

基于超快速星历反演大气可降水量的精度分析

师芸, 邬康康, 申靖宇

(西安科技大学 测绘科学与技术学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 水汽是预报某些灾害性天气的重要依据, 因此及时获得高分辨率的水汽产品对精准预报天气具有至关重要的意义. 针对最终精密星历更新速度较慢、时延较长, 无法满足实时反演大气可降水量的要求, 提出一种利用超快速星历代替最终精密星历反演大气可降水量的方法: 基于地基 GNSS 反演大气可降水量的原理, 利用 GAMIT 软件, 根据国际 GNSS 服务 (IGS) 网站提供的不同精度的星历产品获得大气可降水量, 并与气象探空站所获得的大气可降水量对比分析. 研究结果表明, 利用超快速星历所获得的大气可降水量与最终精密星历一致, 二者平均差值优于 0.1 mm, 且与探空站测得的大气可降水量值非常一致, 其精度可以满足天气预报的需求.

关键词: 超快速星历; 精密星历; GNSS; 大气可降水量; 实时反演

中图分类号: P228.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1008-9268(2019)05-0041-06

0 引 言

在气象学研究中, 学者们将垂直方向上气柱内所有的水汽含量转化成液态水的高度来表示大气中的水汽含量, 又称为大气可降水量 (PWV). 大气中的水汽含量虽然少, 但它却是大气系统的重要组成部分, 几乎所有的天气变化都与水汽的动态变化密切相关. 因此, 及时准确地掌握水汽的变化对于预报天气具有重要意义. 传统的水汽探测方法有探空气球、激光探测、微波辐射计等, 但这些方法存在造价高昂、时空分辨率低等问题. 文献[1]在 1992 年进行了 GPS 探测 PWV 的实验, 利用地面气温拟合了大气的加权平均温度, 使得 GPS 探测大气水汽的方法由设想变成现实, 并在 1994 年提出“GPS 气象学”的概念. 几乎同一时间, 北京大学的毛杰泰教授^[2]将这一概念引入国内, 并对 GPS-PWV 的原理做了详细介绍. 文献[3]综合各种因素研究了如何实时获得高精度的 GPS-PWV, 同时卫星轨道信息是影响地基 GNSS 反演 PWV 精度重要因子之一. 文献[4]的研究表明, 利用 IGS 中

心提供的最终精密星历获得的水汽精度可达 1 mm, 其精度完全可以满足天气预报的需求. 但是最终精密星历具有时间上的延迟性, 最短也有 13 d 左右, 无法满足对天气的实时预报.

为解决此问题, IGS 中心于 2000 年提供可以实时下载的超快速星历, 国内外许多专家学者对于广播星历、快速星历、超快速星历是否可以代替最终精密星历来实现对水汽的实时获取这一问题进行了许多研究. 文献[5]对广播星历条件下基线解算精度进行了分析, 结果表明, 一定条件下用广播星历代替最终精密星历可以满足日常工程需求; 文献[6]中可以用超快速星历代替最终精密星历进行中长基线的解算; 文献[7-9]使用不同星历进行精密单点定位精度分析, 并取得了良好的定位精度; 文献[10]使用超快速星历可以得到和最终精密星历精度一致的低轨定位结果.

针对最终精密星历更新速度较慢、时延较长, 无法满足实时反演 PWV 的要求, 本文利用 GAMIT 软件, 用超快速星历代替精密星历反演出 PWV, 并将其与最终精密星历和气象探空站获得

收稿日期: 2019-06-26

资助项目: 国家自然科学基金(41674013)

通信作者: 邬康康 E-mail: 1751620983@qq.com

的 PWV 对比分析,结果表明,超快速星历可以代替最终精密星历反演 PWV ,实现对中小尺度天气的预测。

1 地基 GNSS 反演 PWV

GPS 信号在传播过程中会受到电离层和对流层影响产生延迟和弯曲。其中电离层延迟可以利用双频接收机消除 99% 以上的影响,大气总延迟剔除电离层延迟可得到对流层总延迟,其可表示为

$$T_D = 10^{-6} \int N_d ds + 10^{-6} \int N_w ds = H_D + W_D, \quad (1)$$

式中: H_D 为静力学延迟; W_D 为湿延迟。通过映射函数,将大气延迟转换到天顶方向,则天顶总延迟 (ZTD) 为

$$ZTD = ZHD + ZWD, \quad (2)$$

式中: ZHD 为天顶方向上的干延迟; ZWD 为天顶方向上的湿延迟。

其中,干延迟量占对流层总延迟的 90% 以上^[11],其具有较好的稳定性,可以利用地面气象观测通过数学模型计算;而湿延迟随着时间和方向不同而发生快速的变化,难以用模型计算。可利用 GAMIT 等高精度 GPS 数据处理软件求解,天顶静力学延迟 (ZHD) 可通过 Saastamoinen 模型很好地估计得到,由此可分离得到天顶湿延迟 (ZWD)^[12],而 PWV 与 ZWD 成比例关系,有

$$PWV = \Pi \cdot ZWD, \quad (3)$$

式中, $\Pi = 10^6 / \rho R_v (K_3 / T_m + K_2')$, R_v 为水汽特定的气体常数, ρ 为水的密度, $K_2' = 22.1 \text{ K/hPa}$, $K_3 = 3.739 \times 10^5 \text{ K}_2 / \text{hPa}$,详细流程如图 1 所示。

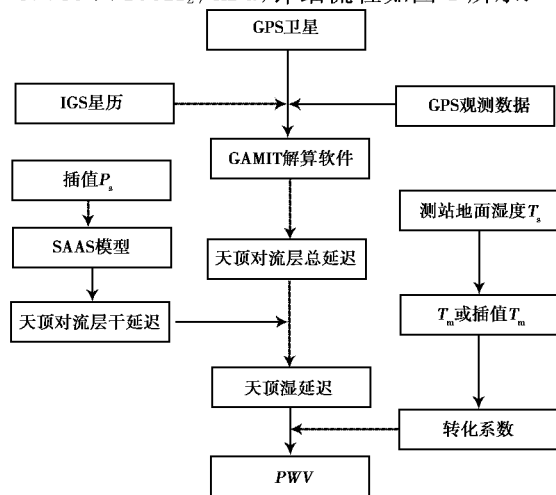


图 1 GPS 反演 PWV 流程图

2 数据及处理

2.1 数据来源

本次试验选取中国北京房山 (BJFS)、武汉 (WUHN) 及泰国帕图瓦 (CUSV), 菲律宾奎松市 (PIMO) 四个 IGS 站点数据, 及对应时间 IGS 提供的星历产品, 探空站数据。观测时段为 2013 年 7 月 1 日—7 月 8 日及 2016 年 5 月 30 日—6 月 4 日。历史天气数据显示, 此时间段内武汉地区有大到暴雨, 水汽变化明显, 具有代表意义。

探空站数据从美国怀俄明州立大学 (<http://weather.uwyo.edu/>) 网站下载, IGS 观测数据及其他数据可从地球动力数据分析中心 (CDDIS) 获取^[13-14], 其中观测数据观测时长为 24 h, 采样率为 30 s。IGS 提供的精密星历产品包括最终精密星历 (IGF)、快速精密星历 (IGR)、超快速精密星历 (IGU)^[15-16]。不同星历在精度、滞后时间、更新率和采样率方面存在差异, 如表 1 所示。

表 1 IGS 提供的精密星历产品

星历类型	精度/cm	滞后时间	更新频率
超快速星历(预报)	5	实时	4 次/天
超快速星历(实测)	3	3~9 h	4 次/天
快速星历	2.5	17~41 h	1 次/天
最终星历	2.5	12~18 h	每 7 天更新 1 次

2.2 数据处理

采用 GAMIT10.6 软件, 主要参数设置如下:

- 1) 卫星截止高度角为 15° 。
- 2) 解算模式选择 BASELINE。
- 3) 历元间隔 30 s。
- 4) 对流层模型选用 Saastamoinen 模型、映射函数选用 VMF1。
- 5) 加权平均温度模型采用 Bevis 经验公式。
- 6) 分别采用不同精密星历进行基线解算, 解算时引入气象观测数据, 生成 Z 文件, 通过 sh_metutil 生成可降水量成果文件。

3 数据处理结果及分析

3.1 不同星历条件反演的 PWV 对比

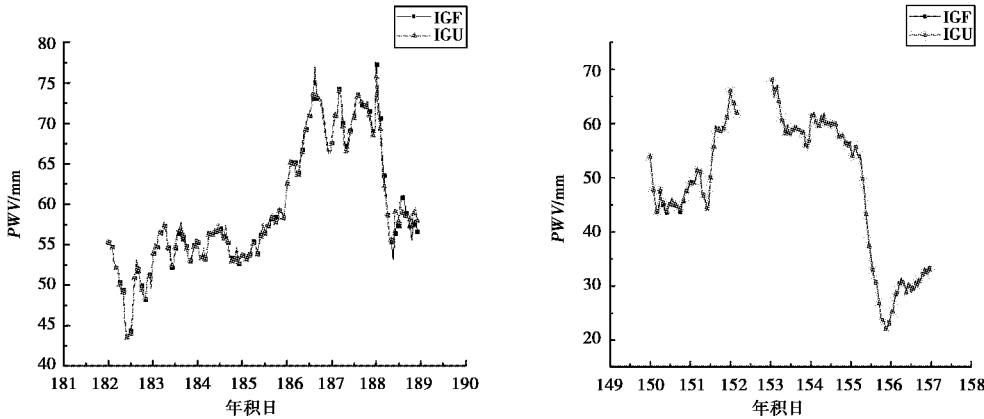
在 IGS 提供的所有星历产品中, IGF 精度最高, IGU 精度最低, 但更新频率最快。从更新频率来看, 超快速星历完全可以满足实时反演 PWV 的要求。本节对比分析利用 IGF 和 IGU 计算 PWV

的精度差异. PWV 计算时可采取不同的时间间隔,本文采用的时间间隔为 2 h,一天可得到 13 组结果. 由于暴雨的影响,2016 年 5 月 31 日 5:00—24:00 缺乏观测数据,故 5 月 31 日得到两组结果. 经计算整理得到 IGF 与超快速星历条件下 PWV 的序列图和差值图.

1)由图 2 可知两种星历条件下得到的 PWV 值非常接近,且整体趋势一致;利用 SPSS 软件计算得到二者相关性均在 0.985 以上;

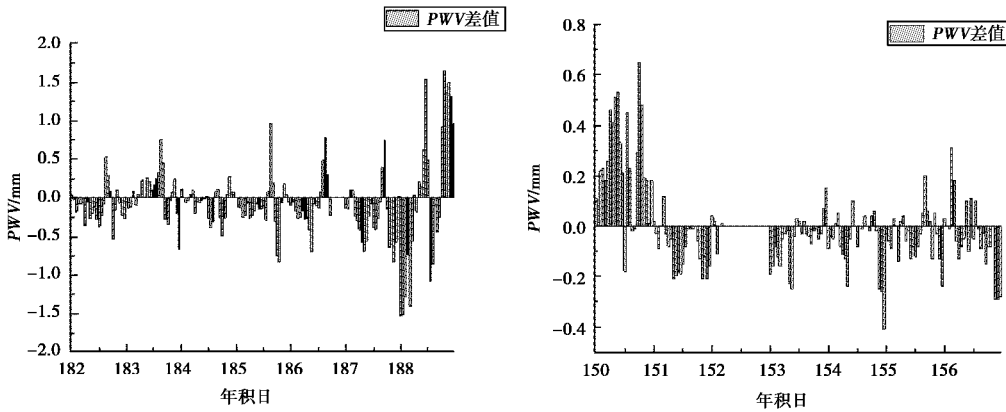
2)由图 3、表 2 可以看出 2016 年二者差值最大为 0.65 mm,平均差值为 0.005 6 mm,在数值上几乎保持一致. 2013 年二者差值最大为 1.62 mm,平均差值为 0.071 3 mm;

3)相对于 2016 年来说,2013 年水汽差值较大,但 2013 年 7 月 5 日左右武汉发生暴雨,降雨量超过 500 mm,空气中水汽含量最高可达 77.8 mm,因此相对于空气中水汽含量来说,二者差异几乎可以忽略不计.



(a)2013 年 7 月 1 日—2013 年 7 月 8 日水汽对比 (b)2016 年 5 月 29 日—2016 年 6 月 4 日水汽对比

图 2 不同星历反演 PWV 对比



(a)2013 年 7 月 1 日—2013 年 7 月 8 日水汽差值 (b)2016 年 5 月 29 日—2016 年 6 月 4 日水汽差值

图 3 不同星历反演 PWV 差值

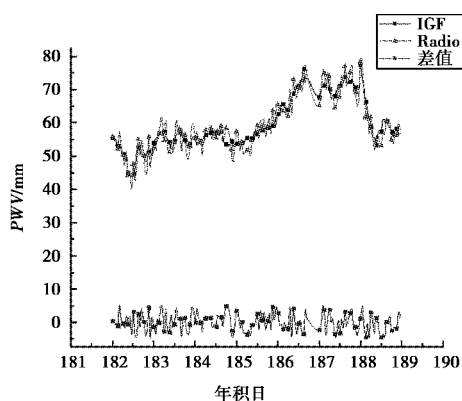
表 2 IGF 和超快速星历计算结果的差值统计

时间	差值			
	最大值/mm	最小值/mm	均值/mm	标准差
2013 年 7 月 1 日—2013 年 7 月 8 日	1.62	−1.41	0.0713	0.5847
2016 年 5 月 29 日—2016 年 6 月 4 日	0.65	−0.41	0.0056	0.1682

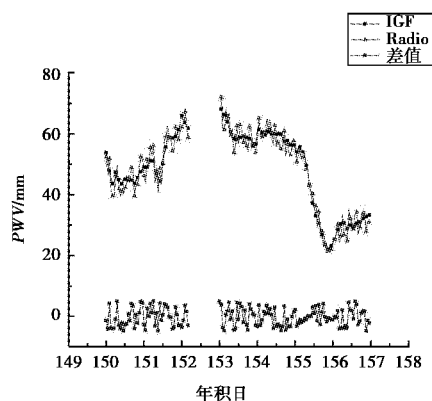
3.2 GPS-PWV 与 Radio-PWV 对比

无线电探空站是为大气科学研究而在全球建立的大气探测站. 目前已经在国内不同地区建立了超过 100 个探测站, 以准确地获取不同高度的气

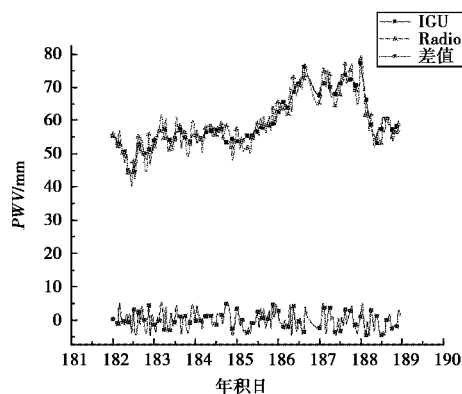
压、温度、可降水量等产品; 因其探测精度较高, 常作为其他探测方法的检验标准. 本文利用武汉无线电探空站 (简称 ZBAA, 编号 57494) 作为检验标准, 与地基 GPS 反演的 PWV 对比如图 4 所示.



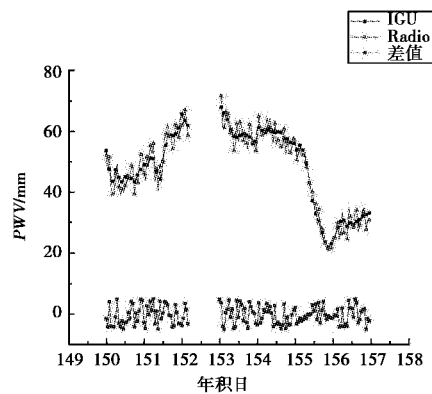
(a) 2013 年 IGF-PWV 与 Radio-PWV 对比



(b) 2016 年 IGF-PWV 与 Radio-PWV 对比



(c) 2013 年 IGU-PWV 与 Radio-PWV 对比



(d) 2016 年 IGU-PWV 与 Radio-PWV 对比

图 4 Radio-PWV 与 GPS-PWV 对比

表 3 GPS-PWV 与 Radio-PWV 对比结果统计

时间	IGU-PWV 与 Radio-PWV 结果统计					IGF-PWV 与 Radio-PWV 结果统计				
	最大差 值/mm	最小差 值/mm	平均差 值/mm	相关系数	RMSE	最大差 值/mm	最小差 值/mm	平均差 值/mm	相关系数	RMSE
2013	5.46	-5.08	-0.113 7	0.944	2.81	4.97	-4.88	-0.185 0	0.948	2.73
2016	5.08	-5.13	-0.315 7	0.973	2.98	4.98	-4.95	-0.321 4	0.973	2.97

由图 4 可知, 对比 IGS 站反演出的 PWV 与探空站得到的 PWV 可知, 二者在趋势上保持高度一致, 最高相关性可达到 0.973, 但并不是完全对应相等, 因为探空站的位置与 IGS 站的位置只是相近, 并不完全重合, 另一方面探空气球获得的 PWV 会有包含时间延迟且受风力等因素的影响,

而 GPS 接收机接收信号则是实时反映变化. 结合图 4、表 3 可知, 二者数值非常接近, 最大差值不超过 6 mm, 利用最终星历得到的 PWV 与 Radio-PWV 对比, 2013 年平均差值为 0.185 mm, 2016 年平均差值为 0.321 4 mm, 最大均方根误差为 2.97. 超快速星历条件下, 2013 年二者平均差值为

0.113 7 mm, 2016 年二者平均差值为 0.315 7 mm, 最大均方根误差为 2.98, 由此可以证明地基 GNSS 反演 *PWV* 是稳定可靠的。

4 结 论

地基 GNSS 探测 *PWV* 相对于其他传统探测手段具有成本低、时空分辨率高、范围广等优点, 本文通过对 2013 年 7 月 1 日—7 月 8 日及 2016 年 5 月 30 日—6 月 4 日武汉两次降雨时期不同星历条件下获取的 *PWV* 与 Radio-*PWV* 对比分析, 可得到以下结论:

1) 与探空站获取 *PWV* 对比, 连续运行参考站反演的 *PWV* 精度较高, 二者之间的平均误差不超过 5 mm, 最大均方根误差不超过 3, 在无法获得 Radio-*PWV* 的情况下, 可利用地基 GPS 获得的可降水量代替 Radio-*PWV* 用于对中小尺度天气的预测等。

2) 与 2016 年相比, 2013 年基于超快速星历计算得到的 *PWV* 与基于 IGF 计算得到的 *PWV* 值相差较大, 但是同期武汉降雨量超过 500 mm, 空气中水汽最高含量达 77.8 mm, 其差值占 *PWV* 总含量不足 0.1%, 因此可认为两种星历条件下计算得到的 *PWV* 一致, 均可以满足对天气预报的需求。

3) 基于 IGF 和超快速星历得到的 *PWV* 具备良好的一致性, 鉴于 IGF 的长时间时延, 可利用 IGF 进行事后计算 *PWV*, 用来研究 *PWV* 的变化特征等; 若需要实时获取 *PWV*, 可采用精度较低的超快速星历反演的 *PWV*。

4) 文中采用 4 个 IGS 站进行联合计算, 结果良好。至于参与解算的跟踪站数量及位置分布对计算 *PWV* 精度的影响, 还需要采用不同的观测组网解算进一步分析讨论, 以便提高地基 GNSS 反演 *PWV* 的精度。

参考文献

- [1] BEVIS M, BUSINGER S, HERRING T A, et al. GPS meteorology: Remotesensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 1992, 97(D14): 15787-15801. DOI: 10.1029/92JD01517.
- [2] 毛节泰. GPS 的气象应用[J]. 气象科技, 1993(4): 45-49.
- [3] 宋淑丽, 朱文耀. 区域 GPS 网实时计算可降水量的若干问题[J]. 中国科学院上海天文台年刊, 2003(24): 20-27.
- [4] 徐韶光, 熊永良, 刘宁, 等. 利用地基 GPS 获取实时可降水量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2011, 36(4): 407-411.
- [5] 谭阳涛, 岳建平. 基于超快速星历的 GAMIT 高精度基线解算研究[J]. 地理空间信息, 2019, 17(3): 75-78, 10.
- [6] 高旺, 高成发, 潘树国, 等. 基于广播星历的 GAMIT 基线解算方法及精度分析[J]. 测绘工程, 2014, 23(8): 54-57.
- [7] 赖允斌, 赵春梅, 李子申. 不同星历下实时精密单点定位精度分析[J]. 测绘通报, 2015(8): 9-12.
- [8] 何帆, 高成发, 潘树国, 等. 不同星历和钟差产品的精密单点定位结果分析[J]. 导航定位学报, 2015, 3(4): 79-84.
- [9] 李勇军, 丁士俊. 不同星历误差对静态单点定位精度的影响与分析[J]. 测绘工程, 2010, 19(3): 17-19, 23.
- [10] 吴琼宝, 赵春梅, 田华. 不同星历下低轨卫星轨道精度分析[J]. 导航定位学报, 2017, 5(4): 21-24.
- [11] 于胜杰, 万蓉, 付志康. 气压对 GPS 大气可降水量解算的影响分析[J]. 大地测量与地球动力学, 2013, 33(2): 87-95.
- [12] 姚宜斌, 郭健健, 张豹, 等. 湿延迟与可降水量转换系数的全球经验模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 41(1): 45-51.
- [13] 张双成, 李振宇, 戴凯阳, 等. 北京地区 GPS 水汽变化与雾霾的相关性[J]. 测绘科学, 2016, 41(8): 43-47.
- [14] 张双成, 刘经南. 顾及双差残差反演 GPS 信号方向的斜路径水汽含量[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(1): 100-104.
- [15] 刘盼, 刘智敏, 张明敏, 等. 不同 IGS 星历产品对地基 GPS 反演水汽的影响[J]. 测绘科学, 2018, 43(12): 17-22.
- [16] 陈兆林, 孙钦帮, 张书毕, 等. IGS 超快速星历对 GPS 近实时反演水汽精度的影响研究[J]. 气象科学, 2017, 37(5): 652-658.

作者简介

师芸 (1974—), 女, 教授, 研究方向为大地测量数据处理与环境遥感。

邬康康 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高精度 GNSS 数据处理、GNSS 气象学。

申靖宇 (1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高频 GNSS 数据处理。

Precision analysis of atmospheric precipitation inversion based on super fast ephemeris

SHI Yun, WU Kangkang, SHEN Jingyu

(College Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: Water vapor is an important parameter for weather forecast weather, so it is important to obtain high resolution water vapor products in time. Aiming at the slow update speed and long delay of final precise ephemeris, which can't meet the requirement of real-time retrieving atmospheric precipitable water, a method of retrieving atmospheric precipitable water by using ultra-fast ephemeris instead of final precise ephemeris is proposed. Based on the principle of ground-based GNSS inversion of atmospheric precipitable water, using GAMIT software, the atmospheric precipitable water is obtained according to the ephemeris products with different precision provided by the international GNSS service (IGS) website, and compared with the atmospheric precipitable water obtained by meteorological sounding station. The results show that the atmospheric water obtained from the super fast ephemeris can be consistent with the final precise ephemeris. The average difference is smaller than 0.1 mm, and is consistent with the atmospheric precipitable water measured by the sounding station. The accuracy of the two ephemeris can meet the needs of weather forecasting.

Keywords: ultra-fast ephemeris; final precision ephemeris; GNSS; atmospheric precipitation; real time inversion

俄罗斯计划 15 年发射 46 颗 GLONASS 卫星

2019 年 5 月 9 日,据综合俄罗斯国际新闻通讯社(RIA Novosti)报道,援引俄罗斯航天国家集团公司消息,俄罗斯计划在 2034 年前发射 46 颗“格洛纳斯(GLONASS)”导航卫星。预计,2019-2033 年发射 4 颗“GLONASS-M”卫星、9 颗“GLONASS-K”卫星和 33 颗“GLONASS-K2”卫星。

表 1 2019-2033 年 GLONASS 导航卫星具体发射时间

年份	卫星	年份	卫星
2019	3 颗“GLONASS-M”、1 颗“GLONASS-K”和 1 颗“GLONASS-K2”	2025	6 颗“GLONASS-K2”
2020	1 颗“GLONASS-M”、3 颗“GLONASS-K”和 1 颗“GLONASS-K2”	2026	2 颗“GLONASS-K2”
2021	3 颗“GLONASS-K”	2029	3 颗“GLONASS-K2”
2022	1 颗“GLONASS-K”和 1 颗“GLONASS-K2”	2030	7 颗“GLONASS-K2”
2023	1 颗“GLONASS-K”和 1 颗“GLONASS-K2”	2031	3 颗“GLONASS-K2”
2024	4 颗“GLONASS-K2”	2032	2 颗“GLONASS-K2”
		2033	2 颗“GLONASS-K2”

按计划,2025 年“GLONASS-M”卫星将退役,GLONASS 系统全面使用新一代卫星即“GLONASS-K”和“GLONASS-K2”卫星,2030 年系统在轨卫星全部使用“GLONASS-K2”卫星。与前一代即“GLONASS-M”卫星相比,新一代卫星发出导航信号数量更多,寿命更长。“GLONASS-M”卫星发射 5 个信号,寿命 7 年;而“GLONASS-K”卫星发射 7 个信号,“GLONASS-K2”卫星发射 9 个信号,两者寿命均为 10 年。

此外,2023-2025 年间,发射 6 颗“GLONASS-V”高轨导航卫星,以提高 GLONASS 系统导航精度。具体讲,2023-2024 年间,“联盟-2.1B”火箭发射 2 颗“GLONASS-V”卫星,2025 年用“安加拉-A5”火箭发射 4 颗“GLONASS-V”卫星。

据悉,首颗“GLONASS-K2”卫星将使用精度比目前 GLONASS 卫星所用铷钟和铯钟高 10 倍的无源氢频标。第二颗“GLONASS-K2”卫星将使用更精确的星载计时器即升级版无源氢频标。新型原子钟将提高 GLONASS 系统定位精度。2020 年除发射首颗“GLONASS-K2”卫星外,GLONASS 系统还将获得新型地面时间标准,用以与星载时钟同步。其精度将比现有“计时器”高 10 倍。

目前,GLONASS 系统在轨有 26 颗卫星(24 颗“GLONASS-M”卫星、2 颗“GLONASS-K”卫星),其中 24 颗运行正常。为保证导航信号全球覆盖,GLONASS 系统必须有 24 颗卫星在轨运行。

中国电子科技集团公司第 10 研究所 徐兴泽编译

原转载自“天地一体化信息网络”微信公众号