

基于 Python 的 RINEX 数据转换软件设计与实现

吴汤婷, 梁 乔, 赵宝贵

(东华理工大学 测绘与空间信息工程学院, 南昌 330013)

摘 要:与接收机无关的数据交换格式 RINEX 是一种在全球导航卫星系统 GNSS 测量领域中普遍采用的标准数据格式,但其升级速度超过数据处理软件的更新频率,导致高版本 RINEX 数据不能被大部分数据处理软件兼容。为提高数据的通用性,基于各版本 RINEX 标准数据格式的特点,文中采用 Python 语言设计开发了一款 RINEX 数据转换软件,实现观测数据、导航电文和气象数据在不同 RINEX 版本间的转换操作,满足用户的 GNSS 数据转换需求。软件测试结果表明,转换后文件的观测值编码类型符合目标版本 RINEX 规范要求,且转换前后编码对应的数据完整性和数据质量一致;此外,研制的软件编码转换结果与同类型软件保持一致。

关键词:观测数据;导航电文;数据转换;格式转换

中图分类号:P228

文献标识码:A

文章编号:1006-7949(2024)02-0033-08

Design and implementation of RINEX data conversion software based on Python

WU Tangting, LIANG Qiao, ZHAO Baogui

(School of Surveying and Geoinformation Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: Receiver Independent Exchange Format (RINEX) is a standard data format widely used in the field of Global Navigation Satellite System (GNSS) measurements, but its upgrade rate exceeds the update frequency of data processing software, resulting in higher versions of RINEX data not being compatible with most data processing software. In order to improve the data generality, this paper uses Python language to design and develop a RINEX data conversion software based on the characteristics of each version of RINEX standard data format, which enables the conversion of observation data, navigation ephemeris and meteorological data between different RINEX versions to meet users' GNSS data conversion needs. The software testing results show that the encoding type of observations in the converted file meets the requirements of the target version RINEX specification, and the data integrity and quality corresponding to the encoding before and after conversion are consistent. In addition, the coding conversion results of the software developed in this article are consistent with those of the same type of software.

Key words: observation data; navigation ephemeris; data conversion; format conversion

全球导航卫星系统 GNSS 数据是定位、导航与授时服务的前提和基础,通过解算可获得位置信息^[1]。统一的数据格式是进行解算的首要条件,但接收机生产厂商定义的数据记录规范各不相同。为使 GNSS 数据格式标准化,国际上提出一种与接收机无关的数据交换格式(receiver independent exchange format, RINEX)。RINEX 是以文本形式记录并储存 GNSS 数据,记录格式与接收机生产商和

接收机型号无关,迅速成为 GNSS 数据处理中普遍采用的标准数据格式^[2-5]。随着新卫星系统的发展和已有卫星系统的改造升级,GNSS 数据愈加丰富多样,为满足多元化的数据记录需求,RINEX 也在不断迭代升级^[6-8]。但大部分 GNSS 数据处理软件的更新速度落后于 RINEX 发展,不支持高版本 RINEX 数据的解算。为提高数据的通用性和可分析性,通常会将待处理数据转换成软件支持的 RINEX 版本,方便后续工作的推进。

目前,国内外已有多款软件/工具提供 RINEX 版本转换服务。其中,美国 Ashtech 公司研发的 RINEX Converter 软件和日本高须知二开发的 RT-KLIB 软件,都具备友好的操作界面,分别支持

收稿日期:2023-04-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42264003);赣鄱俊才支持计划—主要学科学术和技术带头人培养项目(20232BCJ23018);江西省自然科学基金资助项目(20224BAB213048)

第一作者简介:吴汤婷(1990—),女,讲师,博士。

RINEX 3.02 及以下版本和 RINEX 3.04 及以下版本之间的数据转换^[9]；德国波茨坦地学研究中心研发的 GFZRNx 软件提供一定的 RINEX 版本转换服务，其所有操作须基于 DOS 窗口输入特定指令方可执行，仅支持 RINEX 2.11、3.04、3.05 和 4.00 文件的输出^[10]；GPS Solutions Inc. 提供的 GNSS Converter 是一款在线的 RINEX 转换工具，拥有简洁的 Web 页面，但数据的上传和下载速度缓慢，仅支持 RINEX 2.11、2.12 和 3.02 版本间的转换。综上所述，现有 RINEX 转换软件仍存在一定不足，不能很好地满足用户对不同版本 RINEX 数据的转换需求，因此亟待研制一款功能齐全的 RINEX 转换软件。

1 RINEX 格式

RINEX 已成为 GNSS 测量领域中广为使用的标准数据格式，下面将对其发展历程、文件构造和版本差异做简要介绍。

1.1 发展历程

RINEX 标准数据格式是由瑞士伯尔尼大学天

文学院的 Werner Gurtner 首次提出，其目的是解决欧洲 EUREF 89 项目中不同接收机的数据格式不一致问题，方便后续的数据统一处理^[11-12]。为紧跟卫星导航系统的发展变化，便于采集记录最新的 GNSS 数据，RINEX 一直处于迭代升级状态中。截至目前，RINEX 已更新至第四版，其主要版本发展历程如表 1 所示。下面针对 RINEX 2.11 至 RINEX 3.01 之间的几个版本修订简要介绍，RINEX 2.11 首次支持美国全球定位系统 GPS、俄罗斯格洛纳斯卫星导航系统(global navigation satellite system, GLONASS)、欧盟伽利略卫星导航系统(galileo satellite navigation system, Galileo)和星基增强系统(satellite-based augmentation system, SBAS)等卫星系统的数据记录，为运用多 GNSS 数据解算位置信息提供便利，因此得到大范围推广应用；随后修订的 RINEX 3.00 采用 3 字符观测值编码命名方式，与上一版本相比改动较大，因此不被当时大部分数据处理软件支持；为兼顾 GNSS 的发展和 RINEX 数据的使用，2009 年 6 月同步修订了 RINEX 3.01 和 RINEX 2.12。

表 1 RINEX 主要版本发展简介

版本	时间	版本相关信息
第一版	1989 年提出	第五届国际大地测量关于卫星定位的研讨会上正式提出(该版本目前已停用)
	1990 年 9/10 月发布 1.00	
第二版	1993 年 4 月修订版本 2.00	第二版是目前使用周期最长的 RINEX 版本，现仍在使用中。其中次生版本 RINEX 2.11 使用最广泛，能被大部分 GNSS 数据处理软件支持，记录的卫星系统包括 GPS、GLONASS、Galileo 和 SBAS ^[13-14] ；为支持我国北斗卫星导航系统 BDS 跟踪数据的记录，推出了 RINEX 2.12
	1999 年 7 月修订版本 2.10	
	2004 年 10 月修订版本 2.11	
	2009 年 6 月修订版本 2.12	
第三版	2007 年 11 月修订版本 3.00	第三版在支持多 GNSS 跟踪数据的记录，并为所有卫星系统引入 3 个字符的观测值编码，用于明确观测的跟踪模式。随着新卫星系统的发展、已有卫星系统的改造和广域差分增强系统的应用，在 RINEX 第三版中先后推出多个次生版本，不断满足多样化的数据记录需求
	2009 年 6 月修订版本 3.01	
	2013 年 4 月修订版本 3.02	
	2015 年 7 月修订版本 3.03	
	2018 年 11 月修订版本 3.04	
第四版	2020 年 12 月修订版本 3.05	第四版的更新主要集中在对导航信息的改进，即为每组导航数据添加行标题，该标题中声明了导航数据的记录类型、数据源和信息类型，数据描述信息更具体。
	2021 年 12 月修订版本 4.00	

1.2 文件构造

RINEX 文件由头信息和数据记录两部分组成。以 RINEX 第二版观测文件为例(如图 1 所示)，从文件的首行开始，至“END OF HEADER”标签处截止，这部分内容统称为头信息，剩余部分为数据记录。头信息是由众多行标签构成，其中每行 61~80 列内

容是行标签名，1~60 列内容是行标签指示的具体内容。头信息包含了数据的基本属性，是对记录数据的解释说明。数据记录是以历元为单位，将单颗卫星的所有数据按照头信息中声明的观测值编码顺序依次记录，当卫星某一观测值编码对应的数据丢失时，为保障数据记录格式的统一，用空格替代。

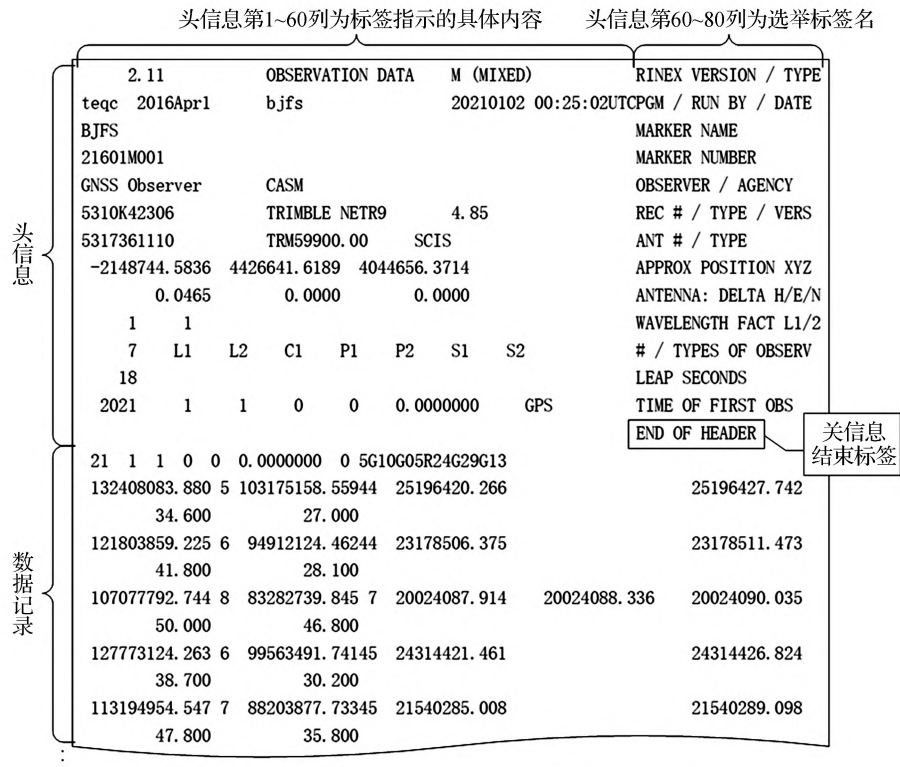


图 1 RINEX 观测文件结构

RINEX 文件是采用 ASCII 码的编码方式,按照严格的排布规则记录 GNSS 数据。为避免因格式不明确带来的数据存储和使用问题,RINEX 标准数据格式借鉴 Fortran 语言中简明的格式说明方式,对文件头信息和数据记录两部分内容的读写格式进行定义说明,该读写格式的形式通常为:

[r]fw.[m].

式中:[]中的内容为可选项,各字符的具体含义见表 2。例如数据记录格式为:5I6,F13.7,5X,A3,表示该行内容从第一个字符开始依次是:5 个 6 位的整型数,1 个 13 位(保留 7 位小数)的单精度浮点数,5 个空格和 1 个宽度为 3 的字符串。

1.3 版本差异

不同版本 RINEX 文件包含的信息量不同,数据读写格式也存在差异。以观测文件为例,对第二版、第三版和第四版 RINEX 标准数据格式的差异展开介绍。

首先,文件命名方式上存在差异。早期推出的 RINEX 第二版采用“8+3”(8 位文件名+3 位拓展名)的文件命名方式,为方便用户通过文件名直观地获取更多数据信息,后续 RINEX 版本的文件命名采用“29+3”方式。文件命名详情如图 2 所示。

其次,文件头信息差别较大。在行标签类型

表 2 RINEX 数据记录格式字符说明

字符	含义
r	重复因子,表示后面的数据将重复出现 r 次
f	数据类型
w	字段宽度
m	在字段中最少的数字或字符数

中,RINEX 第三版因需记录更详细的数据说明信息,相较第二版增添了 ANTENNA: DELTA X/Y/Z、SYS/PHASE SHIFT 和 GLONASS SLOT/FRQ # 等标签;第四版对标签作进一步修正与调整,如删除 GLONASS COD/PHS/BIS 标签内容。在行标签中的观测值声明处,RINEX 第三、四版舍弃第二版中的两位字符观测值编码命名方式,改用“tna”三字符来命名,其中 t 表示观测值类型,n 代表波段或频率,a 为信道或跟踪模式;另外,RINEX 第三版各次生版本之间因支持记录的卫星系统、频点不同,观测值编码类型也存在差异。

最后,数据记录部分的格式也存在区别。

RINEX 第三版和第四版的数据记录格式一致,因此仅对 RINEX 第二版与第三版的记录格式展开对比,对比情况见表 3。此外,RINEX 第三版取消单

行字符数不超过 80 个的限制,将任一历元下的单颗卫星数据记录于一行,方便数据的写入和读取。

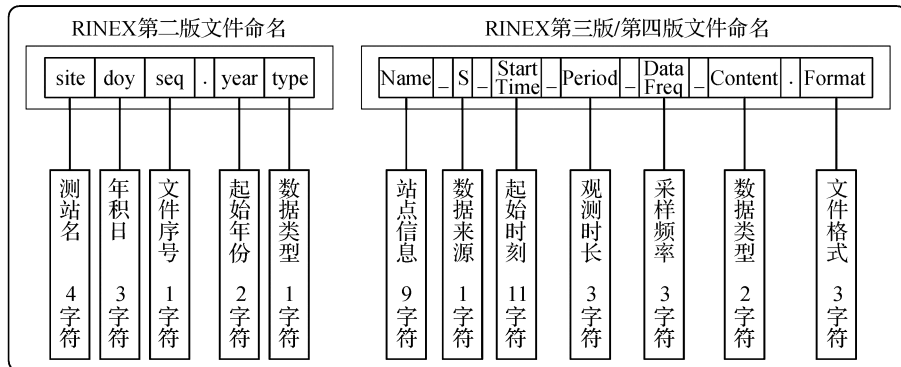


图2 RINEX 文件命名方式

表3 RINEX 数据记录部分格式对比

版本	数据记录部分	记录格式
第二版	标题(历元+历元标志+卫星数+PRN× m) 内容(观测值× k)	$1X,I2.2,4(1X,I2),F11.7 + 2X,I1 + I3 + m(A1,I2)$ $k(F14.3,I1,I1)$
第三版	标题(">"+历元+历元标志+卫星数+钟差改正) 内容(PRN+观测值× k)	$A1 + 1X,I4,4(1X,I2.2),F11.7 + 2X,I1 + I3 + 6X,F15.12$ $A1,I2.2 + k(F14.3,I1,I1)$

注: m 表示卫星数, k 表示头信息中声明的观测值编码个数。

2 版本转换

基于上述 RINEX 版本差异,下面将介绍 RINEX 转换流程,并完成相关软件的开发。

2.1 转换流程

RINEX 版本转换是依据文件格式特点,结合观测值编码优先级关系,对头信息和数据记录两部分内容进行转换。在确定观测值编码优先级时,对比发现 RTKLIB 和 GFZRNx 两款常用的 RINEX 转换软件的编码优先级大致相同,但在少数频点中存在细微差异,如 Galileo E6 频点中,RTKLIB 将提供公共特许服务(public regulated service, PRS)的 A 信道置于首位,优先级最高;GFZRNx 考虑到 PRS 用户群体的特殊性,因此将供有 PRS 信息的 A 信道优先级设置为最低。本文以 RINEX 第三版转换至第二版观测文件为例,选择 GFZRNx 编码优先级为参考依据,区分出 RINEX 版本转换过程中有关频点的观测值编码优先级关系(见表 4),并对转换流程做简要介绍。转换流程如图 3 所示,主要步骤包括:

1)读取头信息标签,删除转换后 RINEX 版本

中未定义的标签及其内容,并搜寻 SYS/#/OBS TYPES 标签,提取出其对应的观测值编码。根据波段、数据类型筛选观测值编码,提取出单个卫星系统内相同波段下、同一类型的观测值编码,并根据已定义的编码优先级关系,对提取后的编码进行转换。

2)判断转换后的编码是否符合目标 RINEX 编码定义规范。当编码符合规范时,记录其转换前编码的位置,后续用于保留对应位置的观测数值,并最终得到所有符合要求的转换后观测值编码;当编码不符合规范时,记录转换前编码的位置,后续用于删除对应位置的观测数值。

3)读取数据记录内容,以历元为单位进行转换。在单个历元中,首先,根据目标版本 RINEX 规范调整数据记录标题;其次,读取当前历元下卫星记录的观测数据,并根据转换前编码位置删除、保留观测数据;然后,按转换后观测值编码顺序调整单个观测数据的位置;最后,将处理好的数据按目标版本 RINEX 记录格式输出。按历元循环执行上述操作,直至全部内容转换完成。

2.2 软件实现

基于文中设计思路,采用 Python 语言开发出

表 4 RINEX 第三版转向第二版的观测值编码优先级

卫星系统	频点	数据类型	观测值编码信道或跟踪模式选取的优先级(逐级递减)
GPS	L1	C	C S L X
		P	P W Y M
		L/D/S	P W C S L X Y M N
	L2	C	C D S L X
		P	P W Y M
		L/D/S	P W C D S L X Y M N
GLO-NASS	L5	C/L/D/S	I Q X
	G1	C	C
		P	P
		L/D/S	P C
	G2	C	C
		P	P
		L/D/S	P C
Galileo	G3	C/L/D/S	I Q X
	E1	C/L/D/S	B C X Z A
	E5a	C/L/D/S	I Q X
	E5b	C/L/D/S	I Q X
	E5(E5a+E5b)	C/L/D/S	I Q X
	E6	C/L/D/S	B C X Z A
BDS	B1	C/L/D/S	I Q X
	B2/B2b	C/L/D/S	I Q X D P Z
	B3/B3A	C/L/D/S	I Q X D P Z
SBAS	L1	C/L/D/S	C
	L5	C/L/D/S	I Q X

注:表中未说明的卫星系统和频点,其对应的观测值编码将在转换过程中被删除。数据类型中,C、P为伪距;L为载波相位;D为多普勒;S为信噪比。

一款 RINEX 转换软件(RINEX conversion software, RinC),软件界面如图 4 所示。RinC 由三大转换模块组成,分别是观测数据、导航电文和气象数据,每个模块又支持多个 RINEX 版本,包括 RINEX 2.11、RINEX 2.12、RINEX 第三版全部次生版本以及 RINEX 4.00。

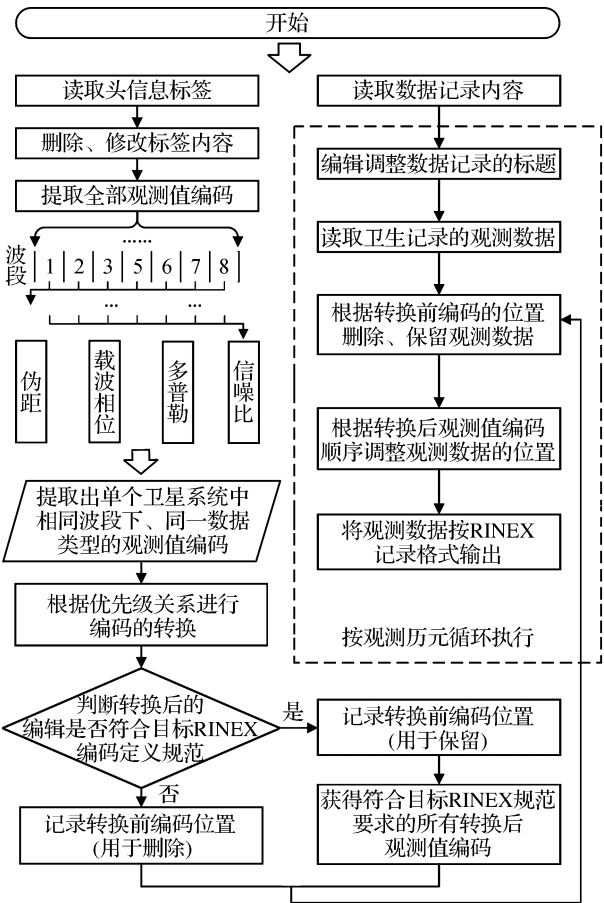


图 3 RINEX 第三版转换至第二版观测文件流程

3 测试与分析

为测试软件性能,选取 2022 年 11 月 10 日 IGS 中 WUH2 站的 RINEX 3.04 观测数据,将其通过 RinC 转换为 RINEX 2.11 数据,从观测值编码、数据完整率和数据质量等方面对比转换前后文件的差异;为进一步验证编码转换设计的合理性,对 RinC、GFZRNx 和 RTKLIB 3 款软件的同类编码转换情况展开对比分析。

3.1 观测值编码

观测值编码是文件头信息中的重要指示内容,其不同版本 RINEX 观测数据间存在一定差异。表 5 是文件转换前后观测值编码对比情况。可知,在 GPS、GLONASS、Galileo 和 SBAS 中对同一频点的相同数据类型编码按照优先级关系进行转换,并剔除转换后版本不支持记录的 GLONASS 中 G3 等部分频点的全部观测值编码;转换后的 RINEX 2.11 数据格式不支持我国 BDS、日本准天顶卫星系统(quasi-zenith satellite system, QZSS)和印度区域导航卫星系统(Indian regional navigation satellite system, IRNSS)数据记录,因此其相关的观测值编码将在转换过程中被全部删除。整体而言,转

换后观测值编码类型符合对应 RINEX 标准数据格式的规范要求。

3.2 数据完整率

数据完整率是指接收机实际获得的观测值数据量与理论数据量之比,是一项能直观反应数据在转换过程中是否丢失的重要指标^[15]。文中以转换前文件 GPS 中 L1 频点 W 信道、L5 频点 X 信道的

观测值为例,统计相关观测值编码对应的数据在文件转换前后的完整率,统计结果见表 6。可知,文件转换前后观测值编码的数据完整率相同,表明文件转换过程中并不存在数据的丢失现象,数据转换效果符合预期。此外,根据统计结果可知 GPS 中 L1 频点 W 信道的数据完整率较高,说明接收机捕获跟踪该信号的能力较强。



图 4 RinC 软件界面

表 5 文件转换前后观测值编码对比

卫星系统	转换前						转换后					
GPS	C1C	C1W	C1X	C2W	C2X	C5X	C1	P1	/	P2	C2	C5
	D1C	D1W	D1X	D2W	D2X	D5X	/	D1	/	D2	/	D5
	L1C	L1W	L1X	L2W	L2X	L5X	/	L1	/	L2	/	L5
	S1C	S1W	S1X	S2W	S2X	S5X	/	S1	/	S2	/	S5
GLONASS	C1C	C1P	C2C	C2P	C3X	D1C	C1	P1	C2	P2	/	/
	D1P	D2C	D2P	D3X	L1C	L1P	D1	/	D2	/	/	L1
	L2C	L2P	L3X	S1C	S1P	S2C	/	L2	/	/	S1	/
	S2P	S3X					S2					
Galileo	C1X	C5X	C6X	C7X	C8X	D1X	C1	C5	C6	C7	C8	D1
	D5X	D6X	D7X	D8X	L1X	L5X	D5	D6	D7	D8	L1	L5
	L6X	L7X	L8X	S1X	S5X	S6X	L6	L7	L8	S1	S5	S6
	S7X	S8X					S7	S8				
BDS	C1X	C2I	C5X	C6I	C7D	C7I						
	C7Z	C8X	D1X	D2I	D5X	D6I						
	D7D	D7I	D7Z	D8X	L1X	L2I						
	L5X	L6I	L7D	L7I	L7Z	L8X						
	S1X	S2I	S5X	S6I	S7D	S7I						
	S7Z	S8X										

码经 GFZRNx、RTKLIB 和 RinC 3 款软件,均转换得到 C1、P1、D1、L1 和 S1。参照 RINEX 标准格式说明文件,根据 GLONASS 中 C1C、C1P、D1P、L1P 和 S1P 等编码在 RINEX 3.04 中的频率值,在 RINEX 2.11 中与该频率值对应的观测值编码为 C1、P1、D1、L1 和 S1,由此说明 RinC 的编码转换与 GFZRNx、RTKLIB 保持一致,转换结果规范合理。

4 结束语

本文基于 RINEX 标准数据格式各版本的特点,对 RINEX 版本转换流程展开分析介绍,并采用 Python 语言研制了一款 RINEX 转换软件(RinC),可实现对观测数据、导航电文和气象数据的 RINEX 版本转换。该软件能有效满足 GNSS 数据中不同版本 RINEX 格式转换需求,提高数据的通用性和可分析性,方便后续的数据处理。

参考文献:

- [1] 吴汤婷,梁乔,陈本富,等. 三种 GNSS 数据下载方法对比分析[J]. 全球定位系统,2022,47(3):99-103.
- [2] 谷守周,秘金钟,党亚民. 新一代 RINEX 标准格式及其应用[J]. 全球定位系统,2009,34(3):52-58.
- [3] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 3 版. 武汉:武汉大学出版社,2016.
- [4] 刘毅科,郭承军,吴衡. UBX 协议格式的 GPS 原始数据解码与转换[J]. 全球定位系统,2016,41(6):80-84.
- [5] 杨义辉,邹进贵,马宁. 基于北斗 UB380-OEM 板的数据解码方法研究[J]. 测绘通报,2016(增刊 2):82-88.
- [6] 陈振,王权,秘金钟,等. 新一代国际标准 RTCM V3.2 及其应用[J]. 导航定位学报,2014,2(4):87-93.
- [7] 冯胜涛,刘志广,占伟,等. RINEX 观测数据文件格式及其应用[J]. 华北地震科学,2014,32(1):38-46.
- [8] 王铎,秘金钟,徐彦田,等. BINEX 标准数据格式及其解析[J]. 导航定位学报,2017,5(1):12-17.
- [9] TAKASU T. RTKLIB: an open source program package for GNSS positioning [EB/OL]. (2006-12-16) [2023-03-22]. <http://www.rtklib.com/>.
- [10] NISCHAN T. GFZRNx-RINEX GNSS data conversion and manipulation toolbox[EB/OL]. (2016-10-30) [2023-03-22]. <http://doi.org/10.5880/GFZ.1.1.2016.002>.
- [11] HATANAKA Y. Compact RINEX format and tools (beta-test version)[C]// Proceedings of 1996 IGS Analysis Center Workshop, March 19-21, 1996, Maryland, USA. Silver Springs, 1996.
- [12] 周玉霞,康登榜. 卫星导航接收机数据传输协议标准综述[J]. 航天标准化,2015(4):10-16,21.
- [13] ESTEY L, MEERTENS C. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data[J]. GPS Solutions, 1999, 3(1): 42-49.
- [14] 赵忠海,袁宜. 天宝 GNSS 原始观测数据批量转换 RINEX 格式的方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2017,40(5):157-159.
- [15] 蒋光伟,程传录,陈雄川,等. 基于 BDS-3 的定位性能与区域参考框架维持分析[J]. 地球物理学进展,2021,36(3):887-893.
- [16] 尹志豪,王广兴,胡志刚,等. 北斗三号观测数据质量分析[J]. 测绘科学,2020,45(6):37-45.

[责任编辑:李铭娜]