



基于智能手机 GNSS 双频原始观测值的 电离层延迟提取与分析

摘要

基于智能手机 GNSS(全球导航卫星系统)观测值的研究主要集中于观测值质量分析和定位算法,在大气应用方面关注度则较为有限.本文基于全球首款支持 GNSS 双频信号的小米 8 智能手机和超短基线的 Trimble Alloy 测地型接收机,利用原始 GNSS 双频载波相位观测值,考虑连续历元间电离层变化较小从而进行观测值质量控制策略,评估了小米 8 智能手机电离层提取精度.研究结果表明:卫星高度角或载噪比较高的条件下,智能手机观测值可能依然是无效的,设置卫星高度角或载噪比阈值的方法进行质量控制不再适用.小米 8 提取的电离层延迟与测地型接收机呈现了很好的一致性,但其波动幅度略高于测地型接收机,提取精度优于 0.2 TECU,表明智能手机 GNSS 观测值用于大气应用是可行的.

关键词

智能手机;全球导航卫星系统;电离层延迟;多路径;载噪比

中图分类号 P228;P352.7

文献标志码 A

收稿日期 2021-03-01

资助项目 湖北省自然科学基金(2020CFA048)

作者简介

徐黎,男,博士生,研究方向为智能手机 GNSS 定位理论及算法.xuli@whigg.ac.cn

张宝成(通信作者),男,博士,研究员,博士生导师,研究方向为高精度 GNSS 数据处理与应用.b.zhang@whigg.ac.cn

1 中国科学院精密测量科学与技术创新研究院,武汉,430071

2 中国科学院大学 地球与行星科学学院,北京,100049

0 引言

随着多频多模全球导航卫星系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的发展,欧洲 Galileo 卫星导航系统和我国北斗卫星导航系统(Beidou Navigation Satellite System, BDS)逐渐完善^[1],可视卫星数量大幅增加,大众用户对位置服务的强烈需求,使低成本、高精度定位拥有巨大市场潜力.谷歌公司在 2016 年开发者大会上宣布从 Android 7 起,对所有用户开放 GNSS 观测数据获取接口,用户不仅可以获取伪码,还能获取相位和多普勒观测值,从而能开发算法来提高面向大众市场移动智能设备的定位精度.移动智能设备 GNSS 高精度定位成为当前的研究热点^[2-5].

2018 年 5 月,小米科技有限公司发布了全球首款搭载博通 BCM47755 双频(GPS L1+L5)GNSS 芯片的小米 8 手机,从此,手机定位进入双频时代,极大地推动了 Android 高精度定位算法的研究^[6-9].Mas-sarweh 等^[10]系统评估了小米 8 手机原始 GNSS 观测值的多路径特性;Paziewski 等^[11]证实了 Android 智能设备循环节能模式(duty cycle)严重影响了 GNSS 载波观测值的质量,导致模糊度无法固定;Liu 等^[12]对 Android 设备的循环节能模式进行了系统地研究,发现该模式在设备处于静态时打开,动态时关闭,且静态和动态变化时,打开和关闭有一定时延,并提出了一种顾及手机循环节能模式的大众行人导航算法;Geng 等^[13]发现了 Android 设备初始相位偏差的存在,并利用智能手机外接高精度天线的方式,首次实现了相位模糊度固定;Gao 等^[14]系统分析了智能手机 GNSS 原始观测值和随机模型,并提出了利用智能手机原始精度因子定权的策略,取得了较好的定位效果.

目前,智能手机原始 GNSS 观测值的研究主要集中于观测值质量分析、随机模型与定位算法,利用智能手机级别的 GNSS 设备进行空间天气方面的研究极少.本文利用小米 8 智能手机原始 GNSS 双频载波相位观测值,深入研究分析了电离层延迟提取精度.首先介绍了智能手机获取原始 GNSS 观测值的方法,然后分析了载波相位观测值质量,最后分析了 GPS 和 QZSS 系统卫星提取的电离层延迟精度.

1 数据与方法

1.1 Android 手机原始 GNSS 观测数据获取

Android 应用程序和不同传感器(如 GNSS)之间的交互是在 An-

droid 框架 API 下进行的.Android 平台每个新版本操作系统都与一个相应的应用程序接口(Application Programming Interface,API)相关联,配置、交互和用户用户对 GNSS 数据的访问都依赖于此.用户可调用 Location API 中的 GNSSClock 和 GNSSMeasurement 类来获取原始伪距(非直接)、载波相位和多普勒观测

数据.GnssClock 类是获取 Android 设备中相关参数的一个基本类,GnssMeasurement 是获取 GNSS 观测值相关参数的类,包含的与 GNSS 相关的部分参数如表 1 所示,详情可参考 Android 开发文档(<https://developer.android.google.cn/guide/topics/sensors/gnss>).

表 1 Location API 部分原始观测信息

Table 1 Part of the raw observations information of Location API

Android 类	字段	描述
GNSSClock	TimeNanos	钟面时间(单位:ns)
	BiasNanos	亚纳秒级钟偏差(单位:ns)
	FullBiasNanos	钟面时间与 GPS 零时之差(单位:ns)
	HardwareClockDiscontinuityCount	硬件钟不连续计数
GNSSMeasurement	ConstellationType	星座类型
	Svid	卫星号
	State	运行状态
	ReceivedSvTimeNanos	卫星信号发射时间(单位:ns)
	AccumulatedDeltaRangeMeters	相位观测值(单位:m)
	Cn0DbHz	载噪比
	TimeOffsetNanos	Android 设备时延
	CarrierFrequencyHz	载波相位频率
	PseudorangeRateMetersperSecond	伪距率

Android 系统没有直接给出伪距观测值,而是提供了相关的计算参数.伪距由信号从卫星端发出到接收机端的传播时间乘以电磁波传播速度(近似等于光速)得到.

$$\rho = c \cdot (t_{Rx} - t_{Tx}) \times 10^{-9}, \quad (1)$$

式中: ρ 表示 GNSS 伪距观测值(单位:m), c 表示光在真空中的传播速度($c=299\ 792\ 458\ \text{m/s}$), t_{Rx} 表示测量时间(单位:ns), t_{Tx} 表示卫星信号发射时间(单位:ns).值得注意的是, t_{Tx} (ReceivedSvTimeNanos) 的有效范围取决于跟踪状态,且为对应的 GNSS 系统时,多系统计算时需要统一时间基准.根据本文第 2 节时间系统转换关系,计算方法如下:

$$t_{Rx}^{TYPE} = \begin{cases} t_{TN} + t_{TON} - (t_{FBN} + t_{BN}), & \\ \begin{cases} t_{Rx}^{TYPE} - t_{WNN}, & \text{(GPS)} \\ t_{Rx}^{TYPE} - t_{DNN} + 3 \times 3\ 600 \times 10^9 - t_{LS}, & \text{(GLONASS)} \\ t_{Rx}^{TYPE} - t_{MSNN}, & \text{(Galileo)} \\ t_{Rx}^{TYPE} - t_{WNN}, & \text{(BDS)} \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

式中: t_{Rx}^{TYPE} 表示不同的 GNSS 系统测量时间; t_{TN} 和 t_{TON} 分别表示 TimeNanos 和 TimeOffsetNanos, t_{FBN} 和 t_{BN} 分别表示 FullBiasNanos 和 BiasNanos,所有符号的

单位均为 ns. t_{WNN} 表示 GNSS 系统时累计周数转换纳秒的大小, t_{DNN} 表示 GNSS 系统时累计天数转换成纳秒的大小, t_{MSNN} 表示 GNSS 系统时累计毫秒转换成纳秒的大小.当计算出 t_{Rx} 和 t_{Tx} 后,可根据式(1)计算得到伪距观测值.

载波相位观测值在 GNSSMeasurement 类中用 AccumulatedDeltaRangeMeters 表示,单位为 m,可调用接口直接获得.GNSSMeasurement 类中还给出了 AccumulatedDeltaRangeState 参数,来判断获取载波相位观测值的有效性.仅当相位观测值有效时才会用于位置计算.并非所有智能设备都能输出有效的载波相位观测值,这和设备本身 GNSS 芯片控制有关,可在 Android 开发者网站查询(<https://developer.android.google.cn>).

多普勒观测值($X_{Doppler}$)可以由 PseudorangeRateMetersPerSecond 参数(其量值记为 v_{PRMPS})得到,计算方法如下:

$$X_{Doppler} = \frac{f}{c} \cdot v_{PRMPS}, \quad (3)$$

式中: f 表示信号中心频率(单位:Hz); c 表示真空中的光速(单位:m/s);PseudorangeRateMetersPerSecond (v_{PRMPS})表示由 Android 设备获取的原始观测值(单

位:m/s).

1.2 相位电离层提取

电离层延迟是 GNSS 主要误差源,同时 GNSS 也是空间天气研究的重要数据源^[15-17].伪距和载波相位是 GNSS 两类基本观测值,原始非差非组合观测方程如下:

$$\begin{cases} P_{r,f}^S = \rho_r^S + c(\Delta t_r - \Delta \tau^S + b_{r,f} + b_f^S) + T_r^S + I_{r,f}^S + \varepsilon_p, \\ \Phi_{r,f}^S = \rho_r^S + c(\Delta t_r - \Delta \tau^S) + T_r^S - I_{r,f}^S + \lambda_f^S N_{r,f}^S + \varepsilon_L, \end{cases} \quad (4)$$

式中:上标 S 表示卫星号,下标 r, f 分别表示接收机和频率号; $P_{r,f}^S$ 和 $\Phi_{r,f}^S$ 分别表示伪距和相位观测值(单位:m); Δt_r 和 $\Delta \tau^S$ 分别表示接收机钟差和卫星钟差(单位:ns); $b_{r,f}$ 和 b_f^S 分别表示接收机端和卫星端伪距硬件延迟(单位:ns); $I_{r,f}^S$ 和 T_r^S 分别表示电离层延迟和对流层延迟(单位:m); ρ_r^S 表示接收机到卫星的几何距离(单位:m); $N_{r,f}^S$ 表示吸收了卫星端和接收机端相位硬件延迟的模糊度(单位:cycle); λ_f^S 表示波长(单位:m/cycle); ε_p 和 ε_L 分别表示伪距和载波相位观测未模型化的误差(单位:m).

目前,基于 GNSS 观测值的电离层总电子浓度(Total Electron Content, TEC)提取方法可分为几何无关组合和非差非组合精密单点定位两大类^[18].由于智能手机伪距噪声大、精确位置难以确定,故本文采用载波相位的无几何观测值提取:

$$\Phi_{r,gf}^S = \Phi_{r,1}^S - \Phi_{r,f}^S = -I_{r,1}^S + \mu_f I_{r,1}^S + N_{r,1}^S - N_{r,f}^S + \varepsilon_L = (\mu_f - 1)I_{r,1}^S + N_{r,1}^S - N_{r,f}^S + \varepsilon_L, \quad (5)$$

式中 $\Phi_{r,gf}^S$ 表示相位几何无关组合,其他参数含义同式(4).由于整周模糊度的存在,导致无法从相位观测值中获取绝对的电离层 TEC 值.在连续弧段内模糊度为常数,因此可采用连续滤波的方法,以尽可能减小相位噪声的影响,得到准确的相对电离层:

$$\eta_{\text{STEC-diff}} = \frac{\left(\Phi_{r,gf}^S - \frac{1}{N} \sum \Phi_{r,gf}^S \right)}{\frac{f_1^2 f_5^2}{(f_1^2 - f_5^2) \times 40.3 \times 10^{16}}}, \quad (6)$$

式中: $\eta_{\text{STEC-diff}}$ 表示斜电离层延迟的相对变化量(单位:TECU), N 表示连续弧段历元个数, f 表示载波相位的频率(单位:Hz),下标表示不同的频点.

载波相位观测值的质量直接影响了电离层提取的精度.智能手机载波相位观测值极易发生周跳,故周跳探测极为重要.当两个连续历元间 TEC 变化量大于给定阈值时,可判断当前历元发生周跳.在中纬度地

区,测地型接收机历元间变化量约 0.01 TECU/s.考虑到智能手机天线质量和相位噪声,且 L1 频点一个波长对应的电离层 TEC 约 1.1 TECU,本文设定的两个连续历元间 TEC 变化量阈值为 0.5 TECU/s.为了尽量减少周跳影响,如果当前历元探测出周跳时,则重新初始化.

2 实验设计与数据采集

本文智能手机选用小米 8 手机,该手机支持 GPS、GLONASS、BDS、Galileo 和 QZSS 五系统,为全球首款搭载博通 BCM47755 双频(GPS L1+L5、Galileo E1+E5a、QZSS L1+L5)GNSS 芯片的手机,且能够获取有效的原始伪距和载波相位观测值,是目前智能手机精密定位研究中常被选用的设备,其结果得到研究人员的广泛认可.

智能手机在开发者模式中打开 GNSS 相位观测值连续跟踪选项,放置于楼顶开阔环境的观测墩上,相隔约 5 m 的另一观测墩上放置 Trimble Alloy 测地型接收机,形成超短基线,同时采集数据.智能手机数据记录采用德国 Geo++公司发布的 Geo++Rinex Logger 应用,该应用能将原始 GNSS 观测值直接保存成与接收机无关的交换格式(Receiver Independent Exchange Format, RINEX).数据采集世界协调时(Coordinated Universal Time, UTC)为 2021 年 1 月 8 日 01:00:41—23:59:59,采样率 1 s,总时长约 23 h.

3 实验结果分析

3.1 智能手机相位观测数据质量分析

智能手机载波相位观测值的质量直接影响了电离层提取的精度.目前,小米 8 手机已支持 GPS/Galileo/QZSS 三系统双频观测值,然而在本次实验中未能观测到 Galileo 系统卫星有效的双频观测值.图 1 展示了观测到的 GPS 和 QZSS 双频卫星数量时间序列,其中红色表示当前历元观测到的所有卫星数,蓝色表示当前历元双频卫星数,可以看出平均每个历元 GPS 双频卫星大约能观测到 4 颗左右,QZSS 卫星约 3 颗,观测到总的双频卫星数约占总卫星数的 33%.

智能手机 GNSS 天线为线性极化天线,无法抑制多路径效应的影响,增加了观测值的观测噪声,造成卫星频繁失锁,导致相位观测值频繁发生周跳.为了最小相位观测值对电离层提取的影响,本文利用高频数据,连续两个历元间电离层变化小的特性进行质量控制,当历元间电离层变化大于 0.5 TECU/s

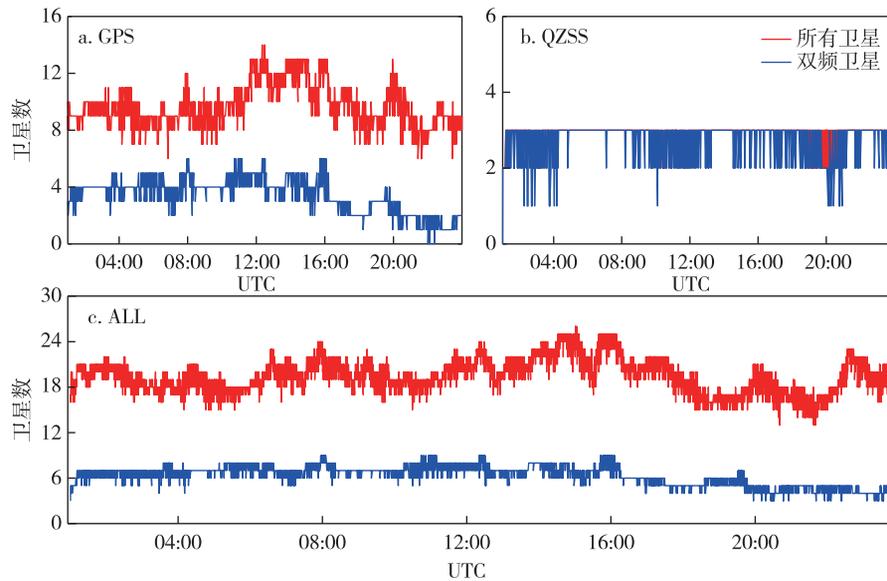


图1 观测到的卫星数时间序列

Fig. 1 Time series of the number of satellites observed

时,判定为周跳,则舍弃当前历元观测值.图2和图3分别给出了卫星信号载噪比(Carrier to Noise)时间序列和舍弃的观测值载噪比分布,可以看出,GPS和QZSS的L1频点中舍弃观测值载噪比低于30 dB-Hz数量多于L5频点,这可能是由于L5频点波长更长,受多路径的影响更小.然而与GPS L5频点相比,GPS L1舍弃观测值载噪比低于30 dB-Hz数量占比高出21个百分点,QZSS仅高出11个百分点,这可能是由于目前智能手机接收双频GNSS信号采用双天线设计而导致的差异.由图3还可以看出,除了GPS L1

频点外,GPS L5、QZSS L1和QZSS L5频点在载噪比为40 dB-Hz左右舍弃的观测值是最多的,由此可见,单纯设置载噪比阈值来进行质量控制是不可行的.

图4和图5分别给出了卫星高度角的时间序列和舍弃观测值的卫星高度角分布,可以看出,舍弃的GPS观测值中高度角低于30°的观测数约占85%,这是由于卫星在低高度角时,卫星信号更容易受到大气折射、多路径效应等因素的影响,同时智能手机线性极化天线抗多路径性能差,从而导致相位观测值

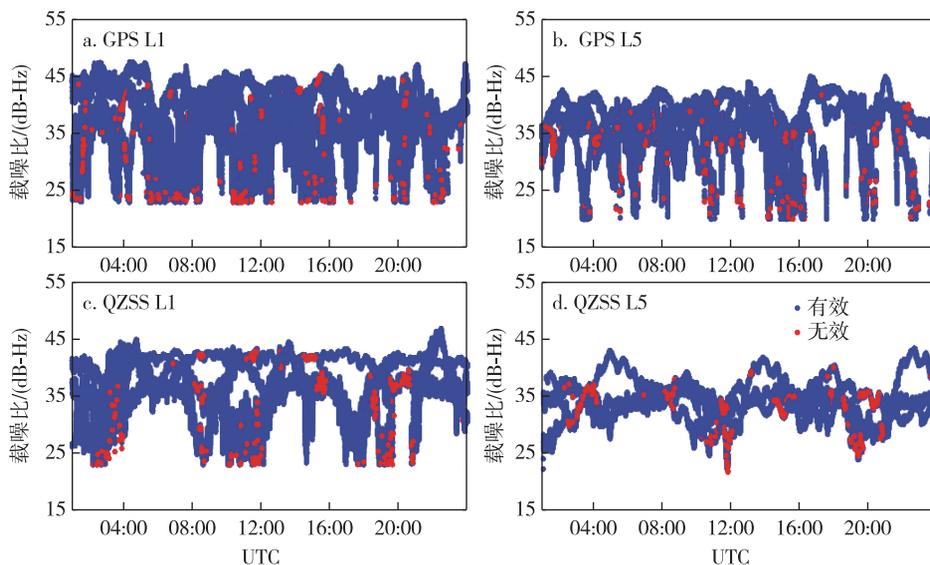


图2 载噪比时间序列(红色散点表示无效的观测值)

Fig. 2 Time series of the C/N_0 (red scattered points represent invalid observations)

频繁发生周跳.舍弃的 QZSS 观测值中高度角低于 30° 的观测数仅占 36%,高度角在 60° 左右占比最大,这可能是由于智能手机跟踪不同系统卫星性能存在一定的差异造成的.

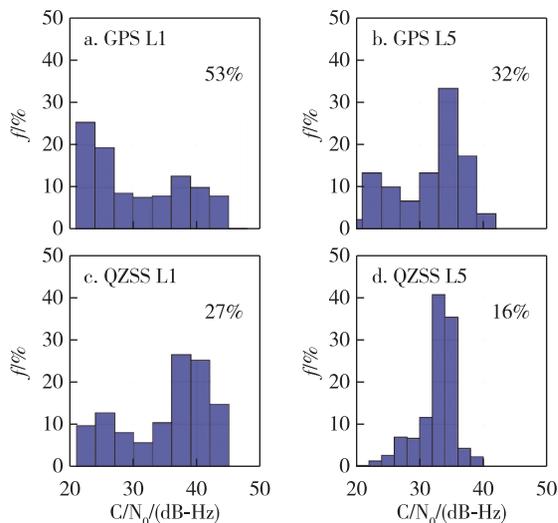


图3 舍弃观测值载噪比分布
(蓝色数字表示载噪比低于 30 dB-Hz 的百分比)

Fig. 3 C/N_0 distribution of discarded observations

(blue numbers represent percentages with C/N_0 below 30 dB-Hz)

通过以上分析可以发现,由于智能手机 GNSS 天线、跟踪环路等因素影响,在较高的载噪比或卫星高度角时,也常出现跟踪卫星失锁,导致周跳发生,严重影响了相位观测值质量.低载噪比或高度角时,部分相位观测值依然有效,甚至舍弃观测值更少,间接验证了通过连续历元间电离层变化小的特性进行观测值质量控制的有效性.

3.2 电离层延迟提取比较

本节主要基于前文提出的相位无几何组方法,并与超短基线 Trimble Alloy 测地型接收机结果比较,分析 GPS 和 QZSS 双系统提取的电离层延迟精度.

相位电离层延迟提取时,首先利用连续历元间电离层变化阈值进行质量控制,舍弃无效的观测值,然后形成几何无关组合观测值,采用连续滤波方法,即可得到相对的 STEC 值.图 6 展示了小米 8 和 Trimble Alloy 接收机观测到的部分 GPS 系统卫星提取的相对 STEC 时间序列.不同的子图表示不同的卫星,红色和蓝色散点分别表示小米 8 和 Trimble Alloy 接收机提取的 GPS 卫星相对 STEC 值.可以看出,小米 8 观测到的各卫星提取的相对 STEC 值和 Trimble Alloy 接收机有着一致的变化趋势,图 6c 显示了测

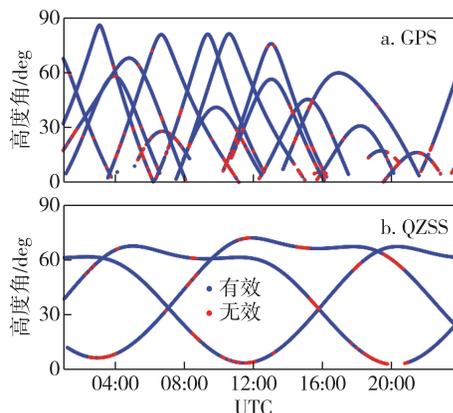


图4 卫星高度角时间序列

(红色散点表示无效的观测值)

Fig. 4 Time series of satellite elevation

(red scattered points represent invalid observations)

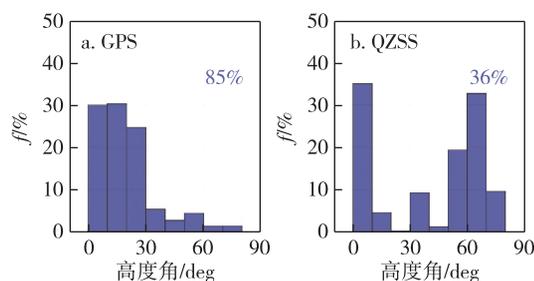


图5 舍弃观测值的卫星高度角分布

(蓝色数字表示卫星高度角低于 30° 的百分比)

Fig. 5 Satellite elevation distribution for discarded observations
(blue numbers represent percentages with elevation below 30°)

地型接收机在 UTC 时间 16:00—18:00 间,探测到了 G06 卫星信号传播路径上的电离层变化较为明显,小米 8 也很好地探测到这一变化.同时,小米 8 提取的结果变化幅度略高于测地型接收机,总体上与测地型接收机呈现了很好的一致性.

图 7 表示小米 8 和 Trimble Alloy 接收机提取 GPS 卫星相对 STEC 值的散点分布图,不同子图表示不同的 GPS 卫星,红色和蓝色散点分别表示小米 8 和 Trimble Alloy 接收机相对 STEC 值散点和散点直线拟合,蓝色式子表示直线拟合方程,红色数字表示小米 8 以 Trimble Alloy 接收机相对 STEC 值为真值,相对 STEC 值时间序列的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE).可以看出,小米 8 和 Trimble Alloy 接收机相对 STEC 值散点分布在斜率约为 1,截距为 0 的直线上,更加直接地反映了小米 8 和 Trimble Alloy 接收机 GPS 卫星相对 STEC 值具有很好的一致性.同时,小米 8 提取的 GPS 卫星相对电离层精度约 0.1 TECU.

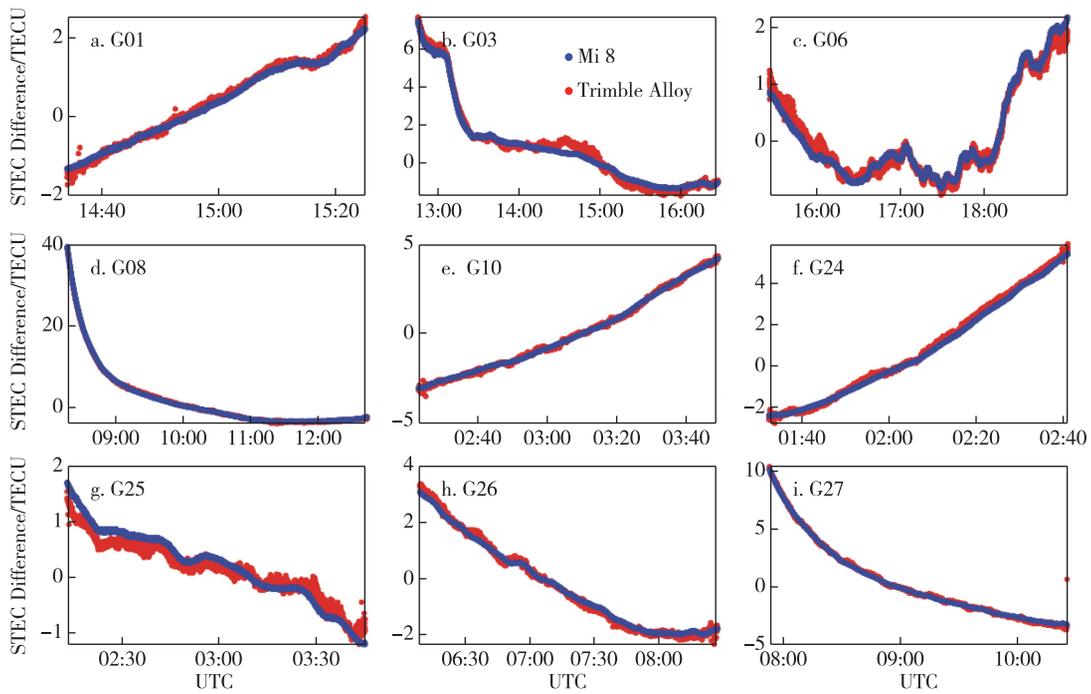


图6 小米8和Trimble Alloy提取的GPS卫星相对STEC值比较

Fig. 6 Comparison of STEC difference from Mi 8 and Trimble Alloy from GPS

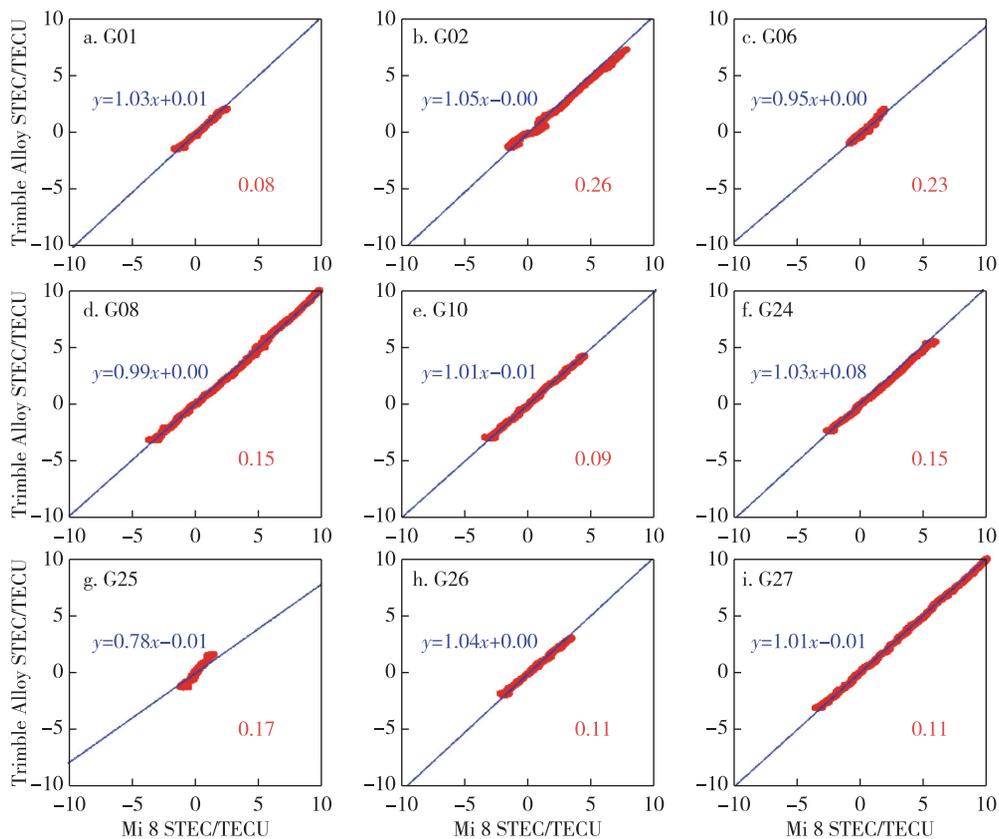


图7 小米8和Trimble Alloy提取的GPS卫星相对STEC值的散点图(红色数字表示RMSE值,蓝色式子表示散点的线性拟合方程)

Fig. 7 Scatter plot with STEC difference from Trimble Alloy and Mi 8 from GPS (red numbers represent the RMSE values, and blue formulas represent the linear fitting equations for the scattered points)

图 8 和图 9 分别展示了小米 8 和 Trimble Alloy 接收机提取 QZSS J01、J02 和 J03 卫星相对 STEC 值的散点分布图,其中两图的子图 a—c、d—f 和 g—i 分别表示 J01、J02 和 J03 卫星不同时段的结果,其他图示的表示方法和上文一致.可以看出,与 GPS 类似,QZSS 卫星相对 STEC 与测地型接收机呈现了很好的一致性,且小米 8 智能手机波动幅度更大.图 10 给出了小米 8 手机 GPS 和 QZSS 卫星相对 STEC 提取精度的统计结果,红色和蓝色数字分别表示 GPS 和 QZSS 系统卫星平均 RMSE 值.由图 10 可知,对于 GPS 和 QZSS 大部分卫星相对 STEC 提取精度在 0.2 TECU 以内,GPS 和 QZSS 平均提取精度分别为 0.14 TECU 和 0.13 TECU,两者精度相当.表明利用智能手机级别的低成本 GNSS 设备原始观测值用于电离层研究是可行的,这大大降低了 GNSS 空间监测设备成本,具有广阔的应用前景.

4 总结与展望

本文基于全球首款搭载 GNSS 双频芯片的小米 8 智能手机和超短基线的 Trimble Alloy 测地型接收机,利用原始 GNSS 双频载波相位无几何组合观测值,评估了电离层提取精度.

小米 8 支持 GPS (L1/L5)、Galileo (E1/E5a) 和

QZSS (L1/L5) 三系统双频信号跟踪,但测试期间仅能观测到 GPS 和 QZSS 双系统双频卫星,无法观测到有效的 Galileo 系统卫星信号.平均每个历元大约观测到 6 颗双频卫星,约占观测到总卫星数的 33%.同时利用高频连续历元间电离层变化较小的特性进行质量控制,超过阈值的观测值被视为发生了周跳,在提取电离层时剔除.结果表明:与设置载噪比或高度角阈值相比,该方法既能识别高载噪比和高度角数据中的周跳,又能获取低于载噪比或高度角阈值的有效观测数据,大大提高了观测值的利用率.同时,小米 8 智能手机在跟踪 GPS 和 QZSS 卫星能力表现出系统差异.

与超短基线的 Trimble Alloy 测地型接收机电离层提取结果比较表明:小米 8 智能手机原始 GNSS 双频载波相位观测值提取的相对 STEC 与 Trimble Alloy 测地型接收机呈现很好的一致性,小米 8 相对 STEC 提取结果波动幅度略大.大部分卫星相对 STEC 提取精度优于 0.2 TECU, GPS 和 QZSS 系统卫星提取的相对 STEC 的 RMSE 值分别为 0.14 TECU 和 0.13 TECU,没有表现很大系统差异,两者精度基本相当.这表明智能手机级别的低成本 GNSS 设备具有高精度电离层提取的潜力,在保证精度的情况下,能大大降低 GNSS 空间天气监测的成本,具有广阔

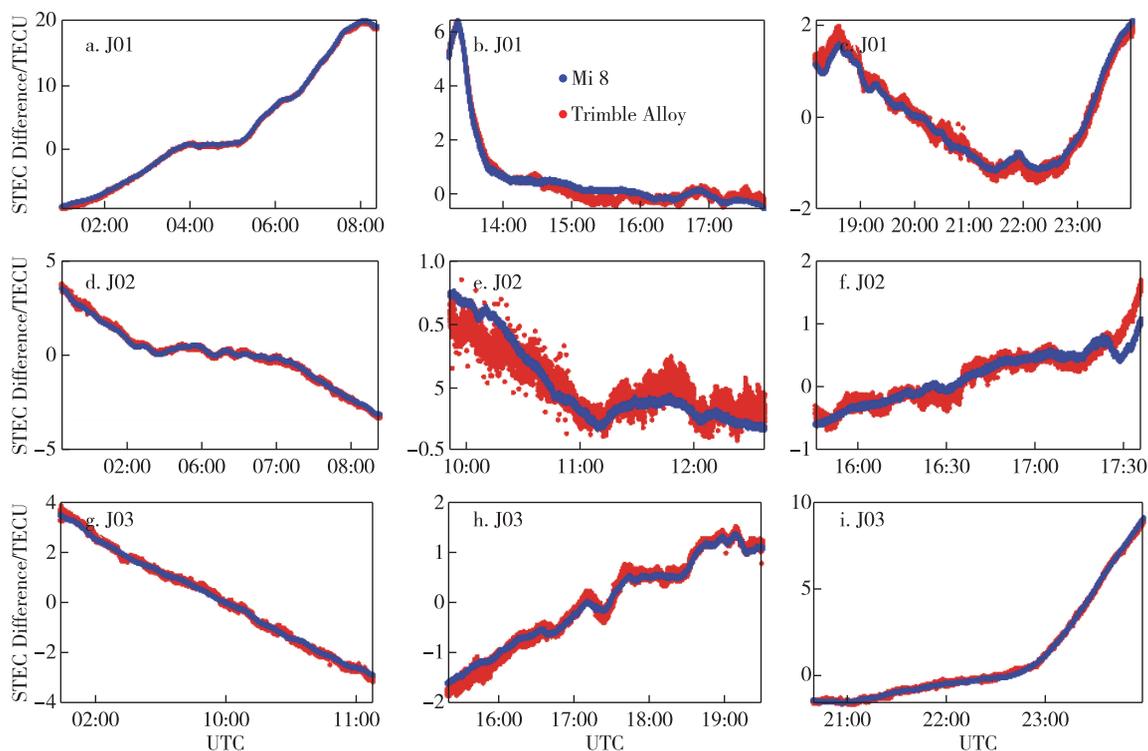


图 8 小米 8 和 Trimble Alloy 提取的 QZSS 卫星相对 STEC 值比较

Fig. 8 Comparison of STEC difference from Mi 8 and Trimble Alloy from QZSS

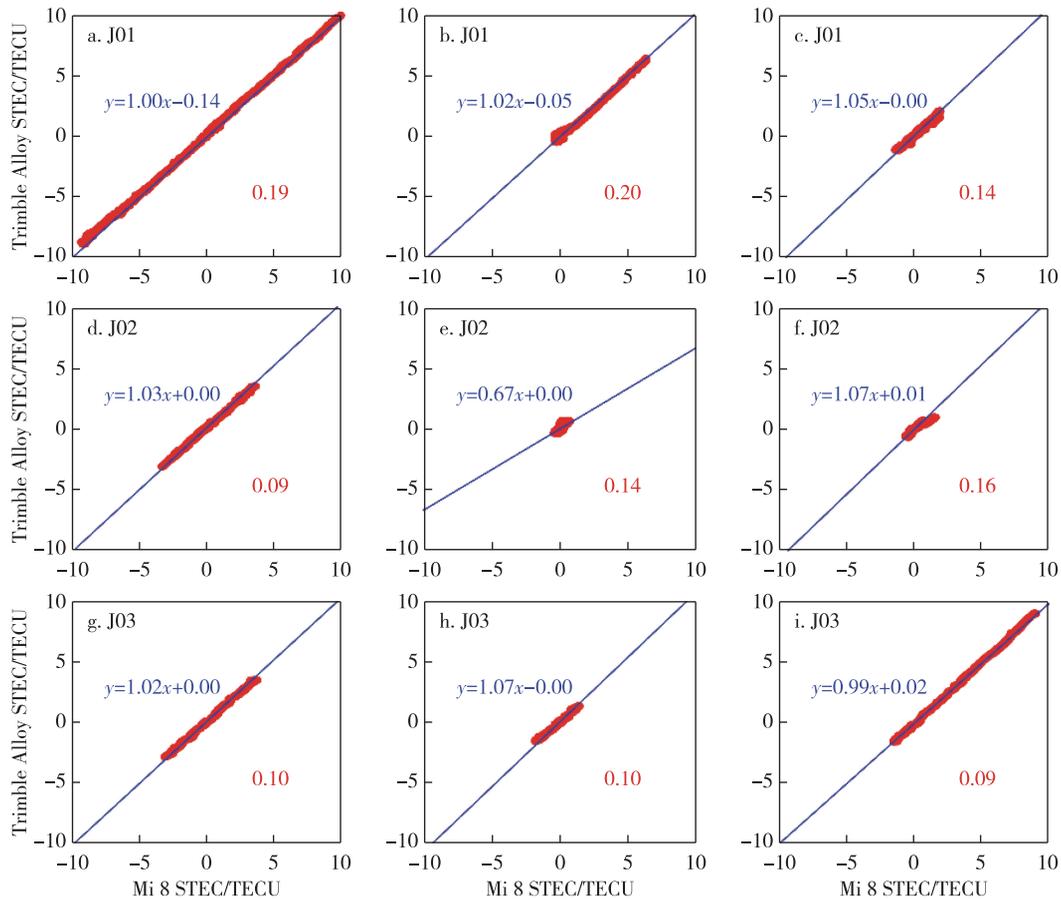


图9 小米8和Trimble Alloy提取的QZSS卫星相对STEC值的散点图(红色数字表示RMSE值,蓝色式子表示散点的线性拟合方程)

Fig.9 Scatter plot with STEC difference from Trimble Alloy and Mi 8 from QZSS (red numbers represent the RMSE values, and blue formulas represent the linear fitting equations for the scattered points)

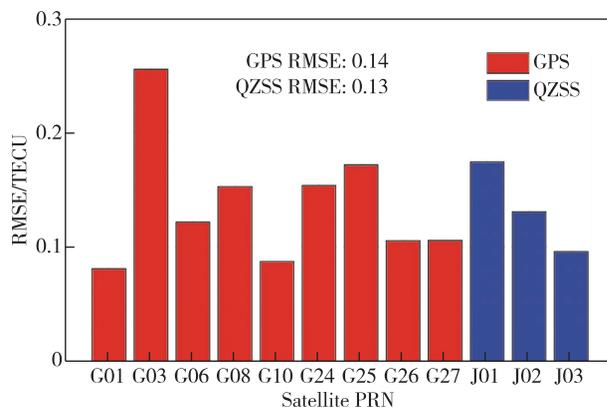


图10 小米8相对STEC值的精度

Fig.10 Accuracy of Mi 8 STEC difference

的市场应用前景.

下一步将采用不同品牌、不同GNSS芯片型号的智能手机,比较和分析其电离层提取精度差异,并进行电离层建模实验,更加全面地评估智能手机提取电离层的精度表现.

参考文献

References

- [1] Yang Y X, Mao Y, Sun B J. Basic performance and future developments of Beidou global navigation satellite system [J]. Satellite Navigation, 2020, 1 (1) : 1. DOI: 10.1186/s43020-019-0006-0
- [2] Paziewski J. Recent advances and perspectives for positioning and applications with smartphone GNSS observations [J]. Measurement Science and Technology, 2020, 31 (9) : 091001. DOI: 10.1088/1361-6501/ab8a7d
- [3] Zhang X H, Tao X L, 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) : 1-11
- [4] Li G C, Geng J H. Characteristics of raw multi-GNSS measurement error from Google Android smart devices [J]. GPS Solutions, 2019, 23 (3) : 1-16
- [5] 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
- [6] Tomaščík J, Chudá J, Tunák D, et al. Advances in smartphone positioning in forests: dual-frequency receivers and raw GNSS data [J]. *Forestry: an International Journal of Forest Research*, 2021, 94(2): 292-310
- [7] Guo L, Wang F, Sang J, et al. Characteristics analysis of raw multi-GNSS measurement from Xiaomi Mi 8 and positioning performance improvement with L5/E5 frequency in an urban environment [J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(4): 744. DOI: 10. 3390/rs12040744
- [8] Wang G X, Bo Y D, Yu Q, et al. Ionosphere-constrained single-frequency PPP with an android smartphone and assessment of GNSS observations [J]. *Sensors*, 2020, 20(20): 5917. DOI: 10. 3390/s20205917
- [9] Chen B, Gao C F, Liu Y S, et al. Real-time precise point positioning with a Xiaomi MI 8 android smartphone [J]. *Sensors*, 2019, 19(12): 2835. DOI: 10. 3390/s19122835
- [10] Massarweh L, Fortunato M, Gioia C. Assessment of real-time multipath detection with android raw GNSS measurements by using a Xiaomi Mi 8 smartphone [C] // 2020 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS). April 20-23, 2020, Portland, OR, USA. IEEE, 2020: 1111-1122
- [11] 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): 1-12
- [12] Liu W K, Shi X, Zhu F, et al. Quality analysis of multi-GNSS raw observations and a velocity-aided positioning approach based on smartphones [J]. *Advances in Space Research*, 2019, 63(8): 2358-2377
- [13] Geng J H, Li G C. On the feasibility of resolving Android GNSS carrier-phase ambiguities [J]. *Journal of Geodesy*, 2019, 93(12): 2621-2635
- [14] Gao R, Xu L, Zhang B C, et al. Raw GNSS observations from Android smartphones: characteristics and short-baseline RTK positioning performance [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/abe56e>
- [15] Jin S G, Gao C, Yuan L L, et al. Long-term variations of plasmaspheric total electron content from topside GPS observations on LEO satellites [J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(4): 545. DOI: 10. 3390/rs13040545
- [16] Su K, Jin S G, Jiang J, et al. Ionospheric VTEC and satellite DCB estimated from single-frequency BDS observations with multi-layer mapping function [J]. *GPS Solutions*, 2021, 25(2): 1-17
- [17] Jin S G. Two-mode ionospheric disturbances following the 2005 northern California offshore earthquake from GPS measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, 123(10): 8587-8598
- [18] Zhang B C, Teunissen P J G, Yuan Y B, et al. Joint estimation of Vertical Total Electron Content (VTEC) and Satellite Differential Code Biases (SDCBs) using low-cost receivers [J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(4): 401-413

Retrieval of ionospheric delay based on smartphone raw GNSS dual-frequency observations

XU Li^{1,2} ZHANG Baocheng¹

1 Innovation Academy for Precision Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071

2 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract At present, research on smartphone GNSS high-precision positioning observations mainly focuses on quality analysis and positioning algorithms, but few studies have been carried out on their atmospheric applications. In this research, the ionospheric delay using the raw GNSS dual-frequency carrier phase observations from Xiaomi Mi 8, the world's first dual-frequency smartphone, is estimated and compared with that of Trimble Alloy geodesic receiver with ultra-short baseline. The quality of observations is controlled by considering the small ionospheric variation between successive epochs. The results show that the observations of smartphone may still be invalid when the satellite elevation or the carrier-to-noise is high. The method of setting threshold of satellite elevation or the carrier-to-noise is no longer applicable for quality control. The ionospheric delay retrieved by Xiaomi Mi 8 is in good agreement with that of Trimble Alloy geodetic receiver, with slightly higher fluctuation range. The retrieving accuracy is better than 0.2 TECU, indicating that the GNSS observations from smartphone is feasible for atmospheric application.

Key words smartphone; Global Navigation Satellite System (GNSS); ionospheric delay; multipath; carrier-to-noise