

文章编号: 1000-8349(2005)02-0000-00

整体平差方法在 CCD 天体测量中的应用

于 涌, 李金岭, 唐正宏, 赵 铭

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 回顾了基于底片重叠观测的整体平差方法的发展历史和应用概况, 分析了该方法应用于底片资料处理没有取得预期效果的原因, 介绍了小视场 CCD 重叠观测的整体平差研究进展。分析与实测资料归算表明, 整体平差方法可以在 CCD 资料处理中充分发挥作用, 在保证长焦距、小底片比例尺的同时, 通过对 CCD 重叠观测的整体平差 (相当于扩大观测视场), 可覆盖更多的参考星, 进而达到改善局部参考架、提高归算结果精度的目的。

关键词: 天体测量学; 整体平差; 综述; 参考系

中图分类号: P123

文献标识码: A

1 引 言

自上世纪 19 世纪末起, 照相定位方法开始广泛应用于天体测量领域。这是一种相对测量技术, 其基本步骤如下: (1) 在视场范围内选定若干参考星, 其天球坐标已知; (2) 选用某种底片参数模型描述理想坐标 (天球坐标在底片平面上的投影) 与量度坐标 (星像测量坐标) 之间的关系, 并利用参考星的量度坐标和理想坐标确定模型参数; (3) 将参数模型应用于待测星, 根据待测星的量度坐标确定其理想坐标, 进而得到天球坐标。可见, 照相定位方法的参考基准是底片上参考星所构成的局部参考架, 而不是参考星表所有星所体现的全球参考架。

由于参考星的位置和量度坐标都存在误差, 由参考星归算得到的底片参数不可避免地也存在误差, 进而给待测星的归算位置带来系统性影响。即使对同一天区采用同样的参考星, 由于量度坐标误差的存在, 从不同底片归算得到的同一组待测星的位置之间仍然存在系统差异。应用整体平差方法的最初目的就是利用重叠观测的手段设法消除这种差异, 提高归算结果的均一性。此外, 由于统一处理所有观测资料, 相当于扩大视场, 增加参考星数目, 因此整体平差的另一个优点就是能够改善局部参考架, 降低归算结果的系统误差。

收稿日期: 2004-12-16; **修回日期:** 2005-01-18; **特约稿**

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (10333050、10173019、10473019); 中国科学院知识创新工程资助项目 (KJCX2-SW-T1)

本文第 2 节简单回顾了基于底片重叠观测的整体平差方法的发展历史和应用概况, 分析了该方法应用于重叠底片处理没有取得预期效果的原因; 第 3 节介绍了基于小视场 CCD 重叠观测的整体平差方法的研究进展; 最后简单分析了 CCD 整体平差方法的潜在应用研究课题。

2 底片整体平差方法

2.1 发展历史

1887~1920 年间, 多家天文台进行了一项庞大的国际合作观测计划, 即照相天图星表 (AC)。为了尽可能消除照相底片缺陷对观测结果的影响, 观测时采取了角对中心的重叠方式, 使每颗星平均出现在两张底片上。在 AC 底片的处理过程中, Donner^[1] 注意到不同底片归算结果之间存在着系统差异, 为此他初步提出了重叠底片一起归算的想法^[2], 并应用于 AC 星表 Helsingfors 区域的底片资料处理。Donner 认为, 通过底片重叠技术可使底片参数的形式误差缩减到原来的 1/4。但是, 由于涉及大量烦琐重复的计算, 在 AC 星表其它天区底片归算中并没有采用这项技术。后来, Lacroute^[3,4] 改进了 Donner 的方法, 即首先对每张底片分别进行单独归算, 然后将底片重叠区域内同一目标的不同归算结果取平均, 并将之重新运用于单底片归算, 重复以上过程直到收敛。

1960 年, Eichhorn^[5] 用理想坐标建立了整体平差的原理性方程:

$$\xi_{\nu} = \Xi_{\mu\nu} \alpha_{\nu}, \quad (1)$$

其中 ξ_{ν} 为第 ν 颗场星的理想坐标, $\Xi_{\mu\nu}$ 为该星在第 μ 张底片上的量度坐标, α_{μ} 为第 μ 张底片的模型参数。当第 ν 颗场星为参考星时, 则有

$$\xi_{\nu} = \xi_{\nu^0}. \quad (2)$$

其中 ξ_{ν^0} 由参考星的星表位置计算得到。联立 (1)、(2) 式, 通过最小二乘可解算出所有底片的模型参数和所有场星的理想坐标。Jefferys^[6] 指出, 上述方程组在 Gauss-Seidel 叠代解算过程中收敛极慢, 特别是当场星远多于参考星时, 需要涉及庞大矩阵的求逆运算, 这导致了 Eichhorn 和 Jefferys 应用上述方程组处理 AC 星表 Helsingfors 区域的重叠底片时未能取得成功。该方法将所有底片投影至同一个平面上, 所以不能应用于大天区重叠底片的整体平差处理。后来 Eichhorn^[7] 对上述方程组作了改进, 建立了基于球面坐标的整体平差公式, 将场星的天球坐标 (α, δ) 与底片模型参数一起作为整体平差的待求参数。然而, 这一方法对实际应用效果并没有显著改善。

1981 年, Stock^[8] 建立了球面整体平差公式, 即将底片上的星像投影至球面, 并通过旋转矩阵建立与该星天球赤道直角坐标的联系, 具体为

$$\begin{bmatrix} \xi_i \\ \eta_i \\ \zeta_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \alpha_{m3} \\ \alpha_{m4} & \alpha_{m5} & \alpha_{m6} \\ \alpha_{m7} & \alpha_{m8} & \alpha_{m9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{mi} \\ v_{mi} \\ w_{mi} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 (ξ_i, η_i, ζ_i) 为第 i 颗星的天球赤道直角坐标; $[\alpha]$ 为第张底片所对应的旋转矩阵, 其元素可表示成底片切点的天球坐标以及量度坐标系轴与赤经增加方向 (或 y 轴与赤纬增加方向) 夹

角的函数; (u_{mi}, v_{mi}, w_{mi}) 根据第张底片上该星的量度坐标 (x_{mi}, y_{mi}) 和望远镜的焦距 F 通过下式计算得到:

$$\begin{cases} u_{mi} = x_{mi} \cos r \\ v_{mi} = y_{mi} \cos r \\ w_{mi} = F \cos r \end{cases}, \quad (4)$$

这里

$$r = \arctan \left(\frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{F} \right). \quad (5)$$

如果一颗星出现在第 m 和第 n 张底片上, 则可建立如下联系方程:

$$\begin{bmatrix} \alpha_{m1} & \alpha_{m2} & \alpha_{m3} \\ \alpha_{m4} & \alpha_{m5} & \alpha_{m6} \\ \alpha_{m7} & \alpha_{m8} & \alpha_{m9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{mi} \\ v_{mi} \\ w_{mi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} \\ \alpha_{n4} & \alpha_{n5} & \alpha_{n6} \\ \alpha_{n7} & \alpha_{n8} & \alpha_{n9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ni} \\ v_{ni} \\ w_{ni} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

联立 (3)、(6) 两式, 通过最小二乘方法可解出每张底片的矩阵 $[\alpha]$ 。Stock 建立的方程虽然形式简单, 但是仍然存在如下问题。首先, 无法准确判断切点在底片上的位置; 其次, 不能由旋转矩阵 $[\alpha]$ 完整描述底片复杂的成像规律。如果不将正交性强加于矩阵 $[\alpha]$, 即把 $[\alpha]$ 视作转换矩阵而非旋转矩阵, 则虽然可以吸收一些复杂的畸变项, 但实际上也只等效于一个特殊的三次项底片模型; 再者, 底片的星等差无法被矩阵 $[\alpha]$ 吸收。因此 Stock 方法不具有普适性。

2.2 应用效果与分析

自从 Eichhorn 给出整体平差原理性方程以后, 诸多天体测量学家就重叠照相底片的整体平差处理开展了许多分析工作。Googe^[9] 实现了整体平差方程中底片模型参数和场星位置的分离求解, 大大减少了法方程系数矩阵求逆的运算量。de Vegt 和 Ebner^[10] 基于当时的计算机条件, 发表了实现整体平差的程序算法。之后, Von der Heide^[11] 按此算法编写了计算机程序。Von der Heide^[12~15] 还从理论上分析了利用整体平差方法所可能获得的目标定位精度。

但是一直以来, 整体平差应用于重叠底片的处理并没有得到预期效果。Eichhorn 和 Gatewood^[16] 对 AC 星表 Northern Hyderabad 区域底片的重新归算, 以及 Führmann^[17] 对 AGK2 底片资料的处理等工作都表明, 相比于单底片归算, 整体平差在模型参数的解算精度上并没有提高, 相反却明显增加了计算量。究其原因, 我们认为主要体现在如下两点:

(1) 天体测量用的照相望远镜视场一般较大, 从几平方度到 100 平方度, 虽然在望远镜镜片制造时已经考虑了尽可能消除各种像差, 但由于镜面加工、机械支撑等各种复杂因素, 在望远镜焦面处的接收终端上, 成像规律极其复杂, 只有在光轴附近才可能实现线性成像, 偏离光轴越远则成像规律越复杂。这导致在当时的参考星表条件下不可能获得适用于整张底片的高精度的底片参数模型。

(2) 视场边缘的星像除了由光学系统缺陷可能产生的像差外, 还存在由跟踪误差 (与星像纬度有关)、较差折射 (与天顶距有关) 和较差光行差 (与赤经、赤纬及观测季节有关) 等因素引起的误差。像差本身与星像的中心距及星等也有关。因此, 底片边缘的星像误差非常复杂, 这也是过去单张照相底片归算时, 常常只利用底片中心区域资料的主要原因。上述误差因素导致了整张底片量度坐标质量的不统一且难以把握, 进而影响了底片常数的解算精度。

总之, 由于照相底片的先天不足, 很难保证底片模型的准确性和参数的解算精度。而整体平差的归算结果依赖于所有底片模型的完备情况, 此模型不完善则必将给最终结果带来系统性影响。Eichhorn 和 Jefferys^[18] 提到, 利用整体平差方法处理 AC 星表 Hyderabad 区域的重叠底片时, 由于没有正确考虑星等差项, 归算得到的底片参数其精度甚至不如单底片归算结果。de Vegt^[19] 认为, 在处理 AGK2-3 的 Strasbourg 底片资料时, 归算模型中引入的星等差项不但没有消除系统差, 反而将系统差带入了归算结果。de Vegt^[20] 分析指出, 尽管应用整体平差方法在理论上可以获得比单底片解更均匀的结果, 但是成功进行整体平差的基础是完美的单底片解, 因为只有这样才能充分把握各底片的成像规律。事实上, 完美的单底片解既需要高精度、高密度的参考星表, 又要求对底片量度坐标质量的准确把握。在早期处理照相底片的年代, 这两个条件都无法满足, 这也是为什么整体平差在理论上有很大优势, 但在实际底片处理中却很少应用的主要原因。

1984 年, Zacharias 开始了有关底片的整体平差研究工作, 并计划利用整体平差处理 CPC2 重叠底片观测^[21]。他通过模拟试算发现, 在 Hipparcos 参考星表条件下, 整体平差结果的精度相比于单底片归算方法并没有显著提高。故此, 1999 年出版的 CPC2 星表^[22] 仍然是基于 Hipparcos 参考星表的单底片归算结果。应该指出的是, Zacharias 在模拟试算中, 假设底片上的星像严格遵循心射切面投影关系, 并忽略了大气折射和共同星自行的影响, 因而模拟数据的产生过于理想化。如 Zacharias^[23] 在分析 CPC2 底片系统差时曾指出, 由于滤光片的非均匀性以及底片暗室处理技术的限制, CPC2 底片普遍存在着复杂的场畸变 (FDP)。图 1 所示的是 CPC2 底片的场畸变情况, 其中最大畸变量约为 160 mas, 平均为 57 mas。畸变产生的原因很复杂, 不同底片的畸变变化规律难以把握, 所以成功进行整体平差之前需要对所有

图 1 CPC2 底片的视场畸变情况^[23]

底片逐张分析, 否则将直接影响到整体平差的精度。这项工作不仅需要大量的时间、精力, 而且还受参考星表的限制。显然, CPC2 星表没有采用整体平差方法也是可以理解的。

3 小视场 CCD 整体平差

3.1 小视场 CCD 整体平差的提出

自 20 世纪 80 年代起, CCD 得到了广泛应用并逐渐取代照相底片。与照相底片相比, CCD 具有量子效率高、线性响应性能好和能够实时处理等优点。但 CCD 的一般尺寸仅 2~5 cm, 对于长焦距望远镜, 其视场只有百分之几平方度, 以致于视场内所含参考星通常很有限。由于参考星位置误差的存在, 由数量不多、分布范围狭小的参考星构成的局部参考架相对于全球参考架存在平移、旋转和扭曲等形式复杂的系统偏差。因而由此得到的目标定位结果的合理性受到局限, 具体体现在以下几个方面:

(1) 当 CCD 用于加密星表时, 单幅 CCD 归算提供的加密星表其系统缺乏全局一致性和系统均匀性, 它们如同一个个独立的“补丁”覆盖着天区。这样得到的加密星表在理论上显然存在缺陷。如果用这种加密星表再作为其他照相测量参考星表, 误差必将传至归算结果中。

(2) 当 CCD 用于建立恒星参考架和射电参考架的连接时, 因为通过单幅 CCD 上的参考星给各射电源进行定位, 相当于将射电源分别联系到一个个局部 (CCD) 恒星参考架上, 这样得到的连接实际上并不是整个射电源框架与全球恒星框架之间的联系。类似可知, 对于恒星参考架与动力学参考架之间的连接, 情况也一样。

(3) 当 CCD 用于恒星自行测量时, 由于待测量非常小, 局部参考架的缺陷对测量结果的影响可能更加严重。

(4) 当 CCD 用于研究某些天体系统 (例如大行星及其卫星系统、疏散星团) 时, 局部的 CCD 参考架的系统偏差将会给系统成员带来不正确的位置关系和虚假的运动信息, 从而直接影响它们的运动学研究结果。

另外, 更为严重的是, 有时在狭小的 CCD 视场内甚至找不到足够数量的参考星, 以致无法进行准确定位, 这也限制了小视场 CCD 在天文观测研究中的应用。

针对上述问题, 可能存在如下解决方案:

(1) 降低参考星的精度标准, 在二级参考星表中寻找替代星。当然, 二级参考星的引入必然会影响待测目标的定位精度。

(2) 使用大视场短焦距望远镜, 以增加所覆盖的参考星数目。但是短焦距望远镜的底片比例尺通常很大, 以致分辨率显著降低, 不利于星像的精确定位。

(3) 采用小视场重叠观测方法, 并对观测资料作整体平差处理。对于长焦距望远镜, 小尺寸 CCD 接收终端只取望远镜视场中央区域, 量度坐标的模式比较简单且稳定。另外, CCD 线性响应性能好, 通常不受星等差的影响。因此只需采用简单的多项式模型就可以很好地描述 CCD 成像规律。以国家天文台 2.16 m 望远镜的 CCD 观测为例, 图 2 是其单幅底片归算后参考星的残差情况。该望远镜焦距约为 13 m, CCD 视场约为 $10' \times 10'$ 。由图可见, 参考星残差几乎没有系统趋势, 这预示着 CCD 成像比照相底片有显著改善, 满足整体平差的“完美”单底片解”要求, 因此可以采用整体平差方法对小视场 CCD 资料进行处理。小视场 CCD 经

过拼接后可以覆盖较大观测天区, 这既保持了它在成像方面的各项优点, 又有利于提高参考星数, 进而有望提高照相天体测量的精度。

图 2 小视场 CCD 观测参考星的残差情况

3.2 CCD 整体平差原理的矢量表示

不同于以往学者的研究, 我们在矢量天体测量学的基础上, 根据 “共同星在参考历元平位置相等” 的原则, 推导了 CCD 整体平差的严格矢量表达式 [24]。该方程形式简单, 便于理解和计算机编程, 具体如下:

$$\begin{aligned}
 & [PN]_2 \left[\ddot{\mathbf{W}}_{s2} K_2 \begin{bmatrix} H(x_2, y_2; b_1 + \Delta b_1, \dots, b_n + \Delta b_n) \\ I(x_2, y_2; b_1 + \Delta b_1, \dots, b_n + \Delta b_n) \\ 1 \end{bmatrix} - \overleftarrow{T}'_2 \Delta \rho_2 \right] + \overleftarrow{T}'_0 \Delta \rho_{pm2} \\
 & = [PN]_1 \left[\ddot{\mathbf{W}}_{s1} K_1 \begin{bmatrix} H(x_1, y_1; a_1 + \Delta a_1, \dots, a_n + \Delta a_n) \\ I(x_1, y_1; a_1 + \Delta a_1, \dots, a_n + \Delta a_n) \\ 1 \end{bmatrix} - \overleftarrow{T}'_2 \Delta \rho_2 \right] + \overleftarrow{T}'_0 \Delta \rho_{pm2}, \quad (7)
 \end{aligned}$$

其中, H 、 I 为底片参数模型表达式, $a_1 \dots a_n$ 、 $b_1 \dots b_n$ 为两次观测的底片参数初值, $\Delta a_1 \dots \Delta a_n$ 、 $\Delta b_1 \dots \Delta b_n$ 为底片参数初值的改正值, (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) 为共同星在各自 CCD 观测图像上的量度坐标, $[PN]_1$ 和 $[PN]_2$ 是从瞬时真位置至参考历元平位置的岁差章动转换矩阵, $\ddot{\mathbf{W}}_{s1}$ 和 $\ddot{\mathbf{W}}_{s2}$ 为两次观测的切平面上理想坐标系至赤道坐标系的转换矩阵, K_1 、 K_2 为归一化系数, \overleftarrow{T}'_1 和 \overleftarrow{T}'_2 为瞬时真赤道坐标系三元基, \overleftarrow{T}'_0 为历元平赤道坐标系三元基, $\Delta \rho_1$ 和 $\Delta \rho_2$ 为影响天体方向的各项改正之和, $\Delta \rho_{pm1}$ 和 $\Delta \rho_{pm2}$ 为自行改正。

通过共同星的约束方程将所有重叠 CCD 图像拼接成一张大幅 “CCD 折面”, 然后利用整个观测天区内的参考星给出该折面的空间定向, 即底片常数, 最后得到目标星的待测位置。

3.3 具体实现中若干问题的分析

为了成功实现 CCD 整体平差, 必须合理解决下述几个方面的问题。

首先, 与基于重叠底片观测的整体平差不同, 由于 CCD 视场很小, 通常单幅 CCD 视场内参考星稀少甚至没有, 以致无法对所有 CCD 图像都进行单底片归算。在此情况下, 许多 CCD 图像的底片模式不再由参考星决定, 而是由共同星决定, 这就要求重叠区域的底片参数应该很好地代表整幅 CCD 图像。不难理解, 若底片参数模型为线性模型, 其外推性显然优于非线性模型。但是由于视场畸变、CCD 倾斜于望远镜焦平面, 或者归算时切点采用值过分偏离真值等因素的存在, CCD 成像模型有时是非线性的。因此整体平差之前需要对 CCD 成像模型的特性有所认识, 并且利用小视场 CCD 量度坐标模式稳定的优点, 对非线性模式的观测资料进行预先修正。

其次, CCD 图像记录了观测时刻天体之间的相对位置。由于受较差大气、较差光行差等因素的影响, 天体之间的相对位置会发生改变, 如何确保星像理想坐标和量度坐标之间具有简单且稳定的关系, 是成功实现整体平差的关键问题之一。以大气折射为例, 根据理论公式对所有星像的理想坐标进行大气折射改正。虽然理论公式中的折射系数有误差 (约 $0.2''$), 但是它在 CCD 小视场内 ($10' \times 10'$) 的较差量 (毫角秒量级) 可以完全忽略。因而考虑这些因素的理论改正, 可以使每幅 CCD 图像上星像的理想坐标之间具有较为真实的相对位置关系, 这大大简化了底片模式。

根据 (7) 式可知, 对于连续观测, 即相邻 CCD 之间的观测历元间隔很短 (小于 1 个月), 其共同星的自行较差量可以忽略。但在有些情况下, 不得不处理时间间隔长达一年甚至多年的观测, 此时自行不能被忽略, 否则经过底片重叠归算后将导致错误的结果。若这时满足要求的共同星数目过少, 不足以准确约束重叠底片模型间的关系, 将导致重叠归算失败。这种情况下, 我们建议到二级参考星表中寻找具有自行数据的共同星。虽然这些共同星的自行不精确, 但由于其误差通常比自行本身小一个数量级, 因而在用于约束两张重叠底片参数之间的联系时, 显然要比完全不用这些共同星更为可取。

另外, 利用整体平差方法处理 CCD 重叠观测时, 待求参数为所有参与归算的 CCD 图像的底片常数。由于每张 CCD 图像只与相邻的 CCD 图像通过共同星方程建立联系, 因此整体平差的法方程系数矩阵为一稀疏型矩阵。如果观测资料庞大, 那么直接对系数矩阵求逆将非常耗时, 甚至由于计算机内存限制而不可实现, 此时需要运用有针对性的矩阵求逆方法, 即稀疏矩阵技术。

3.4 CCD 整体平差的实现及初步应用

我们根据 CCD 整体平差的矢量表达式编写了 FORTRAN 语言的实现程序, 包括数据收集、预处理、平差与结果输出 3 个步骤, 并将该方法初步应用于实测资料的处理。

2004 年, 我们利用国家天文台兴隆观测基地 2.16 m 望远镜获得了 4 颗河外射电源以及 Stone 标准天区 [25] 的观测资料。该望远镜所备 CCD 的视场为 $1^\circ \times 1^\circ$, 像素尺寸为 2048×2048 , 像素比例尺为每像素 0.015 mm。通过对标准天区观测资料的单底片归算, 我们首先确定出该 CCD 最佳成像模型为 8 参数模型, 其形式如下:

$$\begin{cases} \xi = ax + by + c + px^2 + qxy \\ \eta = a'x + b'y + c' + pxy + qy^2 \end{cases} \quad (8)$$

由于非线性因素的存在, 底片参数在稀疏参考星条件下不能合理外推, 因此整体平差之前需要借助标准天区观测资料的归算结果对非线性项进行改正^[24]。图 3 示出改正前后采用线性模型归算时参考星的残差分布情况。为了仔细考察非线性特征, 图 3 为 20 张 CCD 图像叠加在一起的结果。从图 3(a) 可见, 非线性因素的存在使得所有 CCD 图像上的参考星残差分布具有显著且统一的系统趋势, 而图 3(b) 中的参考星残差则表现为随机分布, 表明此处的非线性改正合理的, 亦即上述 8 参数模型对于 2.16 m 望远镜的 CCD 观测是适用的。

图 3 进行非线性项改正前后利用线性模型归算参考星的残差分布
(a) 改正前; (b) 改正后。

图 4 河外射电源的重叠观测模式示意图

其中“*”表示目标源。(a) 对应 1252+119、1307+121 和 1743+173; (b) 对应 1749+096。

图 4 为河外射电源的重叠观测模式, 其中对 1252+119、1307+121 和 1743+173 目标源分别观测了 5 个小天区, 对 1749+096 观测了 13 个小天区。每颗源的观测都是在一天之内连续进行的, 因此共同星的自行影响可以忽略。河外射电源的光学定位结果见表 1, 其中“ N_r ”为 UCAC2^[26] 参考星的数目, “ N_c ”为相邻 CCD 观测重叠区域内共同星的平均数目, “ $\Delta\alpha \cos \delta$ ”和“ $\Delta\delta$ ”均为光学—射电位置差。为了便于比较, 表 1 同时列出了单底片归算结果。待测目标的归算位置误差主要取决于量度误差和底片常数误差。由于单底片归算和整体平差归算都使用相同的量度坐标, 因此两种归算所得归算位置误差的差异主要取决于模型参数的解算误差。如表 1 所示, 整体平差扩大了观测天区的覆盖范围, 增加了参考星的数量, 同时也发挥了共同星的作用, 因此可显著提高模型参数的解算精度, 进而使得整体平差结果的精度好于单底片归算。另外, 从参考架的连接角度考虑, 利用更多的参考星对河外射电源进行定位, 可以降低参考星个别误差对归算结果的影响, 有利于提高光学与射电参考架之间的连接精度。

表 1 4 颗河外射电源的光学位置结果

目标	整体平差				单底片归算			
	$\alpha/(\text{h m s})$	$\delta/(\text{° ' ''})$	N_c	N_r	$\alpha/(\text{h m s})$	$\delta/(\text{° ' ''})$	N_r	
	σ_α/mas	σ_δ/mas			σ_α/mas	σ_δ/mas		
	$(\Delta\alpha \cos \delta)/\text{mas}$	$\Delta\delta/\text{mas}$			$(\Delta\alpha \cos \delta)/\text{mas}$	$\Delta\delta/\text{mas}$		
1252+119	12 54 38.2551	11 41 05.868	6	15	12 54 38.2582	11 41 05.854	6	
	± 17	± 17			± 37	± 28		
	-7	-27			38	-41		
1307+121	13 09 33.9320	11 54 24.563	5	25	13 09 33.9331	11 54 24.563	5	
	± 22	± 22			± 43	± 43		
	-6	11			10	11		
1743+173	17 45 35.2094	17 20 01.411	42	149	17 45 35.2083	17 20 01.395	17	
	± 11	± 14			± 30	± 31		
	17	-12			2	-28		
1749+096	17 51 32.8182	09 39 00.770	25	409	17 51 32.8189	09 39 00.760	28	
	± 10	± 11			± 14	± 15		
	-5	42			4	32		

4 结 束 语

本文回顾了基于天文底片观测整体平差的发展历史和应用概况, 分析了过去整体平差应用于重叠底片处理没有取得预期效果的原因。我们认为, 照相底片成像规律的复杂性和量度坐标质量的不统一, 造成了整体平差相比于单底片归算其结果并没有显著提高, 有时甚至不如单底片归算结果。

自上世纪 80 年代起, CCD 逐渐取代照相底片。对于长焦距望远镜, 小尺寸 CCD 接收终端只取望远镜视场中央区域, 量度坐标模式简单且稳定, 因此其成像比照相底片有显著改善,

这预示着整体平差可以在 CCD 资料处理中充分发挥作用。小视场 CCD 经过拼接可以覆盖较大的观测天区, 这既保持了它在成像方面的各项优点又有利于提高参考星数, 进而有望提高照相天体测量的精度。我们系统地进行了 CCD 整体平差的分析工作, 包括 CCD 整体平差矢量表达式的推导、FORTRAN 语言实现程序的编制、具体实现中若干问题分析等, 并将该方法初步应用于实测资料的处理。结果表明, 通过对多幅小视场 CCD 观测的整体平差处理, 可以在保证长焦距望远镜小底片比例尺优势的同时, 实现扩大观测天区覆盖范围、增加参考星数量, 进而达到改善局部参考架的目的。可以预见, CCD 整体平差在参考系连接、恒星参考架加密、行星系统或星团成员位置与运动关系的测定等研究课题中将具有巨大的应用潜力。

参考文献:

- [1] Donner A. *Acta Soc. Scient. Fenn.*, 1896, 21(8): 53
- [2] Donner A, Furuholm R. *Catalogue Photographique du ciel. Zone de Helsingfors*, 1929, I/1: 52
- [3] Lacroute P. *Ann. Obs. Strasbourg*, 1964, 6: 97
- [4] Lacroute P. *Ann. Obs. Strasbourg*, 1964, 6: 113
- [5] Eichhorn H. *Astron. Nachr.*, 1960, 285: 233
- [6] Jefferys W H. *AJ*, 1963, 68: 111
- [7] Eichhorn H. *Ann. d. Univ. Sternwarte Wien*, 1971, 30: 5
- [8] Stock J. *Rev. Mex. Astron. Astrofis.*, 1981, 6: 115
- [9] Googe W D. *AJ*, 1967, 72: 623
- [10] de Vegt C, Ebner H. *MNRAS*, 1974, 167: 169
- [11] Von der Heide K. *A&AS*, 1978, 32: 141
- [12] Von der Heide K. *A&A*, 1977, 61: 545
- [13] Von der Heide K. *A&A*, 1977, 61: 553
- [14] Von der Heide K. *A&A*, 1979, 72: 324
- [15] Von der Heide K. *Mitt. d. Astron. Ges.*, 1980, 48: 150
- [16] Eichhorn H, Gatewood G D. *AJ*, 1967, 72: 1191
- [17] FÜhrmann U. *Neureduktion des AGK2-Sternkataloges und Untersuchung der systematischen Fehler mit Hilfe von Blockausgleichungsverfahren*, Dissertation Universität Hamburg, 1979
- [18] Eichhorn H, Jefferys W H. In: Ianna P A ed. *Proc. of the Fourth Astrometric Conference*, No. 16, Virginia: Leander McCormick Obs., 1971: 267
- [19] de Vegt C. *A&A*, 1975, 43: 303
- [20] de Vegt C. *Ap&SS*, 1991, 177: 3
- [21] Zacharias N. *A&A*, 1992, 264: 196
- [22] Zacharias N, Zacharias M I, de Vegt C. *AJ*, 1999, 117: 2895
- [23] Zacharias N. *AJ*, 1995, 109: 1880
- [24] Yu Y, Tang Z H, Li J L *et al.* *AJ*, 2004, 128: 911
- [25] Stone R C, Jeffrey R, Monet D G. *AJ*, 1999, 118: 2488
- [26] Zacharias N. *AJ*, 2004, 127: 3043

Progress of the Block Adjustment of Overlapping Plates in CCD Astrometry

YU Yong, LI Jin-ling, TANG Zheng-hong, ZHAO Ming

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China)

Abstract: The history and application of the block adjustment (BA) in the reduction of overlapping photographic plates are reviewed in this paper. The reasons that the anticipated results have not been obtained by this method are analyzed. The new progress in the BA of overlapping CCD frames with small field of view is introduced. Investigation and reduction of CCD frames show that BA can play an important role in the reduction of overlapping CCD frames. In the case of long focal length of telescope and small plate scale, the BA of overlapping CCD frames can enlarge the field of view, cover more reference stars, and consequently improve the local reference frame and the precision of reduction results.

Key words: astrometry; block adjustment; review; reference systems