

VLBI 归心测量中的空间拟合

刘光明^{1,2}, 马金辉¹, 唐颖哲²

(1. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 西安测绘研究所, 陕西 西安 710054)

Fit Method in Determination of Space Coordinate Differences of VLBI Sites

LIU Guangming, MA Jinhui, TANG Yingzhe

摘要: 简要介绍 VLBI 归心测量的实施步骤, 并较系统地推导有关的空间曲线、空间直线和空间平面等空间拟合公式。在 VLBI 归心测量的 GPS 控制点测量方面, 提出联合陆态网基准站和全球 IGS 站的协方差阵, 统一平差解算控制点在 ITRF 框架下的坐标的方法, 并指出这种方法更适用于 VLBI 归心测量。

关键词: VLBI; 归心测量; 控制点; 拟合

一、引言

甚长基线干涉测量(very long baseline interferometry, VLBI)、卫星激光测距(satellite laser ranging, SLR)和 GPS 技术在国际地球参考框架的建立、维持以及地壳构造运动监测中各有特色、优势互补、相互依赖、相互检核。虽然协议地球参考系的定义是确定的, 但由于观测技术的不同和观测数据分析处理中所采用的模型、常数系统和分析处理方法的不同, 会导致出现不同的地球参考框架, 它们的原点、尺度和定向等存在一定的系统差。要比较两个不同的参考框架或对它们进行综合时, 由于各参考框架之间存在系统性偏差, 不能直接进行比较和综合, 因此必须先把它们变换到同一系统中。

本地连接参数, 是并址台站中不同技术、不同观测仪器下参考点在全球框架中的地心坐标, 及参考点之间的坐标差。它是实现多技术观测资料综合的基本输入量。毫米级本地连接参数的建立, 保证了多种技术观测的综合、比对和检核, 保证了 ITRF、EOP 等高精度综合解的生成, 并有助于分析判别不同技术测量结果之间可能存在的系统差异。然而, 我国并址测站多年来一直缺少高精度本地连接参数, 同时, 我国并址测站的本地连接测量的精度较低, 并且缺少及时的复测。

建立我国 GPS 与 VLBI、SLR 并址台站间毫米级的本地连接参数, 需要解决的关键问题是 VLBI、SLR 设备的参考点的高精度动态确定。这些设备的参考点一般指固定轴与移动轴所在平面的交点, 设备的具体构造情况各异, 参考点通常不可视, 需要

依据具体情况设计测量方案。另外, 高精度的本地连接参数需要周期性复测, 需要及时跟踪参数的可能变化。有地震等突发性事件或者仪器更新、维修等情况时, 需要重新测量。

二、控制点 GPS 测量

目前最常用的方法是 GPS 测量, 即利用周围若干个高等级 GPS 控制点(如上海 SHAO 基准站以及 XIAM、WHJF、ZHNZ、TAIN、DAEJ 等基准站)与待测点进行差分 GPS 静态测量。这种方法用于高精度的 VLBI 归心测量并不是很恰当。原因如下:

- 1) 这些基准站观测时间较短(一般为 10 a), 其精度不理想。
- 2) 这些基准站的时间序列不稳定, 存在由地质原因或人为干扰造成的坐标突变。
- 3) 这些基准站没有发布权威的 ITRF 参考框架坐标。
- 4) 虽然上海 SHAO 基准站是 IGS 核心站, 但只有一个 IGS 核心站不能提供可靠的旋转约束。而且, 由于没有其他 IGS 核心站参与解算, 一旦该站出现粗差就会污染归心结果。

鉴于以上原因, 本文提出了联合陆态网基准站和全球 IGS 站的协方差阵, 统一平差解算控制点在 ITRF 框架下的坐标的方法^[1], 这种方法更适用于 VLBI 归心测量。

1) 产生单日区域松弛解。利用 GAMIT 软件联合解算我国陆态网 30 个基准站以及中国周边 14 个 IGS 跟踪站的坐标和卫星轨道。得到测站坐标、极移和卫星参数的单日松弛解及协方差矩阵。这些

收稿日期: 2010-12-21

作者简介: 刘光明(1976—), 男, 陕西西安人, 工程师, 主要研究方向为空间大地测量。

基准站中的上海、乌鲁木齐、拉萨属于 IGS 核心站; 武汉、北京房山属于 IGS 站。

2) 产生全球的单日松弛解。为了取得与 ITRF 参考框架的联系, 利用 GLOBK 将 GAMIT 处理得到的单日松弛解和 SOPAC (Scripps Orbital and Permanent Array Center) 给出的全球 IGS 站的 3 个单日松弛解合并, 得到一个包含全球 IGS 站和我国陆态网基准站的单日松弛解。合并得到的单日松弛解同样给出了测站坐标、极移和卫星参数的松弛解和协方差矩阵。

3) 选择用于实现参考框架转换的参考站。1997 年 8 月在美国喷气推进实验室 (JPL) 举行的工作会议上, 由 52 个 IGS 核心站组成的参考框架被 IGS 的所有数据处理中心接受。IERS 的 ITRF 部门同各分析中心协作仔细检查了这 52 个站, 最后确定其中的 47 个为今后 IGS 数据处理中心的基准站。

4) 得到 ITRF 参考框架下的单日坐标解。以全球单日松弛解作为准观测值, 并利用 GLOBK 通过七参数的相似变换得到 ITRF 参考框架下的单日坐标解。以国际地球自转服务局 (IERS) 公布的 ITRF 值为先验值, 7 个相似变换参数由 47 个 IGS 核心站求得。所求控制点的参考框架由这 47 个 IGS 核心站的参考框架决定。因为 IGS 核心站的准观测值是无基准解的, 所以 7 个相似变换参数有时段性, 在复测时需要重新计算。

通过控制点的 GPS 测量, 得到了控制点在指定 ITRF 参考框架下的坐标。但是 GPS 测量的相对精度比全站仪、水准仪要低, 尤其在高程分量上精度更低。因此, 笔者拟采用全站仪、水准仪在控制点之间测边、测角、测高差作为约束条件, 与 GPS 观测值进行加权平差, 进一步改进控制点坐标^[2]。

三、VLBI 归心测量方法^[3]

1) 方位轴估计。如图 1 所示, 在 VLBI 天线的一侧安装 4 个标志, VLBI 绕方位轴旋转, 每旋转 15°, 3 个控制点上的全站仪对每一个标志观测水平角和垂直角, 得到标志点的坐标。当天线旋转一周时, 就测定了天线上 4 个标志位于水平面内的 4 个圆轨迹, 每个圆分别由 24 个离散点构成。用圆方程拟合一个圆轨迹上的离散点, 可以得出以天线的竖直旋转轴为中心的一个圆, 圆心和圆所在平面法线就确定了天线的方位轴直线方程。将 4 个圆得到的 4 条方位轴用最小二乘法进行空间直线拟合, 就得到了方位轴的估值。

2) 俯仰轴估计。在 VLBI 天线的边缘安装 4 个标志, 固定方位轴, 天线绕俯仰轴旋转, 每旋转 10°

测得一组坐标。当天线旋转 90° 时, 就测得了每一个标志由 9 个离散点构成的、位于竖直面内的轨迹, 用与步骤 1) 相同的方法可以拟合出俯仰轴的位置。

3) 水平面估计。方位角以 90° 间隔转动, 重复步骤 2), 可以得到 4 条俯仰轴。由于观测误差的存在, 这 4 条俯仰轴可能不在一个平面上。相邻两条俯仰轴, 无论其平行、相交或者不共面, 都可确定一个与这两条俯仰轴最接近的空间平面。4 条俯仰轴可得到 4 个水平面。

4) 参考点和轴线偏差估计。方位轴与 4 个水平面交点的重心就是所求参考点, 参考点到 4 个俯仰轴的平均距离就是轴线偏差。

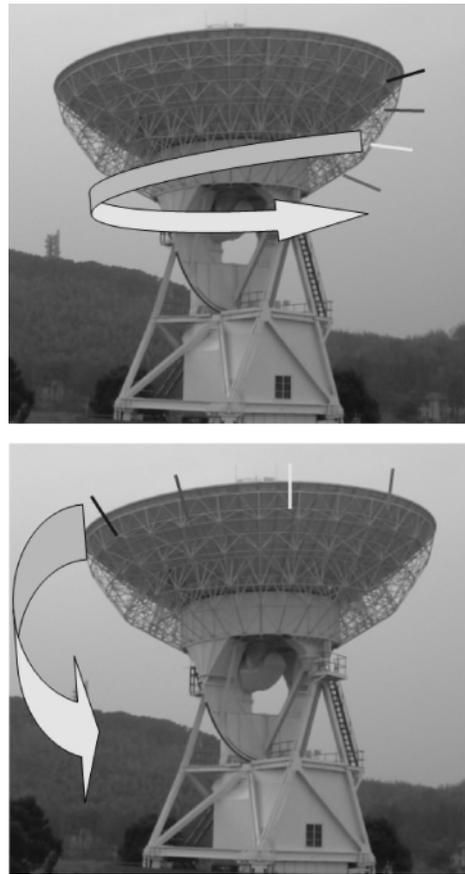


图 1

四、空间拟合

1) 由观测的一组空间圆轨迹离散点坐标 (x_i, y_i, z_i) , 求过圆心 (x_0, y_0, z_0) 的法线方程。设这些离散点所在平面方程为

$$Ax + By + Cz + D = 0 \quad (1)$$

这是一个多元线性回归问题^[4], 可以通过最小二乘法求出该平面的参数 A, B, C, D , 确定该平面。误差方程为

$$v_i = Ax_i + By_i + Cz_i + D \quad (2)$$

而圆的曲线方程是球面与平面的交线^[5]

$$\left. \begin{aligned} r^2 &= (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \\ Ax + By + Cz + D &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

则该圆曲线在平面 $Ax + By + Cz + D = 0$ 上的方程为

$$r^2 = \left(\frac{B(y-y_0) + C(z-z_0) + D}{A} \right)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2 \quad (4)$$

这是一个一元曲线回归问题,再次利用最小二乘法求出该圆曲线的参数:半径 r 和圆心的坐标 (x_0, y_0, z_0) 。

误差方程为

$$v_i = \left(\frac{B(y_i - y_0) + C(z_i - z_0) + D}{A} \right)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2 - r^2 \quad (5)$$

则过圆心的法线方程为

$$\frac{x-x_0}{A} = \frac{y-y_0}{B} = \frac{z-z_0}{C} \quad (6)$$

将其用方向余弦形式表示为

$$\frac{x-x_0}{\cos \alpha} = \frac{y-y_0}{\cos \beta} = \frac{z-z_0}{\cos \gamma} \quad (7)$$

这就是由一组空间圆轨迹坐标拟合方位轴或俯仰轴空间直线方程的方法。

2) 由一组非常接近的空间直线

$$\frac{x-x_i}{\cos \alpha_i} = \frac{y-y_i}{\cos \beta_i} = \frac{z-z_i}{\cos \gamma_i}$$

利用最小二乘法拟合出一条空间直线

$$\left. \begin{aligned} \frac{x-x'}{\cos \alpha'} = \frac{y-y'}{\cos \beta'} = \frac{z-z'}{\cos \gamma'} \\ \cos \alpha'^2 + \cos \beta'^2 + \cos \gamma'^2 = 1 \end{aligned} \right\}$$

根据空间直线的夹角公式,可得每条已知直线与待估直线夹角余弦 $\cos \varphi_i$ 表示如下

$$\cos \varphi_i = \cos \alpha_i \cos \alpha' + \cos \beta_i \cos \beta' + \cos \gamma_i \sqrt{1 - \cos \alpha'^2 - \cos \beta'^2} \quad (8)$$

利用最小二乘法求出待估直线的方向参数 $(\cos \alpha', \cos \beta', \cos \gamma')$ 。

误差方程为

$$v_i = \arccos (\cos \alpha_i \cos \alpha' + \cos \beta_i \cos \beta' + \cos \gamma_i \sqrt{1 - \cos \alpha'^2 - \cos \beta'^2}) \quad (9)$$

在这个过程中,要注意已知直线之间方向相反的情况。

根据空间直线间的距离公式,可得每条已知直线与待估直线间的距离 d_i 表示如下

$$d_i = \frac{|a_i(x_i - x') + b_i(y_i - y') + c_i(z_i - z')|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}} \quad (10)$$

式中,

$$(a_i \ b_i \ c_i) = (\cos \alpha_i \ \cos \beta_i \ \cos \gamma_i)^T \times (\cos \alpha' \ \cos \beta' \ \cos \gamma')$$

利用最小二乘法求出待估直线的参数 (x', y', z') 。

误差方程为

$$v_i = \frac{|a_i(x_i - x') + b_i(y_i - y') + c_i(z_i - z')|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}} \quad (11)$$

至此 就拟合出空间直线

$$\frac{x-x'}{\cos \alpha'} = \frac{y-y'}{\cos \beta'} = \frac{z-z'}{\cos \gamma'}$$

3) 由理论值在同一平面上的两条空间直线

$$\frac{x-x_i}{\cos \alpha_i} = \frac{y-y_i}{\cos \beta_i} = \frac{z-z_i}{\cos \gamma_i} \quad (i = 1, 2)$$

拟合一个与这两条直线最接近的空间平面

$$Ax + By + Cz + D = 0$$

两直线方向叉乘,得到平面的法线方向 (A, B, C) 。

$$(A \ B \ C) = (\cos \alpha_1 \ \cos \beta_1 \ \cos \gamma_1)^T \times (\cos \alpha_2 \ \cos \beta_2 \ \cos \gamma_2) \quad (12)$$

根据两条直线到该平面的距离相等,可解出 D 。

$$|Ax_1 + By_1 + Cz_1 + D| = |Ax_2 + By_2 + Cz_2 + D| \quad (13)$$

这样就拟合出一个与这两条直线最接近的空间平面。

五、结束语

在陆态网工程、探月工程、大地基准精化等国家重大项目的推动下,我国 VLBI 观测站的数量将会日益增多。我国现有 4 个 VLBI 观测站,其中,上海站(1987 年)、乌鲁木齐站(1994 年)已有十几年的测地 VLBI 观测历史,积累了大量观测资料,其位置和运动测量已有很高的精度,是目前 ITRF 的基准站。它们在建立欧亚大陆中东部区域和全球框架的联系中,占有举足轻重的地位,这些台站也是将我国及周边区域性研究与全球背景相连的纽带。

与国际一流台站相比,我国 VLBI 站的本地连接测量精度较低,并缺少及时的复测。希望本文的探讨能对日后的工作起到借鉴作用。

参考文献:

[1] 刘光明,马金辉,吴富梅,等.网络工程历年观测数据的重新处理[J].大地测量与地球动力学,2010,30(4):64-67.
[2] 黄维彬.近代平差理论及其应用[M].北京:解放军出版社,1992. (下转第19页)

任何大于 1 hm^2 的植被块自动分配到植被区中;商业区仅包括极小的植被碎片;植被区主要指研究区域的公园绿地;居民区的植被介于商业区与植被区之间;宽度小于 6 m 的居民区小路和停车场包含在居民区中。

表1 多尺度分割数据分析

| 分割序号 | 分割尺度 | 对象个数 | 对象平均像元个数 |
|------|------|--------|----------|
| 水平1 | 10 | 27 988 | 11 |
| 水平2 | 20 | 6 179 | 51 |
| 水平3 | 40 | 1708 | 185 |
| 水平4 | 80 | 513 | 616 |
| 水平5 | 100 | 329 | 961 |
| 水平6 | 120 | 197 | 1 605 |
| 水平7 | 160 | 118 | 2 680 |
| 水平8 | 200 | 70 | 4 517 |
| 水平9 | 220 | 19 | 16 642 |

层次三主要是提取商业区高层建筑与道路的边缘,以及居民区零星分布的乔灌木。分割尺度为40,光谱(颜色)权重设为0.7,形状权重则为0.3,如图1(d)所示。依据经验,道路在高分辨率遥感影像中,具有一定的宽度,其形状像一个窄的矩形或带状线,在城市区域,道路长度通常大于或等于一个街区,同时道路网络具有一定的规则。传统的建筑物在结构上有一定的几何形态特征,通常表现为矩形或矩形的组合,因而形状因子占到0.3的比重。

六、结束语

本试验讨论了一种在高分辨率遥感影像上进行地物边界提取的方法,并验证了该方法的有效

性。分析了分水岭算法特点及不足之处,研究了面向对象多尺度分割方法的原理及应用于遥感图像处理中的可行性,并对分水岭算法产生的过分割结果在最小异质性原则下进行合并。从上述的处理过程和试验结果中可以看出,应用面向对象多尺度分割技术,适当地选用特征参数可以直接从高分辨率遥感影像上自动提取目标地物的边界信息,较大地提高了目标边界提取的速度,同时取得较理想的分割结果。由于本算法涉及分割尺度的确定,如何合理地选取最优分割尺度,如何进一步降低空地、阴影等因素的影响是今后关注的一个方向^[6]。

参考文献:

- [1] 罗希平,田捷,诸葛婴,等. 图像分割方法综述[J]. 模式识别与人工智能,1999,12(3):300-312.
- [2] 付卓,胡吉平,谭衢霖,等. 遥感应应用分析中影像分割方法[J]. 遥感技术与应用,2006,21(5):456-462.
- [3] 陈秋晓. 高分辨率遥感图像分割方法研究[D]. 北京:中国科学院地理科学与资源研究所,2004.
- [4] 肖鹏峰,冯学智,赵书河,等. 基于相位一致的高分辨率遥感图像分割方法[J]. 测绘学报,2007,36(2):146-151.
- [5] VINCENT L, SOILLE P. Watersheds in Digital Space: An Efficient Algorithms Based on Immersion Simulation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(6):583-598.
- [6] SMET P D, PIRES R L. Implementation and Analysis of an Optimized Rainfalling Watershed Algorithm [J]. Proceedings of SPIE, 2009, 3974:759-766.

(上接第13页)

- [3] 沈云中,陈廷武. 上海天文台并址站的空间归心测量[J]. 同济大学学报:自然科学版,2006,34(2):217-220.

- [4] 丁月蓉,郑大伟. 天文测量数据的处理方法[M]. 南京:南京大学出版社,1990.
- [5] 潘晏仲,李洪军. 高等代数与几何[M]. 西安:西安交通大学出版社,2001.