

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2019.02.024

# 基于卡尔曼滤波的组合定位技术在现代有轨电车的应用研究

刘瑞豪, 何涛

(兰州交通大学, 兰州 730070)

**摘要:** 针对现代有轨电车定位系统实时性、高精度度等要求, 结合有轨电车工程设计的需求, 设计一种新的有轨电车定位系统。系统采用组合定位方式, 以 GPS 定位为主、DR/RFID 定位为辅助, 采用分段式组合定位技术, 在满足有轨电车工程中造价低的特点的同时确保列车运行安全。利用坐标转换对数据进行融合, 再通过卡尔曼滤波对定位数据进行优化, 从而有效地提高有轨电车的定位精度。实验测试结果表明, 该方法能够有效地减少有轨电车的定位误差, 提高定位精度和系统稳定性, 满足行车要求。

**关键词:** 现代有轨电车; 组合定位; GPS 定位技术; 卡尔曼滤波

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2019)02-0138-04

## Application of Combined Location Technology Based on Kalman Filtering to Modern Trams

LIU Ruihao, HE Tao

(Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070)

**Abstract:** A new tram positioning system aimed at the real-time and high accuracy requirements of modern tram positioning systems, combined with the requirements of tram engineering design, is proposed in this paper. A combined positioning method is adopted for the system, with a GPS and DR/RFID used to obtain the main and auxiliary positions, utilizing sectional combined positioning technology that has a low associated cost and ensures the safety of train operation. In this paper, a coordinate transformation is used to combine the data, and a Kalman filter is used to optimize the positioning data, which effectively improves the positioning accuracy of the trams. The experimental results demonstrate that this method can effectively reduce the positioning error of modern trams. Thus, the positioning accuracy and system stability can be improved to meet the driving requirements.

**Keywords:** modern tram; combination location; coordinate transformation; GPS positioning technology; Kalman filtering

现代有轨电车作为新型城市轨道交通的重要组成部分之一, 越来越受到人们的喜爱。相比于公交车, 现代有轨电车具有更高的舒适性, 更大的运量, 更加环保<sup>[1]</sup>, 而有轨电车的造价和建设周期也远远低于地

铁。现代有轨电车传统的定位方式为 GPS、感应环线、轨道电路等方式, 而直接将传统的 GPS 定位用在现代有轨电车的应用, 仍然存在较多问题。以下介绍组合定位的软件功能设计和实现。

### 1 设计需求

因为现代有轨电车运行于城市道路中, 树、高楼、天桥等都会遮挡 GPS 信号的接收, 从而影响定位精度, 并且由于防盗防干扰的因素不适合设置过多的轨旁设备, 单一的 DR 定位技术也会随着时间的累积造成误差不断提高, 因此需要组合定位的方式进行实时、

收稿日期: 2018-05-17 修回日期: 2018-06-26

第一作者: 刘瑞豪, 男, 硕士研究生, 研究方向为交通信息工程及控制, 303420566@qq.com

导师简介: 何涛, 男, 教授, 研究生导师

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB1201003-020); 甘肃省教育部科技项目(2015B-041)

精确定位。

现代有轨电车在保证安全的前提下，造价低是其另一重要特点。因此不适用于大面积铺设环线和轨道电路，又因为不同路段有着不同的定位精度需求，因此宜采用分段式组合定位方式进行定位。在普通区段，以 GPS 定位方式为主，当 PDOP 值(卫星的分布空间几何强度因子)大于预定值<sup>[2]</sup>，也就是定位精度误差大于预定误差后，自动切换到 DR 定位。在道岔区段，因为对定位精度有更高的要求，因此采用 GPS/RFID 组合定位方式进行定位，在接收到 RFID 信号后自动切换。

## 2 定位方案设计

### 2.1 GPS 与航位推算组合定位

在 GPS 定位存在盲区后，需要切换另外一种定位方式进行辅助定位，信号恢复后再切换为 GPS 定位方式。因为有轨电车车辆空间的限制，因此需要减少车辆设备，考虑到定位所需数据的兼容性，GPS 定位报文中接收到的经纬度、速度、方向等数据可以直接为航位推算定位方式提供数据，无需额外添加其他传感器，这样就能够有效地解决 GPS 定位存在盲区的问题。

航位推算定位技术需要获取初始点坐标，利用该点坐标通过已知的速度、方向来计算下一时刻位置，在短时间内具有高精度的特点，但是随着时间的增加会提高误差，因此需要不断地进行误差修正。GPS 定位通过对 PDOP 值判断定位是否有效，在失效前一刻作为 DR 定位的初始位置，在有效时每隔一段时间对 DR 定位误差进行校正，两种定位方式相互校正相互弥补。具体流程如图 1 所示。

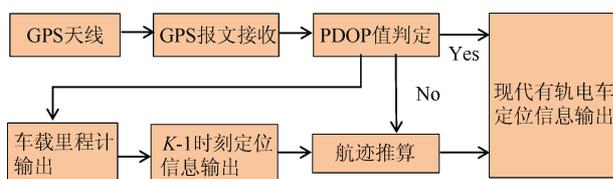


图 1 GPS 与航位推算组合定位流程

Fig. 1 GPS and position calculation combined with position

### 2.2 GPS 与 RFID 组合定位

射频识别(radio frequency identification, RFID)通过射频信号自动识别目标信号对象并且能够从目标对象中提取相关信息的技术，分为有源、半有源、无源 3 种类型<sup>[3]</sup>。RFID 发送特定频率的射频信号，在现代有轨电车的车载标签进入有效的工作区域范围内后产

生感应电流，激活电子标签的同时发送自身的编码信息，阅读器读取并解码后发送有效信息至信标主机进行相关处理。为了提高有轨电车在道岔区段的定位精度，达到有轨电车在道岔区段的定位需求，提出了以 RFID 为辅助的组合方式，在特定区域对 GPS/DR 定位结果进行校正。具体流程如图 2 所示。

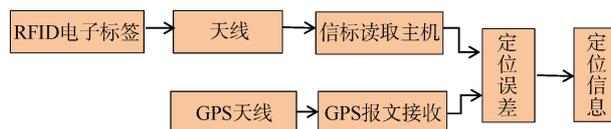


图 2 GPS 与 RFID 组合定位流程

Fig. 2 Combination location by GPS and RFID

### 2.3 定位方案的综合设计

由于有轨电车在不同的区段对定位的精度有着不同的需求，不同于其他轨道交通方式，现代有轨电车仅在道岔区段处设有进路，因此电车的位置影响着道岔的转换时机，高精度的定位方式能够提高现代有轨电车在道岔区段的运行效率。所以采用分段式定位方式，具体框图如图 3 所示。

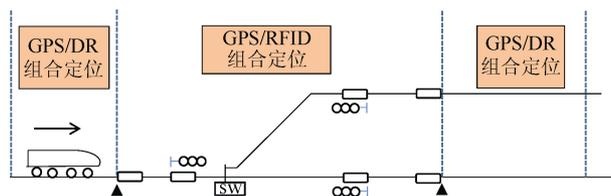


图 3 GPS 与 RD/RFID 组合分段式定位

Fig. 3 Piecewise positioning of the GPS and RD/RFID combination

在无岔区段采用 GPS/DR 组合定位方式，在有岔区段采用 GPS/DR 为主、RFID 为辅的组合定位方式，在有轨电车的 RFID 读写器检测到标签后，自动对 GPS/DR 定位输出信息进行校正，同时信号机亮红灯，该电车获得目前道岔区段控制权，防止后方电车冒进，在有轨电车进入道岔离去区段检测到电子标签后，信号机亮绿灯，释放该区段并释放该区段的控制权。RFID 电子标签通过车载安全计算机对 GPS 获取的位置信息进行校正和处理，获取精确位置信息后发送给轨旁道岔控制器和控制中心，轨旁道岔控制器根据从控制中心获取的线路信息和电车运行方向来判断道岔区段的占用和出清；同时为了保证位置信息的安全性和可靠性，同一地点 RFID 应冗余设置。这种定位方式不仅提高了定位精度及行车效率，而且可以显示有轨电车的区

段占用情况,节省了铺设轨道电路的费用,降低成本的同时提高了安全性。

### 3 数据处理算法

#### 3.1 坐标转换

GPS 接收机接收到 NMEA0183 报文,提取出需要的 GPGGA 与 GPGSA 报文,从 GPS 报文中可以获取采集到的经度和纬度坐标信息,在航位推算时无法直接使用这些坐标,因此要统一坐标,将经纬度坐标转换为东北天坐标<sup>[4]</sup>。

大地坐标系( $L, B, H$ )到直角坐标系( $X, Y, Z$ )转换关系为<sup>[5]</sup>

$$\begin{cases} X = (N + H) \cos B \cdot \cos L \\ Y = (N + H) \cos B \cdot \sin L \\ Z = [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{cases} \quad (1)$$

直角与东北天坐标转换,以 GPS 失效前一刻作为起点,即东北天坐标原点,通过坐标原点且指向天顶的法线作为  $z$  轴,子午线方向为  $y$  轴,向北为正<sup>[6]</sup>, $x$  轴指向东,且与  $y, z$  垂直,正东为正,则

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin B \cos L & -\sin L & \cos B \cos L \\ -\sin B \sin L & \cos L & \cos B \sin L \\ \cos B & 0 & \sin B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (N + H) \cos B \cos L \\ (N + H) \cos B \sin L \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{bmatrix} \quad (2)$$

令

$$\begin{bmatrix} \hat{X} \\ \hat{Y} \\ \hat{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (N + H) \cos B \cos L \\ (N + H) \cos B \sin L \\ [N(1 - e^2) + H] \sin B \end{bmatrix} \quad (3)$$

可由大地坐标得到东北天坐标,即:

$$\begin{cases} x = -\sin L \cdot \hat{X} + \cos L \cdot \hat{Y} \\ y = -\sin B \cdot \cos L \cdot \hat{X} - \sin L \cdot \sin B \cdot \hat{Y} + \cos B \cdot \hat{Z} \\ z = \cos B \cdot \cos L \cdot \hat{X} + \cos B \cdot \sin L \cdot \hat{Y} + \sin B \cdot \hat{Z} \end{cases} \quad (4)$$

#### 3.2 运动模型

因为有轨电车在正常运行过程中,除去平交道口路段外基本不受外界过多干扰,平交道口接近区段有电子标签对定位误差进行修正从而不考虑平交道口的干扰,因此选用 Singer 模型,能够较好地描述匀速、匀加速、匀减速的运动状态,且算法不复杂。

Singer 模型的数学表达式为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ \dot{y}(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ y(t) \\ \ddot{x}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (5)$$

#### 3.3 数据融合

由于模型建立选用的是 Singer 模型,因此,卡尔曼滤波的状态方程为<sup>[5]</sup>

$$X'(t) = AX(t) + Bw(t) \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} X &= [s \quad v \quad a]^T \\ B &= [0 \quad 0 \quad 1]^T \\ A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

对于航位推算,观测向量为加速度  $a$ ,因此相应的观测方程为

$$\begin{aligned} a_D(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(t) \\ v(t) \\ a(t) \end{bmatrix} + N_D(t) \\ Z_D(t) &= H_D X(t) + N_D(t) \end{aligned} \quad (8)$$

对于 GPS 定位,观测向量为速度  $v$ ,对应的观测方程为

$$\begin{aligned} V_G(t) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s(t) \\ v(t) \\ a(t) \end{bmatrix} + V_G(t) \\ Z_G(t) &= H_G X(t) + V_G(t) \end{aligned} \quad (9)$$

利用联邦卡尔曼滤波方式,把 GPS 接收的信息与航位推算得到的信息分别送入滤波器中对数据进行处理,然后再把输出的数据输入主滤波器进行最有效估计。

### 4 验证与分析

#### 4.1 试验设备

试验设备包括 GPS 接收模块、上位机、天线,提前设定好 GPS 路标,路标的坐标作为航位推算的误差校正基准坐标。

#### 4.2 数据处理的方法对比

选取一段跑车路线,围绕学校线路长为 7.2 km,行驶最高速度为 16 m/s,平均速度为 10 m/s,车辆行驶时间为 720 s。用航位推算的方法计算从起点到终点的累计行驶里程,利用计算仿真输出数据直接推算,再将数据通过卡尔曼滤波后进行推算和输出。选取其中匀速行驶的 400 m,速度为 10 m/s,选择量测点

$N=40$ , 采样周期为  $T=1$  s, 卫星定位数据的滤波结果如图 4 所示。

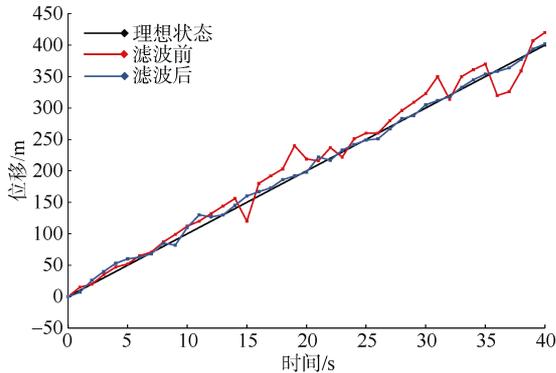


图 4 卡尔曼滤波仿真

Fig. 4 Kalman filtering simulation

航位推算会随着时间的增长误差增大, 因此需要通过卡尔曼滤波对数据进行处理, 处理后的数据误差明显减少, 但是依然会随着里程的累计而增加, 相比之下, 数据通过卡尔曼滤波处理后与实际的里程最接近, 误差相对最小。滤波前后误差比较见表 1。

表 1 滤波前后误差比较

Tab. 1 Error comparison before and after filtering m

滤波情况	误差均值	误差标准差
滤波前	2.31	29.492 2
GPS 单独滤波	1.02	12.932 4
组合滤波	0.6	7.630 1

由表可知, 组合滤波后对定位的精度和定位系统稳定性都有所提升。

## 5 结论

通过高精度的有轨电车定位方式, 能够有效地提升现代有轨电车的运行效率和安全性。基于 GPS/DR 的定位方式, 在大部分路段采用 GPS 定位, 当 GPS 信号受到遮挡时, 利用航位推算定位方式进行辅助定位, 在对定位精度有较高要求的区段, 如道岔接近区段时, 利用 RFID 对定位信息进行校正, 进一步提升定位精度。采用 Singer 模型对有轨电车进行建模, 利用联邦卡尔曼滤波对数据进行处理, 经过实验验证, 减小了定位误差也提升了系统的稳定性。因此 GPS/DR 组合定位的方式能够实现连续、实时、精确的定位。

### 参考文献

[1] 吴梦芹. 新型轨道交通方式之现代有轨电车系统发展

对策研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.

WU Mengqin. Research on development countermeasure for modern trams system of new urban rail transit[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.

[2] 武文平, 王瑞峰. GPS-ZigBee 组合定位在现代有轨电车定位中的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(5): 133-136.

WU Wenping, WANG Ruifeng. Application of GPS-ZigBee combined positioning in modern tram location[J]. Urban mass transit, 2016, 19(5): 133-136.

[3] 李成渊. 射频识别技术的应用与发展研究[J]. 无线互联科技, 2016(20): 146-148.

LI Chengyuan. Research on the application and development of RFID technology[J]. Wireless interconnected technology, 2016(20): 146-148.

[4] 杨国元, 史天运, 方凯, 等. 铁路客运管理信息系统总体架构及关键技术研究[J]. 铁路计算机应用, 2016, 25(3): 22-26.

YANG Guoyuan, SHI Tianyun, FANG Kai, et al. General framework and key technologies of railway passenger transport management information system[J]. Railway computer application railway computer, 2016, 25(3): 22-26.

[5] 陈俊英. 参心坐标系测绘成果向 2000 国家大地坐标系转换的研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.

CHEN Yingjun. Study on the transformation of reference-ellipsoid-centric suvering and mapping results to China geodetic coordinate system 2000[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.

[6] 夏飞, 罗文彬. GAMIT/GLOBK 软件中的坐标参考系及其相互转换[J]. 四川水泥, 2017(9).

XIA Fei, LUO Wenbin. Coordinate reference system in GAMIT/GLOBK software and their mutual conversion[J]. Sichuan cement, 2017(9).

[7] 蒋捷. 现代有轨电车车载系统的仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.

JIANG Jie. Research on the simulation of the modern tram vehicle system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

[8] 徐鼎, 张静. 现代有轨电车行车控制方案设计[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(6): 167-170.

XU Ding, ZHANG Jing. Design of modern tram vehicle control scheme[J]. Urban rapid rail transit, 2013, 26(6): 167-170.

[9] 黄凯, 周在福, 陈祥猷. 基于精确定位的现代有轨电车信号系统[C]//中国智能交通年会大会. 2016.

HUANG Kai, ZHOU Zaifu, CHEN Xiangxian. Modern tram signal system based on precise positioning[C]//China Annual Conference on Intelligent Transportation, 2016.

[10] 辛帆. 有轨电车车载子系统仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.

XIN Fan. Research on vehicle subsystem simulation of tram[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.

(编辑: 王艳菊)