

多模模拟源分布激励泄漏电缆的隧道内 二维定位方法

汤小龙, 宋茂忠

(南京航空航天大学 电子信息工程学院, 南京 211106)

摘要: 由于隧道内卫星导航信号缺失, 致使导航终端在隧道空间中无法工作; 为解决这一问题, 提出了一种多模模拟源与泄漏电缆组合的隧道二维定位方法; 采用多模多通道的卫星导航模拟源产生全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯系统三模导航信号, 分别激励平行泄漏电缆的 3 个端口, 通过接收机原始伪距观测量的二次处理解算, 减少了模拟器对卫星星座、星历及通道伪距时延的特殊要求, 采用基于遗忘因子的多系统组合钟差联合定位算法, 实现了接收机的二维定位, 避免了数据饱和现象; 经实验测试, 80%定位点的偏差在 1.6 m 以内, 90%定位点的偏差在 2 m 以内, 可以实现隧道内的二维定位。

关键词: 隧道定位; 二维定位; 卫星导航; 泄漏电缆; 卫星导航模拟源

Two-Dimensional Positioning Method for Leakage Cables in Tunnels Using Multi-mode Simulator Distribution Excitation

TANG Xiaolong, SONG Maozhong

(College of Electronic Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Navigation equipment can not work properly in tunnels due to the lack of satellite navigation signals. In order to solve this problem, a two-dimensional positioning method for the combination of multi-mode simulators and leakage cables is proposed. The multi-mode and multi-channel satellite navigation simulators are used to generate three kinds of signals: global positioning system (GPS), Beidou satellite navigation system (BDS) and global navigation satellite system (GLO-NASS), which excite three ports of leakage cables in parallel direction, respectively. The secondary processing algorithm is applied to solve the original pseudorange data of the receiver, which reduces the special requirements of satellite constellation, satellite almanac and channel pseudorange delay. The multi-system satellite clock joint positioning algorithm based on a forgetting factor is adopted to realize two-dimensional positioning and avoid data saturation. Through experiments, the method has an 80% positioning error of within 1.6 m and an 90% positioning error of within 2.0 m, achieving two-dimensional positioning in the tunnel.

Keywords: tunnel positioning; two-dimensional positioning; satellite navigation; leaky cable; satellite navigation simulator

0 引言

无人驾驶技术的快速发展^[1-5], 使无人驾驶汽车已从概念走向现实。随着各大城市相继落地无人驾驶汽车项目, 这将深刻地改变人们的出行方式以及对汽车的认

知。无人驾驶可以在不需要人工干预的条件下自主完成驾驶任务, 这依赖于高精度的卫星导航技术。然而由于卫星导航信号的特性, 难以穿透山体、建筑物, 特别是在隧道、地下等特殊环境, 导航信号的缺失使得卫星导航终端无法连续工作。这也为无人驾驶技术的继续发展

收稿日期:2024-08-05; 修回日期:2024-09-18。

作者简介:汤小龙(2000-),男,硕士研究生。

通讯作者:宋茂忠(1962-),男,教授,博士生导师。

引用格式:汤小龙,宋茂忠.多模模拟源分布激励泄漏电缆的隧道内二维定位方法[J].计算机测量与控制,2025,33(9):230-236.

带来了问题与挑战。

近年来,针对隧道、地下空间、室内等场景的定位技术层出不穷。比如:无线网(WIFI, wireless fidelity)、超宽带(UWB, ultra wide band)、蓝牙、射频识别(RFID, radio frequency identification)等等。在室内定位研究中,利用WIFI信号的到达时间差,可以实现无源定位,文献[6]提出了一种基于WIFI的多参数室内无源定位技术。通过几何关系解释到达角、飞行时间和多普勒频移等参数,利用参数模型量化用户运动和信道状态信息之间的关系,并将多参数估计问题转化为最大似然估计问题,最终输出目标位置。这种方法可以利用现有的WIFI网络,但在动态环境中由于信号的反射、折射以及多径效应都可能导致定位精度低和稳定性差的问题。蓝牙技术以其低功耗的特点也被广泛用于室内定位的研究中,文献[7]通过在定位环境中部署蓝牙网关采集标签的特征信息,应用指纹匹配技术,实现对位置的精确测定。蓝牙标签的多节点覆盖,可以用低成本的方式实现定位需求,但同时也引入了由于多节点同时工作而导致的信号干扰、信道拥塞和计算延迟等问题。UWB测距是利用信号到达时间,根据三边测量法、定标差分原理进行定位。文献[8]在差分定位算法基础上,引入已知的定标标签,通过在接收端补偿固定时钟差,实现对标签时钟的修正,提高定位精度。文献[9]基于深度学习训练分类模型对UWB测距定位进行改进,提高了动态环境中的定位准确性,但需要大量特定环境下的训练集才能达到理想效果。文献[10]利用RFID射频识别电子标签的编码信息并结合车载里程计数据来确定车辆位置,这种方法通过多种传感器的数据融合弥补了单一传感器可能存在的不足,但需要安装大量的RFID标签,增加了成本和技术复杂度。

针对隧道、地下空间的二维定位,文献[11]利用无线传感网络的信号强度值,提出了一种隧道环境中车辆二维定位的方法。通过局部线性嵌入算法和半监督极限学习机模型相结合,离线阶段完成降维处理和位置映射,在线阶段进行信号强度数据处理,估计车辆位置。文献[12]基于UWB测距技术,采用对称双向双边测距算法,并利用粒子群算法优化基于到达时间的定位方法,提高了二维定位精度,在地铁隧道中能稳定运行。无论是无线传感网还是UWB测距,都依赖于信号的指纹,而隧道内的环境复杂多变,如信号的多径效应、电磁干扰等复杂性,给机器学习和室内外无缝切换带来麻烦。基于卫星导航信号的定位方案是解决目前问题的另一种手段。文献[13]提出的基于北斗卫星的导航定位延伸系统,将隧道外的北斗信号二次处理后,实时同步到隧道转发设备,通过多个中继节点实现信号全覆盖,并实现了列车上行、下行线路定位授时的应用要求。这

种中继转发的方案可以在隧道内部实现连续、稳定的卫星导航信号覆盖,避免进出隧道时信号丢失的情况,但需要布设多个中继节点,增加了系统成本和复杂性。文献[14-16]研究了基于模拟源的隧道内、地下空间定位技术。文献[14]中的关键技术是通过在隧道或地下空间安装导航信号模拟器,实时仿真并播发卫星导航模拟信号,并不断修正卫星数据,用于隧道定位,定位精度在10m以内。文献[15]提出了一种泄漏电缆垂直分布的模拟源信号覆盖方案,利用星间伪距差的二维定位算法对接收机位置进行二次解算,达到室内伪距定位的米级精度。文献[16]提出了一种针对模拟源的时间校准方案,通过一个直连到接收机的时间服务器来减少同步误差,提高定位精度。但无线时钟同步相对于有线解决方案来说,引入了新的误差累积。基于模拟源的隧道、地下空间二维定位方案可以在已有的卫星导航终端上实现定位,但需要严格的时钟校准和误差修正才能实现更高精度的定位。

本文提出了一种多模模拟源与泄漏电缆组合的隧道二维定位方法,以解决隧道内卫星导航的二维定位问题。利用卫星导航模拟源产生全球定位系统(GPS, global positioning system)、北斗卫星导航系统(BDS, beidou satellite navigation system)、格洛纳斯导航系统(GLONASS, global navigation satellite system)三模导航信号,激励平行泄漏电缆。根据信号传播路径,推导了多系统组合钟差联合定位公式,为减小接收机工作中产生的系统偏差和随机误差,给出了基于最小二乘的组合钟差修正算法,同时引入遗忘因子,在钟差修正过程中可以降低旧数据对结果的影响,避免数据饱和现象,定位精度和结果鲁棒性得到明显提升。

1 隧道二维定位系统结构及原理

隧道二维定位系统如图1所示,由多模多通道卫星导航信号模拟源、两根平行放置的泄漏电缆、射频调制器、多模卫星导航接收机和若干同轴电缆组成。

多模多通道卫星导航信号模拟源工作原理:通过上位机生成实时的全球定位系统NAV电文、北斗导航系统D1和D2电文、格洛纳斯系统导航电文。数字信号处理器(DSP, digital signal processing)完成电文解码,获取卫星星历参数,包括:全球定位系统卫星的时间参数、历书、基本导航信息;北斗导航系统卫星的历书、基本导航信息、时间同步信息;格洛纳斯系统卫星的运动参数、时间参数、卫星状态、历书。根据模拟坐标对卫星可见性进行判断,计算可见星的轨道位置、卫星速度以及到达模拟坐标的传播延时;进一步根据传播延时计算导航信号的码相位、载波相位,根据卫星速度计算多普勒频偏。将这些参数控制字送到现场可编程门

阵列 (FPGA, field programmable gate array), FPGA 根据卫星号生成测距码并与导航电文进行扩频调制, 再与中频载波进行二进制相移键控调制生成数字中频信号。模转换器 (D/A, digital to analog) 实现数字中频到模拟中频的转换。最后利用不同本振的射频调制模块分别实现三系统的导航信号射频调制。

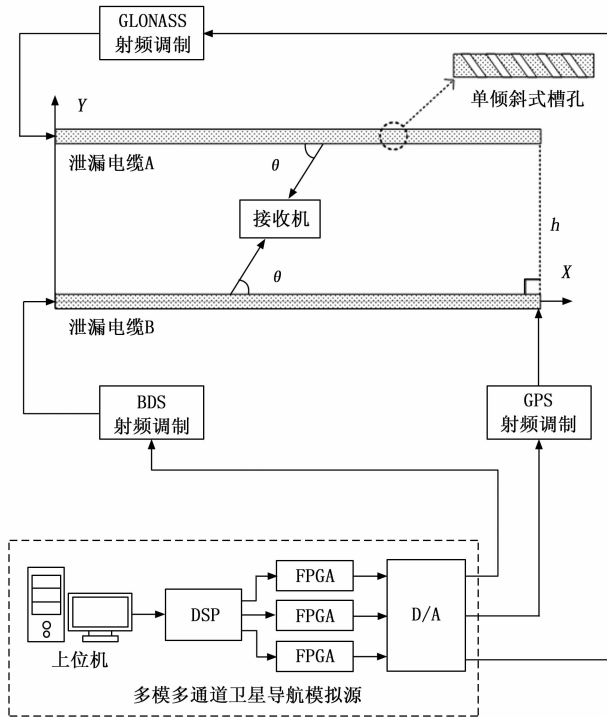


图1 隧道二维定位系统示意图

多模模拟源以隧道中心点为模拟坐标, 分通道产生全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯系统三模卫星导航信号。两根泄漏电缆长度相等为 l_{LCX} 、间距为 h ; 平行泄漏电缆的铺设要使得两电缆开槽方向与 X 轴夹角一致, 保证格洛纳斯导航信号从电缆射出的辐射角与全球定位系统导航信号从电缆射出的辐射角相等, 均为 θ 。为减小射频信号长线传输的衰减和辐射, 将全球定位系统中频信号通过同轴电缆传输到泄漏电缆的右端, 经过射频调制后激励泄漏电缆 B 的右端; 将北斗导航系统中频信号和格洛纳斯系统中频信号分别经过同轴电缆传输到泄漏电缆左端, 然后通过各自射频调制器, 分系统激励泄漏电缆 B 和 A 的左端口。三系统导航信号通过两根泄漏电缆传输, 并向隧道区域辐射。

全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯系统三系统导航信号在平行泄漏电缆覆盖的隧道区域内传播路径如图2所示。全球定位系统导航信号从泄漏电缆 B 右端的激励点进入电缆, 在电缆中的传播距离为 l_1 , 随后以辐射角射出, 经空气传播 d_1 后, 到达接收机; 北斗导航信号从泄漏电缆 B 左端的激励点进入电缆, 在电

缆中的传播距离为 l_2 , 随后沿辐射角方向射出, 同样地经空气传播 d_1 后, 到达接收机; 格洛纳斯导航信号则从泄漏电缆 A 左端的激励点进入电缆, 在电缆中的传播距离为 l_3 , 随后以辐射角射出, 经空气传播 d_2 后, 到达接收机。

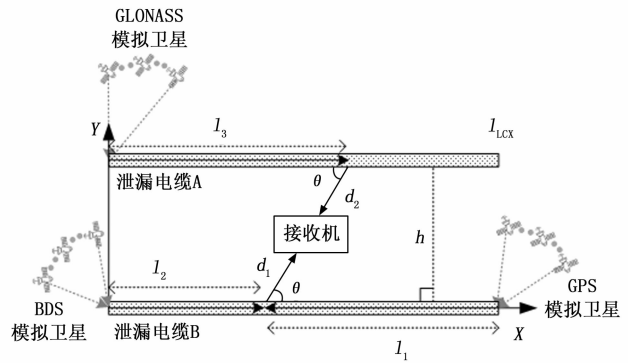


图2 导航信号在隧道内的传播路径示意图

2 多系统组合钟差联合定位算法

2.1 多系统组合钟差联合定位算法

导航信号在空气中的传播速度为光速 c , 而泄漏电缆中电波的传播速度与电缆的材质、发泡技术相关, 考虑到泄漏电缆中的电波传播速度 v 小于光速, 因此全球定位系统导航信号的传播等效距离 S_{GPS} 、北斗导航信号的传播等效距离 S_{BDS} 、格洛纳斯系统导航信号的传播等效距离 S_{GLO} 分别与图2中信号传播路径的关系如下:

$$\begin{cases} S_{GPS} = \frac{c}{v} l_1 + d_1 \\ S_{BDS} = \frac{c}{v} l_2 + d_1 \\ S_{GLO} = \frac{c}{v} l_3 + d_2 \end{cases} \quad (1)$$

根据图2所示的几何关系解直角三角形, 可以得到传播距离与接收机坐标 (x, y) 之间的关系:

$$\begin{cases} l_1 = l_{LCX} - x + \frac{y}{\tan\theta} \\ l_2 = x - \frac{y}{\tan\theta} \\ l_3 = \frac{h}{\tan\theta} + x - \frac{y}{\tan\theta} \\ d_1 = \frac{y}{\sin\theta} \\ d_2 = \frac{h - y}{\sin\theta} \end{cases} \quad (2)$$

在平行泄漏电缆覆盖区域内利用多模卫星导航接收机采集原始伪距观测量, 建立全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯三系统的伪距观测方程:

$$\rho_j^i = r_j^i + c \cdot (\delta t_j - \delta t_{j,sv}^i) + c \cdot (I_j^i + T_j^i) + c \cdot \tau_j + \epsilon_{j,p} + S_j \quad (3)$$

其中: $j = \text{GPS, BDS, GLO}$ 分别表示全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯系统; $i = 1, 2, \dots, n$ 表示卫星号。 ρ_j^i 是伪距观测量, r_j^i 是模拟卫星到信号模拟点的模拟距离, δt_j 是接收机钟差, $\delta t_{j,sv}^i$ 是卫星钟差, I_j^i 是模拟的电离层延时, T_j^i 是模拟的对流层延时, τ_j 是接收机处理延时, $\epsilon_{j,p}$ 是多径和噪声, S_j 是导航信号经泄漏电缆和空气传播的等效距离。 $\delta t_{j,sv}^i$ 可以根据模拟源解码电文获取的卫星星历计算得到; I_j^i , T_j^i 可以借助模拟源的电离层、对流层延时估算模型校正。因此, 联合解算得到的组合钟差 Δt_j 由三部分组成, 分别是接收机钟差 δt_j 、接收机处理延时 τ_j 、信号在隧道内传播等效距离 S_j :

$$\Delta t_j = \delta t_j + \tau_j + \frac{S_j}{c} \tag{4}$$

将式 (1) 和式 (2) 代入式 (4), 便能建立多系统组合钟差与接收机坐标之间的关系:

$$\begin{cases} \Delta t_{\text{GPS}} = \delta t_{\text{GPS}} + \tau_{\text{GPS}} + \frac{l_{\text{LCX}} - x + \frac{y}{\tan\theta}}{v} + \frac{\frac{y}{\sin\theta}}{c} \\ \Delta t_{\text{BDS}} = \delta t_{\text{BDS}} + \tau_{\text{BDS}} + \frac{x - \frac{y}{\tan\theta}}{v} + \frac{\frac{y}{\sin\theta}}{c} \\ \Delta t_{\text{GLO}} = \delta t_{\text{GLO}} + \tau_{\text{GLO}} + \frac{x + \frac{h-y}{\tan\theta}}{v} + \frac{\frac{h-y}{\sin\theta}}{c} \end{cases} \tag{5}$$

接收机钟差 δt_j 对于不同的导航系统是不同的, 需要利用模拟源给各通道附加时延进行校正, 保证三系统的导航系统时间同步; 由于不同系统的导航信号处理算法各异, 处理延时 τ_j 也不相同, 需要根据特定接收机事先测定全球定位系统、格洛纳斯系统分别与北斗导航系统之间的差异值 $\Delta\tau_1, \Delta\tau_2$:

$$\begin{cases} \Delta\tau_1 = \tau_{\text{GPS}} - \tau_{\text{BDS}} \\ \Delta\tau_2 = \tau_{\text{GLO}} - \tau_{\text{BDS}} \end{cases} \tag{6}$$

根据式 (5) 给出的组合钟差与接收机坐标关系, 可以推导出隧道二维定位的多系统组合钟差联合定位公式:

$$\begin{cases} x = \frac{v}{2}(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GPS}} + \Delta\tau_1) + \frac{1}{2}\left(l_{\text{LCX}} + \frac{h}{\tan\theta}\right) + \frac{c\cos\theta}{2}\left(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GLO}} + \Delta\tau_2 + \frac{h}{v\tan\theta}\right) \\ y = \frac{c\sin\theta}{2}(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GLO}} + \Delta\tau_2) + \frac{ch\cos\theta}{2v} + \frac{h}{2} \end{cases} \tag{7}$$

2.2 基于遗忘因子的组合钟差修正

接收机坐标与组合钟差 $\Delta t_{\text{GPS}}, \Delta t_{\text{BDS}}, \Delta t_{\text{GLO}}$ 密切相关, 定位精度受限于组合钟差的数据质量, 但是接收机的钟源频率特性会随接收机工作时间和温度的变化而产生系统偏差和随机误差^[17-18], 从而导致定位不准确。

组合钟差修正算法的基本思想: 对组合钟差测量值建立二次多项式模型, 利用最小二乘法进行参数估计, 每取得新的测量值, 都需要计算新的估计参数, 然后将估计参数用于组合钟差修正。

组合钟差可以用二次多项式模型表示:

$$x(t_k) = \beta_0 + \beta_1 t_k + \beta_2 \frac{t_k^2}{2} + w(t_k) + n(t_k) \tag{8}$$

其中: $t_k, k = 0, 1, 2, \dots, N$ 表示观测时刻; $x(t_k)$ 表示组合钟差的测量值; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ 是二次多项式系数; $w(t_k)$ 是时钟的相位噪声; $n(t_k)$ 是接收机测量噪声。写成矢量表达式:

$$\mathbf{x}(N) = \mathbf{t}(N)\boldsymbol{\beta} + \mathbf{w}(N) + \mathbf{n}(N) \tag{9}$$

其中: $\mathbf{x}(N) = [x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_N)]^T$ 是组合钟差测量值矢量; $\boldsymbol{\beta} = [\beta_0, \beta_1, \beta_2]^T$ 表示二次多项式系数矢量; $\mathbf{w}(N), \mathbf{n}(N)$ 分别表示相位噪声矢量、测量噪声矢量; $\mathbf{t}(N)$ 是描述测量值和二项式系数之间的关系矩阵:

$$\mathbf{t}(N) = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & \frac{t_1^2}{2} \\ 1 & t_2 & \frac{t_2^2}{2} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_N & \frac{t_N^2}{2} \end{bmatrix} \tag{10}$$

二次多项式系数矢量的估计值为 $\bar{\boldsymbol{\beta}}$, 若 $\bar{\boldsymbol{\beta}}$ 的取值可以使得下述的目标函数 $J(\bar{\boldsymbol{\beta}})$ 取得最小值, 则认为组合钟差修正模型的系数矢量最优解为 $\bar{\boldsymbol{\beta}}$, 这种方法是最小二乘参数估计:

$$J(\bar{\boldsymbol{\beta}}) = [\mathbf{x}(N) - \mathbf{t}(N)\bar{\boldsymbol{\beta}}]^T [\mathbf{x}(N) - \mathbf{t}(N)\bar{\boldsymbol{\beta}}] \tag{11}$$

上式对新旧测量值的处理权重相同, 当测量时间足够长, 由于旧值的累积会出现数据饱和现象, 影响钟差修正精度。引入遗忘因子矩阵 $\mathbf{Q}(N) = \text{diag}(\lambda^{N-1}, \lambda^{N-2}, \dots, \lambda, 1), \lambda \in (0, 1)$ 。根据遗忘因子 λ 的取值不同, 可以不同程度地削减旧值的影响, 接近于 0 表示遗忘速度加快, 修正结果更加依赖于新的测量值; 接近于 1 则表示遗忘速度缓慢, 修正结果受旧的测量值影响。遗忘因子的取值策略, 取决于接收机的运动状态。当接收机处于静止状态, 遗忘因子取值选取接近 1 的值; 当接收机处于运动状态, 遗忘因子取值选取接近 0 的值。因为当接收机快速运动时, 数据的统计特性会迅速变化, 因此需要遗忘因子取较小的值, 以便算法能够快速遗忘旧数据, 从而匹配数据的新趋势:

$$J(\bar{\boldsymbol{\beta}}) = [\mathbf{x}(N) - \mathbf{t}(N)\bar{\boldsymbol{\beta}}]^T \cdot \mathbf{Q}(N) \cdot [\mathbf{x}(N) - \mathbf{t}(N)\bar{\boldsymbol{\beta}}] \tag{12}$$

为了求解在 N 次测量值下的多项式系数矢量 $\bar{\boldsymbol{\beta}}(N)$ 。首先令式 (12) 中的目标函数对 $\bar{\boldsymbol{\beta}}$ 求偏导, 并使偏导结果为 0, 可得:

$$\bar{\beta}(N) = [t^T(N)Q(N)t(N)]^{-1} \cdot t^T(N)Q(N)x(N) \quad (13)$$

$$\bar{\beta}(N-1) = [t^T(N-1)Q(N-1)t(N-1)]^{-1} \cdot t^T(N-1)Q(N-1)x(N-1) \quad (14)$$

将 $t^T(N)Q(N)x(N)$ 和 $t^T(N)Q(N)t(N)$ 都以矩阵元素形式展开, 可以得到如下关系:

$$t^T(N-1)Q(N-1)x(N-1) \cdot \lambda = t^T(N)Q(N)x(N) - t_N x(t_N) \quad (15)$$

$$t^T(N-1)Q(N-1)t(N-1) \cdot \lambda = t^T(N)Q(N)t(N) - t_N t_N^T \quad (16)$$

其中: $t_N = \left[1, t_N, \frac{t_N^2}{2}\right]^T$, $x(t_N)$ 表示第 N 次组合钟差的测量值; 根据式 (14) 和式 (15) 可得:

$$t^T(N-1)Q(N-1)t(N-1) \cdot \bar{\beta}(N-1) \cdot \lambda = t^T(N)Q(N)x(N) - t_N x(t_N) \quad (17)$$

将式 (16) 和式 (17), 代入式 (13) 可得:

$$\bar{\beta}(N) = \bar{\beta}(N-1) + T(N)t_N[x(t_N) - t_N^T \bar{\beta}(N-1)] \quad (18)$$

其中: $T(N) = [t^T(N)Q(N)t(N)]^{-1}$, 结合式 (16) 中 $t^T(N)Q(N)t(N)$ 的展开关系, 由矩阵求逆定理可以得到 $T(N)$ 的求解递推式:

$$T(N) = \frac{1}{\lambda} \left[T(N-1) - \frac{T(N-1) \cdot t_N t_N^T \cdot T(N-1)}{t_N^T T(N-1) t_N + \lambda} \right] \quad (19)$$

式 (18) 是基于遗忘因子的二次多项式系数 $\bar{\beta}(N)$ 求解递推式, $\bar{\beta}(N)$ 可由 $\bar{\beta}(N-1)$ 以及第 N 次组合钟差的测量值 $x(t_N)$ 计算得到。组合钟差修正值 $\hat{x}(t_N)$ 可由 $\bar{\beta}(N)$ 求得:

$$\hat{x}(t_N) = t_N^T \cdot \bar{\beta}(N) \quad (20)$$

3 实验结果与分析

3.1 实验步骤

本实验选取的测试环境如图 3 所示, 将两根等长 50 m 的泄漏电缆 A、泄漏电缆 B 平行放置, 两电缆间距 6 m。首先, 多模模拟源可以分通道产生隧道中心点处的多系统卫星导航信号, 包括: 全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯系统导航信号。然后, 不同系统的导航信号分别单独激励泄漏电缆, 并在隧道空间中沿泄漏电缆做横向和纵向的信号强度测试, 保证单一导航信号能实现均匀覆盖。接着, 三系统导航信号同时激励泄漏电缆, 并通过信号放大器调节功率增益, 使不同导航系统信号之间不会出现干扰和互相压制。最后, 在平行泄漏电缆覆盖的区域内做定位测试, 设置卫星导航接收机, 用于输出原始伪距观测量、导航电文、卫星星历等数据。

以北斗导航信号激励点为原点, 如图 2 所示建立直

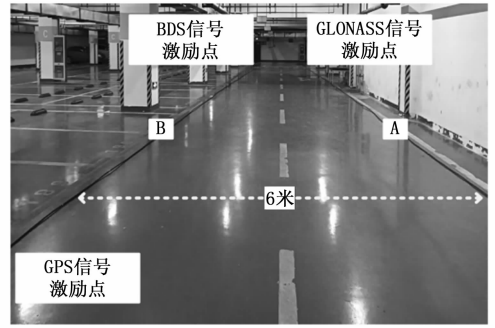


图 3 实验场景

角坐标系。定点实验中, 分别采集了四点的实验数据: (20 m, 1.5 m)、(30 m, 1.5 m)、(20 m, 4.5 m)、(30 m, 4.5 m)。轨迹实验中, 沿 (10 m, 0.5 m) 到 (25 m, 6 m) 再到 (40 m, 0.5 m) 的轨迹匀速运动, 并采集实验数据。利用这些数据, 根据多系统组合钟差联合定位算法计算位置结果, 并将定位结果分别用简单滑动滤波处理和基于遗忘因子修正算法处理, 对比其定位性能, 最终输出用户在坐标系中的相对位置。

3.2 结果与分析

根据 2.1 节推导的隧道内坐标求解公式可知, 隧道内坐标结果 (x, y) 与 $(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GPS}})$, $(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GLO}})$ 相关。对组合钟差分别进行简单滑动滤波和遗忘因子修正算法处理, 图 4 显示的是 $(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GPS}})$, $(\Delta t_{\text{BDS}} - \Delta t_{\text{GLO}})$ 结果对比。遗忘因子修正算法可以有效避免异常值的影响, 使组合钟差趋于平滑。

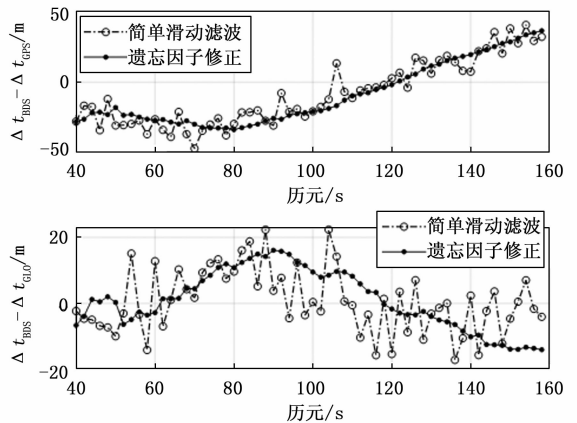


图 4 组合钟差结果对比

从图 4 的分析可知, 遗忘因子修正算法应用于组合钟差处理中, 可以获得更加平滑的钟差序列数据。由于钟差的平滑性直接影响到定位点的聚集程度, 进而影响最终的定位精度, 因此通过该算法优化组合钟差能够显著提高定位的准确性和可靠性。

在定点实验中, 分别采集了四点的实验数据 (20 m,

1.5 m)、(30 m, 1.5 m)、(20 m, 4.5 m)、(30 m, 4.5 m)。图 5 是简单滑动滤波的定位结果与遗忘因子修正算法的定位结果。通过计算对应的偏差和均方根误差, 对两种方法进行对比。利用偏差可以衡量定位准确性, 其描述的是定位点与真实点之间的偏离程度; 均方根误差可以衡量定位稳定性, 其描述的是定位点离散程度。表 1 给出的是简单滑动滤波处理后的偏差和均方根误差结果, 表 2 给出的是遗忘因子修正算法处理后的偏差和均方根误差结果。

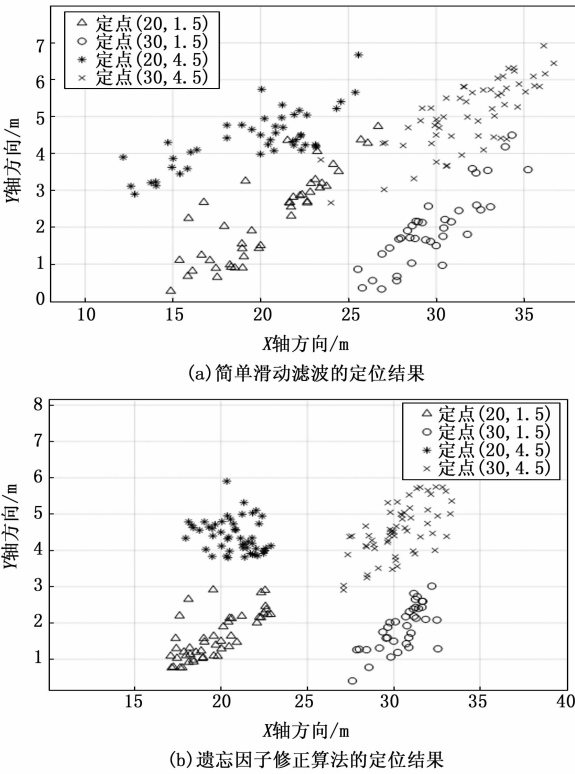


图 5 隧道内定点定位结果

表 1 简单滑动滤波的定点定位精度 m

定点	偏差	均方根误差
(20,1.5)	3.67	1.56
(30,1.5)	3.56	1.91
(20,4.5)	3.44	1.86
(30,4.5)	3.87	2.20

表 2 遗忘因子修正算法的定点定位精度 m

定点	偏差	均方根误差
(20,1.5)	1.75	0.82
(30,1.5)	1.36	0.74
(20,4.5)	1.74	0.78
(30,4.5)	1.87	0.91

根据表 1、表 2 数据结果可知, 简单滑动滤波处理后的定位结果, 其偏差最大值为 3.87 m, 而遗忘因子

修正算法的定位结果, 其偏差最大值为 1.87 m, 降低了 2 m。同样地, 简单滑动滤波处理后的定位结果, 其均方根误差最大值为 2.20 m, 而遗忘因子修正算法的定位结果, 其均方根误差最大值为 0.91 m, 降低了 1.29 m。上述结果分析, 遗忘因子修正算法使得偏差最大值和均方根误差最大值都有所减小, 引入遗忘因子的修正算法在定点实验数据的处理中, 一方面使得定位点更加靠近真实点, 另一方面也提高了定位点的聚集程度, 定位结果的准确性和稳定性更好。

遗忘因子修正算法的定位结果, 其偏差平均值为 1.68 m, 相较于简单滑动滤波的定位结果, 偏差平均值降低了 1.96 m, 精确度提高了 54%。遗忘因子修正算法的定位结果, 其均方根误差的平均值为 0.81 m, 相较于简单滑动滤波的结果, 均方根误差平均值降低了 1.07 m, 稳定性提高了 57%。从图 5 中简单滑动滤波的定位结果和遗忘因子修正算法的定位结果对比, 也能直观看出简单滑动滤波处理与遗忘因子修正算法处理的定位结果存在明显差异, 无论是定位点精确度还是聚集程度, 都得到了显著改善。遗忘因子修正算法在处理数据时能更有效地减少误差, 提升定位的精确度和稳定性, 提高系统的抗噪声性能。

在动态轨迹定位实验中, 沿着 (10 m, 0.5 m) 到 (25 m, 6 m) 再到 (40 m, 0.5 m) 的理论轨迹匀速运动, 采集原始观测量, 利用多系统组合钟差联合定位算法进行定位解算后, 分别绘制采用简单滑动滤波处理和遗忘因子修正算法处理的定位结果, 如图 6 所示。并且统计二者定位结果偏差的累积分布函数曲线 (CDF, cumulative distribution function), 如图 7 所示。

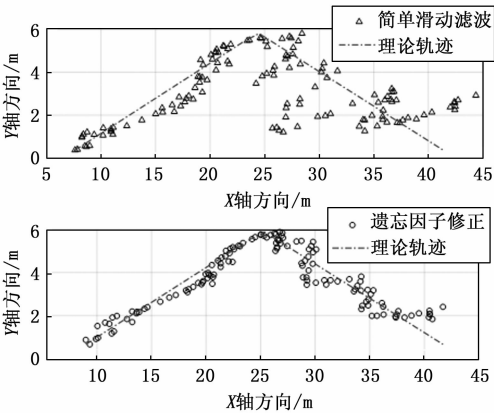


图 6 隧道内轨迹定位结果

通过对图 6 和图 7 的分析可以看出, 使用简单滑动滤波算法处理后的定位轨迹并不理想, 这是由于系统偏差和随机误差较大, 导致定位结果与理论轨迹的偏离程度显著, 图 7 显示超过 60% 的定位点偏离真实轨迹 2 m 以上。并且随着实验过程的进行, 观测时间的增加, 这

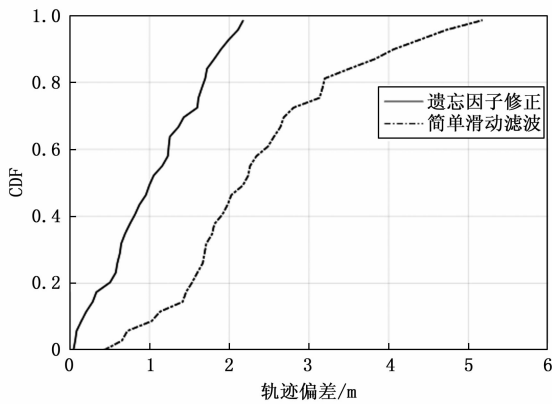


图 7 隧道内轨迹定位偏差 CDF 曲线

种偏离程度有逐渐增大的趋势，定位结果精度低，定位效果差。然而，在引入遗忘因子修正算法后，定位效果得到了显著改善。根据图 7 数据显示，80% 的定位点的偏差被控制在了 1.6 m 以内，而 90% 的定位点的偏差在 2 m 以内。遗忘因子能有效降低旧数据对组合钟差修正的影响，组合钟差修正过程中的系统误差随时间的累积效应得以改善，在动态轨迹测量实验中，该算法显示出良好的适应性和鲁棒性。

4 结束语

本文将卫星导航模拟源与泄漏电缆用于导航信号缺失的隧道空间，利用电磁波在泄漏电缆中的辐射特性，实现均匀稳定的全球定位系统、北斗导航系统、格洛纳斯系统导航信号覆盖。并在接收端提供了多系统组合钟差联合定位算法，以及误差修正算法，实现了隧道内二维定位的要求。为隧道定位、地下空间定位给出了新的解决方案，同时也为卫星导航拓展应用提供了新的思路。

参考文献:

- [1] DE LA TORRE G, RAD P, CHOO K K R. Driverless vehicle security: Challenges and future research opportunities [J]. *Future Generation Computer Systems*, 2020, 108: 1092–1111.
- [2] BISSELL D, BIRTCHNELL T, ELLIOTT A, et al. Autonomous automobiles: The social impacts of driverless vehicles [J]. *Current Sociology*, 2020, 68 (1): 116–134.
- [3] EDWARDS D J, AKHTAR J, RILLIE I, et al. Systematic analysis of driverless technologies [J]. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 2022, 20 (6): 1388–1411.
- [4] HUO Y, ZHANG C. A review of key technologies for environment sensing in driverless vehicles [J]. *World Electric Vehicle Journal*, 2024, 15 (7): 290.
- [5] DONG L, SUN D, HAN G, et al. Velocity-free localization of autonomous driverless vehicles in underground intelligent mines [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020, 69 (9): 9292–9303.
- [6] 王颖颖, 常俊, 武浩. 室内 WiFi 定位技术的多参数优化研究 [J]. *计算机工程*, 2021, 47 (9): 128–135.
- [7] 葛敏婕, 赵子涵. 基于蓝牙技术的物联网室内定位系统 [J]. *物联网技术*, 2021, 11 (11): 52–57.
- [8] 董宇, 逯暄, 彭甫镛, 等. 基于 TOA 算法的 UWB 室内定位的定标方法 [J]. *测控技术*, 2023, 42 (11): 1–6.
- [9] SUNG S, KIM H, JUNG J I. Accurate indoor positioning for UWB-based personal devices using deep learning [J]. *IEEE Access*, 2023 (11): 20095–20113.
- [10] EDMUND ARPPINV, CRAIG S, MAX D. A high accuracy vehicle positioning system implemented in a lane assistance system when GPS is unavailable [J]. *No. CTS*, 2011: 11–18.
- [11] 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.
- [12] 李伟杰, 戴亚文, 唐雨, 等. 基于 UWB 的地铁隧道定位系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2019, 27 (8): 198–201.
- [13] 蒋韵, 张文字, 练灿明, 等. 高铁隧道内基于北斗卫星的导航定位延伸系统研究 [J]. *铁道通信信号*, 2020, 56 (1): 48–50.
- [14] 陈建平, 刘鑫. 基于全球卫星定位导航系统的隧道定位装置 [P]. 中国: 201921835150. 9, 2020–02–21.
- [15] 尹立华, 宋茂忠, 徐家俊, 等. 虚拟星座伪卫星和双泄漏电缆覆盖的室内定位 [J]. *测控技术*, 2024, 43 (6): 40–45.
- [16] KIM W, SEO J. Low-cost GNSS simulators with wireless clock synchronization for indoor positioning [J]. *IEEE Access*, 2023, 11: 55861–55874.
- [17] 宋成, 王飞雪, 庄钊文. 基于遗忘因子最小二乘的 GPS 接收机钟差预测算法研究 [J]. *测绘科学*, 2008 (s1): 41–43.
- [18] 马蕊, 吕晶, 胡相誉, 等. 接收机钟差模型构建技术研究 [J]. *通信技术*, 2017, 50 (4): 622–629.
- [19] 刘绍龙, 朱滨. 基于安卓设备 GNSS 原始观测值的分析方法 [J]. *信息通信*, 2020 (10): 20–22.
- [20] LI G, GENG J. Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices [J]. *GPS solutions*, 2019, 23 (3): 90.
- [21] ROBUSTELLI U, BAIOCCHI V, PUGLIANO G. Assessment of dual frequency GNSS observations from a Xiaomi Mi 8 Android smartphone and positioning performance analysis [J]. *Electronics*, 2019, 8 (1): 91.