosat 卫星定轨中的大气阻力摄动^{*}

董晓军 黄 珏

主题词: 卫星观测 一定轨 一摄动 一大气阻力摄动

提 要

在利用卫星测高资料定轨的过程中, 大气阻力摄动的影响较大。本文在比较几种常用大气密度模型误差对定轨影响的基础上, 将密度改正公式引入到 Geosat 卫星的精密定轨中。结果显示, 该公式可以有效地提高卫星的径向定轨精度。

一、 引 言

Geosat 卫星是美国海军于 1985 年 4 月发射的一颗科学探测卫星, 装载一台雷达测高仪, 可以精确地测定卫星到瞬时海平面的距离, 其精度可达到 5cm。由于它可以在较短的时间内获得大量覆盖均匀的高精度的海洋表面信息, 因此在海洋学研究中具有很高的价值。而有效地利用这些数据的关键在于卫星的径向定轨精度达到相应的水平。

Geosat 卫星的高度为 800km, 在动力学模型中地球引力场摄动和大气阻力摄动误差影响较大。本文主要讨论与大气密度模型误差有关的大气阻力摄动问题。

卫星的大气阻力摄动可以表示为:

$$\vec{A}_{drag} = -\frac{1}{2}\rho_a\left[\frac{C_D A}{m}\right]\vec{V}_r\vec{V}_r \quad (1)$$

其中:

ρ_a : 大气密度

m, A : 卫星的质量和垂直于 $\vec{V}$ 方向的截面积

$\vec{V}_r$: 卫星在地心惯性系中相对大气的速度

C_D : 卫星的大气阻力系数

在大气阻力摄动中, 不确定性主要来自于 C_D, ρ_a 项。长期以来, 人们为解决这一问题做了很多工作, Jacchia 等人先后提出了多种大气密度模型, 其中包括: 指数模型, Jacchia 模型系列 (64、71、73、77), 国际参考大气模式 (CIRA72、CIRA86), Harris—prister 模型, DTM 模型 (Drag Temperature Model)。这些模型在一定程度上反应了高层大气的密度变化, 但由于大气密度变化极其复杂, 这些模型都不可能完美地描述大气密度的变化, 在这些模型中较多用于人

卫精密定轨工作的是 J71、J77 和 DTM 模型。

J71 模型也称为 Jacchia—Robert 模型, Jacchia 根据 Robert 的工作于 1971 年提出的^[1], 为了克服 Jacchia 以前模型中的缺点, J71 模型引入了 Robert 方程^[2], 并结合了较新的观测资料。该模型考虑了太阳活动、太阳自转、半年变化、周日变化和地磁的影响, 对高层大气密度作了较好的描述, 是目前人卫定轨中应用最为广泛的大气密度模型, 适用于 90km—2500km 的高层大气。

J77 模型是 Jacchia 于 1977 年发表的^[3], 主要以 OGO6 和 ESRO4 卫星的质谱仪资料和卫星阻力密度为基础, 并结合另外 10 颗卫星取得的 40811 个大气密度值^[4], 适用于 90km—2500km 的高层大气。

DTM 模型是 Barlier 等人^[5]利用两个太阳周期(1958—1975 年)内的一系列卫星阻力资料计算出的八万多个密度值和 Jacchia 以前的五万多个密度值推导出的一种新的大气密度模型, 主要适用于高度在 120km 以上的高层大气。

利用这三种大气密度模型时, 都要输入当天的地磁指数 Kp 、10.7cm 太阳辐射流量 S 和平均辐射流量 $\bar{S}'$ 。

本文在比较上述几种常用大气密度模型误差对定轨精度影响的基础上, 引入密度改正公式, 并对 Geosat 卫星测高资料进行了处理。

二、 大气密度模型误差及其影响

为了分析大气密度模型的误差, 我们分别用太阳活动高峰期(1982 年)和平静期(1986 年)的太阳辐射流量和地磁活动资料计算 Geosat 轨道上的大气密度值变化, 如图 1 所示:

由图 1 可以看出, 不同的大气密度模型之间存在着较大的差异。这种密度差异局部甚至可以达到 500%。大气密度在很大程度上取决于太阳辐射的强弱, 太阳活动高峰期的大气密度差异比平静期大几百倍, 因此对定轨的影响也要大得多。

利用 J71 大气模型产生模拟数据, 分别使用 J77 和 DTM 模型定轨并拟合模拟数据, 可以分析大气密度的不准确性对定轨的影响, 表 1 列出了在太阳活动平静期大气阻力对 Geosat 卫星定轨精度的影响。

表 1 不同大气模型对 Geosat 卫星定轨的影响

Table 1 Influences of different atmospheric model on orbit determination for Geosat satellite

模拟数据使用 Jacchia71 大气密度模型 轨道参数: $h = 800\text{km}$, $e = 0.008$, $i = 108^\circ$ 太阳活动平静期 ($\bar{S}' = 75$) 使用交叉点方法定轨 交叉点残差(cm)		
弧长	DTM	J77
5 天	20.8	9.3
17 天	74.0	35.1

图 1(a) Geosat 卫星轨道上的大气密度值变化
Fig. 1a Density variation on Geosat orbit(800km altitude)

图 1(b) Geosat 卫星轨道上的大气密度值变化
Fig. 1b Density variation on Geosat orbit(800km altitude)

从表 1 结果显示:即使在太阳活动平静期,大气密度误差对定轨仍有较大的影响。如果以

交叉点残差作为径向定轨精度^[6],并认为 J71 模型代表了真实大气模型,则大气模型误差对 Geosat 卫星五天弧段径向定轨精度的影响大约在 10—20cm 左右,而对十七天弧段,这种影响将达到 35—70cm。

三、 密度改正公式

为了减小大气密度误差对定轨的影响,在人卫工作中一般采用估计 C_D 的方法。我们采用同样的方法处理 Geosat 卫星的模拟数据:(表 2)

表 2 估计大气阻力摄动参数对定轨的影响

Table 2 Influences of atmospheric drag perturbation on orbit determination

模拟数据使用 Jacchia71 大气密度模型 轨道参数: $h = 800\text{km}$, $e = 0.008$, $i = 108^\circ$ 太阳活动平静期 ($\bar{S}' = 75$) 使用交叉点方法定轨 交叉点残差(cm)				
序号	弧长	估计参数	DTM	J77
1	5 天	C_D	2.9	7.2
2	5 天	$C_D, \bar{C}, \bar{S}$	0.5	2.9
3	17 天	C_D	15.7	33.0
4	17 天	$C_D, \bar{C}, \bar{S}$	5.2	17.9

从表 3 的结果(序号 1,3)可以看出,采用估计 C_D 的方法有效地减小了 DTM 模型和 J71 模型之间的差异对定轨的影响,而对 J77 模型和 J71 模型之间的差异的影响改进不大。结合图 1 可以发现 DTM 模型和 J71 模型之间的平均密度值相差较大。估计出的 C_D 值也能说明这一问题。在模拟数据中,我们取大气阻力系数 C_D 为 2.72。对 J77 模型估计出的 C_D 值为 2.86(五天弧段)和 2.79(十七天弧段)。对 DTM 模型分别为 3.25 和 3.21。因此,可以认为在人卫定轨工作中,采用估计 C_D 的方法可以减小大气密度模型整体偏差对定轨的影响。

即使认为 DTM 模型和 J71 模型之间的差异为 DTM 模型相对实际大气模型的误差,在太阳活动平静期,这种误差对径向定轨精度仍有大约 2.9cm(五天弧段)和 15.7cm(十七天弧段)的影响。为了进一步减小这种影响,Shum 等人提出了一种密度改正公式^[7]:

$$\rho = \rho_c [1 + \bar{C} \cos(\omega + M) + \bar{S} \sin(\omega + M)]$$

(2)

其中:

- ρ_c 大气密度模型计算出的大气密度
- ρ 改正后的大气密度
- $\bar{C}, \bar{S}$ 改正系数,一般参加估计
- ω, M 卫星的近地点角距和平近点角

高层大气受太阳辐射和地磁活动的影响很大,其变化主要包括周日项、太阳激发、地磁活动、季节—纬度项、半周日项。一般的大气密度模型把 10.7cm 太阳辐射流量和地磁指数作为变量参数拟合,在使用时输入了实际观测值,因此太阳激发和地磁活动可以得到较好拟合。而

周日项、半周日项和季节—纬度项在模型制作时就得到了确定,主要依赖于当时使用的数据,随着时间的推移,这些项也发生了变化,这时模型就不能很好地拟合大气的变化。公式(2)就是考虑到这几项的影响而设计的,将 $\bar{C}$ 、 $\bar{S}$ 作为待估参数参加估计可以减小这部分的影响。

我们把这一公式应用到对模拟资料的处理中,可以发现定轨精度得到了进一步的提高(表 2 序号 2,4),在太阳活动平静期,DTM 模型之大气密度误差对径向定轨精度的影响为 0.5cm(五天弧段)和 5.2cm(十七天弧段),其定轨精度比不用密度改正公式的情况有了明显的提高。

四、 实测资料的处理

选用 1986 年 11 月 13—18 日(五天弧段)和 13—29 日(十七弧段)的 Geosat 卫星测高数据,使用交叉点方法定轨,并引入密度改正公式(2),我们得到了以下结果:

表 3 不同大气模型定轨结果的比较

Table 3 Comparison of results of orbit determination obtained with different atmospheric model

轨道参数: $h=800\text{km}$, $e=0.008$, $i=108^\circ$ PGS-5215 引力场模型(70×70) N 体摄动(日,月),固体潮、海潮摄动 太阳直射辐射压、地球反照辐射压摄动 相对论摄动 太阳活动平静期($\bar{S}'=75$) 使用交叉点方法定轨 交叉点残差(cm)				
弧长	估计参数	J71	J77	DTM
5 天	C_D	22.5	20.4	24.2
5 天	$C_D, \bar{C}, \bar{S}$	19.0	19.6	19.0
17 天	C_D	68.6	49.3	83.8
17 天	$C_D, \bar{C}, \bar{S}$	32.1	37.0	33.8

分析表 3 的结果,可以看出:

1. 密度改正公式(2)明显地提高了径向定轨精度。尤其是对于较长的弧段,如果不引入密度改正公式,大气密度误差将是动力学模型中的最大误差源。

2. 结合表 2,即使引入了密度改正公式,大气密度误差的影响仍不能很好地减小。这种影响大致正比于弧长。因此,应尽可能地选用较短的弧段或把大气密度有关参数作为短弧参数(复弧法中的局部量)来减弱大气密度模型误差的影响。

3. J71、J77 和 DTM 模型都能较好地拟合大气密度的变化。J77 模型在仅估计 C_D 的情况下要好于另外两种模型,而在同时估计 C_D 、 $\bar{C}$ 、 $\bar{S}$ 的情况下效果较差,这可能是由于它已经考虑了大气的每圈变化。有关 J77 和 J71、DTM 模型之间的差异尚待于进一步的研究。结合表 2 的结果我们认为在引入密度改正公式之后,应选用 J71 或 DTM 模型。

五、结 论

通过上述讨论,我们主要得到以下结论:

1. 大气密度误差对定轨的影响较大,这种影响大致正比于弧长,在定轨中应尽可能地选用较短的弧段或把大气密度有关参数作为复弧法中的局部量处理。
2. 密度改正公式(2)可以较好地减小大气密度对定轨的影响,在中低轨卫星的定轨中应估计参数 C_D 、 $\bar{C}$ 、 $\bar{S}$ 。
3. 在引入密度改正公式之后,推荐使用 J71 或 DTM 模型。

参 考 文 献

- [1] Jacchia, L. G., Revised static model of the thermosphere and exosphere with empirical temperature profiles, Special Report, 332, SAO Cambridge, Mass., 1971.
- [2] Robert, C. E., An analytical model for upper atmospheric densities based upon Jacchia's 1970 model, Celest. Mech., 4(3/4), 1971.
- [3] Jacchia, L. G., Thermospheric temperature, density and composition, New methods, Special Report, 375, SAO Cambridge, Mass., 1977.
- [4] 孙长安译,在卫星测量中大气模式的应用,人造卫星观测与研究, No. 1, 1986.
- [5] Barlier, F., et al., Comparisons between various semi-empirical thermospheric models of the terrestrial atmosphere, J. Atmosph. Terrest. phys., 41, 1979.
- [6] 康莹、何妙福,卫星测高技术的发展及其应用,天文学进展, Vol. 10, No. 4, (1992) pp291—299.
- [7] Shum, C. K., et al., Atmospheric model for precision orbit determination, CSR-86-2, Center of space Research, the University of Texas at Austin, 1986.

ATMOSPHERIC DRAG PERTURBATION IN ORBIT DETERMINATION FOR GEOSAT SATELLITE

Dong Xiaojun Huang Cheng

(Shanghai Observatory, Chinese Academy of Sciences)

Key words Satellite observation—Orbit determination—Perturbation—Perturbation of atmospheric drag

Abstract

The atmospheric drag perturbation is very important in orbit determination using satellite altimeter data. This paper introduces the formula for atmospheric density correction into the precision orbit determination for Geosat satellite, based on the comparisons of the effects of various usual atmospheric density models in orbit determination. The results show that the formula can raise the radial precision of satellite orbit determination significantly.