

低成本 μ -blox 单频多系统 GNSS 接收机的 定位性能分析

龙驰宇¹, 温强²

(1. 武汉大学 测绘学院, 湖北 武汉 430079; 2. 武汉大学 卫星导航定位技术研究中心, 湖北 武汉 430079)

摘要: 随着大众市场对高精度定位需求增加, 基于低成本小型化设备的全球卫星导航系统(GNSS)高精度定位成为研究热点之一。本文以低成本多系统 GNSS 接收机 μ -blox M8P 型号为例, 分析其观测数据质量, 研究其伪距单点定位和单频载波相对定位的定位性能和特点, 为低成本 GNSS 接收机高精度定位应用提供参考。实验结果表明, 与测量型接收机相比, μ -blox 输出 GNSS 观测值的载噪比略小, 伪距和载波相位的测量噪声较大。静态模式下, μ -blox 的单频载波相对定位(基线长度约为 430 m)可以提供厘米级的定位精度; 城市环境动态模式下, 其单频载波相对定位可提供亚米级至米级的定位精度。信号受限环境下, GPS/GLONASS 双系统能够提供更稳定的定位结果。

关键词: GNSS; 单频; 低成本 μ -blox 接收机; 数据质量分析; 高精度定位

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)04-0082-07

0 引言

全球卫星导航系统(GNSS)定位结果受接收机和天线等硬件的影响, 面向不同市场应用的接收机在稳定性、接收信号质量和卫星信号可观测性等方面会表现出很大的差异^[1-2]。因此, 在同样的环境条件下, GNSS 定位精度的高低受制于接收机和天线本身的卫星信号处理能力。当前的 GNSS 接收机主要分为用于消费市场的低成本接收机和用于科研、工程领域的测量型接收机。测量型接收机由于使用了高性能的硬件以及复杂的信号跟踪处理算法^[3], 一般能够同步跟踪双频甚至更多频的多系统载波相位、伪距和多普勒等观测值。同时, 测量型接收机配有高精度天线, 可以更好地抑制多路径效应等误差的影响, 从而获得更高质量的观测信号。因此, 测量型接收机在信号可观测性、稳定性以及观测信号质量方面表现优异, 可以实现厘米乃至毫米级的高精度定位。相比之下, 用于大众市场的低成本接收机一般仅能提供米级的定位精度^[4-5]。由于接收机成本的限制, 目前市场上新型主流的低成本 GNSS 接

收机仅能接收单频双系统 GPS/GLONASS 的观测数据, 并且所使用的多是低成本天线, 其多路径噪声抑制能力较差, 并且具有较低的信噪比。

测量型 GNSS 接收机虽然可以提供很高的测量精度, 但是由于其价格昂贵, 体积和质量较大, 超过了大众消费市场的成本承受能力, 并且无法安置在平台较小的设备上, 从而制约了其应用^[6], 因此低成本高精度接收机的研发及其数据处理理论的发展成为现在位置服务市场的迫切需求。截至目前, 面向大众市场的 μ -blox 接收机不仅成本低, 能够为大众市场所接受, 而且体积质量都很小, 可以满足小型平台对 GNSS 接收机对体积和载荷的限制性要求^[7], 为消费市场的各种应用实现提供了较好的备选方案。

本文基于 μ -blox M8P 低成本 GNSS 接收机进行测试, 分析其观测数据质量与静态模式和车载动态模式下的单频载波相对定位的性能, 为基于载波的低成本单频 GNSS 高精度定位的实际应用提供有益参考。

收稿日期: 2019-04-23

资助项目: 国家自然科学基金(41674033)

通信作者: 温强 E-mail: qwen@whu.edu.cn

1 观测模型

GNSS 单频伪距和载波相位的观测方程一般表示为^[8]

$$\begin{aligned} P_r^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + d_{orb}^s + I_r^s + T_r^s + \\ &\quad c(b_r - b^s) + \epsilon_{r,P}^s, \\ L_r^s &= \rho_r^s + c(dt_r - dt^s) + d_{orb}^s - I_r^s + T_r^s + \\ &\quad \lambda N_r^s + \lambda(d_r - d^s) + \epsilon_{r,L}^s. \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P_r^s 和 L_r^s 分别为 L_1 频率上的伪距观测值和载波相位观测值, m ; ρ_r^s 为卫星端天线载波相位中心到接收机端天线载波相位中心的距离, m ; dt_r 和 dt^s 分别为接收机钟差和卫星钟差, s ; d_{orb}^s 为卫星轨道误差, m ; I_r^s 和 T_r^s 分别为信号传播路径上的电离层延迟和对流层延迟, m ; b_r 和 b^s 分别为接收机上和卫星上的伪距硬件延迟偏差, s ; d_r 和 d^s 分别为接收机上和卫星上的载波相位硬件延迟, $周$; N_r^s 为载波相位整周模糊度, $周$; $\epsilon_{r,P}^s$ 和 $\epsilon_{r,L}^s$ 分别为伪距和载波相位的观测噪声。

GNSS 定位方式主要包括单点定位和相对定位, 且基于不同类型的观测值可提供不同量级的定位精度。其中基于载波相位观测值的相对定位和精密单点定位 (PPP) 技术是实现 GNSS 高精度定位的主流技术^[8]。基于载波相位观测值的相对定位, 接收机端和卫星端的钟差、硬件延迟以及卫星轨道误差被消除, 空间相关性较强的电离层延迟和对流层延迟被削弱甚至可忽略不计, 因此基于短基线的载波相对定位通常可以实现厘米级甚至毫米级定位精度。本文将采用相对定位模式对低成本接收机的定位性能做评估分析。

2 实验与分析

本文基于低成本 GNSS 接收机和低成本贴片天线的实测数据, 首先对数据质量进行分析, 然后进行静态定位和动态车载定位性能分析。所使用的低成本接收机和天线为可以接收单频 GPS/GLONASS 双系统观测数据的新型 μ -blox M8P 接收机及其配套的 ANN-MS 贴片型天线。

2.1 静态实验测试

为了测试 μ -blox M8P 接收机静态环境下能够达到的定位精度, 本实验在较为开阔的环境进行了 17 个小时静态连续观测。数据采集时间为 2018 年 6 月 4 日 07:00:00 协调世界时 (UTC) 至 2018 年 6 月 4 日 24:00:00 UTC, 观测值为单频 GPS/GLONASS 伪距观测值和载波相位观测值, 采样率为 1 Hz。数

据采集地点为武汉大学信息学部教学实验大楼楼顶, μ -blox M8P 和 Trimble NetR9 观测条件一致。在测试前已经通过双频接收机数据解算精确测定两台接收机天线所在位置坐标, 精度可达 2 mm, 可以作为两台天线位置的参考真值。

2.1.1 数据质量分析

本节将从载噪比、伪距及载波相位观测噪声等方面分析低成本接收机 μ -blox 的数据质量。

1) 载噪比

接收机测量的载噪比是指载波信号与噪声的能量密度之比, 与信号强度息息相关。载噪比是信号在整个传输过程中经过增益和损耗的结果, 受到卫星有效载荷、卫星天线、传播路径、接收机等的影响^[9]。因此, 通过与相同测试环境下的高精度接收机的载噪比较, 可以反映出低成本接收机的观测信号强度和质量。

如图 1 所示, 对比了两种接收机测量的 GNSS 载噪比与高度角的关系, 其以 5° 为单元划分 $0^\circ \sim 90^\circ$ 高度角, 统计每单元内两种接收机所接收的所有 GPS 和 GLONASS 卫星信号载噪比的均值。其中不同形状代表不同的接收机和不同的卫星系统。如图 1 中高度角 37.5° 处的星形点表示 μ -blox 接收机所接收的高度角在 $35^\circ \sim 40^\circ$ 内的 GPS 卫星的信号载噪比均值。除卫星高度角在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 外, Trimble 接收机所测量 GPS 信号载噪比均略大于 μ -blox 接收机所测量的 GPS 信号载噪比, 两种接收机所测量 GLONASS 信号载噪比值相近。除个别高度角区段, 两种接收机在同等高度角下测量的 GLONASS 信号载噪比值均小于 GPS 信号载噪比值。 μ -blox 接收机接收到的信号载噪比随高度角降低而减小, 这与 Trimble 接收机相似, 所以 μ -blox 接收机可采用与测量型接收机同样的观测值定权方式, 即高度角定权。

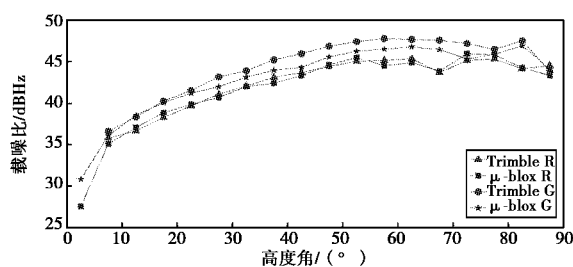


图1 Trimble 和 μ -blox 的 GNSS 信号载噪比与高度角关系 (其中 R 代表 GLONASS 卫星, G 代表 GPS 卫星)

2) 观测值噪声

伪距噪声和载波相位噪声可用于评估接收机观测质量. 为了确定观测值的噪声, 本文采用三阶导数法^[10]. 三阶导数法的原理是假定观测值的高频信息等价于噪声, 通过对观测值的微分来确定观测值的噪声. 该方法使用连续的四个历元进行差分, 消除了大气延迟、部分多径误差和几何距离等低频信息. 在归一化后, 三阶导数的标准差可以被用作观测值噪声的度量^[11].

用 $CP(i)$ 表示历元 i 的载波相位测量值, CPN 表示载波相位噪声, 用三阶导数法计算 CPN 的公式如下:

$$CPN = \frac{CP(i+3) - 3 \times CP(i+2) + 3 \times CP(i+1) - CP(i)}{\sqrt{20}} \quad (2)$$

用 $P(i)$ 表示历元 i 的伪距测量值, PN 表示伪距噪声, 用三阶导数法计算 PN 的公式如下:

$$PN = \frac{P(i+3) - 3 \times P(i+2) + 3 \times P(i+1) - P(i)}{\sqrt{20}} \quad (3)$$

三阶导数法解算观测噪声可以自动排除测量偏差等信息, 但在估计载波相位噪声的时候, 有两点需要注意. 第一点是, 低成本接收机的钟噪声往往具有与载波相位热噪声相同甚至更高的数量级, 这意味着三阶导数法无法分离钟噪声和相位热噪声. 第二点是, 载波相位测量值中可能存在周跳, 当探测到周跳时需要将其从载波相位测量值中排除.

图 2 和图 3 分别示出了 Trimble 和 μ -blox 所采集静态数据中的 GPS 和 GLOANSS 伪距噪声和载波相位噪声, 不同颜色表示不同的卫星. 从图 2 中可看出两种接收机所观测的 GLONASS 伪距噪声标准差均大于所观测的 GPS 伪距噪声标准差 20 cm 左右. Trimble 接收机观测的 GPS 伪距噪声标准差为 0.25 m, 约小于 μ -blox 接收机观测的 GPS 伪距噪声的标准差 0.07 m; Trimble 接收机观测的 GLONASS 伪距噪声标准差为 0.45 m, 约小于 μ -blox 接收机观测的 GLONASS 伪距噪声的标准差 0.09 m. 两种设备的正常伪距噪声稳定度相近, 但 μ -blox 接收机观测的伪距存在较多的非正常噪声, 本文认为这些非正常噪声是粗差, 造成了 μ -blox 接收机的伪距观测值标准差偏大. 图 3 示出了 Trimble 接收机所观测的 GPS 和

GLONASS 信号的载波相位噪声标准差均在 0.0050 cycle 左右, μ -blox 接收机观测的标准差均在 0.0194 cycle 左右. 图 3 中还示出 GPS 与 GLONASS 信号的载波相位噪声标准差十分接近. 可见由于硬件性能上的差异, 相较测量型接收机, 低成本接收机 μ -blox M8P 所测量的伪距和载波相位均具有较大的测量噪声, 其伪距测量存在较多粗差, 载波相位噪声比测量型接收机的大一个量级.

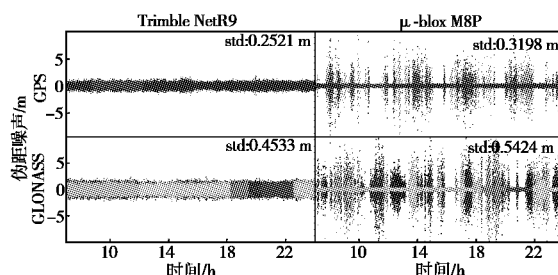


图 2 Trimble 和 μ -blox 所采集静态数据中 GPS 与 GLONASS 信号的伪距噪声

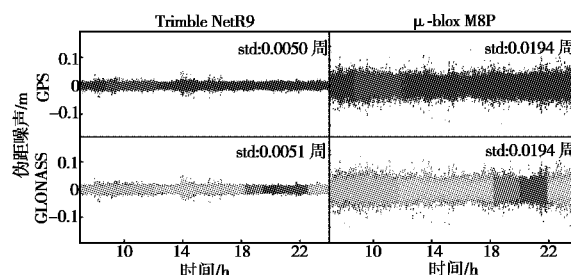


图 3 Trimble 和 μ -blox 所采集静态数据中 GPS 与 GLONASS 信号的载波相位噪声

2.1.2 伪距单点定位精度

为了评估低成本接收机伪距定位精度, 首先进行的是伪距单点定位的处理. 在伪距单点定位中, 所使用的是戈达德航天中心 (GSFC) 发布的广播星历, 电离层延迟使用 Klobuchar 模型进行改正, 对流层延迟使用 Saastamoinen 经验模型进行改正, 截止高度角设置为 10° .

图 4、5、6 分别示出了 Trimble NetR9 和 μ -blox M8P 接收机单频 GPS、GLONASS、GPS/GLONASS 伪距单点定位的误差. 如图 4 所示, 单频 GPS 伪距单点定位时, Trimble 接收机 E/N/U 三个方向的定位误差均方根 (RMS) 值分别为 0.59 m、0.94 m、1.38 m, μ -blox 接收机 E/N/U 三个方向的定位误差 RMS 分别为 0.75 m、0.99 m、1.71 m. 单频 GLONASS 伪距单点定位时, 如图 5 所

示,Trimble 接收机 E/N/U 三个方向的定位误差 RMS 分别为 1.81 m、1.90 m、6.71 m, μ -blox 接收机 E/N/U 三个方向的定位误差 RMS 分别为 3.02 m、3.27 m、8.30 m。可见,与 GPS 相比,两种接收机的 GLONASS 伪距定位误差均较大,且存在定位异常。而采用单频 GPS/GLONASS 组合伪距单点定位时,如图 6 所示,Trimble 接收机 E/N/U 三个方向的定位误差 RMS 分别为 0.65 m、0.94 m、1.33 m, μ -blox 接收机 E/N/U 三个方向的定位误差 RMS 分别为 0.81 m、1.16 m、1.90 m。其结果优于 GLONASS 结果,且与 GPS 结果趋近。在静态模式下,低成本接收机 GLONASS 伪距单点定位的误差最大,GPS 伪距单点定位的误差最小,GPS 伪距单点定位水平精度优于 1 m,垂直精度优于 2 m。

在数据质量分析中,经分析得出了同等高度角下,GLONASS 卫星载噪比小于 GPS 卫星载噪比,且 GLONASS 信号的伪距噪声大于 GPS 信号伪距噪声。因此,这导致了静态 GLONASS 伪距单点定位的误差显著大于 GPS/GLONASS 结合和 GPS 单系统的结果。同时,由于 GLONASS 广播星历精度没有 GPS 的高,导致了 GPS/GLONASS 结合时伪距单点定位的精度反而不如 GPS 单系统。此外, μ -blox 接收机测量的伪距噪声大于 Trimble 接收机测量的伪距噪声,且载噪比小于 Trimble 接收机的,这导致了 μ -blox 接收机的伪距单点定位结果差于 Trimble 接收机的伪距单点定位结果。

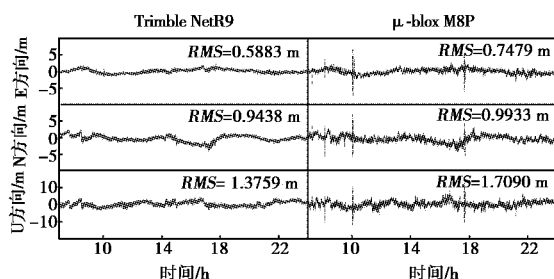


图4 Trimble 和 μ -blox 静态 GPS 伪距单点定位误差对比图

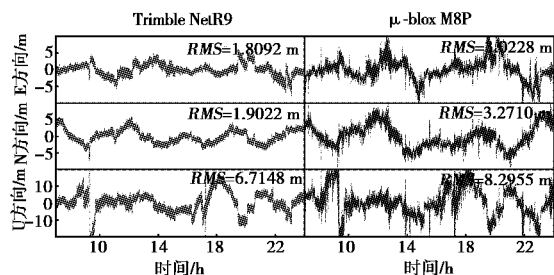


图5 Trimble 和 μ -blox 静态 GLONASS 伪距单点定位误差对比图

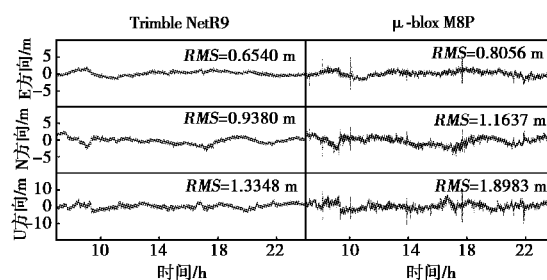


图6 Trimble 和 μ -blox 静态 GPS/GLONASS 结合伪距单点定位误差对比图

2.1.3 短基线相对定位精度

为了测试静态条件下低成本接收机相位观测值定位精度,本文对两种接收机数据进行了短基线相对定位的处理。基准站选取为距离实验地点约 430 m 的 IGS 观测站 WUHN 站,采用单频 GPS/GLONASS 双系统观测数据,采样率为 1 Hz,截止高度角设为 10° 。图 7、8、9 分别表示静态短基线相对定位模式下, μ -blox 低成本接收机和 Trimble 高精度接收机 GPS 单系统相对定位、GLONASS 单系统相对定位、GPS/GLONASS 组合相对定位的结果。如图 7 所示, μ -blox 低成本接收机 GPS 单系统相对定位结果差于测量型接收机结果,其 E/N/U 三方向上 RMS 分别为 0.34 cm、0.41 cm、1.11 cm,比 Trimble 的 E/N/U 三方向 RMS 分别大 0.21 cm、0.25 cm、0.48 cm。如图 8 所示, μ -blox 定位结果在三方向上 RMS 分别为 7.26 cm、2.68 cm、2.48 cm,比 Trimble 的 E/N/U 三方向 RMS 分别大 7.88 cm、2.76 cm、5.27 cm,而两种接收机 GLONASS 单系统相对定位结果误差都很大,且局部定位结果不稳定有较大起伏,这可能是在此时间段 GLONASS 可用卫星数较少造成的。如图 9 所示, μ -blox 低成本接收机 GPS/GLONASS 组合相对定位结果差于测量型接收机结果,其 E/N/U 三方向上 RMS 分别为 0.29 cm、0.32 cm、0.93 mm,比 Trimble 的 E/N/U 三方向 RMS 分别大 0.35 cm、0.47 cm、0.77 cm。通过对比 μ -blox 低成本接收机三个系统的载波相对定位结果,可知在 GPS 观测卫星足够多时,与 GLONASS 组合的相对定位并没有改善定位结果,有时甚至更差,但 GPS/GLONASS 双系统组合对测量型接收机的相对定位结果有显著提升,此差异可能是由于两种接收机对 GLONASS 卫星观测的数据质量差异造成的。

相对定位结果受接收机的载波相位噪声的影

响,在观测值的质量分析中,可得出 μ -blox 接收机的载波相位噪声大于 Trimble 接收机的一个数量级,且对于所有可用卫星整体而言, μ -blox 低成本接收机所接收卫星信号的载噪比较小,因此导致了 μ -blox 低成本接收机的定位结果较差。但在良好的观测环境下,基于 μ -blox 低成本接收机组合 GPS/GLONASS 相对定位,或 GPS 单系统相对定位仍可以提供亚厘米至厘米级的高精度定位服务。

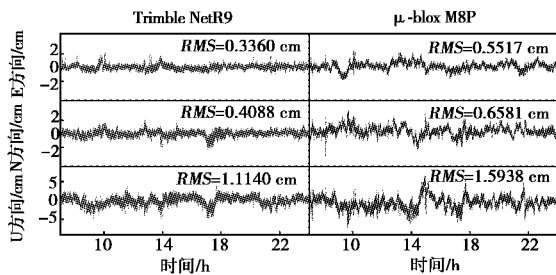


图7 Trimble 和 μ -blox 静态短基线 GPS 相对定位误差对比图

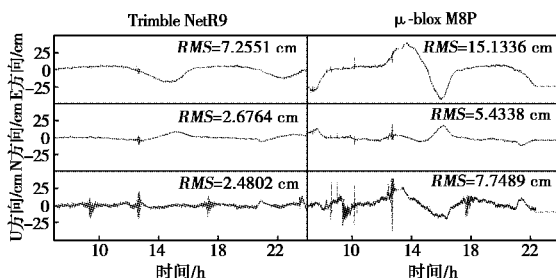


图8 Trimble 和 μ -blox 静态短基线 GLONASS 相对定位误差对比图

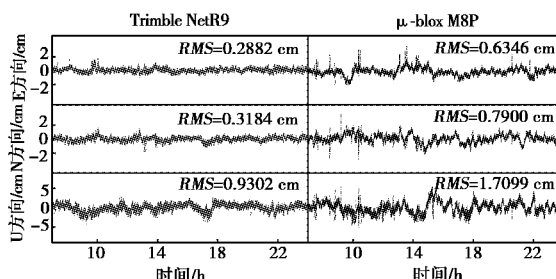


图9 Trimble 和 μ -blox 静态短基线 GPS/GLONASS 组合相对定位误差对比图

2.2 动态车载实验测试分析

为了测试低成本接收机动态定位性能,本文设计了在城市环境下的动态车载实验.测试地点为武汉市高新技术开发区,数据采集时间为2018年6月27日上午10时至12时,所使用接收机采样率均为1 Hz.测试路线如图10所示,实验中行车环绕此区域共5圈.数据处理中分别采用GPS/GLONASS组合及单GPS载波相位相对定位解算,其中基准站为Trimble NetR9接收机,安置在测区内(图10右下角).实验中试验车车顶分别安置了一台Trimble NetR9接收机和一台 μ -blox M8P接收机,两者之间的相对位置固定且测定.本文将车顶Trimble NetR9接收机解算出的轨迹作为参考轨迹,将低成本接收机解算的轨迹与参考轨迹进行求差对比.如图11中左侧的三条曲线所示,GPS/GLONASS组合相对定位E/N/U三方向上的定位误差RMS分别为0.73 m、1.38 m和0.82 m;如图11中右侧的三条曲线所示,GPS单系统相对定位E/N/U三方向上的定位误差RMS分别为1.18 m、1.59 m和0.99 m,这说明在信号受限的环境下,双系统相对定位提供了更稳定的结果.由于城市环境下车道两侧多高大建筑物,对GNSS信号会产生很大的遮挡,并且低成本的 μ -blox接收机所使用的贴片天线抗多路径差,而城市环境下多路径噪声严重,所以其在城市环境下动态实验结果的精度只有亚米级至米级.这说明低成本接收机若想投入到自动驾驶等要求更高动态定位精度的领域使用,在接收机硬件及数据处理策略上还需做出改进.

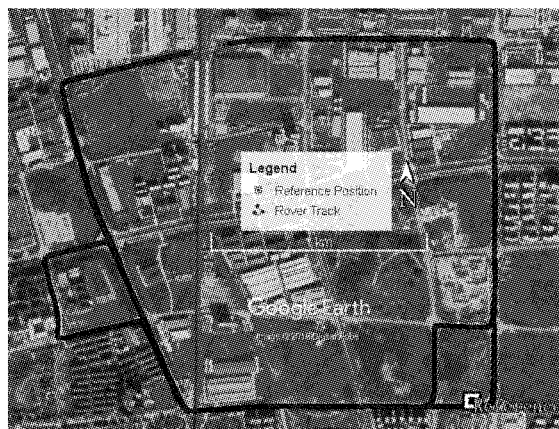
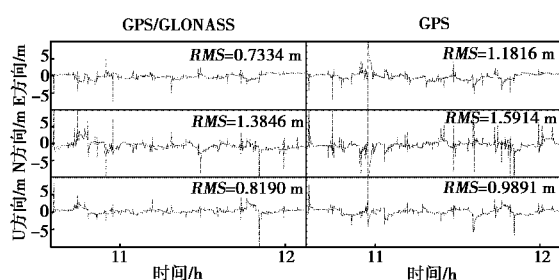


图10 动态车载实验路线图

图 11 低成本接收机 μ -blox 定位结果误差

3 结束语

本文对低成本单频多系统 GNSS 接收机 μ -blox M8P 进行了不同场景下定位精度的测试分析,通过与测量型接收机的定位结果对比,得出如下结论:

1)低成本接收机 μ -blox M8P 所测量 GPS 信号载噪比总体小于测量型接收机,所测量 GLONASS 信号载噪比总体与测量型接收机相近。

2)低成本接收机 μ -blox M8P 所测量的伪距和载波相位均具有较大的测量噪声,其伪距测量存在较多粗差,载波相位噪声比测量型接收机的大一个量级。

3)在静态模式下,低成本接收机 GPS 伪距单点定位水平精度优于 1 m,垂直精度优于 2 m,而采用短基线载波相位相对定位,可以实现厘米级的定位精度,具有很好的应用前景。

4)在车载动态模式下,低成本接收机能够提供亚米级到米级的定位精度。但是对于自动驾驶等需要分米级定位精度的应用,低成本接收机还需要做出改进。

5)在优越环境下,GPS/GLONASS 双系统对低成本接收机定位性能提升不显著甚至变差,但在信号受限环境下,双系统能够提供更稳定的定位结果。

参考文献

- [1] 邹璇. GNSS 单频接收机精密点定位统一性方法的研究[D]. 武汉:武汉大学, 2010.
- [2] 辛星,崔有祯,李继林,等. 一种 BDS/GPS 接收机单频定位精度分析[J]. 测绘科学. 2016, 41(2): 34-38.
- [3] 谢松,张建伟. GPS/BDS 双系统高精度接收机设计方法[J]. 电子技术与软件工程. 2016(14): 39-41.
- [4] VERHAGEN S, ODIJK D, TEUNISSEN P J G, et

al. Performance improvement with low-cost multi-GNSS receivers[C]//2015 5th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing, 2010. DOI:10.1109/NAVITEC. 2010.5708015.

- [5] CINA A, PIRAS M. Performance of low-cost GNSS receiver for landslides monitoring; test and results [J]. Geomatics, Natural Hazards and Risk. 2014, 6 (5-7): 497-514. DOI: 10. 1080/19475705. 2014. 889046.
- [6] STEMPFHUBER W, BUCHHOLZ M. A precise, low-cost RTK GNSS system for UAN applications [J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2011, XXXVIII-1/C22(1):289-293. DOI: 10.5194/inprsarchives-XXXV111-1-C22-289-2011.
- [7] ODOLINSKI R, TEUNISSEN P J G. Low-cost, high-precision, single-frequency GPS-BDS RTK positioning[J]. GPS Solutions. 2017, 21(3): 1315-1330.
- [8] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2005.
- [9] HAUSCHILD A, MONTENBRUCK, SLEEWAE-GEN J M, et al. Characterization of compass M-1 signals[J]. GPS Solutions, 2012, 16(1): 117-126. DOI:10.1007/S10291-011-0210-3.
- [10] LEE Y H, CHIANG K W. The performance analysis of a 3d map embedded ins/gps fusion algorithm for seamless vehicular navigation in elevated highway environments[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2012, XXXIX-B1(1): 491-496. DOI: 10. 5194/isprsarchives-XXXIX-B1-491-2012.
- [11] DE BAKKER P F, SAMSON J, JOOSTEN P, et al. Effect of radio frequency interference on GNSS receiver output[C]//ESA workshop on satellite navigation user equipment technologies NAVITEC, ESA/ESTEC, Noordwijk (NL). 2006. DOI: 10. 13140/2.1.1355.7763.

作者简介

龙驰宇 (1998—),男,主要从事 GNSS 数据质量分析、精密单点定位算法研究。

温强 (1994—),男,硕士研究生,主要从事 GNSS 高精度定位算法研究。

Positioning performance analysis of a low-cost μ -blox single-frequency multi-GNSS receiver

LONG Chiyu¹, WEN Qiang²

(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. GNSS Research Center, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: In recent years, high precision positioning of low-cost miniaturized GNSS receiver has been a hot topic on account of the big surge of high precision positioning in mass market. In this paper, we analyse the quality of GNSS observations and evaluate the positioning performance of a new low-cost, single frequency, multi-GNSS receiver μ -blox M8P in different scenarios with different processing strategies, providing reference for high precision positioning of low-cost GNSS receiver. The experimental results show that the carrier to noise ratio of GNSS observations of μ -blox is lower than that of geodetic receiver and the pseudorange and carrier phase noise are higher. In static mode the low-cost GNSS receiver can achieve a high performance with a precision of centimeter level from short baseline relative positioning. In dynamic urban vehicle test the low-cost GNSS receiver can provide a precision of sub-meter to meter level with short baseline relative positioning. In a signal-constrained environment, the GPS/GLONASS combined positioning can provide more stable results.

Keywords: GNSS; single frequency; low-cost μ -blox receiver; data quality analysis; high precision positioning