



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101718560 B

(45) 授权公告日 2011. 11. 16

(21) 申请号 200910073241. 8

(22) 申请日 2009. 11. 20

(73) 专利权人 哈尔滨工程大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区南通大街145号1号楼哈尔滨工程大学科技处知识产权办公室

(72) 发明人 孙枫 孙伟 薛媛媛 袁俊佳

王根 王武剑 李国强

(51) Int. Cl.

G01C 25/00 (2006. 01)

G01C 21/18 (2006. 01)

审查员 杨庆林

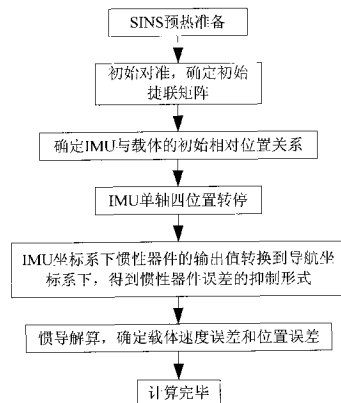
权利要求书 4 页 说明书 9 页 附图 3 页

(54) 发明名称

基于单轴四位置转停方案的捷联系统的误差抑制方法

(57) 摘要

本发明提供的是一种基于单轴四位置转停方案的捷联系统误差抑制方法。(1) 通过GPS确定载体的初始位置参数;(2) 采集光纤陀螺仪输出和加速度计输出的数据并对数据进行处理;(3) 惯性测量单元绕着载体方位轴固定的四个位置正反转停;(4) 将IMU旋转后光纤陀螺仪和石英加速度计生成的数据转换到导航坐标系下,得到惯性器件常值偏差的调制形式;(5) 利用光纤陀螺的输出值 ω<sub>is</sub><sup>s</sup>对捷联矩阵 T<sub>g</sub><sup>s</sup>进行更新;(6) 计算IMU旋转调制后载体的速度和位置;本发明水平方向上的惯性器件常值偏差进行调制,提高导航定位精度。



1. 一种基于单轴四位置转停方案的捷联系统的误差抑制方法,其特征在于包括以下步骤:

- (1) 利用全球定位系统 GPS 确定载体的初始位置参数,将它们装订至导航计算机中;
- (2) 捷联系统进行预热后采集光纤陀螺仪和石英加速度计输出的数据;
- (3) IMU 采用 8 个转停次序为一个旋转周期的转位方案,方案为:

次序 1, IMU 从 A 点出发顺时针转动  $180^\circ$  到达位置 C, 停止时间  $T_t$ ; 次序 2, IMU 从 C 点出发顺时针转动  $90^\circ$  到达位置 D, 停止时间  $T_t$ ; 次序 3, IMU 从 D 点出发逆时针转动  $180^\circ$  到达位置 B, 停止时间  $T_t$ ; 次序 4, IMU 从 B 点出发逆时针转动  $90^\circ$  到达位置 A, 停止时间  $T_t$ ; 次序 5, IMU 从 A 点出发逆时针转动  $180^\circ$  到达位置 C, 停止时间  $T_t$ ; 次序 6, IMU 从 C 点出发逆时针转动  $90^\circ$  到达位置 B, 停止时间  $T_t$ ; 次序 7, IMU 从 B 点出发顺时针转动  $180^\circ$  到达位置 D, 停止时间  $T_t$ ; 次序 8, IMU 从 D 点出发顺时针转动  $90^\circ$  到达位置 A, 停止时间  $T_t$ ; IMU 按照此转动顺序循环进行; 水平东向轴上的 IMU 停顿点 p3、p8 与 p4、p7 对称于转轴中心; 北向轴上的停顿点 p1、p5 与 p2、p6 对称于转轴中心; 四位置转停方案仍然是转动角度为  $180^\circ$  或  $90^\circ$  间隔进行;

(4) 将 IMU 旋转后光纤陀螺仪生成的数据转换到导航坐标系下, 得到惯性器件常值偏差的调制形式, 包括:

IMU 水平方向上的陀螺常值漂移分别为  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$ , 载体静止条件下, IMU 停顿的 A、B、C、D 四个位置相对于导航坐标系对称, 在一个循环周期内四个固定位置上器件偏差产生的水平误差角在导航坐标系下满足:

$$\begin{cases} 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_A + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_B + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_C + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_D = 0 \\ 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_A + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_B + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_C + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_D = 0 \end{cases}$$

IMU 正反转动的 8 个环节内, 导航坐标系水平方向上的误差角度分别表示为:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = -\frac{2\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{C \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{D \rightarrow B} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = \frac{2\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{B \rightarrow A} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = \frac{2\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{C \rightarrow B} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{B \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = -\frac{2\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{D \rightarrow A} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = 2\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{C \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{D \rightarrow B} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = 2\frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{B \rightarrow A} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = -2\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{C \rightarrow B} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{B \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = -2\frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{D \rightarrow A} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2}
 \end{aligned} \right.$$

将一个完整转动周期内的 IMU 停顿位置和转动过程的东向和北向的水平误差角分别相加, 得到导航坐标系下累计的水平误差角度,

$$\begin{cases} \int \varepsilon_E^n dt = 0 \\ \int \varepsilon_N^n dt = 0 \end{cases}$$

导航坐标系上水平方向上光纤陀螺仪常值偏差得到调制, 该常值偏差对系统的作用为

零；

(5) 将 IMU 坐标系下光纤陀螺仪的输出值  $\omega_{is}^s$  带入捷联系统中采用四元数法对捷联矩阵  $T_s^n$  进行更新：

$$\omega_{ns}^s = \omega_{is}^s - (T_s^n)^T (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)$$

其中： $\omega_{ie}^n$  为地球自转角速度在导航坐标系下的分量； $\omega_{en}^n$  为导航坐标系相对地球坐标系的运动角速度在导航坐标系下的分量； $\omega_{ns}^s$  为 IMU 相对导航坐标系的运动角速度在载体坐标系上的分量；

(6) 利用石英加速度计的输出值  $f_{is}^s$  和步骤 (5) 计算的姿态矩阵  $T_s^n$ ，计算出经过 IMU 旋转调制后载体的速度和位置。

2. 根据权利要求 1 所述的基于单轴四位置转停方案的捷联系统的误差抑制方法，其特征在于所述的将 IMU 坐标系下光纤陀螺仪的输出值  $\omega_{is}^s$  带入捷联系统中采用四元数法对捷联矩阵  $T_s^n$  进行更新包括：

更新四元数和姿态矩阵：

设载体坐标系相对导航坐标系的转动四元数为：

$$Q = q_0 + q_1 i_s + q_2 j_s + q_3 k_s$$

其中： $i_s$ 、 $j_s$ 、 $k_s$  分别表示 IMU 坐标系  $ox_s$  轴、 $oy_s$  轴、 $oz_s$  轴上的单位方向向量；

四元数的即时修正通过解四元数微分方程  $\dot{Q} = \frac{1}{2} Q \omega_{ns}^s$  来实现：

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ns}^{sx} & -\omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sz} \\ \omega_{ns}^{sx} & 0 & \omega_{ns}^{sz} & -\omega_{ns}^{sy} \\ \omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sz} & 0 & \omega_{ns}^{sx} \\ \omega_{ns}^{sz} & \omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

其中： $\omega_{ns}^{sx}$ 、 $\omega_{ns}^{sy}$ 、 $\omega_{ns}^{sz}$  分别表示载体相对导航坐标系的运动角速度在 IMU 坐标系  $ox_s$  轴、 $oy_s$  轴、 $oz_s$  轴上的分量；

姿态矩阵  $T_s^n$  的更新过程为：

$$T_s^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}。$$

3. 根据权利要求 2 所述的一种基于单轴四位置转停方案的捷联系统的误差抑制方法，其特征在于所述的计算出经过 IMU 旋转调制后载体的速度和位置地方法为：

1) 计算导航坐标系下加速度：

$$\begin{bmatrix} f^{nx} \\ f^{ny} \\ f^{nz} \end{bmatrix} = T_s^n \begin{bmatrix} f_{is}^{sx} \\ f_{is}^{sy} \\ f_{is}^{sz} \end{bmatrix}$$

2) 计算载体的水平速度和位置：

根据  $t_1$  时刻的载体东向水平速度  $V_x(t_1)$  和北向水平速度  $V_y(t_1)$ ，求取  $t_1$  时刻载体水平速度的变化率为：

$$\begin{cases} \dot{V}_x(t_1) = f^{nx} + (2\omega_{ie}^{nz} + \omega_{en}^{nz})V_y(t_1) \\ \dot{V}_y(t_1) = f^{ny} - (2\omega_{ie}^{nz} + \omega_{en}^{nz})V_x(t_1) \end{cases}$$

在  $t_2$  时刻水平速度和载体位置分别为：

$$\begin{cases} V_x(t_2) = V_x(t_1) + \dot{V}_x(t_1)(t_2 - t_1) \\ V_y(t_2) = V_y(t_1) + \dot{V}_y(t_1)(t_2 - t_1) \\ \varphi(t_2) = \varphi(t_1) + \frac{V_y(t_2)}{R_{yp}}(t_2 - t_1) \\ \lambda(t_2) = \lambda(t_1) + \frac{V_x(t_2)}{R_{xp} \cos \varphi}(t_2 - t_1) \end{cases}$$

3) 计算载体速度误差和位置误差：

$$\begin{cases} \Delta V_x = V_x(t_2) - V_{x0} \\ \Delta V_y = V_y(t_2) - V_{y0} \\ \Delta \varphi = \varphi(t_2) - \varphi_0 \\ \Delta \lambda = \lambda(t_2) - \lambda_0 \end{cases}$$

其中： $V_{x0}$ 、 $V_{y0}$  分别表示初始时刻载体的东向和北向速度； $\Delta V_x$ 、 $\Delta V_y$  分别表示载体东向、北向速度的变化量； $\varphi_0$ 、 $\lambda_0$  分别表示初始时刻载体所处位置的经度和纬度； $\Delta \varphi$ 、 $\Delta \lambda$  分别表示载体的纬度、经度的变化量； $R_{xp}$ 、 $R_{yp}$  分别表示地球子午圈、卯酉圈的曲率半径； $t_1$ 、 $t_2$  为捷联系统的解算过程中两个相邻的时间点。

## 基于单轴四位置转停方案的捷联系统的误差抑制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及的是一种捷联系统误差抑制方法,尤其涉及的是一种基于单轴四位置转停方案的捷联系统误差抑制方法。

### 背景技术

[0002] 在捷联式惯导系统中,所有的惯性元件都直接安装在载体上,惯性元件的输出就是载体相对惯性空间的加速度和角速度,有计算机将载体坐标系下测得的数据变换到导航坐标系再进行导航解算,这相当于在计算机内虚拟了一个平台作为导航计算的参考。由于取消了平台结构,因而系统的体积大大缩小,成本和维护费也大大降低。

[0003] 惯性敏感元件的误差是惯性导航系统误差的主要决定因素。从工艺上提高惯性敏感元件的精度,存在技术难度大,周期长的问题,而且也不能超越现阶段实现的可能。惯性元件误差补偿方法有两种:一是采用高精度的漂移误差补偿软件,另一种是采用系统的反转或者是旋转补偿法。

[0004] 自从光学陀螺出现以后,在旋转自动补偿技术和捷联惯性导航技术的基础上出现了一种新型的惯导系统,即旋转式惯性导航系统。它具有与传统平台系统类似的框架和转轴,然而却没有稳定的平台。简而言之,此类惯导系统相当于在捷联惯导系统的外贸加上转动机构和测角装置,导航解算也采用了捷联惯导算法,这样导航计算出来的依然是载体的位置和速度信息,而导航直接计算出的姿态信息只是惯性测量单元(IMU)的姿态,这时候需要加上IMU相对载体的转动角度,就得到了载体的姿态信息。

[0005] 旋转式惯性导航系统中转动机构的目的是为了在一个转动周期内让惯性元件的常值漂移对导航所产生的误差能够自动抵消,相应的技术也被称为系统误差平均技术,被广泛的应用到当前的船用光学陀螺惯性导航系统中。

[0006] CNKI库中与本发明相关的公开报道有:1、《光学陀螺旋转惯导系统原理探讨》(袁保伦、饶谷音;国防科技大学学报;2006年第6期),该文章主要以静电陀螺的旋转调制方式为例讨论了单轴、双轴旋转调制方法,但是没有涉及到本文提到的单轴旋转调制方法。2、《旋转IMU在光纤捷联航姿系统中的应用》(王其、徐晓苏;中国惯性技术学报;2007年第3期),该文章主要介绍了单轴、双轴旋转方式,并在理论上给予证明。3、《捷联惯导动基座对准新方法及导航误差抑制技术研究》(练军想,国防科学技术大学博士学位论文,出版日2009年7月),该论文主要介绍了单轴旋转调制技术的误差补偿原理,但是文章中提到的是单轴连续旋转,没有提及本发明提出的单轴四位置转停方案。

### 发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种能够提高导航定位精度的基于单轴四位置转停方案的捷联系统误差抑制方法。

[0008] 本发明的目的是这样实现的:包括以下步骤:

[0009] (1) 利用全球定位系统GPS确定载体的初始位置参数,将它们装订至导航计算机

中；

[0010] (2) 光纤陀螺捷联惯性导航系统进行预热后采集光纤陀螺仪和石英加速度计输出的数据；

[0011] (3) IMU 采用 8 个转停次序为一个旋转周期的转位方案；

[0012] (4) 将惯性测量单元旋转后陀螺仪生成的数据转换到导航坐标系下，得到惯性器件常值偏差的调制形式；

[0013] (5) 将 IMU 坐标系下陀螺仪的输出值  $\omega_{is}^s$  带入惯导系统中采用四元数法对捷联矩阵  $T_s^n$  进行更新：

$$[0014] \quad \omega_{ns}^s = \omega_{is}^s - (T_s^n)^T (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n)$$

[0015] 其中： $\omega_{ie}^n$  为地球自转角速度在导航系下的分量； $\omega_{en}^n$  为导航坐标系相对地球坐标系的运动角速度在导航系下的分量； $\omega_{ns}^s$  为 IMU 相对导航坐标系的运动角速度在载体坐标系上的分量；

[0016] (6) 利用石英加速度计的输出值  $f_{is}^s$  和步骤 (5) 计算的姿态矩阵  $T_s^n$ ，计算出经过 IMU 旋转调制后载体的速度和位置。

[0017] 本发明还可以包括：

[0018] 1、所述的 IMU 采用 8 个转停次序为一个旋转周期的转位方案为：

[0019] 次序 1, IMU 从 A 点出发顺时针转动  $180^\circ$  到达位置 C, 停止时间  $T_t$ ；次序 2, IMU 从 C 点出发顺时针转动  $90^\circ$  到达位置 D, 停止时间  $T_t$ ；次序 3, IMU 从 D 点出发逆时针转动  $180^\circ$  到达位置 B, 停止时间  $T_t$ ；次序 4, IMU 从 B 点出发逆时针转动  $90^\circ$  到达位置 A, 停止时间  $T_t$ ；次序 5, IMU 从 A 点出发逆时针转动  $180^\circ$  到达位置 C, 停止时间  $T_t$ ；次序 6, IMU 从 C 点出发逆时针转动  $90^\circ$  到达位置 B, 停止时间  $T_t$ ；次序 7, IMU 从 B 点出发顺时针转动  $180^\circ$  到达位置 D, 停止时间  $T_t$ ；次序 8, IMU 从 D 点出发顺时针转动  $90^\circ$  到达位置 A, 停止时间  $T_t$ ；IMU 按照此转动顺序循环进行；水平东向轴上的 IMU 停顿点 p3、p8 与 p4、p7 对称于转轴中心；北向轴上的停顿点 p1、p5 与 p2、p6 对称于转轴中心；四位置转停方案仍然是转动角度为  $180^\circ$  或  $90^\circ$  间隔进行。

[0020] 2、所述的将惯性测量单元旋转后陀螺仪生成的数据转换到导航坐标系下，得到惯性器件常值偏差的调制形式包括：

[0021] IMU 水平方向上的陀螺常值漂移分别为  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$ ，载体静止条件下，IMU 停顿的 A、B、C、D 四个位置相对于导航坐标系对称，在一个循环周期内四个固定位置上器件偏差产生的水平误差角在导航系下满足：

$$[0022] \quad \begin{cases} 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_A + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_B + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_C + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_D = 0 \\ 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_A + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_B + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_C + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_D = 0 \end{cases}$$

[0023] IMU 正反转动的 8 个环节内，导航系水平方向上的误差角度分别表示为：

[0024]

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{A \rightarrow C} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = -\frac{2\varepsilon_y}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{C \rightarrow D} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\omega_2} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{D \rightarrow B} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = \frac{2\varepsilon_x}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{B \rightarrow A} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\omega_2} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{A \rightarrow C} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = \frac{2\varepsilon_y}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{C \rightarrow B} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\omega_2} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{B \rightarrow D} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = -\frac{2\varepsilon_x}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{D \rightarrow A} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\omega_2} \end{array} \right.$$

[0025]

$$\left\{ \begin{array}{l} \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{A \rightarrow C} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = 2\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{C \rightarrow D} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{D \rightarrow B} = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = 2\frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{B \rightarrow A} = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{A \rightarrow C} = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = -2\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{C \rightarrow B} = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{B \rightarrow D} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = -2\frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \\ \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{D \rightarrow A} = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \end{array} \right.$$

[0026] 将一个完整转动周期内的 IMU 停顿位置和转动过程的东向和北向的水平误差角分别相加, 得到导航系下累计的水平误差角度,

$$[0027] \quad \begin{cases} \int \varepsilon_E^n dt = 0 \\ \int \varepsilon_N^n dt = 0 \end{cases}$$



[0028] 导航坐标系上水平方向上陀螺仪常值偏差得到调制,该常值偏差对系统的作用为零,水平方向上加速度计零偏也得到类似的调制。

[0029] 3、所述的将 IMU 坐标系下陀螺仪的输出值 $\omega_{is}^s$ 带入惯导系统中采用四元数法对捷联矩阵 $T_s^n$ 进行更新包括:

[0030] 更新四元数和姿态矩阵:

[0031] 设载体坐标系相对导航坐标系的转动四元数为:

$$[0032] \quad Q = q_0 + q_1 i_s + q_2 j_s + q_3 k_s$$

[0033] 其中: $i_s$ 、 $j_s$ 、 $k_s$ 分别表示 IMU 坐标系  $ox_s$  轴、 $oy_s$  轴、 $oz_s$  轴上的单位方向向量;

[0034] 四元数的即时修正通过解四元数微分方程 $\dot{Q} = \frac{1}{2} Q \omega_{ns}^s$ 来实现:

$$[0035] \quad \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ns}^{sx} & -\omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sz} \\ \omega_{ns}^{sx} & 0 & \omega_{ns}^{sz} & -\omega_{ns}^{sy} \\ \omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sz} & 0 & \omega_{ns}^{sx} \\ \omega_{ns}^{sz} & \omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

[0036] 其中: $\omega_{ns}^{sx}$ 、 $\omega_{ns}^{sy}$ 、 $\omega_{ns}^{sz}$ 分别表示载体相对导航系的运动角速度在 IMU 坐标系  $ox_s$  轴、 $oy_s$  轴、 $oz_s$  轴上的分量;

[0037] 姿态矩阵 $T_s^n$ 的更新过程为:

$$[0038] \quad T_s^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

[0039] 4、所述的计算出经过 IMU 旋转调制后载体的速度和位置地方法为:

[0040] 1) 计算导航系下加速度:

$$[0041] \quad \begin{bmatrix} f^{nx} \\ f^{ny} \\ f^{nz} \end{bmatrix} = T_s^n \begin{bmatrix} f_{is}^{sx} \\ f_{is}^{sy} \\ f_{is}^{sz} \end{bmatrix}$$

[0042] 2) 计算载体的水平速度和位置:

[0043] 根据  $t_1$  时刻的载体东向水平速度  $V_x(t_1)$  和北向水平速度  $V_y(t_1)$ , 求取  $t_1$  时刻载体水平速度的变化率为:

$$[0044] \quad \begin{cases} \dot{V}_x(t_1) = f^{nx} + (2\omega_{ie}^{nz} + \omega_{en}^{nz})V_y(t_1) \\ \dot{V}_y(t_1) = f^{ny} - (2\omega_{ie}^{nz} + \omega_{en}^{nz})V_x(t_1) \end{cases}$$

[0045] 在  $t_2$  时刻水平速度和载体位置分别为:

$$[0046] \quad \begin{cases} V_x(t_2) = V_x(t_1) + \dot{V}_x(t_1)(t_2 - t_1) \\ V_y(t_2) = V_y(t_1) + \dot{V}_y(t_1)(t_2 - t_1) \end{cases}$$

[0047]

$$\begin{cases} \varphi(t_2) = \varphi(t_1) + \frac{V_y(t_2)}{R_{yp}}(t_2 - t_1) \\ \lambda(t_2) = \lambda(t_1) + \frac{V_x(t_2)}{R_{xp} \cos \varphi}(t_2 - t_1) \end{cases}$$

[0048] 3) 计算载体速度误差和位置误差：

$$[0049] \quad \begin{cases} \Delta V_x = V_x(t_2) - V_{x0} \\ \Delta V_y = V_y(t_2) - V_{y0} \end{cases}$$

[0050]

$$\begin{cases} \Delta \varphi = \varphi(t_2) - \varphi_0 \\ \Delta \lambda = \lambda(t_2) - \lambda_0 \end{cases}$$

[0051] 其中： $V_{x0}$ 、 $V_{y0}$  分别表示初始时刻载体的东向和北向速度； $\Delta V_x$ 、 $\Delta V_y$  分别表示载体东向、北向速度的变化量； $\varphi_0$ 、 $\lambda_0$  分别表示初始时刻载体所处位置的经度和纬度； $\Delta \varphi$ 、 $\Delta \lambda$  分别表示载体的纬度、经度的变化量； $R_{xp}$ 、 $R_{yp}$  分别表示地球子午圈、卯酉圈的曲率半径； $t_1$ 、 $t_2$  为惯导系统的解算过程中两个相邻的时间点。

[0052] 本发明与现有技术相比的优点在于：本发明打破了传统捷联惯导系统中 IMU 与载体固连导致系统导航精度受到惯性器件偏差影响的约束，提出一种将 IMU 绕载体方位轴固定的四个位置正反转停的惯性器件常值偏差调制方案，该方法可以将水平方向上惯性器件常值偏差进行调制，有效地提高导航定位精度。

[0053] 对本发明有益的效果说明如下：

[0054] 在 VC++ 仿真条件下，对该方法进行仿真实验：

[0055] 载体处于静止状态，IMU 四位置转停方案的误差模型参数：

[0056] 四个位置的停顿时间： $T_t = 5\text{min}$ ；

[0057] 转动  $180^\circ$  和  $90^\circ$  时消耗的时间： $T_z = 12\text{s}$ ；

[0058] 转动  $180^\circ$  和  $90^\circ$  的过程中，每一个转位中的加减速时间各为  $4\text{s}$ ；

[0059] 载体初始位置：北纬  $45.7796^\circ$ ，东经  $126.6705^\circ$ ；

[0060] 初始姿态误差角：三个初始姿态误差角均为零；

[0061] 赤道半径： $R_e = 6378393.0\text{m}$ ；

[0062] 椭球度： $e = 3.367\text{e-}3$ ；

[0063] 由万有引力可得的地球表面重力加速度： $g_0 = 9.78049$ ；

[0064] 地球自转角速度（弧度/秒）： $7.2921158\text{e-}5$ ；

[0065] 陀螺仪常值漂移： $0.01$  度/小时；

[0066] 加速度计零偏： $10^{-4}g_0$ ；

[0067] 常数： $\pi = 3.1415926$ ；

[0068] 利用发明所述方法得到载体速度误差曲线和位置误差曲线分别如图 3、图 4 所示。结果表明 IMU 四位置转停条件下，采用本发明方法可以获得较高的定位精度。

## 附图说明

[0069] 图 1 为本发明的一种基于单轴四位置转停方案的捷联系统误差抑制方法流程图；

[0070] 图 2 为本发明的 IMU 单轴四位置转停方案图；

[0071] 图 3 为本发明的基于 IMU 单轴四位置转停方案的陀螺仪常值漂移在导航系下的调制曲线；

[0072] 图 4 为本发明的基于 IMU 单轴四位置转停方案的载体速度误差与 IMU 静止状态时载体速度误差的对比实验曲线；

[0073] 图 5 为本发明的基于 IMU 单轴四位置转停方案的载体位置误差与 IMU 静止状态时载体定位误差的对比实验曲线。

### 具体实施方式

[0074] 下面结合附图举例对本发明做更详细地描述：

[0075] (1) 利用全球定位系统 GPS 确定载体的初始位置参数，将它们装订至导航计算机中；

[0076] (2) 光纤陀螺捷联惯性导航系统进行预热后采集光纤陀螺仪和石英加速度计输出的数据；

[0077] (3) IMU 采用 8 个转停次序为一个旋转周期的转位方案；

[0078] 次序 1, IMU 从 A 点出发顺时针转动  $180^\circ$  到达位置 C, 停止时间  $T_t$ ; 次序 2, IMU 从 C 点出发顺时针转动  $90^\circ$  到达位置 D, 停止时间  $T_t$ ; 次序 3, IMU 从 D 点出发逆时针转动  $180^\circ$  到达位置 B, 停止时间  $T_t$ ; 次序 4, IMU 从 B 点出发逆时针转动  $90^\circ$  到达位置 A, 停止时间  $T_t$ ; 次序 5, IMU 从 A 点出发逆时针转动  $180^\circ$  到达位置 C, 停止时间  $T_t$ ; 次序 6, IMU 从 C 点出发逆时针转动  $90^\circ$  到达位置 B, 停止时间  $T_t$ ; 次序 7, IMU 从 B 点出发顺时针转动  $180^\circ$  到达位置 D, 停止时间  $T_t$ ; 次序 8, IMU 从 D 点出发顺时针转动  $90^\circ$  到达位置 A, 停止时间  $T_t$ ; IMU 按照此转动顺序循环进行。为了有效地对水平方向上的惯性器件偏差在对称位置上进行正负平均, 定义水平东向轴上的 IMU 停顿点 p3、p8 与 p4、p7 对称于转轴中心; 北向轴上的停顿点 p1、p5 与 p2、p6 对称于转轴中心。改进的四位置转停方案仍然是转动角度为  $180^\circ$  或  $90^\circ$  间隔进行。

[0079] (4) 将惯性测量单元旋转后陀螺仪生成的数据转换到导航坐标系下, 得到惯性器件常值偏差的调制形式；

[0080] 假定 IMU 水平方向上的陀螺常值漂移分别为  $\varepsilon_x$  和  $\varepsilon_y$ 。载体静止条件下, 由于 IMU 停顿的 A、B、C、D 四个位置相对于导航坐标系对称, 因此在一个循环周期内四个固定位置上器件偏差产生的水平误差角在导航系下必然满足：

$$[0081] \quad \begin{cases} 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_A + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_B + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_C + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_E^n dt\right)_D = 0 \\ 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_A + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_B + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_C + 2\left(\int_0^{T_t} \varepsilon_N^n dt\right)_D = 0 \end{cases} \quad (1)$$

[0082] IMU 正反转动的 8 个环节内, 导航系水平方向上的误差角度可以分别表示为：

[0083]

$$\left\{ \begin{aligned}
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = -\frac{2\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{C \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{D \rightarrow B} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = \frac{2\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{B \rightarrow A} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = \frac{2\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{C \rightarrow B} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{B \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t = -\frac{2\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_E^n dt \right)_{D \rightarrow A} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{\omega_2}
 \end{aligned} \right. \quad (2)$$

[0084]

$$\left\{ \begin{aligned}
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = 2\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{C \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{D \rightarrow B} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{270^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = 2\frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{B \rightarrow A} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{90^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{A \rightarrow C} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_0^{180^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = -2\frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{C \rightarrow B} &= -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{180^\circ}^{90^\circ} \cos \omega_2 t d\omega_2 t = -\frac{\varepsilon_x}{\omega_2} + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{B \rightarrow D} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \sin \omega_1 t d\omega_1 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \int_{90^\circ}^{270^\circ} \cos \omega_1 t d\omega_1 t = -2\frac{\varepsilon_y}{\omega_1} \\
 \left( \int_0^{T_z} \varepsilon_N^n dt \right)_{D \rightarrow A} &= \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \sin \omega_2 t d\omega_2 t + \frac{\varepsilon_y}{\omega_2} \int_{270^\circ}^0 \cos \omega_2 t d\omega_2 t = \frac{\varepsilon_x}{\omega_2} - \frac{\varepsilon_y}{\omega_2}
 \end{aligned} \right. \quad (3)$$

[0085] 将一个完整转动周期内的 IMU 停顿位置和转动过程的东向和北向的水平误差角分别相加, 得到导航系下累计的水平误差角度。

$$[0086] \quad \left\{ \begin{aligned}
 \int \varepsilon_E^n dt &= 0 \\
 \int \varepsilon_N^n dt &= 0
 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

[0087] 至此,导航坐标系上水平方向上陀螺仪常值偏差得到调制,该常值偏差对系统的作用为零,水平方向上加速度计零偏也得到类似的调制。

[0088] (5) 将 IMU 坐标系下陀螺仪的输出值  $\omega_{is}^s$  带入惯导系统中采用四元数法对捷联矩阵  $T_s^n$  进行更新:

$$[0089] \quad \omega_{ns}^s = \omega_{is}^s - (T_s^n)^T (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \quad (5)$$

[0090] 其中:  $\omega_{ie}^n$  为地球自转角速度在导航系下的分量;  $\omega_{en}^n$  为导航坐标系相对地球坐标系的运动角速度在导航系下的分量;  $\omega_{ns}^s$  为 IMU 相对导航坐标系的运动角速度在载体坐标系上的分量。

[0091] 更新四元数和姿态矩阵:

[0092] 设载体坐标系相对导航坐标系的转动四元数为:

$$[0093] \quad Q = q_0 + q_1 i_s + q_2 j_s + q_3 k_s \quad (6)$$

[0094] 其中:  $i_s$ 、 $j_s$ 、 $k_s$  分别表示 IMU 坐标系  $ox_s$  轴、 $oy_s$  轴、 $oz_s$  轴上的单位方向向量。

[0095] 四元数的即时修正可以通过解四元数微分方程  $\dot{Q} = \frac{1}{2} Q \omega_{ns}^s$  来实现:

$$[0096] \quad \begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{ns}^{sx} & -\omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sz} \\ \omega_{ns}^{sx} & 0 & \omega_{ns}^{sz} & -\omega_{ns}^{sy} \\ \omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sz} & 0 & \omega_{ns}^{sx} \\ \omega_{ns}^{sz} & \omega_{ns}^{sy} & -\omega_{ns}^{sx} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0097] 其中:  $\omega_{ns}^{sx}$ 、 $\omega_{ns}^{sy}$ 、 $\omega_{ns}^{sz}$  分别表示载体相对导航系的运动角速度在 IMU 坐标系  $ox_s$  轴、 $oy_s$  轴、 $oz_s$  轴上的分量。

[0098] 姿态矩阵  $T_s^n$  的更新过程为:

$$[0099] \quad T_s^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0100] (6) 利用石英加速度计的输出值  $f_{is}^s$  和步骤 (5) 计算的姿态矩阵  $T_s^n$ , 计算出经过 IMU 旋转调制后载体的速度和位置。

[0101] 1) 计算导航系下加速度:

$$[0102] \quad \begin{bmatrix} f^{nx} \\ f^{ny} \\ f^{nz} \end{bmatrix} = T_s^n \begin{bmatrix} f_{is}^{sx} \\ f_{is}^{sy} \\ f_{is}^{sz} \end{bmatrix} \quad (9)$$

[0103] 2) 计算载体的水平速度和位置:

[0104] 根据  $t_1$  时刻的载体东向水平速度  $V_x(t_1)$  和北向水平速度  $V_y(t_1)$ , 求取  $t_1$  时刻载体水平速度的变化率为:

$$[0105] \quad \begin{cases} \dot{V}_x(t_1) = f^{nx} + (2\omega_{ie}^{nz} + \omega_{en}^{nz})V_y(t_1) \\ \dot{V}_y(t_1) = f^{ny} - (2\omega_{ie}^{nz} + \omega_{en}^{nz})V_x(t_1) \end{cases} \quad (10)$$

[0106] 在  $t_2$  时刻水平速度和载体位置分别为:

$$[0107] \quad \begin{cases} V_x(t_2) = V_x(t_1) + \dot{V}_x(t_1)(t_2 - t_1) \\ V_y(t_2) = V_y(t_1) + \dot{V}_y(t_1)(t_2 - t_1) \end{cases} \quad (11)$$

[0108]

$$\begin{cases} \varphi(t_2) = \varphi(t_1) + \frac{V_y(t_2)}{R_{yp}}(t_2 - t_1) \\ \lambda(t_2) = \lambda(t_1) + \frac{V_x(t_2)}{R_{xp} \cos \varphi}(t_2 - t_1) \end{cases} \quad (12)$$

[0109] 3) 计算载体速度误差和位置误差：

$$[0110] \quad \begin{cases} \Delta V_x = V_x(t_2) - V_{x0} \\ \Delta V_y = V_y(t_2) - V_{y0} \end{cases} \quad (13)$$

[0111]

$$\begin{cases} \Delta \varphi = \varphi(t_2) - \varphi_0 \\ \Delta \lambda = \lambda(t_2) - \lambda_0 \end{cases} \quad (14)$$

[0112] 其中： $V_{x0}$ 、 $V_{y0}$  分别表示初始时刻载体的东向和北向速度； $\Delta V_x$ 、 $\Delta V_y$  分别表示载体东向、北向速度的变化量； $\varphi_0$ 、 $\lambda_0$  分别表示初始时刻载体所处位置的经度和纬度； $\Delta \varphi$ 、 $\Delta \lambda$  分别表示载体的纬度、经度的变化量； $R_{xp}$ 、 $R_{yp}$  分别表示地球子午圈、卯酉圈的曲率半径； $t_1$ 、 $t_2$  为惯导系统的解算过程中两个相邻的时间点。

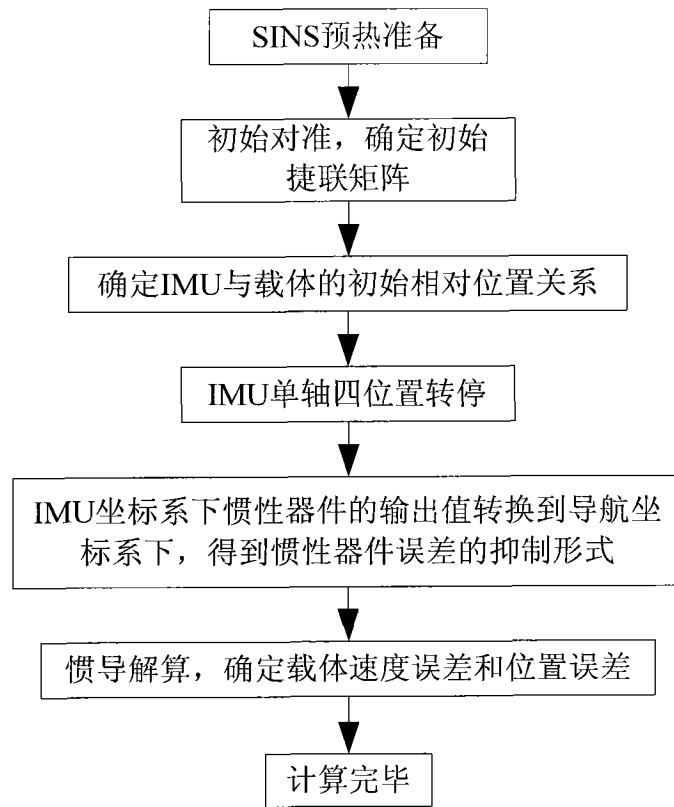


图 1

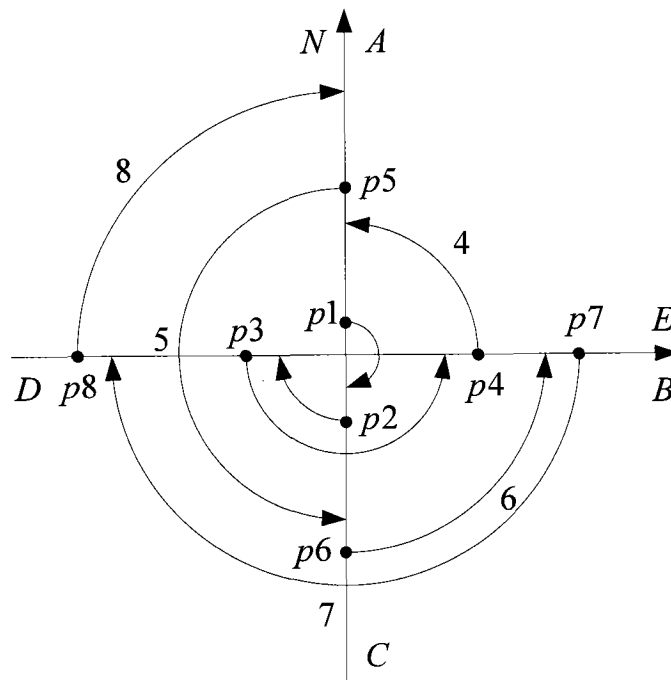


图 2

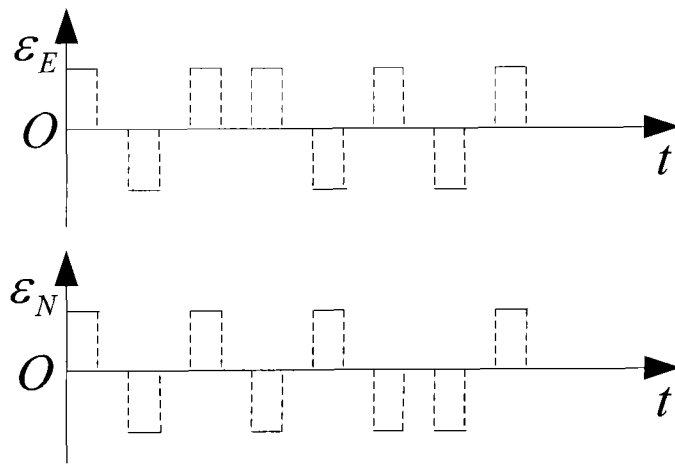


图 3

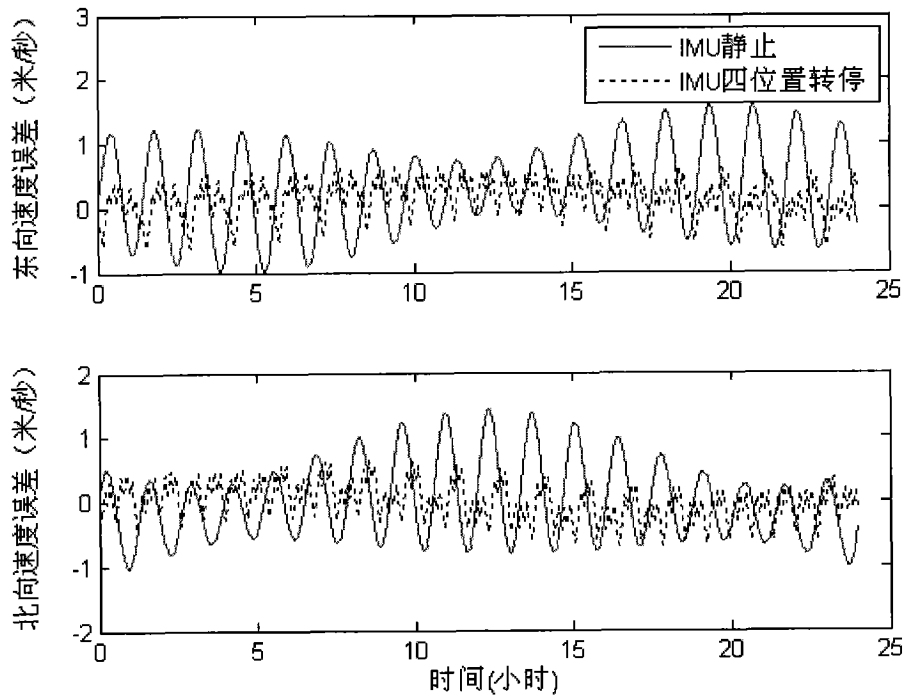


图 4



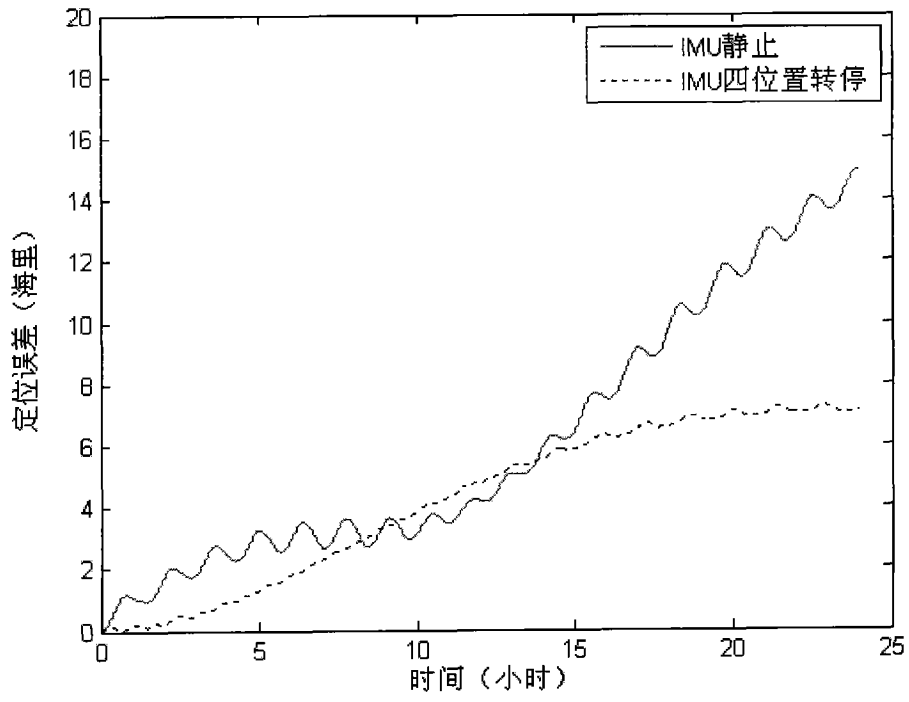


图 5