# 一种适用于光纤捷联罗经寻北的新算法

王 宇 程向红 吴 峻

(东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

**摘 要**: 舰船的摇摆使陀螺仪无法测出地球自转角速度($\Omega$),进而光纤捷联罗经系统无法根据陀螺仪和加速度计的输出直接计算出载体航向. 针对这一问题,提出了一种寻北新算法. 该算法以"固定"的参考系——惯性坐标系为参考基准,建立了过渡惯性坐标系和初始时刻捷联惯组惯性坐标系,利用加速度计敏感重力加速度在惯性坐标系中的投影计算出 $\Omega$ 的空间指向,得到地理真北. 光纤捷联罗经系统寻北算法的实现分解为 3 个步骤:建立初始时刻捷联惯组惯性坐标系,利用加速度计获得稳定的水平坐标系;根据捷联惯组坐标系与初始时刻捷联惯组惯性坐标系的转换,将加速度计信息投影到初始时刻捷联惯组惯性坐标系,采用空间圆拟合法求出 $\Omega$ 的空间指向;将平行于 $\Omega$ 的矢量向水平面投影得到地理真北. 仿真结果表明:载体晃动环境下的寻北精度达到了 $0.23°(1\sigma)$.

**关 键 词**: 晃动基座; 光纤捷联罗经; 寻北; 重力加速度; 空间圆拟合

**中图分类号**: U666.1

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2012)01-0033-06

# New north finding algorithm for strapdown compass based on FOG

Wang Yu Cheng Xianghong Wu Jun

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract**: The ship rolling prevents a gyroscope from reliably measuring the angular velocity of the earth's rotation ($\Omega$). Consequently, the strapdown compass system based on fiber optic gyroscopes (FOG) cannot compute the heading of the carrier based on the outputs of gyroscopes and the accelerometers. To address this issue, a new north finding algorithm was proposed. By taking the inertial frame as the reference coordinate frame, this algorithm established the transitional inertial frame and the initial-time strapdown compass body inertial frame. The direction of vector $\Omega$ was then calculated according to the projection of the accelerometer sensitive to grivity in the initial-time body inertial frame. And this in turn recovers the true north of geographic direction. The proposed north finding algorithm consists of three steps. It established the initial-time body inertial frame. Then it obtained a stable level frame via the initial-time body frame and the outputs of gyroscope and accelerometer. By projecting the output of accelerometer from the strapdown compass body frame to the initial-time body inertial frame, the direction of vector $\Omega$ was calculated by the space circle fitting method. Then the true north was recovered by projecting the vector parallel with $\Omega$ from the initial-time body inertial frame to the stable level frame. The simulation result shows that the error of azimuth can be reduced to as low as $0.23°(1\sigma)$.

**Key words**: rocking base; fiber optic strapdown compass system; north finding; acceleration of gravity; space circle fitting

**收稿日期**: 2010-09-02; **网络出版时间**: 2012-01-06 15:10; **DOI**: CNKI:11-2625/V.20120106.1510.004

**网络出版地址**: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20120106.1510.004.html

**基金项目**: 国家科技支持计划重点课题资助项目(2008BAJ11B02); 江苏省博士后科研资助项目(0902012C)

**作者简介**: 王 宇(1978 - ),男,江苏宿迁人,博士后,yu_wang_cn@sohu.com.

传统意义上的陀螺罗经根据地球上的陀螺仪的视在运动,利用传感器敏感主轴高度角的变化,同时向主轴施加所需的力矩,根据陀螺仪的进动性,使主轴的一端自主的指向地球的北极方向,从而在载体上确立地球真北的指向基准. 基于光纤陀螺仪的捷联式罗经系统(简称"光纤捷联罗经系统"),其北向基准由姿态矩阵中的欧拉角提供. 由于光纤捷联罗经系统直接与载体固连,光纤陀螺仪敏感的地球自转角速度($\boldsymbol{\Omega}$)被外部角运动干扰,加速度计所测量的重力加速度也被离心加速度污染,传统初始对准误差很大,甚至不可用. 如何使光纤捷联罗经系统在晃动或运动条件下获得满足精度的姿态矩阵,是一个非常值得研究的课题[1]. 文献[2-3]提供了一种借助于惯性坐标系实现晃动基座对准的新颖思路. 文献[1]也提出了舰船在系泊状态下基于惯性坐标系中的重力加速度信息的初始粗对准算法,通过坐标系之间的转换关系实现粗对准,在该算法实现中需要外部提供载体的位置信息. 受文献[2-3]方法的启发,本文结合传统陀螺罗经的寻北方法[4-5],提出了以惯性坐标系为参考基准,在无载体位置信息的情况下,根据惯性传感器的输出直接计算出 $\boldsymbol{\Omega}$ 的空间指向,从而获得地理真北的一种罗经寻北的新算法. 最后,进行了晃动环境下的算法仿真验证.

## 1 坐标系定义

在寻北过程中所涉及到的坐标系定义如下,其相互关系如图 1 所示.

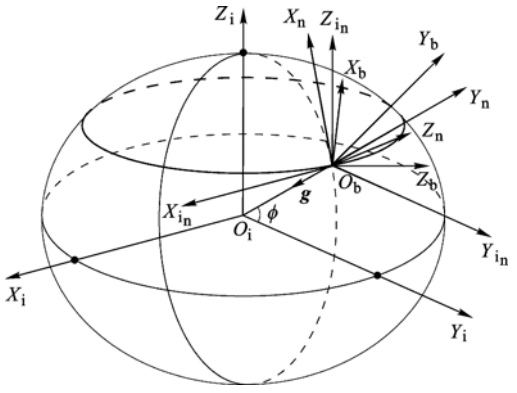


图 1 坐标系关系图

1) 地心惯性坐标系(i 系):相对于惯性空间静止或匀速运动的坐标系,原点为地球的质量中心 $O_i$,$O_iZ_i$ 轴沿地球自转轴指向地球北极,$O_iX_i$ 轴位于赤道平面内指向远方恒星的方向,$O_iX_i$,$O_iY_i$,$O_iZ_i$ 构成右手坐标系;

2) 导航坐标系(n 系):即地理坐标系,原点与载体质心 $O_b$ 重合,$O_bX_n$ 轴指向当地地理北向,$O_bY_n$ 竖直指向天向,$O_bZ_n$ 指向当地地理东向,构成右手坐标系;

3) 载体坐标系(b 系):原点与载体质心 $O_b$ 重合,$O_bX_b$ 沿载体纵轴指向前,$O_bZ_b$ 沿载体横轴指向载体右侧,$O_bY_b$,$O_bX_b$ 和 $O_bZ_b$ 构成右手坐标系;

4) 过渡惯性坐标系($i_n$ 系):将 i 系进行平移,使平移后的原点与载体质心 $O_b$ 重合所形成的惯性坐标系;

5) 水平坐标系(h 系):原点与载体质心 $O_b$ 重合,$O_bY_h$ 竖直指向天向,$O_bX_h$ 和 $O_bZ_h$ 在水平面内与 $O_bY_h$ 构成右手坐标系;

6) 初始时刻捷联惯组惯性坐标系($i_{b0}$ 系)[6]:在 $t_0$ 时刻 $i_{b0}$ 系重合于 $b$ 系,寻北开始后 $i_{b0}$ 系不随捷联罗经系统转动,即在惯性空间中保持指向不变.

## 2 寻北算法原理

导航平台的构成方式是捷联式惯性系统与平台式惯性系统的区别之一. 平台式惯性系统具有物理实体平台,惯性测量均以这个物理实体平台作为参考基准,而捷联式惯性系统是通过在计算机内建立姿态矩阵 $\boldsymbol{C}_b^n$——"数学平台"的方式提供参考基准,因此捷联罗经系统的寻北过程就是通过调整欧拉角使得数学平台对准导航平台的过程. 在静止基座上,捷联罗经系统中的惯性传感器敏感到的只有 $\boldsymbol{\Omega}$ 和重力加速度信息,利用这些地球物理量信息,通过传统的解析对准方式,可以解算出,实现初始对准. 在晃动基座上,由于捷联罗经系统与载体固连,没有平台式惯性系统中的环架隔离载体运动,惯性器件的输出中,除了 $\boldsymbol{\Omega}$ 和重力加速度,还包含了载体运动的干扰,这些干扰量级往往比地球物理参数高出几个数量级,使地球物理量信号完全被淹没,所以,不能按照传统的解析法得到载体的初始姿态矩阵. 虽然加速度计的输出中包含了地球重力加速度、杆臂加速度、垂荡加速度以及横荡加速度,但是后面的 3 种加速度都是可以通过一定的算法进行补偿,因此,可以从晃动基座上的加速度计的输出中提取当地的重力加速度信息[7],并将此信息用于寻北. 相同的重力加速度信息在不同的坐标系中体现不同的信息量,其在 n 系中的投影 $\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}} = [0, -g, 0]$ 没有包含 $\boldsymbol{\Omega}$ 信息. 而在惯性坐标系中,其轨迹为一个圆锥面(如图 2 所示),该锥面的轴线就是地球自转

的轴线[8],取 $\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}$ 在惯性坐标系的投影,其投影分量包含 $\boldsymbol{\Omega}$ 信息,分析 $\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}$ 的运动就可以确定地理北向信息. 因此,晃动基座下光纤捷联罗经系统寻北的原理为:将惯性坐标系中的地球重力矢量作为观测信息,利用载体上固联的光纤陀螺仪和加速度计的输出,通过运动误差补偿,根据空间几何理论解算出地球自转轴的空间指向,通过向当地水平面内投影,得到该地的北向基准.

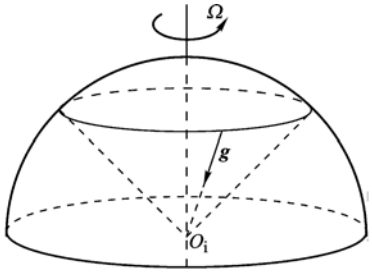


图 2　惯性坐标系中重力加速度矢量的运动轨迹

## 3　算法实现步骤

根据第 2 节的寻北算法原理,光纤捷联罗经系统不能采用直接测量地球相对于光纤陀螺构成的坐标系的角速率,而是应该在惯性空间中测量地球的物理参数,通过计算 $\boldsymbol{\Omega}$ 的旋转轴指向来寻找真北方位. 光纤捷联罗经系统中 3 个光纤陀螺仪用于敏感惯性空间中运动物体的角速率(包含 $\boldsymbol{\Omega}$);3 个加速度计用于敏感载体加速度和重力加速度的矢量和. 因此,通过对光纤陀螺仪的积分可以计算出载体在惯性空间中的运动姿态,并利用此姿态矩阵将总的加速度信息在惯性空间中表示出来,对总加速度值进行滤波后,可以“观测”到由于地球转动而造成的表观重力加速度缓慢的漂移. 表观重力加速度在惯性空间中的运动轨迹表现为一个圆锥面,锥面的中轴就是 $\boldsymbol{\Omega}$ 的旋转轴,通过测量表观重力加速度的运动就可以判别出地理北向.

具体寻北步骤推导如下:

1) 确定 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$. 如第 1 节所述,定义 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系与任意起始时刻的 $b$ 系重合,即 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系到 b 系的转换矩阵初始值 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}}^{\mathrm{b}}=\boldsymbol{I}$. 此后 b 系连同地球一起转动,而 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系则凝固不动[9](如图 3 所示). b 系相对于 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系的姿态关系可以通过陀螺仪的测量值进行计算,即载体相对于惯性空间的运动姿态矩阵可以实时算出 $\boldsymbol{C}_{\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}}^{\mathrm{b}}(t)$:

$$\begin{bmatrix}a_x\\a_y\\a_z\end{bmatrix}_{\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}}=(\boldsymbol{C}_{\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}}^{\mathrm{b}})^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}a_x\\a_y\\a_z\end{bmatrix}_{\mathrm{b}}=\begin{bmatrix}\cos\varphi\cos\theta & \sin\varphi\sin\gamma-\cos\varphi\sin\theta\cos\gamma & \sin\varphi\cos\gamma+\cos\varphi\sin\theta\sin\gamma\\ \sin\theta & \cos\theta\cos\gamma & -\cos\theta\sin\gamma\\ -\sin\varphi\cos\theta & \cos\varphi\sin\gamma+\sin\varphi\sin\theta\cos\gamma & \cos\varphi\cos\gamma-\sin\varphi\sin\theta\sin\gamma\end{bmatrix}\begin{bmatrix}a_x\\a_y\\a_z\end{bmatrix}_{\mathrm{b}} \tag{1}$$

式中,$[a_x,a_y,a_z]_{\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}}^{\mathrm{T}}$ 为加速度计信息在 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系中的投影;$[a_x,a_y,a_z]_{\mathrm{b}}^{\mathrm{T}}$ 为加速度计信息在 b 系中的投影;$\varphi$ 为方位角;$\theta$ 为纵摇角;$\gamma$ 为横摇角. 将加速度计信息利用式(1)转换到 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系中. 有了这些转换信号,通过调整欧拉角获得稳定的水平面,即 h 坐标系,其原理类似于陀螺罗经的调平运动,并利用加速度计信息始终保持水平面稳定.

2) 将 i 系平移,使其原点与 $O_{\mathrm{b}}$ 重合,获得 $\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系. 由图 3 可以得到,矢量 $-\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}$ 在 $\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系中的运动轨迹为圆锥面,而且其轴线 $\boldsymbol{k}$ 与 i 系中的锥面轴线平行且同向,因此 $\boldsymbol{k}$ 与 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转轴的指向一致. 由于 i 系、$\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系和 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系均为惯性坐标系,$\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系由 i 系平移得到,而且与 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系共原点,那么根据惯性空间的坐标系的定义可得 $\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系与 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系之间只有固定的夹角关系,没有相对运动. 根据同一个矢量在不同坐标系之间的转换定理可知:矢量转换不改变其物理形态和矢量之间的相互关系,只是函数表达方式不同,线面之间的关系也仍然保持不变. 在 $\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系中定义 $-\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}$ 的坐标所形成的空间圆为 $S$,圆心为 $O'$,在 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系中仍然为空间圆,在 $\mathrm{i}_{\mathrm{n}}$ 系中空间圆 $S$ 的法线 $\boldsymbol{k}_S$(与 $\boldsymbol{k}$ 重合)在 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系中仍然为 $S$ 的法线. 因此,在 $\mathrm{i}_{\mathrm{b}0}$ 系中,假设存在直线 $\boldsymbol{k}'$ 垂直于 $S$ 扩张成的圆面,由于垂直于同一平面的两条直线平行,那么 $\boldsymbol{k}'$ 与 $\boldsymbol{k}_S$ 平行. 根据以上推理,$\boldsymbol{k}'$ 与 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转轴指向一致,从而得到 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转轴的指向.

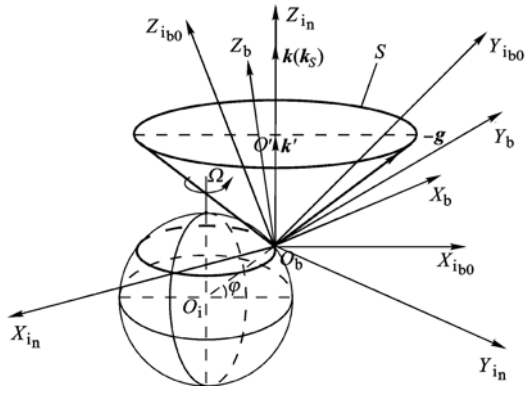


图 3　等效 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转轴与重力加速度矢量轨迹

3) 地球自转轴指向的求取. 根据 2) 的分析,求取 $\boldsymbol{\Omega}$ 旋转轴的指向就是求取直线 $\boldsymbol{k}'$. 可以采用 2 种方法求取:自主求取,在位置信息已知情况下的求取. 具体方法如下:利用式(1)将加速度计的输

出转换到 $i_{b0}$ 系中(假设载体只做摇摆运动,相对地球没有位置的变化,并且加速度计输出中的杆臂误差已经补偿),可以获得其在 $i_{b0}$ 系中的实时坐标 $A,B,C$,根据"在空间中,3 点可确定一个平面,而且同一个平面内的 3 点如果不共线则一定共圆"的空间几何理论,采用拟合的方法,拟合出一个空间圆,即 $A,B,C$ 3 点根据以上理论一定可以拟合成一个空间圆,该圆圆心与 $i_{b0}$ 系原点的连线就是 $\boldsymbol{k}$(与 $\boldsymbol{k}'$平行). 由于拟合空间圆的算法复杂,在实际解算中并不采用. 通过分析向量 $\overrightarrow{O_bA},\overrightarrow{O_bB},\overrightarrow{O_bC}$ 可知,$\overrightarrow{AB}$和$\overrightarrow{BC}$叉乘得到的矢量 $\boldsymbol{k}'$垂直于 2 个向量组成的平面,因此利用向量叉乘的方法可以求得 $\boldsymbol{k}'$的指向,从而得到 $\Omega$ 旋转轴指向,这也是仿真验证中所用的方法.

这种自主式求取方法不依赖于任何外部信息,通过大量的测量点信息,可以实现寻北功能. 由于需要进行多点测量,该方法消耗的时间较长,以 4 min为间隔进行样点采集,3 个点最快需要8 min 才能完成寻北. 另一种是利用外部纬度信息快速推算 $\boldsymbol{k}'$指向的方法. 根据图 4,如果纬度信息已知,那么 $-\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}$ 相对 $i_n$ 系的锥运动轨迹的半锥角为纬度的余角,假设 $O'$ 坐标为 $[k_x^{i_{b0}},k_y^{i_{b0}},k_z^{i_{b0}}]$,根据图 4,$\angle BO_bO'$可以利用纬度值求出,而且 $A$ 点到 $B$ 点的运动是由于地球自转运动造成的,$\angle AOB'$可以根据时间测量得到,那么根据两个向量之间的夹角公式可得

$$\cos\angle BO_bO'=\frac{\overrightarrow{O_bB}\cdot\overrightarrow{O_bO'}}{|O_bB|\cdot|O_bO'|} \tag{2}$$

$$\cos\angle AO'B=\frac{\overrightarrow{O'A}\cdot\overrightarrow{O'B}}{|O'A|\cdot|O'B|} \tag{3}$$

式中,$\overrightarrow{O_bO'}$为载体质心到拟合圆心的向量;$\overrightarrow{O'A}$,$\overrightarrow{O'B}$为拟合圆心到采样点的向量,$|\cdot|$为向量取模运算. 再利用$\overrightarrow{AB}$与 $\boldsymbol{k}'$垂直的关系,得到两者点乘为 0,即

$$\overrightarrow{AB}[k_x^{i_{b0}},k_y^{i_{b0}},k_z^{i_{b0}}]^{\mathrm{T}}=0 \tag{4}$$

联立式(2)~式(4)即可得到 $O'$ 在 $i_{b0}$ 系中的坐标值,从而求得 $\boldsymbol{k}'$.

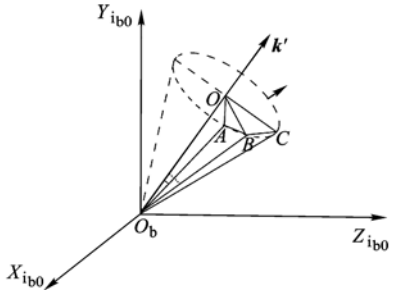


图 4 等效 $\Omega$ 旋转轴 $\boldsymbol{k}'$算法示意图

4) 将 $\boldsymbol{k}'$向 h 坐标系转换. 由于 $\boldsymbol{k}'$与 $\Omega$ 旋转轴指向一致,因此,其在 $X_hOY_h$ 平面上的投影即为当地的地理北向,完成寻北过程. 由于 h 坐标系保持水平,因此根据计算求得的 $OX_h$ 与当地地理北向的夹角,调整 $h$ 坐标系即可以得到 n 系,定义 $\boldsymbol{C}_{i_{b0}}^{n}(t)$ 为 $i_{b0}$ 系到 n 系的转换矩阵,再由 $\boldsymbol{C}_b^n(t)=\boldsymbol{C}_{i_{b0}}^n(t)\cdot\boldsymbol{C}_b^{i_{b0}}(t)$ 可以求出载体的姿态矩阵,实现初始对准.

## 4 算法误差分析

在寻北算法推导过程中主要涉及到以下误差因素:陀螺仪漂移误差,加速度计偏置误差,纬度误差,垂线偏差,地球自转轴的摆动、杆臂误差以及外部运动所引起的附加加速度误差. 陀螺仪的漂移误差在建立稳定的惯性平台的过程中会逐渐积累,导致惯性稳定平台发生漂移,通过加速度计转换环节将误差引入到寻北的全过程. 由于其误差通过时间积累,因此可以通过重调系统的方式尽量减少. 加速度计偏置误差在寻北过程的每个环节均产生影响,是寻北精度的主要误差源,通过对加速度计建模,采用滤波的方法可以降低偏置误差的影响. 杆臂误差和外部运动所起的附加加速度误差可以看成是加速度计对重力加速度测量的干扰,由于干扰信号的频率与重力加速度的频率差异较大,可以采用低通滤波的方法消除这些干扰的影响.

纬度误差、垂线偏差和地球自转轴的摆动属于地球物理量的测量误差,目前 GPS(Global Positioning System)接收机的单点定位精度在十几米以内,使用差分或载波相位相对定位技术可获得低于 1 m 的定位精度[10]. 这些定位方式下的纬度误差很小,即使经线方向上 0.5 n mile 的偏差,转换到纬度也只有约 0.008°. 根据式(2)~式(4)推算得出,寻北精度对纬度误差不敏感,当纬度存在 0.01°误差的时候,寻北误差是 0.000 47°. 垂线偏差和地球自转轴摆动均会在寻北过程中引入误差,然而这种偏差角和周期漫长的极移运动所产生的影响极小,对于捷联罗经系统而言,该误差可以忽略不计.

## 5 仿真与结果分析

算法仿真流程图如图 5 所示.

算法流程分为:数据采集,加速度计输出坐标系转换,求解 $\Omega$ 旋转轴的指向,水平投影获取地理北向等步骤.

在光纤捷联罗经系统仿真中不考虑垂荡、纵荡和横荡的干扰速度影响,运动参数设置如表 1 所示,传感器参数设置如表 2 所示.

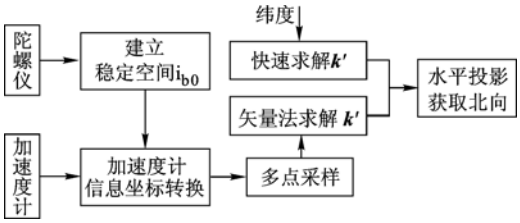


图 5　寻北算法仿真流程图

**表 1　仿真环境运动参数设置**

| 纬度/(°) | $\varphi$ | | $\theta$ | | $\gamma$ | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 幅值/(°) | 周期/s | 幅值/(°) | 周期/s | 幅值/(°) | 周期/s |
| 32 | 5 | 7 | 7 | 5 | 10 | 6 |

**表 2　仿真环境传感器参数设置**

| 参数 | 光纤陀螺仪 | 加速度计 |
|---|---|---|
| 常值误差 | 0.05(°)/h | $1\times10^{-3}g$ |
| 随机误差 | 0.05(°)/h | $5\times10^{-4}g$ |

纬度未知时,仿真 8 min 后采样载体姿态角的输出值,共进行 50 次试验,误差如图 6 所示. 纬度已知时,仿真 4 min 后采样载体姿态角的输出值,共进行 50 次试验,误差如图 7 所示.

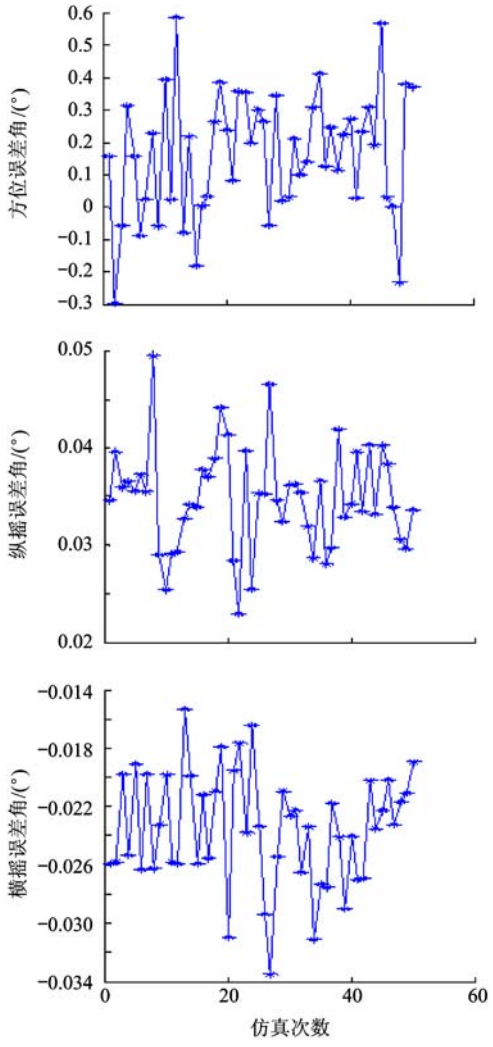


图 6　完全独立寻北误差曲线

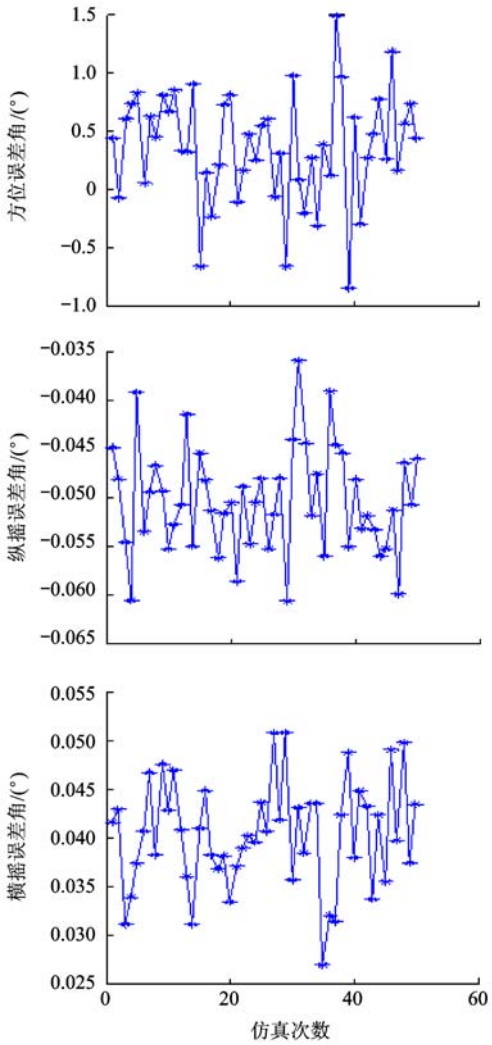


图 7　利用纬度信息寻北误差曲线

姿态角的理想值由仿真环境假设的摇摆函数确定,以寻北结束时刻的姿态误差角作为衡量寻北对准精度的指标.

由图可看出:纬度未知时,方位角、纵摇角和横摇角误差的均值分别为 0.17°,2.1′和 -1.44′,误差角的标准差分别为 0.23°,0.31′和 0.26′. 纬度已知时,方位角、纵摇角和横摇角误差的均值分别为 0.41°, -3.2′和 2.4′,误差角的标准差分别为 0.52°,0.35′和 0.36′. 因此,上述寻北算法能有效计算出载体姿态值. 由于寻北过程中的空间圆拟合结果决定着 $\boldsymbol{k}'$的指向,根据曲线拟合的理论,拟合的样本点越多,最终的拟合精度越高,在对准时间允许的情况下,延长对准时间,增加样本点的采集,将有助于寻北精度的提高. 另外,通过增加样本点间隔时间,使得$\overrightarrow{AB}$和$\overrightarrow{BC}$的夹角变小,两个向量叉乘也可以获得更高精度的矢量 $\boldsymbol{k}'$,从而提高寻北精度. 在利用纬度信息寻北时,由于对重力加速度信息利用较少,寻北精度低于完全独立寻北时的精度,这也是寻北时间与寻北精度矛盾的体现.

## 6 结 论

晃动基座上的光纤捷联罗经寻北算法方法最大特点是基于重力加速度信息在惯性坐标系内的投影求取地球自转角速度指向,从而得出地理真北. 通过"凝固"惯性坐标系和平移惯性坐标系,利用空间线面之间的相互关系,将求取地球自转角速度的指向转化为求取相同指向的矢量,利用矢量的运算规律求出地球自转轴的指向,通过向稳定的水平面投影,确定当地的地理北向,从而建立数学平台——姿态矩阵. 本文提出的光纤捷联罗经寻北算法不依赖外部信息,充分体现了惯性系统自主定向的优势,仿真试验表明该算法具有较高的寻北对准精度. 由于计算重力加速度在空间稳定坐标系内的投影值时未考虑垂荡、纵荡和横荡的干扰速度影响,进一步的滤波器研究还在进行中.

### 参考文献(References)


[1] 秦永元,严恭敏,顾冬晴,等. 摇摆基座上基于g信息的捷联惯导粗对准研究[J]. 西北工业大学学报,2005,23(5):681-684
Qin Yongyuan, Yan Gongmin, Gu Dongqing, et al. A clever way of SINS coarse alignment despite rocking ship[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005, 23(5): 681-684 (in Chinese)

[2] Napolitano F, Gaiffe T. PHINS: the first high performances inertial navigation system based on fiber optic gyroscopes [C]//9th International Conference on Integrated Navigation Systems. Saint Petersburg, Russia: [s. n.], 2002: 296-304

[3] Gaiffe T, Cottreau Y, Faussot N, et al. Highly compact fiber optic gyrocompass for applica-tions at depths up to 3 000 meters[C]// IEEE Underwater Technology, Proceedings of the Inter-national Symposium. Tokyo, Japan: [s. n.], 2000: 155-160

[4] 肖正林,钱培贤. 方位罗经自对准原理的修正[J]. 战术导弹技术,2006,3(2):75-79
Xiao Zhenglin, Qian Peixian. The correction of azimuth compass auto-aligning principle [J]. Tactical Missile Technology, 2006, 3(2): 75-79 (in Chinese)

[5] Rawlings A L. The theory of the gyroscopic compass and its deviations [M]. New York: The Macmillan Company, 1994

[6] 严恭敏,秦永元,卫育新,等. 一种适用于SINS动基座初始对准的新算法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3):634-637
Yan Gongmin, Qin Yongyuan, Wei Yuxin, et al. New initial alignment algorithm for SINS on moving base [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 31(3): 634-637 (in Chinese)

[7] Gaiffe T. From R&D brassboards to navigation grade FOG-based INS: the experience of photo-netics/ixsea[C]//IEEE 15th Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, Vol 1. Portland: IEEE, 2002: 1-4

[8] 练军想,汤永刚,吴美平,等. 捷联惯导惯性系动基座对准算法研究[J]. 国防科技大学学报,2007,29(5):95-99
Lian Junxiang, Tang Yonggang, Wu Meiping, et al. Study on SINS alignment algorithm with inertial frame for swaying bases [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29(5): 95-99 (in Chinese)

[9] 李瑶,徐晓苏,吴炳祥. 捷联惯导系统罗经法自对准[J]. 中国惯性技术学报,2008,16(4):386-389
Li Yao, Xu Xiaosu, Wu Bingxiang. Gyro-compass self-alignment of SINS[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(4): 386-389 (in Chinese)

[10] Ali J, Fang Jiancheng. SINS/ANS/ GPS integration using federated Kalman filter based on optimized information-sharing coefficients[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit. San Francisco, California: AIAA, Inc, 2005: 6030-6033


(编 辑:刘登敏)