

基于北斗定位技术的铁路机车轨道电子地图生成算法^①



龚利¹, 沙建领², 赵超³, 崔毅⁴

¹(中国铁道科学研究院集团有限公司 电子计算技术研究所, 北京 100081)

²(河南思维信息技术有限公司, 郑州 450000)

³(株洲中车时代电气股份有限公司, 株洲 412001)

⁴(成都运达科技股份有限公司, 成都 611731)

通讯作者: 龚利, E-mail: 81703162@qq.com

摘要: 随着中国机车远程监测与诊断系统 (CMD 系统) 中注册机车数量的迅速增长, 积累的大量北斗定位数据对生成精度较高的轨道电子地图提供了必要的数据库基础。但由于机车上发的北斗数据会存在一定偏差, 造成机车定位出现偏移或定位成孤点的现象。本文通过卡尔曼 (Kalman) 滤波算法构建预测方程对北斗数据集中的野值数据进行剔除, 进一步对处理后的经纬度数据进行分段曲线拟合, 从而生成列车轨道电子地图。实例分析表明采用基于 Kalman 滤波算法和分段曲线拟合方法对北斗定位数据进行电子地图生成, 能够较为准确的贴近真实轨道线路走势。

关键词: 列车轨道; 电子地图; 北斗定位; Kalman 滤波; 分段曲线拟合

引用格式: 龚利, 沙建领, 赵超, 崔毅. 基于北斗定位技术的铁路机车轨道电子地图生成算法. 计算机系统应用, 2019, 28(6): 172-177. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6945.html>

Railway Track Electronic Map Generation Algorithm Based on Beidou Positioning Technology

GONG Li¹, SHA Jian-Ling², ZHAO Chao³, CUI Yi⁴

¹(Institute of Computing Technology, China Academy of Railway Sciences Co. Ltd., Beijing 100081, China)

²(Henan Thinking Information Technology Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China)

³(Zhuzhou CRRC Times Electric Co. Ltd., Zhuzhou 412000, China)

⁴(Chengdu Yunda Technology Co. Ltd., Chengdu 611731, China)

Abstract: With the rapid growth of the number of registered locomotives in CMD system, a large amount of Beidou positioning data accumulated provides a necessary data foundation for generating orbital electronic maps with higher precision. However, the Beidou data sent by the locomotive will have a certain deviation, resulting in the displacement of the locomotive positioning or positioning as isolated points. In this study, the prediction equation was constructed by Kalman filtering algorithm to eliminate the outlier data in the Beidou data set, and the processed longitude and latitude data were further fitted with segmental curves, thus generating the electronic map of train track. The case analysis shows that using Kalman filtering algorithm and segmental curve fitting method to generate electronic map of Beidou positioning data can get close to real track line trend accurately.

Key words: train tracks; electronic maps; Beidou positioning; Kalman filter; section curve fitting

① 基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划 (2014J011-A)

Foundation item: Science and Technology Research and Development Plan of China Railway (2014J011-A)

收稿时间: 2018-12-13; 修改时间: 2019-01-08; 采用时间: 2019-01-15; csa 在线出版时间: 2019-05-25

北斗定位技术结合 GIS (Geographic Information System, 地理信息系统) 电子地图是一种对机车实现远程跟踪和定位的新手段, 目前铁路机务管理信息系统中的核心基础子系统—中国机车远程监测与诊断系统 (Chinese locomotive remote Monitoring and Diagnosis system, CMD 系统) 即基于机车实时下发的北斗数据, 利用 GIS 技术实现了对机车的远程跟踪和定位, 对机务人员实时掌控机车位置、安全指挥调度都具有十分重要的意义。

目前 CMD 系统中已注册和谐型机车近 7000 台, 覆盖全路 18 个铁路局集团公司, 每台机车均配备机车车载综合信息监测装置 (简称 LDP), LDP 实时向地面发送机车当前的北斗数据, 大量的北斗数据为实现新建铁路线的绘制提供了必要的条件。目前国内在利用 GPS (Global Positioning System, 全球定位系统) 及北斗定位数据生成轨道电子地图方面已有许多研究, 如文献[1]提出一种带关键点约束条件的多轨迹求径算法, 利用车站中很多固定的 POI 点 (Points of Interest), 如信号机、道岔、转辙机等, 结合低精度的 GPS 数据来生成精度较高的站内数字电子地图; 文献[2]提出一种在地图多尺度分层结构的基础上, 采用多点加权检验和 Kalman 估计差值检验进行错误数据剔除, 利用三次 B 样条曲线拟合反算生成轨道电子地图; 文献[3]提出一种改进的多轨迹融合算法, 利用两个固定的高精度端点, 从起点到终点不断画圆, 利用局部非线性优化的方法来生成高精度的轨迹。以上算法研究虽具备一定的参考价值, 但考虑到 CMD 系统中北斗数据下发的特殊性且并无固定的高精度点, 造成部分机车定位偏移或定位成孤点的现象, 因此以上研究并不能满足 CMD 系统生成新建铁路地图数据的需求, 为此我们提出一种基于 Kalman 滤波算法和分段曲线拟合方法对经纬度数据进行处理的思想, 用于提高铁路线绘制的准确性, 精确定位机车位置和轨迹具有重要的现实意义。

1 北斗卫星定位技术介绍

北斗技术作为我国自主研发的全球定位与导航技术, 不仅对国防安全意义重大, 在民用领域的应用也越来越得到广泛的使用。据统计, 2017 年卫星导航与位置服务产业总产值达到 2550 亿元, 较 2016 年增长约 20.4%。并且随着北斗组网建设和北斗二号区域的稳定运行, 预计 2023 年北斗相关产业规模将达到

4600 亿元^[4]。

考虑到铁路运输在国家安全方面的战略地位, 从保证国家信息安全角度出发, CMD 系统使用北斗技术而非 GPS 技术。北斗技术在 CMD 系统中的应用主要有两个方面。一是利用北斗导航技术全天候、全天时定位机车位置, 实时掌握全路机车运行动态, 为故障机车救援提供精确定位。二是由于北斗链路具备抗干扰能力强、抗衰落能力强、支持高速移动设备、保密性强等优点, 使用北斗短报文通信技术将机车关键业务数据发送到地面, 作为无线通信链路的重要数据补充。

CMD 系统车载子系统通过北斗模块获取到机车实时定位信息, 通过 CMD 系统的 4G 通道和北斗短报文通道将机车定位信息发送到地面系统中, 为实现机车轨道电子地图生成提供数据支撑。车载子系统经纬度获取和短报文发送流程如图 1 所示。

2 研究方法

2.1 基于 Kalman 滤波法的野值数据剔除

数据滤波是去除噪声还原真实数据的一种数据处理技术, Kalman 滤波在测量方差已知的情况下能够从一系列存在测量噪声的数据中, 估计动态系统的状态。由于它便于计算机编程实现, 并能够对现场采集的数据进行实时的更新和处理, 因此 Kalman 滤波是目前应用最为广泛的滤波方法, 在通信、导航、制导与控制等多领域得到了较好的应用^[5,6]。下面我们基于 CMD 数据库中导出的经纬度数据集研究利用 Kalman 滤波进行数据处理的程序算法实现^[7]。

铁路线路的平面由直线、圆曲线及缓和曲线等规则曲线组成, 且曲线半径比较大, 当 2 个定位点距离较近时, 曲线路段可以近似视为 1 条直线^[8]。例如图 2 示, 在曲线半径为 500 m 的弯股路段, 利用直线近似曲线的原理, 机车从 V_{k-1} 运行至 V_k , 运行距离约 10 m 时产生的最大误差为 0.025 m; 列车从 V_{k-1} 运行至 V_{k+1} , 运行距离约 20 m 时产生的最大误差为 0.100 m。由此可见, 直线、圆曲线和缓和曲线均可由相邻定位点的位置预测下一个定位点的位置。因此, 利用 Kalman 滤波算法, 建立基于轨道几何特征的 Kalman 预测方程, 可以实现对北斗数据集中野值数据的判断和剔除。

假设机车当前的定位点为 V_k , 根据系统模型, 可以基于上一定位点 V_{k-1} 的位置预测定位点 V_k 的位置, 即:

$$X_{k|k-1} = AX_{k-1|k-1} + B \quad (1)$$

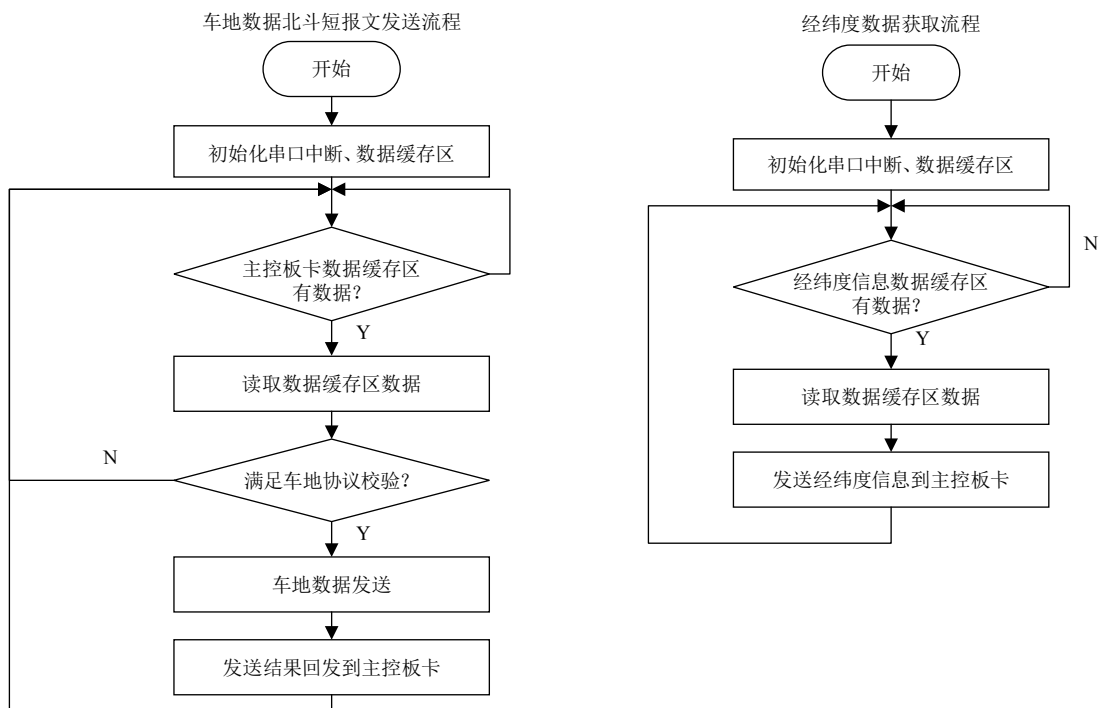


图1 经纬度获取发送流程

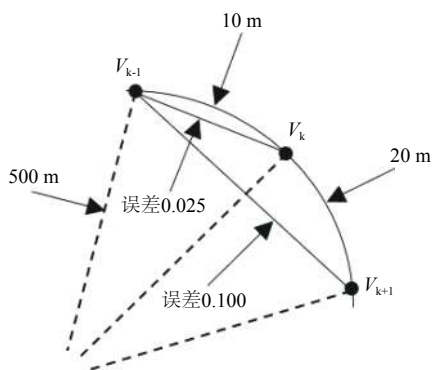


图2 曲线段近似直线段示意图

式中, $X_{(k|k-1)}$ 为先验估计值, 表示定位点 V_k 的位置预测值; $X_{(k-1|k-1)}$ 为后验估计值, 表示定位点 V_{k-1} 的位置最优值; A 和 B 为由定位点 V_{k-1} 和 V_{k-2} 的位置最优值获得的线性方程的参数.

用 P 表示协方差, 则 $X_{(k|k-1)}$ 的协方差可以表示为:

$$P_{(k|k-1)} = AP_{(k-1|k-1)}A^T + Q \quad (2)$$

式中, $P_{(k-1|k-1)}$ 为 $X_{(k-1|k-1)}$ 对应的协方差; Q 为经验值, 表示过程噪声的方差, 本文取 $Q=0.1$.

令 Z_k 为利用机车下发的 GPS 经纬度实际值, 再结合系统预测值即可得到定位点 V_k 的位置最优估计值 $X_{(k|k)}$ 为:

$$X_{(k|k)} = X_{(k|k-1)} + K_{g(k)} (Z_{(k)} + X_{(k|k-1)}) \quad (3)$$

其中,

$$K_{g(k)} = \frac{P_{(k|k-1)}}{P_{(k|k-1)} + R} \quad (4)$$

式中, K_{gk} 为 Kalman 增益; R 为经验值, 表示测量噪声的方差, 本文取 $R=0.1$.

更新 $X_{(k|k)}$ 对应的协方差为

$$P_{(k|k)} = (1 - K_{g(k)})P_{(k|k-1)} \quad (5)$$

根据以上 Kalman 滤波算法, 运用式 (1) 可以由一定位点 V_{k-1} 的位置估算出当前定位点 V_k 的位置, 结合当前定位点 V_k 位置的实测值 $Z_{(k)}$, 再运用式 (3) 可得到当前定位点 V_k 位置的最优估计值 $X_{(k|k)}$. 当实际测量值 $Z_{(k)}$ 偏差很大, 通过最优估计值 $X_{(k|k)}$ 可以修正偏差, 剔除野值 $Z_{(k)}$. 对式 (1) 至式 (5) 编写计算机程序, 通过程序的自回归运算可以实现对整条线路定位点中野值的剔除.

2.2 基于分段曲线拟合的轨道地图绘制

经过 Kalman 滤波处理后得到的经纬度数据集, 剔除了部分野值数据, 提升了铁路线绘制的准确性, 为了进一步逼近真实铁路线, 我们对处理后的经纬度数据进行分段曲线拟合, 然后对每一分段计算经纬度点到

拟合曲线的垂直距离, 实现经纬度数据集的进一步处理, 最后再将处理后的数据集与地图线路数据集进行融合, 完成地图线路图层数据的添加。

前面提到铁路线是由直线、圆曲线和缓和曲线组成, 要实现铁路线路的曲线拟合, 就需要对 Kalman 滤波后的数据进行分段并确定相应的拟合类型, 为此我们采用角度差法进行处理, 具体做法是通过建立线路直角坐标系, 利用等间隔算法对 Kalman 滤波后的数据进行采样, 将采样的经纬度坐标点转换为直角坐标系下的点并在坐标系中标出, 计算采样点 i 与采样点 $i+1$ 连成的直线与横轴的夹角 θ_i , 如果采样点落在直线上, 则夹角 θ_i 保持不变, 如果采样点落在圆曲线上, 则 θ_i 值的变化值 $\Delta\theta_i$ 保持不变, 其他的点可认为落在缓和曲线上, 利用这一性质可实现对待拟合的铁路线进行分段并确定相应的拟合曲线类型, 下面分别针对直线、圆曲线和缓和曲线拟合的最小二乘法进行介绍说明。

2.2.1 直线拟合

设直线方程为: $y=ax+b$, 根据直线上的经纬度点数据集 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$, 由最小二乘原理, 可求

$$\begin{cases} r = \sqrt{x_0^2 - 2\bar{x}x_0 + y_0^2 - 2\bar{y}y_0 + \bar{x}^2 + \bar{y}^2} \\ x_0 = \frac{(\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - (\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{y}^3 - \bar{x}^2\bar{y})(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \\ y_0 = \frac{(\bar{x}^2\bar{y} + \bar{y}\bar{y}^2 - \bar{y}^3 - \bar{x}^2\bar{y})(\bar{x}^2 - \bar{x}^2) - (\bar{x}^2\bar{x} + \bar{x}\bar{y}^2 - \bar{x}^3 - \bar{x}\bar{y}^2)(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})}{2(\bar{x}^2 - \bar{x}^2)(\bar{y}^2 - \bar{y}^2) - 2(\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y})^2} \end{cases}$$

其中, $\overline{x^a y^b} = (\sum_{i=1}^k x_i^a y_i^b) / k$. 由公式可以看出, 由最小二乘法圆拟合的形式虽然复杂, 但只需要对各点坐标计算一次即可得出圆曲线半径和圆心坐标, 因此该算法的拟合速度是很快的。

2.2.3 缓和曲线拟合

常用的缓和曲线方程属于三次抛物线型, 其表达式为:

$$y = \frac{x^3}{6Rl_0}$$

其中, (x, y) 为缓和曲线上任意一点坐标, R 为圆曲线半径, l_0 为缓和曲线的长度. 该方程的坐标原点是直缓点. 对缓和曲线采用三次多项式拟合, 足以保证轨道地图的精度要求. 根据缓和曲线上的经纬度点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$, 拟合方程为:

只需要 4 个数据点的值就可确定上式中的 a 、 b 、

得 a 、 b 的值分别为:

$$\begin{cases} a = \frac{\sum_i x_i^2 \sum_i y_i - \sum_i x_i y_i \sum_i x_i}{k \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} = \bar{y} - b\bar{x} \\ b = \frac{k \sum_i x_i y_i - \sum_i x_i \sum_i y_i}{k \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2} = \frac{\bar{x}\bar{y} - \bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 - \bar{x}^2} \end{cases}$$

根据上式对各点坐标值进行一次计算就可求出 a 、 b , 即可得到目标直线方程。

2.2.2 圆曲线拟合

根据圆曲线上的经纬度点 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_k, y_k)$, 设 r 为圆曲线半径, (x_0, y_0) 为圆心点坐标, 运用最小二乘法进行圆曲线拟合, 各经纬度点残差平方和函数为:

$$Q = \sum_{i=1}^k [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 - r^2]^2$$

根据最小二乘原理有:

$$\frac{\partial Q}{\partial x_0} = \frac{\partial Q}{\partial y_0} = \frac{\partial Q}{\partial r} = 0$$

由以上两式可得:

c 、 d 参数的值。

通过编写程序很容易根据经纬度数据集获取到以上三类拟合曲线的参数值, 得到拟合曲线方程后对每一分段计算由定位点到拟合曲线的垂直距离, 可进一步将偏离较远的经纬度点去除, 最后将处理后的经纬度点集追加到地图线路图层数据集中, 利用地图部署工具对相应区域进行切图发布即完成地图的更新。

2.3 基于 CMD 系统中北斗定位数据的列车轨道电子地图绘制过程

由 2.1 和 2.2 节中提出的列车轨道电子地图生成算法, 可以将绘制过程概括为 5 步:

(1) 数据采集, 从 CMD 数据库中导出缺失铁路线路的经纬度数据集;

(2) 数据处理, 利用 Kalman 滤波算法对导出的数据集进行滤波处理, 剔除数据野值;

(3) 曲线拟合, 对滤波处理后的数据集等间隔采样、分段, 确定曲线拟合类型, 利用最小二乘法编制 Matlab 曲线拟合程序进行分段曲线拟合, 得到曲线拟合参数;

(4) 数据融合, 根据拟合曲线对滤波后的数据集进行二次处理, 去除偏离拟合曲线较远的离散点, 将处理后的数据集与地图中的线路图层数据集进行融合;

(5) 地图发布, 利用地图部署工具对地图重新发布, 完成地图数据的更新。

3 实例分析

为了验证基于 Kalman 滤波算法和分段曲线拟合方法对数据处理的合理性和有效性, 我们采取陇海铁路线上巩义站至上街站区间内的一段铁路线进行实例说明。系统硬件环境为云存储服务器, 操作系统为 Windows Server 2008, 北斗定位数据存储在 MongoDB 数据库中, 保存至少 6 个月的机车定位信息。

图 3 是根据从 CMD 系统数据库中导出原始经纬度数据在地图中的打点情况显示。可以看出, 由于机车下发的经纬度数据存在位置浮动, 造成数据点在地图中定位后呈现出局部比较杂乱的状态, 如果不进行数据处理, 那么绘制出来的铁路线必然存在较大的误差。



图 3 原始经纬度点集定位显示

基于本文中介绍的 Kalman 滤波算法和分段曲线拟合方法, 通过编写 Matlab 滤波程序对原始经纬度数据集进行 Kalman 滤波处理, 选取某一段包含直线、圆曲线和缓和曲线的路段作算例, 测量点数据按 50 m 等间隔采样, 共选取测量点 248 个, 通过角度差法对路段进行分段, 利用 Matlab 拟合程序对以上 3 种线形进行拟合, 计算得到圆曲线半径和缓和曲线长度等曲线参数, 对同一组数据多次分段拟合处理, 对拟合结果进行误差计算结果显示, 拟合出的线路参数不存在较大的偶然误差和系统误差, 符合精度需求。将经过 Kalman 滤

波和分段曲线拟合处理后的点集在地图中定位如图 4 所示, 数据呈现出较为平滑的状态。



图 4 经过 Kalman 滤波和分段曲线拟合处理后的点集定位显示

图 5 是基于 Kalman 滤波和分段曲线拟合处理后的经纬度数据绘制的铁路线, 可以看出, 生成的线路走势与真实的铁路线基本吻合, 精度较高, 准确性较好, 满足实际应用的需求。



图 5 最终生成的轨道线路走势

利用本文卡尔曼滤波和分段曲线拟合方法进行地图铁路线生成, 与文献[9]提出的基于稳定估计的几何距离准则拟合铁路线参数的方法进行比较, 后者利用每一次拟合之后的改正数大小来确定权值, 从而逐步减小粗差对拟合精度的影响。基于上述陇海线巩义站至上街站间机车记录的原始北斗定位数据进行拟合误差计算, 其中离差和为各个数据点的纵坐标与拟合结果的差值的平方和, RMS 为该误差的均方根, 它们从统计规律上体现了数据拟合结果的质量。如表 1 所示。

表 1 方法对比分析结果

对比项	Kalman 滤波和 分段拟合法	几何距离准则拟合法
原始北斗定位点	15 242	15 242
异常数据定位点	3154	2196
直线分段数	13	16
圆曲线分段数	11	10
缓和曲线分段数	11	9
误差均方根 (RMS)/m	6.074	13.586

由表 1 可知, 本文的 Kalman 滤波法相比文献 [9] 的稳定估计加权法对异常定位数据处理效果上更优越, 剔除的异常数据点更多, 处理后的定位点分布趋势更平滑. 本文利用角度差法对定位数据进行分段, 同样比文献 [9] 利用几何距离法分段更精细, 直线分段数较少, 拟合误差更小, 更逼近真实铁路线走势.

4 结束语

本文基于 CMD 系统中机车下发的北斗定位数据, 提出利用 Kalman 滤波和分段曲线拟合的方法来生成机车轨道电子地图, 有效地提高了地图线路绘制的准确性, 该方法利用计算机程序对数据实现自动处理, 速度快、效率高、人工参与少, 能够较为准确的实现地图缺失铁路线的绘制, 具备一定的应用价值.

参考文献

- 1 刘嘉, 穆建成, 蔡伯根. 多轨迹 GPS 数据生成高精度列车控制用数字电子地图的方法. 铁道通信信号, 2007, 43(5): 52-55. [doi: 10.3969/j.issn.1000-7458.2007.05.023]
- 2 刘江, 蔡伯根, 唐涛, 等. 基于 GPS 的列控轨道地图数据生成方法研究. 测绘学报, 2011, 40(1): 111-117.
- 3 杨诗颖, 陈德旺, 曾翔宇. 基于局部优化的多轨迹信息融合算法研究. 第十一届中国不确定系统年会、第十五届中国青年信息与管理学者大会论文集. 邯郸, 中国. 2013. 5.
- 4 曲向芳. 北斗卫星导航定位系统全球组网产业链迎来新发展机遇——《2018 中国卫星导航与位置服务产业发展白皮书》发布. 卫星应用, 2018, (8): 65-71.
- 5 Huang YL, Zhang YG, Wang XD. Kalman-filtering-based in-motion coarse alignment for odometer-aided SINS. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2017, 66(12): 3364-3377. [doi: 10.1109/TIM.2017.2737840]
- 6 Wang DJ, Lv HF, Wu J. In-flight initial alignment for small UAV MEMS-based navigation via adaptive unscented Kalman filtering approach. Aerospace Science and Technology, 2017, 61: 73-84. [doi: 10.1016/j.ast.2016.11.014]
- 7 董绪荣, 陶大欣. 一个快速 Kalman 滤波方法及其在 GPS 动态数据处理中的应用. 测绘学报, 1997, 26(3): 221-227, 267.
- 8 倪晓林, 杨妮, 张东. 列控数字轨道地图自动生成算法研究. 铁路运营技术, 2010, 16(1): 24-27.
- 9 朱文华, 覃爱丽. 基于几何距离准则拟合铁路线路参数的研究. 铁路计算机应用, 2010, 19(5): 14-16. [doi: 10.3969/j.issn.1005-8451.2010.05.005]