引文格式：石林峰,申哲宇,郝宗泽,等. 优化的L-SAR角反射器坐标测定方法研究[J]. 地理空间信息, 2026, 24(2):20-24. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2026.02.005

优化的L-SAR角反射器坐标测定方法研究

石林峰[1]，申哲宇[2]，郝宗泽[1]，郑文科[1]，商永杰[1]，张建华[1]，贺勤辉[1]
（1. 自然资源部第一大地测量队，陕西 西安 710054；2. 河南理工大学，河南 焦作 454000）

摘　要：获取L-SAR卫星地面角反射器（corner reflector，CR）参考点的已有测量方法，外场工作量大，流程相对繁琐，作业周期长，不利于L-SAR卫星业务化检校的开展。对此，提出一种优化的L-SAR卫星CR参考点坐标测定方法，该方法仅通过一次野外测绘，即可连续获取卫星CR参考点的坐标成果。通过验证和分析，坐标转换精度均值能够控制在5 mm以内。实验结果表明：该方法能够保证CR参考点测量精度，验证了该方法的有效性和可行性。

关键词：几何检校；控制数据成果；归心元素计算模型；坐标转换模型
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）02-0020-05

Research on L-SAR Corner Reflector Coordinate Measurement Optimized Method

SHI Linfeng[1], SHEN Zheyu[2], HAO Zongze[1], ZHENG Wenke[1], SHANG Yongjie[1], ZHANG Jianhua[1], HE Qinhui[1]
(1. The First Geodetic Surveying Brigade of MNR, Xi'an 710054, China;
2. Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: The existing measurement methods for obtaining the corner reflector (CR) reference points of L-SAR satellite require a large amount of field work, a relatively cumbersome process, and long operation cycles, which is not conducive to the development of L-SAR satellite business calibration. Therefore, we proposed an optimized measurement method for the coordinates of L-SAR satellite CR reference points. This method can continuously obtain the coordinate results of satellite CR reference point through only one field survey. Through verification and analysis, the average accuracy of coordinate transformation could be controlled within 5 mm. The experimental results show that this method can ensure the measurement accuracy of CR reference points, which can verify its effectiveness and feasibility.

Key words: geometric calibration, control data, calculation model of centering elements, coordinate transformation model

“陆探一号”是我国首型民用L波段SAR卫星，其相关检校测量暂时没有现成的方法可以借鉴参考[1-5]。目前，SAR卫星几何检校获取地面高精度控制数据常用的是布设角反射器（corner reflector,CR）法，常见的CR以可移动式或者固定式居多（不可变换姿态），我国L-SAR检校使用的是带有伺服云台的固定位置的CR，其利用伺服云台给高精度CR提供物理支撑，通过伺服云台水平和俯仰旋转调节CR反射面的空间指向，使其指向星载SAR运动轨迹。每次卫星过境前，技术人员根据卫星轨道参数，提前计算出CR伺服云台的最佳检校姿态（即CR伺服云台的水平和俯仰角度），通过远程控制口令使CR伺服云台旋转到特定姿态，等卫星过境后，通过测绘手段获取CR特定姿态下参考点的高精度大地坐标成果，该坐标成果作为卫星在轨标定的重要依据，因此参考点的坐标测定是我国L-SAR卫星在轨几何检校的关键环节[6-7]。

本文提出一种优化的L-SAR卫星CR参考点坐标测定方法，该方法仅需对CR上若干特征点进行一次野外观测，通过归心元素计算模型求解出其大地坐标，再通过优化的三维基准转换模型求得CR特征点在大地坐标系和自定义坐标系之间的转换参数。后续根据卫星检校需要，CR姿态变换后，可不再进行野外测绘，只需利用CR姿态变换后参考点在自定义坐标系中的坐标和已求解出的转换参数，即可获得CR姿态变换后参考点的大地坐标[8-15]。

1　原理和方法

本实验在CR上选取若干个特征点 P （如图1中 $P0-P3$ ）作为待测点。CR周边埋设3个局域网控制点，分别为A点、B点和C点，局域网控制点分布情况如图1所示。

本实验用到两套坐标系，分别为2000国家大地坐标系和自定义坐标系。实验的基本流程下图2。

为验证本文方法的可行性，在内蒙古某地埋设3个固定式CR点（编号分别假定为J01、J02、J03）进行

第一作者简介：石林峰（1990—），工程师，研究方向为大地测量与精密工程测量，E-mail：1135390389@qq.com。

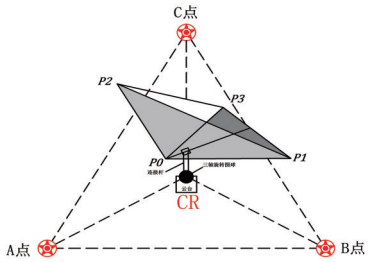


图1　局域网控制点分布示意图

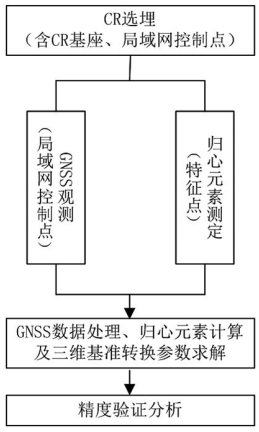


图2　技术流程图

相关实验验证。

外场使用全站仪，对J01、J02、J03三个角反射器上的特征点按照归心测量的方法进行观测，每个角反射器上分别测得 $P0-P3$ 共计4个特征点的坐标。以J01角反射器为例，4个特征点分别命名为J01-$P0$、J01-$P1$、……、J01-$P3$，角反射器J02和J03上的特征点命名依此类推。

1.1　局域网控制点布测

根据L-SAR卫星几何检校任务需要，实验选定内蒙古某地为检校场地，点位选埋工作包括两部分，分别为：CR选埋和局域网控制点选埋。勘选点位时需考虑以下因素影响：点间距适中，避免强磁场干扰，地势尽量平坦，无遮挡等。

按照C级网点的精度要求对局域网控制点进行观测，观测采用基于GNSS连续运行基准站的观测模式，对同一角反射器的控制点位进行同步观测。

数据处理采用美国麻省理工学院（MIT）的GAMIT/GLOBK软件的最新版本。卫星轨道采用IGS精密星历，按照同步观测情况，同时采用Auto Clean周跳自动修复技术，进行周跳剔除与修复，以获取精确的基线解算结果。起算数据采用国际IGS跟踪站和国家CORS站等数据成果。

1.2　算法模型优化

1.2.1　归心元素计算模型

如图3所示开展归心测量，即假设A、B点为已知点，P 点为待测特征点。按照三等三角测量的要求观测水平角 γ_1；用电磁波测距仪，得到AP间的距离 S_{AP}；用全站仪采用电磁波测距高程导线方法测出PA间的高差 h_{AP}，即可根据观测值计算出 P 点的归心元素[18]（即A、P点间的在2000国家大地坐标系下的坐标差）。

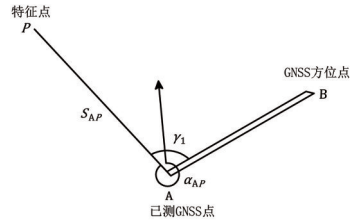


图3　归心元素观测示意图

已知A、B 2点的2000国家大地坐标系中空间直角坐标分别为 X_A、Y_A、Z_A 与 X_B、Y_B、Z_B，以A点坐标为原点，按公式（1）求得B点在A点站心坐标系中的站心地平坐标：

$$\begin{bmatrix} N_B \\ E_B \\ U_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B_A \cos L_A & -\sin B_A \sin L_A & \cos B_A \\ -\sin L_A & \cos L_A & 0 \\ \cos B_A \cos L_A & \cos B_A \sin L_A & \sin B_A \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} X_B - X_A \\ Y_B - Y_A \\ Z_B - Z_A \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中，B_A 为A点在2000国家大地坐标系下的大地纬度；L_A 为A点在2000国家大地坐标系下的大地经度。

1）AB间的大地方位角：

$$A = \arctan\left(E_B / N_B\right) \tag{2}$$

由于arctan( )函数的取值范围为（-90°，90°），而大地方位角的取值范围为[0°，360°），还需判断其所在象限。

当 $N_B > 0$ 且 $E_B > 0$ 时，$A_{AB} = A$；

当 $N_B > 0$ 且 $E_B < 0$ 时，$A_{AB} = 360° + A$；

当 $N_B < 0$ 时，$A_{AB} = 180° + A$。

2）AP间的大地方位角：

$$A_{AP} = A_{AB} + \left(360° - \gamma_1\right) \tag{3}$$

此即为归心方位角。注意 γ_1 应沿逆时针方向从已知方位角量测。

3）PA间的大地方位角：

$$A_{PA} = A_{AP} - 180° = A_{AB} + \left(180° - \gamma_1\right) \tag{4}$$

4）P 在A点站心坐标系中的坐标：

$$\begin{cases} N_P = \sqrt{S_{AP}^2 - \Delta h_{AP}^2} \times \cos A_{AP} \\ E_P = \sqrt{S_{AP}^2 - \Delta h_{AP}^2} \times \sin A_{AP} \\ U_P = \Delta h_{AP} = h_{AP} \left(\text{A点高于}P\text{点时取正，反之取负}\right) \end{cases} \tag{5}$$

用类似的公式和方法，可求得 P 在以B点站心坐标系中坐标。

5）再反用公式（1），即可得到 P 点的空间直角坐标（X_P、Y_P、Z_P）。

以A点站心坐标系，得到 P 点的空间直角坐标（X_{P_A}、Y_{P_A}、Z_{P_A}）：

$$\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}-\sin \mathrm{B}_{\mathrm{A}}\cos L_{\mathrm{A}} & -\sin L_{\mathrm{A}} & \cos \mathrm{B}_{\mathrm{A}}\cos L_{\mathrm{A}}\\ -\sin \mathrm{B}_{\mathrm{A}}\sin L_{\mathrm{A}} & \cos L_{\mathrm{A}} & \cos \mathrm{B}_{\mathrm{A}}\sin L_{\mathrm{A}}\\ \cos \mathrm{B}_{\mathrm{A}} & 0 & \sin B_{\mathrm{A}}\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}X_i\\Y_i\\Z_i\end{bmatrix}_{\mathrm{I}}=\begin{bmatrix}\Delta X\\\Delta Y\\\Delta Z\end{bmatrix}+k\begin{bmatrix}\cos\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_Y\\ -\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & \sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\\ \sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_i\\Y_i\\Z_i\end{bmatrix}_{\mathrm{II}} \tag{7}$$

式中，Xi，Yi，Zi 为第 i 点的三维坐标；下标I和II表示2套坐标系，分别为2000国家大地坐标系和自定义坐标系；$\Delta X,\Delta Y,\Delta Z$ 分别为3个平移因子；$k=1+m$，m 为2坐标系间的尺度变换参数；$R_1(\varepsilon_X)R_2(\varepsilon_Y)R_3(\varepsilon_Z)$ 为坐标旋转矩阵，其中 $\varepsilon_X,\varepsilon_Y,\varepsilon_Z$ 为 X、Y、Z 3个坐标轴的旋转角。

$$\begin{bmatrix}X_C\\Y_C\\Z_C\end{bmatrix}_{I}=\begin{bmatrix}\Delta X\\\Delta Y\\\Delta Z\end{bmatrix}+k\begin{bmatrix}\cos\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_Y\\ -\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & \sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\\ \sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_C\\Y_C\\Z_C\end{bmatrix}_{\Pi} \tag{8}$$

求各点对原点的坐标差值，利用公共点的坐标差值求转换参数，即：

$$\begin{bmatrix}X_i-X_C\\Y_i-Y_C\\Z_i-Z_C\end{bmatrix}_{I}=k\begin{bmatrix}\cos\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_Y\\ -\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & \sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\\ \sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & -\sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & \cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X_i-X_C\\Y_i-Y_C\\Z_i-Z_C\end{bmatrix}_{\Pi} \tag{9}$$

上述模型相当于是将2套坐标系的坐标原点移动到求取转换参数的公共点的重心位置，以该重心位置为原点，重建了新转换模型，消去了平移参数。

若设：

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}k\cos\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & k\cos\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & -k\sin\varepsilon_Y\\ -k\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & k\cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & k\sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\\ k\sin\varepsilon_X\sin\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\cos\varepsilon_Z & -k\sin\varepsilon_X\cos\varepsilon_Z+\cos\varepsilon_X\sin\varepsilon_Y\sin\varepsilon_Z & k\cos\varepsilon_X\cos\varepsilon_Y\end{bmatrix},$$

给定至少3个公共点在2套坐标系下的不同坐标，根据上面三维坐标转换模型，则有：

$$\begin{bmatrix}X_1-X_C & X_2-X_C & \cdots & X_n-X_C\\ Y_1-Y_C & Y_2-Y_C & \cdots & Y_n-Y_C\\ Z_1-Z_C & Z_2-Z_C & \cdots & Z_n-Z_C\end{bmatrix}_{I}=T\begin{bmatrix}X_1-X_C & X_2-X_C & \cdots & X_n-X_C\\ Y_1-Y_C & Y_2-Y_C & \cdots & Y_n-Y_C\\ Z_1-Z_C & Z_2-Z_C & \cdots & Z_n-Z_C\end{bmatrix}_{\Pi} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}X_1-X_C & X_2-X_C & \cdots & X_n-X_C\\ Y_1-Y_C & Y_2-Y_C & \cdots & Y_n-Y_C\\ Z_1-Z_C & Z_2-Z_C & \cdots & Z_n-Z_C\end{bmatrix}_{I}\begin{bmatrix}X_1-X_C & X_2-X_C & \cdots & X_n-X_C\\ Y_1-Y_C & Y_2-Y_C & \cdots & Y_n-Y_C\\ Z_1-Z_C & Z_2-Z_C & \cdots & Z_n-Z_C\end{bmatrix}_{\Pi}^{\mathrm{T}}$$
$$\left(\begin{bmatrix}X_1-X_C & X_2-X_C & \cdots & X_n-X_C\\ Y_1-Y_C & Y_2-Y_C & \cdots & Y_n-Y_C\\ Z_1-Z_C & Z_2-Z_C & \cdots & Z_n-Z_C\end{bmatrix}_{\Pi}\begin{bmatrix}X_1-X_C & X_2-X_C & \cdots & X_n-X_C\\ Y_1-Y_C & Y_2-Y_C & \cdots & Y_n-Y_C\\ Z_1-Z_C & Z_2-Z_C & \cdots & Z_n-Z_C\end{bmatrix}_{\Pi}^{\mathrm{T}}\right)^{-1} \tag{11}$$

$\boldsymbol{T}$ 矩阵元素包含了旋转和尺度缩放共同信息，在此可认为尺度缩放系数为1，那么 $\boldsymbol{T}$ 为旋转矩阵，9个矩阵元素为9个旋转参数。将 $\boldsymbol{T}$ 代入式（8），可恢复出3个平移参数。通过这13个参数的基准转换模型，

$$\begin{bmatrix}X_{P_{\mathrm{A}}}\\Y_{P_{\mathrm{A}}}\\Z_{P_{\mathrm{A}}}\end{bmatrix}=\boldsymbol{H}^{\mathrm{T}}\times\begin{bmatrix}N_P\\E_P\\U_P\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}X_{\mathrm{A}}\\Y_{\mathrm{A}}\\Z_{\mathrm{A}}\end{bmatrix} \tag{6}$$

1.2.2 优化的三维基准转换模型

传统的三维坐标转换一般是小角度的，该方法在计算过程中无法满足本试验的需要，因此，本实验数据处理需要解决大旋转角的坐标转换难题，本实验采用以下优化的三维基准转换模型进行参数求解。

对于2个不同的空间直角两坐标系，两者的坐标转换公式可表示为：

N_{B}、E_{B}、U_{B} 为B点在A点站心坐标系中的站心地平坐标。

设原点坐标分别为 $X_C=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}X_i;\ Y_C=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Y;_i$ $Z_C=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}Z_i$，则有：

进而推算非公共点转换后的坐标。

2　实验及结果分析

2.1　归心元素数据处理分析

本实验对每个CR的4个特征点位进行优化方法与传统方法所计算的坐标进行比对分析，得出优化方法和传统方法所计算所得的CR特征点坐标在3个维度上差值绝对值最大分别为：0.004 6、0.003 0、0.004 1 m，均小于5 mm，精度可以满足试验要求；绝对值最小分别为：0.000 2、0.001 0、0.000 9 m；差值绝对值的均值分别为：0.001 4、0.002 3、0.002 7 m。综上数据表明：优化方法所求的CR坐标成果数据同样是可靠的。

2.2　三维基准转换数据分析

为了进一步验证本文提出的三维基准转换模型的精度，本文从模拟实验精度验证和工程应用实例精度分析2个方面，进一步证明其可靠性。

2.2.1　模型精度验证

不考虑仪器观测误差前提下，使用AutoCAD，按照标准尺寸绘制出角反射器的3D模型。CAD模型旋转前，在角反射器的每个面上随机选取3个点（命名为S1－S12），与4个顶点共组成16个点的坐标对，查看并记录转换前CAD中16个点位的三维坐标值属性；将模型在CAD中进行平移和大角度的旋转操作，假定平移参数为（4，2，3），3个旋转角分别为30°、60°、45°，得到旋转后的CAD模型，查看并采集该16个点位的三维坐标值。这样可得到16个点位坐标转换前后的2套真值坐标，其可作为转换模型精度的验证数据。

选取16个点中的任意4个点作为模拟实验的公共点，分别求取转换参数，然后使用剩余的12点作为检核点进行转换模型精度验证，共有1 820种组合可能。根据检核点的模型转换坐标与已知坐标按公式 $m=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i^2+\Delta y_i^2+\Delta z_i^2)/n}$（$n$为点数）来计算中误差，作为外符合精度评定指标。1 820种组合的中误差大小区间分布情况如图4所示。

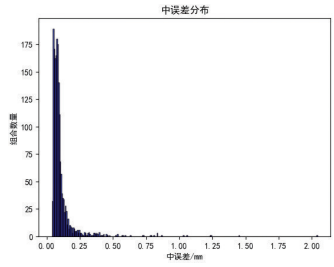


图4　中误差分布

通过以上模型精度验证实验，发现最差组合P2–S2–S6–S10的中误差为2.04 mm，检核点的单分量最大残差均小于3.00 mm。绝大多数组合的中误差都在0.50 mm以内，中误差的均值为0.11 mm，说明了该转换模型的高可靠性。1 820种计算组合的中误差分布见图5，精度最差组合P2–S2–S6–S10的转换参数求解结果见表1，该组合检核点残差统计见表2。

表1　模型转换参数

	平移参数/m	旋转矩阵	尺度	检核点外符合精度/mm
参数	4.000 360 89 1.999 215 17 2.999 243 17	0.354 081 64　−0.917 983 73　−0.177 686 11 0.352 285 85　0.304 888 23　−0.881 845 16 0.864 857 17　0.248 732 42　0.434 968 02	1	2.041 2

表2　最差组合三维坐标残差统计

点号	转换后坐标/m			转换后坐标残差/mm			备注
	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	
P3	3.242 7	2.467 4	3.878 3	1.259 5	−2.822 0	−2.684 3	检核点
P2	3.574 4	0.447 3	3.349 2	−1.269 6	2.948 6	2.849 1	检核点
P1	5.190 6	1.820 4	3.350 5	0.021 0	0.005 2	0.005 5	公共点
P0	3.841 0	1.770 1	2.696 8	0.059 6	−0.083 7	−0.102 9	检核点
S1	3.839 0	1.531 9	3.547 2	−0.062 0	0.090 5	0.054 1	检核点
S2	4.647 1	1.726 6	3.434 7	−0.015 2	−0.003 8	−0.004 0	公共点
S3	3.671 8	1.064 8	3.472 3	−0.617 9	1.281 2	1.286 2	检核点
S4	3.495 0	1.670 5	3.418 8	0.189 8	−0.356 5	−0.366 0	检核点
S5	3.792 7	1.809 8	2.793 3	0.116 1	−0.246 2	−0.251 3	检核点
S6	3.787 2	1.711 6	2.812 3	0.007 0	0.001 7	0.001 8	公共点
S7	3.764 5	2.002 1	3.140 0	0.434 8	−0.963 7	−0.975 1	检核点
S8	3.713 8	2.124 9	3.370 5	0.644 5	−1.452 9	−1.348 2	检核点
S9	4.264 8	1.853 6	3.040 6	0.109 7	−0.353 2	−0.305 0	检核点
S10	4.592 2	1.776 2	3.073 7	−0.022 8	−0.005 6	−0.005 9	公共点
S11	4.075 1	1.371 1	3.053 0	−0.391 6	0.865 1	0.860 2	检核点
S12	4.296 1	1.304 1	3.204 8	−0.462 9	1.095 4	0.985 9	检核点

2.2.2　工程实例分析

为了进一步验证坐标转换模型的可靠性，笔者选取参考文献[12]中的盾构机工程施测数据进行验证分析，本试验选用其中的7个点位的观测数据为：点1、点3、点4、点5、点6、盾首中心点、盾尾中心点。

选取7个点中的任意4个点作为公共点进行转换参数求解，其他3个点作为检核点，共有35种组合。对35种计算组合分别进行内符合精度评定（按公式 $m=\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(\Delta x_i^2+\Delta y_i^2+\Delta z_i^2)/(n-1)}$（$n$为点数）来计算中误差，作为内符合精度评定指标）和外符合精度评定。经计算，内符合精度的中误差最大为1.16 mm，最小为0.01 m，均值为0.47 mm，由此可见，模型的内附合精度比较好。外附合精度的中误差最大值为

15.15 mm，最小值为0.24 mm，均值为3.24 mm，35种组合的中误差大小区间分布情况如下图5所示。

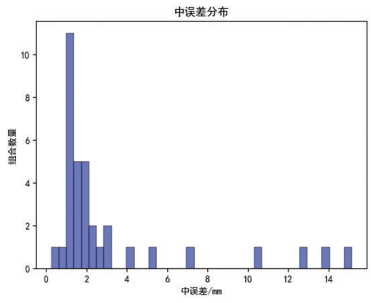


图5 中误差分布

以上35个组合中，外附合精度最大的组合是（点3、点4、点5、点6），中误差为15.15 mm。此组合转换参数见表3，残差统计见表4。由表4可以看出，该计算组合的 x 、 y 、 z 三个方向上的残差最大值为盾首中心点的，3个方向上的残差分别为12.88、9.03、10.94 mm，该点位于模型的边缘。本组合中误差较大原因分析：这与模型转换使用的公共点的空间分布有关，该组合公共点均位于盾构机内侧，检核点位于外侧，空间分布非最优，因此使用本文方法进行坐标转换时，建议公共点优先选取模型外侧点位。

表3 模型转换参数

	平移参数/m	旋转矩阵	尺度	检核点外符合精度/mm
参数	1 000.019 875 95 532.014 326 69 798.016 639 38	1.002 907 98 0.016 472 69 −0.189 540 40 −0.014 361 34 1.000 048 68 −0.997 583 28 0.193 130 45 0.998 679 13 1.000 825 96	1	15.15

表4 最差组合三维坐标残差统计

点号	转换后坐标/m			转换后坐标残差/mm			备注
	X	Y	Z	ΔX	ΔY	ΔZ	
1	993.468 2	523.339 7	785.798 3	−1.097 1	−0.735 7	−0.951 1	检核点
3	993.888 9	523.071 6	785.645 0	0.076 0	0.065 7	0.062 1	公共点
4	993.904 4	543.180 1	805.056 9	−0.036 7	−0.031 7	−0.030 0	公共点
5	993.988 4	543.311 9	804.491 9	−0.338 0	−0.292 2	−0.276 2	公共点
6	994.174 1	542.587 0	804.302 9	0.508 3	0.439 4	0.415 4	公共点
盾首中心	1000.019 9	532.014 3	798.016 6	12.875 9	9.026 7	10.939 4	检核点
盾尾中心	991.479 1	532.136 6	796.371 9	−11.988 4	−8.472 2	−10.159 5	检核点

综上所述，利用优化后的外场检校测量方法，从流程上规范了L-SAR卫星的外场检校测量，使检校测量实现标准化、流程化，并通过优化的三维基准转换的坐标模型实现高精度、大旋转角的内、外场坐标转换，经过工程实例的验证分析：坐标转换外附合精度均值为3.24 mm，可以控制在5 mm以内，能够满足实验要求。

3 结 语

本文针对现阶段L-SAR卫星CR参考点坐标测定方法存在的问题，提出一种优化的坐标测定方法。优化后的方法仅需通过一次外场实验即可持续获取CR参考点的高精度2000国家大地坐标，坐标转换精度在能够满足实验要求的同时，也缩短了作业周期，提高了检校的时效性，该方法在L-SAR卫星业务化检校中具有一定的推广应用价值。

参考文献

[1] 李涛,唐新明,李世金,等. L波段差分干涉SAR卫星基础形变产品分类[J]. 测绘学报,2023,52(5):770-779

[2] 李涛,唐新明,高小明,等. SAR卫星业务化地形测绘能力分析与展望[J]. 测绘学报,2021,50(7):891-904

[3] Shimada M, Isoguchi O, Tadonot,et al. PAL-sar Radiometric and Geometric Calibration[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2009,47(12):3915-3932

[4] 许耀宗. 基于国产L波段差分干涉SAR影像的矿区地表形变监测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2023

[5] 李文浩. L波段差分干涉SAR卫星远近波位联合基线检校技术研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2023

[6] 翁寅侃. SAR角反射器的优化设计及其应用[D]. 武汉:武汉大学,2017

[7] 丁刘建. 星载SAR影像高精度几何区域网平差方法研究[D]. 青岛:山东科技大学,2020

[8] 李征航,黄劲松. GPS测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社,2005

[9] 沈云中,胡雷鸣,李博峰. Bursa模型用于局部区域坐标变换的病态问题及其解法[J]. 测绘学报,2006,49(2):95-98

[10] 申仲舒,项谦和,董思学,等. 广义整体最小二乘粗差探测的

（下转第29页）