引文格式:胡一帆,李增科,孙久运,等.顾及局部最优的手机端GNSS阴影匹配定位算法[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(5):856-865.DOI:10.13203/j.whugis20220744

Citation:HU Yifan,LI Zengke,SUN Jiuyun,et al.Smartphone GNSS Shadow Matching Algorithm Considering Local Optimal [J].Geomatics and Information Science of Wuhan University,2025,50(5):856-865.DOI:10.13203/j.whugis20220744

顾及局部最优的手机端GNSS阴影匹配定位算法

胡一帆[1] 李增科[1] 孙久运[1] 葛于祥[1] 邵克凡[1] 王一帆[2]

1 中国矿业大学环境与测绘学院,江苏 徐州,221116

2 云南电网有限责任公司电力科学研究院电力遥感技术联合实验室,云南 昆明,650214

摘 要:受建筑物反射的卫星信号以及多路径效应的影响,城市复杂环境下全球导航卫星系统伪距单点定位误差通常高达数十米。阴影匹配算法利用3D城市模型进行卫星可见性预测与位置匹配,可降低伪距单点定位误差,但传统的阴影匹配算法未充分考虑实际观测环境与理想观测环境的不同,存在固定阈值打分、卫星利用率较低、选取高分候选位置不合理等问题。提出一种顾及局部最优的阴影匹配定位方法,依据固定区间信噪比确定局部候选区域,采用连续信噪比打分公式对候选位置点评分,归一化选取高分候选位置以及加权平均处理求得最终定位结果。与传统阴影匹配算法不同,连续信噪比打分和固定区间信噪比打分的结果具有不一致性,顾及局部最优的阴影匹配算法通过划分候选区域将二者相结合,这样就能在全局区域内不违背全局最优的同时,在局部范围内也满足连续信噪比打分结果最优,以获得既是全局最优又是局部最优的定位结果。在城市复杂环境下的静态实验中,顾及局部最优的阴影匹配算法相较于伪距单点定位与传统的阴影匹配算法,在定位精度上分别提升了75.68%和60.82%,绝对定位精度达到了5 m左右;动态实验中顾及局部最优的阴影匹配算法跨街方向的定位精度达到了1.36 m,显著提高了该环境下的手机端定位精度。

关键词:城市环境;GNSS;手机端;阴影匹配;局部最优

中图分类号:P228 **文献标识码**:A **收稿日期**:2023-03-14

DOI:10.13203/j.whugis20220744 **文章编号**:1671-8860(2025)05-0856-10

Smartphone GNSS Shadow Matching Algorithm Considering Local Optimal

HU Yifan[1] *LI Zengke*[1] *SUN Jiuyun*[1] *GE Yuxiang*[1] *SHAO Kefan*[1] *WANG Yifan*[2]

1 School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China

2 Joint Laboratory of Electric Power Remote Sensing Technology, Power Test and Research Institute, Yunnan Municipal, Electric Power Company, Kunming 650214, China

Abstract: **Objectives**: Under the influence of satellite signals reflected by buildings and multipath effect, global navigation satellite system (GNSS) pseudo-distance single point positioning error can be up to tens of meters in complex urban area, in order to improve GNSS positioning accuracy in urban area, a shadow matching algorithm is proposed. Shadow matching algorithm uses 3D city model for satellite visibility prediction and location matching, which can reduce the pseudo-distance single point positioning error and improve the positioning accuracy of the smartphone. However, the basic algorithm does not fully consider the influence of different observation environments, and there are still some problems such as fixed threshold scoring, low satellite utilization rate, and unreasonable selection of high-score candidate locations, and there is still a large space for improvement of its positioning accuracy. **Methods**: We propose a shadow matching localization method considering local optimality. First, the unimproved shadow matching algorithm is used to determine the local candidate regions in the global candidate regions, then the continuous signal-to-noise raito scoring formula is used to score the local candidate regions. Finally, the scores of the local candidate locations are normalized, and the high score candidate locations are selected for weighted average processing to obtain the global and local

基金项目:国家自然科学基金(42274020);江苏省科技计划项目(BE2023692)。

第一作者:胡一帆,硕士,主要研究方向为GNSS阴影匹配算法。ts21160013a31@cumt.edu.cn

通信作者:李增科,博士,教授。zengkeli@yeah.net

optimal positioning results. **Results**: Experimental results show that in the complex urban area, compared with the pseudo-distance single point positioning and the basic shadow matching algorithm, the localization accuracy of the locally optimal shadow matching algorithm in the static experiment is improved by about 75% and 50%, respectively, and the absolute positioning accuracy reaches about 5 m. In the dynamic experiment, the cross-street positioning accuracy of the shadow matching algorithm considering the local optimal reaches 1.36 m. **Conclusions**: The shadow matching algorithm considering the local optimal can significantly improve the GNSS positioning accuracy of mobile phones in complex urban environments, providing a reference for vehicle and pedestrian navigation services.

Key words: urban area; GNSS; smartphone; shadow matching; local optimal

随着现代社会的发展,基于位置的服务(location based services,LBS)广泛应用于如车辆行人导航、旅游、紧急呼救、物流运输等众多行业,LBS的现实需求促进了导航定位相关技术的发展,各种复杂环境也对定位精度提出了更高的要求[1-2]。空旷区域下全球导航卫星系统(global navigation satellite system,GNSS)的伪距单点定位能够达到米级定位精度,可满足一般的定位需求[3-4]。而城市环境下,高层建筑外表面会使GNSS卫星信号在传播路径中发生反射、折射和衍射,因此最终进入手机的卫星信号不仅有直射信号(line of sight,LOS),还有非直射信号(non line of sight,NLOS)和多路径信号,由此引起的伪距单点定位误差通常高达数十米甚至上百米[5-7]。测地型接收机的各种硬件设置如扼流圈和抑径板等,可较好地削弱多路径效应和反射信号,而低成本接收机如手机等设备,由于体积的限制,无法从硬件上对输入信号的质量加以改善,但在城市环境下,手机端定位服务往往占据着主要的应用场景,用户在这种情况下也同样有着较高精度的定位需求[8-9]。

在手机端GNSS定位中,通常采用伪距单点定位来获得定位坐标,而城市复杂环境下,NLOS和多路径延迟会严重干扰伪距单点定位结果[10]。在过去的城市复杂环境下定位算法研究中,Yoon等[11]证明了手机端使用差分GNSS(differential GNSS,DGNSS)在开阔环境下可以提高定位精度,但由于城市环境下GNSS卫星信号的复杂性,该方法对手机端定位精度的提升有限;Moreau等[12]提出增加额外设备如鱼眼相机,通过图像识别来辨别NLOS卫星;Wen等[13]使用三维激光雷达来测量设备到周围建筑物的距离,以修正NLOS信号的延迟,达到改正伪距延迟的目的;Miura等[14]研究利用3D城市模型模拟光线反射路径,根据信号传播路径修正NLOS信号延迟;Isaacs等[15]采用贝叶斯估计结合3D城市模型应用于动态定位;Groves[16]较早提出了GNSS阴影匹配的方法,并提出通过地形高度数据库辅助确定阴影匹配算法中的候选位置高程[17],以及使用*K*-NN在阴影匹配算法中对候选位置求解,全面评价了手机端GNSS阴影匹配算法的定位精度[18-20];Hsu等[21-25]利用3D城市模型通过光线追踪来模拟LOS和NLOS信号的伪距测量值,对比模拟测量值与实际测量值的误差来筛选候选位置,并利用深度学习的方式来区分NLOS和LOS卫星,以提高卫星在阴影匹配算法中的分类正确性[26-27];Zhang等[28]使用多个GNSS接收机进行阴影匹配定位,通过多个接收机同时段观测来消除NLOS信号。此外,也有学者对阴影匹配算法做出了不同的改进,胡辉等[29]研究了阴影匹配与粒子滤波的自适应加权算法;罗欢等[30]采用低通滤波减小阴影匹配中信噪比波动过大的问题,并通过聚类分析的方式求出确定用户最终坐标;王式太等[31]提出了动态阈值的阴影匹配算法,提高了对卫星可见性判断正确率。这些基于阴影匹配的各种改进算法都在一定程度上提高了定位精度。

伪距单点定位以最小二乘为核心,通过距离交会的形式来确定接收机的位置,由于遮挡环境下可观测卫星数量的减少以及伪距测量误差的增加,其定位误差高达数十米;传统的阴影匹配算法通过卫星可见性预测对候选位置上每颗卫星得分进行累加,在候选位置点集中选出得分前5%的高分候选位置,对高分候选位置坐标加权平均得出最终的定位结果,在一定程度上提高了该环境下的定位精度[32-33]。然而传统的阴影匹配算法均采用25 dB-Hz、35 dB-Hz为固定阈值来对卫星的可见性进行分类,苛刻的分类条件提高了卫星分类的准确性,但同时也使信噪比位于25~35 dB-Hz之间的卫星未能得到充分利用。本文提出一种顾及局部最优的阴影匹配定位方法,首先按照固定区间信噪比打分结果在全局候选区域内确定局部候选区域,然后对局部候选区域内的候选位置点集使用连续的信噪比打分公式进行打分,归一化局部候选位置点的得分,

选取高分候选位置进行加权平均处理,得到最终的定位结果。

相较于传统的阴影匹配算法,顾及局部最优的阴影匹配算法引入了连续信噪比打分、局部候选区域划分、全局最优与局部最优相结合等方法,充分挖掘卫星和3D城市模型的数据信息,将不同候选位置点上可见卫星与不可见卫星的打分差异最大化,有效提高了复杂环境下阴影匹配算法的定位精度。

1 阴影匹配基本原理

1.1 可见性预测

进行卫星可见性预测前,首先要确定候选位置点集,阴影匹配算法将伪距单点定位结果或上一历元的定位结果作为当前历元候选位置点集的中心点,将中心点的大地坐标转化为高斯平面坐标,在平面方向上以城市复杂环境下伪距单点定位的极限误差50 m为半径确定全局候选区域边界,在该范围内以1 m为间隔设点,当候选位置点集所在的平面高差较小时,每个候选位置点的高程值为统一值,由道路多边形边界点的平均值确定。当所在的平面高差较大时,每个候选位置点的高程值为TIN模型内差求出,所有在该范围内且在建筑物范围外的点共同构成全局候选位置点集,如图1所示。

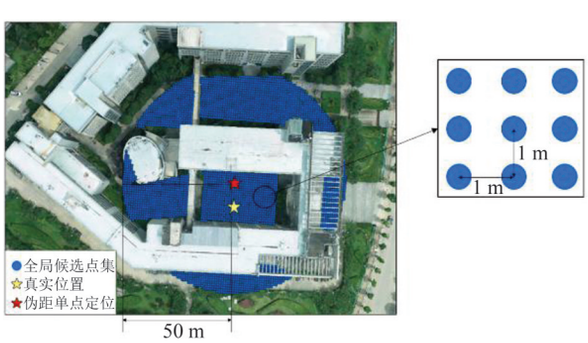


图1 全局候选位置点集

Fig. 1 Point Set of Global Candidate Positions

卫星可见性预测:构成了候选位置点集后,在SuperMap软件中通过3D工具对建筑物顶面的所有边线进行提取,每条边由起点和终点确定,用n行6列的二维数组存储所有建筑物边线的起点与终点,以候选位置为坐标原点分别计算边线起点和终点的坐标方位角,在这两个角度范围内以1°为间隔递增,计算每个间隔点的平面坐标,间隔点的高程则由起点和终点的高程内插求出,计算边线上每一个间隔点在站心坐标系下的站心坐标,通过站心坐标计算高度角,若当前方向高度角大于天空阴影矩阵中记录的高度角时,即更新天空阴影矩阵,遍历所有建筑物顶面边线后,天空阴影矩阵中各方向上保留的高度角在极坐标系下连线形成的折线图即为天空阴影图。根据广播星历计算每颗卫星的高度角与方位角,根据卫星在天空阴影图中的位置来预测每颗卫星的可见性,当卫星位于阴影区域内时,则预测该卫星被遮挡,这颗卫星就预测为NLOS卫星,反之则为LOS卫星。天空阴影图如图2所示,对每一个候选位置都生成与之对应的天空阴影图。

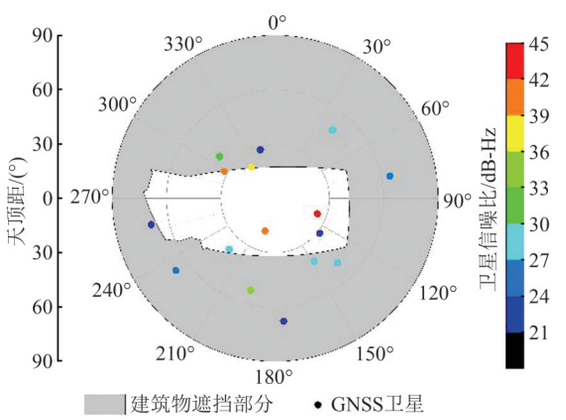


图2 天空阴影图

Fig. 2 Sky Shadow Map

1.2 固定区间信噪比评分

当预测某颗卫星为LOS卫星时,若实测卫星的信噪比大于等于35 dB,则该卫星的得分为1分;当预测卫星为NLOS卫星时,且实测卫星信噪比小于25 dB,则该卫星的得分为1分;对于实测信噪比位于[25,35) dB之间的卫星,无论预测为LOS卫星还是NLOS卫星,其得分都为0.5分,其他情况都为0分;对于未接收到信号的卫星,则根据其被遮挡的情况得分为0分或1分。具体评分机制如表1所示[30]。

表1 阴影匹配打分表

Table 1 Score Sheet of Shadow Matching

预测卫星	信噪比/dB			
	≥35	<25	[25,35)	未接收到信号
LOS	1	0	0.5	0
NLOS	0	1	0.5	1

1.3 阴影匹配算法流程

对每个候选位置点上的卫星重复上述操作,每个候选点上对应的所有卫星得分总和为该候选点得分。对候选位置点集中得分前5%的候选位置点进行加权平均处理,所得加权平均值即为最终定位结果。计算如下:

$$G=\sum_{i=1}^{n}S_i \tag{1}$$

$$P=(\sum_{k=1}^{m}P_kG_k)/(\sum_{k=1}^{m}G_k) \tag{2}$$

式中,S_i为该候选位置点上的第i颗卫星的得分;n为总卫星数;G为该候选位置点得分;P_k为第k个高分候选位置点的坐标;G_k为第k个高分候选位置点的得分;m为得分前5%候选位置点的个数;P为最终的定位结果。

阴影匹配算法以GNSS伪距单点定位坐标为中心构建候选位置点集,结合3D城市模型与广播星历在每一个候选位置点上进行卫星可见性预测,根据实测卫星信号信噪比与预测卫星的可见情况,对每一个候选位置进行匹配打分,取得分前5%的候选位置坐标进行加权平均,所得坐标结果即为阴影匹配定位结果,具体算法流程见图3。

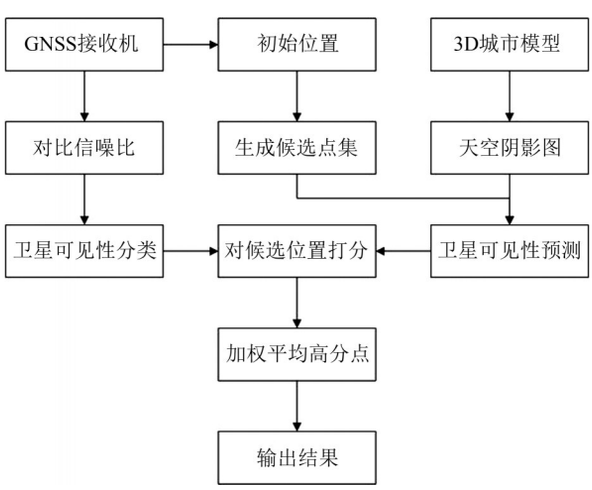


图3　传统的阴影匹配算法流程图

Fig. 3　Flowchart of Basic Shadow Matching Algorithm

上述传统的阴影匹配算法存在的一些问题如下:(1)卫星的分类过于严格,信噪比位于25~35 dB之间的卫星未能充分利用;(2)没有扣分机制,在错误的位置上会将NLOS卫星预测为LOS卫星,信噪比小于25 dB的LOS卫星本身就是对该候选位置的否定,应给予扣分;同样,在错误的位置上也会将LOS卫星预测为NLOS卫星,信噪比高于35 dB的NLOS卫星同理也应给予扣分;(3)按固定比例选取高分候选位置,存在漏选得分较高的候选位置,或多选得分较低的候选位置等情况。

2　局部最优阴影匹配

2.1　局部候选区域确定

与传统的阴影匹配不同,顾及局部最优的阴影匹配需要提取3D城市模型的道路信息,在SuperMap中使用3D对象的多边形工具提取道路区域多边形的边界点,并导出对应的KML文件,在定位程序中设计相应的读取函数和存储结构体来读取KML文件与存储道路多边形数据。道路信息不仅能筛除位于建筑物内部的候选位置,还可按候选位置周围建筑物环境的相似性,根据该区域候选位置上天空阴影图的相似程度,将整个模型范围内的道路候选区域划分成不同颜色的局部候选区域,区域划分如图4所示。结合道路区域分块,将传统的阴影匹配定位结果所位于的道路分块区域确定为该历元的局部候选区域,见图5。



图4　局部候选区域分块图

Fig. 4　Block Map of Local Candidate Areas

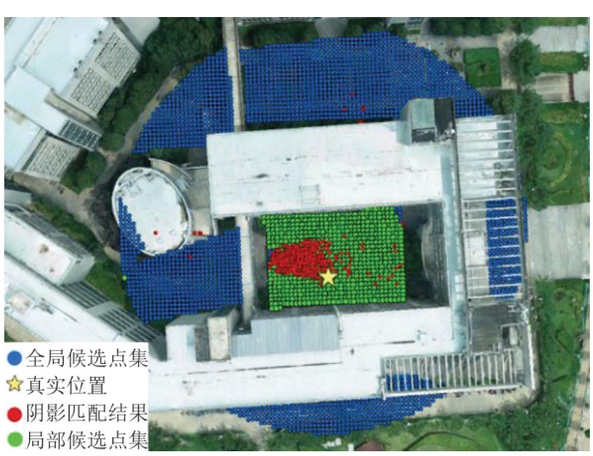


图5　确定局部候选区域

Fig. 5　Confirm Local Candidate Areas

2.2　连续信噪比评分

确定局部候选区域后,在局部候选区域内生成局部候选位置点集,传统的阴影匹配算法损失了部分卫星信息,需对卫星打分公式进行改进。分别在遮挡环境和开阔环境下用手机进行实测实验,并对信噪比数值区间出现的概率进行高斯拟合,NLOS和LOS经高斯拟合后R^2分别为0.98和0.81,见图6。

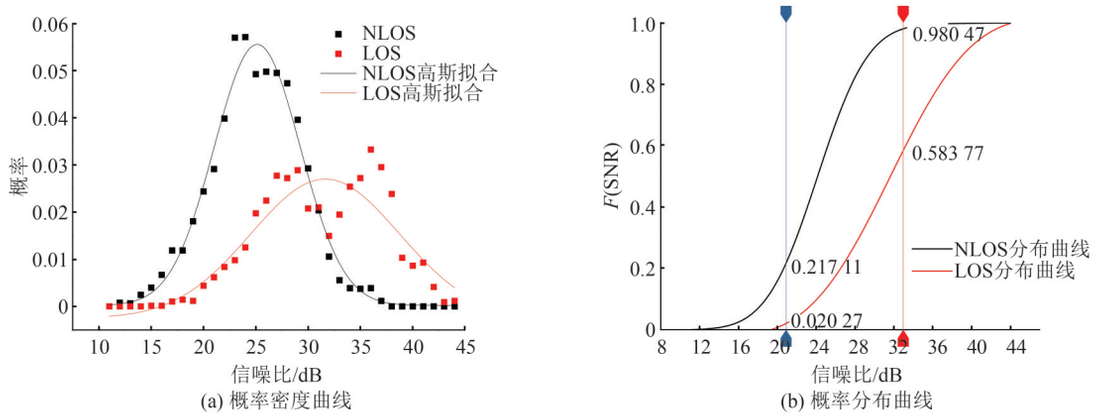


图6 LOS/NLOS概率密度曲线和概率分布曲线

Fig. 6 LOS/NLOS Probability Density Curve and Probability Distribution Curve

分析图6(b)可知,若按传统的阴影匹配算法评分原则,则会损失57%的LOS卫星和42%的NLOS卫星,实测LOS卫星与NLOS卫星的数量比例为0.72:1,即有大约1/2的卫星在打分中没有得到利用,显然不利于对众多候选位置做出差异化评分。在对候选位置上的卫星打分过程中,有两类错误需要严格区分,一是误将信噪比较高的NLOS卫星识别为LOS卫星,二是将信噪比较低的LOS卫星识别为NLOS卫星,这两类错误会使得错误的位置上得分偏高,因此结合图6(b)中概率分布曲线,取置信水平为0.98,对NLOS曲线的右侧单边检验,若预测为NLOS卫星的情况下,误判为LOS的概率为0.02,其拒绝域为[32.93,50] dB;同理,对LOS概率分布曲线的左侧单边检验,其拒绝域为[0,20.90) dB-Hz,对于信噪比位于[20.90,32.93) dB之间的卫星,统一取其得分中间值26.5 dB,按区间中心对称打分,以此保证信噪比分段打分的连续性。实验证明,若按该打分机制打分,则所有的卫星都能得到利用,虽然连续信噪比打分放大了噪声的影响,但更重要的是放大了局部候选区域中每个候选位置点得分的区分度,确保得分高的点更靠近真实位置,局部最优阴影匹配打分原则见表2。

表2 顾及局部最优的阴影匹配打分表

Table 2 Shadow Matching Score Considering Locally Optimal

预测结果	信噪比/dB		
	[0,20.90)	[20.90,32.93)	[32.93,50]
预测为LOS	−100	17×(信噪比−26.5)	+100
预测为NLOS	+100	17×(26.5−信噪比)	−100

2.3 归一化与加权平均

在局部候选区域内对所有候选位置点进行局部最优阴影匹配打分,按得分高低对所有局部候选位置点进行排序,G_i为第i个局部候选位置点的得分,取得分较高的前20个点的得分平均值为G_H,得分最低的后20个点平均值为G_L,将G_i-G_L后除以G_H-G_L的差作为该候选点的归一化得分G_i'。计算公式如下:

$$G_H=(\sum_{i=1}^{20}G_i)/20,\ G_L=(\sum_{i=n-20}^{n}G_i)/20 \tag{3}$$

$$G_i'=(G_i-G_L)/(G_H-G_L) \tag{4}$$

$$P=(\sum_{k=1}^{m}P_kG_k')/(\sum_{k=1}^{m}G_k') \tag{5}$$

式中,m为归一化后得分大于0.98的高分候选位置点个数;P_k和G_k'分别为第k个高分候选位置坐标与得分;P为局部最优阴影匹配的结果,这样就解决了传统的阴影匹配算法中高分点的漏选和超选等情况。

2.4 改进的算法流程

相较于传统的阴影匹配,顾及局部最优阴影匹配算法增加了道路区域分块、局部候选区域确定、顾及局部最优的阴影匹配打分、归一化得分后求解坐标结果等步骤,该算法具体流程如图7所示。

3 实验结果分析

实验场所为某地学院楼,以其中一处为例进行说明:该处为典型的城市复杂场景,如图8所示,其建筑物楼顶距地面高差约30 m,建筑物所形成的峡谷区域长约40 m,宽约20 m,数据采集点到建筑物的最近距离为3 m,高度角在0°~85°的卫星都有可能被遮挡。实验所采用的3D城市模型由倾斜摄影测量建立,该模型的精度为厘米级,符合实验对参考值的精度需求,故实验中真实点的参考坐标直接在3D城市模型中读取。使用OnePlus 7手机分别在3个点和一条线路上采

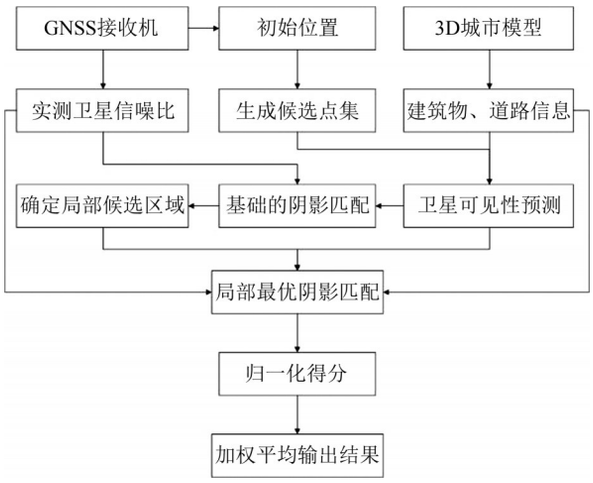


图 7　局部最优阴影匹配算法

Fig. 7　Local Optimal Shadow Matching Algorithm

集数据,使用顾及局部最优的阴影匹配、阴影匹配和伪距单点定位对观测数据进行解算。

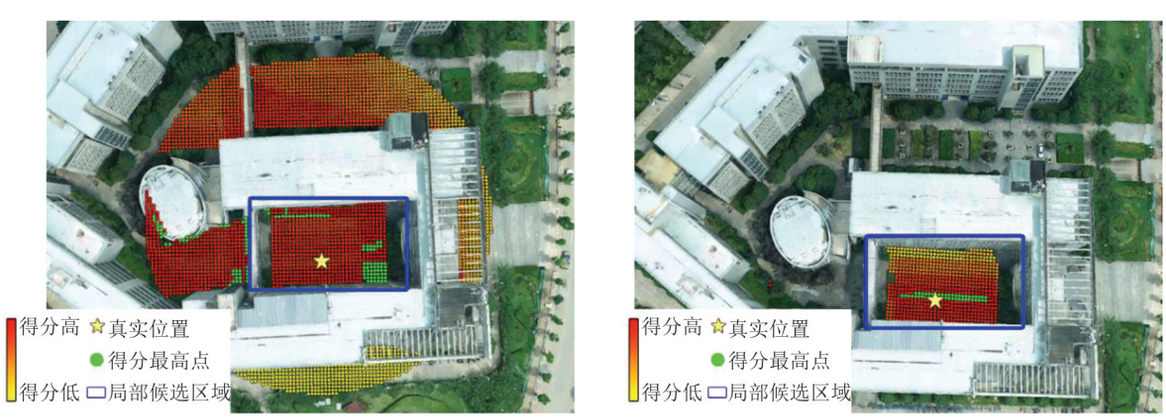
3.1　局部最优分析

取同一时刻的观测数据,分别使用传统的阴影匹配算法和顾及局部最优的阴影匹配算法进行评分,传统的阴影匹配算法可以在全局范围内将高分点集中在真实点附近,尽管其聚集区域的中心在沿街方向和跨街方向都存在一定的偏差,但是依然可以将局部候选区域确定为图9(a)中的蓝色方框内。对局部候选点集进行顾及局部最优的阴影匹配算法打分,在蓝色方框表示的局部候选区域内,得分最高点无论是沿街方向还是跨街方向的分布都优于传统的阴影匹配结果,见图9(b)。



图 8　实验环境

Fig. 8　Experimental Environment



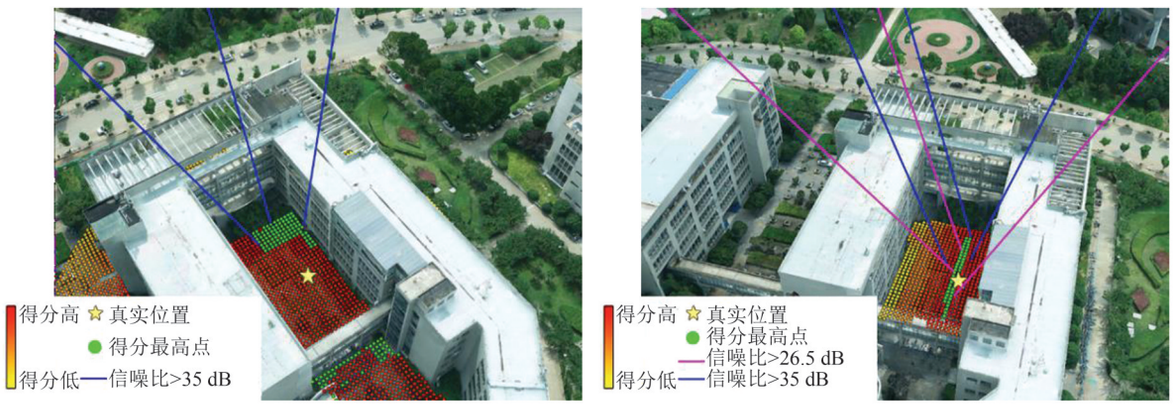
(a) 传统的阴影匹配打分结果　　(b) 顾及局部最优的阴影匹配打分结果

图 9　两种算法打分结果对比

Fig. 9　Scoring Results Comparison of Two Algorithms

顾及局部最优的阴影匹配算法放大了局部候选区域内候选位置点的得分差异。若按传统的阴影匹配算法打分,则可用于差异化打分的卫星数量较少,因此传统的阴影匹配算法所确定的高分点分布较差,具体表现为高分点在跨街方向上分布较宽,且沿街方向上偏离真实位置,如图10(a)所示。而对于顾及局部最优的阴影匹配算法,信噪比小于35 dB但大于26.5 dB的次级LOS卫星和信噪比小于26.5 dB但大于20 dB的次级NLOS卫星都加入了打分,放大了不同候选位置得分的差异,使得顾及局部最优的阴影匹配算法打分结果在各个方向上分布皆优于传统的阴影匹配算法,最终确定的高分点分布见图10(b)。

顾及局部最优的阴影匹配算法采用归一化的方式选择高分点,而传统的阴影匹配算法中,则按候选位置总数,取前5%的高分点作加权平均值为最终的定位结果。顾及局部最优的阴影匹配算法对得分做归一化处理,选择归一化后得分大于0.98的高分点做加权平均处理,而不是从整体比例上进行数量限制,如图10(a)中一共有3 689个候选位置,若取得分前5%的高分点,则需取184个高分点加入计算,显然第一梯队的点远远不足184个,因此若按传统的阴影匹配算法的固定比例选取候选位置点,会将不必要的次级高分候选位置点加入最终的加权计算,而归一化处理后可以较好地避免漏选或多选高分点。



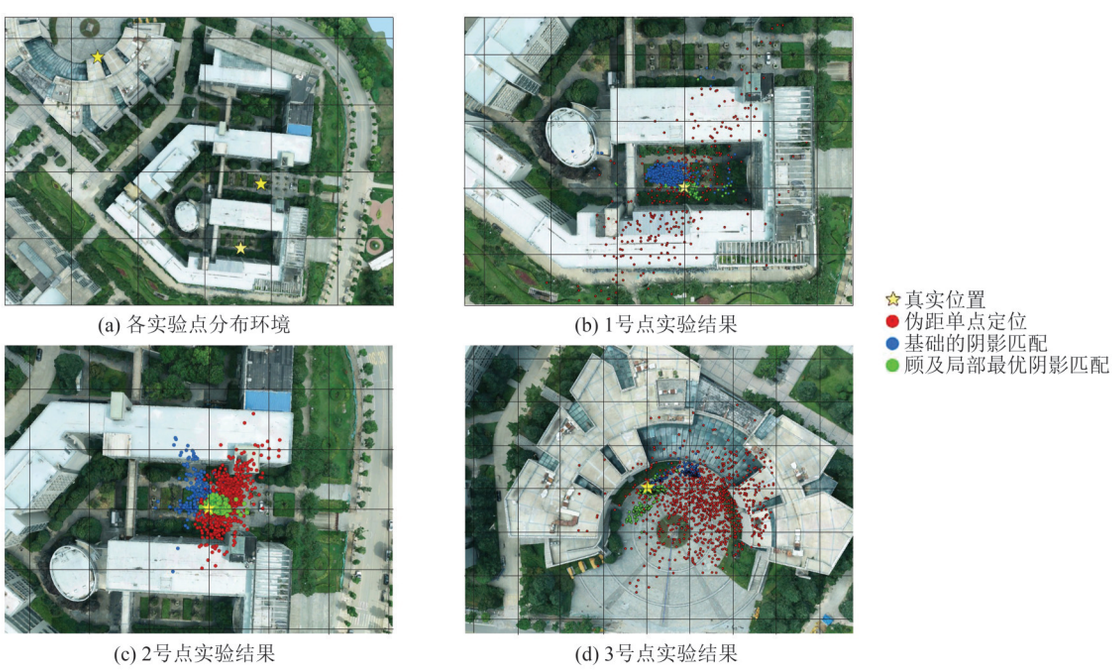
(a) 传统的阴影匹配 (b) 顾及局部最优的阴影匹配

图10 两种打分算法示意图

Fig. 10 Diagram of Two Scoring Algorithms

3.2 静态实验结果

分别选取3个不同复杂场景进行手机端数据采集,1号点四周都被高层建筑阻挡,遮挡最为严重;2号点3个侧面被建筑物遮挡,仅一侧开阔,遮挡情况次之;3号点被弧形建筑物围绕,开阔性最优,各点分布如图11(a)所示。实验使用的OnePlus 7手机具有全球定位系统、北斗卫星导航系统、Galileo、GLONASS四系统定位功能,于各个实验位置上用手机接收一段时间的GNSS信号,分别使用伪距单点定位、传统的阴影匹配算法和顾及局部最优的阴影匹配算法处理原始GNSS数据,图中真实点坐标参考值直接在3D模型中提取,定位结果如图11(b)~11(d)所示,可见伪距单点定位结果整体分布较散且距真实点位置最远,伪距单点定位受NLOS卫星信号影响最为严重;而阴影匹配定位结果相较于伪距单点定位在精度上有一定的提高;顾及局部最优的阴影匹配定位结果距真实点最近且分布最优。



(a) 各实验点分布环境 (b) 1号点实验结果

(c) 2号点实验结果 (d) 3号点实验结果

图11 静态实验结果

Fig. 11 Static Experimental Results

实验均方根误差(root mean squares error, RMSE)对比如表3所示,1、2号点所处的街道与纬度平行,可将1、2号点东(E)方向看作沿街方向,将1、2号点的北(N)方向看作跨街方向。在1号点处,对比伪距单点定位和传统阴影匹配算法,顾及局部最优的阴影匹配算法在沿街方向的精度分别提升约76%和55%,在跨街方向精度分别提升约89%和62%,定位精度提高效果最为显著。在2号点处,对比伪距单点定位和传统阴影匹配算法,该算法在沿街方向的精度分别提升约51%和35%,在跨街方

向分别提升约74%和72%,定位精度提高效果次之。3号点不存在沿街方向和跨街方向之分,因此对比伪距单点定位和传统阴影匹配算法,顾及局部最优的阴影匹配算法整体精度分别提升为82%和62%。1号点东西方向都有建筑物遮挡,但遮挡情况不如南北两侧严重,东西方向上可用于差异化打分的卫星数量少于南北方向,故沿街方向上精度提升幅度不如跨街方向,2号点东侧无建筑物遮挡,伪距单点定位初始精度较高,传统的阴影匹配算法对于定位精度的提高效果并不显著,而顾及局部最优的阴影匹配算法加入了差异化打分,显著提高了定位精度;3号点不是平行街道,而且存在玻璃幕墙,同时周围环境中存在大量树木,所以伪距单点定位误差最大;玻璃幕墙对NLOS的强反射导致NLOS信号信噪比较高,所以阴影匹配定位结果偏向圆弧状建筑内部,定位精度提高不明显;3号点虽然开阔性最好,但伪距单点定位和传统的阴影匹配算法定位精度相对较低,顾及局部最优的阴影匹配不依赖未接收信号的卫星,茂盛的树木对其影响不大,且充分利用卫星进行差异化打分,因此在各个方向表现均优于伪距单点定位和传统的阴影匹配算法,跨街方向上有较多的次级LOS卫星和NLOS卫星参与对局部区域候选位置点的差异化打分,所以跨街方向定位精度提升效果更好。

表3　3种算法静态实验误差RMSE对比/m

Table 3　RMSE Comparison of Static Experiment of Three Algorithms/m

点号	伪距单点定位			传统阴影匹配算法			顾及局部最优的阴影匹配算法		
	E	N	2D	E	N	2D	E	N	2D
1	16.72	21.58	27.31	8.46	6.51	10.68	3.85	2.46	4.56
2	8.70	8.18	11.87	6.47	7.70	10.06	4.22	2.12	4.72
3	28.51	18.60	34.04	15.17	2.99	15.46	4.26	4.15	5.95

3.3　动态实验结果

为进一步验证顾及局部最优的阴影匹配算法的准确性,在同一区域使用OnePlus 7手机进行动态实验,取一条与纬线平行的直线段,坐标真值依然在城市模型中直接读取。利用3种算法对动态数据进行处理,处理结果如图12所示,3种算法跨街方向的定位精度结果见表4。

阴影匹配算法更注重跨街方向的定位精度,且动态路线中每一时刻的位置坐标真值不便确定,但预先已知路线上各处纬度一致,因此着重分析3种算法在跨街方向上的定位精度。同一实验环境下,动态实验跨街方向上伪距单点定位误差是静态实验的两倍,观察图12中伪距单点定位分布,绝大部分远离动态路线且处于该路线所在街道对面,由于接收对向建筑物反射的NLOS卫星信号更多,所以导致伪距单点定位结果在跨街方向上误差迅速扩大,且偏向街道北侧;传统阴影匹配算法在跨街方向上定位精度与静态实验基本持平;顾及局部最优的阴影匹配在动态路线中的跨街精度达到了1.36 m,相较于静态实验有了更大的提升,此时卫星大多分布于街道的跨街方向两侧,顾及局部最优的阴影匹配可充分利用每颗卫星进行差异化打分,更多的跨街方向分布的卫星使该算法跨街方向定位精度进一步提高;而跨街方向卫星增加,则沿街方向可用于差异化打分的卫星随之减少,这样就导致图12中顾及局部最优的阴影匹配定位结果在跨街方向上没有布满整条线路,在右侧还存在一定区域的聚集。综合分析可知,顾及局部最优的阴影匹配可以较大地提升跨街方向上的定位精度,但当动态路线靠近建筑物且沿街方向上可用于差异化打分的卫星较少时,该算法对沿街方向上的定位精度提升有限。

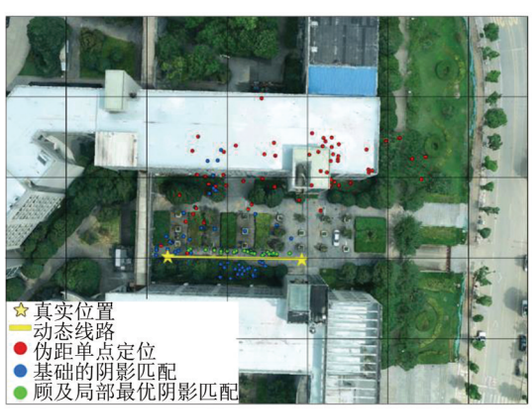


图12　动态实验结果

Fig. 12　Dynamic Experimental Results

表4　3种算法动态实验跨街方向RMSE对比/m

Table 4　RMSE Comparison of Dynamic Experiment of Three Algorithms/m

统计项	伪距单点定位	传统阴影匹配算法	顾及局部最优的阴影匹配算法
跨街方向	22.29	8.44	1.36

4　结　语

城市复杂环境下GNSS手机端伪距单点定位误差较大,传统的阴影匹配算法对该环境下定位精度的提高有限,本文提出了一种顾及局部最优的阴影匹配算法,充分利用3D城市模型的数据信息,在局部候选区域中使用连续的信噪比打分机制,有效区分了不同候选位置与真实位置的匹配程度,并对

局部候选位置得分进行归一化处理,最终加权平均求出定位结果。实测实验证明,顾及局部最优的阴影匹配算法相较于伪距单点定位和传统阴影匹配算法,由表3实验结果可得定位算法精度分别提升了75.68%和60.82%,绝对定位精度达到了5 m左右;动态实验中顾及局部最优的阴影匹配算法在跨街方向上定位精度达到了1.36 m。该算法为城市复杂环境下行人导航及基于位置服务的各类应用提供了重要参考。

本文的主要目的是验证顾及局部最优阴影匹配算法的精确性,所涉及的实验都是PC端上的后处理实验,针对后续实际应用中可能存在更加复杂的城市场景,可利用云计算技术,将手机端作为GNSS数据接收端,利用5G网络进行低延迟的实时数据传输,实际3D城市模型存储和阴影匹配数据处理过程在云端服务器进行,将定位结果实时传回至手机端,即可实现手机端实时定位服务。结合上述静态和动态实测实验可知,顾及局部最优的阴影匹配虽然在跨街方向上的定位精度提升较为显著,但在沿街方向仍存在较大的提升空间,其根本原因在于沿街方向上可用于差异化打分的卫星数量较少。未来的研究可结合手机端的惯性传感器,利用行人轨迹推算算法在沿街方向上对动态路线进行约束,可进一步提升该算法在沿街方向上的定位精度。

参 考 文 献

[1] 刘经南,高柯夫. 智能时代测绘与位置服务领域的挑战与机遇[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(11):1506-1517.
LIU Jingnan, GAO Kefu. Challenges and Opportunities for Mapping and Surveying and Location Based Service in the Age of Intelligence[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(11): 1506-1517.

[2] CHEN L, THOMBRE S, JÄRVINEN K, et al. Robustness, Security and Privacy in Location-Based Services for Future IoT: A Survey[J]. *IEEE Access*, 2017, 5: 8956-8977.

[3] LIU W K, SHI X, ZHU F, et al. Quality Analysis of Multi-GNSS Raw Observations and a Velocity-Aided Positioning Approach Based on Smartphones[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8): 2358-2377.

[4] SZOT T, SPECHT C, SPECHT M, et al. Comparative Analysis of Positioning Accuracy of Samsung Galaxy Smartphones in Stationary Measurements[J]. *PLoS One*, 2019, 14(4): e0215562.

[5] 张小红,陶贤露,王颖喆,等. 城市场景智能手机GNSS/MEMS融合车载高精度定位[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(10):1740-1749.
ZHANG Xiaohong, TAO Xianlu, WANG Yingzhe, et al. MEMS-Enhanced Smartphone GNSS High-Precision Positioning for Vehicular Navigation in Urban Conditions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, 47(10): 1740-1749.

[6] 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.

[7] 葛于祥,刘赞,李增科,等. 智能手机单点定位随机模型与平滑方式分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2022,45(8):1113-1119.
GE Yuxiang, LIU Zan, LI Zengke, et al. Analysis of Stochastic Models and Smoothing Methods in Smartphone Single Point Positioning[J]. *Journal of Hefei University of Technology* (*Natural Science*), 2022, 45(8): 1113-1119.

[8] WU Q, SUN M F, ZHOU C J, et al. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GNSS Observations on Smartphone[J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2189.

[9] 刘超,高井祥,于子晏,等. GPS/伪卫星相对定位中伪卫星优化布设模型研究[J]. 中国矿业大学学报,2012,41(1):120-126.
LIU Chao, GAO Jingxiang, YU Ziyan, et al. An Optimal Pseudolites Location Model of GPS/Pseudolites Integrated Relative Positioning[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2012, 41(1): 120-126.

[10] 王甫红,栾梦杰,程雨欣,等. 城市环境下智能手机车载GNSS/MEMS IMU紧组合定位算法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(7):1106-1116.
WANG Fuhong, LUAN Mengjie, CHENG Yuxin, et al. Smartphone GNSS/MEMS IMU Tightly-Coupled Integration Positioning Method for Vehicular Navigation in Urban Conditions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(7): 1106-1116.

[11] YOON D, KEE C, SEO J, et al. Position Accuracy Improvement by Implementing the DGNSS-CP Algorithm in Smartphones[J]. *Sensors*, 2016, 16(6): 910.

[12] MOREAU J, AMBELLOUIS S, RUICHEK Y. Fisheye-Based Method for GPS Localization Improvement in Unknown Semi-Obstructed Areas[J]. *Sensors*, 2017, 17(1): 119.

[13] WEN W W, ZHANG G H, HSU L T. GNSS NLOS Exclusion Based on Dynamic Object Detection Using LiDAR Point Cloud[J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(2): 853-862.

[14] MIURA S, HISAKA S, KAMIJO S. GPS Multipath Detection and Rectification Using 3D Maps [C]//The 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), HagueThe, Netherlands, 2013.

[15] ISAACS J T, IRISH A T, QUITIN F, et al. Bayesian Localization and Mapping Using GNSS SNR Measurements [C]//2014 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium, Monterey, CA, USA, 2014.

[16] GROVES P D. Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons[J]. *Journal of Navigation*, 2011, 64(3): 417-430.

[17] GROVES P D, JIANG Z Y. Height Aiding, C/N_0 Weighting and Consistency Checking for GNSS NLOS and Multipath Mitigation in Urban Areas[J]. *Journal of Navigation*, 2013, 66(5): 653-669.

[18] WANG L, GROVES P D, ZIEBART M K. GNSS Shadow Matching: Improving Urban Positioning Accuracy Using a 3D City Model with Optimized Visibility Scoring Scheme [J]. *Navigation*, 2013, 60(3): 195-207.

[19] GROVES P D, WANG L, ADJRAD M, et al. GNSS Shadow Matching : The Challenges Ahead [C]//The 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, Florida, USA, 2015.

[20] WANG L, GROVES P D, ZIEBART M K. Smartphone Shadow Matching for Better Cross-Street GNSS Positioning in Urban Environments[J]. *Journal of Navigation*, 2015, 68(3): 411-433.

[21] HSU L T, GU Y L, SHUNSUKE K. Pedestrian Localization Service Using 3D Map and RAIM GNSS Satellite Selection Technique [C]//IEEE 18th International Conference on Intelligent Transportation Systems, Gran Canaria, Spain, 2015.

[22] HSU L T, GU Y L, KAMIJO S. NLOS Correction/Exclusion for GNSS Measurement Using RAIM and City Building Models[J]. *Sensors*, 2015, 15(7): 17329-17349.

[23] HSU L T, CHEN F Y, KAMIJO S. Evaluation of Multi-GNSS and GPS with 3D Map Methods for Pedestrian Positioning in an Urban Canyon Environment [J]. *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, 2015, E98.A(1): 284-293.

[24] HSU L T, GU Y L, KAMIJO S. 3D Building Model-Based Pedestrian Positioning Method Using GPS/GLONASS/QZSS and Its Reliability Calculation[J]. *GPS Solutions*, 2016, 20(3): 413-428.

[25] HSU L T, TOKURA H, KUBO N, et al. Multiple Faulty GNSS Measurement Exclusion Based on Consistency Check in Urban Canyons [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2017, 17(6): 1909-1917.

[26] HSU L T. GNSS Multipath Detection Using a Machine Learning Approach [C]//IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Yokohama, Japan, 2017.

[27] SUN R, HSU L T, XUE D B, et al. GPS Signal Reception Classification Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System[J]. *Journal of Navigation*, 2019, 72(3): 685-701.

[28] ZHANG G H, WEN W S, HSU L T. Rectification of GNSS-Based Collaborative Positioning Using 3D Building Models in Urban Areas [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(3): 83.

[29] 胡辉, 欧敏辉, 颜瑜军. 阴影匹配/粒子滤波自适应加权组合定位算法[J]. 探测与控制学报, 2016, 38(4): 82-87.
HU Hui, OU Minhui, YAN Yujun. Shadow Matching/Particle Filter Adaptive Weighted Integrated Localization Algorithm[J]. *Journal of Detection & Control*, 2016, 38(4): 82-87.

[30] 罗欢, 翁多杰, 陈武. 一种改进的手机阴影匹配定位方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(12): 1907-1915.
LUO Huan, WENG Duojie, CHEN Wu. An Improved Shadow Matching Method for Smartphone Positioning[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(12): 1907-1915.

[31] 王式太, 张博宇, 殷敏. 基于动态阈值的移动终端GNSS定位阴影匹配算法[J]. 大地测量与地球动力学, 2021, 41(11): 1101-1105.
WANG Shitai, ZHANG Boyu, YIN Min. Research on Shadow Matching Algorithm for GNSS Positioning of Mobile Terminal Based on Dynamic Threshold[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2021, 41(11): 1101-1105.

[32] KUMAR R, PETOVELLO M G. 3D Building Model-Assisted Snapshot Positioning Algorithm [J]. *GPS Solutions*, 2017, 21(4): 1923-1935.

[33] NG H F, HSU L T. 3D Mapping Database-Aided GNSS RTK and Its Assessments in Urban Canyons [J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2021, 57(5): 3150-3166.