

引用格式: 向华, 王清海, 万航雁, 等. 惯性和电磁综合瞄准线测量方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(7): 96-99, 109. XIANG H, WANG Q H, WAN H Y, et al. Measurement of line of sight based on inertial and electromagnetic positioning[J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(7): 96-99, 109.

惯性和电磁综合瞄准线测量方法

向 华¹, 王清海², 万航雁¹, 张伊慧¹, 刘世良¹

(1. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000;

2. 海军装备部驻洛阳地区军事代表室, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对头盔瞄准线快速、精准测量的要求, 研究一种全新的综合瞄准线测量方法。在电磁瞄准线测量基础上, 增加微惯性测量技术, 实现头部姿态的高精度、快速、实时测量。通过卡尔曼滤波算法以及微惯性器件零偏估计, 将电磁和惯性测量技术融合在一起进行综合瞄准线测量。根据瞄准线测量原理建立有效的数学模型, 并用实物搭建实验平台进行测试和验证。实验结果表明, 惯性和电磁综合瞄准线测量技术可以快速、有效地计算出高精度瞄准线。

关键词: 头盔显示器; 瞄准线测量; 综合测量; 电磁; 惯性

中图分类号: O213.2

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2019.07.019

Measurement of Line of Sight Based on Inertial and Electromagnetic Positioning

XIANG Hua¹, WANG Qing-hai², WAN Hang-yan¹, ZHANG Yi-hui¹, LIU Shi-liang¹

(1. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

2. Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Luoyang, Luoyang 471000, China)

Abstract: Aiming at the requirements for fast and precise positioning of helmets in the modern warfare, the paper puts forward a new integrated LOS measurement method. Based on the electromagnetic pose measurement, the inertial positioning method is added to realize fast, real-time and high-accuracy head pose measurement. By using the Kalman filtering algorithm as well as the IMU zero bias estimate, the method combines the electromagnetic with the inertial method for integrated LOS measurement. An effective mathematical model is established according to the principle of LOS measurement, and an experimental platform is set up for testing and verification. The results show that the algorithm can effectively complete the high-precision measurement of the helmet posture.

Key words: HMD; LOS measurement; integrated measurement; electromagnetic; inertial

0 引言

瞄准线测量技术是头盔瞄准显示系统核心技术之一。快速准确地计算瞄准线是飞行员目视目标即可攻击目标的重要前提, 且头部姿态计算精度的高低直接关系到目标捕获率。头盔瞄准线测量技术经历了多种技术的发展阶段^[1], 从早期的机械式、超声波式到后来的电磁式、光电式^[2]和惯性式^[3]。

迄今为止, 已经出现的瞄准线测量技术各有特点: 机械式精度高, 但限制了飞行员的活动自如程度; 超声

波式制造简单、维修方便、无遮挡, 但易受座舱内环境噪声干扰; 光电式附重轻, 测量精度高, 但易受环境强光干扰, 且使用过程中光路易被遮挡; 电磁式附重轻、测量范围大、无遮挡, 但受座舱金属环境影响较大, 磁场畸变修正较为复杂; 惯性式测量全向且延迟小, 但测量误差随时间累积会发散。单一瞄准线测量技术有优点也有难以克服的缺点, 故采用多种方法融合是头盔跟踪技术的发展趋势。

鉴于电磁定位技术的成熟性, 以及惯性与电磁定位方法的互补性^[4], 头盔体积、质量、布局的局限性, 并考虑到微惯性器件质量轻、体积小、成本低、测量范围宽、实时性和自主性强, 以及电磁器件功耗小和姿态精度高等突出特点^[5], 将惯性和电磁定位技术相结合, 提出综合瞄准线测量方法: 在电磁定位头盔上加装一个

收稿日期: 2018-11-05

修回日期: 2018-11-26

作者简介: 向 华(1975—), 男, 湖南溆浦人, 学士, 高工, 研究方向为头盔瞄准显示技术。

微惯性器件,通过惯性和电磁瞄准线测量技术的组合,基于卡尔曼滤波算法,实时测量头盔姿态,获得高精度的瞄准线。通过仿真实验对微惯性测量累计误差进行修正,对两种定位数据进行融合,分析处理,验证了综合瞄准线测量技术的优越性。

1 基本概念

电磁测量输出的瞄准线是头盔坐标系相对飞机机体坐标系的头部姿态,微惯性器件输出的瞄准线是头盔坐标系相对惯性坐标系的头部姿态。综合瞄准线测量是将两种瞄准线测量数据进行融合,将两者坐标系都统一到飞机机体坐标系中。通过坐标转换、姿态阵组合匹配和数字平台的误差角转换,进行数据融合和滤波,完成姿态失准的估计,通过实时校正,计算获得高精度的瞄准线输出。

在头盔内安装电磁测量部件和微惯性器件(IMU),组成综合瞄准线测量系统。综合瞄准线测量技术工作原理如图1所示。

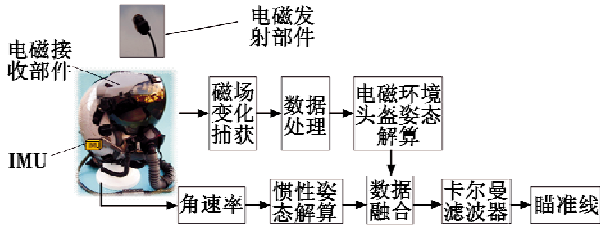


图1 综合瞄准线测量技术工作原理

Fig.1 Working principle of the integrated LOS measurement technology

2 瞄准线测量算法及应用

2.1 惯性姿态解算

设*b*系、*v*系分别为机体坐标系和头盔坐标系,方向为右前上;*i*系为惯性坐标系;*n*系为导航坐标系,以东北天地理坐标系作为导航坐标系。用3个欧拉角描述头盔相对机体的姿态^[6],分别为方位角 ψ_r 、俯仰角 θ_r 、横滚角 γ_r 。

定义机体系(*b*系)与头盔坐标系(*v*系)有如下旋转关系: $Ox_b, Y_b, Z_b \xrightarrow{\text{绕 } OZ_b \text{ 轴}} Ox_v, Y_v, Z_v \xrightarrow{\text{绕 } OX_v \text{ 轴}} Ox_2, Y_2, Z_2 \xrightarrow{\text{绕 } OY_2 \text{ 轴}} Ox_v, Y_v, Z_v$ 。

根据欧拉角和变换矩阵的关系,则坐标变换矩阵为

$$T_b^v = C_\gamma C_\theta C_\psi = \begin{pmatrix} \cos \gamma_r & 0 & -\sin \gamma_r \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \gamma_r & 0 & \cos \gamma_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ 0 & -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{pmatrix}.$$

$$\begin{pmatrix} \cos \psi_r & -\sin \psi_r & 0 \\ \sin \psi_r & \cos \psi_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \gamma_r \cos \psi_r + \sin \gamma_r \sin \theta_r \sin \psi_r & -\cos \gamma_r \sin \psi_r + \sin \gamma_r \sin \theta_r \cos \psi_r & -\sin \gamma_r \cos \theta_r \\ \cos \theta_r \sin \psi_r & \cos \theta_r \cos \psi_r & \sin \theta_r \\ \sin \gamma_r \cos \psi_r - \cos \gamma_r \sin \theta_r \sin \psi_r & -\sin \gamma_r \sin \psi_r - \cos \gamma_r \sin \theta_r \cos \psi_r & \cos \gamma_r \cos \theta_r \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: $C_\psi, C_\theta, C_\gamma$ 分别为方位、俯仰、横滚的转换矩阵。

以飞机惯导数据为基准^[6]获得 ω_{iv}^b ,头盔微惯性器件输出数据为 ω_{iv}^v ,由机体系和头盔坐标系的转换关系可以得到 ω_{iv}^v ,即

$$\omega_{iv}^v = \omega_{iv}^v - \omega_{iv}^b = \omega_{iv}^v - T_b^v \omega_{iv}^b. \quad (2)$$

ω_{iv}^v 和姿态航向角速度 $\dot{\theta}_r, \dot{\gamma}_r, \dot{\psi}_r$ 的关系为

$$\begin{pmatrix} \omega_{ivx}^v \\ \omega_{ivy}^v \\ \omega_{ivz}^v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \dot{\gamma}_r \\ 0 \end{pmatrix} + C_\gamma \begin{pmatrix} \dot{\theta}_r \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + C_\gamma C_\theta \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -\dot{\psi}_r \end{pmatrix} \quad (3)$$

由此可得

$$\begin{pmatrix} \dot{\psi}_r \\ \dot{\theta}_r \\ \dot{\gamma}_r \end{pmatrix} = G_0 \begin{pmatrix} \omega_{ivx}^v \\ \omega_{ivy}^v \\ \omega_{ivz}^v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \gamma_r & 0 & -\cos \gamma_r \\ \cos \theta_r & 0 & \cos \theta_r \\ \cos \gamma_r & 0 & \sin \gamma_r \\ \tan \theta_r \sin \gamma_r & 1 & -\tan \theta_r \cos \gamma_r \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \omega_{ivx}^v \\ \omega_{ivy}^v \\ \omega_{ivz}^v \end{pmatrix} \quad (4)$$

可得到微惯性器件的姿态解算模型。

2.2 卡尔曼滤波器状态方程

电磁测量实时输出头盔相对机体的姿态,利用此冗余测量进行卡尔曼滤波^[7],可以大大提高瞄准线测量的精度。根据惯性姿态解算模型建立状态方程为

$$F(e+1) = \varphi(e+1, e)F(e) + G(e+1, e)\mu(e) + \Gamma(e+1, e)W(e) \quad (5)$$

式中: $\varphi(e+1, e)$ 是从 t_e 时刻到 t_{e+1} 时刻的状态转移矩阵; $F(e)$ 是 t_e 时刻的状态; $\mu(e)$ 是 t_e 时刻的输入; $W(e)$ 是 t_e 时刻的系统噪声。

提出一种在线标定微惯性器件零偏的方法,通过状态扩维,将惯性器件零偏作为状态量,则可取状态变量为

$$F = (\psi \quad \theta \quad \gamma \quad b_x \quad b_y \quad b_z)^T. \quad (6)$$

设系统噪声为

$$W(e) = (w_1 \quad w_2 \quad w_3 \quad w_4 \quad w_5 \quad w_6)^T. \quad (7)$$

由单位矩阵*H*、0矩阵*V*、矩阵*G*₀可得出状态转移矩阵为

$$\varphi(e+1, e) = \begin{pmatrix} H_{3 \times 3} & -G_0 \Delta t \\ V_{3 \times 3} & H_{3 \times 3} \end{pmatrix}. \quad (8)$$

输入系数矩阵为

$$G(e+1, e) = (G_0 \quad V_{3 \times 3})^T. \quad (9)$$

输入阵为

$$\boldsymbol{\mu}(e) = (\boldsymbol{\omega}_{\text{brx}}^v \quad \boldsymbol{\omega}_{\text{brv}}^v \quad \boldsymbol{\omega}_{\text{brz}}^v)^T \Delta t \quad (10)$$

方差阵输入阵为

$$\boldsymbol{\Gamma}(e+1, e) = \mathbf{H}_{3 \times 3} \quad (11)$$

2.3 卡尔曼滤波器观测方程

根据电磁测量信息可以获得头盔相对于机体的姿态角观测值,设测得的相对姿态角度分别为 $\psi_d, \theta_d, \gamma_d$,则可以得到观测方程为

$$\mathbf{L}(e) = \mathbf{M}(e)\mathbf{F}(e) + \mathbf{P}(e) \quad (12)$$

式中: $\mathbf{L}(e)$ 为测得的3个角度,即

$$\mathbf{L}(e) = \begin{pmatrix} \psi_d(e) \\ \theta_d(e) \\ \gamma_d(e) \end{pmatrix} \quad (13)$$

$\mathbf{P}(e)$ 为 t_e 时刻的观测误差,

$$\mathbf{P}(e) = (p_1 \quad p_2 \quad p_3)^T \quad (14)$$

$\mathbf{M}(e)$ 为 t_e 时刻的测量值矩阵,

$$\mathbf{M}(e) = (\mathbf{H}_{3 \times 3} \quad \mathbf{V}_{3 \times 3})^T \quad (15)$$

得到状态方程和观测方程后,则可利用卡尔曼滤波器进行滤波^[8],实时解算相对姿态角并在线估计微惯性器件零偏。

2.4 卡尔曼滤波更新算法

卡尔曼滤波是一种递推滤波方法^[9],包括时间更新和量测更新两部分,其中,时间更新是获得状态的最优线性预测值,量测更新则通过比较预测值与测量值获得状态的最优估计值。

2.4.1 时间更新过程

t_e 时刻的最优状态估计为 $\hat{\mathbf{F}}(e)$ 。由于系统噪声为零, t_{e+1} 时刻的最优状态预测为

$$\hat{\mathbf{F}}((e+1)|e) = \boldsymbol{\varphi}(e+1, e)\hat{\mathbf{F}}(e) \quad (16)$$

t_{e+1} 时刻的协方差的期望值可用 t_e 时刻的值预测

$$\mathbf{Q}((e+1)|e) = \boldsymbol{\varphi}(e+1, e)\mathbf{Q}(e|e)\boldsymbol{\varphi}^T(e+1, e) + \boldsymbol{\Gamma}(e)\mathbf{Q}(e)\boldsymbol{\Gamma}^T(e) \quad (17)$$

2.4.2 量测更新过程

把 t_{e+1} 时刻的测量值与根据系统模型得到的预测值相比,利用测量值更新预测值,得到 t_{e+1} 时刻的最优估计

$$\hat{\mathbf{F}}((e+1)|e+1) = \hat{\mathbf{F}}((e+1)|e) - \mathbf{E}(e+1) \cdot (\mathbf{M}(e+1)\hat{\mathbf{F}}((e+1)|e) - \mathbf{L}(e+1)) \quad (18)$$

则协方差可表示为

$$\mathbf{Q}((e+1)|e+1) = \mathbf{Q}((e+1)|e) - \mathbf{Q}((e+1)|e) \cdot \mathbf{M}^T(e+1)(\mathbf{M}(e+1)\mathbf{Q}((e+1)|e)\mathbf{M}^T(e+1) + \mathbf{R}(e+1))^{-1}\mathbf{M}(e+1)\mathbf{Q}((e+1)|e) \quad (19)$$

其中卡尔曼增益矩阵^[10]为

$$\mathbf{E}(e+1) = \mathbf{Q}((e+1)|e)\mathbf{M}^T(e+1)(\mathbf{M}(e+1) \cdot \mathbf{Q}((e+1)|e)\mathbf{M}^T(e+1) + \mathbf{R}(e+1))^{-1} \quad (20)$$

3 仿真及分析

3.1 仿真环境

仿真环境如图2所示,对综合瞄准算法和瞄准线测量精度进行验证。

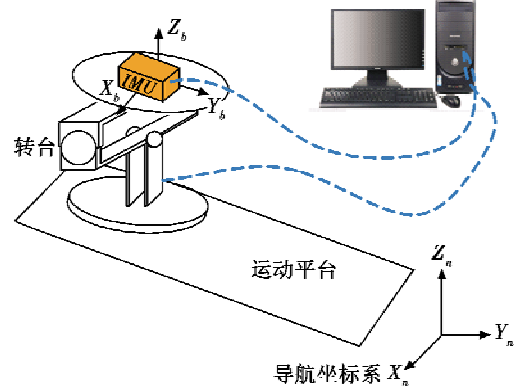


图2 综合瞄准线测量实验平台

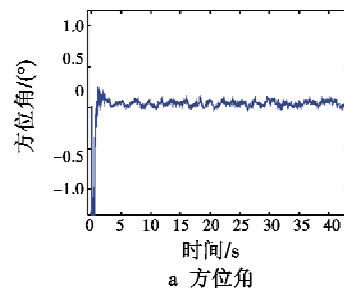
Fig.2 The experimental platform of the integrated LOS measurement

其中,高精度转台模拟头部的转动,进行惯性瞄准线测量精度验证时,在转台上固定惯性器件,仿真头盔上的IMU随头部进行转动。进行电磁瞄准线测量精度验证时,在转台上固定电磁部件,仿真头盔上的电磁接收器随头部进行转动。转台测量值是头部相对飞机机体姿态理论值,惯性、电磁测量及解算出的瞄准线值是头部姿态测量值;飞机姿态值是模拟飞机静止,输入角速度为地球自传角速度在飞机当前位置各轴向的分量。

3.2 测量精度仿真结果

因惯性器件的个体性能存在差异,其零偏值、测量精度就各有不同,零偏值是决定其定位精度的主要因素,因此需要对惯性器件的零偏值进行测试,并加入算法中进行修正。先将惯性器件安装在测试转台上,假设惯性器件的零偏初始值为0,对惯性器件的零偏进行测试,测试结果如图3所示。

通过测试数据可以分析出,在初始2 s内微惯性器件的零偏值较大,经过卡尔曼滤波算法的修正,可快速收敛零偏值。



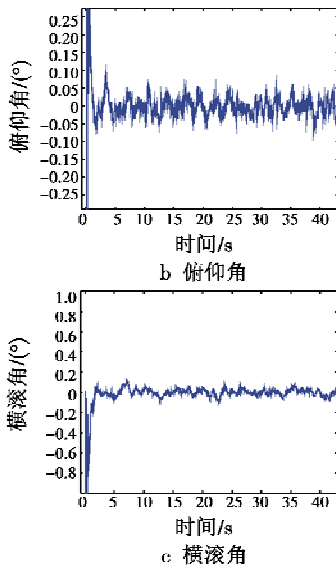


图3 零偏测试结果

Fig.3 The measurement result of the zero bias

使用 STIM300 自带的采集软件对综合定位数据进行采集,数据处理、姿态解算部分由 Matlab 进行处理,仿真实验结果如图 4 所示。

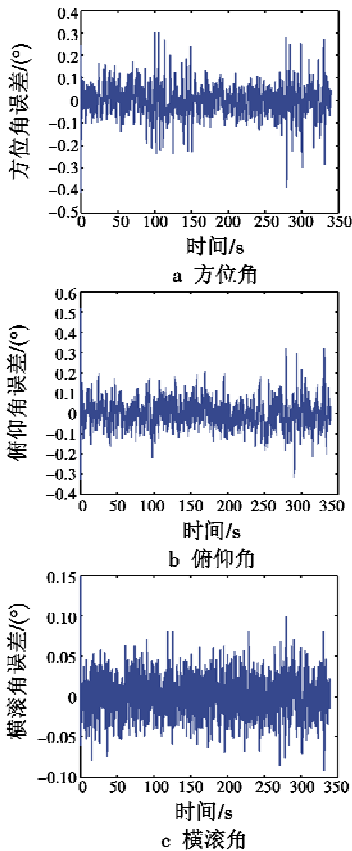


图4 综合瞄准线测量结果

Fig.4 The result of the integrated LOS measurement

使用电磁测量、惯性测量、综合瞄准线测量 3 种方式,仿真头部在方位 $-120^{\circ} \sim +120^{\circ}$,俯仰 $-50^{\circ} \sim +50^{\circ}$ 范围内进行转动,分别对 100 个位置点进行数据采集,

每个位置点重复采集 200 次数据,然后通过卡尔曼滤波算法对数据进行递推解算处理。电磁测量误差、惯性测量误差、综合瞄准线测量误差的对比如表 1 所示。

表 1 误差对比

Table 1 Error comparison (°)

测量方式	方位角标准差	俯仰角标准差	横滚角标准差	系统精度
电磁	0.3002	0.2984	0.1004	0.4350
惯性	0.1344	0.1461	0.0183	0.1994
综合	0.0492	0.0524	0.0179	0.0741

实验室环境中,由于采用二维转台进行测量,横滚角理论值为零,方位角、俯仰角由转台带动头盔运动产生,因此,横滚角误差值较小。在采用综合瞄准线解算中,算法对惯性器件误差进行了有效抑制,并且采用电磁测量值对解算误差漂移进行了实时校正,解算精度高,验证了算法的正确性。

通过仿真和统计数据计算,可以得出惯性和电磁综合瞄准线测量精度优于单一的测量方式,且满足头盔瞄准线精度不大于 0.5° 的需求。

4 结论

综合瞄准线测量技术并充分考虑到头盔空间安装定位部件的局限性,以及使用头盔的周边环境金属对电磁测量的影响,利用惯性和电磁两种测量技术的优点,发挥测量器件体积小、质量轻、成本低、测量范围宽、自主性强的特点,使用卡尔曼算法对数据进行优化处理,通过数据融合,保证头盔在各种姿态和使用环境下都能实时提供有效的、高精度的瞄准线。实验结果验证了该方法的可行性,惯性和电磁综合瞄准线测量是一种有效的瞄准线测量方法,具有较好的工程参考作用和应用价值。

参考文献

- [1] 王永生. 机载头盔瞄准显示系统动态性能研究[J]. 电光与控制,2013,20(8):1-5.
- [2] 刘延新,刘世良,丁全心,等. 基于数据融合的座舱头部姿态跟踪方法研究[J]. 电光与控制,2016,23(8):65-69.
- [3] 万航雁,张求知,张伊慧,等. 基于微惯性器件的头部运动综合测量方法研究[J]. 电光与控制,2018,25(4):83-86.
- [4] 李书杰,刘晓平. 摄像机位姿的高精度快速求解[J]. 中国图象图形学报,2014,19(1):20-27.
- [5] 晏登洋,任建新,牛尔卓. 惯性/地磁组合导航系统自适应卡尔曼滤波算法研究[J]. 电光与控制,2007,14(6):74-77.

(下转第 109 页)

5 结束语

本文基于电离层模型提出了有无干扰条件下岸舰通信畅通区计算模型、数据采样和可视化方法,并且进行了仿真。从实现效果来看,能够直观形象地展现通信状态,为装备的部署和工作参数选择提供方法。后续工作可对短波通信的其他情况进行拓展研究,完善可视化仿真系统。

参考文献

- [1] 黄威刚,郑红,张兵. 编队岸舰短波通信组网研究[J]. 信息通信,2014(2):13-14.
- [2] 邬昊愨. 对于远距离高频通信频率的选择与分析[J]. 科技创新导报,2011(32):51-52.
- [3] 李伟. 论电离层特性对短波传输的影响[J]. 数字传媒研究,2016,33(6):68-71.
- [4] 孙雷. 短波在无线电通信中的作用及特点[J]. 信息技术,2005(5):86-88.
- [5] 焦培南,杨龙泉,凡俊梅. 短波天波反射/地波绕射组合新传播模式及其可能应用[J]. 电波科学学报,2007,22(5):746-750.
- [6] 邹伟,候德亨,王芊,等. 高功率微波在电离层中传播的折射率研究[J]. 强激光与粒子束,2006,18(10):1673-1676.
- [7] 周文瑜,焦培南. 超视距雷达技术[M]. 北京:电子工业出版社,2008.
- [8] 戴开良,罗发根,权坤海,等. 亚大地区 F2 电离层预测方法和 CCIR 方法的比较[J]. 空间科学学报,1992,12(2):153-156.
- [9] 李忠勤,权坤海,张雪枫,等. 对 CCIR 预测 f_0F_1 方法精度检验[J]. 电波科学学报,1993,8(3):82-87.
- [10] 孙宪儒. 亚大地区 F2 电离层预测方法[J]. 通信学报,1987,8(6):37-44.
- [11] 丁峻岭. 亚大地区 F2 电离层预测模型[J]. 信息工程学院学报,1996,15(4):28-33.
- [12] 宋铮,张建华,黄冶. 天线与电波传播[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2011:242-245.
- [13] 陈洪普,卢雷. 高频电离层传播轨迹研究[J]. 曲阜师范大学学报,2017,43(2):65-69.
- [14] 李有才,王然,陈锐龙. 基于电场强度的短波干扰压制系数估算[J]. 舰船电子对抗,2008,31(6):22-25.
- [15] 王睿,张海勇,杨曦. 远距离短波通信最低可用频率的计算[J]. 舰船科学技术,2008,30(6):83-85.
- (上接第99页)
- [6] CHANG G. Kalman filter with both adaptivity and robustness[J]. Process Control, 2014, 24(3):81-87.
- [7] MEDEIROS C B, WANDERLEY M M. Multiple-model linear Kalman filter framework for unpredictable signals[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(4):979-991.
- [8] CHANG L, HU B, LI A, et al. Transformed unscented Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2013, 58(1):252-257.
- [9] 岳晓奎,武媛媛,吴侃之. 基于电磁信息的航天器位姿估计迭代算法[J]. 西北工业大学学报,2011,29(4):559-563.
- [10] 毛秀华,吴健. 卡尔曼滤波算法研究[J]. 舰船电子对抗,2017,40(3):64-68.
- (上接第104页)
- [12] HARTLEY R, ZISSERMAN A. Multiple view geometry in computer vision[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [13] WU C, AGARWAL S, CURLESS B, et al. Multicore bundle adjustment[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011:3057-3064.
- [14] SNAVELY N, SEITZ S M, SZELISKI R. Photo tourism: exploring photo collections in 3D[J]. ACM Transactions on Graphics (TOG), 2006, 25(3):835-846.
- [15] BYRÖD M, ÅSTRÖM K. Conjugate gradient bundle adjustment[C]//The 11th European Conference on Computer Vision-ECCV, 2010:114-127.
- [16] AGARWAL S, SNAVELY N, SEITZ S M, et al. Bundle adjustment in the large[C]//The 11th European Conference on Computer Vision-ECCV, 2010:29-42.
- [17] GAO X S, HOU X R, TANG J, et al. Complete solution classification for the perspective-three-point problem[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(8):930-943.
- [18] BRADSKI G. The OpenCV library[J]. Journal of Software Tools, 2000, 25(11):384-386.