

# 基于惯性导航的城市轨道交通 CBTC 无线环境监测系统网格连续定位技术研究<sup>\*</sup>

李宏宇<sup>1</sup> 朱 俊<sup>2</sup> 王历珩<sup>3</sup> 吴 杰<sup>3</sup>

(1. 上海伽易信息技术有限公司, 200233, 上海; 2. 上海申通地铁集团有限公司博士后科研工作站, 201103, 上海;  
3. 上海地铁维护保障有限公司通号分公司, 200235, 上海)

**摘 要** [目的] 由于城市轨道交通现有列车信标次级定位系统的定位精度为 300 m, 不能满足无线环境监测网格的高精准定位需求, 同时 GPS (全球定位系统) 和北斗卫星导航系统不能用于地下轨道定位, 因此, 需对城市轨道交通 CBTC (基于通信的列车控制) 无线环境监测网格连续定位技术进行深入研究。[方法] 在城市轨道交通现有列车信标次级定位系统的基础上, 采用信标辅助训练的惯性导航技术, 通过多传感器融合定位算法, 将惯性导航模块的传感器数据和 ATS (列车自动监控) 系统的信标数据相融合, 实现城市轨道交通无线环境监测网格的连续定位。同时采用回归预测算法进行模型离线训练, 用于提高城市轨道交通无线环境监测网格连续定位的准确性。[结果及结论] 该系统可以实现无线环境监测网格的连续、实时定位, 支持 CBTC 无线环境监测网格在隧道内部、高架下方, 以及途经高楼林立和树木遮挡等多种复杂环境下的定位应用, 定位精度达 10 m, 满足 CBTC 无线环境监测系统的定位需求, 全面保障了城市轨道交通 CBTC 信号系统的安全。

**关键词** 城市轨道交通; CBTC 无线环境监测系统; 网格连续定位技术; 惯性导航

**中图分类号** U231.7

**DOI**: 10.16037/j.1007-869x.2024.08.050

## Grid Continuous Positioning Technology for Urban Rail Transit CBTC Wireless Environment Monitoring System Based on Inertial Navigation

LI Hongyu<sup>1</sup>, ZHU Jun<sup>2</sup>, WANG Lizhou<sup>3</sup>, WU Jie<sup>3</sup>

(1. Shanghai Jiayi Information Technology Co., Ltd., 200233, Shanghai, China; 2. Postdoctoral Research Workstation, Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., 201103, Shanghai, China; 3. Signal Branch of Shanghai Metro Maintenance and Support Co., Ltd., 200235, Shanghai, China)

**Abstract** [Objective] The current secondary positioning system of urban rail transit train beacons has a positioning ac-

curacy of 300 meters, failing to meet the high-precision positioning requirements of wireless environment monitoring grid. Additionally, GPS (global positioning system) and the Beidou Satellite Navigation System are not suitable for underground rail positioning. Therefore, it is necessary to conduct in-depth research on continuous positioning technology for urban rail transit CBTC (communication-based train control) wireless environment monitoring grid. [Method] Building on the existing urban rail transit train beacon secondary positioning system, an inertial navigation technology enhanced by beacon-assisted training is adopted. By utilizing a multi-sensor fusion positioning algorithm, the sensor data from the inertial navigation module is integrated with the beacon data from the ATS (automatic train supervision) system, thus achieving the continuous positioning of wireless environment monitoring grid in urban rail transit. Additionally, a regression prediction algorithm is used for offline model training to enhance the accuracy of continuous positioning for the urban rail transit wireless environment monitoring grid. [Result & Conclusion] The proposed methods can achieve continuous and real-time positioning of wireless environment monitoring grid, supporting CBTC wireless environment monitoring grid in tunnels, beneath elevated structures, and in complex environments where metro train passing through areas with tall buildings and tree cover. The positioning accuracy reaches 10 m, meeting the positioning requirements of the CBTC wireless environment monitoring system, and fully ensuring the safety of the urban rail transit CBTC signaling system.

**Key words** urban rail transit; CBTC wireless environment monitoring system; grid continuous positioning technology; inertial navigation

城市轨道交通 CBTC (基于通信的列车控制) 信号系统采用无线方式传输, 由于无线环境复杂, 存

<sup>\*</sup> 上海申通地铁集团有限公司博士后科研工作站项目 (LS21R063)

在大量外部干扰信号,可能影响列车安全运行,因此 CBTC 无线环境监测越来越重要。CBTC 无线环境监测时需要构建城市轨道交通线路的大数据无线图谱,用于无线环境实时监测和外部无线干扰分析定位。在大数据无线图谱构建过程中,需对城市轨道交通沿线按照 10 m 间隔进行网格划分,并根据监测数据进行无线图谱动态更新。准确获得无线监测网络的连续位置是 CBTC 无线环境监测的前提条件。

城市轨道交通线路多建于地下,无法采用 GPS (全球定位系统)、北斗卫星导航系统对其进行无线监测网格定位。目前,城市轨道交通 CBTC 信号系统广泛采用基于计轴的次级列车定位子系统。为了提升列车的定位精度,以及降低计轴设备的运维成本,上海申通地铁股份有限公司引入基于信标的列车次级定位系统,但在车站非停车轨区段,信标多按 300 m 间隔进行布置,无法满足 CBTC 无线环境监测系统网格定位的连续性和高精度需求<sup>[1]</sup>。

本文提出一种利用城市轨道交通信标辅助训练的惯性导航技术,将惯性导航定位与城市轨道交通信标定位相融合,同时采用回归预测算法进行模型离线训练,可以大幅提升城市轨道交通无线监测网格定位精度,满足 CBTC 无线环境监测系统网格定位需求,全面保障城市轨道交通 CBTC 信号系统的运行安全。

## 1 CBTC 无线环境监测系统架构

基于惯性导航的城市轨道交通 CBTC 无线环境监测系统,主要由传感器数据实时采集、算法模型训练及多传感器融合定位算法等三个模块组成。

列车的 CBTC 无线环境监测设备上配置有惯性导航模块,可利用该模块的三轴加速度计,检测列车在导航坐标系中的三轴加速度信号和角速度信号并将其输出至数据实时采集模块中。三轴包括  $x$  轴、 $y$  轴与  $z$  轴,其中: $x$  轴为列车运行方向, $y$  轴为列车横向, $z$  轴为列车竖向。三轴加速度可以实时表征列车在运行过程中的直线运行、上下坡运行及隧道运行等状态<sup>[2]</sup>。

通过算法模型训练,即基于线性回归算法进行模型离线训练,可以提高模型输出的准确性<sup>[3,4]</sup>。

多传感器融合定位算法利用卡尔曼滤波算法<sup>[5]</sup>,将惯导传感器数据和 ATS(列车自动监控)信号信息融合,进行组合定位测算<sup>[6]</sup>,同时连续输出

位置信息至城市轨道交通 CBTC 无线环境监测系统。

CBTC 无线环境监测系统架构如图 1 所示。

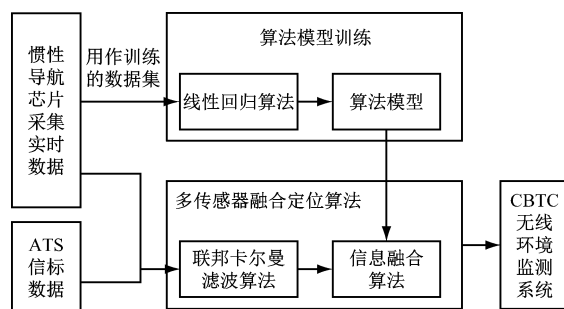


图 1 CBTC 无线环境监测系统架构图

Fig. 1 Architecture diagram of CBTC wireless environment monitoring system

## 2 CBTC 无线环境监测系统的实现

### 2.1 传感器数据实时采集

在上海轨道交通 2 号线列车上的无线环境监测设备中配置惯性导航模块,当列车运行时,该模块可以实时采集列车三轴的加速度、角加速度信号值,同时通过 ATS 系统监听接口实时获取 ATS 系统的信标数据。

1) 惯性导航模块的传感器数据主要包括时间、 $x$  向加速度、 $y$  向加速度、 $z$  向加速度、 $x$  向角速度、 $y$  向角速度、 $z$  向角速度、 $x$  向磁强度、 $y$  向磁强度及  $z$  向磁强度。惯性导航数据样本如表 1 所示。

2) ATS 系统的信标数据主要包括时间、数据源、目的地、协议、长度及内容。ATS 系统信标数据样本如表 2 所示。

### 2.2 多传感器融合定位算法

选择上海轨道交通 A 车站和 B 车站进行测试,绘制其  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向加速度以及列车运行速度曲线,并通过类似联邦卡尔曼滤波算法的加权平均法计算列车运行速度曲线。列车三轴加速度曲线如图 2 所示。列车运行速度曲线如图 3 所示。

由图 2 和图 3 可以看出:列车先加速运行,接着匀速,最后减速,这符合列车运行实际情况。通过上述方法可计算得到列车运行距离,将该距离转化为列车位置,即可获取列车所在的网格位置信息。

列车运行距离转化为列车位置的过程如下:

1) 列车从 A 车站驶向 B 车站。通过百度地图可知,A 车站经度为  $121.297^{\circ}$ ,纬度为  $31.2675^{\circ}$ ,两个车站之间的距离为 1 620 m。将两个站点之间的

表 1 惯性导航数据样本  
Tab.1 Inertial navigation data sample

时刻	加速度/(m/s <sup>2</sup> )			角速度/(rad/s)			磁感应强度/10 <sup>-7</sup> T		
	x 向	y 向	z 向	x 向	y 向	z 向	x 向	y 向	z 向
2021-12-16T01:15	0.039 547 300	0.525 091 8	-9.712 015	-0.000 772	0.003 826 3	-0.001 467	335.212 64	-140.325 20	345.820 71
2021-12-16T01:15	0.041 004 159	0.520 707 9	-9.720 365	-0.000 949	0.003 706 8	-0.001 495	335.105 08	-131.881 60	346.178 44
2021-12-16T01:15	0.160 988 554	0.527 983 4	-9.714 911	-0.000 881	0.003 778 1	-0.001 361	335.829 44	-131.441 80	345.516 42
2021-12-16T01:15	0.457 361 529	0.515 566 5	-9.716 468	-0.000 885	0.003 742 6	-0.001 462	334.777 45	-128.565 20	347.720 63
2021-12-16T01:15	0.554 342 200	0.515 327 1	-9.717 161	-0.000 730	0.003 761 5	-0.001 369	330.651 55	-133.926 60	357.637 13
2021-12-16T01:15	0.965 871 645	0.508 905 6	-9.719 505	-0.001 027	0.003 798 5	-0.001 337	322.820 99	-130.511 10	381.138 51
2021-12-16T01:15	1.081 009 833	0.513 821 7	-9.706 468	-0.001 101	0.003 652 2	-0.001 441	322.043 56	-99.332 470	380.904 00
2021-12-16T01:15	0.773 428 438	0.515 344 2	-9.724 496	-0.001 019	0.003 603 9	-0.001 506	374.168 50	-113.821 80	370.899 62
2021-12-16T01:15	0.420 098 344	0.520 039 0	-9.718 616	-0.000 845	0.003 721 9	-0.001 717	329.167 26	-143.691 20	354.385 46
2021-12-16T01:15	0.734 190 594	0.513 253 9	-9.733 895	-0.000 969	0.003 697 8	-0.001 657	299.835 12	-116.068 80	335.107 68
2021-12-16T01:15	1.080 870 679	0.381 642 2	-9.720 935	-0.000 956	0.003 855 8	-0.005 219	299.135 27	-149.178 10	332.456 48
2021-12-16T01:15	1.108 252 892	0.278 140 1	-9.758 401	-0.000 093	0.004 601 6	-0.016 737	286.272 97	-73.573 68	171.614 56

表 2 ATS 系统信标数据样本  
Tab.2 ATS system beacon data sample

时间/s	数据源	目的地	协议	头部数据	源端口	目标端口	数据报文长度
0	192.206.233.190	192.206.233.255	UDP	122	65 529	9 037	80
0	192.206.233.190	192.206.233.255	UDP	164	65 528	9 725	122
0.018 060	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	1 159	62 062	9 072	1 117
0.018 060	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	196	62 062	9 070	154
0.018 060	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	196	62 063	9 079	154
0.018 060	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	182	62 063	9 079	154
0.018 060	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	182	62 063	9 079	154
0.018 060	192.206.233.180	255.255.255.255	UDP	90	55 196	9 625	48
0.023 554	192.206.233.190	192.206.233.255	UDP	122	65 529	9 037	80
0.023 554	192.206.233.190	192.206.233.255	UDP	164	65 528	9 725	122
0.027 051	192.206.233.180	255.255.255.255	UDP	90	55 196	9 625	48
0.040 963	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	1 161	162 062	9 072	1 119
0.040 963	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	196	62 062	9 070	154
0.040 963	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	196	62 063	9 079	154
0.040 963	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	182	62 062	9 070	140
0.040 963	192.206.233.80	192.206.233.255	UDP	182	62 063	9 079	140
0.040 963	192.206.233.180	255.255.255.255	UDP	90	55 196	9 625	48
0.047 608	192.206.233.190	192.206.233.255	UDP	122	65 529	9 037	48

注:UDP 为用户数据报协议。

线路按 5 m 等分为 324 个线段,等分点采用  $K_x(x = 1, 2, \dots, 323)$  来表示。则  $K_x$  点的经度  $M_{Kx}$  可表示为:

$$M_{Kx} = (121.313\ 82 - 121.297\ 00) \times / 324.000\ 00 + 121.297\ 00 \quad (1)$$

$K_x$  点的纬度  $N_{Kx}$  可表示为:

$$N_{Kx} = (31.265\ 353 - 31.267\ 500) \times / 324.000\ 00 + 31.267\ 500 \quad (2)$$

2) 将计算得到的每个时间切片的列车运行距离,与百度地图上 A 车站和  $K_x$  点之间的距离相比

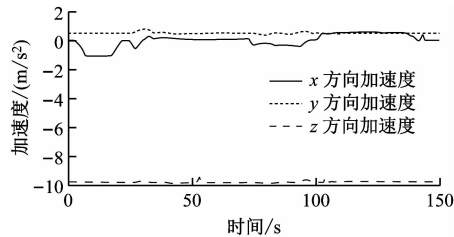


图2 列车三轴加速度曲线

Fig. 2 Diagram of train three-axis acceleration curves

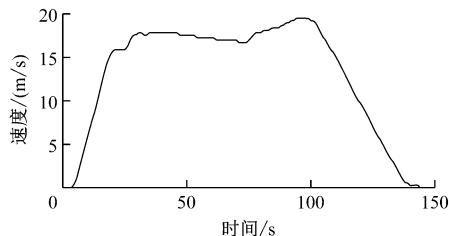


图3 列车运行速度曲线

Fig. 3 Diagram of train operating speed curve

较,当列车运行距离与百度地图上一致时,则可以将列车位置匹配至相应的  $K_x$  点, $K_x$  点的经纬度信息即为列车在该时间切片的网格位置信息。列车定位结果如表 3 所示。

表 3 列车定位结果			
Tab. 3 Train positioning results			
时刻	运行距离/ m	定位经度/ (°)	定位纬度/ (°)
2021-12-16T13:42:02	0	121.297 0	31.267 50
2021-12-16T13:42:03	0	121.297 0	31.267 50
2021-12-16T13:42:04	5	121.297 1	31.267 49
2021-12-16T13:42:05	5	121.297 1	31.267 49
2021-12-16T13:42:06	10	121.297 1	31.267 48
2021-12-16T13:42:07	10	121.297 1	31.267 48
2021-12-16T13:42:08	15	121.297 2	31.267 48
2021-12-16T13:42:09	20	121.297 2	31.267 47
2021-12-16T13:42:10	25	121.297 3	31.267 46
2021-12-16T13:42:11	30	121.297 3	31.267 46
2021-12-16T13:42:12	40	121.297 4	31.267 44
2021-12-16T13:42:13	45	121.297 5	31.267 44

选取上海某条轨道交通线路的地面线进行数据训练。回归模型训练前后列车位置误差如表 4 所示。

表 4 回归模型训练前后列车位置误差

Tab. 4 Train position errors before and after regression model training

时刻	GPS 实测		回归模型训练前		回归模型训练后		列车位置误差/m	
	经度/(°)	纬度/(°)	经度/(°)	纬度/(°)	经度/(°)	纬度/(°)	回归模型训练前	回归模型训练后
2021-12-16T01:15	31.164 40	121.396 30	31.195 9	121.427 8	31.164 1	121.393 3	19.068	3.015
2021-12-16T01:16	31.166 80	121.399 90	31.198 4	121.431 5	31.164 0	121.393 3	14.150	1.380
2021-12-16T01:17	31.166 70	121.399 95	31.197 7	121.431 0	31.163 9	121.393 3	17.453	2.478
2021-12-16T01:18	31.166 60	121.399 90	31.198 0	121.431 3	31.163 9	121.393 3	14.599	4.854
2021-12-16T01:19	31.166 50	121.399 90	31.198 1	121.431 5	31.163 8	121.393 4	13.459	4.475
2021-12-16T01:20	31.166 40	121.399 90	31.197 3	121.430 8	31.163 7	121.393 4	15.844	1.943

注:回归模型训练前、后的列车位置误差分别为该模型训练前、后的列车位置至 GPS 实测列车位置的距离。

根据测试结果,回归模型训练前后的列车位置误差对比曲线,如图 4 所示。由图 4 可见:回归模型训练前,列车位置最大误差为 43.94 m,平均误差为 25.42 m;回归模型训练后,列车位置最大误差为 5.68 m,平均误差为 3.34 m,定位精度明显提高。

根据上述测试结果,通过回归模型训练输出的列车位置精度高达 10 m,可以满足 CBTC 无线环境监测系统高精度和连续性的定位需求。

### 3 CBTC 无线环境监测系统的应用

城市轨道交通线路可能通过隧道内部、高架下

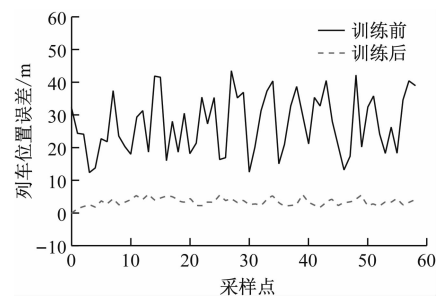


图4 回归模型训练前后的列车位置误差对比曲线

Fig. 4 Train position error comparison curves before and after regression model training



