

引用格式:董蓉蓉,邹德财,范丽红,等.GNSS 卫星用户测距误差特性分析[J].时间频率学报,2025,48(3): 233-241.

# GNSS 卫星用户测距误差特性分析

董蓉蓉<sup>1,2</sup>, 邹德财<sup>1,2</sup>, 范丽红<sup>1,2,†</sup>, 李兆妍<sup>1,2</sup>

1.中国科学院 国家授时中心,西安 710600;

2.中国科学院大学,北京 100049

**摘要:**对于全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS),用户测距精度(user range accuracy, URA)作为反映卫星钟和轨道产品质量的完好性参数,有着重要的作用。分别选取 2024 年 1 月(电离层平静期)和 5 月(电离层活跃期)共 60 d MGEX(multi-GNSS experiment)测站观测数据和广播星历数据,在剔除不健康的卫星和粗差等情况下,对 BDS(BeiDou Navigation Satellite System)、GPS(Global Positioning System)、GLONASS(GLObal NAvigation Satellite System)和 Galileo 四大系统的用户测距误差(user range error, URE)和 URA 进行综合分析。结果表明:Galileo 卫星 URE 最小,RMS(root mean square)为 0.24 m,URA 为 0.28 m,搭载氢钟的 FOC(full operational capability)卫星性能最好;GPS 卫星 URE 的 RMS 为 0.78 m,URA 为 0.69 m,最新的 III-A 卫星效果最优,不同类型 GPS 卫星的 URE 区别较大;BDS 卫星 URE 的 RMS 为 0.81 m,URA 为 0.73 m,BDS-3 较之 BDS-2 精度有所提升也更为稳健,不同轨道类型的卫星 URE 存在星间差异。GLONASS 卫星 URE 最大,RMS 为 1.43 m,URA 为 1.23 m。

**关键词:**全球导航卫星系统;用户测距误差;用户测距精度

DOI:10.13875/j.issn.1674-0637.2025-03-0233-09

## Analysis of user ranging error characteristics for GNSS satellite

DONG Rong-rong<sup>1,2</sup>, ZOU De-cai<sup>1,2</sup>, FAN Li-hong<sup>1,2,†</sup>, LI Zhao-yan<sup>1,2</sup>

1.National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China;

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

**Abstract:** For Global Navigation Satellite System (GNSS), user range accuracy (URA) plays an important role as an integrity parameter reflecting the quality of satellite clock and orbit products. A total of 60 days of MGEX (multi-GNSS experiment) station observations and broadcast ephemeris data in January (quiet ionospheric period) and May (active ionospheric period) in the year of 2024 are selected respectively, and the user range error (URE) and URA of the four major systems of BDS (BeiDou Navigation Satellite System), GPS (Global Positioning System), GLONASS (GLObal NAvigation Satellite System), and Galileo are analyzed by eliminating unhealthy satellites and roughness. The results show that: Galileo satellite has the smallest URE, the RMS (root mean square) is 0.24 m, the URA is 0.28 m, and the full operational capability (FOC) satellite equipped with a hydrogen clock has the best performance. The RMS of the GPS satellite' URE is 0.78 m and the URA is 0.69 m, with the latest III-A satellites showing

收稿日期:2024-11-28;接受日期:2025-01-12;†: fanlihong@ntsc.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金(12203060);中国科学院青年创新促进会人才项目(2023426)

the best performance. Significant variations in URE are observed among different GPS satellite types. For BDS satellites, the RMS of URE is 0.81 m and the URA is 0.73 m, where BDS-3 satellites show improved accuracy and greater stability compared to BDS-2. There are interstellar differences in URE of satellites with different types of BDS orbits. URE of GLONASS satellite is the largest, with the RMS of 1.43 m, and the URA is 1.23 m.

**Keywords:** Global Navigation Satellite System; user ranging error; user ranging accuracy

全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)系统完好性是指当导航系统的误差超过允许限值不能胜任规定的导航工作时,系统及时报警,通知用户或终止此信号的功能<sup>[1]</sup>。GNSS完好性是民用航空导航系统的关键性能之一,其应用范围已经从传统的航空航海和生命搜救等关乎生命安全的领域,扩展到了公路、货运、铁路以及测绘、授时、测速等普通民用领域,为 PNT(positioning, navigation and timing)用户提供服务<sup>[2]</sup>。对于实时导航定位用户,地面运控系统通过导航星历中完好性参数告知用户所播发电文中轨道和钟差信息的可靠性,因此对 GNSS 系统完好性监测进行研究十分必要。

用户测距误差(user range error, URE)是导航系统精度性能的重要评估指标,也称之为空间信号测距误差(signal in space range error, SISRE),主要反映广播星历轨道及钟差精度,并最终影响实时导航用户定位精度<sup>[3]</sup>。用户测距精度(user range accuracy, URA)是对卫星段和控制段造成的用户测距误差的  $1\sigma$  估计<sup>[4]</sup>,间接影响用户的定位精度。用户测距精度指数(user range accuracy index, URAI)则是导航电文中的完好性参数索引,在 GNSS 系统播发的导航完好性参数中多有使用<sup>[5-8]</sup>。目前多数学者对单系统的空间信号精度进行分析与评估<sup>[9-13]</sup>,一些学者也对 GNSS 多系统 SISRE 进行对比分析<sup>[14-17]</sup>。在评估方法上, Gao 等<sup>[18]</sup>用在接收机伪距中消去电离层、对流层误差,修正接收机本身误差和多径误差,来计算卫星空间信号误差精度的方法,称为“Top-Down”方法,以及使用广播星历与精密星历作差来计算卫星空间信号误差精度的方法,称为“Bottom-Up”方法<sup>[18]</sup>,也是目前主流的空间信号评估方法。刘瑞华<sup>[10]</sup>以这两种不同的计算方法分析北斗空间信号用户测距误差,发现两种方法结果基本一致。一些学者对不同机构的轨道、钟差产品精度进行了评估<sup>[11,19-21]</sup>。Cheng<sup>[20]</sup>分析

了 CNES 的实时精密轨道和时钟产品的特性、精度和误差分布以及 URE 和 URA 的计算策略,李宗义<sup>[21]</sup>对 CAS 轨道进行评估, BDS-2 和 BDS-3 的  $\sigma_{\text{URA}}$ 、 $\sigma_{\text{URE}}$  差异小于 10 cm。王尔申<sup>[13]</sup>提出了一种故障趋势与阈值组合判断的异常空间信号剔除方法,提高了完好性评估精度; Wang<sup>[22]</sup>则对 URA 特征分析,提出了误差椭圆模型来计算 URA。

以上学者评估多集中于单系统的 URE 分析,对多系统 URE 分析、综合 URA 和 URAI 对比分析相对较少。目前的国内外学者通常以事后发布的精密星历、精密钟差产品作为参考基准对广播星历进行 URE 或 SISRE 评估分析<sup>[23]</sup>,考虑到精密星历数据并不能实时接收以及 URA 在实际用户使用中的解算方式,本文选取亚太地区 17 个 MGEX(multi-GNSS experiment)站观测数据和广播星历,计算伪距残差,解算 URE、URA 及电文中播发的 URAI 值,并对 GNSS 4 个系统之间进行分析对比,评估各系统 URE、URA 表现,为实时导航定位用户提供参考。

## 1 空间信号测距误差计算原理

用户等效测距误差(user equivalent range error, UERE)是衡量卫星导航系统空间信号精度的一个关键指标,它由两部分组成: URE 和用户设备环境误差(user equipment error, UEE)<sup>[24]</sup>。其中 URE 主要包括卫星轨道和钟差误差两方面因素,影响用户的定位精度和完好性<sup>[25]</sup>。

### 1.1 用户测距误差解算

URE 是导航卫星位置与钟差的实际值与利用预报导航星历得到的预测值之差在接收机到卫星视线方向上的投影。基于实时导航观测数据和导航星历的 GNSS 用户测距误差解算方法如下。

对于用户接收机  $u$  观测到的卫星  $s$ , GNSS 伪距观测方程为

$$\rho_{u,i}^{s,G} = r_u^{s,G} + v(t_u^G - t^{s,G}) + k_{1,i} I_{u,1}^{s,G} + T_u^{s,G} + \epsilon_{u,i}^{s,G}. \quad (1)$$

式(1)中,下标  $i$  表示接收机接收到的频率,上标  $G$  表示卫星系统(GPS/BDS/GLONASS/Galileo); $\rho_{u,i}^{s,G}$  表示伪距观测值(单位:m), $r_u^{s,G}$  表示发射时刻的卫星位置到接收机时刻用户位置间的星地几何距离(单位:m), $v$  表示光速, $t_u^G$ 、 $t^{s,G}$  表示接收机钟差和卫星钟差(单位:s), $I_{u,1}^s$  分别表示第 1 频率倾斜电离层延迟, $k_{1,i} = f_i^2/f_i^2$  为  $i$  频率的一阶电离层延迟放大因子, $T_u^{s,G}$  为对流层折射引起的传播路径上的误差, $\epsilon_{u,i}^{s,G}$  表示测量噪声以及其他未建模因素引起的误差。

对于电离层延迟,计算用户测距误差使用双频无电离层组合以消除电离层延迟,假定两个频率  $i, j$ :

$$\rho_{u,IF}^{s,G} = \frac{f_i^2}{f_i^2 - f_j^2} \rho_{u,i}^{s,G} - \frac{f_j^2}{f_i^2 - f_j^2} \rho_{u,j}^{s,G} \quad (2)$$

式(2)中, $\rho_{u,IF}^{s,G}$  表示经过电离层修正后的伪距, $\rho_{u,i}^{s,G}$  和  $\rho_{u,j}^{s,G}$  表示  $i$  频段和  $j$  频段的伪距测量值, $f_i$  和  $f_j$  为中心频率,则双频无电离层组合观测值可由式(1)改写为

$$\rho_{u,IF}^{s,G} = r_u^{s,G} + v(t_u^G - t^{s,G}) + T_u^{s,G} + \epsilon_{u,IF}^{s,G} \quad (3)$$

式(3)中, $\epsilon_{u,IF}^{s,G}$  表示经过电离层修正后的未知误差。

本文 GPS(Global Positioning System)使用 L1 与 L2;GLONASS(GLObal NAVigation Satellite System)使用 L1 与 L2;Galileo 使用 E1 与 E5a,BDS(BeiDou Navigation Satellite System)使用 B1I 与 B3I。考虑到北斗使用 B1I、B3I 两个频点双频消电离层组合伪距公式来修正电离层延迟时要考虑到 B1I 信号的星上设备时延差  $T_{GDI}$ ,故将式(3)修改如下:

$$\rho_{u,IF}^{s,G} = \frac{\rho_{u,B3I}^{s,G} - k_{1,3}(f) \cdot \rho_{u,B1I}^{s,G}}{1 - k_{1,3}(f)} + \frac{v \cdot k_{1,3}(f) \cdot T_{GDI}}{1 - k_{1,3}(f)} + r_u^{s,G} + v(t_u^G - t^{s,G}) + T_u^{s,G} + v \cdot \alpha \cdot T_{GDI} + \epsilon_{u,IF}^{s,G} \quad (4)$$

式(4)中, $\rho_{u,B1I}^{s,G}$  和  $\rho_{u,B3I}^{s,G}$  表示 B1I 和 B3I 信号的伪距测量值

$$\begin{cases} \alpha = \frac{k_{1,3}(f)}{1 - k_{1,3}(f)}, \\ k_{1,3}(f) = \frac{f_1^2}{f_3^2} = \left( \frac{1\ 561.098}{1\ 268.520} \right)^2 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, $f_1$  为 B1I 信号的标称载波频率, $f_3$  为 B3I 信号的标称载波频率,单位为 MHz。

在实际计算中,根据观测方程,无电离层组合伪距观测量减去接收机—卫星几何距离、接收机钟

差、卫星钟差、对流层误差、多路径和观测噪声,剩下的便是轨道误差和卫星钟差残差,即用户测距误差。因此,卫星  $s$  的  $E_{URE}^{s,G}$  计算公式如下:

$$E_{URE}^{s,G} = \rho_{u,IF}^{s,G} - (r_u^{s,G} + v(t_u^G - t^{s,G}) + T_u^{s,G} + \epsilon_{u,IF}^{s,G}) \quad (6)$$

其他误差:① 对流层改正使用 Hopfield 模型和全球投影函数(GMF);② 接收机钟差则通过建模来估计;③ 此外地球自转效应误差,相对论效应、天线相位中心误差等都已有误差模型改正。

多种误差修正措施并不能完全消除所有对应的误差,存在许多微小的系统误差和偶然误差,这些误差难以被完全消除。因此,URE 实际上包含了传播路径模型修正误差,还包括系统误差和多路径效应等。

## 1.2 用户测距精度解算

URA 是对卫星段和控制段造成的用户测距误差的  $1\sigma$  估计,是一个综合指标。URA 即为 URE 的统计量,是 URE 的 68% 界限值,用来包络用户测距误差。相应卫星的用户测距精度值为<sup>[26]</sup>:

$$E_{URA} = \mu + k \cdot \sigma \quad (7)$$

式(7)中, $\mu$  为 URE 均值; $\sigma$  为标准差; $k$  为对应一定置信度的分位数。

在 BDS 中,B3I 和 B1I 信号以用户测距精度指数(URAI)表征 URA,URAI 为范围从 0 到 15。根据北斗公开服务信号接口文件(ICD)中索引值“0”表示  $0 < URA \leq 2.40$  m,意味着在没有其他误差影响的前提下,用户采用最小二乘估计进行定位解算时的最差测距精度值为 2.4 m。

用户收到任意一个 URAI(用  $n$  表示),可根据公式计算出相应的 URA 值(用  $X$  表示),其计算公式如下<sup>[8]</sup>:

$$X = \begin{cases} 2^{n/2+1}, & 0 \leq n < 6 \\ 2^{n-2}, & 6 \leq n < 15 \end{cases} \quad (8)$$

当  $n=15$  时,表示卫星轨道机动或者没有精度预报。

本文首先对观测数据和广播星历进行数据预处理。利用星历参数计算卫星的理论位置,从 SINEX 文件中提取测站的精确坐标,进而计算星地几何距离。在此基础上计算 O-C 伪距残差,针对各项误差进行改正,得到卫星 URE 和 URA,以对系统性能进行评估。整个分析流程框架图见图 1。

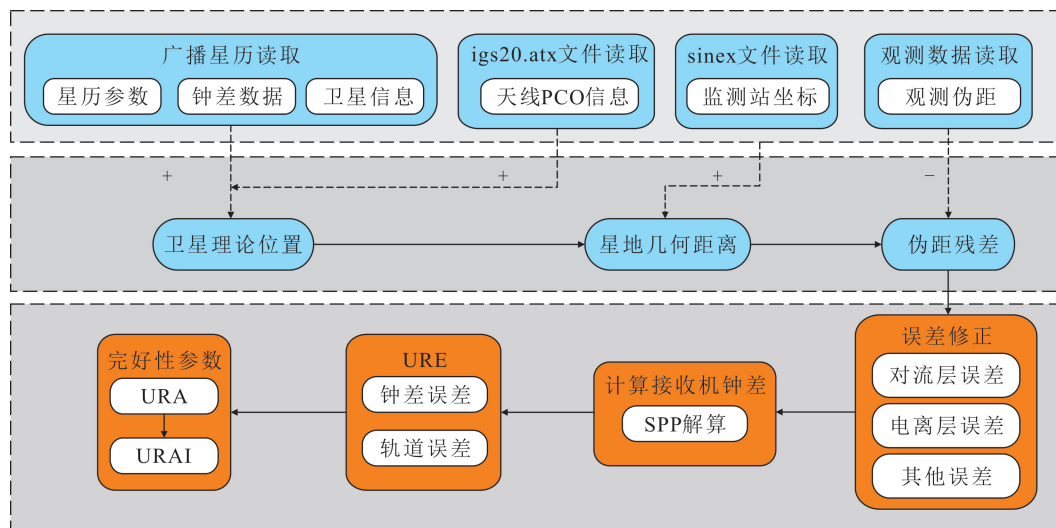


图1 URE、URA 分析流程图

## 2 算例分析

### 2.1 数据来源

选取 2024 年 1 月 1 日至 1 月 30 日和 5 月 1 日至 5 月 30 日共 60 d 的数据进行分析,采样间隔为 30 s。1 月地磁活动处于平静期,电离层处于非活跃状态,5 月为电离层活跃期,在 10 至 11 日发生强地磁暴,12 日发生了大地磁暴。广播星历采用多系统 RINEX 文件。观测数据选取亚太地区中低纬度 17 个 MGEX 站的观测数据进行单历元解算,选取测站如图 2 所示。测站精确坐标来自 SINEX 周解文件。天线信息来自 igs20.atx 文件。

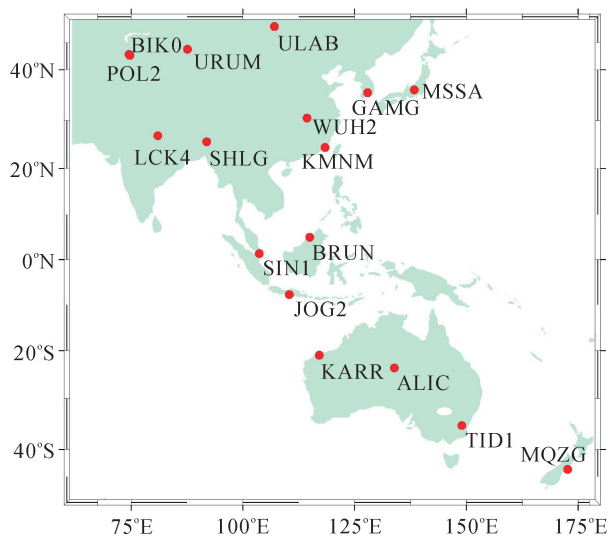


图2 测站分布图

### 2.2 数据预处理

在解算之前对数据进行预处理,对数据进行质

量控制,包括以下几方面:

① 粗差探测与剔除。针对观测文件的伪距数据以 30 m 为阈值进行粗差剔除;对解算出的各个测站 URE,采用中位数法,剔除大于 3 倍中位数绝对偏差的结果。

② 对于不健康状态的卫星,剔除广播星历健康标志为 1 的不健康星历数据。

③ 卫星截止高度角取  $10^\circ$ 。

④ 对于数据量较少的卫星( $<100$  个历元)进行剔除。

### 2.3 不同系统用户测距误差分析

基于所选数据计算了 BDS、GPS、Galileo 和 GLONASS 卫星的用户测距误差,绘制了相应的时间序列,如图 3 所示。

图 3 表明,在数据预处理排除空间信号异常数据后,卫星的轨道、时钟误差在相对稳定的范围内变化,并呈现时间相关性。其中 Galileo 卫星 URE 主要集中在  $-2 \sim 2$  m 间,稳定性较好。GPS 卫星的 URE 在  $-4 \sim 4$  m 之间。与 Galileo 和 GPS 相比,GLONASS 在 5 月份波动更加剧烈,存在偶尔的高峰值,在 5 月 20 日 R08、R22 和 R24 卫星存在显著的异常值,多数卫星在  $-5 \sim 5$  m 之间。BDS-3 卫星 1 月份数据较 5 月更为集中,整体 URE 在  $-3 \sim 3$  m 之间,主要集中在  $-2 \sim 2$  m,单星平均用户测距误差基本满足北斗公开服务性能指标要求:  $\text{SISRE}(95\%, \text{单颗卫星统计值}) \leq 4.6$  m,  $\text{SISRE}(95\%, \text{所有卫星统计值}) \leq 2$  m。此外,电离层处于磁暴期状态下对高纬度地区测站数据完整率、周跳探测



等影响较大<sup>[27]</sup>,在中低纬度影响相对较小,IF 组合进一步减小了电离层影响,由图 3 也可以看出,5 月磁暴期并未对综合统计指标 URE 产生明显的影响。

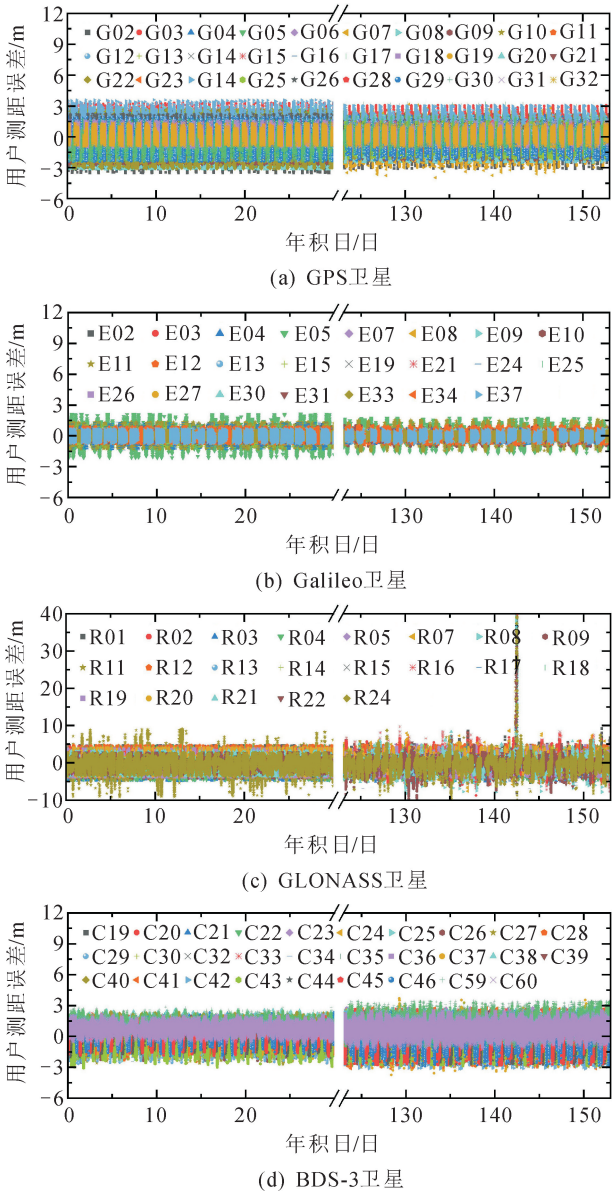


图 3 各系统卫星 95%URE 序列图

对各系统全星座 URE 均方根(RMS)绘制单日变化时序图,如图 4 所示。

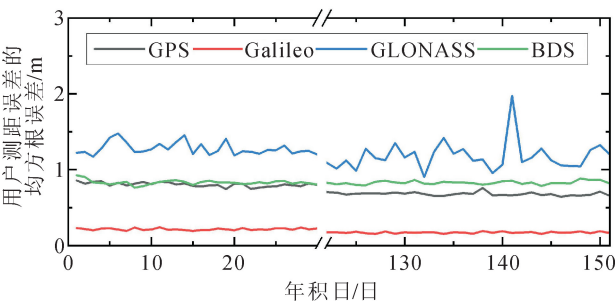


图 4 GPS、Galileo、GLONASS、BDS 卫星 URE 60 d 时间序列对比

图 4 表明,BDS、GPS 和 Galileo 单日 URE RMS 优于 1 m;Galileo 卫星 URE 优于 0.5 m,这与 Galileo 每 10 min 播发一次广播星历,降低了轨道误差和钟差参数误差有关;GPS 和 BDS 的 URE 相近,较老的 GPS 卫星和铯钟拉高了 GPS 卫星全星座 URE, BDS-3 卫星搭载了星间链路和稳定性更高的卫星时钟增强了 BDS 的整体性能。GLONASS 全星座 URE 基本>1 m,5 月份波动较为明显。

2.4 各系统不同卫星用户测距误差分析

分别对 GPS、Galileo、GLONASS、BDS-2 和 BDS-3 各系统不同类型卫星的用户测距误差进行统计分析,具体如下所示。

为了分析不同卫星的 URE 误差分布(均值、中位数、25%~75%,5%~95%),各 GPS 卫星 URE 箱线图如图 5 所示,其不同类型卫星均方根(RMS)、标准差(STD)见表 1。

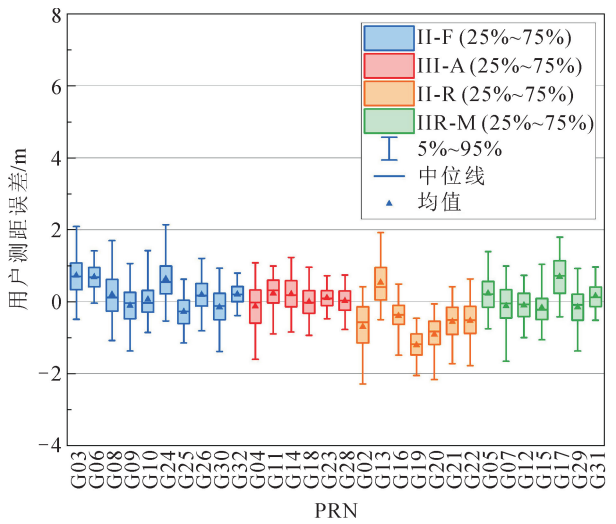


图 5 GPS 卫星 URE 箱线图

表 1 GPS 不同卫星用户测距误差 单位:m

系统	卫星类型	钟类型	URE 均值	均方根	标准差
GPS	II-F	Rb	0.17	0.70	0.59
		Cs	0.42	0.95	0.84
	III-A	Rb	0.09	0.61	0.59
		Rb	-0.46	0.91	0.63
	IIR-M	Rb	0.08	0.68	0.62

由图 5 可以看出,G19 卫星 URE 均值为 -1.20 m,其余卫星均值都<1 m。对比不同型号卫星,II-R 卫星 URE 大于 II-F,两者的 URE 均高于 III-A 卫星和 IIR-M 卫星。不同卫星的轨道误差对

URE 的贡献相对较小,星间差异主要归因于卫星钟差误差。比较同类型卫星 URE,搭载铷钟的 GPS 卫星 URE 更优。表 1 展示了 GPS 不同卫星 URE 均值、RMS、STD 情况,IIR 卫星整体 RMS 为 0.91 m,STD 为 0.63 m;IIIA 卫星整体 RMS 为 0.61m,STD 为 0.59。

将 Galileo 卫星分为全运行能力(full operational capability,FOC)卫星与在轨验证(in orbit validation element,IOV)两类卫星,不同类型卫星 URE 分布情况如图 6 所示,RMS、STD 见表 2。

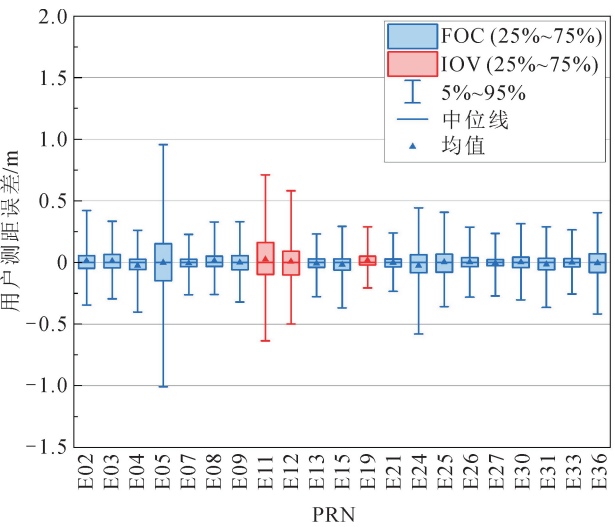


图 6 Galileo 卫星 URE 箱线图

表 2 Galileo 卫星用户测距误差 单位:m

系统	卫星类型	钟类型	URE 均值	均方根	标准差
Galileo	FOC	H	-0.03	0.23	0.22
		Rb	0.03	0.39	0.37
	IOV	H	0.01	0.24	0.23

Galileo 单星 URE 基本优于 1 m,URE 均值在厘米级;使用氢钟的 IOV 卫星 E12、E19 与使用铷钟的 FOC 卫星 URE 精度相当,使用铷钟的 E11 卫星 URE 相对精度较低,E05 卫星 5%、95%分位数均接近±1 m。E05、E11、E12 和 E24 卫星 95%分位数外异常值较大。表 2 展示了不同 Galileo 卫星整体均值、RMS 和 STD 情况。FOC 卫星整体 RMS 为 0.23 m,STD 为 0.22 m;IOV 卫星整体 RMS 为 0.31 m,STD 为 0.3 m。

将 GLONASS 卫星分为 GLONASS-M 与 GLONASS-K 卫星,绘制 URE 箱线图如 7 所示,其不同类型卫星 RMS、STD 情况见表 3。

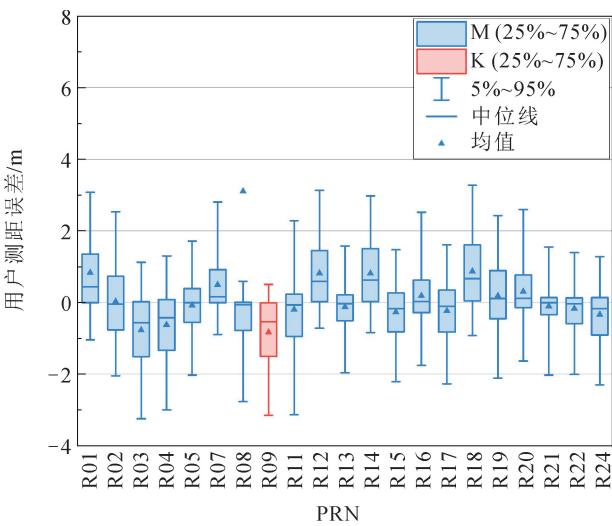


图 7 GLONASS 卫星 URE 箱线图

表 3 GLONASS 卫星用户测距误差 单位:m

系统	卫星类型	钟类型	URE 均值	均方根	标准差
GLONASS	M	Cs	0.24	1.55	1.52
	K	Cs	-0.83	2.41	2.20

由于 R06、R10、R23 以及 R26 4 颗卫星数据较少(<100)且数据异常,故预处理时剔除该 4 颗卫星。图 7 表明,GLONASS 卫星 URE 分布较为分散,且星间差异比较明显。R08 虽然中位数接近 0,但是均值和 25%界限达到了 3 m,95%外的异常值点较多。表 3 展示了 GLONASS 不同类型卫星 URE 的 RMS 与 STD 情况,GLONASS-M 卫星 URE 均值为 0.24 m,但 RMS 和 STD 都大于 1 m。

针对 BDS-2 和 BDS-3 地球同步轨道(geostationary orbit,GEO)、倾斜地球同步轨道(inclined geosynchronous orbit,IGSO)、地球中轨(medium earth orbit,MEO) 3 种卫星,绘制 URE 对比箱线图如图 8(a)和图 8(b),RMS、STD 情况对比见表 4。

在 BDS-2 中 C05 卫星 URE RMS 为 1.23 m、C12 卫星 URE RMS 为 1.4 m,C14 卫星 URE RMS 为 1.42 m,除这 3 颗卫星 95%分位数超过了 2 m 外,其余卫星 95%分位数都优于 2 m,单星 RMS 优于 1 m,星间差异比较明显。BDS-3 的 MEO 卫星根据制造厂家分为由中国空间技术研究院(China Academy of Space Technology,CAST)和中国科学院微小卫星创新研究院/上海微小卫星工程中心(Shanghai Engineering Center for Microsatellites,SECM)制造的两类卫星,结合图 4,可以看出同一卫

星制造商的 URE 表现较为一致;同时,BDS-3 MEO 卫星采用更高精度的铷原子钟和氢原子钟,使得星载原子钟的性能得到提升<sup>[28]</sup>,在 URE 表现上也优于 BDS-2,星间差异较小,CAST 卫星 URE RMS 为 0.58 m、STD 为 0.53 m,SECM 卫星 URE RMS 为 0.86 m、STD 为 0.59 m。BDS-3 MEO 卫星中除 C27、

C29 和 C43 外,URE 95%分位数均优于 2 m、RMS 优于 1 m。此外,由于选取的 MGEX 站分布在亚太地区、中国附近区域,GEO 卫星轨道高度较高,观测历元较多,而 MEO 卫星会缺失部分弧段观测数据,因此 GEO 卫星与 IGSO 卫星 URE 分布较 MEO 卫星更为集中,其 STD 在 0.44 m 左右。

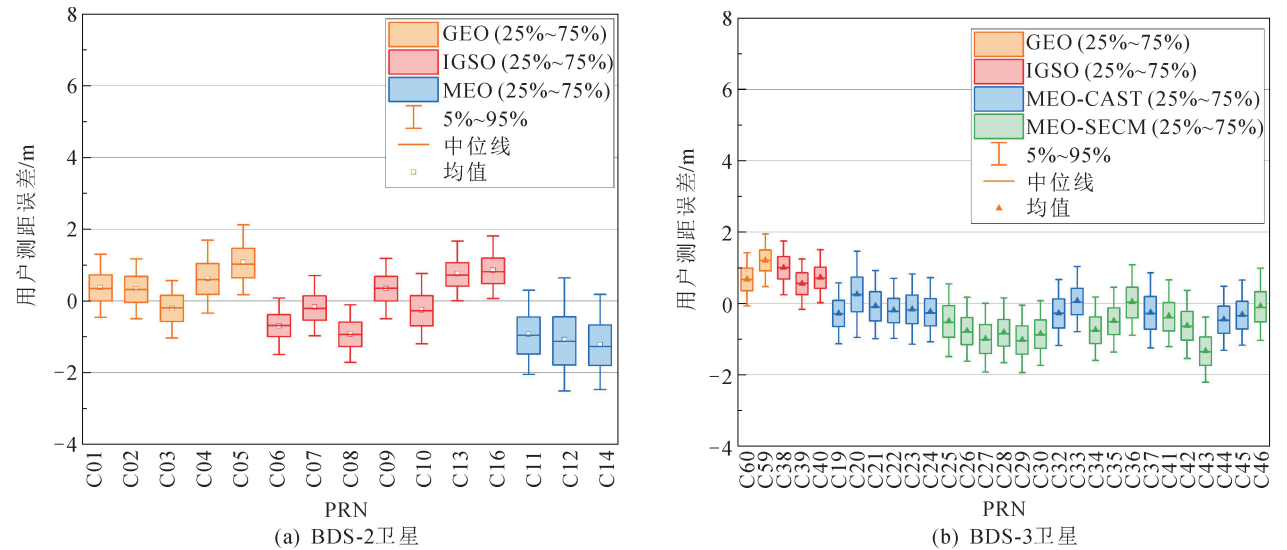


图 8 BDS 卫星 URE 箱线图

表 4 BDS-3 卫星用户测距误差

单位:m

系统	卫星类型	钟类型	URE 均值	均方根	标准差
BDS-2	GEO	Rb	0.43	0.77	0.55
	IGSO		-0.1	0.79	0.51
	MEO		-1.07	1.29	0.81
BDS-3	GEO	H	0.96	1.02	0.44
	IGSO	H	0.79	0.84	0.48
	MEO-CAST	Rb	0.16	0.58	0.53
	MEO-SECM	H	0.61	0.86	0.59

2.5 不同系统用户测距精度分析

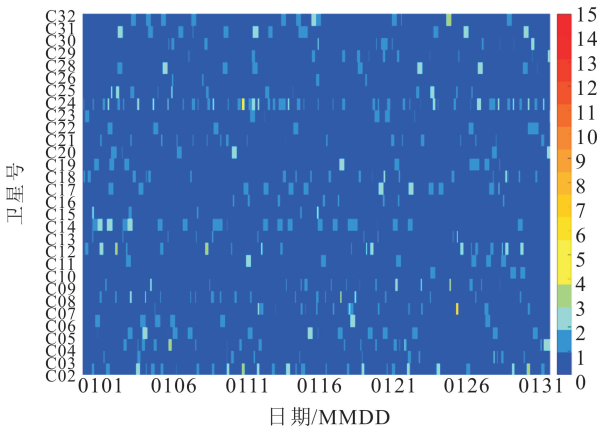
以 1 月份各卫星测站 URE 数据为例,进行统计分析,采用用户测距误差的 1 $\sigma$  估计,即 URE 的 68% 的误差包络统计值,形成各卫星 30 s 一个的实时 URA 值,并进行 URAI 转换,生成用户测距精度指数,提取每 1 h 的 URAI 进行绘图统计分析,各系统 URAI 变化图如图 9。

对于 GPS、Galileo、GLONASS 和 BDS 整星座统计 URE、URA 如表 5 所示。

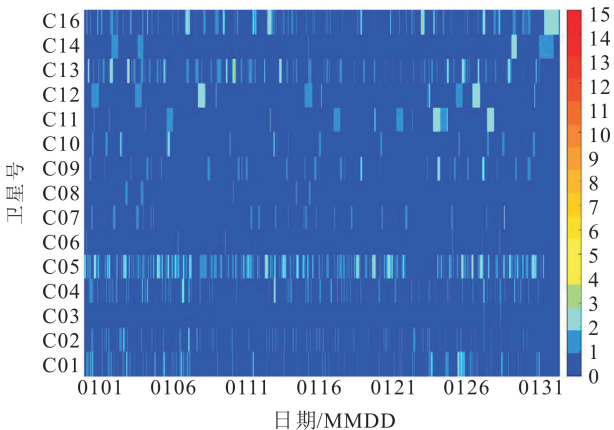
表 5 表明,除 GLONASS,其余系统的 URE 和 URA 均在 1 m 内,对 BDS、GPS、Galileo、GLONASS

卫星 URE 和 URA 差距都在 0.24 m 内,表明两种统计结果较为一致,展现出的各系统规律也较为一致。

图 9(a)表明,G24 卫星 URAI 大于 0 时段较多,G19 在 99.5% 的时段 URAI 都为 0。对比图 9(b)和图 9(c),GLONASS URAI 值>0 时段较多,甚至有些时段 URAI>5,而 Galileo 极少的时段 URAI>0 与 URE 表现情况相吻合。图 9(d)和图 9(e)表明,BDS-2 和 BDS-3 一个月内绝大多数 URAI 值为 0,反映为 0~2.4 m 的 URE,C05 URAI 值>0 时段较多,不同类型卫星,URAI 差异较大。



(a) GPS卫星URAI图

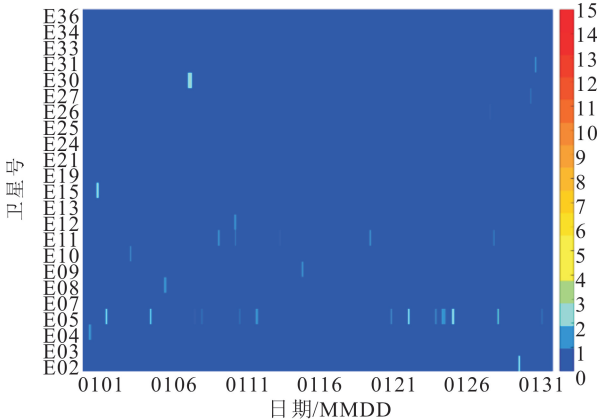


(e) BDS-2卫星URAI图

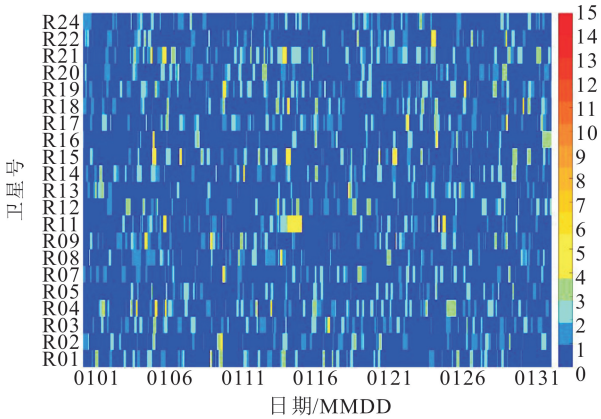
图 9 各系统卫星 URAI 图

表 5 GNSS 整星座 URE、URA 单位:m

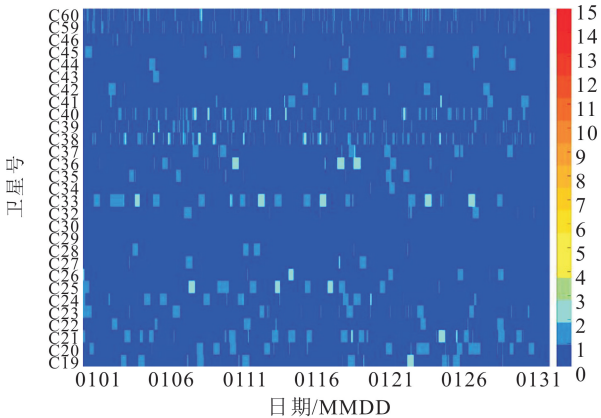
系统	URE(RMS)	URA
GPS	0.78	0.69
Galileo	0.24	0.28
GLONASS	1.43	1.23
BDS	0.81	0.73



(b) Galileo卫星URAI图



(c) GLONASS卫星URAI图



(d) BDS-3卫星URAI图

3 结语

利用电离层平静期与活跃期的广播星历数据与观测数据对 GPS、Galileo、GLONASS 和 BDS 卫星的 URE、URA 和 URAI 值进行分析,结果如下。

① 对不同系统用户测距误差, Galileo 卫星 URE 集中在  $-2\sim 2$  m 间,全星座 URE 均方根为 0.24 m。GPS 卫星的 URE 在  $-4\sim 4$  m 之间,URE 均方根为 0.78 m。GLONASS 卫星 URE 主要集中在  $-5\sim 5$  m 之间。BDS 卫星整体 URE 主要集中在  $-2\sim 2$  m,较之 BDS-2,BDS-3 搭载了星间链路和稳定性更高的星载钟,使得 URE 更加集中稳定,全星座 URE 均方根为 0.81 m。

② 对各系统不同类型卫星 URE, Galileo FOC 卫星整体 RMS 为 0.23 m,STD 为 0.22 m;IOV 卫星整体 RMS 为 0.31 m,STD 为 0.3 m,单星 URE 最大为 E05 的 0.63 m,整体表现最好。GPS IIR 卫星整体 RMS 为 0.91 m,STD 为 0.63 m;IIIA 卫星整体 RMS 为 0.61 m,STD 为 0.59。BDS 不同类型卫星在 URE 上的表现存在差异,MEO CAST 卫星 URE RMS 为 0.58 m、STD 为 0.53 m,MEO SECM 卫星 URE RMS 为 0.86 m、STD 为 0.59 m,GEO 卫星与 IGSO 卫星 URE 分布较集中,其 STD 在 0.5 m 以下。GLONASS 无论是整星还是单星都效果较



差,存在较多的异常值和异常卫星,GLONASS-M 卫星 URE 均值为 0.24 m,RMS 和 STD 大于 1 m。

③ 对不同系统用户测距精度进行分析,除 GLO-NASS 外,其余系统的 URA 大多数时段  $URAI=0$ ,保持在 2.4 m 内;不同类型卫星,URAI 差异较大。Galileo 整星座平均 URA 为 0.3 m,GPS 为 0.72 m,BDS 为 0.74 m,GLONASS 为 1.19 m。

## 参考文献:

- [1] 张军.空域监视技术的新进展及应用[J].航空学报,2011,32(1):1-14.
- [2] 苏先礼.GNSS 完好性监测体系及辅助性能增强技术研究[D].上海:上海交通大学,2013.
- [3] 杨元喜.卫星导航的不确定性、不确定度与精度若干注记[J].测绘学报,2012,41(5):646-650.
- [4] WU Y, LIU X, LIU W, et al. Long-term behavior and statistical characterization of BeiDou signal-in-space errors[J].GPS Solutions,2017,21(4):1907-1922.
- [5] 王陆潇,黄智刚,赵昀.GPS 电文用户测距精度参数设计分析[J].南京理工大学学报,2014,38(5):620-625.
- [6] 杨戩,曹月玲.北斗三号系统 SISA 参数用户使用算法及性能评估[J].天文学进展,2022,40(1):130-141.
- [7] 崔瑞云,倪育德,王琳琳,等.北斗卫星导航系统完好性参数研究[J].现代导航,2015,6(1):17-22.
- [8] GB/T 39414.4—2020.北斗卫星导航系统空间信号接口规范 第4部分:公开服务信号 B3I[S].2020.
- [9] DIAZ S P, MEURER M, RIPPL M, et al. URA/SISA analysis for GPS-Galileo ARAIM integrity support message[C]//Proceedings of the 28th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS + 2015), 2015: 735-745.
- [10] 刘瑞华,董立尧,翟显.北斗卫星导航系统空间信号用户测距误差计算方法研究[J].中国空间科学技术,2017,37(4):41-48.
- [11] 刘东亮,成芳,沈朋礼,等.北斗三号全球卫星导航系统空间信号精度评估[J].全球定位系统,2022,47(2):114-125.
- [12] 许焱,刘智敏,徐保朋,等.北斗卫星导航系统广播星历轨道精度分析[J].第十三届中国卫星导航年会论文集——S04 星轨道与精密定位,2022:81-88.
- [13] 王尔申,刘慧超,雷虹,等.高精度 BDS 空间信号完好性评估方法[J].沈阳航空航天大学学报,2023,40(3):56-62.
- [14] 陶清瑞,贾小林,王利军,等.GNSS 空间信号精度的研究分析[J].测绘工程,2021,30(1):24-29.
- [15] 杨建华,唐成盼,宋叶志,等.GNSS 导航电文空间信号测距误差分析[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2021,51(1):68-80.
- [16] 张熙,刘长建,章繁,等.四大 GNSS 广播星历精度评估与对比分析[J].武汉大学学报(信息科学版),2022,47(2):208-218.
- [17] 彭华东,乔书波,杨显赐.GPS/Galileo/BDS-3 广播星历精度分析[J].时间频率学报,2024,47(1):62-71.
- [18] GAO G X, TANG H, BLANCH J, et al. Methodology and case studies of signal-in-space error calculation: top-down meets bottom-up[C]//Proceedings of International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, 2009, 5538(1):2824-2831.
- [19] WANG L, LI Z, GE M, et al. Investigation of the performance of real-time BDS-only precise point positioning using the IGS real-time service [J]. GPS Solutions, 2019, 23: 1-12.
- [20] CHENG C, ZHAO Y X, LI L, et al. Preliminary analysis of URA characterization for GPS real-time precise orbit and clock products[C]//2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Monterey:IEEE, 2018:615-621.
- [21] 李宗义,汪亮,王宁波,等.CAS 实时轨道、钟差产品性能评估及完好性支持信息估计[J].武汉大学学报(信息科学版),2024:1-19.
- [22] WANG Y, LI R. The analysis of character of user range accuracy [C]//China Satellite Navigation Conference (CSNC) 2013 Proceedings: Satellite Navigation Signal System, Compatibility & Interoperability • Augmentation & Integrity Monitoring • Models & Methods, Heidelberg:Springer Berlin Heidelberg, 2013:267-277.
- [23] 范丽红.GPS/BDS 数据质量评估及完好性监测研究[D].西安:长安大学,2014.
- [24] 郑洁,潘士娟.GNSS 空间信号完好性评估与分析[J].时间频率学报,2022,45(1):59-74.
- [25] HENG L. Safe satellite navigation with multiple constellations: global monitoring of GPS and GLONASS signal-in-space anomalies[D]. California: Stanford University, 2012.
- [26] 范媚君,周建华,牛飞,等.卫星导航系统基本完好性算法及性能分析[J].测绘科学技术学报,2011,28(6):407-410+415.
- [27] 桑文刚,姜广振,张兴国,等.地磁暴期间电离层扰动监测及 GNSS 定位性能分析[J].全球定位系统,2023,48(5):71-78.
- [28] 钱文进,张琳,安丽超,等.北斗三号广播星历空间信号测距误差分析[J].地理信息世界,2022,29(3):86-90.