论文

利用Rosetta无线电跟踪数据解算小行星(21) Lutetia质量与体积密度

金炜桐¹, 李斐^{1,2*}, 鄢建国^{1*}, 叶茂¹, 杨轩¹

1. 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079;

2. 武汉大学中国南极测绘研究中心, 武汉 430079

*联系人, 李斐, E-mail: fli@whu.edu.cn; 鄢建国, E-mail: jgyan@whu.edu.cn

收稿日期: 2018-03-27; 接受日期: 2018-06-19; 网络出版日期: 2018-10-08

国家自然科学基金(编号: 41374024, 41604004)、湖北省自然科学基金创新群体(编号: 2015CFA011)和贵州省射电天文数据处理重点实验室开放基金(编号: KF201813)资助项目

摘要 小行星的质量与体积密度是解释其内部结构和物质组分的重要参数, 探测器飞掠则是精确获取该参数的主要手段之一. 本文利用Rosetta探测器飞掠小行星(21) Lutetia期间的无线电跟踪数据, 基于自研软件解算了小行星(21) Lutetia的质量并根据星载科学级相机确定的形状模型给出了体积密度的估计值. 解算过程中, 针对星上高增益天线在俯仰和方位两个自由度上的旋转特性, 建模去除其产生的附加多普勒频移摄动量并给出具体数学公式; 为提升质量估计的可靠性提出两种不同的解算策略, 基于参数性质及结合几何构型从参数相关性及解算稳定性两方面进行了详细讨论. 解算得到(21) Lutetia的质量为 $(1.696 \pm 0.014) \times 10^{18}$ kg (1σ , 误差0.85%), 体积密度为 $(3.4 \pm 0.3) \times 10^3$ kg/m³. 质量解算值与欧洲太空局(European Space Agency, ESA)的Rosetta科学团队提供的结果具有一致性, 解算精度提高了15%.

关键词 Rosetta探测器, 小行星(21) Lutetia, 质量, 体积密度, WUDOGS**PACS:** 96.25.Nc, 96.30.Ys, 95.55.Jz

1 引言

Rosetta探测器于2004年3月2日发射升空, 途中借助3次地球和1次火星的引力助推, 历经两次小行星飞掠(2867 Steins, 21 Lutetia)以及一段漫长的深空休眠期, 2014年8月最终抵达探测目标——彗星67P/Churyumov-Gerasimenko^[1]. 飞掠小行星(21) Lutetia期间Ro-

setta探测器搭载的12个科学仪器先后开启, 对其运行轨道、自转、形状、大小、质量、热力学特性等进行了充分的探测和研究^[2]. 其中, 小行星的质量信息可以从地面测站对探测器的无线电跟踪数据中提取. 当探测器近距离飞掠小行星时, 通过建立精细的星地链路观测模型从观测信号中扣除小行星质量以外的影响, 即可得到仅由小行星质量引起的轨道摄动量, 进而反

引用格式: 金炜桐, 李斐, 鄢建国, 等. 利用 Rosetta 无线电跟踪数据解算小行星(21)Lutetia质量与体积密度. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 129501
Jin W T, Li F, Yan J G, et al. Determination of mass and bulk density of asteroid (21) Lutetia using Rosetta radio tracking data (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 129501, doi: [10.1360/SSPMA2018-00084](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00084)

表 2 Rosetta 飞掠小行星(21) Lutetia 参数

Table 2 Flyby parameters of the asteroid (21) Lutetia

飞掠参数	参数数值
d	$(3168 \pm 7.5) \text{ km}$
v_0	14.99 km/s
α	171.2°
α_p	172.18°
β	3°
探测器日心距离	2.71 AU
探测器地心距离	3.03 AU
SPA 最小值	0.15°
SPA 最小值时刻	$t_0 - 18 \text{ min}$
LSEA	98.9°

图 2 (网络版彩图) Rosetta 飞掠小行星(21) Lutetia 太阳相角、小行星-日-地张角与相对距离. 由于飞掠速度较快, (t_0-2) 至 (t_0+6) min 期间 SPA 迅速变化, 从 (t_0+16) min 时刻开始, SPA 大于 157° ; LSEA 稳定在 98.9° 左右

Figure 2 (Color online) Solar phase angle, Lutetia-sun-earth angle and relative distance during Rosetta flyby at asteroid (21) Lutetia. SPA changes rapidly from (t_0-2) to (t_0+6) min due to high relative flyby velocity. SPA is larger than 157° from (t_0+16) min; LSEA is about 98.9° during the flyby.

掠距离上; 后者关系到无线电信号在深空中的传播路径, LSEA 越接近 180° , 表示信号的传播路径越接近太阳, 不仅太阳引力势造成的光路弯曲更加显著^[14], 也更容易被冕区等离子体影响^[15,16], 两者在飞掠期间均处于允许的误差范围内.

结合飞掠几何构型, 可以推导出从负无穷远时刻至任意时刻 t , 由小行星质量引起的探测器在视线方向速度摄动量的一阶解析公式^[12,15,17]

$$\Delta v_r = -\frac{GM}{v_0 d} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{v_0^2}{d^2}(t-t_0)^2}} \cos \alpha_p \cos \beta - \frac{GM}{v_0 d} \left[1 + \frac{\frac{v_0(t-t_0)}{d}}{\sqrt{1 + \frac{v_0^2}{d^2}(t-t_0)^2}} \right] \sin \alpha_p \cos \beta, \quad (1)$$

其中, d 表示飞掠最近点距离, v_0 表示飞掠最近点探测器相对于小行星飞掠速度的大小, α_p 表示视线方向在飞掠平面的投影同探测器相对于小行星飞掠速度向量 v_0 的夹角, α 表示视线方向与 v_0 的夹角, β 表示视线方向同飞掠平面的夹角. 式中第一项和第二项分别表示小行星质量引起的探测器在飞掠平面内沿轨和横向方向的速度摄动量在视线方向的投影大小. 根据欧洲空间运行操作中心(European Space Operations Centre, ESOC)提供的 Rosetta 轨道文件^[18], 可以带入解析公式计算出观测数据时间覆盖范围内由小行星质量造成的视线方向多普勒频移的摄动量大小(图3).

对于实际观测数据, 拟合 X 波段的观测值得到的观测噪声为 5.7 mHz , 与文献^[7]提供的结果一致, 拟合 S 波段的观测值得到的观测噪声为 13.55 mHz . 一方面, 小行星质量在 S 波段的影响较小且 S 波段的观测噪声较大; 另一方面, 在 S 波段的实测数据中, 从飞掠最近点前 5 min 直到飞掠最近点后 2 h 内均无观测数据. 故本文仅利用 X 波段的双程多普勒观测数据解算小行星(21) Lutetia 的质量.

3 星上高增益天线旋转引起的多普勒频移附加摄动量建模

Rosetta 轨道器的主体部分是一个大型铝制长方箱体, 直径为 2.2 m 的抛物面高增益天线附着在箱体一侧, 具有俯仰和方位两个方向的自由度, 分别可以旋转 $-165^\circ - +30^\circ$ 以及 $-260^\circ - +80^\circ$ ^[19]. 飞掠期间高增益天线需要一直保持朝向地球, 直至抵达 $(t_0-5) \text{ min}$ 时刻附近转动自由度达到上限^[2]. 从 $(t_0-15) \text{ min}$ 时刻开始, 高增益天线旋转引起的多普勒频移摄动量已经趋于明显, (t_0+95) 至 $(t_0+165) \text{ min}$ 时段内高增益天线进行了一组回转用于测试轨道器与着陆器之间的无线电路^[7], 对多普勒频移量级的影响已经超过了小行星质量对多普勒频移量级的影响(图4), 若不考虑高增益天线的转

图 3 (网络版彩图)解析公式计算的飞掠期间由小行星质量造成的视线方向多普勒频移摄动量

Figure 3 (Color online) Frequency changes due to asteroid mass during Rosetta flyby from analytical method.

图 4 (网络版彩图)不考虑HGA旋转时由小行星质量造成的视线方向X波段多普勒频移摄动量

Figure 4 (Color online) Frequency changes at X-band due to asteroid mass during Rosetta flyby by neglecting HGA motion.

动, 小行星的质量参数在解算过程中会吸收旋转效应, 掩盖真实的小行星质量值. 文献[7]对Rosetta探测器高增益天线转动的影响进行模拟但并未给出消除其影响的详细计算公式. 图5为与探测器质心和高增益天线相位中心有关的坐标系示意图. 本文考虑飞掠期间星上高增益天线的旋转特征, 详细讨论其转动造成的多普勒频移附加摄动量并给出具体数学公式.

某时刻高增益天线以角速度 ω_s 绕某轴旋转时, 由探测器质心指向相位中心的向量 r_{ch} 会随之改变, 将两者又乘再左乘相应的旋转矩阵, 即可定量计算出该时刻相应坐标系下的天线转动线速度, 具体公式如下:

图 5 (网络版彩图)Rosetta探测器相关坐标系(Rosetta本体坐标系ROS_SPACECRAFT, HGA俯仰坐标系ROS_HGA_EL, HGA方位坐标系ROS_HGA_AZ以及HGA坐标系ROS_HGA)

Figure 5 (Color online) Coordinate system for Rosetta (Central body frame ROS_SPACECRAFT, HGA elevation frame ROS_HGA_EL, HGA azimuth frame ROS_HGA_AZ and HGA frame ROS_HGA).

$$\Delta v_{J2000} = M_{sj} \cdot [\omega_s \times (k_{ch} \cdot r_{ch})], \quad (2)$$

其中, M_{sj} 为从ROS_SPACECRAFT坐标系至BCRS (Barycentric Celestial Reference System)的旋转矩阵, ω_s 和 r_{ch} 分别表示ROS_SPACECRAFT坐标系下高增益天线的旋转角速度和从探测器质心指向高增益天线相位中心的向量, k_{ch} 为比例因子. 其中, ω_s 和 r_{ch} 的计算公式如下:

$$\omega_s = f\{S(\omega_s)\}, \quad (3)$$

$$S(\omega_s) = \left(\frac{d}{dt} M_{sh} \right)^T \cdot M_{sh}, \quad (4)$$

$$r_{ch} = -r_c + r_b + M_{sh}^T \cdot (r_g + r_p), \quad (5)$$

$S(\omega_s)$ 表示角速度反对称矩阵, f 表示从角速度反对称矩阵至角速度矢量的映射关系, 该关系表示为

$$\begin{aligned} \omega_s(1) &= S(\omega_s)_{(3,2)}, \\ \omega_s(2) &= S(\omega_s)_{(1,3)}, \\ \omega_s(3) &= S(\omega_s)_{(2,1)}, \end{aligned} \quad (6)$$

M_{sh} 表示从ROS_SPACECRAFT坐标系至ROS_HGA坐标系的旋转矩阵, r_c 为ROS_SPACECRAFT坐标系下探测器质心位置, r_b 为高增益天线附着点在ROS_SPACE-

CRAFT坐标系下的位置向量, $\mathbf{r}_g$ 为ROS_HGA坐标系下由高增益天线附着点指向高增益天线几何中心的位置向量, $\mathbf{r}_p$ 为ROS_HGA坐标系下高增益天线几何中心指向相位中心的位置向量, 在该尺度的距离下可以认为两者重合¹⁾, 具体数值在表3^[19,20]中给出.

本文采用Sky-Frequency作为观测值计算模型^[21]. 探测器在BCRS坐标系下的速度量需要加上高增益天线的旋转线速度再代入计算.

利用上述模型去除高增益天线旋转引起的附加速度摄动后, 仅由小行星引起的视线方向的多普勒频移量随时间变化的趋势(图6)同图3符合. 由于HGA的旋转影响探测器质心在本地坐标系下的位置, 故公式中的比例因子 k_{ch} 作为待估参数进行解算.

4 解算策略与结果分析

表4^[7,8,11,14,20–26]给出了解算过程中采用的模型配置、详细参数及相应的参考文献. 为了充分考虑参数间的协方差结构特性, 更准确地解算小行星质量, 本文讨论分析了两种解算策略: 除解算探测器6个初始轨道根数、探测器质心至HGA相位中心向量 $\mathbf{r}_{ch}$ 的比例因子 k_{ch} 以及小行星的GM值外, 策略一不解算太阳光压摄动加速度的比例因子 k_{so} , 策略二则对其进行解算. 一方面, 探测器进入深空环境后无法定量描述太阳帆板和轨道主箱体表面材料光学属性的变化, 一般在太阳光压摄动加速度前引入比例因子并作为待估参数进行解算. 另一方面, 基于经典最小二乘原理的参数

表 4 利用Rosetta飞掠数据解算小行星(21) Lutetia质量的解算配置

Table 4 Configuration of determining mass of asteroid (21) Lutetia with Rosetta flyby data

解算配置	配置说明
力模型	中心引力(以太阳为中心天体 ^[11]); 三体摄动(DE421历表 ^[22] , (21) Lutetia历表 ^[20,21]); 广义相对论摄动(太阳、木星点质量引力场 ^[14]); 太阳光压摄动(Box-Wing模型 ^[23] , 探测器质量2851 kg, Rosetta单侧太阳能帆板以及主箱体表面积, 吸收, 镜面反射以及漫反射光学参数 ^[11])
观测模型	双程多普勒Sky-Frequency模型 ^[11,21]
对流层改正	测站气压、温度以及相对湿度来自Level 2数据集集中的气象文件; 干分量天顶延迟: Saastamoinen模型 ^[24] ; 湿分量天顶延迟: Ifadis模型 ^[25] ; 映射函数GMF (Global Mapping Function) ^[26]
待估参数及初值	探测器初始轨道根数 $\mathbf{r}_{00}, \mathbf{v}_{00}$, 初值从Rosetta探测器对应的SPICE Kernel文件中读取 ^[20] ; 小行星(21) Lutetia的GM, 初值为 $0.1087 \text{ km}^3/\text{s}^2$ ^[8] ; 探测器质心至HGA相位中心向量 $\mathbf{r}_{ch}$ 的比例因子(Scale Factor) k_{ch} , 初值为1.0; 太阳光压摄动力比例因子 k_{so} (可选参数), 初值为1.0
观测值权重	与实测数据噪声水平相同: 5.7 mHz ^[7]

表 3 Rosetta相关坐标系固定几何参数

Table 3 Fixed vectors of coordinate systems for Rosetta

几何参数	参数取值 (m)
$\mathbf{r}_c$	$(-0.0170, 0.0011, 1.2508)^{2)}$
$\mathbf{r}_b$	$(2.1515, 0.0000, 0.0800)^{[19]}$
$\mathbf{r}_g$	$(1.3045, 0.0000, 0.1500)^{[20]}$
$\mathbf{r}_p$	$(0.0000, 0.0000, 0.0000)^{1)}$

图 6 (网络版彩图)考虑HGA旋转时由小行星质量造成的视线方向X波段多普勒频移摄动量

Figure 6 (Color online) Frequency changes at X-band due to asteroid mass during Rosetta flyby accounting for HGA motion.

估计方法要求待估参数间彼此独立, 从参数性质上来看, k_{ch} 属于观测模型参数, 不会与力模型参数产生很强的相关性; k_{so} 与小行星的GM值同属力模型参数, 受飞掠过程的轨道几何构型限制会与其产生相关性.

1) Andert T P. HGA phase center of the Rosetta spacecraft. Personal Commun, 2017

2) Andert T P. Center of mass of the Rosetta spacecraft. Personal Commun, 2017

使用两种策略分别进行参数估计后得到的多普勒残差值(Postfit-Residuals)如图7和8所示, 不解算 k_{so} 时残差序列均值为0.0023 mHz, 标准差为4.9966 mHz; 解算 k_{so} 时残差序列均值为-0.0067 mHz, 标准差为4.9938 mHz, 两残差序列均值均十分接近于0 mHz, 标准差大约为X波段测量噪声水平的1/3, 近似符合高斯白噪声分布. 提取的有效信息是否按照实际物理意义精确地分配到每个待估参数中, 还需要考察参数解算的误差范围以及参数间的独立性.

待估参数 1σ 的误差范围如表5所示, 各参数误差范围均在1%以下; 图9和10分别显示了使用两种策略解

图7 (网络版彩图)策略一解算小行星质量后的观测值残差
Figure 7 (Color online) Post-fit residuals after subtracting the least-squares fit from observation for scenario 1.

图8 策略二解算小行星质量后的观测值残差
Figure 8 Post-fit residuals after subtracting the least-squares fit from the observation for scenario 2.

算后待估参数之间的相关系数, 不解算太阳光压比例因子时, 探测器速度的x分量与其他速度分量以及小行星对探测器的摄动加速度存在一定的相关性. 由于多普勒频移的大小与地面站和探测器之间视线方向的相对速度有关, 若在飞掠期间, 探测器某一方向的速度分量一直与视线方向保持接近于 0° 或者 180° (图11), 那么这一速度分量造成的多普勒频移对总多普勒频移的贡献最大, 而另外两个方向的速度分量对多普勒频移的贡献几乎为零, 对应分量的参数近似处于冗余状态, 造成“过拟合”现象, 导致该方向的速度分量与其他两

图9 (网络版彩图)解算策略一待估参数相关系数
Figure 9 (Color online) Correlation matrix of solve-for parameters with scenario 1.

图10 (网络版彩图)解算策略二待估参数相关系数
Figure 10 (Color online) Correlation matrix of solve-for parameters with scenario 2.

表 5 策略一和策略二待估参数的解算结果及形式误差限

Table 5 Results and formal error bars of solve-for parameters for scenario 1 and 2

待估参数	策略一解算结果	策略二解算结果
$r_{s0}(x)$	$(-400904659.571898 \pm 0.000004) \text{ km}$	$(-400904659.571891 \pm 0.000004) \text{ km}$
$r_{s0}(y)$	$(-67933330.567693 \pm 0.000005) \text{ km}$	$(-67933330.567688 \pm 0.000005) \text{ km}$
$r_{s0}(z)$	$(-6951958.400240 \pm 0.000005) \text{ km}$	$(-6951958.400265 \pm 0.000004) \text{ km}$
$v_{s0}(x)$	$(-10.384308 \pm 1 \times 10^{-9}) \text{ km/s}$	$(-10.384308 \pm 1 \times 10^{-9}) \text{ km/s}$
$v_{s0}(y)$	$(-14.521395 \pm 4 \times 10^{-9}) \text{ km/s}$	$(-14.521395 \pm 4 \times 10^{-9}) \text{ km/s}$
$v_{s0}(z)$	$(-6.460574 \pm 4 \times 10^{-9}) \text{ km/s}$	$(-6.460574 \pm 4 \times 10^{-9}) \text{ km/s}$
k_{ch}	0.970 ± 0.002	0.969 ± 0.002
GM	$(0.1132 \pm 0.00016) \text{ km}^3/\text{s}^2$	$(0.1137 \pm 0.0002) \text{ km}^3/\text{s}^2$
k_{so}	—	1.019 ± 0.003

图 11 (网络版彩图)相关性分析几何角. Vx-LOS Angle表示 $v_{s0}(x)$ 与视线方向的夹角, 飞掠期间一直保持将近 180° , Vx-GM Angle表示 $v_{s0}(x)$ 与小行星质量摄动加速度的夹角, t_0 时刻前接近于 0° , t_0 时刻附近迅速变化直至 (t_0+40) min时刻夹角将近 180° , SRP-GM Angle表示太阳光压加速度与小行星质量摄动加速度的夹角, 变化趋势与前者近乎相同

Figure 11 (Color online) Geometry angles for correlation analysis. Vx-LOS Angle denotes angle between $v_{s0}(x)$ and LOS, which is approach to 180° during flyby. Vx-HGA Angle denotes angle between HGA motion and $v_{s0}(x)$, which is not constant due to HGA rotation. Vx-Gm Angle denotes angle between $v_{s0}(x)$ and acceleration due to asteroid mass, which is approach to 0° before t_0 , with rapid change at t_0 and is approach to 180° after (t_0+40) min. SRP-GM Angle denotes angle of acceleration between solar radiation pressure and asteroid mass, which has the same trend as the former.

个方向的相关系数较大, 探测器速度x分量同其他待估参数一定程度上的相关性实际上为几何构型的限制; 对于策略二, k_{so} 与小行星GM相关性较强, 随着探测器接近于 t_0 时刻, 两者加速度夹角(图11)保持在很小的范围内并持续减小至接近 0° , (t_0-17) 至 (t_0+20) min时刻夹角迅速变化, 直至稳定在接近于 180° 的水平. 同时对 k_{so} 和GM值进行解算, 则会掩盖小行星的真实GM值.

为进一步证实GM的解算结果不依赖于所选取的初值, 本文参照文献[2]给出的结果 $(0.1081 \pm 0.00296) \text{ km}^3/\text{s}^2 (1\sigma)$, 以0.1081作为均值, 0.00296作为标准差, 生成正态分布的50个随机GM值作为初值, 分别采用策略一和策略二进行解算, 解算结果如图12和13所示, 策略一中小行星GM值的解算结果稳定在 $0.1132 \text{ km}^3/\text{s}^2$, 而策略二则出现了小行星GM解算值的跳动情况, 解的稳定性不及策略一.

图14给出了与文献[2](GM= $(0.1081 \pm 0.00296) \text{ km}^3/\text{s}^2$, 误差2.7%, 1σ)、文献[8](GM= $(0.1081 \pm 0.0018) \text{ km}^3/\text{s}^2$, 误差1.7%, 1σ)以及文献[7](GM= $(0.1134 \pm 0.0011) \text{ km}^3/\text{s}^2$, 误差1.00%, 1σ)利用Rosetta探测器跟踪数据解算结果的比较, 除观测数据拟合的形式误差(0.14%)外, 探测器飞越距离小行星Lutetia最近点处的误差和对流层改正的误差分别为0.24%和0.8%^[7], 而前者的误差实际属于小行星星历误差影响的一部分, 分别为Lutetia的星

图 12 (网络版彩图)使用策略一配置解算50个随机GM值算例结果及形式误差限

Figure 12 (Color online) Results and formal error bars of solving for 50 random GM values case with scenario 1 setup.

图 13 (网络版彩图)使用策略二配置解算50个随机GM值算例结果及形式误差限

Figure 13 (Color online) Results and formal error bars of solving for 50 random GM values case with scenario 2 setup.

图 14 本文的小行星GM解算值与其他结果的比较

Figure 14 Comparison of results and error bars between this paper and other references.

历加4.24, 8.48以及12.73 km的偏差. 表6给出解算值的变化百分数和文献[7]中星历偏差相对于飞掠最近点距离的百分数的对比情况, 可以看出星历误差对GM的影响基本与飞掠最近点距离的相对偏差一致. 综合上述3种影响, 本文最终的GM解算值为 $(0.1132 \pm 0.00096) \text{ km}^3/\text{s}^2$, 1σ 误差为0.85%, 解算精度最高.

表 6 小行星Lutetia星历误差对GM解算的影响

Table 6 Effects of GM solution due to errors of asteroid Lutetia ephemeris

星历偏差 (km)	变化百分数		
	GM解算值 (km^3/s^2)	GM解算值相对变化 (%)	飞掠最近点相对误差 (%)
0	0.11316	0	0
4.24	0.11331	0.132	0.134
8.48	0.11290	0.265	0.268
12.73	0.11359	0.380	0.402

5 结论

利用探测器飞掠小行星期间的无线电跟踪数据解算小行星质量的精度主要与4方面因素有关: 观测数据噪声水平、飞掠几何构型、观测链路理论建模的精确性以及解算策略的选取. Rosetta探测器飞掠小行星(21) Lutetia期间, 考虑实际飞掠几何构型, 单独由小行星质量引起的多普勒频移摄动量大部分位于X波段的双程多普勒数据噪声水平之上, 具备高精度解算(21) Lutetia的先决条件. 对于观测链路的理论值计算则必须高精度地建立除小行星质量影响外其他影响因素的精细模型, 以保证摄动量中小行星质量信息的纯净性. 除考虑常规的坐标转换、力模型建立、轨道积分以及观测数据的校正与理论值计算外, Rosetta探测器飞掠小行星(21) Lutetia期间星上高增益天线发生过俯仰与方位两个自由度上的旋转, 其影响的多普勒频移附加摄动量已经超过了小行星质量影响的摄动量. 本文对此进行了详细讨论并给出数学公式, 消除了其转动效应的影响. 根据是否解算太阳光压摄动加速度的比例因子 k_{so} , 本文提出了两种解算策略. Rosetta探测器飞掠小行星(21) Lutetia期间受几何构型的限制, 探测器受到的太阳光压摄动力的方向与小行星质量对探测器的摄动力方向大部分时间几乎位于一条直线上, k_{so} 与小行星GM参数的相关性较强, 若同时解算两个参数, 则会导致参数之间相互吸收, 掩盖小行星的真实质量值. 与此同时, 上述结果表明在给定误差范围内策略一对GM初值不具有依赖性, 解的稳定性良好, 而策略二无论在解的稳定性和参数相关性方面均不及策略一. 因此本文选取策略一的解算结果作为最终解. 根据解算出的GM值 $((0.1132 \pm 0.00096) \text{ km}^3/\text{s}^2)$, 可得小行星质量为 $(1.696 \pm 0.014) \times 10^{18} \text{ kg}$ (误差0.85%), 根据文献[4]

得到的体积值 $((5.0 \pm 0.4) \times 10^{14} \text{ m}^3)$, 计算可得小行星的主体密度为 $(3.4 \pm 0.3) \times 10^3 \text{ kg/m}^3$. 质量解算值与欧空局的Rosetta科学团队提供的结果具有一致性, 解算精度提高了15%.

致谢 感谢欧洲太空局在PDS网站上公布Rosetta飞掠Lutetia期间的数据, 感谢德国慕尼黑联邦国防军大学空间技术与空间应用研究所Thomas Paul Andert博士对数据处理给予的指导.

参考文献

- Godard B, Budnik F, Muñoz P, et al. Orbit determination of Rosetta around Comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. In: Proceedings of 25th International Symposium on Space Flight Dynamics. Munich, 2015
- Accomazzo A, Ferri P, Hubault A, et al. Rosetta visits asteroid (21) Lutetia. *Acta Astronaut*, 2012, 72: 178–184
- Pätzold M, Neubauer F M, Wennmacher A, et al. Rosetta radio science investigations. In: Dynamics and Astrometry of Natural and Artificial Celestial Bodies. Berlin: Springer, 1997. 141–148
- Sierks H, Lamy P, Barbieri C, et al. Images of asteroid 21 Lutetia: A remnant planetesimal from the early solar system. *Science*, 2011, 334: 487–490
- Fienga A, Manche H, Laskar J, et al. INPOP06: A new numerical planetary ephemeris. *Astron Astrophys*, 2008, 477: 315–327
- Baer J, Chesley S, Britt D. Asteroid masses V1.0 EAR-A-COMPIL-5-ASTMASS-V1.0, NASA Planetary Data System, 2009
- Pätzold M, Andert T P, Asmar S W, et al. Asteroid 21 Lutetia: Low mass, high density. *Science*, 2011, 334: 491–492
- Morley T, Budnik F, Croon M, et al. Rosetta navigation for the fly-by of asteroid 21 Lutetia. In: Proceedings of 23rd International Symposium on Space Flight Dynamics. Pasadena, 2012
- Ye M, Li F, Yan J G, et al. Wuhan university deep-space orbit determination and gravity recovery system WUDOGS and its application analysis (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2017, 46: 288–296 [叶茂, 李斐, 鄢建国, 等. 深空探测器精密定轨与重力场解算软件系统WUDOGS及其应用分析. *测绘学报*, 2017, 46: 288–296]
- Yan J, Yang X, Ye M, et al. Independent Mars spacecraft precise orbit determination software development and its applications. *Astrophys Space Sci*, 2017, 362: 123
- Andert T P. Masses of Small Bodies: Mass Estimation of Small Solar System Bodies Using Radio Science Data from Close Flybys. Dissertation for Doctoral Degree. Germany: University of Cologne, 2010
- Pätzold M, Andert T P, Häusler B, et al. Pre-flyby estimates of the precision of the mass determination of asteroid (21) Lutetia from Rosetta radio tracking. *Astron Astrophys*, 2010, 518: L156
- Yeomans D K, Barriot J P, Dunham D W, et al. Estimating the mass of asteroid 253 mathilde from tracking data during the NEAR flyby. *Science*, 1997, 278: 2106–2109
- Moyer T D. Formulation for observed and Computed Values of Deep Space Network Data Types for Navigation. New York: John Wiley & Sons, 2005
- Pätzold M, Wennmacher A, Häusler B, et al. Mass and density determinations of 140 Siwa and 4979 Otawara as expected from the Rosetta flybys. *Astron Astrophys*, 2001, 370: 1122–1127
- Liu Q H, Chang S Q, Huang Y, et al. Mars spacecraft tracking and analysis of VLBI orbit determination (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astro*, 2017, 47: 099504 [刘庆会, 昌胜骐, 黄勇, 等. 火星探测器跟踪及VLBI测定轨分析. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2017, 47: 099504]
- Anderson J D. Feasibility of determining the mass of an asteroid from a spacecraft flyby. In: Proceedings of Physical Studies of Minor Planets. Tucson: NASA Special Publication, 1971
- Pätzold M. Radio Science Predicted and Reconstructed Orbit Data: Specifications. RORSI-IGM-MA-3121, Issue 2, Revision 3, 2005
- Richner M, G Gebauer, Leissle T. Coordinate Systems for Rosetta. RO-DSS-TN-1081, Issue 6, 2003
- Acton C H Jr. Ancillary data services of NASA's navigation and ancillary information facility. *Planet Space Sci*, 1996, 44: 65–70
- Pätzold M, IFMS Doppler Processing Software: Level 1a to Level 2. RO-RSI-IGM-MA-3118, Issue 5, Revision 0, 2005
- Folkner W M, Williams J G, Boggs D H. The planetary and lunar ephemeris DE 421. IPN Progress Report, Jet Propulsion Laboratory, California

Institute of Technology, 2008, 42: 178

- 23 Milani A, Nobili A, Farinella P. Non-gravitational Perturbations and Satellite Geodesy. Bristol: IOP Publishing Ltd, 1987
- 24 Saastamoinen J. Atmospheric correction for the troposphere and stratosphere in radio ranging satellites. In: The Use of Artificial Satellites for Geodesy. Washington DC: American Geophysical Union, 1972. 247–251
- 25 Ifadis I. The Atmospheric Delay of Radio Waves: Modelling the Elevation Dependence on a Global Scale. Technical Report, Chalmers University of Technology. 1986
- 26 Boehm J, Niell A, Tregoning P, et al. Global mapping function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. [Geophys Res Lett](#), 2006, 33: L07304

Determination of mass and bulk density of asteroid (21) Lutetia using Rosetta radio tracking data

JIN WeiTong¹, LI Fei^{1,2*}, YAN JianGuo^{1*}, YE Mao¹ & YANG Xuan¹

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

² Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Mass and bulk density of asteroids, which could be determined to high precision through spacecraft flyby, are critical to understanding their interior structures and compositions. In this paper, the Rosetta spacecraft radio tracking data were used to determine the mass of the asteroid based on self-developed software tools. Using the volume model of Lutetia determined by Rosetta science camera, the bulk density was estimated. For extracting contributions only associated with Lutetia, an effective model was established and the detailed mathematical formula was developed to remove the additional frequency shift induced by HGA slew motion accounting for two degrees of freedom in azimuth and elevation angle. In addition, two available solution scenarios were applied in order to obtain reliable solution and the detailed discussion about parameter correlation and solution stability were performed based on properties of parameters and fly-by geometry. All of above yielded a mass of $(1.696 \pm 0.014) \times 10^{18}$ kg (1σ , error 0.85%) and the bulk density $(3.4 \pm 0.3) \times 10^3$ kg/m³ at last. The values were almost the same as which was achieved by Rosetta Science Team and the precision of the asteroid mass was improved by 15%.

Rosetta spacecraft, asteroid (21) Lutetia, mass, bulk density, WUDOGS

PACS: 96.25.Nc, 96.30.Ys, 95.55.Jz

doi: [10.1360/SSPMA2018-00084](https://doi.org/10.1360/SSPMA2018-00084)