

文章编号:1671-1637(2016)05-0132-10

## 北斗二代在西部低密度铁路中的应用

上官伟<sup>1,2,3,4</sup>,袁重阳<sup>1</sup>,蔡伯根<sup>1,3</sup>,王 剑<sup>1,2,3</sup>,刘 江<sup>1,2,3</sup>

(1. 北京交通大学 电子信息工程学院,北京 100044; 2. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室,北京 100044; 3. 北京交通大学 北京市轨道交通电磁兼容与卫星导航工程技术研究中心,北京 100044; 4. 伦敦大学学院 交通研究中心,伦敦 WC1E 6BT)

**摘要:**考虑西部铁路线低密度、低成本、高可靠性等应用需求,研究了基于北斗二代卫星导航系统和惯性导航系统的组合定位技术,结合地图匹配技术,能够满足面向西部低密度铁路的列车连续无缝定位需求。当列车经过铁路沿线隧道与山区时,北斗卫星信号会因遮挡而失效,采用加速度计和陀螺仪构成的惯性导航系统进行参数短时推算,能够提供列车的运行姿态、速度与位置信息,解决短时间内因卫星信号失效导致列车无法定位的问题。研究了面向铁路直线线路和有岔区段的地图匹配技术,并结合轨道地图数据库进行了测试。设计并搭建了应用于西部低密度铁路的北斗二代卫星导航列车定位系统,在实验室单点静态定位和青藏铁路现场连续动态定位测试条件下,对系统的定位功能进行了测试和验证。试验结果表明:在单点静态定位条件下,定位误差平均为0.558 m,在动态定位条件下,定位误差平均为0.258 m;结合基于轨道地图数据库的地图匹配技术,列车运行轨迹点匹配正确率达98.6%,系统定位误差能够满足西部低密度铁路的全局定位需求。

**关键词:**信息工程;西部低密度铁路;北斗二代卫星导航系统;组合定位;地图匹配;无缝定位

**中图分类号:**U283.2 **文献标志码:**A

## Application of BDS in western low-density railway lines

SHANGGUAN Wei<sup>1,2,3,4</sup>, YUAN Chong-yang<sup>1</sup>, CAI Bai-gen<sup>1,3</sup>, WANG Jian<sup>1,2,3</sup>, LIU Jiang<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Electronic and Information Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Beijing Engineering Research Center of EMC and GNSS Technology for Rail Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 4. Centre for Transport Studies, University College London, London WC1E 6BT, UK)

**Abstract:** Considering the application requirements of low-density, low-cost and high-reliability of western railway lines, the integrated positioning technology of Beidou satellite navigation system and the inertial navigation system was studied, and the requirement of continuous and seamless positioning of train aimed at western low-density railway lines could be satisfied based on the map matching technology. When train passed through the tunnel and the mountainous area along railway lines, the Beidou satellite navigation system signal would failed due to obstacle. The short-term parameters could be derived and calculated by using the inertial navigation system constructed with accelerometer and gyroscope, train information of attitude, speed and position could be provided, which could solve the positioning problem of train because satellite signal failed in a short time. The map matching technology on the straight line and switch section of

收稿日期:2016-06-21

基金项目:国家自然科学基金项目(61490705, U1334211);国家国际科技合作专项项目(2014DFA80260);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013JBM007);北京高等学校青年英才计划项目(YETP0538)

作者简介:上官伟(1979-),男,陕西乾县人,北京交通大学副教授,工学博士,从事交通信息工程及控制研究。

railway was studied, and the test was carried out based on the track map database. The Beidou satellite navigation positioning system of train aimed at western low-density railway lines was designed and established. Under the conditions of single-point static positioning in the laboratory and continuous dynamic positioning in the Qinghai-Tibet Railway Lines, the positioning functions of the system were tested. Test result shows that the average positioning error of train is 0.558 m under single-point static positioning condition, the average positioning error of train is 0.258 m under dynamic positioning condition, and the matching accuracy rate of train running trajectory point is 98.6% combining with the map matching technology based on track map database, so the system positioning errors can meet the overall positioning requirements of western low-density railway lines. 15 figs, 25 refs.

**Key words:** information engineering; western low-density railway line; Beidou satellite navigation system; integrated positioning; map matching; seamless positioning

**Author resume:** SHANGGUAN Wei(1979-), male, associate professor, PhD, +86-10-51687111, wshg@bjtu.edu.cn.

## 0 引言

中国的西部低密度线路(Low-Density Lines)是指分布在沙漠、高山、高原等极其恶劣的自然环境中,密度小、运量低、线路信号设备不完善的铁路线。西部地区地广人稀,自然资源丰富,但铁路的运输管理和控制系统严重滞后于东部发达地区,其供给能力与经济发展极不匹配,这主要因为人们将大量的人员与物资投入到低密度线路的日常维护与周边基础设施的建设。利用先进技术解决低密度铁路存在的设备不完善、人员匮乏、环境恶劣等问题,设计一种适用于低密度地区的新型列控系统,极大降低运营和维护成本的同时整体提升列车的安全防护能力,将成为中国发展符合国情的列控系统的新方向。

欧洲铁路运输管理系统<sup>[1]</sup>是欧洲铁路运营部门和欧洲铁路信号工业界在欧盟和国际铁路联盟<sup>[2]</sup>(International Union of Railways, UIC)的支持下建立的,包括2个主要部分:GSM-R移动无线网络与欧洲列车控制系统(European Train Control System, ETCS)。目前,ETCS在检测列车轨道占用情况与列车完整性时主要利用联锁、轨道电路等地面设备实现,依靠轨道电路和计轴设备等划分闭塞分区,辅以应答器实现列车定位<sup>[3]</sup>。这些功能的实现是建立在铺设大量地面设备的基础上,增加了列控系统建设和维护的成本,对于低运量的区域性铁路来说,经济负担过大。2003年3月,在ETCS-3级<sup>[4]</sup>基础上,UIC提出了ERTMS-Regional<sup>[5]</sup>方案,主要内容是利用卫星导航定位技术、路旁设备与列车间

的无线通信等先进技术,减少传统地面信号设备等,提高列车的安全性与可靠性<sup>[6]</sup>。2012年,日立公司借助电气联锁设备和ATP设备等成熟技术开发了基于无线通信的先进列车管理和通信系统(Advanced Train Administration and Communications System, ATACS)<sup>[7]</sup>。美国推出了精准列车控制(Positive Train Control, PTC)系统<sup>[8]</sup>,使用列车卫星定位系统、数字信号无线传输追踪列车位置,发送行车许可,传递位置报告,具有精确的列车跟踪和运行管理能力,能够使列车发车间隔减小以增强线路的运输能力,减少轨旁设备日常维护工作量,适用于大运量需求的铁路以及高速铁路等。美国Wabtec公司的ETMS<sup>[9-10]</sup>、GE公司的ITCS(Incremental Train Control System)与Lockheed Martin空间系统公司的Vital PTC等符合PTC标准。在国内,青藏线采用美国GE公司的ITCS列控系统<sup>[11]</sup>,结构简单,适用于恶劣的外部环境。

中国自行研制的中国北斗卫星导航系统(Beidou Satellite Navigation System, BDS)是一种新型的全球卫星导航系统,包括北斗一代和二代。北斗一代卫星导航系统为区域定位,卫星数量少(3颗),定位精度低,而且主要应用有源定位的方法,接收终端需要向卫星发出信号,由卫星把信号传给地面站,再由它解算并发送到接收终端。北斗二代卫星导航系统为全球定位,卫星数量多(35颗),定位精度高,使用与GPS一样的无源定位,接收机被动接收卫星广播的导航信号,由接收终端来计算位置。2003年,北斗卫星导航验证系统建成,并在多个领域得到了广泛应用<sup>[12]</sup>,如国家物联网应用架

构就是基于北斗导航系统,结合无线传感器网络和蜂窝移动通信网络技术,不仅扩大了物联网覆盖面积,而且提高了可靠性和经济性<sup>[13]</sup>。

杨杰指出将北斗导航系统应用于农业领域,提升农业信息化和智能化<sup>[14]</sup>;杨殿阁等将北斗导航系统和电子罗盘、陀螺传感器、车速传感器等进行组合定位,提高了北斗定位系统在车辆导航中的可靠性<sup>[15]</sup>。中国铁路在列车行车安全、铁路沿线灾害监测、基础设施监测与建设等领域采用 GPS 的导航产品较多,但 GPS 受控于美国,所以需要中国自主研发的北斗导航系统来进行定位。杨军等分析了北斗导航系统的优势和劣势,指出其潜在的社会效益,鼓励推进北斗二代系统的建设<sup>[16]</sup>。BDS 可以全天候、全天时为全球各地各类用户提供精度高、可靠性好的导航、定位、授时等服务,并兼具短报文通信业务,因而在铁路中也逐渐得到应用。在列车组合定位方面,传统的定位设备包括应答器、轨道电路、里程计、编码轨道电路、计轴设备和多普勒雷达等<sup>[17]</sup>,但上述列车定位设备普遍存在建设、维护成本高的缺点。随着全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)技术的发展,卫星导航技术未来将逐步应用到列车定位领域<sup>[18]</sup>。

目前,地图匹配技术越来越多应用在列车定位之中<sup>[19]</sup>,地图匹配技术是指同一款接收机在不同时间内获得铁路线同一位置的配准。由于铁路线具有一维特性,所以采用地图匹配技术能够提高列车定位的精度<sup>[20]</sup>,由于铁路线具有拓扑性,所以在区间内和股道中可以采用拓扑匹配的方法,既减小了计算量,又提高了准确性,因此,在列车定位中应用地图匹配技术优势明显<sup>[21]</sup>。

中国面向低密度线路的列控系统研究尚处在探索阶段,自青藏线 ITCS 系统运行以来,对 ITCS 系统出现的问题和解决办法进行了一定的分析和探索,但是尚未形成具有自主知识产权、适用于中国低密度线路列车运行控制系统(CTCS-LDL)的方案。本文针对西部低密度铁路列车控制系统中的定位技术,将北斗二代卫星导航系统和惯性导航系统进行组合定位,以提高定位精度,并结合地图匹配技术,通过软件和硬件的设计,完成了定位终端的研制,搭建了一套适合低密度铁路的列车定位系统,为列车的运行控制提供了保障。

## 1 北斗二代列车定位系统关键技术

全球导航卫星系统广泛应用于地面交通,例

如车辆导航、铁路车辆管理与车站客运信息等,许多研究人员正将 GNSS 推广到地面交通系统与安全相关的应用中,例如铁路列车控制系统等。中国西部低密度铁路环境恶劣,沿线维护成本高,要求信号设备数量少,耗能低,而且尽量做到无人值守与维护简便。本文采用北斗二代导航技术,研究并构建了局域差分系统,用于列车定位,系统结构见图 1。

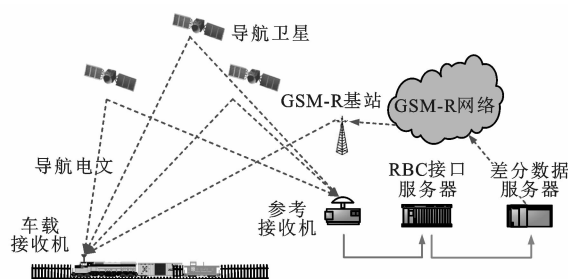


图1 局域差分系统结构

Fig. 1 Structure of local area differential system

地面接收机向 RBC 提供差分校正消息、固定定位信息和时间信息,然后通过 GSM-R 网络将差分数据传送到车载接收机,对其定位结果进行修正。车载计算机 OBC 同时通过卫星导航系统和与机车车轴连接的速度传感器监控列车当前速度。

北斗二代接收机若被遮挡或进入隧道时,无法接收到 4 颗以上卫星的信号,不能有效定位,因此,可靠性不高,而惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)能够在 BDS 信号失锁<sup>[22]</sup>时提供短时精确的定位,再结合地图匹配技术<sup>[23]</sup>,提高定位的精度和可靠性。

### 1.1 BDS/INS 组合定位技术

BDS 和 INS 的误差具有相互弥补的特性,一方面 INS 完全自主,不依赖任何外部帮助或视界条件,短期位置误差相对较小,但误差随时间累积<sup>[24]</sup>,另一方面 BDS 位置误差的短期误差性能不如 INS,但误差不随时间增加。考虑到 BDS 接收机定位中进入隧道等卫星信号失锁的情况,采用 BDS/INS 组合<sup>[25]</sup>来实现列车的无缝定位。

当接收不到北斗卫星信号时,可以利用惯性导航来实现定位。惯性传感器可以根据物体运动的变化对物体进行姿态判断,包括陀螺仪和加速度计,用二者信息进行计算,判断物体的位置。陀螺仪测量的是载体运动的姿态角速度变化,加速度计测量作用在载体单位质量上的惯性力和万有引力的矢量和。捷联 INS(SINS)是一种将惯性传感器“准”固定在主载体的框架结构上,与主载体互为一体的导

航系统。微电子机械系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)的捷联惯导系统使用载体坐标系,也就是传感器固定坐标系,多用于铁路定位应用。捷联惯性导航系统的定位原理见图 2,主要包括 3 个步骤:姿态矩阵计算、姿态更新与 BDS/INS 组合定位实现。

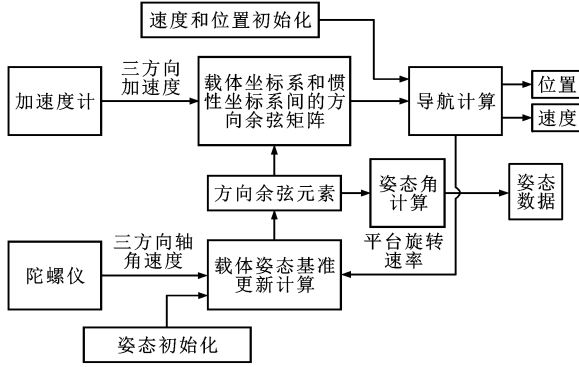


图 2 捷联惯性导航系统定位原理

Fig. 2 Positioning principle of SINS

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & \cos(\theta)\sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ -\cos(\gamma)\sin(\psi) + \sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) & \cos(\gamma)\cos(\psi) + \sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) & \sin(\gamma)\cos(\theta) \\ \sin(\gamma)\sin(\psi) + \cos(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) & -\sin(\gamma)\cos(\psi) + \cos(\gamma)\sin(\theta)\sin(\psi) & \cos(\gamma)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

可相应推导姿态矩阵  $\mathbf{T}$  为

$$\mathbf{T} = \mathbf{C}_b^n = (\mathbf{C}_n^b)^{-1} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{33} & T_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{C}_b^n$  为从 b 系到 n 系坐标变换的方向余弦矩阵;  $T_{11}$ 、 $T_{12}$ 、 $\dots$ 、 $T_{33}$  均为姿态变量。

### 1.1.2 姿态更新

姿态矩阵  $\mathbf{T}$  与其四元数  $\mathbf{q}$  存在以下转换关系

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} w^2 + x^2 - y^2 - z^2 & 2(xy - wz) & 2(xz + wy) \\ 2(xy + wz) & w^2 - x^2 + y^2 - z^2 & 2(yz - wx) \\ 2(xz - wy) & 2(yz + wx) & w^2 - x^2 - y^2 + z^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{cases} w = 0.5(1 + T_{11} + T_{22} + T_{33})^{1/2} \\ x = \frac{1}{4w}(T_{32} - T_{23}) \\ y = \frac{1}{4w}(T_{13} - T_{31}) \\ z = \frac{1}{4w}(T_{21} - T_{12}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $w$ 、 $x$ 、 $y$ 、 $z$  均为四元数  $\mathbf{q}$  的元素,其中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为具体的向量坐标,  $w$  为此空间坐标的旋转角度。

### 1.1.1 姿态矩阵计算

载体姿态有 3 种表示方法:欧拉角、方向余弦姿态矩阵与四元数。定义导航坐标系为 n 系,载体坐标系为 b 系,地球坐标系为 e 系,惯性坐标系为 i 系。n 系到 b 系旋转的欧拉角为  $(\gamma, \theta, \psi)$ ,  $\gamma$ 、 $\theta$ 、 $\psi$  分别为横滚角、俯仰角与航向角。从 n 系坐标  $\mathbf{R}^n$  到 b 系坐标  $\mathbf{R}^b$  的转换式为

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\gamma) & \sin(\gamma) \\ 0 & -\sin(\gamma) & \cos(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & -\sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\psi) & \sin(\psi) & 0 \\ -\sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $x_n$ 、 $y_n$ 、 $z_n$  与  $x_b$ 、 $y_b$ 、 $z_b$  分别为导航坐标系与载体坐标系下的载体三向坐标。

令  $\mathbf{R}^b = \mathbf{C}_n^b \mathbf{R}^n$ ,  $\mathbf{C}_n^b$  为从 n 系到 b 系坐标变换的方向余弦矩阵,由式(1)推导可得

$$\mathbf{C}_n^b = \begin{bmatrix} \cos(\theta)\cos(\psi) & \cos(\theta)\sin(\psi) & -\sin(\theta) \\ -\cos(\gamma)\sin(\psi) + \sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) & \cos(\gamma)\cos(\psi) + \sin(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) & \sin(\gamma)\cos(\theta) \\ \sin(\gamma)\sin(\psi) + \cos(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) & -\sin(\gamma)\cos(\psi) + \cos(\gamma)\sin(\theta)\sin(\psi) & \cos(\gamma)\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2)$$

四元数随时间变化可表示为

$$\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \dot{w} \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_{nb} \times \mathbf{q} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{nbx} & -\omega_{nby} & -\omega_{nbz} \\ \omega_{nbx} & 0 & \omega_{nbz} & -\omega_{nby} \\ \omega_{nby} & -\omega_{nbz} & 0 & \omega_{nbx} \\ \omega_{nbz} & \omega_{nby} & -\omega_{nbx} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $\boldsymbol{\omega}_{nb}$  为载体的初始姿态的载体系相对于导航系的角速度;  $\omega_{nbx}$ 、 $\omega_{nby}$ 、 $\omega_{nbz}$  分别为  $\boldsymbol{\omega}_{nb}$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的角速度。

对  $t$  时刻的  $\mathbf{q}$  解微分方程,得到  $t + \Delta t$  时刻的  $\mathbf{q}$ ,  $\Delta t$  为时间  $t$  的微分量,根据式(4)求得对应的姿态矩阵,完成对姿态矩阵的更新。对于载体来说,  $\boldsymbol{\omega}_{nb}$  为

$$\boldsymbol{\omega}_{nb} = \boldsymbol{\omega}_{ib} - \mathbf{C}_n^b (\boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n) \quad (7)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{ie}^n = \begin{bmatrix} \omega_{ie,x}^n \\ \omega_{ie,y}^n \\ \omega_{ie,z}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos(L) \\ \omega_{ie} \sin(L) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\omega}_{en}^n = \begin{bmatrix} \omega_{en,x}^n \\ \omega_{en,y}^n \\ \omega_{en,z}^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -V_N / (R_M + h) \\ V_E / (R_N + h) \\ V_E \tan(L) / (R_N + h) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\omega_{ib}$  为载体相对于  $i$  系的陀螺测量值;  $\omega_{ie}^n$  为地球自转角速度  $\omega_{ie}$  在  $n$  系的投影;  $\omega_{ie,x}^n$ 、 $\omega_{ie,y}^n$ 、 $\omega_{ie,z}^n$  分别为  $\omega_{ie}^n$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的角速度;  $\omega_{en}^n$  为  $n$  系相对于  $e$  系的旋转角速度在  $n$  系的投影;  $\omega_{en,x}^n$ 、 $\omega_{en,y}^n$ 、 $\omega_{en,z}^n$  分别为  $\omega_{en}^n$  在  $x$ 、 $y$ 、 $z$  轴方向的角速度;  $V_E$  为导航坐标系沿东向的速度;  $V_N$  为导航坐标系沿北向的速度;  $R_M$  为沿地球卯酉圈的曲率半径;  $R_N$  为子午圈的曲率半径;  $L$  为载体所处纬度;  $h$  为载体所处高程。

### 1.1.3 BDS/INS 组合定位实现

BDS/INS 组合定位实现具体步骤如下。

Step 1: 通过 INS 数据, 判断列车的运动状态, 若列车处于静止或匀速运动状态, 则对 INS 进行零偏校正。

Step 2: BDS 获取列车的位置、运行速度与航向等信息, 对 INS 进行初始化。

Step 3: 利用 INS 推算下一时刻的列车状态。

Step 4: 当获取到 BDS 定位信息, 对 BDS 和 INS 的数据进行融合, 并校正 INS 状态误差, 得出列车当前位置; 若遇到遮挡等导致 BDS 不能定位的情况时, 以前一时刻 BDS 数据为参考, 用 INS 进行位置推算, 实现列车的无缝定位。

Step 5: 循环 Steps 3、4, 直到定位结束。

### 1.2 基于轨道地图数据库的地图匹配方法

列车在正常运行情况下, 一定会处于铁路线上, 所以采用地图匹配技术能够提高列车定位的精度。在进行地图匹配时, 首先使用高精度接收机采集铁路线数据, 制作成离线的地图数据库, 然后在车载中将接收机获得数据采用匹配算法进行投影匹配, 获取列车精确的位置。

若列车运行所在片段为无岔区段, 采用位置点匹配算法, 求出位置点的最近投影, 即搜索数据库中到该点距离最小的两点, 然后直接投影到这两点所确定的直线上, 计算步骤如下。

Step 1: 由位置点  $C$  向备选片段  $AB$  做投影, 得到点到备选片段的距离, 取其中投影距离最小的片段作为需要匹配的片段, 取其垂足  $D$  为匹配点, 匹配原理见图 3, 可以得到直线  $AB$  的解析方程为

$$\begin{cases} \alpha x + \beta y + \lambda = 0 \\ k_1 = (y_2 - y_1) / (x_2 - x_1) \\ \alpha = 1 \\ \beta = -1/k_1 \\ \lambda = -x_1 + (1/k_1)y_1 \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\lambda$  均为方程参数;  $k_1$  为直线  $AB$  的斜率;  $(x_1, y_1)$  为点  $A$  的坐标;  $(x_2, y_2)$  为点  $B$  的坐标。

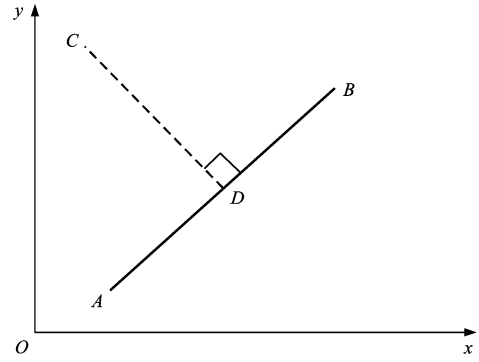


图 3 位置点匹配原理

Fig. 3 Principle of position point matching

Step 2: 根据点到直线的距离公式,  $CD$  的长度  $d$  为

$$d = \frac{|\alpha x_0 + \beta y_0 + \lambda|}{\sqrt{\alpha^2 + \beta^2}} \quad (11)$$

式中:  $(x_0, y_0)$  为点  $C$  的坐标。

通过求 2 条直线的交点, 垂足点  $D$  的坐标  $(x_3, y_3)$  表示为

$$\begin{cases} x_3 = \frac{\beta x_0 + k_1 \beta y_0 + k_1 \lambda}{\beta - k_1 \alpha} \\ y_3 = (-1/k_1)(x_3 - x_0) + y_0 \end{cases} \quad (12)$$

但在有岔区段, 直接采用点到直线的匹配算法很容易导致地图匹配错误, 因此, 考虑采用曲线拟合的匹配算法, 提取当前的列车运行轨迹, 与线路地图进行比较, 最后确定当前列车运行所在轨道。有岔区段地图匹配原理见图 4, 其中“●”为实际列车定位点, 直线  $S_1$ 、 $S_2$  均为实际轨道, 具体步骤如下。

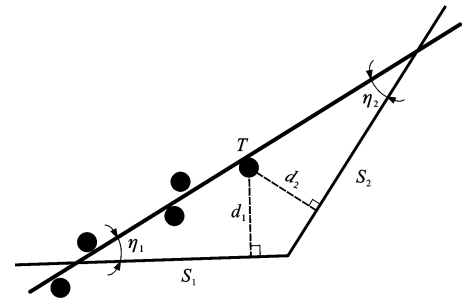


图 4 有岔区段地图匹配原理

Fig. 4 Map matching principle of switch section

Step 1: 设  $T$  点为列车定位点, 获取列车位置后, 依据道岔的拓扑关系, 找到列车到达的地图数据片段。

Step 2: 计算列车定位点分别到候选片段  $S_1$  和  $S_2$  的距离,  $d_1$  为列车定位点  $T$  到轨道  $S_1$  的垂直投影距离,  $d_2$  为列车定位点  $T$  到轨道  $S_2$  的垂直投影距离。

Step 3:根据曲线拟合法,利用定位点与前一时刻所有点,拟合一条直线,计算拟合直线与候选片段的夹角,获得列车行进轨迹与候选片段的夹角差  $\eta$  为

$$\eta = \frac{\eta_1 - \eta_2}{2}$$

式中: $\eta_1$ 、 $\eta_2$  分别为定位点  $T$  与前一时刻所有定位点的拟合直线与  $S_1$ 、 $S_2$  轨道的夹角。

Step 4:根据求出的夹角差  $\eta$  计算定位点与前一时刻所有定位点拟合的直线的斜率  $k_2$ ,  $k_2$  由式(13)推导求出

$$\eta = \arctan\left(\frac{k_2 - K_m}{1 + k_2 K_m}\right) \quad (13)$$

式中: $K_m$  为候选路段的斜率, $m$  为 1、2 分别对应候选路段  $S_1$ 、 $S_2$ 。

Step 5:分别将  $(d_1, k_2)$  和  $(d_2, k_2)$  送入评价函数,判断此点属于  $S_1$  还是  $S_2$ ,最后直接投影得到其匹配点。评价函数  $s$  为

$$s = p_1 \frac{\arctan(k_2) - \arctan(K_m)}{\pi/6} + p_2 \frac{d_m}{60} \quad (14)$$

式中: $d_m$  为测量点到候选路段的垂直投影距离; $p_1$ 、 $p_2$  分别为夹角和距离的权值,由于夹角和距离都对判断列车运行所在轨道起到了决定性作用,权值的分配要根据实际情况调节, $p_1$ 、 $p_2$  的取值范围为(0,1)。

Step 6:接收列车下一时刻的定位数据,转到 Step 1,直到定位结束。

## 2 面向西部铁路的列车定位系统设计与功能验证

### 2.1 定位系统设计

定位系统终端主要由车载处理单元、列车定位单元与无线通信单元等部分组成,车载设备主要结构见图 5,其硬件结构见图 6。定位终端设备主要实现的功能有:将卫星定位的差分数据信息通过无线

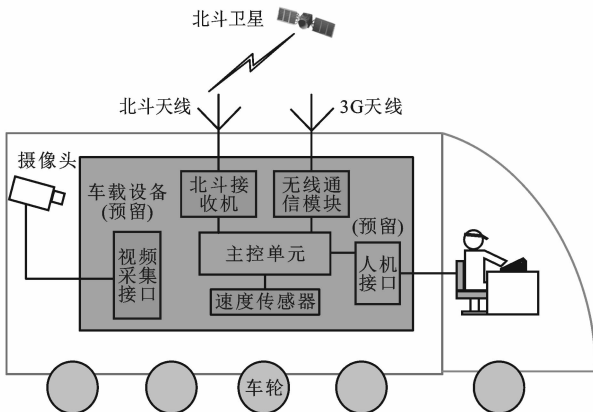


图 5 车载设备结构

Fig. 5 Structure of on-board equipments

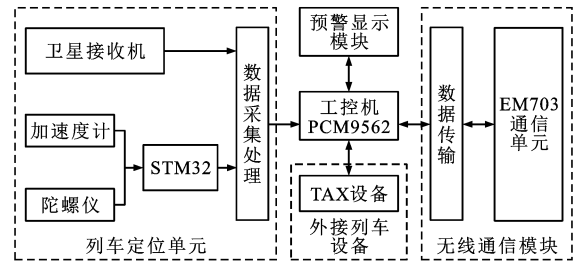


图 6 定位终端设备硬件结构

Fig. 6 Hardware structure of positioning terminal equipments

通信单元发送给卫星接收机,将接收机输出的差分卫星信息进行采集、解析和处理;将 INS 内部的加速度计和陀螺仪的信息通过 STM32 模块进行处理,将处理之后的数据与卫星接收机输出的差分信息在主处理器中进行融合;通过数据传输模块发送位置报告信息,并且接收系统的提示信息;数据处理中心能够接收通过车载设备发送来的信息,包括公里标、运行速度、机车号、车次、列车编组等信息。车载设备和数据处理中心分别见图 7、8。定位系统还需要稳定可靠的软件和驱动程序与硬件结合来协调和管理各个功能的实现。定位终端设备的软件见图 9。



图 7 车载设备

Fig. 7 On-board equipment

利用多线程机制,定位终端处理部分可以进行北斗数据和 INS 数据处理、预警显示和无线传输的通信处理等多个功能。为了确保资源的合理分配与共享,线程之间采用互斥机制。

### 2.2 定位系统功能验证

定位系统工作时,地面差分基站不断向车载接收机发送差分信息,校正车载设备的定位结果。当遇到遮挡、隧道等北斗信号失锁而导致接收机无法定位时,惯性导航系统根据加速度计和陀螺仪所测数据,进行位置的推算,从而实现了列车的无缝定位。为了提高有岔区段的定位精度,采用地图匹配技术,使得定位的结果投影到地图数据库中。在列

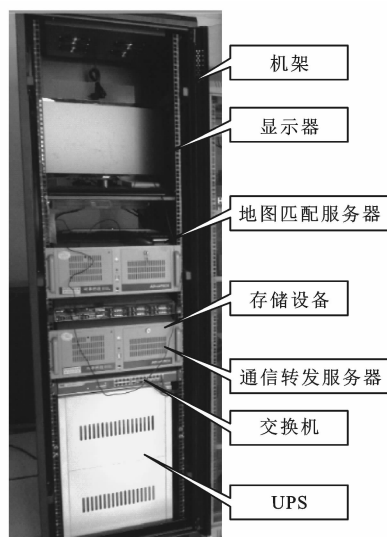


图 8 数据处理中心

Fig. 8 Data processing center

车实际运行中,要求的定位精度为 3 m,具体测试结果如下。

### 2.2.1 BDS 定位测试

天线安装在青藏铁路某站房屋顶,进行静态测试,共 1 901 个点,现场静态定位结果见图 10。实际受环境等因素影响,定位结果会有不同程度的漂移,而其收敛情况便可作为判断单点定位精度好坏的依

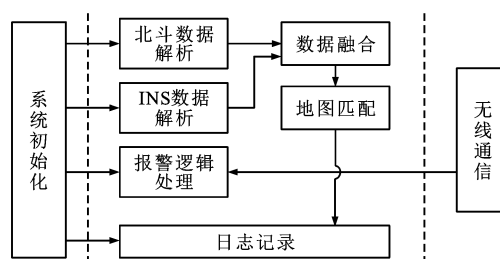


图 9 定位终端设备软件设计

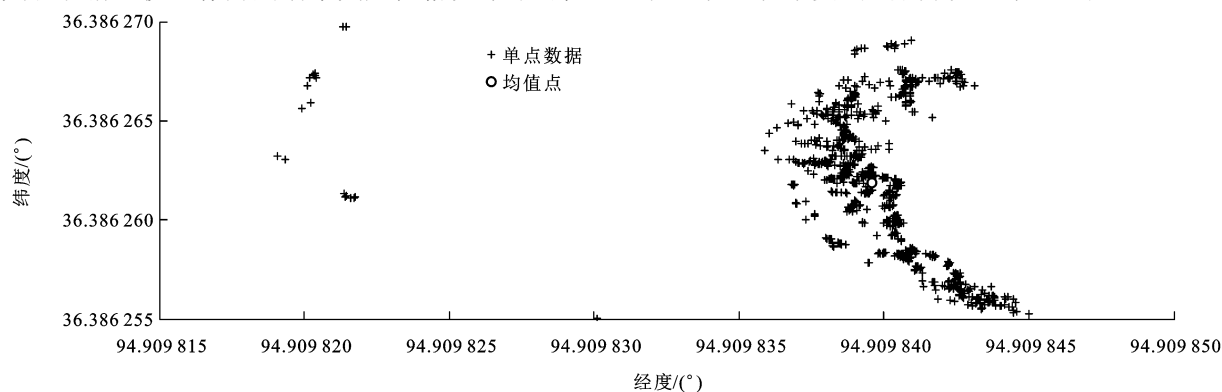
Fig. 9 Software design of positioning terminal equipments

据。由图 10 可知:单点静态定位误差整体偏小,最大为 1.957 m,平均为 0.558 m,能够满足西部铁路单点静态定位误差小于 1 m 的定位需求。

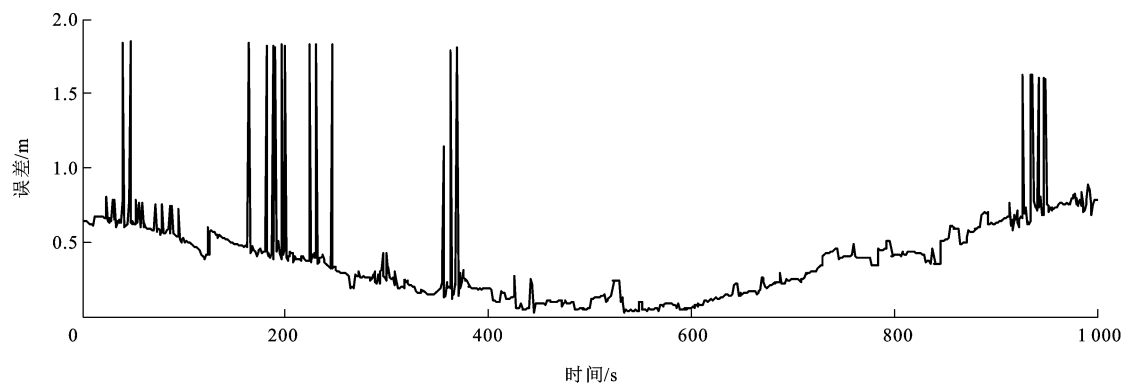
在青藏铁路某线路进行动态测试,结果见图 11,误差表示定位结果和实际线路数据的偏差,由于受到环境以及卫星信号接收情况的影响,如接收的卫星数目与卫星高度角的变化,都会使定位的结果有不同程度的波动。由图 11 可知:动态定位误差最大为 2.181 m,最小为 0.001 m,平均为 0.258 m,能够满足西部铁路动态定位误差小于 3 m 的要求。

### 2.2.2 BDS/INS 组合定位测试

由于应用了 BDS/INS 组合定位技术,使得列车在运动过程中受到遮挡或进入隧道时,BDS 一旦失



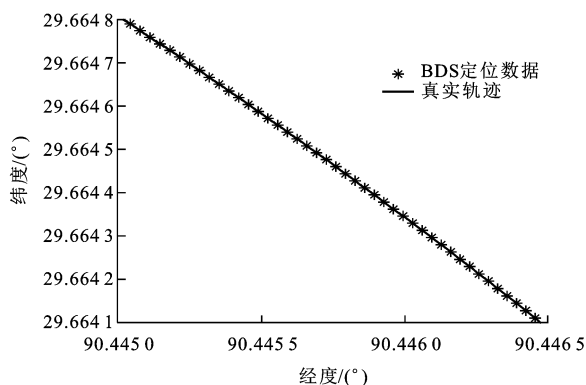
(a) 定位经纬度



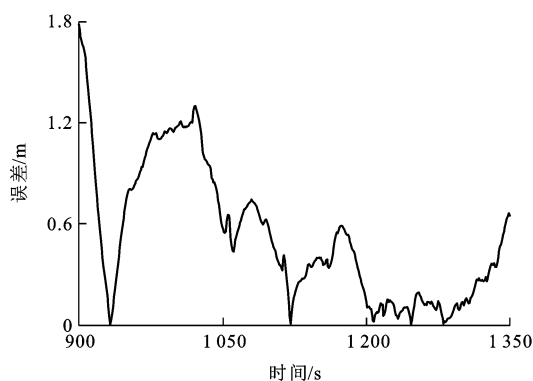
(b) 定位误差

图 10 现场静态定位结果

Fig. 10 Static positioning result in field



(a) 定位经纬度



(b) 定位误差

图 11 现场动态定位结果

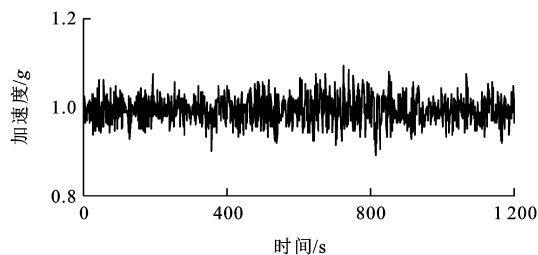
Fig. 11 Dynamic positioning results in field

效,INS(主要由加速度计和陀螺仪构成)可以起到辅助定位的作用。

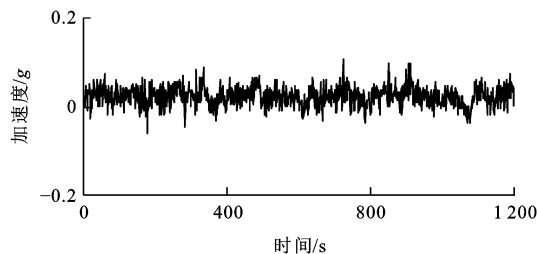
图 12 为试验采集的加速度计原始数据,通过对三轴加速度的积分,可以短时间内获得较准确的列车运行速度和位移。图 13 为采样频率为 123 Hz 的陀螺仪采集的原始数据。当 BDS 失效时,对加速度计和陀螺仪数据进行推算,结果见图 14,其中直线表示用 INS 进行推算的结果(由于 INS 累积误差大,因而在每秒起始时,由 BDS 的定位结果进行校正),“+”表示 BDS 的定位结果。BDS 在点 E 和 F 之间由于遮挡导致信号无法接收,持续时间为 11 s,此时通过对加速度计和陀螺仪所得参数的推算,最终得到列车的运行位置。

### 2.2.3 地图匹配测试

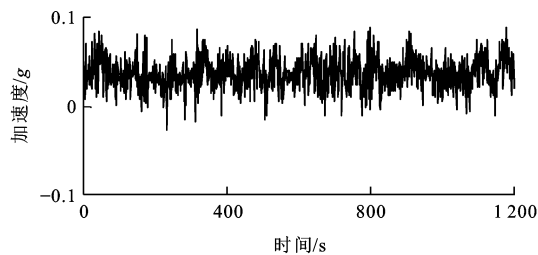
为了提高定位的精度,使得定位结果更加接近真实的线路数据,在有岔区段,首先采用曲线拟合的方法判断其定位点所在区段,然后再将该点直接投影到地图数据库中。在地图数据库中投影得到的数字地图点间相距 10 m,与实际点的误差不超过 0.1 m。在实际的交分道岔路段上进行试验,结果见图 15,股道 1、2、3 表示地图数据库中的真实线路,可以看出,匹配点与真实线路基本重



(a) 横向加速度



(b) 纵向加速度



(c) 垂向加速度

图 12 加速度计采集数据

Fig. 12 Accelerator measured data

合。将匹配股道 2 上的点进行统计,共 509 个点,匹配点与真实点误差小于 3 m 即为匹配正确,成功匹配的点有 502 个,正确率为 98.6%,达到较好的匹配效果。

## 3 结 语

(1)北斗二代卫星导航系统已经在多个领域得到广泛应用,本文针对西部低密度铁路的应用需求,研究了基于北斗二代卫星导航系统与惯性导航系统的组合定位技术和地图匹配技术,搭建了适合西部低密度铁路的列车定位系统。通过对北斗接收机和惯性传感器的组合,实现了列车的连续无缝定位,将定位数据和地图数据库进行地图匹配,提高了定位的精度。在此基础上,在硬件和软件层面对面向西部铁路的列车定位系统做了详细的设计,通过对定位系统的功能测试,证明定位精度能够满足西部低密度铁路的定位需求。

(2)目前,北斗导航技术已逐步在铁路中得到应用,但单纯依靠其作为主要定位手段,仍然无法满足高精度的需求,如高山、隧道等遮挡影响,因而除了结合 INS 惯性导航、地图匹配等技术作为辅助手段



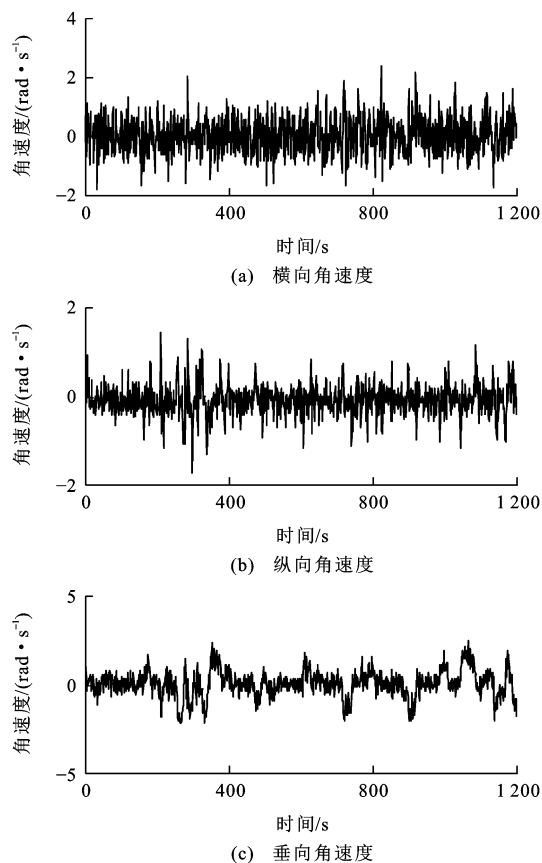


Fig. 13 Gyroscope measured data

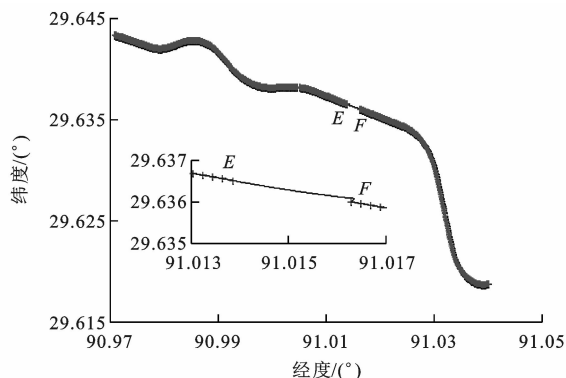


Fig. 14 Integrated positioning result of BDS/INS

外,可以研究基于多源传感器融合的新方法,采取低成本、高效率的手段来进一步提高定位的精度和可靠性。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] LOPEZ I, AGUADO M, PINEDO C. A step up in European rail traffic management systems: a seamless fail recovery scheme[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(2): 52-59.
- [2] MANSSON D, THOTTAPILLIL R, BACKSTROM M, et al.

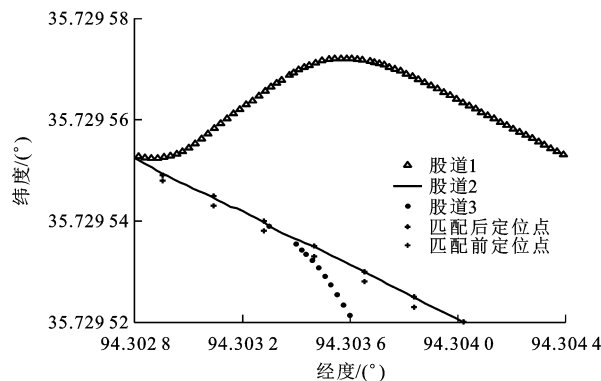


Fig. 15 Test result of map matching

Vulnerability of European rail traffic management system to radiated intentional EMI[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2008, 50(1): 101-109.

- [3] MIGLIANICO D. Fleet migration towards ETCS—challenge and experience gathered[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 557-566.
- [4] SOLAS G, MENDIZABAL J, VALDIVIA L, et al. Development of an advanced laboratory for ETCS applications[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 1894-1903.
- [5] ZIMMERMANN A, HOMMEL G. Towards modeling and evaluation of ETCS real-time communication and operation[J]. Journal of Systems and Software, 2005, 77(1): 47-54.
- [6] LAROCHE F, GUIHÉRY L. European rail traffic management system (ERTMS): supporting competition on the European rail network?[J]. Research in Transportation Business and Management, 2013, 6: 81-87.
- [7] KON Y. The new train control system ATACS by using ADS technologies[C]//IEEE. Proceedings of the 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System. New York: IEEE, 2002: 206-210.
- [8] RESOR R R, SMITH M E, PATEL P K. Positive train control (PTC): calculating benefits and costs of a new railroad control technology[J]. Journal of the Transportation Research Forum, 2010, 44(2): 1-19.
- [9] LINDSEY R. Positive train control in North America[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2009, 4(4): 22-26.
- [10] PALACIOS R, HANSMAN R J. Filtering enhanced traffic management system (ETMS) altitude data[J]. Metrology and Measurement Systems, 2013, 20(3): 453-464.
- [11] ZHENG Yu-heng, CROSS P. Integrated GNSS with different accuracy of track database for safety-critical railway control systems[J]. GPS Solutions, 2012, 16(2): 169-179.
- [12] 杨元喜.北斗卫星导航系统的进展、贡献与挑战[J].测绘学报, 2010, 39(1): 1-6.  
YANG Yuan-xi. Progress, contribution and challenges of compass/Beidou satellite navigation system[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2010, 39(1): 1-6. (in Chinese)
- [13] 张飞舟,何汉贤.基于北斗系统的物联网应用评述[J].导航定位学报, 2014, 2(2): 6-12.

- ZHANG Fei-zhou, HE Han-xian. The comment of the application of IOT based on BDS[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2014, 2(2): 6-12. (in Chinese)
- [14] 杨 杰. 北斗导航系统在农业领域的应用分析[J]. 科技与创新, 2015(13):102-103.
- YANG Jie. Analysis of the application of Beidou navigation system in agricultural field[J]. Science and Technology and Innovation, 2015(13): 102-103. (in Chinese)
- [15] 杨殿阁,连小珉,张 涛,等. 基于北斗卫星的车辆组合导航系统开发[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(5): 856-859.
- YANG Dian-ge, LIAN Xiao-min, ZHANG Tao, et al. Integrated vehicular navigation system based on the Beidou satellites [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(5): 856-859. (in Chinese)
- [16] 杨 军,曹 冲. 我国北斗卫星导航系统应用需求及效益分析[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2004,29(9):775-778.
- YANG Jun, CAO Chong. Market forecast and benefit analysis of application of Beidou navigation satellite system in China [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2004, 29(9): 775-778. (in Chinese)
- [17] NOURELDIN A, EL-SHAFIE A, BAYOUMI M. GPS/INS integration utilizing dynamic neural networks for vehicular navigation[J]. Information Fusion, 2011, 12(1): 48-57.
- [18] 刘 江,蔡伯根,王云鹏. 基于 GNSS/DSRC 融合的协同车辆定位方法[J]. 交通运输工程学报,2014,14(4):116-126.
- LIU Jiang, CAI Bai-gen, WANG Yun-peng. Cooperative vehicle positioning method based on GNSS/DSRC fusion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2014, 14(4): 116-126. (in Chinese)
- [19] ZHANG Tao, XU Xiao-su. A new method of seamless land navigation for GPS/INS integrated system[J]. Measurement, 2012, 45(4): 691-701.
- [20] HE Xiu-feng, LIU Jian-ye. Analysis of lever arm effects in GPS/IMU integration system[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 19(1): 59-64.
- [21] SAAB S S. A map matching approach for train positioning part II: application and experimentation[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(2): 476-484.
- [22] RAZAVI A, GEBRE-EGZIABHER D, AKOSD M. Carrier loop architectures for tracking weak GPS signals[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2008, 44(2): 697-710.
- [23] 张 涛,杨殿阁,李克强,等. 车辆导航中带匹配度反馈的模糊地图匹配算法[J]. 清华大学学报:自然科学版,2009,49(2): 277-280.
- ZHANG Tao, YANG Dian-ge, LI Ke-qiang, et al. Fuzzy map-matching algorithm with confidence feedback for vehicle navigation[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(2): 277-280. (in Chinese)
- [24] 吴俊伟,曾启明,聂莉娟,等. 惯性导航系统的误差估计[J]. 中国惯性技术学报,2002,10(6):1-5.
- WU Jun-wei, ZENG Qi-ming, NIE Li-juan, et al. Estimation of the INS's errors[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2002, 10(6): 1-5. (in Chinese)
- [25] 刘 江,蔡伯根,王 剑. 地图辅助北斗/惯导组合的列车轨道占用估计方法[J]. 铁道学报,2014,36(3):49-58.
- LIU Jiang, CAI Bai-gen, WANG Jian. Map-aided BDS/INS integration based track occupancy estimation method for railway trains[J]. Journal of the China Railway Society, 2014, 36(3): 49-58. (in Chinese)