

DOI:10.11918/201811112

船用极区格网惯性导航系统综合校正方法

方涛,黄卫权,王宗义

(哈尔滨工程大学 自动化学院,哈尔滨 150001)

摘要:为抑制适用于极区的船用格网惯性导航系统随时间积累的导航误差,提出一种基于格网坐标系的综合校正方法对陀螺常值漂移进行估计和补偿.该方法首先基于格网坐标系推导了 P 方程,该方程建立起位置误差、格网航向误差与平台漂移角 ψ 的关系;其次推导了 ψ 方程,该方程建立起陀螺常值漂移与平台漂移角的关系;最后基于 P 方程与 ψ 方程设计了一种两点式综合校正方案,该方案通过建立观测量误差与载体坐标系下陀螺常值漂移之间的关系完成对陀螺常值漂移的估计和补偿.系统在外水平阻尼条件下间断地获取两次外部位置和航向信息后对陀螺常值漂移进行估计,进而对位置和格网航向误差重调并补偿陀螺常值漂移即可完成船用格网惯导系统的综合校正.仿真结果表明:在两次间断的外部位置和航向信息辅助下,所设计的两点综合校正算法可以准确地估计出载体坐标系下的陀螺常值漂移,补偿陀螺常值漂移并进行系统重调可有效抑制船用格网惯导系统随时间积累的导航误差,从而有效地保证了船舶在极区航行时的导航精度.

关键词:船用格网惯导系统;极区;综合校正;陀螺常值漂移;平台漂移角;外水平阻尼

中图分类号: U666.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2020)04-0058-08

Comprehensive calibration method of shipborne grid inertial navigation system

FANG Tao, HUANG Wei-quan, WANG Zong-yi

(College of Automation, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To restrain the accumulated navigation error of shipborne grid inertial navigation system (INS), the paper proposed a comprehensive calibration method based on grid frame to estimate and compensate the gyroscope constant drift. First, the P equation was derived based on grid frame, and the P equation established the relationship among the position errors, the grid yaw error, and the platform drift angles ψ . Then the ψ equation was derived to establish the relationship between the gyroscope constant drifts and the platform drift angles ψ . Finally, on the basis of P equation and ψ equation, a two-point comprehensive calibration scheme was designed, and the gyroscope constant drifts in body frame were estimated and compensated by establishing the relationship between the gyroscope constant drifts and observation errors. Under external level damping state, the gyroscope constant drifts were estimated after obtaining two intermittent external position and azimuth information, then the comprehensive calibration of shipborne grid INS was realized by resetting the position errors and grid yaw error and compensating the gyroscope constant drifts. Simulation results demonstrate that with the aid of two intermittent external position and yaw information, the proposed two-point comprehensive calibration method can estimate the gyroscope constant drifts accurately. Conducting the gyroscope error compensation and the system reset can efficiently restrain the accumulated errors of shipborne grid INS, thus significantly improve the navigation accuracy of ships navigating in polar regions.

Keywords: shipborne grid inertial navigation system; polar regions; comprehensive calibration; gyroscope constant drifts; platform drift angles; external level damping

具备极区导航能力是现代船舶在极区航行时的重要性能指标^[1]. 惯性导航系统因其自主性、导航信息的连续性与完备性成为船舶在极区航行的首选^[2-3]. 由于高纬度地区经线快速收敛,常用的指北方位惯导力学编排在极区存在定位与定向的困

难^[4-6]. 以格网坐标系为导航坐标系的格网惯性导航力学编排可以作为船舶在极区航行时的理想力学编排^[7].

由于惯性器件测量误差等误差源的存在,同常规指北方位惯导系统,格网惯导系统同样存在导航误差随时间积累的问题,文献[8-9]分析得出格网惯导系统同样存在3类周期性振荡误差:84.4 min舒勒振荡、傅科振荡以及24 h地球振荡,这种随时间积累的周期性振荡误差对于在海上长时间工作的船舶来说是极为不利的^[10].

收稿日期: 2018-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(61633008)

作者简介: 方涛(1992—),男,博士研究生;

黄卫权(1968—),男,教授,博士生导师;

王宗义(1964—),男,教授,博士生导师

通信作者: 黄卫权, huangwei-quan@hrbeu.edu.cn

为抑制格网惯导系统随时间积累的误差,可采取常用的组合导航方式如卫星导航系统/惯性导航系统的方式通过卡尔曼滤波器对系统误差进行准确估计并进行实时补偿^[11-12].然而,船舶在实际航行中为确保自身的隐蔽性及自主性,通常不会获取连续的卫星导航信息^[13].综合校正技术通过定期地对陀螺漂移进行测定补偿,并对惯导系统的航向和位置进行重调来提高系统的导航精度.针对非连续性的外部参考信息,文献[14-16]对适用于指北方位惯导系统的两点校、三点校以及点点校等综合校正方式进行了详细的推导.然而目前并没有相关文献对适用于极区的格网惯导力学编排综合校正算法进行叙述.

本文在格网惯导力学编排的基础上,首先通过外水平阻尼技术对格网惯导系统舒勒振荡进行抑制.为进一步提高格网惯导系统的导航精度,在外水平阻尼的基础上,针对有间断的外部位置及航向信息辅助的情况,基于格网坐标系推导了 P 方程以及 ψ 方程,设计了适用于船用格网惯导力学编排的两点校综合校正算法,其中 P 方程建立起位置误差、格网航向误差与平台漂移角 ψ 的关系, ψ 方程建立起平台漂移角与陀螺常值漂移的关系.该算法利用两次间断的外部位置和航向信息对陀螺常值漂移进行估计,即在第1次外部导航信息辅助下完成系统重调,在第2次外部导航信息辅助下同时完成陀螺常值漂移的估计和系统重调,从而通过陀螺漂移补偿抑制船用格网惯导系统随时间积累的导航误差,以保证船舶在极区航行时的自主性.

1 格网惯导外水平阻尼算法

本文所设计的两点校综合校正算法在外水平阻尼条件下进行,外水平阻尼条件下进行综合校正的原因有两点:一方面当外部测速设备如多普勒计程仪提供的参考速度可用时,外水平阻尼状态是船舶常用的工作状态;另一方面由于水平阻尼可有效减小水平姿态误差,这有助于在校正过程中提高系统重调的性能.在船用格网惯性导航力学编排的基础上,参考指北方位惯导力学编排外水平阻尼舒勒振荡抑制方法,可以设计出适用于格网惯导系统力学编排的外水平阻尼算法,格网惯导力学编排详见文献[8].格网惯性导航系统外水平阻尼算法系统方块图如图1所示,算法实现过程中所涉及的控制方程详见文献[9].

图1中, V_{GN} 为格网北向速度, V_{rGN} 为外部参考速度在格网北向的速度分量, φ_{GE} 为格网东向姿态误差角, R 为地球半径, g 为重力加速度常量, s 为拉普拉

斯变量, $H_y(s)$ 为水平阻尼网络.本文用到的水平阻尼网络为

$$H_y(s) = \frac{(s + 8.5 \times 10^{-4})(s + 9.412 \times 10^{-2})}{(s + 8.0 \times 10^{-3})(s + 1.0 \times 10^{-2})}.$$

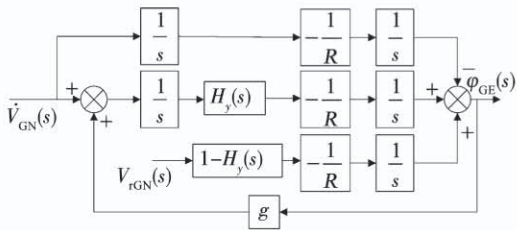


图1 外水平阻尼系统方块图

Fig.1 Block diagram of external level damping

2 格网惯导两点校综合校正算法

2.1 坐标系定义

本文用到的坐标系及其定义如下.

1) 格网坐标系 G . 格网坐标系如图2所示.过 P 点分别作本初子午面的平行平面和当地水平面,以两平面的交线作为格网坐标系的 G_N 轴, P 点处的天向作为格网坐标系的 G_U 轴, G_E 轴与 G_N 轴和 G_U 轴构成右手坐标系.

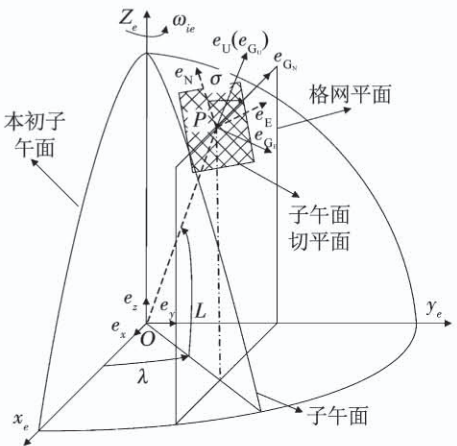


图2 格网坐标系

Fig.2 Grid frame

2) $OEPQ$ 坐标系. 原点位于载体质心, E 轴与纬度圈相切指向东, P 轴平行于地球极轴, Q 轴与另外两轴构成右手坐标系.

3) 计算机坐标系 c . 原点位于导航计算机计算出来的位置,坐标轴指向同格网坐标系.计算机坐标系相对于格网坐标系的夹角为 θ .

4) 数学平台坐标系 p . 原点位于载体质心,模拟格网坐标系.数学平台坐标系相对于格网坐标系的夹角为 φ ,数学平台坐标系相对于计算机坐标系的夹角为 ψ .

φ 、 θ 和 ψ 之间的关系为

$$\varphi = \theta + \psi. \quad (1)$$

其他用到的坐标系还包括:载体坐标系 b 、地理坐标系 g 、惯性系 i 以及地心地固坐标系 e (ECEF).

2.2 P 方程

P 方程即为建立位置误差、格网航向误差与平台漂移角 ψ 之间关系的方程. 设船舶所在点 P 的经、纬度以及格网方位角分别为 λ 、 L 和 σ (σ 为格网北向为地理北向夹角), 计算机坐标系所对应的经、纬度以及格网方位角的计算值分别为 λ_c 、 L_c 和 σ_c . 考虑格网坐标系与计算机坐标系由于位置差异造成的格网方位角误差, 则计算机坐标系相对于格网坐标系的夹角 θ 在地理坐标系 g 下的投影为

$$\theta^g = \begin{bmatrix} -\delta L \\ \delta \lambda \cos L \\ \delta \lambda \sin L - \delta \sigma \end{bmatrix}.$$

式中: $\delta \lambda$ 为经度误差; δL 为纬度误差; $\delta \sigma$ 为格网方位角误差.

计算机坐标系相对于格网坐标系的夹角 θ 在格网坐标系下的投影为

$$\theta = C_g^C \theta^g = \begin{bmatrix} \cos \sigma & -\sin \sigma & 0 \\ \sin \sigma & \cos \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\delta L \\ \delta \lambda \cos L \\ \delta \lambda \sin L - \delta \sigma \end{bmatrix}. \quad (2)$$

展开式(2)可以得到:

$$\begin{cases} \theta_x = -\delta L \cos \sigma - \delta \lambda \cos L \sin \sigma, \\ \theta_y = -\delta L \sin \sigma + \delta \lambda \cos L \cos \sigma, \\ \theta_z = \delta \lambda \sin L - \delta \sigma. \end{cases}$$

水平阻尼条件下, 当系统达到稳态时, 格网水平姿态误差主要受加速度计零偏影响, 而现代惯性导航系统所用的加速度计零偏较小, 其所引起的 φ_x 、 φ_y 均很小, 即有 $\varphi_x \approx 0$ 和 $\varphi_y \approx 0$ 成立. 结合式(1)则有:

$$\begin{cases} \psi_x = -\theta_x = \delta L \cos \sigma + \delta \lambda \cos L \sin \sigma, \\ \psi_y = -\theta_y = \delta L \sin \sigma - \delta \lambda \cos L \cos \sigma, \\ \varphi_z = \psi_z + \delta \lambda \sin L - \delta \sigma. \end{cases} \quad (3)$$

为简化推导过程, 假设地球模型为圆球模型. P 点处 ECEF 坐标系下的位置为 $(x \ y \ z)^T$. 忽略高度通道的影响, 因为 $x = R \cos L \cos \lambda$, $y = R \cos L \sin \lambda$, 对两式两边取一阶全增量有

$$\begin{cases} -R \sin L \cos \lambda \delta L - R \cos L \sin \lambda \delta \lambda = \delta x, \\ -R \sin L \sin \lambda \delta L + R \cos L \cos \lambda \delta \lambda = \delta y, \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可以分别解出 $\delta \lambda$ 、 δL 为

$$\begin{cases} \delta \lambda = \frac{\delta y \cos \lambda - \delta x \sin \lambda}{R \cos L}, \\ \delta L = -\frac{\delta x \cos \lambda + \delta y \sin \lambda}{R \sin L}. \end{cases} \quad (5)$$

又根据 $(\lambda \ L)^T$ 与 $(x \ y \ z)^T$ 的转换关系, 即

$$\begin{cases} \sin \lambda = \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \cos \lambda = \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \\ \sin L = \frac{z}{R}, \cos L = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R}, \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)可得:

$$\begin{cases} \delta \lambda = \frac{x \delta y - y \delta x}{x^2 + y^2}, \\ \delta L = -\frac{x \delta x + y \delta y}{z \sqrt{x^2 + y^2}}. \end{cases} \quad (7)$$

格网方位角 σ 与 $(\lambda \ L)^T$ 的转换关系为

$$\begin{cases} \sin \sigma = \frac{\sin L \sin \lambda}{\sqrt{1 - \cos^2 L \sin^2 \lambda}}, \\ \cos \sigma = \frac{\cos \lambda}{\sqrt{1 - \cos^2 L \sin^2 \lambda}}. \end{cases} \quad (8)$$

将式(6)代入式(8)可得:

$$\begin{cases} \sin \sigma = \frac{yz}{\sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{x^2 + z^2}}, \\ \cos \sigma = \frac{Rx}{\sqrt{x^2 + y^2} \sqrt{x^2 + z^2}}. \end{cases} \quad (9)$$

将式(6)、(7)和式(9)代入式(3)可得:

$$\begin{cases} \psi_x = -\frac{\sqrt{x^2 + z^2}}{Rz} \delta x - \frac{xy}{Rz \sqrt{x^2 + z^2}} \delta y, \\ \psi_y = -\frac{1}{\sqrt{x^2 + z^2}} \delta y, \\ \varphi_z = \psi_z + \frac{x \delta y - y \delta x}{x^2 + y^2} \frac{z}{R} - \delta \sigma, \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)前两式可以解得:

$$\begin{cases} \delta x = \frac{xy}{\sqrt{x^2 + z^2}} \psi_y - \frac{Rz}{\sqrt{x^2 + z^2}} \psi_x, \\ \delta y = -\sqrt{x^2 + z^2} \psi_y. \end{cases} \quad (11)$$

由式(8)对 $\cos \sigma$ 两边求一阶全增量可得:

$$\delta \sigma = \frac{\delta \lambda \sin L}{1 - \cos^2 L \sin^2 \lambda} + \frac{\delta L \sin \lambda \cos \lambda \cos L}{1 - \cos^2 L \sin^2 \lambda}. \quad (12)$$

将式(6)、(7)代入式(12)并结合式(11)可以得到:

$$\delta \sigma = \frac{R^2 y \psi_x}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + z^2}} - \frac{R x z \psi_y}{(x^2 + y^2) \sqrt{x^2 + z^2}}. \quad (13)$$

由式(10)、式(13)可以进一步得到:

$$\varphi_z = \psi_z - \frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}} \psi_x. \quad (14)$$

联立式(11)、式(14)可以得到:

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \varphi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{Rz}{\sqrt{x^2+z^2}} & \frac{xy}{\sqrt{x^2+z^2}} & 0 \\ 0 & -\sqrt{x^2+z^2} & 0 \\ -\frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_x \\ \psi_y \\ \psi_z \end{bmatrix}.$$

令

$$N = \begin{bmatrix} -\frac{Rz}{\sqrt{x^2+z^2}} & \frac{xy}{\sqrt{x^2+z^2}} & 0 \\ 0 & -\sqrt{x^2+z^2} & 0 \\ -\frac{y}{\sqrt{x^2+z^2}} & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

为了便于分析和计算,引入 $OEPQ$ 坐标系, $OEPQ$ 坐标系与格网坐标系的转换关系为

$$C_{OEPQ}^G = \begin{bmatrix} \cos \sigma & -\sin \sigma & 0 \\ \sin \sigma & \cos \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos L & -\sin L \\ 0 & \sin L & \cos L \end{bmatrix}, \quad (16)$$

则可求得格网坐标系下位置误差、航向误差与 $OEPQ$ 坐标系下的平台漂移角的关系为

$$P(t) = \begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \varphi_z \end{bmatrix} = NC_{OEPQ}^G \begin{bmatrix} \psi_E(t) \\ \psi_P(t) \\ \psi_Q(t) \end{bmatrix} = M\psi(t). \quad (17)$$

将式(6)与式(9)代入式(16)结合式(15)可进一步得到 M 为

$$M = \begin{bmatrix} \frac{-xz}{\sqrt{x^2+y^2}} & y & \frac{-yz}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ \frac{-yz}{\sqrt{x^2+y^2}} & -x & \frac{xz}{\sqrt{x^2+y^2}} \\ \frac{-Rxy}{\sqrt{x^2+y^2}(x^2+z^2)} & \frac{Rz}{x^2+z^2} & \frac{Rx^2}{\sqrt{x^2+y^2}(x^2+z^2)} \end{bmatrix}.$$

式(17)建立起了适用于格网惯性导航力学编排的 P 方程,如果能从外界得到准确的位置和航向信息计算出 $P(t)$,就可以利用式(17)计算出 $OEPQ$ 坐标系下的平台漂移角 $\psi(t)$. 由于 P 方程的推导是基于格网坐标系,因而该方是适用于极区的.

2.3 ψ 方程

为了使数学平台跟踪格网坐标系的旋转角速度,计算机根据载体的位置及速度计算出平台的指令角速度,理想情况下系统不存在定位误差,陀螺也没有漂移,这时格网、计算机和数学平台坐标系完全重合.但由于数学平台坐标系与计算机坐标系之间存在 ψ 角,同时又由于陀螺漂移 ε 的存在,平台的指令角速度为

$$\omega_{ip} = \omega_{ic} + \psi \times \omega_{ic} + \varepsilon. \quad (18)$$

由矢量角 ψ 的定义可知,数学平台坐标系相对计算机坐标系的角速度为

$$\left. \frac{d\psi}{dt} \right|_c = \dot{\psi}. \quad (19)$$

根据角速度合成定理有

$$\omega_{ip} = \omega_{ic} + \left. \frac{d\psi}{dt} \right|_c. \quad (20)$$

由式(18)和式(20)可以得到:

$$\left. \frac{d\psi}{dt} \right|_c + \omega_{ic} \times \psi = \varepsilon. \quad (21)$$

根据矢量相对微商原理,式(21)相对格网坐标系的微分方程为

$$\left. \frac{d\psi}{dt} \right|_G + \omega_{iG} \times \psi = \varepsilon_G. \quad (22)$$

由于船舶的航行速度很低,地球自转角速度 $\Omega \gg \omega_{eG}$,结合式(19),式(22)可以简化为

$$\dot{\psi}_G + \Omega \times \psi = \varepsilon_G. \quad (23)$$

地球自转角速度 Ω 仅在 $OEPQ$ 坐标系 OP 轴存在分量,只考虑陀螺常值漂移,将式(23)投影到 $OEPQ$ 坐标系可得:

$$\begin{cases} \dot{\psi}_E + \Omega \psi_Q = \varepsilon_E, \\ \dot{\psi}_P = \varepsilon_P, \\ \dot{\psi}_Q - \Omega \psi_E = \varepsilon_Q, \end{cases} \quad (24)$$

式(24)即为 ψ 方程,该方程建立起了陀螺常值漂移与平台漂移角的关系.

2.4 系统综合校正方案

由式(24)参考文献[14]的推导方式,可以得到载体系下的陀螺漂移为

$$\varepsilon_b = C_G^b B \Omega U^{-1}(t_{n+1}, t_n) \cdot [\psi(t_{n+1}) - T(t_{n+1}, t_n) \psi(t_n)]. \quad (25)$$

式中: C_G^b 为格网坐标系与载体坐标系之间的转换矩阵; t_n, t_{n+1} 分别为两次获得外部参考信息的时刻. 令 $a_n = \Omega(t_{n+1} - t_n)$, 则:

$$U(t_{n+1}, t_n) = \begin{bmatrix} \sin a_n & 0 & \cos a_n - 1 \\ 0 & a_n & 0 \\ 1 - \cos a_n & 0 & \sin a_n \end{bmatrix},$$

$$T(t_{n+1}, t_n) = \begin{bmatrix} \cos a_n & 0 & -\sin a_n \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin a_n & 0 & \cos a_n \end{bmatrix}.$$

式(25)表示了平台漂移角 ψ 与陀螺漂移 ε 的关系. 在两次观测点上,测出惯导系统的误差 $P(t_n)$ 、 $P(t_{n+1})$,结合式(17)将式(25)改写为

$$\varepsilon_b = C_G^b B \Omega U^{-1}(t_{n+1}, t_n) \cdot [M^{-1}P(t_{n+1}) - T(t_{n+1}, t_n)M^{-1}P(t_n)]. \quad (26)$$

在第1个观测点取得外部位置及航向角信息后,利用外部位置及航向角信息对格网惯导系统进行重调,即将外部位置及航向信息分别赋值给惯导系统对应导航参数,重调后 $t = t_n^+$ 时, $\delta x = 0, \delta y = 0, \delta z = 0, \varphi = 0$, 此时 $\mathbf{P}(t_n^+) = 0$, 式(26)简化为

$$\boldsymbol{\varepsilon}_b = \mathbf{C}_b^T \mathbf{B} \boldsymbol{\Omega} \mathbf{U}^{-1}(t_{n+1}, t_n) \mathbf{M}^{-1} \mathbf{P}(t_{n+1}). \quad (27)$$

通过式(27)即可估计出陀螺常值漂移,利用第2个观测点取得的位置及航向信息对系统进行重调,同时补偿陀螺常值漂移,即完成两点校综合校正过程.通过OEPQ坐标系设计综合校正策略的好处在于简化了综合校正算法的复杂程度,在两次系统重调后,通过简单的矩阵运算即可准确地估计出陀螺常值漂移.两点校综合校正方案原理图如图3所示.图3中, $[x_{r1} \ y_{r1} \ z_{r1}]^T, [x_{r2} \ y_{r2} \ z_{r2}]^T$ 分别为 t_n, t_{n+1} 时刻外部参考位置; ψ_{r1}, ψ_{r2} 分别为 t_n, t_{n+1} 时刻外部参考航向; $[x_{s1} \ y_{s1} \ z_{s1}]^T, [x_{s2} \ y_{s2} \ z_{s2}]^T$ 分别为 t_n, t_{n+1} 时刻惯导输出的位置; ψ_{s1}, ψ_{s2} 分别为 t_n, t_{n+1} 时刻惯导输出的航向.

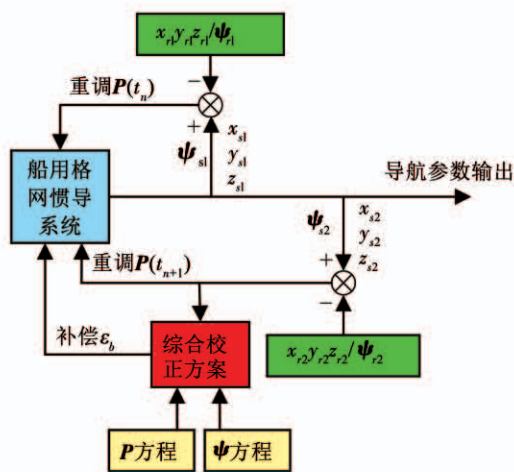


图3 综合校正方案原理图

Fig. 3 Schematic diagram of comprehensive calibration scheme

3 仿真分析

为验证所设计的基于格网坐标系的两点校综合校正算法的可行性,对算法进行仿真分析,在外水平阻尼条件下实现两点校综合校正算法.采用数值解法给出陀螺和加速度计输出信息,仿真条件设置为:仿真时长10 h,采样频率100 Hz; $t = 2$ h 与 $t = 3.5$ h 时刻引入外部位置和航向角信息,ECEF坐标系下外部位置沿3个轴的误差均为5 m,外部航向角误差为6";陀螺常值漂移为 $1 \times 10^{-2} (^{\circ})/\text{h}$,加速度计常值零偏为 10^{-4} g,陀螺随机漂移以及加速度计随机零偏设置为白噪声;初始位置中纬度(85°N),经

度(18°E);初始姿态误差角中格网横摇角误差($6''$),格网纵摇角误差($6''$),格网航向角误差($6'$);船舶沿着纬度圈向东以10 m/s的速度匀速运动;船舶摇摆以正弦规律变化,如下式所示:

$$\begin{cases} \text{pitch} = P_m \sin(\frac{2\pi}{T_p} t + \varphi_p), \\ \text{roll} = R_m \sin(\frac{2\pi}{T_r} t + \varphi_r), \\ \text{yaw} = 90^{\circ} + Y_m \sin(\frac{2\pi}{T_y} t + \varphi_y). \end{cases} \quad (28)$$

式中:摇摆幅值 $P_m = 3^{\circ}$, $R_m = 5^{\circ}$, $Y_m = 4^{\circ}$, 摇摆周期 $T_p = 7$ s, $T_r = 9$ s, $T_y = 12$ s, 摇摆初始相位设置为随机值.仿真结果如图4~6所示.

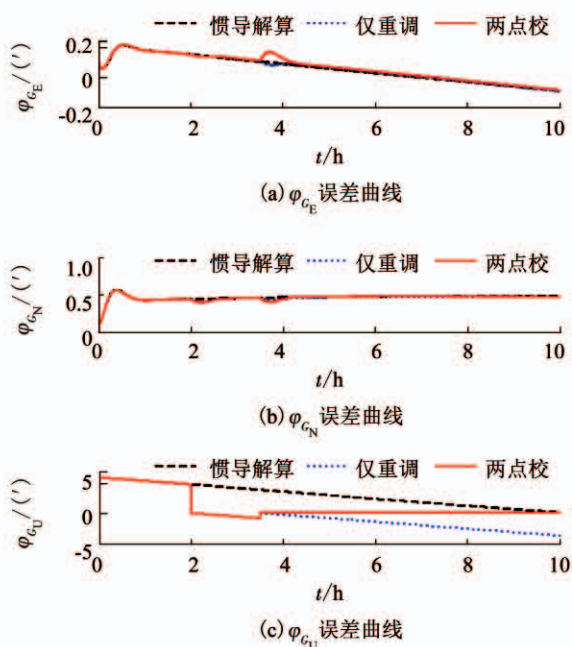


图4 格网姿态误差角仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of grid attitude angle errors

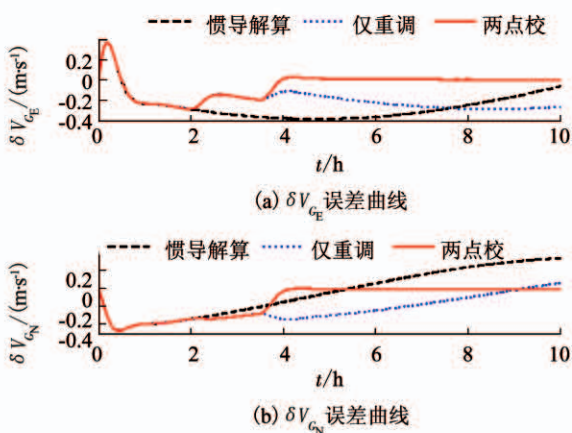


图5 格网水平速度误差仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of grid level velocity errors

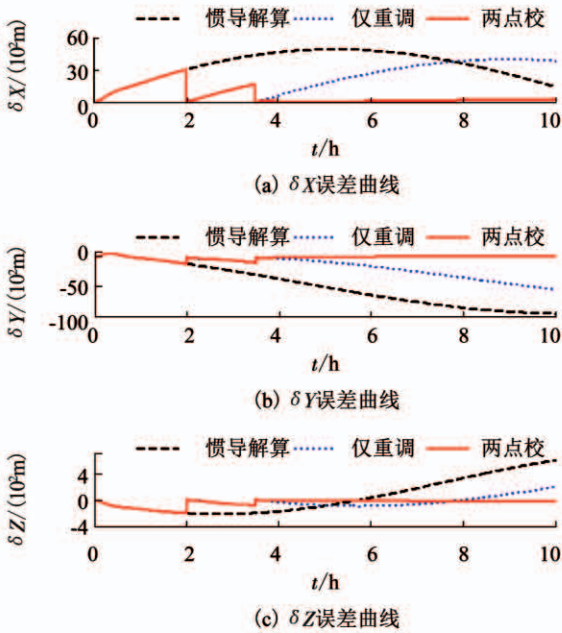


图 6 ECEF 坐标系下位置误差仿真曲线

Fig. 6 Simulation curves of position errors within ECEF frame

由图 4~6 可知,外水平阻尼状态下系统舒勒振荡误差得到了有效抑制,但格网航向误差、格网水平速度误差和位置误差将仍随时间积累.对于格网航向角、格网水平速度以及位置而言,与仅利用外部位置及航向信息进行重调(图中蓝色虚线)相比,两点校综合校正算法由于准确地估计并补偿了陀螺常值漂移,在第 2 次观测点后系统导航误差得到了有效抑制;对格网水平姿态而言,由于稳态条件下格网水平姿态误差主要受加速度计零偏的影响,因而两点校综合校正算法对格网水平姿态误差抑制能力有限.需要补充的一点是:校正点后由于航向和位置重调破坏了系统平衡条件,因而格网水平姿态误差以及位置误差在校正点后将出现短时间的超调误差^[17],这与格网水平速度误差在校正点后不能立刻得到抑制,而需要经过一段调整时间才能减小是一致的.

对该仿真条件下的综合校正算法进行 20 次测试,得到 X 轴陀螺常值漂移估计情况如图 7 所示,3 轴陀螺常值漂移估计平均值及标准差见表 1.

由表 1 可知,所设计的两点校综合校正算法可以准确地估计出载体坐标系下 3 轴陀螺常值漂移,所估计的陀螺常值漂移可用于陀螺测量误差的补偿.

OE PQ 在极点附近其 E 轴指向将发生较快变化,这种情况下综合校正将受到一定影响,因而有必要对第 2 次观测点在极点附近这种情况下的综合校正算法进行仿真测试,进而确定由于 E 轴指向变化

速率加快所产生的影响.仿真条件设置如下:初始位置中纬度(88.868 168°N),经度(18°E);航向角常值为 0°,其余姿态变化如式(28)所示;船舶沿着经线圈向北以 10 m/s 的速度匀速运动;其他仿真条件与上述仿真条件设置相同.仿真结果如图 8~10 所示.

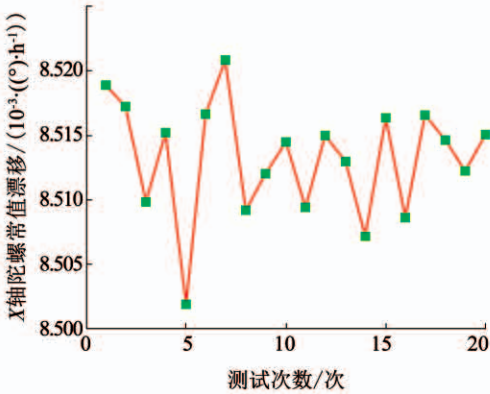


图 7 20 次 X 轴陀螺常值漂移估计值

Fig. 7 Estimation of X-axis gyroscope constant drift for 20 times

表 1 估计的陀螺常值漂移平均值及标准差

Tab. 1 Mean and standard deviation of estimated three-axis gyro constant drift

坐标轴	平均值/ $((^{\circ})\cdot\text{h}^{-1})$	标准差/ $((^{\circ})\cdot\text{h}^{-1})$
X	8.528×10^{-3}	5.159×10^{-6}
Y	7.758×10^{-3}	7.437×10^{-6}
Z	1.001×10^{-2}	2.858×10^{-6}

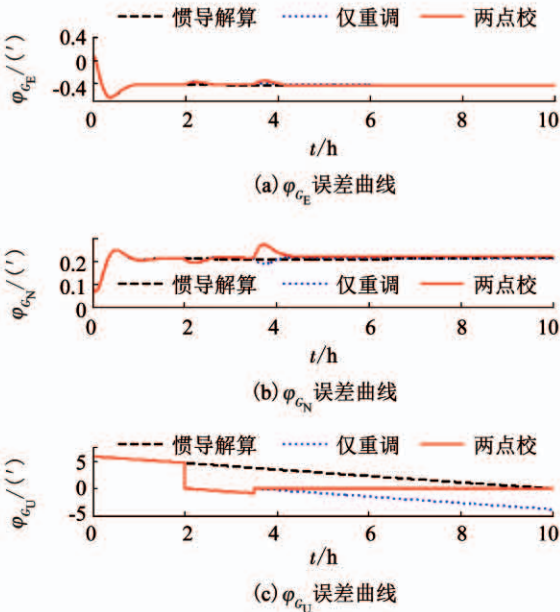


图 8 格网姿态误差角仿真曲线

Fig. 8 Simulation curves of grid attitude angle error

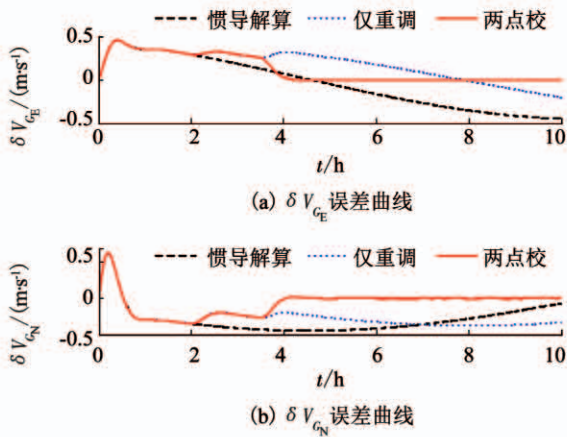


图 9 格网水平速度误差仿真曲线

Fig. 9 Simulation curves of grid level velocity errors

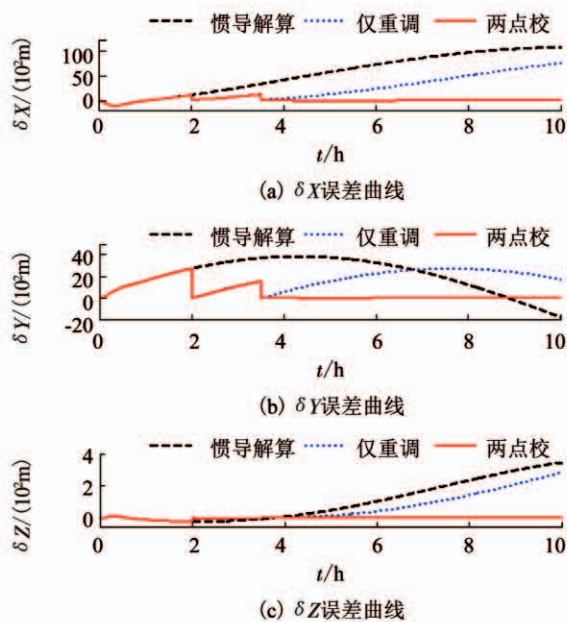


图 10 ECEF 坐标系下位置误差仿真曲线

Fig. 10 Simulation curves of position errors within ECEF frame

对该仿真条件下的综合校正算法进行 20 次测试,3 轴陀螺常值漂移估计平均值及标准差见表 2。

表 2 估计的陀螺常值漂移平均值及标准差
Tab. 2 Mean and standard deviation of estimated three-axis gyro constant drift

坐标轴	平均值/($^{\circ}$ ·h $^{-1}$)	标准差/($^{\circ}$ ·h $^{-1}$)
X	8.528×10^{-3}	7.176×10^{-6}
Y	8.480×10^{-3}	8.954×10^{-6}
Z	1.014×10^{-2}	2.852×10^{-6}

$t = 3.5$ h, 船舶航行至纬度为 $89.999\ 999\ 8^{\circ}$ 处, 按圆球模型计算, 距离极点不足 2 cm。由图 8 ~ 10 可知, 所设计的综合校正算法在进行穿过极点仿真

测试后仍能取得较好的校正效果, 所得到的结论与上述仿真结果一致。同时结合表 2 可知, 所设计的综合校正算法对 3 轴陀螺常值漂移的估计仍能取得较好的估计性能。因而, 可以认为 OEPQ 坐标系在极点附近处 E 轴指向变化速率加快所影响的范围很小, 所设计的两点校综合校正算法在实际应用中具备一定的可行性, 可有效保证船舶在极区航行时的导航精度。由于格网东向姿态误差微分包含格网方位误差与航向正弦值乘积项, 格网方位误差在阻尼条件下其值有正负变化, 因而两次仿真结果中格网东向姿态误差变化趋势不同。

文献[18]指出在目前的外部信息测量精度和惯导系统输出的水平姿态精度下, 为了得到较好的陀螺常值漂移估计效果, 当使用两点校作为综合校正方案时, 陀螺精度应处于 $1 \times 10^{-2} (^{\circ})/\text{h}$ 量级。若要进一步提高本文所提出的基于格网坐标系的两点校综合校正算法的性能, 需要从提高外测信息精度以及补偿格网水平姿态误差这两个方面入手。

4 结 论

- 1) 外水平阻尼条件下, 船用格网惯性导航系统的舒勒振荡得到了有效抑制。然而外水平阻尼技术并不能抑制船用格网惯导系统随时间积累的导航误差。
- 2) 所推导的 P 方程建立起了位置误差、格网航向误差与平台漂移角之间的关系; 所推导的 ψ 方程建立起了陀螺常值漂移与平台漂移角之间的关系。基于以上两方程所设计的综合校正方案准确地建立起了载体坐标系下陀螺常值漂移与外部观测量误差之间的关系, 进而完成对陀螺常值漂移的估计。
- 3) 所提出的两点校综合校正算法可以准确地估计出载体坐标系下的陀螺常值漂移, 对系统进行陀螺常值漂移补偿以及系统重调后可有效抑制船用格网惯导系统随时间积累的导航误差。

参考文献

[1] CHENG Jianhua, WANG Tongda, GUAN Dongxue, et al. Polar transfer alignment of shipborne SINS with a large misalignment angle [J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27 (3): 035101. DOI:10.1088/0957-0233/27/3/035101

[2] YAN Zheping, WANG Lu, ZHANG Wei, et al. Polar grid navigation algorithm for unmanned underwater vehicles[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1599. DOI:10.3390/s17071599

[3] 周琪, 秦永元, 付强文, 等. 极区飞行格网惯性导航算法原理 [J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(2): 210

ZHOU Qi, QIN Yongyuan, FU Qiangwen, et al. Grid mechanization in inertial navigation systems for transpolar aircraft [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(2): 210. DOI: 10.3969/j. issn. 1000-2758. 2013. 02. 010

- [4] YAO Yiqing, XU Xiaosu, LI Yao, et al. Transverse navigation under the ellipsoidal earth model and its performance in both polar and non-polar areas[J]. Journal of Navigation, 2016, 69(2): 335. DOI:10.1017/S0373463315000715
- [5] 周琪, 岳亚洲, 张晓冬, 等. 极区飞行间接格网惯性导航算法[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 18
ZHOU Qi, YUE Yazhou, ZHANG Xiaodong, et al. Indirect grid inertial navigation mechanization for transpolar aircraft[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2014, 22(1): 18. DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2014.01.005
- [6] 张海峰, 张礼伟, 王兴岭, 等. 捷联惯导系统极区导航算法优化设计及误差特性分析[J]. 中国惯性技术学报, 2015, 23(6): 701
ZHANG Haifeng, ZHANG Liwei, WANG Xingling, et al. Optimization design and error analysis of strapdown inertial navigation system mechanization in polar region[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2015, 23(6): 701. DOI:10.13695/j.cnki.12-1222/o3.2015.06.001
- [7] KANG Yingyao, ZHAO Lin, CHENG Jianhua, et al. A novel grid sins/dvl integrated navigation algorithm for marine application[J]. Sensors, 2018, 18(2): 364. DOI:10.3390/s18020364
- [8] HUANG Weiquan, FANG Tao, LUO Li, et al. A damping grid strapdown inertial navigation system based on a kalman filter for ships in polar regions[J]. Sensors, 2017, 17(7): 1551. DOI:10.3390/s17071551
- [9] 杨梁, 李群, 姜述明, 等. 极区格网阻尼导航方法[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(5): 27
YANG Shuo, LI Qun, JIANG Shuming, et al. A damping method for polar navigation based on grid mechanization[J]. Navigation Positioning and Timing, 2016, 3(5): 27. DOI:10.19306/j.cnki.2095-8110.2016.05.006
- [10] 赵琳, 李久顺, 程建华. 双滤波器捷联惯导外阻尼导航算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(3): 178
ZHAO Lin, LI Jiushun, CHENG Jianhua. Double-filters external damping strapdown inertial navigation algorithm[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(3): 178. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201612054
- [11] CHANG Lubin, LI Kailong, HU Baiqing. Huber's M -estimation-based process uncertainty robust filter for integrated INS/GPS[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15(6): 3367. DOI:10.1109/JSEN.2014.2384492
- [12] FENG Kaiqiang, LI Jie, ZHANG Xi, et al. An improved strong tracking cubature Kalman filter for GPS/INS integrated navigation systems[J]. Sensors, 2018, 18(6): 1919. DOI:10.3390/s18061919
- [13] LI Qian, BEN Yueyang, YU Fei, et al. System reset of transversal strapdown INS for ship in polar region[J]. Measurement, 2015, 60(2015): 247. DOI:10.1016/j.measurement.2014.10.020
- [14] 黄德鸣, 程禄. 惯性导航系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986: 175
HUANG Deming, CHENG Lu. Inertial navigation system[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1986: 175
- [15] 高伟, 史宏洋, 张鑫, 等. 基于位置信息的捷联惯导系统综合校正技术[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(6): 101
GAO Wei, SHI Hongyang, ZHANG Xin, et al. Comprehensive correction technology of strapdown inertial navigation system based on position information[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(6): 101. DOI:10.13245/j.hust.140620
- [16] 张鑫. 长航时捷联惯导系统综合校正方法[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(2): 47
ZHANG Xin. Anovel comprehensive calibration method for long-endurance strapdown inertial navigation system[J]. Ship Electronic Engineering, 2014, 34(2): 47. DOI:10.3969/j.issn.1672-9730.2014.02.013
- [17] 丰璐. 长航时惯导系统的阻尼和综合校正技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2016
FENG Lu. Research ondamping and comprehensive calibration techniques for long-term inertial navigation system[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2016
- [18] 杨晓东, 邓太光. 平台式惯导系统两点校的常值误差分析[J]. 交通运输工程学报, 2011, 11(3): 100
YANG Xiaodong, DENG Taiguang. Constant error analysis of two-point comprehensive calibration in gimbaled inertial navigation system[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2011, 11(3): 100. DOI:10.369/j.issn.1672-9730.2014.02.013

(编辑 张红)