

doi: 10.7690/bgzd.2015.01.020

自旋卫星定姿数据合检分析与应用

王振平, 饶爱水, 张 龙, 刘海兵, 裴澍炜

(中国卫星海上测控部试验技术部, 江苏 江阴 214431)

摘要: 为了提高某自旋卫星姿态确定数据的正确性与准确性, 介绍卫星进行定姿所需的数据源的选取方法和姿态确定过程中量测量的数据处理过程。通过对姿测数据、量测量的合理性检验、野值的剔除以及双解真伪的判别分析, 给出了详细的公式推导。实践工作证明, 该方法为航天测量船应用测控软件的设计提供了良好基础。

关键词: 姿态确定; 数据合检; 测控; 自旋卫星

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Analysis and Application of Rationality Detection of Attitude Determination Data of Spin-Stabilized Satellite

Wang Zhenping, Rao Aishui, Zhang Long, Liu Haibing, Pei Shuwei

(Technology Department, Satellite Marine Tracking & Control Department of China, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to increase the validity and accuracy of attitude determination data for certain spin-stabilized satellite, the data sources selection method and detected measurement data processing for attitude determination are introduced. Through the analysis of rationality test of detected measurement, elimination of outliers and distinguish of true and false with the two results. The equation derivation is listed in detail. The application shows this method provides a solid base on the measurement software of TT&C ship.

Keywords: attitude determination; data rationality detection; measurement and control; spin-stabilized satellite

0 引言

由于某自旋稳定卫星在第四级发动机点火前是一个细长体, 必须在海上测控弧段内完成姿态确定并进行初步姿态控制工作; 因此, 对海上进行姿态确定的精度提出了较高的要求^[1]。该卫星姿态的控制是按照测控中心计划, 把卫星从一种姿态按一定的控制规律调整到另一种姿态的过程。在海上进行姿态确定与实施姿态控制是一个实时性较强的工作, 理想情况下, 尽量选取太阳与南北红外均可见, 并且信号稳定的段落进行工作^[2]。但它受到选择信号(测量弧段数据)与单船测控等条件限制, 信号不一定全部能获取到或正常, 所以为精确确定姿态和控制增加了难度。可见海上测控信息的获取, 对姿态确定中的合检数据和剔野处理是十分必要的。基于此, 笔者对被控对象姿态确定时对姿态脉冲数据量测量的合理性检验等问题进行研究。

1 定义

$P(P_x, P_y, P_z)$ 为卫星自旋轴矢量及其在 J2000 惯性坐标系各坐标轴的投影; $S(S_x, S_y, S_z)$ 为量测时刻的太阳向量及其在 J2000 惯性坐标系各坐标轴的投

影; $E(E_x, E_y, E_z)$ 为测量时刻的地球向量及其在 J2000 惯性坐标系各坐标轴的投影; θ_s 为太阳角, P 与 S 的夹角; θ_e 为地球角, P 与 E 的夹角; λ_{sc} 为两面角, PS 平面与 PE 平面的夹角; θ_{sc} 为 S 与 E 的夹角。

2 姿态确定处理过程概述

2.1 姿态确定数据源选取

航天测量船在自旋卫星测控任务中, 根据测控中心计划需完成海上测控弧段的粗调姿。在海上仅需处理模拟遥测下传的太₁(t_{s1})、太₂(t_{s2})、北中(t_{Nh1})、北出(t_{Nh2})、南中(t_{Sh1})、南出(t_{Sh2}), 此 6 个姿态脉冲前沿信号已满足于姿态确定的数据要求。几何确定姿态的方法可以满足实时监视卫星飞行姿态的要求^[1]; 因此, 测量数据的选取, 在运行段进行可任选一个基准姿态脉冲周期的实测值即可确定一组几何定姿结果进行监视。对于姿态控制, 还需多组几何定姿结果, 利用统计估计方法进行姿态确定^[3-4]。因此应选择卫星姿态测量段落好的连续多个周期数据。

收稿日期: 2014-07-21; 修回日期: 2014-09-03

作者简介: 王振平(1981—), 女, 山东人, 硕士, 工程师, 从事导航定位软件及海上测控软件开发应用研究。

2.2 姿态确定过程^[5-7]

首先根据测量信息的获取情况计算卫星自旋周期和转速，用于计算量测量太阳角、北红外弦宽、南红外弦宽、两面角。同时求出太阳角、地球角和两面角数据后^[8]，进行几何姿态确定。在姿态确定中，根据量测量获取的情况可以组成 10 种情况下不同的定姿方法，而测量船在进行确定姿态时，一般只取南北红外信息均有或只有南红外信息或只有北红外信息时的 3 种情况，这 3 种情况又都保证太₁、太₂脉冲信号同时存在。这种情况下的姿态确定一般精确度高，为了确保定姿数据的正确性，在进行统计估计前必须对数据进行合理性检验和数据剔野，最后进行卡尔曼滤波方法确定姿态。

3 数据合理性检验与双解真伪判别

姿态确定数据合检和数据剔野，通过大量的试验和试算，航天测量船在海上实际姿态确定中采用如下方法和做法。

3.1 数据合理性检验

3.1.1 姿测数据的合检

通过计算卫星自旋周期 T_s 来判定姿测数据的合理性。

在模拟遥测中，相邻两组数据的 t_{s1} (或 t_{Nh1} 、 t_{Sh1}) 时间间隔，即为卫星的自旋周期：

$$\begin{aligned} T_s &= t_{s1}(i+1) - t_{s1}(i) \\ T_s &= t_{Nh1}(i+1) - t_{Nh1}(i) \\ T_s &= t_{Sh1}(i+1) - t_{Sh1}(i) \end{aligned}$$

在编码遥测数据中， T_{12} 即为自旋周期：

$$T_s = T_{12}。$$

一组数据得到的自旋周期偏差大、可信度低、须用多组数据统计确定卫星自旋周期。同时求出均方差，再利用均方差别除不合理数据。

3.1.2 量测量的合检

对量测量太阳角、北红外弦宽、南红外弦宽、两面角的数据合理性检验，首先计算平均姿态 $\bar{P}(\bar{\alpha}, \bar{\delta})$ ，再由 \bar{P} 、 S 、 E 估算量测量的平均值 θ_s° 、 ϕ_N° 、 ϕ_S° 、 λ_{se}° ，同时求出量测量的方差。最后进行数据剔野^[6]。

1) 平均姿态的计算：

计算 N 组数据的平均姿态， N 一般取为 100：

$$\begin{cases} \bar{\alpha}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \alpha(i) \\ \bar{\delta}_N = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \delta(i) \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\bar{\alpha}_N$ 、 $\bar{\delta}_N$ 分别为 N 组数据的平均赤经和平均赤纬； $\alpha(i)$ 、 $\delta(i)$ 分别为第 i 次赤经、赤纬的瞬时值。

当 $|\alpha(i) - \bar{\alpha}_N| \geq 3^\circ$ 或 $|\delta(i) - \bar{\delta}_N| \geq 3^\circ$ 时，剔除 $\alpha(i)$ 、 $\delta(i)$ ，不参加统计，则赤经赤纬的统计值：

$$\begin{cases} \bar{\alpha}(i) = \frac{i-1}{i} \bar{\alpha}(i-1) + \frac{1}{i} \alpha(i) \\ \bar{\delta}(i) = \frac{i-1}{i} \bar{\delta}(i-1) + \frac{1}{i} \delta(i) \quad (i=1,2,\dots) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\bar{\alpha}(i)$ 、 $\bar{\delta}(i)$ 分别为第 i 次赤经、赤纬的平均值。

平均姿态的计算公式可以归纳为：

$$\bar{P} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \bar{P}_i \text{ 或 } \bar{P} = \frac{1}{i} [(i-1)\bar{P}_{i-1} + \bar{P}_i] \quad i=1,2,\dots \quad (3)$$

2) 用平均姿态估算量测量的平均值：

$$\begin{cases} \theta_s^\circ = \cos^{-1}(\bar{P} \cdot S) \\ \phi_N^\circ = 2 \cos^{-1} \left[\frac{\cos \rho - \cos \gamma_N (\bar{P} \cdot E)}{\sin \gamma_N \sqrt{1 - (\bar{P} \cdot E)^2}} \right] \\ \phi_S^\circ = 2 \cos^{-1} \left[\frac{\cos \rho - \cos \gamma_S (\bar{P} \cdot E)}{\sin \gamma_S \sqrt{1 - (\bar{P} \cdot E)^2}} \right] \\ \lambda_{se}^\circ = \begin{cases} \text{ctg}^{-1} \left[\frac{(S \cdot E) - (\bar{P} \cdot S)(\bar{P} \cdot E)}{\bar{P}(S \cdot E)} \right] & \bar{P}(S \cdot E) > 0 \\ \text{ctg}^{-1} \left[\frac{(S \cdot E) - (\bar{P} \cdot S)(\bar{P} \cdot E)}{\bar{P}(S \cdot E)} \right] + \pi & \bar{P}(S \cdot E) < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

式中： θ_s° 、 ϕ_N° 、 ϕ_S° 、 λ_{se}° 分别为太阳角、北红外弦宽、南红外弦宽、两面角估算的平均值。

3) 方差计算。

量测量的方差计算公式如下 (一般取 $N=100$)：

$$\begin{cases} \sigma_{\theta_s} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\theta_s(i) - \theta_s^\circ]^2} \\ \sigma_{\phi_N} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\phi_N(i) - \phi_N^\circ]^2} \\ \sigma_{\phi_S} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\phi_S(i) - \phi_S^\circ]^2} \\ \sigma_{\lambda_{se}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [\lambda_{se}(i) - \lambda_{se}^\circ]^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中： σ_{θ_s} 、 σ_{ϕ_N} 、 σ_{ϕ_S} 、 $\sigma_{\lambda_{se}}$ 分别为太阳角、北红外弦宽、南红外弦宽、两面角的方差； $\theta_s(i)$ 、 $\phi_N(i)$ 、 $\phi_S(i)$ 、 $\lambda_{se}(i)$ 分别为第 i 次太阳角、北红外弦宽、南

红外弦宽、两面角的计算值。

4) 数据的剔野。

凡满足下列不等式的量测量认为是合理的，否则予以剔除，用剔除后的数据进行统计处理。

$$\begin{cases} |\theta_s(i) - \theta_s^\circ| \leq 7\sigma_{\theta_s} \\ |\phi_N(i) - \phi_N^\circ| \leq 7\sigma_{\phi_N} \\ |\phi_S(i) - \phi_S^\circ| \leq 7\sigma_{\phi_S} \\ |\lambda_{sc}(i) - \lambda_{sc}^\circ| \leq 7\sigma_{\lambda_{sc}} \end{cases} \quad (6)$$

3.2 双解真伪的判别

当姿态出现双解时，测量船海上测控软件采用简单的双解真伪的判别，其方法是：

1) 角度符合下列约束条件的为真解^[3]：

$$\begin{aligned} 60^\circ \leq \theta_s \leq 120^\circ & \quad 10^\circ \leq \theta_{sc} \leq 170^\circ \\ \gamma_S - \rho \leq \theta_c(\phi_S) \leq \gamma_S + \rho & \quad \gamma_N - \rho \leq \theta_c(\phi_N) \leq \gamma_N + \rho \\ \gamma_S - \rho \leq \theta_c \leq \gamma_S + \rho & \quad \phi_S, \phi_N \geq 7^\circ \end{aligned}$$

式中： γ_N 、 γ_S 分别为北红外和南红外探头安装角； ρ 为地球相对卫星的半张角； ϕ_N 、 ϕ_S 分别为北红外弦宽和南红外弦宽^[3]。

模拟传输的脉冲，可能相互干扰，对被干扰的姿态脉冲应予剔除，不参加定姿计算。

用一个红外弦宽和太阳角，两面角计算地球角时公式为：

$$\theta_c = \cos^{-1} \left[\frac{\cos \rho \sin \theta_s \cos \lambda_{sc} - \cos \theta_{sc} \sin \gamma \cos \frac{\Phi}{2}}{\cos \gamma \sin \theta_s \cos \lambda_{sc} - \cos \theta_s \sin \gamma \cos \frac{\Phi}{2}} \right] \quad (7)$$

式中 Φ 为 ϕ_N 或 ϕ_S ， γ 为 γ_N 或 γ_S 。

设分母 $\cos \gamma \sin \theta_s \cos \lambda_{sc} - \cos \theta_s \sin \gamma \cos \frac{\Phi}{2} = \Delta$ ，则

① 当 $|\Delta| \geq 0.03$ 时，上式得到的 θ_c 可用；当 $|\Delta| \leq 0.03$ 时用下式：

$$\theta_c = \cos^{-1} \left[\frac{\cos \rho \cos \gamma \pm \sin \gamma \cos \frac{\Phi}{2} \sqrt{\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos^2 \frac{\Phi}{2} - \cos^2 \rho}}{\cos^2 \gamma + \sin^2 \gamma \cos^2 \frac{\Phi}{2}} \right] \quad (8)$$

将求出的 2 个 θ_c 代入 $\theta_{sc} = \cos \theta_s \cos \theta_c + \sin \theta_s \sin \theta_c \cos \lambda_{sc}$ ， $|\cos \theta_{sc}|$ 较小的为真解。

② 当 $|\Delta| \leq 0.01$ 时，认为无法分辨 θ_c 双解的真伪。

2) 用先验值确定，接近先验值的为真解。

用几何定姿前 3 种情况^[4]定出的姿态确定为真解(见文中 2.2 节)。

3) 对多组数据定出的姿态进行统计处理，弥散度小的为真实姿态。即取 N 次量测，得 N 组姿态解(每组有两解)。设

$$\begin{aligned} \text{第 1 组: } & \begin{cases} \alpha_1(1) & \alpha_1(2) \cdots \alpha_1(N) \\ \delta_1(1) & \delta_1(2) \cdots \delta_1(N) \end{cases} \\ \text{第 2 组: } & \begin{cases} \alpha_2(1) & \alpha_2(2) \cdots \alpha_2(N) \\ \delta_2(1) & \delta_2(2) \cdots \delta_2(N) \end{cases} \end{aligned}$$

若

$$\frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N \left[(\alpha_1(i) - \alpha_1(1))^2 + (\delta_1(i) - \delta_1(1))^2 \right]^{\frac{1}{2}} \leq \frac{1}{N-1} \sum_{i=2}^N \left[(\alpha_2(i) - \alpha_2(1))^2 + (\delta_2(i) - \delta_2(1))^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

则第 1 组为真解，反之，则第 2 组为真解。

4 结论

测量船在执行某自旋卫星发射任务中，利用该方法设计的软件成功地对不稳定信号与计算数据进行了有效合检与剔野工作，使得定姿结果与实际姿态基本相符，为圆满完成姿态测定、姿控量计算、最佳点火姿态计算、姿章联合控制等测控事件提供了可靠依据，其中有 2 次对卫星实施姿态、章动联合控制，其控制结果符合总体要求。

同时，该方法也已经推广到新一代航天测量船测控应用软件设计中。在应用软件设计中，对数据选取原则和数组选取条件，以及各合检数据的处理进行了规范，通过多次任务证明：该方法内容正确、全面，可操作性强，对海上进行卫星姿态确定和软件设计具有一定指导作用。

参考文献：

- [1] 简仕龙. 航天测量船海上测控技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 28-31.
- [2] 敬喜. 卡尔曼滤波器及其应用基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1973: 56-62.
- [3] 贾沛璋. 卡尔曼滤波定轨算法的研究进展[J]. 飞行器测控学报, 2001, 20(3): 45-50.
- [4] 王玉祥, 李祥明, 李凌. 卫星姿态的几何确定方法初探[J]. 遥测遥控, 2007, 28(6): 1-5.
- [5] 黄福铭, 郝和年. 航天器飞行控制与仿真[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 73-85.
- [6] 章仁为. 卫星轨道姿态动力学与控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998: 65-72.
- [7] 陈芳允, 贾乃华. 卫星测控手册[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 398-418.
- [8] 屠善澄, 邹广瑞. 卫星姿态动力学与控制[M]. 北京: 宇航出版社, 1998: 45-48.