

文章编号 1004-924X(2015)09-2627-08

暗弱空间目标的高精度定位

李振伟^{1*}, 张 涛², 张 楠¹, 孙明国¹

- (1. 中国科学院 国家天文台 长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;
- (2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了一种暗弱空间目标的高精度定位方法,以进一步提高该类空间目标的定位精度。研究了星像质心计算和星图匹配以及光电望远镜静态指向修正模型和天文定位等算法。首先,深入分析了星像质心计算和三角形匹配算法。然后,采用 Tycho-2 星表和基本参数修正模型,修正光电望远镜系统静态指向误差。最后,针对暗弱空间目标定位精度低,对传统天文定位方法进行了改进,提出了“暗弱空间目标高精度定位方法”,实现了暗弱空间目标高精度定位。实验结果表明:提出的暗弱空间目标高精度定位方法的测量精度优于 4",基本满足光电观测系统进行暗弱空间目标测量时对精度和稳定性的要求。

关键词:暗弱空间目标;星图匹配;天文定位;电荷耦合器件

中图分类号:P123.46;V556.5 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152309.2627

High precision orientation of faint space objects

LI Zhen-wei^{1*}, ZHANG Tao², ZHANG Nan¹, SUN Ming-guo¹

- (1. Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)
- * Corresponding author, E-mail: lizw@cho.ac.cn

Abstract: A high precision orientation method for faint space objects was presented to improve the positioning accuracy of this kind of space objects in photoelectric reconnaissance. Several relevant algorithms were investigated, such as star centroid computing, star pattern matching, correction models for static pointing of optoelectronic telescope, and the astronomical orientation of space objects. The star centroid computing method and star identification using triangle algorithm were firstly analyzed. Then, the Tycho-2 catalog and basic parameter pointing model were used to correct the static pointing error of the optoelectronic telescope. Finally, by considering lower orientation precision of faint space objects, the high precision orientation algorithm of faint space objects was presented based on the improved traditional astronomical orientation method to realize the high precision orientation of space objects. Experimental results indicate that the measuring precision of the

收稿日期:2015-01-05;修订日期:2015-03-01.

基金项目:中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站青年探索基金资助项目(No. 1400TS1001);中国科学院院级科研装备研制项目(No. YZ201116)

high precision orientation method for faint space objects is superior to $4''$, which satisfies the system requirements of faint space object surveillance for the precision and stabilization.

Key words: faint space object; star pattern matching; astronomical orientation; Charge Coupled Device(CCD)

1 引言

空间目标光电观测在空间目标监视中占有重要的地位。自 19 世纪 50 年代前苏联第一颗人造地球卫星发射升空以来,从事航天活动的国家和组织越来越多,航天发射越来越频繁。截止目前,世界各国进行的空间发射已经超过 4 000 次,送入空间并曾经被跟踪观测过的空间目标超过 26 000 个,约有一半的空间目标依然遗留在空间,沿轨道飞行^[1-2]。不难看出,随着人类航天活动的增加,空间碎片会日益增多,而空间碎片与在轨航天器之间也会发生碰撞,从而直接导致航天器器件损坏或者解体,对在轨航天器的正常运行构成严重威胁。此外,空间碎片再入大气层,还给人类带来不可估量的灾难。因此,对上述空间目标的观测已成为人类日益关注的研究课题。目前,空间目标地基观测手段主要包括雷达技术(测距、测速和测角)和光电观测技术(光电测角和激光测距)。根据雷达距离方程,雷达的探测能力与距离的 4 次方成反比,而光电观测技术的探测能力与距离的 2 次方成反比,因此雷达技术对近地空间目标探测有利,而光电观测技术更有利于中高轨空间目标的探测。

目前,美国是世界上空间目标监视技术最强的国家。20 世纪 80 年代,美国地面光电深空监测系统(GEODSS)能观测到 40 000 km 深空上足球大小的空间目标(相当于 16.5 等),测角精度为 $10''$ 。美国空间司令部(USSC)把直径在 10 cm 以上的空间碎片一并编号监控^[3-4]。20 世纪 90 年代,我国研制了专门用于空间目标测量的小型光电跟踪装置,口径为 650 mm,视场为 $0.26^\circ/0.38^\circ$,分别用作白天(主要是晨昏)/夜间的精密轨道测量工作。该跟踪系统采用了多套 $1\,024\text{ pixel}\times 1\,024\text{ pixel}$ 、大动态范围的全数字化输出 CCD(Charge Coupled Device)相机,并采用了全数字高分辨率显示、伪彩色图象显示、动目标提取、多目标实时测量、全数字伺服控制、精密共轴跟踪等多项先进光电测量及控制技术;还采用

了多恒星标校对仪器系统误差进行自动修正,经现场实测,对实际的空间目标精度为 $5\sim 6''$ ^[5]。目前,我国空间目标光电望远镜系统主要由小光电和大光电设备组成,其中小光电设备可探测 9~10 等的目标,大光电设备可探测 10~12 等目标,相应的定位精度分别为 $5\sim 10''$ 和 $3\sim 5''$ 。

采用光电观测技术探测暗弱空间目标,通常需要考虑 2 方面的问题。(1)由于光电望远镜的建造成本与望远镜通光口径的三次方成正比,建造大口径的光电望远镜系统容易加重我国经济负担;(2)通常情况下,大通光口径的光电望远镜系统具有较小的 CCD 视场,跟踪观测暗弱空间目标时需要较为准确的预报信息;此外,由于与恒星运动不同步,跟踪观测暗弱空间目标时视场内背景定标恒星的星像会拖长。因此,获得暗弱空间目标的高精度天文定位尚属难题^[6]。倘若对光电望远镜系统的定位方法进行改进,进而提高暗弱空间目标的定位精度,则在实际工作中具有较高的应用价值。

目前,光电望远镜系统的定位方式主要有两种^[7]:轴系定位和天文定位。轴系定位方式属于一种绝对定位方式,其定位精度受到一系列因素的影响,包括:望远镜置平及南北指向误差、CCD 视场中心和光轴中心偏差、码盘安装误差、CCD 像元当量不准引起的误差、大气折射改正不严格引起的误差和测站坐标的数据不正确引起的误差。此外,轴系定位给出的结果是在地平坐标系中的方位角和仰角,难以保证每个测站在不同观测时间内均属于同一个不变的坐标系。所以,轴系定位的结果具有稳定性低、精度低等特点,无法实现对空间目标的高精度定位^[1]。采用传统意义上的天文定位方法观测暗弱空间目标时,必须增加 CCD 相机的曝光时间。然而,CCD 相机的曝光时间越长,则天文定位所采用的定标恒星的星像轨迹就越长,从而降低了定标恒星的定位精度,进而影响了暗弱空间目标的定位精度。因此,深入研究暗弱空间目标高精度定位具有重要的现实意义和应用价值。

为了解决上述难题,本文进一步完善了传统的天文定位方法,给出一种暗弱空间目标的高精度定位方法。该方法使用 CCD 相机连续采集 3 帧图像(相对于第 1、3 帧 CCD 图像而言,第 2 帧 CCD 图像曝光时间较长),利用第 1 及第 3 帧图像上定标恒星建立 CCD 图像处理模型,并通过线性内插法得到第 2 帧图像拍摄时刻的 CCD 图像处理模型,结合第 2 帧图像上暗弱空间目标的量度坐标,输出暗弱空间目标的高精度定位结果(赤道坐标 J2000, 0)。

2 关键算法

2.1 CCD 图像预处理

CCD 图像预处理包括本底场处理、暗场处理和平场处理。CCD 相机在积分时间为零时生成的图像为本底场图像;在保持快门关闭的情况下积分一段时间后暗流分布的图像为暗场图像;当采用完全均匀的光照射在 CCD 相机靶面上,积分一段时间后生成的图像称为平场图像。经过校正暗场和平场处理后,最后图像为:

$$I(x, y) = k \cdot \frac{R_t(x, y) - d_t(x, y)}{F_t^1(x, y) - d_t^1(x, y)}, \quad (1)$$

其中: $R_t(x, y)$ 为初始图像, $d_t(x, y)$ 为暗场图像, $F_t^1(x, y)$ 为平场图像, t 和 t^1 分别为初始图像和平场图像曝光时间。

2.2 星像质心计算

针对分割出的星像连通域,星像质心的计算方法主要有以下 2 种^[2]。

(1) 二维修正矩方法

通过求空间目标或定标恒星星像连通域的一阶矩,确定空间目标或定标恒星的质心,并将其定义为空间目标或定标恒星质心,如式(2)所示:

$$\begin{cases} X = \sum_{i \in S} I_i x_i / \sum_{i \in S} I_i \\ Y = \sum_{i \in S} I_i y_i / \sum_{i \in S} I_i \end{cases}, \quad (2)$$

其中: S 为空间目标或定标恒星星像元的集合, I_i 为 CCD 图像上点 (x_i, y_i) 处像元灰度值, (X, Y) 为空间目标或定标恒星星像质心。

(2) 二维高斯函数拟合法

定标恒星的星光和空间目标漫反射的太阳光均要经过地球周围大气层(存在湍流)到达望远镜焦面,形成一团不断变化的斑点像,其强度从中心

向外变化,符合二维高斯分布,即:

$$G(x, y) = B + \frac{S_{\text{sum}}}{2\pi R_x R_y} \exp\left[-\frac{(x-x_0)^2}{2R_x^2} - \frac{(y-y_0)^2}{2R_y^2}\right], \quad (3)$$

其中: B 为每像素所张天光背景,在星像范围内是常数; x_0 和 y_0 为星像中心位置; S_{sum} 为星像总光量,即:

$$S_{\text{sum}} = \sum_{x=x_1}^{x_2} \sum_{y=y_1}^{y_2} S(x, y) - B \times (x_2 - x_1) \times (y_2 - y_1). \quad (4)$$

研究表明^[2, 8]:对于近圆形点目标星像而言,二维高斯函数拟合法精度要高于二维修正矩方法。相对于二维高斯函数拟合法而言,二维修正矩算法复杂度较低,实时性更佳。为了提高暗弱空间目标的定位精度,空间目标和定标恒星的星像质心计算推荐采用二维高斯函数拟合法。

2.3 星图匹配

星图匹配算法的目的就是将 CCD 相机所拍摄图像中的背景恒星和恒星星表中的恒星进行匹配,认证图像上的大部分恒星,以便确认当前所拍摄图像的坐标位置。目前,工程上常用的算法有:三角形匹配算法、基于遗传算法的星图匹配算法、基于 Hausdorff 距离的星图匹配算法和基于奇异值分解的星图匹配算法等^[9-10]。因三角形匹配算法具有结构简单、运算量小等优点,该算法应用较为广泛。

假设恒星星表中的三颗定标恒星的赤道坐标分别为 (α_1, δ_1) 、 (α_2, δ_2) 、 (α_3, δ_3) ,则其角距定义为:

$$d(i, j) = \arccos\left\{\frac{\mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_j}{|\mathbf{S}_i| \cdot |\mathbf{S}_j|}\right\}, \quad (5)$$

$$\text{其中: } \mathbf{S}_i = \begin{bmatrix} \cos \alpha_i \cos \delta_i \\ \cos \alpha_i \sin \delta_i \\ \sin \delta_i \end{bmatrix}.$$

假设 CCD 相机所拍摄图像中 3 颗实测恒星的赤道坐标分别为 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 (X_3, Y_3) ,则其角距定义为:

$$d_m^k = \arccos\left\{\frac{\mathbf{S}_l \cdot \mathbf{S}_k}{|\mathbf{S}_l| \cdot |\mathbf{S}_k|}\right\}, \quad (6)$$

$$\text{其中 } \mathbf{S}_l = \frac{1}{\sqrt{X_l^2 + Y_l^2 + f^2}} \begin{bmatrix} X_l \\ Y_l \\ -f \end{bmatrix}.$$

倘若式(7)成立的话,则实测恒星三角形和定标恒星三角形匹配成功;否则,它们匹配失败。

$$\begin{cases} |d(i, j) - d_m^{12}| \leq \epsilon \\ |d(j, k) - d_m^{13}| \leq \epsilon \\ |d(i, k) - d_m^{23}| \leq \epsilon \text{ OR } |\theta(i, k) - \theta_m^{13}| \leq \epsilon \end{cases}, (7)$$

其中 ϵ 表示角距测量的不确定度。

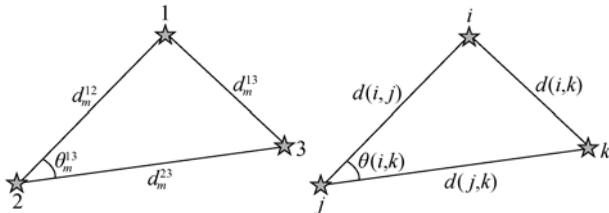


图 1 三角形匹配算法示意图

Fig. 1 Framework of star identification using triangle algorithm

2.4 望远镜静态指向误差修正

望远镜在制造、装配、安装过程中以及周围环境变化等情况下均会引入误差,其误差主要包括大气折射、望远镜制造和装配误差、望远镜结构的重力变形以及因温度变化所引起的变形误差和光学调整误差等。为了进一步提高望远镜的静态指向精度,必须对上述误差进行修正^[1, 11-12]。

与常用的球函数修正模型相比,基本参数修正模型具有参数少、参数间相关性小、模型稳定等优点^[13]。本文拟通过对全天区均匀分布的一批恒星进行实际观测,获得一系列恒星的观测位置 L_o, B_o , 以及由 Tycho-2 星表计算出对应时刻的理论视位置 L_c, B_c , 从而得到望远镜在各个位置上的指向偏差 $\Delta L = L_o - L_c$ 和 $\Delta B = B_o - B_c$, 且有:

$$\Delta L \cos B = A_0 + A_1 \sin B + A_2 \sin L \cos B + A_3 \cos L \cos B + A_4 \sin L \sin B + A_5 \cos L \sin B + A_6 \cos B, (8)$$

$$\Delta B = B_0 + B_1 \sin B + B_2 \cos B + B_3 \sin L + B_4 \cos L. (9)$$

本文采用某水平式光电望远镜系统进行了相关实验,在 Tycho-2 星表中选取全天区均匀分布的恒星进行跟踪观测,得到恒星的观测位置 L_o, B_o , 理论视位置 L_c, B_c 。采用最小二乘法进行拟合,就可测定模型的各个系数,如表 1 所示。经拟合后,该模型的指向精度为: $\sigma_1 = 2.82''$, $\sigma_3 = 2.86''$ 。

表 1 72 颗恒星资料所确定的模型系数

Tab. 1 Model coefficients determined by 72 stars

L 轴系数	Result/(")	B 轴系数	Result/(")
A_0	208.944 049	B_0	-6.479 136
A_1	2.910 139	B_1	62.709 301
A_2	5.110 170	B_2	5.575 247
A_3	-18.951 530	B_3	77.851 115
A_4	34.926 031	B_4	32.471 012
A_5	-85.722 400		
A_6	-316.031 477		

2.5 暗弱空间目标高精度定位方法

2.5.1 星表的选取

本文推荐使用 Tycho-2 星表^[14],该星表给出亮于 12.0 等的约 250 万颗恒星(平均密度在银道面上为 150 deg^{-2} ,在银极附近为 25 deg^{-2})的 J2000.0 的位置,平均精度为 60 mas,坐标系属于国际天球坐标系(ICRS)。

2.5.2 定标恒星的理想坐标(ζ, η)

定标恒星在此坐标系中的理想坐标(ζ_i, η_i)和其赤道坐标(α_i, δ_i)是一一对应的,即:

$$\begin{cases} \zeta_i = \frac{\cos \delta_i \sin(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \\ \eta_i = \frac{\sin \delta_i \cos \delta_0 - \cos \delta_i \sin \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)}{\sin \delta_i \sin \delta_0 + \cos \delta_i \cos \delta_0 \cos(\alpha_i - \alpha_0)} \end{cases} (10)$$

其中: (α_0, δ_0) 为 CCD 相机所拍摄图像的中心位置(赤道坐标)。

2.5.3 天文定位的 CCD 图像处理模型

由于 CCD 芯片尺寸较小,基本上在光电望远镜光轴附近成像,因此像差的影响较小,故可以采用简单的线性图像处理模型。暗弱空间目标观测过程中建议采用六常数模型、十二常数模型和二十常数模型等,在理想坐标(ζ, η)和量度坐标(x, y)之间建立映射关系。

(1) 二十常数模型(需要 10 个以上定标恒星)

$$\begin{cases} \zeta_i = a_1 + b_1 x_i + c_1 y_i + d_1 x_i^2 + e_1 x_i y_i + f_1 y_i^2 + g_1 x^3 + h_1 x^2 y + i_1 x y^2 + j_1 y^3 \\ \eta_i = a_2 + b_2 x_i + c_2 y_i + d_2 x_i^2 + e_2 x_i y_i + f_2 y_i^2 + g_2 x^3 + h_2 x^2 y + i_2 x y^2 + j_2 y^3 \end{cases} (11)$$

(2)十二常数模型(需要 6 个以上定标恒星)

$$\begin{cases} \zeta_i = a_1 + b_1 x_i + c_1 y_i + d_1 x^2 + e_1 xy + f_1 y^2 \\ \eta_i = a_2 + b_2 x_i + c_2 y_i + d_2 x^2 + e_2 xy + f_2 y^2 \end{cases} \quad (12)$$

(3)六常数模型(需要 3 个以上的定标恒星)

$$\begin{cases} \zeta_i = a + bx_i + cy_i \\ \eta_i = d + ex_i + fy_i \end{cases} \quad (13)$$

2.5.4 望远镜指向转换为赤道坐标的过程^[12-13]

(1)计算测站的瞬时经纬度 λ 和 φ

$$\begin{cases} \lambda = \lambda_0 + (x_p \sin \lambda_0 + y_p \cos \lambda_0) \tan \varphi_0 \\ \varphi = \varphi_0 + (x_p \cos \lambda_0 - y_p \sin \lambda_0) \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} \cos(90-\varphi) & 0 & -\sin(90-\varphi) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(90-\varphi) & 0 & \cos(90-\varphi) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(S) & \sin(S) & 0 \\ -\sin(S) & \cos(S) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (17)$$

其中: φ 为测站纬度, S 为地方恒星时。

(5)通过岁差章动修正,将望远镜指向转化到历元天球坐标系(J2000.0)

计算岁差矩阵 \mathbf{PR} :

$$(\mathbf{PR}) = \mathbf{R}_x(-z_A) \mathbf{R}_y(-\theta_A) \mathbf{R}_z(-\zeta_A), \quad (18)$$

$$\begin{cases} \zeta_A = 2\ 306.218\ 1''T + 0.301\ 88''T^2 + 0.017\ 998''T^3 \\ \theta_A = 2\ 306.218\ 1''T + 1.094\ 68''T^2 + 0.018\ 203''T^3 \\ Z_A = 2\ 004.310\ 9''T - 0.426\ 65''T^2 - 0.041\ 833''T^3 \end{cases} \quad (19)$$

其中, $T = (TJD(TDB) - 2\ 451\ 545.0) / 36\ 525$, $TJD(TDB)$ 为儒略日形式的质心动力学时。而旋转矩阵:

$$\begin{cases} \mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_y(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \\ \mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

章动矩阵 \mathbf{NR} 为:

$$(\mathbf{NR}) = \mathbf{R}_x(-(\bar{\epsilon} + \Delta\epsilon)) \mathbf{R}_z(-\Delta\psi) \mathbf{R}_x(-(\bar{\epsilon} + \Delta\epsilon)). \quad (21)$$

其中:

黄经章动:

$$\Delta\psi = \sum_j (\Delta\psi_j) \sin(n_{j1} l + n_{j2} l' + n_{j3} F + n_{j4} D' + n_{j5} \Omega). \quad (22)$$

(2)大气消光修正

$$\begin{cases} A_c = A_0 \\ H_c = H_0 + 0.000\ 292\ 3 \cot(H_0 + 0.000\ 292\ 3 \cot H_0) \end{cases}, \quad (15)$$

其中: (A_c, H_c) 为真位置; (A_0, H_0) 为视位置。

(3)水平坐标系与地平坐标系间坐标转换 $(L, B) \Rightarrow (A, H)$:

$$\begin{cases} A = \arctan(\sin L \cot B) \\ H = \arcsin(\cos L \cos B) \end{cases} \quad (16)$$

(4)地平坐标系 (A, H) 转换到赤道坐标系 (α, δ) :

交角章动:

$$\Delta\epsilon = \sum_j (\Delta\epsilon_j) \cos(n_{j1} l + n_{j2} l' + n_{j3} F + n_{j4} D' + n_{j5} \Omega). \quad (23)$$

平黄赤交角:

$$\bar{\epsilon} = \frac{1}{206\ 264.806\ 3} \times (84\ 381.448 - 46.815 T_U - 0.000\ 59 T_U^2 + 0.001\ 813 T_U^3). \quad (24)$$

(6)改正自行

$$\begin{cases} \alpha = \alpha_0 + \mu_\alpha (t - t_0) \\ \delta = \delta_0 + \mu_\delta (t - t_0) \end{cases}, \quad (25)$$

其中: t 和 t_0 分别是观测时刻、星表 Tycho-2 历元时刻, (α_0, δ_0) 是星表历元时刻的赤道坐标, μ_α 和 μ_δ 分别是赤经自行和赤纬自行。

2.5.5 暗弱空间目标位置的归算

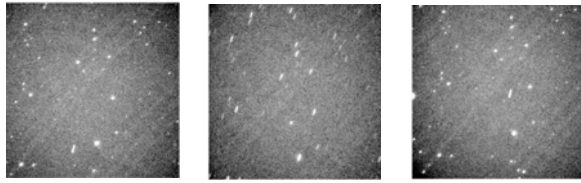
设暗弱空间目标的理想坐标 (ζ, η) , 则暗弱空间目标的赤道坐标 (α, δ) 可由下式求得:

$$\begin{cases} \tan(\alpha_s - \alpha_0) = \frac{\zeta_s}{\cos\delta_0 - \eta_s \sin\delta_0} \\ \tan\delta_s = \frac{(\eta_s \cos\delta_0 + \sin\delta_0) \cos(\alpha_s - \alpha_0)}{\cos\delta_0 - \eta_s \sin\delta_0} \end{cases}, \quad (26)$$

其中: (α_0, δ_0) 为 CCD 相机所拍摄图像中心位置(赤道坐标)。

针对传统天文定位方法的不足,本文提出一种暗弱空间目标的高精度定位方法——使用 CCD 相机连续采集 3 帧图像(相对于第 1、3 帧 CCD 图像而言,第 2 帧 CCD 图像曝光时间较长),利用第 1 及第 3 帧图像定标恒星建立 CCD

图像处理模型,并通过线性内插法得到第 2 帧图像拍摄时刻的 CCD 图像处理模型,结合第 2 帧图像暗弱空间目标的量度坐标,输出暗弱空间目标的高精度定位结果(赤道坐标 J2000.0)。



(a)第 1 帧 (b)第 2 帧 (c)第 3 帧
(a)The 1st frame (b)The 2nd frame (c)The 3rd frame

图 2 连续采集 3 帧图像

Fig. 2 Three consecutive frame images of space objects

假设 CCD 相机连续采集 3 帧图像,曝光时刻分别记为 t_1, t_2, t_3 ,曝光时间分别记为 T_1, T_2, T_3 ($T_2 > T_1, T_1 = T_3$),如图 3 所示,CCD 图像处理模型均采用六常数模型。

(1)解算第 1 帧 CCD 图像处理模型参数,即:

$$\begin{cases} \zeta_1 = a_1 + b_1 x_1 + c_1 y_1 \\ \eta_1 = d_1 + e_1 x_1 + f_1 y_1 \end{cases} \quad (27)$$

(2)解算第 3 帧 CCD 图像处理模型参数,即:

$$\begin{cases} \zeta_3 = a_3 + b_3 x_3 + c_3 y_3 \\ \eta_3 = d_3 + e_3 x_3 + f_3 y_3 \end{cases} \quad (28)$$

(3)解算第 2 帧 CCD 图像上暗弱空间目标的量度坐标 (x_2, y_2) 。

(4)根据第 1 帧和第 3 帧 CCD 图像处理模型参数,计算图像处理模型各参数变化率,线性内插到第 2 帧 CCD 图像拍摄时刻,即为第 2 帧 CCD 图像处理模型参数,具体计算公式如下:

$$\begin{cases} a_2 = a_1 + \frac{a_3 - a_1}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) \\ b_2 = b_1 + \frac{b_3 - b_1}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) \\ c_2 = c_1 + \frac{c_3 - c_1}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) \\ d_2 = d_1 + \frac{d_3 - d_1}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) \\ e_2 = e_1 + \frac{e_3 - e_1}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) \\ f_2 = f_1 + \frac{f_3 - f_1}{t_3 - t_1} (t_2 - t_1) \end{cases} \quad (29)$$

(5)将第 2 帧 CCD 图像处理模型参数和暗弱

空间目标的量度坐标 (x_2, y_2) 代入式(12),即得到暗弱空间目标的理想坐标 (ζ_2, η_2) ,即:

$$\begin{cases} \zeta_2 = a_2 + b_2 x_2 + c_2 y_2 \\ \eta_2 = d_2 + e_2 x_2 + f_2 y_2 \end{cases} \quad (30)$$

(6)将暗弱空间目标的理想坐标 (ζ_2, η_2) 代入式(26),即可计算出暗弱空间目标的赤道坐标(赤道坐标 J2000.0)。

综上所述,暗弱空间目标高精度定位的流程图如图 3 所示。

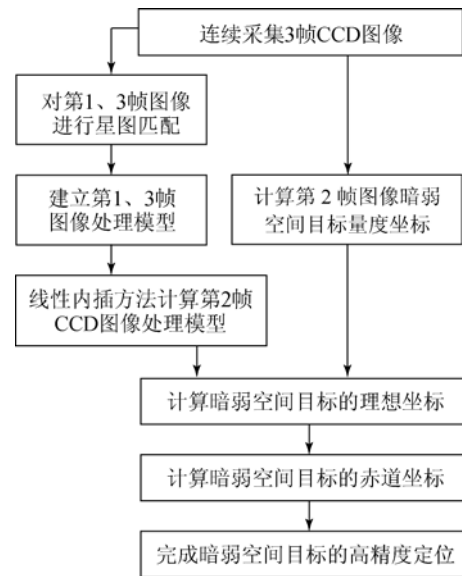


图 3 暗弱空间目标的高精度定位流程图

Fig. 3 Flowchart of high precision orientation for faint space object

3 测量实验与结果

为了定量分析本方法的定位精度,采用某 40 cm 光电望远镜进行试验观测,其具体参数如表 2 所示。选取某颗 Tycho-2 暗弱定标恒星,使用除该颗恒星以外所有匹配的定标恒星计算 CCD 图像处理模型常数,计算出该恒星的赤道坐标(J2000.0 平历元),并与该恒星在 Tycho-2 星表中的理论位置相比较而得到残差分布,如图 4 所示。赤经和赤纬精度的计算公式采用中误差计算公式,即:

$$\sigma_\alpha = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\alpha_i)^2}{n-1}}, \sigma_\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\delta_i)^2}{n-1}} \quad (31)$$

定位系统总精度采用总中误差计算公式,即:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\delta^2} \quad (32)$$

经计算分析,赤经方向 σ_α 的精度(RMS)为 $3.17''$;赤纬方向 σ_δ 的精度(RMS)为 $1.83''$,总精度为 $3.66''$,完全满足光电望远镜观测系统精度要求。

表 2 光电望远镜系统具体参数
Tab. 2 Parameters of telescope system

参数	数值
口径/mm	400
焦距/mm	600
光谱/nm	500~800
望远镜视场/(')	46.9×46.9
CCD 图像尺寸/pixel	512×512
像元角分辨率/(")	5.50

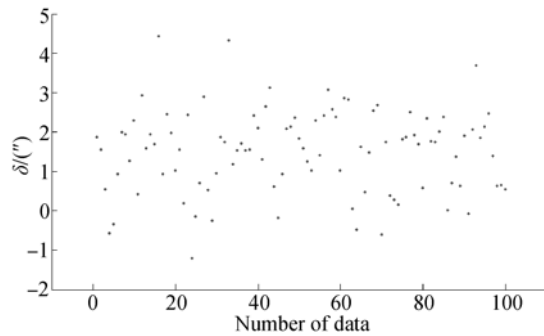
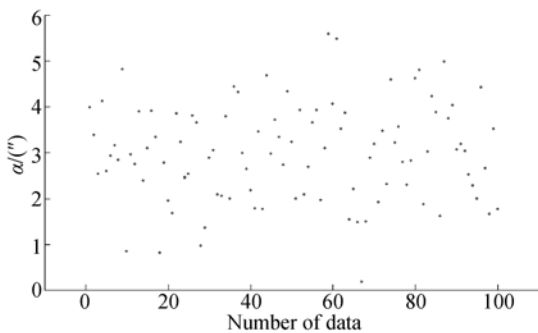


图 4 目标位置残差分布图

Fig. 4 Residuals of object positions

4 结 论

本文根据暗弱空间目标测量的高精度要求,深入研究了星像质心计算和星图匹配,以及光电望远镜静态指向模型修正和天文定位等算法。针对暗弱空间目标定位精度低的缺点,对传统天文定位方法进行了改进,提出了“暗弱空间目标的高精度定位方法”,实现了暗弱空间目标的高精度定位。实验结果证明:暗弱空间目标高精度定位系统的测量精度优于 $4''$,基本满足光电观测系统对暗弱空间目标测量精度高、稳定可靠等要求。结果显示,进一步提高暗弱空间目标的定位精度,在实际工作中将具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] 吴连大. 人造卫星与空间碎片的轨道和探测[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2011.
WU L D. *Orbits and Detection of Satellite and Space Debris* [M]. Beijing:China Science and Technology Press, 2011. (in Chinese)

[2] 孙荣煜,赵长印. GEO 空间碎片的光学观测与精密定位[J]. 天文学进展, 2012, 30(3):394-410.
SUN R Y, ZHAO CH Y. Optical survey technique for space debris in GEO [J]. *Progress in Astronomy*, 2012, 30(3):394-410. (in Chinese)

[3] FLOHRER T, SCHILDKNECHT T, MUSCI R. Proposed strategies for optical observations in a future European Space Surveillance network [J]. *Adv Space Res*, 2008, 41(7):1010-21.

[4] 李语强. SBG 望远镜空间碎片观测精度分析 [D]. 昆明:中国科学院研究生院(云南天文台), 2006.

LI Y Q. *Observational accuracy analysis of space debris of SBG telescope* [D]. Kunming: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Yunnan observatories), 2006. (in Chinese)

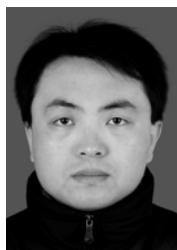
[5] 赵金字. 光电望远镜误差分析及补偿技术 [D]. 北京:中国科学院研究生院, 2005.
ZHAO J Y. *Error analysis and correction technology for photoelectricity telescope* [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2005. (in Chinese)

[6] 中国科学院紫金山天文台. 暗弱空间碎片高精度定位方法:中国, CN102494674A [P]. 2012.
Purple Mountain Observatory, CAS. High precision orientation method of faint space debris:China, CN102494674A [P]. 2012. (in Chinese)

[7] 孙明国,刘承志,范存波,等. 基于 SLR 精密轨道的天文定位精度分析[J]. 天文学报, 2012, 53(2): 153-160.

- SUN M G, LIU CH ZH, FAN C B, *et al.*. Analysis on the accuracy of celestial positioning based on the SLR precise orbit [J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2012, 53(2):153-160. (in Chinese)
- [8] 冒蔚. CCD 天体测量学[M]. 昆明:云南科技出版社, 2003.
- MAO W. *CCD Astrometry* [M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Publishing Press, 2003. (in Chinese)
- [9] 翟优, 曾杰, 熊伟. 基于不变特征描述符实现星点匹配[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(11):2531-2539.
- ZHAI Y, ZENG L, XIONG W. Star matching based on invariant feature descriptor [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11):2531-2539. (in Chinese)
- [10] 张磊, 魏仲慧, 何昕, 等. 快速全天自主星图识别[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(4):909-915.
- ZHANG L, WEI ZH H, HE X, *et al.*. Fast all-sky autonomous star identification [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(4):909-915. (in Chinese)
- [11] 薛向尧, 高云国, 韩光宇, 等. 水平式经纬仪指向误差的统一补偿技术[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(7):1524-1530.
- XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Total correction method of pointing error for level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(7):1524-1530. (in Chinese)
- [12] 薛向尧, 高云国, 韩光宇, 等. 水平式激光发射系统指向误差的修正[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3):536-544.
- XUE X Y, GAO Y G, HAN G Y, *et al.*. Correction of laser pointing error of level mounting laser transmitter system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3):536-544. (in Chinese)
- [13] 刘廷霞, 王伟国, 李博, 等. 水平式经纬仪静态指向修正模型的比较与改进[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(6):1374-1380.
- LIU T X, WANG W G, LI B, *et al.*. Comparison and improvement of correction models for static pointing of level mounting theodolite [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(6):1374-1380. (in Chinese)
- [14] SEIDELMANN P, GAUME R, ZACHARIAS N, *et al.*. Optical Reference Star Catalogs for Space Surveillance: Current Status and Feature Plans [R]. *DTIC Document*, 2007.
- [15] 夏一飞, 黄天衣. 球面天文学[M]. 南京:南京大学出版社, 1995.
- XIA Y F, HUANG T Y. *Spherical Astronomy* [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1995. (in Chinese)

作者简介:



李振伟(1983—),男,河南安阳人,助理研究员,2005年于东北大学获得学士学位,2008年于中国科学院研究生院获得硕士学位,2014年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事空间目标光电观测技术方面的研究。E-mail: lizw@cho.ac.cn



张涛(1964—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事光电工程总体设计等方面研究。E-mail: zhangt@ciomp.ac.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)