

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313883

基于 LoRa 的应答器辅助定位系统

倪秀琳

(同方威视技术股份有限公司 北京 100084)

摘要: 应答器是列车控制系统的基本信息传输设备,用于定位时精度高、可靠性强,但其核心部件射频识别(RFID)标签受国外厂商垄断,为此设计一种基于远距离无线电(LoRa)的应答器辅助定位系统。该系统以接收信号强度指示(RSSD)达到峰值作为列车查询器到达应答器位置的判断依据,并通过包络、插值的处理方法得到准确的 RSSI 值峰值时刻,将该时刻与里程计(ODO)的里程数据结合以实现精确定位。经实验验证,当查询器速度为 15、30、60 km/h 时,系统的定位精度分别为 1.32、2.15、3.4 m,实验表明本文提出的定位方法可实现列车的辅助定位,为应答器国产化提供了一种可行的技术方案。

关键词: 列车定位;应答器;LoRa;FPGA;包络分析

中图分类号: U284.48 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3020

Balise auxiliary positioning system based on LoRa

Ni Xiulin

(Nuctech Company Limited, Beijing 100084, China)

Abstract: The balise is the basic information transmission equipment of the train control system. It has high precision and reliability when used for positioning. However, its core component, radio frequency identification (RFID) tags, is monopolized by foreign manufacturers. Therefore, a balise auxiliary positioning system based on long range radio (LoRa) is designed. The system uses the peak value of the received signal strength indication (RSSI) as the basis for judging the position of the train query to the balise, and obtains the accurate peak time of the RSSI value through the envelope and interpolation processing method. The time is combined with the mileage data of the odometer (ODO) to achieve accurate positioning. The experimental results show that the positioning accuracy of the system is 1.32 m, 2.15 m and 3.4 m respectively when the speed of the query is 15 km/h, 30 km/h and 60 km/h. The experimental results show that the positioning method proposed in this paper can realize the auxiliary positioning of the train, which provides a feasible technical scheme for the localization of the balise.

Keywords: train positioning; balise; LoRa; FPGA; envelope analysis

0 引言

列车定位系统是列车控制系统非常重要的一环。应答器作为列车控制系统中地面与列车之间信息传输的重要设备,被应用于中国列车控制系统(China train control system, CTCS)的各个级别^[1-3]。应答器能够在列车经过时响应车载查询器发送的查询信号,并向列车传输当前绝对位置信息,以及其他道路相关信息^[4]。基于应答器的定位方法虽然只能提供离散的位置信息,但是其精度高、可靠性强、设备简单,因此适合作为辅助定位系统,并配合其他定位方法进行精确定位^[5]。应答器作为轨旁设备,工作环境十分恶劣,其工作容易受到恶劣天气、异物覆盖^[6]、轨枕振动^[7]、电磁干扰^[8]等因素影响,因此应答器需要具备很强

的环境适应能力与抗干扰能力。

传统查询应答器系统以射频识别技术^[9-10](radio frequency identification, RFID)作为车载查询器与地面应答器交换信息的方式。当列车靠近应答器时,车载查询器通过电磁信号传递能量激活应答器,受激活的应答器向列车返回地面信息。在该过程中,查询器与应答器只能在距离较近时传递信息,因此在高速情景下容易出现定位丢失的情况。此外,应答器 RFID 标签使用寿命较短,且受到外国厂商垄断^[11],维护成本相当高,因此迫切需要一种能够打破国外厂商垄断的应答器方案。据此,本文以远距离无线电技术(long range radio, LoRa)作为应答器通信方案,设计一种用于列车定位的应答器辅助定位系统。该系统从

收稿日期:2023-06-12

较远距离开始采集信号,对整个过程的数据进行分析,以此提高定位精度,且该系统相较于 RFID 应答器系统具有更强的稳定性,即使发生少量丢包也不会出现定位丢失的情况。

1 LoRa

LoRa 是低功率广域网络 (low-power wide-area network, LPWAN) 中最具代表性的一项技术,在近几年开始逐渐成熟,并迅速发展起来,具有低功耗、远距离、高灵敏度、抗干扰能力强等优点^[12-13]。LoRa 信号在同等发射功率下能够进行更远距离的通信,并通过扩频技术提高接收灵敏度^[14],这使得 LoRa 相比于其他 LPWAN 技术得到了更广泛的应用。

无线通信用于列车定位最大的问题是信号的干扰,如多径效应、非视距传输^[15]等,但是 LoRa 技术能够很好的解决这些问题。依靠跳频技术,LoRa 能够通过跳转信号频率来避开某特定频段的干扰,从而提高信号传输的稳定性与可靠性。表 1 为 LoRa 与其他无线技术的性能比较^[16]。

表 1 LoRa 与其他无线通信比较

类型	ZigBee	WiFi	LoRa
通信距离	10~100 m	100 m	1~15 km
功耗	较低	高	超低
抗干扰能力	较差	一般	强
通信速度	20~250 kbps	1~11 Mbps	0.3~50 kbps

查询器与应答器的通信本质上是无线信号的通信,为了适应列车定位的工作环境,需要选取一种合适的无线技术。LoRa 技术具备远距离、抗干扰能力强、低功耗等优点,能够很好的满足列车定位的功能需求,因此本文选用 LoRa 作为应答器的通信方案。

2 定位方案设计

2.1 辅助定位方案设计

在列车行驶的过程中,查询器与应答器在相距较远的距离时就能够建立起通信,此时查询器已获取应答器绝对位置,但自身并未到达应答器位置。因此,要实现定位,需要判断查询器在哪个时刻与应答器距离最小(即判断列车何时到达应答器位置)。接收信号强度指示 (received signal strength indicator, RSSI) 法与到达时间 (time of arrival, TOA) 法都是无线测距中常用的方法^[17-18],当 RSSI 达到最大或 TOA 达到最小时即可认为查询器与应答器距离达到最小。由于 RSSI 受环境影响大,易受多径效应、非视距传输等因素干扰导致信号发生衰减^[19],因此一般情况下 RSSI 法的测距精度不如 TOA 法。但在应答器辅助定位系统中,TOA 法是通过应答器发送信号与查询器收到信号的时间差得到应答器与查询器的距离,当应答器与查询

器距离较近时,发送信号到接收信号的时间差仅仅只有几到十几纳秒,这种情况下无线通信的时延会对结果造成巨大影响。此外,辅助定位系统只需要判断在较短距离里 RSSI 值何时到达峰值即可,这种情况下环境对定位精度的影响较小,因此本文选择 RSSI 值达到峰值作为查询器到达应答器位置的判断依据。

查询器收到的应答器信号 RSSI 值一般是存在波动的,因此无法将 RSSI 值开始下降作为 RSSI 值达到峰值的依据。为了准确判断 RSSI 值的峰值时刻,需要让列车驶过应答器一段距离后再对整个过程的 RSSI 值进行分析,从而得到 RSSI 值的峰值时刻。

由于 LoRa 的通信距离最高可达 15 km,远超应答器的布设间距,为了降低系统能耗,可设置应答阈值,即当应答器收到的查询信号 RSSI 超过应答阈值后,应答器才会向查询器返回应答信号,否则应答器进入低功耗模式,其工作方式如图 1 所示。当查询器进入应答器的应答范围后,应答器开始发送应答信号,查询器接收并记录应答信号的 RSSI 值。

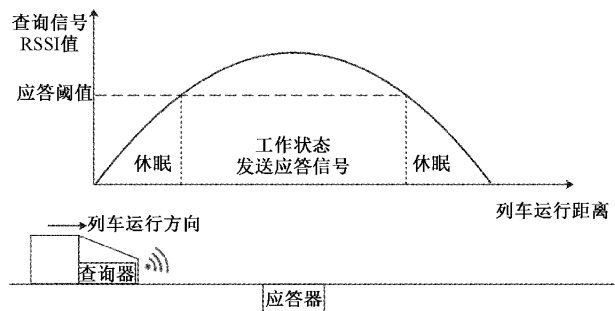


图 1 辅助定位系统方案

2.2 完整定位系统介绍

应答器只能提供离散的位置信息,无法对处于 2 个应答器之间的列车进行定位,因此需要配合其他定位方法进行连续定位。里程计 (odometer, ODO) 定位法通过测速积分,或是直接测得车轮转数,从而得到列车前进距离。该方法本质是测距,但列车的运动受到轨道约束,因此可以等效于定位。该方法设备简单,定位精度高,但是只能测得相对位置信息,需要有其他设备提供绝对位置信息。图 2 为基于 ODO 与查询应答器的列车定位系统。在该定位系统中,ODO 与查询应答器相辅相成:ODO 提供了列车在 2 个应答器之间运行时连续的位置信息,而查询应答器提供绝对位置信息的同时能够对 ODO 运行时产生的累计误差进行矫正。

由于查询器获取绝对位置信息具有一定的滞后,即列车查询器需要驶过应答器一段距离,才能判断出自己何时通过该应答器,因此需要设计定位方案将 ODO 与查询器获取的位置信息融合起来,才能获取完整的位置信息。完整的定位方案如图 3 所示。列车经过一个应答器时,其完整位置信息的获取过程为:

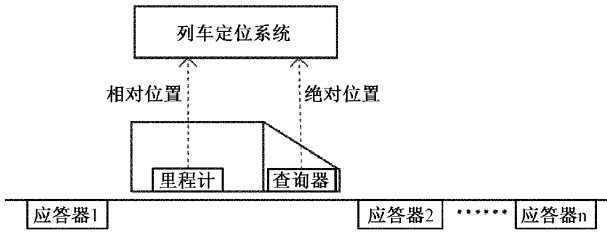


图 2 基于 ODO 与查询应答器的定位系统

1) 应答器 1 接收到的查询信号 RSSI 值达到应答阈值, 查询器进入应答范围, 应答器 1 开始向查询器返回应答信号, 查询器记录此次应答信号的 RSSI 值, 同时定位系统记录此时 ODO 的里程值 S_1 , 此后在整个应答过程中, 查询器每得到一个 RSSI 值, 定位系统都需要记录一次对应的里

程值;

2) 当列车驶离应答范围后, 定位系统记录当前里程计里程值 S_n , 在整个应答过程中 ODO 的里程数是不准确的, 存在累计误差, 需要用应答器 1 提供的绝对位置 S_0 进行矫正;

3) 通过数据分析得到 RSSI 值取最大值的时刻, 即“计算到达时刻”, 并取出“计算到达时刻”对应的里程值 S'_0 ; “计算到达时刻”一般位于 2 个采样点时刻之间, 因此 S'_0 需要通过这 2 个采样点时刻对应的里程值取加权均值求出;

4) 利用“计算到达时刻”对应的里程值 S'_0 与应答器实际位置 S_0 计算出里程计的累计误差 $S_e = S'_0 - S_0$, 再用 S_e 对所有里程值进行矫正, 设任意时刻矫正前里程值为 S , 则矫正后的里程值 $S' = S - S_e$;

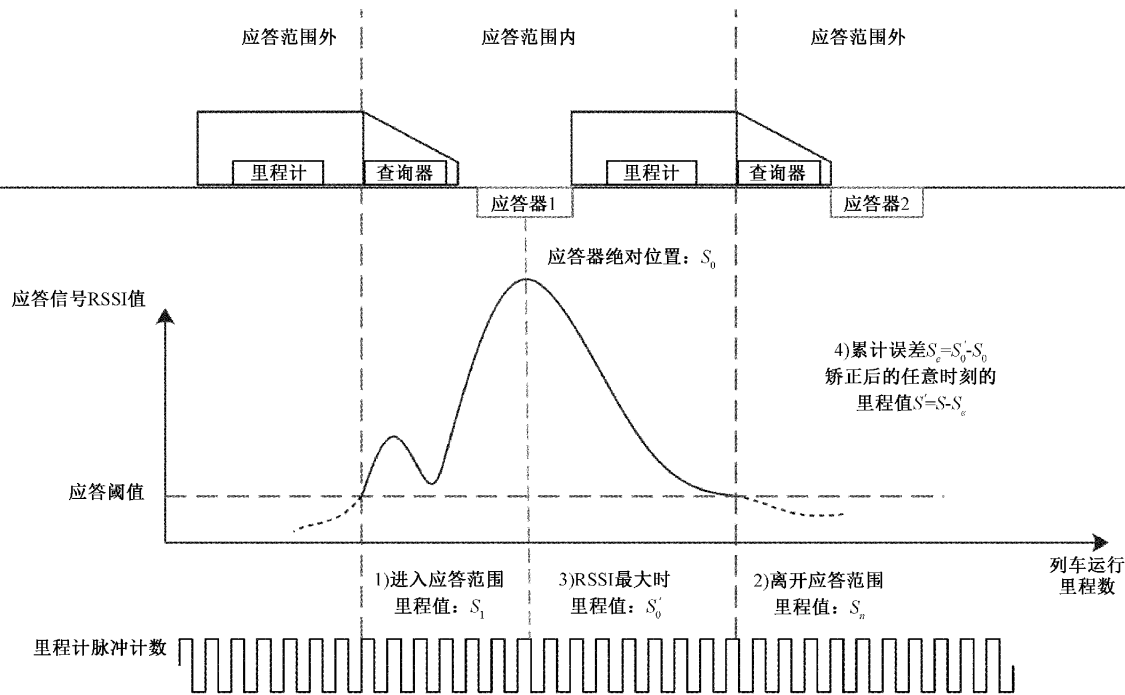


图 3 完整定位系统方案

通过以上过程, 即可实现应答器对里程计累计误差的矫正。由于每个应答器对累计误差的矫正都发生在查询器驶离应答器一段距离之后, 因此该系统实际应用时存在 2 种位置信息: 一种是矫正前实时性强, 但精度稍低的位置信息; 另一种是矫正后实时性稍低, 但精确度高的位置信息。对于实时性要求高的任务, 如列车控制, 可以使用未矫正的结果以满足实时性要求; 对于实时性要求不高的任务, 如钢轨探伤, 可以使用矫正后的结果以提高损伤定位精度。由于里程计使用简单, 并非整个系统的核心, 用于列车的轮轴脉冲传感器可以通过仿真数据替代, 因此本文在给出完整定位系统方案的基础上重点研究应答器辅助定位系统。

3 辅助定位系统设计

3.1 系统硬件设计

本文中定位系统硬件功能需求包括 LoRa 通信, ODO 数据采集, 定位结果显示。对于 LoRa 部分, 作为查询器与应答器间的通信方式, 需要保证其通信质量可靠、抗干扰能力强, 因此选用 E90-DTU(400SL30L) 作为 LoRa 通信模块; 对于 ODO 部分, 鉴于列车运行速度快, ODO 输出的编码信号频率高, 因此选用现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 芯片 EP4CE10E22C8N 作为控制器。图 4 为定位系统的硬件结构。

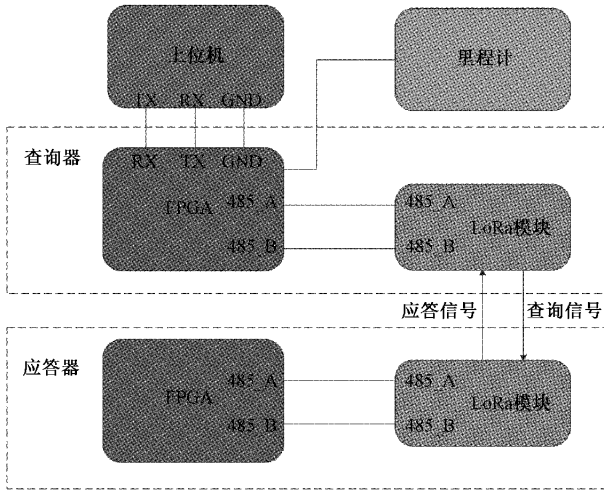


图 4 定位系统硬件结构

3.2 系统软件设计

应答器辅助定位系统的工作方式为：查询器向前方发出查询信号，应答器在判断查询信号指向自身且 RSSI 值超过应答阈值后，开始返回应答信号。随后查询器记录应答信号中包含的绝对位置信息，并计算信号的 RSSI 值，当应答结束后通过数据分析得出“计算到达时刻”，并将查询信号指向下一个应答器。若查询器长时间未接收到应答信号，说明该应答器可能出现故障，在应答超时后查询器将上报故障应答器的序号，并将查询对象指向下一应答器。通过这样的方式能够使绝大多数的应答器工作于低功耗状态，降低系统能耗。系统总体软件流程如图 5 所示。

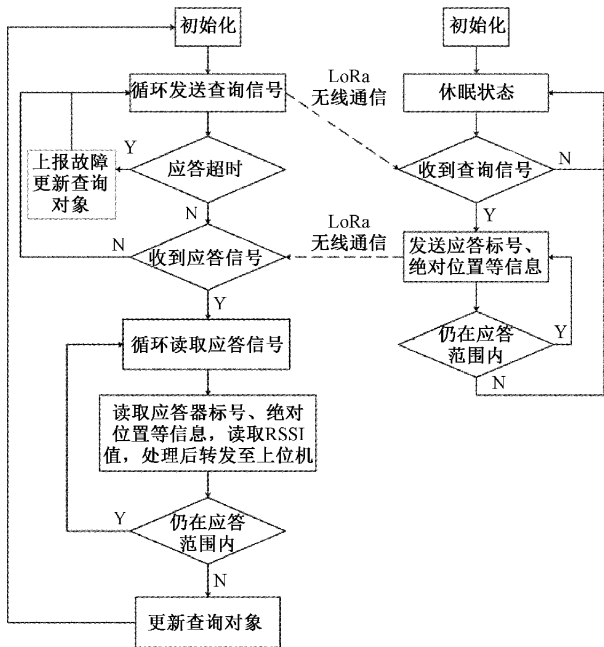


图 5 系统总体软件流程

有限状态机 (finite state machine, FSM) 设计是整个数字逻辑电路设计的核心部分，是为时序逻辑电路设计出的特殊模型，由时序逻辑电路与组合逻辑电路组成。其基本思路是，将整个程序分为有限个状态，利用状态机来控制程序在各个状态之间跳转，每个状态执行不同的任务，使得整个程序的逻辑结构非常清晰，这一点在设计复杂控制过程时尤为明显。图 6 为查询器的 FSM 状态图。

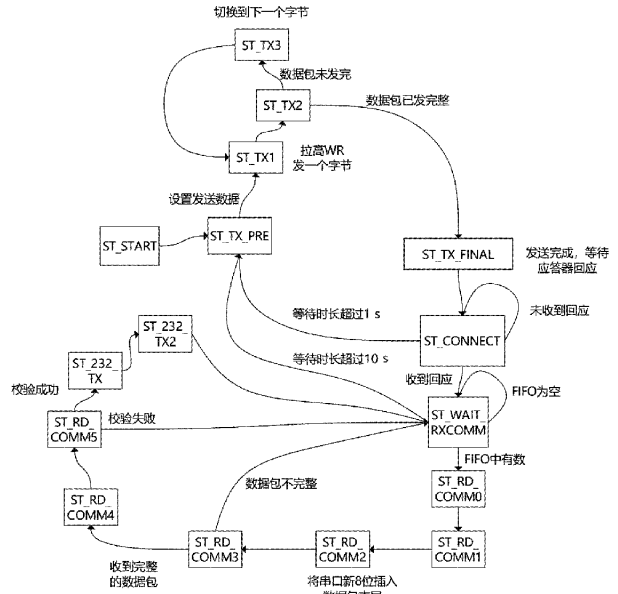


图 6 状态机流程

4 实验设计与结果分析

4.1 可行性验证实验设计

辅助定位系统定位实验的关键是获取查询器到达应答器正上方的“实际到达时刻”，再将该时刻与辅助定位系统得到的“计算到达时刻”进行比较，从而判断该辅助定位系统的定位精度。为了获得“实际到达时刻”与“计算到达时刻”，本文使用 Python Qt5 设计了如图 7 所示的上位机软件。

该软件除了能够实时显示查询器接收到的 RSSI 信号波形，并通过对 RSSI 值进行分析得到峰值时刻，还可以进行定位精度测定实验。实验的具体方案为：当列车通过应答器时，观测者按下“到达位置”的按钮，系统会记录下当前时刻作为“实际到达时刻”，并将其与程序计算得出的“计算到达时刻”进行比较，最终输出本次实验的误差。

为了验证定位系统的可行性，本文选用如图 8 所示的场地进行实验，该场地全长约 800 m，大致接近应答范围，且路线曲折较少，接近于实际轨道情况。

实验过程为：将查询器安装在电动自行车上，从“实验起点”位置出发，同时按下软件上的“开始实验”按钮，软件开始采集 RSSI 值，同时，每采集一个 RSSI 值，软件都将记

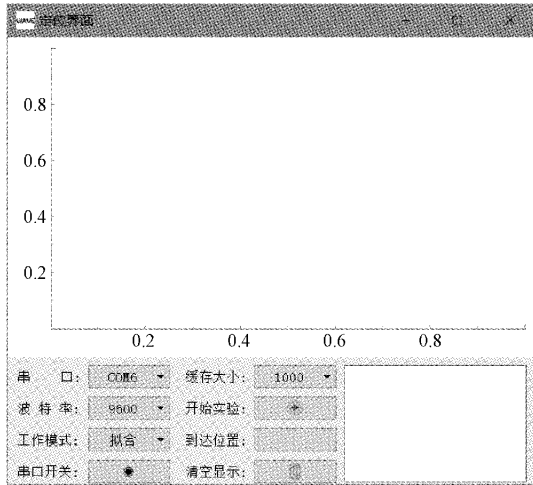


图 7 上位机软件界面

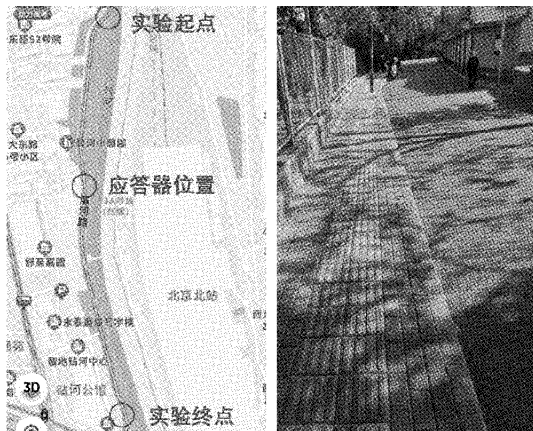


图 8 实验场地

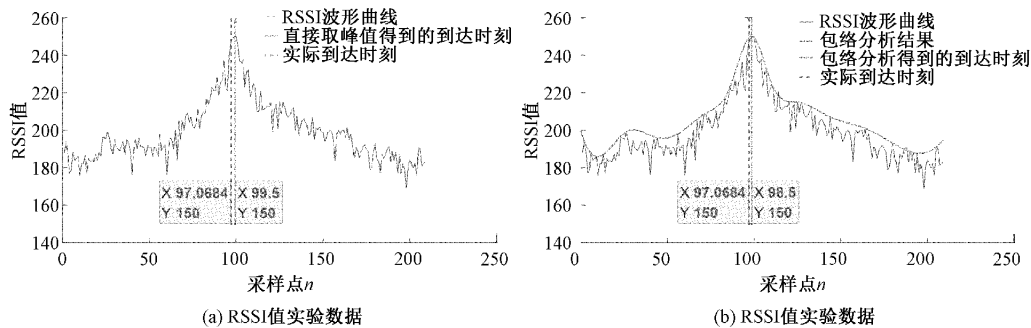


图 9 实验结果与包络分析

间为 0.2 s, 电动自行车的速度为 30 km/h, 最终计算得到平均定位误差约为 2.15 m。为了进一步研究查询器移动速度对定位精度的影响, 在 15 km/h 条件下再次进行实验, 平均定位误差约为 1.32 m。该结果的精度较好, 但本实验中的查询器不论是移动速度还是工作环境都与列车上的查询器有较大的差距, 可以预见该系统应用于列车时定位精度会有所降低。

录一次当前时刻; 当电动自行车到达“应答器位置”时, 按下软件上的“到达位置”按钮, 软件就能记录当前 RSSI 值、RSSI 值序号, 以及到达时刻; 当电动自行车到达实验终点时, 再次按下软件上的“开始实验”按钮以结束实验, 软件将自动进行数据分析, 得出“计算到达时刻”并输出定位误差。

4.2 数据处理与结果分析

实验过程中查询器接收到的 RSSI 值如图 9(a) 所示。RSSI 值的峰值在第 99.5 个采样点(第 99 和第 100 个采样点 RSSI 值相同, 因此取均值), 而实际到达时刻在第 97.06 个采样点, 其中误差约为 2.44 个采样时间。

由于 E90-DTU(400SI.30L) 收发转换具有一定时延, RSSI 值的采样频率受到限制, 最大采样频率为 5 Hz, 由此采集到的 RSSI 在时间上的分辨率较低, 如果直接用原始数据来判断 RSSI 值达到峰值的位置, 会产生很大的定位误差。为了减小采样率较低导致的误差, 本文采用包络、插值的方法对原始数据进行处理。同时为了减小信号震荡的影响, 采用局部极大值法绘制包络线, 即以信号最大值为中心, 每隔至少 10 个采样点取一个极大值, 对取出的所有点进行插值, 从而得到包络线。

包络分析后的结果如图 9(b) 所示。包络、插值之后的波形明显比原始波形更加平滑, 且包络分析得到的到达时刻在第 98.5 个采样点, 误差约为 1.44 个采样点, 说明通过包络、插值处理之后定位的精度明显提高。

重复以上实验, 通过包络分析得到的定位结果与直接取峰值得到的定位结果相比, 误差均减小了 0.5~1 个采样点; 辅助定位系统计算得到的“计算到达时刻”与“实际到达时刻”的平均误差约为 1.29 个采样点。本实验采样时

4.3 系统精度测定实验

电动自行车实验只能验证系统可行性, 要对系统定位精度进行测定, 需要更符合实际的实验环境。因此, 本文选用北京 13 号线西直门站至大钟寺站的城铁路段作为实验平台, 对定位系统的精度进行评定, 图 10 为该路段的示意图。

当城铁行驶至“采样起点”位置时, 开始采集 RSSI 值,

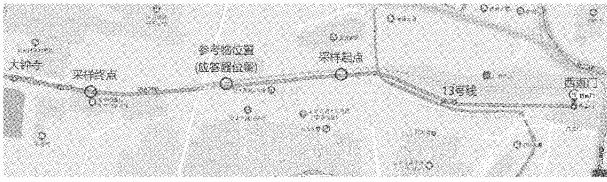


图 10 地铁实验路段示意图

并将其以曲线形式显示于软件界面；当地铁运行至“参考物位置”时，由观察员按下软件上的“到达位置”按钮，软件将记录到达时刻，并将其换算为采样点时间；当地铁运行至“采样终点”时，实验结束，软件绘制出包络线，取出峰值对应的采样点时间，最终误差 = 实际到达时刻 - 计算到达时刻。地铁实验结果如图 11 所示。

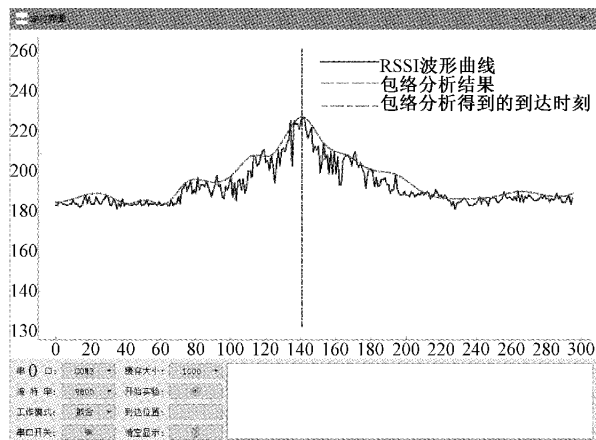


图 11 地铁实验结果

相比于 RFID 应答器系统在近距离时才能工作，本系统在较远距离就开始采集信息，少量数据丢包也不会造成定位丢失，因此高速情景下稳定性高于 RFID 应答器系统，且本系统可对整个过程中的数据进行整体分析，从而得到更为准确的列车位置信息。通过反复实验，系统的平均误差约为 1.02 个采样点时间，平均时间误差为 0.204 s，13 号线速度约为 60 km/h，由此算得系统定位平均距离误差约为 3.4 m，系统定位精度较高，能够实现列车的辅助定位。

5 结 论

本文设计了一种基于 LoRa 无线通信的应答器辅助定位系统。针对列车高精度的定位需求，在给出基于 ODO 与查询应答器的完整定位方案的基础上，对应答器辅助定位系统进行深入研究。该系统以 RSSI 值达到峰值作为查询器到达应答器位置的判断依据，并通过包络分析获取 RSSI 值峰值时刻。最终通过实验验证了方案的可行性，并在城铁上进行精度测定，测得系统平均误差约为 3.4 m，且系统误差随着查询器速度增大而增大，但整体定位精度较高，能够实现辅助定位。不足的是 RSSI 值的处理方法欠佳，定位结果存在较为明显的系统误差，要想得到更高的

定位精度，数据处理部分仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 孔繁军. 高铁列控系统中的列车定位技术分析[J]. 无线互联科技, 2022, 19(3): 83-84,144.
- [2] 李建国, 张鑫奎, 郑云水. 安装角度偏差及列车速度对应答器电磁传输性能影响研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(1):212-221.
- [3] 张友兵, 王建敏, 于晓娜, 等. 基于参考应答器的列车位置和方向计算原理[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(3): 6-11.
- [4] 徐宁, 王瑞, 刘佳. 应答器技术发展历程[J]. 铁道通信信号, 2019, 55(S1): 81-85.
- [5] 邢飞. 列车定位分析与技改[J]. 电子测试, 2022, 36(18): 101-103.
- [6] 魏晓飞. 基于 LabVIEW 的应答器 I/O 特性异物测试研究[J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(1): 101-105.
- [7] 黄喜生, 刘智伟, 张玉娟, 等. 钢枕环境对应答器性能的影响分析及解决方法[J]. 数字化用户, 2019, 25(50): 261-262.
- [8] 朱林富. 轨道交通应答器传输系统天线建模与优化研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [9] 陈利东. 应答器在线检测分析系统的研究及应用[J]. 铁道通信信号, 2023, 59(3): 18-23.
- [10] 陈宁宁, 张琦, 王开锋, 等. 基于电磁感应动态模型的欧标应答器系统定位研究[J]. 中国铁道科学, 2023, 44(2): 166-174.
- [11] 刘晓鹏. 铁路信号应答器系统及其低功耗高可靠性专用芯片的设计研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [12] 彭铎, 牛成群, 张腾飞. 基于 WSN 技术的高空数据采集系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(5): 159-164.
- [13] 王东. 基于远距离无线电的温室大棚监控系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(4): 99-105.
- [14] 赵全, 徐光, 郝龙, 等. 基于 LoRa 的无线多参数环境监测节点设计[J]. 电子测量技术, 2019, 42(5): 119-122.
- [15] 陈浩, 李起伟, 王子龙. 基于改进 TDOA 在煤矿井下超宽带定位算法的研究[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 96-102.
- [16] CHILAMKURTHY N S, PANDEY O J, GHOSH A, et al. Low-power wide-area networks: A broad overview of its different aspects[J]. IEEE Access, 2022, 10: 81926-81959.
- [17] 李娅菲, 朱烜璋. 非视距条件下的测距信息融合定位方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 775-780.
- [18] 陈禹, 渠吉庆, 唐文静, 等. 基于 LSTM 的室内定位系统设计与实现[J]. 电子测量技术, 2021, 44(19):

161-166.

- [19] 乐志伟, 王浩, 谢小军. 基于 RSSI 障碍势能矫正的定位算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 200-207.

作者简介

倪秀琳, 硕士, 中级工程师, 主要研究方向为基于 X 光的大型货物车辆及列车检查系统的控制系统设计。

E-mail: 19789600@qq.com