

DOI:10.13203/j.whugis20130536



文章编号:1671-8860(2018)01-0120-07

激光跟踪仪空间联合平差模型及精度分析

范百兴^{1,2} 李广云³ 周维虎² 易旺民⁴ 杨振¹ 杨再华⁴

1 信息工程大学地理空间信息学院,河南 郑州,450001

2 中国科学院光电研究院,北京,100094

3 信息工程大学导航与空天目标工程学院,河南 郑州,450050

4 北京卫星环境工程研究所,北京,100094

摘要:工业测量领域经常需要多台甚至多种仪器联合测量,各种测量仪器的观测数据类型和精度不同,其关键技术是采用合理的平差模型实现多种仪器的空间定位和定向。采用附有约束条件的参数平差方法构建了空间联合精密控制网(unified spatial metrology network,USMN)平差模型,对激光跟踪仪、全站仪、经纬仪等测量系统进行了联合平差解算,针对不同类型测量数据建立合理的定权模型,保证了在多余观测量不大的情况下整网平差的精度,采用角度后方交会和坐标系转换模型解决了无互瞄和基准尺观测值的控制网概算和平差,克服了 USMN 平差模型的缺点。最后利用编写的 USMN 平差程序对实际测量数据进行解算,验证了平差模型的可行性并分析了点位误差。

关键词:USMN;激光跟踪仪;约束条件;附有条件的参数平差;控制网概算

中图法分类号:P258

文献标志码:A

工业测量的对象呈现尺寸越来越大、结构越来越复杂、测量精度越来越高的趋势,通常需要多种工业测量仪器联合测量,充分发挥各种测量仪器的优势,才能完成全部测量任务^[1-2]。

国际上发展了空间联合精密控制网(unified spatial metrology network,USMN)技术,主要用于解决多种球坐标测量系统(如激光跟踪仪、全站仪、激光雷达等)的空间联合定位和定向平差问题,为多种测量仪器的空间坐标测量的统一提供位置和方位基准^[3]。

中国的航空航天等精密测量领域广泛使用经纬仪进行空间点三维交会测量和空间姿态准直测量,通常需要将经纬仪非球坐标测量系统和跟踪仪球坐标测量系统进行联合平差解算,建立空间三维测量控制网。与球坐标测量系统相比,经纬仪测量系统缺少长度观测基准,需要通过基准尺引入长度基准,并通过互瞄观测值提高各个经纬仪测站的定向精度^[2]。参与 USMN 平差的测量数据可在非整平甚至倒置状态下获取,与经典三维控制网平差模型具有较大的不同。

本文在球坐标测量系统联合平差原理的基础上,针对经纬仪测量系统缺少长度基准而具有互瞄基准和基准尺约束条件等特点,采用附有条件的参数平差模型,构建了包含激光跟踪仪和经纬仪测量系统的 USMN 平差模型,在经纬仪不存在互瞄和基准观测值的情况下也可以实现整网平差解算,克服了 USMN 模型无法解算缺乏经纬仪互瞄值的整网平差的缺点,解决了经纬仪和跟踪仪联合平差解算及其优化问题。

1 USMN 组成

设 $m(m \geq 1)$ 台激光跟踪仪对 $q(q \geq 3)$ 个定向点进行观测, n 台经纬仪两两互瞄并测量了 $p(p \geq 1)$ 个位置的基准尺,每台经纬仪依次测量 q 个定向点,如图 1 所示,则整个控制网的未知参数的个数 t 为:

$$t = 3q + 6m + 6n + 6p \quad (1)$$

则整个控制网的观测方程总数 N 为:

$$N = 3mq + 2nq + n(n - 1) + 4np + p \quad (2)$$

收稿日期:2017-02-22

项目资助:国家自然科学基金(41101446);航天器高精度测量联合实验室基金(201402)。

第一作者:范百兴,博士,副教授,主要从事精密工业与工程测量的理论与方法研究。fbxhrhr@sina.com

在平差解算中,通常以第一测站为测量坐标系,此时,第一测站的 3 个平移和 3 个旋转参数均为零,整个控制网需要满足:

$$N \geq t - 6 \quad (3)$$

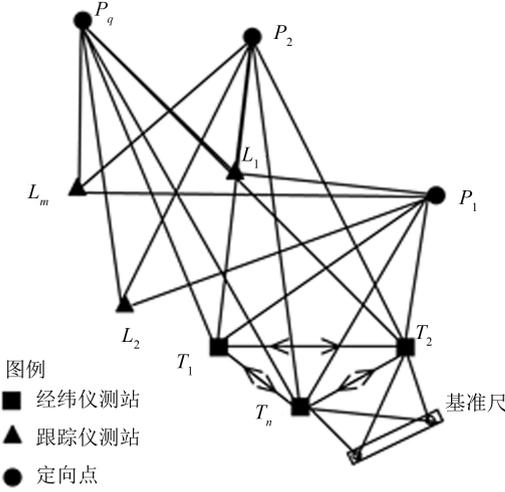


图 1 多种仪器联合测量图

Fig.1 Chart of Combined Measurement

此时,即可按照最小二乘原理求解。在整个控制网中,误差方程可以分为水平角误差方程、垂直角误差方程、斜距误差方程和基准尺长度约束条件方程四类。设第 i ($i=1,2,\dots,m$) 个测站相对于测量坐标系的平移和旋转参数为 $(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, Rx_i, Ry_i, Rz_i)$, 第 k ($k=1,2,\dots,q$) 个定向点在第 i 个测站坐标系下的坐标为 (X_{ik}, Y_{ik}, Z_{ik}) , 其在测量坐标系下的坐标为 (X_k, Y_k, Z_k) 。在利用角度、距离和互瞄值列误差方程时,需要将第 k 个定向点的观测值从第 i 个测站坐标系转换到测量坐标系下^[1,4-5]:

$$\begin{pmatrix} X_{ik} \\ Y_{ik} \\ Z_{ik} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{i1} & b_{i1} & c_{i1} \\ a_{i2} & b_{i2} & c_{i2} \\ a_{i3} & b_{i3} & c_{i3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_k - X_{0i} \\ Y_k - Y_{0i} \\ Z_k - Z_{0i} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} H_{ik} = 2\pi - \arctan \frac{a_{i1}(X_k - X_{0i}) + b_{i1}(Y_k - Y_{0i}) + c_{i1}(Z_k - Z_{0i})}{a_{i2}(X_k - X_{0i}) + b_{i2}(Y_k - Y_{0i}) + c_{i2}(Z_k - Z_{0i})} \\ V_{ik} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{a_{i3}(X_k - X_{0i}) + b_{i3}(Y_k - Y_{0i}) + c_{i3}(Z_k - Z_{0i})}{\sqrt{(a_{i1}(X_k - X_{0i}) + b_{i1}(Y_k - Y_{0i}) + c_{i1}(Z_k - Z_{0i}))^2 + (a_{i2}(X_k - X_{0i}) + b_{i2}(Y_k - Y_{0i}) + c_{i2}(Z_k - Z_{0i}))^2}} \end{cases} \quad (6)$$

此外,点坐标与距离观测值的函数关系如下式^[5-6]:

$$S_{ik} = \sqrt{(X_k - X_{0i})^2 + (Y_k - Y_{0i})^2 + (Z_k - Z_{0i})^2} \quad (7)$$

分别对式(6)和式(7)线性化即可得到定向点和基准尺端点的观测值误差方程:

式中, $a_{i1}, a_{i2}, \dots, c_{i3}$ 为第 i 个测站旋转参数 (Rx_i, Ry_i, Rz_i) 的函数。

2 定向点和互瞄测量误差方程

激光跟踪仪和激光雷达等仪器可以在不整平状态下进行测量,而经纬仪和全站仪都必须在整平状态下才能测量,但整平后的全站仪和经纬仪也存在微小倾斜,因此其平差模型相同,而基准尺测量点的误差方程模型和定向点相同。

设第 i 测站对定向点 k 的角度和距离观测值为 (H_{ik}, V_{ik}, S_{ik}) , 若测站为经纬仪则 $S_{ik} = 0$ 。此时, H_{ik} 是以仪器水平度盘平面为基准水平角,如图 2 所示。

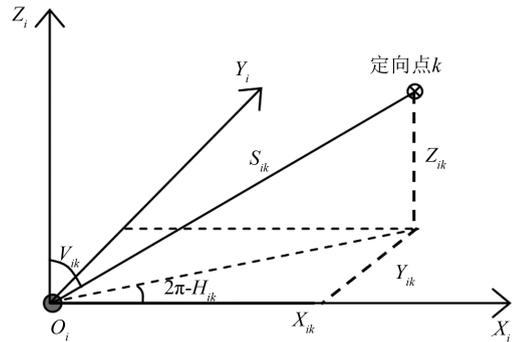


图 2 点坐标与观测值关系

Fig.2 Relation of Coordinate and Observed Value

点坐标与角度观测值的函数关系为^[2]:

$$\begin{cases} H_{ik} = 2\pi - \arctan \frac{Y_{ik}}{X_{ik}} \\ V_{ik} = \frac{\pi}{2} - \arctan \frac{Z_{ik}}{\sqrt{X_{ik}^2 + Y_{ik}^2}} \end{cases} \quad (5)$$

顾及式(4),可将定向点坐标从测站坐标系转换到测量坐标系下,则式(5)变为:

$$\begin{cases} V_{ik}^S = d_1 \delta X_{0i} + d_2 \delta Y_{0i} + d_3 \delta Z_{0i} + d_4 \delta R x_i + d_5 \delta R y_i + \\ d_6 \delta R z_i + d_7 \delta X_k + d_8 \delta Y_k + d_9 \delta Z_k - l_{ik}^S \\ V_{ik}^H = e_1 \delta X_{0i} + e_2 \delta Y_{0i} + e_3 \delta Z_{0i} + e_4 \delta R x_i + e_5 \delta R y_i + \\ e_6 \delta R z_i + e_7 \delta X_k + e_8 \delta Y_k + e_9 \delta Z_{ik} - l_{ik}^H \\ V_{ik}^V = f_1 \delta X_{0i} + f_2 \delta Y_{0i} + f_3 \delta Z_{0i} + f_4 \delta R x_i + f_5 \delta R y_i + \\ f_6 \delta R z_i + f_7 \delta X_k + f_8 \delta Y_k + f_9 \delta Z_k - l_{ik}^V \end{cases} \quad (8)$$

式中, $d_1, \dots, d_9, e_1, \dots, e_9, f_1, \dots, f_9$ 分别为斜距、水平角和垂直角对未知参数的一阶偏导; l_{ik}^S 、 l_{ik}^H 、 l_{ik}^V 为常数项; δX_{0i} 、 δY_{0i} 、 δZ_{0i} 、 $\delta R x_i$ 、 $\delta R y_i$ 、 $\delta R z_i$ 为第 i 个测站参数的近似改正数; δX_k 、 δY_k 、 δZ_k 为第 k 个定向点的近似坐标改正数。

$$\begin{cases} V_{i(i+1)}^H = g_1 \delta X_{0i} + g_2 \delta Y_{0i} + g_3 \delta Z_{0i} + g_4 \delta R x_i + g_5 \delta R y_i + \\ g_6 \delta R z_i + g_7 \delta X_{0(i+1)} + g_8 \delta Y_{0(i+1)} + g_9 \delta Z_{0(i+1)} + \\ g_{10} \delta R x_{0(i+1)} + g_{11} \delta R y_{0(i+1)} + g_{12} \delta R z_{0(i+1)} - l_{i(i+1)}^H \\ V_{i(i+1)}^V = h_1 \delta X_{0i} + h_2 \delta Y_{0i} + h_3 \delta Z_{0i} + h_4 \delta R x_i + h_5 \delta R y_i + \\ h_6 \delta R z_i + h_7 \delta X_{0(i+1)} + h_8 \delta Y_{0(i+1)} + h_9 \delta Z_{0(i+1)} + \\ h_{10} \delta R x_{0(i+1)} + h_{11} \delta R y_{0(i+1)} + h_{12} \delta R z_{0(i+1)} - l_{i(i+1)}^V \end{cases} \quad (9)$$

式中, $g_1, \dots, g_{12}, h_1, \dots, h_{12}$ 分别经纬仪互瞄的水平角和垂直角对测站参数的一阶偏导; $l_{i(i+1)}^H$ 、 $l_{i(i+1)}^V$ 为常数项; δX_{0i} 、 δY_{0i} 、 δZ_{0i} 、 $\delta R x_i$ 、 $\delta R y_i$ 、 $\delta R z_i$ 为第 i 个测站参数的近似改正数; $\delta X_{0(i+1)}$ 、 $\delta Y_{0(i+1)}$ 、 $\delta Z_{0(i+1)}$ 、 $\delta R x_{0(i+1)}$ 、 $\delta R y_{0(i+1)}$ 、 $\delta R z_{0(i+1)}$ 为第 $i+1$ 个测站参数的近似改正数。则式(8)和式(9)联合即可组成定向点和互瞄观测误差方程的矩阵形式:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A}\mathbf{X} - \mathbf{l} \quad (10)$$

式中, \mathbf{V} 为改正数向量; \mathbf{A} 为系数矩阵; \mathbf{X} 包含测站点、定向点、基准尺端点等未知参数矩阵; \mathbf{l} 为常数项矩阵。

3 基准尺长度约束条件方程

设基准尺两个端点为第 k 和 $k+1$ 个定向点, 基准尺参考长度为 S_0 , 坐标值参数为 (X_k, Y_k, Z_k) 和 $(X_{k+1}, Y_{k+1}, Z_{k+1})$, 则利用基准尺的参考长度即可构成约束条件方程^[5]为:

$$\sqrt{(X_k - X_{k+1})^2 + (Y_k - Y_{k+1})^2 + (Z_k - Z_{k+1})^2} - S_0 = 0 \quad (11)$$

将式(11)线性化即可得到条件方程的形式为:

$$c_k \delta X_{k+1} + d_k \delta Y_{k+1} + e_k \delta Z_{k+1} - c_k \delta X_k - d_k \delta Y_k - e_k \delta Z_k + \omega_k = 0 \quad (12)$$

式中, c_k, d_k, e_k 分别为线性化后的系数; ω_k 为自由项; $\delta X_k, \delta Y_k, \delta Z_k$ 为基准尺第 k 个端点的近似坐标改正数; $\delta X_{k+1}, \delta Y_{k+1}, \delta Z_{k+1}$ 为基准尺第 $k+1$ 个端点的近似坐标改正数。若多个基准尺

第 i 台经纬仪瞄向第 $i+1$ 台经纬仪时, 角度互瞄值为 $(H_{i(i+1)}, V_{i(i+1)})$, 设两台经纬仪的测站参数为 $(X_{0i}, Y_{0i}, Z_{0i}, R x_i, R y_i, R z_i)$ 和 $(X_{0(i+1)}, Y_{0(i+1)}, Z_{0(i+1)}, R x_{i+1}, R y_{i+1}, R z_{i+1})$, 则角度互瞄值的误差方程为^[1,4]:

在多个位置观测, 则式(12)可以写成矩阵形式:

$$\mathbf{B}_x \mathbf{X} + \mathbf{W} = \mathbf{0} \quad (13)$$

式(13)中, \mathbf{B}_x 为条件方程的系数矩阵; \mathbf{X} 包含未知参数的矩阵; \mathbf{W} 为常数项矩阵。式(10)和式(13)按照具有约束条件的参数平差模型, 即可解算得到^[6-10]:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{N}^{-1} (\mathbf{B}_x^T \mathbf{K} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \\ \mathbf{K} = (\mathbf{B}_x \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}_x^T) (\mathbf{W} - \mathbf{B}_x \mathbf{N}^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}) \\ \mathbf{Q}_x = \mathbf{N}^{-1} - \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}_x^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{B}_x \mathbf{N}^{-1} \end{cases} \quad (14)$$

式中, \mathbf{P} 为观测值权阵; $\mathbf{N} = \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}$; $\mathbf{M} = \mathbf{B}_x \mathbf{N}^{-1} \mathbf{B}_x^T$ 。

4 观测权阵的确定

与传统经纬仪和全站仪相比, 激光跟踪仪是通过目标跟踪系统精密照准目标后, 再测量水平和垂直度盘的角度读数, 类似于智能全站仪的自动目标识别 (automatic target recognition, ATR) 功能。激光跟踪仪的测角误差常采用 $\pm(a + bS)$ 的形式给出^[11-14], 其中 a 为固定误差, 以 μm 为单位, b 为比例误差系数, 采用 $\mu\text{m}/\text{m}$ 即 10^{-6} , S 为斜距观测值, 以 m 为单位。激光跟踪仪的水平角权值 P_H 、垂直角权值 P_V 和斜距权值 P_S 为:

$$\begin{cases} P_H = \left(\frac{a+b}{a+bS} \right)^2 \\ P_V = K P_H \\ P_S = \left(\frac{1}{S} \right)^2 \end{cases} \quad (15)$$

以徕卡 AT901 型激光跟踪仪为例,其标称测角误差为 $\pm(15\mu\text{m}+6\times 10^{-6}\cdot S)$,激光干涉(interferometer, IFM)测距误差为 $\pm 0.5\mu\text{m}/\text{m}^{[15-17]}$ 。需要指出的是,与经纬仪和全站仪一样,激光跟踪仪的水平垂直测角误差相同,但是实际测试表明,激光跟踪仪的 1 个测回水平方向中误差要小于 1 个测回垂直方向中误差,因此在平差解算时,垂直角度的权要小于水平角度权,二者的系数 K 一般取 $0.8\sim 0.9$ 。经纬仪和全站仪的角度和距离权的确定与传统方法相同。

5 控制网初始坐标参数解算模型

第 i 台电子经纬仪和第 j 台激光跟踪仪对第

k 个定向点的观测值分别为 (H_{ik}, V_{ik}) 和 (H_{ik}, V_{ik}, S_{ik}) ,以第 j 台激光跟踪仪作为当前测站,测站的 3 个平移参数和 3 个旋转参数均为 0。则各个定向点的坐标 $(X_{jk}^0, Y_{jk}^0, Z_{jk}^0)$ 为:

$$\begin{cases} X_{jk}^0 = S_{jk} \sin V_{jk} \cos H_{jk} \\ Y_{jk}^0 = S_{jk} \sin V_{jk} \sin H_{jk} \\ Z_{jk}^0 = S_{jk} \cos V_{jk} \end{cases} \quad (16)$$

如图 3 所示,第 i 个测站对 3 个定向点的观测值分别为 (H_{i1}, V_{i1}, S_{i1}) 、 (H_{i2}, V_{i2}, S_{i2}) 、 (H_{i3}, V_{i3}, S_{i3}) ,由式(16)可以得到三个定向点坐标,分别为 $P_1(X_{j1}^0, Y_{j1}^0, Z_{j1}^0)$ 、 $P_2(X_{j2}^0, Y_{j2}^0, Z_{j2}^0)$ 、 $P_3(X_{j3}^0, Y_{j3}^0, Z_{j3}^0)^{[18-20]}$ 。

设第 i 个测站未知参数为 $(X_i^0, Y_i^0, Z_i^0, 0, 0, Rz_i^0)$,按角度后方交会原理即可解算近似坐标值为:

$$\begin{cases} X_i^0 = X_{j2}^0 + \frac{(Y_{j2}^0 - Y_{j1}^0)(\cot\alpha - \tan\gamma) - (X_{j2}^0 - X_{j1}^0)(1 + \cot\alpha \tan\gamma)}{1 + \tan^2\gamma} \\ Y_i^0 = Y_{j2}^0 + (X_i^0 - X_{j1}^0) \tan\gamma \\ Z_i^0 = Z_{j1}^0 - s_{i1} \cot V_{i1} \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\tan\gamma = \frac{(Y_{j1}^0 - Y_{j2}^0) \cot\alpha + (Y_{j3}^0 - Y_{j2}^0) \cot\beta + X_{j3}^0 - X_{j1}^0}{(X_{j1}^0 - X_{j2}^0) \cot\alpha + (X_{j3}^0 - X_{j2}^0) \cot\beta - Y_{j3}^0 + Y_{j1}^0}$;

$$D_{i1} = \sqrt{(X_i^0 - X_{j1}^0)^2 + (Y_i^0 - Y_{j1}^0)^2 + (Z_i^0 - Z_{j1}^0)^2}; \alpha = H_{i2} - H_{i3}; \beta = H_{i1} - H_{i2}。$$

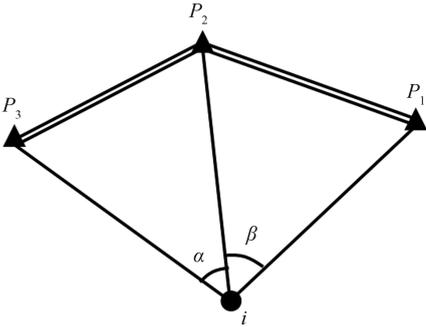


图 3 测站坐标系参数概算

Fig.3 Chart of Station Preliminary

进一步,可计算第 i 个测站到 P_1 点的在第 j 个坐标系下的方位角 α_{i1}^0 :

$$\alpha_{i1}^0 = \arctan \left| \frac{Y_{j1}^0 - Y_i^0}{X_{j1}^0 - X_i^0} \right| \quad (18)$$

式(18)中方位角的值需要根据 X 、 Y 坐标的差值进行判断解算,解算模型和坐标方位角判断方法一致,则第 i 个测站相对于第 j 个测站绕 Z 轴的旋转角度 Rz_i^0 :

$$Rz_i^0 = \alpha_{i1}^0 + H_{i1} \quad (19)$$

至此,完成了第 i 个测站的未知参数 $(X_i^0, Y_i^0, Z_i^0, 0, 0, Rz_i^0)$ 的概算。需要注意的是,此时的概算坐标系为第 j 个激光跟踪仪测站坐标

系,在工业测量中,通常以测站 1 坐标系为全局测量坐标系,通常设第 1 测站为强制水平,可以利用坐标系转换原理,将测站坐标系参数和定向点坐标参数都转换到测站 1 坐标系下,并以转换后的概算值作为平差近似值参与平差解算。

6 平差解算

在实验室内布设了 5 个定向点 $P_1 \sim P_5$,采用 2 台 TM5100A、2 台 T3000A 电子经纬仪和 1 台 AT901-B 激光跟踪仪激光跟踪仪两次设站,和 4 台经纬仪共组成 6 个测站,分别对 5 个定向点进行了观测。其中 4 台经纬仪两两互瞄,6 条互瞄边均测量 0.9 m 的基准尺,共 6 个位置。经纬仪的 1 个测回水平和垂直方向中误差的标称值为 $\pm 0.5''$,激光跟踪仪的 IFM 测距误差为 $\pm 0.5\mu\text{m}/\text{m}$,测角误差为 $\pm(15\mu\text{m}+6\mu\text{m}\times 10^{-6}\cdot S)$ 。

该控制网中的观测值包括经纬仪对定向点的角度观测值、经纬仪互瞄角度观测值、经纬仪对基准尺的角度观测值、跟踪仪对定向点的角度和距离观测值等四类,再顾及到基准尺的长度约束条件,即可按照 USMN 平差模型进行解算,解算结果如表 1 所示。

表1 USMN 平差结果

Tab.1 Adjusted Result of Generalized USMN

	未知参数	误差方程数	多余 观测数	均方根 误差/mm	单位权 中误差/mm	备注
条件1	87	154	67	0.062	1.007	有互瞄和基准尺
条件2	51	100	49	0.080	1.121	有互瞄无基准尺
条件3	51	76	25	0.056	0.731	无互瞄无基准尺

从表1中可以看出,3种条件的整网平差精度基本相当,但是条件3的多余观测数远远低于条件1和条件2,即条件3的测量效率最高。整网用USMN平差后,3种条件下测站点误差和定向点误差分别如图4和图5所示,由于以测站1为测量坐标系,所以图4中只显示测站2~测站6的点位误差值。

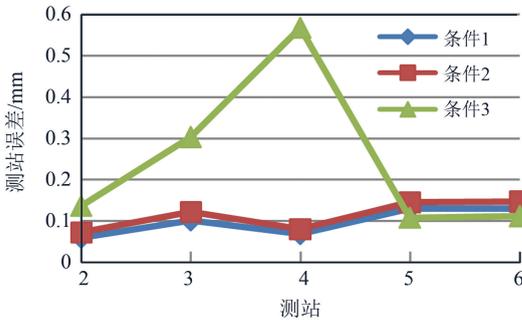


图4 测站点误差分布图

Fig.4 Chart of Station Error

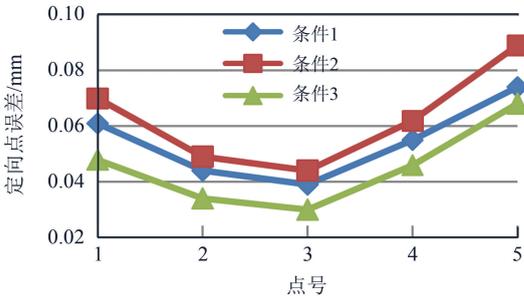


图5 定向点误差分布图

Fig.5 Chart of Orientation Point Error

从图4中可以看出,由于条件1的测站多余观测数最多,因此其测站点位误差最小。而条件3中经纬仪测站缺少测站互瞄值和基准尺测量值,即经纬仪测站的多余观测较少,导致经纬仪测站的误差远远大于激光跟踪仪测站的误差,并且远远大于经纬仪观测量较多的条件2和条件3的经纬仪测站点误差。由于跟踪仪测站的第5站和第6站观测数据没有减少,因此,条件3的跟踪仪测站点位误差与条件1和条件2中基本相当。

从图5中,在3种条件下,由于定向点的观测量没有减少,因此定向点位误差基本相当。

为了进一步评定定向点数量及其分布对广义USMN平差结果的影响,在周围均匀的增加了3个定向点,参与系统的平差解算,解算后,测站点误差和定向点误差的分布如图6和图7所示。

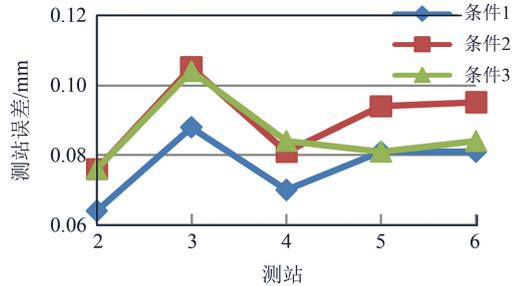


图6 测站点误差分布图(8个定向点)

Fig.6 Chart of Station Error(8 Orientation Points)

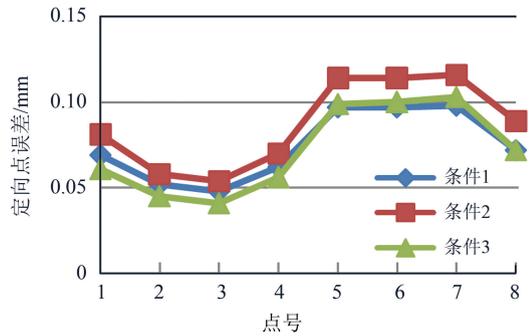


图7 定向点误差分布图(8个定向点)

Fig.7 Chart of Orientation Point Error

(8 Orientation Points)

从图6中可以发现,增加3个定向点后,在3种条件下,测站中心坐标的平差精度接近一致且变化较均匀。比较图4和图6可以发现,由于增加了3个定向点,经纬仪测站的平差精度得到了大幅度的提高,因此,增加定向点个数并优化其空间分布,可以弥补广义USMN平差模型中无经纬仪互瞄和无基准尺观测值的情况下,经纬仪测站的定向精度。而图5和图7的趋势保持一致,即在3种条件下,定向点的平差精度基本一致。

7 结 语

USMN平差模型很好的解决了多台电子经

纬仪交会测量系统、多台激光跟踪仪全站仪等球坐标测量系统的控制网整体平差,实现了多台、多类型测量仪器之间的定位和定向解算。USMN 平差模型在经纬仪没有互瞄值和基准尺观测值的条件下,也可以实现经纬仪和激光跟踪仪的定位定向解算,极大地减少了多余观测量,提高了多类型测量仪器联合测量的效率,满足了航天器准直测量领域的特殊测量要求。由于激光跟踪仪的空间点位误差小于经纬仪交会测量系统,并且采用了激光跟踪仪角度和距离的合理定权模型,因此在经纬仪有无互瞄和基准尺观测值对定向点的点位误差影响不显著。经纬仪测站之间缺少互瞄值时,导致经纬仪测站的多余观测量减少,使经纬仪测站点位误差增大,而跟踪仪测站和定向点的点位误差几乎不受影响。增加定向点个数并优化其空间分布,可以提高无互瞄、无基准尺观测值条件下的经纬仪测站定向精度。

参 考 文 献

- [1] Li Guangyun, Li Zongchun. The Principle and Application of Industrial Measuring Systems [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011(李广云,李宗春. 工业测量系统原理与应用[M]. 北京:测绘出版社, 2011)
- [2] Feng Wenhao. Methods for Industrial Measurement and Basic Principles of Their Choice[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2001, 26(4): 331-336(冯文灏. 工业测量方法及其选用的基本原则[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2001, 26(4): 331-336)
- [3] New River Kinematics, Inc. Spacial Analyzer User Manual [EB/OL]. [http://www. Kinematics.com/download/index.php](http://www.Kinematics.com/download/index.php), 2013
- [4] Feng Wenhao. Method for Setting Up a Three-dimensional Industrial Surveying System of "Building Blocks Type"[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2002, 27(4): 403-407(冯文灏. 建立积木式三维工业测量系统的研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2002, 27(4): 403-407)
- [5] Wang Jiexian. A Method for Fitting of Conicoid in Industrial Measurement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(1): 47-50(王解先. 工业测量中一种二次曲面的拟合方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2007, 32(1): 47-50)
- [6] Zou Jingui, Li Qin, Wang Tong, et al. Theory's Optimization of Helmert Variance Component Estimation and Its Application to Deformation Monitoring Network[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(9): 1 076-1 079(邹进贵, 李琴, 王铜, 等. Helmert 方差分量估计理论的优化及其在形变监测网中的应用[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2009, 34(9): 1 076-1 079)
- [7] Huang Weibin. The Theory and Application of Modern Adjustment [M]. Beijing: PLA Press, 1992: 54-55(黄维彬. 近代平差理论及其应用[M]. 北京: 解放军出版社, 1992: 54-55)
- [8] Zhang Qin, Zhang Juqing. The Principle and Application of Modern Data Process [M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2011(张勤, 张菊清, 岳东杰. 近代测量数据处理与应用[M]. 北京: 测绘出版社, 2011)
- [9] Surveying Adjustment Department of Geodesy and Geomatic School, Wuhan University. Error Theory and Foudation of Surveying Adjustment[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2009(武汉大学测绘学院测量平差学科组. 误差理论与测量平差基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2009)
- [10] Zhang Yu. The Method of Large-scale Measuring with Universal Spatial Network [J]. *Beijing: Environmental and Engineering of Spacecraft*, 2011, 28(3): 277-281(张于. 基于统一空间测量网络的大尺寸测量方法[J]. 航天器环境与工程, 2011, 28(3): 277-281)
- [11] Jody M, Paul G M. Large Scale Metrology in Aerospace Assembly[C]. 5th International Conference on Digital Enterprise Technology, Nates, France, 2008
- [12] The American Society of Mechanical Engineers. ASME B89. 4. 19-2006 (Performance Evaluation of Laser-based Spherical Coordinate Measurement Systems)[S]. New York, USA: The American Society of Mechanical Engineers, 2006
- [13] Liqun Ma, Liding Wang, Tieve Cao, et al. A Large-scale Laser Plane Calibration System[J]. *Measurement Science and Technology*. 2007(18), 1 768-1 772
- [14] Zhongcheng Yan, Chia-Hsiang Menq. Uncertainty Analysis and Variation Reduction of Three Dimensional Coordinate Metrology [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 1999, 39: 1 219-1 238
- [15] Soichi, Ibaraki. Estimation of Three-dimensional Volumetric Error of Numerically Controlled Machine Tools by Tracking Interferometer[J]. *Journal of mechanics Engineering and Automation*, 2011, 1(4): 313-319
- [16] Liu Yongdong, Wang Jia. Self-calibration of Multi-station Laser Tracker Kinetic Geometry [J]. *Optics Technology*, 1999(3): 25-27(刘永东, 王佳. 动态几何量多站法激光跟踪测量自标定[J]. 光学技术,

- 1999(3):25-27)
- [17] Chien chang Lin, Jui liang Her. Calibrating the Volumetric Errors of a Precision Machine by a Laser Tracker System[J]. *The Internatinal Jourhal of Advanced Manufacturing Technology*, 2005 (26): 1 255-1 267
- [18] Zhou Weihu. Research on the Precision Theory of Large-scale Coordinate Measuring Systems [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2000 (周维虎.大尺寸空间坐标测量系统精度理论若干问题的研究[D].合肥:合肥工业大学, 2000)
- [19] Chen Yi, Lu Jue, Zheng Bo. Application of Total Least Squares to Space Resection[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2008, 33(12):1 271-1 274(陈义, 陆珏, 郑波.总体最小二乘方法在空间后方交会中的应用[J].武汉大学学报·信息科学版, 2008, 33(12):1 271-1 274)
- [20] Ma Liqun. Research on Large-scale Dimensional Calibration and Its Application in Measurement Transfer Chain[D]. DaLian: Dalian University of Technology, 2006(马骊群.大尺寸计量校准技术研究及在量值传递中的应用[D].大连:大连理工大学, 2006)

Precision Analysis of the Unified Spatial Metrology Network Adjustment Model

FAN Baixing^{1,2} LI Guangyun³ ZHOU Weihu² YI Wangmin⁴ YANG Zhen¹ YANG Zaihua⁴

1 Institute of Geographical Spatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China

2 Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China

3 Institute of Navigation and Space Target Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450050, China

4 Beijing Satellite Environment Engineering Research Institute, Beijing 100094, China

Abstract: In industrial metrology, a multi-type instrument is only combined to completing all measurement task, and measurement data type and accuracy of each type instrument is different, so valid adjustment model is need to setting up and solving spatial position and attitude parameter of multi-type instrument. Based on observation equation with condition equations, the article established generalized unified spatial metrology network adjustment model and combined adjust for different type instruments, such as laser tracker, total station and theodolite. Furthermore, because of different data type, efficient weight matrix model is build up to get accuracy weight, and this model can get precision position without abundant redundant observation. Based on angular resection and coordinate transformation, spatial network preliminary computation model can solve approximate parameter without theodolite each aiming angle and scalebar measurement. At last, measurement datum is solved with generalized USMN adjustment model, the solution result shows that the model can solve different instrument and raise the point accuracy.

Key words: USMN adjustment model; laser tracker; constraints equation; observation equation with condition equations; spatial network preliminary computation

First author: FAN Baixing, PhD, associate professor, specializes in the theories and methods of precise Industry and engineering survey. E-mail: fbxhrhr@sina.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, No. 41101446; the Open Research Fund Program of Spacecraft Precision Measurement Laboratory, No. 201402.