



GNSS基准站信噪比联合卫星系统综合定权的手机RTK定位

王尔申, 王珩, 张益泽, 程泉润, 唐文杰, 雷虹

Smartphone RTK positioning based on integrated weighting of GNSS base station signal-to-noise ratio and joint satellite system

WANG Ershen, WANG Heng, ZHANG Yize, CHENG Quanrun, TANG Wenjie, and LEI Hong

引用本文:

王尔申, 王珩, 张益泽, 等. GNSS基准站信噪比联合卫星系统综合定权的手机RTK定位[J]. *全球定位系统*, 2024, 49(3): 65–72. DOI: [10.12265/j.gnss.2024045](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024045)

WANG Ershen, WANG Heng, ZHANG Yize, et al. Smartphone RTK positioning based on integrated weighting of GNSS base station signal-to-noise ratio and joint satellite system[J]. *Gnss World of China*, 2024, 49(3): 65–72. DOI: [10.12265/j.gnss.2024045](https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024045)

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12265/j.gnss.2024045>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

智能手机多频多系统实时动态的定位性能分析

Evaluation of the positioning performance of the multi-frequency multi-system RTK for smart phones

全球定位系统. 2021, 46(5): 10–16

基于CORS的智能手机高精度定位平台研究

Research on high precision positioning platform of smart phone based on CORS

全球定位系统. 2021, 46(4): 101–105

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

Refined stochastic model of combining elevation angle and SNR and its impact on precise point positioning in high latitude areas

全球定位系统. 2021, 46(3): 15–23, 53

一种基于智能手机的室内地磁定位系统

An Indoor Geomagnetic Positioning System Based on Smartphone

全球定位系统. 2018, 43(5): 9–16

不同随机模型在GPS单历元定位中解算性能分析研究

Research on Different Stochastic Model in GPS Single Epoch Position Resolution

全球定位系统. 2017, 42(1): 34–38

Android智能手机GNSS数据质量分析

Quality assessment of Android smartphone with GNSS raw observations

全球定位系统. 2021, 46(4): 85–92



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12265/j.gnss.2024045

GNSS 基准站信噪比联合卫星系统综合定权的手机 RTK 定位

王尔申¹, 王珩^{1,2}, 张益泽², 程泉润², 唐文杰², 雷虹³

(1. 沈阳航空航天大学, 沈阳 110136; 2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030;
3. 沈阳飞机设计研究所电磁环境效应航空科技重点实验室, 沈阳 110035)

摘要: 随着智能手机芯片和天线性能的不不断提升, 基于手机的高精度定位逐渐引起学术界和工业界的广泛关注. 相较于单点定位, 实时动态 (real-time kinematic, RTK) 定位通常表现出更高的定位性能. 然而, 目前对于手机 RTK 定位的随机模型的研究仍相对较少. 因此, 文中以小米 8 为例, 重点探讨了智能手机在多系统 RTK 定位情境下的随机模型. 研究表明: 不同系统的卫星伪距噪声存在显著差异, 而相位噪声的差异则较小. 基于此, 本文提出了一种基站信噪比联合卫星系统间综合定权的随机模型. 相对于传统的信噪比模型更准确地考虑了不同系统之间的权重分配. 并在开阔和遮挡条件下进行了静态和动态实验. 结果表明: 相比于传统的信噪比模型, 新模型在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡下三维方向的 RTK 定位精度分别提升了 18.7%、18.3%、3.3% 和 4.6%.

关键词: 智能手机; 随机模型; 信噪比; RTK 定位; 定位精度

中图分类号: P228.41

文献标志码: A

文章编号: 1008-9268(2024)03-0065-08

0 引言

近年来, 人们对定位服务的需求不断增加, 这种需求在出行导航、快递物流等领域尤为显著. 人们的日常生活越来越依赖于精准的位置信息^[1]. 自 2016 年起, 谷歌的安卓 7.0 版本及以下的操作系统开始提供 GNSS 原始数据接口, 为基于智能手机原始数据的定位技术研究带来了新的机遇^[2-4]. 此后, 国内外的众多学者对智能手机接收的 GNSS 数据进行了质量评估. 研究发现, 对于配备低成本多系统 GNSS 芯片的智能手机, 由于不同 GNSS 信号体制和抗多径能力的不同, 其 GNSS 数据的质量可能存在显著差异^[5-6]. 因此, 观测值的噪声在随机模型中的权重对参数估计及其精度评估产生重要影响^[7]. 在这种情况下, 采用适当的随机模型可以有效降低各种系统残余误差对导航定位精度的影响, 从而提高定位的准确性. 这对于 GNSS 技术的研究和应用具有重要意义^[8].

目前, 手机定位中常用的随机模型包括高度角模型、信噪比模型以及高度角信噪比联合模型. 有关此

方面的研究, 文献 [9] 和文献 [10] 均指出, 在伪距单点定位模式下, 信噪比模型表现优于高度角模型, 整体上三维定位精度提高了约 10%. 然而, 这些研究尚未在实时动态 (real-time kinematic, RTK) 定位方面进行进一步验证. 文献 [11] 在文献 [9] 的基础上, 进一步考虑了不同系统之间伪距噪声的差异, 提出了一种信噪比联合系统间加权的随机模型. 相对于采用系统间等权模型的情况, 该模型明显提高了定位精度, 但同样尚未在 RTK 定位方面进行深入验证. 在此期间, 文献 [12] 指出, 在精密单点定位模式 (precise point position, PPP) 下, 信噪比模型表现也优于高度角模型. 此外, 文献 [13] 的研究结果表明, 在良好的观测条件下, 小米 8 智能手机在 RTK 定位模式下可以实现分米级水平的精度, 在平面方向上精度可达 20 cm 以内, 高程方向上精度可达 50 cm 以内. 然而, 该研究并未对动态模式下的 RTK 定位精度进行验证. 文献 [14] 的研究显示, 在 RTK 定位模式下, 信噪比模型相对于高度角模型具有显著的精度提升. 但其仅考虑到了流动站信噪比, 且仍然采用传统的信噪比模型. 值

收稿日期: 2024-03-06

通信作者: 张益泽 E-mail: zhyize@shao.ac.cn

得指出的是,在 RTK 定位中,基站信噪比和流动站信噪比的变化受到环境因素的影响,因此在随机模型中考虑基站信噪比的影响显得非常必要。

基于上述背景,本研究提出了一种基站信噪比联合卫星系统间综合定权的随机模型。我们在各种环境下,包括开阔区域和遮挡环境,进行了静态和动态 RTK 定位实验。通过比较分析新模型与高度角模型、信噪比模型和信噪比联合系统间模型的定位效果,对新模型的有效性进行验证。

1 智能手机 RTK 定位模型

1.1 智能手机 RTK 定位方程建立

假设手机端 r 和参考站 b 同时观测同一颗卫星 j , 将两个站对卫星的观测量作站间单差, 站间单差的观测方程为^[15]

$$\begin{cases} \nabla P_{rb,i}^j = \nabla \rho_{rb,i}^j - c \cdot \nabla t_{rb} + \nabla I_{rb,i}^j + \nabla T_{rb}^j + \varepsilon_P \\ \nabla \varphi_{rb,i}^j = \nabla \rho_{rb,i}^j - c \cdot \nabla t_{rb} - \nabla I_{rb,i}^j + \nabla T_{rb}^j + \lambda_i \cdot \nabla \alpha_{rb,i}^j + \varepsilon_\varphi \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为单差算子; 下标 i 为频率; P 为伪距观测量; φ 为以米为单位的载波相位观测量; ρ 为卫地距; α 为整周模糊度; t 为接收机钟差; I 为电离层误差; T 为对流层误差; λ_i 为频率 i 上的波长; c 为光速; ε_P 为伪距噪声; ε_φ 为相位噪声。从式 (1) 可以看出, 站间单差可以消除卫星端的误差项。

在站间单差的基础上, 手机端 r 和参考站 b 同时观测卫星 j 和 k , 在两颗卫星之间作星间单差, 星间单差的观测方程为

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \nabla \Delta I_{rb,i}^{jk} + \nabla \Delta T_{rb}^{jk} + \varepsilon_P \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta I_{rb,i}^{jk} + \nabla \Delta T_{rb}^{jk} + \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\Delta \nabla$ 为双差算子, 上式可以看出星间单差可以消除接收机端的误差。当手机端 r 和参考站 b 距离较近时, 双差对流层和双差电离层也可忽略不计, 故上式可改写为

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_P \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_\varphi \end{cases} \quad (3)$$

由于短基线 RTK 可以消除卫星端和手机端的绝大部分误差, 因此在短基线 RTK 定位模式下, 只需估计接收机的位置参数和整周模糊度参数。通常采用卡尔曼滤波估计接收机的状态参数^[16]。在卡尔曼滤波中观测噪声矩阵中各元素分别由不同卫星伪距和载波相位的随机模型决定。

1.2 随机模型

常见的随机模型包括高度角随机模型和信噪比

随机模型。有研究者在信噪比随机模型的基础上进一步考虑了不同卫星系统间伪距噪声的差异, 提出了信噪比联合系统间综合定权随机模型^[11]。本节将对上述三种随机模型进行介绍。

1.2.1 高度角随机模型

由于卫星信号受电离层、对流层和遮挡等因素的影响, 不同高度角下的卫星信号质量存在差异。高度角随机模型是根据卫星的高度角来赋予卫星观测值不同的权重, 以反映不同高度角下信号质量的差异。

在高度角随机模型中, 常见的方法包括三角函数模型和指数函数模型。然而, 由于指数函数模型的初始参数选择和调整需要大量试验和经验, 因此本研究采用了最常用的正弦函数模型^[17]。具体公式为

$$\sigma = \left(a + \frac{b}{\sin(E)} \right) \cdot \sigma_0 \quad (4)$$

式中: σ 为观测值方差; E 为卫星高度角; a 和 b 为经验系数; 默认设置值均为 0.5; σ_0 为天顶方向的观测值噪声, 对于伪距观测值一般设为 0.3 m, 对相位观测值一般设为 0.003 m。

1.2.2 信噪比随机模型

在卫星导航定位、通信、信号处理以及无线通信等领域, 信噪比是一个重要的评估指标, 用于衡量信号强度与周围噪声之间的相对关系。信噪比随机模型的主要目的是建立信号强度和噪声之间的概率分布, 以更深入地理解和分析系统性能。

卫星信号在传播过程中会受到电离层延迟、对流层延迟、多路径等多种因素的影响。同时, 每颗卫星信号的传输能量水平也存在差异, 因此不同信号的信噪比值会有所不同。信噪比在一定程度上反映了观测值的信号质量。信噪比值越大, 表示信号质量越好, 测量精度越高。本文采用 Sigma- ε 模型^[18], 即

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0^2 \times 10^{-\left(\frac{C/N_{0,\text{rover}} - C/N_{0,\text{max}}^r}{10}\right)}, C/N_{0,\text{rover}} < C/N_{0,\text{max}}^r \\ \sigma_0^2, C/N_{0,\text{rover}} \geq C/N_{0,\text{max}}^r \end{cases} \quad (5)$$

式中: σ_0 的设置参考公式 (4); $C/N_{0,\text{rover}}$ 为流动站信噪比; $C/N_{0,\text{max}}^r$ 为对应频率 $C/N_{0,\text{rover}}$ 最大值阈值。根据小米 8 智能手机 L1 频率特性, 将 L1 频率的 $C/N_{0,\text{max}}^r$ 阈值设为 45 dB-Hz^[19]。

1.2.3 信噪比联合系统间随机模型

在基于信噪比的随机模型的基础上, 一些研究者提出了信噪比联合系统间的随机模型, 该模型综合考虑了不同卫星系统之间信号质量和空间信号精度的差异, 从而显著提高了定位精度^[11]。其模型可表示为

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0^2 \times 10^{-\left(\frac{C/N_{0,\text{rover}} - C/N_{0,\text{max}}^r}{10}\right)}, & C/N_{0,\text{rover}} < C/N_{0,\text{max}}^r \\ \sigma_0^2, & C/N_{0,\text{rover}} \geq C/N_{0,\text{max}}^r \end{cases} \quad (6)$$

与式(5)不同,式(6)中 σ_0 是根据不同卫星系统的伪距观测值和相位观测值噪声进行设置。

1.3 基站信噪比联合卫星系统间综合定权随机模型

上述模型通常用于单点定位模式,但在 RTK 模式下,基站和移动站通常处于不同的环境中,这导致基站和移动站之间的信噪比存在差异。在某些情况

$$\sigma^2 = \begin{cases} \sigma_0^2 \cdot 10^{-\left(\left(\frac{C/N_{0,\text{rover}} - C/N_{0,\text{max}}^r}{10}\right) + \left(\frac{C/N_{0,\text{base}} - C/N_{0,\text{max}}^b}{10}\right)\right)}, & C/N_{0,\text{rover}} < C/N_{0,\text{max}}^r \\ \sigma_0^2, & C/N_{0,\text{rover}} \geq C/N_{0,\text{max}}^r \end{cases} \quad (7)$$

式中: $C/N_{0,\text{base}}$ 为基站信噪比; $C/N_{0,\text{max}}^b$ 为对应频率 $C/N_{0,\text{base}}$ 最大值阈值。可以看出,上述模型综合考虑了基站和用户站的信噪比,更能反应 RTK 定位中基站和用户站的综合影响。通常,Trimble 接收机比智能手机强约 5~6 dB-Hz,因此,将 $C/N_{0,\text{max}}^b$ 的阈值设为 50~51 dB-Hz^[19]。

1.4 伪距/相位观测噪声分析

伪距观测值精度一般采用零基线法进行测量^[20]。由于手机天线内置于手机内,很难实现零基线,本研究采用短基线法来计算伪距和相位噪声。在本文的短基线算法中,基准站的坐标已经通过 RTK 精确进行了标定,因此消除了坐标误差带来的影响。另外,采用的短基线的基线长度均小于 10 m,可以认为完全消除了轨道钟差误差及对流层电离层误差。短基线观测模型可以写成^[20]

$$\begin{cases} \nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_p \\ \nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} = \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} + \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk} + \varepsilon_\varphi \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\alpha_{rb,i}^{jk}$ 为以周为单位的双差载波相位偏差,主要包含双差载波相位整数模糊度和其它可能的相位偏差;其他符号定义与式(3)的一致。其中 $\alpha_{rb,i}^{jk}$ 可以作为参数进行估计,则剩余的残差中仅包含噪声

$$\begin{cases} \xi_p = \frac{1}{2} \times \varepsilon_p = \frac{1}{2} \times (\nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk}) \\ \xi_\varphi = \frac{1}{2} \times \varepsilon_\varphi = \frac{1}{2} \times (\nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{rb,i}^{jk} - \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: ξ_p 为单差后伪距噪声; ξ_φ 为单差后相位噪声;归一化因子为 1/2 的适用前提是组成基线的接收机类型相同,即测量噪声量级基本一致。若采用不同类型

下,基站和移动站的信噪比差异可能超过 10 dB-Hz 以上。如果在 RTK 定位模式下不考虑基站的随机模型,模型将无法准确反映双差观测值的协方差信息,从而导致 RTK 定位中各个参数的有偏估计。

因此,本研究基于信噪比联合系统间随机模型的基础上,进一步提出了在 RTK 定位中考虑基站信噪比的联合系统间随机模型,这一模型的提出旨在更准确地考虑不同信号源之间的信噪比差异,以提高 RTK 定位的精度,其表示为

的接收机,例如智能手机和测量型接收机,则上述归一化因子应做相应改变。之前的研究表明,智能手机伪距观测值的测量噪声约为测量型接收机的 10 倍,而载波相位的在相同量级^[20]。因此,在本文中,当使用由智能手机和测量型接收机组成的基线时,我们设置了伪距的归一化因子 $1/\sqrt{2}$,以忽略测量型接收机对伪距的影响;同时,我们设置了载波相位的归一化因子 1/2,假定测量型接收机的载波相位测量噪声与智能手机的测量噪声在相同数量级上。

固定流动站和基准站坐标为真实坐标,并忽略多路径延迟误差的超短基线中,其模型改为

$$\begin{cases} \xi_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \varepsilon_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \times (\nabla \Delta P_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}) \\ \xi_\varphi = \frac{1}{2} \times \varepsilon_\varphi = \frac{1}{2} \times (\nabla \Delta \varphi_{rb,i}^{jk} - \nabla \Delta \rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2} - \lambda_i \cdot \nabla \Delta \alpha_{rb,i}^{jk}) \end{cases} \quad (10)$$

式中, $\rho_{r_1 r_2}^{s_1 s_2}$ 为固定流动站和基准站坐标反算的双差卫星地距离。然后统计上式 ξ_p 和 ξ_φ 的标准偏差来量化测量噪声。

通过短基线双差残差法计算的伪距噪声如图 1 所示。在静态开阔环境下,北斗卫星导航系统(BeiDou Navigation Satellite System, BDS)和美国 GPS 的伪距噪声大部分保持在 10 m 以内,俄罗斯 GLONASS 的伪距噪声大部分保持在 20 m 以内。同时, GPS、BDS 和 GLONASS 的伪距噪声均方根(root mean square, RMS)分别为 4.65 m、5.08 m 和 8.54 m。在其他环境下,伪距噪声 RMS 可参考表 1。研究表明,在智能手机小米 8 中,三个不同系统的伪距质量存在显著差异。因此,当使用多系统智能手机数据进行定位时,需要对不同系统的伪距观测值进行分别的加权处理。

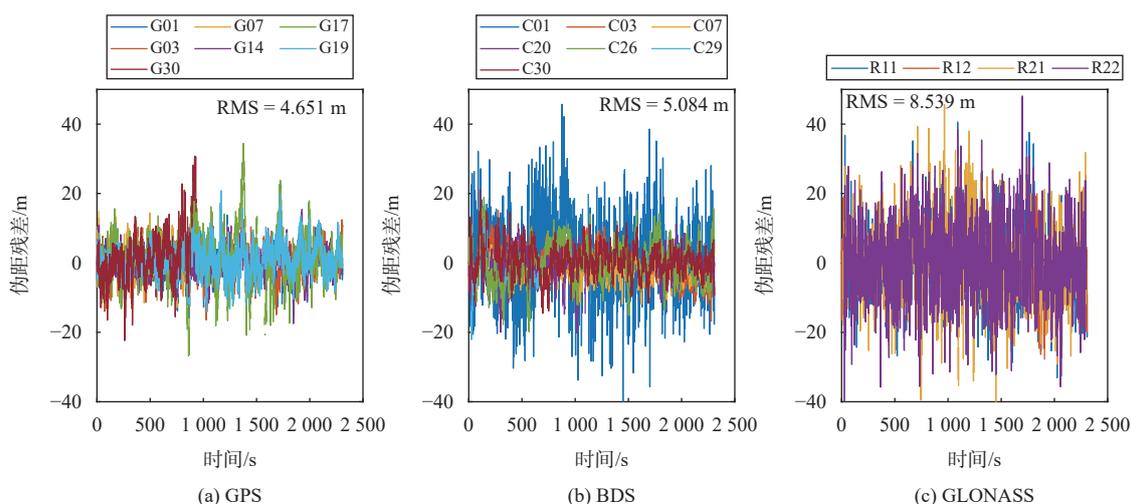


图 1 智能手机小米 8 不同卫星系统伪距噪声

表 1 智能手机小米 8 不同卫星系统伪距噪声 m

卫星系统	静态开阔	静态遮挡	动态开阔	动态遮挡	RMS值
GPS	4.65	5.67	5.15	5.07	5.14
BDS	5.08	5.38	4.02	5.17	4.92
GLONASS	8.54	8.11	8.13	8.19	8.24

本研究在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡四种环境下进行了实验验证, 数据采集时间均在 0.5~1 h. 表 1 中列出了不同系统的双差伪距噪声及其 RMS 值. 结果显示, 在 GLONASS 中, 伪距噪声较大, RMS 值超过了 8 m; 而在 BDS 和 GPS 中, 伪距噪声接近, RMS 值约在 5 m. 基于不同系统间伪距噪声的 RMS 值大小关系, 我们确定了 GPS、BDS 和

GLONASS 的权重分别为 5.14 m、4.92 m 和 8.24 m. 在后续的定位实验中, 我们将伪距观测值的 σ_0 按照这些权重进行权重分配.

使用短基线双差残差法计算的相位噪声如图 2 所示. 在静态开阔环境下, GPS、BDS 和 GLONASS 的相位噪声大多保持在 0.02 m 以内, 它们的相位噪声 RMS 分别为 0.009 m、0.008 m 和 0.009 m, 其他环境下的相位噪声 RMS 可参考表 2. 结果显示在四种不同环境下, 三个系统的相位噪声差异很小, RMS 值分别为 0.009 m、0.008 m 和 0.009 m. 本文提出的基站信噪比联合卫星系统间综合定权随机模型在后续的定位实验中将相位观测值的 σ_0 按照这些权重进行设置.

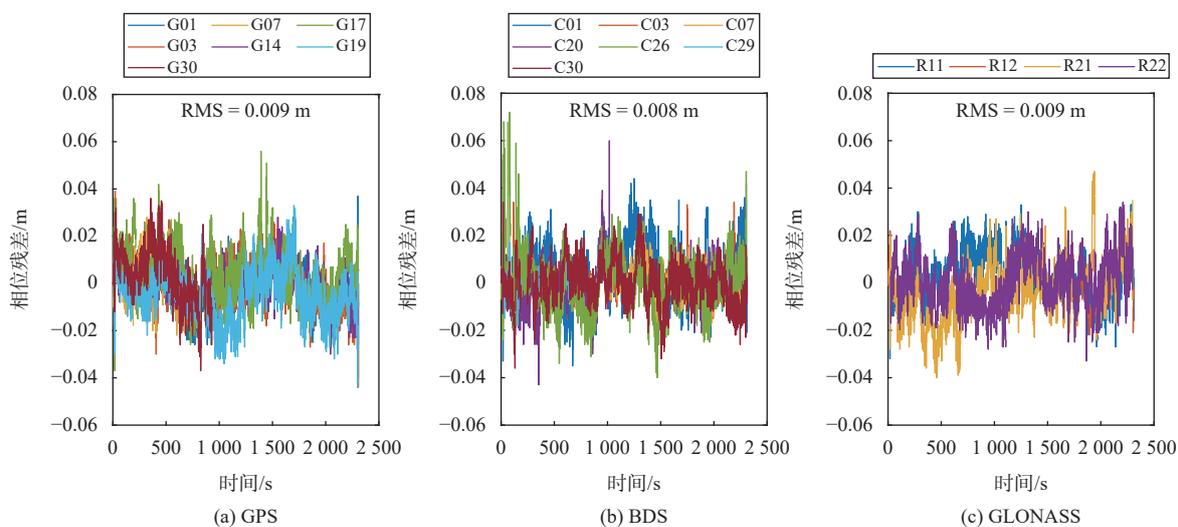


图 2 智能手机小米 8 不同卫星系统相位噪声

表2 智能手机小米8不同卫星系统相位噪声 m

卫星系统	静态开阔	静态遮挡	动态开阔	动态遮挡	RMS值
GPS	0.009	0.010	0.009	0.010	0.009
BDS	0.008	0.009	0.008	0.009	0.008
GLONASS	0.009	0.011	0.009	0.010	0.009

2 实验及分析

2.1 数据采集

在本研究中,我们选用了智能手机小米8作为流动站,并使用 Trimble R9 作为基站,在静态开阔、动态开阔以及动态遮挡等不同环境下进行了数据采集,在静态遮挡环境下,还使用了华测 B5 作为基准站。

静态开阔实验地点位于中国科学院上海天文台佘山科技园区篮球场旁的空地,采集时间为 2023-02-24,采集时长为 40 min,采样间隔为 1 s。静态遮挡实验地点位于中国科学院上海天文台佘山科技园区实验楼前,采集时间为 2023-09-04,采集时长为 15 min,采样间隔为 1 s。

动态实验则从中国科学院上海天文台徐汇园区出发,前往中国科学院上海天文台佘山科技园,华测 B5 与小米8摆放位置关系如图3所示。

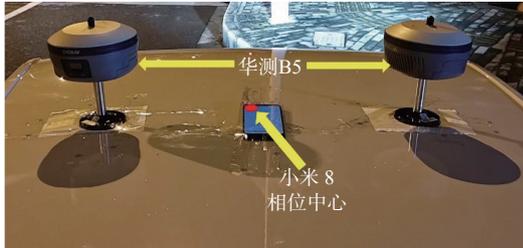


图3 华测 B5 与小米8位置关系

该路线穿越了城市遮挡环境和郊区开阔环境。在遮挡环境中,马路两边有许多高楼,而在郊区开阔环境中则没有高楼的遮挡。

为了评估智能手机 RTK 定位精度,静态实验中的参考坐标事先用华测 CGI-610 接收机 RTK 固定解标定。在动态车载实验中,我们将小米8手机放置在两台华测 B5 接收机之间,以这两台接收机的 RTK 固定解均值作为小米8手机动态位置的基准。一般来说,小米8手机的天线相位中心(antenna phase center, APC)被认为位于智能手机左上方^[18],如图5所示,小米8手机的 APC 正好位于两台 B5 接收机之间。由于 B5 接收机天线高度带来的高程影响已经在后续数据处理中被扣除。

小米8观测数据中 BDS 和 GLONASS 只有 L1 频点,因此本文以 GPS、BDS 和 GLONASS 这三个系统的单频伪距和载波观测数据进行分析,遮挡环境下小米8采集的观测数据质量差,较难实现模糊度固定,所以仅考虑浮点解。

在智能手机 RTK 数据处理中,数据处理过程中的参数配置如表3所示。

表3 模式设置和参数设置

模式设置	参数设置
定位模式	动态差分定位
截至高度角	10°
GNSS	GPS(L1)、BDS(B1)、GLONASS(L1)
电离层改正	Klobuchar
对流层改正	Saastamoinen
卫星轨道和钟差	广播星历

2.2 数据分析

在影响 GNSS 定位的误差源中,除了电离层延迟误差、多路径误差和测量噪声之外,其余误差对伪距和载波相位测量的影响是相似的。因此,本研究采用伪距和载波相位观测值的组合来检测周跳现象^[21-22]。由式(3)伪距与相位作差得

$$\nabla\Delta\alpha_{rb,i}^{jk} = \frac{(\nabla\Delta\varphi_{rb,i}^{jk} - \nabla\Delta P_{rb,i}^{jk}) + (\varepsilon_P - \varepsilon_\varphi)}{\lambda} \quad (11)$$

对式(11)进行历元间差分。此时,整周模糊度的差分可表示为

$$\nabla\Delta\alpha_{rb,i+1}^{jk} - \nabla\Delta\alpha_{rb,i}^{jk} = \frac{(\nabla\Delta\varphi_{rb,i+1}^{jk} - \nabla\Delta\varphi_{rb,i}^{jk}) - (\nabla\Delta P_{rb,i+1}^{jk} - \nabla\Delta P_{rb,i}^{jk}) + \Delta\varepsilon}{\lambda} \quad (12)$$

若没有周跳发生,式(12)伪距和相位的历元间双差应接近为0。若发生周跳,则式(12)会超出一定范围。因此可根据式(12)是否大于阈值来判断是否发生周跳,阈值一般设为0.5周^[21-22]。伪距/载波组合法在1s采样率下,可以很好地探测出小至1周的周跳^[21-22]。

使用此方法探测的周跳情况如图4所示。

观察结果显示,在遮挡环境下,卫星信号发生周跳的次数相对较多。这主要有两个原因,首先,遮挡环境下,卫星信号必须穿越更多的障碍物,如建筑物和树木等。这些物体会引起信号衰减,导致信号强度下降,从而使得智能手机难以正常跟踪卫星信号,或者在信号重新捕获时可能发生周跳。其次,遮挡环境更

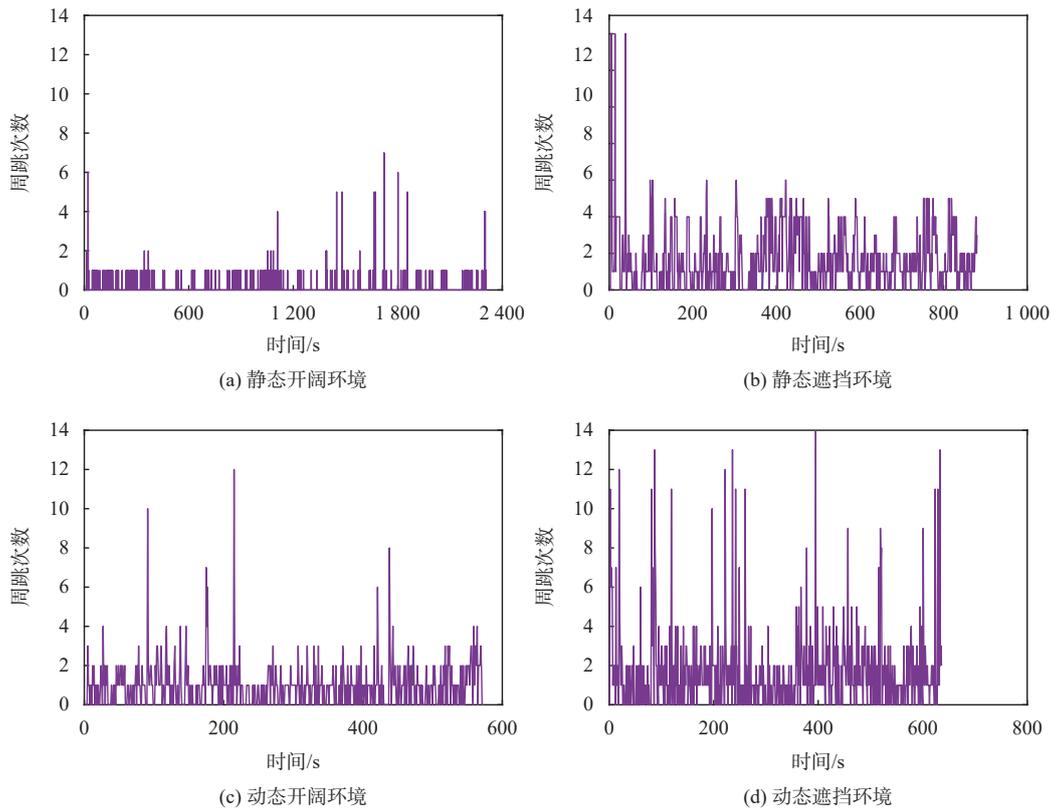


图 4 不同环境下智能手机小米 8 周跳卫星数

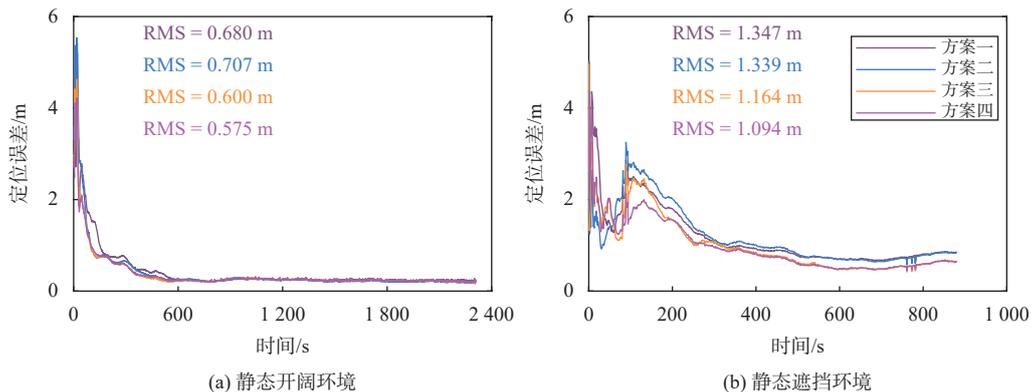
容易引起信号的反射和折射,增加了多路径效应的明显性.这些额外的信号路径会导致智能手机产生不准确的测量结果,从而容易引发周跳事件的发生.

3 定位结果评估与分析

为研究不同随机模型对 Android 智能手机 RTK 定位在开阔和遮挡环境下的影响,本文在基于 RTKLIB Demo5 b34g 的基础上进行了改进和解算.以下是基于提出的基站信噪比联合卫星系统间综合定权随机模型(方案四)与高度角模型(方案一)、信噪比模型(方案二)以及系统间联合信噪比模型(方案三)所得到的三维方向误差时间序列的结果.

由图 5(a)可知,在静态开阔环境下,四种方案收

敛后定位精度相当,但方案三和方案四的收敛速度明显快于方案一和方案二.这种差异可能是因为开阔环境下卫星数量众多,随着观测数据积累,不同随机模型对参数的估计更接近.然而,在收敛过程中,合适的随机模型能更好地反映不同卫星观测误差的差异,也使观测误差在卫星之间得到更为合理的分配,从而加快了收敛速度.由图 5(b)可知,在静态遮挡环境下,四种方案的定位精度明显低于开阔环境,但方案三和方案四的精度高于方案一和方案二.在收敛速度方面,方案四明显优于其他三种方案.这是因为在遮挡环境下,卫星数量较少,观测数据不足,定位结果更加依赖随机模型.此外,遮挡环境下,卫星伪距噪声存在较大的差异并且变化迅速,因此考虑伪距噪声的



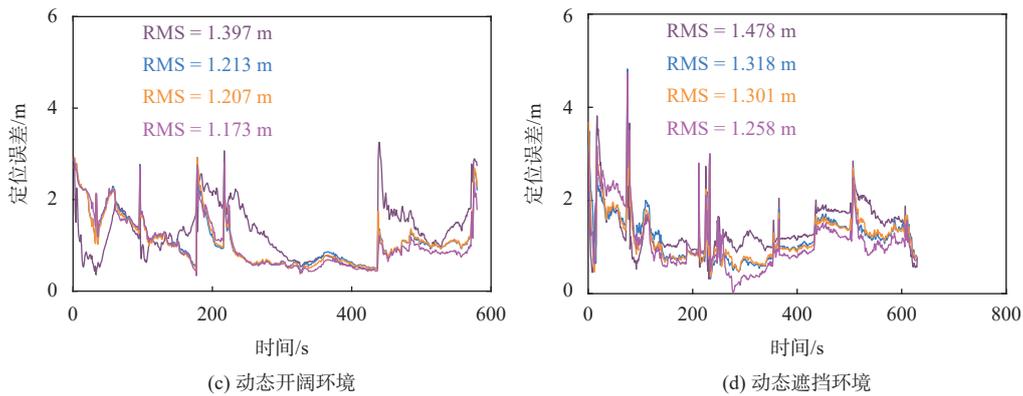


图 5 不同环境下不同随机模型的定位结果

方案三和方案四表现更出色. 方案四在方案三的基础上还考虑了基站处不同卫星信噪比的差异和变化, 因此表现更佳. 由图 5(c) 和图 5(d) 可知, 动态遮挡环境定位精度总体差于开阔环境, 动态开阔环境下四种模式定位精度均约在 1.1 m, 动态遮挡环境定位精度约在 1.3 m. 开阔环境下, 三种基于信噪比的模型明显好于高度角模型, 从统计结果来说, 方案四略好于方案二和方案三. 在动态遮挡环境下, 方案四相比于其他方案有 5%~15% 的精度提升, 提升较为明显. 动态定位都比静态定位的定位精度低, 主要原因可能是动态的情况下, 信号强度可能会发生剧烈的变化, 导致智能手机难以准确捕捉信号, 从而影响定位结果的稳定性.

根据图 6 的结果, 可以得出以下结论: 在静态开阔和遮挡环境下, 方案四相对于其他三种方案在水平和高程定位精度上都有所提升. 在动态开阔环境下, 四种模型的水平定位精度相近, 但三种基于信噪比的模型在高程定位精度方面表现明显优于高度角模型. 在动态遮挡环境下, 四种模型的高程定位精度相近, 但三种基于信噪比的模型在水平定位精度方面表现明显优于高度角模型.

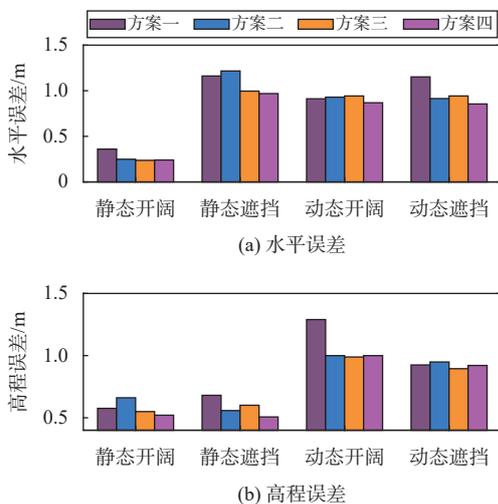


图 6 不同环境下不同随机模型水平和高程误差

4 结束语

本研究聚焦于智能手机多系统定位的随机模型, 针对现有模型未考虑基站信噪比的问题, 提出了基站信噪比联合卫星系统间综合定权随机模型, 并将其与高度角随机模型、信噪比随机模型以及信噪比联合高度角随机模型进行了详细比较与分析. 我们利用小米 8 智能手机, 在不同开阔和遮挡环境下, 进行了静态和动态 RTK 定位验证, 得出以下结论:

- 1) 小米 8 智能手机不同系统卫星观测值的伪距噪声差异较大, 相位噪声差异较小, BDS 和 GPS 伪距观测值精度明显优于 GLONASS.
- 2) 此前的研究已经证明信噪比模型在单点定位中胜过高度角模型, 本文使用小米 8 智能手机进行了 RTK 定位, 得出了相同的结论.
- 3) 本文提出的基站信噪比联合卫星系统间综合定权随机模型在开阔和遮挡环境下进行 RTK 定位验证. 结果表明, 采用此模型时手机 RTK 定位性能最优, 相比传统信噪比模型, 该随机模型分别在静态开阔、静态遮挡、动态开阔和动态遮挡下三维方向上的 RTK 定位精度分别整体提升 18.7%、18.3%、3.3% 和 4.6%.

参考文献

[1] 王楚极, 龙驰宇, 王锋, 等. 智能手机多频多系统实时动态的定位性能分析 [J]. 全球定位系统, 2021, 46(5): 10-16.

[2] 耿江辉, 常华, 郭将, 等. 面向城市复杂环境的 3 种多频多系统 GNSS 单点高精度定位方法及性能分析 [J]. 测绘学报, 2020, 49(1): 1-13.

[3] 赵硕, 秘金钟, 徐彦田, 等. 双频智能手机 GNSS 数据质量及定位精度分析 [J]. 测绘科学, 2020, 45(2): 22-28.

[4] 崔均烨, 宁一鹏, 米宏志, 等. 双频 Android 手机 GPS/BDS 伪距单点定位增强方法与性能评估 [J]. 导航定位与授时, 2022, 9(1): 126-133.

[5] WADA Y, HSU L T, GU Y L, et al. Optimization of 3D

- building models by GPS measurements[J]. *GPS solutions*, 2017, 21(1): 65-78. DOI: [10.1007/s10291-015-0504-y](https://doi.org/10.1007/s10291-015-0504-y)
- [6] LI M, LEI Z, LI W W, et al. Performance evaluation of single-frequency precise point positioning and its use in the android smartphone[J]. *Remote sensing*, 2021, 13(23): 4894-4894. DOI: [10.3390/rs13234894](https://doi.org/10.3390/rs13234894)
- [7] 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.
- [8] 伍劭实, 赵修斌, 庞春雷, 等. 载噪比加权的 BDS 单历元相对定位随机模型研究 [C]//第八届中国卫星导航学术年会, 2017: 5.
- [9] 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.
- [10] 肖青怀, 谷守周, 秘金钟, 等. 智能手机多普勒平滑伪距单点定位精度分析 [J]. 测绘科学, 2020, 45(7): 11-17.
- [11] 舒宝, 义琛, 王利, 等. 华为 P30 手机 GPS/BDS/GLONASS/Galileo 观测值随机模型优化及定位性能分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 2022, 42(12): 1222-1226.
- [12] LI Z S, WANG L, WANG N B, et al. Real-time gnss precise point positioning with smartphones for vehicle navigation[J]. *Satellite navigation*, 2022, 3(1): 19. DOI: [10.1186/s43020-022-00079-x](https://doi.org/10.1186/s43020-022-00079-x)
- [13] 冷宏宇, 秘金钟, 徐彦田, 等. 智能手机终端 RTK 定位性能分析 [J]. 测绘科学, 2020, 45(12): 15-21.
- [14] 袁良雄, 王浩, 申志恒. 基于扩展天线的智能手机 GNSS RTK 定位性能研究 [J]. 全球定位系统, 2023, 48(3): 77-84.
- [15] LIU J H, TU R, HAN J Q, et al. Estimability analysis of differential inter-system biases and differential inter-frequency biases for dual-frequency gps and bds combined RTK[J]. *Measurement science and technology*, 2020, 31(2): 025009. DOI: [10.1088/1361-6501/ab4844](https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab4844)
- [16] 王艺希, 秘金钟, 徐彦田, 等. 卡尔曼滤波方法的 BDS/GLONASS RTK 定位算法 [J]. 测绘科学, 2017, 42(12): 112-117.
- [17] 曾树林, 匡翠林. 智能手机 RTK 定位软件实现及应用试验 [J]. 全球定位系统, 2022, 47(5): 72-80.
- [18] 栗广才. 大众智能手机 GNSS 模糊度固定理论与方法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2021.
- [19] PAZIEWSKI J, FORTUNATO M, MAZZONI A, et al. An analysis of multi-gnss observations tracked by recent android smartphones and smartphone-only relative positioning results[J]. *Measurement*, 2021(175): 109162. DOI: [10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109162](https://doi.org/10.1016/J.MEASUREMENT.2021.109162)
- [20] YAMAWAKI A, MORITA K, IWANE M. An FPGA implementation of a DWT with 5/3 filter using semi-programmable hardware[C]//IEEE Asia Pacific Conference on Circuits & Systems, 2008:709. DOI: [10.1109/APCCAS.2008.4746122](https://doi.org/10.1109/APCCAS.2008.4746122)
- [21] 张明, 郭斐, 邵贺, 等. 单频非差相位观测值的周跳探测方法及其比较 [J]. 全球定位系统, 2009, 34(1): 10-14.
- [22] 戴振东, 张凯渊, 刘佩林, 等. 面向低成本 GNSS 接收机终端的周跳修复策略 [J]. 导航定位与授时, 2021, 8(6): 125-130.

作者简介

王尔申 (1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为北斗卫星导航, 航空电子技术. E-mail: wanges_2016@126.com

王珩 (1998—), 男, 研究生, 主要研究方向为智能手机高精度定位. E-mail: wh18841121030@163.com

张益泽 (1990—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为 GNSS 精密定位, GNSS 偏差分. E-mail: zhy-ize@163.com

Smartphone RTK positioning based on integrated weighting of GNSS base station signal-to-noise ratio and joint satellite system

WANG Ershen¹, WANG Heng^{1,2}, ZHANG Yize², CHENG Quanrun², TANG Wenjie², LEI Hong³

(1. *Shenyang University of Aeronautics and Astronautics, Shenyang 110136, China*; 2. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 3. *Key Laboratory of Aerospace Science and Technology of Electromagnetic Environmental Effects, Shenyang Aircraft Design Institute, Shenyang 110035, China*)

Abstract: With the continuous improvement of smartphone chip and antenna performance, high-precision positioning based on mobile phones has gradually attracted widespread attention from academia and

(下转第 93 页)

Improved algorithm for tree height extraction based on sparse and dense image matching with epipolar constraints

CAI Xiangyuan, CHEN Xiaotong, LI Ronghao, WEI Jiangnan, LI Shuai, ZHAO Hongying

(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*)

Abstract: Tree height is a crucial parameter for monitoring forest conditions and photogrammetry stands out as an essential method for tree height acquisition due to its low cost and flexibility. As a passive remote sensing approach, the traditional photogrammetric method often requires a substantial quantity of images with high overlap, which is associated with the sparsity of traditional image features. To enhance tree height extraction accuracy under limited image availability, a proposed approach combines sparse feature matching with dense pixel matching, by employing the epipolar constraint to filter outliers, dense and highly accurate matching results are obtained. The three-dimensional reconstruction algorithm is then applied to generate a point cloud representing the forest scene. This method demonstrates the capability to reconstruct the forest scene comprehensively and extract tree heights even with a small number of images. Comparison with results from LiDAR point clouds yields a correlation coefficient of 0.91 and a maximum error of 1.64 meters. Notably, the algorithm requires only a small number of overlapping images, indicating its potential in handling high-resolution satellite imagery.

Keywords: unmanned aerial vehicle; image matching; epipolar constraints; tree height extraction; individual tree segmentation

(上接第 72 页)

industry. Compared with single-point positioning, real-time kinematic (RTK) positioning usually shows higher positioning performance. However, there are still relatively few studies on the stochastic model of mobile phone RTK positioning. Therefore, this study takes Xiaomi 8 as an example to focus on the stochastic model of smartphones in a multi-system RTK positioning scenario. The research results show that different systems There are significant differences in satellite pseudorange noise, while the difference in phase noise is smaller. Based on this, this paper proposes a stochastic model of base station signal-to-noise ratio combined with comprehensive weighting between satellite systems, which is more efficient than the traditional signal-to-noise ratio model. The weight distribution between different systems was accurately considered. Static and kinematic experiments were conducted under open and occluded conditions. The results show that compared with the traditional signal-to-noise ratio model, the new model is RTK positioning accuracy in the three-dimensional direction under static openness, static occlusion, kinematic openness and kinematic occlusion has increased by 18.7%, 18.3%, 3.3% and 4.6% respectively.

Keywords: smartphones; stochastic model; signal-to-noise ratio; RTK positioning; positioning accuracy