

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2019.03.001

# 面向 Android 智能终端的多模 GNSS 实时非差精密定位

汪亮<sup>1,2</sup>, 李子申<sup>1</sup>, 周凯<sup>1</sup>, 张少添<sup>1,2</sup>, 袁洪<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** Android 操作系统中全球导航卫星系统(GNSS)原始数据的开放为大众高精度位置服务的应用带来了重要机遇。在对 Android 系统 GNSS 原始数据特性分析的基础上, 利用智能终端 GNSS 原始数据实现了实时非差精密定位, 研制了面向 Android 平台的实时精密单点定位(PPP)软件 PPPAnd, 并开展了实际环境下的定位测试。测试结果表明: 基于 Android 终端 GNSS 原始数据的实时静态伪距单点定位精度(RMS)为 1.16m(水平方向)和 1.51m(垂直方向), 较其自身位置速度和时间(PVT)解算结果分别提高了 70%和 76%; 实时静态精密单点定位解算结果的精度(RMS)为 0.62m(水平方向)和 0.66m(垂直方向), 较 PVT 结果分别提高了 87%和 82%, 精度收敛至 1m 以内所需时间约 8min, 并且收敛后的精度可达亚米级; 城市环境中车载实时动态精密单点定位的水平精度和垂直精度(RMS)分别约为 1.32m 和 0.81m, 较 PVT 结果分别提高了 39%和 65%。

**关键词:** Android 智能终端; 多模 GNSS; 非差精密定位; 实时精密单点定位

中图分类号: P228.4

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



文章编号: 2095-8110(2019)03-0001-10

## Multi-GNSS Real-time Un-differenced Precise Positioning for Android Smart Devices

WANG Liang<sup>1,2</sup>, LI Zi-shen<sup>1</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, ZHANG Shao-tian<sup>1,2</sup>, YUAN Hong<sup>1</sup>

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The availability of GNSS raw measurements from mass-market smart devices with Android operator system opens the door to more advanced GNSS positioning techniques for high-precision location-based services. For the purpose of improving the positioning accuracy of smart devices, real-time un-differenced precise positioning with Android GNSS raw measurement is investigated in this paper. First, the basic characters of the Android GNSS measurements are analyzed. Following this, a real-time un-differenced precise positioning method with Android GNSS raw measurements is implemented, and a real-time precise point positioning (PPP) software called PPPAnd is developed based on the Android platform. Finally, the real-time positioning performance is validated with real data. Numerical results show that the RMS (root mean square) value of real-time single point positioning errors with Android raw GNSS measurement is 1.16m and 1.51m in the horizontal and vertical components, respectively; compared with the PVT (Position Velocity and Time) solutions of Android device, the improvements of accuracy are 70% for the horizontal

收稿日期: 2019-03-01; 修订日期: 2019-04-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0501905)

作者简介: 汪亮(1989-), 男, 博士研究生, 主要从事 GNSS 精密定位方面的研究。E-mail: wangliang115@mails.ucas.ac.cn

通信作者: 李子申(1984-), 男, 副研究员, 主要从事 GNSS 电离层与精密定位方面的研究。E-mail: lizishen@aircas.ac.cn

component and 76% for the vertical component. For real-time precise point positioning in static mode, the positioning accuracies (RMS) in the horizontal and vertical components are 0.62m and 0.66m, respectively, with an improvement of 88% and 82% for the corresponding component compared with the PVT solutions. In addition, the required convergence time for the accuracy level of 1.0m is about 8min, and once it converged the positioning accuracy of static PPP can reach to sub-meter level. For the vehicle-based real-time kinematic precise point positioning in urban environment, the positioning accuracies are 1.32m in the horizontal component and 0.81m in the vertical component and the corresponding improvement of positioning accuracy relative to the PVT solutions is 39% and 65%, respectively.

**Key words:** Android smart devices; Multi-Global Navigation Satellite System (Multi-GNSS); Undifferenced precise positioning; Real-time precise point positioning(PPP)

## 0 引言

基于智能终端的高精度定位是未来实现大众高精度位置服务的重要手段。在硬件设备允许的情况下,早期的 Android 系统支持输出经度、纬度和高程等位置信息,并提供相关的应用程序开发接口(Application Programming Interface, API)。2016年5月18日,Android 7.0(Nougat)系统公开亮相于 Google I/O 开发者大会,Google 宣布自 Android 7.0(API level 24)系统开始,新增了输出全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System,GNSS)的原始观测值的 API—Android Location API (android.location)<sup>[1]</sup>。对于 GNSS 开发者来说,这是首次能够从 Android 智能终端系统获取 GNSS 载波和码的观测数据以及导航电文等信息,Android 系统 GNSS 原始数据的开放为 Android 位置服务的应用带来了重要机遇。

现有的卫星导航定位方法主要包括差分定位和非差分定位两大类,相应的代表性技术分别为基于载波相位的实时动态定位(Real-Time Kinematic, RTK)技术和精密单点定位(Precise Point Positioning, PPP)技术<sup>[2-3]</sup>。针对 Android 终端如何实现高精度定位处理的现有研究<sup>[4-17]</sup>,主要集中于对其观测数据特性的分析以及进行差分定位处理方面,实验结果绝大部分以事后处理为主,基于实时 PPP 手段实现智能终端实时高精度定位的研究则明显较少。基于差分定位技术实现智能终端高精度位置服务密切依赖于地面基准站(网)的支持,难以直接实现大众高精度位置服务的大规模应用。相对而言,基于 PPP 非差方式的定位技术,不受地面基准站的限制,只需通过网络实时接收精密卫星轨道

和钟差以及电离层等改正信息即可实现全球尺度的高精度定位,适合以智能手机为主的大众高精度位置服务的大规模应用。因此,本文针对基于 Android 智能终端开放的 GNSS 原始数据如何实现实时非差精密定位进行了研究,在 Android 智能终端上实现了实时 PPP 高精度定位,并开发了智能终端实时 PPP 定位原型软件,显著提升了智能终端的定位精度。

## 1 智能终端 GNSS 原始观测数据获取与生成

早期 Android 系统中的位置服务主要是通过 android.gsm.location 这一应用程序开发接口完成的,虽然可以通过一些基本的 Android 指令配置 GNSS 芯片,但开发者也只能获得 GNSS 芯片上报给操作系统的位置、速度和时间(Position Velocity and Time, PVT)解算结果等信息。从 Android 7.0(API level 24)系统开始及之后的系统中,Android 系统引入了新的 Location API(android.location),提供了关于 GNSS 原始观测数据的相关类,主要包括:1) GNSS Clock 类,该类提供了用于计算信号接收时刻的 GNSS 芯片时间以及钟偏等信息;2) GNSS Navigation Message 类,该类提供了所有卫星系统的导航电文等相关信息;3) GNSS Measurement 类,该类提供了卫星信号的发射时间以及与计算载波相位和多普勒等观测量的相关信息。关于 GNSS Clock、GNSS Measurement 以及 GNSS Navigation Message 类中的数据成员以及含义具体可参见文献<sup>[1]</sup>和 Android 源码,本文不做详细介绍。

由于伪距和载波相位等观测量并没有直接在 Android Location API 中给出,使用这些 API 提供的 GNSS 原始测量信息进行定位解算的前提是计

算出定位解算所需的伪距、载波相位、多普勒等观测测量信息。例如,GNSS Clock 可以计算出信号接收时间,GNSS Measurement 提供卫星信号发射时间,由这 2 个信息便可以计算得到伪距。下面对 GNSS 伪距、载波相位、多普勒等原始观测量的计算方法做简要介绍。

根据 Android Location API,GNSS 伪距的计算可以表示为

$$Pseudorange = \frac{t_{Rx} - t_{Tx}}{1E9} * c [m] \quad (1)$$

式中,  $t_{Rx}$  和  $t_{Tx}$  为在同一时间系统下的信号接收和发射时间,  $t_{Tx}$  可直接由 GNSS Measurement 类中的 *ReceivedSvTimeNanos* 成员获得,为

$$t_{Tx} = ReceivedSvTimeNanos [ns] \quad (2)$$

对全球定位系统 (Global Positioning System, GPS)、北斗卫星导航系统 (BeiDou Navigation Satellite System, BDS) 和 GALILEO 而言, *ReceivedSvTimeNanos* 为相应的周内秒时间 (Time of Week, TOW);对 GLONASS 而言,其为相应的天内秒时间 (Time of Day, TOD)。需要注意的是,若要获得有效的信号发射时间,需要根据该类中成员 *State* 的相应值来判断当前卫星信号的跟踪状态。其中,要求 GPS 和 BDS 满足 *STATE\_TOW\_DECODED*,GLONASS 满足 *STATE\_GLO\_TOD\_DECODED*,而 GALILEO 满足 *STATE\_TOW\_DECODED* 和 *STATE\_GAL\_EIC\_2ND\_CODE\_LOCK*,具体可参看 Android 源码中的定义。

GNSS 系统时间可以通过 Location API 中的内部硬件时钟以及硬件时钟和 GPS 起始时间之间的偏差等信息计算。早期的 Android 版本对硬件层进行了封装,在 Android 7 系统的 GNSS Clock 类中对硬件时钟进行了开源,支持输出自 GPS 初始至今的纳秒数。根据硬件时钟可以换算得到当前 GPS 时间,信号接收时刻的完整 GPS 时间  $t_{Rx_{GPS}}$  可按式(3)计算得到

$$t_{Rx_{GPS}} = TimeNanos - (FullBiasNanos(1) + BiasNanos(1)) [ns] \quad (3)$$

式中, *TimeNanos* 为接收机内部时钟 (ns), *BiasNanos* 为接收机时钟纳秒以内偏差 (ns), *FullBiasNanos* 为接收机内部时钟与 GPS 起始时间之间的差异 (ns)。将其换算到当前周内秒时间,则为:

$$t_{Rx} = t_{Rx_{GPS}} - weekNumberNanos [ns] \quad (4)$$

式中, *weekNumberNanos* 为自 GPS 时间起始时刻开始至当前周的总纳秒数。这样,在求得  $t_{Rx}$

和  $t_{Tx}$  后便可求得伪距值。需要注意的是,这里  $t_{Rx}$  表示相对于 GPS 的信号接收时间,而  $t_{Tx}$  给出的是各自系统下的信号发射时间。因此,对非 GPS 而言,需要将  $t_{Tx}$  与  $t_{Rx}$  转换到一致的时间系统下,详细的伪距计算与时间转换可查阅文献[1]。

在 Android Location API 中,载波相位的测量值是由变量 *AccumulatedDeltaRangeMeters* 以 m 为单位给出的,将其除以波长便可得到以 cycle 为单位的载波相位测量值 *CarrierPhaseCycles*,具体为

$$AccumulatedDeltaRangeMeters = k * CarrierPhaseCycles \quad (5)$$

这里,  $k$  表示由信号中心频率  $f$  确定的一个常量,即波长 ( $k = c/f$ )。载波相位测量值的有效性是由 *AccumulatedDeltaRangeState* 一值给出的,以告诉用户是否发生了周跳和相位重置等信息,相应的状态有 4 种,分别是: *ADR\_STATE\_UNKNOWN*、*ADR\_STATE\_VALID*、*ADR\_STATE\_RESET* 以及 *ADR\_STATE\_CYCLE\_SLIP*。

由卫星与接收机间的相对运动导致的多普勒频移可以从 *PseudorangeRateMetersPerSecond* 获得,这个变量给出的是伪距率 (m/s),当该变量为正值时,表示卫星正在远离接收机。伪距率 *PseudorangeRateMetersPerSecond* 和多普勒频移 *DopplerShiftHz* 之间的关系可以由式(6)表示,据此可求得多普勒频移观测量

$$PseudorangeRateMetersPerSecond = -k * DopplerShiftHz \quad (6)$$

## 2 智能终端 GNSS 原始数据特性分析

深入分析 Android 系统获得的 GNSS 原始观测数据质量,是基于智能终端实现高精度定位的基础。针对此,使用 Nexus-9 Pad(以下简称 Nex9)采集了不同场景下的实验数据,包括:空旷环境下的静态实验以及一般城市道路环境下的车载动态实验。其中,静态实验数据采集于中国科学院光电研究院科研楼顶,周边视野开阔,无明显遮挡,测试时长约为 250min。车载动态实验数据采集于北京市海淀区城市道路,实验路线为光电院—邓庄南路—友谊路—北清路—G7 高速—光电院,测试终端安装于试验车顶,测试时长约 90min,其中试验车辆在实验开始前的 35min 内处于静止状态。

下面从信号载噪比  $C/N_0$  值、伪距残差特性以及载波相位测量性能 3 个方面对上述采集的 GNSS 原始数据基本特性进行分析。

## 2.1 $C/N_0$ 值特性

图1中给出了静态实验场景下 Nex9 的 GPS 卫星  $C/N_0$  值的大小分布及其与高度角之间的关系。从图1中可以看出,智能终端的卫星  $C/N_0$  值绝大多数分布在  $25 \sim 40 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$  范围内,少数历元部分卫星的  $C/N_0$  值低于  $25 \text{ dB} \cdot \text{Hz}$ 。同时,其  $C/N_0$  值与卫星高度角之间的相关性并不明显,在卫星高度角较低( $< 30^\circ$ )时,其  $C/N_0$  值仍然较高。另外,从图1中还能看到,智能设备的  $C/N_0$  值变化剧烈,许多卫星在部分时段即使其高度角在不断升高,但其  $C/N_0$  值却急剧降低。智能终端的这种  $C/N_0$  特性主要跟其采用小型化、低成本与线性化工作方式的接收天线密切相关,这给其后续信号捕获和跟踪环路的工作性能带来了巨大挑战,进而影响了伪距和载波相位的测量性能以及最终的定位性能。

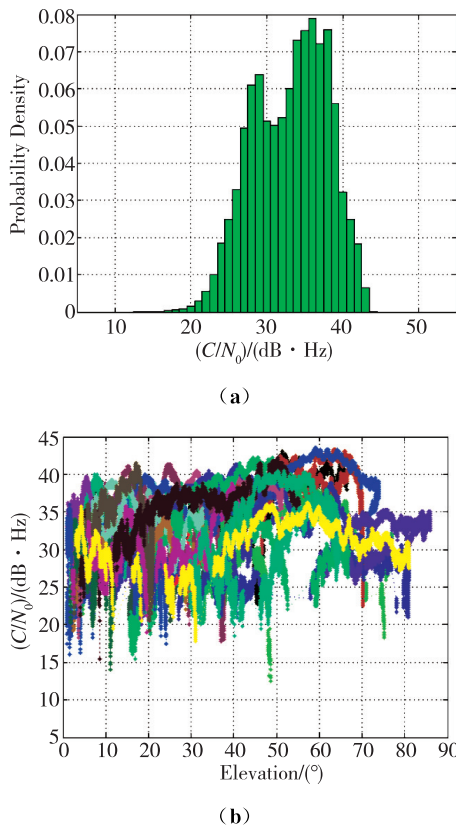


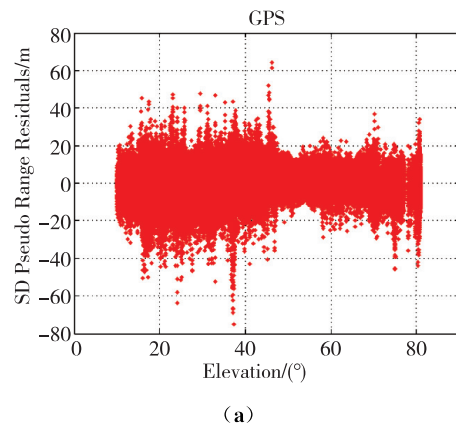
图1 静态场景下 Nex9 的 GPS 卫星  $C/N_0$  值分布(a)及其与高度角的关系(b)

Fig. 1 Probability density distribution of  $C/N_0$  (a) and  $C/N_0$  vs. elevation (b) for GPS satellites of Nex9 in static scenario

## 2.2 伪距残差特性

一般说来,卫星的高度角越低,其信号在大气层中传播的路径就越长,所受到的电离层延迟效应对流层延迟效应的影响也就越大,同时也越容易受到多路径效应的影响,于是其测量值的误差相应地也就越大。另外,对于一般的测量和导航用户而言,其码伪距测量误差主要以由热噪声引起的码相位测量噪声为主。通常  $C/N_0$  值越高,由热噪声引起的码相位测量误差就越小,伪距测量精度就越高;反之, $C/N_0$  值越低则伪距测量误差就越大。为分析智能终端伪距测量性能,利用一台高精度测量型接收机(天宝 NetR9)采用超短基线(约  $15 \text{ cm}$ )方法对 Nex9 静态观测数据进行评估。由于高精度测量接收机和天线具有良好的多路径抑制效果和较低的测量噪声,因此,与其相关的残余误差可以忽略不计,单差残差可认为主要是由于智能终端本身的测量性能造成的。

图2中给出了静态实验场景中 Nex9 的 GPS 卫星伪距单差残差与高度角之间的关系,以及 G12 卫星的伪距单差残差随卫星高度角的变化情况示例。从图2中可以看到,伪距残差与卫星高度角二者之间并无明显相关性,甚至当卫星高度角较高时其伪距残差依然较大,当卫星高度角处于  $70^\circ \sim 80^\circ$  时的伪距残差明显较高度角为  $50^\circ$  时的要大。以 G12 卫星为例可以看到,在  $3.5 \text{ h}$  左右的时段内其高度角为整个实验时段内最高( $35^\circ \sim 38^\circ$ ),但是对应的伪距残差绝对值反而增大到  $30 \text{ m}$  以上;而在  $2.0 \text{ h}$  左右的时段内其卫星高度角最低( $10^\circ$  左右),但此时的伪距残差基本上为  $10 \text{ m}$  以内。





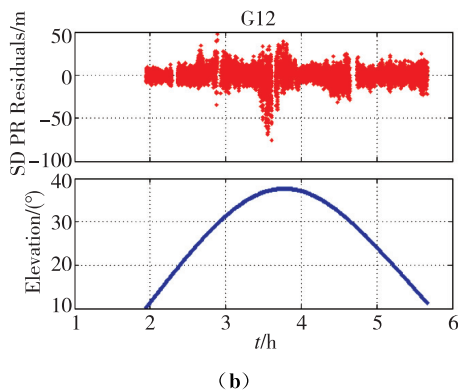


图 2 静态实验中 Nex9 的 GPS 伪距单差残差随卫星高度角的变化(a)以及 G12 卫星示例(b)

Fig. 2 Single-differenced pseudorange residuals of GPS satellites against the elevation (a) and an example of G12 satellites for Nex9 in static scenario

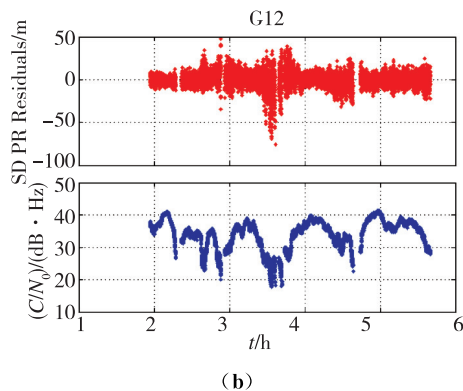


图 3 静态实验中 Nex9 的 GPS 伪距单差残差随  $C/N_0$  的变化(a)以及 G12 卫星示例(b)

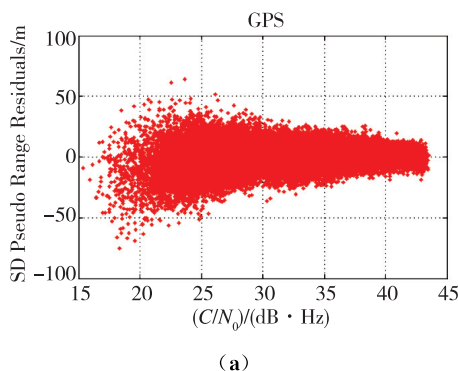
Fig. 3 Single-differenced pseudorange residuals of GPS satellites against the  $C/N_0$  (a) and an example of G12 satellite (b) for Nex9 in static scenario

图 3 中给出了静态实验场景中 Nex9 的 GPS 卫星伪距单差残差与  $C/N_0$  值之间的关系,以及 G12 卫星的伪距单差残差随  $C/N_0$  的变化情况示例。从图 3 中可以直观地看到,随着  $C/N_0$  值的升高,其对应的伪距残差也整体上随之减小,当  $C/N_0$  值最大时对应的伪距残差也整体上最小,表明此时伪距测量精度整体上最高;而当  $C/N_0$  值较低时其伪距残差也随之较大,其较大的伪距残差也更集中在当  $C/N_0$  低于  $25\text{dB} \cdot \text{Hz}$  的情形下。同样,以 G12 卫星为例,其在  $3.5\text{h}$  左右的  $C/N_0$  值降低至  $25\text{dB} \cdot \text{Hz}$  以下时对应的伪距残差绝对值增大到  $30\text{m}$  以上;而当  $C/N_0$  值升高时,对应的伪距残差也随之减小,这很好地说明了伪距测量误差与  $C/N_0$  之间的强相关性。

### 2.3 载波相位测量性能

Android 系统在给出载波相位观测量 AccumulatedDeltaRangeMeters 的同时,给出其状态标记 AccumulatedDeltaRangeState 以告诉用户是否发生了周跳或相位重置等。另外,由于智能终端内置 GNSS 芯片的连续工作将会增加耗电量缩短续航时间,生产商在 Android 系统里普遍采用一种名叫 Duty Cycle(称为工作周期或者占空比)的技术来降低 GNSS 芯片功耗。Duty Cycle 机制即为在一个时间周期(1s)内,对 GNSS 信号的跟踪只开启一小段时间,然后随即关闭。Duty Cycle 机制的存在直接影响 GNSS 芯片对载波相位测量的连续性,这将在很大程度上限制基于载波相位的 RTK 和 PPP 高精度定位的应用实现。关于 Duty Cycle 机制的更多介绍具体可参见文献[1]。根据 Google 给出的相关信息可知,Nex9(非蜂窝版)这一款智能终端没有开启 Duty Cycle 控制机制,因此,其 GNSS 芯片可以向用户提供连续的载波相位测量结果。

以 GPS 卫星为例,图 4 中给出了车载动态实验中 Nex9 各 GPS 观测卫星的载波相位跟踪状态,具体包括 Phase Valid 和 Cycle Slip 两种,其中,Phase Valid(连续有效)对应状态值为 ADR\_STATE\_VALID,Cycle Slip(发生周跳)对应状态值为 ADR\_STATE\_RESET 或 ADR\_STATE\_CYCLE\_SLIP。



(a)

表1中给出了车载动态实验(纯车载动态时段)中Nex9的GPS和GLONASS可观测卫星的载波相位周跳比以及相应的平均周跳比的统计结果,其中,周跳比的定义是发生周跳的历元个数与实际的观测值历元总数的比值。

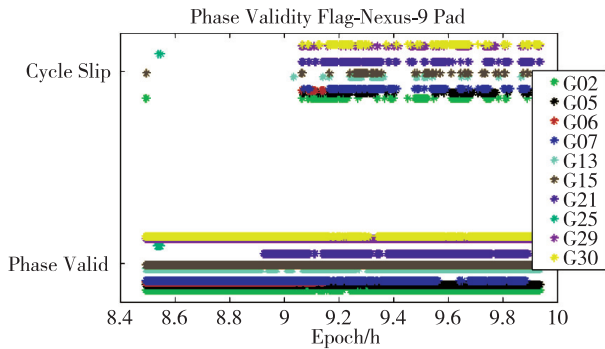


图4 车载场景(先静后动)下Nex9各GPS观测卫星的载波相位跟踪状态

Fig. 4 The carrier phase tracking states for visible GPS satellites of Nex9 in kinematic scenario (static mode for the first 35min)

表1 城市动态实验中Nexus-9载波相位周跳比统计结果

Tab. 1 Percentages of carrier phase cycle slips for Nex9 in urban kinematic scenario

卫星	周跳比/%	卫星	周跳比/%
G02	17.12	R03	33.15
G05	12.70	R04	4.97
G06	24.58	R12	46.94
G07	29.43	R13	21.31
G13	5.34	R18	31.67
G15	3.38	R19	10.74
G21	24.83	R20	4.00
G29	5.61	R21	42.47
G30	20.42	—	—
平均	15.93	平均	24.41

从图4中可以看到,当处于动态实验开始前的UTC 8:30~9:05静态时段内,Nex9的GPS各卫星载波相位状态除个别起始历元外都标记为Valid/连续有效;然而,当从UTC 9:05开始进行动态跑车时,许多历元各卫星的载波相位被标记为Cycle Slip/发生周跳,这是由于城市动态环境引起的环路跟踪性能变差和其自身探测到发生周跳的缘故。从表1中给出的周跳比定量统计结果可以看到,城

市车载动态环境下Nex9对GPS信号的跟踪发生载波相位周跳的比例平均为15.9%,部分GPS卫星的周跳比可达20%~30%;而其对GLONASS信号的跟踪发生载波相位周跳的比例平均为24.4%,部分GLONASS卫星的周跳比可达30%~50%,明显要高于GPS卫星。从上述现象和结果可以看出,在城市动态场景下,受观测环境和用户运动等因素的影响,智能终端GNSS模块对卫星信号的跟踪容易发生失锁,载波相位测量值存在较多的周跳,这给基于载波相位的高精度定位带来了巨大挑战。

### 3 智能终端实时非差精密定位实现与结果分析

#### 3.1 Android终端GNSS实时非差精密定位实现

从第2节对智能终端GNSS原始观测量的数据质量和特性的分析中可以看到:1)载噪比 $C/N_0$ 通常都较低且波动剧烈,与卫星高度角之间的相关性很弱;2)原始伪距测量噪声大、精度低、粗差多;3)载波相位观测量周跳频繁,这给利用智能终端GNSS数据进行高精度定位带来了巨大挑战。本文在深入分析智能终端原始GNSS数据特性的基础上,融合多模GNSS观测数据,将实时的精密卫星轨道和钟差改正产品以及电离层改正产品应用于智能终端非差精密定位中<sup>[18-20]</sup>,并设计了专门针对智能终端数据特性的数据处理与质量控制策略,以及自适应的运动学模型<sup>[21]</sup>,自主研制了面向Android平台的实时非差精密定位软件—PPPAnd (PPP for Android),可在智能终端设备上实时实现GPS+GLONASS+BDS+GALILEO四系统融合的伪距单点定位以及精密单点定位。

PPPAnd软件的设计架构如图5所示,主要包括UI、数据获取、数据解析以及定位解算四部分组成。UI部分主要是进行人机交互操作与定位结果的实时显示。数据获取部分的主要功能是获取实时精密定位所需的原始观测数据、RTCM格式的广播星历数据,以及误差改正数据(即SSR产品)。其中,原始观测数据使用标准Android Location API从内置GNSS芯片获取,RTCM数据流则通过网络按照NTRIP协议由Client从Caster服务器上获取。数据解析部分的主要功能是将Android系统获取的原始观测信息数据进行解析得到伪距、载波相位、多普勒、载噪比等定位解算所需观测量,同时,对RTCM电文进行解码获得广播星历参数以及

实时精密卫星轨道和钟差改正数与电离层参数信息。定位解算部分的功能是实现非差精密定位解算获得用户坐标等。

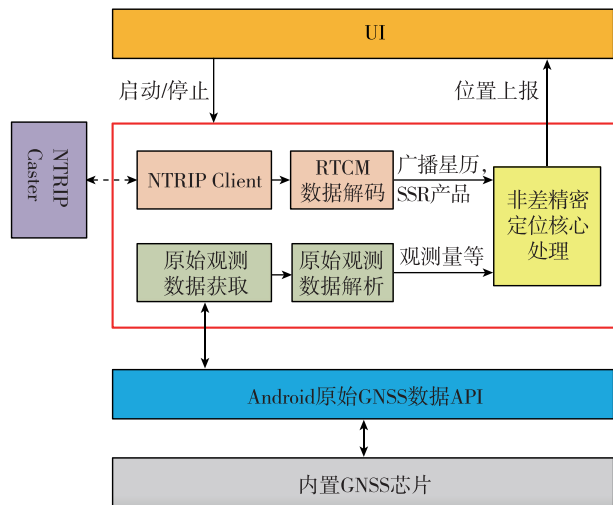


图 5 Android 实时非差精密定位软件(PPPAnd)设计框架  
Fig. 5 Design scheme of the real-time un-differenced precise positioning software for Android (PPPAnd)

为测试和验证智能终端实时非差精密定位性能,分别进行了多种场景下的实际定位实验,所需的 RTCM 实时数据流从中国科学院光电研究院的 Caster 服务器上获取。其中,广播星历使用 RTCM3EPH-MGEX 数据流,实时精密卫星产品与电离层产品分别为中国科学院自主计算的 CAS01 和 CAS10 产品;测试终端为 Nex9,测试时将其放置于测量型天线旁边(车载测试时设备安装于车顶),并使二者尽可能处于同一水平面上,测试场景如图 6 所示。实时定位时使用的卫星系统为 GPS 和 GLONASS 双系统,参考坐标由测量型接收机(NovAtel PP6)数据做事后 RTK 解算得到,精度统计时忽略测试机与测量型天线二者之间的水平位置偏差(~10cm)。



(a)



(b)

图 6 静态(a)和车载动态(b)测试场景示意图

Fig. 6 Test scenarios for the static and kinematic experiments

### 3.2 伪距单点定位结果

图 7 中给出了实时伪距单点定位结果在水平(H)和垂直(V)方向上的时间误差序列及统计结果,包括均方根值(Root-Mean-Square, RMS)、68% 概率值(CEP68,  $1\sigma$ )和 95% 概率值(CEP95,  $2\sigma$ )。可以看到,绝大多数历元的平面定位误差都在 0~2m 范围内波动,高程方向上的定位误差绝对值在 0~3m 范围内,相应的误差 RMS 分别为水平方向 1.16m 和垂直方向 1.51m。从概率分布上看,水平和垂直方向上的  $1\sigma$  精度(CEP68)分别可达到 1.22m 和 1.73m,  $2\sigma$  精度(CEP95)分别为 1.72m 和 2.56m。

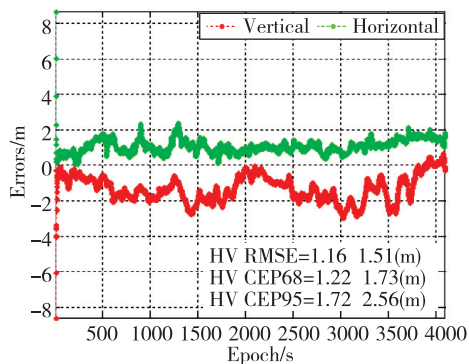


图 7 实时伪距单点定位误差序列

Fig. 7 Time series of the positioning errors of real-time single point positioning in static scenario

### 3.3 实时精密单点定位结果

图 8 中给出了实时 PPP 静态定位结果在水平(H)和垂直(V)方向上的时间误差序列及其误差统计结果(RMS、CEP68 和 CEP95)。可以看到,经过约 500s(8min)的收敛时间后,水平和垂直方向上的定位误差将稳定地收敛至 1m 以内,甚至 0.5m 左右,并且随着观测时间的累积,定位误差亦能收敛至 0.2m 左右。对整个测试时段内的全部定位解而言,误差 RMS 分别为水平方向 0.62m 和垂直方向

0.66m。从概率分布上看,水平和垂直方向上的 $1\sigma$ 精度(CEP68)分别可达到0.42m和0.44m, $2\sigma$ 精度(CEP95)分别为1.55m和1.27m。

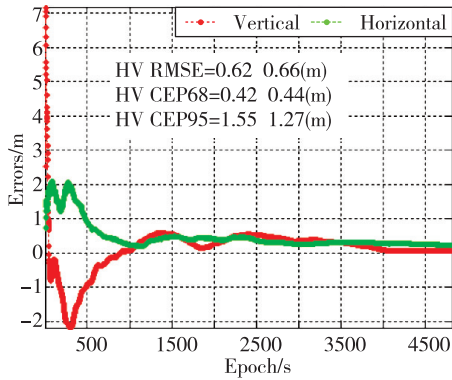


图8 实时静态PPP定位误差序列

Fig. 8 Time series of the positioning errors of real-time precise point positioning in static scenario

图9中给出了在城市道路环境下的实时PPP动态定位结果在水平(H)和垂直(V)方向上的时间误差序列及其误差统计结果(RMS、CEP68和CEP95)。其中,用于比对的参考坐标由NovAtel接收机观测数据做事后RTK解算得到,图中缺失的部分时段历元是因为NovAtel接收机数据缺失的缘故。可以看到,绝大多数历元的平面定位误差都在0~2.5m范围内波动,高程方向上的定位误差绝对值在0~1.5m范围内波动。对整个测试时段内的全部定位解而言,相应的误差RMS分别为水平方向1.32m和垂直方向0.81m。从概率分布上看,水平和垂直方向上的 $1\sigma$ 精度(CEP68)分别可达到1.54m和0.93m, $2\sigma$ 精度(CEP95)分别为2.19m和1.28m。对比静态PPP结果可知,实时动态定位结果明显较差,这主要是因为智能终端GNSS环路对导航信号的跟踪和测量的性能受城市复杂观测环境和动态的影响而变差的缘故。另外从结果中可以看到,该组动态实验的垂直精度优于

水平精度,这主要是因为车辆行进过程中高程方向上的运动变化平缓,对其使用运动学模型进行约束的效果较水平方向上的约束效果要好。

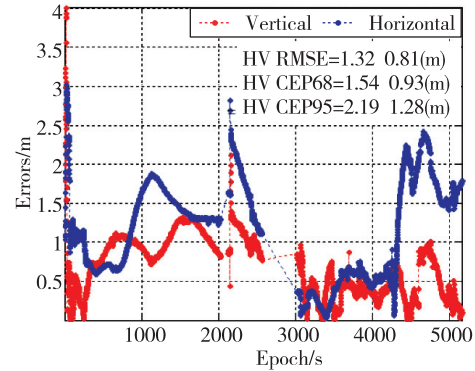


图9 实时车载动态PPP定位误差序列

Fig. 9 Time series of the positioning errors of real-time precise point positioning in kinematic scenario

### 3.4 结果对比

表2汇总给出了3组定位实验中基于原始数据的解算结果与Android终端PVT Location结果的水平和垂直精度统计对比情况。对于实验一而言,测试终端的PVT结果的水平和垂直方向误差RMS统计结果分别为3.88m和6.21m,而基于原始数据解算的静态SPP解的相应统计精度为1.16m和1.51m,较前者改善程度分别为70.1%和75.7%。对于实验二而言,测试终端的PVT结果在水平和垂直方向上的RMS精度分别为5.14m和3.61m,而基于原始数据解算的静态PPP解算精度可达亚米级水平,分别为0.62m和0.66m,较PVT结果分别提高了87.9%和81.7%。在实验三即车载动态实验中,测试终端的PVT结果在水平和垂直方向上的RMS精度分别为2.18m和2.33m,而基于原始数据解算的动态PPP解算精度为1.32m和0.81m,较前者分别提高了39.4%和65.2%。

表2 三组实验中基于原始数据的解算结果与Android终端PVT结果的精度统计对比

Tab. 2 Comparisons of the positioning accuracy between the real-time results derived from raw measurements and the PVT results of Android device

定位测试	水平精度/m			垂直精度/m			
	RMS	CEP68	CEP95	RMS	CEP68	CEP95	
实验一	PVT	3.88	4.25	6.23	6.21	7.43	10.46
	静态SPP	1.16	1.22	1.72	1.51	1.73	2.56
实验二	PVT	5.14	5.33	8.17	3.61	3.39	7.23
	静态PPP	0.62	0.42	1.55	0.66	0.44	1.27
实验三	PVT	2.18	2.37	3.53	2.33	2.81	3.41
	动态PPP	1.32	1.54	2.19	0.81	0.93	1.28



## 4 结论

本文通过采用 Android 系统最新开放的 GNSS 原始测量数据进行实时非差高精度定位,以期达到改善智能终端定位精度的目的。利用实测数据从信号载噪比特性、伪距残差特性以及载波相位测量性能这 3 个方面对智能终端 GNSS 原始数据的基本特性进行了分析。在此基础上,基于智能终端原始 GNSS 数据实现了实时非差精密定位,并研制了面向 Android 系统的实时非差精密定位软件 PP-PAnd,开展了多种条件下的实际定位测试。结果表明:1) Android 终端 PVT 结果的平面定位精度(RMS)约为 3~5m;2)基于 Android 终端 GNSS 原始数据的静态 SPP 定位水平精度可达 1.2m 左右,较 PVT 结果提高了 70%,静态 PPP 定位水平精度可达亚米级,较 PVT 结果提高了 88%;3)静态 PPP 经过约 8min 的收敛,其定位误差将稳定地收敛至 1m 以内,并且随着观测时间的累积定位误差亦能收敛至 0.2m 左右;4)动态 PPP 定位结果的水平精度约为 1.3m,较 PVT 结果提高了 39%,改善效果不及静态场景明显;5)基于 Android 终端原始测量数据的实时非差定位结果在高程方向上的定位改善效果最为明显,较 PVT 结果平均提高了约 74%。

## 参考文献

- [1] European GNSS Agency. White Paper: Using GNSS raw measurements on Android devices[R]. 2017.
- [2] Teunissen P, Montenbruck O. Springer handbook of global navigation satellite systems[M]. Springer, 2017.
- [3] Zumberge J F, Heflin M B, Jefferson D C, et al. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1997, 102 (B3): 5005-5017.
- [4] William R, Joshua C M, Marco F, et al. FLAMINGO-Fulfilling enhanced location accuracy in the mass-market through initial Galileo services[C]// Proceedings of the 31<sup>st</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2018). Miami, Florida, 2018: 489-502.
- [5] Pirazzi G, Mazzoni A, Biagi L, et al. Preliminary performance analysis with a GPS+ Galileo enabled chipset embedded in a smartphone[C]// Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon, 2017: 101-115.
- [6] Humphreys T E, Murrian M, van Diggelen F, et al. On the feasibility of cm-accurate positioning via a smartphone's antenna and GNSS chip [C]// 2016 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). Savannah, GA, 2016: 232-242.
- [7] Riley S, Lentz W, Clare A. On the path to precision—Observations with android GNSS observables[C]// Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon, 2017: 116-129.
- [8] Realini E, Caldera S, Pertusini L, et al. Precise GNSS positioning using smartdevices[J]. Sensors, 2017, 17(10): 2434-2447.
- [9] 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): 70-80.
- [10] Zhu F, Tao X, Liu W, et al. Walker: continuous and precise navigation by fusing GNSS and MEMS in smartphone chipsets for pedestrians [J]. Remote Sensing, 2019, 11(2): 139.
- [11] Dabove P, Di Pietra V. Towards high accuracy GNSS real-time positioning with smartphones[J]. Advances in Space Research, 2019, 63(1): 94-102.
- [12] Zhang K, Jiao F, Li J. The assessment of GNSS measurements from android smartphones[C]// Proceedings of China Satellite Navigation Conference 2018. Harbin, China, 2018.
- [13] 张云, 马天翊, 阙扬州, 等. 移动终端中的 GNSS 高精度定位技术评估[C]// 第九届中国卫星导航学术年会. 哈尔滨, 中国, 2018.
- [14] Zhang Yun, Ma Tianyi, Que Yangzhou, et al. GNSS high-precision positioning technology evaluation in mobile terminals[C]// Proceedings of the 9<sup>th</sup> China Satellite Navigation Conference. Harbin, China, 2018 (in Chinese).
- [15] Banville S, Van Diggelen F. Precise positioning using raw GPS measurements from Android smartphones [J]. GPS World, 2016, 27(11): 43-48.
- [16] Gill M, Bisnath S, Aggrey J, et al. Precise point positioning (PPP) using low-cost and ultra-low-cost GNSS receivers[C]// Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2017). Portland, Oregon, 2017: 226-236.
- [17] Wang L, Li Z, Zhao J, et al. Smart device-supported



- BDS/GNSS real-time kinematic positioning for sub-meter-level accuracy in urban location-based services [J]. *Sensors*, 2016, 16(12): 2201-2215.
- [17] Wang L, Li Z, Yuan H, et al. Research and implementation on BDS/GNSS real-time positioning for urban high-precision location-based services[C]// Proceedings of 2016 China Satellite Navigation Conference (Volume D). Changsha, China, 2016: 277-286.
- [18] Wang L, Li Z, Ge M, et al. Validation and assessment of multi-GNSS real-time precise point positioning in simulated kinematic mode using IGS real-time service[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2):337-356.
- [19] 汪亮, 李子申, 袁洪, 等. BDS/GPS/GLONASS 组合的双频单历元相对定位性能对比分析[J]. *科学通报*, 2015, 60(9): 857-868.  
Wang Liang, Li Zishen, Yuan Hong, et al. Validation and analysis of the performance of dual-frequency single-epoch BDS/GPS/GLONASS relative positioning [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60(9): 857-868(in Chinese).
- [20] 李子申. GNSS/Compass 电离层时延修正及 TEC 监测理论与方法研究[D]. 武汉: 中国科学院测量与地球物理研究所, 2012.  
Li Zishen. Study on the mitigation of ionospheric delay and the monitoring of global ionospheric TEC based on GNSS/compass [D]. Wuhan: Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 2012(in Chinese).
- [21] 杨元喜. 自适应动态导航定位(第二版)[M]. 北京: 测绘出版社, 2017.  
Yang Yuanxi. Adaptive navigation and kinematic positioning(2<sup>nd</sup> edition)[M]. Beijing: SinoMaps Press, 2017(in Chinese).