

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108946

室内伪卫星载波多径误差抑制方法研究^{*}

夏 炎¹, 潘树国², 蔚保国³, 赵 越², 张 衡³

(1. 南京工业大学测绘科学与技术学院 南京 211816; 2. 东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096;
3. 卫星导航系统与装备技术国家重点实验室 石家庄 050081)

摘 要:为提升伪卫星在室内多径环境中的定位精度,根据室内伪卫星载波多径的时空变化特征建立了一种基于用户空间位置的多径误差改正模型。首先提取静态采样点的载波双差多径误差值,以采样点的三维坐标为输入、多径误差为输出,采用基于径向基核函数的支持向量回归进行误差模型训练,并借助留一法交叉验证获得模型的最优超参数。在该模型基础上,通过迭代不断修正载波双差观测方程,使得位置解能够最大程度地逼近真实坐标,从而达到抑制多径的目的。强多径室内环境下静态相对定位实验表明,多径改正后的整体平面定位精度提升到厘米-分米级,垂直精度提升到 1 m 以内。该方法无需对系统进行改造,适用于结构化室内环境中的伪卫星高精度定位。

关键词: 伪卫星;室内定位;载波相位;支持向量回归;多径抑制

中图分类号: P228 TH761 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 420

Carrier multipath error mitigation method for the indoor pseudolite system

Xia Yan¹, Pan Shuguo², Wei Baoguo³, Zhao Yue², Zhang Heng³

(1. School of Geomatics Science and Technology, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Key Laboratory of Satellite Navigation System and Equipment Technology, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: To improve pseudolite positioning accuracy in the indoor multipath-contaminated environment, a multipath error correction model based on the user space position is formulated, which utilizes the spatio-temporal variation characteristics of indoor pseudolite carrier multipath. To be specific, the double-differenced carrier multipath errors of the static sampling points are extracted, and the three-dimensional coordinates of these points are taken as the input and the multipath error as the output. The error model is trained by the support vector regression based on the radial basis kernel function, and the optimal hyperparameters of the model are achieved by the leave-one-out cross-validation method. On the basis of this model, the double-differenced carrier observation equations are modified continuously through iteration. The position solutions can approximate the real coordinates to the greatest extent. Thus, the multipath is mitigated. The static relative positioning experiments in the strong-multipath-contaminated indoor environment show that the overall horizontal positioning accuracy after multipath correction is improved to the centimeter-decimeter level. The vertical accuracy within 1 m. This method can be implemented without system transformation, which is suitable for pseudolite high-precision positioning in the structured indoor environments.

Keywords: pseudolite; indoor positioning; carrier phase; support vector regression; multipath mitigation

0 引 言

高精度室内定位是导航与位置服务领域的一个重要

研究方向^[1-3]。伪卫星(pseudoLite, PL)作为全球导航卫星系统(global navigation satellite systems, GNSS)的重要补充,主要用于封闭空间或 GNSS 信号遮挡较严重区域的高精度定位。与其他定位技术相比,伪卫星的优势在

于可以播发与 GNSS 相类似的信号,信号覆盖范围广,且与 GNSS 定位原理基本相同,不但可以与 GNSS 直接进行组合定位,还可以独立组网提供位置服务,使用载波相位观测值可以实现厘米级的定位精度^[4-5]。一般的商用接收机通常只需进行固件升级就可以同时接收 GNSS 和伪卫星信号,因此伪卫星是构建室内外无缝一体化导航体系十分理想的系统。

伪卫星定位系统面临的关键技术主要包括时间同步、线性化误差、远近效应和多径效应^[6-7]。在室内定位中,通常可以采用星间和接收机间的差分技术来消除时间同步误差;一些非线性滤波算法,如无迹卡尔曼滤波、粒子滤波等,可以用来削弱线性化误差的影响;对于伪卫星信号远近效应,一般是通过脉冲发射方案予以抑制。然而,由于伪卫星的系统构成、信号强度、工作环境等方面因素,其多径误差要比 GNSS 系统的更大、更复杂也难以消除,因此多径效应已经成为影响伪卫星室内定位精度的最主要的误差源。相比于 GNSS,室内伪卫星多径的主要特点如下^[8]:1)伪卫星距离用户接收机天线较近,因此产生的多径效应要比 GNSS 的强很多;2)伪卫星一般是静止不动的,无法像 GNSS 通过长时间的观测来削弱多径误差;3)由于室内环境相对复杂,伪卫星多径信号的来源也十分复杂,一些专用的 GNSS 抗多径天线往往并不适用于伪卫星系统。

目前国内外对于伪卫星室内高精度定位的研究多集中于组网优化、时间同步、动态模糊度固定等方面^[9-12],对多径误差抑制方法的研究相对欠缺,大部分研究是选择理想观测环境或仿真环境进行实验以忽略多径误差,这限制了伪卫星室内定位的精度提升和实际应用场景。在室内多径环境中,使用伪卫星载波相位观测值的定位精度通常难以达到厘米级,一般在分米-亚米级^[13-14]。为了缓解多径效应,Locata 系统在其发射机端(LocataLite)采用3种类型的信号分集技术来实现,分别为空间、极化和频率分集,而接收机天线则采用相关器波束形成技术以适应室内多径环境^[15]。但该方法的技术复杂度高,成本昂贵,并且在室内环境下,其定位体制并不能彻底解决多径衰落问题。首尔大学的研究人员使用手工制作的螺旋天线,通过调整螺旋的长度来控制室内伪卫星天线的增益模式^[16-17]。但该方法作用范围有限,且只能抑制来自伪卫星端(天花板和墙壁)的多径效应,对接收机端多径的抑制效果不佳。欧盟委员会联合研究中心(JRC)的学者为了减小时间同步以及信号传播效应带来的测距误差问题,采用基于伪卫星信号信噪比的加权质心方法,结合无线信号衰落模型进行室内定位实验。虽然一定程度上避免了多径效应对定位结果的影响,但由于未使用载波相位观测值,只获得了米级定位精度^[18]。因此,想要获得更高精度的室内定位结果,并将伪卫星应用到更加

复杂的室内环境中,以实现真正意义上的 GNSS/伪卫星室内外无缝高精度定位,研究具有高可用性和高可靠性的多径抑制方法显得十分紧迫。

对于静止的伪卫星和接收机,多径误差在时域上波动性较小,可以将其视作未知的恒定参数,通过一定的方法预先估计,从而削弱或消除多径误差。而在动态环境中,多径效应会显著增加观测值的噪声水平,误差很可能是随机的^[7]。由于室内环境结构在不同位置上的特性较为随机,反射面和反射介质没有规律,且不同位置的遮挡情况不同,因此伪卫星信号在不同位置受到的多径干扰也不同。尽管室内环境相对室外更加复杂,但对于大多数室内场景,其空间是有限且结构化的,就多径误差在空间上的变化特征而言,理论上在数据处理过程中可以通过建立用户空间位置与多径误差的映射关系来修正定位观测方程,从而提高室内定位的精度。这其中最重要两点就在于采样点的布设密度以及多径预测模型的选择。因此,本文考虑从观测值域的角度来研究伪卫星室内定位多径误差的抑制方法。

1 伪卫星室内定位数学模型

在室内定位中,伪卫星发射天线一般是固定在室内高处,坐标精确已知。伪卫星可以播发与 GNSS 卫星类似的信号,用户使用专用或大众接收机进行信号接收。理论上当接收到4颗以上伪卫星发送的信号,对信号进行处理获得观测量数据,即可实现室内定位。伪卫星接收机从发射端获得的观测量主要有伪距、载波相位、载噪比和多普勒观测值。对于室内伪卫星定位,对流层、电离层、潮汐和相对论效应、星历等误差均可以忽略。

1.1 观测方程

不同于 GNSS 卫星的高精度原子钟,伪卫星钟一般使用低成本的温度补偿晶体振荡器,因此伪卫星钟很不稳定,难以做到彼此间时间同步,也就不能通过解观测方程来校准接收机钟差。为了消除伪卫星钟差和接收机钟差,通常采用相对定位的方式进行室内坐标解算。对于单频伪卫星室内定位,其非差伪距和载波观测方程为:

$$P_r^i = \rho_r^i + c(\delta t_r - \delta t^i) + m_p + e_p \quad (1)$$

$$L_r^i = \rho_r^i + c(\delta t_r - \delta t^i) + \lambda_1 N_1 + m_L + e_L \quad (2)$$

式中: P_r^i 为接收机 r 对伪卫星 i 的伪距观测值; L 为载波相位观测值; ρ 为伪卫星到接收机的几何距离; c 为光速; δt_r 和 δt^i 分别为接收机钟差和伪卫星钟差; λ_1 为波长; N_1 为模糊度参数; m_p 、 m_L 为伪距和载波多径误差; e_p 、 e_L 为伪距和载波观测噪声。

为消除钟差,作站间和星间双差可得如下观测方程:

$$\nabla \Delta P_{r,b}^{i,j} = \nabla \Delta \rho_{r,b}^{i,j} + \nabla \Delta m_p + \nabla \Delta e_p \quad (3)$$

$$\nabla \Delta L_{r,b}^{i,j} = \nabla \Delta \rho_{r,b}^{i,j} + \lambda_1 \nabla \Delta N_{r,b}^{i,j} + \nabla \Delta m_L + \nabla \Delta e_L \quad (4)$$

式中: $\nabla \Delta$ 为双差算子, j 和 b 分别表示参考星和基准站。式(3)和(4)即为异步伪卫星室内定位观测方程。需要注意的是,上述方程成立的前提条件是基准站和移动站接收机必须保持严格的时间同步,即二者在相同的时间基准下产生观测值和时间戳,一般要求两台接收机的采样时间同步误差在 $1 \mu\text{s}$ 之内^[18]。

在 GNSS 定位中,常用的随机模型主要有等权模型、基于卫星高度角的模型和基于信号强度的模型。对于伪卫星室内定位,由于没有对流层和电离层误差,也不存在类似室外复杂环境中高大障碍物的遮挡,实际应用中,伪卫星一般静止安置在室内较高处,伪卫星的高度角对于信号质量的影响很小。而载噪比随机模型在伪卫星室内定位中对定位精度没有明显的提升^[19],因此本文使用等权模型进行接收机位置的解算。

1.2 模糊度解算策略

和 GNSS 一样,伪卫星室内高精度定位实现的关键是模糊度参数的正确固定。伪卫星模糊度固定的方法主要有两种,即已知点初始化(known point initialization, KPI)和在航解算(on-the-fly, OTF)。由于室内伪卫星一般是静止不动的,对于静态定位,多历元的观测值对模糊度解算的贡献不大,因此多采用 KPI 方法获取初始的整周模糊度。而对于动态定位,可以使用 OTF 方法通过多历元观测构建不共线的观测方程来求解初始模糊度,其中最常用的就是最小二乘模糊度降相关平差法(least-squares AMBiguity decorrelation adjustment, LAMBDA)。

本文采用 KPI 方法进行初始模糊度的固定。在观测条件良好的静态已知点进行观测,利用伪卫星发射天线和接收机的坐标计算得到伪卫星发射机到接收机的真实几何距离,代入载波双差观测方程式(4)可得模糊度参数解为:

$$\nabla \Delta N_{r,b}^{i,j} = \text{round}((\nabla \Delta L_{r,b}^{i,j} - \nabla \Delta \rho_{r,b}^{i,j})/\lambda_1) \quad (5)$$

式中: $\text{round}(\cdot)$ 为四舍五入函数。经过一段时间的观测,计算所有历元模糊度解,对异常解进行剔除,得到最终的初始模糊度。需要说明的是,由于室内环境复杂,尽管已知点的观测条件相对较好,但伪卫星观测值仍可能会受到弱多径效应的干扰,而这部分误差会被模糊度参数吸收。同时,双差观测方程也会将多径误差噪声放大为原来的 2 倍,从而影响模糊度解算的准确性。然而,弱多径环境下的载波多径误差不会超过波长的 $1/4$,双差后不会超过波长的 $1/2$,因此使用式(5)进行模糊度解算时,可以认为初始点的载波双差多径误差在 ± 0.5 周以内是合理的。此外,多历元的观测也有助于排除不正确的模糊度解。

在获得模糊度初始解之后,可将其作为已知值,随后在进行正式的室内定位时,就可以使用接收到的伪卫星载波相位观测值进行接收机位置的实时解算。一旦发生周跳,先前依靠 KPI 方法获得的模糊度参数需要重新解算。

1.3 非线性滤波算法

GNSS 或伪卫星定位系统本质上为非线性系统。对于 GNSS 观测方程,由于卫星与地面接收机之间的距离非常远,卫星到接收机的真实位置和到初始位置的观测向量近似平行,因此方程线性化(一阶泰勒展开)后,二阶残余量可以忽略不计。然而伪卫星与接收机的距离较近,尤其在室内环境,当接收机的位置偏差较大时,观测向量不能视为平行,线性化后的二阶残余量不可忽略。

伪卫星系统模型的非线性不仅影响定位结果的精度,还会影响定位算法的收敛性。当系统模型的非线性度较严重时,基于一阶泰勒展开式的最小二乘牛顿迭代法和扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)算法都将不再适用。

对于非差观测方程,线性化误差 R 的边界值为^[8,20]:

$$0 \leq R \leq \frac{\|\Delta \mathbf{x}\|^2}{2r_x^i} = \frac{(X - X_0)^2 + (Y - Y_0)^2 + (Z - Z_0)^2}{2r_x^i} \quad (6)$$

由式(6)可知,线性化误差的大小取决于两个参数:接收机位置偏差 $\Delta \mathbf{x}$ 和接收机与卫星之间的距离 r_x^i 。

对于使用载波相位观测值的伪卫星室内高精度定位应用,假定观测距离为 $2 \sim 30 \text{ m}$, 10 cm 的位置误差能够带来最大 2.5 mm 的线性化误差。而由于受到复杂室内环境中强多径信号的干扰,接收机位置偏差会变得很大,当其达到 0.5 m 时,最大线性化误差能超过 6 cm ,如图 1 所示。

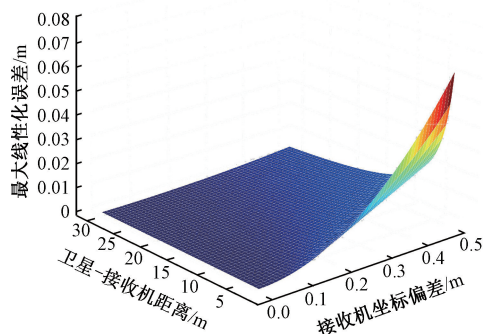


图 1 伪卫星载波定位中线性化误差边界值

Fig. 1 Linearization error boundary value in pseudolite carrier positioning

对于本文所使用的双差观测方程,易得其二阶残余量的边界值为:

$$0 \leq R \leq \max\left(\frac{\|\Delta \mathbf{x}^i\|^2}{2r_x^i}, \frac{\|\Delta \mathbf{x}^j\|^2}{2r_x^j}\right) \quad (7)$$

式中: r_x^i 和 r_x^j 分别为卫星 i 和 j 到接收机的距离。因此,为了保证定位结果的高精度,必须采用相应的方法对线性化误差进行消除。本文采用无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)进行位置参数的解算。与 EKF 不同,UKF 无需对非线性系统进行线性化近似,而是通过特定的采样策略选取一定数量的 Sigma 点,这些点具有和系统状态分布相同的均值和协方差,经过非线性变换后,可以至少以二阶泰勒展开式的精度逼近系统状态验后均值和协方差^[21-22]。

2 室内伪卫星载波多径误差改正

提出一种基于接收机空间位置的载波多径误差改正方法,以改善伪卫星室内定位精度。为了得到定位区域内每个点相对于不同伪卫星的多径大小,布设一定密度的已知站点并计算它们的载波双差多径误差值,将接收机坐标作为输入变量、载波双差多径误差作为输出变量进行非线性回归建模,便可得到该区域内各点的多径误差预测值,用于修正伪卫星载波双差观测方程。

2.1 载波双差多径误差提取

建立多径误差空间模型的第一步是要提取采样点的多径误差。在伪卫星和移动站采样点位置坐标已知的前提下,通过 KPI 方法固定模糊度参数后,即通过式(8)计算得到各采样点的载波双差多径误差。

$$\nabla \Delta m_L = \nabla \Delta L_{r,b}^{i,j} - \nabla \Delta \rho_{r,b}^{i,j} - \lambda_1 \nabla \Delta N_{r,b}^{i,j} \quad (8)$$

室内两个静态观测点的载波双差多径时间序列如图2所示。可以看到,不同观测点对应的多径误差不同,其平均值一般不超过 0.5 周,但对观测值的影响仍然是显著的。多径误差的大小在时域上接近于一个常数值,变化幅度很小,最大的标准差仅在 0.012 周左右。因此多径误差的时空变化特性有利于构建结构化室内环境中基于接收机空间位置的误差改正模型。

在实际应用中,对各采样点进行长时间观测,最后将所有历元的载波双差多径误差求平均值,即可获得采样点最终的多径误差,为后续的回归模型建立提供训练样本。

2.2 支持向量回归(SVR)模型

支持向量机(support vector machine, SVM)是一种基于统计学习理论的分类技术,其基本思想是在多维空间中找到一个超平面对样本数据进行分割,离这个超平面

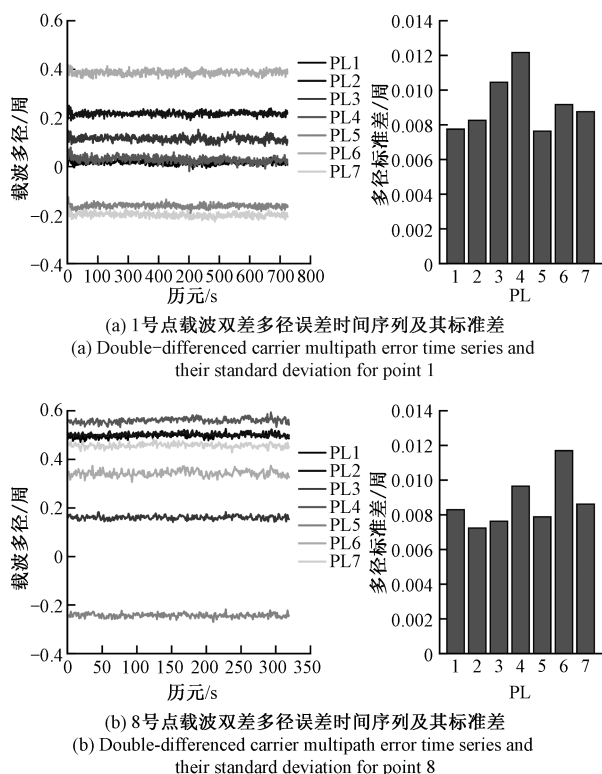


图2 室内静态观测点的伪卫星多径误差时空变化

Fig. 2 Spatio-temporal variations of pseudolite multipath errors at indoor static observation points

最近的点被称为“支持向量”,使超平面和支持向量之间的间隔尽可能的大。将 SVM 应用到函数拟合回归预测称为 SVR,该回归方法具有学习速度快、全局最优和泛化能力强的优点,非常适用于小样本、非线性和高维数的数据回归建模^[23-24]。

本文特征向量为移动站的三维坐标,对于 l 个输入向量,使用 S_i 表示第 i 个向量 $S_i = (x_i, y_i, z_i)$ 。目标输出向量为不同伪卫星的载波双差多径误差值 $(\nabla \Delta m_{l_1}, \nabla \Delta m_{l_2}, \dots, \nabla \Delta m_{l_p})$, p 为伪卫星数量。

给定一个从输入空间 $\mathbb{R}^N$ 到特征空间 F 的非线性映射,满足 $\phi: \mathbb{R}^N \rightarrow F, s \mapsto \phi(s)$, 核函数为 $k(s_i, s_j) = \phi(s_i)^T \phi(s_j)$, 可以得到一个对称核矩阵 $K = \{K_{ij}\}_{i,j=1}^l$, 其中 $K_{ij} = k(s_i, s_j)$ 。

考虑线性函数 f 的回归问题,该函数将每个数据 $\phi(s_i)$ 建模为其对应的载波多径误差,可知 $\nabla \Delta m_{l_i}$ 为:

$$\nabla \Delta m_{l_i} = f(\phi(s_i)) = \phi(s_i)^T w + b \quad (9)$$

式(9)需要求解常量 b 和 w 。

定义线性 ε -不敏感损失函数为:

$$L(\phi(s_i), \nabla \Delta m_{l_i}, f) = \max(0, |\nabla \Delta m_{l_i} - f(\phi(s_i))| - \varepsilon), \varepsilon \geq 0 \quad (10)$$

式中: ε 为不敏感损失系数。使总损失最小化。

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2 + C \sum_{i=1}^l L(\phi(s_i), \nabla \Delta m_{li}, f) \right\},$$

$$C \geq 0 \quad (11)$$

式中: C 为惩罚因子,用于平衡经验风险和模型复杂度,控制对超出误差上限 ε 的样本的惩罚程度。由于允许拟合误差的出现,引入松弛因子 ξ_i 和 $\hat{\xi}_i$, 原始优化问题可以转化为:

$$\min \left\{ \frac{1}{2} \| \mathbf{w} \|^2 + C \sum_{i=1}^l (\xi_i + \hat{\xi}_i) \right\} \quad (12)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} -(\varepsilon + \xi_i) \leq \phi(s_i)^T \mathbf{w} + b - \nabla \Delta m_{li} \leq \varepsilon + \hat{\xi}_i \\ \xi_i, \hat{\xi}_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, l \end{cases} \quad (13)$$

通过拉格朗日函数,引入拉格朗日乘子 α 和 α^* , 将式(12)和(13)的优化模型转化为对偶问题进行求解:

$$\max \left\{ \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \nabla \Delta m_{li} - \varepsilon \sum_{i=1}^l (\alpha_i + \alpha_i^*) - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*)(\alpha_j - \alpha_j^*) k(s_i, s_j) \right\} \quad (14)$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) = 0, \alpha_i, \alpha_i^* \in [0, C], i = 1, 2, \dots, l \quad (15)$$

求解此二次规划问题可求出 α 的值,同时求得 $\mathbf{w}$ 的值为:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) \phi(s_i) \quad (16)$$

参数 b 的值为:

$$b = \nabla \Delta m_{li} - \phi(s_i)^T \mathbf{w} - \varepsilon, \alpha_i \in (0, C) \quad (17)$$

$$b = \nabla \Delta m_{li} - \phi(s_i)^T \mathbf{w} + \varepsilon, \alpha_i^* \in (0, C) \quad (18)$$

令 $\beta_i = \alpha_i^* - \alpha_i$, 可得线性函数 f 为:

$$f(\phi(s_i)) = \sum_{i=1}^l \beta_i k(s_i, s_j) + b \quad (19)$$

同理,其他伪卫星的载波多径误差值 $\nabla \Delta m_{pi}$ 可以使用相同的方法计算得到。

在支持向量分类和回归中,核函数决定输入数据映射的好坏。本文使用高斯径向基函数(radial basis function, RBF),其表达式为:

$$K(s_i, s_j) = e^{-\frac{\|s_i - s_j\|^2}{2\gamma^2}} = \prod_{q=1}^N e^{-\frac{(s_{iq} - s_{jq})^2}{2\gamma^2}} \quad (20)$$

式中: γ 为核的宽度; q 为特征维数。高斯径向基核函数的逼近特性不仅能够实现输入空间到高维空间的非线性映射,并且易于执行,在 SVR 的核函数中应用最广。

2.3 最优超参数确定

SVR 的预测效果强烈地依赖不敏感损失系数 ε 、惩罚因子 C 和宽度系数 γ 的选择。不敏感损失系数 ε 控制支持向量的稀疏性, ε 值的选择影响回归估计的精度。惩罚因子 C 决定样本偏差和机器推广能力之间的折衷,

C 的取值大,训练误差会随之减小,SVR 模型的泛化能力差; C 的取值小,会使得 ε 不敏感,训练误差变大。宽度系数 γ 反映了支持向量之间的相关程度。 γ 值过小会导致模型复杂度高,泛化能力较差; γ 值过大,支持向量间的影响增强,回归模型难以达到足够的精度。因此,选择合适的超参数对 SVR 的性能十分重要。

支持向量学习的模型选择等价于超参数的调节。目前使用最广泛的调参方法是交叉验证,基本思路是将 n 个样本分成 k 个子集,将其中 $k-1$ 个子集的数据作为训练集,在剩余的子集上验证模型的性能。遍历所有的 $k-1$ 个子集进行训练,最后计算模型在所有子集上的平均性能。使用格网穷举法,按照一定的间隔对每一组超参数对应的模型都执行上述操作,平均性能最好的一组参数即为最优超参数。

由于本文移动站采集点的数量有限,因此采用一种特殊的交叉验证方法即留一法(leave-one-out, LOO)^[25] 进行最优超参数的选择。LOO 是将样本数据划分为 n 个子集,即每个子集只有一个样本。这种交叉验证方法不会浪费太多数据,且适用于小样本数据的学习。为了获得最优的 SVR 参数,循环遍历每一组超参数获得相应的模型,计算模型在所有子集上的 LOO 误差,将 LOO 误差最小的模型参数视为最优超参数。需要注意的是,由于存在多颗伪卫星,需要对计算得到的 LOO 误差进行进一步的平均。因此,LOO 误差的实际计算公式为:

$$Err_{LOO} = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |f^i(s_i) - \nabla \Delta m_{ji}| \quad (21)$$

式中: $f^i(\cdot)$ 为剔除第 i 个训练样本后得到的预测函数。

2.4 伪卫星室内高精度定位整体方案

基于上述分析和结论,本文提出一种新的伪卫星室内定位多径抑制方法,算法流程如图 3 所示。

1) 建立基于用户空间位置的多径误差回归模型,具体思路为对伪卫星和基准站的天线位置进行标定,在观测条件相对较好的初始点使用 KPI 方法固定移动站载波双差模糊度;随后按照一定密度均匀布设移动站静态采样点,标定其天线位置,并进行较长时间的观测;依次计算各静态观测点的载波双差多径误差值,求取其观测弧段内的平均值;以采样点的三维坐标为输入值、多径误差为输出值,使用 RBF-SVR 训练数据,获得多径误差空间改正模型。

2) 在此基础上进行伪卫星室内定位,步骤如下:1) 使用 KPI 方法固定模糊度后,对观测点进行 UKF 定位解算,获得初始位置解;2) 由于多径回归预测值取决于接收机的准确位置,后者的求解又依赖于准确的多径改正值,因此需要在每个历元内进行迭代计算;3) 当相邻迭代的位置解差值小于设定的门限值,迭代终止,否则继续迭代,直到满足条件,获得最终的位置解。

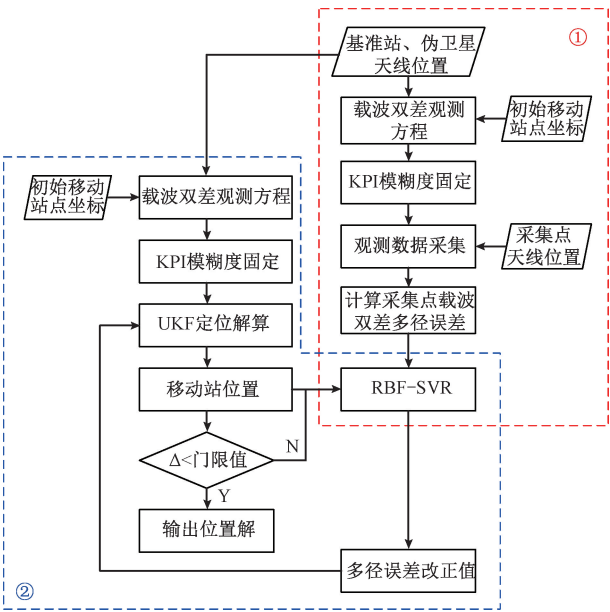


图 3 基于载波多径误差改正模型的伪卫星室内定位流程

Fig. 3 Pseudolite indoor positioning flow chart based on the carrier multipath error correction model

3 实验验证

3.1 多径误差空间模型构建

使用中电 54 所自主研发的伪卫星系统进行载波双差多径误差模型的构建与定位实验。该系统由伪卫星基站、发射天线两部分组成,可调制播发 GPS L1 频率的信号。伪卫星基站内部的信号产生板在时频板提供的时钟下工作,并根据配置信息生成室内伪卫星信号,并由射频子卡完成信号变频处理,生成六路伪卫星信号,通过天线实现室内伪卫星信号的发射。室内定位接收终端接收到伪卫星发射的信号后,对信号进行处理后可进行定位解算。此外,系统采用了脉冲调制技术以抑制远近效应对伪卫星信号处理造成的互相关干扰。

实验场地位于中电 54 所的 C7 测试场。实验场景空间尺寸约为 24.5 m×20 m×13.2 m,为中间挑空的半封闭结构,一楼为开放的大厅环境,伪卫星发射天线安装在房顶,如图 4 所示。可以看到实验场地存在大量玻璃,且墙体和地面较为光滑,容易导致伪卫星信号在传播过程中产生较强的镜面反射,造成多径干扰,因此该环境比较适合进行多径误差建模和抑制实验。

实验所用设备包括 8 颗伪卫星(天线),2 台 u-blox 商用接收机用于接收室内伪卫星信号;2 台笔记本电脑分别用于基准站和移动站观测数据的储存。伪卫星的编号为 PL0~PL7,其中 PL0 为参考星。伪卫星天线、基准站和移动站采样点坐标全部使用全站仪进行标定,并转化为站心坐标系下的三维位置,如图 5 所示。

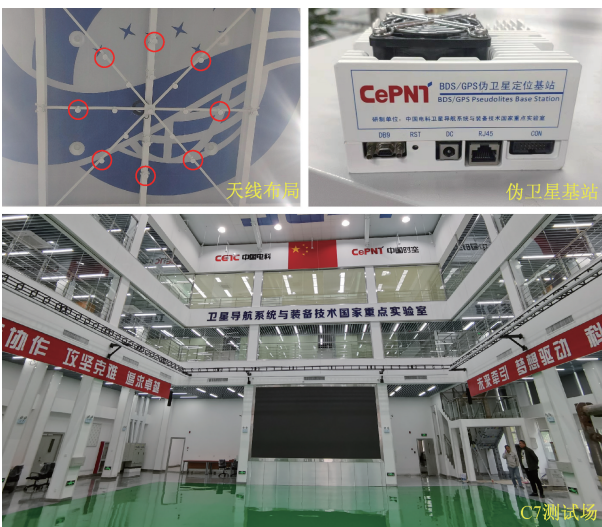


图 4 伪卫星设备与室内定位实验场地

Fig. 4 Pseudolite equipment and experimental site for indoor positioning

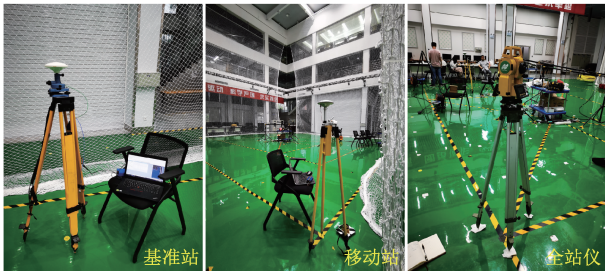


图 5 伪卫星信号接收与位置标定设备

Fig. 5 Pseudolite signal receiving and position calibration equipment

实验总共在 34 个移动站点进行了伪卫星观测数据采集,采样率为 1 Hz,其中 29 个站点用于多径误差模型的构建,剩余的 5 个站点用于后续的定位实验,以测试多径误差模型的有效性。基准站和移动站的分布如图 6 所示,32 号点为基准站所在位置,其余点为移动站采集点,1、10、18、21 和 33 号点为测试点所在位置。

在观测条件相对较好的已知点进行初始化以获得整周模糊度,随后将移动站接收机依次布设到 34 个采样点进行观测。伪卫星数据采集完毕后,在确认没有发生周跳的情况下计算出移动站点的载波双差多径误差值,使用 29 个测试点的数据进行 RBF-SVR 模型训练。根据 LOO 方法计算得到最优超参数, ε 、 C 和 γ 的值分别为 0.05、1.5 和 0.09。图 7 所示为所建立的该实验场景下各颗伪卫星对应的载波多径误差空间图谱。需要说明的是,由于移动站在各采集点的高程变化很小,这里选择 $U=-0.4$ m 进行可视化展示。

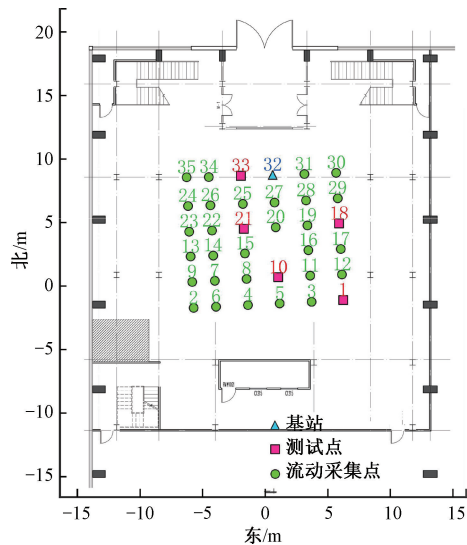


图 6 基准站与移动站采集点的平面相对位置
Fig. 6 The plane relative location distribution of the reference station and rover stations

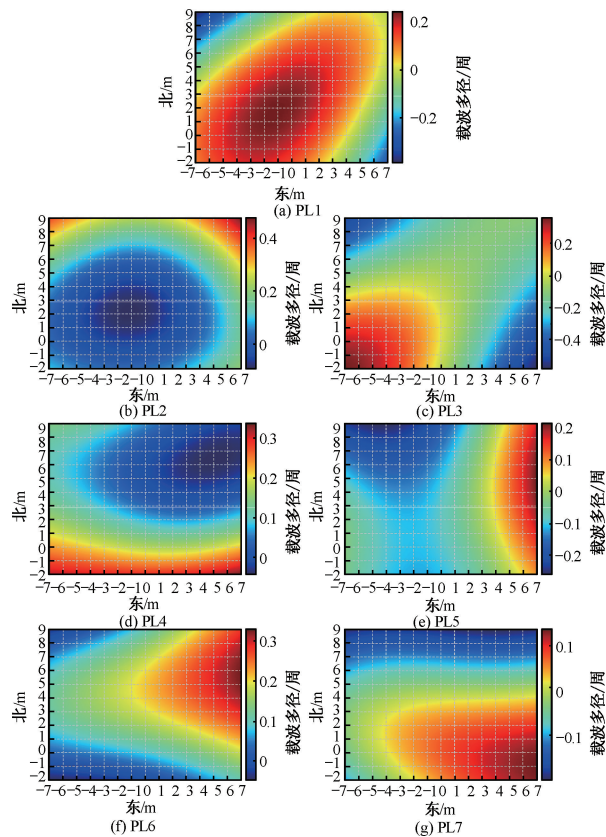


图 7 基于 RBF-SVR 模型的载波多径空间图谱 ($U=-0.4\text{ m}$)
Fig. 7 Carrier multipath spatial atlas based on RBF-SVR model ($U=-0.4\text{ m}$)

对 34 个移动站点进行回归测试,并计算它们的性能指标。表 1 为测试点的均方根误差 (root-mean-square

error, RMSE)、平均绝对百分比误差 (mean absolute percentage error, MAPE) 和决定系数 R^2 统计结果,并与手动设置参数 ($\varepsilon = 0.005$ 、 $C = 10$ 、 $\gamma = 0.1$) 的 RBF-SVR 模型的结果进行了对比。这 3 种用来衡量非线性回归结果好坏的统计指标,其定义分别如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\nabla \Delta m_i - \nabla \hat{\Delta m}_i)^2} \tag{22}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{\nabla \Delta m_i - \nabla \hat{\Delta m}_i}{\nabla \Delta m_i} \right| \times 100\% \tag{23}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\nabla \Delta m_i - \nabla \hat{\Delta m}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\nabla \Delta m_i - \nabla \bar{\Delta m}_i)^2} \tag{24}$$

式中: $\nabla \Delta m$ 为载波双差多径误差真值; $\nabla \hat{\Delta m}$ 为多径误差预测值; $\nabla \bar{\Delta m}$ 为多径误差真值的平均值。RMSE 和 MAPE 值越小表示回归模型的预测结果越好,而 R^2 值越大越接近于 1 则表示拟合效果越好。

表 1 不同的超参数设定方法对应的模型测试结果
Table 1 Model test results corresponding to different hyperparameter setting methods

伪卫星	经验值法			LOO		
	RMSE	MAPE /%	R^2	RMSE	MAPE /%	R^2
PL1	0.205	24.19	0.010	0.148	28.16	-0.031
PL2	0.136	49.07	0.066	0.122	39.20	0.085
PL3	0.179	12.99	0.013	0.169	13.60	0.014
PL4	0.135	65.15	0.172	0.113	56.90	0.339
PL5	0.176	28.11	0.036	0.143	19.98	0.028
PL6	0.171	95.48	0.379	0.128	78.99	0.409
PL7	0.146	39.38	0.019	0.122	36.86	0.048
均值	0.164	44.91	0.099	0.135	39.10	0.128

从表 1 可以看到,相对于经验调参法,LOO 方法的 RMSE 和 MAPE 值更小, R^2 值更大。因此该模型更适用于伪卫星室内结构化多径误差模型的构建。

3.2 基于多径误差修正的伪卫星室内定位

在获得实验场地的伪卫星载波多径误差空间模型之后,即可用于室内定位过程中的多径误差修正。定位实验使用 1、10、18、21 和 33 号 5 个测试点的伪卫星观测数据,注意这 5 个点没有参与上述多径误差模型的构建。

在利用 KPI 方法获得模糊度参数的前提下,构造载波双差观测方程并采用 UKF 对测试点的坐标参数进行估计。由于多径误差依赖接收机的位置,而后者正是需要求解的待估参数,因此为了获得更加准确的多径误差

修正值,需要在每个历元进行迭代计算。1号测试点前两个历元各自迭代100次的误差收敛情况如图8所示。可以看到,第1个历元在10次迭代之后定位结果便开始收敛,而第2个历元只需1~2次迭代便可收敛。这是因为第1个历元一般受到初始坐标偏差的影响,而一旦获得较为准确的位置坐标后,后续历元的迭代次数就会减少。另外,多径误差模型的精度也会影响历元内定位结果的收敛效果。

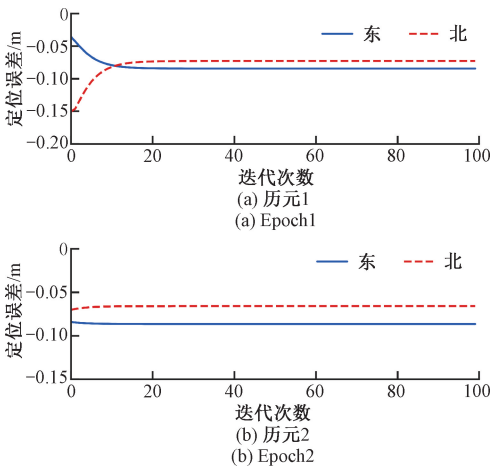


图8 测试点1前两个历元的迭代收敛情况
Fig. 8 The iterative convergence of the first two epochs at point 1

图9~13所示5个测试点多径误差改正前后在东、北、天空3个方向上的定位误差序列,定位误差RMS值如表2所示。由于定位结果通常需要几个历元来收敛,因此在计算每个测试点的误差统计值时使用第10个历元以后的结果。可以看到,经过多径改正之后,5个测试点的定位精度获得了显著的提升。未进行多径改正的测试点定位结果,其平面精度在分米-亚米级水平,垂直精度最差达到了1.756 m。

表2 多径改正前后定位误差RMS值

Table 2 RMS values of positioning error before and after multipath correction						
测试点	未改正/m			改正/m		
	东	北	天空	东	北	天空
1	0.155	0.059	1.026	0.072	0.086	0.687
10	0.374	0.271	1.756	0.048	0.028	0.324
18	0.160	0.679	1.641	0.055	0.425	0.857
21	0.368	0.329	0.860	0.266	0.221	0.547
33	0.294	0.305	0.377	0.008	0.012	0.021

经过多径改正后,1号点3个方向的定位精度分别提升了53.5%、-45.7%和33.0%,尽管N方向定位精度有所下降,但仍然在10 cm以内,达到了8.6 cm,平面总体定位精度获得了提升。10、18、21和33号点3个方向分别提升了87.2%、89.7%和81.5%,65.6%、37.4%、47.8%、27.7%、32.8%、36.4%、97.3%、96.1%、94.4%,其中1、10、33号点在E、N方向的定位精度都达到了10 cm以内。测试点的平面精度总体上保持在厘米-分米级水平,垂直精度在1 m以内。

对于18号点和21号点,虽然定位精度提升明显,但平面精度整体上没有达到10 cm以内,这可能是由于回归模型在这两处附近的多径修正值不够准确造成的。多径误差模型的预测精度直接影响到伪卫星室内定位的精度。针对大场景应用,除了需要对回归模型进行更进一步的精化,合理地增加移动站采集点的布设密度对于提高多径误差模型的准确性也是必要的。

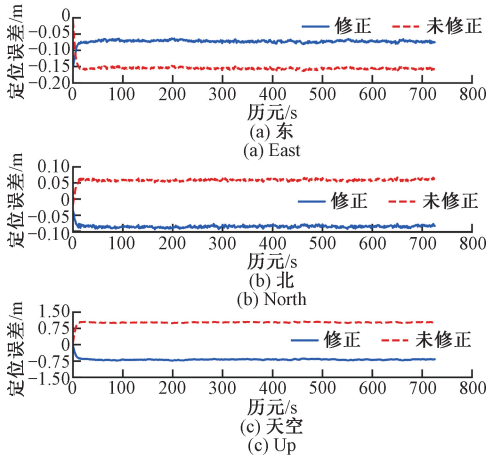


图9 多径改正前后定位误差对比(1号点)
Fig. 9 Comparison of positioning errors before and after multipath correction (point 1)

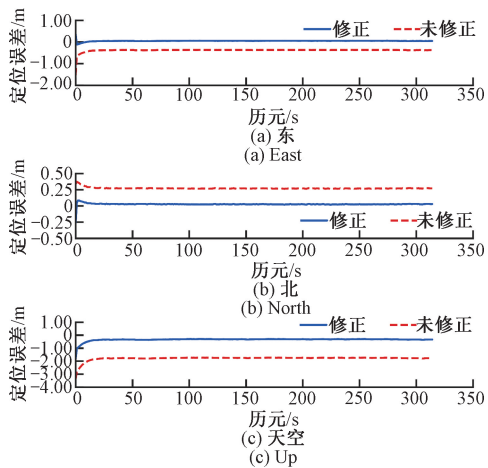


图10 多径改正前后定位误差对比(10号点)
Fig. 10 Comparison of positioning errors before and after multipath correction (point 10)

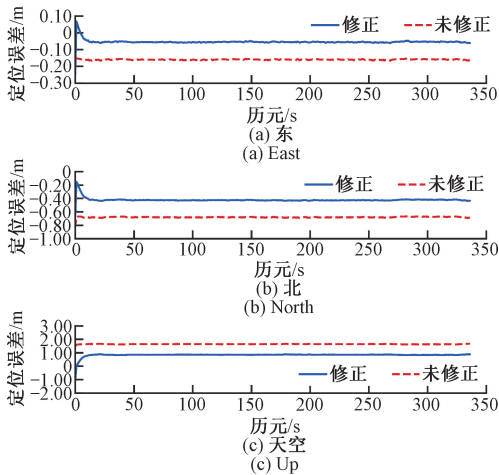


图 11 多径改正前后定位误差对比(18号点)

Fig. 11 Comparison of positioning errors before and after multipath correction (point 18)

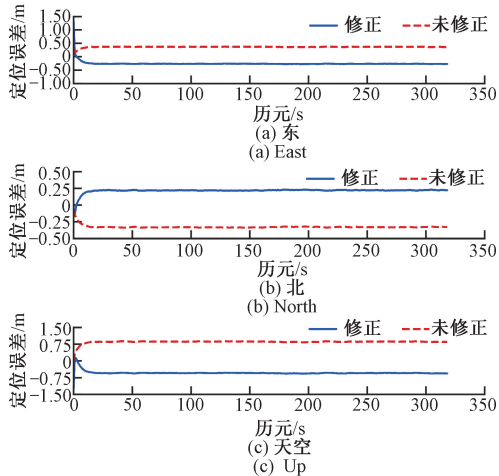


图 12 多径改正前后定位误差对比(21号点)

Fig. 12 Comparison of positioning errors before and after multipath correction (point 21)

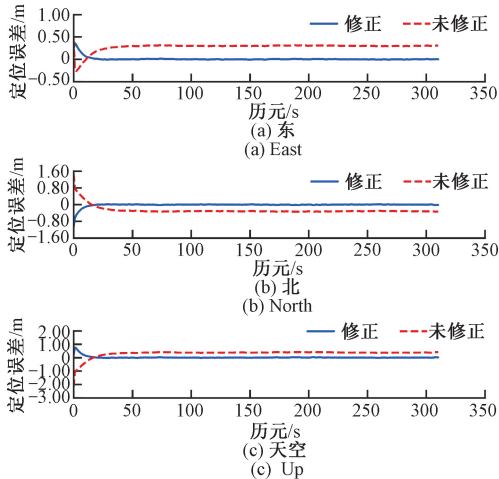


图 13 多径改正前后定位误差对比(33号点)

Fig. 13 Comparison of positioning errors before and after multipath correction (point 33)

4 结 论

对于伪卫星室内高精度定位应用,多径效应是影响其定位精度的最主要因素之一。由于室内环境的复杂性以及伪卫星自身的特性,伪卫星多径通常比 GNSS 多径更加复杂且更加难以处理。传统的通过使用特殊天线的多径抑制方法作用十分有限。本文根据室内伪卫星多径在时空上的不同变化特征建立了基于用户空间位置的多径误差模型,通过迭代修正载波双差观测方程显著提升了结构化环境中伪卫星定位的精度。在对强多径室内环境 5 个静态测试点的定位实验中,经过多径改正后的整体平面定位精度达到了厘米-分米级水平,垂直精度都提升到 1 m 以内。

本文基于迭代 UKF 的伪卫星室内定位方法高度依赖多径误差空间模型的精度,因此,在后续的研究中可以考虑从特征参数、回归模型以及采集点布设密度等方面来进一步提高多径抑制算法的性能,并使之能够适用于更加复杂的非结构化室内多径环境。

参考文献

- [1] FENG D Q, WANG CH Q, HE CH L, et al. Kalman-filter-based integration of IMU and UWB for high-accuracy indoor positioning and navigation [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(4): 3133-3146.
- [2] 孙伟, 李亚丹, 黄恒, 等. 基于级联滤波的建筑结构信息/惯导室内定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(3): 10-16.
- [3] SUN W, LI Y D, HUANG H, et al. A location method of building structure information/inertial navigation combination based on the cascade filtering [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(3): 10-16.
- [4] SHENG CH ZH, YU B G, ZHANG Z T, et al. An optimal indoor trust-region PPP algorithm with constrain of homologous array pseudolite [J]. Advances in Space Research, 2022, 69(5): 1978-1993.
- [5] JIANG W, LI Y, RIZOS C. Locata-based precise point positioning for kinematic maritime applications [J]. GPS solutions, 2015, 19(1): 117-128.
- [6] LI X, ZHANG P, HUANG G W, et al. Performance analysis of indoor pseudolite positioning based on the unscented Kalman filter [J]. GPS Solutions, 2019, 23(3): 1-13.
- [7] DAI L W, WANG J L, TSUJII T, et al. Pseudolite applications in positioning and navigation: Modelling and geometric analysis [C]. Int. Symp. on Kinematic Systems

- in Geodesy, Geomatics & Navigation (KIS2001). Banff, Canada, 2001: 482-489.
- [7] WANG J L. Pseudolite applications in positioning and navigation: Pro-gress and problems [J]. Journal of Global Positioning Systems, 2002, 1(1):48-56.
- [8] 万晓光. 伪卫星组网定位技术研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.
- WAN X G. Research on pseudolite networking positioning technique[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [9] GUO X Y, ZHOU Y B, WANG J L, et al. Precise point positioning for ground-based navigation systems without accurate time synchronization[J]. GPS Solutions, 2018, 22(2): 1-12.
- [10] LI X, HUANG G W, ZHANG P, et al. Reliable indoor pseudolite positioning based on a robust estimation and partial ambiguity resolution method[J]. Sensors, 2019, 19(17): 3692.
- [11] LIU J, ZHAO X L, CAI B G, et al. Pseudolite constellation optimization for seamless train positioning in GNSS-challenged railway stations[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021. (early access).
- [12] SUN Y, WANG J L, CHEN J Y. Indoor precise point positioning with pseudolites using estimated time biases iPPP and iPPP-RTK[J]. GPS Solutions, 2021, 25(2): 1-15.
- [13] 刘洋洋, 廉保旺, 赵宏伟, 等. Kalman 滤波辅助的室内伪卫星相对定位算法[J]. 物理学报, 2014, 63(22):415-421.
- LIU Y Y, LIAN B W, ZHAO H W, et al. Indoor pseudolite relative localization algorithm with Kalman filter [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63 (22): 415-421.
- [14] 徐亚明, 孙福余, 张鹏, 等. 一种利用载波相位差值的伪卫星定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(10):1445-1450.
- XU Y M, SUN F Y, ZHANG P, et al. A pseudolite positioning approach utilizing carrier phase difference[J]. Journal of Wuhan University (Information Science), 2018, 43(10):1445-1450.
- [15] RIZOS C, YANG L. Background and recent advances in the locata terrestrial positioning and timing technology[J]. Sensors, 2019, 19(8): 1821.
- [16] KEE C, YUN D, JUN H, et al. Centimeter-accuracy indoor navigation using gps-like pseudolites [J]. GPS World, 2001, 12(11):14-22.
- [17] KEE C, JUN H, YUN D. Indoor navigation system using asynchronous pseudolites[J]. The Journal of Navigation, 2003, 56(3): 443.
- [18] BORIO D, GIOIA C, BALDINI G. Asynchronous pseudolite navigation using C/N0 measurements[J]. The Journal of Navigation, 2016, 69(3): 639-658.
- [19] 夏炎, 潘树国, 蔚保国, 等. 基于载噪比加权融合的异步伪卫星室内定位方法[J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(2):154-159.
- XIA Y, PAN SH G, YU B G, et al. Asynchronous pseudolite indoor positioning method based on C/N0 weighted fusion [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(2):154-159.
- [20] TEUNISSEN P J G. Nonlinear inversion of geodetic and geophysical data: Diagnosing nonlinearity [M]. Developments in Four-Dimensional Geodesy. Springer, Berlin, Heidelberg, 1990: 241-264.
- [21] 赵琳, 王小旭, 丁继成, 等. 组合导航系统非线性滤波算法综述[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(1): 46-52,58.
- ZHAO L, WANG X X, DING J CH, et al. Overview of nonlinear filter methods applied in integrated navigation system [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2009, 17(1):46-52,58.
- [22] 李燕, 鲁昌华, 张国强, 等. 自适应 UKF 在北斗伪距定位中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(2):125-131.
- LI Y, LU CH H, ZHANG G Q, et al. Research on the Beidou pseudo ranges positioning based on adaptive UKF algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(2):125-131.
- [23] WU Z, LI C, NG J K Y, et al. Location estimation via support vector regression [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2007, 6(3): 311-321.
- [24] 姚英彪, 毛伟勇, 姚瑞丽, 等. 基于改进支持向量回归的室内定位算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(9): 2112-2119.
- YAO Y B, MAO W Y, YAO R L, et al. Indoor positioning algorithm based on improved support vector regression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(9):2112-2119.
- [25] MUKHERJEE S, NIYOGI P, POGGIO T, et al. Learning theory: Stability is sufficient for generalization and necessary and sufficient for consistency of empirical risk minimization [J]. Advances in Computational Mathematics, 2006, 25(1): 161-193.

作者简介



夏炎(通信作者),2021 年于东南大学获得博士学位,现为南京工业大学讲师,主要研究方向为 GNSS 多径检测与抑制技术。

E-mail: yanx@njtech.edu.cn

Xia Yan (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University in 2021. He is currently a lecturer at Nanjing Tech University. His main research interests include GNSS multipath detection and mitigation technique.



潘树国,2007 年于东南大学获得博士学位,现为东南大学教授,博士生导师,主要研究方向为 GNSS 高精度定位与环境智能感知。

E-mail: psg@seu.edu.cn

Pan Shuguo received his Ph. D. degree from Southeast University in 2007. He is currently a professor and a Ph. D. supervisor at Southeast University. His main research interests include GNSS high-precision positioning and environmental intelligent sensing.



蔚保国,1988 年于国防科技大学获得学士学位,1995 年于燕山大学获得硕士学位,2005 年于北京理工大学获得博士学位,现为中国电子科技集团公司第五十四研究所首席科学家,主要研究方向为卫星导航。

E-mail: yubg@sina.cn

Yu Baoguo received B. Sc. degree from National University of Defense Technology in 1988, M. Sc. degree from Yanshan

University in 1995, and Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2005. He is currently the chief scientist at the 54th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation. His main research interests include satellite navigation.



赵越,2018 年于南京理工大学获得学士学位,2021 年于东南大学获得硕士学位,主要研究方向为伪卫星室内定位技术。

E-mail: zhaoyue95@foxmail.com

Zhao Yue received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2018, and M. Sc. degree from Southeast University in 2021. His main research interests include pseudolite indoor positioning technique.



张衡,2013 年于石家庄铁道大学获得学士学位,2016 年于桂林电子科技大学获得硕士学位,现为中国电子科技集团公司第五十四研究所卫星导航方向工程师,主要研究方向为室内外伪卫星系统设计、信号处理与高精度定位。

E-mail: 13582161539@163.com

Zhang Heng received his B. Sc. degree from Shijiazhuang Railway University in 2013, and M. Sc. degree from Guilin University of Electronic Technology in 2016. He is a researcher at the 54th Research Institute of China Electronics Technology Group. His main research interests include indoor and outdoor pseudolite system design, signal processing, and high-precision positioning algorithm.