

GPS 与 TPS 集成超站仪的数据转换研究

郭际明¹ 张正禄¹ 罗年学¹ 黄全义¹

(1 武汉大学测绘科学与技术学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘要: 在讨论 GPS 与 TPS 两大测量技术特点的基础上, 研究了两者的集成技术和数据转换问题, 重点是如何利用 GPS 技术实时求得 TPS 的测站空间直角坐标, 再通过合适的数学模型转换为地方坐标系的二维直角坐标和正常高。将 GPS 接收单元集成到 TPS 上构成超站仪测量系统, 可以实现测站点与碎部点的同步测绘模式。

关键词: GPS; TPS; 超站仪; 数据转换模型

中图法分类号: P228.41; P226.3

全球定位系统(GPS)与全站仪定位系统(TPS)是目前广泛采用的两大测量技术。GPS 技术不需要点与点之间通视, 并且受距离的限制较小, 因而在大范围的开阔地有很强的优势, 并已成为大范围测量工作特别是建立等级控制网的首选方法。TPS 技术则在城市建筑密集地区和小范围内获取碎部点方面具有优势, 但采用 TPS 作业时, 首先必须建立控制网。若测区附近无已知控制点, 则需从较远的地区联测过来, 因而加大了工作量。若将 GPS 技术和 TPS 技术集成在一起, 则可用 GPS 方法确定 TPS 的测站位置, 用 TPS 测量其他碎部点。这样可实现不建加密控制网(或称无加密控制网)的测站点与碎部点的同步步测, 大大增加测量工作的灵活性, 并能提高工作效率。GPS 与 TPS 集成在一起的软硬件测绘系统称为超站仪定位系统(简称 SPS)。笔者在 GPS 与 TPS 的集成方面进行了较为深入的研究, 实现了 GPS 数据的准实时通讯与基线解算、WGS84 坐标与地方坐标的实时转换、碎部点数据的同步测绘等。本文主要讨论超站仪系统的坐标实时转换问题。

1 WGS84 坐标系到当地坐标系的转换参数求解

若 GPS 接收机接收的是基于 WGS84(G873)

坐标系的星历信息和载波相位与伪距等观测值, 在此基础上求得的空间直角坐标(X, Y, Z)和三维基线向量($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)均是在 WGS84(G873)坐标系下的, 而我国测量成果大多数是在 BJ54、GDZ80 或地方坐标系下的(BJ54、GDZ80、地方坐标系等非全球坐标系统称为当地坐标系), 因而需要将 GPS 结果转换到当地坐标系中去。这种转换一般通过在已知点上进行 GPS 静态测量, 进而求解转换参数。转换可分为三维转换(7 参数法: 3 个平移参数($\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$)、3 个旋转参数($\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$)、1 个尺度参数 m)和二维转换(4 参数法: 2 个平移参数、1 个旋转参数、1 个尺度参数)。

1.1 三维转换模型

参照卫星坐标到地面坐标的转换模型^[1], 并取 $m+1=a_{11}$, $\epsilon_x=a_{12}/a_{11}$, $\epsilon_y=a_{13}/a_{11}$, $\epsilon_z=a_{14}/a_{11}$, 则得:

$$\begin{pmatrix} X_T \\ Y_T \\ Z_T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{14} & -a_{13} \\ -a_{14} & a_{11} & a_{12} \\ a_{13} & -a_{12} & a_{11} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, (X_S, Y_S, Z_S) 为 WGS84 坐标系下的空间直角坐标; (X_T, Y_T, Z_T) 是由 (X_S, Y_S, Z_S) 经过坐标转换求得的公共点在当地参考系下的空间直角坐标。

当公共点个数多于 3 个时, 可按最小二乘原理求得 7 个转换参数的最或然值。由式(1)可得相

应的误差方程为:

$$\begin{pmatrix} V_{X_T} \\ V_{Y_T} \\ V_{Z_T} \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & X_S & 0 & -Z_S & Y_S \\ 0 & 1 & 0 & Y_S & Z_S & 0 & -X_S \\ 0 & 0 & 1 & Z_S & -Y_S & X_S & 0 \end{pmatrix} \cdot (\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14})^T + \begin{pmatrix} X_T' \\ Y_T' \\ Z_T' \end{pmatrix} \quad (2)$$

矩阵形式为 $V = B \delta X + L$, 权阵为 P 。其中, $V = (V_{X_T}, V_{Y_T}, V_{Z_T})^T$; $\delta X = (\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14})^T$; $L = (X_T', Y_T', Z_T')^T$ 为地面点在当地坐标系下已知的三维空间直角坐标; B 为系数阵。相应的法方程为 $B^T P B \delta X + B^T P L = 0$, 解为 $\delta X = -(B^T P B)^{-1} B^T P L$ 。

另外, 还可在三维联合平差时, 将转换参数作为附加参数与其他未知数一并求得^[2]。

1.2 二维转换模型

实际计算时, 已知点在本地参考系中的空间直角坐标一般是通过大地坐标(经纬度和大地高)转换得到的, 大地高等于正常高加高程异常, 而我国只有极少数地区有准确的大地水准面资料, 大部分点的高程异常值精度较低, 这将影响三维转换参数的质量。另外, 平移参数($\Delta X_0, \Delta Y_0, \Delta Z_0$)受GPS起始点坐标精度的影响, 有时GPS测区附近无国家A级或B级GPS点, 而采用单点定位解作为参考值, 这样就使不同网的平移参数有较大差异。因而当测区范围较小时, 通常的做法是将平面坐标与高程分开进行。平面转换用二维转换模型, 高程转换则用数学函数拟合法。

为了求得二维转换参数, 可采用两种方法:
①将GPS三维网平差坐标转换为平面坐标, 再结合地面已知坐标, 采用相似变换模型求解;
②在二维联合平差时引入尺度和旋转参数进行求解。本文主要讨论后者, 此时至少需在两个公共点(或者一个公共点及一条地面边长和一个地面方位角)上进行静态GPS观测, 然后进行基线解算, 再将GPS三维基线向量($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)投影到参考平面上, 转换为二维基线坐标差向量($\Delta x, \Delta y$)和大地高差 Δh , 即($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) \rightarrow ($\Delta x, \Delta y, \Delta h$), 同时对基线向量的协方差阵进行变换, 作为二维联合平差的随机模型。

1.2.1 基线向量的转换步骤

1) 以基线一端在WGS84坐标系下的三维直角坐标(X_1, Y_1, Z_1)为参考坐标, 求得另一端的

坐标(X_2, Y_2, Z_2), 即

$$\begin{aligned} X_2 &= X_1 + \Delta X \\ Y_2 &= Y_1 + \Delta Y \\ Z_2 &= Z_1 + \Delta Z \end{aligned} \quad (3)$$

2) 将上述基线两端点的空间直角坐标转换为大地坐标, 即

$$\begin{aligned} (X_1, Y_1, Z_1) &\rightarrow (B_1, L_1, H_1) \\ (X_2, Y_2, Z_2) &\rightarrow (B_2, L_2, H_2) \end{aligned}$$

3) 将大地坐标转换为参考平面坐标, 即

$$\begin{aligned} (B_1, L_1) &\rightarrow (x_1, y_1) \\ (B_2, L_2) &\rightarrow (x_2, y_2) \end{aligned}$$

4) 求在参考平面上的二维坐标差向量

($\Delta x, \Delta y$), 即

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_2 - x_1 \\ \Delta y &= y_2 - y_1 \end{aligned} \quad (4)$$

在上述转换中, 只涉及到平面坐标转换, 而 $\Delta h = \Delta H = H_2 - H_1$ 。

1.2.2 基线向量协方差阵的转换步骤和模型

1) $\Sigma_{\Delta XYZ} \rightarrow \Sigma_{\Delta BLH}$, $\Sigma_{\Delta XYZ}$ 为三维空间直角坐标基线向量($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$)的协方差阵, $\Sigma_{\Delta BLH}$ 为三维大地坐标差向量($\Delta B, \Delta L, \Delta H$)的协方差阵。转换公式为^[1]:

$$\Sigma_{\Delta BLH} = E \circ \Sigma_{\Delta XYZ} \circ E^T \quad (5)$$

$$E = \begin{pmatrix} -\frac{\rho \sin B \cos L}{M+h} & -\frac{\rho \sin B \sin L}{M+h} & \frac{\rho \cos B}{M+h} \\ -\frac{\rho \sin L}{(N+h)\cos B} & \frac{\rho \cos L}{(N+h)\cos B} & 0 \\ \cos B \cos L & \cos B \sin L & \sin B \end{pmatrix}$$

式中, B, L, h 为基线两端点的平均纬度、平均经度、平均大地高; M, N 为与 B, L 相应的子午曲率半径和卯酉曲率半径; $\rho = 206265$ 。

2) $\Sigma_{\Delta BLH} \rightarrow \Sigma_{\Delta xyh}$, $\Sigma_{\Delta xyh}$ 为参考平面二维坐标差向量及大地高高差的协方差阵, $\Sigma_{\Delta xy}$ 是 $\Sigma_{\Delta xyh}$ 的子块矩阵。转换公式为^[3]:

$$\Sigma_{\Delta xyh} = F \circ \Sigma_{\Delta BLH} \circ F^T \quad (6)$$

$$F = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

式中, $b_{11} = M[1 + \frac{1}{2}(1 - 2\sin^2 B) \cdot l^2]$; $b_{12} = N \sin B \cos B$; $b_{21} = -M \sin B \cdot l$; $b_{22} = N[1 + \frac{1}{2}(1 - 2\sin^2 B) \cdot l^2] \cos B$; e 是椭球第一偏心率; $W^2 = 1 - e^2 \sin^2 B$; $l = L - L_0$, L_0 是中央子午线经度。

1.2.3 求解转换参数

将GPS三维基线向量及协方差阵转换为高

斯平面上的二维坐标差向量及其协方差阵后, 再引入尺度和旋转角两个参数, 同地面数据进行联合平差可同时求得转换参数及其他非公共点的平面坐标的最或然值。

参考平面上二维坐标差向量的观测值方程

$$\begin{cases} \Delta x_{ij} + v_{\Delta x_{ij}} \\ \Delta y_{ij} + v_{\Delta y_{ij}} \end{cases} = (m+1) \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_{ij}' \\ \Delta y_{ij}' \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} a & b \\ -b & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x^0 + \delta x_j - \delta x_i \\ \Delta y^0 + \delta y_j - \delta y_i \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, $(\Delta x_{ij}, \Delta y_{ij})$ 为 i, j 两点在 WGS84 椭球参考系的平面坐标差, $(v_{\Delta x_{ij}}, v_{\Delta y_{ij}})$ 为相应的改正数; $(\Delta x_{ij}', \Delta y_{ij}')$ 为 i, j 两点在当地椭球参考系的平面坐标差, $(\Delta x^0, \Delta y^0)$ 为相应的近似值; $\delta x_i, \delta y_i, \delta x_j, \delta y_j$ 为坐标未知数。设

$$a = (m+1)\cos \alpha, b = (m+1)\sin \alpha$$

则有: $m+1 = \sqrt{a^2 + b^2}$, $\alpha = \arctan \frac{b}{a}$

与式(7)相应的误差方程为:

$$\begin{pmatrix} v_{\Delta x_{ij}} \\ v_{\Delta y_{ij}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -a & -b & a & b & \Delta x^0 & \Delta y^0 \\ b & -a & -b & a & \Delta y^0 & -\Delta x^0 \end{pmatrix} \cdot$$

$$(\delta x_i, \delta y_i, \delta x_j, \delta y_j, a, b)^T - \begin{pmatrix} \Delta x_{ij} \\ \Delta y_{ij} \end{pmatrix} \quad (8)$$

权阵为: $P = \sigma_0^2 \cdot \Sigma_{xy}^{-1}$

$$\text{令 } B = \begin{pmatrix} -a & -b & a & b & \Delta x^0 & \Delta y^0 \\ b & -a & -b & a & \Delta y^0 & -\Delta x^0 \end{pmatrix}$$

$$L = \begin{pmatrix} \Delta x_{ij} \\ \Delta y_{ij} \end{pmatrix}$$

$$\delta X = (\delta x_i, \delta y_i, \delta x_j, \delta y_j, a, b)^T$$

取 a, b 的初值为: $a=1, b=0$, 按最小二乘原理组成法方程为: $B^T P B \cdot \delta X + B^T P L = 0$, 进行迭代计算解求 δX , 直至 $|m_i - m_{i-1}| < 1 \times 10^{-10}$, 并且 $|\alpha_i - \alpha_{i-1}| < 0.001''$ 。迭代结束后求得尺度因子 m 和旋转角 α , 并同时求得各点坐标、点位精度等其他平差量。

1.3 高程拟合模型

GPS 方法求得的是与 WGS84 椭球相对应的大地高, 其精度一般在 1~2cm, 采用高精度接收机和较长的观测时间还可将精度提高到 mm 级, 因而大地高本身的精度是较高的。但我国采用的是正常高高程系统, 正常高 H_r 与大地高 H_e 的关系是: $H_r = H_e - \zeta$, ζ 为高程异常。当存在垂线偏差时, 似大地水准面与参考椭球面是不平行的, 因而不同点的高程异常 ζ 是不同的。但 ζ 的变化

一般是平缓和规律性的, 可根据公共的 GPS 点和水准高程点拟合高程异常 $\zeta^{(4)}$ 。

2 测站坐标实时求解

根据上面求得的转换参数和超站仪系统的 GPS 测量结果可实时求得测站坐标。可将转换参数直接引入或手工输入到相应的参数库中, 并在测量程序中设计参数配置选项, 一个或多个参考站的 GPS 数据通过数据链传送到流动站进行基线向量解算, 并得到流动站 WGS84 坐标的最或然值和质量指标, 再实时将流动站坐标转换为当地坐标。

2.1 超站仪定位系统构成

超站仪定位系统由参考站(GPS 接收机和电台)、流动站(GPS、TPS、电台、计算机)、碎部点反射棱镜构成, 如图 1 所示。参考站一般安置在接收 GPS 卫星信号较好的已有固定点上, 电台的有效范围一般可达 15~20km, 流动站设置在电台有效通讯范围内而且可进行 GPS 观测的测站上, 碎部点通过反射棱镜来获取。

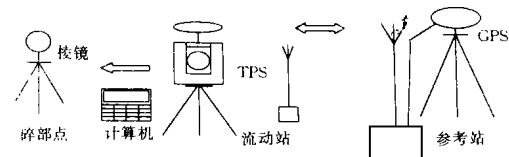


图 1 超站仪定位系统的构成

Fig. 1 System Structure of SPS

2.2 求解平面坐标

1) 将 SPS 的 GPS 参考站与电台设置在当地坐标系中的已知点 A 。

2) 将 SPS 的 TPS 测站(也称流动站)设置在 B , 参考站和流动站上的 GPS 接收单元同时接收卫星数据。

3) 在测站用 TPS 测量碎部点的水平方向、斜距、垂直角。

4) 全站仪观测 15~20min 后, 流动站请求参考站发送数据, 经电台无线通讯, 把参考站和测站的 GPS 数据传至笔记本电脑, 进行基线解算求得 AB 的基线向量 $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{WGS84}$ 。

5) 若存在多个参考站, 可获得多条基线, 这时可根据各个参考点 WGS84 坐标和相应的基线向量及协方差阵求得测站点的最或然坐标 $(X, Y, Z)_{WGS84}$, 将该坐标与已知点坐标求差即

可得相应的基线向量的最或然值(ΔX , ΔY , ΔZ)_{WGS84}。

6) 进行二维转换, 可得 WGS84 参考系下的二维坐标差, 即

$$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)_{\text{WGS84}} \rightarrow (\Delta x, \Delta y, \Delta h)_{\text{WGS84}}$$

7) 根据二维转换参数进行相似变换, 可得当地坐标系下的二维坐标差, 即

$$(\Delta x, \Delta y)_{\text{WGS84}} \rightarrow (\Delta x, \Delta y)_{\text{local}}$$

8) 按下式求得测站在当地坐标系下的平面坐标:

$$(x, y)_{\text{local}} = (x, y)_{\text{local}}^{\text{参考站}} + (\Delta x, \Delta y)_{\text{local}} \quad (9)$$

2.3 求解正常高

1) 求解测站点的 WGS84 大地高 H_e 。

2) 用拟合模型求得该点的高程异常 ζ 。

3) 求测站点的正常高 $H_r = H_e - \zeta$ 。

3 碎部点坐标的获取

一台或多台接收机设置在已知点上作为参考站, 流动站设置在数据采集地区。若无任何已知点, 则首先用 GPS 方法确定一地面点作为后视点, 然后即可将流动站设置在某点进行碎部测量, 输入仪器高、目标高、碎部点属性码, 自动记录测站点至目标点的水平方向、斜距、高度角。

可采用两种作业方式:

1) 在流动站架设好仪器后, 同时进行全站仪和 GPS 观测, 记录全站仪的直接观测值(水平方向、斜距、高度角)。一般测站上用全站仪观测碎部点需 20min 左右。全站仪观测完后, GPS 已接收了足够的数据, 然后通过电台将参考站数据传输至笔记本电脑, 同时将测站 GPS 数据通过无线接口传至电脑, 求得测站坐标。再根据已记录的全站仪观测数据, 即可求得各碎部点在当地坐标系下的坐标。这样, 测站点和碎部点可只架设一次仪器而求得。

2) 在流动站架设好仪器后, 先进行 15~20min 的 GPS 观测, 从而求得测站坐标。若解算效果不好, 可延长观测时间直至得到满意结果。再用全站仪观测至反射棱镜的水平方向、斜距、高度角, 并立刻计算得到各点所需的平面坐标和高程。

工程放样与碎部点坐标获取相似, 但需要首先得到测站坐标, 因而只能采用作业方式 2)。得到测站点在当地坐标系下的平面坐标和高程后, 根据参考方向和放样点的设计坐标, 可实时得到放样数据进行工程放样。

4 结 论

将 GPS 与 TPS 集成在一起形成超站仪, 可实时求得 TPS 的测站点坐标, 进而用 TPS 测量其余碎部点, 是对现有测量作业模式的改进, 可不再需要布设较密的控制点, 而只需测定少数几个参考站所需的控制点, 这会提高测量工作的效率和灵活性, 并节省控制点埋设与维护的费用。

致谢: 在论文的写作过程中, 巢佰崇教授、李静年副教授、郭再春博士给予了大力协作, 特此感谢。

参 考 文 献

- 孔祥元, 梅是义. 控制测量学(下册). 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1996. 117~121
- 刘基余, 李征航, 王跃虎, 等. 全球定位系统原理及其应用. 北京: 测绘出版社, 1993. 220~226
- 周忠谋, 易杰军, 周琪. GPS 卫星测量原理与应用. 北京: 测绘出版社, 1992. 192
- 徐绍铨, 李振洪, 吴云孙. GPS 高程拟合系统的研究. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(4): 336~339
- 赵建虎, 刘经南, 张红梅. 估计非格网数据考虑地形改正的 GPS 水准高程拟合. 武汉测绘科技大学学报, 1999, 24(4): 346~349
- 李洪涛, 许国昌, 薛鸿印, 等. GPS 应用程序设计. 北京: 科学出版社, 1999
- Revhaug I. A Model for the Transformation of Satellite Vectors to the Plane of the Map. Survey Review, 1999, 35: 274
- Twigg D R. OSGB36/WGS84 Coordinate Transformations. Survey Review, 2000, 35: 275

作者简介: 郭际明, 教授, 现从事 GPS 和测量机器人在精密工程测量中的应用研究。代表成果: 高精度激光测距仪 M E5000 测程扩展; GPS 网与地面网联合平差模型研究; 地面控制测量自动化一体化研究; 测量机器人系统构成与精度研究等论文和“科傻”系列软件等。

E-mail: guojimin@public.wuhan.cngb.com

Research of Data Transformation for Super-totalstation Positioning System Integrated by GPS and Totalstation

GUO Jiming¹ ZHANG Zhenglu¹ LUO Nianxue¹ HUANG Quanyi¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China, 430079)

Abstract: Based on the discussion of the characteristics of GPS and totalstation, this paper focuses on the integration and data transformation for them. How to get the most precise three-dimensional cartesian coordinates of the station occupied by a totalstation through GPS unit integrated in it is emphasized, and then they are transferred to the local two-dimensional plane coordinates and the orthometric height by a series of mathematical models. The GPS unit, totalstation, radio, notebook computer and the corresponding software work together to form a new surveying system, super-totalstation positioning system(SPS) and a new surveying model for terrestrial surveying. With the help of this system, the positions of detail points can be measured at the same time with the station's. This will be a more advanced surveying type than pure GPS or totalstation model.

GPS and totalstation are the two widely adopted surveying systems. GPS has the benefits that the line of sight between stations needn't to be sighted through and the measured distance may be very long. It has become the first considered method for establishing national, district or engineering project control networks. As for densely built urban area, the signal from the GPS satellite is severely interrupted by buildings around the station, especially for detail surveying, GPS is limited, then totalstation will have its advantage to catch detail points in this case. But we have to set up a series of control points used as stations and back sight reference points to locate other unknown detail points for the later method based on totalstation. If there is no control point around the surveying area, the surveyor has to develop a control network from some known points far away from the considered area, so a heavy extra control surveying task is appended. The integrated GPS and SPS is a solution for the above problem. First, a GPS receiver and a radio is put on a reference station with known coordinates and good condition to receive GPS satellite signal. Then a totalstation with built-in GPS unit is set up at any interest as well as with good condition to receive satellite signal point and oriented to another known point previously determined by SPS or GPS only. Last, the detail points are located by horizontal direction, slope distance and zenith angle. At the same time the GPS unit is recording the phase, pseudo range and navigation data from GPS satellites. So the station and detail points can be determined at the same time.

We do some research work on SPS. The radio communication and data processing including baseline vector resolving, WGS84 cartesian coordinates to local system transferring, detail points measuring etc. have been designed. This paper is a description of our realized part of data transformation for SPS.

Key words: GPS; TPS; SPS; data transformation model

About the author: GUO Jiming, professor. His major researches are the application of GPS and measurement robot for precision engineering surveying. His representative papers are the range extending of high precision EDM ME5000; the combined adjustment of GPS measurement and terrestrial measurement; the research on automatic terrestrial control surveying; the research of system structure and precision of measurement robots as well as the serial COSA software.

E-mail: guojimin@public.wuhan.cnrgb.com