

文章编号: 1672-3392(2024)04-0100-05

基于 SINS/GNSS 组合导航的列车定位算法

程远¹ 李亚聪² 杨玉孔¹

(1 华中光电技术研究所—武汉光电国家研究中心, 湖北 武汉 430223;

2 烽火通信科技股份有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘要 相较于单一的列车定位方式,组合导航技术可以有效提高列车定位系统的定位精度。介绍了捷联惯性导航(SINS)/卫星导航(GNSS)组合导航技术的基本原理,提出了一种实用的列车惯导/卫导组合 Kalman 滤波算法,利用惯导和卫导各自的技术优势,克服列车行驶路线中地理、环境等因素的不利影响,持续性地给出列车准确的定位信息。通过分析列车实际复杂线路的行驶数据,组合导航定位精度满足要求,验证了该算法的实用性和有效性,确保了列车行车安全和运输效率。

关键词 列车定位; Kalman 滤波; 组合导航; 卫星导航; 捷联惯性导航

中图分类号 TN967.2 **文献标识码** A

1 引言

列车运行控制系统正常安全运行时需要实时、准确和可靠地获取列车的位置、速度等导航信息。传统的列车定位系统主要是通过轨旁设备获得列车位置和其他控制信息,但是这种定位系统具有后期维护工作量大、维护成本高、不支持线路的动态交通配置变化等缺点^[1]。因此,利用列车车载多类型导航设备各自的技术优势,完成组合导航系统的构建,可以有效提高系统导航精度,从而保障列车运行控制系统的可靠性和安全性。

卫星导航是目前最为常见的导航定位手段,在列车行驶过程中可以长时间提供高精度位置和速度等导航信息。但是卫星导航也存在数据更新率慢,易受干扰等缺点,尤其在隧道、山区、森林等地理环境复杂的地区,卫星信号经常会出现因为卫星数量、卫星几何形态分布、自然环境等因素造成的信号丢失、信号质量变差,从而导致卫星导航功能丧失或定位精度较差。因此,单

一的使用卫星导航对于列车运行控制会造成安全隐患。捷联惯性导航系统是一种自主式导航系统,其工作时不依靠任何外部信源,并可以为载体平台提供位置、速度、航向、姿态等全参量高数据率(200 Hz)的导航信息,是一种非常可靠的导航定位手段。但是惯性导航存在着定位误差随时间积累而发散的问题,长时间自主工作后的定位精度难以独立完成高精度定位(米级)的需求。综上所述,捷联惯性导航和卫星导航在功能特性上具有很强的互补性,将两种系统组合构建列车的组合导航系统,既可以解决短时间内卫星导航失效的问题,又可以将卫星导航信息用于校正捷联惯性导航系统的累积误差^[2-5]。

本文提出的组合导航算法针对列车短时丢失卫导情况的应用场景而设计,算法简单易实现,组合导航定位精度高,通过在列车上实际使用验证了算法的有效性。

2 惯导/卫导组合导航系统结构

惯导/卫导组合导航通常利用最优估计的

收稿日期 2023-12-05 收修改稿日期 2024-02-23

作者简介 程远(1982—),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为光电与导航系统技术。

Kalman 滤波算法进行融合,融合估计后可以得到惯导系统误差和卫导系统误差,再通过实时反馈闭环误差值,来提高惯导/卫导组合导航系统的精度。按照组合模式通常可以分为松组合、紧组合。松组合通常利用惯导和卫导的位置信息差和速度信息差作为观测量。紧组合则利用卫导原始观测值和惯导预测的相关值之差作为观测量。紧组合模式相较于松组合模式融合层次更深,可以利用惯导信息辅助估计电离层、对流层、模糊度等卫导误差项^[6-8]。在实际应用中松组合结构简单、精度高,且易于实现,应用最为广泛。本文对松组合算法做了适应性的调整,更加适合列车实际的应用场景。

松组合导航系统结构如图 1 所示,惯导和卫导独立进行工作,分别输出各自的导航信息。用惯导的位置信息与卫导的位置信息的差值作为滤波器的量测输入,通过滤波器估计的各项误差值实时修正惯导导航结果,从而输出最终的组合导航结果。当卫导有效时,组合导航结果的定位信息跟随卫导的定位信息,速度、航姿等其他导航信息采用惯导实时修正后的结果。当卫导无效或精度较差时,滤波器估计的误差信息会闭环至惯导,提高惯导在自主导航状态下的导航精度,此时组合导航结果为惯导自主导航的结果^[9,10]。

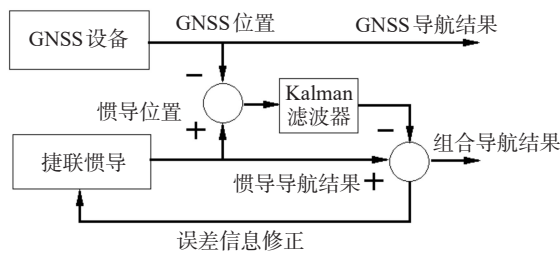


图 1 惯导/卫导松组合导航系统结构框图

Fig. 1 Schematic diagram of SINS/GNSS loose integrated navigation system

3 Kalman 滤波器算法设计

3.1 Kalman 滤波误差状态微分方程

滤波模型采用捷联惯导系统误差方程,误差方程组如下:

1) 姿态误差方程

$$\dot{\phi}^i = \delta\omega_{ie}^i + \delta\omega_{et}^i - (\omega_{ie}^i + \omega_{et}^i) \times \phi^i + C_b^p \varepsilon^b \quad (1)$$

式中, $\delta\omega_{ie}^i$ 、 ω_{ie}^i 分别为地球系相对于惯性系的角速度在导航系里的投影和误差; $\delta\omega_{et}^i$ 、 ω_{et}^i 分别为导航系相对于地球系的角速度在导航系里的投影和误差; C_b^p 为载体系到地理系的转移矩阵; ε^b 为陀螺常值零偏矢量。

2) 速度误差方程

$$\delta\dot{V}^i = \delta f^i - (2\delta\omega_{ie}^i + \delta\omega_{et}^i) \times V^i + \delta g^i - (2\omega_{ie}^i + \omega_{et}^i) \times \delta V^i \quad (2)$$

式中, δf^i 为加速度计测量误差矢量; δV^i 为速度误差矢量; δg^i 为加速度计测量误差在导航系的投影。

3) 位置误差方程

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{L} \\ \delta\dot{\lambda} \\ \delta\dot{h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta V_N}{R_M + h} \\ \frac{\delta V_E}{R_N + h} \sec L + \frac{V_E \sec L}{R_N + h} \cdot \tan L \cdot \delta L \\ \delta V_U \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, δV_E 、 δV_N 、 V_U 为东、北、垂速误差; R_M 、 R_N 为子午圈和卯酉圈的曲率半径; L 为所在纬度。

Kalman 滤波器系统方程如下:

$$\delta\dot{x} = F\delta x + Gw \quad (4)$$

为了在卫导丢失时,尽可能长的时间内保持惯导自主定位精度,需要在惯导/卫导组合导航时实时估计惯导主要参量误差。故将捷联惯导系统的位置误差、姿态误差、速度误差、陀螺漂移、加速度计零偏作为状态变量 $X(t)$, 惯导与卫导的位置误差作为观测量,实时估计捷联惯导系统的位置误差、速度误差、姿态误差和惯性器件误差。 $X(t)$ 的表达式为

$$X(t) = [\delta\lambda \ \delta L \ \delta h \ \delta\varphi_x \ \delta\varphi_y \ \delta\varphi_z \ \delta v_e \ \delta v_n \ \delta v_u \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \Delta_x \ \Delta_y \ \Delta_z]^T$$

式(4)中, F 矩阵为动态系数矩阵,包含了式(1)、(2)、(3)中捷联惯导系统的位置、姿态、速度以及惯性器件的误差模型。 G 矩阵为误差分布矩阵,表达式为

$$G = [\sigma_{r,1 \times 3}, \sigma_{\theta,1 \times 3}, \sigma_{v,1 \times 3}, \sigma_{\omega,1 \times 3}, \sigma_{f,1 \times 3}]^T \quad (5)$$

式(4)中 w 矩阵为单位方差高斯噪声。

3.2 离散化 Kalman 滤波方程

将上述 Kalman 滤波方程离散化,可以得到

离散 Kalman 滤波方程组:

$$\begin{cases} \mathbf{X}_{k+1} = \Phi_{k+1,k} \mathbf{X}_k + \Gamma_k \mathbf{W}_k \\ \mathbf{Z}_{k+1} = \mathbf{H}_{k+1} \mathbf{X}_{k+1} + \mathbf{V}_{k+1} \end{cases} \quad (6)$$

由于捷联惯导系统数据处理间隔很小,状态转换矩阵 $\Phi_{k+1,k}$ 可以简化为^[10]

$$\Phi_{k+1,k} \approx \mathbf{I} + \mathbf{F} \cdot \Delta t \quad (7)$$

其中, Γ_k 为系统噪声驱动矩阵, \mathbf{W}_k 为系统噪声序列, \mathbf{V}_{k+1} 为观测噪声序列。 \mathbf{W} 、 \mathbf{V} 满足 $\mathbf{E}(\mathbf{W}_i) = 0$, $\mathbf{E}(\mathbf{W}_i \mathbf{W}_j^T) = \mathbf{Q}_i \delta_{ij}$, $\mathbf{E}(\mathbf{V}_i) = 0$, $\mathbf{E}(\mathbf{V}_i \mathbf{V}_j^T) = \mathbf{R}_i \delta_{ij}$, $\mathbf{E}(\mathbf{W}_i \mathbf{V}_j^T) = 0$, \mathbf{Q}_i 为 \mathbf{W}_i 的对称非负定方差矩阵, \mathbf{R}_i 为 \mathbf{V}_i 的对称正定方差矩阵, δ_{ij} 为 Kronecker- δ 函数, i, j 为任意时刻。

对于列车来说垂直方向上的位移观测量可以引入高度传感器的高度信息,可以取观测量为

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \delta\lambda \\ \delta L \\ \delta H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{\text{ins}} - \lambda_{\text{gnss}} \\ L_{\text{ins}} - L_{\text{gnss}} \\ H_{\text{高度传感器}} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $\delta\lambda$ 、 δL 为纬度、经度误差; δH 为高度误差。

如不具备高度传感器,则该项可以不作为观测量。因此, Kalman 滤波量测矩阵 \mathbf{H} 表达式为

$$\mathbf{H} = [\mathbf{I}_{3 \times 3}, \mathbf{0}_{3 \times 12}]$$

4 实车验证情况

2023 年 3 月, 在新疆精伊线 SG5 标段与铁路线路并行路段的运行列车上对惯导/卫导组合导航的性能进行了实际验证, 列车的运行时速在 60 km/h 左右。由于此路段隧道、山岭、树木较多, 列车行驶过程中会经常出现卫导丢失情况, 可以有效验证惯导/卫导组合导航系统在卫导有效、无效以及卫导有效/无效状态反复切换下的工作情况。惯导设备选用的是中船星惯科技(武汉)有限公司的 TYF71A 光纤惯导, 该惯导选用 0.02 °/h 等级的光纤陀螺和 100 μg 等级的加速度计, 具有体积小、重量轻等优点, 比较适合用于列车动态检测和导航功能。

图 2 所示箭头标记为实际行驶路线, 全程约 80 km, 列车自北向南行驶。图 3 为惯导/卫导组合导航位置信息曲线。其中, 细线为卫导有效时, 惯导/卫导组合导航输出的行驶路线, 粗线为

卫导无效时, 惯导纯惯性自主导航输出的行驶路线。可以看出, 整个路线轨迹总体连续平滑, 与实际运行线路重合度高。

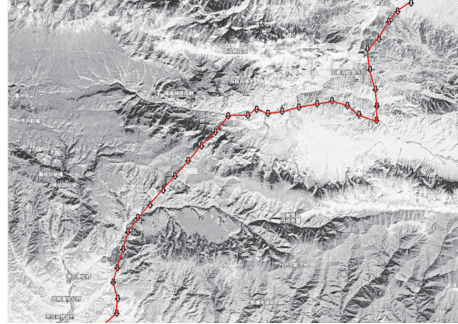


图 2 列车行驶线路地理示意图

Fig. 2 Geography schematic of train travel routes

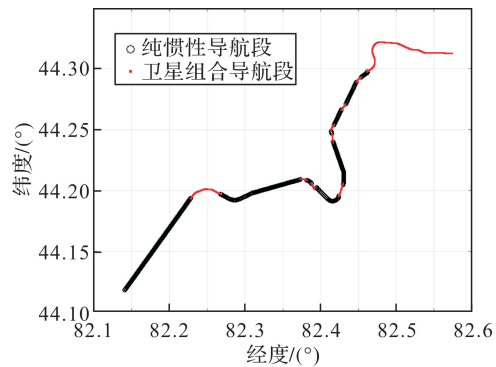


图 3 惯导/卫导组合导航位置信息

Fig. 3 SINS/GNSS integrated navigation positioning information

图 4~8 为惯导/卫导组合导航位置信息曲线的 5 段局部放大图, 可以看出, 当卫导无效时, 惯导工作在自主导航状态下, 经过一段时间后, 会积累一定的位置误差。待卫导恢复有效后, 惯导跟随卫导位置信息进入组合导航模式。列车在整段线路行驶过程中, 卫导无效时长最长约为 12 min, 惯导自主导航定位误差最大值为 268 m。

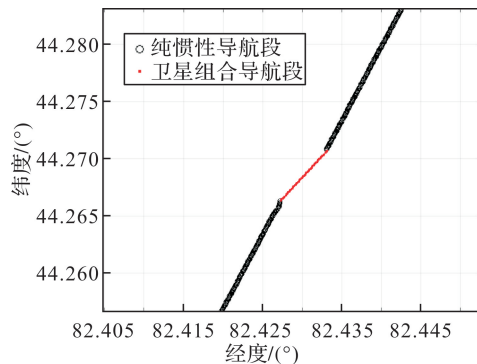


图 4 第一段局部放大图

Fig. 4 Part 1 enlarged image

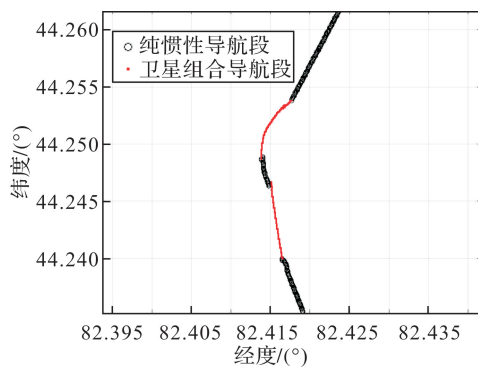


图5 第二段局部放大图

Fig. 5 Part 2 enlarged image

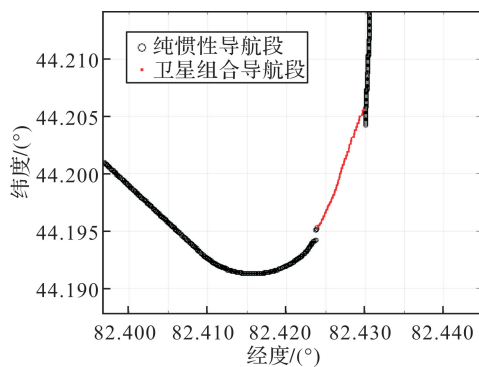


图6 第三段局部放大图

Fig. 6 Part 3 enlarged image

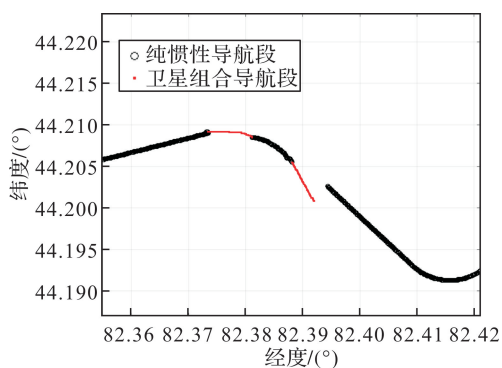


图7 第四段局部放大图

Fig. 7 Part 4 enlarged image

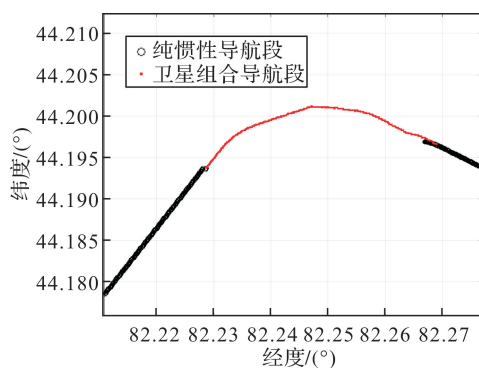


图8 第五段局部放大图

Fig. 8 Part 5 enlarged image

5 结论

本文提出的列车车载捷联惯导/卫导组合导航系统方案,算法简单易实现,通过选择更高精度等级的捷联惯导系统,可以进一步提高系统自

主定位精度。经过实车验证结果表明,该系统能够在复杂地理环境中实现高精度的列车定位,同时还可以持续输出列车的速度、姿态等全参量导航信息,可以有效地保障列车运行控制系统的安全运行,具有相当的实际应用价值。

参考文献

- [1] 赵静, 陆遥, 梁丁文. 基于SINS/GPS/OD组合导航的列车定位方法的研究[J]. 科技信息, 2012, (29): 83-84.
ZHAO Jing, LU Yao, LIANG Ding-wen. Research of the train positioning technologies based on SINS/GPS/OD integrated navigation[J]. Science & Technology Information, 2012, (29): 83-84.
- [2] 陈光武, 刘昊, 魏宗寿, 等. 基于RTK-GPS/INS的列车组合定位方法研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(10): 67-75.
CHEN Guang-wu, LIU Hao, WEI Zong-shou, *et al.* Research on RTK-GPS/INS-based train combination positioning method[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(10): 67-75.
- [3] 刘江, 王长林. 基于GPS/INS的列车组合定位关键技术分析[J]. 铁道计算机应用, 2013, 22(8): 5-7.
LIU Jiang, WANG Chang-lin. Analysis of key technology of train integrated positioning based on GPS/INS [J]. Railway Computer Application, 2013, 22(8): 5-7.
- [4] 钟晓春, 张海涛, 姜向东, 等. 基于SINS/GPS的高速列车组合导航系统[J]. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 580-584.
ZHONG Xiao-chun, ZHANG Hai-tao, JIANG Xiang-dong, *et al.* SINS/GPS integrated navigation system for High-

- Speed trains[J]. Journal of Southwest JiaoTong University, 2010, 45(4): 580-584.
- [5] 程朴, 覃慧玲, 杨龙河. 基于自适应滤波的天文惯性组合导航技术[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(3): 92-99.
CHENG Pu, QIN Hui-ling, YANG Long-he. Application of CNS-INS integrated navigation technology based on adaptive filtering[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2023, 21(3): 92-99.
- [6] 王世达. GNSS/INS组合导航模型研究与性能分析[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
WANG Shi-da. Models research and performance analysis of GNSS/INS integrated navigation[D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2019.
- [7] 刘超慧. 嵌入式GPS/SINS组合导航技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
LIU Chao-hui. Research on technology of the embeded GPS/SINS integrated navigation system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [8] 刘丹, 王剑, 姜维, 等. 列车组合定位系统定位精度评估方法研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(11): 79-87.
LIU Dan, WANG Jian, JIANG Wei, *et al.* Research on positioning accuracy evaluation method for integrated train positioning system[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(11): 79-87.
- [9] 秦周. 基于不同等级惯性器件的INS与GNSS组合导航研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2016.
QING Zhou. Research of different grade INS and GNSS integrated navigation[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2016.
- [10] 武晓燕. 基于光纤陀螺的捷联惯导与卫星组合导航算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
WU Xiao-yan. Algorithm research on SINS/GNSS integrated navigation system based on FOG [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [11] 谢木生. 卡尔曼滤波在INS/GPS组合导航中的应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
XIE Mu-sheng. The study on application of Kalman in INS/GPS integrated navigation [D]. Changsha: Central South University, 2013.

Algorithm of Train Positioning Based on SINS/GNSS Loose Integrated Navigation

CHENG Yuan¹ LI Ya-cong² YANG Yu-kong¹

(¹ Huazhong Institute of Electro-Optics – Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China;

² Fiberhome Communication Technology Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract Compared with a single train positioning method, integrated navigation technology can effectively improve the performance of train positioning systems. This paper introduces the basic principle of the integrated navigation technology of strapdown inertial navigation system (SINS)/satellite navigation (GNSS) for trains, and proposes a practical Kalman filtering algorithm for loose integrated of inertial navigation and satellite navigation. By utilizing the technical advantages of inertial navigation and satellite navigation, it overcomes the adverse effects of geographical and environmental factors on train travel routes and continuously provides accurate positioning information for trains. By analyzing the actual travel data of complex routes, the accuracy of integrated navigation positioning meets the requirements. The practicability and effectiveness of the integrated navigation algorithm are verified, which ensures the safety of train operation and transportation efficiency.

Key words train positioning; Kalman filtering; loose integrated navigation; GNSS; SINS