



# 基于卫星载噪比定权的手机 RTK/PDR 融合定位研究

## 摘要

针对智能手机 GNSS 定位芯片在遮挡环境下定位精度下降的问题,本文采用 RTK/PDR 融合方法解算位置结果,考虑到 GNSS 信号易受环境影响,本文提出根据平均卫星载噪比参数将当前 GNSS 观测环境分为优、中、差三种情况,并根据判断出的不同观测条件,设置不同的膨胀系数放大 Kalman 融合滤波中量测噪声方差矩阵  $R$ ,实现在遮挡环境中对 GNSS 位置信息的降权处理,以获得更优的融合结果.实验测试显示:在开阔环境中,两部测试手机 RTK 与 RTK+PDR 定位精度基本一致;在轻微遮挡环境中,两部测试手机 RTK+PDR 融合定位结果较 RTK 单独定位结果平面提升效果分别为 6.24% 和 3.97%,高程提升效果分别为 20.44% 和 32.56%;在严重遮挡环境中,两部测试手机 RTK+PDR 融合定位结果较 RTK 单独定位结果平面提升效果分别为 47.65% 和 42.90%,高程提升效果分别为 39.78% 和 67.98%.实验结果表明,本文提出的依据平均卫星载噪比动态设置 GNSS 信息权重的 RTK+PDR 融合定位方法,能够部分弥补手机 RTK 在遮挡地区定位精度下降的缺点.

## 关键词

RTK;PDR;智能手机;遮挡环境感知;融合定位

中图分类号 P228.4;TN929.53

文献标志码 A

收稿日期 2022-07-28

资助项目 教育部-中国移动科研基金(MCM2020J01)

## 作者简介

高成发,男,博士,教授,研究方向为卫星导航定位理论与应用.gaochfa@seu.edu.cn

梅俊杰(通信作者),男,硕士生,研究方向为手机高精度定位.986872577@qq.com

## 0 引言

近年来,由于移动互联网和物联网的快速发展,智能移动终端已经变得十分普及,在这些移动智能设备中,基于 Android 系统的智能手机占有最高<sup>[1]</sup>.Android 智能手机通常集成了多种传感器,如蓝牙、Wi-Fi、音频以及摄像头等硬件设备,而用于提供导航定位服务的全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)定位芯片和惯性导航系统(Inertial Navigation System,INS)传感器也是 Android 智能手机的标准硬件配置<sup>[2]</sup>.当前,研究人员正致力于通过借助这些低成本的传感器,获取更加可靠有效的导航信息,为广大的手机用户提供更优的位置服务.

开阔环境下手机实时载波相位差分方法(Real-Time Kinematic,RTK)动态定位精度可达 1 m 左右<sup>[3-7]</sup>,手机行人航位推算(PDR,Pedestrian Dead Reckoning)平面定位结果短时精度较高<sup>[8]</sup>.但无论是手机 GNSS 定位,还是手机 INS 定位,都面临着各自导航系统的固有问题,即手机 GNSS 在遮挡环境中,如高楼林立的城市区域,由于卫星信号受遮挡或其他复杂因素的影响,定位精度严重下降,手机 INS 在无外部约束的条件下,系统产生的导航误差会随着时间的推移逐渐积累,定位结果将不再可用.手机多源融合定位可以依靠不同定位系统之间的优势以弥补各自存在的不足.当前基于手机 GNSS/INS 融合定位的方法大致可以分为两种:一种是 INS 定位方法选择行人航位推算 PDR,以行人的位置、步长以及航向作为状态量,以 GNSS 的定位结果作为观测量,通过 Kalman 滤波实现手机 GNSS/INS 融合定位<sup>[9]</sup>;另一种是 INS 定位方法选择捷联惯导推算 SINS,以卫星导航参数与惯性导航参数的差值作为状态量,以 GNSS 的定位结果作为观测量,通过 Kalman 滤波实现手机 GNSS/INS 融合定位<sup>[10]</sup>.两种方法中,前者对惯性测量单元(Inertial Measurement Unit,IMU)误差补偿要求更低,适用于精度低、稳定性差的手机 IMU,因此本文选择前者模型作为本文 GNSS/INS 的融合定位方法.

手机 GNSS 与 PDR 融合定位结果优于单一系统的解算结果<sup>[11]</sup>.文献[12]指出,当卫星信号在短时间内被部分遮蔽或严重遮挡的情况下,手机 GNSS 和 PDR 融合定位可以校正 GNSS 观测值的点位漂移.虽然前人对手机 GNSS/PDR 单独与组合定位开展了丰富深入的研究,但相关学者利用 Kalman 滤波对 GNSS/PDR 进行融合解算时,

1 东南大学 交通学院,南京,211189

往往视系统噪声为常量,采用常值作为对应的量测噪声方差矩阵,并未考虑 GNSS 定位结果受环境影响的实际情况,而手机可见卫星数与卫星载噪比的变化在一定程度上可以反映 GNSS 观测环境的优劣状况.因此,本文针对手机 RTK/PDR 融合滤波中 GNSS 位置信息的权重分配展开分析和研究,旨在通过利用智能手机中内置的 GNSS 芯片和 IMU 传感器实现更优的位置融合解算,以提高智能手机在遮挡环境中的定位精度.

## 1 手机 RTK/PDR 融合定位方法

目前针对 Android 智能手机的多源融合研究多集中于卫星定位与惯性定位,本文卫星定位数据处理方法选择 RTK,惯性定位数据处理方法选择 PDR.

### 1.1 手机 RTK 定位模型

对于智能手机,通常采用单频观测值,其观测方程为

$$P_i^p = \rho_i^p + c \cdot (dt_i - dT^p) + (d_{\text{trop}})_i^p - (d_{\text{ion}})_i^p + \varepsilon_p, \quad (1)$$

$$\phi_i^p = \rho_i^p + c \cdot (dt_i - dT^p) + (d_{\text{trop}})_i^p - (d_{\text{ion}})_i^p + N_i^p + \varepsilon_L, \quad (2)$$

式中,  $P_i^p$  表示伪距观测值,  $\phi_i^p$  表示载波观测值(单位 m),  $\rho_i^p$  表示站星几何距离,  $c$  表示光速,  $t_i$  表示接收机钟差,  $T^p$  表示卫星钟差,  $(d_{\text{trop}})_i^p$  表示对流层折射误差,  $(d_{\text{ion}})_i^p$  表示电离层延迟误差,  $N_i^p$  表示整周模糊度,  $\varepsilon_p$  和  $\varepsilon_L$  分别表示伪距和载波的测量噪声,  $i$  和  $p$  分别表示接收机和卫星.

站星双差能够消除接收机和卫星钟差,并大大削弱大气延迟误差和星历误差,将双差后的大气延迟误差视作残差,得到简化后的站星双差观测方程如下:

$$\Delta \nabla P_{ij}^{pq} = (\rho_i^p - \rho_j^p - \rho_i^q + \rho_j^q) + \Delta \nabla \varepsilon_p, \quad (3)$$

$$\Delta \nabla \phi_{ij}^{pq} = (\rho_i^p - \rho_j^p - \rho_i^q + \rho_j^q) + \Delta \nabla N_{ij}^{pq} + \Delta \nabla \varepsilon_L. \quad (4)$$

### 1.2 手机 PDR 定位模型

行人航位推算 PDR 主要通过分析行人的运动状态,借助 IMU 实现行人步态探测、步长估计以及航向估计,进而完成行人的逐步位置推算.

#### 1.2.1 步态探测

根据行人步行时身体呈现的周期性特征可采用峰值探测法对加速度信号进行脚步探测.峰值探测法的思想是通过前后相邻时刻的加速度值,找到加

速度信号曲线的波峰和波谷,以两次波峰或两次波谷的间隔代表一步,实现脚步探测.

由于行人在行走过程中手机不能完全保持  $Z$  轴朝上,总是会存在一定的姿态角,为了提高竖直方向加速度的可靠性,常被用于探测的加速度信号为合加速度,即

$$a = \sqrt{(a_x)^2 + (a_y)^2 + (a_z)^2}, \quad (5)$$

式中,  $a$  为智能手机三轴合加速度,  $a_x$  为  $X$  轴方向的加速度,  $a_y$  为  $Y$  轴方向的加速度,  $a_z$  为  $Z$  轴方向的加速度.合加速度还可能会存在毛刺噪声,需对合加速度做平滑预处理,滑动均值滤波的公式为

$$\bar{a}_l = \frac{\sum_{i=l-N}^l a_i}{N}, \quad l > N, \quad (6)$$

式中  $l$  为当前时刻计数,  $\bar{a}_l$  为当前时刻平滑后的合加速度,  $N$  为平滑区间,  $a_i$  为平滑区间内的合加速度.

#### 1.2.2 步长估计

经研究表明,步长与加速度以及迈步频率密切相关<sup>[13]</sup>,因此,可以选用线性公式估计行人步长.文献[14]通过大量实验测试给出了线性公式的具体参数,本文在文献[14]提出的线性公式基础上增加迈步频率约束条件,具体公式如下:

$$L_s = \begin{cases} 0.4f - 0.01, & 0.5 < f < 3, \\ 0.7, & \text{其他,} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $L_s$  表示行人步长,  $f$  表示迈步频率,由步态探测获得.通常行人行走一步的时间在  $0.3 \sim 2$  s 之间,对应的迈步频率在  $0.5 \sim 3$  Hz 之间,当迈步频率不在该阈值范围内,式(7)不再适用,采用常值代替.

#### 1.2.3 航向估计

智能手机的航向角以陀螺仪输出的角速度为变量,四元数为数学工具,逐步更新推算得到.将姿态矩阵用四元数表示,其形式为

$$Q = (q_0, q_1, q_2, q_3) = q_0 + q_1 i + q_2 j + q_3 k = q_0 + q. \quad (8)$$

根据刚体转动理论,可以得到姿态四元数运动方程:

$$\dot{q} = \frac{1}{2} \mathbf{W}(w_{nb}^n) q, \quad (9)$$

$$\text{式中: } \mathbf{W}(w_{nb}^b) = \begin{bmatrix} 0 & -w_{nbx}^b & -w_{nby}^b & -w_{nbz}^b \\ -w_{nbx}^b & 0 & w_{nbz}^b & -w_{nby}^b \\ w_{nby}^b & -w_{nbz}^b & 0 & w_{nbx}^b \\ w_{nbz}^b & w_{nby}^b & -w_{nbx}^b & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$w_{nb}^b$  表示载体坐标系相对导航坐标系的转动角速度在载体坐标系上的投影,它由陀螺仪的输出变换而得,求解该方程即可得到姿态四元数的更新值  $q_b^n$ ,从而计算出载体姿态角的大小,得到行人的航向信息.

### 1.3 手机 RTK/PDR 松耦合模型

由于松耦合方式不涉及 GNSS 与 INS 内部数据处理方法,直接对结果进行组合,因此实现方式简单,融合结果可靠,被广泛应用于低成本的 GNSS/INS 融合研究中.本文采用 Kalman 滤波进行融合解算,基于综合考虑算法效率, Kalman 滤波器设计如下:

1) 状态向量

$$\mathbf{X} = [E \quad N \quad U \quad \Delta\theta], \quad (10)$$

式中,  $E, N, U$  分别为智能手机在站心坐标系下的东向、北向和天向坐标,  $\Delta\theta$  为陀螺仪估计的航向与真实航向之间的差值.

状态方程描述为

$$\begin{cases} E_{k+1} = E_k + v \cdot \sin(\theta + \Delta\theta_k) + \omega_E, \\ N_{k+1} = N_k + v \cdot \cos(\theta + \Delta\theta_k) + \omega_N, \\ U_{k+1} = U_k + u + \omega_U, \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $v$  为利用步态探测及步长估计内插得到的平面速度,  $\theta$  为利用陀螺仪推算出的航向角,  $u$  为加速度二次积分得到的天向速度.需要特别指出的是,由于 PDR 方法仅为平面推算,无高程信息,因此天向速度  $u$  由 SINS 方法中加速度二次积分得到,并且由于行人在室外的天向速度较小,为防止  $u$  (单位: m/s) 在推算过程中发散,设置约束条件,即:

$$|u| < 0.25. \quad (12)$$

2) 观测向量

$$\mathbf{Z} = [E_{GNSS} \quad N_{GNSS} \quad U_{GNSS}], \quad (13)$$

式中,  $E_{GNSS}, N_{GNSS}$  和  $U_{GNSS}$  分别是通过 RTK 定位算法得到的智能手机在站心坐标系下的东向、北向和天向坐标.

观测方程描述为

$$\begin{cases} E_{GNSS} = E_k + \omega_{E_{GNSS}}, \\ N_{GNSS} = N_k + \omega_{N_{GNSS}}, \\ U_{GNSS} = U_k + \omega_{U_{GNSS}}. \end{cases} \quad (14)$$

### 1.4 手机 GNSS 观测环境动态感知

GNSS 定位易受观测环境影响,尤其是使用消费级 GNSS 芯片的智能手机,由于无法消除遮挡环境中的复杂信号影响,造成手机 GNSS 在开阔环境下能够有效定位,但在遮挡环境中 GNSS 定位漂移严重,误差可达数米到数十米.由此来看,手机 GNSS 定位结果作为融合滤波中的系统观测量,对应观测噪声受环境遮挡状况动态变化,因此,本文提出根据 GNSS 观测环境优劣动态设置融合滤波中手机 GNSS 位置信息权重.

通常卫星平均载噪比能够在一定程度上反映当前的环境质量,可以用来作为感知观测环境优劣的参数.为进一步体现平均卫星载噪比随观测环境的变化情况,本文采用以下公式处理平均卫星载噪比,以放大载噪比的数值相对变化量.

$$P_{C/N_0} = 10^{\frac{40-C/N_0}{10}}, \quad (15)$$

式中,  $C/N_0$  为平均卫星载噪比,  $P_{C/N_0}$  是通过平均卫星载噪比计算得到的参数,本文简称为载噪比参数.根据计算出的载噪比参数,利用阈值判断环境质量,判断公式如下所示:

$$EQ = \begin{cases} \text{good}, & P_{C/N_0} \leq 1.2C, \\ \text{medium}, & 1.2C < P_{C/N_0} \leq 1.6C, \\ \text{bad}, & P_{C/N_0} > 1.6C, \end{cases} \quad (16)$$

式中 EQ 为环境质量评价结果.需要指出的是,经实验比较发现,不同类型智能手机在同一环境下受手机天线硬件配置、信号调制方式等影响,可见卫星数、平均载噪比均不相同,因此阈值  $C$  不能直接赋予定值,而是手机通过动态计算各自累计历史均值得到.根据上述提出的方法,即可得到当前 GNSS 的观测环境状况,根据不同的观测环境条件,动态设置融合滤波中 GNSS 位置信息权重,本文提出的设置公式如下:

$$\mathbf{R} = \begin{cases} \mathbf{R}, & \text{good}, \\ \mathbf{R} \cdot 5, & \text{medium}, \\ \mathbf{R} \cdot 10, & \text{bad}, \end{cases} \quad (17)$$

式中  $\mathbf{R}$  为 Kalman 融合滤波中 GNSS 位置信息对应的量测噪声方差矩阵,由开阔环境下统计的手机 RTK 定位中误差给出.根据判断出的不同观测条件,以不同膨胀系数放大大观测噪声,即可实现在遮挡环境下对融合滤波中 GNSS 定位结果的降权处理.

## 2 实验验证与分析

为验证本文提出的智能手机组合定位方法,选

择完全开阔环境测试智能手机 RTK、PDR 定位方法,选择局部遮挡环境测试智能手机 RTK+PDR 融合定位方法,并以测地型接收机提供的基准对智能手机定位结果进行精度评价.

2.1 手机 RTK 定位实验

智能手机型号选择市面上常见品牌,本文记作 M1 和 M2 智能手机.两种品牌智能手机均支持伪距、载波以及多普勒观测.实验观测条件整体较为开阔良好,差分基准站为校园 CORS 站,且与实验地点相距不超 5 km.以测地型接收机提供的解算结果为基准,计算两部智能手机 RTK 动态定位误差, M1 和 M2 智能手机动态定位误差如图 1 所示.

由图 1 可知,两者平面、高程定位精度均为 1 m 左右.以 1 倍中误差 RMSE 为衡量标准,统计上述智能手机动态定位结果,统计结果如表 1 所示.

表 1 中统计结果表明,在动态模式下, M1 智能

表 1 智能手机动态 RTK 定位精度统计

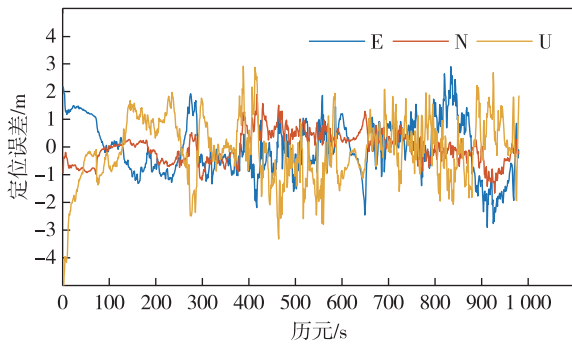
Table 1 Statistics of smart phone dynamic RTK positioning results m

手机型号	东向 E	北向 N	平面	高程
M1	0.982	0.554	1.127	1.152
M2	0.658	0.513	0.835	1.037

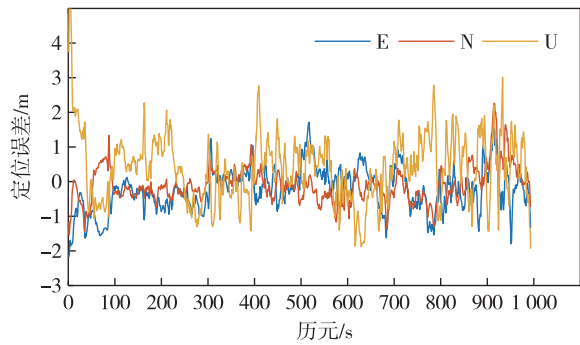
手机平面定位结果为 1.127 m, 高程定位结果为 1.152 m, M2 智能手机平面定位结果为 0.835 m, 高程定位结果为 1.037 m.

2.2 手机 PDR 定位实验

智能手机 PDR 定位实验位于学校校区,实验测试时长共 300 s,其中前 60 s 静止,中间 180 s 步行,后 60 s 静止.研究人员以 1~1.5 m/s 速度手持智能手机和测地型接收机步行前进.智能手机 PDR 定位实验结果如图 2 所示,基准 BASE 为测地型接收机 RTK 固定解.



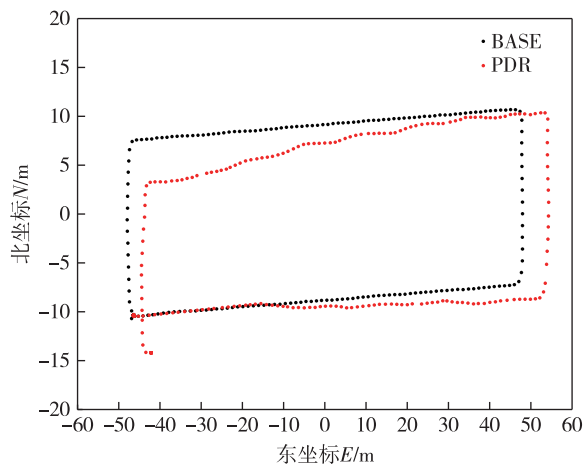
a. M1智能手机ENU定位误差



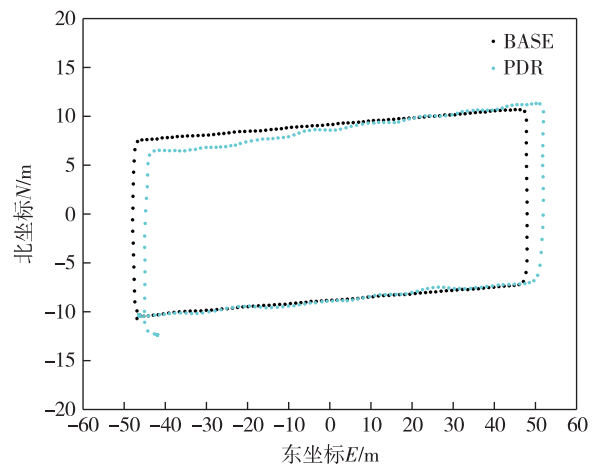
b. M2智能手机ENU定位误差

图 1 智能手机动态 RTK 定位误差

Fig. 1 Smart phone dynamic RTK positioning errors



a. M1智能手机



b. M2智能手机

图 2 智能手机 PDR 定位结果

Fig. 2 Smart phone PDR positioning results

由于 PDR 定位误差具有随时间逐渐积累的特性,且不同时间点的点位误差能够直接反映 PDR 定位结果在时间轴上的精度,因此本文不采用标准差 RMSE 判断 PDR 定位算法的优劣,而采用统计不同时间节点的平面点位误差(即推算点到基准点的平面距离)来判断,统计结果如表 2 所示。

表 2 不同时间节点智能手机 PDR 平面定位误差

Table 2 Plane positioning errors of smart phone PDR at different time nodes m

手机型号	时间节点						
	0 s	10 s	30 s	60 s	100 s	150 s	180 s
M1	0	1.653	3.501	5.208	6.171	5.868	5.624
M2	0	0.432	2.325	3.242	4.283	3.369	4.711

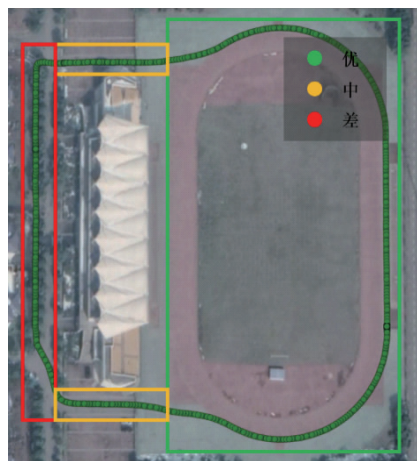
由表 2 统计结果可知,在较短时间(10 s)内,手

机 PDR 定位精度仍优于 2 m,基本满足行人导航定位的需求.但随着时间的推移,手机 PDR 误差逐渐增大,不再能准确反映真实的运动轨迹。

### 2.3 手机 RTK+PDR 组合定位实验

实验区域位于校园内,包括操场跑道和宿舍区道路,其中操场跑道右侧较为开阔,左侧存在体育看台遮挡,宿舍区道路存在树木和建筑遮挡,研究人员以 1~1.5 m/s 速度手持智能手机和测地型接收机步行前进.实验场景如图 3 所示。

智能手机观测的卫星平均载噪比在一定程度上能够反映当前的 GNSS 观测环境的遮挡状况,根据本文提出的载噪比参数计算公式,利用卫星平均载噪比计算出的 M1 和 M2 智能手机的载噪比参数如图 4 所示,其中横坐标为 GPS 周内秒。



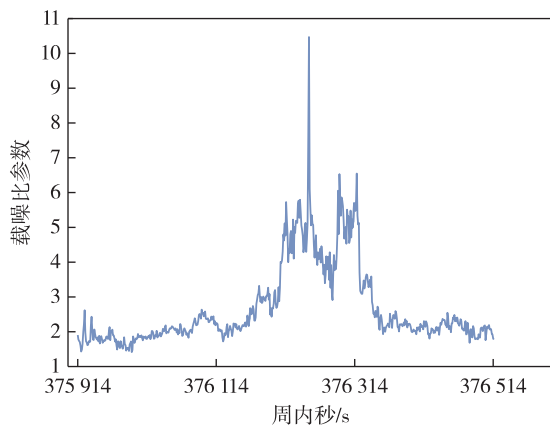
a. 实验测试路线



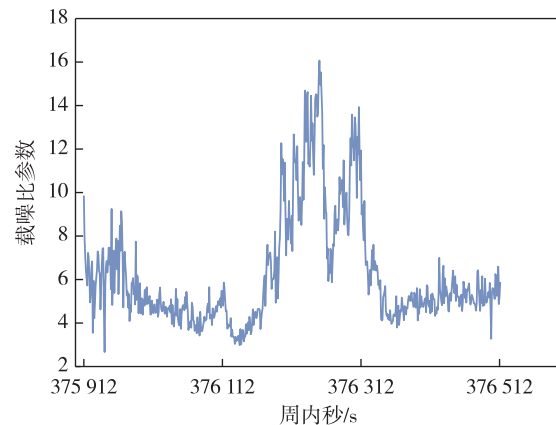
b. 遮挡环境

图 3 智能手机 RTK+PDR 组合定位实验场景

Fig. 3 Experimental scenario of smart phone RTK+PDR positioning



a. M1智能手机



b. M2智能手机

图 4 智能手机载噪比参数

Fig. 4 Carrier noise ratio parameters of smart phone

由图 4 可以看出,智能手机载噪比参数随 GNSS 观测环境变化显著,当智能手机由开阔环境进入到遮挡环境时,载噪比参数数值明显增大,智能手机离开遮挡环境后,载噪比参数数值则恢复到初始水平.按照本文提出的计算平均卫星载噪比参数的方法判断当前的 GNSS 环境的遮挡状况,两部测试手机对 GNSS 观测环境判读结果如图 5 所示.

图 5 中绿色标记表示当前观测环境较为开阔,GNSS 定位结果较好,黄色标记表示当前观测环境存在轻微遮挡,GNSS 定位结果中等,红色标记表示当前环境遮挡较为严重,GNSS 定位结果较差.从图 5 中可以看出,M1 和 M2 智能手机均能大致区分出当前的环境状况.

根据上述 RTK+PDR 的融合定位模型以及融合滤波中观测噪声的动态设置方法,对智能手机进行

融合定位测试,实验结果如图 6 所示.

图 6 中黑色曲线为测地型接收机提供的高精度 RTK 固定解定位结果,蓝色曲线为手机 RTK 计算得到的结果,红色曲线为手机 RTK+PDR 融合计算得到的结果.从图 6 中可以看出,手机 RTK 在开阔环境定位结果良好,基本与基准保持一致,但在遮挡环境中,RTK 定位结果逐渐变差,特别是航向精度严重下降,不再与行人真实运动的轨迹保持一致.手机 RTK+PDR 组合定位的方法则明显弥补了这一缺点,根据上述提出的环境质量判读方法,手机能够较为准确地识别出当前环境质量,并动态设置系统量测噪声方差矩阵.当手机处于开阔环境时,融合滤波更相信 GNSS 的定位结果,RTK+PDR 融合结果基本与纯 RTK 结果大致相同.当手机在遮挡环境时,融合滤波降低 GNSS 定位结果的权重,由 PDR 进行弥补,

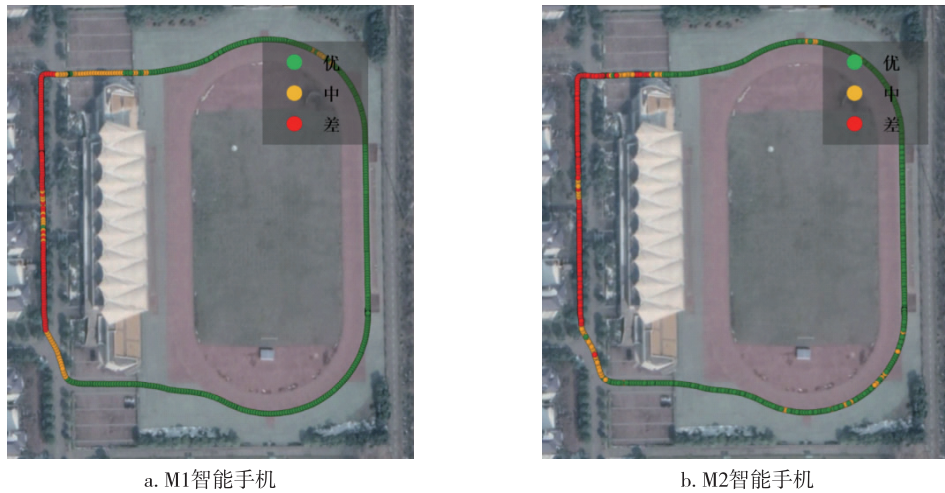


图 5 环境质量判读结果

Fig. 5 Interpretation results of environmental quality

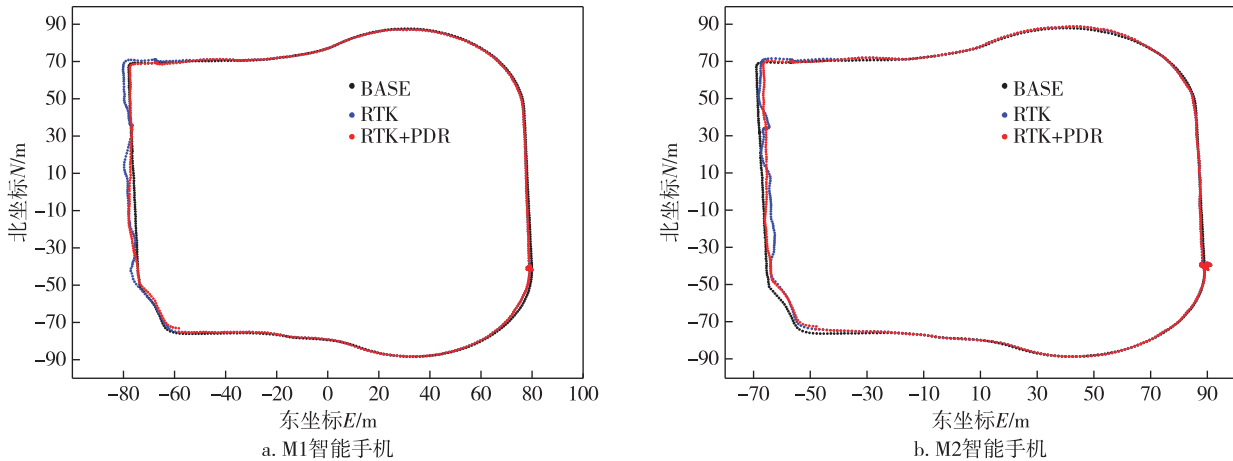


图 6 智能手机 RTK+PDR 组合定位结果

Fig. 6 Smart phone RTK+PDR positioning results

最终融合结果平滑性更高,更加符合行人的真实运动轨迹.以测地型接收机提供的高精度 GNSS 定位结果为基准,M1 和 M2 智能手机定位误差统计结果如图 7 所示.

图 7 表明,两部智能手机 RTK+PDR 融合定位结果与上述分析结论保持一致.以 1 倍中误差 RMSE 为衡量标准,根据图 3 将观测环境分为优中差三种情况,分区间统计上述手机定位结果,统计结果如表 3 和表 4 所示.

结果表明:在观测条件为优的区间,两部手机

RTK 与 RTK+PDR 两种方法定位精度基本一致,且平面高程定位精度均在 1 m 左右;在观测条件为中的区间,两部手机 RTK 的平面中误差分别为 1.359 m 和 1.738 m, RTK+PDR 的平面中误差分别为 1.275 m 和 1.669 m,平面定位精度提升效果分别为 6.24%和 3.97%,两部手机 RTK 的高程中误差分别为 2.333 m 和 1.951 m, RTK+PDR 的高程中误差分别为 1.856 m 和 1.316 m,高程定位精度提升效果分别为 20.44%和 32.56%;在观测条件为差的区间,两部手机 RTK 的平面中误差分别为 3.478 m 和 4.531 m,

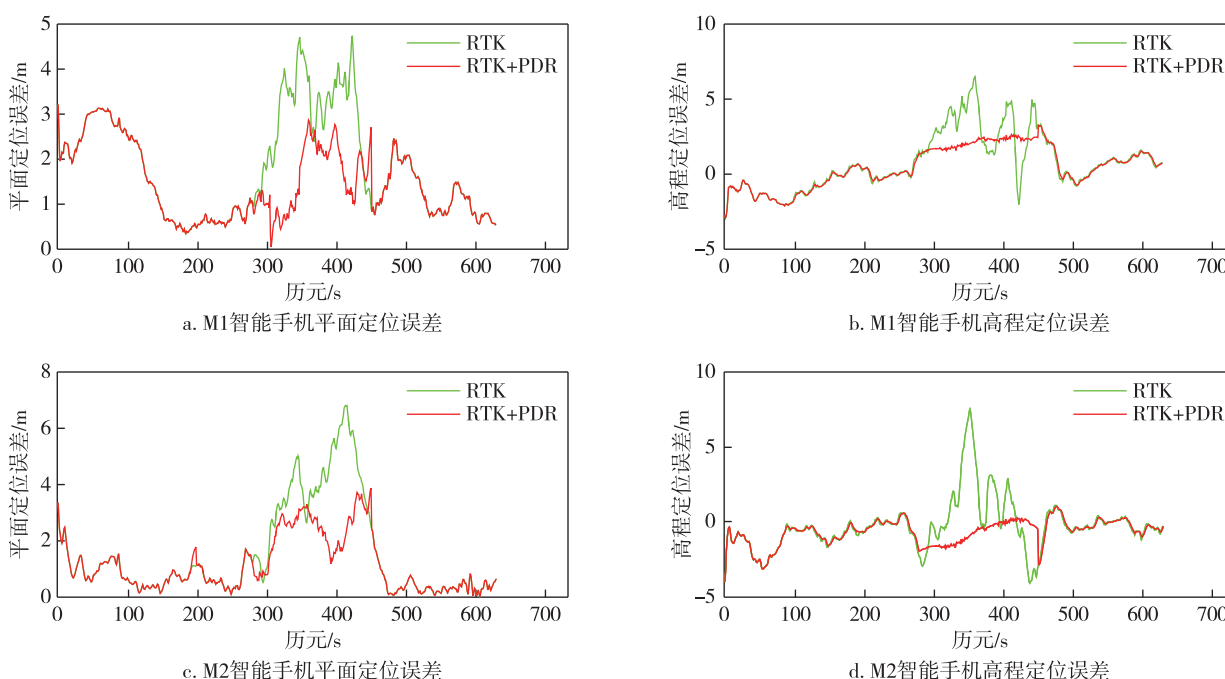


图 7 智能手机 RTK+PDR 组合定位误差

Fig. 7 Smart phone RTK+PDR positioning errors

表 3 M1 智能手机定位精度统计

Table 3 Positioning accuracy statistics for smart phone M1

定位方法	观测条件优		观测条件中		观测条件差	
	平面	高程	平面	高程	平面	高程
RTK	1.706	1.002	1.359	2.333	3.478	3.585
RTK+PDR	1.705	1.004	1.275(6.24%)	1.856(20.44%)	1.821(47.65%)	2.159(39.78%)

注:括号内百分比表示观测条件相同时 RTK+PDR 相对于 RTK 方法的提升效果.

表 4 M2 智能手机定位精度统计

Table 4 Positioning accuracy statistics for smart phone M2

定位方法	观测条件优		观测条件中		观测条件差	
	平面	高程	平面	高程	平面	高程
RTK	0.788	1.045	1.738	1.951	4.531	2.848
RTK+PDR	0.801	1.038	1.669(3.97%)	1.316(32.56%)	2.587(42.90%)	0.912(67.98%)

注:括号内百分比表示观测条件相同时 RTK+PDR 相对于 RTK 方法的提升效果.

RTK+PDR 的平面中误差分别为 1.821 m 和 2.587 m, 平面定位精度提升效果分别为 47.65% 和 42.90%, 两部手机 RTK 的高程中误差分别为 3.585 m 和 2.848 m, RTK+PDR 的高程中误差分别为 2.159 m 和 0.912 m, 高程定位精度提升效果分别为 39.78% 和 67.98%。

### 3 结论

本文对智能手机载波相位差分定位模型展开研究, 实现了单频载波相位差分定位, 实际测试表明, 参与测试的两部智能手机, 在开阔环境下, M1 智能手机平面定位精度为 1.127 m, 高程定位精度为 1.152 m, M2 智能手机平面定位精度为 0.835 m, 高程定位精度为 1.037 m。其次, 根据智能手机 IMU 稳定性差的特点, 提出使用适用于智能手机的行人航位推算 PDR 方法, 实际测试表明, 在短期(10 s)内, 定位精度优于 2 m, 基本满足行人导航定位的需求, 但随着时间推移, 定位精度迅速下降。

针对手机 RTK+PDR 组合定位方法, 考虑 GNSS 定位结果易受环境影响, 提出计算卫星平均载噪比参数的方法自主判断当前环境质量, 进而动态调整融合滤波中 GNSS 的权重, 以实现更优的融合定位结果。测试结果显示, 在严重遮挡环境中, 融合解算能够部分提升定位精度, 手机 RTK+PDR 融合定位平面提升效果分别为 47.65% 和 42.90%, 高程提升效果分别为 39.78% 和 67.98%。实验结果表明, 对于存在局部遮挡严重的观测环境, 本文提出的手机 RTK+PDR 融合定位方法能够部分弥补手机 RTK 在遮挡地区定位精度下降的缺点。

### 参考文献

#### References

- [ 1 ] 何泾沙, 周悦. 移动智能系统测试原理与实践 [ M ]. 北京: 机械工业出版社, 2016  
HE Jingsha, ZHOU Yue. Mobile intelligent systems testing: principles and practices [ M ]. Beijing: China Machine Press, 2016
- [ 2 ] 赵中堂. 基于智能移动终端的行为识别方法研究 [ M ]. 成都: 电子科技大学出版社, 2014  
ZHAO Zhongtang. Research on behavior recognition method based on intelligent mobile terminal [ M ]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology Press, 2014
- [ 3 ] 高成发, 陈波, 刘永胜. Android 智能手机 GNSS 高精度实时动态定位 [ J ]. 测绘学报, 2021, 50(1): 18-26  
GAO Chengfa, CHEN Bo, LIU Yongsheng. Android smart-phone GNSS high-precision real-time dynamic positioning [ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 18-26
- [ 4 ] 陈波, 高成发, 刘永胜, 等. 安卓手机终端原始 GNSS 观测数据质量分析 [ J ]. 导航定位学报, 2019, 7(3): 87-95  
CHEN Bo, GAO Chengfa, LIU Yongsheng, et al. Quality analysis on raw GNSS measurements of Android mobile terminals [ J ]. Journal of Navigation and Positioning, 2019, 7(3): 87-95
- [ 5 ] 王颖喆, 陶贤露, 朱锋, 等. 利用智能手机实现 GNSS 原始观测值的高精度差分定位 [ J ]. 武汉大学学报·信息科学版, 2021, 46(12): 1941-1950  
WANG Yingzhe, TAO Xianlu, ZHU Feng, et al. High accuracy differential positioning with smartphone GNSS raw measurements [ J ]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(12): 1941-1950
- [ 6 ] Fortunato M, Critchley-Marrows J, Siutkowska M, et al. Enabling high accuracy dynamic applications in urban environments using PPP and RTK on Android multi-frequency and multi-GNSS smartphones [ C ] // 2019 European Navigation Conference (ENC). April 9-12, 2019, Warsaw, Poland. IEEE, 2019: 1-9
- [ 7 ] Banville S, Diggelen F V. Precise GNSS for everyone: precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones [ J ]. GPS World, 2016, 27(11): 43-48
- [ 8 ] 陆妍玲, 韦俊伶, 刘采玮, 等. 融合地磁/WiFi/PDR 的自适应粒子滤波室内定位 [ J ]. 测绘通报, 2020(6): 1-6  
LU Yanling, WEI Junling, LIU Caiwei, et al. An indoor localization method based on adaptive particle filter fusion of geomagnetism, WiFi and PDR [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2020(6): 1-6
- [ 9 ] 陈伟. 基于 GPS 和自包含传感器的行人室内外无缝定位算法研究 [ D ]. 合肥: 中国科学技术大学, 2010  
CHEN Wei. Research on GPS/self-contained sensors based seamless outdoor/indoor pedestrian positioning algorithm [ D ]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2010
- [ 10 ] 张楷时, 焦文海, 李建文. Android 智能终端 GNSS 定位精度分析 [ J ]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(10): 1472-1477  
ZHANG Kaishi, JIAO Wenhai, LI Jianwen. Analysis of GNSS positioning precision on Android smart devices [ J ]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(10): 1472-1477
- [ 11 ] 孙伟, 刘得朋, 刘原嘉. PDR/GPS 的 Android 终端融合导航方法 [ J ]. 测绘科学, 2018, 43(12): 118-122  
SUN Wei, LIU Depeng, LIU Yuanjia. Fusion method of Android terminal based on PDR/GPS [ J ]. Science of Surveying and Mapping, 2018, 43(12): 118-122
- [ 12 ] 张书维. 安卓智能终端 GNSS 观测值分析和 GNSS/PDR 融合算法研究 [ D ]. 徐州: 中国矿业大学, 2020  
ZHANG Shuwei. Research on GNSS measurement and GNSS/PDR fusion algorithm for Android smart phone [ D ]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020
- [ 13 ] Li F, Zhao C S, Ding G Z, et al. A reliable and accurate



indoor localization method using phone inertial sensors [C]//2012 ACM Conference on Ubiquitous Computing, September 5 - 8, 2012, Pittsburgh, Pennsylvania, USA. New York: ACM,2012:421-430

[14] 冯昆.基于 PDR/BLE 的 EKF 室内融合定位系统研究

与实现[D].徐州:中国矿业大学,2018

FENG Kun.Research and implementation of EKF indoor positioning system based on fusing PDR/BLE [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2018

## Smart phone RTK/PDR fusion positioning based on satellite carrier noise ratio weighting

GAO Chengfa<sup>1</sup> MEI Junjie<sup>1</sup> SHANG Rui<sup>1</sup> WANG Fuyou<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Transportation,Southeast University,Nanjing 211189

**Abstract** Aiming at the low positioning accuracy of the GNSS positioning chip of the smart phone in occluded environment, this paper uses the RTK/PDR fusion method to solve the position results. Considering that the GNSS signal is susceptible to environment noise, different expansion coefficients are set to amplify the measurement noise variance matrix  $R$  in Kalman fusion filtering to realize the weight reduction of GNSS position information in occluded environment, so as to obtain better fusion results. The experimental test shows that in open environment, the positioning accuracies were identical between RTK and RTK+PDR for both two test mobile phones. While in the slightly occluded environment, compared with the RTK single positioning, the RTK+PDR fusion positioning improved the plane lifting effect of the two test mobile phones by 6.24% and 3.97%, and improved the elevation lifting effect by 20.44% and 32.56%. In the severely occluded environment, the RTK+PDR fusion positioning improved the plane lifting effect of the two test mobile phones by 47.65% and 42.90% compared with the RTK single positioning, and improved the elevation lifting effect by 39.78% and 67.98%. The experimental results show that the RTK + PDR fusion positioning method, which dynamically sets the GNSS information weight according to the average satellite carrier to noise ratio, can partially compensate for the reduction of positioning accuracy caused by environment occlusion for mobile phones using RTK.

**Key words** real-time kinematic (RTK); pedestrian dead reckoning (PDR); smart phone; perception of sheltered environment; fusion positioning