doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2015.07.005

引用格式:李辉芬,刘冰,刘吉英,等.采用误差传递基函数匹配追踪的测量船误差溯源技术[J].电讯技术,2015,55(7):736-740.[LI Huifen,LIU Bing,LIU Jiying, et al. Errors Tracing of TT&C Ship by Using Error Propagating Function[J]. Telecommunication Engineering,2015,55(7):736-740.]

采用误差传递基函数匹配追踪的测量船误差溯源技术*

李辉芬^{1,***},刘 冰¹,刘吉英²,吴 优³,底丽萍¹

(1.中国卫星海上测控部,江苏 江阴 214431;2.国防科技大学,长沙 410073;3.河海大学 理学院,南京 211100)

摘 要:针对航天测量船外弹道测控系统中影响测控精度的误差源众多、作用机理复杂、测量船现有 方法难以从数据残差中自动辨识误差的难题,在给出外测数据轴系参数误差传递模型的基础上,提 出了基于误差传递基函数开展匹配追踪的测量船误差溯源方法,通过误差的迭代辨识,匹配误差,定 位误差,并准确估计误差值,实现测量船误差的自动识别,提高船载设备误差辨识的效率和精度。仿 真分析结果证实了该方法的正确性和有效性。

关键词:航天测量船;外弹道测量;误差辨识;传递模型;误差抑制;匹配追踪 中图分类号:TP274 文献标志码:A 文章编号:1001-893X(2015)07-0736-05

Errors Tracing of TT&C Ship by Using Error Propagating Function

LI Huifen¹, LIU Bing¹, LIU Jiying², WU You³, DI Liping¹

(1. China Satellite Maritime Tracking and Control Department, Jiangyin 214431, China;

2. National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

3. College of Science, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: A number of problems influence the accuracy of the data measured by exterior ballistic measurement system of space TT&C ship, such as various types of error sources, complicated mechanism of action, and existing ways can't tell the inaccuracy of the residual errors automatically. In order to solve above problems, the error propagating model of the tracking data of axis-systematic is given, and a method for tracing the errors of TT&C ship based on the error propagating function is presented. By iterative identification, the errors are matched, located and estimated. In this way, the errors of the TT&C ship can be identified automatically and the efficiency and accuracy of ship-borne equipment have been improved. The simulation analysis result also proves the correctness and effectiveness of the method.

Key words: space TT&C ship; exterior ballistic measurement; error identification; propagating model; error reduction; matching pursuit

1 引 言

测量船是一个运动的平台,海上测量是在动态 条件下进行的,在船载测量设备跟踪测量目标的同 时,必须对船的位置和姿态进行同步测量,然后对测 量设备获取的测量数据进行船位和船姿等修正,才 能得到精确的测量结果。测量船上安装的惯性导航 系统测定船位和船姿,无线电雷达系统跟踪航天飞 行器,与此同时,辅助设备测量并记录两系统之间的 变形数据,然后采用适当的数学模型,利用变形数据 和惯导数据对雷达测量数据作补偿修正,得到最终 的雷达测量数据结果。经过含有各种误差的船姿、 船位、船体变形数据修正后的弹轨道测量数据,其误

^{*} 收稿日期:2015-04-17;修回日期:2015-05-26 Received date:2015-04-17;Revised date:2015-05-26

^{**} 通讯作者:wylhf@yeah.net Corresponding author:wylhf@yeah.net

第7期

差特性变得非常复杂,既非白噪声,又含有船摇和船 体变形修正剩余误差,船载测控设备的测量数据误 差成分和特性与陆基测站测量数据有较大的不 同^[1]。目前,国内关于陆基测量数据的处理技术已 经比较成熟,精度也相对较高。但船载雷达的跟踪 测量是运动的测站测量运动的目标,其测量精度不 仅与船载外测设备本身的测量精度有关,而且与测 量船船体变形、船体姿态、船位测量精度有关。此 外,船载设备长期在测量船载体运动条件下,设备零 值、部分标校参数也可能在一定范围内出现漂移。 因此,与陆基测量相比,航天测量船测量系统更复 杂,海上测量获取的弹/轨道数据误差来源混入了更 多的误差成分,不只包含目标的模型误差、测量设备 的误差、跟踪误差等常规误差,还包括船姿、船体变 形和船位等引起的误差,作用机理复杂,误差源众 多,对测量数据误差的分离更加困难。如何有效辨 识出影响测量船数据精度的主要误差源,有效修正 降低船载测量设备的误差影响,进而增强隐含在数 据中的设备问题的分析能力,是必须研究和解决的 问题。

误差溯源是一种新概念,根据总的误差,在全系 统精度理论的基础上,采用分析方法将其分解为各 单项误差成分,并进一步追溯到系统内部产生该项 误差的母体组成单元或组成件。测量船误差溯源是 指获得弹/轨道参数后,根据测元残差分析寻找产生 异常数据的根源,目前有时间序列分析、多分辨分 析^[2]、时频分析^[3]、神经网络方法^[4]等。文献[5]对 复杂系统的分级误差模型的建立和传递函数的收敛 性等问题进行了详细阐述。文献[6]基于误差间的 相关性与传递特征,提出了以传递函数为基础的误 差传递模型,将复杂系统划分为若干个子系统,分析 各子系统在观测目标误差中的主次作用,分析得出 引起观测误差灵敏度较高的子系统,进而实现误差 溯源、分析和控制。影响测量船精度的误差源众多, 作用机理复杂,本文在推导建立误差传递模型的基 础上,提出了基于误差传递基函数匹配追踪、迭代辨 识测元误差的溯源思路,并进行了有效的尝试。

2 误差传递函数

误差的分析与控制在实际工程应用中十分重要,如何将一个复杂的系统划分成相互独立的若干 个子系统,进而确定各个子系统的影响,是复杂系统 误差分析中需解决的问题。进行误差辨识首先需对 误差源的物理机理进行分析,根据测量设备的系统 误差模型,分析误差源对测量数据的影响。

测量船主要误差源包括外测设备测量误差、船 姿、船位、船舶变形误差和其他误差。外测设备测量 误差包括零值误差、天线座方位转台不水平误差、轴 系不正交误差、光电轴不匹配误差、动态滞后等。船 载雷达使用的轴系误差修正公式如式(1)和式(2):

$$\Delta A = A_0 + \beta_m \cdot \sin(A_c - A_m) \cdot \tan E_c +$$

$$\delta_m \cdot \tan E_c + S_b \cdot \sec E_c + C_s \cdot \sec E_c, \qquad (1)$$

 $\Delta E = E_0 + \beta_m \cdot \cos(A_c - A_m) + C_e + \Delta E_g \cdot \cos E_e \circ$ (2) 式中, β_m 为大盘不水平最大倾斜量, A_m 为大盘不水 平最大倾斜方向, δ_m 为俯仰轴和方位轴不正交, S_b 为俯仰轴和光轴不正交, C_s 为大天线光电轴横向不 匹配, C_e 为大天线光电轴纵向不匹配, ΔE_g 为重力 下垂量。

测量坐标系、惯导甲板坐标系、惯导地平坐标系 是测量船的3个专用坐标系。从测量坐标系向惯导 地平坐标系转换时,首先修正船体变形量,然后将测 量系的坐标原点平移到惯导甲板坐标系的坐标原点 后,再修正船摇量^[7]。坐标变换公式如式(3):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{g} = B_{c} \cdot \begin{bmatrix} B_{b} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{c} + \begin{pmatrix} x_{0} \\ y_{0} \\ z_{0} \end{bmatrix} \circ \qquad (3)$$

式中,

	$\cos\varphi_i\cos K_i$	$-\cos\theta_i\sin\varphi_i\cos K_i-\sin\theta_i\sin K_i$	$-\cos\theta_i\sin K_i + \sin\theta_i\sin\varphi_i\cos K_i$
$B_i =$	$\sin \varphi_i$	$\cos heta_i \cos \! arphi_i$	$-\cos \varphi_i \sin \theta_i$
	$\cos \varphi_i \sin K_i$	$\sin\theta_i \cos K_i - \cos\theta_i \sin\varphi_i \sin K_i$	$\cos\theta_i \cos K_i + \sin\theta_i \sin\varphi_i \sin K_i$
		(i=c,b)	

从测量船坐标变换公式可以看出,船舶摇摆 (K_c , ψ_c , θ_c)、船体变形(K_b , ψ_b , θ_b)对外测数据均有 影响。而船载设备测量数据分析、误差比对及精度 鉴定工作均在惯导地平系进行,在数据处理中要将 数据从测量系转换至惯导地平系,坐标转换时要修 正船舶摇摆和船体变形,所以海上测量数据各项系 统误差修正参数对观测资料的影响在经过船姿修正 后会有显著变化。有别于陆站测量设备的传递规 律,本文推导建立了船载外测设备各测元误差传递 模型,如式(4)~(6):

$$\Delta R' \approx \Delta R, \qquad (4)$$

$$\Delta E' \approx D_1 \Delta E + D_2 \Delta A , \qquad (5)$$

$$\Delta A' \approx D_3 \Delta E + D_4 \Delta A_{\circ} \tag{6}$$

式中,

$$D_{1} = \frac{\frac{\partial F_{2}}{\partial E}(F_{1}^{2} + F_{3}^{2}) - F_{2}\left(F_{1}\frac{\partial F_{1}}{\partial E} + F_{3}\frac{\partial F_{3}}{\partial E}\right)}{(F_{1}^{2} + F_{3}^{2})^{1/2}},$$

$$D_{2} = \frac{\frac{\partial F_{2}}{\partial A}(F_{1}^{2} + F_{3}^{2}) - F_{2}\left(F_{1}\frac{\partial F_{1}}{\partial A} + F_{3}\frac{\partial F_{3}}{\partial A}\right)}{(F_{1}^{2} + F_{3}^{2})^{1/2}}$$

$$D_{3} = \frac{\frac{\partial F_{3}}{\partial E}F_{1} - \frac{\partial F_{1}}{\partial E}F_{3}}{F_{1}^{2} + F_{3}^{2}},$$

$$D_{4} = \frac{\frac{\partial F_{2}}{\partial A}F_{1} - \frac{\partial F_{1}}{\partial A}F_{3}}{F_{1}^{2} + F_{3}^{2}},$$

$$\begin{pmatrix} F_{1} \\ F_{2} \\ F_{3} \end{pmatrix} = B_{c}B_{b}\begin{pmatrix} \cos E \cos A \\ \sin E \\ \cos E \sin A \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_{1}}{\partial E} \\ \frac{\partial F_{2}}{\partial E} \\ \frac{\partial F_{3}}{\partial E} \end{pmatrix} = B_{c}B_{b}\begin{pmatrix} -\sin E \cos A \\ \cos E \\ -\sin E \sin A \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial F_{1}}{\partial A} \\ \frac{\partial F_{3}}{\partial A} \\ \frac{\partial F_{3}}{\partial A} \end{pmatrix} = B_{c}B_{b}\begin{pmatrix} -\cos E \sin A \\ 0 \\ \cos E \cos A \end{pmatrix},$$

式中,俯仰角 E 和方位角 A 为外测数据, B_e 为船摇 欧拉角旋转矩阵, B_b 为测量设备到惯导之间的变形 欧拉角旋转矩阵, $\Delta R_\lambda E_\lambda A$ 为船载外测设备测量 数据系统误差修正后各参数对测量系下 $R_\lambda E_\lambda A$ 数 据影响的误差。

分析发现,海上测量数据俯仰角误差和方位角 误差对斜距基本没有影响,测量设备的斜距误差与 经船姿修正后的斜距误差相当;斜距误差对俯仰角 和方位角也基本不产生影响,而测量设备俯仰角误 差和方位角误差对修正后的俯仰角、方位角均有影 响,结果是非线性的,海上测量数据误差传递公式与 船舶摇摆、船体变形、俯仰角和方位角本身都有关。

3 工作原理

误差溯源是根据测元残差分析寻找数据出现异常的根源,误差溯源方法从数学上可表示为求解 y= **Φx**的过程,其中 **Φ**为 m×n 维的误差源矩阵,即 **Φ**的每一列对应于一种设备误差源,该误差源通过误差传递公式计算得到各测量时刻惯导地平系下测量数据的误差值;**Φ**的每一行为各误差源在同一测量 时刻的误差值;y 为 m×1 维向量,表示惯导地平系 下测量数据残差;x 为 n×1 维向量,表示误差系数, 即向量 x 的每一个元素对应于一项设备误差源,若 该元素为零,则说明该次任务中没有这项误差;若非 零,则说明该次任务中有这项误差,则其大小就是元 素的值;x 的初值为零向量。

将惯导地平系下测量数据残差 y,在误差源矩 阵 Φ 上投影,即计算 $c_s = \Phi^T \cdot r_s$,其中 c_s 为 $n \times 1$ 维 的投影系数向量,下标 s 为迭代次数且 $r_0 = y$;找到投 影系数 c_s 中元素的最大值,记该最大值所在位置的 索引为 j,并入原指标集 I_{s-1} ,即得到新指标集 $I_s =$ $\{j\} \cup I_{s-1}$,其中指标集的初值 $I_0 = \phi$;从误差源矩阵 Φ 中按指标集 I_s 索引列向量,得到新的矩阵 Φ_{I_s} ,在此基 础上进行最小二乘估计,即 $x_s = (\Phi_{I_s}^T \Phi_{I_s})^{-1} \Phi_{I_s}^T y$,令 $r_{s+1} = r_s - \Phi_s x_s$,至此,完成一次迭代。

设总迭代次数为 S,迭代产生的序列 x_0, x_1, \cdots , x_s, \cdots, x_s 逐步逼近真实值的误差系数 x,逐步识别 并扣除测量残差 y 中指标集 I_s 对应的误差源,扣除 后的残差序列为 $r_0, r_1, \cdots, r_s, \cdots, r_s$,同时产生的指 标集序列 $I_0, I_1, \cdots, I_s, \cdots, I_s$ 标记了误差系数中的非 零元素的位置,给出了该测量数据中存在的各项误 差。得到的 x_s 中非零元素的位置对应的设备误差 源引起了测量数据中的误差,且 x_s 中非零元素的数 值表示了该设备误差的大小。

4 处理流程

将外测数据经预处理、变形修正和船摇修正后转至惯导地平系,得到极坐标数据 $(R,E,A)_{g}$,将 $(R,E,A)_{g}$ 与标准数据作差,得到惯导地平系下测量数据残差y,y为 $m\times1$ 维向量。进行误差溯源,即求解 $y=\Phi x$,这是一个迭代过程,如图1所示,具体步骤如下:

步骤1:构造误差源矩阵 ϕ ,其为一个 $m \times n$ 维的 矩阵,每一列对应于一种设备误差源,该误差源通过 误差传递公式计算得到各测量时刻惯导地平系下测 量数据的误差值; ϕ 的每一行为各误差源在同一测 量时刻的误差值;x为 $n \times 1$ 维向量,表示误差系数, 即向量x的每一个元素对应于一项设备误差源,若 该元素为零,则说明该测量数据中没有这项误差;若 非零,则说明该测量数据中有该项误差,其大小就是 元素的值。目前,船载外测设备关注的主要误差源

· 738 ·

斜方向 A_m 、俯仰轴和方位轴不正交 δ_m 、俯仰轴和光轴不正交 S_b 、大天线光电轴横向不匹配 C_s 、大天线 光电轴纵向不匹配 C_e 、俯仰动态滞后 ΔE_z 、方位动态滞后 ΔA_z 和重力下垂量 ΔE_e ;

步骤2:取初值 $x_0 = 0, r_0 = y, I_0$ 为空集, s = 1; 在 第 s 次迭代中, 将 r_s 在误差源矩阵 Φ 上投影, 即计 算 $c_s = \Phi^{T} \cdot r_s$, 其中 c_s 为 $n \times 1$ 维的投影系数向量;

步骤3:找到投影系数*c*,中元素的最大值,记该 最大值所在位置的索引为*j*,并入原指标集*I*_{s-1},即得 到新指标集*I*_s={*j*} ∪*I*_{s-1};

步骤4:从误差源矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$ 中选出指标集 I_s 对应的那些列组成子矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_L$,计算

 $(\boldsymbol{x}_{s})_{L} = (\boldsymbol{\Phi}_{L}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\Phi}_{L})^{-1} \boldsymbol{\Phi}_{L}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{y},$

 \boldsymbol{x}_{s} 中 \boldsymbol{I}_{s} 对应的分量由 $(\boldsymbol{x}_{s})_{L}$ 得到,其余分量为零;

步骤5:进行残差更新 $r_{s+1}=r_s-\Phi_s x_s$;

步骤 6:若还没有达到停止准则(如 s=S,其中 S为事先设定迭代次数;或者 r_{s+1} 小于事先设定的阈 值),则令 s=s+1并回到步骤 2,否则 $\hat{x}_s=x_s$ 即为最 终结果;

步骤 7:输出误差系数 \hat{x}_{s}, \hat{x}_{s} 对应的非零分量即 各项误差的值。



图 1 误差溯源流程图 Fig. 1 Error tracing flow chart

5 仿真实验

选取一组卫星发射任务中某船载设备测量的实

测数据、船体姿态数据和船体变形数据,通过误差传 递基函数计算惯导地平系下的误差曲线,然后乘以 各项误差的数值,得到方位角 A 和俯仰角 E 的残差 曲线。各项误差传播到惯导地平系下方位角 A 和 俯仰角 E 的曲线构成误差源矩阵 $\boldsymbol{\Phi}$,所含误差具体 包括大天线重力下垂 ΔE_g 、大天线光电轴纵向不匹 配误差 C_e 、大天线光电轴横向不匹配误差 C_s 、俯仰 轴方位轴不正交误差 δ_m 、大盘不水平最大倾斜量 β_m 、船体姿态 $\Delta \Psi_e$ 误差、船体姿态 $\Delta \theta_e$ 误差、船体变形 $\Delta \Psi_b$ 误差、船体变形 $\Delta \theta_b$ 误 差、船体变形 ΔK_b 误差共 11 个误差分量。

设定误差:大天线重力下垂误差 0.002 rad (413"),大天线光电轴横向不匹配误差 0.002 rad (413")。基于误差传递模型仿真得到的方位角 *A* 和 俯仰角 *E* 残差曲线如图 2 所示。



按上述流程进行误差溯源,迭代辨识估计得到 系数 \hat{x}_s :(0.0020,0,0.0020,0,0,0,0,0,0,0,0)。从 辨识结果可以看到,该方法在11项误差源中定位大 天线重力下垂 ΔE_g 和大天线光电轴横向不匹配误 差 C_s ,且估计得到的误差与设定误差一致,扣除相 应的估计值后, A_xE 残差中的剩余误差如图 3 所示。



图 3 A、E 残差中剩余误差曲线图 Fig. 3 Remaining A and E residual error

6 结束语

本文以实测数据为研究对象,基于误差传递基 函数开展误差辨识诊断分析,通过将测量残差在误 差源矩阵上进行投影迭代,定位误差,并估计得到对 应误差的数值,实现了误差的自动识别。该方法使 用的误差传递基函数充分考虑了测量船外测数据处 理过程中船体变形、船舶摇摆修正的影响,有效提高 了误差溯源的准确性。但在研究中也发现,该方法 能够成功追踪并准确得到估计值的条件是产生A、E 残差的两(多)种误差源的传播曲线之间的差别要 足够大,溯源效果才好;当两项误差的传播曲线差别 较小时,有时会出现误定位。如何提高误差特性相 似的误差定位的准确性,将是后续工作研究的重点。

参考文献:

- [1] 李辉芬. 航天测量船外测数据异常值自适应处理算法 设计[J]. 电讯技术,2011,51(4):54-59.
 LI Huifen. Self-adaptive Outlier Detection of Parameters of Space Tracking Ships [J]. Telecommunication Engineering,2011,51(4):54-59. (in Chinese)
 [2] 许桢英,费业泰. 用多分辨分析法研究动态测试误差
- [2] 计恢要, 實业泰. 用多分辨分机法研究切态测试误差 溯源[J]. 上海交通大学学报,2003,37(1):9-12.
 XU Zhenying, FEI Yetai. Research on Error Tracing of Dynamic Measurement by Multi – Resolution Analysis
 [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37 (1):9-12. (in Chinese)
- [3] 陈东菊,范晋伟,雒驼,等. Daubechies 小波在机床动态 • 740 •

误差特征提取与辨识中的应用[J].北京工业大学学报,2012,38(10):1468-1473.

CHEN Dongju, FAN Jinwei, LUO Tuo, et al. Application of Daubechies Wavelet on Feature and Identification of Dynamic Error of Machine Tool[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012, 38(10):1468–1473. (in Chinese)

- [4] 李晓惠,陈晓怀,卫兵. 基于神经网络的动态测量误差分解研究[J]. 工业计量,2005,15(6):6-9.
 LI Xiaohui, CHEN Xiaohuai, WEI Bing. Research on error decomposition of dynamic measurement based on neural network method [J]. Industrial Measurement, 2005, 15(6):6-9. (in Chinese)
- [5] 唐冰松,韩晓林.结构动力学有限元模型的参数识别 误差溯源及正向传递[J]. 兰州理工大学学报,2013,39(4):132-137.
 TANG Bingsong,HAN Xiaolin. Error tracing and propagating positively of parameter identification based on dynamical finite element model of structure [J]. Journal of Lanzhou University of Science and Technology, 2013,39
- (4):132-137. (in Chinese)
 [6] 唐冰松,王增会.复杂系统误差传递的主次作用分析 与控制[J].江苏科技大学学报(自然科学版),2013, 27(4):326-330.
 TANG Bingsong, WANG Zenghui. The Primary and Secondary Position Analysis and Control of Error Propagating for a Complex System[J]. Journal of Jiangsu University of Scinence and Technology (Natural Science Edition), 2013,27(4):326-330. (in Chinese)
- [7] 江文达. 航天测量船[M]. 北京:国防工业出版社, 2002:38-46.

JIANG Wenda. Space TT&C Ship[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002:38-46. (in Chinese)

作者简介:



李辉芬(1968—),女,云南昭通人,硕 士,研究员,主要研究方向为海上测量数据处 理与精度分析工作;

LI Huifen was born in Zhaotong, Yunnan Province, in 1968. She is now a senior engineer of professor with the M. S. degree. Her research concerns maritime measurement data processing and accuracy analysis.

Email:wylhf@yeah.net

刘 冰(1967—),男,江苏人,硕士,研究员,主要从事 航天测控总体工作;

LIU Bing was born in Jiangsu Province, in 1967. He is now a senior engineer of professor with the M. S. degree. His research concerns space TT&C system.

刘吉英(1982—),男,湖南人,2011年于国防科技大学获博士学位,主要从事空天信息技术研究;

LIU Jiying was born in Hunan Province, in 1982. He received the Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2011. His research concerns aerospace information technology.

吴 优(1996—),女,江苏南京人,主要研究方向为信息处理;

WU You was born in Nanjing, Jiangsu Province, in 1996. Her research concems information processing.

底丽萍(1978—),女,河北人,工程师,主要从事航天测 控总体工作。

DI Liping was born in Hebei Province, in 1978. She is now an engineer. Her research concerns space TT&C system.