

GNSS接收机观测精度动态评估方法及高动态特性分析

杨慧君^{1,2},刘李娟^{1,2},刘昌建^{1,2},谷宇舒^{1,2},冯克明²

(1.北京无线电计量测试研究所,北京 100854;2.中国航天科工集团第二研究院,北京 100854)

摘要:在无线光通信系统中,全球卫星导航系统(GNSS)定位技术能够辅助系统快速、准确地完成光信号的捕获,但高动态下GNSS接收机的观测噪声增大,对定位精度造成重要影响。提出了一种适用于动态场景的观测噪声评估方法,明确了接收机观测精度的具体推导方法,并对GPS信号在不同动态下的噪声进行了分析。研究表明:观测噪声仅与加速度有关,与速度无关,且加速度越大,噪声越大;载波相位的观测精度远高于伪距观测精度,且不同频率的观测噪声随动态变化的整体趋势相仿,其中L1频率的噪声略大,L5频率观测精度最优。

关键词:光通信;GNSS系统;观测精度;高动态

中图分类号:TN957.5 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)06-0044-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.011

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Dynamic evaluation method of GNSS receiver observation accuracy and analysis of high dynamic characteristics

YANG Huijun^{1,2}, LIU Lijuan^{1,2}, LIU Changjian^{1,2}, GU Yushu^{1,2}, FENG Keming²

(1. Beijing Institute of Radio Metrology and Measurement, Beijing 100854, China;

2. The Second Research Institute of China Aerospace Science and Technology Group, Beijing 100854, China)

Abstract: In the wireless optical communication system, global navigation satellite system (GNSS) positioning technology can assist the system to capture optical signals quickly and accurately. The observation noise of GNSS receiver increases under high dynamic conditions, which has an important impact on the positioning accuracy. A method for evaluating the observation noise suitable for dynamic scenes is proposed. The specific deduction method of the receiver's observation accuracy is made clear, and the noise of GPS signal under different dynamic conditions is analyzed. The results show that the observation noise is only related to the acceleration, but not to the velocity, and the greater the acceleration, the greater the noise; the carrier phase observation accuracy is much higher than the pseudo-range observation accuracy, and the observation noise of different frequencies has the same overall trend with the dynamic change, of which the L1 frequency noise is slightly larger, and the L5 frequency observation accuracy is the best.

Key words: optical communication; GNSS; observation accuracy; high dynamic

0 引言

全球卫星导航系统^[1](GNSS)在无线光通信、大地测绘和航空航天等领域中起着至关重要的作用。特别在无线光通信领域中,自由空间激光链路的持续畅通是光通信系统的基础保障,而GNSS定位能够辅助系

收稿日期:2019-02-21。

作者简介:杨慧君(1992-),女,河北保定人,博士研究生,现就读于中国航天科工集团二院研究生院。主要研究方向为GNSS卫星导航定位技术、信号处理、人工智能、算法设计和电子电路。曾参与的项目获得“国家级国防科技进步一等奖”。



统快速、准确地完成光信号的捕获^[2,3]。尤其是在机载光通信、船载光通信等高动态应用场景下,通信端的高速运动和强震动会对光通信链路产生强干扰。GNSS可为无线光通信系统提供高精度跟踪服务^[4,5],保证了光束的稳定跟踪,保障了系统的正常运转。然而,在高动态场景下,GNSS接收机的观测噪声^[6,7]显著增加,是接收机在高动态下定位精度变低的重要原因之一。GNSS观测噪声中包含各种电子元器件的热噪声、系统干扰及载波相位和码相位的跟踪环路的鉴别误差等^[8,9],它决定着接收机的观测精度,是考查接收机性能的重要指标^[10]。因此,在机载、船载等高动态环境下,

有效分析 GNSS 接收机的观测精度, 对于高动态无线光通信系统的建立是十分必要的。

接收机观测噪声具有随机性, 通常其大小以统计特性表征。一般认为, 伪距的观测噪声在 1m 以下, 载波相位的观测噪声约几毫米^[11,12]。但在高动态下, 由于接收机锁相环及码环为适应高动态信号, 需增加环路带宽^[13], 这势必会增大观测噪声。目前, 对接收机观测噪声的测试手段较少, 且通常仅作用于静态情况, 尚缺乏对接收机在动态场景下观测精度的有效评估方法。因此, 本文有效建立一种适用于动态条件的接收机观测噪声评估方法, 并首次明确衡量观测精度的具体推导方法, 探究不同动态下接收机观测噪声的特性。

1 评估方法基本原理

从根本上, 欲评估接收机的观测精度, 需将接收机的观测信号与发送给接收机的信号进行对比, 然而在接收自然卫星信号的条件下, 无法获取卫星发送的无叠加接收机噪声的“干净”信号。另外, 传统的零基线测试法无法分割 2 台接收机各自的噪声, 且接收机观测精度的测试结果与基线解算算法的精度混合, 对接收机噪声求解不明确。基于以上考虑, 本文通过卫星导航模拟器对特定场景的卫星信号进行模拟, 将模拟器输出信号作为对比标准, 考查接收机接收信号的噪声特性。该方法可满足任意动态测试需求, 且除待测接收机外不叠加其它设备噪声, 操作方便易实现, 且便于数据分析, 结果更加精准。由于载波相位观测量含有整周模糊度, 较伪距评估过程略复杂, 我们着重以载波相位为例, 介绍接收机观测精度评估方法。

在同一历元 t_k 下, 将模拟器生成的卫星 i 、频率 f_n 的载波相位观测量 ϕ_{o,f_n}^i 与接收机同卫星、同频率载波相位观测量 ϕ_{u,f_n}^i 作“单差”运算:

$$\begin{aligned}\lambda_n \times \phi_{uo,f_n}^i &= \lambda_n \times \phi_{u,f_n}^i - \lambda_n \times \phi_{o,f_n}^i \\ &= r_{uo}^i + c \times (\delta t_u - \delta t_o) + \lambda_n \times N_{uo,f_n}^i + \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^i}\end{aligned}\quad (1)$$

其中, o 表示模拟器、 u 表示接收机, λ_n 为 f_n 频率对应波长, c 为光速, r 为站星距, N 为整周模糊度, δt 为设备钟差, ε 为观测噪声。通常, 模拟器生成的载波相位观测量中, 不含有整周模糊度, 因此 $N_{o,f_n}^i = 0$, $N_{uo,f_n}^i = N_{u,f_n}^i - N_{o,f_n}^i = N_{u,f_n}^i$ 。此外, 在不考虑钟差的情况下, 接收机观测量实际为模拟器输出量叠加部分整周模糊度和接收

机观测噪声的结果, 此时单差数据为零基线数据, 则 $r_{uo}^i = r_u^i - r_o^i = 0$; 为考察接收机观测噪声 $\varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^i}^i$ 特性, 可将模拟器输出观测量视为对比标准, 因此视单差观测噪声中 $\varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^i}^i = 0$, 根据误差传播定律, $\varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^i}^i = \varepsilon_{\phi_{u,f_n}^i}^i + \varepsilon_{\phi_{o,f_n}^i}^i = \varepsilon_{\phi_{u,f_n}^i}^i$, 其标准差表示为 $\sigma_{\phi_{uo,f_n}^i}^i$ 。由于观测噪声的随机特性, 其标准差将是衡量噪声大小的重要指标。

为消除设备钟差, 本文将历元 t_k 的卫星 j 与卫星 i 的“单差”观测量作“双差”运算。

$$\begin{aligned}\lambda_n \times \phi_{uo,f_n}^{ij} &= \lambda_n \times \phi_{uo,f_n}^i - \lambda_n \times \phi_{uo,f_n}^j \\ &= \lambda_n \times N_{uo,f_n}^{ij} + \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^{ij}}\end{aligned}\quad (2)$$

其中, 根据误差传播定律 $\varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^{ij}} = \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^i}^i + \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^j}^j = \varepsilon_{\phi_{u,f_n}^i}^i + \varepsilon_{\phi_{u,f_n}^j}^j$, 其标准差为 $\sqrt{\sigma_{\phi_{u,f_n}^i}^i^2 + \sigma_{\phi_{u,f_n}^j}^j^2}$ 。此时, 通过单历元整周模糊度解算, 对 N_{uo,f_n}^{ij} 进行求解后代回。

设历元 t_k 下, 共 m 个观测卫星, 其中仰角最高的卫星为卫星 j , 可获得观测噪声向量 E 。

$$E = [\varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^1}^{1j}, \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^2}^{2j}, \dots, \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^{ij}}^{ij}, \dots, \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^{mj}}^{mj}]^T, i \neq j \quad (3)$$

在同一动态下, 对历元 $t_k, t_{k+1}, \dots, t_{k+T-1}$, 共 T 个连续历元的 E 向量进行计算, 并对 E 求协方差矩阵 Q :

$$Q_{(m-1) \times (m-1)}(i, l) = \begin{cases} \text{Var}(\Delta \varepsilon^{ij}), & i=l \\ \text{Cov}(\Delta \varepsilon^{ij}, \Delta \varepsilon^{ij}), & i \neq l \end{cases} \quad (4)$$

其中, $\Delta \varepsilon^{ij} = \Delta \varepsilon_{\phi_{uo,f_n}^{ij}}$ 。

在理论上, 根据误差传递特性:

$$Q = D \times R_{\phi_{uo,f_n}} \times D^T \quad (5)$$

其中, D 为差分矩阵 (此处假设第一颗卫星仰角最高), $R_{\phi_{uo,f_n}}$ 为单差观测噪声协方差阵, 由于不同观测卫星的观测噪声不相干, 则矩阵 $R_{\phi_{uo,f_n}}$ 为对角阵:

$$D = \begin{bmatrix} 1 & -1 & & \\ 1 & & -1 & \\ \cdots & & & \cdots \\ 1 & & & -1 \end{bmatrix}, R_{\phi_{uo,f_n}}(i, l) = \begin{cases} \left(\sigma_{\phi_{u,f_n}^i}^i \right)^2, & i=l \\ 0, & i \neq l \end{cases}$$

通过最小二乘方法对以上矩阵求解, 可求得 $\sigma_{\phi_{uo,f_n}^i}^i$, $i=1, 2, \dots, m$ 。设接收机在当前动态环境下对 f_n 频率载波相位的观测精度为 ζ , 有:

$$\sigma_{\phi_{uo,f_n}^i}^i = \zeta^2 + \frac{\zeta^2}{\sin^2(e^l)} \quad (6)$$

其中, e_i^l 为卫星 i 的仰角, 最终载波相位观测精度 ζ 即为所求。

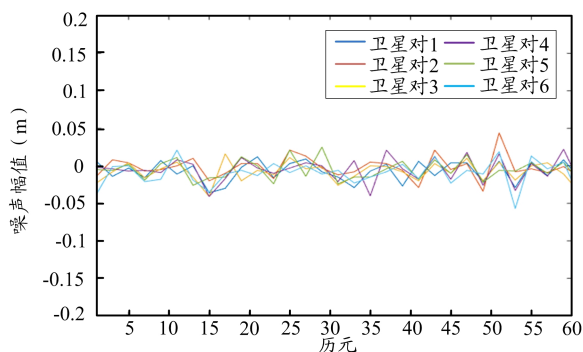
由于伪距观测量不含有整周模糊度, 在进行“双差”计算后残差中仅含双差噪声, 其观测噪声向量 E 可表示为:

$$E = [\varepsilon_{p_{m,l}}^{1j}, \varepsilon_{p_{m,l}}^{2j}, \dots, \varepsilon_{p_{m,l}}^{ij}, \dots, \varepsilon_{p_{m,l}}^{mj}]^T, i \neq j \quad (7)$$

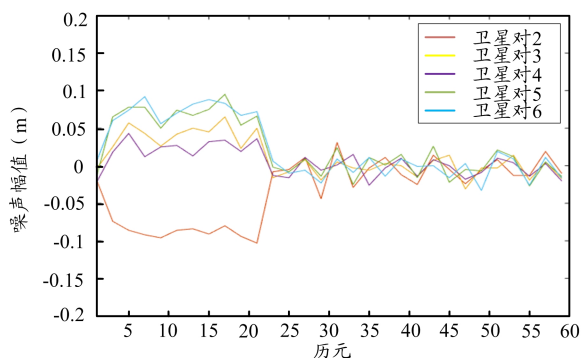
整体上, 伪距观测量观测精度的评估方法与载波相位类似, 此处不再赘述。

2 高动态观测精度分析

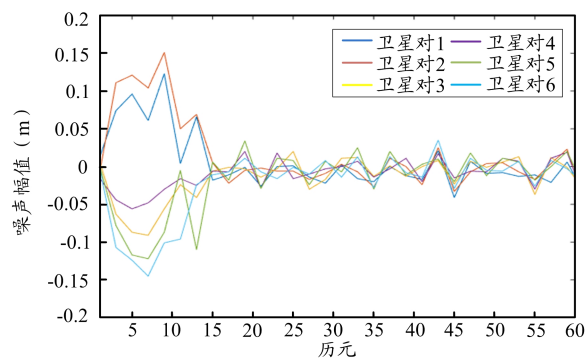
为考查接收机在不同动态条件下各频率的载波相位、伪距观测量的观测精度, 本文以 GPS 信号为例, 基于以上接收机观测精度测量方法, 对 L1 (1575.42±1.023MHz)、L2 (1227.6±10.23MHz) 和 L5 (1176.45±12MHz) 3 个频段的载波相位及伪距观测量在不同动态下的观测噪声进行分析。由于 L2、L5 频率的相应曲线和伪距观测量与 L1 频率相似, 因此本文以 L1 频率为例进行具体描述。首先分别将模拟器轨迹设置成静止状态、加速度为 5g ($g=9.80665\text{m/s}^2$)、10g、15g 和 20g 的匀加速运动状态共 5 种不同动态的运动轨迹, 其中 4 种加速度不为零的轨迹中, 加速段完成后以当前速度保持匀速运动, 为明确噪声特性是否与速度有关, 本文特保留了匀速段观测噪声数值。为保证各场景卫星信号的一致性, 增强最终数据的对比效果, 全部轨迹的起始点设置相同, 且各模拟场景开始时间及时长一致。不同动态条件下 L1 频率的载波相位观测噪声 E 随历元的变化曲线如图 1 所示。各子图分别展示了 5 种动态情况的运动轨迹下观测噪声的变化情况。对应各轨迹情况依次如下: 轨迹一为静态轨迹; 轨迹二加速度为 5g, 匀加速时长 20 历元; 轨迹三加速度为 10g, 匀加速时长 10 历元; 轨迹四加速度为 15g, 匀加速时长 6 历元; 轨迹五加速度为 20g, 匀加速时长 5 历元。



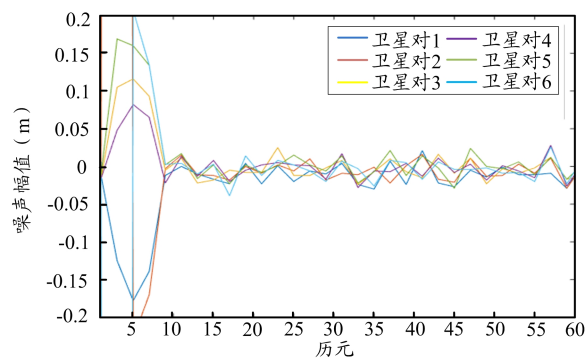
(a) 轨迹一: 加速度为 0g



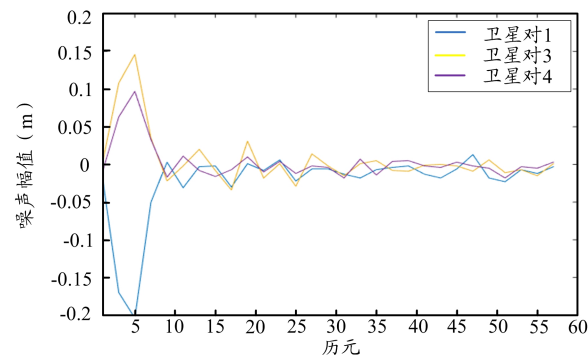
(b) 轨迹二: 加速度为 5g



(c) 轨迹三: 加速度为 10g



(d) 轨迹四: 加速度为 15g



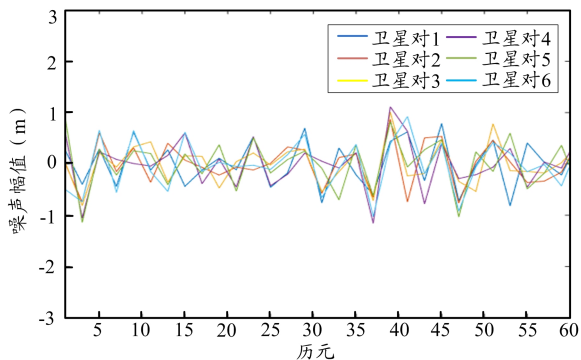
(e) 轨迹五: 加速度为 20g

图 1 L1 载波相位在不同匀加速动态下, 观测噪声 E 的变化曲线

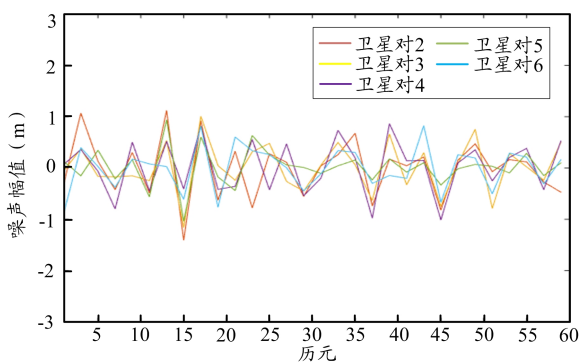
除轨迹一外, 各轨迹加速后以最大速度匀速运动至轨迹结束。

由图 1 可见, 不同卫星对间的观测噪声的特征大致相同, 均在零附近上下随机波动, 且随动态变化呈相近的变化特征。在 5 种不同的轨迹下, 各轨迹观测噪声的特征呈明显差异。具体地, 在静态情况下 (图 1(a)), 3 个频率载波相位噪声最大幅值均在 0.05m 以下, 且观测全程波动状态平稳; 轨迹二中 (图 1(b)), 模拟机载接收机以 5g 加速度时, 噪声幅值迅速增长至约 0.1m, 并在加速过程中幅值稳定, 加速结束后当机载接收机保持最大速度匀速运动时, 噪声幅值逐步下降至 0.05m 以下, 与静态噪声特征相近; 轨迹三中 (图 1(c)), 当加速度为 10g 时, 噪声幅值增至约 0.15m, 匀速运动时, 噪声下降至与静态幅值相仿; 轨迹四中 (图 1(d)), 以 15g 加速度时噪声幅值最大增至近 0.2m; 轨迹五中 (图 1(e)), 当加速度为 20g 时, 接收机出现丢星现象, 在轨迹四中噪声幅值较大的卫星对发生失锁, 在所接收到并持续跟踪的卫星对中, 同一卫星对在 20g 下的噪声幅值比 15g 对应幅值增加约 0.03m。因此, 接收机载波相位观测噪声随动态的变化主要与加速度有关, 加速度越大, 噪声幅值越大, 且当加速度不变, 噪声幅值则保持稳定; 当加速度为零时, 尽管接收机仍以较大速度运行, 观测噪声恢复平稳, 幅值与静态情况无二。整体上, 3 个频率的载波相位观测噪声随动态变化波动特征一致, 且呈现频率 L1 的噪声幅值最大, 频率 L2 幅值次之, 频率 L5 幅值略小。

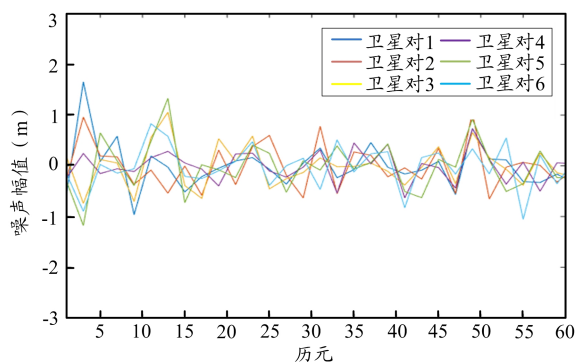
L1 频率的伪距观测量 P1 对应的 5 种轨迹下的观测噪声变化曲线如图 2 所示。相比于载波相位, 伪距的观测噪声在幅值上大很多。静态情况下 (图 2(a)), 伪距观测量观测噪声最大幅值达 1.14m, 在观测期间噪声波动较为稳定; 在轨迹二中 (图 2(b)), 噪声最大幅度峰值出现在加速度段, 达 1.41m; 轨迹三中 (图 2(c)), 当加速度为 10g 时, 出现噪声幅值最大峰



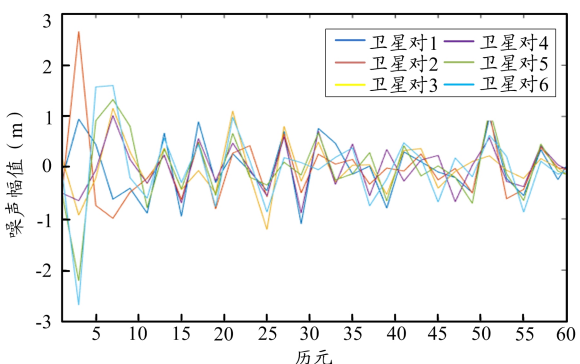
(a) 轨迹一: 加速度为 0g



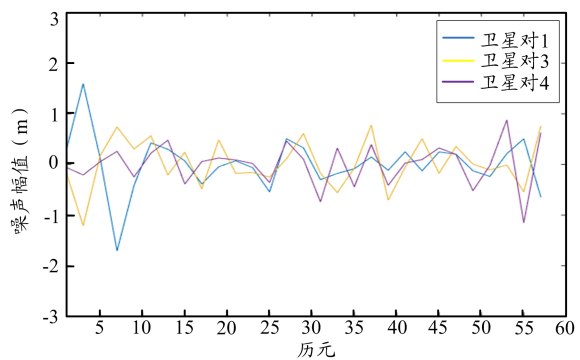
(b) 轨迹二: 加速度为 5g



(c) 轨迹三: 加速度 10g



(d) 轨迹四: 加速度 15g



(e) 轨迹五: 加速度为 20g

图 2 P1 伪距在不同匀加速动态下, 观测噪声 E 变化曲线

值约 1.74m;轨迹四中(图 2(d)),以 15g 加速时,噪声幅值最大 2.7m;轨迹五中(图 2(e))与载波相位观测量一致出现丢星现象,在 15g 加速中噪声较大的卫星在加速度为 20g 时发生失锁,在成功跟踪的卫星对中,噪声比轨迹四中幅值最大对应增加 0.7m。整体上,伪距观测量观测噪声随动态的幅值变化不如载波相位在加速度段与匀速段差异明显,这与伪距码片对齐精度较为粗糙有关,但在观测全程,噪声较大波动幅值多出现在加速度段,且仍具有加速度越大,噪声幅值越大的特点。整体上,3 个频率伪距观测噪声的整体情况相近,各频率噪声随动态的变化特征相同,且呈现频率 L1 噪声幅值普遍较另外 2 种频率幅值大的现象。图 3、图 4 展示了接收机 3 个频率的载波相位和伪距观测精度 ζ 随动态的变化情况(图中加速度为 0g 表示静态情况)。

根据之前的分析已知,接收机观测噪声主要与加速度有关,与速度无关,因此对接收机观测精度的

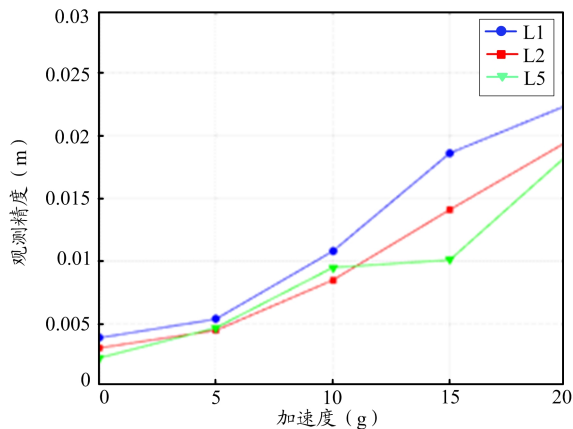


图 3 L1、L2 和 L5 载波相位观测精度随匀加速动态的变化图

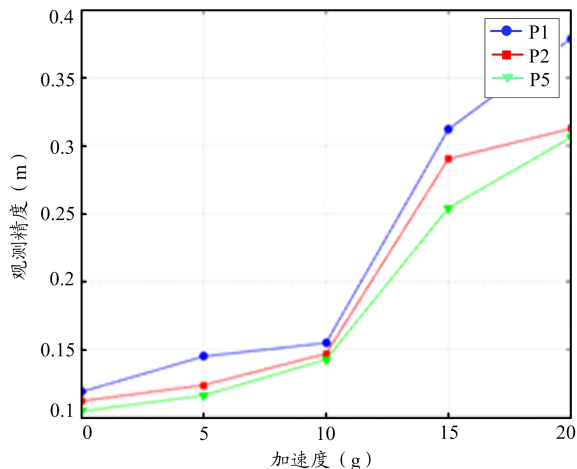


图 4 P1、P2 和 P5 伪距观测精度随匀加速动态的变化图

计算主要是对加速度段的噪声信号进行统计,依照式(6)可求得各频率观测量在当前加速度条件下的观测精度 ζ 。由图 3、图 4 可见,各频率观测量的观测精度数值均随加速度增大呈明显上升趋势。静态条件下观测精度最高,加速度越大,观测精度越差;且不同频率的观测精度非常接近。整体上呈 L1 频段的观测量噪声最大,观测精度最低;L2 频段居中;L5 频段噪声相对较低,观测精度最好。因此,可认为频率越高,观测精度越差。另外,载波相位观测精度要明显优于伪距观测精度,载波相位观测精度在低动态(10g 以下)时为毫米级,在高动态(10g 以上)时为厘米级;伪距观测精度均为分米级。即便在 20g 加速时,载波相位观测精度也远优于静态下的伪距观测精度,这也是精密定位、对时技术需要基于载波相位观测量的原因。各频率观测量的观测精度 ζ 随匀加速动态变化的具体数值如表 1 所示。

表 1 各频率观测量观测精度随匀加速动态变化表

频率	观测精度 (m)				
	0g	5g	10g	15g	20g
L1	0.0039	0.0054	0.0108	0.0186	0.0224
L2	0.0031	0.0045	0.0085	0.0141	0.0195
L5	0.0023	0.0047	0.0095	0.0101	0.0184
P1	0.1189	0.145	0.1549	0.312	0.3788
P2	0.1121	0.1239	0.147	0.2903	0.3125
P5	0.1046	0.1163	0.1426	0.2541	0.306

3 结束语

本文针对无线光通信系统中的 GNSS 定位辅助快速捕获结构,提出了一种适用于动态场景下的观测精度评估方法,明确了接收机观测精度因子的求解过程,并以 GPS 系统为例,对 L1、L2 和 L5 频率的载波相位和伪距观测量在不同的动态场景下的观测噪声及观测精度进行分析。研究表明:接收机的观测噪声主要与加速度有关,与速度无关,且加速度越大,接收机的观测噪声越大,观测精度越低;不同频率的计算结果随动态的变化趋势相仿,数值相近。整体上,在相同动态条件下,L1 频段的信号噪声最大,观测精度最低;L5 频段的噪声最小,观测精度最高,即频率越高噪声越大、观测精度越低;载波相位的观测精度要远

优于伪距的观测精度。因此,在高动态无线光通信系统中,采用载波相位观测量进行定位辅助,可以提高光信号捕获的速度和成功率;同时该方法有利于判断GNSS定位辅助系统能否满足无线光通信系统的使用需求。

参考文献:

- [1] HOFMANN-WELLENHOF B, LICHTENEGGER H, WASLE E. GNSS - Global Navigation Satellite Systems [M]. Springer: GNSS-global navigation satellite systems, 2008: 647-651.
- [2] 姜茹, 艾勇, 单欣, 等. 空间光通信中 GPS 辅助快速捕获对准技术[J]. 光通信技术, 2015, 39(4): 47-49.
- [3] 肖永军, 董冉, 熊准, 等. 市内建筑间无线光通信 GPS 辅助单向捕获研究[J]. 光通信技术, 2012, 36(4): 9-11.
- [4] 覃智祥, 安建欣, 李树德, 等. 机载无线光通信设备设计及试验验证[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(2): 169-172.
- [5] 周浩天, 代永红, 刘彦飞, 等. 机载光通信跟踪系统模拟实验的设计与分析[J]. 光通信技术, 2017, 41(8): 51-54.
- [6] BAKKER P F D, MAREL H V D, TIBERIUS C C J M. Geometry-free undifferenced, single and double differenced analysis of single frequency GPS, EGNOS and GIOVE-A/B measurements [J]. GPS Solutions, 2009, 13(4): 305-314.
- [7] 谢钢. GPS 原理与接收机设计: Principles of GPS and receiver design [M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
- [8] CAI C, HE C, SANTERRE R, et al. A comparative analysis of measurement noise and multipath for four constellations: GPS, BeiDou, GLONASS and Galileo[J]. Empire Survey Review, 2015, 48(9): 1-9.
- [9] YANG Y X, LI J L, WANG A B, et al. Preliminary assessment of the navigation and positioning performance of BeiDou regional navigation satellite system[J]. Science China Earth Sciences, 2014, 57(1): 144-152.
- [10] 孙庆祥. 基于 GPS RTK 技术实现海上三维高精度动态测量 [J]. 测绘通报, 2008, 23(5): 48-50.
- [11] WANG J, SATIRAPOD C, RIZOS C. Stochastic assessment of GPS carrier phase measurements for precise static relative positioning[J]. Journal of Geodesy, 2002, 76(2): 95-104.
- [12] 何海波, 杨元喜. GPS 观测量先验方差 - 协方差矩阵实时估计[J]. 测绘学报, 2001, 30(1): 42-47.
- [13] 王文静. 高动态环境下卫星导航信号跟踪技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [14] 罗海英, 刘广军, 刘旭东. GNSS 接收机内噪声水平检测评价方法研究[J]. 电子测量技术, 2015, 38(1): 34-37.
- [15] 蔡艳辉, 程鹏飞. GNSS 接收机伪距和载波相位测量噪声直接估计方法[J]. 计量学报, 2013, 34(3): 157-167.

参考文献著录规则——总要求及图书、期刊的著录格式

为了帮助向本刊投稿的作者按规范著录参考文献,现将常见类型文献的著录格式作如下要求。

参考文献中的责任者采用姓在前名在后的著录形式。无论中外人士一律姓在前名在后;外国著者的“名”可以用缩写字母,“姓”全部大写,“姓”和缩写的“名”之间勿用“.”,而是空格。如原文中作者为“P. S. 昂温”则在本刊要求中应写成“昂温 P S”, Albert Einstein Seny 应写成 EINSTEIN A S。参考文献的责任者不超过 3 位时,全部照录。超过 3 位时,只著录前 3 位责任者,其后加“等”或与之相应的词。

不同的文献类型均有相应的标志代码:[M]为普通图书;[C]为会议录;[G]为汇编;[N]为报纸;[J]为期刊;[D]为学位论文;[R]为报告;[S]为标准;[P]为专利;[Z]为其它未说明的文献。

◆原著的著录格式:

[序号] 著者. 书名[M]. 版本(1 版不著录). 出版地: 出版者, 出版年: 起-止页码.

[1] 原 荣. 光纤通信[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

[2] CRAWFORD GORMAN M. Future libraries: dreams, madness, & reality[M]. Chicago: America Library Association, 1995.

◆译著的著录格式:

[序号] 著者. 书名[M]. 译者, 译. 出版地: 出版者, 出版年: 起-止页码.

◆期刊的著录格式:

[序号] 著者. 题名[J]. 刊名, 出版年份, 卷(期): 起-止页码.

[1] 蒋超, 张沛, 张永军, 等. 基于 SRLG 不相关的共享通路保护算法[J]. 光通信技术, 2007, 31(7): 4-6.

[2] DIANOV E M, BUFETOV I A, BUBNOV M M, et al. Three-cascaded 1407nm Raman laser based on phosphorus-doped silica fiber[J]. OPTICS LETTERS, 2000, 26(6): 402-404.