

文章编号: 0494-0911(2011)09-0008-03

中图分类号: P23

文献标识码: B

X 射线脉冲星导航系统在月球摄影测量中的应用

史世平

(西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

The Application of Navigation System Based on X-ray Pulsars to Moon Photogrammetry

SHI Shiping

摘要: 初步探讨 X 射线脉冲星导航定位系统在月球摄影测量应用中的主要技术问题, 包括绕月摄影测量卫星脉冲星导航数据获取、脉冲星导航数据处理和脉冲星导航数据与摄影测量数据联合平差等问题。

关键词: X 射线脉冲星; 月球摄影测量; 区域网平差

一、引言

航天摄影测量是以人造地球卫星、宇宙飞船和航天飞机等航天器为运载工具, 利用各种传感器在轨道空间对地球或其他行星进行遥感, 并根据获取的信息进行判读和几何处理, 以测制或修测地图^[1]。

无地面控制的航天摄影测量是航天摄影测量追求的一个目标。为了实现无地面控制的航天摄影测量, 需要提供摄影测量卫星摄影瞬间精确的轨道和姿态数据, 对于低地球轨道摄影测量卫星, 可以利用星载 GPS 接收机和星相机等提供这类数据; 对于月球摄影测量卫星, GPS 则无能为力。而 X 射线脉冲星导航定位系统(XNAV)为解决这类问题提供了新的思路和技术手段。X 射线脉冲星作为自然的天体, 其运行特性不受人造的破坏与干扰, 其可见性也不受近地空间范围的限制。因此, 在航天器上安装 X 射线探测器, 接收多颗几何分布较好的 X 射线脉冲星的辐射信号, 可以同时获得航天器位置、速度、姿态、时间等完整的导航定位数据, 满足环绕月球的摄影测量卫星无地面控制测图的需要。

二、X 射线脉冲星导航定位系统

X 射线脉冲星导航系统是“天然的 GPS”导航定位系统^[2-3]。其导航原理是在航天器上安装 X 射线探测器, 探测脉冲星辐射的 X 射线光子, 测量脉冲到达时间(TOA)和提取脉冲影像信息, 并通过时间转换模型获得脉冲到达太阳系质心惯性系(SSB)

原点的时间, 然后根据脉冲星的相位时间模型计算出脉冲到达 SSB 原点的时间, 最后从多个脉冲星的不同方向获得测量信息, 利用航天器的动力学轨道模型, 再结合导航滤波算法便可以得到位置和速度估值。利用 X 射线脉冲星信号测定卫星姿态的方法与星敏感器类似, 一旦 X 射线成像仪提取脉冲星影像, 脉冲星在探测器平面和星体坐标系的角位置也就随之确定。可以进行星体坐标系与太阳系质心坐标系之间的旋转变换, 直接提取坐标变换的欧拉角信息, 或利用姿态四元素方法进行滤波估计, 最终获得卫星俯仰、滚转和偏航等姿态信息。

脉冲星源是 X 射线脉冲星导航系统的基础。要进行 X 射线脉冲星导航, 必须具有适合导航的 X 射线脉冲星源, 其位置精度和流量要满足一定的要求。如要求导航精度达到 $\pm 10 \text{ m}$ (3σ), 脉冲星的角位置误差应小于 $\pm 0.0001''$, 流量大于 $100 \mu\text{Crab}$ 。目前满足要求的脉冲星数量较少, 且已发现的脉冲星大部分集中在银道面附近, 对于三维定位的几何条件不够好, 因此开展 X 射线巡天, 发现更多的 X 射线脉冲星非常重要。

高灵敏度 X 射线探测器是 X 射线脉冲星导航系统的关键。它主要用于探测和接收来自 X 射线脉冲星的信号, 是由 X 射线成像仪和光子计数器组成。由于 X 射线脉冲星的 X 射线脉冲信号非常微弱, 因此需要极高灵敏度、响应时间快、高信噪比和高时间分辨率($1 \sim 10 \text{ ns}$)的探测器。X 射线探测器是通过测量入射光子与探测器碰撞释放的能量, 而达到探测 X 射线光子数量的目的。其关键作用是

收稿日期: 2010-09-20

作者简介: 史世平(1961-), 男, 内蒙古土默特左旗人, 高级工程师, 主要研究方向为摄影测量与遥感。http://www.cnki.net

从观测的射线源探测到尽可能多的光子,同时降低非源事件的影响。每个探测光子时间标注精度的计时误差小于脉冲星测量值的统计误差,1 μs 的时间分辨率将产生 ±300 m 的定位误差。探测器的关键性能指标是适应辐射能量范围、效率、背景比率和时间分辨率。

实用的导航定位算法是 X 射线脉冲星导航系统不可或缺的部分。导航定位算法就是根据 X 射线探测器得到的光子计数和 X 射线成像数据,利用脉冲到达时间测量,结合脉冲星模型和时空传播模型,通过卡尔曼滤波的方法,将脉冲到达时间的测量值和轨道预报器提供的状态估计值拟合到一起,以确定航天器的绝对位置和速度及姿态数据。

三、X 射线脉冲星导航系统在月球摄影测量中的应用

1. 获取航天器的 X 射线脉冲星导航数据

在绕月摄影测量卫星上安装 X 射线探测器及相应的处理设备,捕获和记录脉冲星发出的 X 射线频段的高能光子。它的设计原理是:当 X 射线携带的光子到达探测器后与探测器内材料原子相碰撞,并释放出能量,释放能量的大小与被探测到的光子数目成比例,探测器通过测定能量来敏感光子。而光子进入探测器栅格的位置则由探测器内安装的二维阵列来确定。

2. X 射线脉冲星导航数据处理

1) 脉冲到达时间测量。卫星脉冲到达时间测量是指测定接近脉冲积分时间中间点的脉冲基准点到达时间,并在足够长的信号积分时间内,以原子时作为参考时标,整合测量脉冲轮廓,提取脉冲到达时间观测量。

2) 脉冲到达时间转换改正。调用基本参数数据库和脉冲星模型数据库,对脉冲到达时间进行 Roemer 延迟、Shapiro 延迟和其他误差项改正,转换得到在太阳系质心坐标系中的脉冲到达时间测量值。

3) 脉冲到达时间与预报时间对比。调用脉冲星模型数据库,提取标准脉冲轮廓和脉冲计时模型,由脉冲计时模型预报脉冲到达时间,从而得到脉冲到达时间差。

4) Kalman 滤波处理。利用多颗脉冲星组成基本观测方程,调用卫星摄动轨道力学方程、卫星时钟系统状态方程和 Kalman 滤波器,得到卫星位置、速度、姿态和时间估计值。

5) 坐标系转换。X 射线脉冲星导航是以太阳

系质心坐标系为时空基准的。坐标转换参数包括坐标平移、坐标旋转、尺度因子和时间偏差,以及岁差、章动、地球极移和非均匀自转参数等。

3. X 射线探测器与绕月摄影机偏心矢量测定

由于 X 射线探测器与绕月摄影机位置不能完全重合,因此要进行 X 射线探测器与绕月摄影机偏心矢量的确定,以便进行位置偏移改正。偏心矢量的测定可使用近景摄影测量法或经纬测量法等完成。

4. 脉冲星导航数据与摄影测量数据联合平差

(1) 联合平差的数学模型

摄影测量观测值的光束法区域网平差的误差方程式为

$$\left. \begin{aligned} V_x &= At + BX + C_c - L_x && \text{权 } E \\ V_c &= E_x X - L_c && \text{权 } P_c \\ V_s &= E_c C - L_s && \text{权 } P_s \end{aligned} \right\}$$

由 X 射线脉冲星定位系统获取的摄站坐标进行解析航天三角测量的误差方程可写为

$$V_{xn} = \bar{A}t + Rr + Dd - L_{xn} \quad \text{权 } P_{xn}$$

光束法联合平差的总误差方程可写为

$$\begin{bmatrix} V_x \\ V_c \\ V_s \\ V_{xn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & C & 0 & 0 \\ 0 & E_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & E_c & 0 & 0 \\ \bar{A} & 0 & 0 & R & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t \\ X \\ C \\ r \\ d \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} L_x \\ L_c \\ L_s \\ L_{xn} \end{bmatrix}$$
$$\text{权矩阵 } P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{xn} \end{bmatrix}$$

式中, $t = [\varphi \ \omega \ \kappa \ dX_s \ dY_s \ dZ_s]^T$ 为像片外方位元素未知数增量; $X = [X \ dY \ dZ]^T$ 为加密点坐标未知数增量; C 为自检校附加参数; $r = [u \ dv \ dw]^T$ 为 X 射线探测器-相机偏移向量未知数增量; $d = [a_x \ a_y \ a_z \ b_x \ b_y \ b_z]^T$ 为漂移改正参数; $A, \bar{A}$ 为未知数 t 的系数矩阵; B, E_x 为未知数 X 的系数矩阵,其中 E_x 为单位阵; R 为未知数 r 的系数矩阵,由像片外方位元素 φ, ω, κ 组成的旋转矩阵; D 为未知数 d 的系数矩阵;

$$L_x = \begin{bmatrix} x - (x) \\ y - (y) \end{bmatrix}$$

(x, y) 为像点坐标; $(x), (y)$ 为由未知数的近似值按共线方程计算的像点坐标; L_c 为控制点坐标观测值向量,将控制点坐标已知值当做近似值时为零; L_s 为附加参数观测值向量;

$$L_{xn} = \begin{bmatrix} X_A - (X_A) \\ Y_A - (Y_A) \\ Z_A - (Z_A) \end{bmatrix}$$

X_A, Y_A, Z_A 为由 X 射线探测器确定的摄站坐标; P_c

$$\begin{bmatrix} A^T A + \bar{A}^T P_{xn} \bar{A} & A^T B & A^T C & \bar{A}^T P_{xn} R & \bar{A}^T P_{xn} D \\ B^T A & B^T B + P_c & B^T C & 0 & 0 \\ C^T A & C^T B & C^T C + P_s & 0 & 0 \\ R^T P_{xn} \bar{A} & 0 & 0 & R^T P_{xn} R & R^T P_{xn} D \\ D^T P_{xn} \bar{A} & 0 & 0 & D^T P_{xn} R & D^T P_{xn} D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t \\ X \\ C \\ r \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^T L_x + \bar{A}^T P_{xn} L_{xn} \\ B^T L_x + P_c L_c \\ C^T L_x + P_s L_s \\ R^T P_{xn} L_{xn} \\ D^T P_{xn} L_{xn} \end{bmatrix}$$

(2) 联合平差解算方法

与传统的光束法区域网平差方程相比,联合区域网平差主要是增加了镶边带状矩阵,没有破坏原法方程的良好稀疏带状结构。因此,对该法方程的求解可采用边法化边消元的循环分块解法。

5. 精度估算

以我国将要发射的嫦娥二号绕月摄影卫星参数为例进行精度估算。嫦娥二号卫星的轨道高度为 100 km,拍摄的月球影像分辨率为 ± 10 m。假设 XNAV 获取的绕月卫星的位置精度为 ± 10 m,姿态角精度为 $\pm 2''$,摄影测量处理同名影像匹配精度为 0.2 像元,摄影镜头焦距测定误差为 ± 0.02 mm,则由下列公式可估算出目标点精度

$$\begin{aligned} M_{XY}^2 &= m_{S_{XY}}^2 + 0.5592m_B^2 + 1.9140m_\varphi^2 + \\ &1370185m_{xy}^2 + 18148m_f^2 \\ M_Z^2 &= m_{S_Z}^2 + 3.2200m_B^2 + 8.4995m_\varphi^2 + \\ &3920000m_{xy}^2 + 980000m_f^2 \end{aligned}$$

式中, M_{XY} 、 M_Z 分别为目标点的平面和高程中误差(以 m 为单位); $m_{S_{XY}}$ 、 m_{S_Z} 分别为摄站位置的平面和高程中误差(以 m 为单位); m_B 为摄影基线中误差(以 m 为单位); m_φ 为像片姿态角的中误差,以最大的 φ 为代表(以"为单位); m_{xy} 为观测像点坐标的中误差(以 mm 为单位); m_f 为摄影镜头焦距测定值的中误差(以 mm 为单位)。

计算结果为: $M_{XY} = \pm 13.27$ m, $M_Z = \pm 29.38$ m。

为控制点坐标观测值的权; P_{xn} 为由 X 射线探测器确定的摄站坐标的权。

由最小二乘法平差原理得法方程为

四、结束语

X 射线脉冲星导航系统是一种自主的全新导航定位系统,在地外行星摄影测量中有重要的应用价值。本文探讨了 X 射线脉冲星导航定位系统在月球摄影测量中应用的主要技术问题,包括月球摄影测量卫星脉冲星导航数据获取、脉冲星导航数据处理和脉冲星导航数据与摄影测量数据联合平差等问题。本文的探讨是初步的,为更好满足各类航天摄影测量任务需要,开展更为广泛深入的理论和实践研究是必不可少的。

参考文献:

- [1] 钱曾波,刘静宇,肖国超. 航天摄影测量 [M]. 北京: 解放军出版社,1992.
- [2] 史世平,徐青. X 射线脉冲星导航定位原理及应用 [J]. 测绘科学与工程,2007,29(2):5-7.
- [3] SHEIKH S I, INES D J. Spacecraft Navigation Using X-Ray Pulsars [J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2006, 29(1): 49-63.
- [4] SHEIKH S I, PINES D J. Recursive Estimation of Spacecraft Position and Velocity Using X-Ray Pulsars Time of Arrival Measurements [J]. Navigation: Journal of Institute of Navigation, 2006, 53(3): 149-166.
- [5] SHEIKH S I. The Use of Variable Celestial X-ray Sources for Spacecraft Navigation [D]. [S.l.]: University of Maryland, 2005.