光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023122701

基于微气压传感器的室内行人高度估计方法

余　豪[1,2]，陈燕苹[1,2]*，邹梦强[1,2]，彭　慧[1,2]，刘　宇[1,2]，王　森[1,2]，江永清[3]

（重庆邮电大学 1. 自主导航与微系统重庆市重点实验室，重庆 400065；
2. 智能传感技术与微系统重庆市高校工程研究中心，重庆 400065；3. 重庆光电技术研究所，重庆 400065）

摘　要： 针对当前气压传感器解算高度存在误差随时间累积的问题，提出了一种基于微气压传感器的室内行人高度估计新方法。该方法结合微气压传感器的输出高度值，对多个相邻时间内的高度值进行合理性判断，并结合室内行人运动状态对高度变化进行约束，使得解算的高度符合室内行人运动规律。通过电脑采集MS5611微气压传感器数据进行仿真验证，结果表明：该方法能够有效地对高度误差进行修正，相较于微气压传感器直接解算的高度，该算法解算的高度更贴合实际情况，解算轨迹也更接近真实轨迹，轨迹的平均闭环误差从1.9%D下降至0.07%D。该算法有效地提高了室内行人高度估计的定位精度，在室内行人三维定位领域具有一定的工程应用价值。

关键词： 微机电系统；微气压传感器；运动模式识别；高度修正；室内定位

中图分类号： TP212　**文章编号：** 1001－5868(2024)02－0313－06

Pedestrian Indoor Height Estimation Algorithm Based on Micro Pressure Sensors

YU Hao[1,2], CHEN Yanping[1,2], ZOU Mengqiang[1,2], PENG Hui[1,2],
LIU Yu[1,2], WANG Sen[1,2], JIANG Yongqing[3]

(1. Chongqing Key Lab. of Autonomous Navigation and Microsystems; 2. Chongqing Engineering Research Center of Intelligent Sensing Technology and Microsystem, Chongqing University of Posts and Telecommun., Chongqing 400065, CHN;
3. Chongqing Optoelectronics Research Institute, Chongqing 400065, CHN)

Abstract: A method for estimating the indoor height of pedestrians based on micro pressure sensors was developed to address the issues of errors accumulated over time in the height calculations performed using the current pressure sensors. In this method, based on the output height value of a micro pressure sensor, an algorithm judges the height values of multiple adjacent time points. It constrains the height change based on the indoor pedestrian movement status such that this change conforms to the indoor pedestrian movement law. Simulations were performed using data from a MS6511 micro pressure sensor. Experimental results indicate that the proposed method effectively corrected height errors. As compared with the height errors calculated using micro pressure sensor data, the trajectories calculated with the proposed method were closer to the real ones. The average closed-loop error decreased from 1.9%D to 0.07%D, effectively improving the positioning accuracy of indoor pedestrian height estimation. This method has engineering application value in the field of indoor 3D pedestrian positioning.

Key words: MEMS; micro pressure sensor; sports pattern recognition; height correction; indoor positioning

收稿日期：2023－12－27.

基金项目：国家自然科学基金项目（52175531，62305039）；重庆市自然科学基金项目（CSTB2023NSCQ-MSX0568，CSTB2022NSCQ-LZX0050，CSTB2023NSCQ-LMX0028，CSTC2022YCJH-BGZXM0190）.

* **通信作者：**陈燕苹

0 引言

气压传感器是测量运载体所处高度的重要器件，在航空航天、探险登山、无人机工业[1]、室内定位[2]等领域具有重要应用。微机电系统（Micro Electro Mechanical Systems，MEMS）制造工艺的发展，使利用MEMS制造工艺的气压传感器具有便携性和低成本的特点，MEMS气压传感器的应用逐渐成为近年的研究热点[3]。目前，由于人们对室内三维定位的需求，室内二维定位难以满足人们的日常需求，室内三维定位技术越来越受到重视[4-7]。在三维定位中，高度测量是行人定位的重要组成部分，也是实现行人三维定位的关键。在消防安全及矿井作业等封闭场景下，准确的三维位置信息能为救援人员提供准确的受困人员与救援人员的位置和高度信息，可极大地缩短搜救时间，减少人员伤亡和财产损失。

目前已有的测高技术有光学仪器测高、GPS接收机测高、加速度计测高等。光学仪器测高技术的测量精度较高，但其体积较大，成本较高[8]，一般在飞机等大型设备上使用，不适用于可穿戴式的行人定位。GPS接收机测高技术的信号易受建筑物遮挡，故无法利用其在室内进行高度测量[9]。加速度计测高技术采用积分运算进行高度解算，具有误差随时间累积的特点[10]。此外，利用无线定位技术进行高度测量的技术也得到了广泛关注，如WIFI[11]，UWB[12]等，然而，这些无线定位测高技术需要提前布点，成本较高。MEMS气压传感器测高具有无需事先布点、体积小和便携等优点，是理想的行人三维导航测高传感单元。但低成本的MEMS气压传感器的数据精度和灵敏度较低，不能直接作为行人三维定位和导航的数据来源。

本文使用2个MEMS气压传感器对同一个物理量进行测量，再进行求均值处理，从而获取一组精度更好、稳定性更高的气压数据，并根据连续时间的高度变化规律判断行人的行走姿态，减少气压随环境和时间变化所产生的误差，从而修正测量高度。

1 气压测高原理

气压传感器是基于大气压强与高度的相互关系实现气压测量的，即当高度产生变化，大气压强也会产生变化。研究表明：在海平面以上，物体的高度每增加12 m，大气压强减少133.322 Pa。因此，可将平均海平面作为零参考面，测量被测物体所处的大气压强的大小，即可获得被测物体所处的相对平均海平面的高度。空气的静态平衡方程、理想气体方程、对流层温度梯度恒定的假设以及温度梯度关系如下：

$$\frac{\mathrm{d}p_s}{\mathrm{d}h}=-\rho g_n \tag{1}$$

$$\rho=\frac{p_s}{RT} \tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}T}{\mathrm{d}h}=\beta_1 \tag{3}$$

$$T=T_0+\beta_1(h-h_0) \tag{4}$$

则压力与温度的关系可表示为：

$$\left(\frac{p_s}{p_0}\right)^{\beta_1 R/g_n}=\frac{T}{T_0} \tag{5}$$

式中，p_s为静态空气压力，h为地理高度，ρ为空气密度，T为大气温度，h_0为参考海平面高度。根据温度与海拔高度之间的关系，结合式(1)至式(4)，可将式(5)转换为大气压强p和高度H之间的关系：

$$H=h_0+\frac{T_0}{\beta_1}\left[\left(\frac{p}{p_0}\right)^{-\beta_1 R/g_n}-1\right] \tag{6}$$

式中，h_0为参考海平面高度，并假设$h_0=0$；T_0为海平面温度，大小为288.15 K；β_1是温度梯度变化率，对于不同高度梯度，β_1取值不同，当高度为0～11 km时，为0.006 5 k/m；p_0为海平面的大气压强（即标准大气压），大小为1.013×10^5 Pa。式(6)中，将微气压传感器的测量值p用静态空气p_s代替，g_n是当地重力常数，R代表空气专用气体常数，大小为287.052 87 $\mathrm{m^2/(s^2\cdot K)}$，通常，$\beta_1 R/g_n=0.190\ 3$，$T_0/\beta_1=44\ 330$，则式(6)可改写为：

$$H=44\ 330\left[\left(\frac{p}{1\ 013.25}\right)^{-0.190\ 3}-1\right] \tag{7}$$

通常，行人导航的高度值为相对高度值，因此，式(7)可改写为：

$$H(t)=44\ 330\times\left\{\left[\left(\frac{P(t)}{1\ 013.25}\right)^{-0.190\ 3}-1\right]-\left[\left(\frac{P(0)}{1\ 013.25}\right)^{-0.190\ 3}-1\right]\right\} \tag{8}$$

式中，$H(t)$为相对高度值，单位为m；$P(t)$是t时刻的气压值，单位为Pa；$P(0)$是起始时刻的气压值，单位为Pa。

环境温度等因素会影响大气压力的测量，因此，需要使用测量仪器对环境温度进行校正。本文采用MEAS公司的MS5611气压高度传感器，并对气压

高度传感器内部寄存器中的参数进行校准，实现环境温度对气压数据影响的补偿。

2　高度估计算法

通常，气压传感器内部已经进行过温度补偿，但气压传感器的累积误差仍然存在。因此，有必要对气压传感器进行进一步的误差校正。本文所采用的气压传感器的采样频率为 20 Hz，大于行人的行走特征频率，可以满足应用需求。其次，本文所采用的数据采集终端，其采样频率为 50 Hz。

利用上述气压传感器对室内外不同高度进行测量，采集的数据具有以下两个特点：其一，气压传感器解算高度的数据存在非硬件故障的突变。其二，随着行人行走的楼层数量增多，高度值的误差累积增大，楼层之间的水平路径无法区分，甚至随着时间增加，无法判定行人所处楼层。

2.1　算法框架

针对上述问题，本文采用高度估计算法对其进行误差的抑制。算法流程图如图 1 所示。

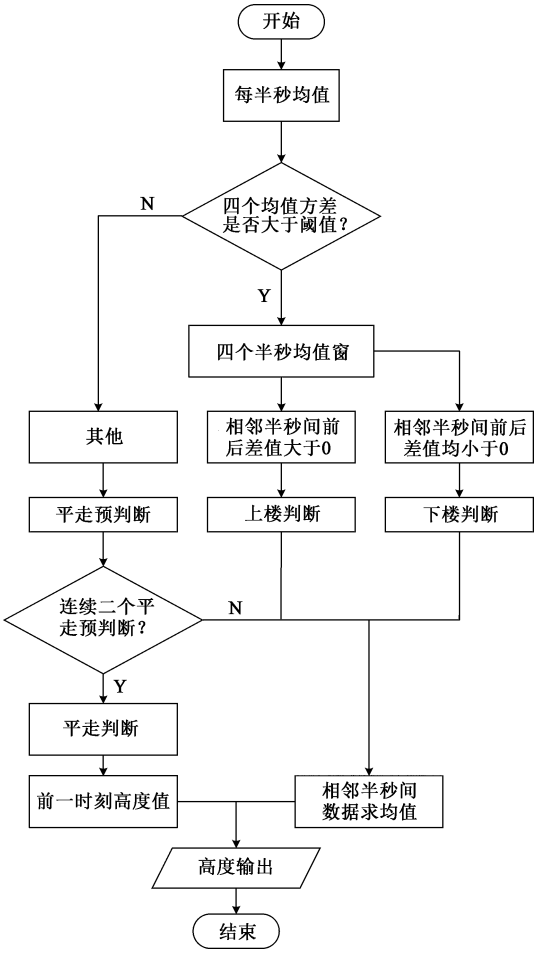


图 1　高度估计流程图

2.2　算法流程

(1)首先，开展数据突变判别及处理。在数据采集过程中，气压传感器的数据容易受到环境的影响。例如，气压传感器的测量值存在突变，即在两个连续的时间间隔内，气压传感器测得的高度相对差值较大。而实际行人行走过程中，高度不可能发生突变，因此，必须对明显的数据突变进行处理。本文采用对相邻间隔的高度差值进行判断，当大于设定阈值时，判定气压传感器数据出现异常值，此时，当前值不可信，采用直接将前一时刻的高度值赋予给当前时刻。具体公式如下：

$$height_instability=\begin{cases}1 & |h_j-h_{j-1}|\leqslant H_{\text{th}}\\ 0 & |h_j-h_{j-1}|>H_{\text{th}}\end{cases} \tag{9}$$

式中，$height_instability$ 为检测当前高度信号可用性的标志，h_j 为对应 j 时刻的高度值，H_{th} 为高度差阈值。当相邻时刻的高度差值小于 H_{th}，则表明当前时刻的高度信号可信，而大于该阈值时，则将前一时刻高度值作为当前高度值。本文设定的高度差阈值为 0.5 m。

(2)根据行人的实际行走频率，对数据进行均值滤波处理。均值滤波公式如下：

$$\bar{h}_j=\frac{\sum_{k=1}^{n}h_k}{n} \tag{10}$$

式中，h_k 为对应 k 时刻的相对高度数据，n 为 0.5 s 时间内对应的采样点数，因此，n 为 25，k 的实际时间间隔为 0.02 s。设一连续数据窗口 $\bar{h}_j$，$\bar{h}_j$ 是含有 4 个高度数据的窗口，假设在 j 时刻内窗口内存储的数据为[$\bar{h}_{j-3}$，$\bar{h}_{j-2}$，$\bar{h}_{j-1}$，$\bar{h}_j$]，窗口初始值为[0，0，0，0]，窗口的更新频率为 2 Hz。即每过半秒后，淘汰最旧的数据 $\bar{h}_{j-3}$，并装入最新的一个数据 $\bar{h}_{j+1}$，其他数据顺次移位，得到 4 个连续时间的均值数据。本文选用方差进行连续数据稳定性的判别，其计算公式如下：

$$S^2=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2 \tag{11}$$

式中，n 是数据量，为 4，$\bar{x}$ 为 4 个数据的平均值。根据计算的方差进行阈值判断，公式如下：

$$\begin{cases}CS^2>\Delta U\\ CS^2>\Delta D\end{cases} \tag{12}$$

式中，C 为比例系数，由于计算所得方差较小，为方便后续计算，所以，C 设置为 1 000；ΔU 为上楼判断的阈值，本文为 0.25，ΔD 为下楼判断的阈值，本文

为 0.5。

(3)然后对窗口内相邻半秒的高度进行作差。公式如下：

$$\begin{cases}\Delta\bar{h}_1=\bar{h}_j-\bar{h}_{j-1}\\ \Delta\bar{h}_2=\bar{h}_{j-1}-\bar{h}_{j-2}\\ \Delta\bar{h}_3=\bar{h}_{j-2}-\bar{h}_{j-3}\end{cases}\tag{13}$$

通过对这三个相对差值进行判断，以及窗口内 4 个均值的方差阈值判断，可以进行上楼和下楼判别。

① 当 $\Delta\bar{h}_1,\Delta\bar{h}_2,\Delta\bar{h}_3$ 均大于零时，且方差阈值判断满足条件，即判断此时行人处于上楼状态；

② 当 $\Delta\bar{h}_1,\Delta\bar{h}_2,\Delta\bar{h}_3$ 均小于零时，且方差阈值判断满足条件，即判断此时行人处于下楼状态；

③ 当处于其他情况下时，即行人处于平走的状态。此外，当行人静止时，高度值不会变化，所以将静止情况也划分为平走状态。

(4)在实际测试中，当行人处于上下楼阶段时，会出现气压缓慢变化和快速变化的两种过程，因此，可能将上下楼阶段误判为平走阶段。本文提出一种平走状态判别方法：将检测得到的连续两个状态放入一个数据窗口，在 i 时刻窗口存储的数据为 $[S_{i-1},S_i]$，窗口初始化为[0,0]，当窗口内数据均为 0 时，判断当前状态为平走状态，保持当前高度值；当窗口内存在 1 或 −1 时，判断当前状态为上楼或下楼状态，更新当前高度值。

(5)当判断此时行人处于上下楼状态时，更新此时的高度数据，将相邻两个半秒间的高度数据求均值进行输出，当判断此时行人处于平走(静止)状态时，保持上一个高度值不变。

3 实验结果与分析

3.1 测试系统

采用 MS5611 气压传感器验证所提方法的有效性。该气压传感器是 MEAS 公司推出的一款支持 SPI 和 I^2C 总线接口的高分辨率气压传感器，最高时钟支持 20 MHz，最大分辨率为 10 cm，可工作在 $1.0\times10^3\sim1.2\times10^5$ Pa 之间，工作温度为 −40～+85 ℃，供电电压支持 1.8～3.6 V，供电电流为 1 μA，该气压传感器尺寸为 5.0 mm×3.0 mm×1.0 mm，可集成在移动设备中。该传感器具备压力和温度信号的滞回率低和稳定性高的特点。

图 2 为集成了上述气压传感器的系统模块，测试环境为常温常压环境，采用 RS422 协议进行数据传输。

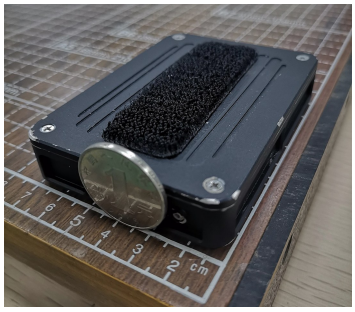


图 2 气压传感器系统模块

3.2 实验测试

如图 3 所示为搭建的实验测试系统，将微气压传感器系统模块稳定置于腰间，实验过程中保持微气压传感器的气孔通畅，通过数据线采集数据并保存到笔记本电脑上，并采用如图 3 所示的上位机界面进行数据的采集指令发送。



图 3 实验测试系统示意图

本文选用的实验测试路径为：从重庆邮电大学第一教学楼的一楼上楼到三楼，再连续从三楼下楼返回一楼。图 4 是采集的高度数据结果，该楼层高 3.80 m。从图 4 可以看出，对两个气压传感器原始数据进行均值滤波后，得到的数据更加平稳，更能够反映出楼层的高度变化。然而，出发时相对高度在零值附近，而返回原点时，气压传感器的数据出现了偏移。

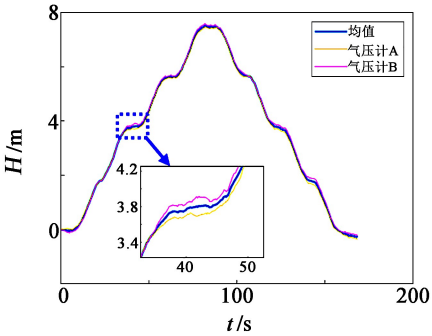


图 4 原始数据图

本文采用对数据进行均值滤波以处理去除环境干扰，均值滤波窗口大小为 25，滤波后的采样率为 2 Hz。如图 5 所示，蓝色线为两个气压传感器数据的均值结果，红色线为经过窗口大小为 25 的均值滤波器处理后的均值结果，从图中可以看出经过滤波后的数据更能反映实际气压变化，受到外界环境影响较小。

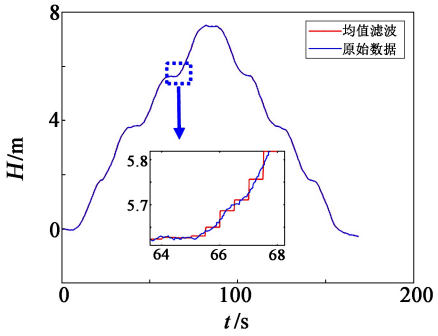


图 5　均值滤波数据图

为了检测行人上下楼的准确性，对上楼、下楼以及平走，文中对三种状态进行判别和标志位设置，上楼、下楼和平走的标志位分别为 1，−1，0，图 6 为检测状态图。蓝色实线为实际步态，橙红色实线为未加入平走判断的步态结果，红色实线为本文算法解算的步态结果。从图中可以看出，未添加平走判别的步态结果中存在很多误判。其原因在于：实际上下楼中，行人的高度变化趋势并不恒定，呈现周期性变化，导致变化缓慢阶段被误识别为平走状态。采用状态检测窗口进行处理后，能够有效消除平走误判，如红色实线所示，同时，处理后的结果与蓝色实线表示的实际步态情况一致，符合行人实际情况。此外，在上楼过程中，没有出现误判为下行的情况；下楼过程中，没有出现误判为上行的情况；在平走过程中，也没有出现误判为上或下楼的情况。

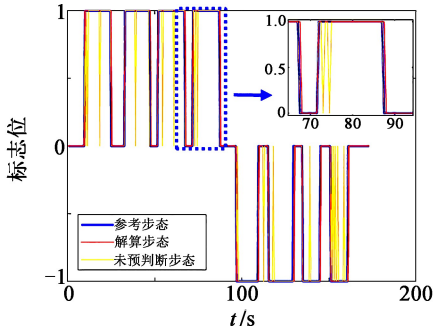


图 6　状态检测图

图 7 所示为闭环实验测试的高度估计结果图。红色实线表示经本文算法修正后得到的高度，蓝色实线表示直接利用气压传感器解算的高度。由于气压传感器会受到环境因素如风速、温度波动等的影响，获得未修正的再次回到原点的高度为−0.290 8 m（理论值应为 0）。而经过本文算法修正后得到最终高度为 0.108 4 m。常采用误差占比进行算法有效性评估，误差占比 E_r 计算如下：

$$E_r = H_{ac}/H_s \times 100\% \tag{14}$$

式中，H_{ac} 为实际高度误差，H_s 为总路程总高度变化和，文中的总路程总高度变化和为 3.8 m×4＝15.2 m，其中，3.8 m 是单层楼的高度。因此，直接利用气压计进行高度解算的误差占比为 1.9%，而利用本文算法修正后的高度误差占比为 0.07%。因此，本文算法可以有效降低平走阶段的高度漂移，获得更高的高度变化与状态检测图。此外，本文算法有效地修正了两层楼之间的中间平台水平高度信息，使测试者更容易准确分辨出具体楼层。

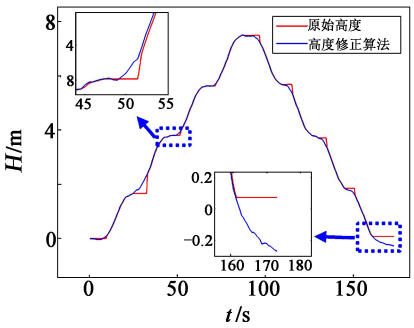


图 7　高度估计图

为检验算法的重复性，将上述实验重复测试了 5 次，并记录每次数据的校正前终点和利用本文算法校正后的终点信息，如表 1 所示。采用气压传感器直接解算的平均高度误差为−0.522 4 m，而采用本文修正算法解算后的平均高度误差为−0.125 3 m。从表中可以看出，相较于直接采用微气压传感器解算的高度结果，本文所提的高度修正算法处理后的行人室内高度精度有了明显的提高。

表 1　高度校正前后统计表

实验次数	起点高度误差/m	校正前终点高度误差/m	校正后终点高度误差/m
1	0	−0.303 4	−0.101 7
2	0	−0.290 8	0.144 6
3	0	−0.512 9	0.261 5
4	0	−0.652 8	−0.367 5
5	0	−0.852 1	−0.563 5
平均值	0	−0.522 4	−0.125 3

4　结论

本文提出一种新的高度估计算法，该算法不仅

利用了气压传感器解算的高度数据对行人的状态进行判别，并利用该状态来对高度数据进行修正。实验结果表明：利用现有的低成本微气压传感器，该算法能够有效分辨楼层高度和中间平台的高度，获得较高精度的行人室内高度信息，并且该算法对平走状态的高度漂移具有一定抑制作用，适用于低速运动载体的高度测量。

参考文献：

[1] 高宇航，向政蓉，黄庆南，等. 基于物联网的无人机仿真与测试系统设计[J]. 物联网技术，2023，13(12)：60-63，66.
Gao Yuhang，Xiang Zhengrong，Huang Qingnan，et al. Design of unmanned aerial vehicle simulation and testing system based on the Internet of Things[J]. J. IoT Technol.，2023，13(12)：60-63，66.

[2] 吕 品，朱静漪，赖际舟，等. 基于行为概率分析的室内行人导航方法[J]. 中国惯性技术学报，2023，31(11)：1122-1131.
Lv Pin，Zhu Jingyi，Lai Jizhou，et al. Indoor pedestrian navigation method based on behavioral probability analysis[J]. J. Chin. Inert. Technol.，2023，31(11)：1122-1131.

[3] Wen S，Ge Z，Yuan D，et al. Enhanced pedestrian navigation on smartphones with VLP-assisted PDR integration[J]. IEEE Sens. J.，2023，23(14)：15952-15962.

[4] 李 楠，梁 冰. 基于UWB的三维定位和优化滤波方法[J]. 河北大学学报(自然科学版)，2021，41(3)：329-336.
Li Nan，Liang Bing. Three dimensional positioning and optimized filtering method based on UWB[J]. J. Hebei Uni. (Natural Science Edition)，2021，41(3)：329-336.

[5] Cao H J，Wang Y J，Bi J X. Smartphones：3D indoor location using WiFi RTT[J]. IEEE Commun. Lett.，2021，25(4)：1201-1205.

[6] Lv Y Y，Liu W J，Wang Z，et al. WSN location technology based on hybrid GA-PSO-BP algorithm for indoor three-dimensional space[J]. Wireless Pers. Commun.，2020，114(1)：167-184.

[7] 吴习芊，江小平，丁 昊，等. 基于WiFi信号的多维参数估计与三维轨迹跟踪算法[J]. 信号处理，2020，36(8)：1352-1362.
Wu Xiqian，Jiang Xiaopin，Ding Hao，et al. Multidimensional parameter estimation and three-dimensional trajectory tracking algorithm based on WiFi signals[J]. J. Signal Process.，2020，36(8)：1352-1362.

[8] 李国元，唐新明，周晓青，等. 高分七号卫星激光测高仪无场几何定标法[J]. 测绘学报，2022，51(3)：401-412.
Li Guoyuan，Tang Xinming，Zhou Xiaoqing，et al. The method of GF-7 satellite laser altimeter on-orbit geometric calibration without field site[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2022，51(3)：401-412.

[9] 王 洁，王娜子，徐天河，等. 组合GNSS观测值反演海面高度[J]. 测绘学报，2022，51(2)：201-211.
Wang Jie，Wang Nazi，Xu Tianhe，et al. Sea level estimation using the combination of GNSS observations [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica，2022，51(2)：201-211.

[10] 黄 鹤，谢飞宇，王 珺，等. 基于自适应高斯-牛顿迭代三步延迟时空融合的无人机测高[J]. 南京大学学报(自然科学)，2022，58(4)：689-698.
Huang He，Xie Feiyu，Wang Jun，et al. Altitude measurement of UAV based on adaptive Gauss-Newton iterative three-step delay space-time fusion[J]. J. Nanjing Uni. (Natural Science)，2022，58(4)：689-698.

[11] Dong Y，Arslan T. Real-time NLOS/LOS identification for smartphone-based indoor positioning system using WiFi RTT and RSS[J]. IEEE Sens. J.，2021，22(6)：5199-5209.

[12] Xu Y，Cao J，Sshmaliy Y，et al. Distributed Kalman filter for UWB/INS integrated pedestrian localization under colored measurement noise[J]. Satell. Navig.，2021(1)：2.

作者简介：

余 豪(1996—)，男，四川省成都市人，硕士研究生，主要从事惯性传感器与自主定位研究；

陈燕苹(1990—)，女，重庆市人，博士，讲师，主要从事惯性传感器与自主定位研究。

(上接第215页)

[37] Jiang X，Wu H，Dai D. Low-loss and low-crosstalk multimode waveguide bend on silicon[J]. Opt. Express，2018，26(13)：17680-17689.

[38] Morrison B，Bedoya A C，Ren G，et al. Compact Brillouin devices through hybrid integration on silicon[J]. Optica，2017，4(8)：847-854.

[39] Vogelbacher F，Nevlacsil S，Sagmeister M，et al. Analysis of silicon nitride partial euler waveguide bends[J]. Opt. Express，2019，27(22)：31394-31406.

[40] Zhou H，Geng Y，Cui W，et al. Soliton bursts and deterministic dissipative Kerr soliton generation in auxiliary-assisted microcavities[J]. Light：Sci. and Appl.，2019，8：50.

[41] Zhang S Y，Silver J M，Bino L D，et al. Sub-milliwatt-level microresonator solitons with extended access range using an auxiliary laser[J]. Optica，2019，6(2)：206-212.

作者简介：

杜润昌(1982—)，男，湖北省十堰市人，博士，高级工程师，主要从事原子分子物理、现代原子钟、微腔光学频率梳、半导体激光器等方面的研究。