



武汉大学学报(信息科学版)

*Geomatics and Information Science of Wuhan University*

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

## 《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 城市分类场景的 GNSS 伪距随机模型构建及其定位性能分析  
作者: 李岚, 朱锋, 刘万科, 张小红  
DOI: 10.13203/j.whugis20220598  
网络首发日期: 2023-06-28  
引用格式: 李岚, 朱锋, 刘万科, 张小红. 城市分类场景的 GNSS 伪距随机模型构建及其定位性能分析[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版).  
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20220598>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20220598

引用格式：

李岚, 朱锋, 刘万科, 等. 城市分类场景的GNSS伪距随机模型构建及其定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220598 (LI Lan, ZHU Feng, LIU Wanke, et al. GNSS Pseudorange Stochastic Model for Urban Classification Scenes and Its Positioning Performance[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220598)

## 城市分类场景的 GNSS 伪距随机模型构建及其定位性能分析

李岚<sup>1</sup> 朱锋<sup>1</sup> 刘万科<sup>1</sup> 张小红<sup>1,2</sup>

1 武汉大学测绘学院, 湖北 武汉, 430079

2 武汉大学中国南极测绘研究中心, 湖北 武汉, 430079

**摘要:** 城市复杂场景容易引起 GNSS 信号出现中断、衰减、多径和非视距严重等问题, 难以保证 GNSS 定位服务的可用性、连续性与可靠性。为提高城市复杂场景下的 GNSS 定位性能, 本文提出了一种精细构建城市分类场景 GNSS 随机模型的方法, 利用高精度组合导航设备提供动态参考基准实现伪距误差精确提取, 通过分析不同城市场景下的 GNSS 信号特征与影响因素, 建立了分场景随机模型。实际城市车载测试表明, 分场景随机模型能有效减弱部分定位粗差的影响, 相比于经典高度角随机模型, 水平定位精度提升 16.76%、垂直定位精度提升 16.18%; 相比经典信噪比随机模型, 水平定位精度提升 18.68%、垂直定位精度提升 17.72%, 为实现复杂场景下随机模型的弹性优化提供了新思路。

**关键词:** GNSS 随机模型; 伪距误差提取; 分类场景

中图分类号: P228

文献标识码: A

### GNSS Pseudorange Stochastic Model for Urban Classification Scenes and Its Positioning Performance

LI Lan<sup>1</sup> ZHU Feng<sup>1</sup> LIU Wanke<sup>1</sup> ZHANG Xiaohong<sup>1,2</sup>

1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

2 Chinese Antarctic Center of Surveying and Mapping, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objective:** There will be many problems such as interruption, attenuation, serious multipath error, and NLOS signals when positioning in harsh urban contexts. It's difficult to ensure the availability, continuity, and reliability of GNSS positioning services. To improve the GNSS positioning performance in complex urban contexts, this paper proposes a method for constructing GNSS stochastic models adapting to different urban contexts. **Methods:** First, GNSS signal characteristics in different contexts are analyzed to reveal the significant discrepancy of GNSS signals in varied contexts. Then, dynamic

项目资助: 国家重点研发计划 (2020YFB0505803); 国家自然科学基金 (42104021); 湖北省科技重大项目 (2021AAA010)

第一作者: 李岚, 硕士生, 主要从事城市环境 GNSS 误差分析及其高精度定位算法方面的研究。

lilan1@whu.edu.cn

通讯作者: 朱锋, 博士, 特聘副研究员。fzhu@whu.edu.cn

reference benchmarks provided by high-precision integrated navigation equipment are used to extract pseudorange error accurately. In addition, appropriate error statistic (median) and impact factor (C/N0) are selected after tests. Finally, the GNSS stochastic models adapting to different urban contexts are constructed using C/N0 and pseudorange error. **Results:** The urban vehicle test shows that the stochastic model adapting to different urban contexts can effectively weaken the influence of some gross errors. Compared to elevation stochastic model, the positioning accuracy is improved by 16.76% and 16.18% in horizontal and vertical directions, and by 18.68% and 17.72% compared to the C/N0 stochastic model. **Conclusions:** Stochastic model reconstructed adapting to different environments can weight observations more realistic, thus improving GNSS positioning performance. This provides a new idea for resilient optimization of stochastic models in complex contexts.

**Keyword:** GNSS stochastic model; pseudorange error extraction; contexts classification

随着多频多模融合的 RTD(real time differential)、RTK(real time kinematic)、PPP(precise point positioning)等技术的不断发展与大批增强系统的建立,全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)已经能够在开阔环境下为用户提供亚米到厘米级的高精度动态定位服务<sup>[1-4]</sup>。但在城市峡谷、高架隧道、林荫景观等城市复杂场景下,GNSS 信号易出现中断、衰减、多径和非视距严重等问题,现在常用的单一随机模型通常无法准确描述不同复杂环境造成的差异性观测误差分布,从而影响 GNSS 的定位精度<sup>[5]</sup>。针对这一现象,根据环境信息进行随机模型的弹性调整,实现基于观测环境的随机模型自适应优化,是提升复杂场景下 GNSS 定位性能的有效手段<sup>[6]</sup>。

国内外众多学者在导航场景特征分析与 GNSS 随机模型优化方面展开了研究。为了解环境因素对 GNSS 信号质量的影响,杨哲、王田、王玉泽等人对比分析了不同导航场景下信号功率、卫星星座、多径误差等 GNSS 信号特征<sup>[7-9]</sup>。Gao 和 Groves 在分析完室内外 GNSS 车载数据的信号强度与卫星个数等特征后,利用行为识别结果确定了不同场景之间的联通性,并联合支持向量机和隐马尔可夫模型实现了室内

外场景识别<sup>[10]</sup>。在 GNSS 随机模型优化方面,杨元喜院士所在团队系统性地研究和开发了自适应动态导航定位的理论与方法,通过自主调整测量噪声实现量测模型对观测环境的自适应<sup>[11-12]</sup>。Wang 在利用 IGG-III削弱粗差的影响后,根据残差更新观测噪声矩阵,实现随机模型对城市复杂环境的自适应优化<sup>[13]</sup>。来奇峰在实现室外开阔、室外遮挡和室内场景的分类后,建立了由场景感知结果增强的量测误差估计模型,辅助 GNSS/INS 滤波<sup>[14]</sup>。为降低复杂场景中站点未建模误差对定位精度的影响,Li 和 Zhang 利用采集的兴趣站点的 GNSS 数据,构建了基于高度角、载噪比的随机模型<sup>[15-16]</sup>。Zhang 提出了一种基于高程、方位角和 C/N0 的复合随机模型,该模型能够在获取监测站的地形地貌信息后进行相应模型调整<sup>[17]</sup>。此外,Li 引入 PDOP 这一影响因子,量化每一颗卫星对 PDOP 的贡献并据此调整卫星权重来实现随机模型对环境的适应<sup>[18]</sup>。刘万科、郭斐等人对智能手机的载噪比随机模型参数进行了拟合标定,构建了更贴合智能手机 GNSS 特性的随机模型<sup>[19-20]</sup>。

综上,现有研究主要是基于残差等验后信息实现的随机模型优化,或者针对单一场景、硬件进行模型调整,很少有研究

直接将导航场景这一影响因素加入到模型优化的过程中。然而，GNSS 观测值质量在不同导航场景下存在显著差异，固定参数的随机模型无法实现对不同导航场景下观测值统计特性的准确描述。因此，本文提出了城市分类场景的 GNSS 随机模型构建方法，针对随机模型与观测环境不适配的问题，提取并分析不同场景下的 GNSS 观测误差，构建符合观测环境的随机模型，并分析其对定位的影响。

## 1 城市分类场景 GNSS 信号分析

本文使用 u-blox 与高精度参考基准系

统组合形成的车载数据采集平台在武汉市洪山区多路段进行城市分类场景的 GNSS 数据采集。数据采集路线与实景如图 1。其中，八一路东段（场景 a）为典型城郊环境，沿路仅有低矮建筑与树荫；卓刀泉北路（场景 b）一侧为浓密树荫，一侧开阔；八一路西段（场景 c）与珞喻路（场景 d）为两类城市场景，一类高层建筑与树荫混合，一类高层建筑与玻璃幕墙混合。为深入了解这四类场景对 GNSS 信号质量的影响，对比分析各场景下 GNSS 信号特征与伪距误差统计特性，具体数据见表 1。



(a) 低高度角遮挡场景 (b) 半树荫半开阔场景 (c) 半树荫半高楼场景 (d) 城市高楼场景

图 1 城市车载数据集轨迹与场景分布




Fig.1 Trajectory of urban vehicle-mounted data set and scenes distribution

表 1 城市典型场景的 GNSS 信号质量与伪距误差统计特性 (Ublox)

Tab.1 Statistical characteristics of pseudorange error and GNSS signal quality in typical urban scenes

场景分类	可见卫星	伪距误差	PDOP	载噪比	卫星高度角
	数均值	均值/m	均值	方差/dB-Hz <sup>2</sup>	均值/°
低高度角遮挡 (八一路)	7.422	-0.485	3.728	43.940	39.991
半树荫半开阔 (卓刀泉)	6.737	0.059	2.747	42.652	40.794



					
半树荫半高楼（八一路）					
	5.822	2.742	7.172	43.298	44.139
城市高楼（珞喻路）					
	5.106	12.987	5.626	42.959	45.572

由表 1 可知，从低高度角遮挡场景到城市高楼场景，可见卫星数、载噪比整体下降，PDOP、卫星高度角整体上升，场景复杂度逐渐提升。在伪距误差统计精度方面，城市高楼场景下的伪距误差最大，达到 12.987 m，半树荫半高楼场景下的伪距误差为 2.742 m，半树荫半开阔场景与低高度角遮挡场景下的伪距误差均小于 0.5 m。四类场景的 GNSS 信号质量与伪距误差呈现出较明显的差异，有必要针对不同场景进行随机模型的优化。

此外，场景间 GNSS 信号特征的差异为实现场景感知提供了可能性。参考现有场景感知研究中选取的特征<sup>[21]</sup>，绘制文中四类场景下卫星数、PDOP 和伪距误差分布如图 2。由图可知，低高度角场景下的卫星数、PDOP 与伪距误差分布最为集中且这三类信号质量最优；城市高楼场景下的卫星数最小、伪距误差最值与极差最大；半树荫半开阔与半树荫半高楼场景下 PDOP 与伪距误差呈现出显著差异。利用差异性特征与各类深度学习算法<sup>[22-23]</sup>，配合城市 3D 模型<sup>[24]</sup>可为本文构建的城市分类场景随机模型提供准确的场景信息，进而实现复杂环境下随机模型的弹性调整，为提升随机模型在不同环境中的适用性提供新思路。

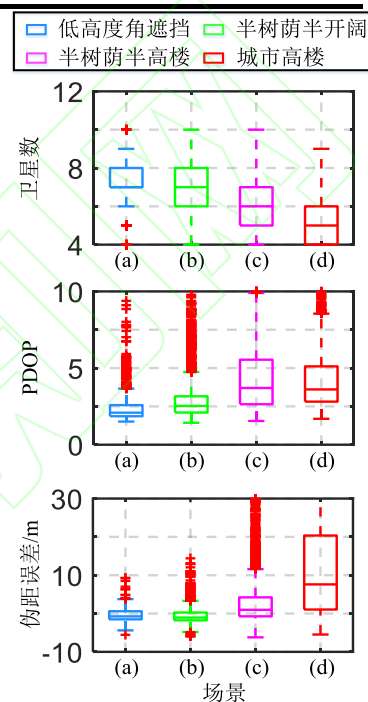


图 2 不同场景 GNSS 信号特征

Fig.2 GNSS signal features in different contexts.

## 2 城市分类场景随机模型构建

GNSS 随机模型用于描述各观测值的统计特性，是 GNSS 数学模型的重要组成部分。随机模型不仅会影响模糊度固定，同时与定位精度密切相关，在周跳和粗差探测等数据质量控制方面同样具有重要作用<sup>[25]</sup>。

现在常用的 GNSS 随机模型有两类：高度角随机模型和载噪比随机模型。一般的，当卫星高度角较低时，观测值含有更大的大气延迟和多路径误差，因此可以根

据高度角的大小对观测值方差进行估计<sup>[26]</sup>。以 RTKLIB 等开源代码中使用的正弦函数模型为例，观测值方差计算公式如下：

$$\sigma_e^2 = a_e^2 + b_e^2 / (\sin(e))^2 \quad (1)$$

式中： $e$  为卫星高度角； $a_e$ 、 $b_e$  为给定常数，通常取  $a_e = 0.3 \text{ m}$ ， $b_e = 0.3 \text{ m}$ 。

载噪比(carrier to noise ratio, C/N0)是 GNSS 接收机输出的一个副产品。在传播过程中，GNSS 信号受到对流层延迟、电离层延迟、接收机天线增益和多路径等因素的影响，载噪比数值会出现波动<sup>[19]</sup>。因此，载噪比也能在一定程度上反应 GNSS 观测值的质量。根据这一特性，Brunner 等人利

用载噪比建立了载噪比随机模型<sup>[27]</sup>：

$$\sigma_{C/N0}^2 = C_i \cdot 10^{-\frac{C/N0}{10}} \quad (2)$$

式中： $C/N0$  为接收机输出的载噪比； $C_i$  与波长相关，实际计算中，通常取  $C_{L_1} = 0.00224 \text{ m}^2 \text{ Hz}$ ， $C_{L_2} = 0.00077 \text{ m}^2 \text{ Hz}$  [28]。

考虑到高度角与载噪比均可在一定程度上反应观测数据的质量，本文在提取 GNSS 信号特征与观测误差，对比不同场景下 GNSS 信号特征的差异后，分析高度角与载噪比对观测误差的影响，并根据分析结果构建城市分类场景的随机模型。具体流程如图 3。

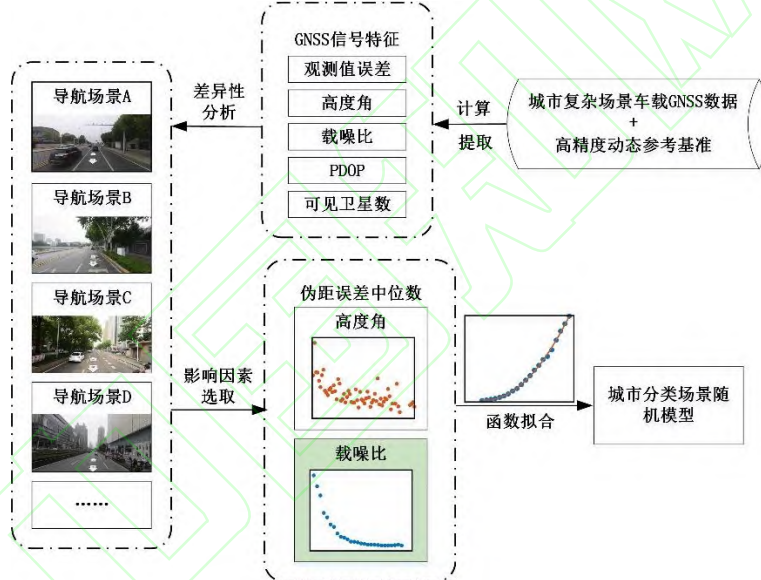


图 3 城市分类场景 GNSS 随机模型构建流程图

Fig.3 Flowchart of GNSS stochastic models construction for city classification scenes

如图 3 所示，首先通过城市复杂场景下的车载实验，用导航型接收机 ublox 采集丰富的 GNSS 观测数据。为给观测值误差的提取提供准确的位置信息，搭载加拿大 NovAtel 公司生产的战术级惯导 FSAS，联合测量型 GNSS 形成高精度参考基准系统。根据 SPAN-FSAS 的性能指标，使用 Inertial Explorer (IE) 软件进行数据处理，在 GNSS 信号连续的情况下，其平面定位精度为 0.010 m、高程定位精度为 0.015 m；在 GNSS 信号中断 60 s、车辆行驶 833 m（假设车速为 50 km/h）的情况下，其平面定位

精度为 0.130 m、高程定位精度为 0.050 m，能为城市场景下的观测值误差提取提供动态参考基准。其次，利用提取的观测值误差与卫星高度角、载噪比等 GNSS 信号特征进行场景间的差异性分析；在确定分类场景后，选取 GNSS 观测值误差的影响因素，并根据选取因素构建城市分类场景随机模型。特征分析，已在 1 中实现，以下将对误差提取与随机模型构建进行详细说明。

## 2.1 伪距误差提取

要实现随机模型的精细构建，关键在准确提取观测误差。在接收机位置已知的情况下，可以通过构建星间单差观测值消除接收机端的相关误差，具体计算公式如下：

$$\Delta V_R^{ij} = \Delta P_R^{ij} - \Delta \tilde{\rho}_R^{ij} + c \cdot \Delta dt^{ij} - \Delta T_R^{ij} - \Delta I_R^{ij} \quad (3)$$

式中， $\Delta$  为星间单差算子； $i$ 、 $j$  代表卫星；

$R$  代表接收机； $P$  为伪距观测值；

$\rho$  为卫星与接收机之间的几何距离； $dt$  为

卫星钟差； $T$  为对流层延迟； $I$  为电离层延迟。

其中，由于高精度参考基准系统为接收机提供的厘米级坐标与广播星历提供的卫星位置、卫星钟参数， $\Delta \tilde{\rho}_R^{ij}$  和  $\Delta dt^{ij}$  可知；

通过基于数值天气预报的 UNB3m 模型与 Klobuchar 模型计算对流层延迟与电离层延迟。

因此， $\Delta V_R^{ij}$  中主要残留项为伪距噪声、

多径误差与经上述模型改正后的残余误差项。由于在城市复杂环境下多径严重，其造成的伪距测量误差可能达到几米甚至几十米<sup>[29]</sup>。在相关模型改正方面，根据 IGS 发布的产品信息，广播星历的 Klobuchar 模型改正精度为 2~8 TECU、卫星钟的精度为 2.5 ns，而 UNB3m 模型在天顶方向的预报精度为 5.2 cm<sup>[30]</sup>。对比可知， $\Delta V_R^{ij}$  中的主要影响因素为多径误差，其能够反应环境对 GNSS 信号质量的影响。

## 2.2 随机模型构建

载噪比与高度角均能反应观测数据的质量。有研究表明，高度角随机模型在处理对流层残余误差方面的效果较好，但其针对卫星信号传输过程中由于观测环境引起的衍射误差的削弱效果不如载噪比随机

模型<sup>[31]</sup>。因此，影响因素的选取在构建随模型时也至关重要。为此，本文对比分析了两种影响因素下伪距误差的分布情况，以半树荫半高楼场景为例，伪距误差具体分布规律如图 4 所示。此外，为使统计量更贴近伪距误差的真实分布水平，本文对比分析了均值、均方根和中位数三种伪距误差统计量的分布情况，同样以半树荫半高楼场景为例，具体分布规律如图 5 所示。

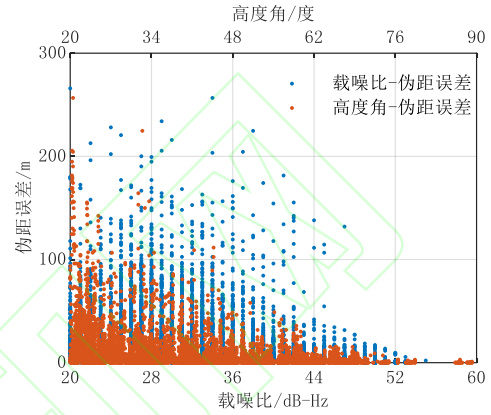


图 4 半树荫半高楼场景伪距误差分布情况 (Ublox)

Fig.4 Distribution of pseudorange error in half-shadow and half-occlusion scene (Ublox)

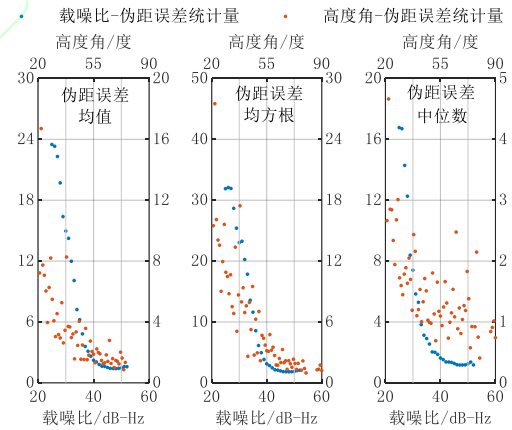


图 5 半树荫半高楼场景伪距误差统计量随影响因素分布情况 (Ublox)

Fig.5 Distribution of pseudorange error statistic with influencing factors in half-shadow and half-occlusion scene (Ublox)

由图 4 可知，从整体上看，随着载噪比与高度角的变化，伪距误差呈现规律性增减，载噪比与高度角越大，伪距误差越小，两者均能在一定程度上反映 GNSS 伪

距观测值的质量。但是当信号发生衍射时，其卫星高度角可能较大，但载噪比通常要比正常情况下小，因此相比于高度角，载噪比与非视距、多径效应的相关性更大<sup>[26]</sup>。如图 5 所示，由于城市复杂场景下非视距与多径效应严重，不同于伪距误差统计量与载噪比之间存在的平滑曲线关系，随高度角变化的伪距误差统计量分布较为散乱，难以从中提取出伪距误差的分布规律。

在均值、均方根与中位数这三类统计量中，中位数具有最佳的稳健性。对于均值和均方根而言，只要存在一个较大的粗差就会使统计量偏离数据真实的分布情况。而中位数至少能够抵御一半粗差的影响，具有更强的稳健性，用它代表全体数据的分布更合适。这一点在图 5 中得到了验证，

相比于均值与均方根，伪距误差中位数的数值最小且变化较光滑，更好的消除了粗差对伪距误差统计的影响。

综上，本文选取载噪比作为影响因素，利用伪距误差中位数进行城市分类场景 GNSS 随机模型的构建。结合图 5 中伪距误差中位数与载噪比的分布规律，并参考经典载噪比随机模型公式，本文分场景随机模型表示为：

$$\sigma^2 = a \cdot 10^{-\frac{C/N0}{b}} + c \quad (4)$$

式中， $\sigma$  为观测值方差； $C/N0$  为载噪比观测值； $a$ 、 $b$ 、 $c$  为模型系数，由伪距误差中位数与载噪比拟合得到。具体拟合结果如图 6 所示。

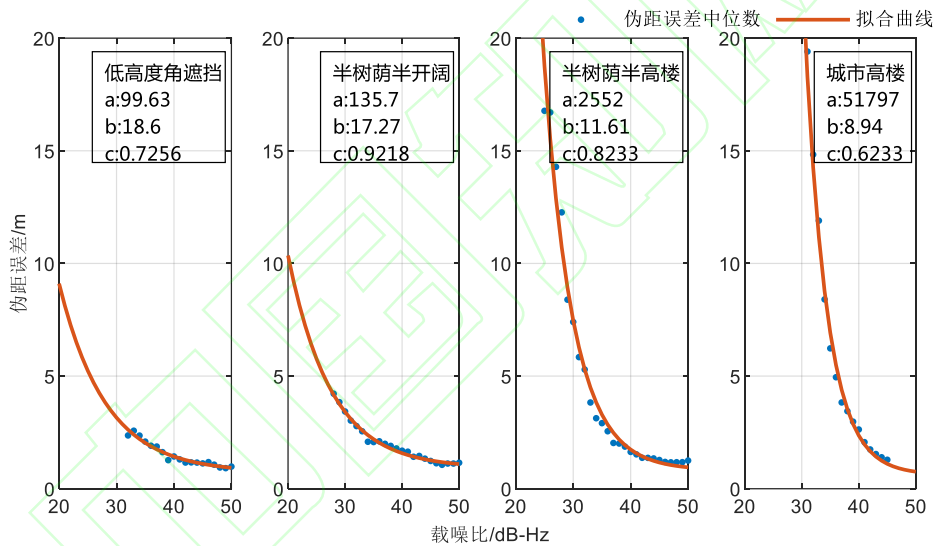


图 6 各场景伪距误差中位数与载噪比的拟合曲线

Fig.6 Fitting curve between the median of pseudorange error and C/N0 of each scene

由图 6 可知，不同场景间伪距误差与载噪比的函数关系呈现出规律性变化。从低高度角遮挡场景到城市高楼场景，随着场景复杂度的逐步提升，模型系数  $a$  逐渐增大， $b$  逐渐减小。在载噪比相同时，场景越复杂，其对应的伪距误差越大。这从函数模型构建结果的角度再一次说明，这四类场景的伪距误差分布规律存在明显差异，有必要分别进行随机模型的构建。

### 3 定位性能分析

#### 3.1 实验数据说明

使用搭建的车载数据采集平台在图 1 所示轨迹上进行数据采集，形成用于随机模型构建与定位性能测试的城市车载数据集，模型构建与定位性能测试分用不同的时段的数据。其中 IMU 的数据频率为 200 Hz，GNSS 的数据频率为 1 Hz。数据集总路程长 973.65 km，共 140895 个历元。为了给随机模型构建与定位性能测试提供坐标参考基准，采用 IE 软件处理高精度惯导和 GNSS 数据，并利用实验前量测的杆臂



将结果归算到 u-blox 中心，获得厘米级的参考位置信息。

### 3.2 GNSS 定位结果分析

为了解分场景随机模型在各场景下的适用性，对比分析四类场景下分场景随机模型与经典高度角随机模型、载噪比随机模型的定位结果。此外，根据获取的场景信息调用对应的随机模型，实现定位过程中随机模型的弹性优化。

图 7、图 8 给出了在高度角、载噪比、分场景三种随机模型条件下各场景的伪距单点定位(single point positioning, SPP)误差时序图与误差累积图。从图中可知，在定位结果的平滑度与小误差占比方面，载噪比随机模型在低高度角遮挡、半树荫半高楼与城市高楼场景下整体优于高度角随机模型，但在主要定位影响因素是信号遮挡

与大气误差的半树荫半开阔场景下，高度角随机模型优于载噪比随机模型；对比两种常用随机模型与分场景随机模型，在半树荫半高楼与城市高楼这两类复杂场景下，因为分场景随机模型对不同场景观测值误差的准确描述，更合理的为卫星分配权重，有效减少了部分粗差，获得了更平滑的定位结果；在低高度角遮挡这类较为开阔的场景下，分场景随机模型针对 u-blox 的 GNSS 信号特性重新拟合模型系数，在 E、U 方向获得了小误差占比更高的误差序列；由于分场景随机模型是基于载噪比实现的模型构建，无法摆脱载噪比在处理大气残余误差等方面的局限性，因此在半树荫半开阔场景下，分场景随机模型在 U 方向上 3 m 以内的误差占比小高度角随机模型近 11 个百分点。

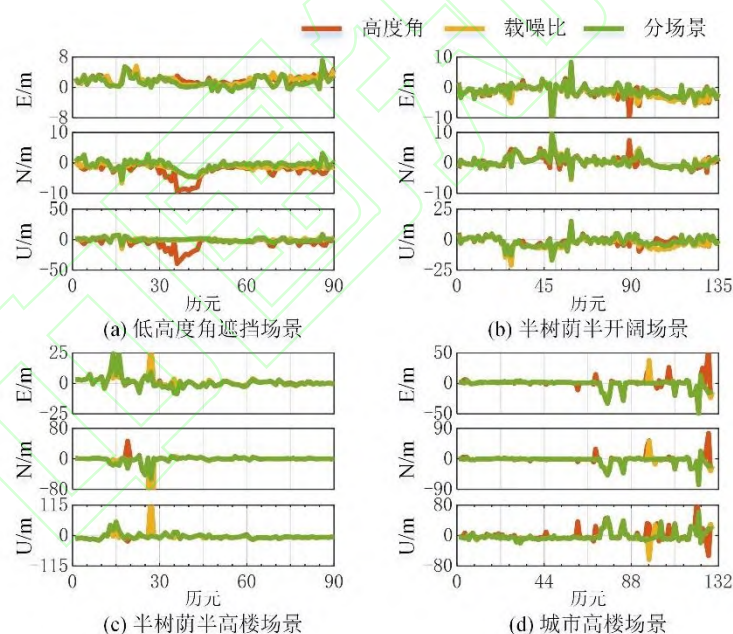


图 7 各场景三种随机模型单点定位误差序列

Fig.7 SPP error sequence of three stochastic models in each scene

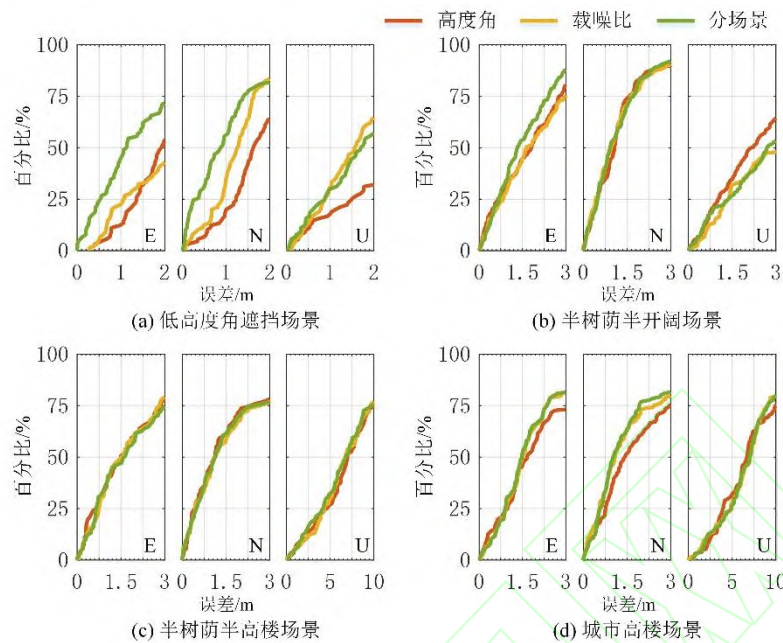


图 8 各场景三种随机模型单点定位误差累计图

Fig.8 Cumulative diagram of SPP error of three stochastic models in each scene

表 2 给出了采用三种随机模型条件下各场景的定位精度。其中，“精度提升 1”为分场景随机模型对比高度角随机模型对定位精度的提升，“精度提升 2”为分场景随机模型对比载噪比随机模型对定位精度的提升。从表 2 可知，采用分场景随机模型进行定位时，在低高度角遮挡场景与半树荫半开阔场景下，E、N、U 三方向的定位精度在 2~4 m；在半树荫半高楼场景下，水平方向定位精度为 7.273 m，高程方向定位精度为 10.551 m；在城市高楼场景下，水平方向定位精度为 10.692 m，高程方向定位精度为 13.129 m。在半树荫半开阔场景下，表 2 的“精度提升 1”体现了图 8 中采用分场景随机模型在 U 方向上的定位结果差于高度角随机模型的现象。此外，在低

高度角遮挡场景下，采用分场景随机模型在 U 方向上 2 m 以内的小误差占比小载噪比随机模型 8 个百分点，但在考虑所有定位误差时，其整体定位精度与载噪比随机模型相当；在半树荫半高楼场景下，采用分场景随机模型在 N、U 两个方向上的定位精度显著优于经典随机模型，但是 E 方向上差载噪比随机模型 0.48 m。这两种现象均说明，分场景随机模型对于定位结果的优化主要通过降低定位粗差的影响实现。整体而言，采用分场景随机模型修正条件下的定位精度在 E、N、U 三方向上，相比于高度角随机模型平均改善了 13.40%、38.00%、30.96%，相比于载噪比随机模型平均改善了 6.10%、24.99%、12.99%。

表 2 各场景三种随机模型单点定位误差均方根/m

Tab.2 RMS of SPP error of three stochastic models in each scene/m						
场景分类	方向	高度角	载噪比	分场景	精度提升 1	精度提升 2
低高度角 遮挡	东	2.368	2.379	1.966	16.98%	17.36%
	北	3.330	1.931	1.723	48.26%	10.77%
	天	9.747	2.845	2.844	70.82%	0.04%
半树荫	东	2.658	2.758	2.322	12.64%	15.81%

半开阔	北	1.898	1.927	1.862	1.90%	3.37%
	天	3.865	5.209	4.300	-11.25%	17.45%
半树荫	东	4.899	4.288	4.765	2.74%	-11.12%
	北	55.010	54.850	9.115	83.43%	83.38%
半高楼	天	18.299	18.842	10.551	42.34%	44.00%
	东	10.647	8.586	8.386	21.24%	2.33%
城市高楼	北	15.426	12.897	12.582	18.44%	2.44%
	天	16.820	13.599	13.129	21.94%	3.46%

在四类场景中，半树荫半高楼场景下的定位精度改善最为明显。为深入分析分场景随机模型对每颗卫星的影响，选出半树荫半高楼场景下定位误差最大的点，并记该点为 P。表 3 为在 P 点采用三种随机模型的情况下 E、N、U 三方向的定位误差。由表 3 可知，在 P 点采用高度角随机模型与载噪比随机模型的定位效果相同，为明显的定位粗差，相比之下，采用分场景随机模型在该点取得了更好的定位结果。

表 3 不同随机模型在 P 点的误差/m

Tab.3 Error of different stochastic models at point P/m

随机模型种类	方向		
	E	N	U
高度角	31.709	-519.338	149.814
载噪比	31.709	-519.338	149.814
分场景	9.238	-54.523	-1.710

表 4 给出了 P 点 5 颗可见卫星的高度角和载噪比，对比发现 G21 的高度角与载噪比最小，G20 的高度角和载噪比最大。

表 4 P 点可见卫星高度角、载噪比

Tab.4 The elevation angle and C/N0 of visible satellite at point P

卫星号	高度角/°	载噪比/dB-Hz
15	28.828	30
20	74.056	44
21	12.165	25
24	63.038	42
32	19.352	40

为直观了解不同随机模型对每颗卫星的影响，计算出 P 点首次使用三种不同随机模型后 5 颗卫星的权比；利用首次定权

结果进行单点定位、验后残差检验和卫星剔除后，再次使用随机模型得到的权比，结果如图 9 所示。

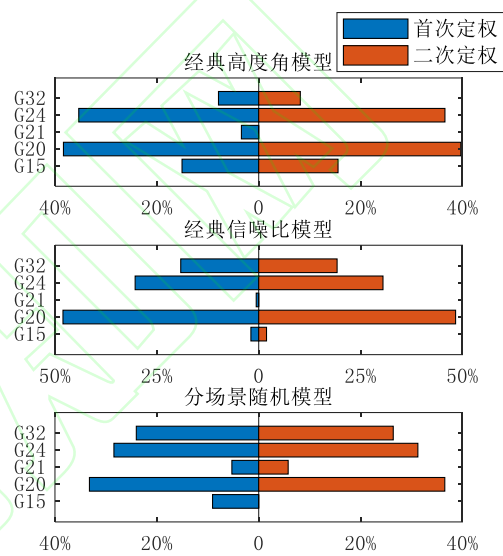


图 9 P 点不同随机模型两次定权后各卫星所占权比

Fig.9 The weight ratio of each satellite after two weights of different stochastic models at point P

从图 9 中可以发现，经过首次高度角随机模型与载噪比随机模型的定权，高度角与载噪比最小的 G21 在验后残差检验的过程中被剔除；而分场景随机模型剔除了卫星 G15。在定位的过程中禁用 G15，采用高度角随机模型与载噪比随机模型条件下的定位精度得到有效提升，具体定位误差如表 5，因在该点采用两种常用随机模型效果一致、定位误差相同，因此在表 5 中将两者记为“常用”。对比表 3 与表 5 可知，卫星 G15 是导致 P 点出现定位误差的主要原因。分场景随机模型通过对不同场景下观测值的更优定权，结合验后残差检验，实现对卫星的有效筛选，从而剔除定位粗差。

表 5 常用随机模型在 P 点删除 G15 前后的定位误差/m

Tab.5 The positioning error of common stochastic models before and after deleting G15 at point P/m

G15 卫星	随机模	方向		
		E	N	U
处理方式	型种类			
未作处理	常用	31.709	-519.338	149.814
删除 G15	常用	9.238	-54.523	-1.710

为尝试定位过程中随机模型的弹性优化,结合高精度参考基准系统提供的位置信息和四类场景的已知坐标范围判断各历元接收机所处的场景类型并据此实现随机模型的调整,当接收机处于未建模环境时,调用经典载噪比随机模型。图 10、表 6 给出了在高度角、载噪比、分场景三种随机模

表 6 全路段三种随机模型单点定位误差均方根/m

Tab.6 RMS of SPP error of three stochastic models on the entire track /m

场景分类	方向	高度角	载噪比	分场景	精度提升 1	精度提升 2
全程	东	6.024	5.120	4.815	20.08%	5.97%
	北	9.324	10.144	7.886	15.43%	22.26%
	天	16.995	17.312	14.245	16.18%	17.72%

观察图 10、表 6 可知,对比两种经典随机模型,全程的分场景随机模型同样实现了降低部分定位粗差影响、提升定位精度的效果,这证实了在获取场景信息后利用本文方法弹性调整随机模型,提升随机模型在各类场景下适用度的可行性。

#### 4 结论

本文提出了一种城市分类场景的 GNSS 随机模型构建方法。在分析了不同场景下 GNSS 信号质量与伪距误差后,利用精准提取的伪距误差结合载噪比这一影响因素,构建了不同观测环境下的随机模型,实现了随机模型对各场景观测值特性的分类描述。通过车载动态实验的验证,得出以下结论:

① 在开阔场景下,伪距误差统计精度小于 0.5m;而在城市高楼等复杂场景下,伪距误差统计精度大于 10m。不同场景下的伪距误差存在显著差异,经典的单一随

型条件下全程 SPP 误差序列与定位误差 RMS 统计结果。

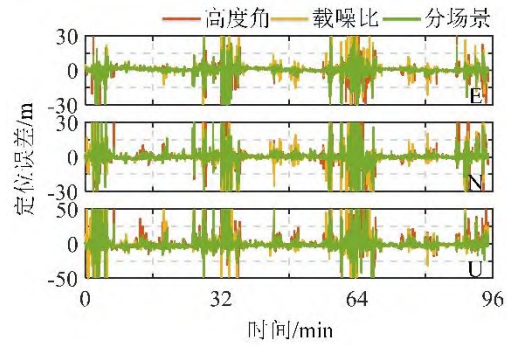


图 10 全程三种随机模型 SPP 误差序列

Fig.10 SPP error sequence of three stochastic models on the entire track

机模型无法适应复杂多变的观测环境;

② 在城市高楼等多类复杂场景下,由于信号衍射等现象的发生,相比于高度角,伪距误差与载噪比之间的相关性更强,更适合用载噪比实现观测值的定权;

③ 相比于经典随机模型,针对不同接收机与观测环境重建的随机模型能够对观测值进行更优定权,从而降低部分定位粗差的影响,提升定位精度。这为实现复杂场景下随机模型的弹性优化提供了新思路。

#### 参考文献

[1] Liu Jingnan, Liu Hui. Continuous Operational Reference System—Infrastructure of Urban Spatial Data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003(3):259-264. (刘经南,刘晖.连续运行卫星定位服务系统——城市空间数据的基础设施[J].武汉大学学报(信息科学版),2003(3):259-264.)



- [2] Zhang Xiaohong, Li Xingxing, Guo Fei, Zhang Ming. Realization and Precision Analysis of Single-Frequency Precise Point Positioning Software[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008(8):783-787. (张小红,李星星,郭斐,张明.GPS 单频精密单点定位软件实现与精度分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2008(8):783-787.)
- [3] Zhang Xiaohong, Ma Fujian. Review of the Development of LEO Navigation-augmented GNSS[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica,2019,48(9):1073-1087. (张小红,马福建.低轨导航增强 GNSS 发展综述[J].测绘学报,2019,48(9):1073-1087.)
- [4] Guo Shuren, Liu Cheng, Gao Weiguang, et al. Construction and Development of Satellite Navigation Augmentation Systems[J]. GNSS World of China, 2019,44(2):1-12. (郭树人,刘成,高为广,等.卫星导航增强系统建设与发展[J].全球定位系统,2019,44(2):1-12.)
- [5] Alkan R, İlçi V, Ozulu M, et al. A comparative study for accuracy assessment of PPP technique using GPS and GLONASS in urban areas[J]. Measurement, 2015, 69:1-8.
- [6] Yang Yuanxi. Resilient PNT Concept Frame[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2018,47(7):893-898. (杨元喜.弹性 PNT 基本框架[J].测绘学报,2018,47(7):893-898.)
- [7] Yang Zhe, Dai Wujiao, Yu Wenkun. Quality analysis of GNSS data based on TEQC in different environments[J]. Journal of geodesy and geodynamics, 2010,30(5):135-139.DOI:10.14075/j.jgg.2010.05.015. (杨哲,戴吾蛟,余文坤,等.不同观测环境中基于 TEQC 的 GNSS 数据质量分析[J].大地测量与地球动力学,2010,30(5):135-139.DOI:10.14075/j.jgg.2010.05.015.)
- [8] Wang Tian, Zhang Shufeng, Peng Ming, et al. Feature Analysis Based on Typical Navigation Test Scenes[C]. GNSS LBS and BeiDou System Application 2016, 2016:328-332. (王田,张书锋,彭明,等.基于导航典型测试场景的特征分析[C].卫星导航定位与北斗系统应用 2016, 2016:328-332.)
- [9] Wang Yuze. Statistical Analysis of GNSS Signal Characteristics for Complex Urban Environment[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2019. (王玉泽.面向复杂城市环境的卫星导航信号特征统计分析研究[D].上海:上海交通大学,2019.)
- [10] Gao H, Groves P. Improving Environment Detection by Behavior Association for Context-adaptive Navigation[J]. Navigation, 2020, 67(1).
- [11] Yang Yuanxi. Robust Kalman Filter for Dynamic Systems[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 1997(2):79-84. (杨元喜.动态系统的抗差 Kalman 滤波[J].解放军测绘学院学报,1997(2):79-84.)
- [12] Yang Yuanxi, Ren Xia, Xu Yan. Main Progress of Adaptively Robust Filter with Applications in Navigation[J]. Journal of Navigation and Positioning, 2013,1(1):9-15.DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.2013.01.006. (杨元喜,任夏,许艳.自适应抗差滤波理论及应用的主要进展[J].导航定位学报,2013,1(1):9-15.DOI:10.16547/j.cnki.10-1096.2013.01.006.)
- [13] Wang J, Han H, Liu F, et al. Performance Analysis of GNSS/MIMU Tight Fusion Positioning Model with Complex Scene Feature Constraints[J]. Journal of Geodesy and Geoinformation Science, 2021, 4(2): 1-13.
- [14] Lai Qifeng, Yuan Hong, Wei Dongyan, et al. Research on GNSS/INS Integrated Positioning Method for Urban Environment Based on Context Aware[J]. Navigation Positioning and Timing, 2021,8(1):151-162. (来奇峰,袁洪,魏东岩,等.基于场景检测的城市环境 GNSS/INS 组合定位方法研究[J].导航定位与授时,2021,8(1):151-162.)
- [15] Li B, Lou L, Shen Y. GNSS Elevation-dependent Stochastic Modeling and Its Impacts on the Statistic Testing[J]. Journal of

- Surveying Engineering, 2016, 142(2):04015012.
- [16] Zhang Z, Li B, Shen Y, et al. Site-specific Unmodeled Error Mitigation for GNSS Positioning in Urban Environments Using a Real-time Adaptive Weighting Model[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7).
- [17] Zhang Z, Li Y, He X, et al. A composite stochastic model considering the terrain topography for real-time GNSS monitoring in canyon environments[J]. Journal of Geodesy, 2022, 96(10):1-19.
- [18] Li Y, Zhang Z, He X, et al. Realistic stochastic modeling considering the PDOP and its application in real-time GNSS point positioning under challenging environments[J]. Measurement, 2022:197.
- [19] Liu Wanke, Shi Xiang, Zhu Feng, et al. Quality Analysis of Raw GNSS Observation of Google Nexus 9 Smart Tablet Terminal[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(12):1749-1756. (刘万科, 史翔, 朱锋, 等. 谷歌 Nexus 9 智能终端原始 GNSS 观测值的质量分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(12):1749-1756.)
- [20] Guo Fei, Wu Weiwang, Zhang Xiaohong, et al. Realization and Precision Analysis of Real-time Precise Point Positioning with Android Smartphones[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2021, 46(7):1053-1062. (郭斐, 吴维旺, 张小红, 等. Android 智能手机实时精密单点定位软件实现及精度分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2021, 46(7):1053-1062.)
- [21] Ferrel F, Vivet D, Watanabe Y. A Review of Environmental Context Detection for Navigation Based on Multiple Sensors[J]. Sensors, 2020(16).
- [22] Xia Y, Pan S, Gao W, et al. Recurrent neural network based scenario recognition with Multi-constellation GNSS measurements on a smartphone[J]. Measurement, 2020, 153:107420-.
- [23] Zhu Y, Luo H, Zhao F, et al. Indoor/Outdoor Switching Detection Using Multisensor DenseNet and LSTM[J]. IEEE Internet of Things Journal, 8.
- [24] Adjrard M, Groves P. Enhancing Least Squares GNSS Positioning with 3D Mapping without Accurate Prior Knowledge[J]. Navigation, 2017, 64(1).
- [25] Zhang Zhetao. Theory and Method for Processing the GNSS Unmodeled Errors[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2020, 49(7):936. (章浙涛. GNSS 非模型化误差处理理论与方法[J]. 测绘学报, 2020, 49(7):936.)
- [26] Dai Wujiao, Ding Xiaoli, Zhu Jianjun. Comparing GPS Stochastic Models Based on Observation Quality Indices[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2008(7):718-722. (戴吾蛟, 丁晓利, 朱建军. 基于观测值质量指标的 GPS 观测量随机模型分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2008(7):718-722.)
- [27] Hartinger H, Brunner F. Variances of GPS Phase Observations: The SIGMA- Model[J]. GPS Solutions, 1999, 2(4):35-43.
- [28] Li Pan. Research on Methodology of Rapid Ambiguity Resolution for GNSS Precise Point Positioning[D]. Wuhan University, 2016. (李盼. GNSS 精密单点定位模糊度快速固定技术和方法研究[D]. 武汉大学, 2016.)
- [29] Feng Xiaochao, Jin Guoping, Fan Jianjun, et al. experimentation and analysis of multipath effect in pseudo-range measurement of GNSS receiver[J]. Modern Electronics Technique, 2013, 36(5):77-81. (冯晓超, 金国平, 范建军, 等. GNSS 接收机伪距测量中的多径效应试验分析[J]. 现代电子技术, 2013, 36(5):77-81.)
- [30] Yao Yibin, Zhang Bao, Yan Feng, et al. Two new sophisticated models for tropospheric delay corrections[J]. CHINESE JOURNAL OF GEOPHYSICS, 2015, 58(5):1492-1501. (姚宜斌, 张豹, 严凤, 等. 两种精化的对流层

延迟改正模型[J].地球物理学报,2015,58(5):1492-1501.)

[31]Lv Minghui, Li Wei, Zhang Baocheng, et al. Refined stochastic model of combining elevation angle and SNR and its impact on precise point positioning in high latitude

areas[J]. GNSS World of China,2021,46(3):15-23+53. (吕明慧,李薇,张宝成,等.联合高度角与信噪比的精化随机模型及其对高纬度精密单点定位的影响[J].全球定位系统,2021,46(3):15-23+53.

#### 网络首发:

**标题:** 城市分类场景的GNSS伪距随机模型构建及其定位性能分析

**作者:** 李岚, 朱锋, 刘万科, 张小红

**DOI:** 10.13203/j.whugis20220598

**收稿日期:** 2023-06-04

#### 引用格式:

李岚, 朱锋, 刘万科, 等. 城市分类场景的GNSS伪距随机模型构建及其定位性能分析[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220598 (LI Lan, ZHU Feng, LIU Wanke, et al. GNSS Pseudorange Stochastic Model for Urban Classification Scenes and Its Positioning Performance[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, DOI: 10.13203/j.whugis20220598)

**网络首发文章内容和格式与正式出版会有细微差别, 请以正式出版文件为准!**

#### 您感兴趣的其他相关论文:

BDS-3多频伪距定位性能分析

刘明亮, 安家春, 王泽民, 张保军, 宋翔宇

武汉大学学报(信息科学版), 2023, 48(6): 902-910

<http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20200714>