

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2412435

顾及非视距与系统误差的 UWB 质量控制及其 与 GNSS/INS 的组合定位^{*}

吴鹏博, 潘树国, 高 旺, 刘 宏, 贾丰硕
(东南大学仪器科学与工程学院 南京 210096)

摘 要:为提高 GNSS 拒止环境下定位系统的定位精度与稳定性,本文提出了顾及非视距与系统误差的 UWB 质量控制方法,并实现了其与 GNSS/INS 的组合定位。首先,综合考虑系统的稳定性与定位精度,以 GNSS/INS 松组合+UWB/INS 紧组合的方式构建集中式卡尔曼滤波;在此基础上,针对 UWB 中存在的 NLOS 误差,设计了基于滑动窗口与滤波新息向量的两步 NLOS 误差识别方法;最后,采用基于滤波估计的方法实时补偿 UWB 中的系统误差。实验结果表明,本文提出的 UWB 质量控制方法能够有效减小 NLOS 与系统误差的影响,GNSS/UWB/INS 组合算法水平定位误差在 5cm 以内。在 UWB 布局合理的情况下,该方法无需依赖过多基站也可实现较高的定位精度。

关键词: GNSS/UWB/INS 组合导航;扩展卡尔曼滤波;质量控制;NLOS 误差

中图分类号: TH-3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

UWB quality control and its integrated positioning with GNSS/INS considering NLOS and system errors

Wu Pengbo, Pan Shuguo, Gao Wang, Liu Hong, Jia fengshuo

(School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: To improve the positioning accuracy and stability of the positioning system in GNSS-denied environments, the paper proposes a UWB quality control method considering NLOS and system errors, and achieves its integrated positioning with GNSS/INS. Firstly, considering the stability and accuracy of the positioning system, a centralized Kalman filter is constructed using loose combination of GNSS/INS and a tight combination of UWB/INS. Based on this, aiming at the NLOS error existing in UWB, a two-step NLOS error identification method based on sliding window and innovation vector of the filter is designed. Finally, a method based on filter estimation is used to compensate the system error in UWB in real time. The experiment results show that the proposed UWB quality control method can effectively reduce the impact of NLOS and system errors, and the horizontal positioning error of the GNSS/UWB/INS integrated algorithm is within 5cm. With a reasonable UWB layout, this method can achieve high positioning accuracy without relying on an excessive number of base stations.

Keywords: GNSS/UWB/INS integrated navigation; extended Kalman filter; quality control; NLOS error

0 引 言

对于室外开阔环境来说,全球定位系统(global navigation satellite system, GNSS)已能够达到厘米级的定位精度^[1]。由于卫星信号较为脆弱,容易受到遮挡或干扰,仅靠 GNSS 难以满足移动载体在复杂环境下的定位

需求。惯性导航系统(inertial navigation system, INS)是一种完全自主的导航方式,依靠惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)测得载体三轴角速度与加速度,通过航位推算的方法计算导航信息,因此误差会随时间快速累计^[2]。GNSS/INS 组合导航考虑了两种定位方式互补的特点:GNSS 利用其准确的定位结果修正 INS 累计误差,INS 利用其自主导航的优势保证定位的连续稳

定^[3]。GNSS/INS 组合导航一定程度上解决了移动载体在复杂环境下的定位问题,但 GNSS 拒止环境的定位精度仍有待提高^[4]。除改进 GNSS/INS 组合导航方法外,另一种方法是引入新的定位方式,作为 GNSS 拒止环境下的补充测量,与现有 GNSS/INS 组合系统融合。

目前已有多种针对 GNSS 拒止环境的定位方法,但每种方式都存在一定的局限性。蓝牙、无线局域网定位成本低,但受环境干扰严重,定位精度低^[5-6];伪卫星定位抗干扰能力较强,但使用成本高,对基站布局有较高要求^[7];红外定位精度高,但不能穿透障碍物,覆盖范围小^[8]。超宽带 (ultra-wide band, UWB) 技术利用纳秒级的非正弦波窄脉冲传输数据,拥有较强的抗干扰能力,在视距 (line of sight, LOS) 情况下拥有较高的测距精度,且设备成本低,使用便捷^[9],是 GNSS 拒止环境替代 GNSS 的良好定位方式。然而,实际应用中 UWB 也存在较多问题亟待解决。一方面,受到环境与成本的限制,UWB 基站可能无法形成良好的几何布局,传统定位方法精度较低^[10];另一方面,受物体遮挡与时间延迟的影响,UWB 测距结果含有非视距 (non line of sight, NLOS) 误差与系统误差,需要进行估计与补偿^[11]。

文献[12]提出了基于 GNSS 载波相位的 GNSS/UWB/INS 紧组合方法,文献[13]进一步提出了联邦式滤波结构,两篇文章主要工作集中在数据融合方法,没有完善的数据质量控制方法。文献[14]基于 UWB 的水平精度因子与 GNSS 的载噪比加权调整两个子滤波器的权重,有效减小了 UWB 的不良几何构型与 NLOS 误差的影响;但实际使用中 UWB 测距含有一定的误差,会影响滤波效果。文献[15]针对 UWB 的测距误差进行了必要的预处理,以校正时钟漂移、速度和延迟误差;但该方法需要预先进行大量工作,时间成本较高,仅适用于单一定位场景。目前,组合导航中针对 UWB 的抗差方法不够成熟,急需一种简便有效的 UWB 质量控制方法,提高复杂环境下系统的定位精度与稳定性。

针对上述问题,本文基于 GNSS/UWB/INS 组合定位,提出了一种顾及 NLOS 与系统误差的 UWB 质量控制方法。数据融合部分,本文使用 GNSS/INS 松组合 + UWB/INS 紧组合的集中式卡尔曼滤波。GNSS/INS 松组合简化组合系统,避免 GNSS 载波相位模糊度等复杂参数的估计,提高系统的稳定性;UWB/INS 紧组合提高定位精度,结合本文提出的 UWB 数据质量控制方法,实现过渡区域的连续定位。系统中同时加入了载体运动约束,根据载体实时运动状态修正 INS 速度误差^[16]。UWB 数据质量控制部分,本文提出基于滑动窗口与新息向量的 NLOS 误差识别方法以及基于滤波估计的 UWB 系统误差实时补偿方法。针对 NLOS 误差,采用两步识别过程,保证了识别的准确性;针对 UWB 系统误差,利用卡

尔曼滤波估计并补偿,无需预先标定,提高定位效率。

1 基于 EKF 的 UWB 定位模型

本文使用多基站组网型 UWB 进行定位,UWB 标签获取各基站的测距信息,通过扩展卡尔曼滤波 (extended Kalman filter, EKF) 计算载体位置,能有效减小测距噪声带来的负面影响。UWB 定位模式与 GNSS 相近,适合作为遮蔽环境下 GNSS 的替代技术。

UWB 距离观测方程可表示如下:

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2} \quad (1)$$

其中, d_i 表示第 i 个 UWB 基站的测距值, (x_i, y_i, z_i) 表示第 i 个 UWB 基站的坐标, (x, y, z) 表示 UWB 标签的坐标。该方程处于地心地固坐标系 (ECEF) 下。

针对上述非线性方程,可采用 EKF 方法进行处理。对式(1)在近似位置 (x_0, y_0, z_0) 处进行泰勒展开,忽略高阶项,代替非线性回归模型,有:

$$d_i = d_{i0} + g_{ix}(x - x_0) + g_{iy}(y - y_0) + g_{iz}(z - z_0) \quad (2)$$

式中: $d_{i0}, g_{ix}, g_{iy}, g_{iz}$ 表示如下:

$$d_{i0} = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2 + (z_0 - z_i)^2} \quad (3)$$

$$g_{ix} = \frac{x_0 - x_i}{d_{i0}}, g_{iy} = \frac{y_0 - y_i}{d_{i0}}, g_{iz} = \frac{z_0 - z_i}{d_{i0}} \quad (4)$$

由于 UWB 数据频率较大,载体在短时间内可视为匀速运动,考虑载体的位置和速度,状态方程可表示如下:

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{F}\mathbf{X}_{k-1} + \boldsymbol{\omega}_{k-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{X} = [x \ y \ z \ \dot{x} \ \dot{y} \ \dot{z}]^T \quad (6)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & T & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & T & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & T \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中, $\mathbf{X}$ 为状态向量, $\mathbf{F}$ 为状态转移矩阵, $\boldsymbol{\omega}$ 为过程噪声矩阵, T 为采样时间间隔。

依据线性化 UWB 测距方程,观测方程表示如下:

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{X}_k) + \boldsymbol{\nu}_k \quad (8)$$

$$\mathbf{Z} = [d_1 \ d_2 \ \cdots \ d_n]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} g_{1x} & g_{1y} & g_{1z} & 0 & 0 & 0 \\ g_{2x} & g_{2y} & g_{2z} & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ g_{nx} & g_{ny} & g_{nz} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{Z}$ 为观测向量; $\mathbf{h}(\mathbf{X}_k)$ 为非线性观测方程,与式(1)对应; $\mathbf{H}$ 为观测矩阵,即观测方程的雅可比矩阵; $\boldsymbol{\nu}$ 为观测噪声矩阵。

2 多传感器数据融合方法

目前多传感器较为常用的组合方式有松组合和紧组合两种。松组合系统结构简单,稳定性较好,但卫星、UWB 观测方程数量不足时无法进行量测更新;紧组合在观测方程数量不足时依旧能够进行量测更新,但系统融合了两种异质观测数据,滤波不稳定的风险较大,需要良好的数据质量控制手段。

对于 GNSS/INS 组合,紧组合模式下载波相位模糊度参数传递风险较大,错误的模糊度易导致滤波发散;松组合模式下 GNSS 独立工作,系统拥有较高的稳定性^[17]。在卫星数量足够时,松组合与紧组合效果基本一致,在卫星数量不足时,也可以依靠 UWB 来实现连续定位。综合考虑定位的精度与系统的稳定性,GNSS 与 INS 采用松组合方式融合。

对于 UWB/INS 组合,松组合模式下 UWB 定位精度受到基站部署的限制,且 NLOS 误差识别准确性较低。不同于 GNSS,UWB 不存在模糊度这一未知参数,紧组合模式下系统较为稳定,且该模式下 UWB 数据质量控制能发挥最大作用。在 NLOS 误差较多环境下,紧组合相比松组合具有更大的优势,因此 UWB 与 INS 采用紧组合方式融合。

2.1 GNSS/INS 松组合算法

松组合模式中,GNSS 独立工作,开阔环境下依靠实时动态差分定位技术(real-time kinematic, RTK)和多普勒测速,提供厘米级的位置速度结果。GNSS 与 INS 的位置速度信息于卡尔曼滤波中融合,以纠正 INS 持续产生的导航误差。

GNSS/INS 松组合状态空间模型可表示为:

$$\dot{X}_1 = F_1 X_1 + G W^b \quad (11)$$

$$Z_1 = H_1 X_1 + V \quad (12)$$

其中,

$$X_1 = [\phi^T \quad (\delta v^n)^T \quad (\delta p^g)^T \quad (\varepsilon^b)^T \quad (\nabla^b)^T]^T \quad (13)$$

$$G = \begin{bmatrix} -C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & C_b^n \\ \mathbf{0}_{9 \times 3} & \mathbf{0}_{9 \times 3} \end{bmatrix}, W^b = \begin{bmatrix} \omega_g^b \\ \omega_a^b \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$Z_1 = [(\mathbf{v}_{INS}^n - \mathbf{v}_{GNSS}^n)^T \quad (\mathbf{p}_{INS}^g - \mathbf{p}_{GNSS}^g)^T]^T \quad (15)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{I}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 6} \end{bmatrix}, V = \begin{bmatrix} V_v \\ V_p \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中:上标 n 表示东北天(ENU)地理坐标系, b 表示载体坐标系, g 表示经纬高坐标系;15 维状态向量依次为:失准角、速度误差、位置误差、陀螺仪漂移和加速度计零偏;6 维观测向量为 INS 与 GNSS 的速度/位置之差;

C_b^n 为载体的姿态矩阵; ω_g^b 和 ω_a^b 分别为陀螺仪角速度测量噪声和加速度计比力测量噪声; V_v 和 V_p 分别为 GNSS 速度测量噪声和位置测量噪声;状态转移矩阵 F_1 可根据惯导误差方程推导而来,具体如文献[18]所示。

2.2 UWB/INS 紧组合算法

UWB/INS 紧组合以 UWB 原始测距值为观测量,与 INS 当前位置信息融合,采用 EKF 来校正 INS 导航误差。紧组合算法在 UWB 基站包络面外依旧能够提供较高的定位精度,同时也利于 NLOS 误差的识别。

UWB/INS 紧组合状态模型与 GNSS/INS 松组合一致,量测模型不同。假设 IMU 位置与 UWB 标签位置重合,则 ECEF 坐标系下系统的位置误差可表示为:

$$\delta p = p_{INS} - p_{UWB} \quad (17)$$

式中: p_{INS} 表示 INS 解算的位置, p_{UWB} 表示 UWB 标签实际位置。

结合式(17),UWB/INS 紧组合观测方程为:

$$d_i = \sqrt{(p_{UWB} - p_i)^2} = \sqrt{(p_{INS} - \delta p - p_i)^2} \quad (18)$$

其中, p_i 表示第 i 个 UWB 基站的位置。

上述观测方程处于 ECEF 坐标系下,而状态量中的位置误差处于经纬高坐标系下,需要统一两者的坐标系。经纬高坐标系转到 ECEF 坐标系需要乘以对应的转换矩阵 C_g^e ,具体过程如下:

$$\begin{bmatrix} \delta x \\ \delta y \\ \delta z \end{bmatrix} = C_g^e \begin{bmatrix} \delta L \\ \delta \lambda \\ \delta h \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$C_g^e =$$

$$\begin{bmatrix} -R_{Nh} \sin L \cos \lambda & -R_{Nh} \cos L \sin \lambda & \cos L \cos \lambda \\ -R_{Nh} \sin L \sin \lambda & R_{Nh} \cos L \cos \lambda & \cos L \sin \lambda \\ R \cos L & 0 & \sin L \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$R_{Nh} = R_N + h, R = R_N(1 - e^2) + h \quad (21)$$

式(21)中, R_N 表示地球卯酉圈曲率半径, e 为椭球第一偏心率。

针对非线性方程,采用 EKF 进行处理。对该观测方程在(0,0,0)处进行泰勒展开,忽略高阶项,近似为线性方程。最终观测向量和观测矩阵可表示为:

$$Z_2 = [d_1 \quad d_2 \quad \cdots \quad d_n]^T \quad (22)$$

$$H' = \begin{bmatrix} \frac{\partial(d_1)}{\partial(\delta p_x)} & \frac{\partial(d_1)}{\partial(\delta p_y)} & \frac{\partial(d_1)}{\partial(\delta p_z)} \\ \frac{\partial(d_2)}{\partial(\delta p_x)} & \frac{\partial(d_2)}{\partial(\delta p_y)} & \frac{\partial(d_2)}{\partial(\delta p_z)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial(d_n)}{\partial(\delta p_x)} & \frac{\partial(d_n)}{\partial(\delta p_y)} & \frac{\partial(d_n)}{\partial(\delta p_z)} \end{bmatrix} C_g^e \quad (23)$$

$$H_2 = [\mathbf{0}_{n \times 6} \quad H' \quad \mathbf{0}_{n \times 6}] \quad (24)$$

式中:

$$\frac{\partial(d_i)}{\partial(\delta p_\alpha)} = -\frac{\alpha_{INS} - \alpha_i}{\sqrt{(\mathbf{p}_{INS} - \mathbf{p}_i)^2}}, \alpha = x, y, z \quad (25)$$

2.3 载体运动约束算法

载体正常运动过程中,应遵守理论的运动学模型,可以根据载体运动状态对速度加以约束,辅助校正 INS 产生的误差。较为常用的运动约束方法包括零速校正 (zero-velocity update, ZUPT) 与非完整性约束 (non-holonomic constraint, NHC)。

1) 零速校正

载体相对地面静止时,真实速度应为零,此时 INS 输出的速度即为系统的速度误差。ZUPT 利用这一物理特性补偿静止状态下的 INS 速度误差,抑制 INS 漂移。载体是否处于静止状态可以根据 IMU 输出加以判断。

ZUPT 可使用卡尔曼滤波进行误差补偿。系统的状态方程同式 (11),观测向量为 INS 输出的 ENU 坐标系下的速度,观测方程可表示为:

$$\mathbf{Z}_3 = \mathbf{v}_{INS}^n, \mathbf{H}_3 = [\mathbf{0}_{3 \times 3} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3} \quad \mathbf{0}_{3 \times 9}] \quad (26)$$

2) 非完整性约束

载体正常运动过程中,若不发生侧滑和漂移,则侧向和垂向速度分量应为零。使用 NHC 可以有效减小运动状态下 INS 的误差发散速度。

IMU 在安装过程中,一般与载体坐标系存在一定的安装偏差角,会一定程度上影响 NHC 的效果。考虑 IMU 俯仰和航向安装角误差 $\delta\alpha_\theta, \delta\alpha_\psi$, 一般视为随机常数,可作为状态量加入卡尔曼滤波进行估计。系统状态向量扩充至 17 维:

$$\mathbf{X}_2 = [\mathbf{X}_1^T \quad \delta\alpha_\theta \quad \delta\alpha_\psi]^T \quad (27)$$

系统观测向量即为载体侧向和垂向速度:

$$\mathbf{Z}_4 = [v_x^b \quad v_z^b]^T \quad (28)$$

观测矩阵的推导过程可参考文献 [19], 具体可表示为:

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_2(1, *) & \mathbf{M}_1(1, *) & \mathbf{0} & \mathbf{M}_3(1, 3) \\ \mathbf{M}_2(3, *) & \mathbf{M}_1(1, *) & \mathbf{0}_{2 \times 9} & \mathbf{M}_3(3, 1) & \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{C}_n^b, \mathbf{M}_2 = -\mathbf{C}_n^b(\mathbf{v}_{INS}^n \times), \mathbf{M}_3 = (-\mathbf{v}_{INS}^b) \times \quad (30)$$

其中, $\mathbf{v}_{INS}^n \times$ 表示由该三维向量构成的反对称矩阵; $\mathbf{M}_1(1, *)$ 表示该矩阵的第一行, 其他同理。

3 UWB 数据质量控制

UWB 信号在受到障碍遮挡时,易产生 NLOS 误差,导致测距值大于正常值。同时,大部分 UWB 采用基于时间的测距模式,时间延迟与环境影响会产生一定的系统误差。由于 UWB 以紧组合的方式融入系统,因此 UWB

测距的准确性对定位系统有较大的影响。需要设置合理的 UWB 数据质量控制体系,剔除 NLOS 误差,补偿系统误差。

3.1 NLOS 误差识别

UWB 信号抗干扰能力较强,一般少量的人员流动不会产生明显的 NLOS 误差。当存在墙体与浓密灌木等较为明显的遮挡物体时,UWB 即会产生明显的 NLOS 误差,主要表现为以下 3 类:1) UWB 信号遮挡严重,标签无法正确接收,无法实现测距功能。2) UWB 基站与标签无直射路径,但信号经多次反射后被接收,测距值远大于正常值,且波动幅度大。3) 间断性环境干扰而产生的 NLOS 误差,通常时间短,误差相对较小。针对以上 NLOS 误差的特征,本文设计了两种 NLOS 误差识别方法,分别针对上述第 2 类与第 3 类 NLOS 误差进行识别与剔除,在滤波前后进行两次判断,提高 NLOS 误差识别准确性。

1) 基于滑动窗口的 NLOS 误差识别

图 1 展示了 LOS 环境和 NLOS 环境 UWB 测距值的不同特征。图中所示 NLOS 环境下,UWB 基站与标签无直射路径,产生上述第 2 类 NLOS 误差。此类 NLOS 误差覆盖范围较大,在其影响下,UWB 测距值会发生较大波动,且严重偏离正常范围,会对组合系统产生较大的不利影响。因此,需要在滤波之前,将所有第 2 类 NLOS 误差剔除。

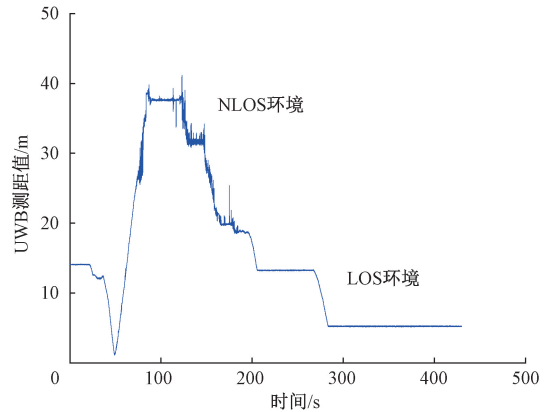


图 1 LOS 与 NLOS 环境下的 UWB 测距值

Fig. 1 UWB ranging values in LOS and NLOS environments

针对 UWB 测距值波动较大的特点,设计如图 2 所示基于滑动窗口的 NLOS 误差识别方法,剔除第 2 类 NLOS 误差。窗口随时间移动,实时计算其中 UWB 测距值的标准差 σ , 同时计算相邻历元 UWB 测距差值 Δd 。如式 (31) 所示,当 σ 与 Δd 均大于各自的阈值 TH_1, TH_2 时, 此段 UWB 数据即视为包含上述第 2 类 NLOS 误差,需进行剔除。NLOS 误差识别的效果取决于窗口大小与阈值的大小,窗口越大,阈值越小,NLOS 误差识别越灵敏,但相

应容易产生误判,损失有效UWB数据,可根据具体环境实时调整。

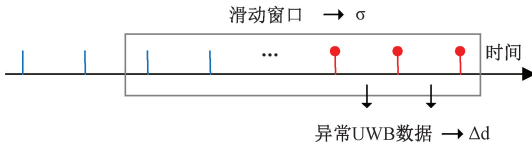


图2 基于滑动窗口的NLOS误差识别方法

Fig. 2 NLOS error identification method based on sliding window

$$\begin{cases} \sigma > TH_1 \\ \Delta d > TH_2 \end{cases} \rightarrow \text{含有 NLOS 误差} \quad (31)$$

2) 基于新息向量的NLOS误差识别

上述第3类的NLOS误差影响较小,多数为偶然出现的数据跳点,通常覆盖整个定位过程。由于此类NLOS误差较小,需要另一种识别方法。本文根据卡尔曼滤波中新息向量的数学意义,设计了基于新息向量的NLOS误差识别方法,剔除第3类NLOS误差。

针对本文UWB及其组合导航采用的EKF,新息向量 V_k 可由下式表示:

$$V_k = Z_k - h(\hat{X}_k^-) \quad (32)$$

式中: $\hat{X}_k^-$ 表示经一步预测的系统状态量。

从新息向量的表示方式来看,新息向量代表了UWB实际测距值与系统预测的UWB测距值之间的差异,在系统定位良好的情况下,系统预测值可信度更高。若新息向量绝对值大于设定的阈值,说明UWB实际测距值偏离系统预测,可能含有NLOS误差。阈值的设定不宜过小,过小的阈值容易产生误判,剔除过多正常的UWB数据,导致整体定位精度降低,影响NLOS误差的正确识别,形成负面的正反馈。阈值的设定也不宜过大,过大的阈值无法有效识别NLOS误差。因此,阈值的设定需要综合考虑系统的定位精度与稳定性,选取合适的中间值,本文阈值设定为0.3 m。

在UWB基站测距数据充足的条件下,一般将存在NLOS误差的数据进行剔除。根据UWB基站编号,可将卡尔曼滤波增益矩阵对应的列向量赋为零,最终量测更新时不会有该UWB基站测距值的影响。整体NLOS误差识别过程如下所示。

$$|V_k(i)| \begin{cases} > TH(NLOS) \rightarrow K_k(*, i) = 0 \\ \leq TH(LOS) \rightarrow K_k(*, i) \text{ 不变} \end{cases} \quad (33)$$

式中: TH 表示设定的阈值; $V_k(i)$ 表示新息向量的第*i*个元素,与观测向量中UWB测距值对应; $K_k(*, i)$ 表示卡尔曼滤波增益矩阵的第*i*列。

3.2 UWB系统误差补偿

在LOS情况下,UWB测距值也存在一定误差,其中

主要部分是UWB系统误差。导致误差的原因有多种,包括UWB时间误差,环境影响,UWB基站布设误差等。此类误差不易建模,难以精确计算具体的误差大小。同种型号的UWB采用相同的测距模式,因而通常具有相同的误差模型,而误差大小随个体与环境的改变发生变化。图3为实际测试中某UWB基站测距误差与距离的关系,其中较大的NLOS误差已剔除。可以看出,该基站测距误差的均值约为-0.2 m,大部分测量点在其上下0.25 m区域内,误差基本不随距离发生改变。结果表明,本文所用UWB存在明显的系统误差,可视作固定的常数,需要进行误差补偿。

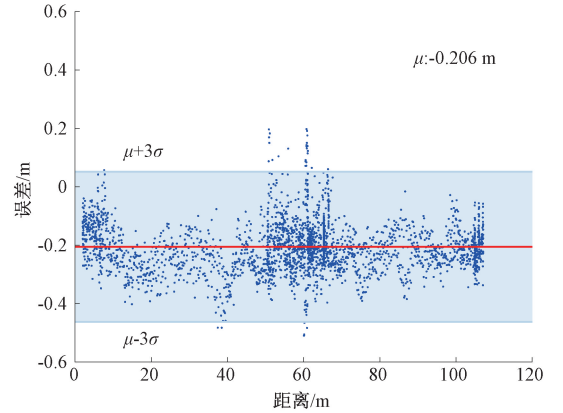


图3 UWB测距误差

Fig. 3 UWB ranging error

传统的误差补偿方法一般是预先进行UWB标定工作,得到所有UWB的误差模型与大小,实现UWB误差补偿。该方法误差估计较为准确,但效率较低,更换场景时往往需要重新标定。考虑到上述问题,本文提出了一种基于滤波估计的UWB系统误差实时补偿方法。该方法将UWB系统误差作为状态量加入卡尔曼滤波,利用组合系统可靠的先验位置信息辅助误差在线估计,显著提高误差补偿效率。根据本文UWB测距误差与距离的关系,可采用常数误差模型进行估计。

考虑UWB系统误差后,式(18)UWB/INS紧组合观测方程可重新表示为:

$$d_i = d'_i + \varepsilon_i = \sqrt{(p_{INS} - \delta p - p_i)^2} + \varepsilon_i \quad (34)$$

其中, d'_i 表示不含系统误差的第*i*个UWB基站测距值, ε_i 表示第*i*个基站的系统误差。

将UWB系统误差作为组合系统的状态量,加入卡尔曼滤波中进行估计。扩充的状态向量为:

$$X_3 = [X_1^T \quad \varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \cdots \quad \varepsilon_n]^T \quad (35)$$

系统的观测向量不变,观测矩阵如下所示:

$$H'_2 = [H_2 \quad I_{n \times n}] \quad (36)$$

该方法无需对UWB系统误差进行预先标定,可在定

位同时完成误差实时估计与补偿,适用于多场景的快速定位。该方法一定程度上会损失部分系统稳定性,需在定位环境良好的情况下启动一段时间,以提高初始误差估计精度。同时,该方法需要与上述 NLOS 误差识别方法结合,剔除其中的异常测距值,保证系统误差估计的准确性。

4 GNSS/UWB/INS 组合定位模型

本文选用集中式滤波方法融合 3 种传感器数据,以 INS 为主线,GNSS 与 UWB 辅助补偿 INS 产生的误差,同时包含载体运动约束以及 UWB 系统误差等参数。

系统状态向量共 $17+n$ 维(n 代表 UWB 基站的数量),包括载体的失准角、速度误差、位置误差、陀螺仪漂移、加速度计零偏、IMU 俯仰与航向安装误差角以及 n 个 UWB 基站的待估系统误差。状态向量与状态转移矩阵可表示为:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{X}_1^T \quad \delta\alpha_\theta \quad \delta\alpha_\psi \quad \varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \cdots \quad \varepsilon_n]^T \quad (37)$$

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1 & \mathbf{0}_{15 \times (n+2)} \\ \mathbf{0}_{(n+2) \times 15} & \mathbf{0}_{(n+2) \times (n+2)} \end{bmatrix} \quad (38)$$

系统观测向量共 $11+n$ 维,包括 INS 与 GNSS 的速度位置之差, n 个 UWB 测距值,INS 输出的速度以及载体横向、垂向速度。观测向量与观测矩阵可表示为:

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{Z}_1^T \quad \mathbf{Z}_2^T \quad \mathbf{Z}_3^T \quad \mathbf{Z}_4^T]^T \quad (39)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 & \mathbf{0}_{6 \times 2} & \mathbf{0}_{6 \times n} \\ \mathbf{H}_2 & \mathbf{0}_{n \times 2} & \mathbf{I}_{n \times n} \\ \mathbf{H}_3 & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times n} \\ \mathbf{H}_4 & \mathbf{0}_{2 \times n} \end{bmatrix} \quad (40)$$

式中各项具体含义可参见第 2 章。

组合系统的整体框架如图 4 所示。INS 是整个定位系统的主线,每个历元获得的 IMU 原始数据,通过机械编排得到载体初步的姿态、速度与位置信息,同时获知载体当前的运动状态。根据载体当前的运动状态,选择 ZUPT 或 NHC 算法,每个历元对 INS 的速度误差进行估计。GNSS/INS 为松组合,GNSS 数据通过 RTK 与多普勒测速获得位置速度信息,与最近时刻的 INS 数据融合。UWB/INS 为紧组合,UWB 数据以原始测距值的形式同 INS 数据融合,在滤波前后需进行 NLOS 识别与剔除。组合系统导航误差与 UWB 系统误差同步进行估计。滤波结束后,得到的各类误差需反馈补偿。

5 实验验证

为验证本文 UWB 质量控制及组合定位算法的实际效果,搭建了实验平台,选取合适的环境进行实时定位测

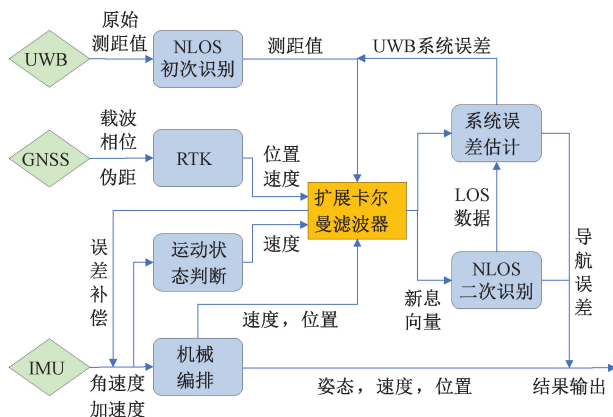


图 4 组合导航系统结构

Fig. 4 The structure of the integrated navigation system

试,针对实验结果进行分析与总结。

5.1 实验平台

实验测试使用的设备包括 1 个 IMU,12 个 UWB (10 个基站,2 个标签),2 个 GNSS 天线,以及用来获取真值的 SPAN-ISA-100C 高精度惯导设备。测试所用 IMU 选用 ADIS16497,UWB 选用 Nooploop 公司的 LinkTrack P-A 系列。所有设备集成至实验车辆上,如图 5 所示。本实验采用双 GNSS 天线与双 UWB 标签测量载体初始姿态,帮助组合导航系统初始化。实验过程中所有传感器杆臂误差与时间不同步误差均已校正。



图 5 实验车辆

Fig. 5 vehicle for experiment

本文利用 NovAtel 公司的 Inertial Explorer 后处理软件解算高精度惯导数据,作为本次实验的真值。图 6 为软件解算的真值轨迹。实验场地为东南大学四牌楼西校区,该段路程同时包含开阔环境与树木遮挡环境,适合测试 GNSS/UWB/INS 组合定位算法。实验车从北侧出发,逆时针绕场地形式一圈,最后回到出发点。

该段路程北侧为开阔环境,南侧有大量树木遮挡。在林荫道路两侧共部署 10 个 UWB 基站,具体环境如图 7 所示。图 8 为实验过程中观测的卫星与 UWB 数量变化。可知,北侧开阔区域观测卫星数量较多,但该区域



图 6 载体真值轨迹

Fig. 6 True trajectory of the carrier

距离 UWB 基站较远,且中间存在树木车辆遮挡,观测到的 UWB 基站数量减少;南侧林荫遮挡区域卫星数量骤减,UWB 观测良好。由于树木车辆较多,UWB 存在较多的 NLOS 误差,且基站部署位置受限,该环境对组合定位有一定的挑战。本次实验由于环境与设备的限制,UWB 基站高度接近,垂直方向定位误差较大,因此仅评估水平定位精度。



图 7 遮蔽环境

Fig. 7 The shade environment

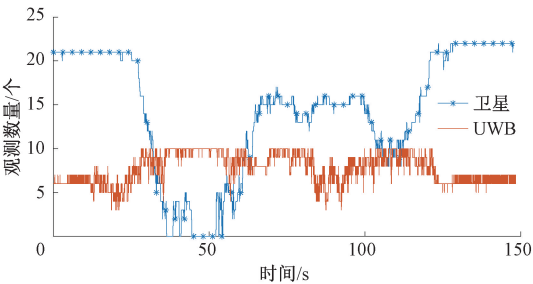


图 8 卫星与 UWB 可见信号数量

Fig. 8 Visible signal number of satellites and UWBs

5.2 实验结果与分析

1) 多传感器松组合结果

图 9 展示了 GNSS/INS 松组合、UWB/INS 松组合与 GNSS/UWB/INS 松组合的定位轨迹,其中 UWB 部分包含 NLOS 误差识别算法,该图同样展示了 UWB 基站部署情况。表 1 统计了 3 种松组合的定位误差,以均方根误

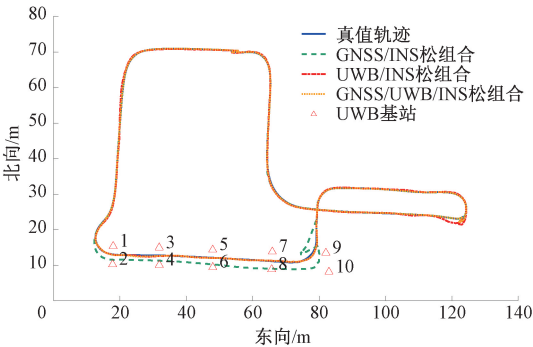


图 9 三种松组合平面轨迹

Fig. 9 The horizontal trajectory of three loosely-coupled methods

表 1 3 种松组合定位误差		
Table 1 Positioning error of three loosely-coupled methods		
组合方法	北向误差 RMSE/m	东向误差 RMSE/m
GNSS/INS 松组合	1.113	2.875
UWB/INS 松组合	0.304	0.143
GNSS/UWB/INS 松组合	0.108	0.043

差 (RMSE) 的形式表示。

结果显示,GNSS/INS 松组合在卫星失效时开始偏离正确轨迹,误差远大于含有 UWB 的组合方式。由于 UWB 覆盖范围较广,UWB/INS 松组合没有偏离正确轨迹,但全局定位精度有待提高。GNSS/UWB/INS 松组合依靠三种定位方式,全局定位精度显著提高,优于两种传感器组合定位结果。因此针对复杂环境的导航定位,有必要使用 GNSS/UWB/INS 组合定位。

2) UWB 质量控制效果

为验证 UWB 质量控制算法的实际作用,测试并分析了不同方法下的 GNSS/UWB/INS 组合定位结果,其中 GNSS/INS 为松组合,UWB 部分的设置如表 2 所示。图 10、11 展示了各方法的位置误差曲线。表 3 统计了各方法的定位误差。

表 2 不同 GNSS/UWB/INS 组合定位方法			
Table 2 Different GNSS/UWB/INS integrated positioning methods			
实验方法	UWB/INS 组合方式	NLOS 误差识别	UWB 系统误差补偿
方法一	松组合	有	无
方法二	紧组合	有	无
方法三	紧组合	有	有
方法四	紧组合	无	无

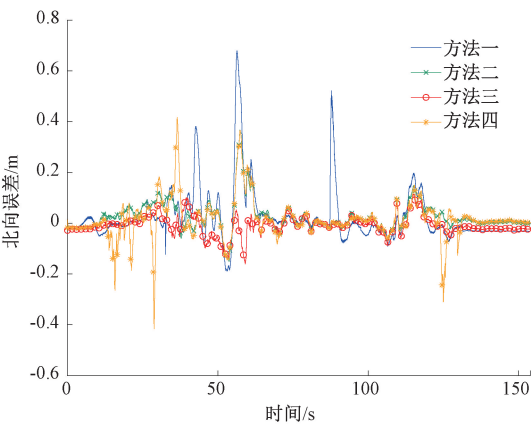


图 10 不同 GNSS/UWB/INS 组合定位方法的北向位置误差

Fig. 10 North position error of different GNSS/UWB/INS integrated positioning methods

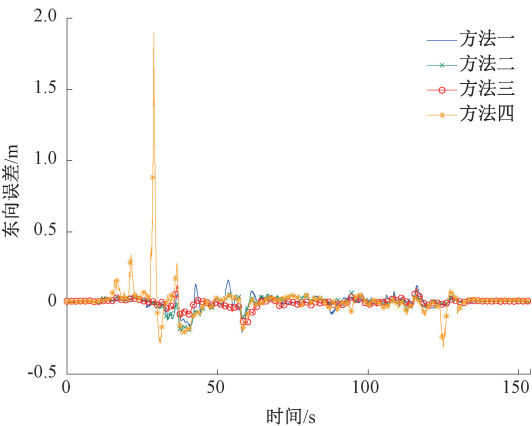


图 11 不同 GNSS/UWB/INS 组合定位方法的东向位置误差

Fig. 11 East position error of different GNSS/UWB/INS integrated positioning methods

表 3 不同 GNSS/UWB/INS 组合定位方法的定位误差

Table 3 Positioning error of different GNSS/UWB/INS integrated positioning methods

实验方法	北向误差 RMSE/m	东向误差 RMSE/m
方法一	0.108	0.043
方法二	0.063	0.044
方法三	0.038	0.030
方法四	0.079	0.123

结果显示,方法一在过渡区域存在较多明显粗差,说明松组合模式下 NLOS 误差识别准确性较低,UWB 独立

解算结果较差。方法二误差有明显改善,定位结果平滑,精度在 10 cm 以内,说明紧组合模式下 NLOS 误差识别准确性较高。但由于 UWB 测距存在误差,UWB 基站包络面外圈的定位误差仍有待提升。

方法三中加入 UWB 系统误差补偿方法后,定位误差显著降低,且没有对系统稳定性产生不利影响,定位精度提高至 5 cm 内,相比方法二水平定位精度提升 37.5%。图 3 为本次实验 1 号 UWB 基站的测距误差,图 12 为该基站进行系统误差补偿后的测距误差。补偿后该基站测距误差均值变为 -0.01 m ,标准差变化不大,固定的系统误差得到有效补偿,证明该方法的有效性。

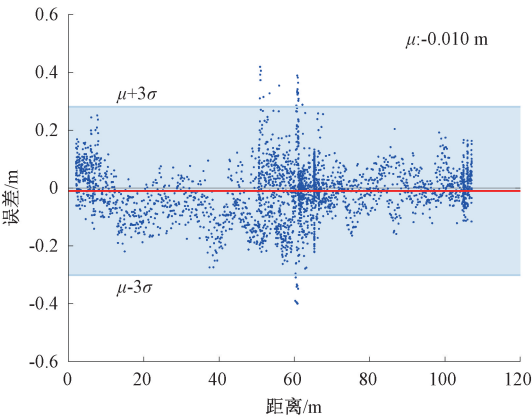


图 12 误差补偿后 UWB 测距误差

Fig. 12 UWB ranging error after error compensation

方法四中去除所有 UWB 质量控制算法后,受 NLOS 误差影响,定位结果出现了一些明显的粗差,最大定位误差超过 1 m。证明本文 UWB 质量控制算法能够有效识别 NLOS 误差,提高系统在复杂环境下的定位精度。

3)不同 UWB 基站组合下的定位结果

考虑到实际应用中受环境或成本的影响,UWB 基站部署受限,本文选取 3 种不同的 UWB 部署方式,测试不同 UWB 基站布局下的组合定位性能。

组合一:选取 1、2、5、6、9、10 号共六个 UWB 基站,既保留了较多的基站,也保留了最大的 UWB 包络面。

组合二:选取 1、2、9、10 号共四个 UWB 基站,仅保留最大的 UWB 包络面,基站数量较少。

组合三:选取 1、2、3、4、5、6、7、8 号共八个 UWB 基站,保留了较多的 UWB 基站,但 UWB 包络面变小。

测试采用的组合定位方法为表 2 中的方法三。图 13、14 展示了不同 UWB 基站组合下的位置误差曲线,表 4 统计了上述 3 种 UWB 基站组合下的定位误差。

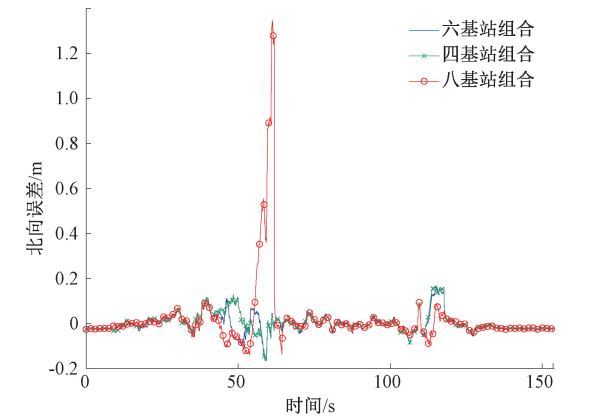


图 13 不同 UWB 基站组合的北向位置误差
Fig. 13 North position error of different UWB base station combinations

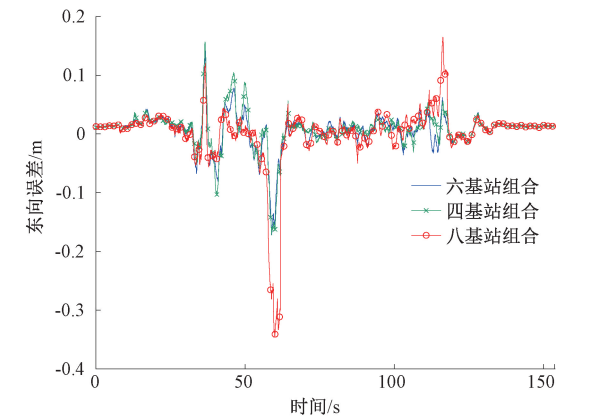


图 14 不同 UWB 基站组合的东向位置误差
Fig. 14 East position error of different UWB base station combinations

表 4 不同 UWB 基站组合的定位误差

Table 4 Positioning error of different UWB base station combinations

组合方法	北向误差	东向误差
	RMSE/m	RMSE/m
六基站组合	0.041	0.030
四基站组合	0.044	0.033
八基站组合	0.149	0.055

结果显示,采用组合一与组合二时,本文提出的算法定位依然有较高的精度,二者均保留了较大的 UWB 包络面,其中组合一基站数量更多,精度更高。组合三由于最东侧两个 UWB 基站移除,在过渡区域出现了较大的误差。因此,单纯增加 UWB 基站数量并不能提高定位精度,需要根据 UWB 精度因子的大小合理设计基站部署位

置。在 UWB 基站部署合理的情况下,减少基站数量并不会显著降低组合导航定位精度。

6 结 论

对于 GNSS 拒止环境下的连续定位问题,本文提出了一种 GNSS/UWB/INS 组合定位方法,并基于此设计了顾及 NLOS 与系统误差的 UWB 质量控制方法。数据融合部分,本文采用了 GNSS/INS 松组合+UWB/INS 紧组合的集中式滤波,保证定位精度的同时提高系统的稳定性。同时采用 ZUPT 与 NHC 的载体运动约束方法,辅助修正 INS 速度误差。UWB 数据质量控制部分,针对 UWB 中的 NLOS 误差与系统误差,本文设计了基于滑动窗口与新息向量的 NLOS 误差识别方法以及基于滤波估计的 UWB 系统误差实时补偿方法。实验结果表明,提出的 GNSS/UWB/INS 组合方法定位结果良好,结合本文的 NLOS 误差识别算法能够达到厘米级的定位精度。UWB 系统误差实时补偿方法能够有效估计不同 UWB 基站的系统误差,无需提前进行 UWB 标定工作,显著提升定位效率。加入该算法后,系统定位精度提高了 37.5%。在不同 UWB 布局下,本文的算法依然拥有较好的定位效果,实际使用中,应尽可能扩大 UWB 包络面。

参考文献

[1] 糜晓龙, 袁运斌, 张宝成. BDS-3 和 Galileo 组合的 RTK 定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(1): 113-118.
MI X L, YUAN Y B, ZHANG B CH. RTK positioning performance analysis for combined BDS-3 and Galileo[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(1): 113-118.

[2] ZHANG Q, NIU X J, SHI CH. Impact assessment of various IMU error sources on the relative accuracy of the GNSS/INS systems[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(9): 5026-5038.

[3] WANG G C, XU X S, ZHANG T. M-M estimation-based robust cubature Kalman filter for INS/GPS integrated navigation system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-11.

[4] ZHANG H, XIONG H L, HAO S J, et al. A novel multidimensional hybrid position compensation method for INS/GPS integrated navigation systems during GPS outages[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(1): 962-974.

[5] CHEN J F, ZHOU B D, BAO SH Q, et al. A data-driven inertial navigation/bluetooth fusion algorithm for indoor localization[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 5288-5301.

- [6] KO D, KIM M, SON K, et al. Passive fingerprinting reinforced by active radiomap for WLAN indoor positioning system [J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(6): 5238-5247.
- [7] 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, 2022, 23(8): 13636-13654.
- [8] MARTÍN-GOROSTIZA E, GARCÍA-GARRIDO M A, PIZARRO D, et al. Infrared and camera fusion sensor for indoor positioning [C]. 2019 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2019: 1-8.
- [9] ZHANG Y, TAN X L, ZHAO CH SH. UWB/INS integrated pedestrian positioning for robust indoor environments [J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 20(23): 14401-14409.
- [10] GAO P G, LUO G, LIU Y H, et al. A novel method for UWB-based localization using fewer anchors in a floor with multiple rooms and corridors [C]. 2022 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2022: 1-6.
- [11] 李荣冰, 王念曾, 刘建业, 等. 面向相对导航的 UWB 测距误差估计与补偿方法 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(5): 28-35.
- LI R B, WANG N Z, LIU J Y, et al. UWB ranging error estimation and compensation method for relative navigation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(5): 28-35.
- [12] JIANG W, CAO ZH J, CAI B G, et al. Indoor and outdoor seamless positioning method using UWB enhanced multi-sensor tightly-coupled integration [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(10): 10633-10645.
- [13] 曹琢健. 基于 GNSS/INS/UWB 组合的室内外无缝定位方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- CAO ZH J. Indoor and outdoor seamless positioning based on the integration of GNSS/INS/UWB [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [14] YAO L H, LI M, XU T H, et al. GNSS/UWB/INS indoor and outdoor seamless positioning algorithm based on federal filtering [J]. Measurement Science and Technology, 2023, 35(1): 015135.
- [15] VILLIEN C, DENIS B. UWB-aided GNSS/INS fusion for resilient positioning in GNSS challenged environments [C]. 2023 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), 2023: 167-178.
- [16] XU Y, WANG K, YANG CH, et al. GNSS/INS/OD/NHC adaptive integrated navigation method considering the vehicle motion state [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(12): 13511-13523.
- [17] 朱锋. GNSS/SINS/视觉多传感器融合的精密定位定位姿方法与关键技术 [D]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- ZHU F. GNSS/SINS/Vision multi-sensors integration for precise positioning and orientation determination [D]. Wuhan: Wuhan University, 2022.
- [18] 严恭敏, 翁浚. 捷联惯导算法与组合导航原理 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2019.
- YAN G M, WENG J. Strap-down inertial navigation algorithm and integrated navigation principle [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 2019.
- [19] 付强文, 秦永元, 李四海. 速度约束辅助车载捷联惯导系统零速校正算法 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(8): 1723-1728.
- FU Q W, QIN Y Y, LI S H. ZUPT method for vehicular SINS aided by velocity constraint [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(8): 1723-1728.

作者简介



吴鹏博, 2022 年于东南大学获得学士学位, 现为东南大学硕士研究生, 主要研究方向为 GNSS/UWB/INS 组合定位及其质量控制方法。

E-mail: wpb@seu.edu.cn

Wu Pengbo received his B.Sc. degree in 2022 from Southeast University. Now he is a M.Sc. candidate in Southeast University. His main research interests include GNSS/UWB/INS integrated positioning and its quality control method.



潘树国 (通信作者), 2007 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学教授, 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 (Corresponding author) received his Ph.D. degree in 2007 from Southeast University. Now he is a professor in Southeast University. His main research interests include GNSS high-precision positioning and intelligent perception of the environment.



高旺, 2018 年于东南大学获得博士学位, 现为东南大学副教授, 主要研究方向为多传感器组合导航定位理论与方法。

E-mail: gaow@seu.edu.cn

Gao Wang received his Ph.D. degree in 2018 from Southeast University. Now he is an associate professor in Southeast University. His main research interests include positioning theory and method of multi-sensor integrated navigation.