引文格式:胡忠禹,王宏,刘路,等.基于光学与雷达数据的小行星精密定轨[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):881-888.DOI:10.13203/j.whugis20230036

Citation:HU Zhongyu,WANG Hong,LIU Lu,et al.Precision Orbit Determination of Asteroid Based on Optical and Radar Data[J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(5):881-888.DOI:10.13203/j.whugis20230036

基于光学与雷达数据的小行星精密定轨

胡忠禹[1] 王 宏[2] 刘 路[1] 王 波[1] 高梧桐[1] 杨婉羚[1] 鄢建国[1]

1 武汉大学测绘遥感信息工程全国重点实验室,湖北 武汉,430079

2 北京跟踪与通信技术研究所,北京,100094

摘 要:基于Python语言研发了可处理多源实测数据的小行星定轨软件,通过使用小行星Toutatis实测数据(1976—2022年期间观测的光学数据与雷达数据)对其进行精密轨道确定研究,并将定轨结果与Toutatis星历作对比,验证了该软件的可靠性。定轨结果表明,联合使用光学与雷达数据计算得到的小行星精密轨道在3σ意义下的位置误差为1.9 km,仅使用光学数据计算得到的轨道位置误差为8.818 km,表明雷达数据的引入可以有效降低小行星的轨道确定误差。最终定轨结果达到了千米级的精度,且该精度与小行星星历一致,表明了自主研制的可处理多源实测数据的小行星定轨软件的正确性。

关键词:小行星Toutatis(4179);光学数据;雷达数据;精密定轨

中图分类号:P135 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-11-20

DOI:10.13203/j.whugis20230036 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0881-08

Precision Orbit Determination of Asteroid Based on Optical and Radar Data

HU Zhongyu[1] *WANG Hong*[2] *LIU Lu*[1] *WANG Bo*[1] *GAO Wutong*[1]
YANG Wanling[1] *YAN Jianguo*[1]

1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Beijing Institute of Tracking & Telecommunications Technology, Beijing 100094, China

Abstract: **Objectives**: In order to serve the implementation of China's deep space exploration programs, we develop software for asteroid orbit determination that can handle multiple sources of measured data. **Methods**: The precision orbit of the asteroid Toutatis is investigated by using its measured data (optical and radar data observed during the period 1976—2022), and the orbit determination results were compared with the Toutatis ephemeris, which verified the reliability of the software. **Results**: The orbit determination results show that the position uncertainty of the precision orbit of the asteroid calculated by combining optical and radar data is 1.9 km in the sense of 3, and the orbital position uncertainty calculated by optical data alone is 8.818 km, indicating that the introduction of radar data can effectively reduce the orbital determination error of asteroids. **Conclusions**: The final orbit determination result reached the engineering level, and the accuracy of the asteroid ephemeris was consistent, which showed the correctness of the self-developed asteroid orbit determination software that can process multi-source measured data.

Key words: asteroid Toutatis (4179); optical data; radar data; precise orbit determination

深空探测是指使用探测器到宇宙空间进行 探测,对于目前来讲,主要是针对太阳系空间的

基金项目:国家自然科学基金(42241116);国家重点研发计划(2022YFF0503202);航天飞行动力学技术重点实验室基金(KJW6142210210201);武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室开放基金(21-01-01)。

第一作者:胡忠禹,硕士,主要研究方向为小天体精密定轨与参数解算。huzy2318@whu.edu.cn

通信作者:鄢建国,博士,教授。jgyan@whu.edu.cn

探测,包括对月球、八大行星以及其他小天体等天体的探测。这里的小天体指小行星、彗星等围绕太阳运动的宇宙物质。其中,小行星在早期太阳系形成时诞生,蕴含行星的起源信息,因此,对小行星的探测是人类发展的必然趋势,同时也是人类了解宇宙、获取科学知识、开发利用空间资源的一种重要途径。

小行星探测活动包含空间探测与地面观测,空间探测包含行星探测器的飞跃、环绕、采样返回等操作[1]。例如中国即将实施的近地小行星Kamoòalewa(469219)的采样返回和小行星带中的主带彗星311P/PANSTARRS的环绕探测任务等,这一系列的计划都依靠于对目标小行星与彗星的精密轨道确定[2]。截至目前,国内外已有多位学者进行了相关小天体的定轨工作。中国曾于2012年12月完成对小行星Toutatis的飞越任务,在任务之前,紫金山天文台使用1988—2012年的历史数据与2012年间持续观测的300多组有效光学数据和雷达数据对小行星Toutatis进行精密定轨,定轨内符合精度在5 km以内,为后续飞越任务提供了科学依据与技术保障[3]。针对在中国即将开展的小天体探测任务,王波等[4]针对曾是任务目标之一的主带彗星133P自主研制了小行星光学定轨软件,使用1979—2019年总共849组光学数据对该彗星进行精密定轨,使该彗星的内符合精度控制在50 km以内;田伟[5]使用2004—2018年间的光学观测数据对小行星Kamoòalewa进行定轨,最终计算得到该小行星的内符合精度约为55 km;Sokova等[6]利用俄罗斯特设天体物理台的大型自适应望远镜对小行星Kalliope(22)的卫星Linus进行了5.2天的观测,通过使用直接几何法计算得到了卫星Linus的轨道六根数,如半长轴a=1 109±6 km,偏心率e=0.001 6±0.004等,其结果与Vachier等[7]利用小行星Linus的10年观测数据进行精密定轨得到的结论相一致。

另外,为了扩展小天体观测数据,学者们还提出许多新的观测模式,如天基观测[8]、月基观测[9]等。这些观测模式的优势在于极大地降低了地球大气和地面背景对设备的干扰,但是由于成本问题,其观测结果只能作为地基观测数据的一个补充。所以,地基观测尤其是地基光学观测以其性价比高、观测数据量大等特点,成为行星探测的主要方式。因此,国际主流的小行星定轨软件基本上是使用光学观测数据进行精密定轨,如OrbFit软件。

随着未来新的测量模式的应用,仅靠光学数据定轨已经不能满足目前的小行星轨道研究,为进行更高精度的小行星轨道确定,本文基于Python语言,在光学数据定轨的基础上,增加了雷达测距数据定轨功能,通过构建完善的动力学模型与测量模型,自主研发了可处理多源小行星观测数据的小行星精密定轨软件,通过使用不同策略处理小行星的实测数据,将定轨结果进行对比分析,验证本软件的可靠性与正确性。

1 小行星精密定轨软件

本文在进行小行星精密轨道确定的研究时,编写了可以处理小行星光学与雷达实测数据的小行星定轨软件,并将其命名为太阳系小天体多源数据处理软件。该软件主要的功能模块如图1所示,可知该软件严格满足程序功能结构化设计的理念,具有易扩展性、易操作性、可跨平台安装的优势。

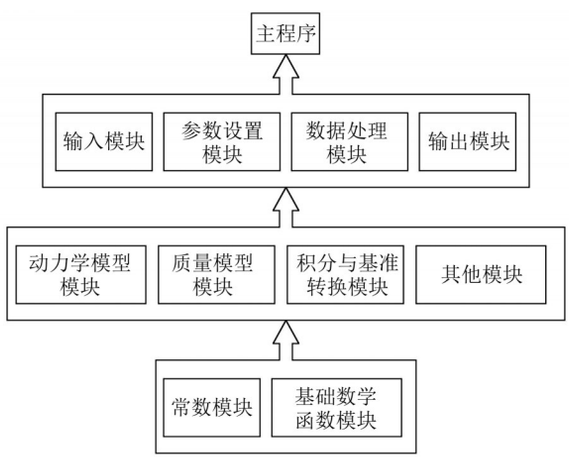


图1 软件内各模块关系图

Fig. 1 Diagram of Each Module Within the Software

动力学模型包括太阳对目标小行星的质点引力$\boldsymbol{a}_{\mathrm{sun}}$;太阳系中八大行星、月球、冥王星与一些质量较大的小行星如小行星Vesta、小行星Pallas等对目标小行星施加的N体摄动力$\boldsymbol{a}_N$;广义相对论摄动$\boldsymbol{a}_{pn}$,包括太阳、木星以及地球对小行星引力的相对论效应摄动;对于太阳辐射压摄动$\boldsymbol{a}_{\mathrm{srp}}$,该软件使用简易球形模型,目标小行星的物理参数参考喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory,JPL)中的小行星信息;此外,该软件还考虑了地球、月球、太阳的$J2$项对目标小行星的引力摄动[10]$\boldsymbol{a}_{J_2}$。具体模型如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{a}_{\text{sun}} = -\dfrac{GM_{\text{sun}}}{r^3}\boldsymbol{r} \\ \boldsymbol{a}_N = -\sum\limits_j^N GM_j\left(\dfrac{\boldsymbol{r}_j}{{r_j}^3}+\dfrac{\boldsymbol{\Delta}_j}{{\Delta_j}^3}\right) \\ \boldsymbol{a}_{pn} = \sum\limits_k^N \dfrac{GM_k}{c^2{r_k}^3}\left\{\left[\dfrac{4GM_k}{r_k}-v^2\right]\boldsymbol{r}_k + 4(\boldsymbol{r}_k\cdot\boldsymbol{v}_k)\boldsymbol{v}_k\right\} \\ \boldsymbol{a}_{\text{srp}} = \dfrac{3(1+\eta)}{2\rho_a d}\left(\rho_s\dfrac{AU^2}{r^3}\right)\boldsymbol{r} \\ \boldsymbol{a}_{J_2} = \sum\limits_k^N \dfrac{3J_2GM_kR^2}{R_k^5}\boldsymbol{U}\left[\left(\dfrac{5}{2}\dfrac{Z_k^2}{R_k^2}-\dfrac{1}{2}\right)\begin{pmatrix}X_k\\Y_k\\Z_k\end{pmatrix}-\begin{pmatrix}0\\0\\Z_k\end{pmatrix}\right] \end{cases} \tag{1}$$

式中,$\boldsymbol{\Delta}_j=\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}_j$,$\boldsymbol{r}$、$\boldsymbol{r}_j$分别为小行星和摄动天体在J2000.0日心天球坐标系下的位置矢量;GM_{sun}和GM_j、GM_k分别为太阳与各摄动天体的引力常数;$\boldsymbol{r}_k$、$\boldsymbol{v}_k$分别为小行星在摄动天体J2000.0质心坐标系下的位置矢量与速度矢量;c为光子在真空中的传播速度;η为小行星的反射系数;ρ_a为小行星的平均密度;ρ_s为距离太阳1 AU处的辐射压强度;J_2为摄动天体扁率;R为该天体的半径;$\boldsymbol{R}_k=[X_k\ Y_k\ Z_k]$,为小行星在摄动天体固定坐标系下的位置矢量;$\boldsymbol{U}$是其固定坐标系到J2000.0质心坐标系的旋转矩阵。

测量模块根据下式建立,并对光行时进行迭代求解:

$$\begin{cases} \boldsymbol{R} = \boldsymbol{R}^* - \boldsymbol{V}\dfrac{|\boldsymbol{R}|}{c} \\ a = \arctan\dfrac{Y-Y_E}{X-X_E} \\ b = \arcsin\dfrac{Z-Z_E}{s} \\ s = |\boldsymbol{R}-\boldsymbol{R}_E| + \rho_{md} + \rho_g \end{cases} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{R}^*$为未进行光行时改正的小行星在J2000.0地心平赤道系下的位置矢量;$\boldsymbol{V}$为小行星在J2000.0地心平赤道系下的速度矢量;光行时为$t=|\boldsymbol{R}|/c$;a、b和s为小行星的理论观测赤经、赤纬与测距数据,其中,赤经与赤纬数据属于光学数据,测距数据属于雷达数据;$\boldsymbol{R}=[X\ Y\ Z]$,$\boldsymbol{R}_E=[X_E\ Y_E\ Z_E]$,分别为小行星和测站在J2000.0地心平赤道系下的位置矢量;ρ_{md}为介质改正;ρ_g为引力时延改正。式(2)中的第一式就是光行时改正的过程,重复计算该式,直至两次计算的t小于给定的阈值即可,一般迭代2~3次即可。

软件中数值积分模块里的积分方法为8阶龙格库塔法,通过使用该积分方法对定轨过程中涉及的常微分方程进行数值求解,发现这一积分方法带来的误差是在精密定轨所要求的精度范围内的。因为该软件处理的目标小行星是以太阳为中心做周期环绕运动,故软件中以太阳系质心动力学时作为轨道积分的时标,对于测量所用的世界时与进行数据处理所用的动力学时之间的转换,主要转换关系如图2所示,图中M为地月质心日心轨道的平近点角。

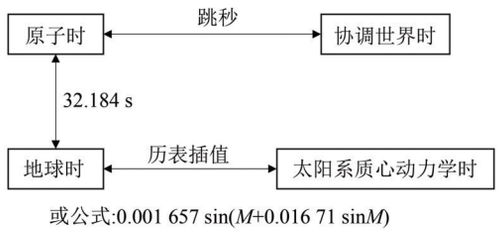


图2　时间系统关系图

Fig. 2　Time System Relationship Chart

空间基准则选取坐标系原点为太阳质心的国际天球坐标系,并以此框架来构建目标小行星的动力学模型[11],由于测量模块所需的小行星位置矢量的坐标系与动力学模型所处的坐标系不同,故需要进行坐标转换,这里不再赘述。特别注意的是,小行星的速度矢量在各天球坐标系下进行转换时要考虑洛伦兹变换,转换关系如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{v}_m = \dfrac{\boldsymbol{v}_j + (b-1)\left(\boldsymbol{v}_j\boldsymbol{v}_{nb}\right)\boldsymbol{v}_{nb} + b\boldsymbol{v}_b}{b\left(1+\dfrac{\boldsymbol{v}_b\boldsymbol{v}_j}{c^2}\right)} \\ b = \dfrac{1}{\sqrt{1-\left(\dfrac{\boldsymbol{v}_b}{c}\right)^2}} \end{cases} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{v}_m$代表转换后小行星速度矢量;$\boldsymbol{v}_j$表示小行星转换前速度矢量;$\boldsymbol{v}_b$表示转换前中心天体在转换后坐标系中的速度矢量;$\boldsymbol{v}_{nb}$为$\boldsymbol{v}_b$的单位矢量。

其他模块包含输入数据的预处理、跨文件全局参数的存储等功能。其中,输入数据预处理功能对于精密定轨是很重要的,包括光学数据预处理和雷达数据预处理。光学数据预处理主要为去偏操作。引言中提到,地基光学观测是小行星天体测量的主要方式。但是这种测量方式是相对于附近的参考恒星获得的,这些参考恒星的位置由参考恒星目录提供,一般来说,恒星目录越精确,观测就越精确。尽管普遍认为观测误差的平均值为零,但Carpino等[12]表明小行星天体测量法有明显的偏差,并认为原因是上述的恒星目录中存在系统误差。截至目前,已有多位学者参

与了该系统误差的解算,并制成文件存储在JPL的网站中(https://ssd.jpl.nasa.gov/ftp/ssd/debias/)。本软件使用ECFF18模型计算恒星目录的系统偏差,以达到光学数据去偏操作。雷达数据的预处理主要为对时延数据进行基于光速与雷达信号频率的缩放,得到以米为单位的测距数据。

根据上述的主要模块内容,该小行星定轨软件系统具有如下能力:

1)小行星精密定轨。可进行环绕太阳飞行的小行星精密定轨工作,可以处理赤经、赤纬、测距3种数据类型,定轨解算参数包括小行星的动力学参数,如小行星的位置与速度矢量;还可以解算非动力学参数,如测距偏差等。可以对定轨解算结果进行精度评定,并输出残差图[13]。

2)观测数据仿真。可以根据设置的观测站仿真赤经、赤纬、测距3种数据类型;可模拟观测系统误差、随机误差等影响误差[14]。

图3给出了软件执行小行星精密定轨解算的详细流程图,其原理是通过使用迭代加权批处理最小二乘法来解算使得给定观测数据的拟合残差最小的小行星的状态矢量。其中,该软件选择Laplace方法计算小行星的初始轨道。

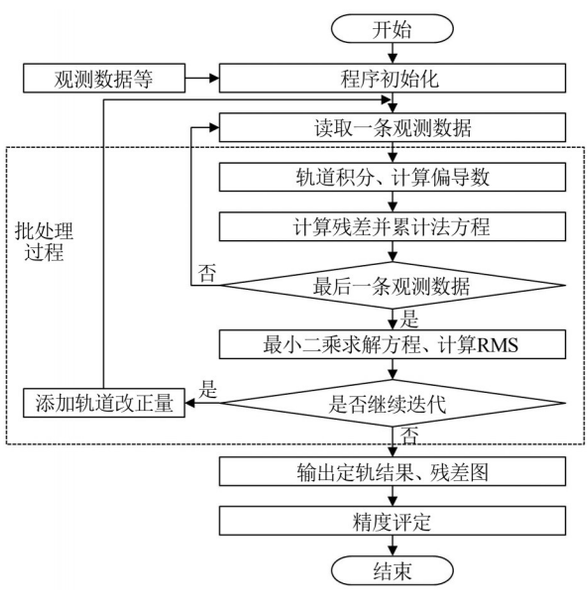


图3 精密定轨流程图

Fig. 3 Flowchart of Precision Orbit Determination

2 数据与方法

小行星Toutatis是一颗近地且目前靠近地球的最大的小行星之一。该小行星最接近地球时仅有690万km,且其轨道周期为4.03 a,平均每4年就会飞越一次地球,为小行星的观测提供了良好的条件。所以,从1989年命名这颗小行星开始,距今33年的时间里总共获取了6 608组光学观测数据、50多条雷达观测数据,观测资料丰富,且该小行星的物理参数明确,有助于构建精密的动力学模型。为验证该定轨软件处理数据结果的正确性,本文选取小行星Toutatis作为目标小行星,对其历史光学与雷达数据进行联合处理,进行小行星Toutatis的精密定轨,同时对解算精度进行分析,从而研究提高小行星定轨精度的方法,再将解算的定轨结果及其对应的不确定度与JPL中的Horizons在线历表系统里的小行星历表作对比,验证该软件解算结果的正确性[15]。此处的不确定度指的是解算参数的方差,该值可由估值协方差矩阵的对角线元素得到。

本文选用1976—2022年间观测小行星Toutatis获取的6 608组光学数据与全部的雷达测距数据共34组对其进行精密定轨。光学与雷达观测数据可分别在小行星中心(https://www.minorplanetcenter.net)与JPL处或在小行星动态站点(asteroids dynamic site, AstDyS, https://newton.spacedys.com/astdys/)处下载得到。根据AstDyS所给出的信息,光学观测数据中赤经的精度约为0.15″,赤纬的精度约为0.1″,总体光学观测值的残差均方根(root mean square,RMS)约为0.405″;雷达测距数据的精度为百米级,由JPL提供。因为本文所处理数据的时间跨度较大,所以没有将各观测视为等精度测量,最终光学观测数据的权重选取AstDyS所解算观测值不确定度的倒数,雷达测距数据的权重则选取JPL公布的测量不确定度的倒数[16]。

本文考虑了两种小行星Toutatis定轨解算策略。策略1:使用1976—2022年间观测的6 608组光学数据进行定轨解算,并与OrbFit软件解算结果进行对比;策略2:在策略1基础上,对上述光学数据引入34组雷达测距数据进行联合定轨,分析引入雷达数据对小行星精密定轨精度的影响。定制这两种解算策略的目的是根据解算结果验证自研软件的正确性。

3 实测数据定轨结果与分析

基于上述策略,使用自主研发的小行星定轨软件执行了小行星Toutatis的精密定轨,定轨历元设置为太阳系质心动力学时下的2017-01-01 0时。图4为策略1中光学数据解算结果反演得到

的赤经、赤纬残差图。由图4可知,残差总体在0″上下,分布均匀,说明本次解算结果没有明显的系统偏差,解算结果可靠[12],且发现1996年以前的残差值较大,原因是其光学数据较为久远,历史数据精度略低[17]。同时,光学观测数据定轨得到的赤经残差RMS约为0.480 1″,赤纬残差RMS约为0.336 9″,总体光学观测值残差RMS为0.409 2″。由于赤经与赤纬的残差RMS与观测文件上的光学观测精度不等,经探究后发现,观测文件上的观测精度与实际能达到的观测精度不符,是因为进行光学观测时测量精度信息缺失,AstDyS对观测数据赋予了一个定值,该定值不能准确地描述观测值的精度,但总体光学观测值的残差RMS是经计算后得出的,较为准确,并且本文解算的值与该RMS值相近。同时利用OrbFit软件对小行星Toutatis的光学数据进行精密定轨,得到的赤经、赤纬残差图如图5所示,其中,赤经残差RMS约为0.474 2″,赤纬残差RMS约为0.323 2″。对比图4与图5可知,本软件进行光学数据定轨的结果是正确的。

表1给出了策略1中光学数据解算的小行星Toutatis的位置与速度。由表1可以看出,使用全部光学数据的定轨结果精度较高,其三维位置中误差约为2.94 km,进一步表明当前小行星Toutatis的光学数据可以约束其三维位置误差到8.818 km(在3σ原则下)。

在上述策略1中使用光学数据定轨的基础上,增加全部的雷达测距数据(策略2),这些雷达数据的不确定度约在3 μs左右,转换为距离不确定度约在450 m左右。将光学数据与雷达数据联合进行小行星的精密定轨。其光学数据与雷达测距数据的残差图如图6所示,其中,光学观测数据定轨得到的赤经残差RMS约为0.469 1″,赤纬残差RMS约为0.340 3″,雷达测距数据的残差RMS约为268 m。对比光学数据的精度和JPL官网上雷达数据的测量不确定度,且根据残差图中残差分布合理,可知策略2中的联合数据解算合理。表1给出了光学与雷达数据解算的位置与速度和它们对应的不确定度。

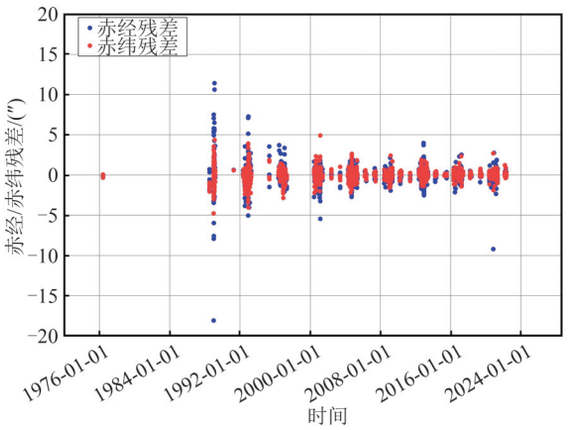


图4　光学数据定轨解算结果与观测值的残差

Fig. 4　Residuals of the Optical Data Orbit Determination Solution Results and the Observations

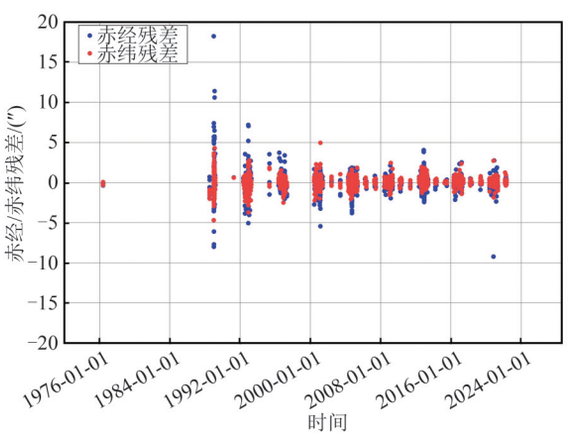


图5　OrbFit软件定轨结果的残差

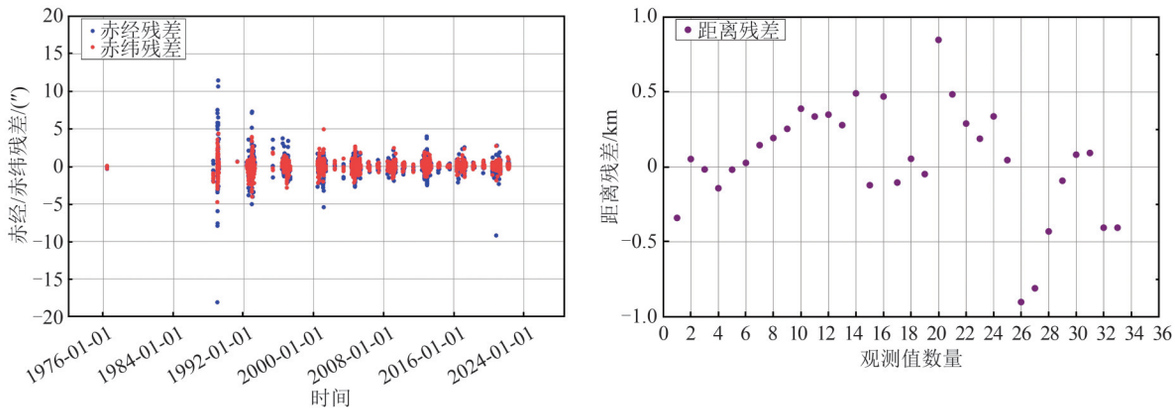
Fig. 5　Residuals from OrbFit Software Orbit Determination Results

表1　光学数据、光学与雷达数据与JPL的解算结果和1σ的不确定度

Table 1　Optical Data Orbiting Results, Optical and Radar Data Orbiting Results, JPL Solving Results and Uncertainty of 1σ

统计项	X/km	Y/km	Z/km	V_X/(10^{-8} km·s^{-1})	V_Y/(10^{-7} km·s^{-1})	V_Z/(10^{-7} km·s^{-1})
光学数据	8 722 122.103 556 ±1.452 4	144 507 293.516 7 ±2.180 9	61 835 422.081 21 ±1.332 2	−34.385 516± 3.499×10^{-7}	11.310 953± 3.066×10^{-7}	5.085 784± 1.775×10^{-7}
光学与雷达数据	8 722 123.276 072 ±0.186 6	144 507 289.039 2 ±0.414 5	61 835 431.351 85 ±0.449 0	−34.385 516± 5.665×10^{-8}	11.310 956± 9.9066×10^{-8}	5.085 785± 4.492×10^{-8}
JPL/Horizons	8 722 123.478 021 ±0.198 7	144 507 287.172 4 ±0.443 5	61 835 433.875 22 ±0.594 9	−34.385 516± 8.122×10^{-8}	11.310 952± 1.336×10^{-7}	5.085 785± 8.088×10^{-8}

图7为两种策略的定轨结果不确定度的柱状图。由图7可知,引用雷达数据后的定轨结果不确定度均有不同程度的降低,符合Krivova等[18]使用雷达数据可以提高定轨精度的结论,且即使是有较长时间进行光学观测的小行星,使用雷达数据依旧可以使小行星的位置与速度矢量元素



(a) 光学观测值残差图 (b) 雷达观测值残差图

图6 光学与雷达数据定轨解算结果与观测值的残差。

Fig. 6 Residuals of the Optical and Radar Data Orbit Determination Solution Results and Observations

值的不确定度有明显降低[19]。

将依据策略2定轨得到的最佳改进结果同JPL公布的小行星Toutatis星历进行对比,由于小行星星历是由某些特定时间的小行星位置与速度信息整合而成,因此JPL通过计算太阳系内主要天体的引力并作为约束,再将其位置与速度积分至当前定轨时刻。结果见表1,JPL输出的定轨时刻的小行星Toutatis的位置精度在X轴与Y轴上都基本一致,在Z轴上略差于本文的结果,可以说两者的定轨结果与解算精度一致。根据表1中的数据,说明通过使用光学与雷达数据联合定轨可以使定轨解算RMS达到0.6 km,且该定轨结果在3σ原则下的位置误差约为1.9 km,验证了本文解算结果的准确性。表2展示了策略1和策略2定轨结果同JPL小行星星历的差值。

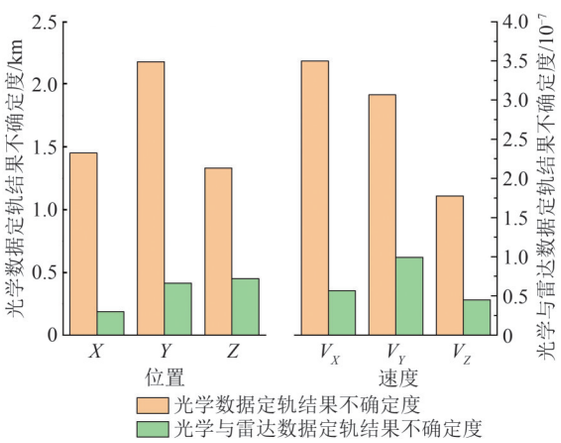


图7 两种策略的定轨结果不确定度对比图

Fig. 7 Comparison of Uncertainty of Track Setting Results for Two Strategies

表2 光学数据、光学与雷达数据与JPL解算结果的差值

Table 2 Difference Between Optical Data, Optical and Radar Data and JPL Solved Results

统计项	ΔX/km	ΔY/km	ΔZ/km	$\Delta V_X/(10^{-8}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}})$	$\Delta V_Y/(10^{-7}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}})$	$\Delta V_Z/(10^{-7}\,\mathrm{km\cdot s^{-1}})$
光学数据	1.374 465	−6.344 3	11.794 01	35.376 537 562 115	10.370 097 134 000	−9.323 323 620 265
光学与雷达数据	0.201 949	−1.866 8	2.523 37	−9.407 760 808 244 3	−4.669 407 062 465 3	−2.861 641 632 989 6

将解算的最优结果进行轨道积分,并与小行星Toutatis星历作差,得到外推星历互差图见图8。由图8可知,本文轨道积分与星历差值最大约为15 km,且差值收敛,说明此次积分结果与历表接近,积分效果较好。同时与星历的最大差值以4年为周期不断出现,这与小行星Toutatis飞越地球的周期相符,这是由于真实星历中使用了许多地面观测值对小行星Toutatis轨道进行改正,观测数据丰富的时间点的轨道有更高、更稳定的精度。

综上所述,本文选用小行星Toutatis作为目标小行星,验证了光学数据与雷达数据的联合使用可以使定轨精度显著提高,同时增加光学观测弧段也会有效降低定轨误差。通过使用历史光学与雷达观测数据对Toutatis进行定轨,残差水平与测量不确定度相当,解算精度与JPL历表结果一致。这些结果初步验证了本文自主研制的可处理小行星多源观测数据的定轨软件的可靠性。

4 结 语

小行星轨道的精密确定有助于小行星探测器在探测过程中实现对小行星的飞跃、采样返回

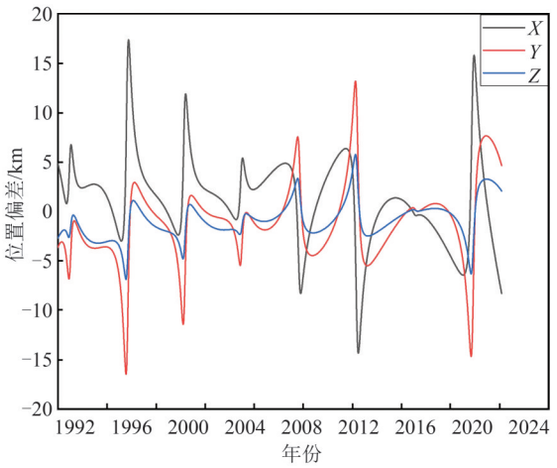


图 8　外推星历互差图

Fig. 8　Difference of Extrapolated Ephemerist

等操作,是小行星探测的前提与基础。针对目前小行星定轨软件只能处理光学数据的缺点,自主研发了可处理多源数据的小行星定轨软件。本文选用小行星 Toutatis 作为目标小行星,验证了增加光学观测数据可以有效提高小行星定轨精度的理论;分析了雷达数据的应用对小行星定轨精度的影响,分别计算使用不同数据下的定轨精度,得到两种数据的联合使用可以使定轨精度提高的结论。且按 3σ 原则,本文解算的小行星轨道与实际位置偏差约为 1.9 km,达到了工程级别,并通过与小行星历表作对比,验证了该小行星定轨软件的可靠性[20]。

在未来的工作中,将进一步研究提高小行星定轨精度的方法。可以对软件中小行星的摄动力模型继续进行完善,可以进一步对地球不规则摄动、Yarkovsky 效应[21]以及 YORP 效应[22]等的影响量级进行研究;可以尝试对测量模型使用更高精度的改正等。

参　考　文　献

[1] 我国首次小行星探测任务公布[J]. 科学 24 小时, 2022(9): 30.
China's First Asteroid Exploration Mission Announced[J]. *Science in 24 Hours*, 2022(9): 30.

[2] 龚自正, 李明, 陈川, 等. 小行星监测预警、安全防御和资源利用的前沿科学问题及关键技术[J]. 科学通报, 2020, 65(5): 346-372.
GONG Zizheng, LI Ming, CHEN Chuan, et al. The Frontier Science and Key Technologies of Asteroid Monitoring and Early Warning, Security Defense and Resource Utilization[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(5): 346-372.

[3] 胡寿村, 季江徽, 赵玉晖, 等. 嫦娥二号飞越小行星试验中图塔蒂斯轨道确定与精度分析[J]. 中国科学: 技术科学, 2013, 43(5): 506-511.
HU Shoucun, JI Jianghui, ZHAO Yuhui, et al. Determination and Accuracy Analysis of Toutatis Orbit in Chang'e-2 Flying over Asteroids Test[J]. *Scientia Sinica* (*Technologica*), 2013, 43(5): 506-511.

[4] 王波, 刘路, 鄢建国, 等. 小行星光学定轨软件研制和数据处理分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(2): 277-284.
WANG Bo, LIU Lu, YAN Jianguo, et al. Development of Asteroid Optical Determination Software and Data Processing Analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(2): 277-284.

[5] 田伟. 小行星(469219)Kamoòalewa 轨道的确定与误差分析[J]. 天文学报, 2021, 62(2): 54-62.
TIAN Wei. Orbit Determination of the Asteroid (469219) Kamoòalewa and Its Error Analysis[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2021, 62(2): 54-62.

[6] SOKOVA I A, SOKOV E N, ROSCHINA E A, et al. The Binary Asteroid 22 Kalliope: Linus Orbit Determination on the Basis of Speckle Interferometric Observations[J]. *Icarus*, 2014, 236: 157-164.

[7] VACHIER F, BERTHIER J, MARCHIS F. Determination of Binary Asteroid Orbits with a Genetic-Based Algorithm[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2012, 543: A68.

[8] 张雪敏,李萌,熊超. 天基单星测角跟踪条件下的空间非合作目标定轨[J]. 航天控制, 2018, 36(3): 40-45.
ZHANG Xuemin, LI Meng, XIONG Chao. Orbit Determination of Non-cooperative Space Target with Space-Based Single-Satellite Angle Tracking[J]. *Aerospace Control*, 2018, 36(3): 40-45.

[9] 祝寒友, 胡震宇, 申智春. 基于月基望远镜的近地小行星观测[J]. 空间碎片研究, 2021, 21(4): 22-29.
ZHU Hanyou, HU Zhenyu, SHEN Zhichun. Near-Earth Asteroid Observations Based on Lunar Telescopes[J]. *Space Debris Research*, 2021, 21(4): 22-29.

[10] 李济生. 人造卫星精密轨道确定[M]. 北京: 解放军出版社, 1995.
LI Jisheng. Precise Orbit Determination of Artificial Satellites[M]. Beijing: PLA Press, 1995.

[11] Montenbruck O, Gill E. 卫星轨道: 模型、方法和应用[M]. 王家松, 祝开建, 胡小工, 译. 北京: 国防工业出版社, 2012.
Montenbruck O, Gill E. Satellite Orbits: Models, Methods and Applications[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2012.

[12] CARPINO M, MILANI A, CHESLEY S R. Error Statistics of Asteroid Optical Astrometric Observations[J]. *Icarus*, 2003, 166(2): 248-270.

[13] 杨轩, 鄢建国, 叶茂, 等. 对一种月球与火星探测多程微波测量链路定轨定位的数值模拟初步分析[J]. 深空探测学报, 2018, 5(2): 154-161.
YANG Xuan, YAN Jianguo, YE Mao, et al. Preliminary Numerical Analysis of Precise Orbit Determination for a Multi-way Microwave Measurement Mode in the Lunar and Mars Missions[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2018, 5(2): 154-161.

[14] 金炜桐. 小天体探测器精密定轨与引力质量解算[D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
JIN Weitong. Precision Orbit Fixation and Gravitational Mass Solution of Small Object Detector[D]. Wuhan: Wuhan University, 2020.

[15] 叶茂. 月球探测器精密定轨软件研制与四程中继跟踪测量模式研究[D]. 武汉:武汉大学, 2016.
YE Mao. Development of Lunar Spacecraft Precision Orbit Determination Software System and Research on a Four-Way Relay Tracking Measurement Mode[D]. Wuhan:Wuhan University, 2016.

[16] Vallado D A. Fundamentals of Astrodynamics and Applications[M]. 5th ed. Hawthorne: Microcosm Press, 2001.

[17] VINOGRADOVA T A, KOCHETOVA O M, CHERNETENKO Y A, et al. The Orbit of Asteroid (99942) Apophis as Determined from Optical and Radar Observations[J]. *Solar System Research*, 2008, 42(4): 271-280.

[18] KRIVOVA N V, YAGUDINA E I, SHOR V A. The Orbit Determination of (4179) Toutatis from Optical and Radar Data[J]. *Planetary and Space Science*, 1994, 42(9): 741-745.

[19] 刘山洪, 鄢建国, 杨轩, 等. 水星探测器精密定轨软件研制及应用[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(4): 510-517.
LIU Shanhong, YAN Jianguo, YANG Xuan, et al. Development of Mercury Precise Orbit Determination Software and Application[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(4): 510-517.

[20] 胡松杰, 唐歌实. 北京中心深空探测器精密定轨与分析软件系统[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(5): 69-74.
HU Songjie, TANG Geshi. BACC Orbit Determination and Analysis Software for Deep-Space Explorers[J]. *Journal of Spacecraft TT&C Technology*, 2010, 29(5): 69-74.

[21] CAPEK D, VOKROUHLICKÝ D. Accurate Model for the Yarkovsky Effect[J]. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 2004 (197): 171-178.

[22] BOTTKE J, VOKROUHLICKÝ D, RUBINCAM D P, et al. The Yarkovsky and YORP Effects: Implications for Asteroid Dynamics[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2006, 34: 157-191.