

王付有<sup>1</sup> 高成发<sup>1</sup> 甘露<sup>1</sup> 张瑞成<sup>1</sup> 王剑超<sup>1</sup>

# 复杂环境智能手机 RTK/DR 车载组合定位方法

## 摘要

针对在手机车载定位场景下,手机 RTK 易受复杂环境干扰、惯导数据更新航向角易发散等问题,本文提出一种结合 OSM 地图数据的 RTK/DR 松组合定位方法.航位推算过程中,基于 OSM 数据,结合组合定位结果、车辆运动状态等信息,设计了点到线的几何匹配方法,使用匹配到的道路方向修正航向角.松组合阶段,使用标准 Kalman 滤波对位置和速度进行估计.为了减小 RTK 大幅漂移或跳动对松组合结果的影响,本文设置了松组合开关,结合 RTK 抗差 Kalman 解算中的协方差阵、车辆运动方向、RTK 定位航向角变化量综合判断是否进行量测更新.本文采用 P30、P40 智能手机共进行 6 组实验,结果表明:OSM 数据的引入能够有效控制航向角误差累积,使纯航位推算的轨迹与基准更加一致;相比于手机 RTK,增加了开关的 RTK/DR 松组合定位性能得到提升,有效抑制了大幅跳动的误差点.

## 关键词

智能手机; RTK; 航位推算; 地图匹配; 车辆定位

中图分类号 P228.4

文献标志码 A

收稿日期 2022-08-02

资助项目 教育部-中国移动科研基金(MCM2020J01)

## 作者简介

王付有,男,硕士生,研究方向为手机高精度定位.WangFuYou\_name@163.com

高成发(通信作者),男,博士,教授,研究方向为卫星导航定位理论及其在交通工程中的应用.gaochfa@163.com

## 0 引言

车辆导航是智慧交通、智能车快速发展中不可或缺的一项,关系着快速寻路、规避拥堵、提高交通运转率等切实需求<sup>[1]</sup>.随着硬件传感器的普及,车辆定位的方法也从单 GNSS 定位,扩展到 GNSS 接收机、惯性导航系统<sup>[2]</sup>、激光雷达<sup>[3]</sup>、里程计<sup>[4]</sup>等设备的融合定位.而对于用户而言,手机作为出行必不可少的设备,在大多数情况下承载着导航定位的任务.

现如今实时动态 RTK 定位已经在部分机型实现,且能够在开阔的环境下发挥稳定作用,而在复杂环境中,定位精度及稳定性均难以保证<sup>[5]</sup>.智能手机内部集成的惯性传感器为航位推算(Dead Reckoning, DR)提供了可能,而实际应用中,低成本的惯导设备数据精度较低,短时间的积分运算即带来较大的速度、姿态、位置误差.此时 RTK、航位推算的松组合结果会跟随 RTK 结果变化,难以带来精度上的有效提升.

影响航位推算过程精度的因素主要是航向角.航位推算过程中,通过角速度、加速度积分更新的航向角误差积累较快,有必要进行航向角的实时修正.航向角的修正一般围绕着车辆运动状态和场景信息进行,有零速修正<sup>[6]</sup>、道路线约束<sup>[7]</sup>、直线检测<sup>[8]</sup>、地图匹配<sup>[9]</sup>等方法.常规的地图匹配是将定位点纠正到道路当中,对地图精度要求较高.目前可获取的开源地图 OSM(OpenStreetMap)数据在点位精度上较低,但几何精度较好<sup>[10]</sup>,具备修正航向角精度水平,因此本文采用了基于 OSM 地图匹配的航向角修正方法.首先,根据 RTK/DR 融合定位结果、航向角、点投影依次筛选,得到候选匹配道路线,再结合车辆运动状态、垂线距离、路线长度选择出最符合的行驶道路,最后使用该道路的方向来纠正航向角.在 OSM 地图数据的辅助下,航位推算的航向角与车辆的行驶方向更加一致.

智能手机 RTK 为抗差 Kalman 滤波浮点解,解算后与航位推算结果进行松组合,最后使用标准 Kalman 滤波对速度和位置进行估计.此外,本文增加了松组合的开关,结合 RTK 抗差 Kalman 解算待估参数的协方差阵  $P_k$ 、车辆运动方向、RTK 定位航向角变化量综合判断是否进行量测更新,以此减小 RTK 的严重漂移对松组合结果的影响.

## 1 关键算法

针对手机 GNSS 定位易受环境影响、手机内部传感器精度低等

1 东南大学 交通学院,南京,211189

问题,本文提出一种 RTK/DR 组合定位方法,在 RTK/DR 松组合的基础上,设计了地图匹配算法,充分发挥 OSM 数据在航向角修正和松组合开关中的作用,进一步提升智能手机在复杂环境的定位精度.

算法流程主要有:

- 1) 手机 RTK 定位;
- 2) 航位推算;
- 3) 航向角修正;
- 4) RTK/DR 松组合.

### 1.1 手机 RTK 定位

智能手机通过网络连接校内基站,实时接收并解码基站观测数据,与手机原始观测值依次星间差分、站间差分,组成双差模型,并使用抗差 Kalman 滤波对位置、速度、加速度、双差模糊度进行估计<sup>[11-12]</sup>. 手机实时动态 RTK 难以固定模糊度,模型中使用浮点解进行解算.双差观测方程如下:

$$\rho_{12}^{sr} = R_{12}^{sr} - [a_{12}^{sr} \quad b_{12}^{sr} \quad c_{12}^{sr}] \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \varepsilon_{12}^{sr}, \quad (1)$$

$$L_{12}^{sr} = R_{12}^{sr} - [a_{12}^{sr} \quad b_{12}^{sr} \quad c_{12}^{sr}] \begin{bmatrix} dx \\ dy \\ dz \end{bmatrix} + \varepsilon_{12}^{sr} + \lambda N_{12}^{sr}, \quad (2)$$

式中:1 代表流动站,2 代表基准站, $s$  为其他卫星, $r$  为参考卫星.在短基线下,双差模型大幅削弱了电离层延迟、对流层延迟的影响,消除了卫星钟差及测站接收机钟差.

手机采用的抗差方案<sup>[13]</sup> 如下:

$$\bar{R}_i = R_i / \alpha_i, \quad (3)$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 1, & |\tilde{v}_i| \leq k_0, \\ k_0 \left( \frac{k_1 - |\tilde{v}_i|}{k_1 - k_0} \right)^2, & k_0 < |\tilde{v}_i| \leq k_1, \\ 10^{-8}, & |\tilde{v}_i| > k_1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\tilde{v}_i = \frac{\text{abs}(v_i - \bar{v})}{\sigma_v}, \quad (5)$$

式中: $\bar{R}_i$  为等价方差, $R_i$  是最大残差  $v_i$  对应观测值的方差, $\alpha_i$  为方差放大因子, $\tilde{v}_i$  为标准化残差,其中  $\text{abs}$  为取绝对值, $k_0, k_1$  为阈值,经多次实验本文取  $k_0 = 1.2, k_1 = 3.0$ . 每个历元的解算均进行抗差迭代,当  $\alpha_i$  等于  $10^{-8}$  时,剔除对应观测值,迭代进行到无法剔除为止.

### 1.2 航位推算

航位推算是一种相对定位技术,基本原理为已知起算点姿态、速度、坐标,根据传感器采集到的信息去计算下一时刻载体的姿态、速度和位置,循环往复来完成一段时间的导航任务<sup>[14-15]</sup>.

航位推算包括起算点初始化、速度更新、航向角更新、位置更新四个过程.起算点初始化可利用的信息有限,只能通过 RTK 定位进行赋值,具体公式为

$$\begin{cases} B^{\text{DR}} = B^{\text{RTK}}, \\ v_n^{\text{DR}} = v_p^{\text{RTK}} \cdot \cos(d\phi) \cdot \cos(\phi_r^{\text{INS}}), \\ v_e^{\text{DR}} = v_p^{\text{RTK}} \cdot \cos(d\phi) \cdot \sin(\phi_r^{\text{INS}}), \\ v_u^{\text{DR}} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $B^{\text{DR}}, B^{\text{RTK}}$  分别代表航位推算与 RTK 的位置; $v_n^{\text{DR}}, v_e^{\text{DR}}, v_u^{\text{DR}}$  分别代表航位推算的北向、东向、天向速度; $v_p^{\text{RTK}}$  代表手机 RTK 的平面速度,通过前后历元坐标差分,再减去高程变化计算得到,下标  $p$  代表手机; $\phi_r^{\text{INS}}$  为经地图修正后的航向角,初始时刻使用手机运动后 RTK 前后差分得到的航向角,下标  $r$  表示角度经过地图修正; $d\phi$  为修正后航向角与 RTK 航向角的差值,目的是为了将 RTK 速度投影到航位推算的方向上.

速度更新方式与式(6)一致,其准确度与航向角的精度密切相关.

航向角更新为姿态更新的一部分,采用智能手机 100 Hz 采集的惯导传感器数据进行解算.惯导姿态更新算法参考严恭敏教授开源 PSINS 工具箱代码,获取到手机采集的加速度、角速度、重力加速度后,进行四元数更新.将四元数转换为姿态矩阵,最后计算出欧拉角,如下所示:

$$C_b^a = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi &= -\arctan(T_{12}/T_{22}), \\ \theta &= \arcsin(T_{32}), \\ \gamma &= -\arctan(T_{31}/T_{33}), \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中: $q_0$  至  $q_3$  为手机四元数; $\phi, \theta, \gamma$  分别为航向角、俯仰角和侧滚角.

位置更新基本公式为

$$\begin{cases} B_{t+1} = B_t + \frac{v_n}{R_m + H_t} dt, \\ L_{t+1} = L_t + \frac{v_e}{(R_n + H_t) \cos B_t} dt, \\ H_{t+1} = H_t + v_u dt, \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $v_n, v_e, v_u$  分别为北向、东向、天向的速度;  $dt$  为 RTK 定位时间间隔;  $R_m$  为子午圈主曲率半径;  $R_n$  为卯酉圈主曲率半径.

### 1.3 航向角修正

航向角修正策略就是通过地图匹配获取当前行驶路线, 使用路线的方向来纠正. 地图采用开源的 OSM 数据, 其质量经学者分析, 位置精度不高, 但几何精度较好, 具备修正航向角的能力.

地图匹配通常有点到点、点到线、线到线的传统方法<sup>[16]</sup>, 也有基于隐马尔可夫<sup>[17]</sup>的概率方法, 考虑到定位的实效性本文采用点到线的匹配方法. 基本思路为: 根据上个历元的融合定位结果, 筛选出周围 50 m 以内的道路线段; 根据此前航向角, 筛选掉相差超过  $20^\circ$  的线段, 再去除点投影之外的线段, 即可得到候选的路段; 最后根据点到线最短垂线距离找到符合的线段, 使用该线段的方向修正航向角. 由于 OSM 地图位置精度有偏移, 因此存在匹配到相邻车道的情况, 而本文只使用道路的方向信息, 所以平行的道路线段方向不影响对航向角的修正.

OSM 地图的道路在转弯时, 突变的角度与车辆平滑的角度变化相矛盾, 因此航向角修正更适合在直线路段进行. 本文实时记录惯导姿态更新后的航向角, 当航向角连续 2 s 变化量超过  $3^\circ$ , 即可认为车辆处于转弯状态, 从而停止航向角的修正, 修正的具体效果将在实验部分给出.

### 1.4 RTK/DR 松组合

RTK、DR 松组合采用基本 Kalman 滤波, 对手机的位置和速度进行估计, 其状态方程和量测方程为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_k = \Phi_{k/k-1} \mathbf{X}_{k-1} + \Gamma_{k-1} \mathbf{W}_{k-1}, \\ \mathbf{Z}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{X}_k + \mathbf{V}_k. \end{cases} \quad (10)$$

状态方程表达的是上一时刻的状态到当前状态的一个转变, 状态转移矩阵  $\Phi_{k/k-1}$  描述了状态的转换过程, 其构成为

$$\Phi_{k/k-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \frac{dt}{R_m + H_k} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \frac{dt}{(R_n + H_k) \cos B_k} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $dt$  为惯导数据采样时间间隔,  $B_k$  为纬度. 量测方程中  $\mathbf{Z}_k$  为 RTK 定位得到的三维坐标和速度.

状态更新和量测更新按照式(12)进行:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \hat{\mathbf{X}}_{k-1}, \\ \mathbf{P}_{k/k-1} = \Phi_{k/k-1} \mathbf{P}_{k-1} \Phi_{k/k-1}^T + \Gamma_{k-1} \mathbf{Q}_{k-1} \Gamma_{k-1}^T, \\ \mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T (\mathbf{H}_k \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}_k^T + \mathbf{R}_k)^{-1}, \\ \hat{\mathbf{X}}_k = \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k (\mathbf{Z}_k - \mathbf{H}_k \hat{\mathbf{X}}_{k/k-1}), \\ \mathbf{P}_k = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_k \mathbf{H}_k) \mathbf{P}_{k/k-1}, \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{R}_k$  为观测信息的方差矩阵, 对应位置和速度的噪声, 本文使用 RTK 抗差 Kalman 滤波后的协方差阵  $\mathbf{P}_k$  来对  $\mathbf{R}_k$  赋值;  $\mathbf{H}_k$  为松组合的系数矩阵.

在道路两边均是高楼的环境下, RTK 定位结果会出现跳动或者漂移, 给松组合引入较大的误差, 也给后续的航位推算带来错误的起算点. 针对这种情况, 本文增加了松组合开关, 结合 RTK 抗差 Kalman 滤波后的协方差阵  $\mathbf{P}_k$ 、车辆运动方向、RTK 定位航向角变化量综合判断是否进行松组合中的量测更新. 将  $\mathbf{P}_k$  的位置方差值从 WGS84 坐标转为东北天坐标系, 并计算平面的误差  $e_p$ , 作为判断定位质量的一项指标. 当  $e_p$  大于 2、车辆运动方向呈现直线、RTK 定位的航向角变化量大于  $10^\circ$ , 本文即认为 RTK 存在漂移或者跳动, 此时松组合仅进行状态更新, 而不进行量测更新.

## 2 实验及结果分析

### 2.1 实验方案

本次实验场地为东南大学九龙湖校区, 车辆按照图 1 的路线行驶, 起点和终点均为开阔的白色点, 共行驶 3 圈. 设备安装如图 2 所示: 木板的两端各固定一个测地型接收机, 用于计算手机的真实参考坐标; 采用的手机为华为 P30 与 P40, 通过支架固定在木板上. 实验过程中, 手机预先安装团队开发的定位软件, 实时接收校内基站观测数据, 并进行 RTK 定位, 同时存储手机的加速度、角速度、磁强度、重力加

速度、GNSS 原始观测值信息.RTK 定位频率 1 Hz,惯性传感器数据采样频率设置为 100 Hz,事后进行 RTK、航位推算的组合解算.



图 1 车辆行驶路线  
Fig. 1 Vehicle route



图 2 设备安装位置  
Fig. 2 Equipment placement

### 2.2 航向角修正结果分析

航向推算过程中,主要有两种航向角:惯性传感器姿态更新得到的航向角  $\phi^{INS}$ ;经地图修正后的航向角  $\phi_r^{INS}$ .本文以两台测地型接收机的定位点连线作为车辆的参考运动方向  $\phi^{Base}$ ,分别统计  $\phi^{INS}$ ,  $\phi_r^{INS}$  与  $\phi^{Base}$  差值的平均值,如表 1 所示.P30、P40 两台手机,共 6 组实验结果显示,航向角在经地图修正后,精度均得到大幅提升,将航向角误差降低到 5°左右.

图 3 为航向角修正前后的航位推算轨迹,对应着表 1 中的 P40-2,横坐标加上 118.8°为实际的经度,黑色为测地型接收机解算的基准轨迹,红色为仅进行初始对准的航位推算轨迹,蓝色为经航向角修正的航位推算轨迹.图 3 显示,纯航位推算的航向角误差逐渐积累,偏离黑色的基准轨迹,而航向角修正后,航位推算的轨迹与基准轨迹更加平行一致.结合表 1 和图 3,可以说明地图数据的引入能够有效控制航向角误差累积.

表 1 航向角误差统计  
Table 1 Error statistics of heading angle

实验编号	航向角误差/(°)		方向精度提升/%
	INS	INS 加地图修正	
P30-1	32.665 8	4.652 3	85.8
P30-2	16.485 7	4.158 7	74.8
P30-3	12.671 6	5.501 0	56.6
P40-1	12.733 8	3.239 8	74.6
P40-2	4.517 7	3.060 4	32.2
P40-3	16.966 4	5.256 7	69.0

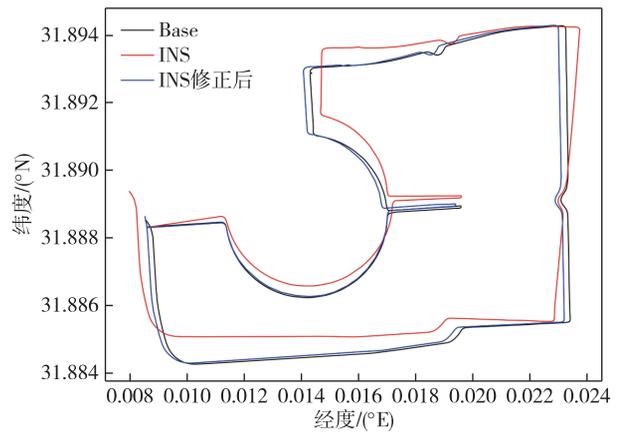


图 3 航位推算轨迹对比(横坐标加 118.800°为实际经度)  
Fig. 3 Comparison of dead reckoning trajectories

### 2.3 定位误差统计

方向修正后,航位推算在位置上仍与基准有偏差,需要与 RTK 组合进一步提升精度.图 4 给出了 RTK、航位推算组合后的定位轨迹对比,对应着 P40 手机的第 2 圈,横坐标加上 118.8°为实际的经度.黑色代表测地型接收机的基准坐标,红色代表手机 RTK 实时定位结果,蓝色代表 RTK、航位推算组合定位结果.可以看到,在轨迹图上方,红色的 RTK 轨迹由于两侧高楼影响,定位出现了漂移,此时算法检测到 RTK 的异常,仅进行松组合的状态更新,而不进行量测更新,从而得到与基准更符合的定位轨迹.

本文按照手机进行分组,统计了 P30、P40 手机 3 圈的定位结果,如图 5 所示.可以看到,部分时间段,RTK 存在着超过 5 m 定位误差,而同时时间段的 RTK、航位推算组合定位性能明显提升,有效抑制了大幅跳动的误差点.

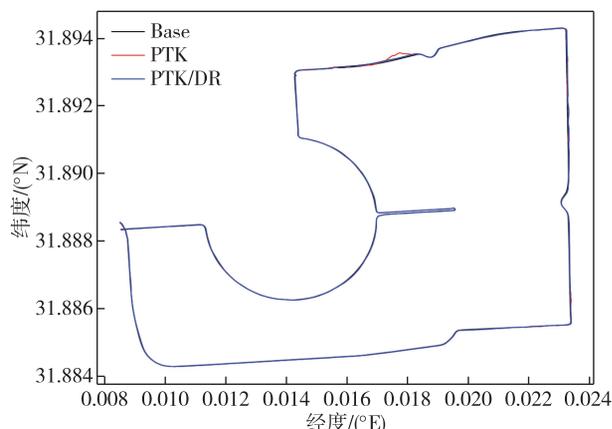


图 4 松组合定位轨迹(横坐标加 118.800°为实际经度)

Fig. 4 Loose combination positioning trajectory

表 2 统计了 2 种定位方式下的均方根误差,每台手机 3 组结果.数据显示:有 5 组实验 RTK、航位推算组合定位平面精度优于 RTK;P30 的第 2 组实验中 N 方向精度有所改善,E 方向精度不佳,平面精度 2 种定位方式相当;6 组实验中,组合定位精度最好达到 1.512 7 m,最差 2.052 7 m;相比于仅使用 RTK 定位,组合定位精度提升幅度最大的为 P40-2 实验,达到 19.4%.结合图 4、图 5 及表 2,可以得到结论:航位推算的加入能够在复杂环境下平滑轨迹、降低侧向漂移.

表 2 定位结果均方根误差统计

Table 2 Root mean square error statistics of positioning results

实验编号	RTK			RTK/DR		
	N	E	平面	N	E	平面
P30-1	0.976 5	0.976 5	1.734 9	0.921 3	1.408 4	1.682 9
P30-2	0.935 8	1.820 6	2.047 0	0.903 9	1.843 0	2.052 7
P30-3	1.033 1	1.788 5	2.065 4	0.955 1	1.753 9	1.997 0
P40-1	0.950 9	1.310 4	1.619 0	0.792 3	1.288 7	1.512 7
P40-2	1.571 4	1.953 0	2.506 6	0.971 2	1.772 6	2.021 2
P40-3	0.970 7	1.422 9	1.722 4	0.944 7	1.385 0	1.676 5

### 3 结束语

在智能手机车载导航场景下,针对手机 RTK 在复杂环境下易发生漂移或跳动、手机惯性导航航向角易发散等问题,本文提出一种智能手机 RTK/DR 组合定位方法.利用 OSM 地图数据,经地图匹配修正惯导姿态更新的航向角,结合 RTK 抗差 Kalman 解算中的协方差阵、车辆运动方向、RTK 定位航向角变化量设置了松组合的开关,最后采用标准 kalman 滤波估计松组合结果.

本文采用了 P30、P40 两台智能手机,对比了航向角修正前后的航位推算、组合定位与手机 RTK 定位的精度.从实验结果来看,OSM 数据能够有效削弱航向角的发散,大幅提升方向精度,使纯航位推算能够获得与测地型接收机平行一致的轨迹.组合定位结果在大部分实验中获得了优于 RTK 的定位结果.轨迹图表明,算法能够有效识别 RTK 误差较大的路段,使得航位推算能够按照更准确的方向进行状态

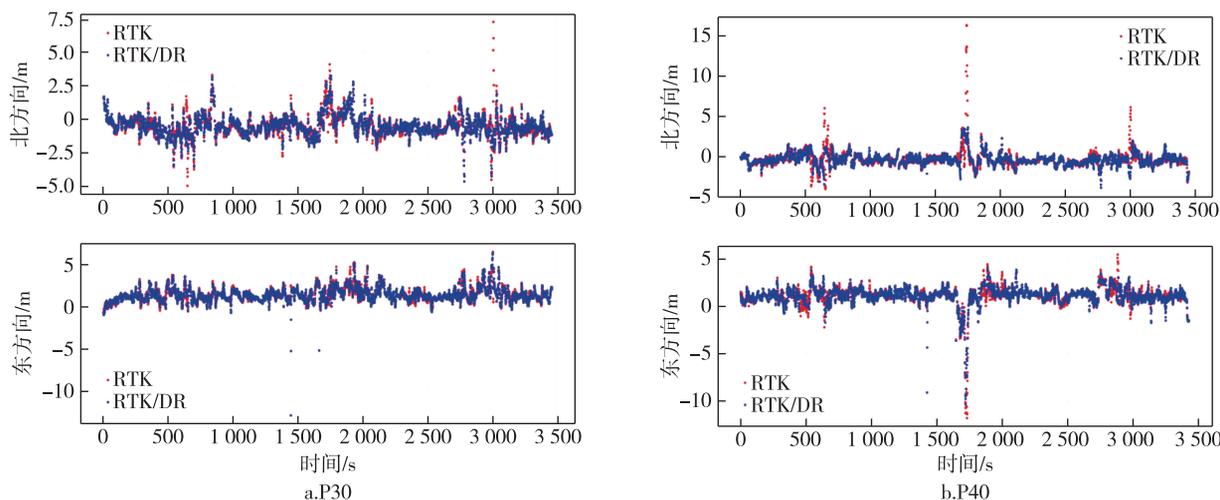


图 5 手机定位误差

Fig. 5 Mobile phone positioning errors

更新.6 组实验结果中,组合定位相比于仅使用 RTK 定位,精度最高提升达 19.4%.

本文的航位推算过程中,虽然在方向上彻底摆脱了对 RTK 的依赖,但在速度上使用的是 RTK 的速度投影,对 RTK 大幅跳变的漏判会导致航位推算的结果偏离实际轨迹.在速度上摆脱 RTK,以及更准确的 RTK 跳变判断将挖掘出航位推算更大的潜力.

## 参考文献

### References

- [ 1 ] 刘启超.Android 车载惯性定位方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017  
LIU Qichao. Research on vehicle inertial positioning method based on Android [ D ]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017
- [ 2 ] 段睿.GNSS/SINS 实时组合导航系统设计与关键技术研究[D].武汉:武汉大学,2019  
DUAN Rui. Research on the key technology and platform design of real-time GNSS/SINS integrated navigation system [ D ]. Wuhan: Wuhan University, 2019
- [ 3 ] 王雅仪.车载激光雷达高精度自主定位算法研究[D].武汉:武汉大学,2021  
WANG Yayi. Research on LiDAR high-precision positioning algorithm for vehicles [ D ]. Wuhan: Wuhan University, 2021
- [ 4 ] 姚卓,章红平.里程计辅助车载 GNSS/INS 组合导航性能分析[J].大地测量与地球动力学,2018,38(2):206-210  
YAO Zhuo, ZHANG Hongping. Performance analysis on vehicle GNSS/INS integrated navigation system aided by odometer [ J ]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2018, 38(2): 206-210
- [ 5 ] Tomaštitk J, Varga M. Practical applicability of processing static, short-observation-time raw GNSS measurements provided by a smartphone under tree vegetation [ J ]. Measurement, 2021, 178: 109397
- [ 6 ] 曾庆化,曾世杰,刘建业,等.重力辅助和模拟零速修正的手机航向修正方法[J].中国惯性技术学报,2018,26(3):289-294  
ZENG Qinghua, ZENG Shijie, LIU Jianye, et al. Heading correction method for smartphone based on gravity assisting and simulated zero-velocity updating [ J ]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(3): 289-294
- [ 7 ] 彭益堂.GNSS/INS/相机车道线多传感器融合定位算法研究[D].武汉:武汉大学,2020  
PENG Yitang. Research on multi-sensor fusion positioning algorithm of GNSS/INS/camera lane line [ D ]. Wuhan: Wuhan University, 2020
- [ 8 ] 彭雅慧,潘树国,高旺,等.基于直线检测和数字地图匹配的车辆航向角估计[J].电子测量与仪器学报,2022,36(3):194-201  
PENG Yahui, PAN Shuguo, GAO Wang, et al. Heading angle estimation for vehicles based online detection and digital map matching [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(3): 194-201
- [ 9 ] 汪梦添.基于地图信息约束的室内定位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2020  
WANG Mengtian. Research on indoor location technology based on map information constraint [ D ]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020
- [ 10 ] 孔琪.面向众源街道的 OSM 路网数据质量分析[D].青岛:山东科技大学,2020  
KONG Qi. Quality analysis on crowd sourcing geographic data with OSM road network data [ D ]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020
- [ 11 ] 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 smartphone GNSS high-precision real-time dynamic positioning [ J ]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(1): 18-26
- [ 12 ] 郝明.北斗导航载波相位差分定位技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017  
HAO Ming. Research on carrier phase difference positioning technique of BeiDou navigation satellite system [ D ]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017
- [ 13 ] 张小红,郭斐,李盼,等.GNSS 精密单点定位中的实时质量控制[J].武汉大学学报·信息科学版,2012,37(8):940-944,1013  
ZHANG Xiaohong, GUO Fei, LI Pan, et al. Real-time quality control procedure for GNSS precise point positioning [ J ]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(8): 940-944, 1013
- [ 14 ] 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
- [ 15 ] 徐国梁,李圳,陶钧,等.复杂环境下智能手机 RTK+PDR 融合定位[J].测绘通报,2021(12):44-49,98  
XU Guoliang, LI Zhen, TAO Jun, et al. RTK+PDR fusion positioning for smart phone in complex environment [ J ]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2021(12): 44-49, 98
- [ 16 ] 李娟.基于 OpenStreetMap 的地图匹配算法研究与实现[D].北京:北京工业大学,2017  
LI Juan. Research on OpenStreetMap based map matching algorithm and its implementation [ D ]. Beijing: Beijing University of Technology, 2017
- [ 17 ] 赵凡.基于双向隐马尔科夫模型的地图匹配算法的研究[D].天津:天津大学,2019  
ZHAO Fan. Research on map matching algorithm based on bidirectional hidden Markov model [ D ]. Tianjin: Tianjin University, 2019

## Integrated mobile phone RTK/DR vehicle positioning in complex environment

WANG Fuyou<sup>1</sup> GAO Chengfa<sup>1</sup> GAN Lu<sup>1</sup> ZHANG Ruicheng<sup>1</sup> WANG Jianchao<sup>1</sup>

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

**Abstract** Mobile phone RTK is vulnerable to interferences from complex environment, and the heading angle of inertial navigation data is easily divergent in scenario of mobile phone vehicle positioning. To address these problems, this paper proposes an RTK/DR loose combination positioning method combined with OSM map data. In the process of dead reckoning, based on the OSM data, combined with the information of combined positioning results and vehicle motion state, a geometric matching method from point to line was designed, and the matched road direction was used to correct heading angle. In the loose combination stage, the standard Kalman filter was used to estimate the position and velocity. In order to reduce the influence of large drift or jump of RTK on the results of loose combination, a loose combination switch was set, which can comprehensively judge whether to update the measurement by combining the covariance matrix, the vehicle's moving direction and the change of RTK positioning heading angle in RTK robust Kalman solution. Then six groups of experiment were carried out by using P30 and P40 smart phones. The results show that the introduction of OSM data can effectively solve the accumulation of heading angle error, which makes dead reckoning trajectory more consistent with the benchmark. Compared with mobile RTK, the proposed RTK/DR loose combination with switch improves positioning performance, and effectively suppresses error points of large jumps.

**Key words** smart phone; RTK; dead reckoning; map matching; vehicle positioning