

PyROEX 软件用户手册

V1.0

软件：基于 python 的 ROEX 格式文件数据分析软件 (PyROEX)

开发人员：张名艺

地址： 中关村南二条一号，海淀区，北京 100190，中国

E-mail: zhangmingyi24@mails.ucas.ac.cn

Mar. 2025

目录

1 概述	3
2 软件需求	3
2.1 环境需求	3
2.2 软件许可证	3
2.3 软件安装	4
3 软件和工具说明	4
3.1 数据监测	5
3.2 质量检测	6
3.3 文件编辑	8
4 理论	9
4.1 数据完整度	9
4.2 MW 组合	10
4.3 GF 组合	10
4.3 IF 组合	10

1 概述

GNSS 掩星观测技术在气象领域的应用最早可以追溯到 1995 年的由美国开展的 GPS/MET 实验。该项目论证了利用 GNSS 掩星技术探测地球大气层和电离层的可行性，并直接带动了后续的掩星计划的蓬勃发展，包括德国的 CHAMP 卫星、阿根廷的 SAC-C 卫星、美国与德国合作的 GRACE 卫星、美国与中国台湾合作的 COSMIC 系列卫星以及中国的 FengYun 系列卫星。到目前，GNSS 掩星技术已经相对比较成熟，拥有全球覆盖、高精度、高垂直分辨率、长期稳定和全天候观测的优势，为气候研究、业务天气预报、空间天气研究提供了巨大的推动力。

目前国际上 GNSS 接收机数据交换相关的格式标准为 RINEX，RINEX 格式是由瑞士伯尔尼大学天文学院的 Werner Gurtner 于 1989 年提出，其设计的初衷是为了能够综合处理 GNSS 定位观测网的数据，主要适用于 GNSS 定位定轨用户，并不完全适用于掩星观测。比如常规的测地型 GNSS 接收机通常采用闭环跟踪方式，而 GNSS 掩星接收机在底层跟踪时通常采用开环跟踪方式，开环跟踪的一些参数也需要在观测数据中记录，目前的 RINEX 格式文件未包含这些参数的定义。在业界，GNSS 掩星数据的定义存在较大差异。例如，COSMIC 卫星和 MetOp 卫星的掩星数据采用的是由研究者自定义的二进制格式。由于缺乏统一的标准，研究人员在处理掩星数据时，每一个掩星任务都需要开发专门的掩星数据读取接口。这种做法不利于数据的交换、统一管理以及联合处理。在第八届国际射电掩星工作组会议总结中提到了掩星数据交换标准的重要性和紧迫性¹。中国国家空间科学中心针对上述问题，在参照目前 RINEX、ANTEX、IONEX 格式等 GNSS 标准数据文件格式基础上，提出了一套标准的北斗/GNSS 掩星数据的自主交换格式，详细内容请参考 ROEX 格式说明文件。ROEX 格式文件已经在实际科学研究中得到了使用。国家空间科学中心针对 ROEX 格式文件开发了一款名为“PyROEX”的软件，该软件是一款由 Python 编程语言编写的图形界面工具，为用户提供了数据监测、查看数据组合和完整性、文件编辑等选项。

2 软件需求

2.1 环境需求

压缩包中的可执行程序由 Conda 24.11.3 和 Python 3.11.7 使用 Spyder6.0.0 集成开发环境构建。计算机配置要求如下：

操作系统：Windows、Linux、Mac
系统类型：64 位
内存：512MB 以上
硬盘空间：至少 500MB

2.2 软件许可证

PyROEX 是由 GNU 通用公共许可证 (版本 3) (<https://www.gnu.org/licenses/gpl-3.0.html>)

¹ <https://irowg.org/workshops/irowg-8/>

管理的开源软件。用户可以根据自由软件基金会发布的 GNU 通用公共许可证的条款重新发布或修改它。

2.3 软件安装

下载完 PyROEX 压缩文件后，请按照以下步骤编译软件。

- **步骤 1:** 解压 PyROEX.zip 文件，不同操作系统的用户可通过不同的命令进行解压操作：

对于 Windows 用户，可在 cmd 控制台中通过 `cd` 命令转到 PyROEX.zip 所在文件夹位置，在控制台中输入：

```
7z x PyROEX.zip
```

对于 Linux 和 Mac 用户，先在命令行中转到 PyROEX.zip 所在文件夹位置，在控制台中输入：

```
unzip PyROEX.zip -d target_folder
```

用户可以得到三个文件夹，分别为 doc、data 和 src。doc 文件夹中包括中英文用户手册和 ROEX 的中英文说明文档；data 文件夹包含用以提供分析的大气层掩星观测文件和电离层掩星观测文件；src 文件夹中包含 Python 源代码。

- **步骤 2:** 利用 `cd` 命令进入到 src 文件夹中，然后在控制台中执行安装命令，通过 python 中的 pip 命令行批量安装运行所需要的库，输入：

```
pip install -r requirements.txt
```

- **步骤 3:** 运行 PyROEX 程序，在命令行中输入：

```
Python main.py
```

3 软件和工具说明

PyROEX 软件主要包含三个功能模块：ROEX 文件数据监测、质量检查和文件编辑，整体结构如图 1 所示。

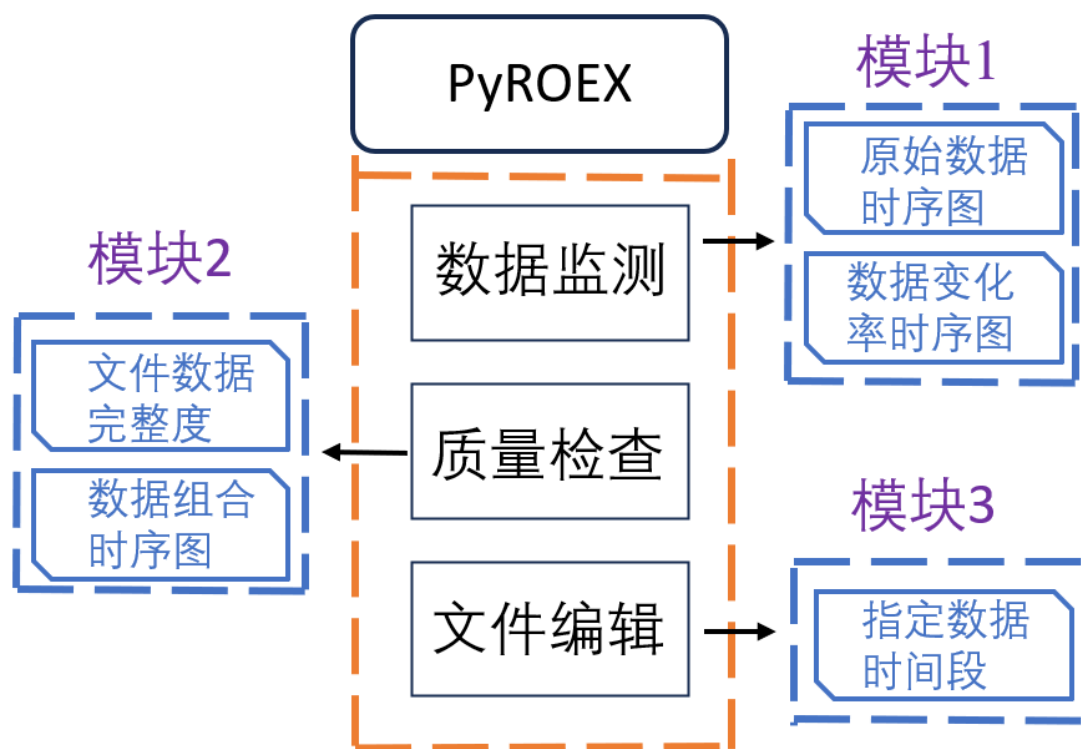


图 1 PyROEX 软件模块与其功能

3.1 数据监测

用户通过数据监测模块可以得到 ROEX 文件数据的可视化图像。用户运行程序后，点击“Input”以导入需要分析的 ROEX 文件，然后选择该文件的类型，具体操作步骤如图 2 所示。



图 2 选择文件界面

选择完文件类型后，用户可以在文本框“CLO SNR LIM”和“OPE SNR LIM”输入信噪比阈值用

于筛选数据。在对于大气层掩星观测文件，软件默认闭环信噪比阈值为 40 dB，开环信噪比阈值为 0.1 dB。对于电离层掩星观测文件，用户只需要设置“CLO SNR LIM”即可。大气层掩星观测文件中包含不参与掩星事件的参考星的信号数据，由于这些数据不包括信噪比，故未对参考星的数据进行筛选。

设置完信噪比阈值后，用户通过选择“Original Data”或“Data Changing Rate”确定需要绘制的数据类型。在“Original Data”界面中实现的是对 ROEX 文件中的各项数据的可视化，在“Data Changing Rate”界面中实现的是以差分计算的数据的变化率的绘制。需要注意的是，这里的变化率并不是由信噪比筛选后的数据的差分，而是筛选前原始数据的差分。变化率时序图中的历元为筛选后的历元。

界面中的标识意义请参考 ROEX 说明文件。图 3 展现了绘制参考大气层掩星观测文件中不同频率的信噪比的时序图的基本步骤，红色箭头指向自定义图像横纵坐标标签的通道。



图 3 数据监测绘图界面与信噪比绘制结果

3.2 质量检测

在“Quality Checking”模块中，用户可以分析文件的数据完整度，绘制数据之间的组合时序图，包括 MW 组合、GF 组合、IF 组合。具体操作步骤和结果如图 4 所示，首先在“File Type”下选择文件类型，然后仍然需要用户设置信噪比阈值。

选择完文件类型之后，用户可在“MW”、“GF”、“IF”三个选项卡中绘制指定观测模式下的指定卫星的数据的组合，该功能可用于检测数据质量。请用户注意：

- 这里绘制的图像并不是组合的时序图，而是组合的一阶差分时序图。具体组合原理请参考第四节。
- 在 Python 程序中，我们将不满足信噪比阈值的值置为 numpy.nan，而 numpy.nan 在参与运算时会将结果也置于 numpy.nan。当双频信号进行组合时，得到的结果的历元范围可能会与数据监测得到的图像的历元范围不同。

图 4 右图展现了绘制示例大气掩星观测文件中的个别数据的 GF 组合的结果。需要注意的是，该模块中的数据标识的命名不同于数据监测模块，比如“MW”界面中的“1C2X”表示由载波相位信息“L1C”、“L2X”和伪距信息“C1C”、“C2X”按照 MW 组合运算规律得到的组合结果；“GF”界面中的“1C2X”表示由载波相位信息“L1C”、“L2X”按照 GF 组合运算规律得到的组合结果；“IF”界面中的标识意义与“GF”中的相同。

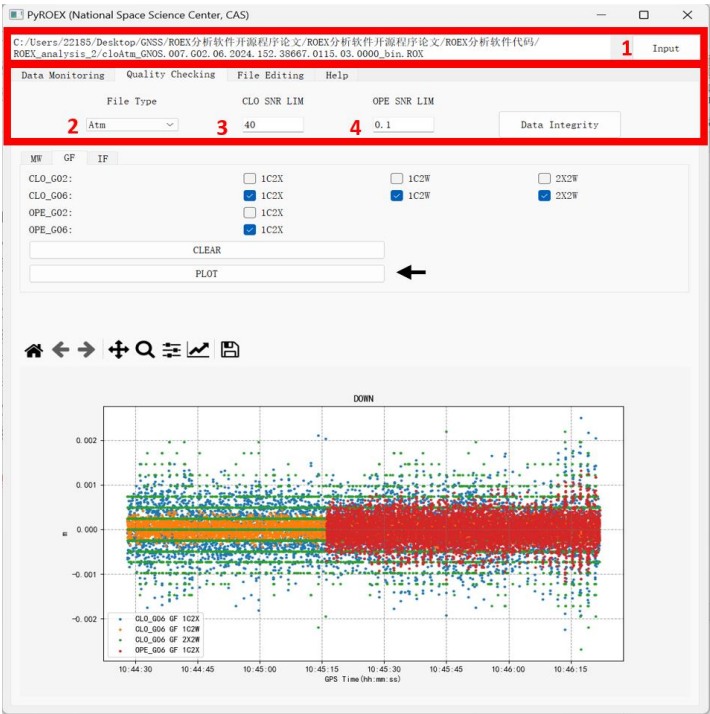


图 4 查看数据组合步骤及结果

点击“Data Integrity”按钮可以得到数据完整度的可视化图像，软件自动在当前运行文件夹下生成 LOG 文件夹以储存数据完整度文件。数据完整度文件以“LOG_DI”+ROEX 文件名命名，内容包含各时段各卫星的数据完整度和各具体时间卫星所缺失的数据标识。计算掩星的数据完整度时使用的理论数据总量为有效数据理论总量，即信噪比大于等于信噪比阈值的历元的理论数据总量，而不是文件所有历元的理论数据总量。图 5 展示了对示例 ROEX 文件的数据完整度的分析结果。

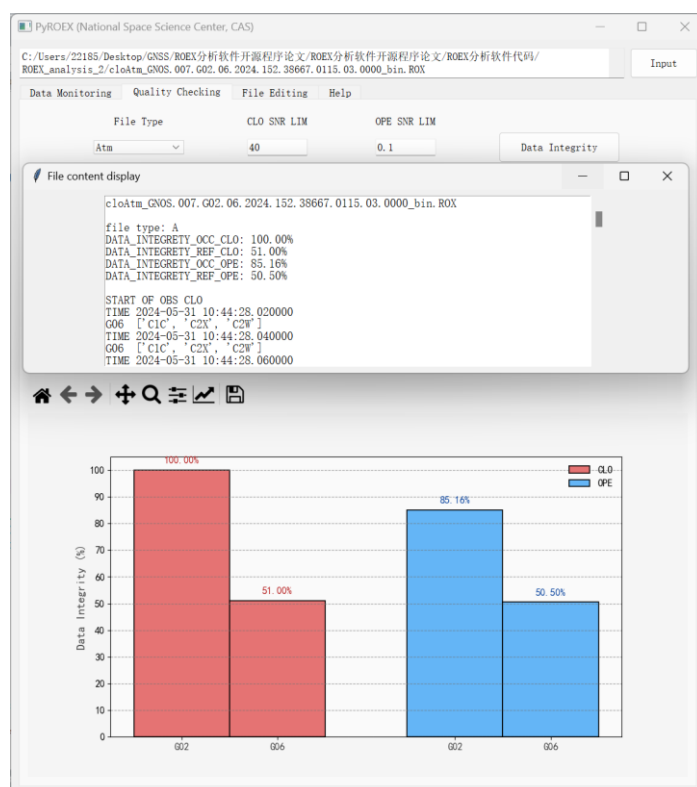


图 5 查看数据完整度

3.3 文件编辑

用户在使用数据监测和质量检测模块后可以较为清晰地判断当前文件各时段的数据的质量状况。若用户需要提取良好质量时间段内的数据，可使用文件编辑模块得到符合用户设定的时间内的新 ROEX 文件。文件编辑模块界面如图 5 所示，对于大气层掩星观测文件，用户需要输入五个量，包括闭环观测起始时间、闭环观测结束时间、开环观测起始时间、开环观测结束时间、输出文件名；对于电离层掩星观测文件，用户只需要输入观测开始时间、观测结束时间和输出文件名，输入信息后点击“Execute”即可。输入的时间格式为“YY-MM-DD HH:MM:SS”，需要注意的是输入时间的秒数需要有小数点，例如输入“2024-2-21 18:42:56.00”可行，而输入“2024-2-21 18:42:56”则会报错。新的 ROEX 文件会以输入的输出文件名+“.ROX”命名，该文件位置在当前执行文件夹中。新 ROEX 文件严格遵守 ROEX 格式。

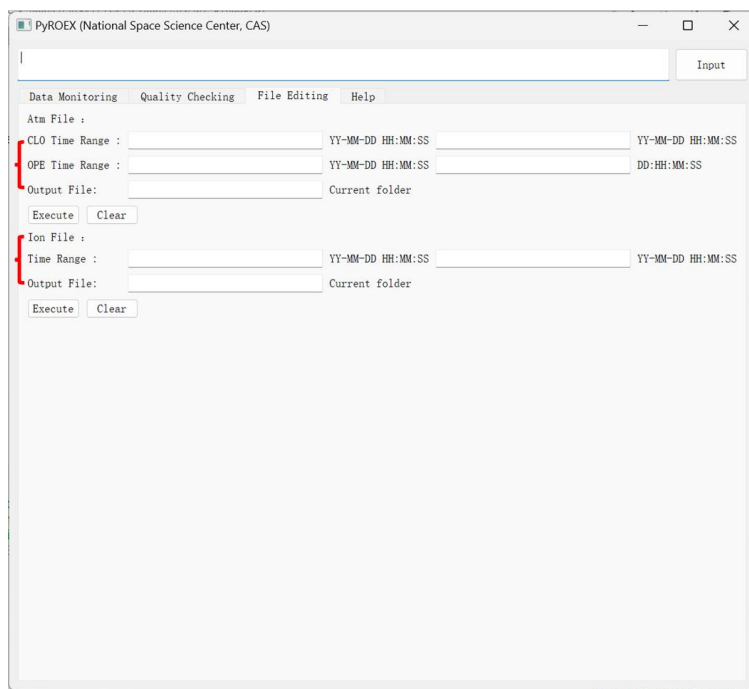


图 6 文件编辑界面

4 理论

为方便用户阅读，在此对各字母和符号进行定义：

c :真空中光速，为 299792458 米每秒(m/s)

L :相位量测值，单位为米(m)

P :相位量测值，单位为周(cycle)

C :伪距测值，单位为米(m)

f :信号频率，单位为赫兹(Hz)

λ :信号波长，单位为米(m)

\bar{x} :对数据 x 求平均值

N :对应载波相位的整周模糊度，单位为周(cycle)

4.1 数据完整度

对 ROEX 文件提供的数据完整度的评估公式如下：

$$DI = \left(\sum_i B_i / \sum_i A_i \right) \times 100\% \quad (1)$$

其中 B_i 为满足信噪比阈值的历元所理论数据总量，若某历元的某频点的信噪比小于信噪比阈值，则该历元该频点的数据不计入理论数据总量。 A_i 为该历元实际提供的数据总量，如果某处数据为 0，则认为该处没有提供数据。针对大气层掩星文件在程序中计算了四个完整度 DI_OCC_CLO、DI_REF_CLO、DI_OCC_OPE和DI_REF_OPE，针对电离层掩星文件只计算一个DI。

4.2 MW 组合

MW 组合包含了双频的伪距和载波相位观测值，具体为载波相位值的宽巷组合和伪距值的窄巷组合之差：

$$P_{MW} = (P_1 - P_2) - \frac{f_1 - f_2}{f_1 + f_2} \left(\frac{C_1}{\lambda_1} + \frac{C_2}{\lambda_2} \right) \quad (2)$$

MW 组合能够消去电离层误差、几何误差、对流层误差和钟差，但仍受到伪距观测噪声和多路径效应的影响。用户可结合 GF 组合，采用 TurboEdit 算法检查周跳。“Quality Checking”模块中绘制的为 P_{MW} 的一阶差分。

4.3 GF 组合

消几何组合定义为：

$$L_{GF} = \lambda_1 P_1 - \lambda_2 P_2 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 + (\gamma - 1)I \quad (3)$$

其中 $\gamma = f_1^2/f_2^2$ ， I 为 L_1 上的电离层延迟值，对上式在相邻历元 t 、 $t+1$ 处做一阶差分，得到

$$\Delta L_{GF} = L_{GF}(t+1) - L_{GF}(t) = \lambda_1 \Delta N_1 - \lambda_2 \Delta N_2 + (\gamma - 1)\Delta I \quad (4)$$

ΔI 为电离层延迟变化量， ΔN_1 和 ΔN_2 分别为相应的整周模糊的变化量。GF 组合消除了与几何距离有关的误差项，如卫星钟差、对流层延迟等。电离层变化量较为平坦，故 ΔL_{GF} 可用于探测周跳。“Quality Checking”模块中绘制的为 ΔL_{GF} 。

4.3 IF 组合

利用电离层一阶项与信号频率平方成反比的形式，得到消电离层组合：

$$L_{IF} = \frac{f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} L_1 - \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} L_2 \quad (6)$$

IF 组合消除了电离层一阶项，可结合 GF 组合结果对数据进行综合考察。“Quality Checking”模块中绘制的为 L_{IF} 的一阶差分。IF 组合未能消除卫星钟差的影响。当接收到的两个信号频率相同时，比如 GPS 系统的 L2X 信号和 L2W 信号，PyROEX 自动将 IF 组合替换为 GF 组合。