

各高速摄影仪跟踪测量数据时间一致性 检验方法及准确分析

崔书华¹ 罗秀娟²

(1 西安卫星测控中心,西安 710043)

(2 中国科学院西安光学精密机械研究所,西安 710068)

摘要 提出了各高速摄影测量仪跟踪测量数据时间一致性检验方法,并经实战任务数据处理分析,证明该方法行之有效.它不仅解决了跟踪设备时间一致性问题,同时也提高了卫星运载工具在起飞段的漂移量数据处理准确.

关键词 高速摄影仪;时间一致性检验;准确分析
中图分类号 TP202+.2 **文献标识码** A

0 引言

高速摄影测量仪是航天测控系统中十分重要的设备之一,它主要对卫星运载工具起飞段的漂移量和飞行姿态进行跟踪测量,用于评定目标的飞行性能.高速摄影测量仪系统一般配置在大地坐标的三角网上,采用角度交会测量体制(nAE)组成测量网.在实战任务中,因某些原因各跟踪设备之间会出现跟踪测量数据时间不一致现象.这种现象不经处理,会严重影响整个数据处理的准确性和可靠性.为了保证漂移量数据处理的准确,提出了各高速摄影测量仪跟踪测量数据时间一致性检验方法.同时,对其定位后的数据准确进行了分析.此方法的实现与应用,为高质量、高准确地完成漂移量数据处理任务提供了可靠的保障.

1 时间一致性检验方法及准确分析

1.1 时间一致性检验方法

每台高速摄影测量仪设备跟踪的数据中有两个测元,即方位角 A 和俯仰角 E .因此,要解算出测量目标的位置就出现了一个冗余的测元.通过这个冗余的测元,利用“L”公式计算测量目标的位置可以获得目标的两组坐标值数据,即 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$.

“L”交会计算方法是指将测量目标 M 点投影到发射坐标系 Oxz 平面上进行计算^[1].设发射坐标系为 $(O:x, y, z)$, O_1 和 O_2 分别为两台高速摄影测量仪跟踪设备的原点, M 为测量点的目标在空间瞬时位置, M', O'_1, O'_2 分别为 M, O_1 和 O_2 点在发射坐标系的 Oxz 平面上的投影, $x_{01}, y_{01}, z_{01}, x_{02}, y_{02}, z_{02}$ 分别为两台高速摄影测量仪跟踪设备的原点在发射坐标系

中的坐标. $\Delta x_1, \Delta y_1, \Delta z_1, \Delta x_2, \Delta y_2, \Delta z_2$ 为测量目标 M 在测站坐标系中的坐标. A_1, A_2, E_1, E_2 为两台跟踪设备测得的测量目标 M 的测角(测角为测量值已进行归化的数据).计算如下

$$\begin{bmatrix} \tan A_1 \\ \tan A_2 \\ \tan E_1 \\ \tan E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{z - z_{01}}{x - x_{01}} \\ \frac{z - z_{02}}{x - x_{02}} \\ \frac{y - y_{01}}{x - x_{01}} \\ \frac{y - y_{02}}{x - x_{02}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过计算得出测量点的目标 M 点在发射坐标系中的两组定位解为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0i} + \Delta x_i \\ y_{0i} + \Delta y_i \\ z_{0i} + \Delta z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{0i} + \Delta x_i \\ y_{0i} + \Delta x_i \sec A_i \tan E_i \\ z_{0i} + \Delta x_i \tan A_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中

$$\Delta x_i = \frac{(x_{01} - x_{02}) \tan A_{3-i} - (z_{01} - z_{02})}{\tan A_1 - \tan A_2} \quad (i = 1, 2)$$

从式(2)不难推出两组中的 x, z 是恒等的,只有高度 y_i 因测量情况受到影响会产生差异.由于高速摄影测量仪的三台测站分布是合理有效的,如果在跟踪数据质量好的情况下,目标高度值应是相等的.

利用“L”交会的计算对高度的敏感性及其高度差的数学期望值近似为零值的特点,我们可以对高度值进行分析,推断出其跟踪数据的时间是否一致.如果各测站跟踪数据的时间是同步的,那么交会的计算后的两组数据中的高度值就应当是相近的.相反,则说明时间并未同步.

设式(2)中两组高度差为

$$\Delta y_i = y_{i1} - y_{i2} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

根据光测数据的随机误差近似白噪声且符合正态分布的特点,如果高度相近,则概率分布是以零为质心分布的,即

$$E[\Delta y_i] = 0 \tag{4}$$

我们可以利用数学期望和方差函数来观察它的趋势和分散程度^[2]. 随机函数的数学期望是一个时间函数 $m_{\Delta y}(t)$, 对于自变量 t , $m_{\Delta y}(t)$ 等于随机函数 $\Delta y(t)$ 在 t 时刻的所有数值的数学期望, 即

$$m_{\Delta y}(t) = E[\Delta y(t)] \tag{5}$$

实质上, $m_{\Delta y}(t)$ 是 $\Delta y(t)$ 的一阶原点矩, 它确定了随机数 $\Delta y(t)$ 的中心趋势, 随机过程的各个样本都围绕它变动. 根据两组高度差的数学期望值应逼近于零的特点, 各样本均应向“0”逼近. 而变动的分散程度则可利用方差来评定

$$D[\Delta y(t)] = E\{[\Delta y(t) - m_{\Delta y}(t)]^2\}$$

方差为

$$\sigma_{\Delta y}(t) = \sqrt{D[\Delta y(t)]} = \sqrt{E\{[\Delta y(t) - m_{\Delta y}(t)]^2\}} \tag{6}$$

1.2 准确分析

利用误差传递定律对数据进行准确分析. 误差传递定律为: 设有函数 $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_n 具有均方根误差 $\sigma_{x_1}, \sigma_{x_2}, \dots, \sigma_{x_n}$ 的独立变量, 函数 y 具有对每一变量的连续偏导数, 则

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)^2 \sigma_{x_n}^2 \tag{7}$$

由于高速摄影测量仪的两个测角系统是互不相关的, 即 $\sigma_A = \sigma_E$, 且假设各高速摄影测量仪跟踪准确是相等的, 即 $\sigma = \sigma_{A_1} = \sigma_{E_1} = \sigma_{A_2} = \sigma_{E_2}$. 同时, 大地测量所导致的误差可忽略不计. 利用误差传递定律对“L”公式交会计算后的定位结果进行准确估计推导为

$$\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial A_1} &= -\frac{(x_{01} - x_{02}) \tan A_2 - (z_{01} - z_{02}) \sec^2 A_1}{(\tan A_1 - \tan A_2)^2} \sec^2 A_1 = \\ &= -\Delta x_1 \frac{\sec^2 A_1}{\tan A_1 - \tan A_2} \\ \frac{\partial x}{\partial A_1} &= -\Delta x_1 \frac{\cos A_2}{\sin(A_1 - A_2) \cos A_1} = \\ &= -\frac{R_1 \cos A_2}{\sin(A_1 - A_2)} \text{ 其中 } R_1 = \frac{\Delta x_1}{\cos A_1} \end{aligned}$$

同理可得

$$\frac{\partial x}{\partial A_2} = \frac{R_2 \cos A_1}{\sin(A_1 - A_2)}, \text{ 其中 } R_2 = \frac{\Delta x_2}{\cos A_2}$$

则 x 方向准确估计为

$$\sigma_x = \frac{\sigma_A}{\sin(A_1 - A_2)} \sqrt{R_1^2 \cos^2 A_2 + R_2^2 \cos^2 A_1} \tag{8}$$

同理可得 z 方向漂移量准确为

$$\sigma_z = \frac{\sigma_A}{\sin(A_1 - A_2)} \sqrt{R_1^2 \sin^2 A_1 + R_2^2 \sin^2 A_2} \tag{9}$$

式(2)中, 因两个 y 值不相等, 所以应分别讨论

$$y_i = \Delta y_i + R_i \tan E_i = \Delta x_i \sec A_i \tan E_i + R_i \tan E_i$$

$$\sigma_{y_i}^2 = \left(\frac{\partial y_i}{\partial R_i}\right)^2 \sigma_{R_i}^2 + \left(\frac{\partial y_i}{\partial E_i}\right)^2 \sigma_{E_i}^2, \text{ 其中 } i = 1, 2$$

可以导出

$$\sigma_{y_i} = \Delta y_i \sigma_E \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_i}}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sin 2E_i}\right)^2} \tag{10}$$

式中, $\sigma_{R_i}^2 = \sigma_{x_p}^2 + \sigma_{z_p}^2 - R_i^2 \sigma_A^2$.

则定位准确为

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_z \\ \sigma_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sigma}{\sin(A_1 - A_2)} \sqrt{r_1^2 \cos^2 A_2 + r_2^2 \cos^2 A_1} \\ \frac{\sigma}{\sin(A_1 - A_2)} \sqrt{r_1^2 \sin^2 A_2 + r_2^2 \sin^2 A_1} \\ \Delta x_i \sec A_i \tan E_i \sqrt{\left(\frac{\sigma_{R_i}}{R_i}\right)^2 + \left(\frac{2}{\sin 2E_i}\right)^2 \sigma^2} \end{bmatrix} \tag{11}$$

2 数据分析

在实战任务中, 利用此方法解决了各高速摄影测量仪跟踪测量数据时间不一致的问题. 根据数据质量情况, 并通过计算分析后, 发现其中一测站的时间不同步量为 50 ms.

图 1 和图 2 分别为某一测量点的时间同步及时间不同步量为 50 ms 的数学期望及方差数据(经解密处理)的比对情况. 从图中可以看出, 时间同步比时间不同步量为 50 ms 的数学期望更逼近“0”, 同时, 其数学期望的分散度要弱.

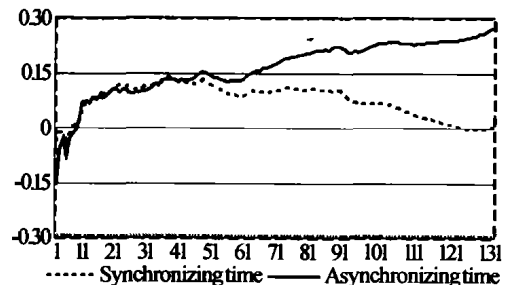


图 1 数学期望数据对比图
Fig. 1 Contrast of mathematical expectation

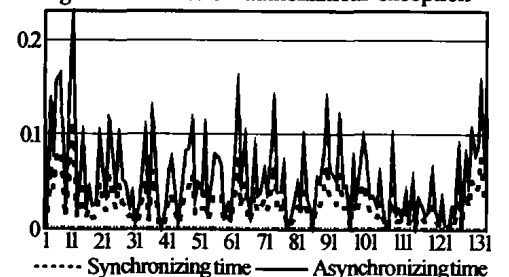


图 2 方差数据对比图
Fig. 2 Contrast of variance

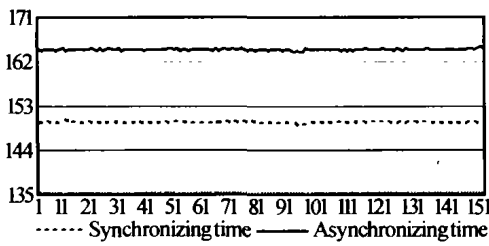


图3 X方向准确比对
Fig.3 Contrast of X directional accurate

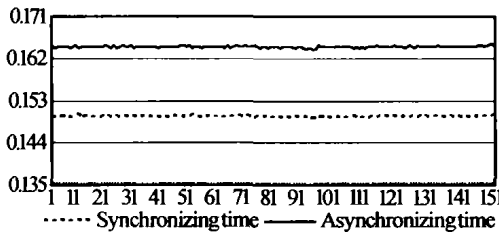


图4 Z方向准确比对
Fig.4 Contrast of Z directional accurate

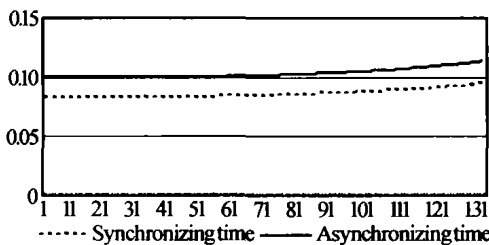


图5 γ_1 准确比对图
Fig.5 Contrast of Y_1 directional accurate

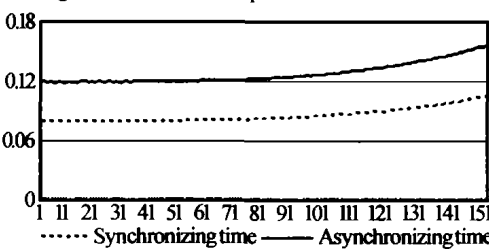


图6 γ_2 准确比对图
Fig.6 Contrast of Y_2 directional accurate

从图3至图6中可明显地看出,两测站在时间相吻合时的定位准确要比两测站在时间不同步量为50 ms时的定位准确高.从而,证明了该方法的有效性.

3 结论

从以上数据分析看,各高速摄影测量仪测量数据时间不一致会给数据处理的准确带来影响,本文中提出的方法有效地解决了任务中出现的实际问题.此方法可以扩展到光电经纬仪跟踪测量设备的数据处理工作中,同样可获得明显的效果.在外弹道事后数据处理中,光测的数据处理准确起着十分重要的作用,它不仅影响着整个外测弹道事后数据处理结果的形成,而且也用于校正无线电测量系统的固定偏差,以提高无线电测量数据处理的准确.因此,各高速摄影仪测量数据时间一致性检验方法的实现与应用为提高外弹道事后数据处理准确提供了有效的保证.

参考文献

- 1 谢红卫. 航天测控系统. 长沙:国防科技大学出版社, 2002,9.41~42
Xie H W. Space TT & C System. Changsha: National Defence Science & Technology University Publishing Company, 2002,9.41~42
- 2 费业泰. 误差理论及数据处理. 北京:机械工业出版社, 1996.154~155
Fei Y T. Error Theory & Data Processing. Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1996.154~155

Measurement Data of High Speed Photography Metrical System Detect in Time Synchronization and Precision Estimation

Cui Shuhua¹, Luo Xiujuan²

1 Xi'an Satellite Control Center, Xi'an 710043

2 Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068

Received date:2003-11-06

Abstract A forward method of time synchronization detection of the high-speed photogram meter metrical system is brought out. The method has resolved some actual problems in some tasks. It is effective to improve the precision of drift-magnitude data processing by using this method.

Keywords High speed photogram meter metrical system; Time synchronization detection; Precision estimation



Cui Shuhua A senior engineer, graduated from mechanical and electrical department of Tongji University in 1986. She has been working on optical measurement data processing and on drift-magnitude data processing of the high-speed photogram meter in particular. More recently, she is mainly interested in the precision analysis on Rocket launching lateral drift-magnitude and the data processing method.