

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2018.01.06

北斗卫星地球辐射压摄动建模研究

赵群河^{1,2,3}, 王小亚^{1,2,3}, 胡小工^{1,3},
张 晶^{1,2}, 邵 璠^{1,2,3}, 何 冰^{1,2,3}, 王家松³

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 宇航动力学国家重点实验室, 西安 710043)

摘要: 在对卫星所受的非保守摄动力研究中, 对太阳辐射压摄动建模的研究发展迅速, 而对地球辐射压摄动的研究相对缺乏, 特别是其对中高轨卫星轨道影响的研究。在高精度人造卫星轨道确定中, 地球辐射压摄动对于具有大面质比的导航卫星的影响越来越不可忽略。针对中国北斗导航卫星, 基于地球辐射压的原理和影响机制, 探讨了地球辐射压摄动建模的方法。针对北斗导航系统特点, 利用地球表层的反照率和红外发射率的分布格网数据, 建立了精确的地球辐射压模型, 并利用全球 MGEX 站观测数据和中国区域监测站数据, 进行了对北斗卫星引入地球辐射压模型的验证试验, 分析了其定轨精度, 检验了模型的正确性和可靠性。试验表明, 对北斗卫星来说, 在加入地球辐射压模型 ERPM2 (Earth radiation pressure model 2) 后, 轨道精度比不加入地球辐射压模型提高约 4 mm; 加入 ERPM1 模型则相应提高约 2 mm。对部分卫星, 加入地球辐射压模型后, 其轨道精度修正量可达 5~10 mm。通过卫星激光测距 (satellite laser ranging, SLR) 检核发现, 加入 ERPM2 模型后, 北斗中轨道地球卫星正常姿态时的轨道径向精度提高 3.1 cm, GPS 036 卫星轨道径向精度改善 0.8~1.4 cm。因此, 地球辐射压摄动模型在北斗导航卫星高精度轨道确定研究中具有一定的意义。

关 键 词: 精密轨道确定; 地球辐射压; 北斗

中图分类号: P228.1 **文献标识码:** A

1 引 言

在导航卫星精密定轨中, 太阳辐射压模型研究发展迅猛, 而对地球辐射压摄动的研究相对缺乏, 其原因是, 人们认为中高轨卫星受地球辐射压摄动的影响相对较小。但是, 随着近几年导航卫星精密轨道精度的不断提高, 人们发现, 地球辐射压摄动对其精度的影响

收稿日期: 2017-05-18; 修回日期: 2017-10-30

资助项目: 科技部基础专项项目 (2015FY310200); 国家重点研发计划 (2016YFB0501405); 国家自然科学基金面上项目 (11173048, 10873029); 上海市空间导航与定位技术重点实验室 (06DZ22101)

通讯作者: 王小亚, wxy@shao.ac.cn

越来越不可忽视。经过近几年的研究, 人们已逐步将地球辐射压摄动引入到 GPS 精密定轨中, 并发现其对轨道精度有所改进。目前美国 Scripps Institution of Oceanography (SIO)、美国麻省理工学院 (Massachusetts Institute of Technology, MIT)、德国慕尼黑工业大学 (Technische Universität München, TUM)、德国地学研究中心 (German Research Centre for Geosciences, GFZ) 等国际 GNSS 服务 (International GNSS Service, IGS) 分析中心已经在数据处理时考虑了 GPS 地球辐射压影响。地球辐射压摄动分为短波光学辐射和长波红外辐射两项, 它们分别是地球反射可见光和地球表面热红外辐射产生的辐射压, 其中前者称作地球反照辐射压, 后者是地球和表层大气向外空间发出的红外辐射对卫星产生的摄动力, 称作地球红外辐射^[1,2]。反照辐射用地球反照率来描述, 红外辐射用发射率来描述。由于受到地面、海洋和空间云层等各种复杂物理因素的影响, 建立其物理分析模型比较困难, 通常需根据大量的测量数据进行拟合^[3,4]。

地球反照辐射强度依赖于太阳的位置。当地球表面辐射面积元受到太阳光垂直照射时, 其光学辐射最大, 其中镜面反射占 5%, 漫反射占 95%; 而当太阳照不到该面积元时, 其光学辐射为零。低轨卫星典型的地球反照辐射压加速度量级约为太阳直接辐射压的 10%~35%^[5]。光学辐射对卫星产生径向和横向摄动加速度。在量级上, 径向摄动力是横向的 100 倍^[6,7]。当卫星处在光亮地球中心的上空时, 径向加速度达到最大; 当卫星在昼夜交界处时, 横向加速度达到最大; 当卫星处于黑夜地球那一面时, 径向和横向的加速度都为零。

热红外辐射是地球吸收了太阳直射辐射后, 以长波形式向空间发射的辐射。它是由地球发出的热辐射, 其辐射强度不依赖于太阳的位置, 只依赖于发射表面的平均绝对温度, 即主要依赖于发射点的纬度和发射时的季节。

与太阳辐射压不同的是, 地球辐射压不仅与卫星的形状、姿态及光学特性有关, 还与陆地和海域地球辐射的变化有关。同时, 卫星所受地球辐射摄动加速度随卫星高度的增加而减小, 这主要是由于地球辐射压与卫星高度的平方成反比引起的。在高精度轨道确定中, 地球辐射压摄动对于具有大面质比的导航卫星的影响越来越不能忽视。对于中高轨的导航卫星来说, 地球辐射压对轨道径向分量的影响最大, 如对 GPS 轨道径向分量的影响为 1~2 cm, 而对其切向和法向分量的影响较小^[8,9]。但地球辐射压对北斗卫星的影响还未有研究, 为此, 本文基于地球辐射压的原理和影响机制, 探讨了地球辐射压摄动建模方法, 针对中国北斗卫星建立了地球辐射压模型, 并引入精密定轨软件对北斗卫星轨道进行了实测数据验证和精度评估。

2 地球辐射压摄动建模

2.1 地球辐射压摄动机理

卫星在有摄动力情况下的运动方程为:

$$\ddot{\mathbf{r}} = \frac{-\mu}{r^3} \mathbf{r} + \mathbf{a}_p, \quad (1)$$

其中, \mathbf{r} 是卫星位置矢量; $\ddot{\mathbf{r}}$ 是 \mathbf{r} 对时间的二阶导数, 即 $d^2\mathbf{r}/dt^2$; μ 是地球引力常数, $\mu = GM$; \mathbf{a}_p 为所有摄动力引起的加速度之和, 如太阳辐射压、地球辐射压等产生的摄动力引起的加速度的影响之和, 即 $\sum_i \mathbf{a}_p(i)^{[10]}$ 。本文主要开展对地球辐射压摄动模型的研究。

地球反照率 α 定义为:

$$\alpha = \frac{\Phi_{\text{refl}}}{\Phi_{\text{in}}} \quad (2)$$

其中, Φ_{refl} 和 Φ_{in} 分别是单位时间、单位面积上各方向出射的总辐射能量和入射的总辐射能量。光学辐射压计算模型最早由 Cunningham 提出, 但由于 α 模型不精确而一直无法反映卫星的实际受摄情况。之后许多人在 α 模型上做了不少工作, 1978 年 Lala 利用法国 D-5-B 卫星上的太阳传感器得到的资料, 提供了 $5^\circ \times 5^\circ$ 面积元的地球反照率全球分布值。1981 年 Stephens 等人^[11]利用 1964—1977 年卫星的太阳传感器得到的资料, 提供了反映纬度和季节变化的 α 与红外辐射流量 I_{IR} 的表格值。Sehna^[12]对 α 提出的分析表达式为:

$$\alpha = \begin{cases} 0.1 + 0.3 \sin |\varphi|, & \text{对海洋} \\ 0.2 + 0.3 \sin |\varphi|, & \text{对陆地} \end{cases} \quad (3)$$

其中 φ 是纬度。但此式未体现出季节性变化。我们认为比较好的是美国空间研究中心 (Center for Space Research, CSR) 提供的分析表达式:

$$\alpha = 0.34 + 0.1 \cos \left[\frac{2\pi}{365.25} (t - t_0) \right] \sin \varphi + 0.29 \left(\frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \quad (4)$$

其中, t 和 t_0 分别为计算时刻和参考时刻。与反照率类似, 发射率 ε 定义为:

$$\varepsilon = \frac{I_{\text{IR}}}{(I_{\text{IR}})_0} \quad (5)$$

其中 I_{IR} 为红外辐射流量, $(I_{\text{IR}})_0 = 340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。同样, 我们认为比较好的是美国 CSR 提供的表达式:

$$\varepsilon = 0.68 - 0.07 \cos \left[\frac{2\pi}{365.25} (t - t_0) \right] \sin \varphi - 0.18 \left(\frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

有了反照率和发射率, 我们可以利用下面两个公式求得地球反照辐射压加速度和红外辐射压加速度。

$$\mathbf{a}_{\text{al}} = \iint_{(w)} E_S \left(\frac{1}{R_S} \right)^2 \frac{1 + \nu}{\pi} \left(\frac{A_E}{m} \right) \frac{\alpha \cos \theta_S \cos \beta}{r^2} \mathbf{r} \text{sgn}(\cos \theta_S) ds \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_{\text{IR}} = \iint_{(w)} \frac{E_S}{4} \left(\frac{1}{R_S} \right)^2 \frac{1 + \nu}{\pi} \left(\frac{A_E}{m} \right) \frac{\varepsilon \cos \beta}{r^2} \mathbf{r} ds \quad (8)$$

其中, ds 表示受到辐射的单位面积元, m 表示卫星质量。太阳常数 $E_S = 1357 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, 为作用在离太阳 1 AU 处黑体上的太阳辐射强度, ν 为卫星表面反射率。地球最大截面积 $A_E = \pi R_E^2$, R_E 为地球半径。 R_S 为卫星到太阳的距离, 单位为天文单位 (AU)。 θ_S 为辐射

到卫星面元的入射角, β 为地球辐射面元辐射到卫星面元的反射角, \mathbf{r} 为径向单位向量 (地球-卫星)。sgn(x) 定义为: 当 $x > 0$ 时, $\text{sgn}(x) = 1$; 当 $x \leq 0$ 时, $\text{sgn}(x) = 0$ 。

显然, 式 (7) 和式 (8) 的积分是相当麻烦的, 特别是对测地工作, 每处理一个观测数据就得积分一次运动方程, 这样, 相应的积分就得做多次 (每积分一步长间隔, 就得积分该两式一次), 这显然相当费时。因此我们将采用 McCarthy 在 1977 年提出的环元法。此方法把卫星所见表面分成若干个面积元, 对每个面积元计算出它们对卫星的反照加速度和红外辐射加速度 (非积分形式) $(d\mathbf{a}_{\text{al}})_i$ 和 $(d\mathbf{a}_{\text{IR}})_i$, 然后用矢量加法代替积分, 求得总的 \mathbf{a}_{al} 和 \mathbf{a}_{IR} :

$$\begin{cases} \mathbf{a}_{\text{al}} = \sum_{i \geq 1} (d\mathbf{a}_{\text{al}})_i \\ \mathbf{a}_{\text{IR}} = \sum_{i \geq 1} (d\mathbf{a}_{\text{IR}})_i \end{cases}, \quad (9)$$

$$\mathbf{a}_{\text{ERP}} = \mathbf{a}_{\text{al}} + \mathbf{a}_{\text{IR}} \quad . \quad (10)$$

2.2 点源地球辐射压模型及地球辐射压摄动在轨分析

地球反照辐射压是由地球表面对太阳入射光的反射和散射产生的, 此反射用地球反照率 α 表述, 定义为从地球反射到空间的短波辐射与入射的短波太阳辐射之比。全球平均反照率 $\alpha \approx 0.3$, 相当于地球表面元 $459 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 的辐射量^[13,14]。地球光学反照辐射压和太阳直接辐射压具有相同的谱分布。只有地球的白天区域才有此辐射, 而且由于地面特性和云层覆盖不同, 辐射值也会有很大不同。

与地球光学反照辐射相反, 热红外辐射为地球及其大气层所吸收的太阳辐射, 近似各向同性的再发射。热红外辐射对卫星主要产生径向加速度, 平均发射率 $\varepsilon \approx 0.68$ 。研究人员通过试验发现, 由热红外辐射导致的地球表面元的有效辐射为 0.17Φ , 或 $230 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[15], 其中 Φ 为太阳辐射流量。

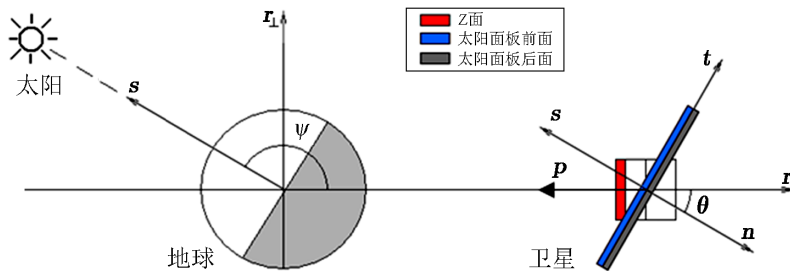
目前比较成熟的 GPS 卫星地球辐射压模型为德国慕尼黑工业大学的 Rodriguez-Solano 建立的分析型模型。该模型为点源分析型模型, 假设地球为均匀辐射体, 将地球看做一个点源^[7], 反照率为常数, 则高度为 h 处的地球辐射强度为:

$$\mathbf{E}_0(\psi, h) = \frac{A_E E_S}{(R_E + h)^2} \left\{ \frac{2\alpha}{3\pi^2} [(\pi - \psi) \cos \psi + \sin \psi] + \frac{1 - \alpha}{4\pi} \right\} \mathbf{r}, \quad (11)$$

其中地球平均半径取 $R_E = 6378 \text{ km}$, h 表示卫星高度, ψ 为太阳-地球-卫星的夹角。几何示意图见图 1。我们将该模型标记为 ERPM1。

地球辐射压模型的建立还应考虑卫星受到反射可见光和红外辐射照射的实际情况, 包括照射的有效截面积和卫星各部件反照率。反射的可见光对卫星的影响机理与太阳辐射压类似^[4]。太阳光入射到地球上时产生的效应, 包括假设地球表面为朗伯体产生的漫反射以及镜面反射等^[16]。

卫星由多个形状不同的部件组成。对于星体部件面积元, 定义 ν 为反射率 (reflectivity), 则吸收率部分为 $1 - \nu$; 定义 η 为镜面反射系数 (specularity), 则 $\nu\eta$ 为镜面反射部分, $\nu(1 - \eta)$ 为漫反射部分, 且镜面反射 + 漫反射 + 吸收 = 1。那么该面积元受到的地球辐射压摄动力可



注: s 表示地球-太阳方向, t 表示接受辐射的卫星表面单位面积元的切线方向, p 是卫星指向地心的方向, Z 面表示垂直于 p 的面。

图 1 盒翼卫星模型受地球辐射压示意图

写为:

$$\mathbf{a}_{\text{ERP}} = -\lambda \frac{E_0}{mc} \sum_{i=1}^n A_i \cos \theta_i \left[2\nu_i \left(\eta_i \cos \theta_i + \frac{1-\eta_i}{3} \right) \mathbf{n}_i + (1-\eta_i\nu_i) \mathbf{p}_i \right], \quad (12)$$

其中, E_0 为卫星受到的地球辐射强度, 可由式 (11) 计算获得; A_i 为卫星面积元 i 的面积, \mathbf{n}_i 和 \mathbf{p}_i 分别为面积元的法向矢量和卫星到地球的方向矢量, θ_i 为面积元的法向与卫星到太阳方向之间的夹角, m 为卫星的质量, λ 为卫星的蚀因子, c 为光速。图 1 为盒翼卫星模型受地球辐射压示意图。

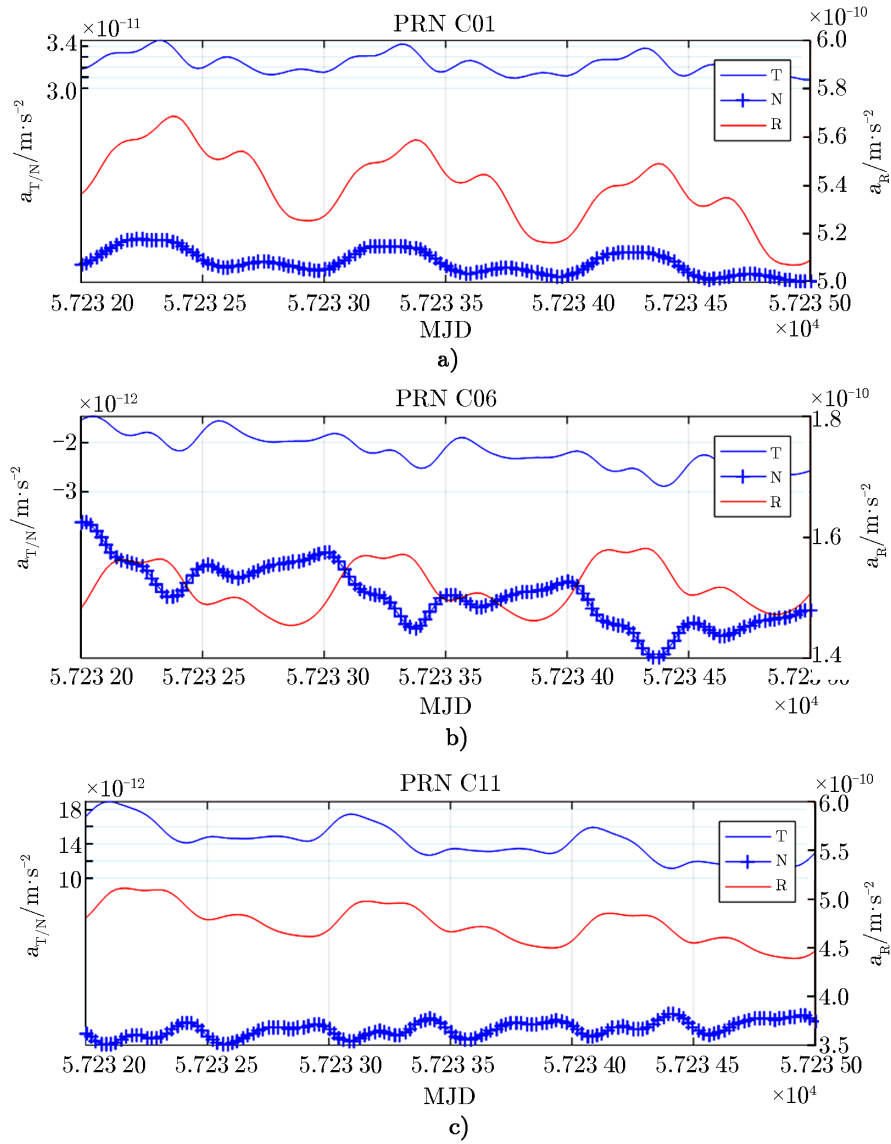
为了研究地球辐射压摄动, 图 2 给出了在轨北斗卫星受到地球辐射压摄动的加速度变化情况, 其时间长度为 3 d。左边标尺是针对切向 (T) 和法向 (N) 的加速度, 右边标尺是针对径向 (R) 的加速度, 横坐标为儒略日。

从图 2 可以看出, 地球辐射压摄动加速度对北斗卫星在 R 方向的影响最大, 约为 $10^{-10} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 并呈现周期变化; T 方向次之, N 方向最小, 量级为 $10^{-12} \sim 10^{-11} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, 其中 PRN C01 和 C11 卫星在 R 方向的摄动加速度还存在线性递减变化, C06 卫星在法向存在线性递减的变化。其原因是, C06 卫星为倾斜地球同步轨道卫星, 法向受到的地球辐射压摄动更加明显。

2.3 数值格网地球辐射压模型

在地球辐射压建模的过程中, 除了第 2.2 节中沿用太阳直接辐射压的建模策略建立点源地球辐射压模型 ERPM1 外, 还可利用实测的地球表层反照率和红外发射率的格网数据, 建立精确的地球辐射压模型。我们把该模型标记为 ERPM2。地球辐射压模型的数学公式可以用于计算卫星接收到的地球辐射, 包括反射的可见光和发射的红外线。假定地球均匀地反射太阳光, 并发射热红外辐射, 则建模的主要步骤包括: (1) 确定地球的每个面积元素 (把地球表面划分为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 格网) 上接收到的太阳辐射; (2) 基于反照率和发射率计算卫星处接收到的来自各地球面积元素的地球辐射强度; (3) 根据卫星结构模型和部件的反射特性, 计算卫星上的地球辐射压。

ERPM2 模型是以地球实测辐射数据为输入的数值模型, 基于辐射数据可以获取到地球格网的反照率 α , 进而可得相应的热红外辐射发射率。辐射数据来源于美国国家航空航



注: a) 地球静止轨道 (geostationary orbit, GEO) 卫星; b) 倾斜地球同步轨道 (inclined geosynchronous orbit, IGSO) 卫星; c) 中高度圆轨道 (medium Earth orbit, MEO) 卫星。

图 2 北斗三类卫星的地球辐射压摄动加速度在 R, T, N 方向的变化

天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的云层和地球的辐射能量系统 (Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES) 数据。目前该模型已经用于 GAMIT 新版本软件中。

ERPM2 数值模型计算公式为^[15]：

$$\mathbf{E}_0|_{\mathbf{r}} = \int d\mathbf{E}_{\text{refl}} \cdot \mathbf{r} + \int d\mathbf{E}_{\text{emit}} \cdot \mathbf{r} \quad , \quad (13)$$

$$\mathbf{E}_0|_{\mathbf{r}_\perp} = \int d\mathbf{E}_{\text{refl}} \cdot \mathbf{r}_\perp \quad , \quad (14)$$

其中，

$$d\mathbf{E}_{\text{refl}} \begin{cases} \frac{\alpha}{\pi d^2} \cos \theta \cos \gamma E_S dA \cdot \mathbf{e} \quad , \quad \cos \theta \geq 0, \cos \gamma \geq 0 \\ 0 \quad , \quad \text{其他情况} \end{cases} \quad , \quad (15)$$

$$d\mathbf{E}_{\text{emit}} \begin{cases} \frac{1-\alpha}{4\pi d^2} \cos \theta E_S dA \cdot \mathbf{e} \quad , \quad \cos \theta \geq 0 \\ 0 \quad , \quad \text{其他情况} \end{cases} \quad , \quad (16)$$

其中， \mathbf{r}_\perp 为与 \mathbf{r} 垂直的单位向量； θ 为地球辐射/反射表面单元法向向量与卫星之间的反射角； d 为地球表面单元到卫星的距离； \mathbf{e} 为地球表面单元到卫星的方向向量； γ 为太阳入射光线与地球表面单元法向向量的夹角，即入射角； dA 为地球表面单位面积元， $dA = R_E^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi$ ， $\vartheta = 0, \dots, \pi$ ， $\varphi = -\pi/2, \dots, \pi/2$ 。

在根据 ERPM2 模型求得卫星处的地球辐射强度后，可根据式 (12) 计算盒翼卫星所受到的摄动力。

3 试验验证和精度评估

前面已经针对导航卫星建立了盒翼卫星的地球辐射压模型。根据北斗卫星的几何物理参数和属性，以及地球的反照率和红外发射率的分布格网数据，我们将 ERPM1 和 ERPM2 这两种地球辐射压模型应用于北斗卫星的精密定轨中，并针对北斗卫星进行了试验验证和轨道精度评估。

利用 2015 年年积日 220—229 d 的全球多 GNSS 实验和试点项目 (the multi-GNSS experiment and pilot project) MGEX 网测站和 6 个区域监测站的非差相位和伪距数据，进行北斗卫星地球辐射压模型验证试验，测站分布见图 3。

这里暂不考虑北斗 GEO 卫星，考虑的误差改正模型有：绝对天线相位改正、相位缠绕改正、相对论效应、固体潮和极潮等。解算参数包括卫星初始轨道根数、太阳光压参数、卫星钟差、测站钟差、模糊度参数、每站每小时一个对流层参数和每日地球自转参数。定轨试验中光压模型为 5 个参数的 BERN 模型，解算弧段时长为 3 d。表 1 给出了定轨改正模型和参数估计策略情况。

表 2 给出了北斗卫星地球辐射压试验的轨道统计结果，对比轨道为德国地学中心 GFZ 的 MGEX 精密轨道产品 (轨道文件以 GBM 开头)，未加入地球辐射压模型的轨道平均

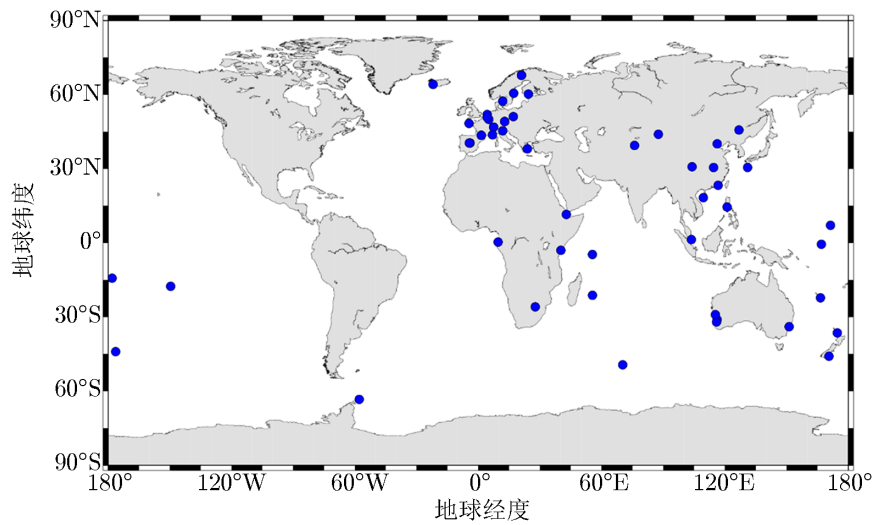


图 3 参与测试的支持北斗的测站分布示意图 (10/08/2015)

1D-RMS 为 175.3 mm, 引入地球辐射压模型 ERPM1 和 ERPM2 后的轨道平均 1D-RMS 分别为 172.6 mm 和 171.2 mm, 精度分别提高了 2.7 mm 和 4.1 mm。除了 C11 和 C12 卫星, 其他 IGSO 和 MEO 卫星的轨道 1D-RMS 精度均有改善, 且 C06, C09 和 C10 卫星提高幅度较大。

表 1 定轨改正模型与参数估计策略

参数	处理策略
地球重力场	EGM96 (12×12)
N 体引力	太阳、月亮和其他行星
潮汐	固体潮、海潮、极潮, IERS 协议
太阳光压	SRPM 半经验模型, BERN5 参数模型
相对论效应	IERS 协议
观测量	非差无电离层组合 PC 和 LC 观测值
采样间隔	300 s
高度截止角	7°
对流层模型	先验模型及映射函数 DRY_NIELL
绝对天线相位中心改正	IGS.08.ATX
相位缠绕改正	模型改正
相对论效应	IERS 协议
固体潮	IERS 协议
海洋潮汐	FES 2004
极潮	IERS 协议
测站坐标	ITRF 2008
卫星轨道	估计

(续表)

参数	处理策略
卫星钟差	估计
接收机钟差	估计
模糊度	估计
测站坐标	强约束 (1σ)
光压参数	估计 (5 个参数)
地球定向参数	估计 $x_p, y_p, dx_p, dy_p, UT1$ (强约束) 和 DUT1
对流层参数	每站每小时估计一个 ZTD 参数

注：表中，EGM96 表示地球重力场模型 (Earth gravitational model) 1996；SRPM 为太阳光压模型 (Solar radiation pressure model)； PC 和 LC 表示无电离层的伪距和相位组合观测值；FES2004 中 FES 为 finite element solutions； x_p, y_p 是极移的 x 和 y 分量； $UT1$ 是全球统一的世界时； $DUT1$ 是 $UT1$ 的变化量； ZTD 为天顶总延迟。

表 2 北斗卫星地球辐射压试验轨道结果 (mm)

模型	C06	C07	C08	C09	C10	C11	C12	C14	平均值
BERN	168.3	135.2	200.5	131.3	161.9	132.7	321.8	150.8	175.3
+ERP1	160.3	134.4	200.2	124.7	156	134.8	323.6	147	172.6
+ERP2	158.5	132.6	197.1	125.3	153.6	132.8	323.1	146.4	171.2

图 4—6 给出了在轨道 R, T, N 三个方向的比较结果。对于 ERP1 模型和 ERP2 模型，在轨道 R, T, N 方向的表现基本一致，以实测地球辐射数据的 ERP2 模型在改正量上更大，尤其是在轨道法向，轨道精度的提升更明显。

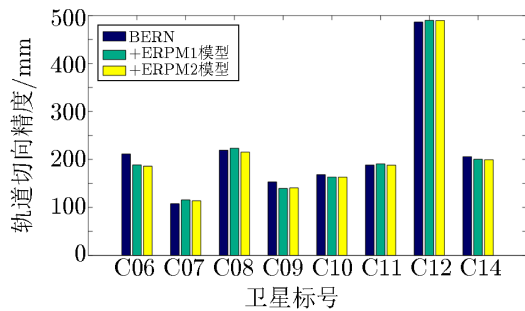


图 4 在 BERN 模型上加入地球辐射压模型后的轨道切向精度对比

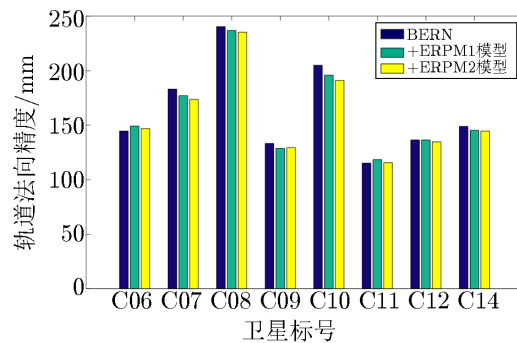


图 5 在 BERN 模型上加入地球辐射压模型后的轨道法向精度对比

同时，采用 SLR(ILRS 提供) 的标准点 (normal point, NP) 数据对北斗轨道进行检核，具有 SLR 数据的卫星有 C08 和 C11^[16]。北斗 IGSO 和 MEO 卫星轨道高度角大于 4° 时，

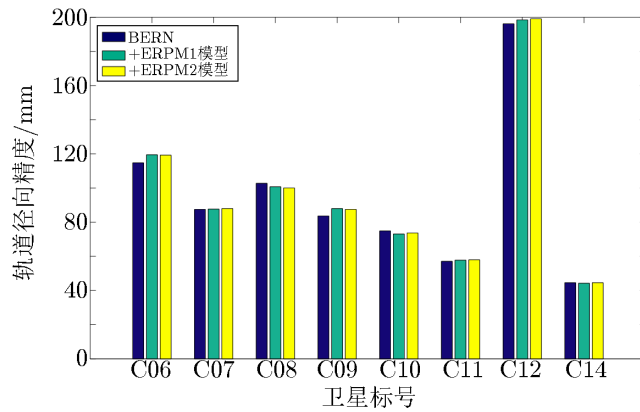


图 6 在 BERN 模型上加入地球辐射压模型后的轨道径向精度对比

C08 和 C11 卫星姿态处于动偏模式; 当轨道高度角小于 4° 时, 卫星姿态处于零偏模式。下面分别对两种姿态模式的轨道进行 SLR 检核, 其残差统计结果见图 7 和图 8。

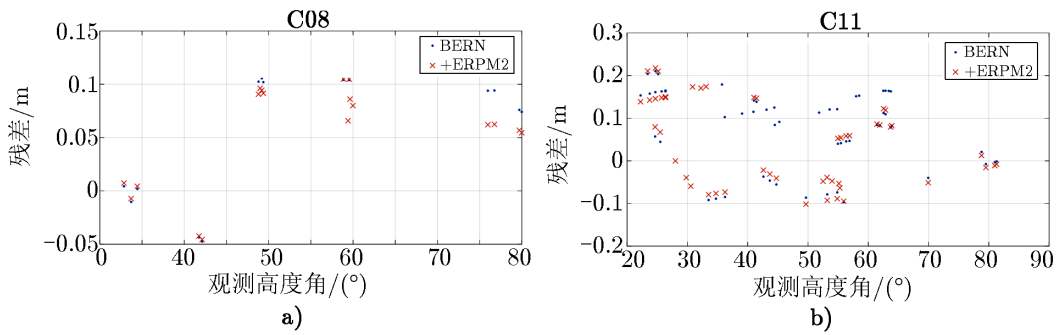


图 7 卫星处于动偏姿态时 SLR 检核残差统计

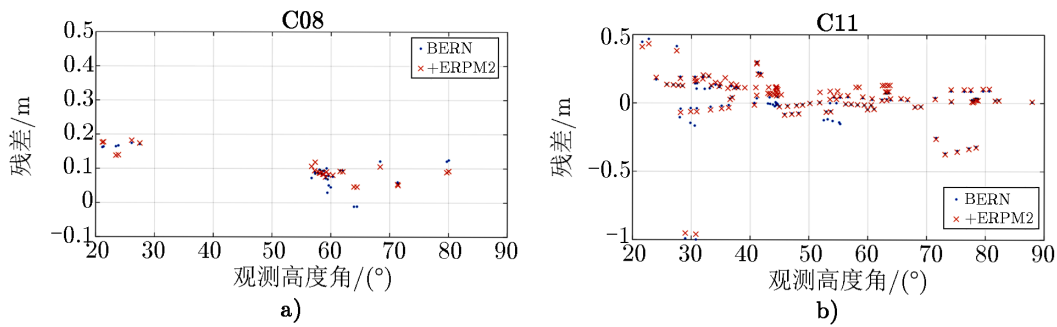
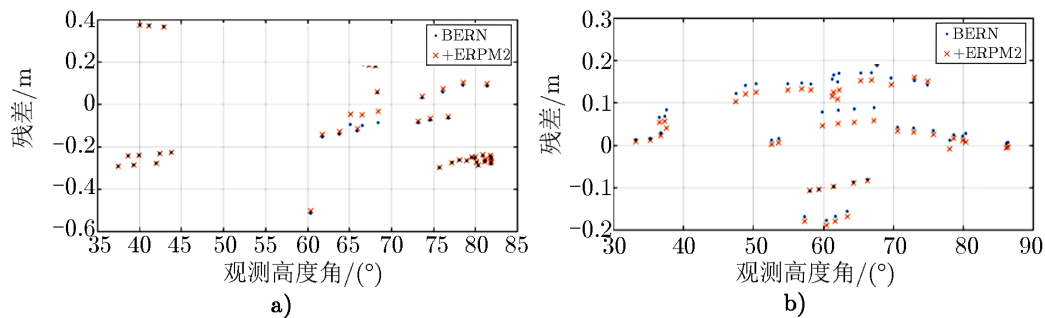


图 8 卫星处于零偏姿态时 SLR 检核残差统计

当卫星处于动偏姿态时, C08 卫星检核残差统计平均值分别为 0.061 m 和 0.064 m, 方

差分别为 0.058 m 和 0.052 m，径向精度降低了 0.3 cm；C11 卫星检核残差统计平均值分别为 0.077 m 和 0.046 m，方差分别为 0.090 m 和 0.098 m，径向精度提高 3.1 cm。但当卫星处于零偏姿态时，C08 卫星检核残差统计平均值分别为 0.109 m 和 0.121 m，方差分别为 0.082 m 和 0.086 m，径向精度降低了 1.2 cm；C11 卫星检核残差统计平均值分别为 0.013 m 和 0.041 m，方差分别为 0.187 m 和 0.177 m，径向精度降低了 2.8 cm。由此可见，对于北斗 MEO 卫星，在加入 ERPM2 模型后轨道精度有一定提升，但是卫星处于零偏姿态时，轨道精度降低约几厘米，说明卫星姿态对地球辐射摄动有一定影响，因此，还需要对涉及到北斗卫星姿态的光压摄动力和地球辐射压摄动力进行进一步研究。

为了进一步验证地球辐射压建模方法的正确性和精度，我们对 GPS 定轨也进行了测试验证。我们采用一天弧段并在 BERN 光压模型的基础上加 ERPM2 地球辐射压模型，对 GPS 卫星进行了定轨试验和 SLR 轨道检核。如图 9 所示，在 2013 年年积日 001—031 d 和 2015 年年积日 277—295 d 两个时间段，GPS 036 卫星利用 SLR 检验得到的标准点观测数据分别为 44 个和 48 个，定轨策略和检核方法同前。如图 9 所示，添加 ERPM2 模型前后的 SLR 检核残差，2013 年的统计平均值分别为 -0.115 m 和 -0.107 m，方差分别为 0.210 m 和 0.213 m，径向精度提高 0.8 cm；2015 年的统计平均值分别为 0.053 m 和 0.039 m，方差分别为 0.107 m 和 0.104 m，径向精度提高 1.4 cm。由此可见，随着导航系统性能的提升，地球辐射压摄动模型的加入对 GPS 卫星轨道精度的提升效果显著。



注：a) 2013 年；b) 2015 年。

图 9 GPS 036 卫星利用 SLR 检核残差统计

综合前面试验发现，地球辐射压模型的加入能够在一定程度上提高北斗卫星 IGSO 和 MEO 卫星的定轨精度，部分卫星轨道精度修正量为 5~10 mm，对于 GPS 卫星轨道精度改善可达 0.8~1.4 cm。在精密轨道确定试验中，可以结合光压模型一起提高北斗导航卫星系统的精密定轨精度。随着导航星座的完善和性能的提升，小摄动力模型(如地球辐射压摄动模型)的精度对精密轨道确定变得越来越重要。

4 总 结

本文探讨了地球辐射压的原理、对卫星轨道的影响机制和建模方法, 并针对中国北斗导航卫星系统特点, 利用地球表面的反照率和红外发射率的格网分布数据, 分别建立了北斗点源和格网地球辐射压模型, 并基于全球 MGEX 网测站数据, 对引入地球辐射压模型定轨精度的变化进行了分析和评估。试验表明, 在加入地球辐射压模型 ERPM2 后, 轨道精度比不加入地球辐射压模型提高约 4 mm, 加入 ERPM1 模型则相应提高约 2 mm, 部分卫星的轨道精度修正量可达 5~10 mm。通过 SLR 检核发现, 加入 ERPM2 模型对北斗 MEO 卫星正常姿态时的轨道精度提高 3.1 cm, 对 GPS 036 卫星轨道精度改善 0.8~1.4 cm。由于地球辐射压还与卫星类型及结构有关, 且因为地球表面辐射格网模型边界的不连续性, 可能会附加一个切向的扰动, 导致轨道切向误差增大, 因此, 后续可利用长期的数据序列, 针对地球辐射压摄动进行统计分析, 研究其变化特性, 并对北斗卫星 (包括 GEO 卫星) 进行更深入研究, 以确定更好的地球辐射压模型。

参考文献:

- [1] 周善石, 胡小工, 吴斌. 中国科学: 物理学、力学、天文学, 2010, 06: 800
- [2] 赵群河, 王小亚, 何冰, 等. 第五届中国卫星导航学术年会论文集. 南京: 中国卫星导航协会, 2014
- [3] Vokrouhlicky D. *Astron Astrophys*, 2006, 459(1): 275
- [4] Rodriguez-Solano C, Hugentobler U, Steigenberger P. *Proceedings of the EGU*. Vienna: EGU Press, 2011
- [5] Knocke P C, Ries J C, Tapley B D. *Astrodynamics Conference*. Washington DC: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988
- [6] Hugentobler U, Rodriguez-Solano C, Steigenberger P, et al. *AGU Fall Meeting*. San Francisco: AGU Press, 2009
- [7] Rodriguez-Solano C, Hugentobler U, Steigenberger P, et al. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(5): 309
- [8] 胡小工. *天文学进展*, 1998, 01: 8
- [9] 郭靖. 博士论文. 武汉: 武汉大学, 2014
- [10] Beutler G, Schildknecht T, Hugentobler U, et al. *Advances in Space Research*, 2003, 31(8): 1853
- [11] Stephens G L, Campbell G G, Haar T H. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1981, 86(C10): 9739
- [12] Sehnal L. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*, 1979, 30: 199
- [13] Ziebart M, Adhya S, Cross P. *EGS-AGU-EUG Joint Assembly*. France: EGU Press, 2003: 2671
- [14] Rodriguez-Solano C. PhD thesis. Munich: Universitätsbibliothek der TU München, 2014
- [15] Pearlman M R, Degnan J J, Bosworth J M. *Advances in Space Research*, 2002, 30(2): 135
- [16] Tan B, Yuan Y, Zhang B, et al. *Scientific Reports*, 2016, 6: 32967

Research on the Earth Radiation Pressure Modelling for Beidou Satellites

ZHAO Qun-he^{1,2,3}, WANG Xiao-ya^{1,2,3}, HU Xiao-gong^{1,3}, ZHANG Jing^{1,2},
SHAO Fan^{1,2,3}, HE Bing^{1,2,3}, WANG Jia-song³

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. State Key Laboratory of Aerospace Dynamics, Xi'an 710043, China)

Abstract: In the non-conservative driving force of satellites, the study of solar radiation pressure model has progressed rapidly, and the research on the earth radiation pressure is relatively lacking. In the high precision orbit determination, the impact of earth radiation pressure can not be ignored for high area-mass ratio satellites such as the navigation satellite. In this paper, the principle and influence mechanism of earth radiation pressure are studied, and the method of modeling the earth radiation pressure perturbation is discussed. According to the characteristics of Beidou satellite navigation system, the reflectivity of the surface of the earth and the distribution data of infrared emissivity are used to establish accurate earth radiation pressure model. The model for BDS satellites was verified and the accuracy and reliability of BDS satellites' orbit were evaluated by the global MGEX station observation data and regional monitoring station data. The experimental results show that the average 1D-RMS of the orbit is decreases by about 4 mm for the ERPM2 model and 2 mm for the ERPM1 model respectively, which orbit accuracy of several satellites has been improved up to 5 ~ 10 mm. The results of SLR validation show that adding the ERPM2 model improves the radial tracking of the Beidou MEO satellite orbit by 3.1 cm and improves the radial tracking of the GPS 036 satellite orbit by 0.8 ~ 1.4 cm. As a result, the earth radiation pressure model in the precision orbit determination of Beidou navigation satellite need to be paid attention.

Key words: precise orbit determination(POD); Earth radiation pressure; BDS