



# Android 智能手机实时精密单点定位软件实现及精度分析

郭 斐<sup>1</sup> 吴维旺<sup>1</sup> 张小红<sup>1</sup> 刘万科<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 武汉大学测绘学院,湖北 武汉,430079

**摘 要:**随着智能手机的普及和卫星导航定位技术发展,导航定位已成为智能手机必不可少的功能之一。对华为(Huawei)和小米(Xiaomi)双频智能手机 Huawei Mate 20/30、Xiaomi 8 观测数据进行质量分析,提出了一套适用于手机精密单点定位(precise point positioning, PPP)的质量控制方案,开发了一款基于安卓(Android)平台的实时 PPP 应用程序。通过实验对比分析了单频与双频、实时与事后手机 PPP 的定位性能。结果表明, Xiaomi 8 和 Huawei Mate 20/30 手机单频 PPP 平面方向的定位精度均可达到 0.5~0.6 m,高程方向的定位精度为 1.0~2.0 m。相比于单频 PPP,双频 PPP 收敛后,其平面与高程方向的定位精度均有提高,且高程方向提升显著。实时与事后 PPP 在平面方向的定位精度相当,但在高程方向上,事后 PPP 较实时 PPP 的定位精度提升 20%~40%。

**关键词:**Android 智能手机;精密单点定位;随机模型;质量控制;精度分析

**中图分类号:**P228

**文献标志码:**A

随着智能手机的普及和全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)的发展,导航定位已经成为智能手机必不可少的功能,超过一半的手机应用程序需要访问位置信息。2016年起,谷歌公司在安卓(Android)N操作系统上开放了访问 GNSS 原始观测值的应用程序接口(application programming interface, API),这为开发者从智能手机中实时获取 GNSS 伪距、载波相位、多普勒等观测值提供了可能,从而进行高精度导航定位与授时。考虑到低成本和低功耗,大众智能手机普遍集成的是单频 GNSS 芯片。2018年5月,全球首款双频智能手机 Xiaomi 8 发布,其搭载了支持 L1/L5 波段的双频 GNSS 定位芯片,并取消了占空比(duty cycle)机制,引起了学界广泛关注<sup>[1-7]</sup>。随后,众多手机厂商也争相发布了具备双频定位功能的手机,如华为公司发布的 Huawei Mate 系列手机(Mate 20/30)、联想公司发布的 Lenovo Z6 手机等。双频 GNSS 芯片的搭载为智能手机进行精密单点定位(precise point positioning, PPP)创造了条件,也增加了手机在复杂环境下的适应性。

国内外众多学者对智能手机的数据质量和定位性能进行了评估。文献[8]指出,手机中存在的 duty cycle 机制导致相位观测数据不连续。文献[9]使用 Huawei P10 手机的相位变化量评估手机的相位观测值噪声,在 duty cycle 关闭的情况下,手机的测速精度可以达到厘米级。文献[10]对 Samsung 8、Huawei P10、Nexus 9 等智能手机的信噪比、伪距残差进行了分析,建立了相应的信噪比定权模型,同时分析了 duty cycle 机制下相位跟踪状态和设备运动状态的相关性,提出了一种考虑 duty cycle 的连续平滑定位算法。文献[11]对 Xiaomi 8 手机在郊区开阔和高楼林立场景下的信噪比和多路径进行了分析,与测地型接收机相比,手机信噪比值平均降低 5~12 dB;在多路径效应方面,欧盟伽利略(Galileo)系统较 GPS 卫星的多路径更小,且 L5 频率的多路径误差明显小于 L1 频率。在定位性能评估方面,文献[12]使用 Xiaomi 8 手机进行双频 PPP 和实时动态定位(real time kinematic, RTK)测试,其精度仅为米级。文献[13]在静态开阔的环境下使用 Xiaomi 8 手机进行静态 PPP,东、北、天方向定位

收稿日期:2020-10-29

项目资助:国家重点研发计划(2017YFB0503402, 2016YFB0501803);国家自然科学基金(41774034);武汉市科技计划项目(2020010601012185);中央高校基本科研业务专项资金(2042019kf0214)。

第一作者:郭斐,博士,教授,主要从事 GNSS 精密定位技术及其应用研究。fguo@sgg.whu.edu.cn

误差的均方根(root mean square, RMS)分别为0.50 m、0.47 m、0.56 m,静态模拟动态PPP 3个方向定位误差的RMS分别为2.20 m、2.32 m、2.03 m。文献[14]评估了Xiaomi 8手机分别在静态和动态场景下双频PPP的定位性能,结果表明,静态PPP收敛后的位置误差在东、北、天3个方向上的RMS分别为4.1 cm、21.8 cm和11.0 cm,但收敛到亚米级的时间长达3 h;对于动态PPP,由于卫星数较少,定位误差达到几米甚至几十米。

现有研究主要聚集于单一的某款智能手机,且大多数采用后处理算法,得到的定位性能差异较大。因此,本文拟对常见的双频智能手机Huawei Mate 20/30、Xiaomi 8,对比分析其数据质量,提出一套适用于手机PPP的质量控制方案,开发一款基于Android平台的实时PPP软件,并评估其定位性能。

## 1 智能手机实时PPP数学模型

### 1.1 函数模型

通过调用Android API的GNSS Clock类、GNSS Measurement类,可以获取智能手机的原始GNSS观测值,包括伪距、载波相位和多普勒观测值。目前,大部分智能手机的GNSS接收芯片仅提供GPS的L1单频点信号,少数智能手机如Huawei Mate 20/30、Xiaomi 8/9支持GPS、Galileo和日本准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)的L1/E1、L5/E5双频定位。对于单频PPP,常用的定位模型有半和模型和非差非组合模型。半和模型通过构造伪距和相位的组合观测值,虽然可以消除电离层延迟影响,但组合后相位观测值的噪声被放大。特别是对于智能手机,GNSS伪距观测值的噪声达到数米甚至数十米,严重影响半和模型的精度。为此,对于手机单频PPP,本文采用非差非组合模型,其观测方程为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} P_{r,1}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s + d_{r,1} - d_1^s) + T_r^s + I_{r,1}^s + \epsilon_{r,1}^s \\ \lambda_1 \cdot \varphi_{r,1}^s = \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda_1(\delta_{r,1} - \delta_1^s + N_{r,1}^s) + T_r^s - I_{r,1}^s + \xi_{r,1}^s \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{r,1}^s$ 和 $\varphi_{r,1}^s$ 分别为单频伪距和载波相位观测值; $\rho_r^s$ 表示测站 $r$ 至卫星 $s$ 的几何距离; $c$ 为光在真空中的传播速度; $dt_r$ 和 $dt^s$ 分别为接收机钟差和卫星钟差; $d_1^s$ 和 $d_{r,1}$ 分别伪距观测值在卫星端和接收机端的硬件延迟; $T_r^s$ 为对流层延迟; $I_{r,1}^s$ 为L1

频率的电离层延迟; $N_{r,1}^s$ 为相位模糊度; $\delta_1^s$ 和 $\delta_{r,1}$ 分别为载波相位在卫星端和接收机端的硬件延迟; $\lambda_1$ 为L1载波的波长; $\epsilon_{r,1}^s$ 和 $\xi_{r,1}^s$ 分别表示伪距和相位观测值中测量噪声、多路径以及未模型化的误差总和。

对于L1/E1、L5/E5a双频PPP,采用双频无电离层组合模型,其观测方程为<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} P_{r,IF}^s = \alpha P_{r,1}^s - \beta P_{r,5}^s = \\ \rho_r^s + c(dt_r - dt^s + d_{r,IF} - d_{IF}^s) + T_r^s + \epsilon_{r,IF}^s \\ \lambda_{IF} \cdot \varphi_{r,IF}^s = \alpha \lambda_1 \cdot \varphi_{r,1}^s - \beta \lambda_5 \cdot \varphi_{r,5}^s = \\ \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + \lambda_{IF}(\delta_{r,IF} - \delta_{IF}^s + N_{r,IF}^s) + T_r^s + \xi_{r,IF}^s \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$$\alpha = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_5^2}, \beta = \frac{f_5^2}{f_1^2 - f_5^2} \quad (3)$$

$P_{r,IF}^s$ 、 $\varphi_{r,IF}^s$ 分别为 $f_1$ 和 $f_5$ 频率的无电离层(ionosphere-free, IF)组合伪距和相位观测值。

在误差处理方面,通过国际GNSS服务组织(International GNSS Service, IGS)实时播发的状态空间表达(state space representation, SSR)信息修正广播星历轨道和钟差。对于单频PPP中的电离层延迟误差,采用预报的全球电离层格网模型进行改正,其精度约为0.3 m。对流层延迟分量采用萨斯塔莫宁(Saastamoinen)模型改正,湿分量附加参数进行估计。接收机端的硬件延迟偏差可被接收机钟差吸收,而卫星端的硬件延迟偏差可被模糊度参数吸收,故在PPP浮点解时可不顾及硬件延迟偏差。

### 1.2 随机模型

在GNSS数据处理中,常用的随机模型有卫星高度角模型、信噪比模型、方差分量估计模型。基于方差分量估计的随机模型,其实时性较差、无法满足实时PPP的要求。信噪比是反映信号接收质量的重要指标之一,其定义为接收信号的功率与接收机噪声的功率谱密度的比值。文献[3]证实了智能手机的伪距单差残差与卫星高度角弱相关,但与信噪比强相关。因此,使用信噪比模型更能反映手机GNSS观测值的特征<sup>[3,7]</sup>。信噪比随机模型可表示为:

$$\sigma = \sqrt{a + b \times 10^{-\frac{C/N_0}{10}}} \quad (4)$$

式中, $\sigma$ 为观测噪声,可由伪距残差计算得到; $C/N_0$ 为信噪比观测值; $a$ 和 $b$ 为模型系数,可根据信噪比和伪距残差按式(4)拟合得到。对于不同

类型的手机 GNSS 观测值,其载波相位的噪声差异较小,通常介于 mm 至 cm 级之间,而伪距观测值的噪声水平差异较大,这就需要对每款手机进行事先标定。表 1 为 Xiaomi 8 和 Huawei Mate 20 各系统 L1 和 L5 频率的随机模型拟合系数。

表 1 Xiaomi 8 和 Huawei Mate 20 的随机模型拟合系数

Tab.1 Fitting Coefficients of Stochastic Model for Xiaomi 8 and Huawei Mate 20

系统	频率	Xiaomi 8		Huawei Mate 20	
		$a/\text{m}^2$	$b/\text{m}^2\text{Hz}$	$a/\text{m}^2$	$b/\text{m}^2\text{Hz}$
G	L1	17.22	$104.70^2$	10.42	$249.86^2$
R	L1	42.16	$228.40^2$	72.78	$513.81^2$
E	L1	17.25	$75.90^2$	6.81	$76.87^2$
C	L1	7.69	$64.85^2$	3.10	$117.56^2$
J	L1	4.17	$68.58^2$	8.08	$88.60^2$
G	L5	1.43	$36.69^2$	4.41	$34.66^2$
E	L5	1.01	$26.01^2$	2.12	$35.98^2$
J	L5	1.06	$27.65^2$	1.29	$47.88^2$

注: G、R、E、C 和 J 依次代表 GPS、GLONASS、Galileo、BDS 和 QZSS 系统

### 1.3 质量控制

由于智能手机通常采用体积小、低成本、低功耗、高灵敏度的线性极化天线,而 GNSS 信号衰减、非视距传播和多路径干扰更易产生粗差和周跳,严重影响手机定位的精度。本文采用数据探测与抗差估计结合的质量控制方案,从卫星高度角、信噪比、验前与验后残差等方面剔除伪距观测值中的粗差<sup>[15-17]</sup>。利用 Android API 中提供的载波相位跟踪状态指示参数(accumulated delta range state, ADRS)和相位历元差分法(time difference carrier phase, TDCP)探测相位周跳,其流程如图 1 所示。具体步骤如下:

1) 采用 ADRS 和多普勒较差法(相位导出的多普勒与实际多普勒值之差)对当前历元的相位观测值进行周跳初步探测。当 ADRS 被标识为 4 时,表示相位跟踪失锁;当多普勒较差小于给定阈值 0.75 m 时,认为未发生周跳,否则将其标记为周跳。

2) 选取未被标定为周跳的  $n$  个相位观测值,构造历元差分模型:

$$\lambda \cdot \Delta \varphi = \Delta \rho - c \cdot \Delta dt^* + c \cdot \Delta dt_r + \Delta T + \Delta I + \epsilon_{\Delta L} \quad (5)$$

式中,  $\Delta$  为历元间单差算子。当历元间隔较短时,  $\Delta I$  和  $\Delta T$  可近似为零,采用最小二乘方法估计载体位置变化量及钟差变化量。

3) 计算各卫星相位观测值的验后残差及单位权中误差。若最大验后残差或单位权中误差超过设定阈值,则认为最大验后残差的观测值发生周跳;将其剔除后重新进行最小二乘解算,直到所有的验后残差都小于设定阈值。

4) 保留当前历元无周跳的相位观测值,进入下一历元的周跳探测,重复步骤 2) 和步骤 3),直至结束。

需要说明的是,最小二乘抵抗多粗差的能力较弱,当周跳观测值超过全部观测值的 1/3 时,相位历元差分法探测周跳的成功率较低。因此,对于  $n$  个有效的相位历元差分方程,当连续  $n/3$  次剔除最大残差时,则认为周跳探测失败。

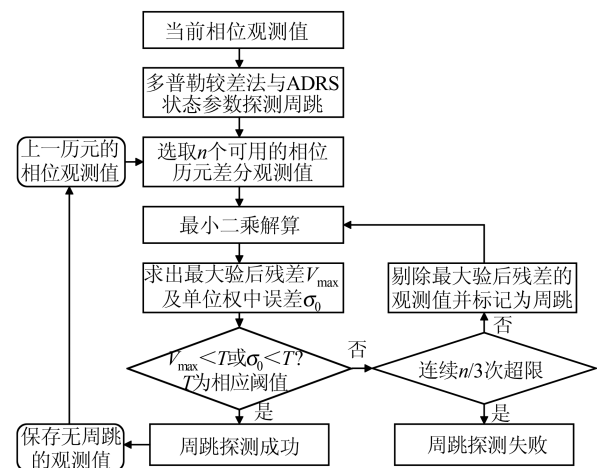


图 1 联合 ADRS 和 TDCP 的周跳探测流程

Fig.1 Flowchat of Cycle Slip Detection Combined with ADRS and TDCP

## 2 基于 Android 的实时 PPP 架构

### 2.1 开发环境搭建

Android 是一款主要面向移动终端的开源操作系统,其底层基于 Linux 操作系统,支持丰富的硬件驱动开发,涵盖多元化的硬件配置和无线通信功能,广泛用于各类交互平台。Android 系统的经典架构分为 4 层,从下往上分别为 Linux 内核层、C/C++ 本地系统库和 Android 运行时环境、应用程序框架层、应用程序层。在底层的 Linux 内核层中,Android 以虚拟机(Android run time, ART)的形式最终调用底层的 Linux 内核以执行命令。当设备具有特定的硬件设备支持时,其内核层还涵盖有硬件抽象层。当上层请求访问设备硬件层时,系统会为该硬件加载相应的库模块。第 2 层为系统库和 Android 运行时,系统库主要负责提供连接应用框架层和内核层的方法库,

Android运行时则包括核心库和ART,应用在运行时都拥有自己的ART实例,ART的主要功能包括预编译和及时编译、优化的资源回收、调试支持等。第3层为应用程序框架层,其提供了各种基本的API,例如Activity、Service、Notification等组件,方便开发人员实现一些基本功能,封装成接口给上层调用。最上层为Android应用程序层,其主要包括Android原生应用以及第三方应用,为开发的应用所在层级。

Android系统的用户接口(user interface, UI)层是通过Java语言进行封装的,而底层则是基于C/C++语言。软件开发设计可以充分结合Java语言库丰富、开发效率高以及C/C++语言开源算法丰富、运行效率高的优点,交互操作部分使用Java语言编写,嵌入的PPP算法则使用C/C++语言编写。通过Java本地开发接口,使Java和C/C++编写的程序可以相互调用。因此,开发前需要配置Android Java和C的开发环境,具体如下:

### 1)Java开发工具集配置

Java开发工具包(Java development kit, JDK)是Java开发的核心,由Java运行环境、Java工具集、Java基础类库构成,为应用开发者提供了基本的开发环境和开发工具。在Windows系统上进行开发,需要配置JDK的系统环境变量,其配置如表2所示。在完成JDK配置后,继续安装Android集成开发环境(integrated development environment, IDE),软件开发使用的IDE为Android Studio 3.3版本。

表2 Windows平台中JDK的系统环境变量配置

Tab.2 System Environment Variable Configuration of JDK in Windows

系统变量	配置内容
JAVA_HOME	JDK本地安装路径
CLASSPATH	%JAVA_HOME%\lib\dt.jar;%JAVA_HOME%\lib\tools.jar
Path	%JAVA_HOME%\bin;%JAVA_HOME%\jre\bin

### 2)Android开发工具集配置

Android软件开发工具包(software development kit, SDK)是开发Android应用必备的工具集,其为开发者提供了在对应平台上的开发组件。Android SDK包括Android ART和Android开发工具插件(Android development tools,

ADT)以及一些开发调试、应用程序包(Android application package, APK)打包、ART管理的工具。Android Studio的设置选项包含有Android SDK的下载页面,根据应用开发所需要适配的API等级选择配置对应的SDK平台,例如本文采用的是Android 9(API 28)的SDK版本。

由于软件涉及到C/C++与Java程序的交互,还需要进一步配置Android本地开发工具集(native development kit, NDK),NDK包含快速开发C/C++动态链接库和将其合并打包到APK的工具。NDK可以通过Android Studio自带的Android SDK Manager进行自动下载和配置。

## 2.2 实时PPP架构与工作原理

开发的智能手机实时PPP软件整体架构与工作原理如图2所示,主要分为3个部分——用户交互UI界面、外部数据的传输、软件后台服务。交互UI包括用户配置、结果显示、数据记录、地图显示,其主要负责定位的参数配置以及数据的可视化。外部数据流的传输部分包括NTRIP(networked transport of RTCM via internet protocol)传输的RTCM(radio technical commission for maritime services)格式的广播星历和SSR改正数据以及调用Android应用框架API获得的GNSS观测数据,对于单频PPP定位,可事先下载预报的全球电离层格网模型。

图2为智能手机实时PPP软件的架构及工作原理,红色虚线框表示的是嵌入PPP算法的后台服务部分,其主要负责对RTCM格式的数据流进行解码,对获得的观测数据加工生成原始观测值,并将数据处理核心解算的位置反馈给UI界面,调用百度地图API实现定位结果的地图可视化。

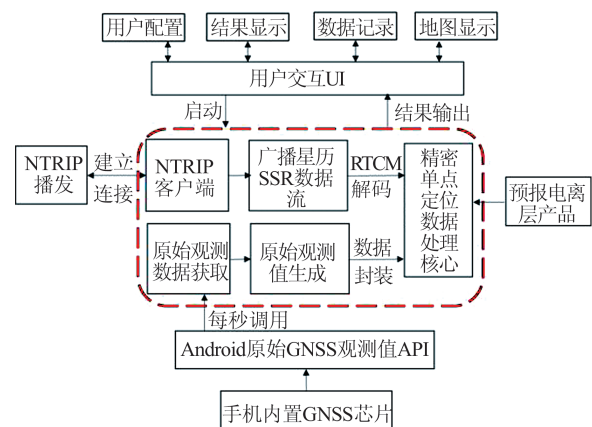


图2 智能手机实时PPP软件的架构及工作原理  
Fig.2 Flowchart and Basic Principle of Smartphone Real-Time PPP Software

3 手机定位实验与结果分析

3.1 实验数据描述

本文采用 3 款双频智能手机 Xiaomi 8、Huawei Mate 20、Huawei Mate 30 进行实验分析。表 3 给出了这 3 款手机所搭载的 GNSS 芯片型号类型及相关配置。其中,Xiaomi 8 搭载的是博通公司

生产的 BCM47755 芯片组,而 Huawei Mate 20/30 搭载的是厂商自主研发的海思芯片组。3 款手机均能跟踪全 GNSS 星座,并且能在 GPS、Galileo、QZSS 星座上提供 L1/L5 频率的双频观测值。此外,3 款手机的内置系统已经取消了 duty cycle 机制,允许输出连续跟踪的相位观测值。

表 3 智能手机内置的 GNSS 芯片型号及配置  
Tab.3 Type and Configuration of GNSS Chip Built in Smartphones

手机类型	芯片型号	提供 L1 频率的系统	提供 L5 频率的系统	duty cycle 机制
Xiaomi 8	BCM47755	G/R/C/E/J	G/E/J	无
Huawei Mate 20	海思芯片	G/R/C/E/J	G/E/J	无
Huawei Mate 30	海思芯片	G/R/C/E/J	G/E/J	无

注:G、R、C、E 和 J 分别代表 GPS、GLONASS、BDS、Galileo 和 QZSS 系统

采用静态模拟动态的方式验证算法的正确性,两次静态实验的 GNSS 数据采集场景如图 3 所示。实验 A 采集于湖北省武汉市某实验大楼楼顶,实验手机为 Xiaomi 8 和 Huawei Mate 20,测量时手机正面朝上固定于观测台上。在手机旁架设有 NovAtel-704-WB 天线,其连接的是 Septentrio PolaRx 5S 测地型接收机,用于计算手机的坐标参考真值。两台手机至 NovAtel 天线的距离已事先量取,并进行了相应的距离改正。此外,在手机附近的观测墩上设有观测站,其采用的是 Trimble Zephyr 3 天线,接收机类型为 Septentrio PolaRx 5,将其作为基站,基站的位置精确已知。实验 B 采集于海南省海口市某居民区楼顶,实验手机为 Xiaomi 8 和 Huawei Mate 30,两台手机正面朝上放置。两次实验的观测时长均为 4 h,采样率为 1 Hz。

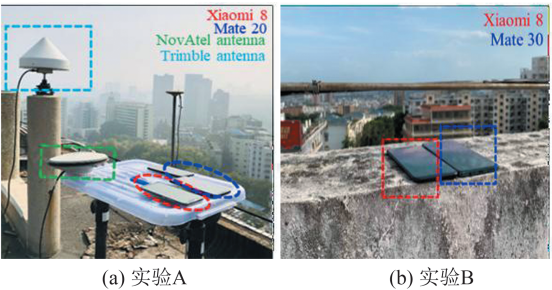


图 3 两次静态实验的手机布局及观测环境  
Fig.3 Smartphones Layout and Observation Environment of Two Static Experiments

3.2 卫星可视性分析

图 4 和图 5 分别给出了两次实验中不同手机在 L1 和 L5 波段所观测到的卫星总数。实验 A 中 Xiaomi 8 和 Huawei Mate 20 对 L1 波段的平均可

见星数分别为 33 颗和 27 颗,明显少于同时段测地型接收机 Septentrio 观测的卫星数。对于 L5 波段的卫星观测情况,由于播发 L5 信号的卫星本身数量较少,因此 Huawei Mate 20 和 Xiaomi 8 在 L5 波段所跟踪的平均卫星数分别仅为 14 颗和 8 颗。实验 A 和实验 B 均表明,在 L1 波段,Huawei Mate 系列手机比 Xiaomi 8 的平均观测卫星数多 5~8 颗,而在 L5 波段的平均卫星数多 4~5 颗。

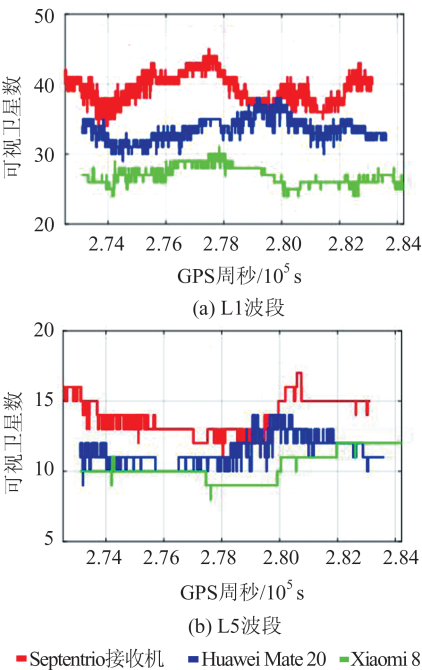


图 4 实验 A 中手机跟踪的 L1 波段和 L5 波段的  
可视卫星数  
Fig.4 Visible Satellite Numbers of L1 and L5 Bands Tracked by Smartphones in Experiment A

3.3 单频与双频 PPP 结果

图 6~8 给出了 3 组双频和单频 PPP 算例,包

括可用卫星数(Sat)、定位精度因子(position dilution of precision, PDOP)和定位误差时序,对应的定位精度统计如表4所示。从图6~8中不难发现,单频PPP可用的卫星数明显多于双频PPP,且对应的PDOP值也相对更小;PPP定位误差整体上呈现随时间累积而减小并趋于平稳的趋势。

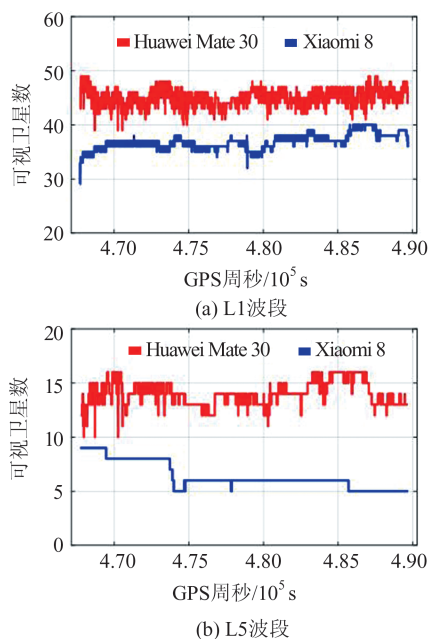


图5 实验B中手机跟踪的L1波段和L5波段的  
可视卫星数

Fig.5 Visible Satellite Numbers of L1 and L5 Bands  
Tracked by Smartphones in Experiment B

由于同时跟踪L1、L5双频信号的卫星数较少,因此双频PPP的收敛速度要慢于单频PPP。以实验A中的Xiaomi 8手机为例,其单频和双频PPP平面方向收敛到1 m以内的时间分别为1 700 s和3 000 s左右。而在定位精度方面,双频PPP的结果则略优于单频PPP,收敛后双频和单频PPP在东、北、天方向上的定位误差RMS分别为0.36 m、0.28 m、0.16 m和0.46 m、0.56 m、2.04 m。

对于重复性分析,实验B中Xiaomi 8双频PPP收敛后,其东、北、天3个方向的标准差(standard deviation, STD)在0.2 m左右,单频和双频PPP的坐标重复性相当,收敛时间均在1 500 s左右。对于Huawei Mate 30,尽管其观测到的卫星数要明显多于Xiaomi 8,但其用于解算的可用卫星数相当,主要原因是Huawei Mate 30在质量控制中剔除了较多发生粗差和周跳的卫星。因此,Huawei Mate 30单频和双频PPP的重复性精度比较差,其收敛的时间也比较长。

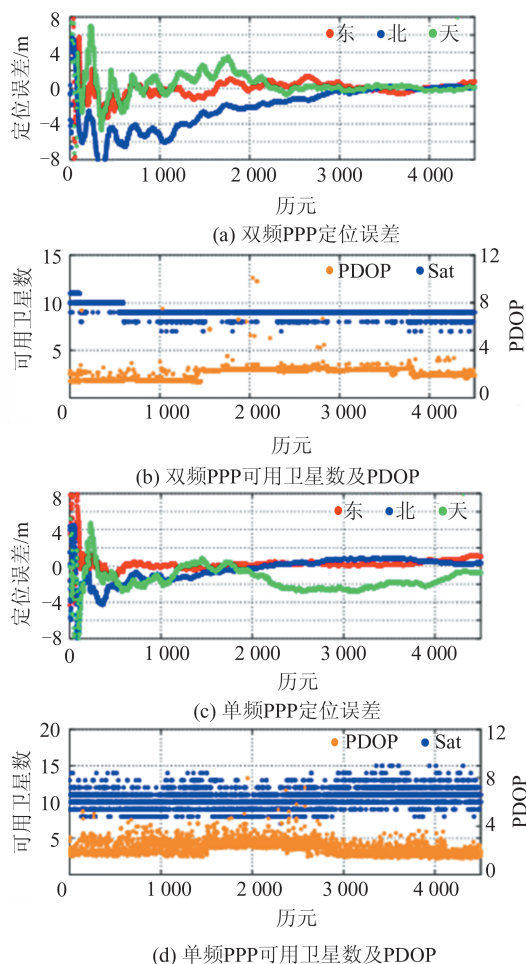


图6 实验A中Xiaomi 8双频和单频PPP的定位误差、  
可用卫星数及PDOP

Fig.6 Positioning Error, Available Satellites and  
PDOP of Xiaomi 8 Under Dual-Frequency PPP and  
Single-Frequency PPP in Experiment A

### 3.4 实时与事后PPP结果

为了满足时效性要求,实时PPP一般采用预报的轨道与钟差改正数以及预报的电离层模型或产品。后处理PPP(事后PPP)则可以采用最终的精密星历和精密钟差以及实测电离层模型,以提高PPP定位精度。本节以单频PPP为例,对比分析了实时与事后PPP的精度。图9给出了Xiaomi 8和Huawei Mate 20实时和事后PPP的定位结果,相应的定位误差RMS统计结果列于表5。

从图9中可以看出,由实时PPP和事后PPP获得的定位结果在平面方向上基本一致,即使用实时或事后精密轨道、钟差及电离层产品对平面方向上的定位精度影响较小,其差值仅在0.1 m左右;但在高程方向上,两者的坐标差值达到0.3~0.7 m,这主要是因为采用的预报电离层格网模型相对事后的精度较差,而电离层延迟对定位的影响主要反映在天顶方向上。

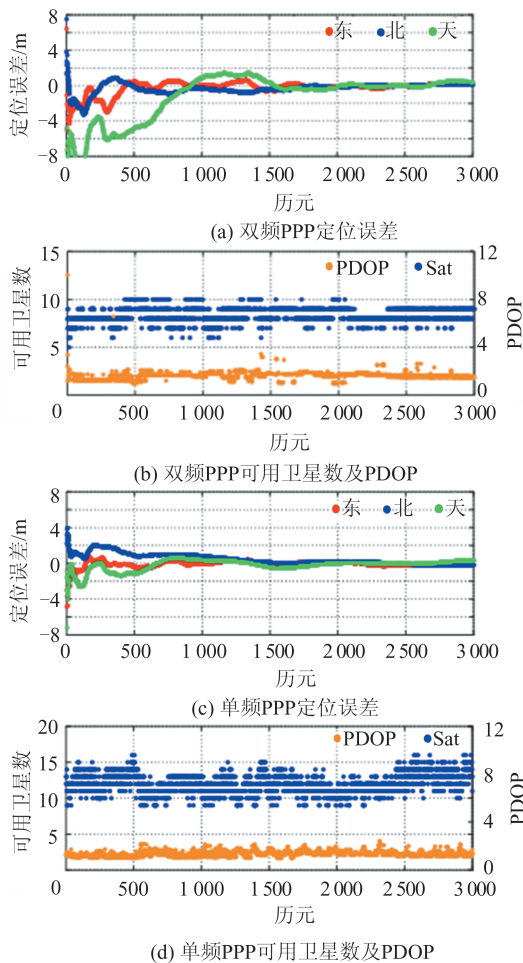


图7 实验B中Xiaomi 8双频和单频PPP的定位误差、可用卫星数及PDOP

Fig.7 Positioning Error, Available Satellites and PDOP of Xiaomi 8 Under Dual-Frequency PPP and Single-Frequency PPP in Experiment B

## 4 结 语

随着智能手机的普及和全球导航卫星系统的发展,导航定位已成为智能手机不可或缺的功能之一,大众对智能手机的高精度定位需求也越来越高。从2016年起,开发者可通过谷歌Android应用程序接口获得GNSS原始观测数据。Android 9.0及以上版本提供了关闭占空比的选项,这为智能手机的精密单点定位创造了有利条件。本文基于Huawei Mate 20/30和Xiaomi 8三款双频智能手机的实测GNSS观测数据,建立了单、双频PPP函数模型和随机模型,提出了一种适用于智能手机的PPP质量控制方案。在此基础上,开发了一款实时PPP应用软件。该软件实现了输入数据源接收和转换、实时定位、数据记录、结果可视化等功能,具备实时和事后处理与分析能力。设计实验对比分析了单频与双频、实

时与事后PPP的定位性能。结果表明,Xiaomi 8和Huawei Mate 20/30手机单频PPP的定位精度在平面和高程方向上分别约为0.5~0.6 m和1.0~2.0 m;相较于单频PPP,双频PPP精度在高程方向上虽有显著改善,但受限于可用的双频卫星数较少,收敛时间明显更长。相比于实时PPP,后处理PPP的定位精度在高程方向改善幅度达到20%~40%。智能手机普遍使用低成本的线性极化天线,在城市复杂环境下更容易受到粗差、周跳和多路径影响,联合GNSS、MEMS等多传感器提升手机定位性能是未来的研究重点。

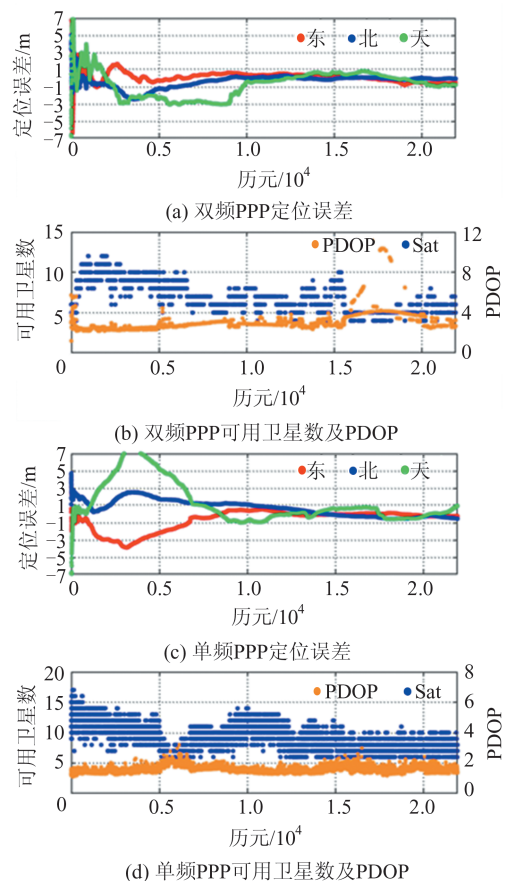


图8 实验B中Huawei Mate 30双频和单频PPP的定位误差、可用卫星数及PDOP

Fig.8 Positioning Error, Available Satellites and PDOP of Huawei Mate 30 Under Dual-Frequency PPP and Single-Frequency PPP in Experiment B

表4 双频和单频PPP精度统计/m

Tab.4 Accuracy Statistics of Dual- and Single-Frequency PPP/m

实验组	精度指标	手机	双频 PPP			单频 PPP		
			东	北	天	东	北	天
实验 A	RMS	Xiaomi 8	0.36	0.28	0.16	0.46	0.56	2.04
		Xiaomi 8	0.25	0.14	0.28	0.18	0.24	0.24
实验 B	STD	Huawei Mate 30	0.42	0.32	0.66	0.23	0.64	0.84

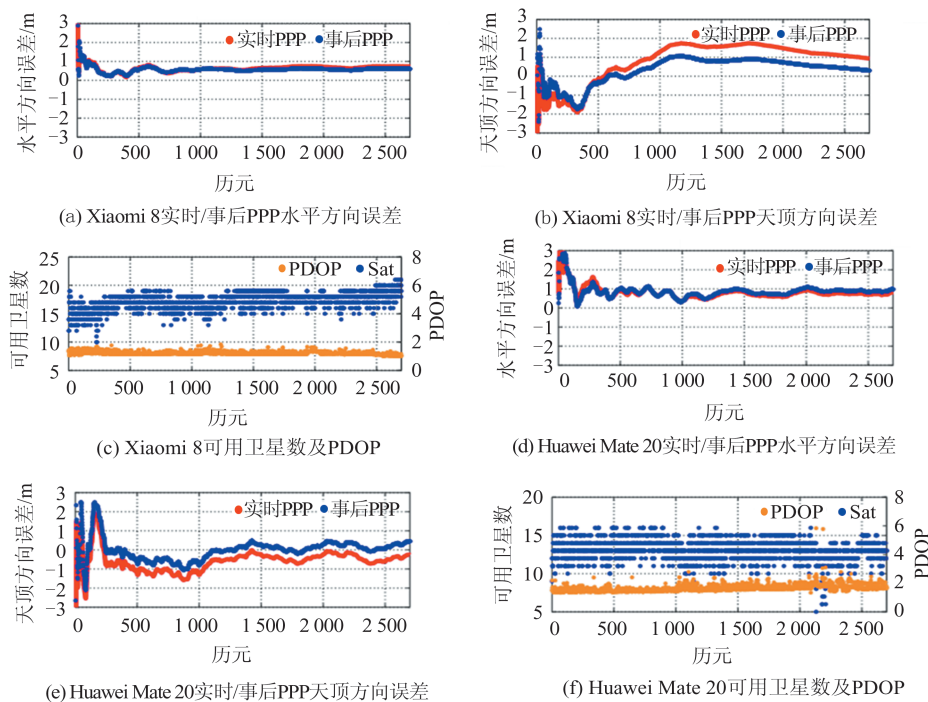


图9 Xiaomi 8和Huawei Mate 20实时和事后单频PPP的定位误差、可用卫星数及PDOP

Fig.9 Positioning Error, Available Satellites and PDOP of Real-Time and Post-Processing PPP with Single-Frequency for Smartphones of Xiaomi 8 and Huawei Mate 20

表5 实时和事后单频PPP精度统计(RMS)/m

Tab.5 Accuracy Statistics (RMS) of Real-Time and Post-Processing PPP with Single-Frequency/m

方向	Xiaomi 8		Huawei Mate 20	
	实时 PPP	事后 PPP	实时 PPP	事后 PPP
平面	0.62	0.53	0.76	0.84
高程	1.86	1.15	1.23	0.98

## 参 考 文 献

- [1] Zhang X, Tao X, Zhu F, et al. Quality Assessment of GNSS Observations from an Android N Smartphone and Positioning Performance Analysis Using Time-Differenced Filtering Approach [J]. *GPS Solutions*, 2018, 22(3): 70
- [2] 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): 1 749-1 756 (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): 1 749-1 756)
- [3] Shi Xiang. Continuous Smoothing Positioning Algorithm Based on GNSS Observations of Smartphones [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019 (史翔. 基于智能手机 GNSS 观测值的连续平滑定位算法 [D]. 武汉: 武汉大学, 2019)
- [4] Aggrey J, Bisnath S, Naciri N, et al. Use of PPP Processing for Next-generation Smartphone GNSS Chips: Key Benefits and Challenges [C]. The 32nd International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2019), Miami, Florida, USA, 2019
- [5] Chen B, Gao C, Liu Y, et al. Real-Time Precise Point Positioning with a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2 835
- [6] Håkansson M. Characterization of GNSS Observations from a Nexus 9 Android Tablet [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(1): 21
- [7] Paziewski J, Sieradzki R, Baryla R. Signal Characterization and Assessment of Code GNSS Positioning with Low-Power Consumption Smartphones [J]. *GPS Solutions*, 2019, 23(4): 98
- [8] Riley S, Lentz W, Clare A. On the Path to Precision-Observations with Android GNSS Observables [C]. The 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017), Portland, Oregon, USA, 2017
- [9] Pirazzi G, Mazzoni A, Biagi L, et al. Preliminary Performance Analysis with a GPS+Galileo Enabled Chipset Embedded in a Smartphone [C]. The 30th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+

- 2017), Portland, Oregon, USA, 2017
- [10] Liu W, 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): 2 358-2 377
- [11] Robustelli U, Baiocchi V, Pugliano G. Assessment of Dual Frequency GNSS Observations from a Xiaomi Mi 8 Android Smartphone and Positioning Performance Analysis [J]. *Electronics*, 2019, 8(1): 91
- [12] 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]. European Navigation Conference (ENC), Warsaw, Poland, 2019
- [13] Elmezayen A G, El-Rabbany A. Precise Point Positioning Using World's First Dual-Frequency GPS/Galileo Smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(11): 2 593
- [14] Wu Q, Sun M, Zhou C, et al. Precise Point Positioning Using Dual-Frequency GNSS Observations on Smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(9): 2 189
- [15] Guo Fei. Theory and Method of Quality Control and Quality Analysis for Precise Point Positioning [D]. Wuhan: Wuhan University, 2013 (郭斐. GPS 精密单点定位质量控制与分析的相关理论和方法研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2013)
- [16] 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 (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)
- [17] Zou Xuan, Li Zongnan, Chen Liang, et al. A New Cycle Slip Detection and Repair Method Based on Epoch Difference for a Single-Frequency GNSS Receiver [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(10): 1 406-1 410 (邹璇, 李宗楠, 陈亮, 等. 一种历元间差分单站单频周跳探测与修复方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2017, 42(10): 1 406-1 410)

## Realization and Precision Analysis of Real-Time Precise Point Positioning with Android Smartphones

GUO Fei<sup>1</sup> WU Weirwang<sup>1</sup> ZHANG Xiaohong<sup>1</sup> LIU Wanke<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China

**Abstract: Objectives:** With the popularization of smartphones and the evolution of global navigation satellite systems (GNSS), navigation contributes as an indispensable function for smartphones, and the demand of high-precision positioning for mass-market smartphones is becoming higher. From 2016, developers can obtain GNSS raw observations through Google Android application programming interface (API). Android 9.0 and above versions, provide the option to turn off the duty cycle, which makes it possible for smartphones to conduct precise point positioning (PPP). **Methods:** This paper conducts quality analysis of the GNSS observations for several common-used dual-frequency smartphones, Huawei Mate 20/30 and Xiaomi 8, and propose a set of quality control schemes that is suitable for smartphone PPP. Gross errors can be removed by data detection according to satellite elevation, signal-to-noise ratio, pre-residuals, etc., while cycle slips can be detected by the accumulated delta range state (ADRS) identifiers as well as the time difference carrier phase (TDCP) observations. A real-time PPP application based on Android platform was developed. It supports for single- and dual-frequency, real-time and post-processing PPP. To verify the performance of PPP with smartphones, several field experiments were performed with different smartphones in different scenarios. **Results:** Field results show that: (1) The pseudorange quality of Xiaomi 8 and Huawei Mate 20 are similar, while the carrier phase quality of Huawei Mate 20/30 is significantly worse than Xiao-

mi 8. (2) The ADRS identifier of Xiaomi 8 can better identify the cycle slip, while it is difficult for Huawei Mate 20/30 to directly determine the cycle slips through the ADRS identifier. By combining the ADRS and TDCP can detect most of cycle slips. (3) The positioning accuracy of single-frequency PPP for Xiaomi 8 and Huawei Mate 20/30 reach 0.5-0.6 m in horizontal, and 1.0-2.0 m in vertical. The positioning accuracy of dual-frequency PPP is better than that of single-frequency PPP after convergence, especially in the vertical direction. (4) For the real-time and post-processing PPP, they both have a similar positioning accuracy in the horizontal components, while the positioning accuracy of post-processing PPP in the vertical direction is higher than that of real-time PPP by 20%-40%. **Conclusions:** An accuracy of a few decimeters can be achieved for real-time PPP with Android smartphones. Different from geodetic GNSS receivers, the widely-used smartphones use low-cost linearly-polarized antennas. In addition, smartphones are often used in urban complex scenarios, thus the GNSS data they collect have more gross errors, cycle slips and multipath effects. Further study should focus on the multipath mitigation, multi-frequency and multi-GNSS combination, and fusion with other sensors such as gyroscopes, magnetometers, barometers, bluetooth, Wi-Fi, etc. to realize continuous and seamless positioning both indoor and outdoor.

**Key words:** Android smartphones; precise point positioning; stochastic model; quality control; precision analysis

**First author:** GUO Fei, PhD, professor, specializes in GNSS precise positioning and its application. E-mail: fguo@sgg.whu.edu.cn

**Foundation support:** The National Key Research and Development Program of China(2017YFB0503402, 2016YFB0501803); the National Natural Science Foundation of China(41774034); Wuhan Science and Technology Project(2020010601012185); Fundamental Research Funds for the Central Universities(2042019kf0214).

**引文格式:** 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. DOI: 10.13203/j.whugis20200527(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. DOI: 10.13203/j.whugis20200527)