

ZHAN Yinhu, ZHANG Chao, ZHENG Yong, et al. A Fitting Algorithm of the Apparent Moon Center and Its' Application on Fast Orientation[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2012, 41(3): 353-358. (詹银虎, 张超, 郑勇, 等. 月球视面中心拟合算法及其在测月快速定向中的应用[J]. 测绘学报, 2012, 41(3): 353-358.)

月球视面中心拟合算法及其在测月快速定向中的应用

詹银虎¹, 张超¹, 郑勇¹, 杜兰¹, 唐家祥²

1. 信息工程大学 测绘学院, 河南 郑州 450052; 2. 92003 部队, 广东 湛江 524037

A Fitting Algorithm of the Apparent Moon Center and Its' Application on Fast Orientation

ZHAN Yinhu¹, ZHANG Chao¹, ZHENG Yong¹, DU Lan¹, TANG Jiexiang²

1. Institute of Surveying and Mapping, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China; 2. 92003 Troop, Zhanjiang 524037, China

Abstract: Based on observing the edge of the bright part of the apparent moon by electronic theodolite, a fitting algorithm of the apparent moon center is put forward, and formulae are deduced in detail. Experiment based on real observation testified the stability of the algorithm, which demonstrated the position of the moon center is solved precisely. Then, a novel method of fast orientation by surveying the moon is explored. By this method, orientation is realized successfully and both inner and outer precision of orientation could be superior to $\pm 2.0''$. The moon-observing method can overcome the shortage that classical astro-geodetic orientation can only be realized by star-observing method at night, and extend the application field of astro-geodetic surveying effectively. Since the apparent sun is a circular plane, the moon-observing method will be suitable for observing the sun.

Key words: fast orientation; electronic theodolite; moon; least-squares fitting; precision

摘要: 基于电子经纬仪对月球明亮区域边沿的观测采样, 提出一种月球视圆面中心拟合算法, 推导出详细的计算公式。通过实际观测试验验证该算法的可靠性, 较好地解决了月面中心的确定问题。在此基础上, 探索一种测月快速定向方法。运用此方法进行天文定向, 内符合精度和外符合精度均优于 $\pm 2.0''$ 。测月定向可有效弥补传统天文定向夜间只能依靠观测恒星进行的不足, 扩展天文测量的使用范围。由于太阳的视面也是正圆, 测月定向方法同样适用于测日定向。

关键词: 快速定向; 电子经纬仪; 月球; 最小二乘拟合; 精度

中图分类号: P228

文献标识码: A

文章编号: 1001-1595(2012)03-0353-06

基金项目: 国家自然科学基金(10878025)

1 引言

天文定向是依靠天空中的自然天体测定真北方向的一种技术, 因其精度较高且是一种绝对定向手段, 常用于测定大地网中起始边的拉普拉斯方位角, 以控制角度观测误差的累积和传播^[1-2]。又因其具有隐蔽性好、不易受干扰和独立性强等优点, 可为航天器发射、远程火炮精确打击、陀螺标校等提供真北基准^[3-5]。目前, 夜间天文定向多采用观测恒星进行, 但在云雾天气下恒星的可见性极低, 往往无法完成定向^[6]。月球是天空中除太阳之外最亮的自然天体, 可见度要远远高于恒星, 是很好的天文定位定向观测目标。

由于视太阳是一个完整的正圆, 目前国内已有学者提出利用电子经纬仪观测太阳前后沿进行

快速定向, 并在实际应用中取得了较好的定向结果^[7]。但国内国外尚未有人提出基于电子经纬仪的测月定向理论和方法。这是因为月球有月相的变化, 它在绝大部分时间呈现的是一个圆缺面, 测日定向的方法无法适用于测月定向。因此, 如何利用电子经纬仪确定月球视面中心是定向的关键。基于电子经纬仪对月球边沿观测采样, 笔者提出月球视面中心拟合算法, 很好地解决了月球视面中心的确定问题, 并在实际应用中取得了较高精度的定向结果。

2 测月定向原理

如图1所示, O 为测站中心, O_L 为月球视面中心。地面目标 B 的天文方位角 A_B 是从南点 S 按顺时针量取至目标的水平角, 范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 。

设在某概略坐标已知的测站,采用电子经纬仪观测地面目标 B 得到水平度盘值为 M_B ,观测月球视面中心 O_L 得到水平度盘值为 M_L ,同时记录下测瞬时刻 T ,并用 A_L 表示 T 时刻月球视面中心的真实方位角。则只需解算出经纬仪水平度盘 0° 方向与南点 S 的水平夹角 ΔM 即可完成定向,即

$$\Delta M = A_L - M_L \quad (1)$$

$$A_B = M_B + \Delta M = M_B + A_L - M_L \quad (2)$$

A_L 需要以观测历元 T 为引数并借助太阳系天体历表计算得到。IAU 2000 年第 24 届大会推荐太阳系大天体基本历表采用美国喷气推进实验室编制的数值历表 DE405,岁差-章动模型采用 IAU 2000A 模型^[8]。为了缩短计算时间,可以采用美国海军天文台提供的 NOVAS 2000K 岁差-章动模型(488 项)代替精确的 IAU 2000A 模型(1365 项)。此时月球视位置计算精度优于 3.5 mas,完全能满足天文定向的需要^[9]。

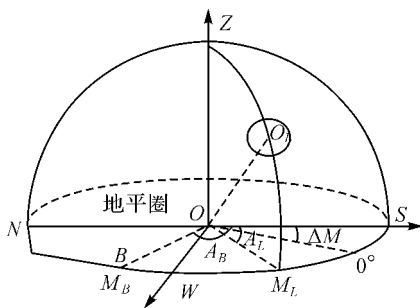


图 1 利用月球进行天文定向原理图

Fig. 1 Principle of orientation by observing the moon

事实上,月球视面中心无法直接照准观测,即 M_L 不能直接获取,需要一定的观测方法及算法来实现。

3 月球视面中心的确定

月球的几何平均扁率约为 0.002,目前建立的月球空间参考系中通常将月球看做正球体。由于地月距离较远,可认为地球上观测到的月球是一个很小的圆面,圆面半径约为 $15'$,且圆面中心与月球的质心重合^[10-13]。若利用电子经纬仪对月球明亮边沿进行观测采样,则可获取月球视面的几何信息,利用一定的算法即可解算其中心位置。

3.1 月球边沿点采样

如图 2 所示,按照由上至下的顺序,用电子经

纬仪望远镜的十字丝中心对月球视面的边沿进行多次均匀采样,记录下每次采样的时刻 T_k ,水平度盘值 M_k 和垂直度盘值 H_k ^[14]。确定一个圆,需要知道其圆心坐标及半径,即有 3 个未知参数,因此至少需要 3 次采样才能确定月球视面。

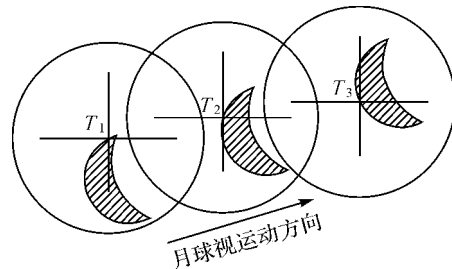


图 2 月球边沿点采样图

Fig. 2 Observing and sampling of the moon edge

3.2 历元归算

上述采样是在不同历元下进行的,需要将观测数据归算到同一历元。

如图 3 所示,从历元 T_1 到 T_2 ,月球视面中心的位置从 O_1 运动到 O_2 ,某采样点的位置从 P_1 运动到 P_2 。如果 T_1 和 T_2 足够接近,可以认为月球在这一时间段内作线性运动,则月球视面中心和采样点的地平坐标变化 $(\Delta A, \Delta H)$ 是相同的,可按如下公式计算

$$\left. \begin{aligned} \Delta A &= A(T_1) - A(T_2) \\ \Delta H &= H(T_1) - H(T_2) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $A(T_1)$ 、 $H(T_1)$ 为历元 T_1 时月球视面中心的方位角和高度角; $A(T_2)$ 、 $H(T_2)$ 为历元 T_2 时月球视面中心的方位角和高度角。若已知测站的天文坐标,这 4 个量均能以时间为引数计算得到,即 $(\Delta A, \Delta H)$ 是已知的,则将 P_2 的观测数据归算到 P_1 为

$$\left. \begin{aligned} M^\circ &= M + \Delta A \\ H^\circ &= H + \Delta H \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

现将第 k 次采样数据 (M_k, H_k) 归算到第 1 次采样历元 T_1 ,先令

$$\Delta T_k = T_k - T_1 \quad (5)$$

ΔT_k 表示第 k 次采样和第 1 次采样之间的时间间隔,一般较大,不妨划分为 m 个等间隔。

$$\Delta T_k = \sum_{i=1}^m \frac{\Delta T_k}{m} \quad (6)$$

显然,只要 m 足够大,即可认为月球在每一个划分时间间隔内的运动为线性运动,则 ΔA_k 和 ΔH_k 可按如下公式计算。

$$\Delta A_k = \sum_{i=1}^m [A(T_k - i \frac{\Delta T_k}{m}) - A(T_k - (i-1) \frac{\Delta T_k}{m})] \quad (7)$$

$$\Delta H_k = \sum_{i=1}^m [H(T_k - i \frac{\Delta T_k}{m}) - H(T_k - (i-1) \frac{\Delta T_k}{m})] \quad (8)$$

第 k 次采样数据归算到历元 T_1 后为

$$\left. \begin{aligned} M_k^\circ &= M_k + \Delta A_k \\ H_k^\circ &= H_k + \Delta H_k \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

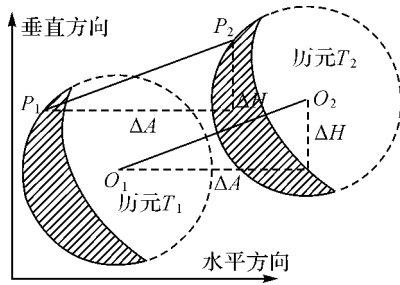


图 3 历元归算原理图

Fig. 3 Principle of epoch unification

采用此方法,可将所有采样点的观测数据归算到同一历元。归算后的采样点序列可清晰反映月球视面的几何特征。

3.3 月面坐标系的建立及转换

历元归算后得到的采样数据 (M_k°, H_k°) 为球面三维坐标,需要转换到月球视面所在的平面直角坐标系下才能进行圆的拟合(图 4)。

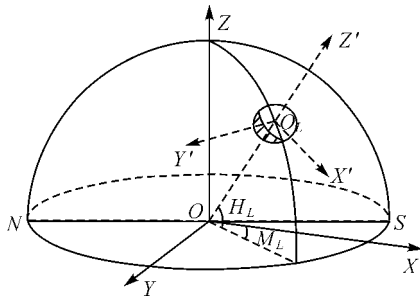


图 4 坐标转换原理图

Fig. 4 Principle of coordinate transformation

如图 4 所示,月球视面中心的水平角 M_L 和高度角 H_L 为待拟合参数。建立坐标系 $O_L-X'Y'Z'$,坐标原点 O_L 为月球视面中心, Z' 轴在 OO_L 方向上指向天顶, X' 轴在垂直面 OZO_L 内与 Z' 轴垂直且指向天底, Y' 轴按左手定则确定,称该坐标系为月面坐标系。再建立 $OXYZ$ 直角坐标

系,坐标原点 O 设在观测仪器的中心, X 轴在水平面上指向水平读盘 0° 方向, Z 轴指向天顶, Y 轴按左手定则确定,称该坐标系为仪器坐标系。则 (M_k°, H_k°) 在 $OXYZ$ 下的坐标表示形式为

$$S_k = \begin{bmatrix} x_k \\ y_k \\ z_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos H_k^\circ \cos M_k^\circ \\ \cos H_k^\circ \sin M_k^\circ \\ \sin H_k^\circ \end{bmatrix} \quad (10)$$

将仪器坐标系转换到月面坐标系,需要先绕 Z 轴顺时针旋转 M_L 角,再绕 Y 轴顺时针旋转 $90^\circ - H_L$ 角,最后沿 Z 轴正向平移 1 个单位长度即可,用等式表示为^[15]

$$S'_k = R_Y(90^\circ - H_L) R_Z(M_L) S_k - \tau \quad (11)$$

$$\tau = (0 \quad 0 \quad 1)^T \quad (12)$$

M_L 和 H_L 为需要求解的未知参数,但其近似值可通过对采样数据取平均得到,并作为初值。

$$\left. \begin{aligned} M_0 &= \frac{\sum_{k=1}^n M_k^\circ}{n} \\ H_0 &= \frac{\sum_{k=1}^n H_k^\circ}{n} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(11)变为

$$S'_k = (x'_k \quad y'_k \quad z'_k)^T = R_Y(90^\circ - H_0) R_Z(M_0) S_k - \tau \quad (14)$$

(x'_k, y'_k, z'_k) 即为月面坐标系下月球视面边缘点的三维坐标。由于月球视面很小,可看做平面,即 $z'_k \approx 0$ 。因此,只需在 $O_L X'Y'$ 平面内作圆的拟合,即可确定中心。

3.4 最小二乘拟合月面中心

假设离散边缘点序列为 $(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2), \dots, (x'_n, y'_n)$, 圆心坐标为 (\hat{x}_c, \hat{y}_c) , 半径为 \hat{r} , 依据几何距离最小的原则,误差方程为^[16]

$$v_k = \sqrt{(x'_k - \hat{x}_c)^2 + (y'_k - \hat{y}_c)^2} - \hat{r} \quad (15)$$

由于坐标原点始终在圆内,不妨将月心坐标的近似值取为 $(0, 0)$, 半径的近似值取为 $r_0 = \sin 15'$ 。令

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_c \\ \hat{y}_c \\ \hat{r} \end{bmatrix} \quad \delta \hat{X} = \begin{bmatrix} \delta \hat{x}_c \\ \delta \hat{y}_c \\ \delta \hat{r} \end{bmatrix} \quad X_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ r_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

输入参数近似值

$$\hat{X} = X_0 + \delta \hat{X} \quad (17)$$

对式(15)线性化

$$v_k = a_k \delta \hat{x}_c + b_k \delta \hat{y}_c - \delta \hat{r} + l_k \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} a_k &= \frac{-x'_k}{\sqrt{x'^2_k + y'^2_k}} \\ b_k &= \frac{-y'_k}{\sqrt{x'^2_k + y'^2_k}} \\ l_k &= \sqrt{x'^2_k + y'^2_k} - r_0 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

令

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & -1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_n & b_n & -1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{l} &= \begin{bmatrix} l_1 \\ \vdots \\ l_n \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

则

$$\delta \hat{\mathbf{X}} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \mathbf{l}) \quad (21)$$

$$\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X}_0 + \delta \hat{\mathbf{X}} \quad (22)$$

月心在 $O_L X' Y' Z'$ 坐标系下的坐标为

$$\mathbf{X}' = (\hat{x}_c \quad \hat{y}_c \quad 0)^T \quad (23)$$

将 X' 转换到 $OXYZ$ 坐标系下为

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= (x \quad y \quad z)^T = \\ & \mathbf{R}_z(-M_0) \mathbf{R}_y(H_0 - 90^\circ) (\mathbf{X}' + \boldsymbol{\tau}) \end{aligned} \quad (24)$$

再将直角坐标化为球面坐标

$$\left. \begin{aligned} M_L &= \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \\ H_L &= \arctan\left(\frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

由式(25)计算出的 (M_L, H_L) 要比初始值 (M_0, H_0) 精确得多, 替换初始值, 再次进行坐标转换及最小二乘拟合, 依此迭代, 直至相邻 2 次计算结果相差较小时为止。实际计算表明, 这一迭代过程收敛极快, 一般只需 2 次迭代即可使结果收敛到 $0.1''$ 以内。

3.5 精度估计

单位权中误差 μ 及 $\hat{\mathbf{X}}$ 的权逆阵 $\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}}$ 表示为

$$\mu = \pm \sqrt{\frac{\mathbf{V}^T \mathbf{V}}{n-3}} \quad (26)$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{\mathbf{X}}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} \end{bmatrix} \quad (27)$$

则 X' 的权逆阵可表示为

$$\mathbf{Q}_{X'} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & 0 \\ q_{21} & q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

根据式, 由权逆阵的传播定律可知^[17]

$$\mathbf{Q}_X = \mathbf{R}_z(-M_L) \mathbf{R}_y(H_L - 90^\circ) \mathbf{Q}_{X'} \cdot$$

$$\mathbf{R}_y(90^\circ - H_L) \mathbf{R}_z(M_L) \quad (29)$$

根据式, M_L 和 H_L 的权倒数为

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{p_{M_L}} &= \mathbf{F}_1^T \mathbf{Q}_X \mathbf{F}_1 \\ \frac{1}{p_{H_L}} &= \mathbf{F}_2^T \mathbf{Q}_X \mathbf{F}_2 \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

式中, \mathbf{F}_1 和 \mathbf{F}_2 分别为 M_L 和 H_L 在月球视面中心处的偏导数系数, 按如下公式计算

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{F}_1 &= \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial M_L}{\partial x}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial M_L}{\partial y}\right)_0 \\ 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{F}_2 &= \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial H_L}{\partial x}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial H_L}{\partial y}\right)_0 \\ \left(\frac{\partial H_L}{\partial z}\right)_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

故 M_L 和 H_L 的精度估计公式为

$$\left. \begin{aligned} m_{M_L} &= \mu \sqrt{\frac{1}{p_{M_L}}} \\ m_{H_L} &= \mu \sqrt{\frac{1}{p_{H_L}}} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

月球视面中心的确定流程如图 5 所示。

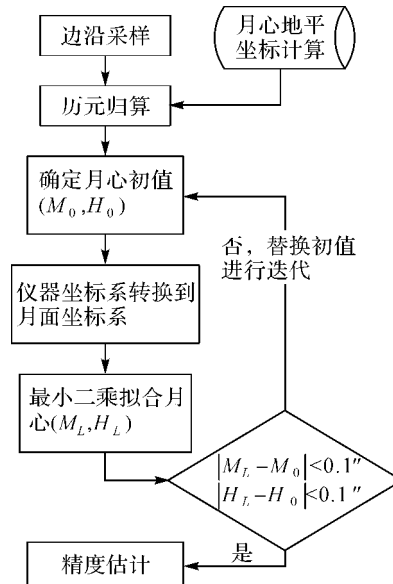


图 5 月面中心拟合算法流程图

Fig. 5 Flow chart of the fitting algorithm

4 试验

为验证第 3 节所介绍的月球视面中心拟合算

法的可靠性,制定以下试验方案:

(1) 采用北极星任意时角法精确测定经纬仪水平度盘 0° 方向与南点的水平夹角,作为真值记为 ΔM_0 。

(2) 采用本文介绍的测月方法再次测定上述夹角记为 ΔM ,以及月球视面中心高度角 H_L 。

(3) 计算水平角的拟合值与真值之差 $dM_L = \Delta M - \Delta M_0$,高度角的拟合值与真值之差 $dH_L = H_L - H_{L0}$ 。 dM_L 、 dH_L 可反映月心拟合的外符合精度,内符合精度可按式(32)计算。

(4) 重复步骤(2)、(3),进行多个时段的观测、计算和比较。

2011年7月16日夜晩,在中国华北地区,月球明亮且光滑的边沿大约只有半个圆周。在某固定测站(天文坐标 $\lambda = 7^{\text{h}}34^{\text{m}}29.8^{\text{s}}$, $\varphi = 34^\circ44'22.7''$),采用 TM5100 电子经纬仪按照上述试验方案进行了多次观测试验,表1列出了某次测量结果。

表1 月球视面中心拟合结果

时段	$dM_L(^{\circ})$	$m_{M_L} (^{\circ})$	$dH_L(^{\circ})$	$m_{H_L} (^{\circ})$
1	1.3	2.7	-4.8	1.0
2	-0.3	2.7	-3.4	1.0
3	-0.6	3.0	-1.9	1.1
4	1.7	1.6	-2.0	0.6
5	1.1	2.5	-3.9	0.9
6	4.0	3.1	-4.4	1.1
平均值	1.2	1.1	-3.4	0.4

上述每个时段对月球边沿的采样次数均为12次,拟合得到的月球视面中心的水平角 M_L 与真实值最大偏差为 $4.0''$,最小偏差为 $-0.3''$,平均偏差为 $1.2''$,拟合中误差为 $\pm 1.1''$;拟合得到的月球视面中心的高度角 H_L 与真实值最大偏差为 $-4.8''$,最小偏差为 $-1.9''$,平均偏差为 $-3.4''$,拟合中误差为 $\pm 0.4''$ 。

高度角偏差普遍较大,这可能是采用标准大气折射改正模型时,没有考虑实际观测时的温度、气压、湿度等因素的影响,造成高度角的改正存在系统差;水平角中误差明显高于高度角中误差,这是因为采样时月球只有左侧边沿明亮且光滑,采样点大致在水平方向上对称分布^[18]。总体来看,采用本文介绍的月心拟合算法可较精确地确定月面中心。

5 实际应用

参照北极星任意时角法定向的观测方法,制

定一个时段内的测月定向观测纲要为^[19]:

(1) 观测地面目标。用望远镜的纵丝连续照准地面目标3次,每次照准后记录下水平度盘读数。

(2) 观测月球。对月球视面明亮且光滑的边沿进行顺序采样,采样点要尽量分布平均,采样次数依边沿的长短而定,一般不少于10次。

(3) 纵转望远镜。再观测月球,观测要求同(2)。

(4) 观测地面目标,观测要求同(1)。

重复上述步骤,进行多个时段的观测。各个时段地面目标天文方位角的解算方法和精度估计方法可参照北极星任意时角法定向,这里不再赘述。2011年10月7日在华北地区某固定天文基线(方位角 $A_B = 332^\circ58'45.7''$,基线长度 $l = 110\text{ m}$),进行了5个时段的测月定向试验,结果如表2所示。

表2 测月定向结果

Tab. 2 Results of the orientation by observing the moon

时段	天文方位角	中误差	与准确值之差
1	$332^\circ58'46.8''$	$\pm 2.0''$	$+1.1''$
2	$332^\circ58'48.2''$	$\pm 2.3''$	$+2.5''$
3	$332^\circ58'48.9''$	$\pm 2.2''$	$+3.2''$
4	$332^\circ58'46.6''$	$\pm 2.1''$	$+0.9''$
5	$332^\circ58'46.9''$	$\pm 2.7''$	$+1.2''$
均值	$332^\circ58'47.5''$	$\pm 1.0''$	$+1.8''$

各时段所测地面目标天文方位角的最大中误差为 $\pm 2.7''$,最大互差为 $2.3''$,与准确值最大偏差为 $+3.2''$;5个时段天文方位角平均值为 $332^\circ58'47.5''$,中误差为 $\pm 1.0''$,与准确值偏差 $+1.8''$ 。可见利用测月进行天文定向可得到较高精度的测量结果。

6 结论

(1) 本文提出的基于最小二乘的月心拟合算法很好地解决了月球视面中心的确定问题,多个时段的拟合精度可优于 $2.0''$ 。

(2) 将此算法应用于天文定向,观测5个时段耗时约15 min,内符合和外符合精度均优于 $2.0''$,可满足快速定向的需要。

(3) 由于太阳视面也是正圆,且太阳质心与视面中心重合^[20],因此本文介绍的测月定向方法同样适用于测日定向。

参考文献:

[1] WEI Ziqing, HUANG Weibin, YANG Jiezhong, et al.

- Combined Adjustment of Nationwide Astro-geodetic and Space-geodetic Networks[J]. Acta Geodatica et Cartographia Sinica, 2000, 29(4): 284-286. (魏子卿, 黄维彬, 杨捷中, 等. 全国天文大地网与空间大地网联合平差[J]. 测绘学报, 2000, 29(4): 284-286.)
- [2] CHEN Junyong, YANG Yuanxi, WANG Ming, et al. Establishment of 2000 National Geodetic Control Network of China and It's Technological Progress[J]. Acta Geodatica et Cartographia Sinica, 2007, 36(1): 1-8. (陈俊勇, 杨元喜, 王敏, 等. 2000 国家大地控制网的构建和它的技术进步[J]. 测绘学报, 2007, 36(1): 1-8.)
- [3] ZHANG Hanwei, XU Houze, WANG Aisheng. The Basic Principle of Mensurating Astronomical Longitude, Latitude and Azimuth Angle[J]. Science of Surveying and Mapping, 2006, 31(4): 157-160. (张捍卫, 许厚泽, 王爱生. 天文经纬度和天文方位角测定的基本原理[J]. 测绘科学, 2006, 31(4): 157-160.)
- [4] WANG Anguo. Celestial Navigation Technique in the Background of Navigation War[J]. Progress in Astronomy, 2001, 19(2): 326-330. (王安国. 导航战背景下的天文导航技术[J]. 天文学进展, 2001, 19(2): 326-330.)
- [5] FANG Jiancheng, NING Xiaolin. Principle and Application of Celestial Navigation [M]. Beijing: Beihang University Press, 2006: 4-9. (房建成, 宁晓琳. 天文导航原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2006: 4-9.)
- [6] ZHANG Chao, ZHENG Yong, LI Changhui. Research of Astronomy Orientation by Using the Random Star[J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(4): 30-32. (张超, 郑勇, 李长会. 用任意星进行天文定向的研究[J]. 测绘科学, 2005, 30(4): 30-32.)
- [7] ZHANG Chao. System-level Development and Application Research on Astronomic Surveying System Based on Electronic Theodolites[D]. Zhengzhou: Information Engineering University, 2009: 151-155. (张超. 基于电子经纬仪的天文测量系统及应用研究[D]. 郑州: 信息工程大学, 2009: 151-155.)
- [8] XIA Yifei, JIN Wenjing. Impacts of the New Reference System on Astrometry[J]. Progress in Astronomy, 2004, 22(3): 200-207. (夏一飞, 金文敬. 新参考系的引入对天体测量学的影响[J]. 天文学进展, 2004, 22(3): 200-207.)
- [9] BANGERT J, PUATUA W, KAPLAN G, et al. User's Guide to NOVAS Version C3. 0[M]. Washington: USA Naval Observatory, 2009: 31-32.
- [10] OUYANG Ziyuan. Introduction to Lunar Science[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005: 223-225. (欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 223-225.)
- [11] CHEN Junyong, ZHANG Chuanyin, DANG Yamin. Lunar Spatial Exploration, Surveying and Mapping[J]. Acta Geodatica et Cartographia Sinica, 2005, 34(3): 191-192. (陈俊勇, 章传银, 党亚民. 月球航天探测和月球测绘[J]. 测绘学报, 2005, 34(3): 191-192.)
- [12] CHEN Junyong. Progress in Lunar Geodesy[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(3): 1-6. (陈俊勇. 月球大地测量学的进展[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(3): 1-6.)
- [13] KONG Xiangyuan, LI Jiancheng, GUO Jiming, et al. Determination of Gravitational Constants for Earth and Moon and Geometric Center and Mass Center of Moon [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(2): 109-114. (孔祥元, 李建成, 郭际明, 等. 地心和月心引力常数及月球形心与质心的确定[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(2): 109-114.)
- [14] XIA Zhiguo, ZHANG Chao, ZHENG Yong, et al. An Astronomical Azimuth Measurement System Aided with an Automatic Gyro Total Station[C]// Third International Symposium on Precision Mechanical Measurements: 2. Urumqi: The International Society for Optical Engineering, 2006: 1400-1405.
- [15] XU Qifeng. Space Geodesy[M]. Beijing: PLA Press, 2001: 18-23. (许其凤. 空间大地测量学[M]. 北京: 解放军出版社, 2001: 18-23.)
- [16] GANDER W, GOLUB G H, STREBEL R. Least-Square Fitting of Circles and Ellipses[J]. BIT Numerical Mathematics, 1994, 34(4): 558-578.
- [17] HUANG Weibin. Principles and Applications of the Contemporary Adjustment[M]. Beijing: PLA Press, 1992: 23-27. (黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1992: 23-27.)
- [18] AHN S J, RAUH W, WARNECKE H J. Least-squares Orthogonal Distances Fitting of Circle, Sphere, Ellipse, Hyperbola and Parabola[J]. Pattern Recognition, 2001, 34: 2283-2303.
- [19] State Bureau of Quality and Technical Supervision. GB/T 17943-2000 Specifications for the Geodetic Astronomy [S]. Beijing: Standards Press of China, 2000. (国家质量技术监督局. GB/T 17943-2000 大地天文测量规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2000)
- [20] ZHANG Chao, ZHENG Yong, MENG Fanyu. Realizing Astronomy Orientation Fast by Surveying the Sun[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2007, 24(5): 344-345. (张超, 郑勇, 孟凡玉. 利用测日实现快速天文定向[J]. 测绘科学技术学报, 2007, 24(5): 344-345.)

(责任编辑: 丛树平)

收稿日期: 2011-10-10

修回日期: 2011-11-27

第一作者简介: 詹银虎(1986—), 男, 硕士生, 研究方向为天文导航。

First author: ZHAN Yinhu (1986—), male, postgraduate, majors in celestial navigation.

E-mail: oscardad@163.com