

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2015.04.08

一种适用于导航卫星自主运行的高精度光压模型

周杨淼^{1,2}, 王 玲¹, 黄文德²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 长沙 410073)

摘要: 针对导航卫星自主运行低功耗、高精度的需求, 在综合考虑卫星本身物理性质和光压产生机理的基础上, 提出一种适用于卫星自主运行时在轨计算的光压模型。利用精密星历反解太阳光压模型参数的方法, 分析三种典型光压模型的参数特性及其精度。通过对轨道拟合和轨道预报的精度分析比较, 在传统球模型的基础上, 提出一种 3 参数的改进球模型。以 GPS 卫星为例的仿真结果表明, 改进球模型以 3 个待估参数达到 Bern 模型 (9 参数) 短期轨道预报精度的 80%, 其长期轨道预报精度也呈现出较好的特性, 模型性能满足卫星自主运行的需求。

关键词: 卫星导航; 太阳光压; 自主导航; 参数估计; 轨道预报

中图分类号: P173.4 **文献标识码:** A

1 引 言

卫星在太空中运行时受到地球非球形摄动、日月引力、太阳光压、大气阻力以及地球辐射压等多种摄动力的影响。导航卫星轨道高度一般在 2×10^4 km 左右或者高于 2×10^4 km, 太阳光压是对其影响最大的非保守力。由于卫星表面结构复杂、表面材料老化和卫星姿态偏差等因素影响, 导致太阳光压建模困难、预报精度低。在导航卫星正常运行时, 为了获得高精度的轨道, 地面控制段借助强大的地面计算资源, 通常将太阳光压参数作为待估参数在轨道确定中与轨道根数一并解算; 而在导航卫星自主运行时, 卫星无法获得地面支持, 且受星上计算资源限制, 有待寻求一种低功耗、高精度的太阳光压参数解算方法。

目前, 国内外学者建立众多的太阳光压模型。主要可以分为以下三种模型: 一是分析性模型。它是根据卫星自身物理特性和太阳光压产生机理而建立的, 一般在卫星发射之前完成。如, 最早的球模型和文献 [1] 中提到的 GPS 制造商与 IBM 公司合作研究的 ROCK 系列

收稿日期: 2015-08-07; 修回日期: 2015-09-01

资助项目: 第二代卫星导航重大专项 (GFZX0301010105)

通讯作者: 周杨淼, zhouyangmiao@qq.com

模型。这类模型物理背景清晰,模型输入参数明确,有利于轨道确定与预报,但由于空间环境复杂多变,其所建模的太阳光压与在轨卫星实际所受的太阳光压差异较大。二是经验型模型。它是根据卫星发射后的在轨运行状态分析而建立。如,文献 [2] 中瑞士伯尔尼大学通过 GPS 卫星 5.5 a 的长期在轨数据分析得到 Bern 模型 (9 参数)。这类模型能够真实反映卫星在太空中受到的光压摄动,精度较高,但是这类模型需要长期在轨数据的支撑,并且吸收了很多未模型化的摄动力影响,不利于对光压摄动变化进行单独分析。三是半经验型模型。它是综合卫星发射前自身基础属性和发射后卫星在轨状态信息而建立的。如文献 [1] 中提出了为 GPS 建立的 Adjustable box-wing 模型。它能够提高分析性模型的精度,同时克服经验型模型时效性问题,是光压模型建立与精化中一种较好的借鉴。但其模型参数较多,不利于在轨解算。

为了适应导航卫星高精度定轨和自主运行,低功耗、参数少、高精度的光压模型是必不可少的。高精度光压模型能够为自主运行提供高精度轨道初值,而且在卫星完全脱离地面段控制时,能够通过前一弧段的光压参数在轨解算,为下一弧段提供高精度的预报模型,能够高精度地预报。本文以 GPS 为例,通过对三种典型光压模型的精度特性分析,建立一种参数少、精度高的改进球模型,为导航卫星自主运行提供支持。

2 几种典型光压模型及其参数确定方法

针对不同模型,其对坐标轴的定义不同,对参数的求解也不尽相同。一是 DYB 坐标系,其中 D 轴是卫星到太阳方向, Y 轴是沿太阳帆板方向, B 轴与 D 轴、 Y 轴构成右手坐标系;二是 XYZ 坐标系,其中 Z 轴是卫星天线视场中心轴,指向地心, X 轴与 Y 轴、 Z 轴构成右手坐标系,如图 1 所示。

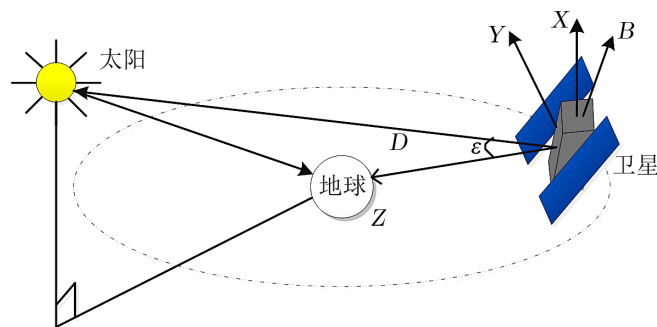


图 1 DYB 坐标与 XYZ 坐标示意图

2.1 几种典型光压模型

2.1.1 球模型

将卫星简化为球状物体进行建模, 是适用性最为广泛的光压模型。具体模型如下,

$$\mathbf{a}_{SRP} = -vP_S \left(\frac{\text{AU}}{RSUN} \right)^2 C_R \frac{A}{M} \mathbf{e}_D, \quad (1)$$

其中, v 为地影因子, P_S 为距太阳一个天文单位太阳辐射强度, AU 为 1 个天文单位, $RSUN$ 为卫星到太阳的距离, C_R 为卫星表面反射系数, A 为卫星表面受光照的有效面积, M 为卫星质量, \mathbf{e}_D 为卫星到太阳方向的单位矢量。

传统球模型是根据发射卫星物理特性得到其面质比和反射系数, 不作为待估参数, 其模型精度较低。目前, 对于球模型主要采取估算反射系数的处理方法, 模型精度较之前有一定的提高。

2.1.2 Bern 模型

将光压摄动分为三个方向即 DYB 坐标系, 如图 1 所示。同时, 通过长期历史数据分析, 发现三个方向都可分成一个常数项和二周期项。具体模型如下:

$$\mathbf{a}_{SRP} = D \cdot \mathbf{e}_D + Y \cdot \mathbf{e}_Y + B \cdot \mathbf{e}_B, \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} D = D_0 + D_C \cos \mu + D_S \sin \mu \\ Y = Y_0 + Y_C \cos \mu + Y_S \sin \mu \\ B = B_0 + B_C \cos \mu + B_S \sin \mu \end{cases}, \quad (3)$$

$D_0, D_C, D_S, Y_0, Y_C, Y_S, B_0, B_C, B_S$ 9 个参数是估计解算的。此模型精度高, 但待估参数较多。

2.1.3 Adjustable box-wing 模型

将卫星分为卫星星体和太阳帆板两部分。假设太阳帆板所受光照完全被吸收, 而星体部分所受光照完全被反射。星体部分可以分为 $+X$ 、 $+Z$ 、 $-Z$ 三个面。其具体模型如下:

对于太阳帆板部分,

$$\mathbf{a}_{SP} = -\frac{A_p}{M} P_S \left(\frac{\text{AU}}{RSUN} \right)^2 \cos \theta \left[(1 - \rho) \mathbf{e}_D + 2 \left(\frac{\delta}{3} + \rho \cos \theta \right) \mathbf{e}_N \right]; \quad (4)$$

对于卫星星体部分,

$$\mathbf{a}_{SB} = -\frac{A_{SB}}{M} P_S \left(\frac{\text{AU}}{RSUN} \right)^2 \cos \theta \left[(\alpha + \beta) \left(\mathbf{e}_D + \frac{2}{3} \mathbf{e}_N \right) \right]. \quad (5)$$

其中,

$$\cos \theta = \mathbf{e}_D \cdot \mathbf{e}_N \quad (\cos \theta \geq 0). \quad (6)$$

式 (4)、(5)、(6) 中, A_p, A_{SB} 分别为帆板、星体的有效面积; α, ρ, δ 分别为吸收率、反射率、漫反射率; \mathbf{e}_N 卫星表面的法向量; 其他参数含义同前。

作为半经验型模型,其也有9个待估参数,分别是: SP 为太阳帆板比例因子; SB 为太阳帆板旋转滞后; $+XAD$ 为 $+X$ 面的吸收率和漫反射率; $+ZAD$ 为 $+Z$ 面的吸收率和漫反射率; $-ZAD$ 为 $-Z$ 面的吸收率和漫反射率; $+XR$ 为 $+X$ 面的反射率; $+ZR$ 为 $+Z$ 面的反射率; $-ZR$ 为 $-Z$ 面的反射率。

在实际应用过程中,还需观测数据来估计模型参数。模型精度与 Bern 模型相当,对在轨数据较少的卫星精度更高,如 Block IIF,但其光压数学表达式复杂,参数较多。

2.2 光压模型参数确定方法

本文采用以精密星历反解光压模型参数的方法,通过比较光压摄动模型参数的轨道拟合精度和轨道预报精度,分析其对轨道的影响。光压模型参数确定具体流程与模型精度评估方法如图2所示。其中精密星历是从 IGS 网站下载的事后精密星历,其定轨精度可以达到5 cm。文献[4]、[5]表明,利用真实观测数据估计得到动力学参数与采用精密星历作为伪观测值得到动力学参数的方法效果相当,故为降低建模的代价,本文直接采用 IGS 精密星历来估计动力学参数。此处动力学参数就是指光压摄动模型参数。

在解算光压参数和卫星位置速度信息时,常用方法有批处理和序贯处理。由于批处理方法的解算过程更加稳定,因此本文结合参数估计和最小二乘法来解算光压参数。首先,利用 IGS 精密星历作为伪观测值,通过最小二乘法和参数估计解算得到光压参数和拟合轨道;然后用解算得到的光压参数,根据轨道动力学采用适当的积分器进行轨道积分,得到预报轨道;最后对拟合轨道、预报轨道进行精度评估分析。其中,轨道精度评估采用 $3D_{RMS}$ 值,是在 RTN 坐标系下计算得到,

$$3D_{RMS} = \sqrt{R_{RMS}^2 + T_{RMS}^2 + N_{RMS}^2} \quad (7)$$

3 改进光压球模型

一般来说,目前对于传统球模型的改善处理是结合在轨数据来解算模型参数,将其模型表达式变为如下:

$$\mathbf{a}_{SRP} = -vP_S \left(\frac{AU}{RSUN} \right)^2 (1 + \eta) \frac{A}{M} \mathbf{e}_D \quad (8)$$

对传统球模型中的反射系数变为 $C_R = 1 + \eta$,其中对光压参数 η 进行估算。通过仿真实验可知,此种球模型轨道拟合精度在0.4 m以内,预报1 d轨道预报精度在5 m以内;相比传统球模型有一定的提高,但和 Bern 模型精度相比还相差较远,尚不能满足导航卫星定轨和轨道预报的需求。

本文在上述处理方式的基础上,借鉴半经验型建模方法,根据光压产生的物理机理和卫星本身物理特性,对传统光压球模型改进如下:

$$\mathbf{a}_{SRP} = -vP_S \left(\frac{AU}{RSUN} \right)^2 \frac{A}{M} (1 + \eta \cdot \varepsilon + C) \mathbf{e}_D + y_{bias} \mathbf{e}_Y \quad (9)$$

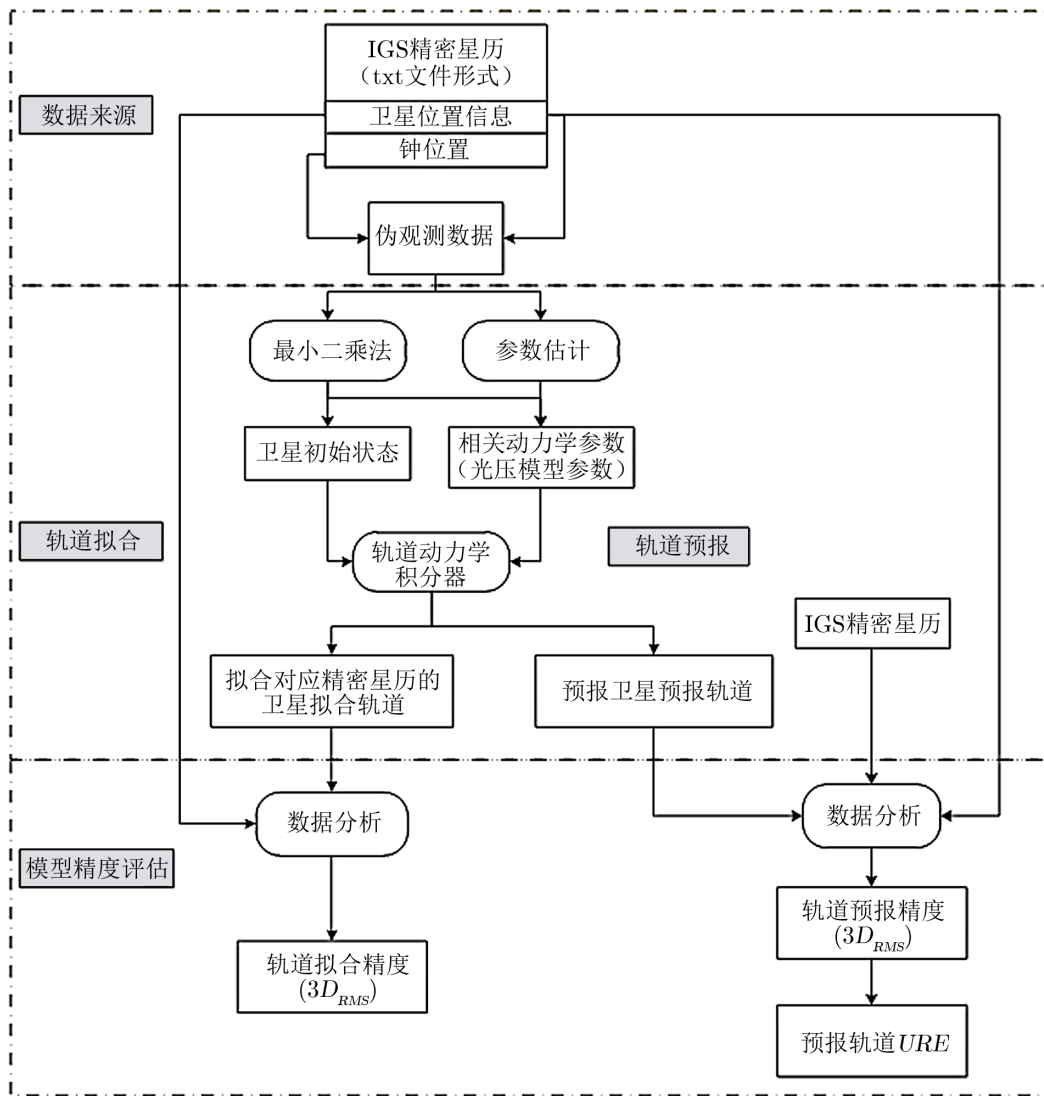


图 2 DYB 坐标与 XYZ 坐标示意图

其中 η, C 作为待估参数, 参与在轨解算。这是由于在充分考虑卫星在轨运行所受太阳光压长期变化趋势时, 不能忽略其所受光压的周日变化趋势; 同时综合太阳、卫星与地球之间的相对位置和卫星所受光压摄动大小的密切关系。下面对光压参数的周日变化规律做了分析。太阳、卫星、地球相对位置由太阳—卫星—地球夹角决定, 用角 ε 来表示。众所周知, 地球约每 365 d 绕太阳一圈, GPS 卫星每 12 h 绕地球一圈, 它们的相对位置在某种程度上必然呈现出周期性变化。图 3 分析了由 2014 年 1 月 1 日起 3 d 的光压参数 η 和太阳—卫星—地球夹角 ε 随时间的变化规律。

在上述建模过程中, 本文假设太阳光总是垂直照射到太阳帆板上, 而实际过程中太阳帆

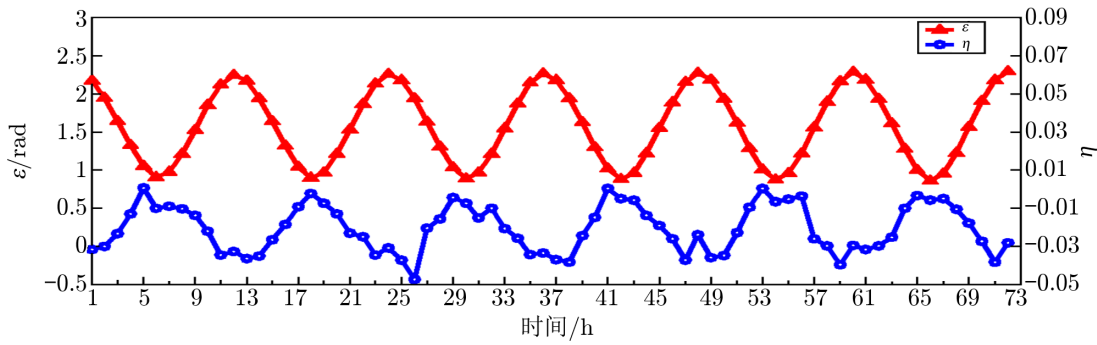


图3 光压参数 η 与太阳-卫星-地球夹角 ε 周日变化规律

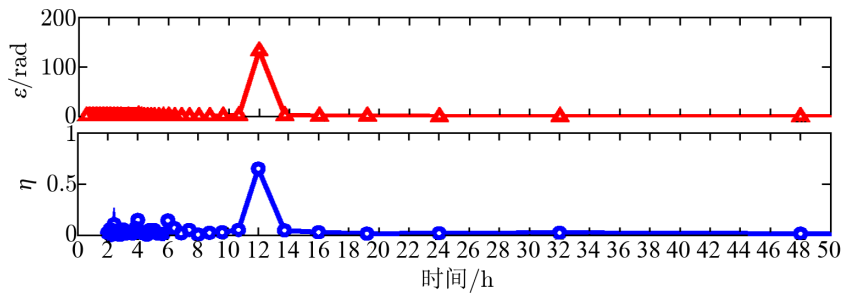


图4 光压参数 η 与太阳-卫星-地球夹角 ε 的频谱图

板随光照调整其角度时总会产生滞后，太阳帆板与卫星本体坐标系 Y 轴不能总是重合或不能严格对准太阳，从而导致姿态偏差。文献 [1] 和 [6] 表明，卫星姿态偏差将影响光压摄动力。故为满足高精度的需求，本文将考虑 Y 方向的摄动偏差估计参数对其进行吸收。综合上述因素，改进光压球模型如式 (9) 所示。

4 仿真算例

为验证本文提出的改进球模型的正确性和有效性，并且与不同模型进行精度比较分析，具体处理与评估流程如图 5 所示。

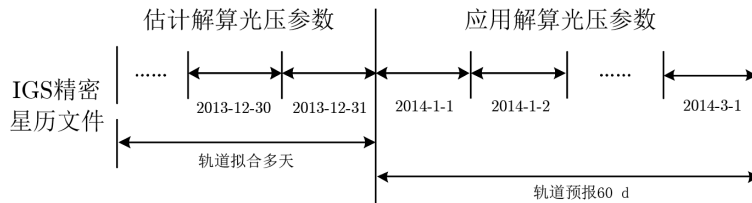


图5 仿真算例的光压模型处理与精度评估示意图

为了验证解算光压参数的有效性,以 2014 年 1 月 1 日的精密星历为例进行拟合,并对卫星轨道预报 1 d 进行轨道精度分析。从图 6 和图 7 中可知,改进球模型的轨道拟合精度和短期轨道预报精度相对于传统球模型、1 参数球模型都有了明显提高。其轨道拟合精度基本能达到 0.1 m 左右,短期轨道预报精度大部分在 0.5 m 以内。这是由于太阳、卫星和地球相对位置的周期性改变会影响卫星所受光压摄动大小的周期性变化,其变化对卫星在轨所受光压摄动的影响是无法忽略的。所以在实际工程中,都必须考虑光压摄动随时间、空间环境的变化趋势。同时,将此改进模型与 Bern 模型(9 参数)相比,受模型本身限制,改进球模型的轨道拟合精度相对差一些,但其短期轨道预报精度基本可以达到 Bern 模型的精度水平,只有个别卫星的精度稍差一些。

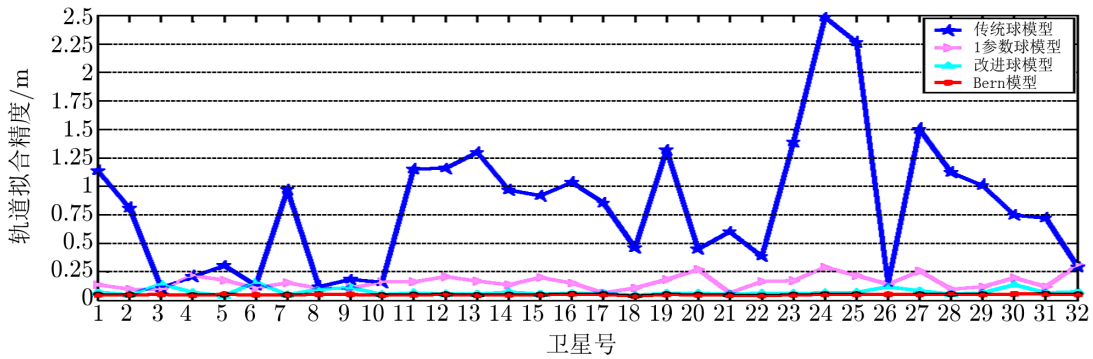


图 6 不同光压模型轨道拟合精度比较

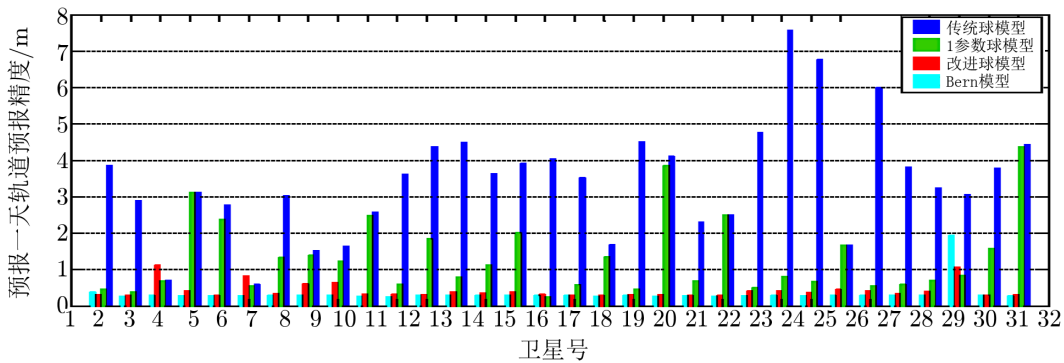


图 7 不同光压模型短期轨道预报精度比较

同时,为了验证模型对自主导航的可用性,本文采用不同光压模型基于 GPS 卫星进行了长期轨道预报仿真。仿真采用 2013 年 11 月 2 日至 3 月 1 日共 120 d 精密星历,考虑在此期间部分 GPS 卫星存在轨道机动,部分卫星为备用卫星其轨道数据并非最佳,因此,选取了其中部分卫星进行分析。由于长期轨道预报需要适当增长拟合弧段,故文中分别选取了 7 d、15 d、30 d 和 60 d 的不同拟合长度对 2014 年 1 月 1 日至 2014 年 3 月 1 日进行了 60 d

的轨道预报。我们对改进球模型不同拟合长度的 60 d 轨道预报精度进行比较, 结果如表 1 所示。其他模型的情况与改进球模型情况类似。从表中可知, 不同卫星、不同拟合弧长对长期轨道预报精度影响不同。对于多数卫星, 随着拟合弧段增长, 长期轨道预报精度有所提高, 个别卫星效果明显; 对于部分卫星, 拟合弧段增长并没有带来预报精度的改善, 甚至有所降低。综合考虑, 本文仿真选取 60 d 作为拟合弧长进行长期轨道预报。

表 1 改进球模型不同拟合长度的 60 d 轨道预报精度 $3D_{RMS}$ 比较

卫星号	$3D_{RMS}/m$				卫星号	$3D_{RMS}/m$			
	7 d	15 d	30 d	60 d		7 d	15 d	30 d	60 d
1	938	1381	1114	1096	17	1920	443	272	86
3	2383	1654	273	2083	18	713	905	622	950
4	2827	3165	3045	2648	20	783	989	1079	2032
5	950	983	1156	1494	23	5172	11 520	3522	1082
6	9873	2999	1322	336	24	1128	916	931	929
7	839	891	636	483	25	1589	1606	2287	1419
9	3011	2610	2235	1875	26	154	24 835	5740	6314
10	1556	1907	2294	778	27	1218	487	74	194
11	617	522	119	256	28	658	341	1320	832
12	1131	1066	2312	3391	29	353	458	352	314
13	7143	15 712	6472	2882	31	559	581	430	531
14	167	4129	1507	83	32	1836	2574	4248	8702
15	1986	1210	6981	4508	均值	1852	2171	1908	1912

长期轨道预报结果如图 8 所示。总体来说, 改进模型长期轨道预报呈现出较好的轨道精度。同时, 选取了不同轨道面不同类型的 6 颗卫星, 计算了其轨道预报 60 d URE 的变化趋势, 如图 9 所示。从图中可以看出改进球模型明显优于传统球模型与 1 参数球模型, 且不逊于 Bern 模型, 个别卫星明显优于 Bern 模型。

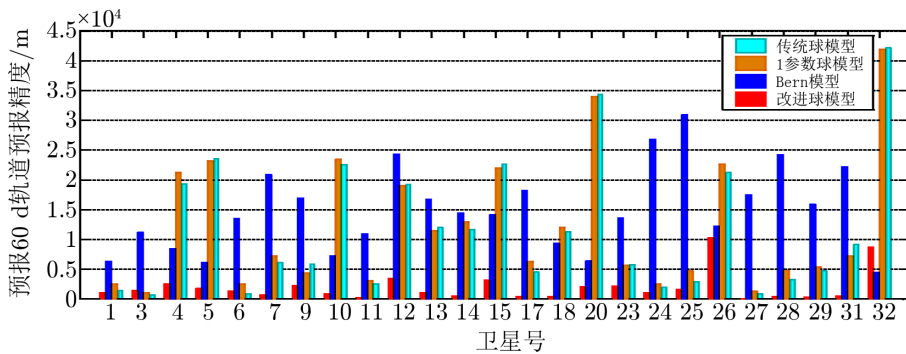


图 8 不同光压模型轨道预报 60 d 精度比较

Bern 模型是针对 GPS Block IIA、IIR 系列卫星设计的, 对于 GPS Block IIF 和我国北

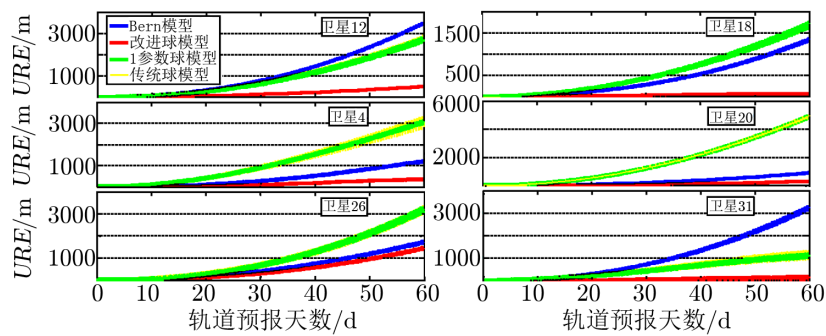


图 9 各模型对不同轨道不同类型卫星的轨道预报 60 d URE 比较

斗卫星中的 IGSO、GEO 的适用存在局限性。这是由于新发射的卫星在轨数据少,且北斗中 IGSO、GEO 轨道与 MEO 轨道特性存在较大差异,在某种程度上不一定满足其大量数据分析得到的光压数学表达式。其待估参数较多,长期轨道预报的精度不高,对卫星在轨自主运行的应用存在一定的局限性,需要利用较多有限的星上资源。

虽然改进球模型的轨道短期预报精度稍为逊色,但在轨道长期预报上表现出较好的稳定性。其模型待估参数少,有利于增强系统的稳定性。

5 结束语

文中通过对不同建模方法的典型光压模型分析比较,吸取半经验型模型的优点,考虑卫星自主运行的特点,研究提出一种适用于卫星自主运行时在轨计算的高精度球模型。仿真结果表明,改进后的球模型顺应了自主运行的发展趋势,能提高星上宝贵资源的利用率。文中分析虽然以 GPS 卫星数据为基础,但对于我国北斗卫星太阳光压的研究也有借鉴意义。

参考文献:

- [1] Fliegel H, Gallini T, Swift E. JGR, 1992, 97(B1): 559
- [2] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, et al. Journal of Geodesy, 1994, 19(6): 367
- [3] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. Adv Space Res, 2012, 49(7): 1113
- [4] Bar-Sever Y. Air Force Materiel Command Space and Missile Systems Center, No. RF-182/808. California: JPL, 1997: 3
- [5] Springer T A, Beutler G, Rothacher M. Journal of Geodesy, 1999, 73(3): 147
- [6] Kuang D, Rim H J, Schutz B Z, et al. Journal of Geodesy, 1996, 70(9): 572
- [7] Sibthorpe A, Bertiger W, Desai S D, et al. Journal of Geodesy, 2011, 85(8): 504
- [8] Fliegel H, Gallini T. Spacecr Rockets, 1996, 33(6): 863
- [9] Froideval L O. Dissertation, Austin: University of Texas, 2009: 54
- [10] McMahan J W, Scheeres D J. Guid Contr Dynam, 2010, 33(5): 1418

- [11] Ziebart M, Dare P. *Journal of Geodesy*, 2001, 57(11): 587
[12] Toshihiro K, Arata S. *Earth Planets Space*, 1999, 51: 979
[13] El-saftawy M I, Ahmed M K M, Helali Y E. *Ap&SS*, 1998, 259: 141
[14] 胡小工. *天文学进展*, 1998, 16(1): 8
[15] 陈俊平, 王解先. *天文学报*, 2006, 47(3): 310
[16] 武子谦, 宋淑丽, 周伟莉, 等. *地球科学进展*, 2015, 30(4): 495
[17] 陈宪东. 博士论文, 西安: 西安交通大学, 2009: 108

A High Precision Model of Solar Radiation Pressure Suitable for Satellites Autonomous Navigation

ZHOU Yang-miao^{1,2}, WANG Ling¹, HUANG Wen-de²

(1. *College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;*
2. *College of Mechatronic Engineering and Automation, Nation University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

Abstract: In order to satisfy the needs of low consumption and high precision of autonomous navigation, it puts forward an enhanced sphere model that is suitable for on-orbit computation, which takes into account both the physical features of satellites and mechanism of solar radiation pressure come into being. Used precise ephemeris as a solution to inverse calculate the SRP parameters, and analyzed parameters characters and precision of three typical SRP models. Through comparison and analysis of precision of orbit fit and orbit prediction, it comes up with an enhanced sphere model, which only have 3 parameters. The results, which taken GPS satellites for example, indicate that the enhanced sphere model, which only have three parameters, can reach 80% short-period orbit prediction precision of Bern model(9 parameters) and performance well in long-period orbit prediction, whose performance can reach the requirement of satellites autonomous navigation.

Key words: satellite navigation; solar radiation pressure; autonomous navigation; parameter estimation; orbit prediction