

北斗/SINS/OD 组合导航定位终端设计

邢昱翔^{1,*}, 赵英亮¹, 姚金杰¹, 姚焕钰¹, 邹宇², 薛晓东², 刘蔚¹

(1. 中北大学 信息探测与处理山西省重点实验室, 太原 030051; 2. 内蒙航天动力机械测试所, 呼和浩特 010060)

摘要: 针对常见组合导航系统在隧道、峡谷、森林等卫星信号较弱甚至出现失锁状况的地区, 定位精度会迅速下降的问题, 设计了北斗/捷联惯导(SINS)/里程计(OD)组合导航定位终端。终端设计以 OMAP-L137 处理器为核心, 包括北斗、SINS、里程计、4G 通信和电源等模块。数据处理部分以北斗导航接收机和根据 SINS/OD 推算分别得到的伪距、伪距率之间的差值作为量测值, 使用拓展卡尔曼(EKF)滤波算法进行数据融合与误差估计。实验结果表明, 北斗/SINS/OD 组合导航定位终端在卫星失锁情况下行驶总里程 5 km 时最大位置误差为 46.82 m, 误差漂移为 0.94%, 能够有效解决卫星信号受遮蔽导致定位精度下降的问题, 实现平滑载体运行轨迹并提高导航定位精度。

关键词: 北斗; SINS; OD; OMAP-L137

中图分类号: TN962

文献标识码: A

Design of Beidou/SINS/OD integrated navigation and positioning terminal

XING Yuxiang¹, ZHAO Yingliang¹, YAO Jinjie¹, YAO Huanyu¹, ZOU Yu², XUE Xiaodong², LIU Wei¹

(1. Institute of Signal Capturing & Processing Technology, Key Laboratory of Shanxi Province, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Inner Mongolia Aerospace Power Machinery Testing Institute, Huhehaote 010060, China)

Abstract: Aiming at the problem that the positioning accuracy of common integrated navigation systems will decline rapidly in areas with weak satellite signals such as tunnels, canyons, forests, etc., a Beidou/strapdown inertial navigation (SINS)/odometer (OD) integrated navigation and positioning terminal is designed. The terminal design takes OMAP-L137 processor as the core, including Beidou, SINS, odometer, 4G communication and power supply modules. The data processing part takes the difference between the Beidou navigation receiver and the pseudo range and pseudo range rate calculated according to SINS/OD as the measured value, and uses the extended Kalman filter (EKF) algorithm for data fusion and error estimation. The experiment results show that the maximum position error of Beidou/SINS/OD integrated navigation and positioning terminal is 46.82 m and the error drift is 0.94% when the total mileage is 5 km when the satellite is unlocked, which can effectively improve the problem of positioning accuracy decline caused by the obscuration of satellite signals, smooth the vehicle trajectory and improve the navigation and positioning accuracy.

Keywords: Beidou; SINS; OD; OMAP-L137

0 引言

全球卫星导航系统(GNSS)是目前应用最广泛的导航系统。北斗作为国之重器, 已在我国乃至世界得到广泛应用^[1], 具有实时高精度定位、无误差累积的优点, 但其信号易受到外界因素干扰, 导致定位误差瞬间增大甚至无法获

取定位信息。

目前, 国内外对于解决卫星信号被遮挡的问题, 最常用的方法为 GNSS/SINS 组合导航^[2], 其中 SINS 具有自主导航能力, 能够输出载体的姿态、速度和位置信息, 但其定位误差会随时间累积而不断增大^[3]。因此, 这种组合导航方式在卫星失锁状况下, 定位精度会迅速下降。

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2022YFSJ0031); 山西省重点研发计划(202102010101002); 国防基础研究计划项目(JCKY2021210B073, JCKY2022209A001)。

邢昱翔、姚焕钰、刘蔚(硕士研究生), 主要研究方向为北斗导航技术应用、组合导航; 赵英亮(副教授), 主要研究方向为信号与信息处理、数字图像处理、多维信号处理与重建、无损检测技术、北斗导航技术应用等; 姚金杰(副教授), 主要研究方向为北斗导航技术应用、毫米波测试技术; 邹宇(高级工程师)、薛晓东(工程师), 主要研究方向为导航技术应用与试验测试。

* 通信作者. E-mail: 1243168576@qq.com。

针对上述问题,本文设计了一种北斗/SINS/里程计(OD)组合导航定位终端。该终端引入里程计这种自主定位设备^[4],利用里程计可进行无源航位推算的特点,充分发挥北斗、SINS与OD的优势,实现3种导航系统信息的相互修正,从而提高系统的定位精度,满足北斗信号失锁环境下的导航定位需求。

1 北斗/SINS/OD 组合导航定位终端总体设计

本系统采用北斗/SINS/OD组合导航方式,适用于车载体,可分车载端和车轮端两部分。终端上电后,车轮端通过 ZigBee 将里程计测得的轮速和里程信息发送至车载端;车载端接收北斗、惯导及里程计信息,经 EKF 算法进行数据融合与误差估计,并以估计误差对惯导与里程计进行矫正,得到导航信息。系统整体框图如图 1 所示。

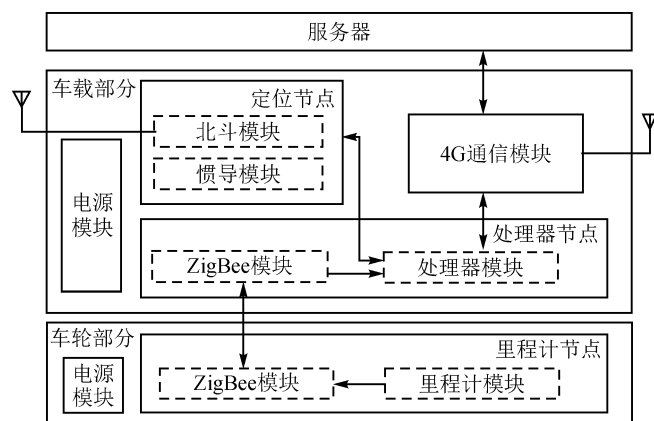


图 1 多源融合定位终端整体框图

Fig. 1 Overall block diagram of multi-source fusion positioning terminal

2 多源融合定位终端硬件设计

2.1 硬件整体设计

本设计的硬件部分总体采用模块化设计方案。车轮端采集里程计速度、里程信息发送至车载端;车载端通过北斗定位模块、惯导模块和里程计模块获取组合导航所需的定位信息,并通过 4G 通信模块将数据传输至服务器。

2.2 处理器模块

处理器模块是车载端的核心,负责接收北斗、惯导和里程计模块定位信息,进行组合导航数据融合解算,并将定位结果发送至通信模块。其中,组合导航系统在进行数据融合解算时,涉及到大量复杂的矩阵运算,常规的微处理器通常难以满足兼具大运算量与小型化、低功耗的需求。因此,本设计采用 TI 公司生产的 OMAP-L137 芯片,该芯片集成了 DSP 高性能计算核、MPU 核及多种常用外设接口,可满足设计需求。处理器模块外部接入了 25 MHz 时钟电路、复位电路、电平转换电路等外围电路,

以支持终端的正常运行。

2.3 惯导模块

在卫星信号失锁时,惯导精度将对组合导航的定位精度产生决定性影响。因此,本设计选用 ADIS16467-2 惯性测量单元,其陀螺仪零偏稳定性为 $\pm 2^\circ/\text{h}$,加速度计零偏稳定性为 $13 \mu\text{g}$,可实现数据高速传输,在非线性和稳定性等方面具有优势。

2.4 北斗模块

北斗模块选用 u-blox 公司的 ZED-F9P 芯片,该芯片支持北斗、GPS 等卫星系统。由于紧组合导航采用伪距和伪距率进行组合,北斗卫星需输出伪距、伪距率信息和星历数据等原始观测信息。该芯片支持原始观测数据的输出,满足组合导航中对卫星伪距与伪距率的解算要求。

2.5 通信模块

由于本系统需实时输出定位结果,因此采用移动通信将定位数据发送至服务器。通信模块选用有人物联网旗下的 WH-GM5 无线透传模块。该模块是一款小体积、多应用功能的 4G 芯片,可实现定位数据的实时传输功能。

2.6 里程计模块

在组合导航系统中,里程计通过测量车辆轮胎的转动情况提供车辆的运动信息,包括位移和速度。通过与北斗定位系统和惯性导航惯导系统的数据融合,里程计可以减小惯导系统的累积误差、补偿惯性导航系统的误差漂移问题。本设计采用 HEDS-5500 增量式光电编码器,该编码器具有高分辨率和支持高速测量的特点,可满足车辆载体等应用场景的使用需求。

3 北斗/SINS/OD 组合导航定位终端算法设计

本节在终端总体设计方案的基础上,将详细介绍北斗/SINS/OD 组合导航算法流程,具体可分为 SINS 解算数值更新、OD 航位推算以及组合导航解算 3 部分。

3.1 组合导航算法流程

系统采用北斗/SINS/OD 紧组合算法,算法框架如图 2 所示。通过惯性解算,惯导获得载体的姿态、速度和位置,里程计结合姿态信息通过航位推算得到载体的位置信息;处理器结合北斗星历数据与惯导/里程计测得位置、速度信息,推算伪距与伪距率的估计值,并以北斗和 SINS/OD 分别得到的伪距、伪距率之间的差值作为量测值,采用 EKF 算法进行数据融合与误差估计,得到 SINS/OD 的误差估计值。

3.2 捷联惯导数值更新算法

惯导更新模型主要分为载体姿态、速度和位置更新 3 部分,更新模型可表示为:

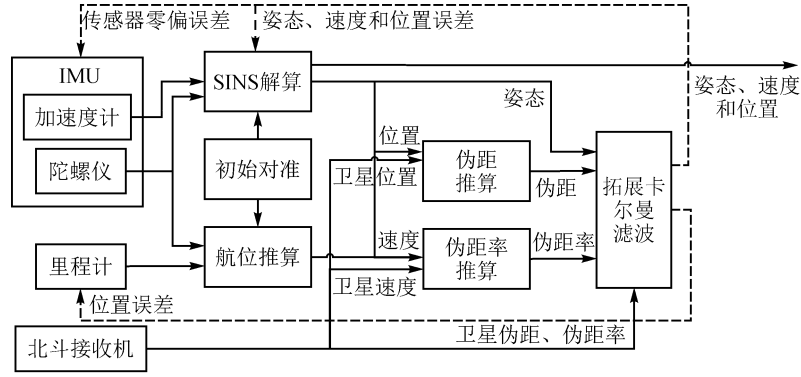


图 2 北斗/SINS/OD 组合导航原理

Fig. 2 Principle of Beidou/SINS/OD integrated navigation

$$\begin{cases} C_{b(m)}^{n(m)} = C_{b(m-1)}^{n(m)} C_{b(m-1)}^{n(m-1)} C_{b(m)}^{n(m-1)} \\ v_m^{n(m)} = v_{m-1}^{n(m-1)} + \Delta v_{sf(m)}^{n(m)} + \Delta v_{cor/g(m)}^{n(m)} \\ p_m = p_{m-1} + M_{pv(m-1/2)}(v_{m-1}^{n(m-1)} + v_m^{n(m)}) \frac{T_m}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中, C 为载体姿态矩阵, v 为载体速度矩阵, p 为载体位置矩阵, $\Delta v_{sf}^{n(m)}$ 为速度快变部分, $\Delta v_{cor/g}^{n(m)}$ 为速度慢变部分, M_{pv} 表示由 p 推导至 v 的函数。

3.3 里程计航位推算(OR)算法

设载体指向其正前方的速度为 v_D , 矢量形式表示为 $v^b = [0 \quad v_D \quad 0]^T$, 因此, 载体在 n 系的速度表达式为:

$$v_D^n = C_b^n v_D^b \quad (2)$$

由里程计的速度 v_D^n 可得 OR 微分方程如下:

$$\begin{cases} \dot{L}_D = \frac{v_{DN}^n}{R_{MhD}} \\ \dot{\lambda}_D = \frac{v_{DE}^n \sec L_D}{R_{NhD}} \\ \dot{h}_D = v_{DU}^n \end{cases} \quad (3)$$

L_D , λ_D 和 h_D 分别代表航位推算得到的地理纬度、经度和高度; 速度 $V_D^n = [V_{DE} \quad V_{DN} \quad V_{DU}]^T$ 。其中:

$$\begin{cases} R_{MhD} = R_{MD} + h_D \\ R_{NhD} = R_{ND} + h_D \end{cases} \quad (4)$$

式中, R_{MD} 和 R_{ND} 表示经航位推算后得到的子午圈与卯酉圈主曲率半径。

将式(3)离散化, 可得航位推算位置更新如下:

$$\begin{cases} L_{D(m)} = L_{D(m-1)} + \frac{T_m v_{DN(m)}^n}{R_{MhD(m-1)}} = L_{D(j-1)} + \frac{\Delta S_{N(m)}}{R_{MhD(m-1)}} \\ \lambda_{D(m)} = \lambda_{D(m-1)} + \frac{T_m v_{DE(m)}^n \sec L_{D(j-1)}}{R_{NhD(m-1)}} = \lambda_{D(m-1)} + \frac{\Delta S_{E(m)} \sec L_{D(m-1)}}{R_{NhD(m-1)}} \\ h_{D(m)} = h_{D(m-1)} + T_m v_{DU(m)}^n = h_{D(m-1)} + \Delta S_{U(m)} \end{cases} \quad (5)$$

3.4 组合导航算法

3.4.1 状态方程

系统状态误差矢量为:

$$X(t) = [\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U, \delta v_E, \delta v_N, \delta v_U, \delta L, \delta \lambda, \delta h, \epsilon_{bx}, \epsilon_{by}, \epsilon_{bz}, \epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}, \nabla_x, \nabla_y, \nabla_z, \delta t_u, \delta t_{ru}]^T \quad (6)$$

式中, $\varphi_E, \varphi_N, \varphi_U$ 为姿态角误差; $\delta v_E, \delta v_N, \delta v_U$ 为东、北、天向速度误差; $\delta L, \delta \lambda, \delta h$ 表示经度、纬度和高度误差; $\epsilon_{bx}, \epsilon_{by}, \epsilon_{bz}$ 和 $\epsilon_{rx}, \epsilon_{ry}, \epsilon_{rz}$ 分别为陀螺仪随机误差和一阶马尔科夫过程; $\nabla_x, \nabla_y, \nabla_z$ 为加计零偏; δt_u 和 δt_{ru} 分别为北斗钟差及时钟频率误差引起的距离误差和速度误差。

系统误差状态方程由 SINS/OD 误差状态方程与北斗误差状态方程构成:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_{I/O} \\ \dot{X}_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{I/O} & 0 \\ 0 & F_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{I/O} \\ X_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{I/O} & 0 \\ 0 & G_G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_{I/O} \\ W_G \end{bmatrix} \quad (7)$$

即

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (8)$$

式中, F_N 为 9 阶惯导误差方阵:

$$F(t) = \begin{bmatrix} F_N & F_S & 0 \\ 0 & F_M & 0 \\ 0 & 0 & F_G \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$F_S = \begin{bmatrix} C_b^n & C_b^n & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & C_b^n \\ 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$F_G = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -\tau \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$F_M = \text{diag} \left[0 \quad 0 \quad 0 \quad -\frac{1}{T_{gx}} \quad -\frac{1}{T_{gy}} \quad -\frac{1}{T_{gz}} \quad -\frac{1}{T_{ax}} \quad -\frac{1}{T_{ay}} \quad -\frac{1}{T_{az}} \right] \quad (12)$$

式中, $T_{gi}, T_{ai} (i=x, y, z)$ 分别为陀螺仪与加速度计的相关时间常数。

3.4.2 量测方程

选取 SINS/OD 与 GNSS 提供的伪距和伪距率分别作

差,将差值作为组合导航系统观测值。

$$Z(t) = \begin{bmatrix} \delta\rho \\ \delta\rho \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{I/O} - \rho_G \\ \rho_{I/O} - \rho_G \end{bmatrix} = h[X(t), t] + v(t) \quad (13)$$

式中, $\rho_{I/O}$ 为 SINS/OD 所得伪距, ρ_G 为北斗所得伪距。

$$\rho_G = \rho + \delta t_u + v_p \quad (14)$$

式中, v_p 为伪距的量测噪声。

理想伪距 ρ 与 $\rho_{I/O}$ 可由下式计算得到:

$$\begin{cases} \rho = \sqrt{(x - x_s^j)^2 + (y - y_s^j)^2 + (z - z_s^j)^2} \\ \rho_{I/O} = \sqrt{(x_I - x_s^j)^2 + (y_I - y_s^j)^2 + (z_I - z_s^j)^2} \end{cases} \quad (15)$$

式中, (x, y, z) 表示载体的地心地固直角坐标系 (e 系) 坐标; (x_s^j, y_s^j, z_s^j) 表示第 j 颗卫星的 e 系坐标; (x_I, y_I, z_I) 为由 SINS/OD 所得 e 系坐标。

$\dot{\rho}_{I/O}$ 表示根据 SINS/OD 所得伪距率, 北斗测量所得伪距率 $\dot{\rho}_G$ 为

$$\dot{\rho}_G = \dot{\rho} + \delta t_{ru} + v_p \quad (16)$$

式中, $\dot{\rho}$ 表示伪距率理论值, v_p 表示量测噪声, 则有:

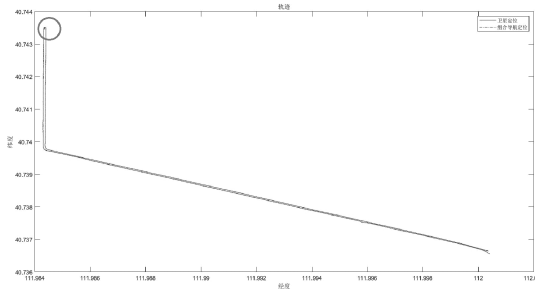
$$\begin{cases} \dot{\rho} = [(x - x_s^j)(\dot{x} - \dot{x}_s^j) + (y - y_s^j)(\dot{y} - \dot{y}_s^j) + (z - z_s^j)(\dot{z} - \dot{z}_s^j)]^T / \rho \\ \dot{\rho}_I = [(x_I - x_s^j)(\dot{x}_I - \dot{x}_s^j) + (y_I - y_s^j)(\dot{y}_I - \dot{y}_s^j) + (z_I - z_s^j)(\dot{z}_I - \dot{z}_s^j)]^T / \rho_I \end{cases} \quad (17)$$

式中, $(\dot{x}, \dot{y}, \dot{z})$ 为载体在 e 系中的速度, $(\dot{x}_s^j, \dot{y}_s^j, \dot{z}_s^j)$ 为第 j 颗卫星在 e 系中的速度, $(\dot{x}_I, \dot{y}_I, \dot{z}_I)$ 为由 SINS 算得的载体在 e 系中的速度。

3.4.3 拓展卡尔曼滤波器

为了抑制非线性系统误差, 提高系统状态量均值与协方差的准确度, 本文采用 EKF 算法进行数据融合与误差估计。选取近似高斯分布的数据来更新系统状态均值与误差协方差, 在更新过程中, 采样点会通过非线性状态方程进行传递, 并经过量测方程后发生变换。

假定变量 x 的平均值为 $\bar{x}$, 协方差为 P_{xx} , 通过对称采样法来获取一系列采样点:



(a) 北斗定位与组合导航定位轨迹对比图

$$\chi_0 = \bar{x}, W_0 = k/n + k, i = 0 \quad (18)$$

$$\begin{cases} \chi_i = \bar{x} + (\gamma \sqrt{P_{xx}})_i, i = 1, 2, \dots, n \\ \chi_i = \bar{x} - (\gamma \sqrt{P_{xx}})_{i-n}, i = n+1, n+2, \dots, L \end{cases} \quad (19)$$

$$W_i = 1/2(n+k) \quad (20)$$

式中, $\gamma = \sqrt{n+k}$ 表示比例因子, 从而得到 EKF 方程如下:

首先, 计算状态一步预测 $\chi_{k|k-1}$ 及其均值 $\bar{x}_k$, 计算误差估计 P_k^- :

$$\chi_{k|k-1} = F[\chi_{k-1}, u_{k-1}], \bar{x}_k = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m \chi_{i,k|k-1} \quad (21)$$

$$P_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [\chi_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-] [\chi_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-]^T + R^v \quad (22)$$

$$z_{k|k-1} = H[\chi_{k|k-1}], \hat{z}_k^- = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m z_{i,k|k-1} \quad (23)$$

量测进入后, 计算 EKF 的增益 K_k :

$$K_k = ([\chi_{i,k|k-1} - \hat{x}_k^-] [z_{i,k|k-1} - \hat{z}_k^-]^T) (\sum_{i=0}^{2L} W_i^c [z_{i,k|k-1} - \hat{z}_k^-] [z_{i,k|k-1} - \hat{z}_k^-]^T + R^n)^{-1} \quad (24)$$

接下来继续进行量测更新并输出估计值 $\hat{x}_k$ 与误差阵 P_k :

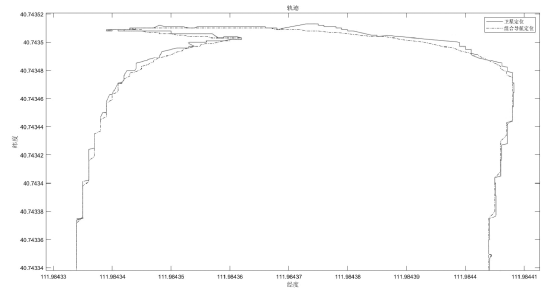
$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{z}_k^-) \quad (25)$$

$$P_k = P_k^- - K_k P_k^- \bar{y}_k \bar{y}_k^T K_k^T \quad (26)$$

式中, R^v 为系统噪声方差, R^n 为观测噪声方差。

4 实测实验与结果分析

为验证终端定位效果, 进行实景测试实验。起点和终点选取同一地点, 往返行驶一周, 总路程为 5 km, 时长为 10 分钟。根据采集数据绘制轨迹, 其定位结果如图 3(a) 所示, 图中圆圈处为载体掉头处, 其运动轨迹图局部放大结果如图 3(b) 所示。



(b) 运动轨迹局部放大图

图 3 北斗定位与组合导航定位轨迹

Fig. 3 Beidou positioning and integrated navigation positioning trajectory

由图 3 可知, 北斗卫星定位能够反应载体的位置轨迹, 但其绘制所得载体运动轨迹不够平滑, 出现部分异常点。组合导航结果有效改善了这一现象, 其定位轨迹也更加平滑。北斗卫星定位与组合导航定位的位置差随行驶

距离变化如图 4 所示, 在北斗信号良好时, 最大位置误差为 0.76 m, 平均位置误差为 0.24 m。

进一步测试终端在无卫星信号时的性能, 采用手动拔掉北斗卫星天线的方式模拟无卫星信号, 其定位轨迹相对

于有卫星信号时的轨迹出现一定的差异,如图 5(a)所示,但轨迹大致重合,表明组合导航能有效抑制定位精度随时间发散。图 5(b)为卫星失锁时组合导航定位位置误差,由于 SINS 和 OD 均为无源定位,无北斗卫星定位时仍然存在误差随时间和距离增大而增大的现象。此时载体行驶总里程为 5 km 时最大位置误差为 46.82 m,误差漂移为 0.94%。

5 结 语

本文设计了一种北斗/SINS/OD 组合导航定位终端。终端工作时,处理器通过北斗定位模块、惯导模块和里程计模块获取组合导航所需的定位信息,采用 EKF 算法进行数据融合解算后,通过通信模块将定位数据传输至服务器。在卫星信号失锁时,终端能够实现对载体的有效定位,有效矫正惯导误差发散,在山区、隧道和城市复杂场景

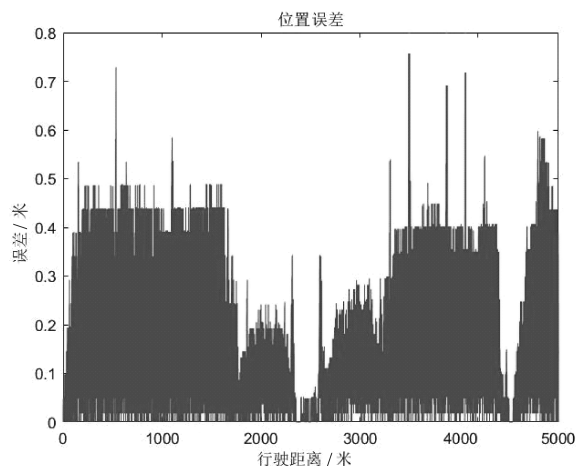
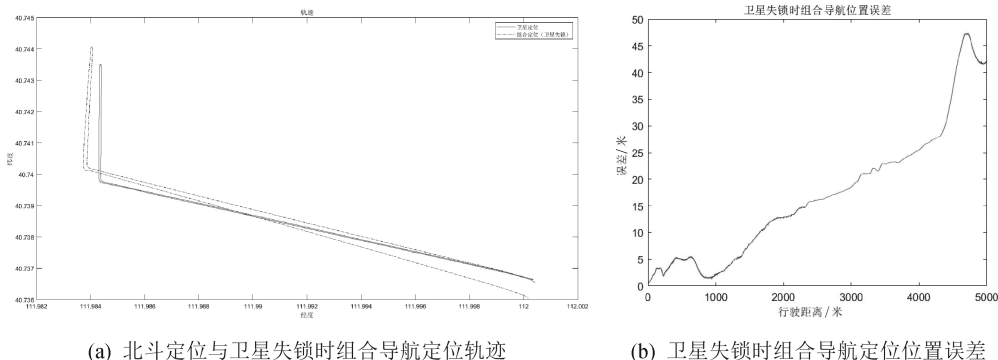


图 4 北斗卫星定位与组合导航定位位置差

Fig. 4 Position difference between Beidou satellite positioning and integrated navigation positioning

等环境能够提供较高精度的定位。



(a) 北斗定位与卫星失锁时组合导航定位轨迹

(b) 卫星失锁时组合导航定位位置误差

图 5 北斗定位与卫星失锁时组合导航定位轨迹

Fig. 5 Integrated navigation and positioning trajectory of beidou positioning and satellite lockout

参考文献

- [1] 杨子辉,薛彬.北斗卫星导航系统的发展历程及其发展趋势[J].导航定位学报,2022,10(1):1-14.
YANG Z H,XUE B. The Development History and Trend of Beidou Satellite Navigation System[J]. Journal of Navigation and Positioning,2022,10(1):1-14(in Chinese).
- [2] 缪玲娟,李春明,郭振西,等.陆用捷联惯导系统/里程计自主式组合导航技术[J].北京理工大学学报,2009,24(9):808-811.
MIAO L J,LI CH M,GUO ZH X,et al. Autonomous Integrated Navigation Technology for Land Strapdown Inertial Navigation System/Odometer [J]. Journal of Beijing University of Technology,2009,24(9):808-811(in Chinese).
- [3] FALCO GIANLUCA, PINI MARCO, MARUCCO GIANLUCA. Loose and Tight GNSS/INS Integrations: Comparison of Performance Assessed in Real Urban Scenarios[J]. Sensors,2017,17(2):255-279.
- [4] 徐田来,崔平远,崔祜涛.车载多传感器组合导航系统设计与实现[J].系统工程与电子技术,2008,30(4):686-691.
XU T L,CUI P Y,CUI H T. Design and Implementation of Vehicle Multi sensor Integrated Navigation System [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2008, 30(4): 686-691(in Chinese).
- [5] 王可东. Kalman 滤波基础及 MATLAB 仿真[M]. 1 版. 北京:北京航空航天大学出版社,2019.
WANG K D. Kalman Filtering Fundamentals and MATLAB Simulation [M]. 1st Edition. Beijing: Beihang University Press,2019(in Chinese).
- [6] 李文华,汪立新,沈强,等.基于鲁棒 EKF 的 MEMS-INS/GNSS/VO 组合导航方法[J].系统工程与电子技术,2022,44(6):1994-2000.
LI W H,WANG L X,SHEN Q,et al. A robust EKF based MEMS INS/GNSS/VO integrated navigation method [J]. Systems Engineering and Electronic Technology, 2022, 44(6):1994-2000(in Chinese).

- [7] 崔晓珍,周琪,武东杰,等. 融合里程计的 INS/GNSS 组合导航系统设计与试验分析[J]. 航空科学技术,2022,33(2):84-89.
CUI X ZH,ZHOU Q,WU D J,et al. Design and experimental analysis of INS/GNSS integrated navigation system with odometer fusion [J]. Aerospace Science and Technology, 2022,33(2):84-89(in Chinese).
- [8] CHENG K,HUANG C M,ZHAO Y Y. Study on SRUKF Applied in Initial Alignmentwith Large Misalignment Angle on Stationary Base of SINS [J]. Advanced MaterialsResearch,2012,383-390:5088-5093.
- [9] LIN YUSEN,MIAO LINGJUAN,ZHOU ZHIQIANG. An Improved MCMC - based Particle Filter for GPS - aided SINS In - motion Initial Alignment[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2020(99):1.
- [10] 陈德潘,陈帅,樊龙江,等. MIMU/CSAC/BDS 组合导航微系统的硬件设计[J]. 航天控制,2018,36(3):71-78.
CHEN D P,CHEN SH,FAN L J,et al. Hardware Design of MIMU/CSA/BDS Integrated Navigation Microsystem[J]. Aerospace Control,2018,36(3):71-78(in Chinese).
- [11] 高小鹏. 基于高精度 MEMS 惯性器件的多传感器融合定位系统的设计与研究[J]. 物联网技术,2021,11(7):99-103.
GAO X P. Design and research of a multi - sensor fusion positioning system based on high - precision MEMS inertial devices[J]. Internet of Things Technology, 2021, 11(7): 99-103(in Chinese).

(责任编辑:薛士然 收稿日期:2023-09-01)