

基于运动约束抑制惯导误差的高速列车 隧道内定位方法

孙振乾, 唐康华, 吴美平, 郭妍, 王雪莹

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 高速列车在隧道内卫星信号缺失, 仅依靠由微机电(micro-electromechanical systems, MEMS)器件构成的惯性导航系统(inertial navigation system, INS)误差较大。针对这一问题, 在不增加额外传感器的情况下, 提出一种利用考虑微惯性测量单元(micro inertial measurement unit, MIMU)在列车上安装角的运动约束来抑制 INS 误差(consider the installation angles for motion constraints to suppress INS error, CIAMC-INS)的方法。该方法在考虑 MIMU 安装角的基础上建立运动约束模型; 分析转弯对运动约束模型的影响, 得到运动约束使用条件; 在卫星信号良好且满足运动约束使用条件时估计安装角; 将估计得到的安装角应用于运动约束抑制纯惯性导航系统(pure inertial navigation system, P-INS)误差, 以提高列车隧道内导航精度。在真实隧道环境和人为断开卫星信号情况下均进行了车载导航试验。试验结果表明, 采用 CIAMC-INS 方法列车在隧道内的定位精度得到明显提高, 相比 P-INS 和传统的不考虑安装角的运动约束抑制惯导(traditional motion constraints suppress INS error, TMC-INS)方法, 水平定位精度分别提高 85% 和 42% 以上, 验证了该方法的有效性。

关键词: 列车定位; 隧道; 运动约束; 安装角; 扩展卡尔曼滤波

中图分类号: U270.38

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2021)03-0624-09

随着中国高速铁路网的布局更加完善, 在网运行的列车数量越来越多, 发车频次越来越高, 这就需要给运行控制系统提供更加精准的位置、速度及姿态信息, 以实现列车的控制、调度与监测^[1]。列车运行过程中会出现 GNSS 信号遮挡、城市及山间峡谷可观测的卫星少, 特别是在长隧道内卫星信号长时间缺失, 对定位系统是个很大挑战^[3]。

传统列车定位系统采用测速测距方式, 定位精度差, 提供的列车信息有限, 系统维护复杂^[4], 设备成本高, 且难以解决长隧道内的定位问题, 已无法满足高速列车定位需求。随着 MEMS 惯性器件的精度越来越高, 可靠性和成本优势让其在车载领域应用广泛^[5]。GNSS 星基增强技术将卫星定位精度提高到亚米级^[6]。INS 和 GNSS 良好的互补性, 使其成为高铁定位的核心, 但在长隧道内, GNSS 信号缺

失, 仅依赖 MIMU 定位精度难以保证^[7-9]。

近年来, 针对隧道内无 GNSS 信号时列车定位研究成为热点。目前主要有 2 种方式: ①在系统中加入额外传感器, 主要有激光雷达、多普勒测速仪、气压高度计、里程计、相机、无线定位、地图匹配、RFID 等^[4], 与 INS 组合导航实现列车定位。但是, 加多余传感器会提高系统的成本和实现难度, 增加维修保养负担。②利用轨道或列车运动信息约束抑制惯导误差发散保证列车在隧道内的定位精度。王鹏飞等提出了基于列车运动模型和轨道约束的方法^[10], 在 GNSS 缺失 40 s 时水平定位误差达 21.2 m。梁飞采用列车运动模型和陀螺仪组合的方法对卫星盲区的列车定位^[11], 卫星信号缺失 10 s 后, 水平误差高达 31 m。杨菊花等人采用列车运动约束来抑制惯导的误差^[12], 明显提高了列车导航精

收稿日期: 2020-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61973312)与国防科技大学智能科学学院青年教师创新研究

项目(ZN2019-16)资助

作者简介: 孙振乾(1989—), 国防科技大学博士研究生, 主要从事惯性导航及组合导航研究。

度。但在运动约束模型中没有考虑安装角影响,50 s内水平定位误差为 12.6 m,水平速度误差约为 0.71 m/s,精度有待进一步提升。在毫米级精度要求的轨道检测领域,陈起金等人设计了基于高精度激光 INS/GNSS 组合导航的轨检小车^[1],使用运动约束提高系统在 GNSS 信号受干扰时的精度。由于没有考虑安装角,对系统精度的提升有限。张全等人对上述系统进行了改进,在运动约束模型中考虑了安装角^[13],但是没有提到怎么得到安装角。朱峰等人在无 GNSS 信号时,通过事后数据处理利用相似旋转的方法得到安装角^[14],但安装角并未被用于运动约束。准确得到 MIMU 的安装角,是提高运动约束效果的关键^[9,15]。

高速列车在长隧道内 GNSS 信号缺失且其他可用信息少,现有方法定位精度低,隧道内建立精确的电子地图和布设高精度参考点都很难实现。针对此,在不增加额外传感器的情况下,本文提出 CIAMC-INS 方法。由于安装角的存在,使得相对车体 m 系的车辆运动约束假设在惯导系统的 b 系中不再成立。该方法先首在考虑 MIMU 安装角的基础上建立了运动约束模型;其次通过分析列车转弯对运动约束模型的影响,得到运动约束的使用条件;然后在 GNSS 信号良好且满足运动约束使用条件时,在线估计 MIMU 的安装角。最后在 GNSS 缺失的隧道内,将估计的安装角用于运动约束辅助 INS 定位。实验结果表明,考虑安装角的运动约束方法对纯惯导误差的抑制作用更明显,列车在隧道内的定位精度得到明显提高,验证了方法的有效性。

1 车辆运动学约束

1.1 列车运动约束关系

定义列车车体坐标系为 m 系,原点为列车车厢中心, x, y 轴分别指向列车的右向、前向, z 轴与 x, y 轴构成右手直角坐标系。定义 MIMU 坐标系为 b 系,安装过程中 b 系的 x, y, z 轴尽量和 m 系的 x, y, z 轴朝向保持一致,保证安装角为小角度。

高速铁路轨道具有良好平顺性^[16],可忽略车体行进中侧滑和跳跃, m 系中 v_x^m 和 v_z^m 的速度为零,忽略 MIMU 安装杆臂的影响, b 系和 m 系速度关系为

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} C_b^m C_n^b v^n = \begin{bmatrix} v_x^m \\ v_z^m \end{bmatrix} \approx 0 \quad (1)$$

m 系到 b 系变换矩阵 C_b^m 由安装角 $a = [a_\theta \ a_y \ a_\psi]^T$ 构成。列车在非转弯情况下, v_x^m 和 v_z^m 的噪声可视为零均值高斯白噪声。

根据文献[17]中的结论,横滚安装角对运动约束没有影响。一旦 MIMU 固定在列车上,安装角误差可以视为小角度随机常数。不考虑 δa_y 的影响,将 δa_θ 和 δa_ψ 扩张成三维向量形式

$$\delta a = [\delta a_\theta \ 0 \ \delta a_\psi]^T$$

估计得到的变换矩阵 \tilde{C}_b^m 为

$$\tilde{C}_b^m = (I - [\delta a \times]) C_b^m = C_b^m - [\delta a \times] C_b^m \quad (2)$$

安装角余弦矩阵误差可表示为

$$\delta C_b^m = -[\delta a \times] C_b^m \quad (3)$$

1.2 列车转弯对运动约束的影响

高铁轨道的曲线线路一般由直线、缓和曲线、圆曲线组成^[16],如图 1 所示。在车体转弯的过程中,由于 MIMU 安装位置与载车旋转中心存在杆臂,在 MIMU 安装处存在杆臂速度^[18-19]。

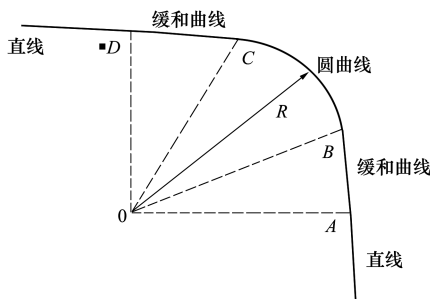


图 1 轨道曲线线路平面图

列车在前向牵引力、轨道、转向架、车轮等机构的配合下实现转弯^[20],允许车箱和转向架之间有一定程度旋转^[9],转向架的实物如图 2 所示。

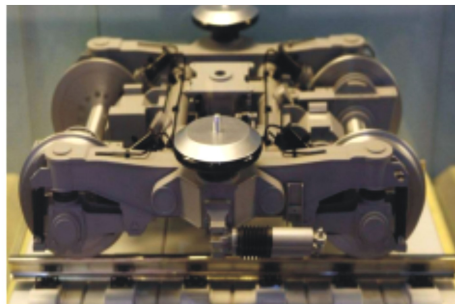


图 2 转向架实物图

为了简化分析,选择图 1 中的 S 段,也即列车从 B 点到 C 点左转弯,转弯模型如图 3 所示。转向架行驶在半径为 R 的列车轨道上,且行驶方向与轨道近

似相切。 P_1 和 P_2 为前后转向架的插销中点, 车厢在通过两点的割线上。

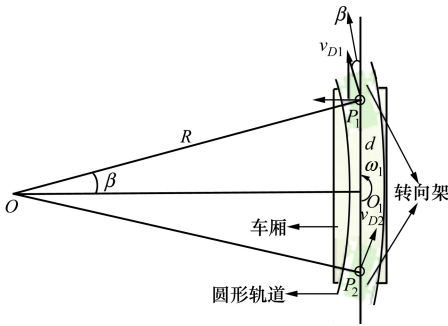


图 3 列车转弯几何分析

因此, 列车转向架的速度方向和车厢轴线之间存在偏差角 β ^[9], 由几何关系可得

$$\beta = \arcsin \frac{d}{2R} \quad (4)$$

式中, d 为 P_1 和 P_2 点之间的距离。

转弯过程中, 车厢绕 O_1 点旋转, 旋转角速度为

$$\omega_1 = \frac{v_{D1} \sin \beta}{\left(\frac{d}{2}\right)} = \frac{v_{D1}}{R} \quad (5)$$

式中, v_{D1} 为前转向架插销的速度。

侧向速度为零的假设在转向架坐标系中的中心点 P_1 处依然成立, 由于车厢绕 O_1 的旋转, 在 m 系中此假设不在成立。设 MIMU 安装在 P_1 点, 此时, MIMU 在 m 系中的速度为

$$\mathbf{v}_D^m = \begin{bmatrix} -v_{D1} \sin \beta & v_{D1} \cos \beta & 0 \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} -\frac{v_{D1} d}{2R} & \frac{v_{D1} \sqrt{4R^2 - d^2}}{2R} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

设列车速度为 350 km/h, 2 个转向架中心点距离为 20 m, 转弯半径为 5 000 m^[16], 由于转弯引起的侧向速度为

$$v_{D,x}^m = -\frac{v_{D1} d}{2R} \approx -0.19 \text{ m/s} \quad (7)$$

这将严重影响卡尔曼滤波器状态估计精度, 甚至导致滤波器发散。

将(5)式带入(6)式可得

$$\mathbf{v}_D^m = \begin{bmatrix} -\frac{\omega_z d}{2} & \frac{\omega_z \sqrt{4R^2 - d^2}}{2} & 0 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

式中, ω_z 为 z 轴陀螺的输出。

在实际行驶过程中, 列车的机动转弯将更加复

杂, 前后转向架的转弯角速度和车厢的旋转中心均不固定。很难建立精确的侧向速度补偿模型。但(8)式仍然为判断侧向速度为零的假设是否成立提供了理论依据。

1.3 运动学约束的阈值

为了减小水平转向机动对运动约束的不利影响, 以车体天向陀螺输出的转弯角速率为判断否可使用运动约束的条件, 表述为

$$|\omega_z - \omega_{z_bias}| < \omega_{z_threshold} \quad (9)$$

式中: ω_z 为 MIMU 的 z 轴陀螺输出; ω_{z_bias} 为 z 轴陀螺的零偏; $\omega_{z_threshold}$ 为设定的判定阈值, 高铁运行比较平稳且转弯少, 可以根据实测数据设定阈值。实验采集的列车运行过程中 z 轴陀螺数据如图 4 所示。

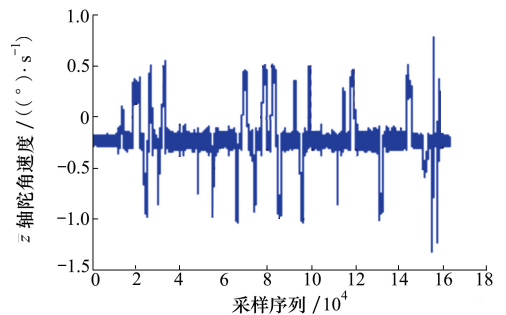


图 4 z 轴陀螺测量数据

通过将非转弯阶段的数据平均值 $\bar{\omega}_z$, 并取图 4 中平稳运行阶段数据带适当的上下边缘值 ω_{z_up} 和 ω_{z_down} , 可以得到阈值为

$$\omega_{z_threshold} = \eta \max(|\omega_{z_up} - \bar{\omega}_z|, |\bar{\omega}_z - \omega_{z_down}|) \quad (10)$$

式中, η 为阈值的调节系数, 可视运动状况及精度要求适当选取。

2 组合导航模型及算法流程

本节根据对 GNSS 信号是否可用和列车运行状态的判断, 设计相应的滤波模型, 并给出算法流程。

2.1 MIMU/GNSS 松组合模型

当列车转向且 GNSS 信号良好时, 运动约束不可用。列车定位采用 15 维 MIMU/GNSS 松组合 EKF 滤波器, 依据惯导误差传播模型, 忽略安装杆臂的影响, 系统的 15 维状态误差向量定义为

$$\mathbf{X}_1 =$$

$$\begin{bmatrix} ((\varphi^n)^T & (\delta \mathbf{v}^n)^T & (\delta \mathbf{P}^n)^T & (\delta \boldsymbol{\varepsilon}^b)^T & (\delta \nabla^b)^T \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}^n$ 为姿态误差; $\delta \mathbf{v}^n$ 为速度误差; $\delta \mathbf{P}^n$ 为位置误差; $\delta \boldsymbol{\varepsilon}^b$ 为陀螺在 b 系中的零漂误差; $\delta \nabla^b$ 为加速度计在 b 系中的零偏误差。

系统状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_1 = \mathbf{F}_{\text{INS}} \mathbf{X}_1 + \mathbf{G}_1 \mathbf{W}_1 \quad (12)$$

式中: \mathbf{F}_{INS} 为系统状态转移矩阵; \mathbf{G}_1 为噪声转移矩阵; \mathbf{W}_1 为过程噪声向量。

$$\mathbf{G}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{C}_b^n \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{W}_1 = [\mathbf{W}_{gx}^b \quad \mathbf{W}_{gy}^b \quad \mathbf{W}_{gz}^b \quad \mathbf{W}_{ax}^b \quad \mathbf{W}_{ay}^b \quad \mathbf{W}_{az}^b]^T \quad (14)$$

式中: \mathbf{C}_b^n 为 b 系到 n 系的变换矩阵; \mathbf{W}_{gi}^b 和 \mathbf{W}_{gi}^a 分别为 $i(i = x, y, z)$ 轴的陀螺和加速度计噪声。

GNSS/MIMU 组合的观测模型表示为

$$\mathbf{Z}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{\text{INS}}^n - \mathbf{v}_{\text{GNSS}}^n \\ \mathbf{p}_{\text{INS}}^n - \mathbf{p}_{\text{GNSS}}^n \end{bmatrix} = \mathbf{H}_1 \mathbf{X}_1 + \mathbf{V}_{\text{GNSS}} \quad (15)$$

式中: \mathbf{Z}_1 为量测矩阵; $\mathbf{v}_{\text{INS}}^n$ 和 $\mathbf{p}_{\text{INS}}^n$ 为惯导系统在 n 系中的速度和位置; $\mathbf{v}_{\text{GNSS}}^n$ 和 $\mathbf{p}_{\text{GNSS}}^n$ 为接收机输出的在 n 系中的速度和位置; \mathbf{H}_1 为观测矩阵; \mathbf{V}_{GNSS} 为 GNSS 观测噪声。其中

$$\mathbf{H}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}^T \quad (16)$$

2.2 MIMU/GNSS/运动约束组合模型

当运动约束和 GNSS 均可用时,可构建滤波器在线估计 MIMU 相对车体的安装角。将俯仰角安装角误差 δa_θ 和航向角安装角误差 δa_ψ 也扩充为误差状态量,17 维状态变量为

$$\mathbf{X}_2 = [(\mathbf{X}_1)^T \quad (\mathbf{X}_a)^T]^T \quad (17)$$

式中, $\mathbf{X}_a = [\delta a_\theta \quad \delta a_\psi]^T$, 安装角误差 δa_θ 和 δa_ψ 均视为随机常值。

$$\delta \dot{a}_\theta = 0, \delta \dot{a}_\psi = 0 \quad (18)$$

系统状态方程为

$$\dot{\mathbf{X}}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{\text{INS}} & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{F}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{X}_1 \\ \mathbf{X}_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{G}_1 & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{G}_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_1 \\ \mathbf{W}_a \end{bmatrix} \quad (19)$$

式中, $\mathbf{F}_a = \mathbf{0}_{2 \times 2}$, $\mathbf{G}_a = \mathbf{I}_{2 \times 2}$, \mathbf{W}_a 为安装角误差噪声。

结合(3)式,(1)式的全微分为

$$\begin{bmatrix} \delta v_x^m \\ \delta v_z^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot$$

$$(\mathbf{C}_b^m (\mathbf{C}_n^b \boldsymbol{\varphi}^n \times \mathbf{v}^n + \mathbf{C}_n^b \delta \mathbf{v}^n) - \delta \mathbf{a} \times \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b \mathbf{v}^n) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (-\mathbf{C}_n^m (\mathbf{v}^n \times) \boldsymbol{\varphi}^n + \mathbf{C}_n^m \delta \mathbf{v}^n +$$

$$((\mathbf{C}_n^m \mathbf{v}^n) \times) \delta \mathbf{a}) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{M}_1 \boldsymbol{\varphi}^n + \mathbf{M}_2 \delta \mathbf{v}^n + \mathbf{M}_3 \delta \mathbf{a}) \quad (20)$$

式中: $\mathbf{C}_n^m = \mathbf{C}_b^m \mathbf{C}_n^b$, $\mathbf{M}_1 = -\mathbf{C}_n^m (\mathbf{v}^n \times)$, $\mathbf{M}_2 = \mathbf{C}_n^m$, $\mathbf{M}_3 = (\mathbf{C}_n^m \mathbf{v}^n) \times$ 。

由列车的运动约束构成的观测方程为

$$\mathbf{Z}_2 = \begin{bmatrix} \delta v_x^m \\ \delta v_z^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x^m - 0 \\ v_z^m - 0 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_2 \mathbf{X}_2 + \mathbf{V}_v \quad (21)$$

式中: v_x^m 和 v_z^m 为 MIMU 在 m 系中的速度; \mathbf{V}_v 为噪声矩阵; 观测方程 \mathbf{H}_2 为

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1(1, \times) & \mathbf{M}_2(1, \times) & \mathbf{0}_{2 \times 9} & 0 & \mathbf{M}_3(1, 3) \\ \mathbf{M}_1(3, \times) & \mathbf{M}_2(3, \times) & \mathbf{0}_{2 \times 9} & \mathbf{M}_3(3, 1) & 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

式中, $\mathbf{M}_i(k, \times)$ 为矩阵 \mathbf{M}_i 的第 $k(k = 1, 2, 3)$ 行的所有元素。

GNSS 和运动约束的联合观测方程为

$$\mathbf{Z}'_2 = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{0}_{2 \times 2} \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} \mathbf{X}_2 + \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{\text{GNSS}} \\ \mathbf{V}_v \end{bmatrix} \quad (23)$$

令运动约束的观测频率为 1 Hz,且与 GNSS 观测数据同步。

2.3 MIMU/MC 组合模型

在铁路线路设计中,隧道内尽量避免设置曲线轨道,即便在特殊情况下设置曲线,曲线的长度会尽量小^[16]。因此,在隧道中若存在短时曲线转弯,可依靠纯惯性导航实现定位。在隧道中装误差角不再估计,系统的状态方程如(12)式所示。

将在隧道外已经估计得到的安装角作为已知常值带入(20)式,可得

$$\begin{bmatrix} \delta v_x^m \\ \delta v_z^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{C}_b^m (\mathbf{C}_n^b \boldsymbol{\varphi}^n \times \mathbf{v}^n + \mathbf{C}_n^b \delta \mathbf{v}^n) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (-\mathbf{C}_n^m (\mathbf{v}^n \times) \boldsymbol{\varphi}^n + \mathbf{C}_n^m \delta \mathbf{v}^n) =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} (\mathbf{M}_1 \boldsymbol{\varphi}^n + \mathbf{M}_2 \delta \mathbf{v}^n) \quad (24)$$

由运动约束提供的观测方程为

$$\mathbf{Z}_3 = \begin{bmatrix} \delta v_x^m \\ \delta v_z^m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x^m - 0 \\ v_z^m - 0 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_3 \mathbf{X}_1 + \mathbf{V}_v \quad (25)$$

(22)式改写为

$$H_3 = \begin{bmatrix} M_1(1, \times) & M_2(1, \times) & \mathbf{0}_{2 \times 9} \\ M_1(3, \times) & M_2(3, \times) & \mathbf{0}_{2 \times 9} \end{bmatrix} \quad (26)$$

2.4 定位算法的流程

根据列车运行状态和 GNSS 数据的观测环境,设计了 3 种滤波算法模,如图 5 所示。在 GNSS 信号良好且满足运动约束条件时,17 维 EKF1 使用 GNSS 和运动约束提供观测,估计各状态量,确定 MIMU 安装角。在无 GNSS 信号且满足运动约束条件时,15 维 EKF2 仅使用车辆运动学约束提供观测,安装角为 EKF1 的估计值。在 GNSS 信号良好但不满足运动约束条件时,15 维 EKF3 仅使用 GNSS 速度位置作为观测。当定位模式发生变化时,公共状态的估计值及其误差协方差阵从老算法直接传递给新算法,其他量不更新或者重置^[21]。

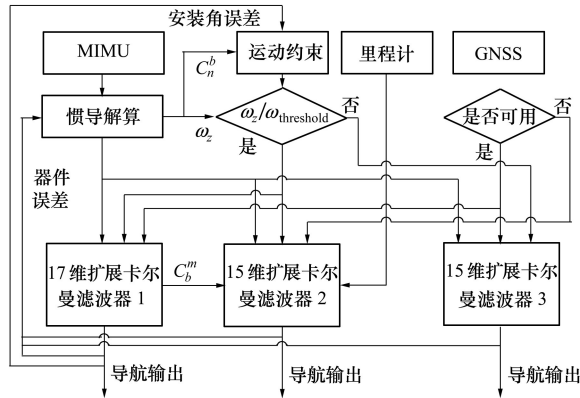


图 5 定位算法流程图

3 试验说明

高铁定位系统主要由 MIMU (50 Hz)、GNSS 接收机 (1 Hz)、Cortex-A9+FPGA 硬件平台等部件组成。组合导航模块固定在前转向架中心附近的车厢地板上,GNSS 接收机固定在组合导航模块正上方的车厢顶部,PC 机通过串口接收并存储试验数据,整个系统组成如图 6 所示。

陀螺的零偏不稳定性为 25°/hr,角度随机游走为 0.3/√hr,加速度计的零偏不稳定性为 0.2g,速度随机游走为 0.05 m/s/√hr。GNSS 模块采用三模 (GPS、北斗、伽利略) 和星基增强 (QZSS、GAGAN) 信号实现定位。在隧道出口处采用 RTK 技术获取的具有厘米级精度参考点。

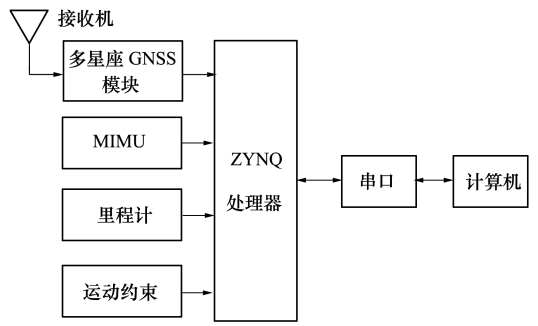


图 6 组合导航及数据采集系统

4 试验结果与分析

4.1 MIMU 安装角估计结果

列车运行在卫星信号良好且满足使用运动约束条件的情况下,对安装角估计,其他情况下,安装角保持原值不更新,安装角估计的结果如图 7 所示。

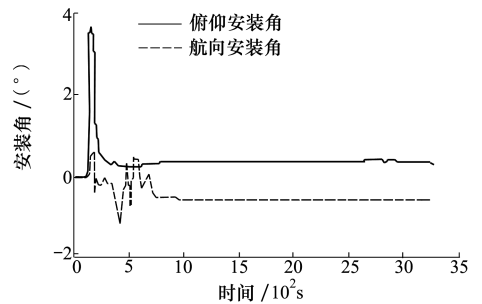


图 7 MIMU 安装角估计

在启动初期,加速度不稳定且速度很小,安装角估计值波动较大,安装角的可观测性与速度和加速度紧密相关。在进入稳定加速阶段,安装角的估计有较快收敛,在匀速行驶阶段安装角变化较小。相比俯仰安装角,航向安装角收敛速度较慢,与列车缺少航向机动及惯导航向角初始化的精度低有关,姿态失准角与安装角存在一定的耦合关系。

4.2 隧道出口处定位结果

列车进入隧道 GNSS 信号完全丢失,出隧道后接收机需要对 GNSS 信号再次捕获、跟踪,在隧道出口附近的参考点处,仍无法定位。在途中的隧道段分别采用 CIAMC-INS 算法、传统的不考虑安装角的运动约束抑制惯导 (traditional motion constraints suppress INS error, TMC-INS)、P-INS 3 种算法定位。以隧道入口最后一个 GNSS 定位点为参考原点,绘制列车运行轨迹,如图 8 至 9 所示。红色标识点为参

考点,图8为参考点11,图9中从左到右依次为参考点21,22,23,24。两隧道出口参考点处水平定位误差统计在表1和表2中。

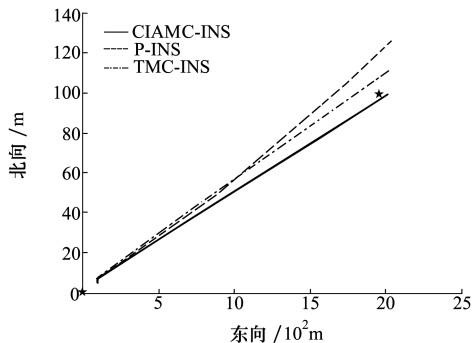


图8 1 412 m 隧道出口处定位轨迹

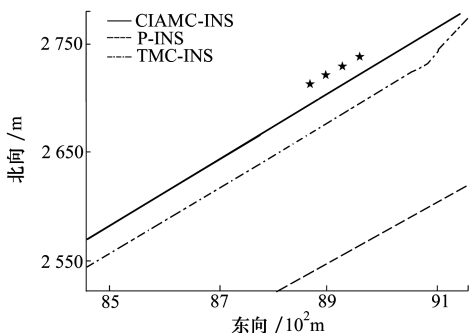


图9 9 063 m 隧道出口处定位轨迹

在1 412 m长隧道出口11号参考点处,3种定位算法的误差百分比分别为:0.94%,0.41%,0.24%。CIAMC-INS算法在隧道口参考点处水平定位误差分别比P-INS算法和TMC-INS算法减小了74.1%,38.1%。

表1 1 412 m 隧道出口参考点处水平定位误差统计

参考点	参考点到隧道入口距离/m	P-INS 误差/m	TMC-INS 误差/m	CIAMC-INS 误差/m
11	1 480.3	13.9	6.3	3.6

9 063 m长隧道中包含一段长约800 m的转弯隧道。3种定位算法的平均误差百分比分别为:3.23%,0.80%,0.47%。CIAMC-INS算法在隧道口参考点处水平定位误差分别比P-INS和TMC-INS减小了84.2%,36.3%。

从统计结果可知,列车在隧道段运动约束方法明显抑制了惯性导航系统定位误差的发散。考虑MIMU安装角影响的CIAMC-INS算法,可以进一步增强抑制作用,提高定位精度。

表2 9 063 m 隧道口参考点处水平定位误差统计

参考点	参考点到隧道入口距离/m	Pure-INS 误差/m	TMC-INS 误差/m	CIAMC-INS 误差/m
21	9 163.1	295.4	72.5	43.3
22	9 228.2	297.9	73.2	43.7
23	9 295.7	299.8	74.5	44.2
24	9 349.5	301.6	74.9	44.7

4.3 隧道内定位结果

因隧道内无定位基准,为进一步分析CIAMC-INS算法在隧道内的有效性,选择一段开阔地带,以平滑后的GNSS/MIMU组合导航定位结果为基准,将GNSS数据断开100 s,以模拟隧道内GNSS信号缺失环境。卫星断开时间内列车直线行驶9 515 m。图10和图11分别显示了3种算法的东向和北向位置误差,图12至13分别显示了3种算法的东向和北向速度误差,图14显示了3种算法的航向角误差。表3列出了3种算法的水平位置、水平速度、航向角的100 s误差及均方根误差。

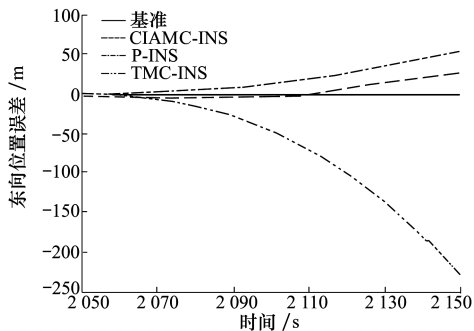


图10 东向位置误差

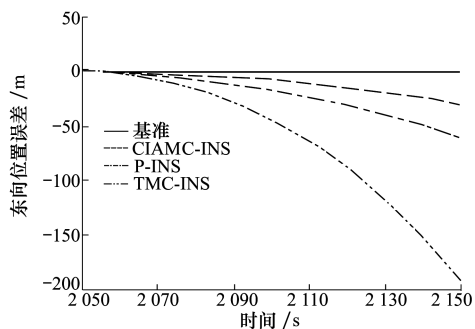


图11 北向位置误差

从表3的统计结果可知,CIAMC-INS算法相比P-INS和TMC-INS算法,水平位置误差、水平速度位置误差和航向角误差均大幅减小。

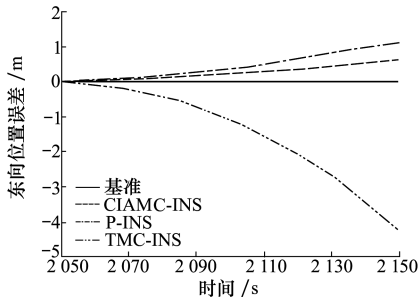


图 12 东向速度误差

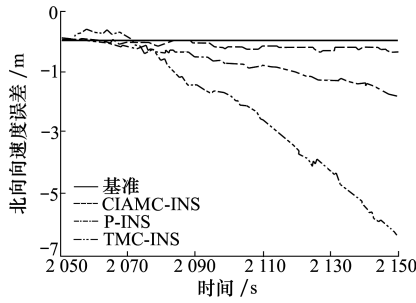


图 13 北向速度误差

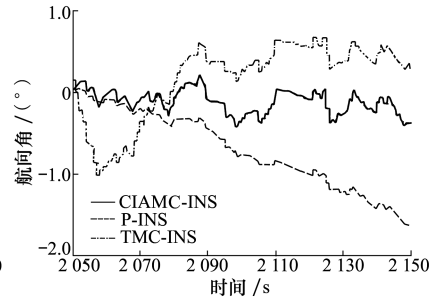


图 14 航向角误差

表 3 隧道口定位误差统计

算法		$\delta\lambda/m$	$\delta L/m$	$\delta V_e/(m \cdot s^{-1})$	$\delta V_n/(m \cdot s^{-1})$	$\delta y_{aw}/(^{\circ})$
P-INS	100 s 误差	-227.7	-190.4	-4.208	-6.358	1.651
	标准差	89.95	84.22	1.781	2.916	0.635
TMC-INS	100 s 误差	54.1	-60.1	1.173	-1.783	0.435
	标准差	20.83	21.40	0.545	0.739	0.174
CIAMC-INS	100 s 误差	24.8	-30.2	0.663	-0.419	0.352
	标准差	11.12	12.44	0.308	0.230	0.048

在卫星信号缺失时,2种运动约束算法对惯导系统的水平位置、水平速度及航向角的误差发散均有一定程度的抑制作用,CIAMC-INS算法对误差的抑制作用更明显。由于采用的惯性器件的精度较低,列车在隧道中缺少机动影响误差估计的效果,且没有约束列车前向速度等原因,CIAMC-INS算法不能完全消除惯导系统误差发散,仍然随时间存在一定程度的误差累积。列车车轮安装有轮式脉冲速度传感器,在将来的工作中可用于约束列车的前向速度,进一步提高定位的精度。

5 结 论

本文针对高速列车在隧道环境卫星信号缺失时定位精度差的问题,在不增加额外传感器的情况下,提出了考虑MIMU相对车体安装角的CIAMC-INS

算法。在沈阳至朝阳段进行了高铁车载试验,对比分析了采用P-INS,TMC-INS,CIAMC-INS3种算法定位结果。试验结果表明,在GNSS观测良好和满足运动约束条件时,MIMU在列车上的安装角可以通过扩展卡尔曼滤波器有效估计;在无GNSS信号的隧道段,CIAMC-INS算法对惯导水平位置误差、水平速度误差及航向角的误差抑制作用比TMC-INS算法更加明显。在不添加额外传感器的情况下,通过9063m长且中间有长约800m弯曲段的隧道,在无GNSS情况下行驶9163m的水平定位误差大概为43.3m。人为断开GNSS情况下,列车直线行驶9515m后,水平定位误差约为38.9m。试验结果表明,在包含转弯的隧道和直隧道内,定位精度均得到大幅提高,曲线隧道内精度稍差,验证了提出算法的有效性,具有重要的应用价值。

参考文献:

[1] CHEN Qijin, NIU Xiaoji, ZHANG Quan, et al. Railway track irregularity measuring by GNSS/INS integration[J], Navigation, 2015, 62(1): 83-93

[2] HAMID H A, NICHOLSON G L, ROBERTS C. Impact of train positioning inaccuracies on railway traffic management systems: framework development and impacts on TMS functions[J]. IET Intelligent Transport System, 2020, 14(6): 534-544

- [3] 刘射德,陈光武,王迪,等.一种基于GPS/DR/MM组合的列车定位方法研究[J].铁道科学与工程学报,2018,2(2):474-482
LIU Shede, CHEN Guangwu, WANG Di, et al. Train integrated positioning method based on GPS/DR/MM[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 2(2): 474-482 (in Chinese)
- [4] 刘江,蔡伯根,王剑.基于卫星导航系统的列车定位技术现状与发展[J].中南大学学报,2014,45:4033-4042
LIU Jiang, CAI Bogen, WANG Jian. Status and development of satellite navigation system based train positioning technology[J]. Journal of Central South University, 2014, 45: 4033-4042 (in Chinese)
- [5] OTEGUI Jon, BAHILLO Alfonso, LOPETEGI Iban, et al. Evaluation of experimental GNSS and 10-DOF MEMS IMU measurements for train positioning[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2019, 68(1): 269-279
- [6] 赵磊,王宏伟,宗干.北斗星基增强系统列车定位应用研究[J].铁道通信信号,2017,53(9):49-52
ZHAO Lei, WANG Hongwei, ZONG Gan. Research on the application of BDS satellite-based enhancement system for train positioning[J]. Railway Communication Signal, 2017, 53(9): 49-52 (in Chinese)
- [7] JIANG Wei, CHEN Sirui, CAI Baigen, et al. A multi-sensor positioning method-based train localization system for low density line[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2018, 53(99): 149-154
- [8] ZHU Kai, GUO Xuan, JIANG Changhui, et al. MIMU/odometer fusion with state constraints for vehicle positioning during beidou signal outage: testing and results[J]. Sensors, 2020, 20(8): 2302
- [9] REIMER C, MULLER F J, HINUBER E L V. INS/GNSS/odometer data fusion in railway applications[C]//DGON Inertial Sensors and Systems, 2016
- [10] 王鹏飞,李卫东,初宪武.基于轨道约束H8滤波的北斗辅助列车定位算法研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):262-268
WANG Pengfei, LI Weidong, CHU Xianwu. Study on Beidou-assisted train positioning algorithm based on track constrained H8 filtering[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(3): 262-268 (in Chinese)
- [11] 梁飞.一种基于运动模型和惯导陀螺仪的列车定位方法[J].控制与信息技术,2019(6):67-70
LIANG Fei. A positioning method based on train motion model and inertial gyroscope[J]. Control and Information Technology, 2019(6): 67-70 (in Chinese)
- [12] 杨菊花,于月,陈光武,等.基于列车运动约束的惯导误差抑制研究[J].铁道学报,2020,42(2):70-77
YANG Juhua, YU Yue, CHEN Guangwu, et al. Research on inertial navigation error suppression based on vehicle motion constraints[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(2): 70-77 (in Chinese)
- [13] ZHANG Quan, CHEN Qijin, NIU Xiaoji, et al. Requirement assessment of the relative spatial accuracy of a motion-constrained GNSS/INS in shortwave track irregularity measurement[J]. Sensors, 2019, 19(23): 52-56
- [14] ZHU Feng, ZHOU Wuxing, ZHANG Yuxi, et al. Attitude variometric approach using DGNSS/INS integration to detect deformation in railway track irregularity measuring[J]. Journal of Geodesy, 2019, 93(9): 1571-1587
- [15] SYED Zainab F, AGGARWAL Priyanka, NIU Xiaoji. Civilian vehicle navigation: required alignment of the inertial sensors for acceptable navigation accuracies[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 2008, 57(6): 3402-3412
- [16] 中国铁道第三勘察设计院集团有限公司.高速铁路设计规范[S].TB 10621-2009
China Railway Third Survey and Design Institute Group Co. High-speed railway design code[S]. TB 10621-2009 (in Chinese)
- [17] 付强文,秦永元,李四海,等.车辆运动学约束辅助的惯性导航算法[J].中国惯性技术学报,2012(6):640-643
FU Qiangwen, QIN Yongyuan, LI Sihai, et al. Inertial navigation algorithm aided by motion constraints of vehicle[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2012(6): 640-643 (in Chinese)
- [18] MIAO Cunxiao, CHU Huanxin, CAO Juanjuan, et al. Steering angle adaptive estimation system based on GNSS and MEMS gyro[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018(153): 196-201
- [19] CHEN He, ZHANG Zigang, ZHOU Ziling, et al. SINS/OD integrated navigation algorithm based on body frame position increment for land vehicles[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2018(10): 145-151
- [20] 张为黎,陈再刚,王家鑫,等.转向架群配置高速货运动车组车辆曲线通过动态特性研究[J].内燃机与配件,2020(11):21-25
ZHANG Weili, CHEN Zaigang, WANG Jiabin, et al. Study on curve negotiation dynamic performance of vehicle in high-speed freight emu equipped with two bogie groups with each having two double-axle bogies[J]. Internal Combustion Engine and Acces-

sories, 2020(11): 21-25 (in Chinese)

- [21] GAO H, GROVES P D. Improving environment detection by behavior association for context-adaptive navigation[J]. Navigation, 2020, 67(1): 43-60

High-speed train positioning method based on motion constraints suppressing INS error in tunnel

SUN Zhenqian, TANG Kanghua, WU Meiping, GUO Yan, WANG Xueying

(College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: When the high-speed train is running in tunnel, the global navigation satellite system (GNSS) signal is completely lost, and only relying on the inertial navigation system (INS) composed of micro electro mechanical system (MEMS) devices makes large navigation error. To solve this problem, a method considering the installation angles of micro inertial measurement unit (MIMU) relative to the train body for motion constraints aided inertial navigation system (CIAMC-INS) is proposed, which does not need extra sensors. This method first establishes motion constraints model based on the installation angles of MIMU; secondly, the effect of turning on the motion constraints model is analyzed, and the use condition of motion constraints is obtained; then, the installation angles of MIMU are estimated when GNSS signal is good and the use condition of motion constraints is met; finally, the estimated installation angles are applied to the motion constraints to suppress the error of pure inertial navigation system (P-INS) to improve the navigation accuracy in tunnel. Based on this method, high-speed train navigation tests are carried out both in the real tunnel environment and in the case of artificially disconnected GNSS signal. The experimental results show that the navigation accuracy of the train in the tunnel is significantly improved, which verifies the effectiveness of the method.

Keywords: train positioning; tunnel; motion constraints; installation angles; extended Kalman filter

引用格式: 孙振乾, 唐康华, 吴美平, 等. 基于运动约束抑制惯导误差的高速列车隧道内定位方法[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(3): 624-632

SUN Zhenqian, TANG Kanghua, WU Meiping, et al. High-speed train positioning method based on motion constraints suppressing INS error in tunnel [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39(3): 624-632 (in Chinese)