

基于自适应卡尔曼滤波算法的紧组合导航系统的研究

刘 军 刘克诚 田 甜 崔学伟

(青岛科技大学 自动化与电子工程学院 青岛 266000)

摘 要: 为了提高子滤波器滤波精度和优化信息融合算法,提出一种基于在线调节因子的自适应卡尔曼滤波算法。首先讨论采用卡尔曼滤波技术的理论依据,设计 SINS/GPS 紧组合导航系统。提出改进的自适应卡尔曼滤波算法,该方法通过构造自适应参数因子,并利用量测噪声协方差阵与自适应参数的比值实现在线修正量测噪声协方差阵。通过 MATLAB 仿真,与传统基于标准卡尔曼滤波算法的紧组合导航系统相比,其各向位置误差和速度误差均得到明显降低,从而达到提高组合导航定位精度和优化信息融合算法的目的。

关键词: SINS/GPS;紧组合;自适应卡尔曼滤波;量测噪声协方差阵;MATLAB

中图分类号: TN967.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Research on tight integrated navigation system based on adaptive Kalman filter algorithm

Liu Jun Liu Kecheng Tian Tian Cui Xuewei

(College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266000, China)

Abstract: In order to improve the sub-filter filtering accuracy and optimize the information fusion algorithm, an adaptive Kalman filtering algorithm based on online adjustment factor is proposed. First of all, discuss the theoretical basis of using Kalman filter technology, and design SINS/GPS tight integrated navigation system. An improved adaptive Kalman filter algorithm is proposed. By constructing an adaptive parameter factor and using the ratio of the measured noise covariance matrix to the adaptive parameters, the online correction measurement noise covariance matrix is realized. Through the result of MATLAB simulation, its position error and speed error are significantly reduced, compared with traditional tightly integrated navigation systems based on standard Kalman filter algorithm, so as to improve the positioning accuracy of the integrated navigation system and optimizing information fusion algorithm.

Keywords: SINS/GPS; tight integration; adaptive Kalman filter; the measured noise covariance matrix; MATLAB

0 引 言

现今科学技术领域为航行体提供了多种导航设备,如捷联惯性导航系统(SINS,以下简称捷联惯导系统)、全球定位系统(GPS)、多普勒导航雷达、奥米加(Omega)导航系统、罗兰系统(Long Range)、天文导航系统和地形辅助系统等^[1]。这些导航设备都各有优缺点,精度和成本也大不相同。惯性导航系统一般作为主要导航设备,因为它是一种自主式导航系统,并能输出多种导航参数(位置、速度及姿态角等导航参数),惯导系统的短期精度可在初始条件完全正确的情况下保持较高水平^[2]。GPS是一种先进的导航设备,它的定位精度极高,也可给出速度信号和姿态信号。但是GPS也有一些缺点,如GPS不是自主式导航,卫星信号可被人为故意加入干扰;GPS数据更新速率太低,并且不

能对地球所有方位完成全覆盖等^[3]。SINS的特点是误差是随时间而累积的,这就使得在满足提高惯导系统长期精度的要求下,必须设计有效的滤波算法保证惯导系统保持在误差收敛的输出状态^[4]。

SINS/GPS组合导航系统可分为3种组合方式:松组合、紧组合、深组合^[5]。而紧组合导航技术是指利用GPS接收机提供的伪距、伪距率及由卫星位置和SINS输出的位置、速度反算出的伪距、伪距率构成伪距差、伪距率差观测测量^[6]。然后经过Kalman滤波器估计SINS的姿态、位置、速度以及传感器误差和GPS接收机时钟偏差及漂移的最优值。从组合导航的实施方法上分析,利用卡尔曼滤波技术进行状态估计和参数校正的最优估计方法是设计组合导航系统进行最优信息融合的常用途径^[7]。

1 组合导航系统中的卡尔曼滤波器

SINS/GPS 紧组合导航系统是一种典型的多传感器信息融合系统,而在此系统中的一个至关重要的环节是将各个传感器的多项输出信息进行数据融合。卡尔曼滤波是基于最小方差理论实现最优估计的一种滤波方法,在组合导航系统中,一般由卡尔曼滤波算法估计出系统状态误差,进而得到各个导航参数的最优估计值^[8]。直至目前,卡尔曼滤波也是组合导航系统中得到普遍应用的信息融合方法。

1.1 组合导航问题描述

一个动态系统(如组合导航系统)的误差变量通常是时变的,可表示成如下状态空间模型:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t) \quad (1)$$

或写成离散形式为

$$\mathbf{X}_k = \Phi_{k,k-1}\mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1}\mathbf{W}_{k-1} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_k$ 为历元 t_k 时刻的状态矢量; $\Phi_{k,k-1}$ 为历元 t_{k-1} 时刻至 t_k 时刻的一步转移阵; Γ_{k-1} 为系统噪声驱动阵; $\mathbf{W}_{k-1}$ 为系统激励噪声序列,相应的协方差序列 $\mathbf{Q}_{k-1}$ 为非负定。设当历元为 t_k 时,有观测量 $\mathbf{Z}_k$,并可将其写成状态变量的线性组合,即:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k\mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k \quad (3)$$

式中: $\mathbf{H}_k$ 为量测阵; $\mathbf{V}_k$ 为量测噪声序列,相应的协方差序列 $\mathbf{R}_k$ 为正定。通常,每个局部系统都可被看作是一个完整的动态系统,它的状态方程可描述为:

$$\mathbf{X}_{i,k} = \Phi_{i,k-1}^i\mathbf{X}_{i,k-1} + \mathbf{W}_{i,k-1} \quad (4)$$

如果观测信息来自于多个独立的系统,可将观测矢量 $\mathbf{Z}_k$ 写成 $\mathbf{Z}_k = [\mathbf{Z}_{1k}^T \ \mathbf{Z}_{2k}^T \ \cdots \ \mathbf{Z}_{ik}^T]^T$,

相应的量测方程为:

$$\mathbf{Z}_{i,k} = \mathbf{A}_{i,k}\mathbf{X}_{i,k} + \mathbf{V}_{i,k} \quad (5)$$

式中:下标 i 表示相应的局部系统; $\mathbf{X}_{i,k}$ 为历元 t_k 时刻局部系统 i 的状态矢量。同理, $\Phi_{i,k-1}^i$ 、 $\mathbf{X}_{i,k-1}$ 、 $\mathbf{W}_{i,k-1}$ 、 $\mathbf{Z}_{i,k}$ 、 $\mathbf{A}_{i,k}$ 和 $\mathbf{V}_{i,k}$ 分别为局部系统 i 的各个状态空间参数。

1.2 离散化卡尔曼滤波

SINS/GPS 组合导航系统本质上是一种多传感器信息融合系统,其中所涉及到的数据融合技术是决定导航系统能否满足工程应用实时性要求的一个主要步骤^[9]。而卡尔曼滤波技术就是目前组合导航系统中最常用的滤波算法,基于上节动态系统离散化模型,离散型卡尔曼滤波(discrete Kalman filter, DKF)基本方程可描述如下。

状态一步预测:

$$\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1}\hat{\mathbf{X}}_{k-1} \quad (6)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k(\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k\hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}) \quad (7)$$

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1}\mathbf{H}_k^T(\mathbf{H}_k\mathbf{P}_{k/k-1}\mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1} \quad (8)$$

一步预测均方误差:

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k,k-1}\mathbf{P}_{k-1}\Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1}\mathbf{Q}_{k-1}\Gamma_{k-1}^T \quad (9)$$

估计均方误差:

$$\mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)\mathbf{P}_{k/k-1}(\mathbf{I} - \mathbf{K}_k\mathbf{H}_k)^T + \mathbf{K}_k\mathbf{R}_k\mathbf{K}_k^T \quad (10)$$

2 SINS/GPS 紧组合导航滤波器设计

2.1 紧组合导航系统原理

紧组合导航系统主要由 SINS 系统、GPS 系统和卡尔曼滤波器组成。紧组合导航系统基本工作原理如图 1 所示,由 SINS 导航解算模块将 SINS 惯性测量元件输出的比力和角速率解算之后输出位置、速度和姿态角信息,经过 GPS 卫星星历计算出 SINS 的伪距和伪距率;再通过 GPS 码环和载波跟踪环得到 GPS 的伪距和伪距率;将两者的伪距和伪距率作差,其结果作为自适应卡尔曼滤波器的输入,得到 SINS 位置、速度和姿态角的估计值^[10]。把状态误差估计值中的位置、速度和姿态角误差对 SINS 解算后的状态信息进行修正,则经过修正后的 SINS 输出即为紧组合导航系统的最终导航信息^[11]。

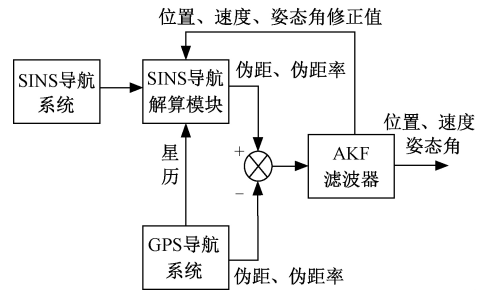


图 1 紧组合导航系统原理

2.2 紧组合导航系统状态方程

首先建立平台误差角模型、速度误差模型、惯性仪表误差模型、陀螺漂移误差模型、加速度计误差模型、GPS 钟差和钟漂误差模型^[12]。

本文选取东北天地理坐标系作为导航坐标系。根据 SINS 的惯性测量元件和 GPS 接收机的时钟误差的噪声特性来扩充状态向量,则紧组合导航系统误差状态方程的状态向量可描述为:

$$\mathbf{X} = [\varphi_E \ \varphi_N \ \varphi_U \ \delta v_E \ \delta v_N \ \delta v_U \ \delta L \ \delta \lambda \ \delta h \ \epsilon_{bx} \ \epsilon_{by} \ \epsilon_{bz} \ \nabla_{bx} \ \nabla_{by} \ \nabla_{bz} \ \delta t_u \ \delta t_{ru}]_{1 \times 17}^T \quad (11)$$

式中: φ 为 3 个轴向的姿态误差; δv 为东北天 3 个方向的速度误差; δl 为经度、纬度、高度误差; ϵ 为沿 b 系的 3 个轴向的陀螺常值零偏; ∇ 为沿 b 系的 3 个轴向的加速度计常值零偏; δt 为钟差等效距离、钟漂等效距离的变化率^[13]。

基于 SINS/GPS 紧组合系统基本原理,可得到伪距、伪距率的状态方程:

$$\dot{\mathbf{X}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{X}}_{\text{SINS}}(t) \\ \dot{\mathbf{X}}_{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{F}(t)\mathbf{X}(t) + \mathbf{G}(t)\mathbf{W}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{SINS}}(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{\text{SINS}}(t) \\ \mathbf{X}_{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{G}_{\text{SINS}}(t) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{G}_{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_{\text{SINS}}(t) \\ \mathbf{W}_{\text{GPS}}(t) \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中,过程噪声向量为:

$$\mathbf{W} = [\omega_{gx} \ \omega_{gy} \ \omega_{gz} \ \omega_{ax} \ \omega_{ay} \ \omega_{az} \ \omega_{tu} \ \omega_{tru}]^T_{1 \times 8} \quad (13)$$

另外,系统状态矩阵 $\mathbf{F}(t)$ 是 17×17 维矩阵,系统噪声矩阵 $\mathbf{G}(t)$ 是 17×8 维矩阵。矩阵具体内容可参照文献[13]。

2.3 紧组合导航系统量测方程

选取伪距差和伪距率差作为量测向量,通过建立伪距、伪距率量测方程,可以给出 SINS/GPS 紧组合系统的量测方程为:

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \delta \rho \\ \delta \dot{\rho} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_G - \rho_{\text{SINS}} \\ \dot{\rho}_G - \dot{\rho}_{\text{SINS}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_\rho(t) \\ H_{\dot{\rho}}(t) \end{bmatrix} \mathbf{X} + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_\rho(t) \\ \mathbf{V}_{\dot{\rho}}(t) \end{bmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{X} + \mathbf{V} \quad (14)$$

式中: ρ_G 和 $\dot{\rho}_G$ 分别为 GPS 测得的伪距、伪距率; ρ_{SINS} 和 $\dot{\rho}_{\text{SINS}}$ 分别为 SINS 的等效伪距、伪距率。矩阵具体内容可参照文献[13]。

3 改进的自适应卡尔曼滤波算法

本节对标准的卡尔曼滤波进行了改进,提出一种基于在线调节因子的自适应卡尔曼滤波算法(adaptive Kalman filtering, AKF)。该算法通过子滤波器的预报残差构造自适应参数因子,并利用量测噪声协方差阵与自适应参数的比值实现在线修正,从而达到提高子滤波器滤波精度和优化信息融合算法的目的^[14]。

首先,定义滤波算法的自适应参数 α_i 为:

$$\alpha_i \triangleq \begin{cases} 1, & |\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}| \leq c_0 \\ \frac{c_0}{|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}|} \left(\frac{c_1 - |\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}|}{c_1 - c_0} \right)^2, & c_0 \leq |\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}| \leq c_1 \\ 0, & |\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}| > c_1 \end{cases} \quad (15)$$

其中,各子滤波器的预报残差 $|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}|$ 可表示为:

$$|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}| = |\mathbf{Z}_{i,k} - \mathbf{H}_{i,k} \hat{\mathbf{X}}_{i,k/k-1}| / \sigma_R \quad (16)$$

式中: σ_R 为量测噪声的均方差; c_0 和 c_1 为 $|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}|$ 的常数阈值,并分别满足 $1.1 < c_0 < 1.5$ 和 $4.0 < c_1 < 4.5$ 。

其次,由各子滤波器的量测噪声方差阵 $\mathbf{R}_{i,k}$ 与自适应参数 α_i 的比值可得到等效量测噪声协方差阵 $\bar{\mathbf{R}}_{i,k}$:

$$\bar{\mathbf{R}}_{i,k} = \mathbf{R}_{i,k} / \alpha_i \quad (17)$$

主要理论依据是,由于 $|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}|$ 的数值在某种程度上可以反映各个子滤波器的量测精度,所以当量测过程中引入不确定量测误差使 $|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}|$ 的值处于 c_0 与 c_1 之间时,调整 α_i 使其满足 $0 < \alpha_i < 1$,进而可按比值调整 $\bar{\mathbf{R}}_{i,k}$; 则当量测过程中引入较小值量测误差时,即 $|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}| \leq c_0$,就可将 α_i 赋值为 1 并认定 $\mathbf{R}_{i,k}$ 完全可信;同理,当量测过程中引入较大值量测误差时,即

$|\Delta \bar{\mathbf{V}}_{i,k/k-1}| > c_1$,就可将 α_i 赋值为 0 并认定 $\bar{\mathbf{R}}_{i,k}$ 完全不可信。

4 仿真与结果分析

对 SINS/GPS 紧组合导航系统仿真初始条件和参数进行如下设置:GPS 的东北天向量误差、均方差均为 30 m,观测时长 500 s;在相同观测地点 SINS 静基座下的仿真条件:陀螺随机常值漂移 $0.02^\circ/\text{h}$,噪声 $0.02^\circ/\text{h}(1)$;加速度计随机常值零偏 1g ,噪声 $1\text{g}(1)$;安装误差、刻度因子误差均为 0;惯导数据更新频率 50 Hz;GPS 可见卫星数为 4^[15];取值 $c_0 = 1.24, c_1 = 4.10$ 。

采用标准卡尔曼滤波的位置误差曲线和速度误差曲线如图 2 和 3 所示。采用自适应卡尔曼滤波的位置误差曲线和速度误差曲线如图 4 和 5 所示。两种模型的各项误差参数如表 1 所示。由图表对比可知,采用改进的自适应卡尔曼滤波算法比传统标准卡尔曼滤波算法能够使滤波精度更高,可使 SINS/GPS 紧组合导航系统的东北天位置误差、速度误差都有所降低。

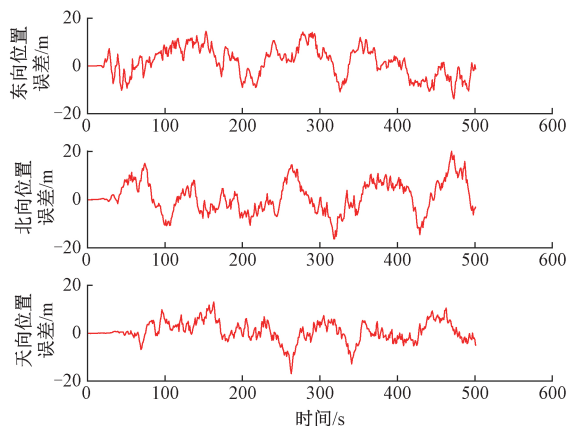


图 2 标准卡尔曼滤波(KF)位置误差曲线

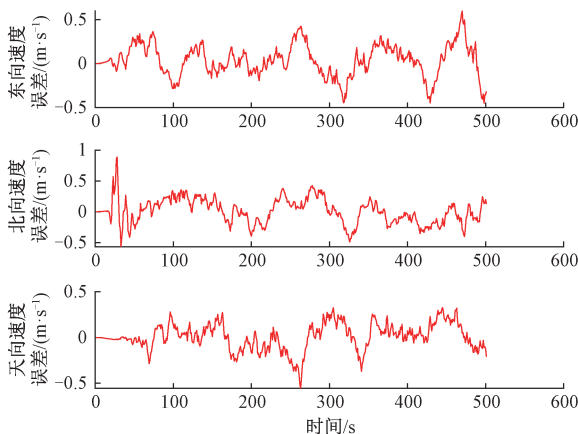


图 3 标准卡尔曼滤波(KF)速度误差曲线

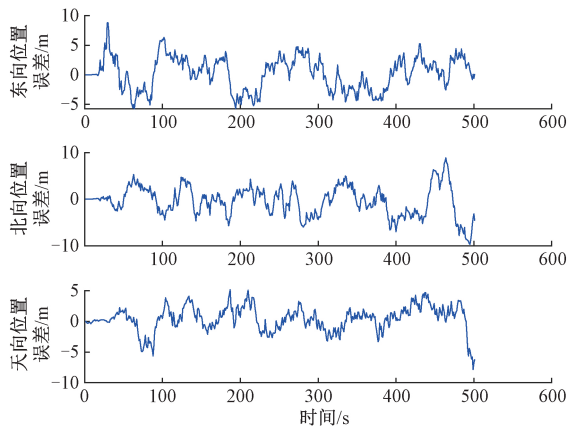


图 4 自适应卡尔曼滤波(AKF)位置误差曲线

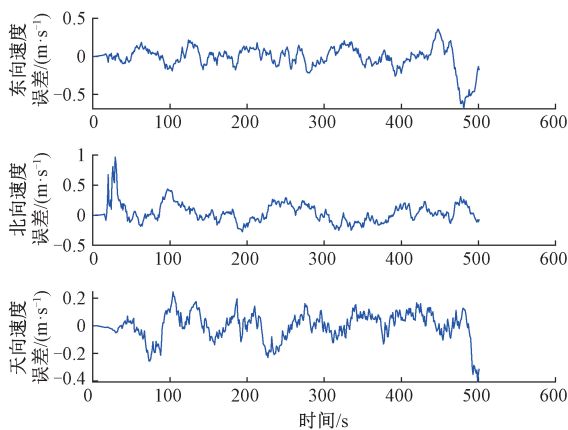


图 5 自适应卡尔曼滤波(AKF)速度误差曲线

表 1 仿真结果分析 (m)

误差参数	模型	RMS
东向位置误差	KF	6.054 7
	AKF	4.236 5
北向位置误差	KF	6.884 6
	AKF	4.376 2
天向位置误差	KF	6.472 8
	AKF	5.562 1
东向速度误差	KF	0.210 2
	AKF	0.291 0
北向速度误差	KF	0.383 8
	AKF	0.307 0
天向速度误差	KF	0.242 5
	AKF	0.209 2

5 结 论

本文以卡尔曼滤波技术为理论依据,设计了 SINS/GPS 紧组合导航系统,对标准的卡尔曼滤波进行改进,提出基于在线调节因子的自适应卡尔曼滤波算法。利用

MATLAB 软件仿真,得出两种滤波算法的误差数据结果,对比分析可以看出,采用本文提出的基于构造自适应参数因子、调整量测噪声协方差阵的自适应滤波算法符合实验预期结果,可使 SINS/GPS 紧组合导航系统的东北天位置误差、速度误差都有所降低,滤波精度明显提高。该算法不足之处在于其仅适用于紧组合导航模型,适用模型单一。

参考文献

[1] 刘基余.北斗卫星导航系统的现况与发展[J].遥测遥控,2013,34(3):1-8.

[2] 秦永元,张洪钺,王叔华.卡尔曼滤波与组合导航原理[M].西安:西北工业大学出版社,2012.

[3] 唐云,李喜来,许昭霞.美国 GPS 现代化建设现状综述[J].卫星与网络,2012(Z1):72-74.

[4] 沈凯.基于 SINS/GPS 紧组合导航系统研究[D].南京:南京理工大学,2017.

[5] 孟凡效,孙红星,丁学文.星间差伪距/伪距率 BDS/GPS/INS 紧组合系统[J].导航定位学报,2017,5(2):86-92.

[6] 曹洁.SINS/GPS 组合导航自适应滤波算法研究[D].上海:华东师范大学,2018.

[7] 孟秀玉,王语嫣.一种 SINS/GPS 紧组合导航系统的改进自适应扩展卡尔曼滤波算法[J].北京理工大学学报,2018,38(6):625-630,636.

[8] 房德君.改进自适应 Kalman 滤波的 SINS/GPS 紧组合导航[J].电光与控制,2017,24(10):102-105,118.

[9] 万娇.基于 GPS/INS 的无人机组合导航信息融合方法设计[D].南昌:南昌航空大学,2018.

[10] 陈克振.嵌入式 GNSS/SINS 超紧组合导航系统的设计与实现[D].南京:南京理工大学,2017.

[11] 臧中原.基于伪距、伪距率的 SINS/GPS 紧组合导航系统研究[D].北京:北京理工大学,2015.

[12] 赵天意,彭喜元,彭宇,等.改进卡尔曼滤波的融合型锂离子电池 SOC 估计方法[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1441-1448.

[13] 张希,缪玲娟,沈军,等.GPS/INS 超紧组合导航滤波器的优化设计[J].北京理工大学学报,2018,38(1):102-107.

[14] KANG Y, ZHAO L, CHENG J. A novel grid SINS/DVL integrated navigation algorithm for marine application[J]. Sensors, 2018,18(2):13-14.

[15] 秦红磊,柴璐璐,丛丽.GPS/INS 超紧组合抗干扰性能分析[J].计算机工程与设计,2013,34(1):333-337.

作者简介

刘军,博士、硕士生导师,主要研究方向为复杂系统建模与控制,太阳能、风能发电与并网调度。

刘克诚,硕士研究生,主要研究方向为控制工程。

E-mail:1053882234@qq.com

田甜,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程。

崔学伟,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程。