

一种十表冗余激光陀螺捷联惯组标定方法研究

邵慧超^{1,2}, 严恭敏³, 陈 珑³, 张 橙^{1,4}

1. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074
2. 立得空间信息技术股份有限公司, 武汉 430223
3. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072
4. 武汉普惠海洋光电技术有限公司, 武汉 430205

摘 要 针对十表冗余激光陀螺三自捷联惯组(包含5只陀螺和5只加速度计)的标定问题, 推导给出了标定模型以及标定方案。将十表冗余惯组划分为直表 $X\backslash Y\backslash Z$ 和斜表 $S\backslash T$ 两组, 直表采用系统级标定方法, 建立关于标定误差模型的状态方程, 以导航速度误差作为量测, 通过 Kalman 滤波估计标定误差参数; 以直表标定结果作为参考, 进行斜表的分立式标定, 分别建立了加速度计、陀螺标度系数和陀螺漂移的标定模型。最后, 结合 19 位置系统级标定方法和分立式标定方法完成了十表冗余激光捷联惯组标定, 结果显示标定结果正确, 分析了标定误差特性。

关键词 冗余捷联惯组; 系统级标定; 分立式标定; Kalman 滤波

中图分类号: V249.3

文献标识码: A

文章编号: 1006-3242(2024)05-0009-06

Calibration Research on a 10-Axis Laser Gyro Redundant Strapdown Inertial Measurement Unit

SHAO Huichao^{1,2}, YAN Gongmin³, CHEN Long³, ZHANG Cheng^{1,4}

1. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China
2. Leader Spatial Information Tech. Ltd. Com., Wuhan 430223, China
3. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China
4. Wuhan Apoocean Technology Co. Ltd., Wuhan 430205, China

Abstract According to calibration problem of ten redundant laser gyroscopes 'three-autonomy' strapdown inertial measurement units, A calibration model and calibration scheme are deduced, which includes five-axis gyros and five-axis accelerometers. The ten-axis redundant inertial measurement unit is divided into two groups known as straight assemble $X\backslash Y\backslash Z$ and oblique assemble $S\backslash T$. A system level calibration method is adopted for the straight assemble, by establishing a state equation about the calibration error model, taking navigation speed error as the measurement, and estimating the calibration error parameters through Kalman filtering. Using the calibration results of the straight assemble as reference, separate calibration models are established for the accelerometer, gyros scale coefficient and gyro bias. Finally, the calibration of ten re-

收稿日期: 2024-04-17

作者简介: 邵慧超(1980-), 男, 高级工程师, 主要从事高精度北斗定位、惯性导航、北斗/惯性组合导航和机器人多源导航定位等领域研究。

引用格式: 邵慧超, 严恭敏, 陈珑, 等. 一种十表冗余激光陀螺捷联惯组标定方法研究[J]. 航天控制, 2024, 42(5): 9-14.

SHAO Huichao, YAN Gongmin, CHEN Long, et al. Calibration Research on a 10-Axis Laser Gyro Redundant Strapdown Inertial Measurement Unit[J]. Aerospace Control, 2024, 42(5): 9-14.

dundant laser strapdown inertial units is verified by combining the 19-position system-level calibration method with the discrete calibration method. The calibration results are correct and the characteristics of the calibration errors are analyzed.

Key words Redundant strapdown inertial measurement unit; System-level calibration; Discrete calibration; Kalman filtering

0 引 言

惯性导航系统(INS)自主性强,能够通过测量得到的角速度和视加速度信息确定航行器的姿态、速度和位置,是航行器制导和控制的关键设备^[1]。惯性导航系统在航空、航天和航海等军民领域应用广泛,一些特殊的应用场景要求导航系统具备非常高的可靠性^[2-3]。除了采用惯性、卫星、天文、多普勒和图像等异构多源信息融合组合导航系统^[4-5],多惯导系统同构冗余^[6]外,多表冗余捷联惯组(RSIMU, Redundant strapdown inertial measurement unit)技术也是提高惯导系统可靠性的一种有效方法^[7-10]。在RSIMU中,通常包含3只以上的陀螺仪和加速度计,当某些陀螺或加速度计出现故障失效后,利用剩余工作正常的不少于3只陀螺和3只加速度计,仍然能够组成一套完整的惯性导航解算系统,完成导航任务。

捷联惯组在出厂之前必须进行标定,常规非冗余惯组的标定方法有分立式标定和系统级标定^[11-12]。分立式标定需要高精度的转台或安装夹具支持;而系统级标定可以降低转台设备的精度要求,转台只需提供粗略的角位置转动,主要起着激励标定误差参数的作用^[13],特别在惯组内存在减振器时,比如激光陀螺捷联惯组,系统级标定具有明显的优势。对于RSIMU,多于3轴的多传感器输出与3轴载体系角速度(或比力,有时也将比力称为视加速度)之间不存在简单的可逆变换关系,难以从整体上建立多传感器标定误差与三维速度量测误差之间的Kalman滤波状态空间模型,文献[14]选用多组传感器进行多次系统级标定方法完成标定。此外,还可以考虑在RSIMU中选取3只陀螺仪和3只加速度计构建一套6表常规捷联惯组,先作系统级标定,再以系统级标定结果作为参考基准,对剩余陀螺仪和加速度计作分立式标定。

针对包含5只陀螺和5只加速度计的十表冗余

激光陀螺三自捷联惯组标定问题,论文建立了标定模型以及标定方案。将10只冗余惯组划分为直表 $X\backslash Y\backslash Z$ 和斜表 $S\backslash T$ 两组,直表采用19位置系统级标定方法,斜表采用分立式标定方法。最后,实测试验验证了标定结果的正确性。

1 十表冗余惯组标定模型

首先,简要给出文中涉及到的坐标系定义:记地心惯性坐标系为 i 系,地球坐标系为 e 系,“东-北-天”导航参考坐标系为 n 系,“右-前-上”载体坐标系为 b 系(简称体系)。此外,虽然多表冗余传感器敏感轴不构成坐标系,但是为了后续叙述方便,记陀螺仪直表敏感轴指向为 g 系,加速度计直表敏感轴指向为 a 系。

在RSIMU中,5只陀螺仪分别记为 $G_i(i=X, Y, Z, S, T)$,5只加速度计分别记为 A_i ,对于陀螺仪和加速度计,记号相同右下标的传感器敏感轴之间原则上是相互平行的。以加速度计为例,5个敏感轴的指向如图1所示,其中 $X\backslash Y\backslash Z$ 在设计上分别沿体系坐标轴方向,相互之间是正交的,统称为直表; $S\backslash T$ 统称为斜表,它们与体系坐标轴有一定的夹角。类似于使用地球上的经、纬度定位描述方法,斜表在 OX^bY^b 赤道平面的投影线与 OX^b 轴的夹角记为经角 α ,斜表与其在 OX^bY^b 平面的投影线之间的夹角称为纬角 β 。

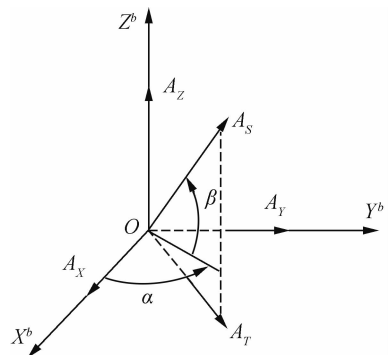


图1 加速度计敏感轴指向

文中所用RSIMU的5只加速度计敏感轴名义设计角度矩阵为

$$\Theta_A = \begin{bmatrix} \Theta_{A,XYZ} \\ \Theta_{A,ST} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_X & \beta_X \\ \alpha_Y & \beta_Y \\ \alpha_Z & \beta_Z \\ \alpha_S & \beta_S \\ \alpha_T & \beta_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 90^\circ & 0 \\ * & 90^\circ \\ 45^\circ & 45^\circ \\ 45^\circ & -45^\circ \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:元素“*”可为任意值。5只陀螺仪的敏感轴名义设计角度矩阵 Θ_C 与加速度计 Θ_A 是一样的。不难看出, S 表在第一卦限,而 T 表在第五卦限。

显然,加速度计各敏感轴在体系下的单位投影向量为

$$\mathbf{u}_{A,i} = [\cos\alpha_i, \cos\beta_i \quad \sin\alpha_i, \cos\beta_i \quad \sin\beta_i] \quad (2)$$

利用投影向量关系式(2),将式(1)的角度矩阵转换为5只加速度计敏感轴与3个体系轴之间关系的测量矩阵为

$$\mathbf{U}_A = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_{A,X} \\ \mathbf{u}_{A,Y} \\ \mathbf{u}_{A,Z} \\ \mathbf{u}_{A,S} \\ \mathbf{u}_{A,T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_{A,XYZ} \\ \mathbf{U}_{A,ST} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & \sqrt{2}/2 \\ 1/2 & 1/2 & -\sqrt{2}/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由测量矩阵式(3)可建立体系3维比力向量 \mathbf{f}_{sf}^b 与加速度计测量5维比力向量 \mathbf{f}_{sf}^a 之间的转换关系为

$$\mathbf{f}_{sf}^a = \mathbf{U}_A \mathbf{f}_{sf}^b \quad (4)$$

若考虑实际加速度计的安装角度误差 $\delta\mathbf{U}_A$ 、标度系数误差 $\delta\mathbf{A}_A$ (为对角矩阵)以及零偏误差 ∇^a ,式(4)变为

$$\tilde{\mathbf{f}}_{sf}^a = (\mathbf{I} + \delta\mathbf{A}_A)(\mathbf{U}_A + \delta\mathbf{U}_A)\mathbf{f}_{sf}^b + \nabla^a \quad (5)$$

式(5)为5只加速度计输入输出模型,物理意义明确,但要直接标定各误差参数比较困难。注意,在角度矩阵中 $\mathbf{U}_A + \delta\mathbf{U}_A$ 每一行的模值应当为1, $|\delta\mathbf{U}_{A,i}|$ 表示 i 加速度计的安装误差角大小。式(5)表明,理想输入 \mathbf{f}_{sf}^b 和测量输出 $\tilde{\mathbf{f}}_{sf}^a$ 之间整体上是呈线性关系的,可简记为

$$\tilde{\mathbf{f}}_{sf}^a = \tilde{\mathbf{K}}_A \mathbf{f}_{sf}^b + \nabla^a \triangleq (\mathbf{K}_A + \delta\mathbf{K}'_A)\mathbf{f}_{sf}^b + \nabla^a \quad (6)$$

式中: $\tilde{\mathbf{K}}_A = (\mathbf{I} + \delta\mathbf{A}_A)(\mathbf{U}_A + \delta\mathbf{U}_A)$ 为标度矩阵, \mathbf{K}_A 为

名义标度矩阵, $\delta\mathbf{K}'_A$ 为标度误差矩阵。

根据式(6),在不少于3只加速度计无故障的情况下(除 $Z\backslash S\backslash T$ 共面外),均可通过提取 $\tilde{\mathbf{f}}_{sf}^a$, $\tilde{\mathbf{K}}_A$ 和 ∇^a 相应行的元素,利用最小二乘法求得体系的比力 \mathbf{f}_{sf}^b ,以 $X\backslash Y\backslash S\backslash T$ 为例,有

$$\mathbf{f}_{sf}^b = (\tilde{\mathbf{K}}_{A,XYST}^T \tilde{\mathbf{K}}_{A,XYST})^{-1} \tilde{\mathbf{K}}_{A,XYST}^T (\tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYST}^a - \nabla_{XYST}^a) \quad (7)$$

由此可见,求解标度矩阵 $\tilde{\mathbf{K}}$ 和零偏 ∇^a 是RSIMU标定的关键。

2 十表冗余惯组标定方法

根据标定模型直接求解标度矩阵 $\tilde{\mathbf{K}}_A$ 和零偏 ∇^a 比较困难,下面采用分步标定方法,先利用系统级标定方法标定6只直表,再利用分立式标定方法标定4只斜表,最后将所有标定结果合成总标度矩阵和零偏,完成十表RSIMU标定。

2.1 直表系统级标定

系统级标定是在已知粗略标定参数的基础上,将标定误差作为状态,建立包含标定误差和导航误差的状态方程,以导航速度误差作为观测量,通过Kalman滤波估计标定误差,再修正标定参数之后获得精确的标定结果^[15]。

根据式(6),以误差表示的3只直表测量模型为

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^a &= (\mathbf{K}_{A,XYZ} + \delta\mathbf{K}'_{A,XYZ})\mathbf{f}_{sf}^b + \nabla_{XYZ}^a = \\ &\mathbf{K}_{A,XYZ}(\mathbf{I} + \mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1}\delta\mathbf{K}'_{A,XYZ})\mathbf{f}_{sf}^b + \\ &\nabla_{XYZ}^a \mathbf{K}_{A,XYZ}(\mathbf{I} + \delta\mathbf{K}_{A,XYZ})\mathbf{f}_{sf}^b + \nabla_{XYZ}^a \quad (8) \end{aligned}$$

式中: $\delta\mathbf{K}_{A,XYZ}$ 为直表的相对标度误差矩阵,它是小量。式(8)经移项整理,可得

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{sf}^b &= (\mathbf{I} + \delta\mathbf{K}_{A,XYZ})^{-1} \mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1} (\tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^a - \nabla_{XYZ}^a) \approx \\ &(\mathbf{I} - \delta\mathbf{K}_{A,XYZ}) \mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^a - \\ &\mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1} \nabla_{XYZ}^a (\mathbf{I} - \delta\mathbf{K}_{A,XYZ}) \mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^a - \nabla_{XYZ}^b \quad (9) \end{aligned}$$

式中:当 $\delta\mathbf{K}_{A,XYZ}$ 未知而 $\nabla_{XYZ}^b = \nabla_{0,XYZ}^b$ 时,可得带误差的体系比力计算值

$$\tilde{\mathbf{f}}_{sf}^b = \mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^a - \nabla_{0,XYZ}^b \quad (10)$$

将式(10)减去式(9),可得比力测量误差为

$$\begin{aligned} \delta \mathbf{f}_{sf,XYZ}^b &= \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^b - \mathbf{f}_{sf,XYZ}^b = \\ &\delta \mathbf{K}_{A,XYZ} \mathbf{K}_{A,XYZ}^{-1} \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^a + \\ &(\nabla_{XYZ}^b - \nabla_{0,XYZ}^b) \delta \mathbf{K}_{A,XYZ} \tilde{\mathbf{f}}_{sf,XYZ}^b + \delta \nabla_{XYZ}^b = \\ &\tilde{\mathbf{f}}_{sf,X}^b \delta \mathbf{K}_{A,X} + \tilde{\mathbf{f}}_{sf,Y}^b \delta \mathbf{K}_{A,Y} + \tilde{\mathbf{f}}_{sf,Z}^b \delta \mathbf{K}_{A,Z} + \delta \nabla_{XYZ}^b \end{aligned} \quad (11)$$

式中: $\delta \mathbf{K}_{A,X}$, $\delta \mathbf{K}_{A,Y}$, $\delta \mathbf{K}_{A,Z}$ 分别为标度误差矩阵 $\delta \mathbf{K}_{A,XYZ}$ 的第 1, 2, 3 列向量。

同理, 不难求得陀螺仪的角速度测量误差为

$$\delta \boldsymbol{\omega}_{ib,XYZ}^b = \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib,X}^b \delta \mathbf{K}_{G,X} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib,Y}^b \delta \mathbf{K}_{G,Y} + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib,Z}^b \delta \mathbf{K}_{G,Z} + \delta \boldsymbol{\varepsilon}_{XYZ}^b \quad (12)$$

式中: $\delta \mathbf{K}_{G,X}$, $\delta \mathbf{K}_{G,Y}$, $\delta \mathbf{K}_{G,Z}$ 分别为陀螺误差矩阵 $\delta \mathbf{K}_{G,XYZ}$ 的第 1, 2, 3 列向量, $\delta \boldsymbol{\varepsilon}_{XYZ}^b$ 为陀螺漂移误差。

选取 27 维状态向量

$$\begin{aligned} \mathbf{X} = &[\boldsymbol{\phi}^T \quad (\delta \mathbf{v}^n)^T \quad (\delta \boldsymbol{\varepsilon}_{XYZ}^b)^T \quad (\delta \nabla_{XYZ}^b)^T \quad (\delta \mathbf{K}_{G,X})^T \\ &(\delta \mathbf{K}_{G,Y})^T \quad (\delta \mathbf{K}_{G,Z})^T \quad (\delta \mathbf{K}_{A,X})^T \quad (\delta \mathbf{K}_{A,YZ})^T]^T \end{aligned} \quad (13)$$

其中: $\boldsymbol{\phi}$ 为惯导失准角误差, $\delta \mathbf{v}^n$ 为速度误差, $\delta \mathbf{K}_{A,YZ}$ 为 $\delta \mathbf{K}_{A,Y}$ 的第 2, 3 分量及 $\delta \mathbf{K}_{A,Z}$ 的第 3 分量构成的 3 维 YZ 加速度计标度误差向量, 其目的是使加速度计的标度误差矩阵为下三角阵, 这是系统级标定中必须满足的约束条件。

建立 Kalman 滤波状态空间模型为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{F}\mathbf{X} + \mathbf{W} \\ \mathbf{Z} = \delta \mathbf{v}^n = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \end{cases} \quad (14)$$

其中: \mathbf{F} , \mathbf{H} 分别为捷联惯导系统误差的系统矩阵和量测矩阵, 具体构造方式可参见文献[1], \mathbf{W} 为过程噪声, 主要包含陀螺仪噪声和加速度计噪声, \mathbf{V} 为速度量测噪声。

2.2 加速度计斜表分立标定

在完成 $X \setminus Y \setminus Z$ 直表系统级标定之后, 便可以直表作为测量参考基准, 为 $S \setminus T$ 斜表提供准确的输入值。以 S 加速度计为例, 由式(6)可提取得到它的输入输出关系为

$$\tilde{\mathbf{f}}_{sf,S}^a = \tilde{\mathbf{K}}_{A,S} \mathbf{f}_{sf}^b + \nabla_S^a = [(\mathbf{f}_{sf}^b)^T \quad 1] \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{K}}_{A,S}^T \\ \nabla_S^a \end{bmatrix} \quad (15)$$

这说明, 通过多位置(至少 4 个)静态测试改变比力激励 \mathbf{f}_{sf}^b , 在每个位置采集一段时间的比力平均值, 建立一组量测方程, 采用最小二乘法即可求得标定参数向量 $\tilde{\mathbf{K}}_{A,S}^T$ 和零偏 ∇_S^a 。

2.3 陀螺仪斜表分立标定

类似于加速度计斜表标定式(15), 但考虑到标定陀螺仪标度系数必须是在角速度转动条件下实现, 转动时间相对比较短, 一般只有 10 s 量级, 如此短时间内陀螺漂移的影响不大, 其初值 $\boldsymbol{\varepsilon}_{0,S}^g$ 可近似为 0, 则有

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib,S}^g - \boldsymbol{\varepsilon}_{0,S}^g = \tilde{\mathbf{K}}_{G,S} \boldsymbol{\omega}_{ib}^b = (\boldsymbol{\omega}_{ib}^b)^T \tilde{\mathbf{K}}_{G,S}^T \quad (16)$$

通过分别绕多轴(至少 3 个)旋转测试, 在每个转动过程中采集一段角速度平均值, 建立一组量测方程, 采用最小二乘法亦可求得标定参数向量 $\tilde{\mathbf{K}}_{G,S}^T$ 。

陀螺漂移标定采用静态测试方法, 需要时间较长, 典型如 20 min 或 1 h。由于陀螺安装向量 $\tilde{\mathbf{K}}_{G,S}^T$ 在前面已经过标定, 因此标定公式(16)可改写为

$$\tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib,S}^g - \tilde{\mathbf{K}}_{G,S} \boldsymbol{\omega}_{ib}^b = \boldsymbol{\varepsilon}_S^g \quad (17)$$

采用一个位置或多个位置陀螺静态测量值取平均的方法, 很容易求得陀螺漂移误差 $\boldsymbol{\varepsilon}_S^g$ 。

当然, 如果初始陀螺漂移较大, 不可忽略, 求得漂移之后还可再次对标度系数进行重新计算。式(16)和(17)可形成迭代算法, 提高计算精度。

3 试验与分析

以某型号带双轴转位机构的十表冗余激光陀螺三自捷联惯组作试验验证, 其中双轴转位机构的外框为俯仰框, 内框为方位框; 在 5 只陀螺中 3 只直表 90# 激光陀螺的标称精度为 0.005 ($^\circ$)/h, 2 只斜表 50# 激光陀螺的标称精度为 0.01 ($^\circ$)/h; 5 只石英挠性摆式加速度计的标称精度均为 50 μg 。

采用 19 位置转动方案^[16]进行直表的系统级标定, 转动过程中角速度设置为 20 ($^\circ$)/s, 静止位置时间约 3 min, 总标定时长约 1 h。在直表 19 位置系统级标定计算完成之后, 重复利用静态位置数据标定斜表加速度计所有参数和斜表陀螺仪漂移, 而利用转动数据计算斜表陀螺仪标度系数。

共做了 10 次标定试验, 各标定参数的均值及标准差统计值参见表 1 和 2。由于标定安装误差大小均为非负值, 不宜采用传统的标准差方式统计误差的波动程度, 以加速度计的安装误差大小 $|\delta \mathbf{U}_{A,i}|$ 为例, 其 N 次试验统计量 δ_0 定义为

$$\delta_0 = \sqrt{\sum_{k=1}^N |\delta \mathbf{U}_{A,i}|_k^2 / N} \quad (18)$$

其中: N 为试验次数, $|\delta \mathbf{U}_{A,i}|_k$ 为第 k 次试验的安装误差大小。式(18)的定义类似于标准差, 只是这里

不需要扣除样本的均值,或者说扣除的均值为0。后面亦将 δ_0 统一称为标准差。

表1 标定结果(均值)

参数	数值		
\tilde{K}_G	0.99982631	0.00000590	-0.00000454
	-0.00000618	0.99989966	-0.00000248
	-0.00000182	-0.00000237	1.00008551
	0.50848256	0.50665791	0.70137267
	0.50817260	0.50434986	-0.70843630
\tilde{K}_A	0.98900665	0	0
	-0.00001060	1.01249576	0
	0.00000598	0.00001880	1.00459325
	0.50598730	0.50278168	0.70046421
	0.50699508	0.50783141	-0.70012363
参数	数值	参数	数值
$\varepsilon^a/((^\circ)/h)$	0.0062		-23.97
	-0.0040		-82.61
	0.0081	$\nabla^a/\mu g$	24.45
	0.0215		-11.67
	-0.0330		-26.63

表2 标定误差(标准差)

参数	数值(1 δ)	参数	数值(1 δ_0)	参数	数值(1 δ)
$\delta A_{G,ii}/ppm$	6.60		1.77		0.0025
	3.19		1.42		0.0018
	4.57	$ \delta U_{G,i} /''$	1.34	$\varepsilon^a/((^\circ)/h)$	0.0032
	8.24		1.37		0.0072
	5.45		2.09		0.0081
$\delta A_{A,ii}/ppm$	6.01		0		4.39
	5.09		1.34		4.56
	7.36	$ \delta U_{A,i} /''$	1.20	$\nabla^a/\mu g$	7.50
	9.73		2.54		10.79
	10.12		2.18		9.17

从表1可以看出,加速度计标度矩阵 \tilde{K}_A 中的直表 $X\backslash Y\backslash Z$ 上三角元素均为0,这是因为系统级标定方法是以 $X\backslash Y\backslash Z$ 加速度计建立标定约束条件的。陀螺标度矩阵 \tilde{K}_A 中的直表 $X\backslash Y\backslash Z$ 前3行近似为单位阵,说明陀螺敏感轴与加速度计对应敏感轴基本相互平行。加速度计和陀螺的斜表 $S\backslash T$ 后2行数值与名义设计值接近。陀螺零偏 ε^a 和加速度计偏值 ∇^a 与标称指标相符,没有明显异常。根据表1和式(7)即可实现任意不少于3只陀螺或加速度计的最小二乘法标定解算。

表2所示标准差代表了10次标定结果之间的离散程度,在陀螺漂移 ε^a 中,斜表 $S\backslash T$ 的数值明显大于

直表 $X\backslash Y\backslash Z$,究其主要原因在于斜表 $S\backslash T$ 采用精度稍差的50#激光陀螺仪。对于加速度计而言,斜表 $S\backslash T$ 的比例系数 $\delta A_{A,ii}$ 、安装误差角 $|\delta U_{A,i}|$ 和偏值 ∇^a 三者的标准差都稍大于直表 $X\backslash Y\backslash Z$ 的相应值,这主要是在19位置系统级标定过程中,只有直表 $X\backslash Y\backslash Z$ 的敏感轴能近似竖直指上或指下方向,最大敏感到 ± 1 g的比力,而斜表 $S\backslash T$ 的敏感轴不能处于竖直状态,其最大比力激励值约为 ± 0.7 g,稍小的比力输入范围决定了相对稍差的斜表标定精度。

4 结 论

针对十表冗余激光陀螺仪三自捷联惯组的标定问题,将标定过程划分为直表系统级标定和斜表分立式标定两个主要步骤。系统级标定方法能够有效避免激光陀螺仪惯组与壳体之间减振器变形的影响,仅需依靠三自惯组的两轴转位机构即可实现自标定,对转位机构的角位置精度要求不高。在完成系统级标定之后,重复利用相同的惯性传感器采样数据进行分立式标定,由于斜表与直表安装在共同的惯组刚性支架上,以直表标定后结果作为参考基准,斜表标定也与减振器变形无关,分立标定过程中同样不需考虑转位机构精度和地球自转补偿的影响,相较于常规分立式标定方法更加简便。最后,利用十表冗余激光陀螺仪三自捷联惯组进行了试验验证,10组标定统计结果表现出了较好的精度一致性。

参 考 文 献

- [1] 严恭敏,翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理(第2版)[M]. 西安:西北工业大学出版社,2023.
- [2] 王彬,申亮亮,邵会兵,等. 高精度多冗余捷联惯组配置优化设计与应用研究[J]. 导航定位与授时, 2019, 6(6):33-40. (WANG Bin, SHEN Liangliang, SHAO Huibing, et al. Research on high-precision RIMU configuration optimization design and application[J]. Navigation Positioning and Timing, 2019, 6(6): 33-40.)
- [3] 罗睿,李鹏,于玲燕. 一种考虑加表不对称误差的冗余惯组标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(2): 114-120. (LUO Rui, LI Peng, YU Lingyan. A calibration method for redundant IMU considering accelerometer asymmetric error[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(2): 114-120.)
- [4] YE W, LI J L, FANG J C, et al. EGP-CDKF for performance improvement of the SINS/GNSS integrated sys-

- tem[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65,(4): 3601-3609.
- [5] YAO Y Q, XU X S, LI Y, et al. A hybrid IMM based INS/DVL integration solution for underwater vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(6): 5459-5470.
- [6] 王林,吴文启,魏国,等. 双航海惯导联合旋转调制协同定位与误差参数估计[J]. 中国惯性技术学报, 2017, 25(5): 599-605. (WANG Lin, WU Wenqi, WEI Guo, et al, Dual marine INS joint rotation and modulation for cooperative positioning and error parameter estimation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2017, 25(5): 599-605.)
- [7] XU B, WEN Z F, ZHANG G Q, et al. A novel fault detection and isolation technology for redundant inertial measurement unit[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72:1-11.
- [8] 赵欣艺,高晓颖,踪华,等. 冗余惯性导航系统信息一致性判断方法[J]. 航天控制,2021,39(3):27-32 + 42. (ZHAO Xinyi, GAO Xiaoying, ZONG Hua, et al. Consistency judgment method of redundant inertial navigation system Information [J]. Aerospace Control, 2021,39(3):27-32 + 42.)
- [9] 孙湘钰. 冗余式捷联惯导系统故障检测与隔离关键技术研究[D]. 哈尔滨. 哈尔滨工程大学,2022. (SUN Xiangyu. Research on the key technology of FDI for redundant strapdown inertial navigation system[D]. Harbin. Harbin Engineering University, 2022.)
- [10] CHENG J H, SUN X Y, LIU P, et al. An improved residual chi-square test fault isolation approach in four-gyro SINS [J]. IEEE Access, 2019, 7: 174400-174411.
- [11] ZHAO G L, TAN M L, GUO Q R, et al. An improved system-level calibration method of strapdown inertial navigation system based on matrix factorization [J]. IEEE Sensors Journal, 2022,22(15):14986-14996.
- [12] DONG C M, REN S Q, CHEN X J, et al. A separated calibration method for inertial measurement units mounted on three-axis turntables[J]. Sensors, 2018, 18(9): 2846.
- [13] ZHU T, REN Y, WANG L F, et al. Self-calibration method for the errors of dual-axis turntable in redundant rotational inertial navigation system[J]. IEEE Sensors Journal, 2023,23(3):2411-2421.
- [14] 李良君,李清华. 十表冗余捷联惯组系统级标定方法[C]// 惯性技术发展动态发展方向研讨会文集. 哈尔滨, 2023, 8. (LI Liangjun, LI Qinghua. System-level calibration method of ten-axis RIMU. [C]// Proceedings of the Symposium on the Dynamic Development Direction of Inertial Technology. Harbin,2023, 8.)
- [15] 严恭敏,李四海,秦永元. 惯性仪器测试与数据分析[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [16] 谢波,秦永元,万彦辉. 激光陀螺捷联惯导系统多位置标定方法[J]. 中国惯性技术学报, 2011,19(2): 157-162 + 169. (XIE Bo, QIN Yongyuan, WAN Yanhui. Multiposition calibration method of laser gyro SINS [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2011, 19(2): 157-162 + 169.)