

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206027

基于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的姿态测量方法研究

张强 吴志强 云启凡

(南京理工大学机械学院 南京 210094)

摘要:现今,惯性传感器加双天线 RTK 的组合测姿方法被广泛的应用于车载测姿领域,该方法集中了惯性传感器的快速更新速率特点和双天线 RTK 的高精确度的优点。针对当遇到高楼或者树林阻挡时卫星信号会丢失,导致双天线 RTK (real time kinematic) 无法提供可用的航向角,而惯性传感器又无法长时间保持航向角精度问题。本文尝试采用了一种基于微惯性测量单元 (miniature inertial measurement unit, MIMU) 与磁传感器与双天线 RTK 的信息融合方法。开展了实际跑车实验分析。得出了在卫星信号丢失的条件下本方法通过引入磁传感器提供航向信息,能够保证高精度车辆姿态数据的稳定输出。

关键词: 惯性传感器;姿态解算;互补滤波;卡尔曼滤波

中图分类号: TN967.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Research on attitude measurement method based on MIMU/magnetic sensor/dual antenna RTK

Zhang Qiang Wu Zhiqiang Yun Qifan

(College of Machinery, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Nowadays, the combined attitude measurement method of inertial sensor and dual antenna RTK (real time kinematic) is widely used in the field of vehicle attitude measurement. This method integrates the characteristics of rapid update rate of inertial sensor and the advantages of high accuracy of dual antenna RTK. When encountering high buildings or trees, the satellite signal will be lost, resulting in the dual antenna RTK unable to provide the available heading angle, and the inertial sensor cannot maintain the heading angle accuracy for a long time. This paper attempts to adopt an information fusion method based on micro inertial measurement unit miniature inertial measurement unit (MIMU), magnetic sensor and dual antenna RTK. The experimental analysis of the actual sports car is carried out. It is concluded that this method can ensure the stable output of high-precision vehicle attitude data by introducing magnetic sensors to provide heading information under the condition of satellite signal loss.

Keywords: inertial sensor; attitude solution; complementary filtering; Kalman filtering

0 引言

现代社会中,有关载体的姿态测量在各种导航领域中具有重要的地位。对于载体的姿态测量的方法如微惯性传感器 (MIMU) 与双天线 RTK^[1-3] 组合测姿方法就被广泛的应用于车载测姿领域中,这种方法结合了惯性传感器的高效更新速率以及双天线 RTK 的高精确度的特点^[4],完美的避开双方的缺点。但其中美中不足的是,当碰到卫星丢失的情况时,如车辆在进入山区行驶或者进

入隧道以及在树木的遮挡下时,由于无法接受到卫星信号,而惯性传感器由于积累误差无法长时间的保持姿态测量精度从而引起组合姿态测量系统的精度大幅度下降^[5-6]。为了解决这一问题,本文计划利用地磁场具有全天候、全天时、全地域的特征,通过加入磁通门传感器来提高姿态测量导航系统在遇到卫星信号丢失的情况下姿态测量精度的保持能力^[7]。通过 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 三者组合的测姿方式,极大地提高了系统的容错性。无论是在卫星信号不良时,或者在地磁场信号紊乱时,都有较强的导航能力^[8-9]。

1 组合测姿基本原理

1.1 坐标系及姿态角

1) 当地导航坐标系

当地导航坐标系也被称作参考坐标系,是导航中最为直接的坐标系,一般用 n 表示。坐标轴的 z 轴为当地的垂直方向, x 轴和 y 轴是互相垂直的分别指向北和东的轴,经常使用的有东北天和北东地两种导航坐标系,本文所使用的是东北天坐标系。

2) 载体坐标系

载体坐标系也被称作运动载体坐标系,一般用符号 b 表示。如图 1 所示的 $o^b x^b y^b z^b$ 坐标系是一个典型的载体右前上坐标系。对于角运动,在 x, y, z 3 个方向的运动可以用横滚角 (ROW)、俯仰角 (PITCH) 和偏航角 (YAW) 来表示。本文所使用的载体坐标系与实验车辆固连,坐标原点是实验车辆的中心点。 x 轴沿实验车辆横轴向右; y 轴沿实验车辆纵轴向前; z 轴沿实验车辆立轴向上^[10-11]。

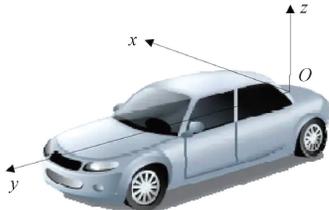


图 1 载体坐标系

Fig. 1 Carrier coordinate system

1.2 四元数法

载体坐标系与导航坐标系之间的角度关系是姿态角,而姿态角是姿态测量的重要内容。而四元数可以完美的表示姿态角,且姿态角也可以来表示四元数。

$$q(t) = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \\ \cos \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} - \sin \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} \\ - \sin \frac{\phi}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\gamma}{2} + \cos \frac{\phi}{2} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\gamma}{2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

四元数法可以做到全姿态工作,受限制少。解算过

程只需要做归一化处理便可实现正交化。所以四元数法是目前工程运用上最常用方法,本文也是基于四元数法求解的。

1.3 卡尔曼滤波

如图 2 所示。卡尔曼滤波器的最开始输入要有系统的状态矩阵初始值 \hat{X}_0 与均方误差初始值 P_0 。在给了初始值的情况下,将进行方程迭代计算,来不断求得当前的最优估计状态矩阵^[12-13]。

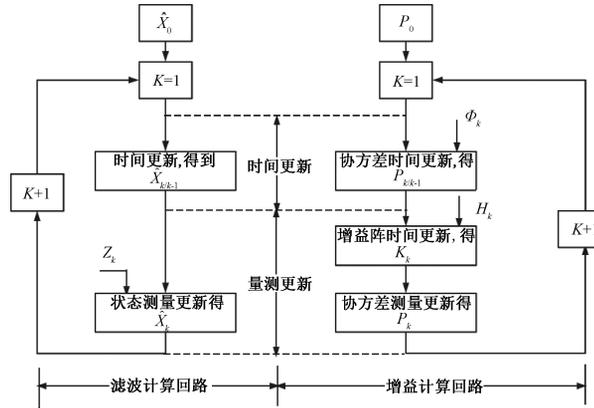


图 2 卡尔曼滤波器流程

Fig. 2 Flow chart of Kalman filter

2 MEMS/磁力计/双天线 RTK 组合测姿算法的分析与设计

2.1 算法总体框架

首先需要将加速度计和磁力计计算所得到的误差向量值求出,对于此误差向量值作为 PI 控制的输入与互补滤波一起对陀螺仪的输出进行相应的校准。对校准之后所获得的角速度进行相应的卡尔曼滤波。在滤波完成后得到相应的姿态角,此时将获得的磁航向角与双天线 RTK 所获得的航向角进行处理得出融合后的航向角。至此完成了所需要的姿态角解算。本文所设计的车载姿态解算算法总体流程框架如图 3 所示。

图 3 中,主要可以分为 4 个部分。第 1 部分是通过相应的磁力计与 MIMU 输出来进行最开始的初始四元数求解,在这一部分同时也需要完成相应的坐标转换。第 2 部分使用加速度计和磁力计所测的数据进行互补滤波与 PI 控制,来对陀螺仪所输出的角速度进行初步校核,可以极大的减少陀螺仪的零偏影响。第 3 部分是使用卡尔曼滤波对四元数进行不断的更新,通过不断更新来获得所得到的磁姿态角。第 4 部分是使用双天线 RTK 所得的航向角与磁航向角进行相应的融合,得到最终所需要的姿态角。

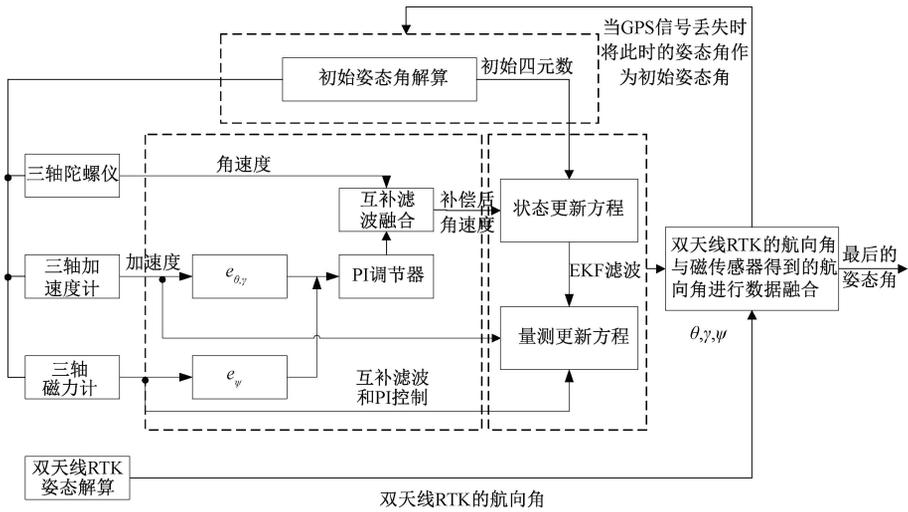


图 3 总体算法流程框架

Fig. 3 Overall algorithm flow framework

2.2 利用起始姿态角计算初始四元数

对于后续姿态角的处理,之后要将载体坐标系转换至导航坐标系,使用的导航坐标系为东北天坐标系。

1) 四元数法来表达姿态角

根据四元数法,可以知道姿态角:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin(2 \times (q_0 \times q_1 + q_2 \times q_3)) \\ \gamma = \arctan \frac{-2 \times (q_1 \times q_3 + q_0 \times q_2)}{1 - 2 \times (q_1^2 + q_2^2)} \\ \psi = \arctan \frac{2 \times (q_1 \times q_2 - q_0 \times q_3)}{1 - 2 \times (q_1^2 + q_3^2)} \end{cases} \quad (2)$$

式中: θ 是俯仰角, γ 是横滚角, ψ 是航向角。

2) 初始四元数的求取

初始四元数的求取,可以使用上面的四元数表达的姿态角,通过初始姿态角来反推出初始四元数。

对于三轴加速度计可以求得所需的俯仰角与横滚角,但缺少一个航向角。对于航向角只能使用磁强计来确定初始的航向角。

对于当载体静止的情况下,可以知道静止时的加速度计与磁力计的理论输出,如下式:

$$a_n = [0 \ 0 \ g] \quad m_n = [0 \ b_n \ b_u] \quad (3)$$

式中: g 为重力加速度, b_n 是地磁场在东北天坐标系中的北向分量, b_u 是地磁场在东北天坐标系中的垂直分量。

假设载体在静止的情况,可得导航坐标系的加速度为:

$$\begin{cases} q_0 = \cos(\theta/2) \cos(\gamma/2) \cos(\psi/2) + \sin(\theta/2) \sin(\gamma/2) \sin(\psi/2) \\ q_1 = \sin(\theta/2) \cos(\gamma/2) \cos(\psi/2) - \cos(\theta/2) \sin(\gamma/2) \sin(\psi/2) \\ q_2 = \cos(\theta/2) \sin(\gamma/2) \cos(\psi/2) + \sin(\theta/2) \cos(\gamma/2) \sin(\psi/2) \\ q_3 = \cos(\theta/2) \cos(\gamma/2) \sin(\psi/2) - \sin(\theta/2) \sin(\gamma/2) \cos(\psi/2) \end{cases} \quad (8)$$

$$a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = C_b^n(q)^T \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(q_1q_3 - q_0q_2) \\ 2(q_2q_3 + q_0q_1) \\ q_0 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对式(4)进行相应的展开,可以通过加速度计求得所需的翻滚角和俯仰角:

$$\begin{cases} \gamma = \arctan \left(\frac{a_x}{\sqrt{a_y^2 + a_z^2}} \right) \\ \theta = \arctan \left(-\frac{a_y}{a_z} \right) \end{cases} \quad (5)$$

同理,可以通过对载体在静止情况下时,导航坐标系的磁力计大小与四元数关系得出式(6):

$$m = \begin{bmatrix} m_x \\ m_y \\ m_z \end{bmatrix} = C_n^b \cdot b = \begin{bmatrix} 2(q_1q_2 + q_0q_3)b_y + 2(q_1q_3 - q_0q_2)b_z \\ (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2)b_y + 2(q_2q_3 + q_0q_1)b_z \\ 2(q_2q_3 - q_0q_1)b_y + (q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2)b_z \end{bmatrix} \quad (6)$$

通过式(6),航向角的初值可以由磁强计来解算得到:

$$\psi_{mag} = \arctan \left(\frac{m_x^n}{m_y^n} \right) \quad (7)$$

通过之前所解析得到的初始俯仰角、横滚角和航向角,根据式(8)来求出所需的初始四元数:

2.3 互补滤波器和 PI 控制算法设计

对于先使用互补滤波与 PI 控制算法的目的是为了降低陀螺仪所测得的角速度的误差。对于陀螺仪而言,由于陀螺仪具有零偏,在工作了一定的时间之后,在由于各种环境影响,最终的误差会越来越大。为了使姿态角解算更加准确,可以先通过对陀螺仪的输出用互补滤波与 PI 控制来降低误差。

1) 互补滤波与 PI 控制原理

对于加速度计与磁力计,它们所测得的值都是实时变化的,不会因为累计而产生较大误差,缺点是它们的精度没有陀螺仪高。陀螺仪角速度测量精度高,但存在零漂以及长时间运行时的累积误差。

加速度计与磁力计为低通特性而陀螺仪为高通特性,符合互补滤波的使用条件。之后对于 PI 控制,将磁强计与四元数所得姿态角之间的差值作为输入值,对陀螺仪的输出进行校正。

假设校正之后所得的姿态角为 θ ,在 s 域上有如下等式成立:

$$\theta = A(s)\theta_{ref}(s) + B(s)L \left[\int_t^{t+\Delta t} \omega_m dt \right] \quad (9)$$

式中: $A(s) = K/(S + K)$ 为低通滤波器, $B(s) = S/(S + K)$ 为高通滤波器 $A(s) + B(s) = 1$, ω_m 表示陀螺仪测量值, θ_{ref} 为磁力计与旋转矩阵结合所算出的。

$$\dot{\theta} = K(\theta_{ref} - \theta) + \omega_m \quad (10)$$

其中, $\theta_{ref} - \theta$ 为磁力计与四元数法分别求得的姿态角的误差,将这个误差量作为陀螺仪输出的修正值,从而修正陀螺仪的角速度输出, $\theta_{ref} - \theta$ 的值本文通过 PI 调节来控制。

PI 调节器的数学模型为:

$$u_o(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (11)$$

式中: $e(t)$ 为 t 时的系统误差, $u(t)$ 为 t 时 PI 调节器的输出值。通过控制 K_p 和 K_i 这两个参数能获得所需要的误差估计量^[14-15]。

2) 向量误差矫正值

对于校正陀螺仪误差的确定是一个难点。本文采用了一种新型的误差矫正值的计算方法,这是一种通过向量叉乘的算法来实现相应的误差矫正值计算。

对于向量误差校正值的计算,首先是要用四元数的旋转矩阵对当前的加速度矢量 \vec{a}^s 以及磁场强度矢量 \vec{m}^s 进行估计。与此同时还可以根据加速度计输出的加速度矢量和磁场强度矢量量测值得到 \vec{a}^s, \vec{m}^s 。

对于上述矢量之间的叉乘如式(12)所示:

$$\begin{aligned} \Delta_{\theta, \gamma} &= \vec{a}^s \times \vec{a}^s \\ \Delta_{\psi} &= \vec{m}^s \times \vec{m}^s \end{aligned} \quad (12)$$

理论情况下,对于 Δ_{ψ} 和 $\Delta_{\theta, \gamma}$ 的值应该一直为 0。但事实上,由于测量、非正交化、坐标对准等各种误差的存在, Δ_{ψ} 和 $\Delta_{\theta, \gamma}$ 不总为 0。通过对上文中的矢量进行相互叉乘,这是一种向量叉乘的方法。由于向量是标准向量,向量积为两向量之间夹角的正弦值。一般而言,这之间的误差很小,误差角度与误差正弦值可以近似的看作相等,如式(13)所示:

$$|\Delta_{\theta, \gamma}| = \vec{a}^s \times \vec{a}^s = 1 \times 1 \times \sin\theta \approx \theta \quad (13)$$

$$|\Delta_{\psi}| = \vec{m}^s \times \vec{m}^s = 1 \times 1 \times \sin\theta \approx \theta$$

误差角度 θ 通过投影在坐标轴上将会形成相应的误差矢量,对于向量叉乘的结果可以用来进行陀螺仪的漂移的校正,求得的总误差为:

$$\Delta = \Delta_{\theta, \gamma} + \Delta_{\psi} \quad (14)$$

根据上式可得:

$$\vec{\omega} = twoK_p \vec{e}(k) + twoK_i \sum_{j=0}^k \vec{e}(j) \Delta t + \omega_m \quad (15)$$

其中, $\vec{\omega}$ 为角速度, $twoK_p$ 表示比例积分, $twoK_i$ 表示控制积分。

2.4 基于卡尔曼滤波器的四元数更新的算法

1) 状态量选取以及状态方程的建立

本次设计中,以四元数的 q_0, q_1, q_2, q_3 作为状态变量,状态方程为:

$$X(k) = \Phi(k, k-1)X(k-1) + \Gamma(k-1)W(k-1) \quad (16)$$

$$\Phi(k, k-1) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & -\omega_x(k) \frac{\Delta T}{2} & -\omega_y(k) \frac{\Delta T}{2} & -\omega_z(k) \frac{\Delta T}{2} \\ \omega_x(k) \frac{\Delta T}{2} & 1 & \omega_z(k) \frac{\Delta T}{2} & -\omega_y(k) \frac{\Delta T}{2} \\ \omega_y(k) \frac{\Delta T}{2} & -\omega_z(k) \frac{\Delta T}{2} & 1 & \omega_x(k) \frac{\Delta T}{2} \\ \omega_z(k) \frac{\Delta T}{2} & \omega_y(k) \frac{\Delta T}{2} & -\omega_x(k) \frac{\Delta T}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\Gamma(k) = \begin{bmatrix} q_1(k) & q_2(k) & q_3(k) \\ -q_0(k) & q_3(k) & -q_2(k) \\ -q_3(k) & -q_0(k) & q_1(k) \\ q_2(k) & -q_1(k) & -q_0(k) \end{bmatrix} \Delta T \quad (18)$$

其中, $W(k)$ 可以作为白噪声,而 $\Gamma(k)$ 可以作为噪声驱动矩阵。

2) 观测量选取和观测方程的建立

在载体坐标系中, a_x, a_y, a_z 为加速度归一化后作为的标准向量, m_x, m_y, m_z 为磁场强度归一化后作为的标准向量。

所以 对于 观 测 量, 选 取 的 为 $Z =$

$$[a_x \ a_y \ a_z \ m_x \ m_y \ m_z]^T$$

对于卡尔曼滤波的观测方程为^[16-17]:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \tag{19}$$

$$H(k) = \frac{\partial h[X(k)]}{\partial X(k)} \Big|_{X(k,k-1)} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_0}{\partial q_0} & \frac{\partial h_0}{\partial q_1} & \frac{\partial h_0}{\partial q_2} & \frac{\partial h_0}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_1}{\partial q_0} & \frac{\partial h_1}{\partial q_1} & \frac{\partial h_1}{\partial q_2} & \frac{\partial h_1}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_2}{\partial q_0} & \frac{\partial h_2}{\partial q_1} & \frac{\partial h_2}{\partial q_2} & \frac{\partial h_2}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_3}{\partial q_0} & \frac{\partial h_3}{\partial q_1} & \frac{\partial h_3}{\partial q_2} & \frac{\partial h_3}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_4}{\partial q_0} & \frac{\partial h_4}{\partial q_1} & \frac{\partial h_4}{\partial q_2} & \frac{\partial h_4}{\partial q_3} \\ \frac{\partial h_5}{\partial q_0} & \frac{\partial h_5}{\partial q_1} & \frac{\partial h_5}{\partial q_2} & \frac{\partial h_5}{\partial q_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2q_2 & 2q_3 & -2q_0 & 2q_1 \\ 2q_1 & 2q_0 & 2q_3 & 2q_2 \\ 2q_0 & -2q_1 & -2q_2 & 2q_3 \\ 2(q_3b_y - q_2b_z) & 2(q_2b_y + q_3b_z) & 2(q_1b_y - q_0b_z) & 2(q_0b_y - q_1b_z) \\ 2(q_0b_y + q_1b_z) & -2(q_1b_y - q_0b_z) & 2(q_2b_y + q_3b_z) & -2(q_3b_y - q_2b_z) \\ -2(q_1b_y - q_0b_z) & -2(q_0b_y + q_1b_z) & 2(q_3b_y - q_2b_z) & 2(q_2b_y + q_3b_z) \end{bmatrix} \tag{20}$$

其中, $V(k)$ 为观测噪声矩阵, 可以看作是白噪声, 方差阵 $R(k)$ 正定 $R(k) = \text{diag}([\sigma_a^2 I \ \sigma_m^2 I])$, 其中 I 为 3×3 的单位矩阵, σ_a^2 和 σ_m^2 。分别为加速度和磁力计协方差矩阵值。

2.5 双天线 RTK 航向角与磁航向角的融合

对于进行了卡尔曼滤波, 并进行了四元数更新之后。可以通过四元数来计算得到所需要的姿态角, 此时对于车载导航最为重要的就是航向角。在之前求出的磁航向角上利用双天线 RTK 求出的航向角进行航向角融合。通过航向角融合来最大程度上减少航向角的偏差。具体的融合方法为对于采集得到的双天线 RTK 所得的航向角进行判定, 如果无 GPS 信号, 此时主要依靠的就是 MIMU 与磁力计组合的测姿方式。当 GPS 信号能正常工作的情况下, 对于双天线 RTK 所获得的数据而言, 可以通过计算磁航向角与双天线 RTK 所获得的磁航向角进行比较得出磁偏角。然后用磁偏角对磁航向角进行处理, 得出本文所需要的航向角^[18-20]。

2.6 MIMU/磁力计/双天线 RTK 组合测姿算法的分析

对于 MIMU/磁力计/双天线 RTK 组合测姿算法的分析, 设置的仿真数据如下。一共仿真 3 000 s, 陀螺仪的零偏为 $0.09^\circ/\text{s}$, 静止状态下双天线 RTK 给出的航向角为 90° 。在 1 000~2 000 s 时双天线所得的航向角为 0, 来模拟 GPS 信号受到干扰时, 同时磁噪声在 0.04 高斯左右。下面进行相应的仿真。

在所给仿真数据相同的情况下, 最后通过 MIMU/磁力计/双天线 RTK 组合测姿算法得到的航向角的偏差较惯性与双天线 RTK 还是与磁传感器组合要小, 而对于在 1 000~2 000 s 内, 无 GPS 信号时, 三者的融合测姿方法的结果与给出的仿真数据也比惯性与双天线 RTK 还是

与磁传感器组合要精准。仿真结果如图 4 所示。

通过本次仿真实验结果, 表明了本文设计有关 MIMU/磁力计/双天线 RTK 组合测姿算法的实用性, 准确性。之后将进行实际的跑车实验来分析 MIMU/磁力计/双天线 RTK 组合测姿算法。

3 实验验证

3.1 测姿系统的硬件平台搭建

本文有关于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的组合导航系统的实验, 是通过相关的惯性测量模块、磁传感器测量和双天线 RTK 模块来进行的, 下面简要介绍。

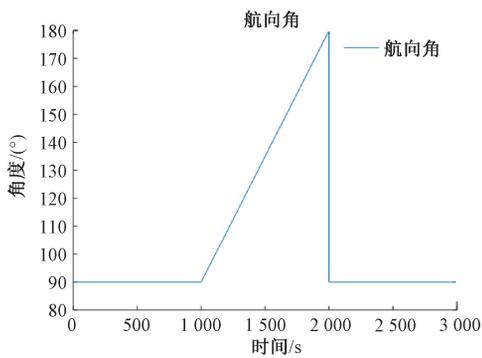
- 1) 惯性测量模块采用的是 ADIS16475 惯性测量单元。
- 2) 磁传感器模块所使用霍尼韦尔 HMC1051, 专门为低场磁感应设计的磁电阻传感模块。
- 3) 双天线 RTK 模块中所使用的 GPS 模块为 UB482 高精度定位定向板卡。

3.2 跑车实验

本次实验的地点为 XXXX 大学教学区内, 围绕行政楼进行车载姿态测量实验。对于要完成这一个实验, 需要在车辆上安装惯性测量模块, 磁传感器测量模块和双天线 RTK 测量模块。对于上述的双天线 RTK 模块的安装如图 5 所示。

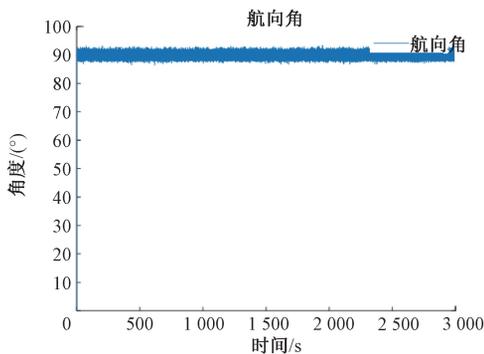
在图 5 中, 将两个 GPS 天线安装在车的一前一后, 两个 GPS 天线之间的连线在汽车的对称面内。这种情况下就可以得到双天线 RTK 所测得的航向角。

对于磁传感器模块和惯性模块安装, 在汽车的上方有一个平台, 将设计好的磁传感器模块, 惯性模块, 信号



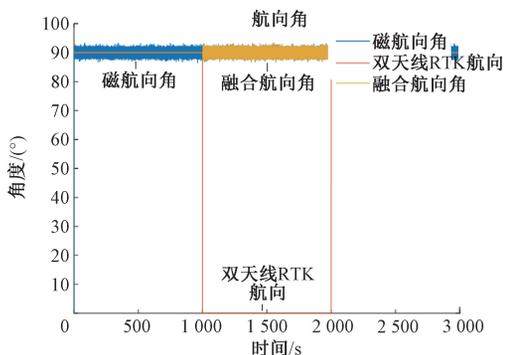
(a) MIMU与双天线RTK组合测姿航向角

(a) MIMU and dual antenna RTK combined attitude and heading angle measurement



(b) MIMU/磁力计组合测姿航向角

(b) MIMU/magnetometer combined attitude and heading angle measurement



(c) MIMU/磁力计/双天线RTK组合测姿航向角

(c) MIMU/magnetometer/dual antenna RTK combined attitude and heading angle measurement

图 4 仿真得出的航向角比较

Fig. 4 Comparison of heading angle obtained by simulation

传输装置和 GPS 信号接受装置封装在一个方盒内。同时的 x 轴与汽车的右向重合, y 轴与汽车的前进方向重合而 z 轴与汽车的天向重合。

跑车实验所产生的真实数据,包括三轴加速度,三轴角速率,三轴磁场强度和双天线 RTK 给出的航向角数据,进行之后的结果处理与分析。

在车载姿态角的解算过程中,在平路上行驶的大部分情况下,车辆的俯仰角和横滚角基本上没有太大变化。



(a) 双天线RTK安装图 (a) Installation drawing of dual antenna RTK
(b) 惯性模块与磁传感器模块 (b) Inertia module and magnetic sensor module

图 5 汽车安装的测量模块

Fig. 5 Measurement module installed on the vehicle

而对车辆而言最重要的是航向角,之后将重点分析在各种测姿方法下,车辆姿态角中的航向角的变化情况。

3.3 跑车实验结果分析

在本次跑车实验中,一共进行了 850 s 的车载数据收集,对于车载姿态角的解算。对于车载姿态角最重要的为航向角,汽车在拐弯时航向角变化明显。汽车是在水平马路上行驶,汽车的横滚角在 $(-20^{\circ} \sim +20^{\circ})$,俯仰角在 $(-15^{\circ} \sim +15^{\circ})$ 变化,并在 0° 附近波动,对于车辆的导航影响较小,俯仰角与横滚角产生波动原因是在平路上行驶时会因为路面不平整和遇到减速带造成。所以接下来对于姿态解算算法的分析将主要靠航向角进行。在 0~200 s 左右汽车处于静止状态,在之后 200~400 s 左右内进行多次转弯,在 400~850 s 左右驶入树木和楼房遮挡处,此时有部分 GPS 信号丢失。图 6 是实际跑车实验的结果航向角。

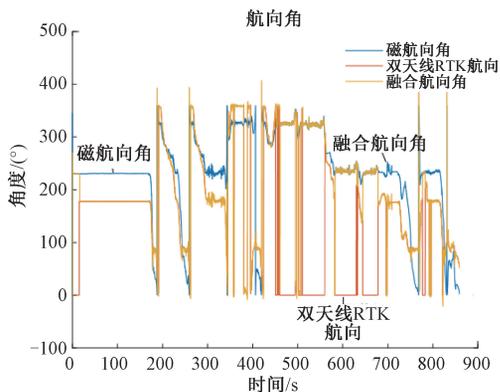


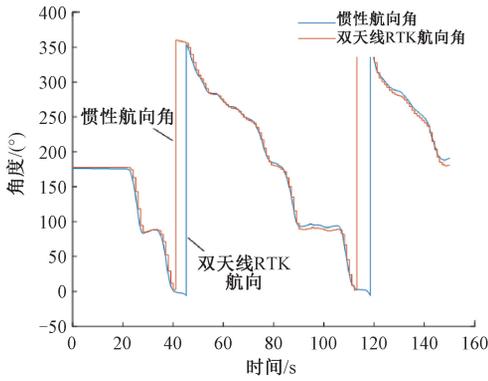
图 6 在 0~850 s 时车辆全程的航向角

Fig. 6 Heading angle of the whole vehicle from 0 to 850 s

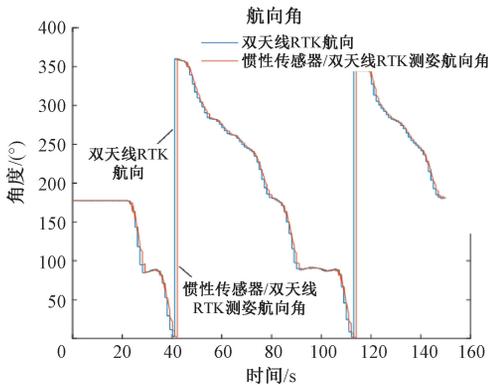
1) 惯性传感器/双天线 RTK 测姿分析

选取 150~300 s 的跑车实验数据,其中 GPS 信号并没有被遮挡的情况下时。双天线 RTK 的航向角可以持续给出。此时实验比较纯惯性测姿与采用惯性/双天线 RTK 组合测姿的区别。图 7 为 150~300 s 惯性航向角与 MIMU/双天线 RTK 测姿航向角结果。

通过对上述在 150~300 s 的跑车实验数据进行分



(a) 惯性航向角与双天线RTK航向角
(a) Inertial heading angle and dual antenna RTK heading angle



(b) MIMU/双天线RTK测姿航向角与双天线RTK航向角
(b) MIMU/ dual antenna RTK attitude heading angle and dual antenna RTK heading angle

图 7 150~300 s 惯性航向角与 MIMU/双天线 RTK 测姿航向角

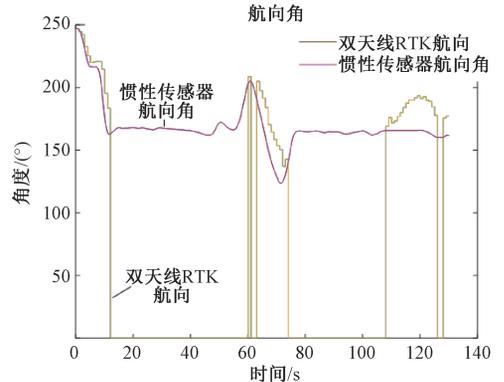
Fig. 7 150 to 300 s inertial heading angle and MIMU/ dual antenna RTK attitude heading angle

析,可以看出在 GPS 信号未受到影响时,此时可以将双天线 RTK 给出的航向角作为真实航向角的参考。而如果只依靠纯惯性测姿的话,随着时间变化,其累计误差不断变大。而相对的惯性传感器/双天线 RTK 组合测姿方式可以看出,在这一段过程中融合航向角与双天线 RTK 所给的值基本吻合。双天线 RTK 所给的航向角由于更新间隔长,灵敏度不如惯性传感器/双天线 RTK 组合测姿。但惯性传感器/双天线 RTK 组合测姿的缺点是如果 GPS 信号丢失,就会变成如图 4 所示的结果,所以这一种组合测姿方法存在不足。

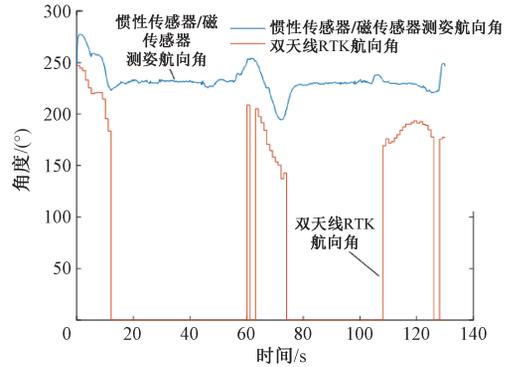
2) 惯性传感器/磁传感器测姿分析

选取 570~700 s 之间的跑车实际数据进行相应的分析,这一段数据的特点是有一段时间内受到树木或高楼的遮挡,丢失了部分 GPS 信号,丢失信号的时间是 10~60 s 和 75~110 s 这两段,此时的数据输出只有三轴加速度计,三轴磁力计和三轴陀螺仪。图 8 为 570~700 s 惯

性航向角与 MIMU/磁传感器航向角结果。



(a) 惯性航向角与双天线RTK航向角
(a) Inertial heading angle and dual antenna RTK heading angle



(b) MIMU/磁传感器航向角与双天线RTK航向角
(b) MIMU/ magnetic sensor heading angle and dual antenna RTK heading angle

图 8 570~700 s 惯性航向角与 MIMU/磁传感器航向角

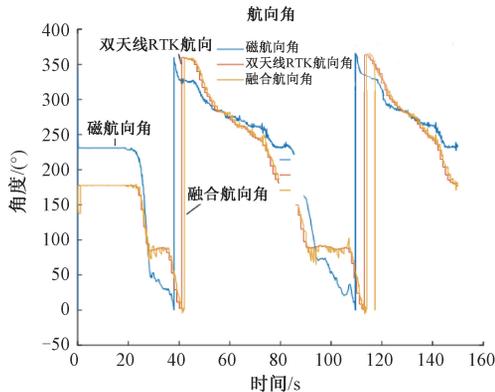
Fig. 8 570 to 700 s inertial heading angle and MIMU/ magnetic sensor heading angle

通过对上述在 570~700 s 的跑车实验数据的分析,可以看出在 GPS 信号受到影响时,此时双天线 RTK 给出的航向角缺失部分。此时如果只依靠纯惯性测姿的话,随着时间变化,其累计误差不断变大。而相对的惯性传感器/磁传感器组合测姿方式可以看出,融合之后的航向角在 60~75 s 内,可以借用双天线 RTK 所给的航向角作为判断的标准,可以看出惯性传感器/磁传感器组合测姿方式所得的航向角要远优于纯惯性测姿。这也同样表明了,如果不进行惯性传感器/磁传感器组合测姿的话,只依靠纯惯性测姿的话,随着时间航向角的漂移会越来越大。

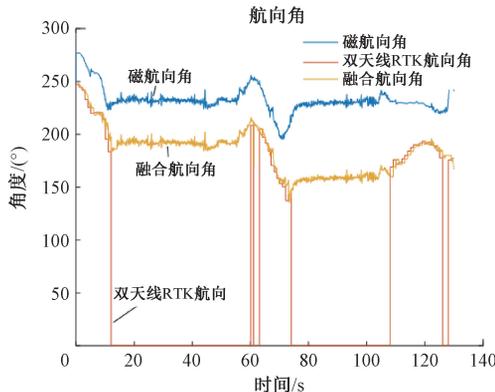
3) MIMU/磁传感器/双天线 RTK 测姿分析

对于最后的惯性传感器/磁传感器/双天线 RTK 组合测姿而言,通过对时间在 150~300 s 之间和 570~700 s 之间进行惯性传感器,磁传感器测姿和双天线 RTK 组合测姿,通过比较分析两者之间的区别,可以看出本文所需要的结果。图 9 为双天线 RTK 航向角与三者融合测姿

的航向角结果。



(a) 150~300 s 双天线 RTK 航向角与三者融合测姿的航向角
(a) 150 to 300 s dual antenna RTK heading angle and heading angle of three fusion attitude measurement



(b) 570~700 s 双天线 RTK 航向角与三者融合测姿的航向角
(b) 570 to 700 s dual antenna RTK heading angle and heading angle of three fusion attitude measurement

图9 双天线 RTK 航向角与三者融合测姿的航向角
Fig. 9 Dual antenna RTK heading angle and heading angle of three fusion attitude measurement

对于上述实验结果,可以看出在 150~300 s 的数据进行实验时,此时实验中双天线 RTK 所给的航向角没有丢失,在这种情况下可以认为此时的双天线 RTK 航向角可以近似作为真实航向角。对于使用惯性传感器/磁传感器测姿所得到的磁航向角,与双天线 RTK 航向角和三者融合航向角的航向角差别较大。在 GPS 未丢失时,双天线 RTK 航向角和三者融合航向角基本上完美重合。可以看出,仅仅使用惯性传感器/磁传感器测姿会因为陀螺零偏导致航向角漂移,而使用惯性传感器/磁传感器测姿/双天线 RTK 组合测姿可以有效的解决这一问题,实现了高精度的姿态角解算。

在 570~700 s 的数据进行实验时,此时实验中双天线 RTK 所给的航向角部分丢失,在这种情况下可以认为未丢失的双天线 RTK 航向角可以近似作为之后的真实航向角。对于使用惯性传感器/磁传感器测姿所得到的

磁航向与图中未丢失 GPS 信号时的双天线 RTK 航向角的航向角差别较大。而当 GPS 信号丢失时,此时的惯性传感器/磁传感器测姿/双天线 RTK 组合测姿将在此时主要依靠惯性传感器与磁传感器,此时的组合测姿结果与惯性传感器/磁传感器测姿结果相接近。当 GPS 信号未丢失时,此时惯性传感器/磁传感器测姿/双天线 RTK 组合测姿的曲线与双天线 RTK 航向角曲线相重合。实验结果说明了使用惯性传感器/磁传感器测姿/双天线 RTK 组合测姿可以有效地避免 GPS 信号丢失所带来的测姿问题。

上述实验结果表明了本文所提出的惯性传感器/磁传感器测姿/双天线 RTK 组合测姿方法,无论是在 GPS 信号的丢失还是陀螺仪零偏情况下,都能够高精度的测量姿态角。

4 结论

常用的车载姿态测量方式是惯性传感器加双天线 RTK 的组合测姿方法,其缺点是当遇到高楼或者树林阻挡时卫星信号会丢失,导致双天线 RTK 无法提供可用的航向角,而惯性传感器又无法长时间保持航向角精度。针对上述问题,本文尝试了一种基于 MIMU 与磁传感器与双天线 RTK 的信息融合方法。该方法在卫星信号丢失的条件下引入磁传感器提供航向信息,能够保证高精度车辆姿态数据的稳定输出。

对于跑车实验结果的分析可以看出当车载姿态角解算过程中,如果依靠 MEMS 与双天线 RTK 进行解算的话,当 GPS 信号丢失时将导致姿态解算出的航向角发生漂移。当只依靠 MEMS 与磁力计进行姿态解算时,由于磁干扰与磁偏角问题将会对姿态解算造成影响。对于本文所设计的基于 MIMU/磁传感器/双天线 RTK 的组合测姿算法,可以有效地避免上述问题,从最终的结果来看,无论是受到陀螺仪零偏还是 GPS 信号丢失基本上都可以输出稳定的姿态角,从而进一步地实现高精度的导航。

参考文献

- [1] 王守华,李云柯,孙希延,等. 基于低成本接收机的双天线测姿算法[J]. 计算机应用, 2019, 39(8): 2381-2385.
WANG SH H, LI Y K, SUN X Y, et al. Era method dual antenna attitude measurement algorithm based on low-cost receiver [J]. Computer Applications, 2019, 39(8): 2381-2385.
- [2] 刘义,杨鹏. 基于卡尔曼滤波的云台自适应姿态优化算法[J]. 自动化与仪表, 2022, 37(11): 80-86.
LIU Y, YANG P. Adaptive attitude optimization algorithm of PTZ based on Kalman filter [J]. Automation

- and Instrumentation, 2022, 37 (11): 80-86.
- [3] 刘春,刘滔,张海燕,等.小波变换法在姿态解算中的应用[J].电子测量与仪器学报,2021,35(1):183-190.
LIU CH, LIU T, ZHANG H Y, et al. Application of wavelet transform in attitude calculation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (1): 183-190.
- [4] 刘军,刘克诚,田甜,等.基于自适应卡尔曼滤波算法的紧组合导航系统的研究[J].电子测量技术,2019,42(5):52-55.
LIU J, LIU K CH, TIAN T, et al. Research on tight integrated navigation system based on adaptive Kalman filter algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42 (5): 52-55.
- [5] 池晓辉.微小型无人机 MEMS-IMU/GPS 组合测姿系统研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2016.
CHI X H. Research on MEMS-IMU/GPS integrated attitude measurement system of micro UAV [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016.
- [6] 舒南樟.基于 DSP 的磁力计/惯性组合测姿系统设计及算法研究[D].南京:东南大学,2018.
SHU N ZH. Design and algorithm research of magnetometer/inertial integrated attitude measurement system based on DSP [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [7] SONG R, FANG Y. Vehicle state estimation for INS/GPS aided by sensors fusion and SCKF-based algorithm[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150: 107315.
- [8] 高文凯,郑岳久,许霜霜,等.基于增量误差的卡尔曼滤波算法全区间荷电状态估计[J].电源学报,2019,17(5):162-169.
GAO W K, ZHENG Y J, XU SH SH, et al. Kalman filter algorithm based on incremental error for inter-regional state-of-charge estimation [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17 (5): 162-169.
- [9] 王鑫博,白保东,于江华,等.基于改进模糊卡尔曼滤波的感应电机转速估计策略研究[J].电机与控制学报,2014,18(11):8-14.
WANG X B, BAI B D, YU J H, et al. Research on speed estimation strategy of induction motor based on improved fuzzy Kalman filter [J]. Journal of Motor and Control, 2014, 18 (11): 8-14.
- [10] 刘颖,杨媛,徐金涛.融合互补滤波和卡尔曼滤波的姿态解算算法[J].西安邮电大学学报,2021,26(4):98-104.
LIU Y, YANG Y, XU J T. Attitude solution algorithm integrating complementary filter and Kalman filter [J]. Journal of Xi'an University of Posts and Telecommunications, 2021, 26 (4): 98-104.
- [11] FAN Q, ZHANG H, PAN P, et al. Improved pedestrian dead reckoning based on a robust adaptive Kalman filter for indoor inertial location system [J]. Sensors, 2019, 19(2): 294.
- [12] AL BITAR N, GAVRILOV A. A novel approach for aiding unscented Kalman filter for bridging GNSS outages in integrated navigation systems [J]. Navigation, 2021, 68(3): 521-539.
- [13] 余东毅,柴云峰,宋亚,等.基于四元数的地面光电探测系统指向标定[J].激光与红外,2022,52(9):1384-1389.
YU D Y, CHAI Y F, SONG Y, et al. Pointing calibration of terrestrial photoelectric detection system based on quaternion [J]. Laser and Infrared, 2022, 52(9): 1384-1389.
- [14] 孙江山,刘敏,邓磊,等.基于自适应无迹卡尔曼滤波的配电网状态估计[J].电力系统保护与控制,2018,46(11):1-7.
SUN J SH, LIU M, DENG L, et al. Distribution network state estimation based on adaptive unscented Kalman filter [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 1-7.
- [15] 胡晓晓,程冬.基于四元数尺度函数的边缘检测方法[J].浙江大学学报(理学版),2022,49(5):549-554.
HU X X, CHENG D. Edge detection method based on quaternion scale function [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2022, 49 (5): 549-554.
- [16] 方文轩,丛伟伟.卫星/惯性/视觉组合导航多源融合技术现状及发展[J].无线电工程,2022,52(10):1813-1820.
FANG W X, CONG D W. Status and development of satellite/inertial/visual integrated navigation multi source fusion technology [J]. Radio Engineering, 2022, 52(10): 1813-1820.
- [17] 晏理,张金艺,陈兴秀,等.全景多模式组合导航姿态估计算法[J].电子测量技术,2015,38(5):37-41.
YAN L, ZHANG J Y, CHEN X X, et al. Panoramic multi-mode integrated navigation attitude estimation algorithm [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38 (5): 37-41.
- [18] 刘春,何敏,戴雷.基于 Mahony 与改进 Kalman 融合的姿态解算方法[J].电子测量与仪器学报,2022,36(9):64-71.
LIU CH, HE M, DAI L. Attitude calculation method based on Mahony and improved Kalman fusion [J].

Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 64-71.

- [19] 黎标幸, 夏海英, 宋树祥, 等. GPS/BDS 组合的 RTK 多路径抑制方法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(7): 199-205.

LI B X, XIA H Y, SONG SH X, et al. RTK multipath suppression method based on GPS/BDS combination [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (7): 199-205.

- [20] 郭庆瑞, 章政, 黄卫华, 等. 基于 Huber 鲁棒估计的改进互补滤波姿态解算算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 157-165.

GUO Q R, ZHANG ZH, HUANG W H, et al. An improved complementary filtering attitude algorithm based on Huber robust estimation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (3): 157-165.

作者简介

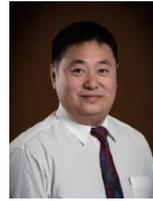


张强, 2022 年于南京理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学研究生, 主要研究方向为组合导航。

E-mail: zhangqiangmems@njust.edu.cn

Zhang Qiang received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2022. He is now a M. Sc. candidate in Nanjing University of Science and Technology. His main research interest

includes integrated navigation.



吴志强 (通信作者), 2003 年于西北工业大学获得学士学位, 2006 年于西北工业大学获得硕士学位, 2009 年于西北工业大学获得博士学位, 现为南京理工大学讲师, 主要研究方向为嵌入式系统开发与组合导航系统。

E-mail: wuzhiqiang@njust.edu.cn

Wu Zhiqiang (Corresponding author), received his B. Sc. degree from Northwestern Polytechnic University in 2003, received his M. Sc. degree from Northwestern Polytechnic University in 2006 and received his Ph. D. degree from Northwestern Polytechnic University in 2009. He is now a lecturer at Nanjing Polytechnic University. His main research interests include embedded system development and integrated navigation system.



云启凡, 2020 年于南京理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学机械工程学院硕士研究生, 主要研究方向为惯性导航/组合导航。

E-mail: yunqifan@163.com

Yun Qifan received his B. Sc. degree from Nanjing University of Technology in 2020. He is now a M. Sc. candidate at the School of Mechanical Engineering of Nanjing University of Technology. His main research interest includes inertial navigation/integrated navigation.