

基于激光测距与 RFID 的隧道局部定位方法研究

罗 玄, 肖世德, 孟祥印, 江海锋, 赵 斌
(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 针对铁路隧道接触网作业平台在隧道内局部高精度要求的横纵向定位进行了研究, 提出一种基于激光测距与射频识别 (RFID) 的定位方法; 首先利用激光测距传感器实现横向定位, 通过实时检测传感器数据有效性与动态组合数据实现定位与抗干扰, 其次基于 RFID 相位提出两阶段纵向定位方法, 通过第一阶段基于标签相位变化率的粗定位将定位结果限制在单个标签区间, 第二阶段精定位通过基于合理约束条件的标签布置间距消除相位缠绕的影响, 最终通过相位差双曲线定位实现纵向定位; 实验结果表明: 提出方法实现了实验环境下 0.005 m 的平均横向定位误差与 0.07 m 的平均纵向定位误差, 并且具有一定的抗干扰能力, 能够在低硬件成本与布置条件下满足隧道作业平台的局部高精度定位。

关键词: 隧道定位; 激光测距; 无线射频识别; 抗干扰; 相位缠绕; 双曲线定位

Research on Local Localization Method for Tunnels Based on Laser Ranging and RFID

LUO Xuan, XIAO Shide, MENG Xiangyin, JIANG Haifeng, ZHAO Bin

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the problem that the local lateral and longitudinal localization of overhead contact system operating platform requires local high precision in tunnels, a localization method based on laser ranging and radio frequency identification (RFID) is proposed. Firstly, the laser ranging sensor is used to realize the lateral localization, and the sensor data and dynamic combination data are effectively detected in real time to realize the localization and anti-interference. Secondly, two-stage longitudinal localization method is proposed based on the RFID phase. The localization results are limited to single tag interval through the coarse localization based on the tag phase change rate in the first stage. In the second stage, the effect of phase winding is eliminated by the spacing of the label layout based on the reasonable constraint conditions, and finally the longitudinal localization is realized by the phase difference hyperbolic localization method. The experimental results show that the proposed method achieves the average lateral localization error of 0.005 m and average longitudinal localization error of 0.07 m in the experimental environment, and has certain anti-interference ability, thus it can satisfy the local high-precision localization of the tunnel operating platform under the conditions of low hardware and layout cost.

Keywords: tunnel localization; laser ranging; RFID; anti-interference; phase winding; hyperbolic localization

0 引言

在铁路隧道的建设过程中, 某些工程如接触网吊柱的自动化安装, 作业平台需要保持在隧道中线行驶并在指定区域停车作业, 其对作业时平台的定位精度要求较高: 纵向定位精度要求在 ± 200 mm 内, 横向定位精度要求在 ± 20 mm 内, 且吊柱安装间隔为 50 m, 而铁路隧道平均长度超过 1 km^[1], 且由于铁路隧道环境特殊, 想要在合理的硬件与布置成本条件下实现隧道局部的横纵向高精度定位, 面临着十分巨大的挑战。

由于隧道对外界信号有隔绝效果, 因此在车辆定位中常用的全球导航卫星系统 (GNSS, global navigation satellite system) 技术无法使用, 而文献 [2] 提出了一种基于同源多通道伪卫星的指纹库匹配定位方法, 通过在地面布

置伪卫星并利用载波相位指纹库匹配的方法实现定位, 实现了实验环境下 0.39 m 的动态平均定位精度, 但在隧道环境下伪卫星的大规模布置与供电问题较难解决, 局部定位精度也尚未满足作业要求。

基于激光雷达的即时定位与地图构建 (SLAM, simultaneous localization and mapping)^[3] 技术常用于高精度定位, 但其依赖于前期的完整建图以及特征点匹配, 由于隧道环境属于狭长但简单重复场景, SLAM 算法的定位准确度会因此降低, 且建图成本过高, 不适用于作业场景完整横纵向定位, 但激光测距的高精度特性使其可通过非建图方式实现隧道横向定位。

而基于无线传感器网络 (WSN, wireless sensor networks) 的定位技术在室内、隧道、地下等环境中也得到了

收稿日期: 2023-02-10; 修回日期: 2023-03-07。

作者简介: 罗 玄 (1998-), 男, 硕士研究生。

通讯作者: 肖世德 (1967-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 罗 玄, 肖世德, 孟祥印, 等. 基于激光测距与 RFID 的隧道局部定位方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(12): 34-41.

广泛研究^[4-5]。在众多无线传感器技术类型中, 无源超高频 (UHF, ultra high frequency) RFID 技术以其极低的布置成本和无源特性受到大量研究者青睐^[6-9]。以 LANDMARC (location identification based on dynamic active rfid calibration)^[10-11] 为代表的基于接收信号强度 (RSSI, received signal strength indication) 指纹匹配的非测距定位算法得到了广泛研究, 而 LIU 等^[12] 则利用 RFID 反向散射信号的相位进行双曲线定位, 在使用多天线条件下实现了 12.8cm 的定位精度; RIGALL 等^[13] 则通过计算整个空间的概率全息图以寻求最大的概率位置。但以上现有研究方案均用于标签移动、天线固定场景, 大部分在室内小范围内定位时能够实现良好的定位效果, 即使部分可用于隧道环境, 也难以满足横纵向不同高精度要求的定位。

本文为解决隧道高精度纵向定位问题, 提出一种基于激光测距与 RFID (radio frequency identification) 相位的隧道局部定位方法。首先利用作业平台左右侧对称布置的激光测距传感器实现高精度的横向定位与航向角测算, 同时针对可能遇到干扰问题, 通过实时检测传感器数据有效性与动态组合数据实现抗干扰能力; 其次通过基于 RFID 相位的两阶段算法实现纵向定位, 第一阶段利用 RFID 反向散射信号的相位变化率特性实现标签区间的确定; 第二阶段通过提出的合理约束条件下的基于 RFID 相位差的双曲线定位并联合横向定位结果实现标签区间内的进一步精定位。提出方法可在更低硬件与布置成本的条件下实现满足作业要求精度的隧道横纵向定位。所提方法的框架如图 1 所示。

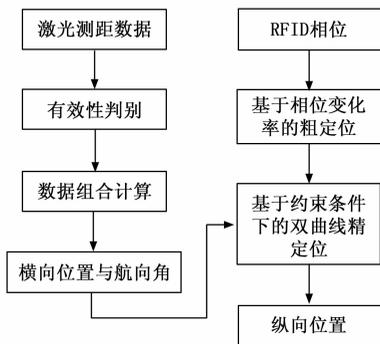


图 1 局部定位算法框图

1 基于激光测距的动态抗干扰横向定位

激光测距是利用激光器向目标物体投射出脉冲激光束, 激光束到达物体表面后反射回来, 由激光器的光电接收装置接收反射回来的激光脉冲, 并计算从发射到接收的耗时, 实现对目标物体距离的测量^[14]。本论文采用在平台两侧对称布置的共 4 个激光测距传感器的方案, 如图 2 所示, 左前、左后、右前、右后 4 个传感器布置于平台左右边缘相同高度, 其中前后传感器的安装间距为 d , 左右传感器的安装间距为 l , 传感器安装水平界面的隧道壁宽度为 L , 传感器安装中心为 O 。

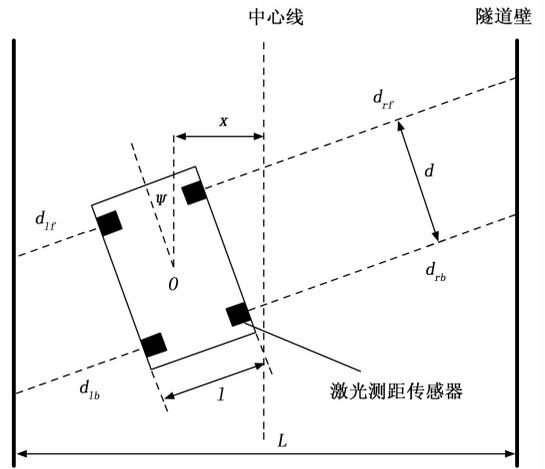


图 2 激光测距横向定位示意图

1.1 定位参数计算

理论上只需两个传感器数据正确, 即可计算得到航向角 Ψ 和中心偏距 x 的值, 但部分条件下会存在多解, 接下来将详细讨论利用全部或部分传感器测距值计算 Ψ 和 x 的数学关系。设激光测距值集合 $D = \{d_{lf}, d_{lb}, d_{rf}, d_{rb}\}$, 集合中元素分别表示左前、左后、右前、右后传感器数据。

1) 使用所有传感器数据 (Ψ 和 x 正方向为左), 以尽量少地使用环境参数从而减少误差引入为原则, 此时仅需测距值集合 D 及同侧传感器安装间距 d 即可得到 $f_1(D)$:

$$\Psi = \arctan \frac{d_{lb} + d_{rf} - d_{lf} - d_{rb}}{2d}$$

$$x = \frac{1}{2}(d_{rf} + d_{rb} - d_{lf} - d_{lb}) \quad (1)$$

2) 仅左/右同侧两个传感器 ($k=l, r, k$ 所在方向表示 Ψ 和 x 正方向), 此时除 D 及同侧传感器安装间距 d 外, 还需要隧道宽度 L 以及左右传感器安装间距 l 才可计算出定位参数, 可得 $f_2(D)$:

$$\Psi = \arctan \frac{d_{lb} - d_{lf}}{d}$$

$$x = \frac{1}{2}[L - (d_{rk} - d_{rf} - d \cdot \tan\Psi) \cdot \cos\Psi] \quad (2)$$

3) 仅前/后侧两个传感器 ($k=f, b, \Psi$ 和 x 正方向为向左), 此时同样需要 L 和 l 才可计算定位参数, 可得 $f_3(D)$:

$$\Psi = \pm \arccos \frac{L}{d_{rk} + d_{lk} + l}$$

$$x = \frac{1}{2}(d_{rk} - d_{lk} - d \cdot \tan\Psi) \cdot \cos\Psi \quad (3)$$

此时仅根据前/后侧两个传感器无法得到的正负性, 因此存在 2 个可能的 x , 需要其他条件进行相应的判断。

4) 仅斜对侧两个传感器 (以 d_{lf} 、 d_{rb} 为例), 可得 $f_4(D)$:

$$\begin{cases} d_{lf} + d_{rb} + \frac{d \cdot \sin\Psi}{\cos\Psi} + l = \frac{L}{\cos\Psi} \\ \sin^2\Psi + \cos^2\Psi = 1 \end{cases}$$

$$x = \frac{1}{2}(d_{rb} - d_{lf}) \cdot \cos\Psi \quad (4)$$

此时 Ψ 的值可由式中的方程组解出, 但存在正负两解, 无法直接得到 Ψ 的正负性, 因此同样需要额外信息进行判断。

1.2 抗干扰定位算法

在作业平台行进与作业过程中, 会不可避免地受到标准条件以外的干扰, 主要包括隧道内间隔分布的避车洞^[15]以及作业人员的遮挡等, 如图 2 所示。因此需要动态判断各传感器数据受干扰情况并调整算法。

分析干扰情况, 如图 2 所示, 当传感器被工作人员或其他障碍物遮挡时, 在起始与结束时刻对应传感器测量值均会发生明显突变(相邻两次测量值差值远大于正常情况下的差值); 遇到如避车洞①所示情况时, 对应传感器的测量值将会在起始时刻发生明显突变, 而在结束时刻会产生与 ψ 相关的非突变变化(由于较高的采样频率, 在很小时该现象仍然较为明显, 我们通过实验也证明了这一点); 而避车洞②所示情况则与①相反, 在 ψ 起始时刻并不会发生非突变变化, 而在结束时刻会发生突变。因此仅通过传感器测量值突变无法分辨干扰, 然而可以注意到, 在正常情况下, 对于同侧传感器有:

$$d_{lb} - d_{lf} = d_{rf} - d_{rb} = d \cdot \tan\Psi \quad (5)$$

在正常情况下, ψ 的值并不会发生突变, 因此上式也不会发生突变, 当出现上述两种干扰时, 上式将出现明显的偏差, 因此可以结合比较同侧传感器测量值差值的变化率来确定是否发生干扰, 但利用该式无法确定具体被干扰的传感器, 因此还需根据各传感器测量值的变化率确定被干扰的传感器。鉴于以上分析, 本文采用算法 1 完成激光测距定位。

算法 1: 抗干扰横向定位算法

初始化: 上一时刻左、右侧传感器值之差 $\Delta d'_{lf} \leftarrow 0, \Delta d'_{rf} \leftarrow 0$, 上一时刻航向角 $\psi' \leftarrow 0$, 上一时刻中心偏距 $x' \leftarrow 0$, 所有传感器数据均有效

输入: 激光测距值集合 $D = \{d_{lf}, d_{lb}, d_{rf}, d_{rb}\}$, 传感器值变化阈值 d_b , 同侧传感器差值变化阈值 Δd_b

输出: 航向角 ψ 和中心偏距 x

```

1: function LATERALLOCALIZATION(D, d_b, Δd_b)
2: foreach d_j ∈ D do
3:     Δd_j ← d_j - d'_j
4:     d'_j ← d_j
5: end for
6: Δd_l ← d_lb - d_lf
7: Δd_r ← d_rb - d_rf
8: foreach Δd_k ∈ {Δd_l, Δd_r} do
9:     if |Δd_k - Δd'_k| > Δd_b then
10:        if |Δd_k| > Δd_b and (d_kf 有效 or |Δd_k - d · tanΨ'| > Δd_b) then
11:            d_kf 反转有效标志
12:        end if
13:        if |Δd_lb| > Δd_b and (d_lb 有效 or |Δd_k - d · tanψ'|

```

> Δd_b) then

```

14:            d_lb 反转有效标志
15:        end if
16:    end if
17:    Δd'_r ← Δd_k
18: end for
19: if 所有传感器数据有效 then
20:     根据 f_1(D) 计算得到 Ψ 和 x
21: else if 仅 1 个传感器数据无效 then
22:     根据 f_2(D) 和 f_3(D) 计算并取均值得到 ψ 和 x
23: else if 有 2 个传感器无效 then
24:     根据情况 n 选择 f_n(D) (n=1, 2, 3) 计算得到 ψ 和 x, 存在多解时, 舍弃与上一时刻 ψ' 和 x' 结果相差较大的值
25: else
26:     参数不足, 无法计算更新 ψ 和 x, ψ ← ψ', x ← x'
27: end if
28: 滑动均值滤波更新 Ψ 和 x
29: ψ ← ψ', x ← x'
30: end function

```

算法主要思想为在每个数据采集周期计算各传感器数据变化率 Δd_j ($j = lf, lb, rf, rb$) 与同侧传感器数据差值 $\Delta d_l, \Delta d_r$, 并通过分析各种传感器有效性与数据突变的可能情况组合得到判断条件, 然后更新各传感器有效标志, 并根据现有有效数据个数与组合动态选择算法计算更新定位参数 Ψ 和 x , 最后采用滑动均值滤波更新 Ψ 和 x 以应对算法不同可能造成的突变。算法中的预设阈值 d_b 和 Δd_b 由实验确定。

2 基于 RFID 相位的纵向定位

2.1 RFID 特性

一个基本的 RFID 系统主要包括以下四部分: 阅读器、天线、标签以及上位机^[16]。阅读器能够获得 RFID 标签的 ID、接收的信号强度指示 (RSSI) 和接收信号的相位 (Phase) 信息用于实现定位。

然而, 在隧道环境下, 多径效应对信号传播的影响十分显著^[17], 尤其是地面反射路径对接收信号参数的影响, 按照如图 3 所示布置方式, 标签粘附于隧道壁, 天线与标签等高, 除了直线传播路径, 多径效应主要来自于地面反射路径(图中虚线所示)。在多径效应下, RSSI 并不与自由空间一样随距离单调变化, 而相位一距离曲线整体仍旧保持单调递增的特性^[18], 因此, 利用 RFID 接收信号的相位实现定位可实现更高的定位精度。

然而, 要利用 RFID 信号的相位信息, 首先需要解决其缠绕特性。在大多数利用 RFID 信号相位实现定位的相关方案中, 阅读器天线所接收的 RFID 信号相位^[12]表示为:

$$\theta + 2k\pi = 2\pi \frac{2d}{\lambda} + \theta_r + \theta_R + \theta_{tag} \quad (6)$$

其中: θ 为阅读器天线实际测得的接收相位, k 为保证 $\theta \in [0, 2\pi)$ 的未知整数, θ_r 为天线发射电路引入的相位变化, θ_R 为天线接收电路引入的相位变化, θ_{tag} 为标签处理过

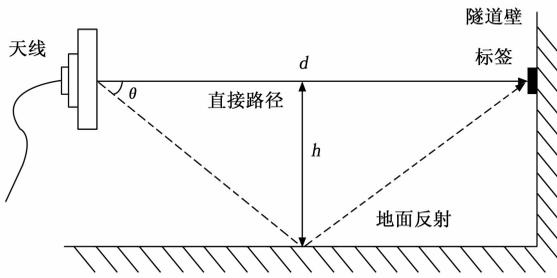


图 3 隧道中的 RFID 多径效应

程中引入的相位变化。 k 在实际使用中无法得知, 因此真实的 $\hat{\theta}$ 也无法确实, 因此无法直接利用式计算距离参数 d 。

2.2 BackPos 方法

为解决以上问题, 文献 [12] 中的 BackPos 方法采用预先布置固定天线而标签粘附于移动物体的方式, 为消除由硬件引起的而与距离无关的相位偏移 θ_r 、 θ_R 和 θ_{tag} , 将任两个标签的接收相位相减:

$$\Delta\theta + 2k'\pi = 2\pi \frac{2\Delta d}{\lambda} \quad (7)$$

其中: $\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2$, $k' = k_1 - k_2$, $\Delta d = d_1 - d_2$, 经过上述操作, 与距离无关的量均被消除, 然而 k' 的未知性依然存在。为解决此问题, BackPos 方法提出可行域的概念并证明了在此区域内 Δd 满足条件 $|\Delta d| < \lambda/2$, 因此对应 k' 的仅有有限的可能取值, 在该条件下, 对于每组两个可接收 RFID 信号的天线, 所有可能的取值在空间上形成一组非对称双曲线, 如图 4 所示 c_1 与 c_2 , 通过布置多组天线并求解各组双曲线的交点并排除不合理值即可得到标签的位置。

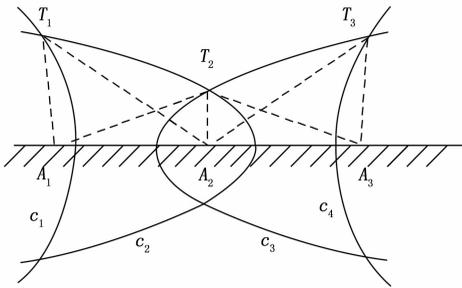


图 4 BackPos 方法

然而为得到精确的标签位置, 需要更多组天线实现冗余校正, 采用了 4 天线的布置形式, 即使在隧道环境中可将该方法中的天线与标签的固定形式交换, 但同时依赖多组双曲线交点的方式使得其中某个数据由于热噪声^[19]或其他原因产生偏差时会较大影响最终定位结果, 此外, 事实上由于硬件的原因, 大多数商用 RFID 阅读器只能提供 π 而非 2π 的相位测量周期^[20], 我们所使用的 RFID 阅读器也证实了这一点, 这也进一步限制了可行域的范围, 导致其在定位范围较大的空间无法有效覆盖需要定位的区域, 因此在隧道环境中该方法可能出现定位结果与实际位置偏差过大的情况。

因此, 本文提出分阶段进行粗定位与精定位满足隧道场景定位要求。

2.3 基于 RFID 的隧道纵向两阶段定位方法

为提升定位算法的精度, 本文提出分阶段的定位方法, 第一阶段通过粗定位缩小定位范围从而为后续精定位筛选出更为可靠的数据。考虑到相位测量周期限制问题, 对式 (1) 进行进一步限制:

$$\theta + k\pi = 2\pi \frac{2d}{\lambda} + \theta_T + \theta_R + \theta_{\text{tag}} \quad (8)$$

对于天线与标签布置形式, 本文采用将天线安装于作业平台, 并且将无源 RFID 标签以固定间距 d_{tag} 粘附于隧道壁的方案, 如图 3 所示, 标签不需要额外提供电源, 而移动平台上只需安装单天线即可, 因此具有较低的硬件与布置成本。

2.3.1 基于 RFID 相位变化率的粗定位

根据式中 RFID 相位与距离的关系, 理论上可以通过由某个标签反向散射 RFID 信号变化率的正负性判断天线处于靠近或远离标签的状态, 同时通过多标签数据的组合即可得到天线与标签的相对前后位置, 即:

$$x_{\text{rel}}^{(i)} = \text{sign}(\Delta P^{(i)}), \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

$x_{\text{rel}}^{(i)}$ 表示天线相对于第 i 个标签的位置, 正为右侧, 负为左侧, $\text{sign}(\cdot)$ 为求数值正负运算, $\Delta P^{(i)}$ 为第 i 个标签的相位变化率。利用此方法得到的定位误差小于标签之间的间距 d_{tag} , 那是否可以通过缩小 d_{tag} 来直接实现高精度的定位呢? 答案是否定的, 过小的标签间距会使得各标签的相位测量值会被附近的其他标签所干扰, 但当 d_{tag} 大于 40 cm 时, 标签之间将不会受到明显干扰^[21]。因此为保证数据的稳定性, 标签间距不应小于 40 cm。

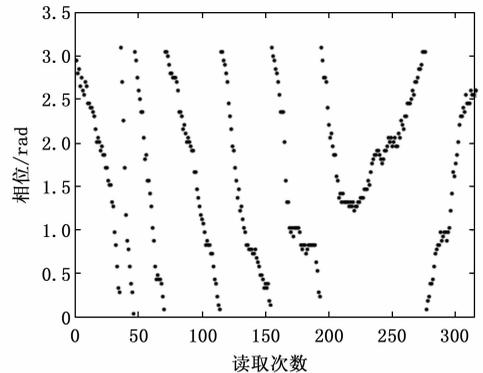


图 5 天线经过标签相位变化

理论上此方法可实现不低于 d_{tag} 的定位精度, 但实际应用中, RFID 信号的测量相位值总是会受到热噪声的影响, 图 5 为天线通过标签时的 RFID 信号相位值变化图, 其相邻两次采样可能由于热噪声影响而出现与理论相反的变化情况, 因此直接利用相邻两次测量值直接计算 $\Delta P^{(i)}$ 会引入较大误差。为使计算得到的 $x_{\text{rel}}^{(i)}$ 具有较高的准确性与稳定性, 本文提出如下改进滑动窗口算法进行 $\Delta P^{(i)}$ 的计算:

首先利用大小为 m 的窗口记录标签 i 当前测量点 n 前 m

次的测量相位差 $[\Delta p_{n-m}^{(i)}, \Delta p_{n-m+1}^{(i)}, \dots, \Delta p_{n-1}^{(i)}]$, 其中 $\Delta p_k^{(i)}$ 由式 (10) 确定:

$$\Delta p_k^{(i)} = \begin{cases} p_k^{(i)} + \pi - p_{k-1}^{(i)} & p_k^{(i)} - p_{k-1}^{(i)} < -p_s \\ p_k^{(i)} - \pi - p_{k-1}^{(i)} & p_k^{(i)} - p_{k-1}^{(i)} > p_s \\ p_k^{(i)} - p_{k-1}^{(i)} & \text{else} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $p_k^{(i)}$ 表示获取的对于第 i 个标签的第 k 个相位测量值, p_s 为针对相位跳跃修正引入的判断阈值。由于相位数据 π 周期变化的特性, 数据会存在 $0 \sim \pi$ rad 以及 $\pi \sim 0$ rad 的相位跳跃, 因此针对此种情况添加上式中的修正策略是必要的。然后, 在每次获得最新的数据 $p_n^{(i)}$ 时, 将窗口右移, 移除第一个值, 加入最新计算得到的 $\Delta p_n^{(i)}$, 然后通过式 (11) 计算 $\Delta P_n^{(i)}$:

$$\Delta P_n^{(i)} = \begin{cases} 1 & \Delta p_k^{(i)} > 0 \\ -1 & \Delta p_k^{(i)} < 0 \\ \Delta P_{n-1}^{(i)} & \text{else} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $k = n - m + 1, n - m + 2, \dots, n$ 。由于 $x_{rel}^{(i)}$ 只与 $\Delta P_n^{(i)}$ 的正负性有关, 因此式简化了相位变化率的结果表示, 正负值分别用 1 和 -1 表示。此外, 理论上对于可以获得数据的多个标签, 位于天线同侧标签的 $\Delta P^{(i)}$ 应该同号, 并且两侧值相互异号, 因此, 为进一步提升第一阶段定位的稳定性, 使用多个标签数据选择左右一致性最高的标签区间作为最终的一阶段定位结果。

2.3.2 基于约束条件下双曲线定位的精定位

第一阶段已经确定了移动平台在隧道纵向所处标签区间, 第二阶段本文提出一种基于约束条件下的双曲线定位方案实现区间内的精确定位。BackPos 方法的可行域约束在缠绕周期为且定位范围较大的条件下并不能实现很好的效果, 因此本文提出单个标签区间内的一种基于几何约束的相位差计算方法, 通过实施在实际条件下可实现的约束条件以消除相位缠绕的影响, 从而对相位差进行约束计算, 其具体内容程如下:

首先, 由于缠绕周期限制为 π , 式 (7) 修正为下式:

$$\Delta\theta + 2k'\pi = 2\pi \frac{2\Delta d}{\lambda} \quad (12)$$

对经过粗定位确定的离天线最近的两个标签 tag_1 和 tag_2 , 根据几何关系可得:

$$|\Delta d| = |d_1 - d_2| \leq \sqrt{d_{\text{tag}}^2 + l^2} - l \quad (13)$$

其中: l 为天线到墙壁的垂直距离, 方法主要思想为: 通过实施在实际条件下可实现的约束条件对相位差进行约束, 使得 $\Delta\theta$ 与 Δd 的关系即可以唯一确定。为达到约束目的, 需要满足相位差约束:

$$|\Delta\hat{\theta}| = |\Delta\theta + k'\pi| \leq p_c \quad (14)$$

其中: $\Delta\hat{\theta}$ 表示真实的相位差, p_c 为相位差约束值, 由式 (12)、式 (14) 得

$$\left| 2\pi \frac{2\Delta d}{\lambda} \right| \leq p_c \quad (15)$$

为实现约束目的, 需要找到可以在实际环境中能够实现的约束条件, 最佳约束为由几何条件和和相位条件约束

的 Δd 范围相匹配, 即根据式 (13) 和式 (15) 可得:

$$\sqrt{d_{\text{tag}}^2 + l^2} - l = \frac{p_c \lambda}{4\pi} \quad (16)$$

式中存在 3 个变量: 标签布置间距 d_{tag} 、天线到墙壁的垂直距离 l 以及相位约束值 p_c , 由于作业平台需要始终保持隧道中线行驶, l 由隧道尺寸约束, 因此可用作约束条件的变量为 p_c 和 d_{tag} 。式 (14) 将 $\Delta\hat{\theta}$ 的取值范围限定在了 $[-p_c, p_c]$, 区间大小为 $2p_c$, 为简化 k' 的计算并使 k' 在 $\Delta\theta$ 确定的条件下有且仅有唯一确定的值, 令 $p_c = \pi/2$, 则 $-\pi \leq \theta_1 - \theta_2 \leq \pi$, 可以得到如下 k' 与 $\Delta\theta$ 的对应关系:

$$k' = \begin{cases} 1 & -\pi \leq \Delta\theta \leq -\pi/2 \\ 0 & -\pi/2 < \Delta\theta \leq \pi/2 \\ -1 & \pi/2 < \Delta\theta \leq \pi \end{cases} \quad (17)$$

再通过计算 d_{tag} 约束条件并按照约束条件布置标签即可消除相位缠绕影响。在确定 l 之后, 根据式 (16) 计算得到有关 d_{tag} 的限制条件, 从而可以根据 $\Delta\theta$ 得到唯一的 Δd :

$$\Delta d = \frac{\lambda}{4\pi} (\Delta\theta + k'\pi) \quad (18)$$

式中, k' 由式 (17) 确定。

得到 Δd 之后, 由于作业平台在隧道内按隧道中线行驶, 即使存在少量偏离也可通过用于横向定位的激光测距定位系统得到平台与墙壁垂直距离。因此可以通过计算双曲线在指定垂直距离处的坐标得到相对标签的纵向距离, 如图 6 所示, 由于标签已按照事先设定位置布置, 且不同 RFID 标签可以根据不同 ID 进行识别, 通过事先建立标签 ID-坐标映射表即可在任意时刻得到 RFID 信号标签的坐标。对于如图 6 所示的双曲线, 以 T_1 和 T_2 为焦点, $T_1 T_2$ 中点为原点, 其数学表达式为:

$$\frac{y^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad \text{其中:} \begin{cases} a = \frac{\Delta d}{2} \\ b = \sqrt{c^2 - a^2} \\ c = \frac{d_{\text{tag}}}{2} \end{cases} \quad (19)$$

将 l 作为隧道横向距离 x_0 代入上式即可得到相对标签坐标系的纵向距离 y_r , 通过 Δd 的正负性可以剔除不合理值, 从而得到最后的纵向坐标值:

$$y_0 = y_r + (y_{T_1} + y_{T_2})/2 \quad (20)$$

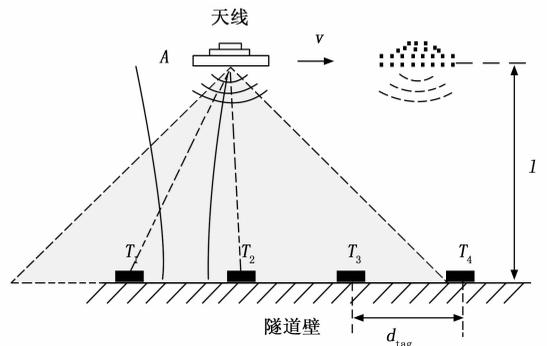


图 6 RFID 定位示意图

2.4 区间判断优化算法

虽然理论上通过上述方法即可实现隧道内的纵向精确定位, 然而注意到粗定位中引入的滑动窗口算法在提升稳定性的同时带来了一定的滞后性, 这也会导致问题: 天线实际已经越过前一标签区域而算法仍以原标签区域计算位置, 此时会导致计算结果产生较大错误偏离值。

为避免上述情况, 本文将区间内相位差 $\Delta\theta$ 引入标签区间的判断算法以进行优化。根据 2.3.2 节中 $p_c = \pi/2$ 的条件, 理论情况下天线在各个标签区间内移动时正好对应区间左右标签相位差 $\Delta\theta$ 从 $-\pi/2$ 到 $\pi/2$ 一次完整的周期变化, 因此也可利用 $\Delta\theta$ 的周期性跳变判断标签区间的变换, 但同样由于热噪声的存在以及不同标签相位本身存在的差异性, 仅根据 $\Delta\theta$ 判断同样无法完全避免上述问题。因此本文综合相位变化率 ΔP 与区间相位差 $\Delta\theta$ 对判断算法进行优化, 具体算法如算法 2 所示。

算法 2: 粗定位标签区间判断优化算法输入: 各标签相位值集合 Ψ

输出: 天线当前所处标签区间 (tag_l, tag_r)

```

1: foreach  $p^{(i)} \in \Psi$  do
2:   根据式(12)、(13)计算  $\Delta p^{(i)}$ 、 $\Delta P^{(i)}$ ;
3:   计算以相邻标签为区间的左右  $\Delta P$  一致性并选取目前最高者区间作为当前计算结果;
4: end for
5: 根据当前区间结果计算区间  $(tag_1, tag_2)$  与下一相邻区间  $(tag_2, tag_3)$  标签相位差:  $\Delta\theta \leftarrow \theta_1 - \theta_2$ ,  $\Delta\theta' \leftarrow \theta_2 - \theta_3$ ;
6: if 非从标签区外进入标签区间 then
7:   if  $|\Delta\theta| > \pi/2$  and  $\Delta\theta' < 0$  then
8:     以下一区间作为最终区间,  $(tag_l, tag_r) \leftarrow (tag_1, tag_2)$ ;
9:   else if  $|\Delta\theta| > \pi/2$  and  $\Delta\theta' > 0$  then
10:    以下一区间  $(tag_2, tag_3)$  作为最终区间,  $(tag_l, tag_r) \leftarrow (tag_1, tag_2)$ , 并以左标签位置作为最终计算位置;
11:   else
12:    以当前区间  $(tag_1, tag_2)$  作为最终区间,  $(tag_l, tag_r) \leftarrow (tag_2, tag_3)$ ;
13:   end if
14: end if

```

3 实验验证与结果分析

3.1 实验环境及平台搭建

为了验证提出方法的有效性并对定位指标进行评估, 我们采用如图 7 所示的小车平台作为实验验证平台, 验证环境为类隧道的走廊环境, 横向定位实验场景中用门框模拟避车洞, 并且行进过程中加入障碍物干扰。实验平台配置如下: 平台处理器为 ARM® Cortex®-A57, 内存为 4 GB, 操作系统为 Ubuntu16.04。顶部对称布置 4 个 HZH-D80 激光测距传感器, 量程 10 m, 测量精度 ± 1 mm, 测量频率 10 Hz。同时搭载 WYUAN M-2800EK 系列 RFID 阅读器, 并在侧边安装 RD905M 超高频圆极化天线, 天线增益为 8 dB, 射频频率设定为 920 MHz, 标签读取频率为 10 Hz, 标签采用基于 Alien H3 芯片的 RFID 无源标签。场地布置

如下: 平台沿距墙壁 2.5 m 的路线行驶, 根据式 (16) 计算得到 $d_{\text{tag}} = 0.45$ m, 因此标签按照 0.45 m 的间距以及与天线等高的 0.35 m 高度粘附于墙壁。由于同一标签相邻两次相位差不超过 $\pi/2$, 因此在 10 Hz 读取速率下需要保证前进速度不高于 0.58 m/s, 由于工程作业平台本身限速较低, 且实际作业中在作业点附近需要进一步降速以保证较为精确的停车点, 因此此速度满足该场景下的定位要求, 若有更高速度要求, 可采用具有更高读取频率 (130 Hz) 的 Impinj R420 阅读器。

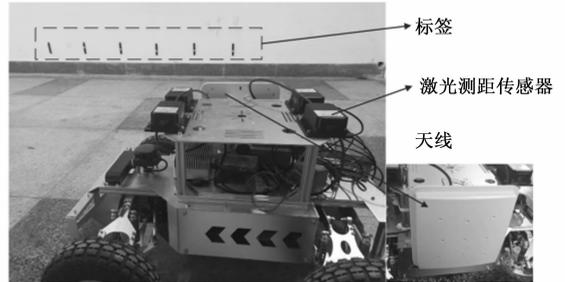


图 7 实验平台与定位场景

3.2 实验结果与分析

3.2.1 横向定位实验结果与分析

由于在隧道中左右避车洞均交错布置^[15], 因此实验中为单侧避车洞情况, 实验设置阈值 $d_{ts} = 0.1$ m 和 $\Delta d_{ts} = 0.1$ m, 定位结果如图 8 所示。

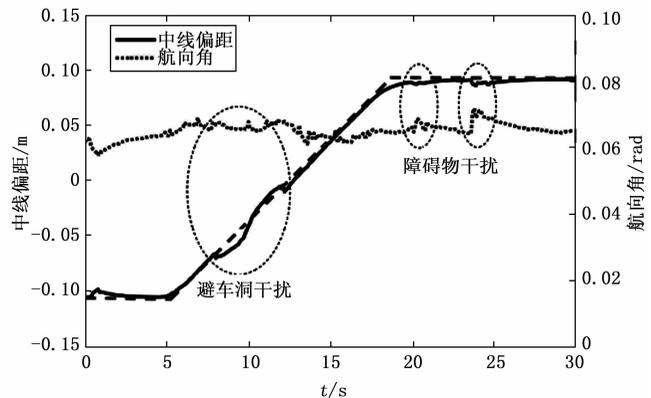


图 8 横向定位实验结果

定位结果显示提出算法总体实现了高精度与抗干扰能力的横向定位。但算法仍旧因干扰条件而产生一定影响, 在经过避车洞时计算所得航向角并未产生较大变化, 而偏距存在突变; 而行人干扰情况则正好相反。分析原因, 在不同有效传感器数据组合时, 由于所用算式差异, 并且传感器的安装并未经过严格校准, 因此可能出现数据突变, 而算法中偏距的计算优先采用同端数据, 航向角计算优先采用同侧数据, 因此造成了该实验结果, 但误差始终保持在精度要求范围内, 最终定位误差如表 1 所示。但由于实际隧道壁平整度更低, 因此算法可能有更差表现, 对传感器安装的准确标定会提升算法的精度与稳定性。

3.2.2 纵向定位实验结果与分析

首先为验证区间判断优化算法的实际效果，设计了如下验证实验：实验平台以 0.2 m/s 的速度从一个标签区间前行至另一标签区间，实验结果如图 9 所示，在虚线范围内，即区间判断算法由于滞后性而未能及时更正标签区间的时段，结果显示未使用优化算法的结果发生了错误突变，而采用优化算法的结果仍能保持稳定的结果，证明算法 2 优化了标签间差异性有可能导致的结果突变。

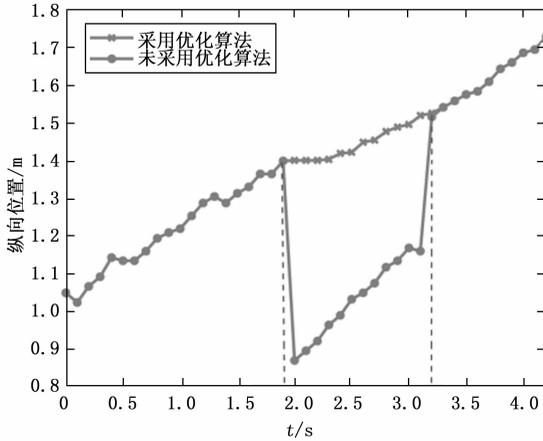


图 9 区间判断优化算法前后对比

为验证提出方法的综合效果，本文将所提出的方法与 LANDMARC、BackPos 方法进行了比较，由于后两种方法原本均是基于多固定天线而标签移动的形式，因此本实验对两种方法进行了适当修改使得其能应用于单移动天线、多参考标签的场景。实验设置平台移动速度为 0.5 m/s，各方法的定位结果如图 10 所示，图 11 为几种定位方法的定位误差累积概率密度分布图，而各种算法的定位数据对比见表 1。

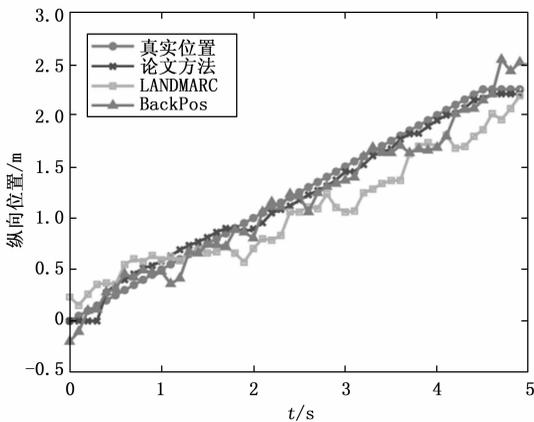


图 10 各算法定位结果对比

表 1 各定位方法实验误差

| 定位方法 | 最大误差/m | 平均误差/m |
|----------|--------|--------|
| 论文纵向定位方法 | 0.017 | 0.005 |
| 论文纵向定位方法 | 0.11 | 0.07 |
| LANDMARC | 0.53 | 0.26 |
| BackPos | 0.36 | 0.13 |

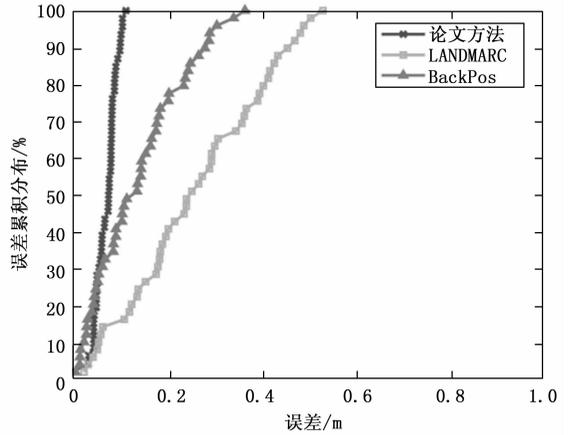


图 11 各算法定位误差累积概率密度分布

从结果看，基于 RSSI 指纹的 LANDMARC 方法定位误差最大，达到了平均误差 0.26 m、最大误差 0.53 m，并且在定位过程中稳定性较低，这主要是由于在真实环境中获取的 RFID 信号 RSSI 值并非与距离值简单单调相关，并且标签数量较少，无法为结果提供更多有用的参考信息。LANDMARC 方法虽然利用相位信息达到了平均误差 0.13 m、最大误差 0.36 m 的定位效果，但其总体定位稳定性并不理想，通过定位结果可以看到，LANDMARC 方法在定位开始和结束时都出现了较大定位误差，甚至在开始时出现了错误的负值，这是由于 BackPos 定位结果完全依赖双曲线交点定位，当多个标签中某个标签数据发生扰动时会极大影响定位结果，造成定位结果甚至出现在标签区域外的情况。因此以上两种方法均无法满足应用精度要求。

而本文提出方法最终达到了 0.07 m 的平均误差与 0.11 m 的最大定位误差，这表明其在定位精度与结果稳定性方面都达到了非常好的效果，满足了隧道自动化作业平台对纵向定位精度的要求。其主要归因于所采用的两阶段定位方法，通过第一阶段的粗定位先确定天线所处的标签区间，缩小定位范围，第二阶段利用离天线最近的 2 个标签相位数据通过双曲线定位实现标签区间内更加精确的定位。

但是，从图 10 中可以看到在定位开始的短暂阶段，论文提出算法计算结果始终保持在 0 m，虽然此时实验平台已经开始移动，造成该结果的主要原因是一阶段粗定位算法的滞后性，虽然 2.3 节中已经针对其进行了优化，但在首次进入标签区间时出现的滞后性无法避免，因此在实际应用中，还需要额外在标签区域两端增加一个冗余标签的方法才能抵消该影响。

4 结束语

本文针对现有定位算法无法满足隧道环境下作业平台需要高精度局部纵向定位的问题，提出了基于激光测距与 RFID 的定位方法。基于激光测距的横向定位通过动态抗干扰算法实现精准而稳定的横向定位，而基于 RFID 相位的两

阶段纵向定位方法仅使用单天线与少量标签, 通过缩小定位范围, 然后利用几何约束消除相位缠绕影响的双曲线定位法最终实现高精度的纵向定位。最终实现了实验环境下满足定位精度要求的可靠横纵向定位。在使用单天线与少量标签的有限硬件资源条件下实现了满足隧道自动化作业平台对纵向定位的精度要求与良好的稳定性。未来我们的工作研究通过数据融合方法实现作业平台在整个隧道内的定位, 并进一步进行测试。

参考文献:

[1] 田四明, 王伟, 杨昌宇, 等. 中国铁路隧道 40 年发展与展望 [J]. 隧道建设 (中英文), 2021, 41 (11): 1903-1930.

[2] 黄璐, 蔚保国, 李宏生, 等. GNSS 拒止环境下的伪卫星指纹定位方法 [J]. 电子学报, 2022, 50 (4): 811-822.

[3] KIM K, IM J, JEE G. Tunnel facility based vehicle localization in highway tunnel using 3D LIDAR [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23 (10): 17575-17583.

[4] 李帅鑫, 李九人, 田滨, 等. 面向点云退化的隧道环境的无人车激光 SLAM 方法 [J]. 测绘学报, 2021, 50 (11): 1487-1499.

[5] 周凯. 基于射频技术的室内三维定位技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (6): 279-286.

[6] BIANCHI V, CIAMPOLONI P, DE M I. RSSI - Based Indoor Localization and Identification for ZigBee Wireless Sensor Networks in Smart Homes [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 68 (2): 566-575.

[7] FANG W S, WANG H, HU Z D. Filter anchor node localization algorithm based on RSSI for underground mine wireless sensor networks [C] // Guangzhou: IEEE International Conference on Computational Science and Engineering, 2017: 673-676.

[8] 方福柱. 隧道多车辆定位系统研究、设计与实现 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.

[9] LI C, XIE J, WU W, et al. Nodes deployment of wireless sensor networks for underground tunnel environments [C] // 3rd International Conference on Electrical Engineering and Information Technologies for Rail Transportation, Changsha, 2017, 482: 837-844.

[12] 吴海涛, 代尚林, 乔中伟, 等. 基于 RBF-SVM 智能配变终端的网络安全态势评估 [J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36 (5): 35-40.

[13] TELLOLI C. ICP-MS triple quadrupole as analytical technique to define trace and ultra-trace fingerprint of extra virgin olive oil [J]. Food Chemistry, 2023, 4 (8): 1851-1857.

[14] 周奕涛, 张斌, 刘自豪. 基于多模态深度神经网络的应用层 DDoS 攻击检测模型 [J]. 电子学报, 2022, 50 (2): 508-512.

[15] 冯钧, 李顶圣, 陆佳民, 等. 基于 HBase 的路网移动对象时空索引方法 [J]. 计算机应用, 2018, 38 (6): 1575-1583.

[16] 张国鹏, 陈学斌, 王豪石, 等. 面向本地差分隐私的 K-Prototypes 聚类方法 [J]. 计算机应用, 2022, 42 (12): 3813-3821.

(上接第 33 页)

[10] NI L M, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: Indoor location sensing using active RFID [J]. Wireless Networks, 2004, 10: 701-710.

[11] 王瑞峰, 席旭宇. 改进的 LANDMARC 算法在隧道人员定位中的应用 [J]. 铁道学报, 2016, 38 (1): 70-74.

[12] LIU T, YANG L, LIN Q, et al. Anchor-free backscatter positioning for RFID tags with high accuracy [C] // IEEE Conference on Computer Communications, New York: IEEE, 2014: 379-387.

[13] RIGALL E, WANG X, CHEN Q. An RFID tag localization method based on hologram mask and discrete cosine transform [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71: 1-12.

[14] 李燕, 王向玲, 赵志云. 激光测距与卫星导航定位技术组合研究 [J]. 激光杂志, 2017, 38 (12): 96-99.

[15] 中华人民共和国铁道部. 高速铁路电力牵引供电工程施工质量验收标准: TB 10758-2018 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.

[16] 王盛阳. 基于信号强度的 UHF RFID 定位技术研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2020.

[17] 林永杰, 黄紫林, 吴攀, 等. 基于半监督极限学习机的隧道内车辆 RSSI 定位方法 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21 (2): 243-255.

[18] NIKITIN P V, RAO K V. Antennas and propagation in UHF RFID systems [C] // IEEE International Conference on RFID, New York: IEEE, 2008: 277-288.

[19] XU H, DING Y, WANG R C, et al. An RFID Indoor positioning algorithm based on bayesian probability and K - nearest neighbor [J]. Sensors, 2017, 17 (8): 1-17.

[20] ROBERT M, FABIAN K, MARTIN V. UHF RFID localization based on synthetic apertures [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2013, 10 (3): 807-815.

[21] WU H, TAO B, GONG Z, et al. A fast UHF RFID localization method using unwrapped phase - position model [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2019, 16 (4): 1698-1707.

[17] 李颖之, 李曼, 董平, 等. 基于集成学习的多类型应用层 DDoS 攻击检测方法 [J]. 计算机应用, 2022, 42 (12): 3775-3784.

[18] JING X Y, YAN Z, PEDRYCZ W. Security data collection and data analytics in the Internet: a survey [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2019, 21 (1): 586-618.

[19] 刘琪, 郭荣新, 蒋文贤, 等. 基于 BLS 聚合签名技术的平行链共识算法优化方案 [J]. 计算机应用, 2022, 42 (12): 3785-3791.

[20] 韦海宇, 王勇, 柯文龙, 等. 基于改进极端随机树的异常网络流量分类 [J]. 计算机工程, 2018, 44 (11): 33-39.

[21] 吴磊, 原鹏, 丁维龙. 智能家居网关与云服务器数据同步协议的研究 [J]. 计算机技术与发展, 2018, 28 (9): 151-155.