

武汉大学

WUHAN UNIVERSITY



《导航工程专业实习 1》

实习报告

院 系 测 绘 学 院
学 号 2021302141134
年 级 2 0 2 1 级
班 级 导 航 工 程 1 班
姓 名 刘 恒 祯
时 间 二〇二三年七月



目录

1.概述	4
1.1 实习目的	4
1.2 实习任务	4
1.3 实习参考资料与软件	4
2.GNSS 静态数据采集、处理与分析	6
2.1 数据采集	6
2.1.1 选点	6
2.1.2 观测计划	6
2.1.3 观测步骤	6
2.2 数据处理与分析	7
2.2.1 静态采集数据汇总	7
2.2.2 静态数据预处理	11
2.2.3 数据处理流程	11
2.2.4 基线解算处理质量评估	16
2.2.5 重复基线质量评估	20
2.2.6 闭合环质量评估	22
2.2.7 网平差计算	23
3.GNSS 动态数据采集、处理与分析	27
3.1 数据采集	27
3.2 CGO PPK 后处理动态数据	27
3.2.1 配置及操作	27
3.2.2 数据分析	28
3.3 RTKLib PPK 后处理动态数据	29
3.3.1 配置及操作	29
3.3.2 数据分析	29
3.3.3 几类策略对比分析	33
3.4 CGO RTKLib PPK 对比	34
3.4.1 地形轮廓图对比	34
3.4.2 数值数据对比	35

3.5 华测 CORS+流动站联测与单基准站+流动站 PPK 轨迹对比	36
4.GNSS 数据质量分析	38
4.1 基于 RTKLib 的 GNSS 观测数据质量分析	38
4.1.1 卫星跟踪情况	38
4.1.2 卫星天空视图	40
4.1.3 卫星数及 DOP 值	43
4.1.4 信噪比/多路径/高度角	45
4.2 基于自编程序的 GNSS 观测数据质量分析	50
4.2.1 程序实现过程	50
4.2.2 数据完整性检测	50
4.2.3 信噪比/载噪比分析	53
4.2.4 载波相位周跳探测分析	58
4.2.5 伪距多路径效应分析	69
5.实习总结	74
6.附录	77
6.1 main.m	77
6.2 GetSatelliteTime.m	79
6.3 GetPRNData.m	79
6.4 GetSysIntergrity.m	80
6.5 GetFrqIntergrity.m	81
6.6 GetSNR.m	82
6.7 GetCycleSlip.m	84
6.8 GetMultipath.m	91
6.9 Visualization.m	97

1.概述

1.1 实习目的

通过 GNSS 接收机的操作使用、静态与动态数据采集和数据处理、不同观测环境下 GNSS 数据质量分析等实践教学活动，熟悉并掌握卫星导航设备与相关数据处理软件的使用，学会 GNSS 数据质量的分析方法，加深学生对卫星导航理论知识的理解，培养学生理论联系实际、分析问题与解决问题的能力。

1.2 实习任务

实习任务分为三部分：

(1) 卫星导航数据采集与数据处理，6月19日~6月25日；

内容：GNSS 接收机操作、静态观测、动态观测、基线解算

工具：华测导航 i50, LandStar, CGO 软件

(2) 卫星导航数据分析与实践，6月26日~7月2日；

内容：利用现有软件分析 GNSS 数据质量、自编程序实现 GNSS 数据质量分析、参观湖北省 CORS 中心

工具：RTKLib, GLAB, TEQC 等

(3) 实习总结与成果提交，7月3日~7月6日。

内容：各部分对应的技术方法/方案、结果与分析、实习心得

成果：自编程序提交指导老师、实习总结报告在校友邦进行提交

1.3 实习参考资料与软件

本次实习用到的参考资料及软件如下：

- ① GBT 18314-2009 全球定位系统(GPS)测量规范.pdf
- ② 天紫湖点位参考坐标.pdf
- ③ 中绘智能 RTK 产品使用说明书（适用 i50）.pdf
- ④ LandStar7 版软件说明书（20181127）.pdf
- ⑤ CGO 软件(CGO-2.2.2.29.20230330.exe)
- ⑥ TEQC 使用手册(UNAVCO_Teqc_Tutorial.pdf)
- ⑦ TEQC 工具(teqc.exe)
- ⑧ RTKLib 软件
- ⑨ RTKLib 使用指南(manual_RTKLib.pdf)
- ⑩ RTKLib 用于精室断点精度测试与分析参考文献

1.3.1 CHC Geomatics Office(CGO)

利用 CGO 软件对静态观测数据进行分析和处理，对基线的残差序列图像进行分析，剔除观测数据质量较差的某一卫星或某一卫星的某一观测时段，从而获得较好的结算结果。

1.3.2 RTKLib

RTKLib 是全球导航卫星系统 GNSS 的标准&精密定位开源程序包，由日本东京海洋大学(Tokyo University of Marine Science and Technology)的高须知二(Tomoji Takasu)开发。RTKLib 由一个便携式程序库和多个 AP (应用程序)工具库组成。主要功能有：

- (1) 支持多个 GNSS 系统的标准和精密定位算法，包括 GPS, GLONASS, Beidou,



Galileo, QZSS 和 SBAS;

(2) 支持多种 GNSS 实时和后处理定位模式: 单点定位、DGPS/DGNSS, 动态 RTK、静态 RTK、移动基站、PPP;

(3) 支持多种 GNSS 标准格式和协议: RINEX2.10、RINEX2.11、RINEX2.12、RINEX3.00、RINEX3.01、RINEX3.02、RTCM2.3、RTCM3.1、RTCM3.2、BINEX、NTRIP、NMEA0183、SP3、ANTEX1.4、IONEX1.0、NGSPCV、EMS2.0;

(4) 支持多种 GNSS 接收机专有数据协议格式: NovAtel: OEM4/V/6, OEM3, OEMStar、Superstar II、Hemisphere、Crescent、u-blox: LEA-4T/5T/6T、SkyTraq、JAVAD、GW10-II/III 和 NVS;

(5) 支持外部通信: Serial、TCP/IP、NTRIP、本地日志文件(记录和播发)和 FTP/HTTP;

(6) 提供许多函数库和 API: 卫星和导航系统函数、矩阵和向量函数, 时间和字符串函数、坐标的转换, 输入和输出函数、调试跟踪函数、平台依赖函数、定位模型、大气模型、天线模型、地球潮汐模型、大地水准面模型、基准转换、RINEX 函数、星历和时钟函数、精密星历和时钟、接收机原始数据函数、RTCM 函数, 解算函数、谷歌地球 KML 转换、SBAS 函数、选项(option)函数、流数据输入和输出函数、整周模糊度解算、标准定位、精密定位、后处理定位(解算)、流服务器函数、RTK 服务器函数、下载函数。

1.3.3 TEQC(Translation, Editing and Quality Checking)

TEQC 是功能强大且简单易用的 GNSS 数据预处理软件, 是由 UNAVCO Facility(美国卫星导航系统与地壳形变观测研究大学联合体)研制的为地学研究 GPS 监测站数据管理服务的公开免费软件, 主要功能有格式转换、编辑和质量检核。

其中, 格式转换可将许多不同厂家的 GPS 接收机观测(二进制)文件转换为 RINEX 文件, 也可以在 RINEX 文件的不同格式之间转换; 编辑功能可用于 RINEX 文件字头块部分, 也可进行数据文件的任意切割与合并、观测值类型的删减、卫星系统的选则及特定卫星的禁用; 质量检核可以反映出 GPS 数据的电离层延迟、多路径影响、接收机周跳、卫星信号信噪比等信息, 并实现了可视化。

TEQC 通过命令行操作, 能够运行在多种操作系统上, 包括 Unix、Linux、MacOS 以及 Windows 的 DOS 等。

2.GNSS 静态数据采集、处理与分析

2.1 数据采集

GNSS 静态测量，是使用测量型 GNSS 接收机进行控制测量的一种，主要用于建立各种级别的坐标控制网。整个静态测量过程中，GNSS 接收机是静止不动的，数据处理时，将接收机天线的位置作为一个不随时间的改变而改变的量，通过卫星信号与位置数据的变化参量来解算待定点的坐标。

GNSS 静态相对定位是将两台或两台以上的 GNSS 接收机安置在固定测站上进行同步观测，以求取测站点间基线向量的过程。观测时段是指多台 GNSS 接收机同步静态采集数据的时间段。

本次实习采用静态相对定位测量技术，在天紫湖景区选取合适的点位，安置 GNSS 接收机，分两个大队分别同步采集 3 个时段观测数据，每个时段 1 小时，通过基线解算数据处理，获取相邻点间的基线向量。

2.1.1 选点

我们小组为第一大队第四小组，按照队长的分配，我们的观测信息如下：

表 2.1.1 第一大队第四小组观测点位信息

观测时段（时间：UTC）	点名	点位
第一时段（2:07 - 3:07）	E077	员工宿舍
第二时段（8:43 - 9:43）	D038	天紫湖湖边
第三时段（10:43 - 11:43）	D055	会议中心前

2.1.2 观测计划

根据大队长向治宇制定的观测计划：

第一大队全体 7 个小组于北京时间 6 月 20 日 8: 30 准备测量第一时段，15: 30 准备测量第二时段，18:30 准备测量第三时段。具体精确开机时间由最后开始静态测量的小组起始时间为为准，作为观测时段的起始时间，并连续观测一个小时。各组自行依据天紫湖点位信息与地图寻找本组点位

2.1.3 观测步骤

选定测站点位后，确定天气适宜，观测步骤如下：

- (1)三脚架、接收机安置。手簿开机、接收机开机，蓝牙连接，检查是否存在故障。
- (2)对中，粗平，精平；再对中，再精平。
- (3)量测 3 处（互成 120°）天线斜高，取平均。（精确到毫米，估读 1 位）

设置手簿静态数据采集参数。如，采样率为 5s，截止高度角设为 10°，以及天线高。

- (4)确定接收机处于单点固定解状态，开始原始静态数据采集。

【注:第一大队七个小组同时观测，保证有三个点位同步观测，每个小组每个观测时段一个点位，共三个时段，故原始基线共有 $7 \times 3 \times 3 = 63$ 条。】



(5) 观测过程中，定期观察接收机卫星数、数据存储灯是否正常，不要用伞遮挡信号，禁止移动仪器，不要修改手簿。

(6) 该观测时段结束，记录结束时间。并量测 3 处天线斜高，取平均，记录天线斜高。

(7) 整理、收纳仪器，带回后及时为接收机电池与手簿充电，导出观测数据检查有无异常。

注意事项：

各小组组长电话畅通，若确认接收机故障及时更换并相应延长观测时间，出现问题第一时间与大队队长报备。

2.2 数据处理与分析

2.2.1 静态采集数据汇总

表 2.2.1.1 第一大队第 1 观测时段数据

第一大队		第 1 时段：10: 07-11: 07 (UTC + 8)	
组名	点名	仪器高 (m)	数据文件名
1	D055	1.3592	D055171B.HCN
2	D076	1.5564	D076171C.HCN
3	D005	1.522	D005171B4.HCN
4	E077	1.4643	E077171(combined).HCN
5	D079	1.559	D079171B.HCN
6	D038	1.4249	D038171B.HCN
7	D045	1.2587	D045171B.HCN

表 2.2.1.2 第一大队第 2 观测时段数据

第一大队		第 2 时段：16: 27-17: 27 (UTC + 8)	
组名	点名	仪器高 (m)	数据文件名
1	D061	1.2262	D061171I.HCN
2	D055	1.5318	D055171I.HCN
3	D079	1.449	D079171I.HCN
4	D038	1.4319	D038171(combined).HCN
5	D005	1.513	D005171(combined).HCN
6	D076	1.4863	D076171H.HCN
7	E077	1.4694	E077171I.HCN

表 2.2.1.3 第一大队第 3 观测时段数据

第一大队		第 3 时段：18: 43-19: 43 (UTC + 8)	
组名	点名	仪器高 (m)	数据文件名
1	E077	1.2925	E077171K.HCN



2	D038	1.5039	D038171K2.HCN
3	D045	1.497	D045171K.HCN
4	D055	1.483	D055171K.HCN
5	D061	1.462	D061171K.HCN
6	D005	1.4886	D005171J.HCN
7	D079	1.4349	D079171K.HCN

下面是我们第四小组观测手簿：

GNSS 外业观测手簿

观测日期：2023 年 6 月 20 日

观测者：第四小组

点号	E077	大致地点	员工宿舍
天线型号	华测 i50	天线编号	3206138
接收机型号	华测 i50	接收机编号	3206144
对中误差 (mm)	1	仪器箱编号	6144
采样间隔	5S	卫星截止高度角	10°
时段号	1	是否重复观测	是
开始时间 (UTC)	12:07	关机时间 (UTC)	13:07
天线高 (m) 如：1.237	测前(m)	测后(m)	平均
	1.4645	1.4651	1.4648
	1.4648	1.4648	
	1.4647	1.4648	
天线示意图			<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> 参考点斜高	<input type="checkbox"/> 天线座底部垂高	<input type="checkbox"/> 其它

备注（点之记、意外情况等）：

无



对中误差：不 ~~~~

天线高量高：3 个方向、测前、测后互差均不超过 3mm

若连续观测，应重新开关机\对中整平\量取天线高。

图 2.2.1.1 E077 观测手簿



GNSS 外业观测手簿

观测日期: 2023 年 6 月 20 日

观测者: 第四小组

点号	D038	大致地点	东湖湖边
天线型号	华测 i50	天线编号	3206138
接收机型号	华测 i50	接收机编号	3206144
对中误差 (mm)	1	仪器箱编号	6144
采样间隔	1s	卫星截止高度角	10°
时段号	2	是否重复观测	是
开始时间 (UTC)	8:43	关机时间 (UTC)	9:30
	测前(m)	测后(m)	平均
天线高 (m) 如: 1.237	1.4320	1.4316	1.4319
	1.4318	1.4320	
	1.4319	1.4321	
天线示意图			
	<input checked="" type="checkbox"/> 参考点斜高	<input type="checkbox"/> 天线座底部垂高	<input type="checkbox"/> 其它

备注 (点之记、意外情况等):

同步观测 50min 时
 接收机设备故障, 接收信号中断
 导致数据只有前 50min 可用



对中误差: 不应超过 1mm

天线高量高: 3 个方向、测前、测后互差均不超过 3mm

若连续观测, 应重新开关机\对中整平\量取天线高。

图 2.2.1.2 D038 观测手簿



GNSS 外业观测手簿

观测日期: 2023 年 6 月 20 日

观测者: 第四小组

点号	D055	大致地点	会议中心前
天线型号	华测 i50	天线编号	3206138
接收机型号	华测 i50	接收机编号	3206144
对中误差 (mm)	1	仪器箱编号	6144
采样间隔	5s	卫星截止高度角	10°
时段号	3	是否重复观测	是
开始时间 (UTC)	10:43	关机时间 (UTC)	11:43
	测前(m)	测后(m)	平均
天线高 (m) 如: 1.237	1.4827	1.4830	1.4830
	1.4826	1.4832	
	1.4830	1.4835	

天线示意图	
	<input checked="" type="checkbox"/> 参考点斜高

备注 (点之记、意外情况等):

无



对中误差: 不应超过 1mm

天线高量高: 3 个方向、测前、测后互差

若连续观测, 应重新开关机\对中整平\量

图 2.2.1.3 D055 观测手簿



2.2.2 静态数据预处理

每个小组的数据都需要导出,由于接收机硬件问题以及卫星跟踪观测中断等不可控因素,接收机静态采集储存的结果文件很可能是几个离散的文件。我们可以使用 CGO 软件的观测文件合并功能,将不连续的几个同时段同测站的观测文件合并到一起,并带有“combined”标记。如下图所示:



9	D045171K.HCN	静态
10	E077171(combined).HCN	静态
11	D038171(combined).HCN	静态
12	D055171K.HCN	静态

图 2.2.1 观测文件合并

2.2.3 数据处理流程

用 CGO 软件进行 GNSS 基线处理的步骤如下:

- ①新建一个工程,在工程属性里面设置坐标系统、中央子午线经度、投影方法等;
- ②导入各小组 GNSS 观测值文件,共 $7 \times 3 = 21$ 个观测文件。先进行配置,选择时间系统(如 UTC),控制网等级(如城市二级),选用的卫星导航系统,截止高度角,采样频率等。其余按照要求配置,再导入 GNSS 原始数据(如果是 Rinex 格式的,需要同时导入观测文件和星历文件),并核对和修改测站名、天线类型、天线高等信息。
- ③将 E077 转为控制点,基线解算后,对基线进行初步处理。检查有无不合格的基线或者 rms 过大 ratio 过小的基线,打开其残差序列图进行处理。进行基线解算后,禁用某颗卫星或者某颗卫星的某一观测时段,修改解算结果较差的基线的残差序列图,直至合格或达到要求;
- ④看闭合环是否合格,不满足闭合差限差,说明有些基线处理的并不好。这个时候需要对不合格环的基线进一步精细化处理直至所有同步环和异步环满足限差要求。
- ⑤自由网网平差+三维约束网平差,查看网平差报告并比较。
 - ⇒ **基线解算质量的判断:** 一般来说,衡量基线解算好坏的指标有两个,一个是 rms 值,一个是 ratio 值。rms 要尽可能小, ratio 值要尽可能大。但是这二者并不是强制要求满足的指标,最终的结果还是得看闭合环的闭合差是否满足要求。
 - ⇒ **基线精细化处理的方法:** 基线精细化处理是通过残差序列图实现的。给定某一条基线,查看其残差序列图,对于某颗卫星,若存在一个观测时段频繁中断,数据质量很差,可以编辑删掉这个时段。对于整个观测时段数据质量都很差的卫星,可以禁用该卫星。



静态数据处理时的部分配置如下表：

表 2.2.3 短基线网部分配置表

配置项	参数
默认卫星系统 (单个基线处理会禁用低质量卫星)	GPS+BDS+GLONASS+GALILEO
控制网等级	城市二级-2019
时间显示类型	UTC
高度截止角 (°)	15
采样间隔 (sec)	Auto
对流层改正模型	GPT2 模型
电离层改正模型	Klobuchar 模型
温度 (°C)	28
相对湿度 (%)	50
模糊度搜索方法	LAMBDA
RMS 阈值	0.01
Ratio 阈值	10

1) 最初，导入第一大队 7 个小组的 21 组同步观测数据，得到 63 条基线，如表 2-1 调节控制网配置、基线处理配置，注意将基线配置处理程序设置为“静态”，考虑到各组的同步观测，将静态最小观测时间改为 20min。此时基线配置如下，未解算：

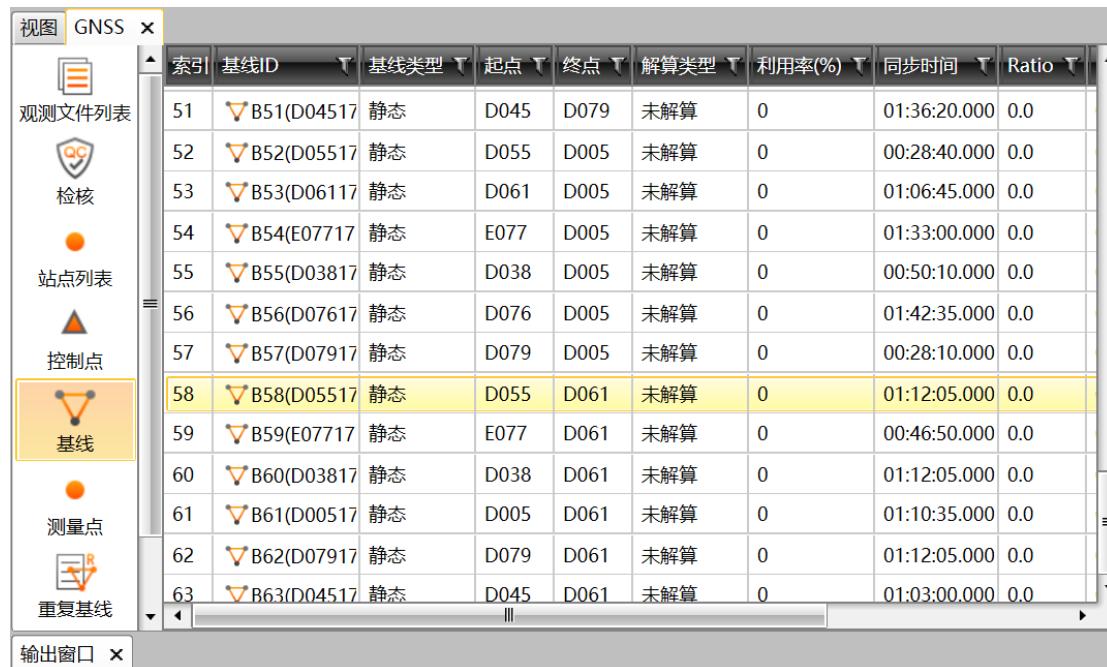


图 2.2.3.1 CGO 运行界面

2) 发现 6/63 条基线解算未成功，考虑到部分测站卫星观测时间太短、观测值中含有较为严重的周跳、观测时段的对流层或电离层折射影响偏大等因素，我们可以针对解算不成功的基线，打开“残差序列图”。



图 2.2.3.2 CGO 运行界面

3) 如下图, 禁用观测时间过短或不连续的卫星 R23。

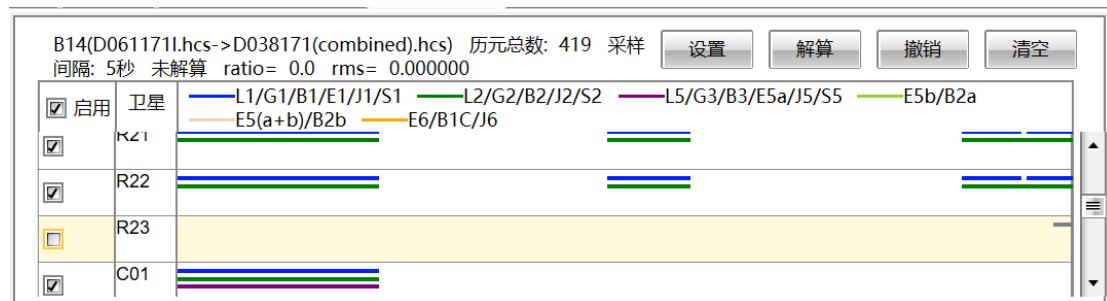


图 2.2.3.3 CGO 运行界面

4) 打开观测文件时间覆盖图, 可发现同步观测时间过短的小组观测文件, 判断对应基线质量不好。

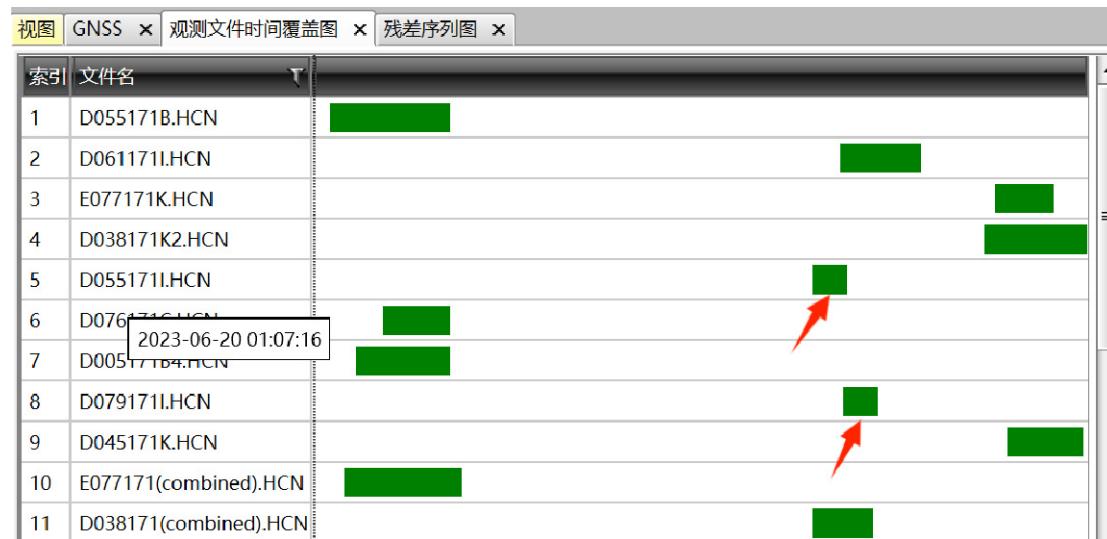


图 2.2.3.4 CGO 运行界面



5) 通过对观测文件进行修改, 以及禁用不好的卫星, 禁用或删除严重不合格的基线, 重新对基线进行解算。我们最终得到如下基线结算结果及 GNSS 短基线控制网图。(全部合格, 城市二级-2019)

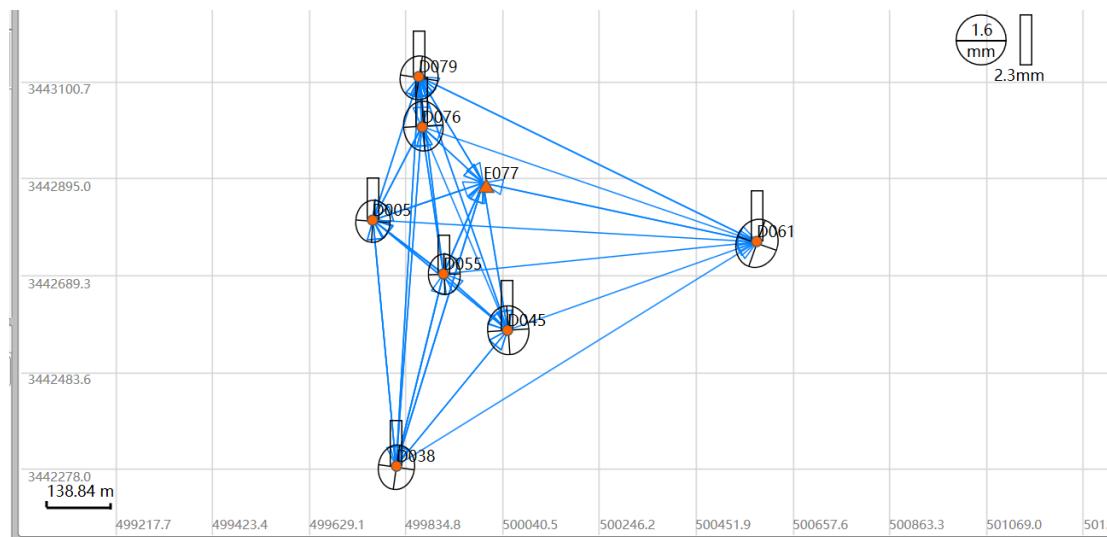


图 2.2.3.5 CGO 运行界面

	索引	基线ID	基线类型	起点	终点	解算类型	利用率(%)	同步时间	Ratio	RMS(m)	合格	Dx(m)
1	1	B01(E07717)	静态	E077	D038	L1固定解	100	00:49:00.000	99.0	0.0069	合格	45.2526
2	2	B03(D05517)	静态	D055	D076	L1固定解	100	00:55:55.000	40.7	0.0070	合格	106.6935
3	3	B04(D05517)	静态	D055	D005	L1固定解	100	01:18:15.000	42.5	0.0065	合格	158.1349
4	4	B05(D07617)	静态	D076	D005	L1固定解	100	00:55:55.000	15.1	0.0089	合格	51.4396
5	5	B07(D06117)	静态	D061	D079	L1固定解	100	00:28:10.000	35.9	0.0091	合格	728.0451
6	6	B08(E07717)	静态	E077	D045	L1固定解	100	00:39:25.000	20.6	0.0092	合格	-110.4541
7	7	B09(D03817)	静态	D038	D045	L1固定解	100	01:03:00.000	20.9	0.0092	合格	-155.7072
8	8	B10(D05517)	静态	D055	E077	L1固定解	100	01:27:55.000	14.7	0.0095	合格	-38.2772
9	9	B11(D07617)	静态	D076	E077	L1固定解	100	00:55:55.000	10.1	0.0067	合格	-144.9721
10	10	B12(D00517)	静态	D005	E077	L1固定解	100	01:18:15.000	8.0	0.0092	合格	-196.4119
11	11	B13(D05517)	静态	D055	D038	L1固定解	100	00:28:40.000	40.0	0.0082	合格	6.9906
12	12	B16(E07717)	静态	E077	D055	L1固定解	100	00:49:00.000	54.5	0.0063	合格	38.2729
13	13	B17(D03817)	静态	D038	D055	L1固定解	100	01:22:55.000	49.0	0.0059	合格	-6.9808
14	14	B18(D04517)	静态	D045	D055	L1固定解	100	01:03:00.000	24.4	0.0083	合格	148.7278

图 2.2.3.6 CGO 运行界面

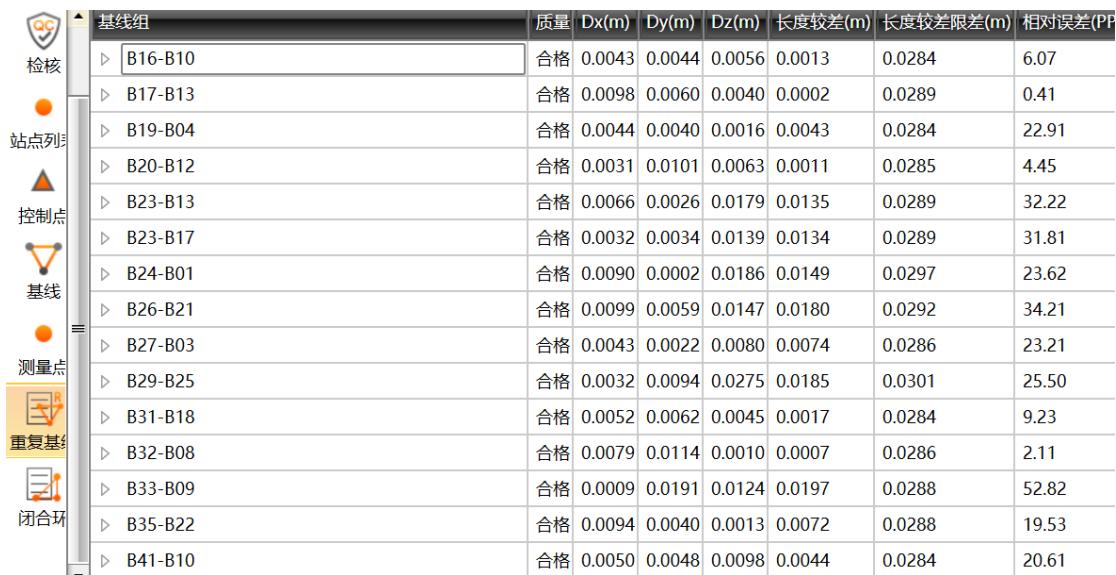
6) 由上图可知, 模糊度固定采用的载波相位观测值是 L1 频段, 即当如下图选择“自动”时, 默认采用 L1 解算。

采样间隔 (秒)	自动
最小历元数	5
观测值/最佳值	自动
自动化处理模式	自动
星历	L1 L2 L5
卫星系统	L5

图 2.2.3.7 CGO 运行界面



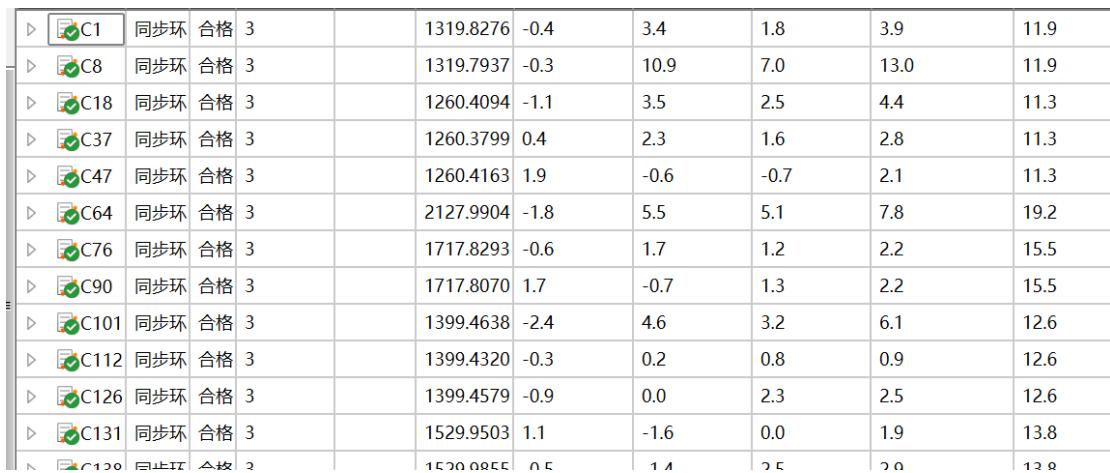
7) 重复基线全部合格。



	基线组	质量	Dx(m)	Dy(m)	Dz(m)	长度较差(m)	长度较差限差(m)	相对误差(PP)
检核	▷ B16-B10	合格	0.0043	0.0044	0.0056	0.0013	0.0284	6.07
站点列表	▷ B17-B13	合格	0.0098	0.0060	0.0040	0.0002	0.0289	0.41
控制点	▷ B19-B04	合格	0.0044	0.0040	0.0016	0.0043	0.0284	22.91
基线	▷ B20-B12	合格	0.0031	0.0101	0.0063	0.0011	0.0285	4.45
测量点	▷ B23-B13	合格	0.0066	0.0026	0.0179	0.0135	0.0289	32.22
重复基线	▷ B23-B17	合格	0.0032	0.0034	0.0139	0.0134	0.0289	31.81
闭合环	▷ B24-B01	合格	0.0090	0.0002	0.0186	0.0149	0.0297	23.62
	▷ B26-B21	合格	0.0099	0.0059	0.0147	0.0180	0.0292	34.21
	▷ B27-B03	合格	0.0043	0.0022	0.0080	0.0074	0.0286	23.21
	▷ B29-B25	合格	0.0032	0.0094	0.0275	0.0185	0.0301	25.50
	▷ B31-B18	合格	0.0052	0.0062	0.0045	0.0017	0.0284	9.23
	▷ B32-B08	合格	0.0079	0.0114	0.0010	0.0007	0.0286	2.11
	▷ B33-B09	合格	0.0009	0.0191	0.0124	0.0197	0.0288	52.82
	▷ B35-B22	合格	0.0094	0.0040	0.0013	0.0072	0.0288	19.53
	▷ B41-B10	合格	0.0050	0.0048	0.0098	0.0044	0.0284	20.61

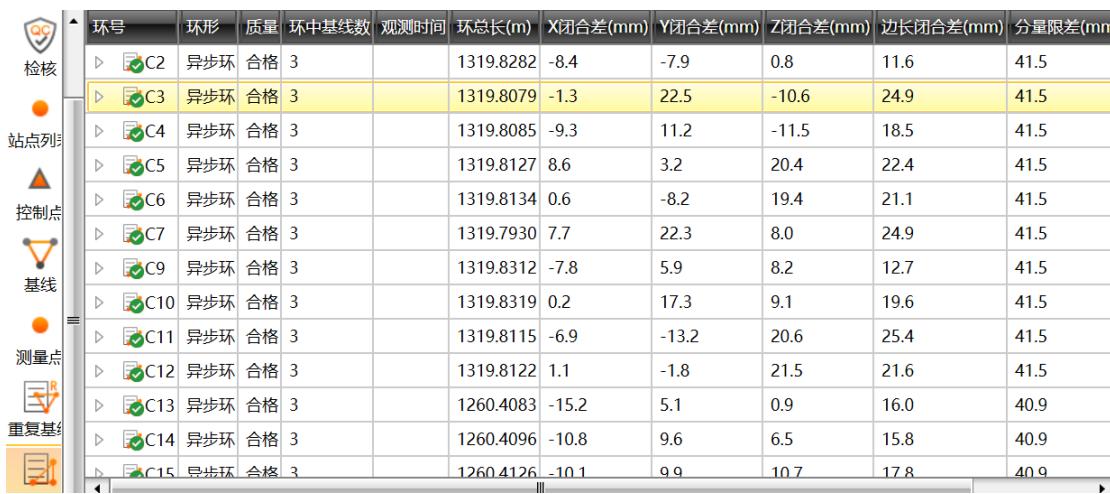
图 2.2.3.8 CGO 运行界面

8) 同步环、异步环全部合格（城市一级-2019）。



▷ C1	同步环	合格	3		1319.8276	-0.4	3.4	1.8	3.9	11.9
▷ C8	同步环	合格	3		1319.7937	-0.3	10.9	7.0	13.0	11.9
▷ C18	同步环	合格	3		1260.4094	-1.1	3.5	2.5	4.4	11.3
▷ C37	同步环	合格	3		1260.3799	0.4	2.3	1.6	2.8	11.3
▷ C47	同步环	合格	3		1260.4163	1.9	-0.6	-0.7	2.1	11.3
▷ C64	同步环	合格	3		2127.9904	-1.8	5.5	5.1	7.8	19.2
▷ C76	同步环	合格	3		1717.8293	-0.6	1.7	1.2	2.2	15.5
▷ C90	同步环	合格	3		1717.8070	1.7	-0.7	1.3	2.2	15.5
▷ C101	同步环	合格	3		1399.4638	-2.4	4.6	3.2	6.1	12.6
▷ C112	同步环	合格	3		1399.4320	-0.3	0.2	0.8	0.9	12.6
▷ C126	同步环	合格	3		1399.4579	-0.9	0.0	2.3	2.5	12.6
▷ C131	同步环	合格	3		1529.9503	1.1	-1.6	0.0	1.9	13.8
▷ C130	同步环	合格	3		1529.9855	0.5	1.4	2.5	2.0	13.8

图 2.2.3.9 CGO 运行界面



	环号	环形	质量	环中基线数	观测时间	环总长(m)	X闭合差(mm)	Y闭合差(mm)	Z闭合差(mm)	边长闭合差(mm)	分量限差(mm)
检核	▷ C2	异步环	合格	3		1319.8282	-8.4	-7.9	0.8	11.6	41.5
站点列表	▷ C3	异步环	合格	3		1319.8079	-1.3	22.5	-10.6	24.9	41.5
控制点	▷ C4	异步环	合格	3		1319.8085	-9.3	11.2	-11.5	18.5	41.5
基线	▷ C5	异步环	合格	3		1319.8127	8.6	3.2	20.4	22.4	41.5
测量点	▷ C6	异步环	合格	3		1319.8134	0.6	-8.2	19.4	21.1	41.5
重复基线	▷ C7	异步环	合格	3		1319.7930	7.7	22.3	8.0	24.9	41.5
闭合环	▷ C9	异步环	合格	3		1319.8312	-7.8	5.9	8.2	12.7	41.5
	▷ C10	异步环	合格	3		1319.8319	0.2	17.3	9.1	19.6	41.5
	▷ C11	异步环	合格	3		1319.8115	-6.9	-13.2	20.6	25.4	41.5
	▷ C12	异步环	合格	3		1319.8122	1.1	-1.8	21.5	21.6	41.5
	▷ C13	异步环	合格	3		1260.4083	-15.2	5.1	0.9	16.0	40.9
	▷ C14	异步环	合格	3		1260.4096	-10.8	9.6	6.5	15.8	40.9
	▷ C15	异步环	合格	3		1260.4126	-10.1	9.9	10.7	17.8	40.9

图 2.2.3.10 CGO 运行界面



图 2.2.3.11 CGO 运行界面

2.2.4 基线解算处理质量评估

(1) 选中某条基线打开残差序列图, 经过尝试若 L1 载波固定的模糊度 ratio 值与 rms 不好, 可改为 L2 载波。由于 $L1:1575.42 \pm 1.023\text{MHz}$, $L2:1227.60 \pm 1.023\text{MHz}$, L2 载波的波长更大, 更利于模糊度固定。

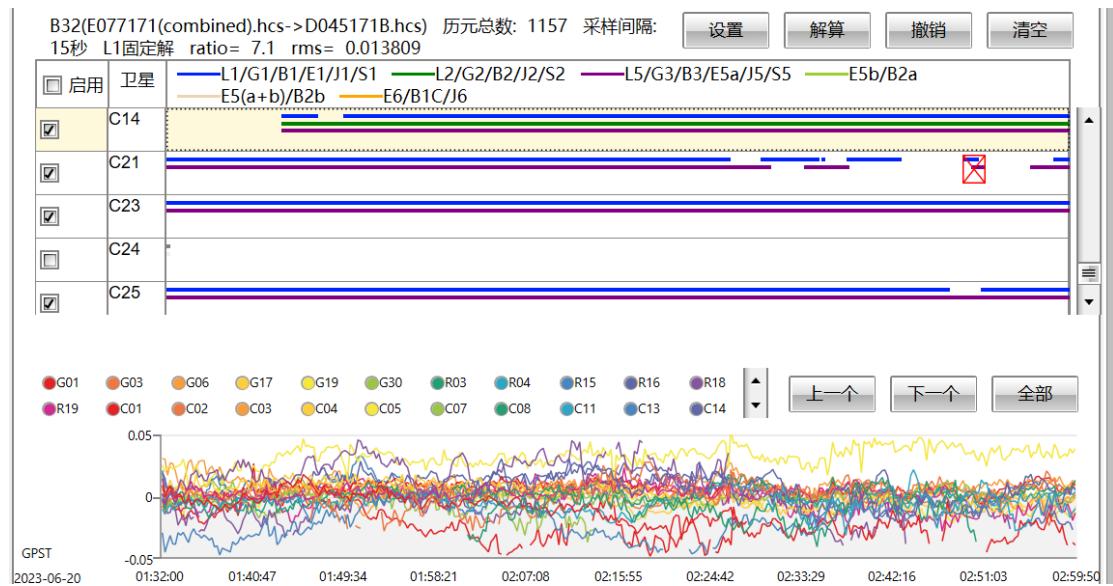


图 2.2.4.1 CGO 运行界面

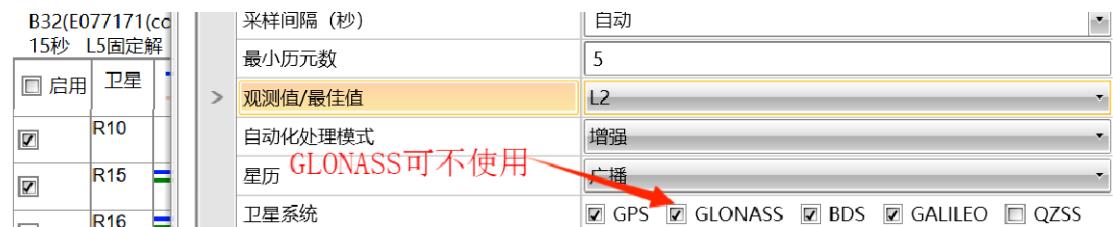


图 2.2.4.2 CGO 运行界面

(2) 处理比较可知, rms 小于 0.01, ratio 大于 10, 结果得到明显改善。

B32(E077171(combined).hcs->D045171B.hcs)	采样间隔 (秒)	自动
15秒	最小历元数	5
<input type="checkbox"/> 启用	卫星	
<input checked="" type="checkbox"/> R10	观测值/最佳值	L2
<input checked="" type="checkbox"/> R15	自动化处理模式	增强
<input type="checkbox"/> R16	星历	GLONASS 可不使用
	卫星系统	<input checked="" type="checkbox"/> GPS <input checked="" type="checkbox"/> GLONASS <input checked="" type="checkbox"/> BDS <input checked="" type="checkbox"/> GALILEO <input type="checkbox"/> QZSS

图 2.2.4.2 CGO 运行界面

(3) 由于 GLONASS 卫星轨道倾角的设定, 其在中低纬度地区的定位精度不好, 观察残差序列图可知, 有较强抖动的序列或均值明显偏离 0 附近的序列多为 GLONASS 卫星 (尤其是 G21、G07), 部分北斗卫星的残差序列也不好, 以及 GPS 的 G01、G30 也多出现问题, 禁用这些卫星精度可明显得到改善。如下图根据残差序列图禁用 G01, 重新解算发现 ratio 值以及 rms 均得到改善。

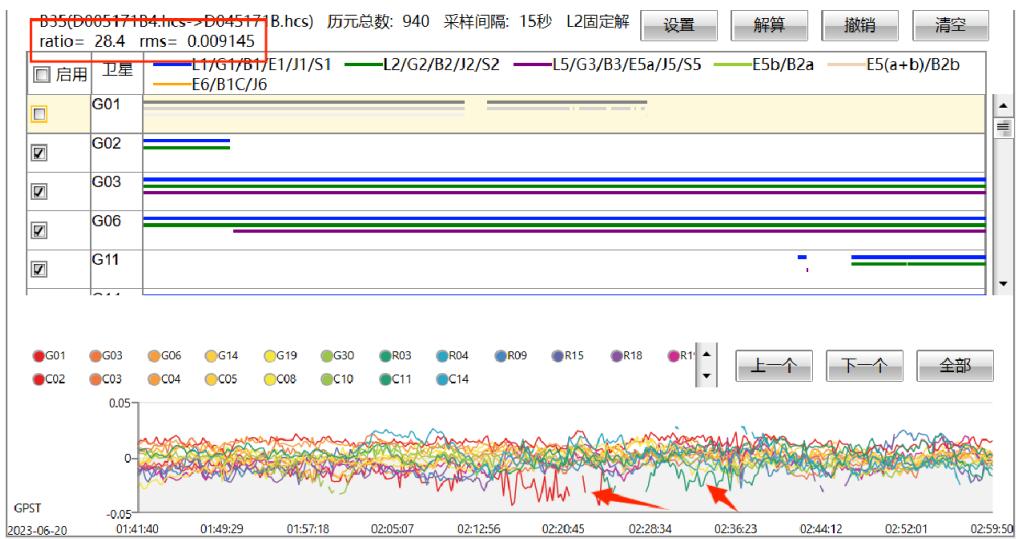


图 2.2.4.4 CGO 运行界面

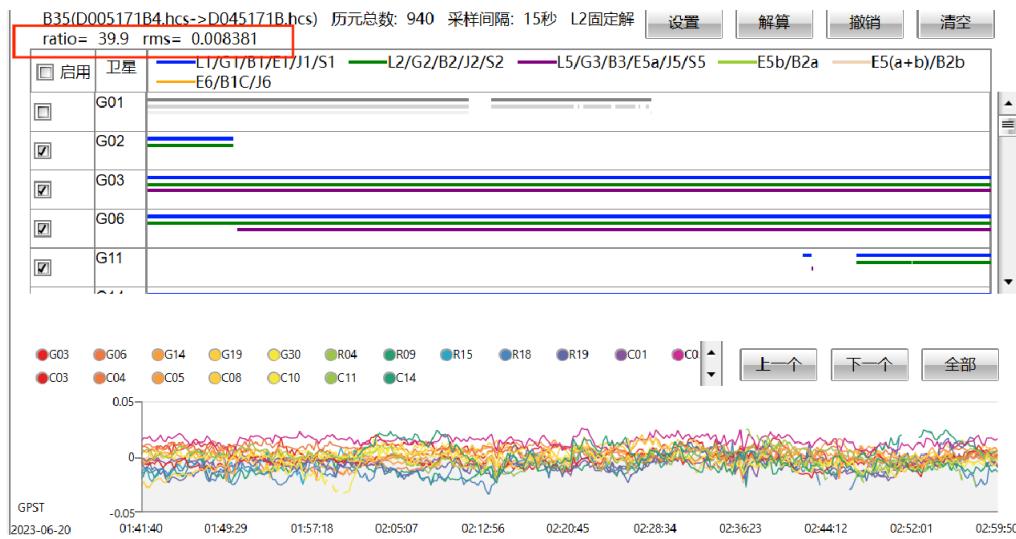


图 2.2.4.5 CGO 运行界面

(4) C04 残差序列表现为系统性误差, 禁用之。

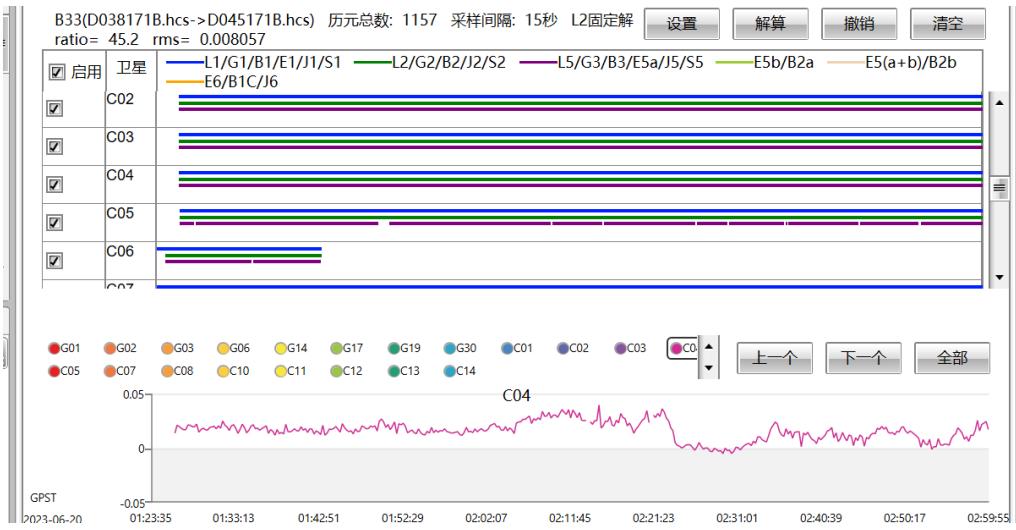


图 2.2.4.6 CGO 运行界面



(4) 对于所有卫星的残差序列图都出现严重的相似的抖动时，考虑观测环境的变化等，可以禁用该时段的所有卫星数据，即使它们是连续的。如下图所示为禁用后重新解算的结果。



图 2.2.4.7 CGO 运行界面

(5) 最终得到基线处理报告：rms 均小于 0.001，ratio 值均大于 20.0，均非常优秀。在 57 条基线中，基线解算类型大部分为 L1 固定解，小部分为 L2 固定解。均满足城市一级-2019 标准。

基线总结列表

基线信息	
名称	值
基线总数	57
最长基线边(m)	B60 (D038171K2.hcs->D061171K.hcs): 902.6559
最短基线边(m)	B30 (D079171.hcs->D076171H.hcs): 103.5735
最弱边基线名(m)	B29 (D038171(combined).hcs->D076171H.hcs)
最弱边相对中误差	1 / 674390

图 2.2.4.8 CGO 运行界面

(6) 基线列表信息如下(城市一级-2019):

表 2.2.4.1

基线类型	起点	终点	解算类型	Ratio	RMS(m)	合格	Dx(m)	Dy(m)	Dz(m)	距离
静态	E077	D038	L1 固定解	99.0000	0.0069	合格	45.2526	350.7416	-520.4452	629.2302
静态	D055	D076	L1 固定解	40.8589	0.0070	合格	106.6935	-126.4078	271.2367	317.6976
静态	D055	D005	L1 固定解	42.9879	0.0065	合格	158.1349	11.1189	101.9642	188.4860
静态	D076	D005	L1 固定解	99.0000	0.0059	合格	51.4401	137.5294	-169.2723	224.0838
静态	D061	D079	L1 固定解	35.9664	0.0091	合格	728.0451	131.1877	301.3154	798.7808
静态	E077	D045	L1 固定解	99.0000	0.0054	合格	-110.4532	119.3659	-272.9565	317.7316
静态	D038	D045	L1 固定解	20.9409	0.0093	合格	-155.7072	-231.3706	247.4922	372.8665
静态	D055	E077	L1 固定解	99.0000	0.0054	合格	-38.2767	-118.0861	170.7558	211.1089



静态	D076	E077	L2 固定解	99.0000	0.0060	合格	-144.9678	8.3274	-100.4750	176.5793
静态	D005	E077	L1 固定解	36.2254	0.0070	合格	-196.4118	-129.2029	68.7933	244.9562
静态	D055	D038	L1 固定解	40.1253	0.0082	合格	6.9906	232.6528	-349.6888	420.0696
静态	E077	D055	L1 固定解	54.4869	0.0063	合格	38.2728	118.0794	-170.7627	211.1101
静态	D038	D055	L1 固定解	49.2195	0.0059	合格	-6.9808	-232.6588	349.6847	420.0694
静态	D045	D055	L1 固定解	24.4197	0.0084	合格	148.7278	-1.2900	102.1910	180.4567
静态	D055	D005	L1 固定解	99.0000	0.0056	合格	158.1393	11.1149	101.9659	188.4904
静态	E077	D005	L1 固定解	43.7911	0.0073	合格	196.4151	129.1931	-68.7997	244.9554
静态	D038	D005	L1 固定解	30.8164	0.0076	合格	151.1599	-221.5439	451.6486	525.2785
静态	D045	D005	L1 固定解	22.6130	0.0094	合格	306.8684	9.8245	204.1564	368.7067
静态	D055	D038	L1 固定解	99.0000	0.0056	合格	6.9840	232.6554	-349.6709	420.0560
静态	E077	D038	L2 固定解	99.0000	0.0069	合格	45.2643	350.7358	-520.4302	629.2155
静态	D076	D038	L1 固定解	38.2354	0.0080	合格	-99.7116	359.0679	-620.9044	724.1508
静态	D005	D038	L1 固定解	21.8203	0.0085	合格	-151.1500	221.5380	-451.6339	525.2605
静态	D055	D076	L1 固定解	35.6090	0.0081	合格	106.6973	-126.4057	271.2450	317.7051
静态	D061	D076	L1 固定解	99.0000	0.0065	合格	700.6189	176.3749	212.2444	753.0090
静态	D038	D076	L1 固定解	38.6642	0.0086	合格	99.7098	-359.0645	620.9335	724.1738
静态	D079	D076	L1 固定解	60.8104	0.0057	合格	-27.4282	45.1835	-89.0708	103.5735
静态	D055	D045	L1 固定解	99.0000	0.0053	合格	-148.7227	1.2933	-102.1975	180.4562
静态	E077	D045	L1 固定解	25.4790	0.0090	合格	-110.4459	119.3779	-272.9563	317.7334
静态	D038	D045	L2 固定解	99.0000	0.0072	合格	-155.7040	-231.3558	247.4743	372.8442
静态	D076	D045	L2 固定解	99.0000	0.0072	合格	-255.4090	127.7056	-373.4315	470.0996
静态	D005	D045	L2 固定解	99.0000	0.0070	合格	-306.8539	-9.8229	-204.1638	368.6986
静态	D055	D079	L1 固定解	82.4653	0.0060	合格	134.1287	-171.5932	360.3094	421.0197
静态	E077	D079	L1 固定解	64.7335	0.0067	合格	172.4011	-53.5108	189.5480	261.7518
静态	D038	D079	L1 固定解	37.8258	0.0077	合格	127.1479	-404.2507	709.9942	826.8476
静态	D005	D079	L1 固定解	22.2742	0.0077	合格	-24.0125	-182.7058	258.3462	317.3339
静态	D045	D079	L1 固定解	38.1136	0.0087	合格	282.8544	-172.8789	462.5017	569.0357
静态	D055	E077	L1 固定解	96.4781	0.0065	合格	-38.2705	-118.0795	170.7653	211.1118
静态	D061	E077	L1 固定解	99.0000	0.0057	合格	555.6511	184.6963	111.7636	596.1141
静态	D038	E077	L1 固定解	37.9229	0.0083	合格	-45.2579	-350.7331	520.4520	629.2315
静态	D076	E077	L1 固定解	51.8068	0.0071	合格	-144.9688	8.3277	-100.4793	176.5825
静态	D079	E077	L1 固定解	38.6520	0.0081	合格	-172.3992	53.5124	-189.5482	261.7510



静态	D055	D079	L1 固定解	94.2321	0.0068	合格	134.1260	-171.6016	360.3070	421.0202
静态	E077	D079	L1 固定解	99.0000	0.0073	合格	172.4031	-53.5159	189.5501	261.7556
静态	D038	D079	L1 固定解	99.0000	0.0072	合格	127.1430	-404.2579	709.9778	826.8363
静态	D076	D079	L2 固定解	99.0000	0.0060	合格	27.4344	-45.1865	89.0757	103.5806
静态	D005	D079	L1 固定解	26.2364	0.0084	合格	-24.0077	-182.7182	258.3450	317.3396
静态	D045	D079	L1 固定解	69.2256	0.0066	合格	282.8517	-172.8972	462.5040	569.0417
静态	D055	D005	L1 固定解	99.0000	0.0056	合格	158.1342	11.1131	101.9671	188.4867
静态	E077	D005	L1 固定解	99.0000	0.0062	合格	196.4060	129.1923	-68.7995	244.9476
静态	D038	D005	L1 固定解	97.4447	0.0092	合格	151.1448	-221.5395	451.6549	525.2777
静态	D076	D005	L1 固定解	99.0000	0.0079	合格	51.4379	137.5191	-169.2777	224.0809
静态	D055	D061	L1 固定解	99.0000	0.0055	合格	-593.9116	-302.7829	58.9976	669.2452
静态	E077	D061	L1 固定解	99.0000	0.0064	合格	-555.6369	-184.7052	-111.7691	596.1046
静态	D038	D061	L1 固定解	99.0000	0.0062	合格	-600.8911	-535.4413	408.6810	902.6559
静态	D005	D061	L1 固定解	33.0416	0.0080	合格	-752.0534	-313.8954	-42.9654	816.0642
静态	D079	D061	L1 固定解	75.2780	0.0068	合格	-728.0396	-131.1904	-301.3127	798.7753
静态	D045	D061	L1 固定解	21.1945	0.0094	合格	-445.1848	-304.0726	161.1898	562.7004

2.2.5 重复基线质量评估

在(2.2.3)中，我们通过基线解算，使得所有基线的 Ratio 和 RMS 值达到要求。重复基线的解算是另一个重要的内符合指标。

不同观测时段，对同一条基线的观测结果，就是所谓重复基线。这些观测结果之间的差异，就是重复基线较差。当重复基线较差满足限差要求时，则表明这些基线向量的质量是合格的；否则，则表明这些基线向量中至少有一条基线向量的质量不合格，要确定出哪些基线向量的质量不合格，可以通过多重条件进行。

在《GBT 18314-2009 全球定位系统(GPS)测量规范》中，明确规定重复基线：

GB/T 18314—2009

12.2.4 B 级 GPS 网基线外业预处理和 C、D、E 级 GPS 网基线处理，复测基线的长度较差 d_s 应满足公式(1)的规定：

$$d_s \leqslant 2\sqrt{2}\sigma$$

式中：

σ ——基线测量中误差，单位为毫米(mm)，其计算按 12.2.5 规定执行。

其中： $\sigma = \pm \sqrt{a^2 + (b \cdot d)^2}$

a 为固定误差，单位 mm； b 为比例误差系数，单位 mm/km； ds 为基线长度，单位 km。

如下图为重复基线的处理结果，在城市一级-2019 的标准下，全部合格：



基线组	质量	Dx(m)	Dy(m)	Dz(m)	长度较差(m)	长度较差限差(m)	相对误差(PPM)
▷ B16-B10	合格	0.0039	0.0067	0.0069	0.0012	0.0284	5.51
▷ B17-B13	合格	0.0098	0.0060	0.0041	0.0002	0.0289	0.47
▷ B19-B04	合格	0.0044	0.0040	0.0016	0.0043	0.0284	22.94
▷ B20-B12	合格	0.0033	0.0098	0.0063	0.0008	0.0285	3.24
▷ B23-B13	合格	0.0066	0.0026	0.0179	0.0136	0.0289	32.28
▷ B23-B17	合格	0.0032	0.0034	0.0139	0.0134	0.0289	31.81
▷ B24-B01	合格	0.0117	0.0058	0.0150	0.0148	0.0297	23.49
▷ B26-B21	合格	0.0099	0.0059	0.0147	0.0180	0.0292	34.23
▷ B27-B03	合格	0.0038	0.0021	0.0083	0.0075	0.0286	23.66
▷ B29-B25	合格	0.0018	0.0034	0.0291	0.0230	0.0301	31.80
▷ B31-B18	合格	0.0051	0.0033	0.0064	0.0005	0.0284	2.97
▷ B32-B08	合格	0.0073	0.0120	0.0002	0.0018	0.0286	5.72
▷ B33-B09	合格	0.0032	0.0148	0.0179	0.0224	0.0288	60.03
▷ B35-B22	合格	0.0145	0.0016	0.0074	0.0080	0.0288	21.81
▷ B41-B10	合格	0.0063	0.0066	0.0095	0.0029	0.0284	13.58

图 2.2.5.1 CGO 运行界面

基线组	质量	Dx(m)	Dy(m)	Dz(m)	长度较差(m)	长度较差限差(m)	相对误差(PPM)
▷ B33-B09	合格	0.0032	0.0148	0.0179	0.0224	0.0288	60.03
▷ B35-B22	合格	0.0145	0.0016	0.0074	0.0080	0.0288	21.81
▷ B41-B10	合格	0.0063	0.0066	0.0095	0.0029	0.0284	13.58
▷ B41-B16	合格	0.0024	0.0001	0.0026	0.0017	0.0284	8.07
▷ B43-B01	合格	0.0053	0.0085	0.0067	0.0012	0.0297	1.97
▷ B43-B24	合格	0.0064	0.0027	0.0217	0.0160	0.0297	25.45
▷ B44-B11	合格	0.0009	0.0004	0.0043	0.0033	0.0284	18.48
▷ B45-B37	合格	0.0020	0.0015	0.0003	0.0008	0.0285	3.07
▷ B46-B36	合格	0.0027	0.0085	0.0024	0.0005	0.0289	1.25
▷ B47-B37	合格	0.0019	0.0051	0.0021	0.0038	0.0285	14.68
▷ B47-B45	合格	0.0039	0.0036	0.0019	0.0046	0.0285	17.75
▷ B48-B38	合格	0.0048	0.0073	0.0164	0.0113	0.0306	13.62
▷ B49-B30	合格	0.0062	0.0030	0.0049	0.0072	0.0283	69.16
▷ B50-B39	合格	0.0047	0.0124	0.0012	0.0057	0.0286	18.12
▷ B50-B39	合格	0.0047	0.0124	0.0012	0.0057	0.0286	18.12
▷ B51-B40	合格	0.0027	0.0182	0.0023	0.0060	0.0294	10.59

图 2.2.5.2 CGO 运行界面

基线组	质量	Dx(m)	Dy(m)	Dz(m)	长度较差(m)	长度较差限差(m)	相对误差(PPM)
▷ B47-B37	合格	0.0019	0.0051	0.0021	0.0038	0.0285	14.68
▷ B47-B45	合格	0.0039	0.0036	0.0019	0.0046	0.0285	17.75
▷ B48-B38	合格	0.0048	0.0073	0.0164	0.0113	0.0306	13.62
▷ B49-B30	合格	0.0062	0.0030	0.0049	0.0072	0.0283	69.16
▷ B50-B39	合格	0.0047	0.0124	0.0012	0.0057	0.0286	18.12
▷ B51-B40	合格	0.0037	0.0201	0.0009	0.0036	0.0294	6.25
▷ B52-B04	合格	0.0007	0.0059	0.0029	0.0006	0.0284	3.20
▷ B52-B19	合格	0.0051	0.0019	0.0012	0.0037	0.0284	19.74
▷ B54-B12	合格	0.0065	0.0105	0.0052	0.0093	0.0285	37.84
▷ B54-B20	合格	0.0096	0.0005	0.0011	0.0083	0.0285	34.00
▷ B55-B21	合格	0.0145	0.0041	0.0055	0.0012	0.0292	2.23
▷ B55-B26	合格	0.0046	0.0018	0.0202	0.0168	0.0292	32.00
▷ B56-B05	合格	0.0032	0.0096	0.0044	0.0033	0.0285	14.73
▷ B59-B42	合格	0.0132	0.0081	0.0047	0.0089	0.0295	14.87
▷ B62-B07	合格	0.0055	0.0027	0.0026	0.0056	0.0305	6.95

图 2.2.5.3 CGO 运行界面

2.2.6 闭合环质量评估

⇒ 同步环

同步环 (simultaneous observation loop) 是指在用全球定位系统 (GPS) 进行测量中, 由 3 台或 3 台以上接收机, 同时对同一组卫星进行观测 (同步观测)) 所获得的基线向量所构成的闭合多边形。

理论上同步环中各 GPS 边的坐标增量闭合差应等于零, 由于各台 GPS 接收机的观测并不能严格同步, 和有可能存在其他的观测缺陷, 将导致同步环闭合差并不等于零, 但不能超过规定的限差。若同步环闭合差超限, 就表明观测或基线向量解算有严重失误, 组成同步环的基线中至少存在一条基线向量是错误的; 同步环闭合差不超过限差, 只能表明观测无严重失误和基线向量的解算合格, 但并不足以表明观测值的高精度, 因为只是采用了一组线性相关观测值的必然结果, 与观测精度无关。

⇒ 异步环

异步环 (non-simultaneous observation loop) 是在用全球定位系统(GPS)进行测量中, 由数条 GPS 独立边构成的闭合多边形。在 GPS 网中, 必须保证有足够的异步环, 才能确保观测成果的可靠性和有效地发现观测值中存在的粗差。

当异步环闭合差不满足限差要求时, 则表明组成异步环的基线 向量中至少有一条基线向量的质量不合格。要确定出哪些基线向量的质量不合格 可以通过多个相邻的异步环或重複基线来进行。

如下图所示, 同步环合格。

环号	环形	质量	环中基线数	观测时间	环总长(m)	X闭合差(mm)	Y闭合差(mm)	Z闭合差(mm)	边长闭合差
▶ C1	同步环	合格	3		1319.8284	-1.3	5.1	3.4	6.3
▶ C8	同步环	合格	3		1319.7930	6.3	2.1	0.4	6.6
▶ C18	同步环	合格	3		1260.4097	-1.0	3.4	2.2	4.2
▶ C37	同步环	合格	3		1260.3804	3.6	-5.7	-3.6	7.6
▶ C47	同步环	合格	3		1260.4128	3.1	-0.9	-2.2	3.9
▶ C64	同步环	合格	3		2127.9908	-1.6	5.6	4.9	7.6
▶ C76	同步环	合格	3		1717.8296	-0.6	1.8	1.0	2.1
▶ C90	同步环	合格	3		1717.8074	4.3	-6.2	-2.5	7.9
▶ C101	同步环	合格	3		1399.4641	-2.5	4.6	3.0	6.0
▶ C112	同步环	合格	3		1399.4321	2.5	-5.1	-3.0	6.5
▶ C126	同步环	合格	3		1399.4568	3.3	-1.3	-2.4	4.3
▶ C131	同步环	合格	3		1529.9455	8.1	-4.7	-0.9	9.4
▶ C138	同步环	合格	3		1529.9878	1.1	3.6	-2.2	4.4

图 2.2.6.1 CGO 运行界面

如下图所示, 异步环合格。



环号	环形	质量	环中基线数	观测时间	环总长(m)	X闭合差(mm)	Y闭合差(mm)	Z闭合差(mm)	边长闭合差
▷ C2	异步环	合格	3		1319.8302	-8.6	-6.9	3.2	11.5
▷ C3	异步环	合格	3		1319.8060	1.9	19.9	-14.4	24.7
▷ C4	异步环	合格	3		1319.8078	-5.4	7.9	-14.6	17.5
▷ C5	异步环	合格	3		1319.8136	10.3	-0.7	18.4	21.1
▷ C6	异步环	合格	3		1319.8154	3.1	-12.7	18.2	22.4
▷ C7	异步环	合格	3		1319.7912	13.5	14.1	0.5	19.6
▷ C9	异步环	合格	3		1319.8296	-4.0	3.3	3.3	6.2
▷ C10	异步环	合格	3		1319.8314	3.3	15.3	3.5	16.1
▷ C11	异步环	合格	3		1319.8072	-7.2	-11.5	21.2	25.1
▷ C12	异步环	合格	3		1319.8091	0.1	0.5	21.4	21.4
▷ C13	异步环	合格	3		1260.4087	-14.7	2.7	-0.6	14.9
▷ C14	异步环	合格	3		1260.4099	-10.8	9.4	6.3	15.6
▷ C15	异步环	合格	3		1260.4116	-8.4	9.4	8.9	15.4

图 2.2.6.2 CGO 运行界面

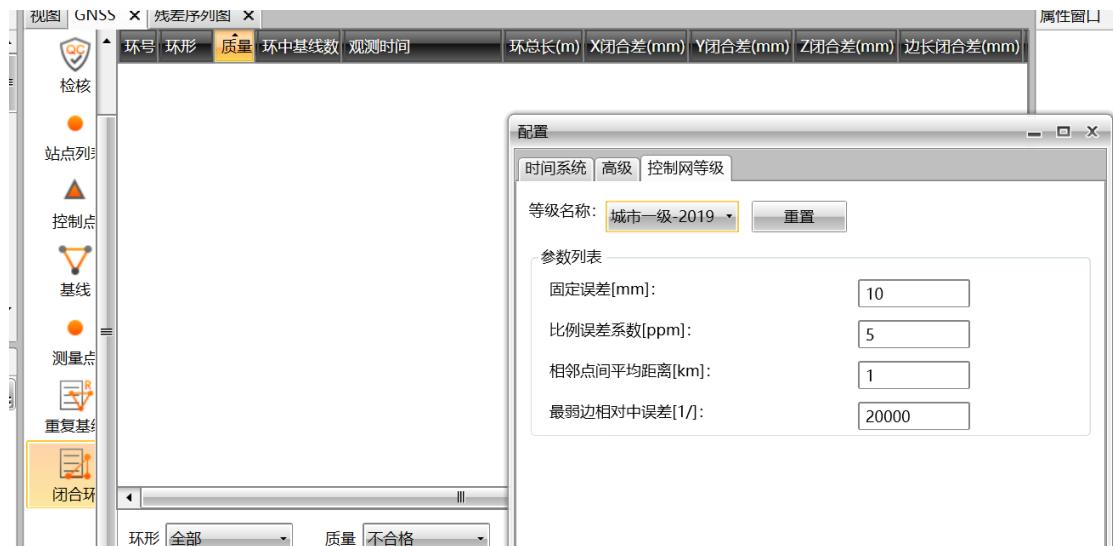


图 2.2.6.3 CGO 运行界面

2.2.7 网平差计算

(1) 网平差的目的

在 GPS 网的数据处理过程中, 基线解算所得到的基线向量仅能确定 GPS 网的几何形状, 但无法提供最终确定网中点绝对坐标所必需的绝对位置基准, 在 GPS 网平差中, 通过起算坐标可以达到引入绝对基准的目的。进行 GPS 网平差的目的主要有三个:

- ① 消除由观测量和已知条件中存在的误差所引起的 GPS 网在几何上的不一致。
- ② 改善 GPS 网的质量, 评定 GPS 网精度。
- ③ 确定 GPS 网中点在指定参照系下的坐标以及其他所需参数的估值。

(2) 网平差的类型

通常, 无法通过某个单一类型的网平差过程来达到上述三个目的, 而必须分阶段采用不同类型的网平差方法。根据进行网平差时所采用的观测量和已知条件的类型和数量, 可将网平差分为最小约束平差、约束平差和联合平差三种类型。



① 无约束平差

GPS 网的最小约束平差中所采用的观测量完全为 GPS 基线向量，平差通常在与基线向量相同的地心地固系下进行。在平差进行过程中，最小约束平差除了引入一个提供位置基准信息的起算点坐标外，不再引入其他的外部起算数据，而自由网平差则不引入任何外部起算数据。

由于 GPS 基线向量本身能够提供尺度和方位基准信息，它们所缺少的是位置基准信息，因此在进行网平差时需要设法获得位置基准信息，而通过引入外部起算数据来提供所缺少的基准信息是数据处理中常用的方法。但是，除了一个起算点坐标外，在 GPS 网的无约束平差中就不能再引入其他起算数据了。

GPS 网无约束平差所得到的 GPS 网的精度被作为衡量精度的指标，另一方面，通过 GPS 网无约束平差所反映出的观测值的质量，又被作为判断粗差观测值以及进行相应处理的依据。

② 约束平差

GPS 网的约束平差中所采用的观测量也完全为基线向量，但与无约束平差所不同的是，在平差进行过程中，引入了会使 GPS 网的尺度和方位发生变化的外部起算数据。

③ 联合平差

在进行 GPS 网平差时，如果所采用的观测值不仅包括 GPS 基线向量，而且还包含边长、角度、方向和高差等地面常规观测量，这种平差被称为联合平差。

(3) CGO 软件：秩亏自由网平差与三维约束网平差

如下图所示，1~3 步做秩亏自由网平差，得到秩亏自由网平差报告。

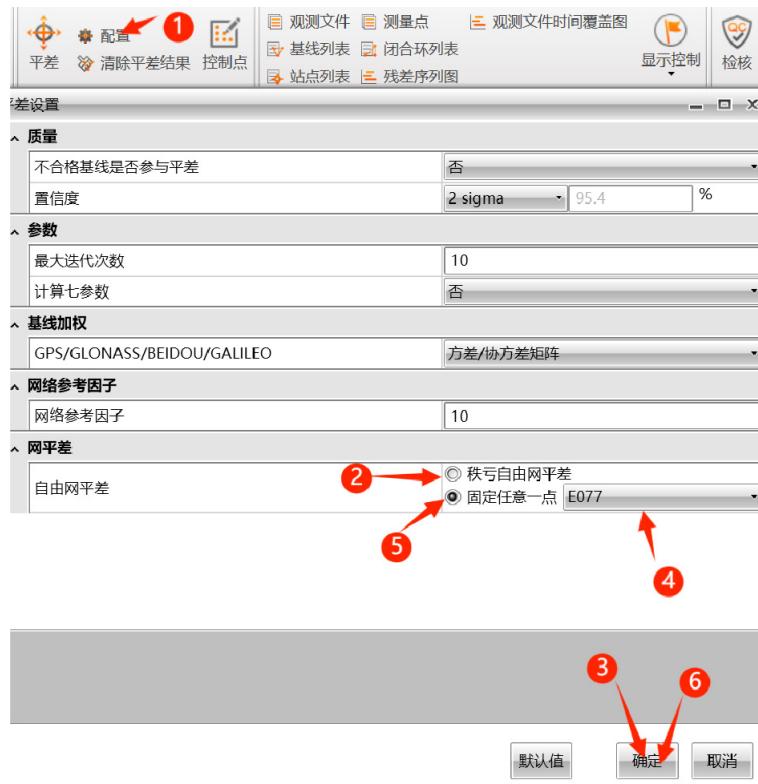
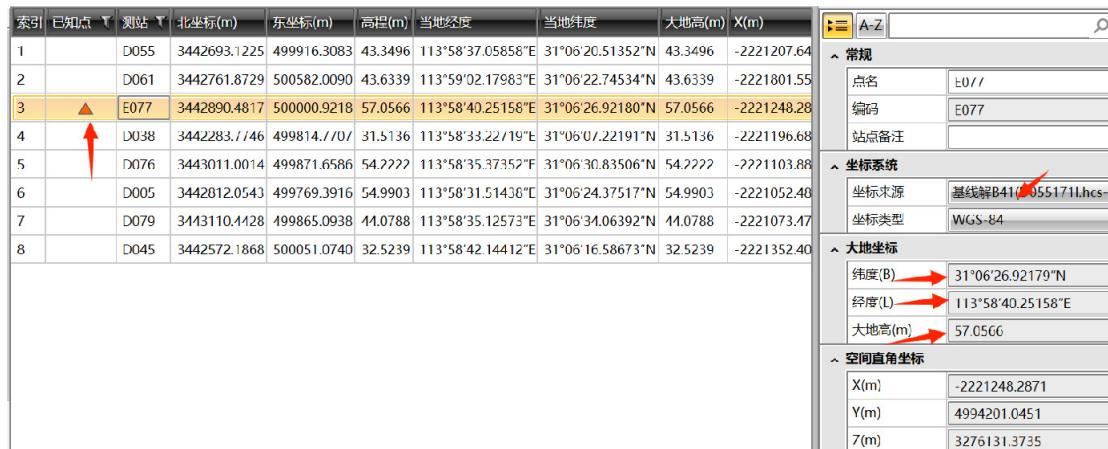


图 2.2.7.1 CGO 运行界面



做完秩亏自由网平差后，根据《天紫湖点位参考坐标.pdf》核对天紫湖点位信息，E077为我们第一大队选点中的精度较高的控制点。在 CGO 软件内将其转为控制点，并修改其点位信息，如下所示。修改 E077 点数据完毕后，按照上图 4~6 步，做三维约束网平差，得到三维约束网平差报告。



索引	已知点	测站	北坐标(m)	东坐标(m)	高程(m)	当地经度	当地纬度	大地高(m)	X(m)
1		D055	3442693.1225	499916.3083	43.3496	113°58'37.05858"E	31°06'20.51352"N	43.3496	-2221207.64
2		D061	3442761.8729	500582.0090	43.6339	113°59'02.17983"E	31°06'22.74534"N	43.6339	-2221801.55
3	▲	E077	3442890.4817	500000.9218	57.0566	113°58'40.25158"E	31°06'26.92180"N	57.0566	-2221248.28
4		D038	3442283.//46	499814.//0	31.5136	113°58'33.22/19"E	31°06'0/.22191"N	31.5136	-2221196.68
5		D076	3443011.0014	499871.6586	54.2222	113°58'35.37352"E	31°06'30.83506"N	54.2222	-2221103.88
6		D005	3442812.0543	499769.3916	54.9903	113°58'31.51430"E	31°06'24.37517"N	54.9903	-2221052.40
7		D079	3443110.4428	499865.0938	44.0788	113°58'35.12573"E	31°06'34.06392"N	44.0788	-2221073.47
8		D045	3442572.1868	500051.0740	32.5239	113°58'42.14412"E	31°06'16.58673"N	32.5239	-2221352.40

常规

点名	E077
编码	E077
站点备注	

坐标系统

坐标来源	基线解B41//055171L.hcs>
坐标类型	WGS-84

大地坐标

纬度(B)	31°06'26.92179"N
经度(L)	113°58'40.25158"E
大地高(m)	57.0566

空间直角坐标

X(m)	-2221248.2871
Y(m)	4994201.0451
Z(m)	3276131.3735

图 2.2.7.2 CGO 运行界面



索引	已知点	测站	北坐标(m)	东坐标(m)	高程(m)	当地经度	当地纬度	大地高(m)	X(m)
1		D055	3442693.1225	499916.3083	43.3496	113°58'37.05858"E	31°06'20.51352"N	43.3496	-2221207.64
2		D061	3442761.8729	500582.0090	43.6339	113°59'02.17983"E	31°06'22.74534"N	43.6339	-2221801.55
3	▲	E077	3442890.4817	500000.9218	57.0566	113°58'40.25158"E	31°06'26.92180"N	57.0566	-2221248.28
4		D038	3442283.7746	499814.7707	31.5136	113°58'33.22719"E	31°06'07.22191"N	31.5136	-2221196.68
5		D076	3443011.0014	499871.6586	54.2222	113°58'35.37352"E	31°06'30.83506"N	54.2222	-2221103.88
6		D005	3442812.0543	499769.3916	54.9903	113°58'31.51438"E	31°06'24.37517"N	54.9903	-2221052.40
7		D079	3443110.4428	499865.0938	44.0788	113°58'35.12573"E	31°06'34.06392"N	44.0788	-2221073.47
8		D045	3442572.1868	500051.0740	32.5239	113°58'42.14412"E	31°06'16.58673"N	32.5239	-2221352.40

常规

点名	E077
编码	E077
站点备注	

坐标系统

坐标来源	用户自定义
坐标类型	WGS-84

大地坐标

纬度(B)	31°06'26.75777"N
经度(L)	113°58'40.16627"E
大地高(m)	41.7243

空间直角坐标

X(m)	-2221241.9476
Y(m)	4994192.3546
Z(m)	3276119.1257

根据天紫湖参考控制点坐标文件修改完毕

根据BLH自动调整XYZ

图 2.2.7.3 CGO 运行界面

两份报告如下：



点ID	纬度	纬度误差(s)	经度	经度误差(s)	大地高(m)	高程误差(m)
D055	31°06'20.46141"N	0.000033	113°58'37.03578"E	0.000049	32.5647	0.0018
D061	31°06'22.69314"N	0.000043	113°59'02.15711"E	0.000057	32.8484	0.0023
E077	31°06'26.75772"N	0.000000	113°58'40.16627"E	0.000000	41.7243	0.0000
D038	31°06'07.22149"N	0.000038	113°58'33.22742"E	0.000053	31.5130	0.0021
D076	31°06'30.66696"N	0.000041	113°58'35.29529"E	0.000059	36.6815	0.0023
D005	31°06'24.20369"N	0.000036	113°58'31.41270"E	0.000051	38.9190	0.0020
D079	31°06'34.02279"N	0.000039	113°58'35.04236"E	0.000052	37.8096	0.0021
D045	31°06'16.58668"N	0.000043	113°58'42.14393"E	0.000058	32.5309	0.0023

点ID	X坐标(m)	Y误差(m)	Y坐标(m)	Y误差(m)	Z坐标(m)	Z误差(m)	3D误差(m)
D055	-2221203.6738	0.0015	4994310.4364	0.0020	3275948.3645	0.0013	0.0028
D061	-2221797.5878	0.0019	4994007.6545	0.0025	3276007.3604	0.0018	0.0036
E077	-2221241.9476	0.0000	4994192.3546	0.0000	3276119.1257	0.0000	0.0000
D038	-2221196.6913	0.0017	4994543.0936	0.0023	3275598.6841	0.0015	0.0032
D076	-2221096.9769	0.0018	4994184.0277	0.0025	3276219.6026	0.0014	0.0034
D005	-2221045.5366	0.0016	4994321.5533	0.0021	3276050.3289	0.0014	0.0030
D079	-2221069.5462	0.0016	4994138.8427	0.0023	3276308.6742	0.0014	0.0032
D045	-2221235.23990	0.0018	4994311.7287	0.0026	3275846.1715	0.0017	0.0036



① 文件 | C:/Users/Lewis/Desktop/专业实习1/自由网平差总结报告.html

5.3 WGS84系统下平差大地坐标

点ID	纬度	纬度误差(s)	经度	经度误差(s)	大地高(m)	高程中误差(m)
D055	31°06'20.48711"N	0.000033	113°58'37.11407"E	0.000049	38.4519	0.0018
D061	31°06'22.71883"N	0.000043	113°59'02.23538"E	0.000057	38.7358	0.0023
E077	31°06'26.78341"N	0.000000	113°58'40.24456"E	0.000000	47.6115	0.0000
D038	31°06'07.24719"N	0.000038	113°58'33.30571"E	0.000053	37.4001	0.0021
D076	31°06'30.69264"N	0.000041	113°58'35.37358"E	0.000059	42.5687	0.0023
D005	31°06'24.22938"N	0.000036	113°58'31.49100"E	0.000051	44.8061	0.0020
D079	31°06'34.04847"N	0.000039	113°58'35.12065"E	0.000052	43.6968	0.0021
D045	31°06'16.61237"N	0.000043	113°58'42.22221"E	0.000058	38.4181	0.0023

5.4 WGS84系统下平差空间直角坐标

点ID(m)	X坐标(m)	X误差(m)	Y坐标(m)	Y误差(m)	Z坐标(m)	Z误差(m)	3D误差(m)
D055	-2221207.4516	0.0015	4994313.8256	0.0020	3275952.0834	0.0013	0.0028
D061	-2221801.3657	0.0019	4994011.0436	0.0025	3276011.0793	0.0018	0.0036
E077	-2221245.7254	0.0000	4994195.7437	0.0000	3276122.8446	0.0000	0.0000
D038	-2221200.4692	0.0017	4994546.4827	0.0023	3275602.4030	0.0015	0.0032
D076	-2221100.7547	0.0018	4994187.4168	0.0025	3276223.3215	0.0014	0.0034
D005	-2221049.3144	0.0016	4994324.9424	0.0021	3276054.0478	0.0014	0.0030
D079	-2221073.3241	0.0016	4994142.2318	0.0023	3276312.3931	0.0014	0.0032
D045	-2221356.1768	0.0018	4994315.1178	0.0026	3275849.8904	0.0017	0.0036

比较秩亏自由网平差报告与三维约束网平差报告可知，二者平差解算的经纬度有较小的差异，而在高程方向，即大地高有约 6m 的系统误差。这是由于三维约束网平差固定了已知的 E077 的点位信息，平差解算时使用了 E077 的已知坐标。而所有点自动解算的大地高与真值是存在系统误差的，即一个常数。其他部分数据如下（两份报告的其他数据基本相同）：

2 平差统计

统计总结

名称	值
网参考因子	30.772295693533
x2卡方检验	合格
Chi2计算值	151.98576
Chi2检验范围	117.46306 ~ 186.50847
单位权中误差比	1.00660
精度置信水平	2 sigma
水平误差mm	2.0
垂直误差mm	2.3
检验结果	合格

5.7 最弱边和最弱点统计

最弱边基线名	基线ID	DX(m)	Std.DX(m m)	DY(m)	Std.DY(m m)	DZ(m)	Std.DZ(m m)	斜距(m)	中误差(m)	相对中误差
B30(D079->D076)	D079->D076	-27.4306	1.9	45.1850	2.6	-89.0716	1.5	103.5754	0.0035	1/29531.0000

当地最弱点名	北坐标(m)	北坐标中误差(m)	东坐标(m)	东坐标中误差(m)	高程(m)	高程误差(m)	点位中误差(m)
D061	3442761.0566	0.0013	500583.4811	0.0015	38.7358	0.0023	0.0031

控制网等级

名称	值
控制网等级	城市二级-2019

基线解算结果和检验指标

B01(E077->D038)	名称	计算值	限差
	相邻点基线水平分量中误差:mm	0.3	20.0
	相邻点基线垂直分量中误差:mm	0.2	40.0

B03(D055->D076)	名称	计算值	限差
	相邻点基线水平分量中误差:mm	0.2	20.0
	相邻点基线垂直分量中误差:mm	0.1	40.0

B04(D055->D005)	名称	计算值	限差
	相邻点基线水平分量中误差:mm	0.2	20.0
	相邻点基线垂直分量中误差:mm	0.1	40.0

B05(D076->D005)	名称	计算值	限差
	相邻点基线水平分量中误差:mm	0.3	20.0
	相邻点基线垂直分量中误差:mm	0.1	40.0



3.GNSS 动态数据采集、处理与分析

3.1 数据采集

使用大队在已架设的 D005 静态基站作为基准站。每个小组的接收机为流动站，在天紫湖景区规划区域做 RTK 点测量、线测量，同时将原始观测数据保存到接收机。最终得到基站静态观测数据 D005.HCN。

RTK 测量作业：

(1)点测量(地形点：每人 10 个控制点*5 人+每人 10 个地物点*5 人=100 个)

(2) 线测量(连续点：总长度至少 200m 以上)

通过 RTK 测量，记录点、线测量的位置数据，可以绘制特征点线的地形图。

RTK 测量的接收机操作：

连接手簿与接收机，手簿连接网络，设置 CORS 的 IP 地址、端口和协议，选取测量模式，观察是否为固定解等。

我们第四小组最终从接收机中得到动态测量数据 D005173B.HCN。

3.2 CGO PPK 后处理动态数据

3.2.1 配置及操作

新建工程，导入静态基站观测数据(D005.HCN)、流动站 RTK 观测数据(D005173B.HCN)，注意：核对基站天线高、量测方式，更改流动站天线高为“1.800m”、量测方式为“天线座底部”。然后，将流动站观测数据转为动态，将基准站点位转化为控制点。修改基线处理配置为 PPK 解算，动态解类型“组合”，进行基线解算。

表 3.2.1 CGO PPK 解算部分配置表

配置项	参数
卫星系统	GPS+BDS+GLONASS+GALILEO
控制网等级	城市二级-2019
高度截止角 (°)	15
温度 (°C)	28
相对湿度 (%)	55
处理程序	PPK
动态解类型	组合

3.2 观测数据

列表	起点	止点
数据文件	C:\Users\Lewis\Desktop\专业实习1\RTK\D005.HCN	C:\Users\Lewis\Desktop\专业实习1\RTK\动态测量接收机\GNSS原始数据\hcn\D055173B.HCN
接收机类型	CHC I90	CHC I50
接收机序号	3238144	3206135
天线类型	CHCI90	CHCI50
测量类型	量测到天线边缘 (斜高)	量测到天线座底部
天线高(m)	1.5180	1.8000



3.4 基线

基线ID	基站	移动站	解算类型	同步时间	RMS(m)	合格	Dx(m)	Std.Dx(m)	Dy(m)	Std.Dy(m)	Dz(m)	Std.Dz(m)	距离	参与解算卫星	PDOP
B01	D005	D055	固定解	02:44:40.000	0.0455	合格	-13.2461	-170560.1733	27.7303	222952.8550	-51.6035	-157557.9077	60.0612	28	2.1354

上图为 PPK 解算报告的部分信息，包含 RMS=0.0455m、STD 等。

3.2.2 数据分析

经统计，移动站 PPK 解算结果类型如下表所示：

表 3.2.2 CGO 移动站动态基线 PPK 解算 (历元总数=1970)

	浮动解	伪距差分解	固定解	单点定位	无效解	解总数
个数	101	14	1841	1	12	1979
比例 (%)	5.104%	0.707%	93.027%	0.051%	0.606%	100%

在移动站的点测量与线测量时，由于天紫湖景区内环境树木遮挡较多（道路两侧、花园绿化等），在采集地形点和连续点时，均容易进入连续遮挡道路，所以有较多浮动解、伪距差分解等。而固定解占 93% 左右，数据总体上是较为可靠的。

下图为动态基线解算的点位分布，从图中可以看出移动站的动态测量的运动轨迹。由于在线测量时，我们小组主要采用“每隔 1m”的点测量方式，故从图中可以看出，明显的长边界地形轮廓的点间隔直观上是相同的，间隔为 1m。

最上面的部分为天紫湖酒店门前的小广场，这里我们只绕了一圈；中间部分为第一大队的喷泉和周围花坛测区，图中可大致看出一圈与一圈相套的轮廓；下面是第二大队的测区，我们组虽是第一大队但由于想测得更完整的地形图，绕着第二大队测区转了一圈。

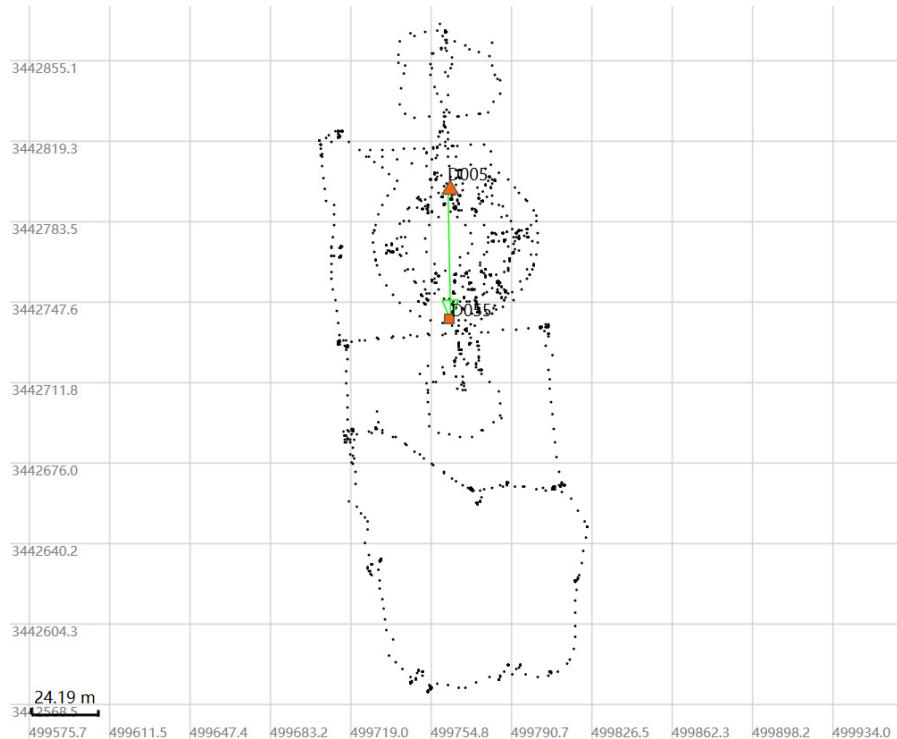


图 3.2.2 地形图



3.3 RTKLib PPK 后处理动态数据

3.3.1 配置及操作

表 3.3.1 RTKLib PPK 后处理动态数据配置

配置	解算策略 1	解算策略 2	解算策略 3	...	解算策略 n-1	解算策略 n
定位解算模式	kinematic	kinematic	kinematic	...	kinematic	kinematic
导航系统	All Sats	All Sats	GPS+BDS	...	GPS+BDS	GPS
电离层改正	Off	Estimate ZTD	Off	...	off	off
对流层改正	Off	Estimate TEC	Off(saastamoinen)	...	off	off
频率	L1	L1+L2+L3(+L4+L5)	L1+L2+L3(+L4+L5)	...	L1+L2+L3+L4+L5	L1+L2
模糊度解算策略	Fix and hold	Fix and hold	Fix and hold	...	Continuous	Continuous
滤波模式	Combined	Combined	Combined	...	Combined	Combined
迭代次数	1	1	1	1~∞	1	1

注：表中括号部分表示使用括号内策略对解算结果影响较小

3.3.2 数据分析

多次尝试知，解算策略 2、3 综合地形图质量与模糊度固定成功率最好。下面给出解算策略 2 配置与分析，其他解算策略皆同理，根据控制变量法调试得出每一组 PPK 解算策略。

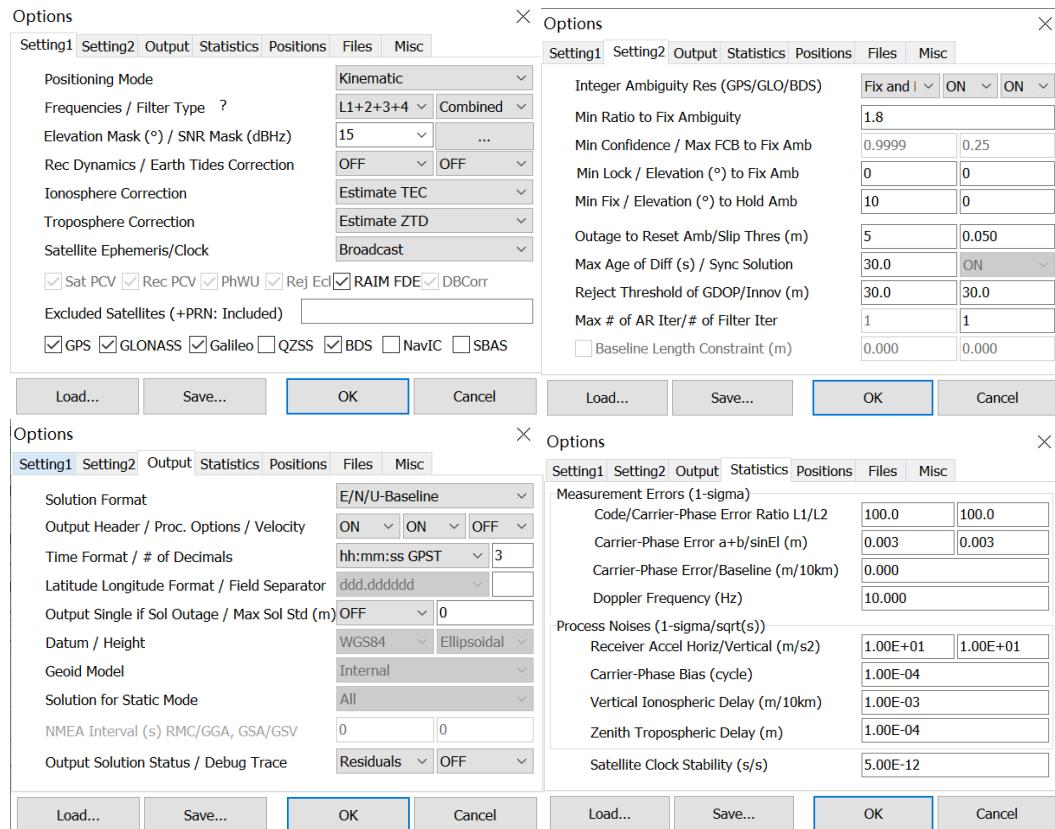


图 3.3.2.1 解算策略 2 配置



表 3.3.2 RTKLib 移动站动态基线 PPK 解算 (解算策略 2)

	浮动解	固定解	解总数
个数	575	1266	1841
比例 (%)	31.233%	68.767%	100%

解算策略 2 的固定解比例与浮动解比例的比值超过 2: 1, 认为观测条件较好。

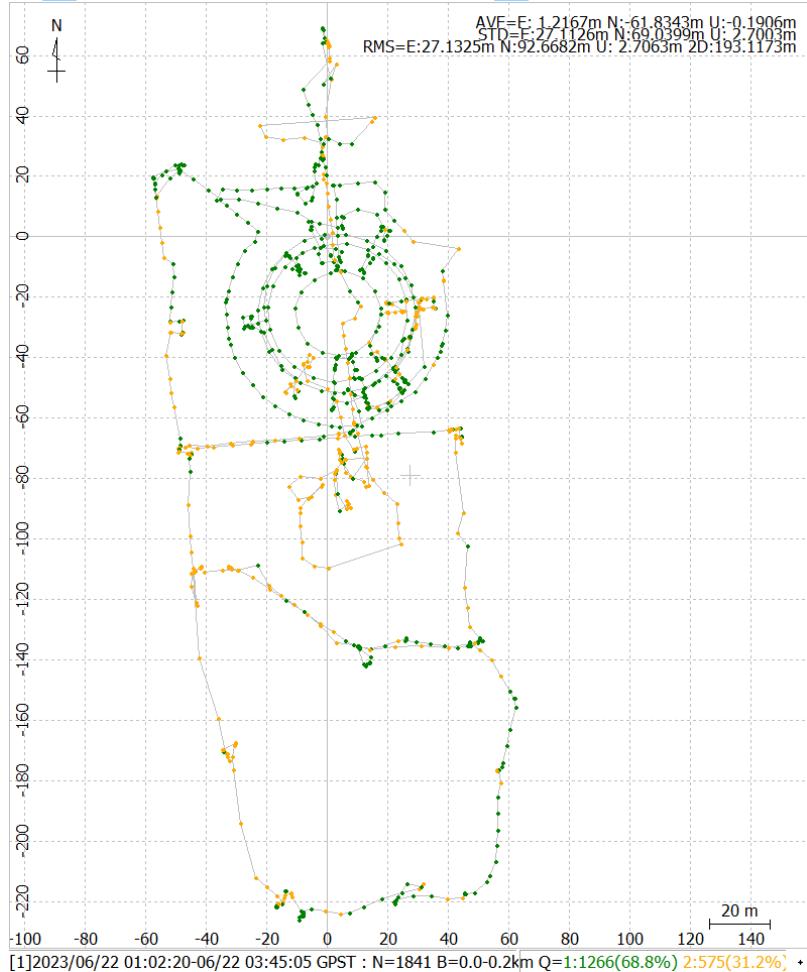


图 3.3.2.2 解算策略 3 地形轮廓图

- ⇒ 参数调试过程：（初始：allsats，电离层/对流层延迟改正=OFF, L1+L2, combined, iters=1）
- 改变电离层策略=sass 未影响解算精度；
- 改变电离层策略=Estimate ZTD+Grad 未影响点位解算（图相同），但固定解比例降低；
- 改变电离层策略=Estimate ZTD 提高固定解比例；
- 改变对流层策略=broadcast、sbas 未影响解算精度；
- 改变对流层策略=ionex tec、QZSS brod 较小地降低解算精度，固定解比例下降；
- 改变对流层策略=LC ionofree 显著降低解算精度，固定解比例下降；
- 改变对流层策略=Estimate TEC 小幅提高解算精度，固定解比例上升；
- 改变滤波策略=forward/backward，地形点轮廓变差，固定解比例降低；
- 改变迭代次数=2、3、4，地形点轮廓变形修正明显，但过度的部分修正脱离了真值，且固



定解比例降低；

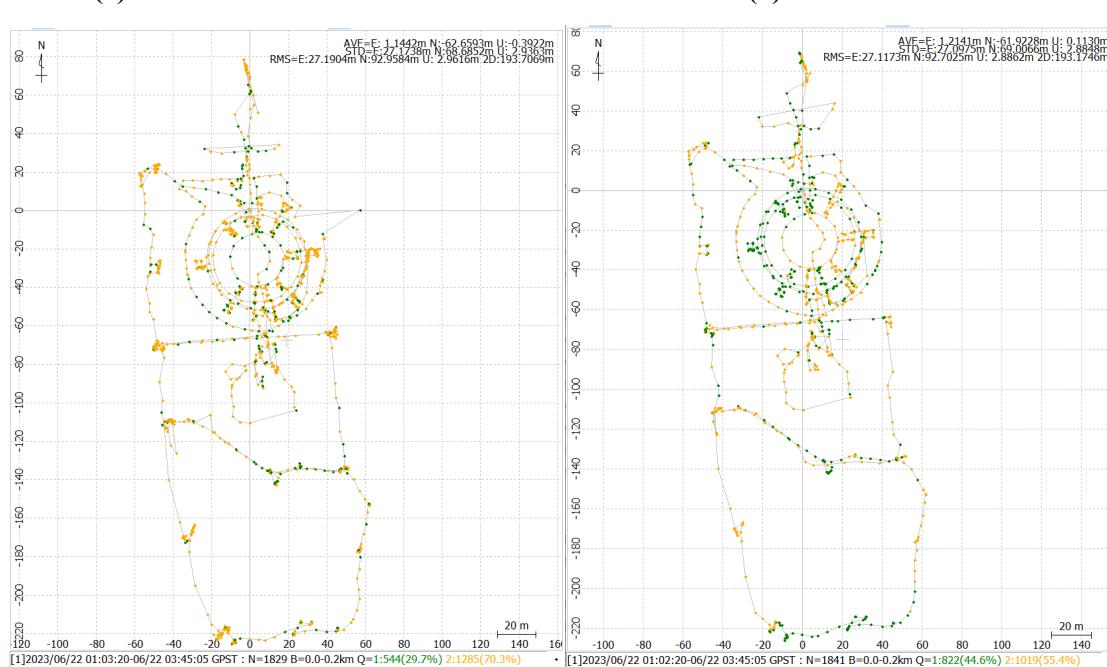
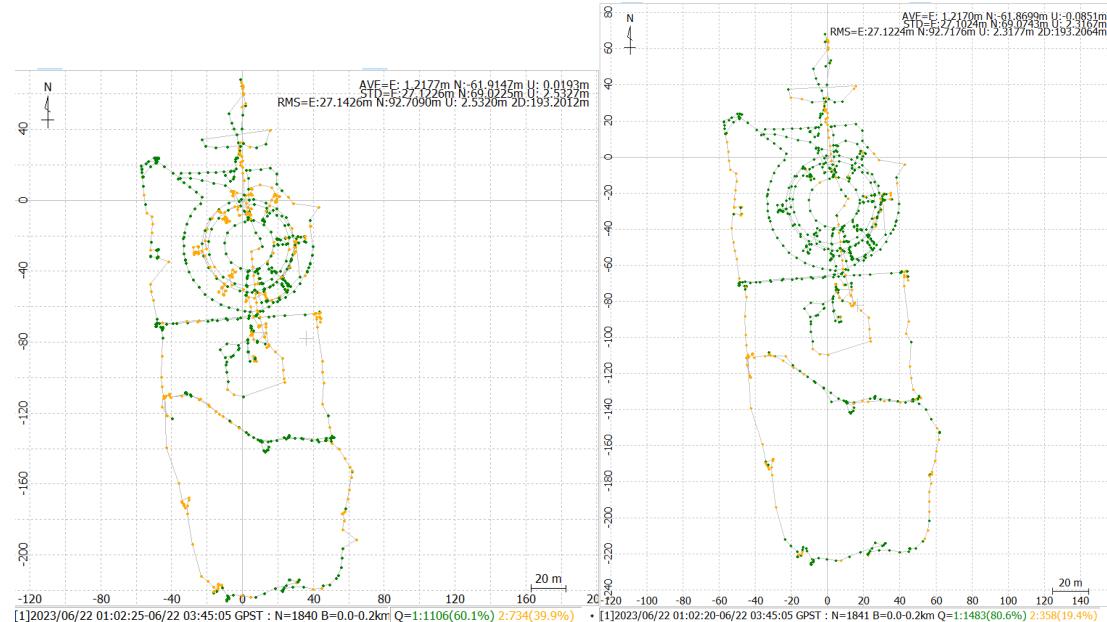
改变模糊度解算使用的载波=L1，地形点轮廓严重变形，几乎不可用，固定解大幅减小；

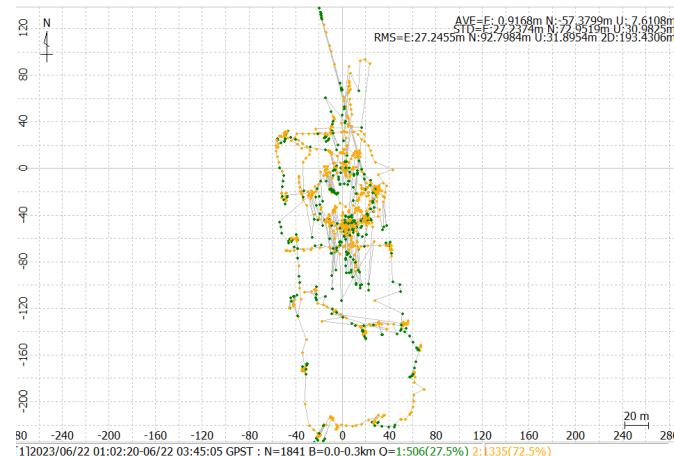
改变模糊度固定方式=实时单历元解算 instantaneous，轮廓较差，固定解大幅减少（原本以为单历元解算模糊度成功率更高，因为就是本历元结果仅与当前历元有关，不需要考虑周跳处理问题，不需要考虑滤波发散问题。结果更差说明观测条件相对不佳）；

改变模糊度固定方式=continuous，图形轮廓尚可，固定解却惊人的达到 80.6%；

改变使用单卫星系统=GPS，地形点轮廓严重变形，固定解大幅减小；

如下图(a)~(e)所示，为部分比较策略的成图效果：





(e) base + L1(only)

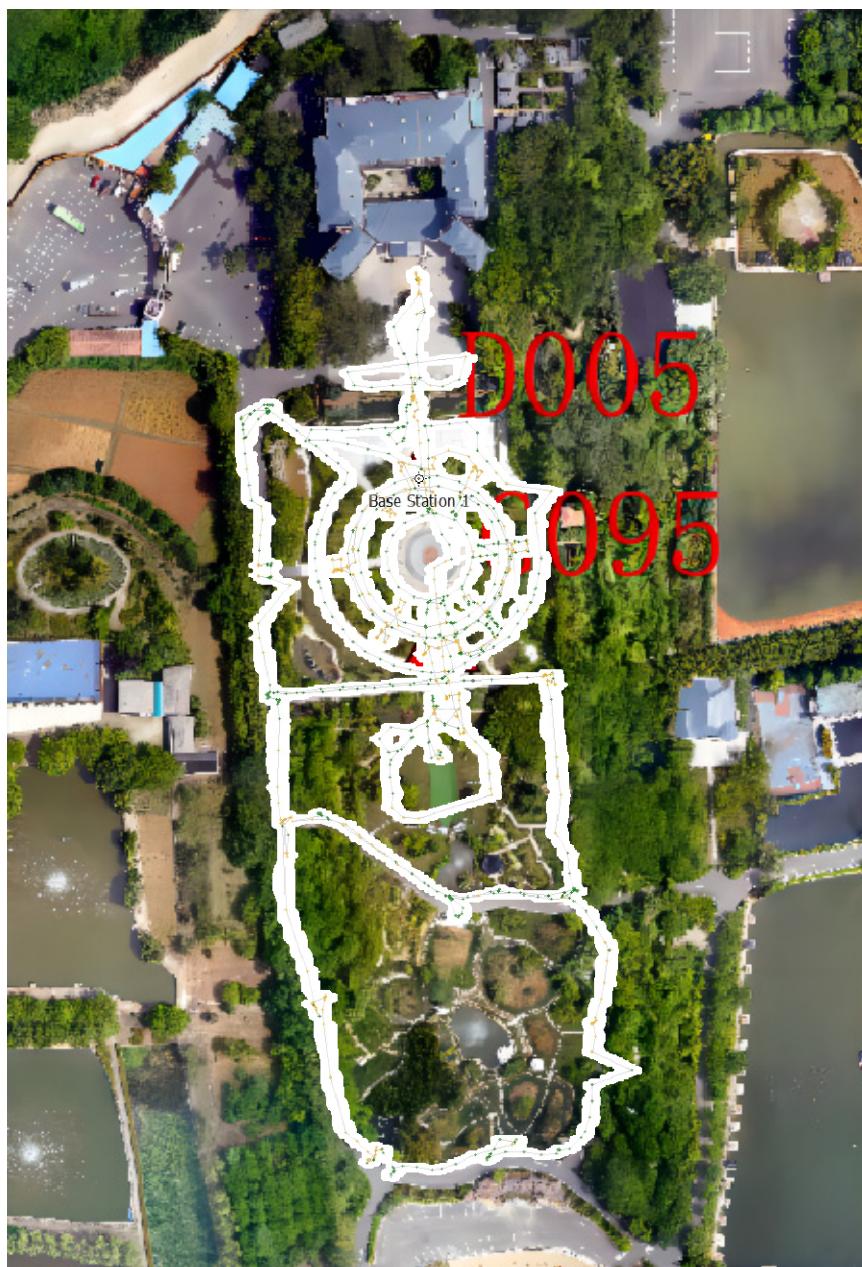


图 3.3.2.3 RTKLIB PPK 轨迹图 + 天紫湖 IMAGE MAP



3.3.3 几类策略对比分析

由于我实验了大量的策略，无法一一列举阐述之，我们一般均采取多系统（单系统是比较差的，GPS+BDS 是比较好的双系统组合以下四个示例均为 GPS+BDS，此外部分 GLONASS 卫星可以提供部分修正，但精度并不稳定，故以下分析不使用之），采取 fix and hold 策略，迭代次数均为 1 次，由此我们可以将所有策略分为四类：

- (1) 单频+不改正对流层/电离层
- (2) 单频+改正对流层/电离层
- (3) 双(多)频+不改正对流层/电离层
- (4) 双(多)频+改正对流层/电离层

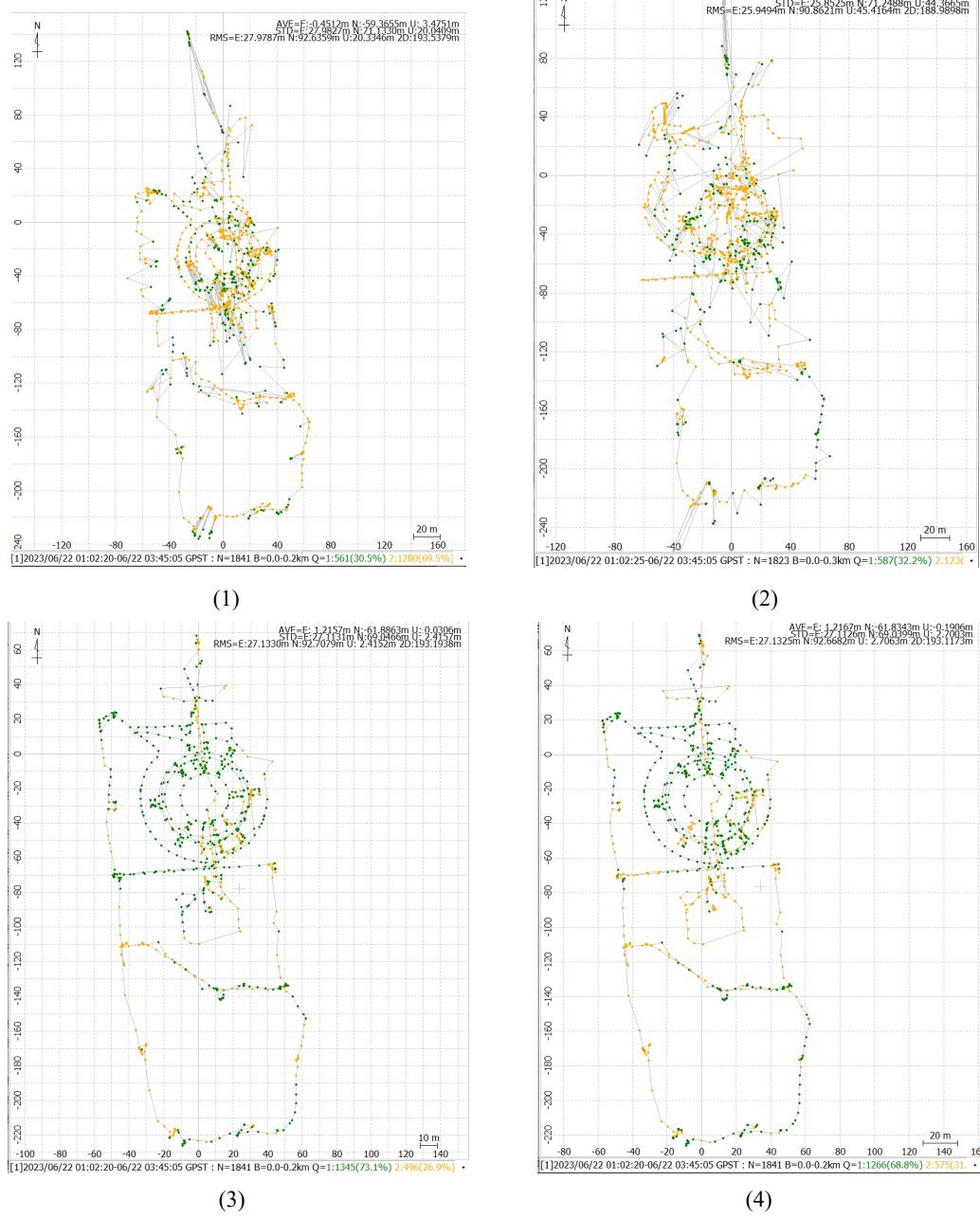


图 3.3.3 四种策略的 RTKLib 成图效果



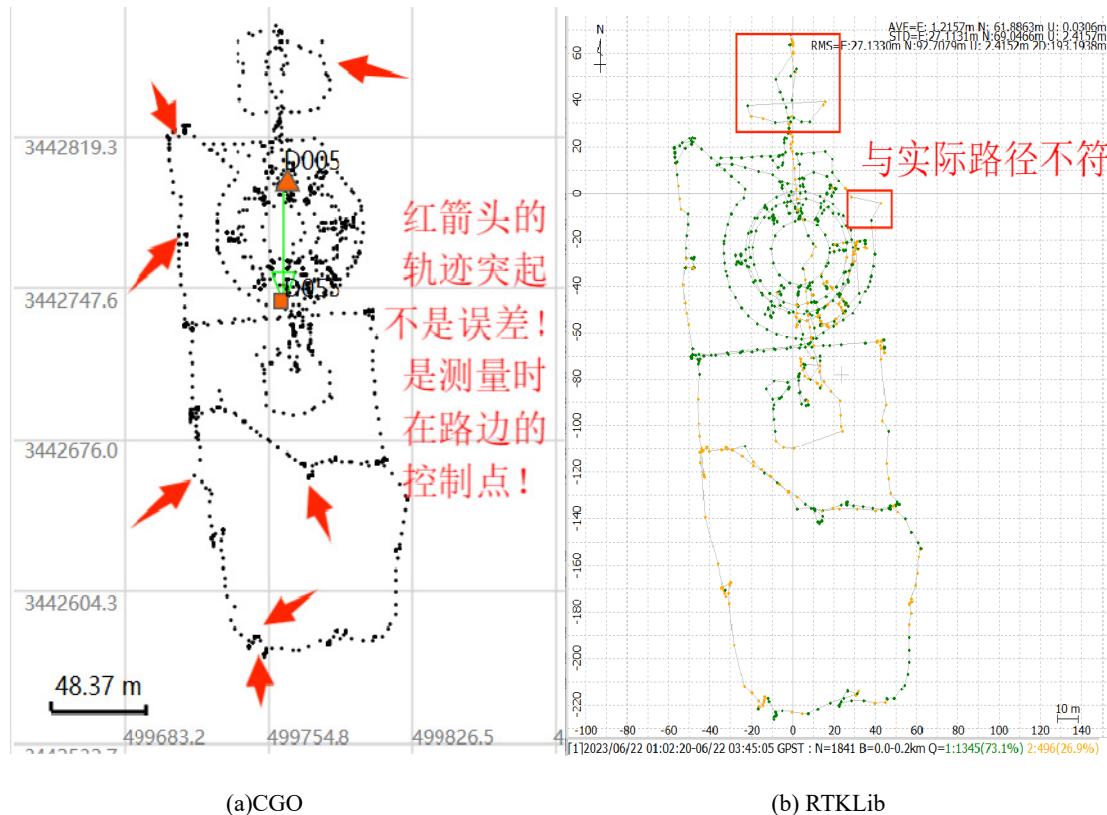
经过 RTKLib 根据四类策略更改参数，可以得出结论：

如图(1)图(2)分别为单频不改电离层对流层与单频改电离层对流层的成图效果。显然，两者的精度都非常差。没有使用双频载波相位观测值的解算，便无法根据作差法、线性组合法等消去载波传播共性的电离层、对流层误差，或者也无法直接由两个载波相位观测值反解出模糊度。而经过尝试，即使根据经验模型改正（IONEX TEC、saastamoinen）或者引入参数估计（Estimate ZTD, Estimate TEC）根本达不到可用的精度，图形轮廓特别差。

如图(3)所示双频不改电离层对流层可达到很高的精度，模糊度固定成功率达到 73.1%（关于 ambiguity 固定的设置如 ratio、elevation 在 settings2 页面，当前设置的 ratio=1.8 等），而比如如图(4)所示是使用 Estimate ZTD、Estimate TEC 改对流层与电离层，精度却有所下降至 68.8%，如果采用不合适的模型如 IONEX TEC，固定解比例下降至 33% 左右，显然应该拒绝此方法；若使用广播星历改电离层，saastamoinen 改对流层，那么不仅固定解比例，而且精度（RMS、STD）是与不改电离层、对流层完全一致。在此有一点不解与疑问，难道程序执行了完全相同的步骤？不同模型即使模糊度固定在阈值内的数目可能一样（固定解比例相同），那 RMS、STD 等解算的结果也不应该相同。相同的现象还发现在选择 L1L2L3 载波解算结果与 L1L2L3L4 结果一致的情况下。或者是这些改正还需要在 rtkpost 中加载额外的文件？否则默认缺省？比如 IONEX 电离层格网文件之类的。我个人还没有给出一个能说服自己的解释。

3.4 CGO RTKLib PPK 对比

3.4.1 地形轮廓图对比





(c) Ground Truth

图 3.4.1

结合(a)(b)(c)与(3.3.2)中的“RTKLib PPK 轨迹图 + 天紫湖 IMAGE MAP”可知，二者成图的精度方面，CGO 软件精度较高，表现在红色框框选的区域 RTKLib 建图存在明显误差，而 CGO 软件更符合实际动态测量路线。

3.4.2 数值数据对比

表 3.4.2 CGO 与 RTKLib PPK 解算

	浮动解 个数	伪距差分解 比例 (%)	固定解 个数	单点定位 比例 (%)	无效解 个数	解总数
CGO	101	5.104%	14	93.027%	1	1841
			0.707%	0.051%	12	1979
RTKLib	496	26.942%	---	73.058%	---	1841
			---	---	---	100%

首先，我们要知道 RTK 数据处理时各种解的含义及质量：

固定解：RTK 工作精度可以达到厘米级。

浮动解：信号呈现一下固定，一下不固定的情况。一般可以达到 10 厘米以内精度。



单点解(单点定位): 只有移动站在工作。精度往往在几米左右。

伪距差分解: RTK 接收信号工作, 解算数据精度非常低。精度和单点解精度相近。

无解: RTK 没有接收到信号, 精度非常低, 不可用。

在 PPK 后处理程序中, 给定同样的观测数据, 我们不仅在成图的精细化程度上可知 CGO 软件精度更高, 滤波优化更成熟, 而且:

(1) CGO 软件将解的分类分为五种, 且固定解的比例远大于 RTKLib(设定的 ratio 值相同均为 1.8), 对数据的后处理能力较好, rms 达到厘米级;

(2) RTKLib 是综合的老牌 GNSS 数据处理软件, 综合能力强悍, 但精细化水平不如商业化追求精度细致的 CGO, RTKLib 对于出现信号失锁后的周跳等粗差难以忽略, 精度较差的坐标易受粗差影响, 从而滤波结果使粗差附近的固定解比例下降, 比如(3.3.1)(b)红框标注区域。最终 RTKLib 计算的 RMS 和 STD 居然达到了 10m 级, 显然受到粗差影响过大。也说明 RTKLib 的结算策略存在明显的不合理之处。

3.5 华测 CORS+流动站联测与单基准站+流动站 PPK 轨迹对比

步骤:

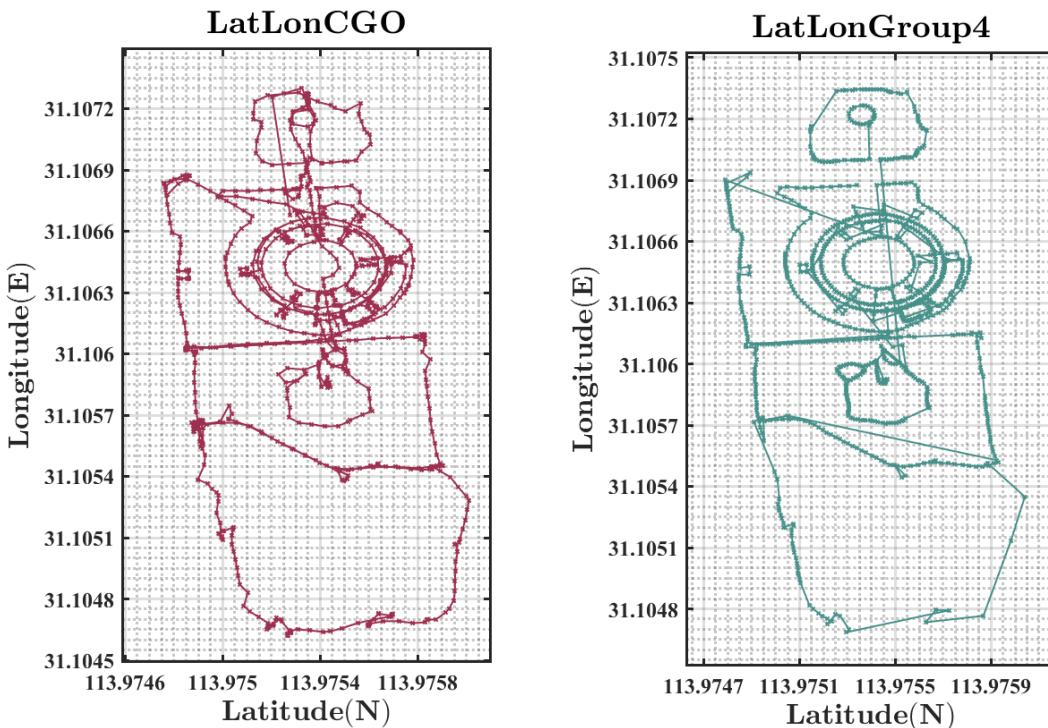
①整理流动站手簿导出的 neu、blh 文件 “Group4_LatLon.txt” “Group4_NEU.txt” ;

②整理导出 CGO PPK 解算的坐标数据 “CGO 动态 1_PPKTrack_B01.txt” ;

③filter1.py+filter2.py, python 整理以上数据得到四组数据:

“NEU_Group4.txt” “LatLon_Group4.txt” “NEU_CGO.txt” “LatLon_CGO.txt” ;

④自编代码 drawPPKpos.m, 针对四组数据使用 matlab 画图, 由于观测位置、历元不同步, 无法将两类数据作差研究残差图, 我采取二维折线散点图的形式给出可视化效果。



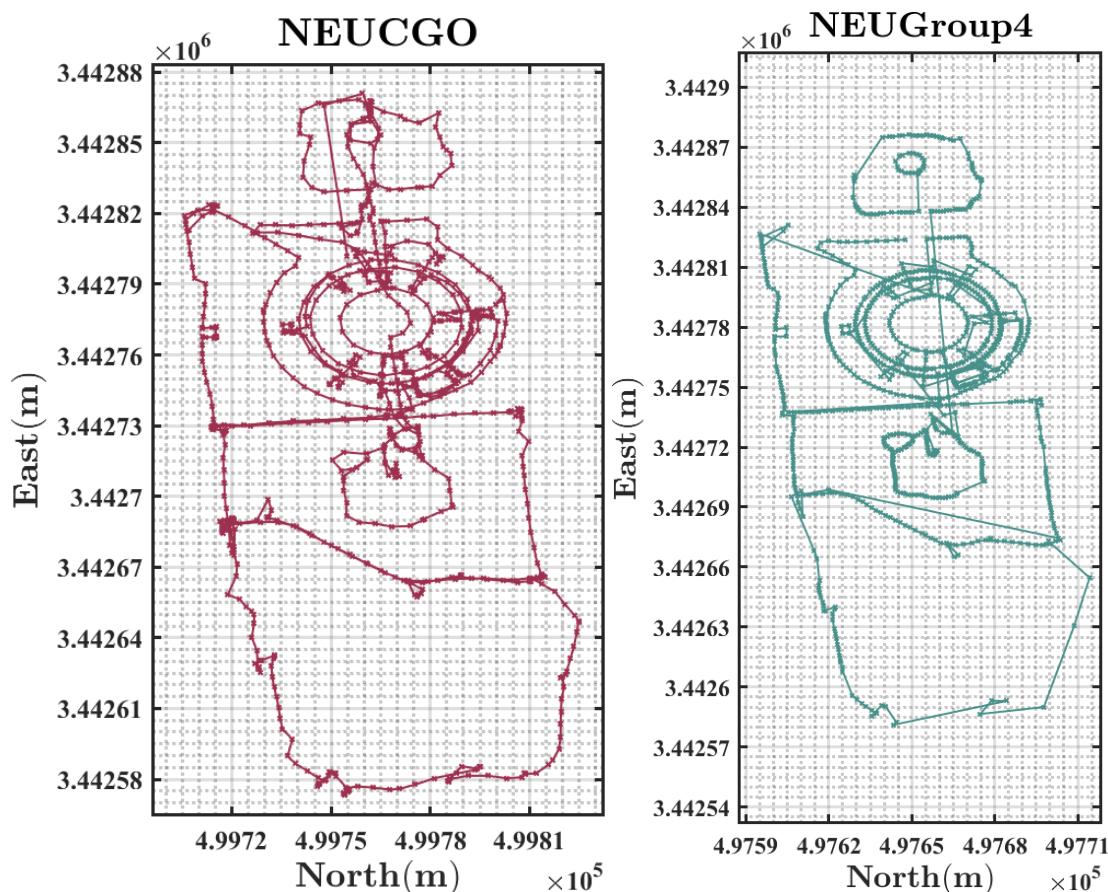


图 3.5

关于四张成图，以下有三点说明：

1. 对比 CGO（单基准站+流动站 PPK 解算坐标数据）和 Group4（我们第四组的手簿导出华测 CORS+流动站联测的定位坐标数据）的成图效果，大致是相同的。由于 CGO 软件导出的坐标数据是由基准站+流动站接收机自动记录的，所以在手簿 LandStar7 软件手簿中未使用点测量（或线测量）的时候，即在流动站接收机移动的过程中，都会自动按一定频率存储观测数据，所以 CGO 的成图明显含有冗杂的非测量路径。如：中间花园的中心我们手簿操作并未使用点测量/线测量；且对比 Group4 的数据就可看出，下方的轮廓的直线仅仅是由几个测量点两两连接的直线，这是因为最下方的轮廓我们没有进行线测量，只进行了点测量（最下方轮廓区域，我们这些都测的是控制点），而 CGO 解算的坐标成图后下方的轮廓有很多较均匀间隔的解算点，这正是因为接收机按频率自动记录观测数据。也就是说，CGO 数据更能反映接收机移动的轨迹，手簿的 Group4 数据则是反映人工测图的地形轮廓，当然，二者均有误差。

2. 在(3.4)中已经得出结论，CGO PPK 解算的精度明显高于 RTKLib，所以我选取了 CGO PPK 解算的坐标数据作为 PPK 的结果来进行比较。

3. 比较 NEU 与 BLH 两种坐标系下的成图，地形图（轨迹图）的轮廓是基本相同的，仅仅是参考系不同度量单位不同，相对轮廓是一样的。



4.GNSS 数据质量分析

4.1 基于 RTKLib 的 GNSS 观测数据质量分析

下面，我们选取不同场景下的两组静态数据与一组动态数据进行数据分析。其中，第一组静态数据取自 2023.6.20 下午第三观测时段在天紫湖 D055 点位的静态采集数据，第二组静态数据取自 2023.6.22 上午在天紫湖第一大队 RTK D005 基站的静态观测数据。动态观测数据取自 2023.6.22 上午在天紫湖我们第 4 小组流动站采集的动态测量数据。

4.1.1 卫星跟踪情况

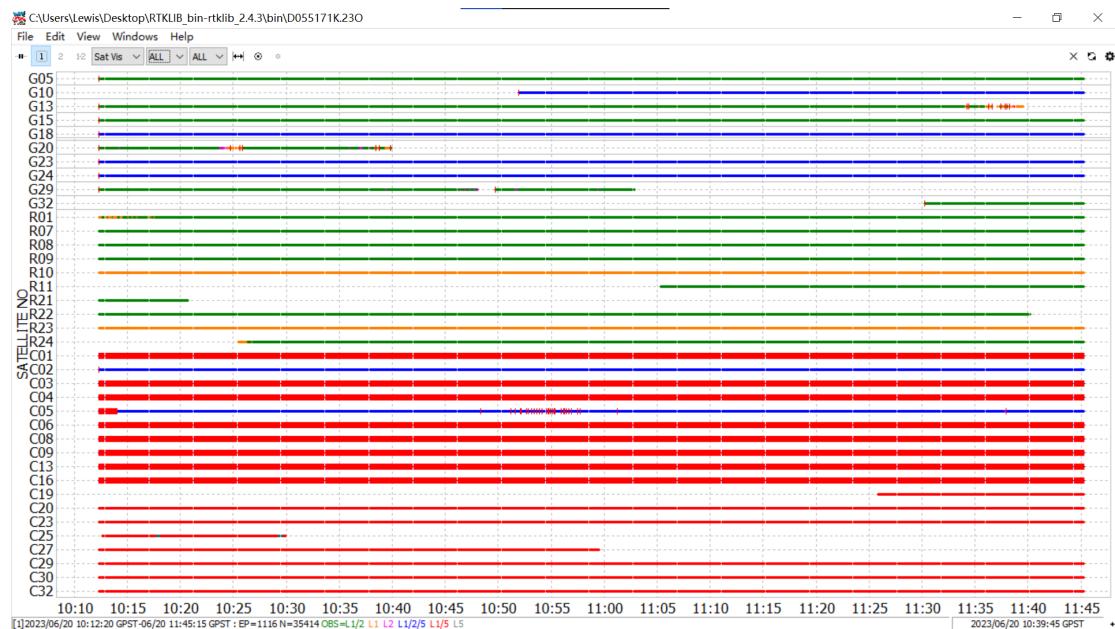


图 4.1.1.1 20230620 静态采集 D055

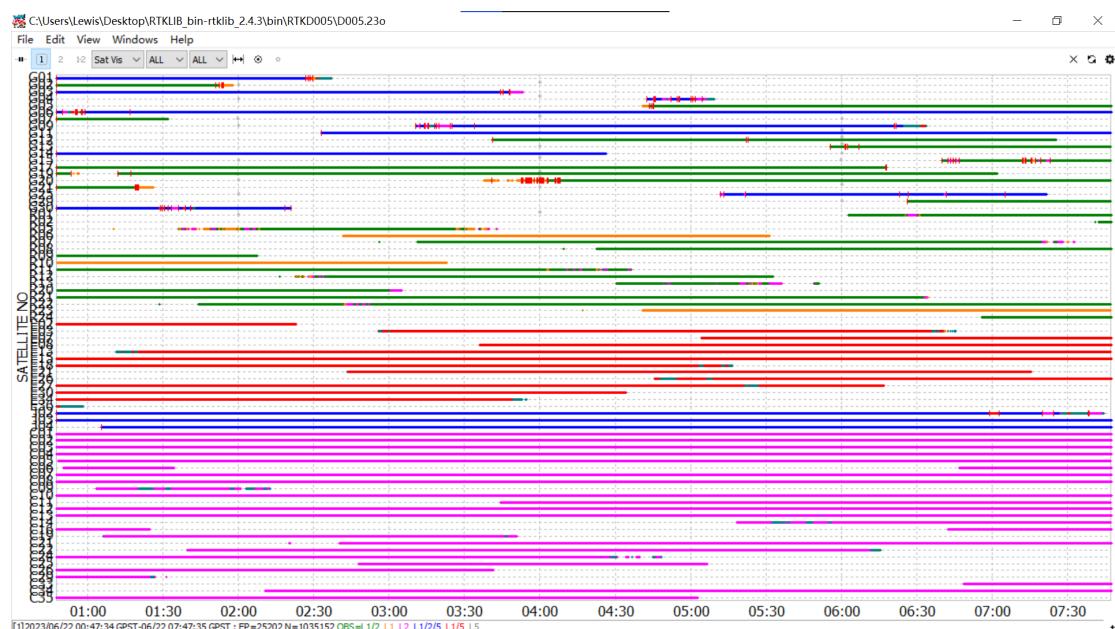


图 4.1.1.2 20230622 RTK 基站静态采集 D005

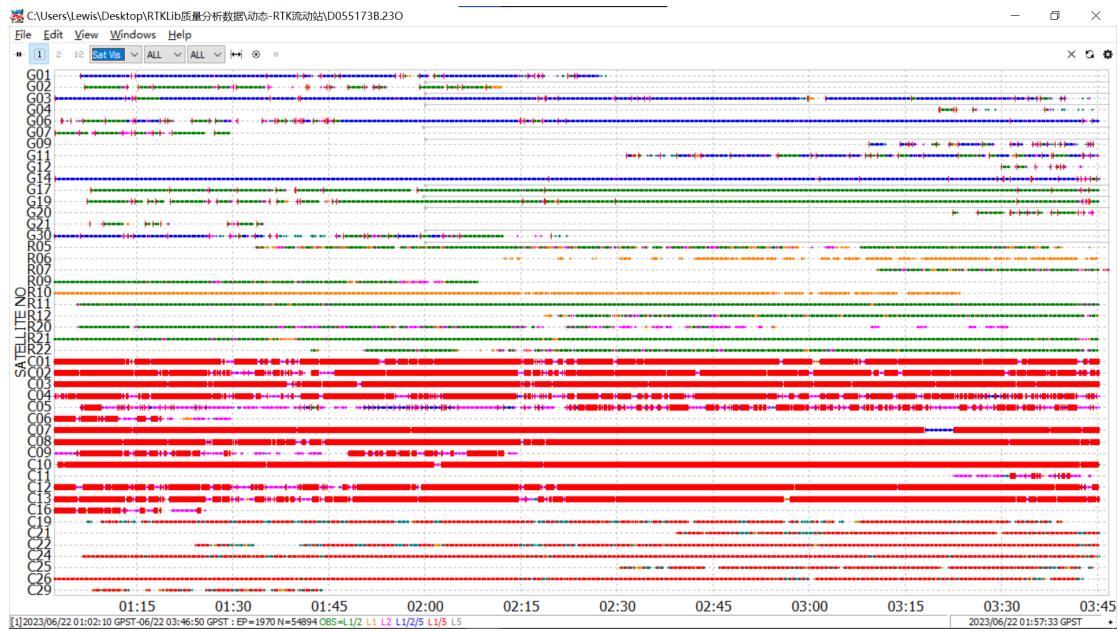


图 4.1.1.3 20230622 RTK 流动站动态采集

分析：

下拉列表选中 SatVis 选项，查看卫星的可见状态和周跳情况，Edit-Options-Cycle-Slip 中选择 LG JUMP 查看通过 LG 双频组合探测的周跳或者使用竖线标记的 Loss-off-lock（失锁）情况。图中灰色线表示星历，圆点表示 Toe 时间，红色圆表示卫星状态不健康。红色竖线是周跳的标志。不同颜色表示不同的频点：绿色为同时收到 L1/L2，具有双频载波相位观测值；黄色或玫瑰红色为仅 L1 或仅 L2 载波，只有单频载波相位观测值；蓝色为同时具有 L1/L2/L5 载波相位观测值；橙红色为 L1/L5 双频载波相位观测值，灰色为仅 L5 单频载波相位观测值。比如在某个连续观测时段颜色发生变化比如由蓝色变为绿色，说明此时发生 L5 频点信号的中断，而仍能接受 L1/L2 载波频段的信号。如果发生颜色的中断，说明接收机对该卫星发生了全部频点的信号中断，即信号失锁(Loss-off-lock)。根据卫星跟踪情况图可以直观地看到卫星的跟踪状况，有无周跳、是否中断等信息。

具体来说，所选的静态采集 D055 的 GPS、GLONASS 和 BDS 卫星跟踪情况大部分皆连续，少部分存在中断，但中断并不频繁，从图中总的来看共有 38 颗卫星（10 颗 GPS+10 颗 GLONASS+18 颗 BDS），GLONASS 周跳最少，GPS 周跳较少，而对于 BDS，周跳极为频繁，比如 C01/C03/C04/C05/C06/C08/C09/C13/C16，周跳在整个观测时段上每时每刻都发生，说明模糊度极难固定，这些卫星是几乎不可用的，为保证数据处理的精度和可靠性，在后续处理时应该慎用该卫星的数据，比如我们在 CGO 软件的处理静态数据时，也对残差序列图执行了相应的禁用单个卫星的操作。

对于 RTK D005 基站静态采集的数据来说，周跳现象明显减少，说明架设基站的选址非常棒，没有复杂环境遮挡，而且周跳大多发生在观测时段的起始部分，这可能是刚开始观测时，模糊度没有固定好，而随着观测时间变长，模糊度已经得到很好的固定，加之期间观测条件好，数据连续且周跳很少。也可以注意到，与另外两组观测数据相比，RTK 基准站 D005

不仅可以收到 GPS、GLONASS、BDS 的卫星信号，也可以收到 QZSS、GALILEO 的卫星信号(E07/E08/E13/E15/E26 等、J03/J04 等)，总共 88 颗卫星(31 颗 GPS 卫星+13 颗 GALILEO+3 颗 QZSS+16 颗 GLONASS+25 颗 BDS)。这进一步印证了接收机良好的观测条件。但同时也发现 GPS 卫星观测中断特别多，而 GLONASS 以及 BDS 周跳特别少，且中断较少，从这个角度上出发，此观测时段的 GLONASS 与 BDS 的观测数据相对更可靠（因为仅从周跳发生频率来判断数据是否可用是片面的）。

对于 RTK 流动站的动态数据采集，观测到的卫星数比 D055 静态测量（38 颗）观测到的卫星多（因为流动站的位置变化，往往会在不同位置更多地接收到不同类型卫星不同频点的信号），有 46 颗卫星（15 颗 GPS 卫星，10 颗 GLONASS 卫星，21 颗 BDS 卫星）。从图中看，动态相比静态的观测数据，卫星跟踪数据的质量明显更差，中断更多，C01~C16 周跳频繁几乎不可用，而 GPS 也有频繁信号失锁中断，周跳在信号中断的起始位置非常频繁。

4.1.2 卫星天空视图

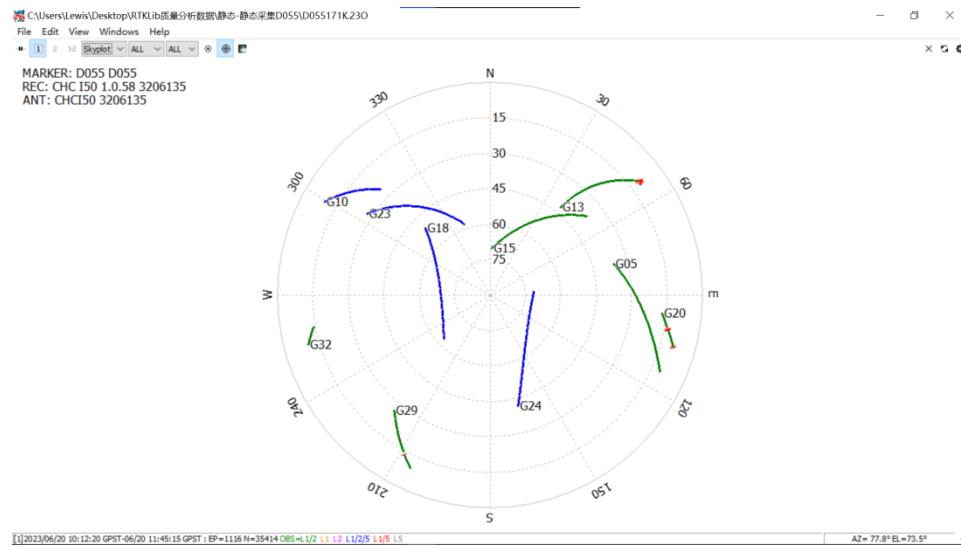


图 4.1.2.1 20230620 静态采集 D055

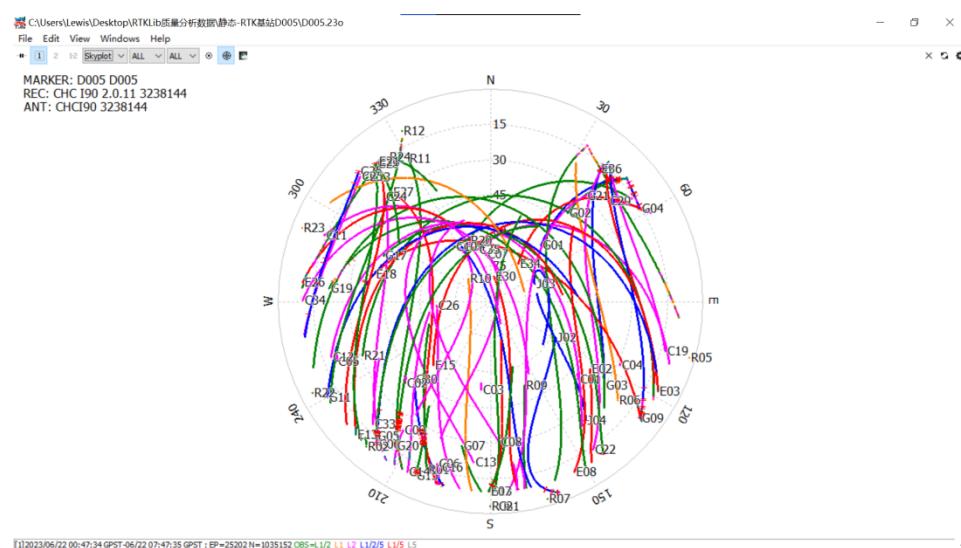


图 4.1.2.2 20230622 RTK 基站静态采集 D005 (总视图)

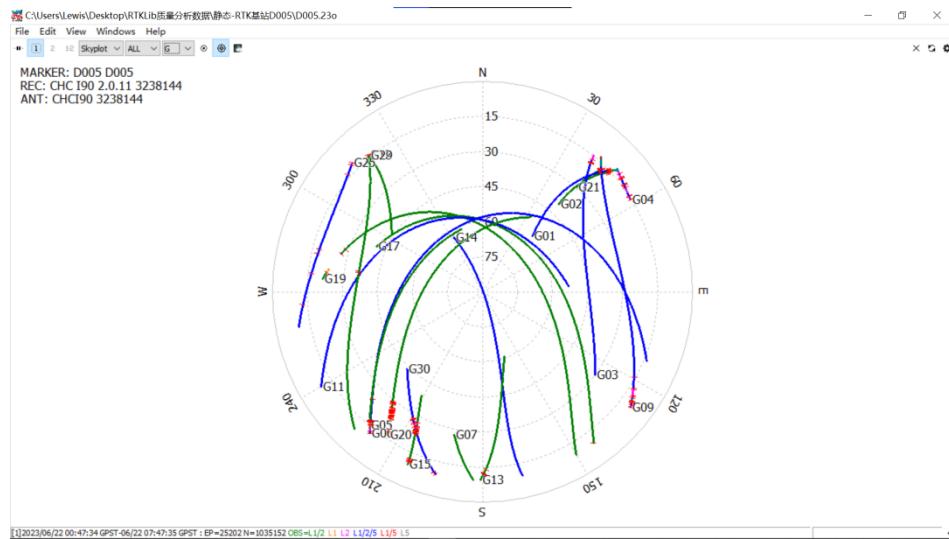


图 4.1.2.3 20230622 RTK 基站静态采集 D005 (GPS 视图)



图 4.1.2.4 20230622 RTK 基站静态采集 D005 (GLONASS 视图)

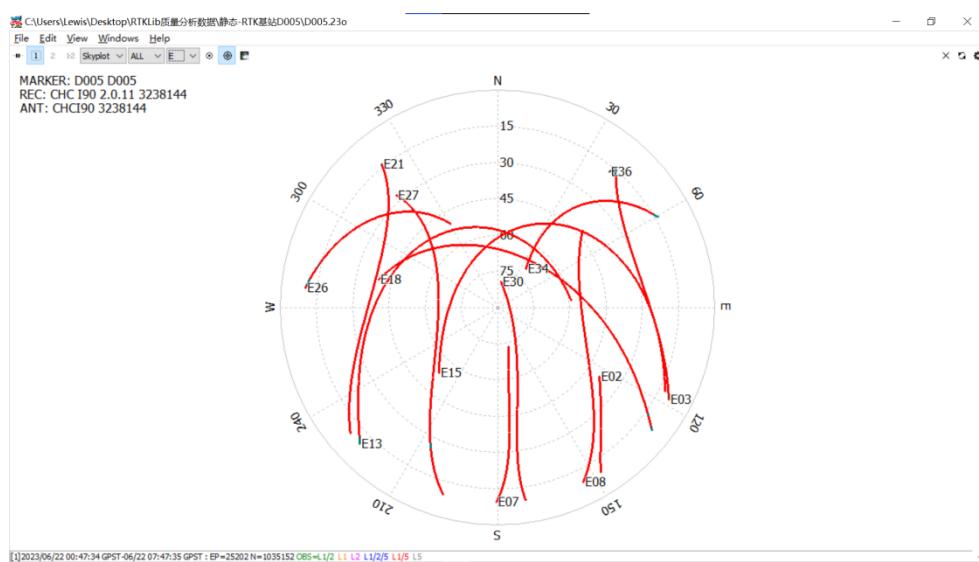


图 4.1.2.5 20230622 RTK 基站静态采集 D005 (GALILEO 视图)

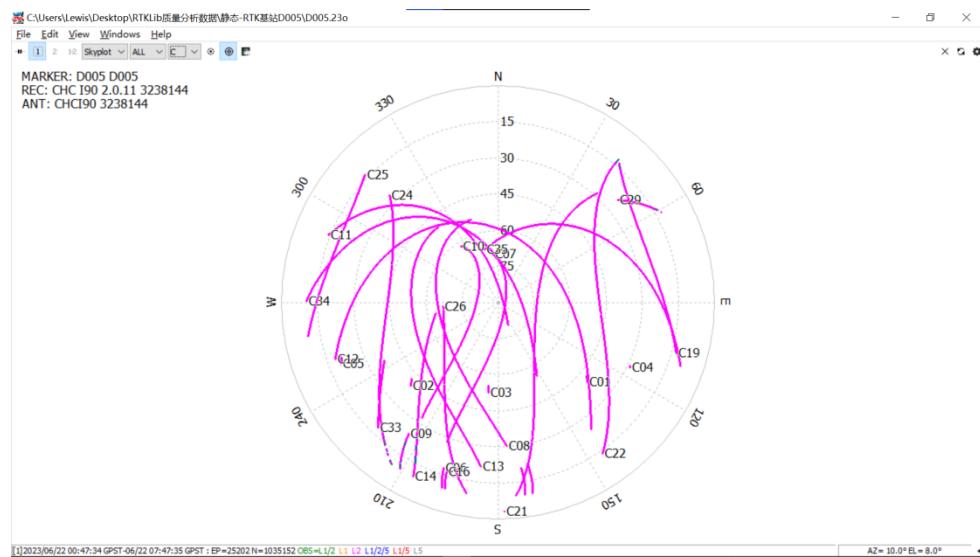


图 4.1.2.6 20230622 RTK 基站静态采集 D005 (BDS 视图)

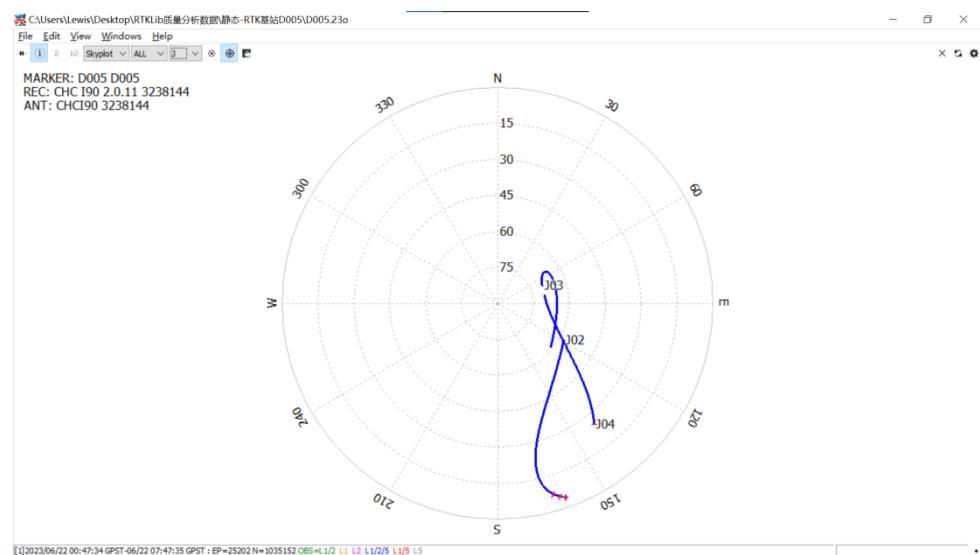


图 4.1.2.7 20230622 RTK 基站静态采集 D005 (QZSS 视图)

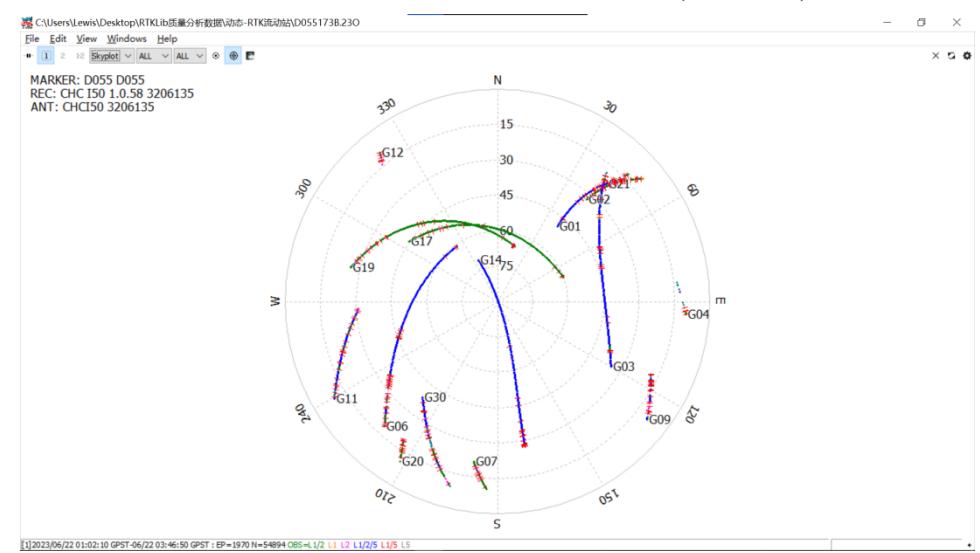


图 4.1.2.8 20230622 RTK 流动站动态采集



分析：

从天空视图可以看出观测时段卫星的分布情况。它是以测站为中心，原点是测站的天顶方向，根据卫星高度角和方位角绘制出来的。若根据广播星历计算得到某一时刻某一卫星的位置，就可以得到该卫星相对于测站的高度角和方位角，将这个点绘在图上，依此就可以作出所有卫星在整个观测时段的天空视图。

在这 3 组数据中，RTK 基准站 D005 的观测时间比其余 2 组更长（达到 6h 以上），所得的卫星天空视图更完整，且观测条件优秀，有更多个数更多种类的可选卫星。而静态采集 D055 反映的是在 1h 多不到 2h 的观测时段时长，RTK 流动站接收机采集的动态数据是 3h 左右的观测时段时长，它们的卫星天空视图相对于 D005 基准站的观测，对于每颗卫星来说只有完整轨迹的一小段。

在 rtkplot.exe 程序中也可以选择只看某一个系统或某颗卫星的天空视图，如上图所示，我对 D005 测站静态测量的天空视图分类展示。一般来说，卫星数量越多分布越均匀，卫星的天空视图也就越均匀。而无论在哪个图中都可以发现天空视图上方一块是空白的，这其实与卫星的轨道倾角和测站的纬度有关。

以 GPS 卫星为例，其轨道倾角为 55°，而测站的纬度也是在北半球中纬度地区，这样就会导致天空视图上半部分有一块真空区域。而图中低高度角的部分有一些红色的短线表明有周跳发生，且多发生频点信号中断或失锁现象，这也说明了低高度角时卫星的观测数据质量不是很好，更容易受大气延迟与多路径效应的影响。而其他卫星也是类似的，在天空视图的北方向都有空白。再以 BDS 为例，观察天空视图，发现 C01、C02、C03、C04、C05 的方位角和高度角几乎保持不变，这是因为 C01~C05 这 5 颗卫星都是地球同步轨道卫星(GEO)。另外，观察 QZSS 的天空视图的卫星轨迹与大多数其他卫星不同，这是因为 QZSS 是由 3 颗准天顶轨道的 IGSO 卫星 +1 颗地球同步轨道卫星组成的，目的就是在 GPS 全球覆盖的基础上，实现针对日本本土区域的卫星导航增强功能，对 GPS 定位精度进行修正提高。我们观察到的 J02~J04 三颗 IGSO 卫星的轨道，固然与 MEO 卫星不同。

4.1.3 卫星数及 DOP 值

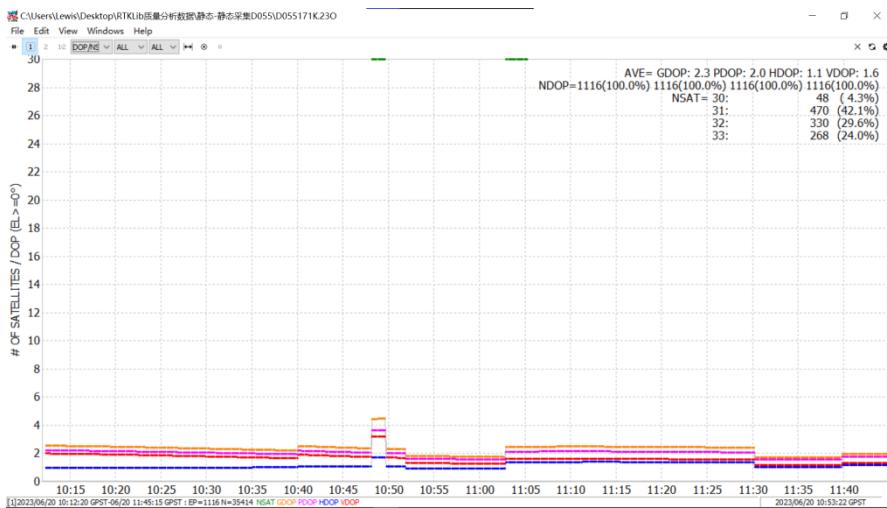


图 4.1.3.1 20230620 静态采集 D055

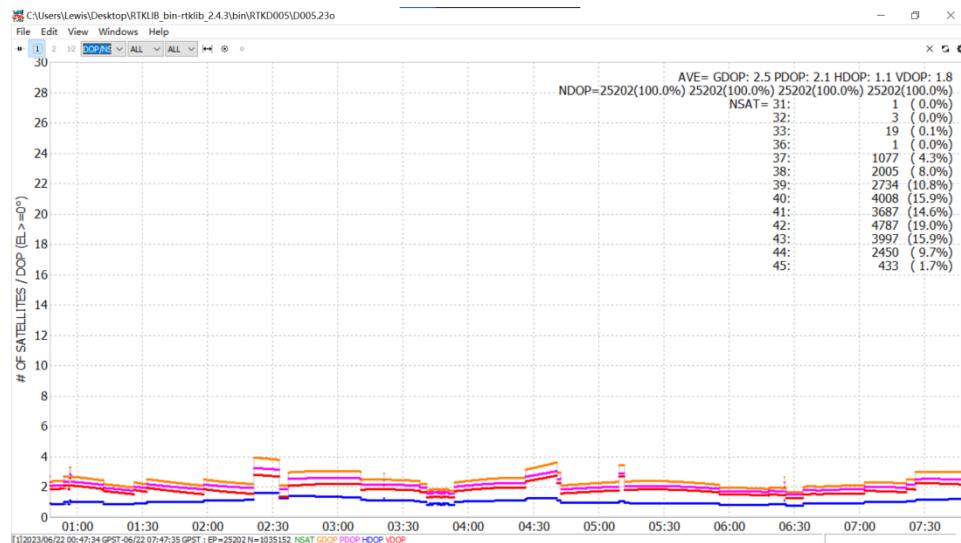


图 4.1.3.2 20230622 RTK 基站静态采集 D005

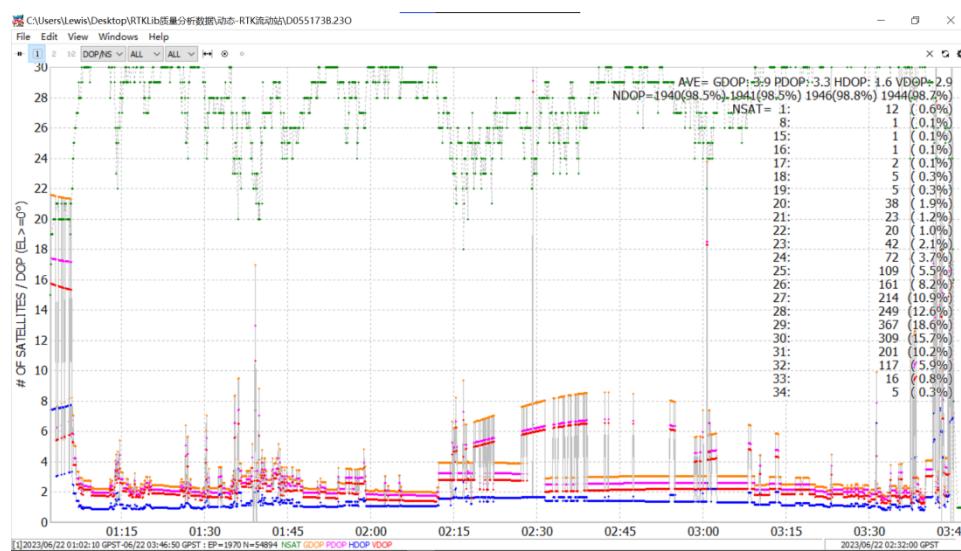


图 4.1.3.3 20230622 RTK 流动站动态采集

分析：

从卫星数和 DOP 值的图中可以看到，上面一部分表示观测到的卫星数（最多显示 30 颗，如果观测时段可视卫星数多于 30 颗，即如上面第二张 D005 的图，可视卫星数在观测时段内都多于 30 颗，就不显示绿色的可视卫星数折线），下面表示对应的 DOP 值。从图中的右侧可以看到不同卫星数的历元数占总历元数的百分比。

而 DOP 值与卫星数和空间几何构型有关。当卫星数变化时 DOP 值也会出现变化。从图中可以很直观地看出哪些历元的 DOP 值大，哪些 DOP 值小，若已知 DOP 值随历元的这种变化，我们可以人为选择 DOP 值小的时段去观测，得到更高质量的数据。几何因子(GDOP)表征用户和可见卫星在空间几何分布的好坏。GDOP 包括位置、水平、垂向和时间精度衰减因子(PDOP、HDOP、VDOP 和 TDOP)四个参数。GDOP 等的平均值是在各图中也都可见。

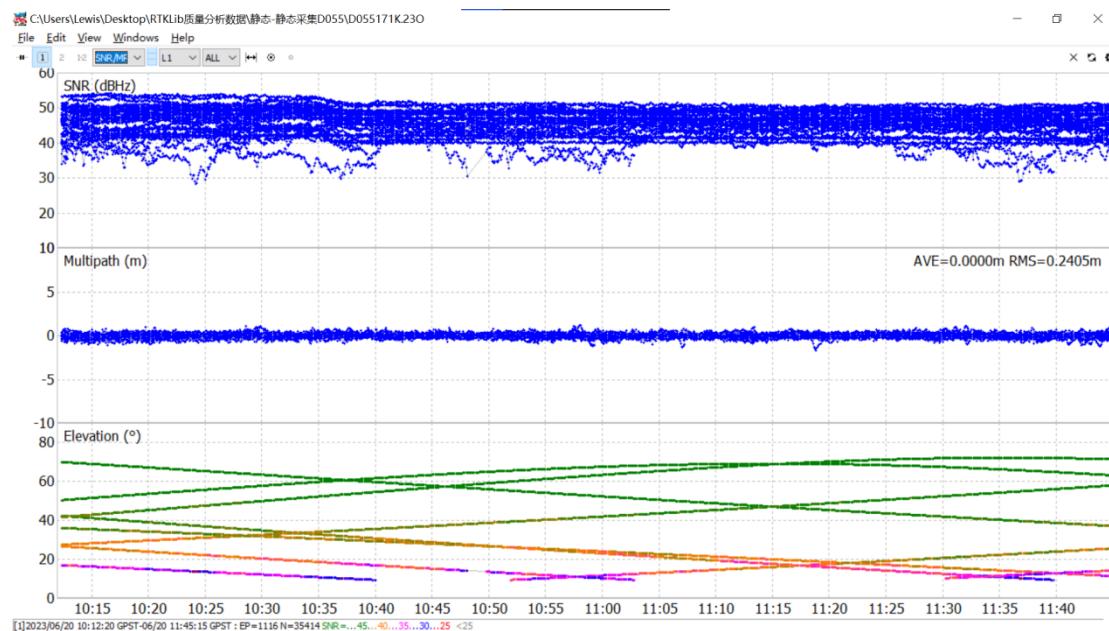
RTK 静态 D005 基准站在每个观测时刻观测到的卫星数更多，大概分布在 42 颗左右，其实得益于卫星数的增加，其平均 GDOP 值应该更低，但 RTK 基准站的 GDOP 为 2.5，这要比 D055 静态测量的 GDOP 为 2.3 更大，而上面我们分析的根据卫星跟踪情况的角度看，



静态 D055 的观测条件是没有 D005 的好的。但 D005 的 GDOP 却更大，其原因可推测为：我们前面做过计数，RTK 基准站的 D005 测站最多总共观测到 88 颗卫星，但实际稳定观测的卫星个数为 42 左右，说明不稳定卫星的干扰非常大，卫星数增多对 GDOP 的增益小于不稳定的卫星的进入离开可视范围带来的误差抖动。静态测量的 GDOP 值在 2.3~2.5 左右，而动态测量的 GDOP 值达到了 3.9，这也是因为接收机位置移动导致观测条件变差，几何构型不断杂乱变化导致的，动态测量的精度不如静态好。RTK 动态测量流动站接收机的卫星数在 29 颗左右。流动站的观测条件总的来看也不如静态的观测条件好，可视卫星数也没有明显的优势。

下面我想研究站单系统与组合多系统的 GDOP 对比以及卫星数，但是 RTKLib 好像总是有 bug：如果单导入观测值文件 (*.23O)，那么切换到单系统比如单 BDS 可以呈现 GDOP 等 DOP 值的折线图，但如果再导入导航电文文件，DOP 值的可视化折线就空白不存在了，反复试了很多次，不知道哪里出了问题。这也不是卫星数过少无法解算的问题，我尝试的系统的可视卫星数都远大于 4 颗（我试了 BDS、GLONASS）。但总的说，我根据只看没导入导航电文的 rtkplot 呈现的图像（得出的结论是相似的），可以得出以下结论：就单 GPS 或者单 GLONASS 或单 BDS 的的卫星数及 DOP 值而言，单系统时，GPS 卫星数以及 GLONASS（或 BDS）卫星数都显然更少，并且单系统的 DOP 值和多系统相比其 DOP 值会翻倍或者明显增大，这说明多系统联测的精度要明显优于只依靠某一系统的精度。并且在卫星数少时，DOP 值受卫星数的影响更大。

4.1.4 信噪比/多路径/高度角



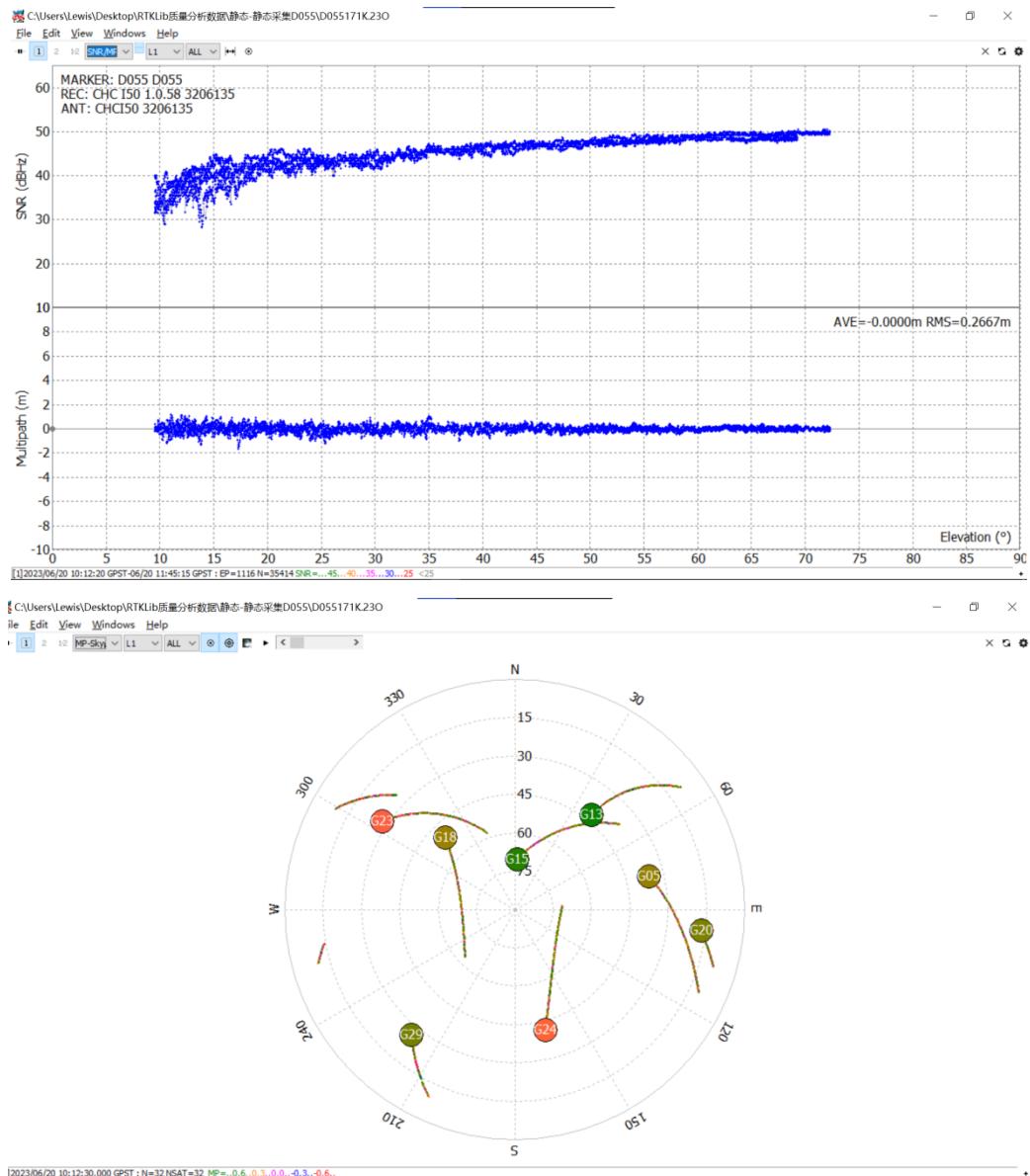
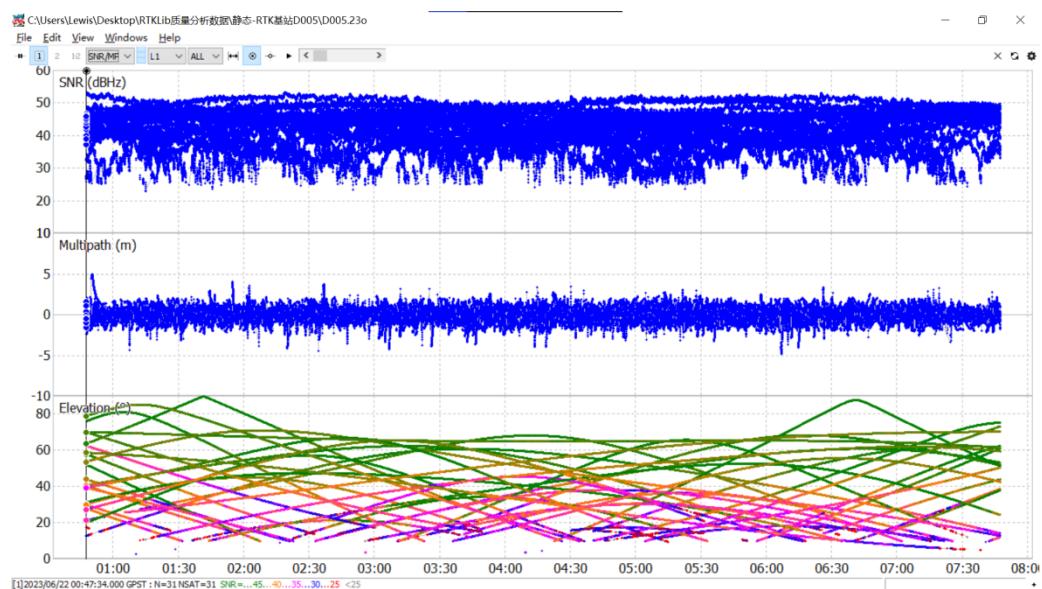


图 4.1.4.1 20230620 静态采集 D055



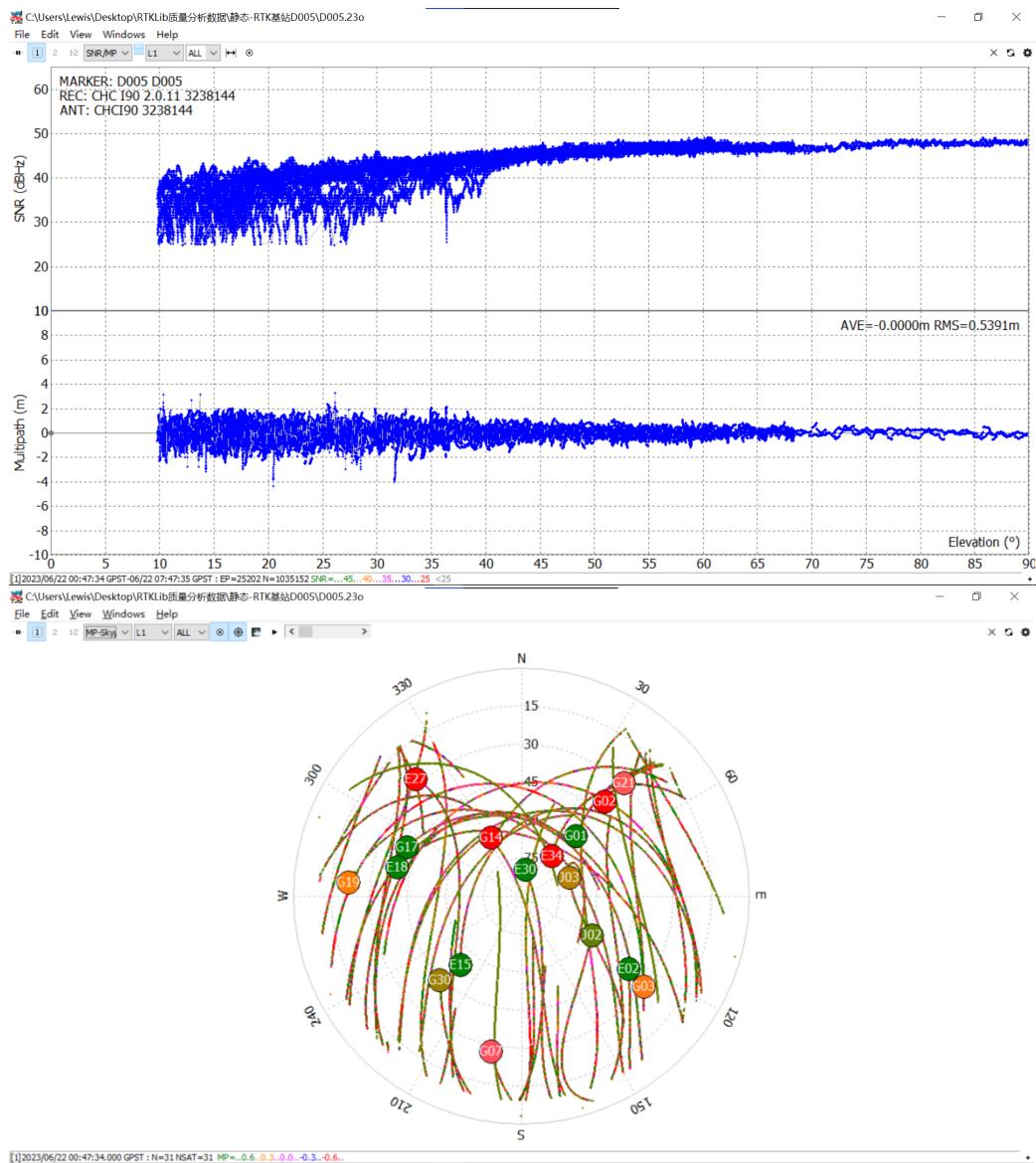
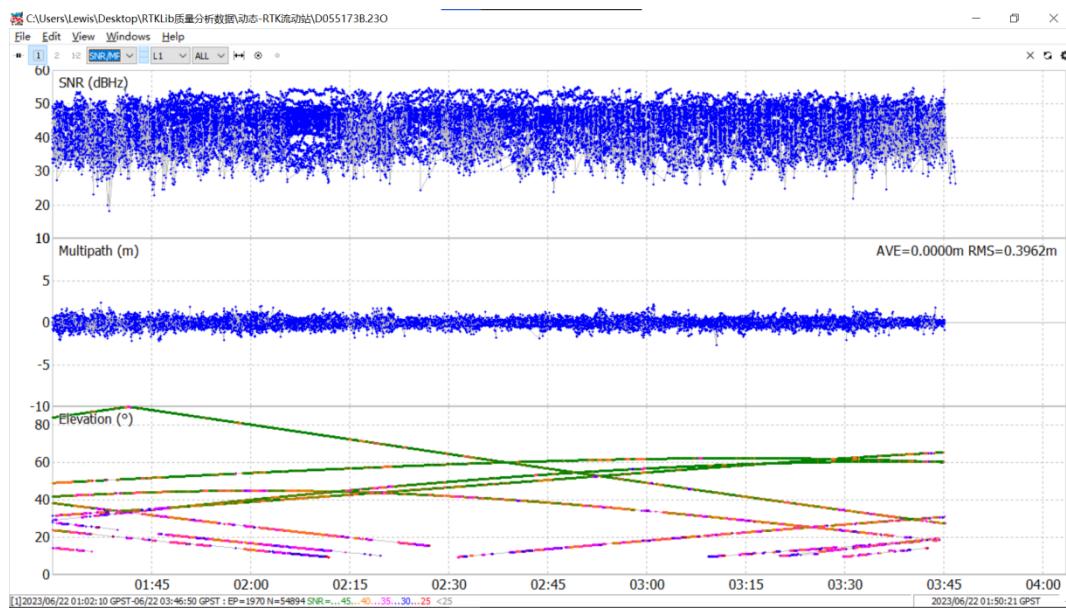


图 4.1.4.2 20230622 RTK 基站静态采集 D005



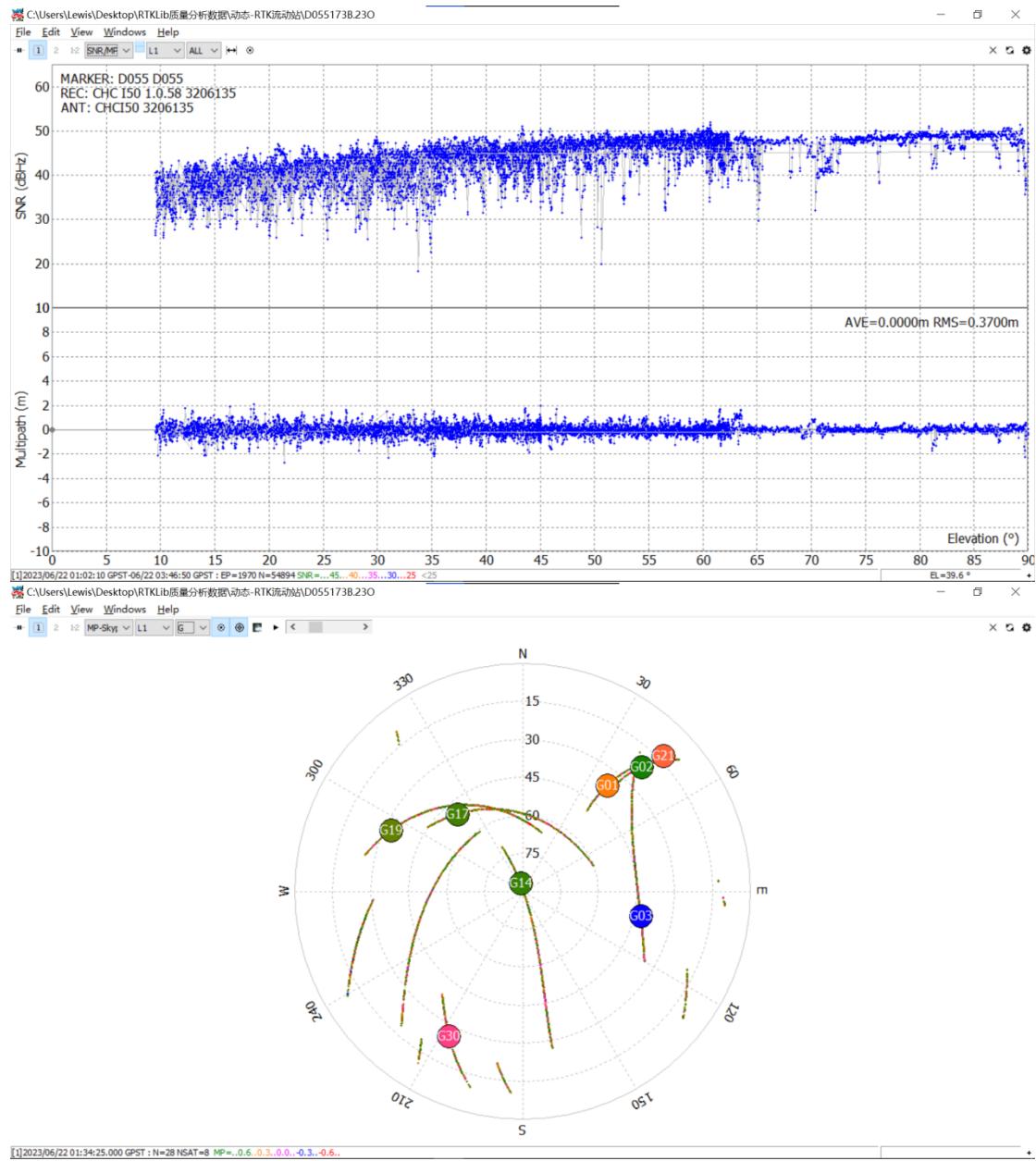


图 4.1.4.3 20230622 RTK 流动站动态采集

要评判数据质量怎么样，可以看信噪比。一般来说信噪比越强则数据质量越好。这几组数据中，信噪比范围大致在 35dBHz~50dBHz，也有少量信噪比在 30dBHz 或更低。这几组数据的多路径的均方值 RMS 都在亚米级。多路径在低高度角时可达 1~2m 左右。

而信噪比、多路径、高度角这三者也有联系。信噪比越高，则说明卫星信号受噪声的影响越小，而卫星高度角较低时，传播路径更长，多路径误差也更大，此时的信噪比也会更低，且信噪比和多路径误差都在低高度角时抖动更加剧烈，建筑物和树木的遮挡、大气延迟影响增强（尤其是对流层）是很重要的原因。当卫星高度角增大时多路径效应明显改善，信噪比也明显提高。

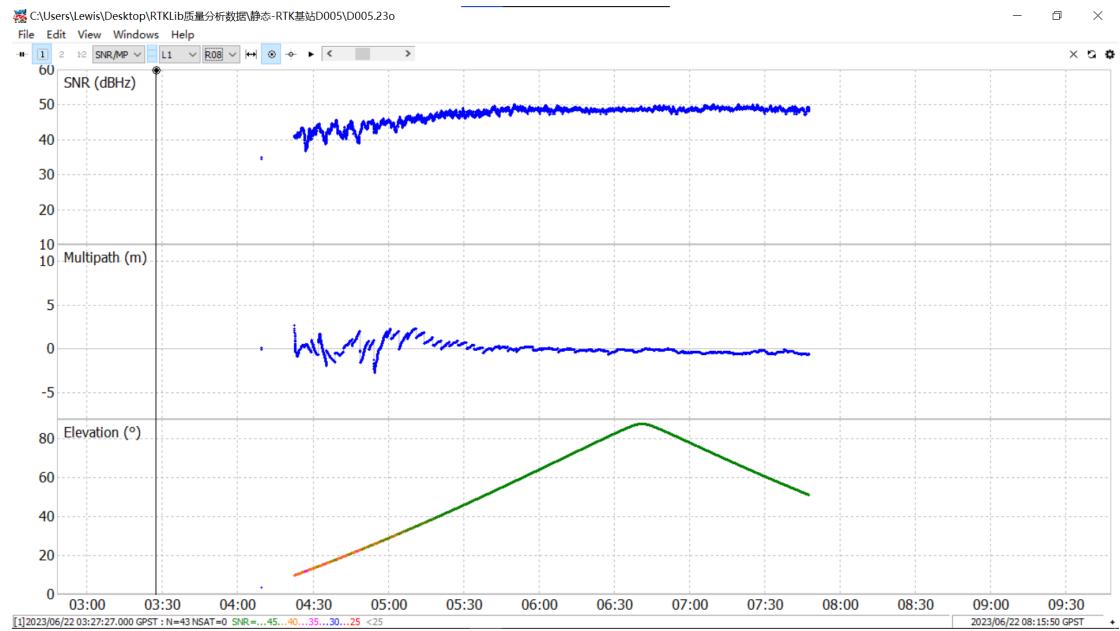


图 4.1.4.4 20230622 RTK 基准站 D005 静态采集 GLONASS R08

用 RTK 流动站的数据看或者在下拉列表中选择某单个卫星则看的更清楚，也可以切换不同的频点进行比较查看。如上图所示，印证了卫星高度角越高，信噪比越高，多路径也越小这一结论。而应对多路径效应的方式，可以采取：外业观测上适当延长观测时间；数据处理上给低高度角的卫星信号降权（或对低高度角设置 mask）、参数法、滤波法、信号分析法等。



4.2 基于自编程序的 GNSS 观测数据质量分析

4.2.1 程序实现过程

此次质量分析的数据来自 RTK 基准站静态采集的数据，文件为 D005.23O。因为其观测时段较长且连续，基站架设的观测条件较好，可视卫星数目较多，数据全面而完整，因而选用之。

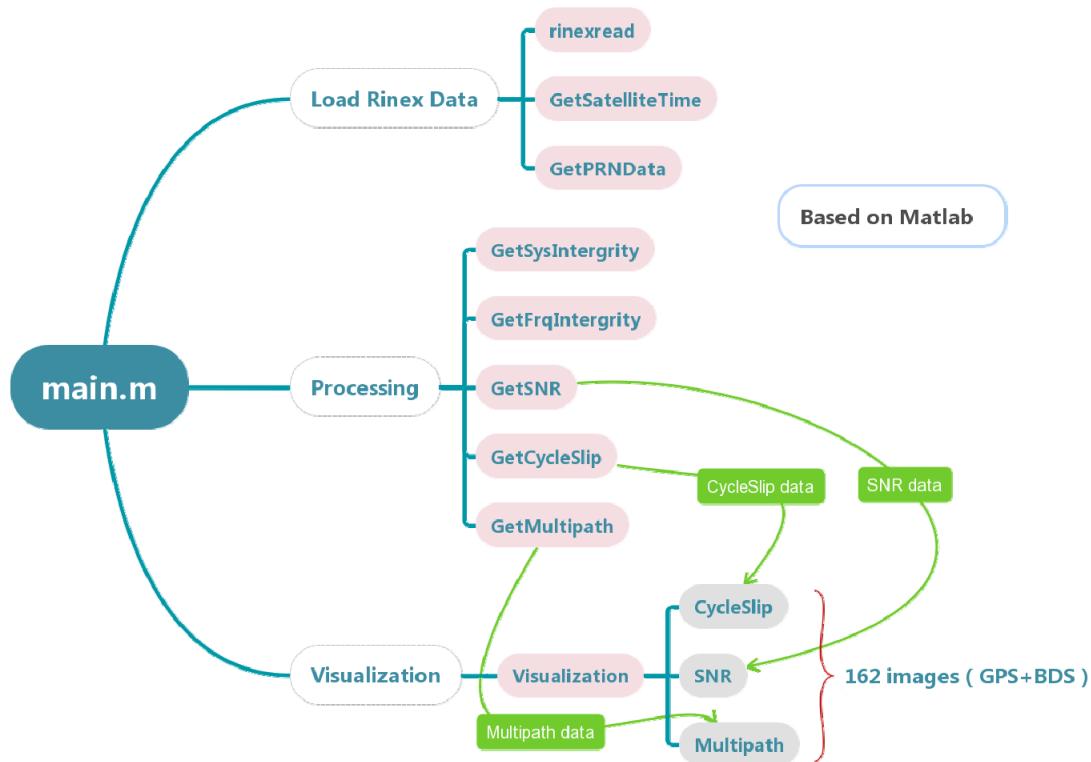


图 4.2.1 matlabQC 程序构型

4.2.2 数据完整性检测

按公式(1)、公式(2)计算单频点观测数据完整率和单系统观测数据完整率。

$$DI_f = \left(\sum_{j=1}^n A^j / \sum_{j=1}^n B^j \right) \times 100\% \quad (1)$$

$$DI_s = \left(\sum_{j=1}^n C^j / \sum_{j=1}^n D^j \right) \times 100\% \quad (2)$$

其中，

DI_f —— 单频点观测数据完整率

n —— 在观测时间段内，观测的卫星总数

A^j —— 在观测时间段内，第 j 颗卫星在某频点的实际观测历元总数

B^j —— 在观测时间段内，第 j 颗卫星在某频点的理论历元总数

DI_s —— 单系统观测数据完整率



C^j ——在观测时间段内，第 j 颗卫星所有频点均有有效观测数据的历元数

D^j ——在观测时间段内，第 j 颗卫星的理论历元总数

在此呈现的结果，GPS 中研究的总频点是 L1/L2，BDS 中研究的总频点是 B1/B3，由于 GPS 的 L5 载波和 BDS 的 B2 载波观测数据特别少，且 L1/L2、B1/B3 已经构成双频组合，故不考虑 L5/B2。

表 4.2.2.1 GPS 与 BDS 单卫星数据完整性

GPS 卫星编号	数据完整性	BDS 卫星编号	数据完整性
G01	90.61%	C01	100%
G02	92.18%	C02	100%
G03	96.47%	C03	100%
G04	52.47%	C04	100%
G05	98.45%	C05	99.99%
G06	98.22%	C06	100%
G07	100%	C07	100%
G09	89.96%	C08	100%
G11	100%	C09	52.71%
G12	99.68%	C10	100%
G13	99.54%	C11	100%
G14	100%	C12	100%
G15	88.90%	C13	100%
G17	99.88%	C14	91.10%
G19	99.58%	C16	100%
G20	93.97%	C19	96.53%
G21	84.14%	C21	100%
G25	98.17%	C22	97.98%
G29	99.96%	C24	96.15%
G30	94.47%	C25	100%
		C26	100%
		C29	96.09%
		C33	100%
		C34	100%
		C35	99.98%
		C38	100%
		C39	100%
		C40	100%



C44	99.39%
C45	100%
C56	99.99%
C57	98.76%
C59	100%
C60	100%

表 4.2.2.1 GPS 与 BDS 系统数据完整性

卫星系统	GPS	BDS
系统数据完整性	96.97%	99.24%

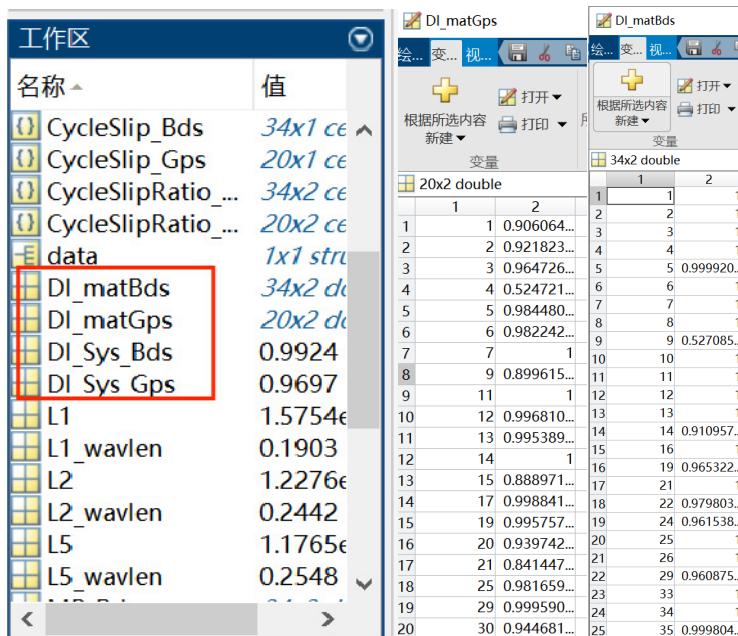


图 4.2.2.1 GPS 与 BDS 数据完整性工作区数据

数据完整性指标反映观测时段内数据的可用性与完好性，数据完整性不仅体现了接收机的优劣，同时也反映了观测环境的好坏。

从上面的数据可以看出：

- ①GPS 系统和 BDS 系统的双频可用数据均在 95% 以上，质量合格（一般要求 Integrity > 95%），且 BDS 比 GPS 的观测数据更完整更优秀；
- ②大部分 GPS、BDS 卫星的数据完整性均在 95% 以上，部分卫星如 G07/G11/G14、C01~C04 等的数据完整性达到 100%，说明双频观测值无观测时间中断，观测条件相对较好，卫星高度角不差；
- ③而如 G04 的数据完整性却为 52.47%，反映出接收机难以跟踪该卫星，观测条件差，推测接收机与卫星的几何构型较差，观测时段内卫星高度角普遍较低，推测信噪比较低、周跳/粗差频繁。



4.2.3 信噪比/载噪比分析

信号接收功率的强弱并不能完整地用来描述信号的清晰程度或者质量好坏，信号相对于噪声的强弱才能用于更好的评判。信噪比是指一个电子设备或者电子系统中信号与噪声的比例，定义为信号功率 P_R 与噪声功率 N 之间的比率，如公式(3)所示：

$$SNR = \frac{P_R}{N} \quad (3)$$

考虑到电路中带电粒子的热运动形成热噪声，我们通常将噪声功率用一个大小相同的热噪声功率 N 所对应的噪声温度 T 等价表示，两者之间的关系可以表示为公式(4)：

$$N = kTB_n \quad (4)$$

其中， N 的单位是瓦特(W)， T 的单位是开尔文(K)， B_n 是以赫兹为单位的噪声带宽，玻尔兹曼常数 k 等于 $1.38 \times 10^{-23} J/K$ 。由于噪声功率 N 以及相应的信噪比 SNR 与噪声带宽 B_n 的取值大小有关，因而每次给定一个信号比值，一般应当随即指出其所采用的噪声带宽值，这常常会给信噪比的应用带来不便。因而，GNSS 接收机一般采用载噪比 C/N_0 来描述观测信号质量，其大小与接收机所采用的噪声带宽 B_n 无关，有利于不同接收机之间性能的对比。载噪比越高，则观测信号的质量越好。

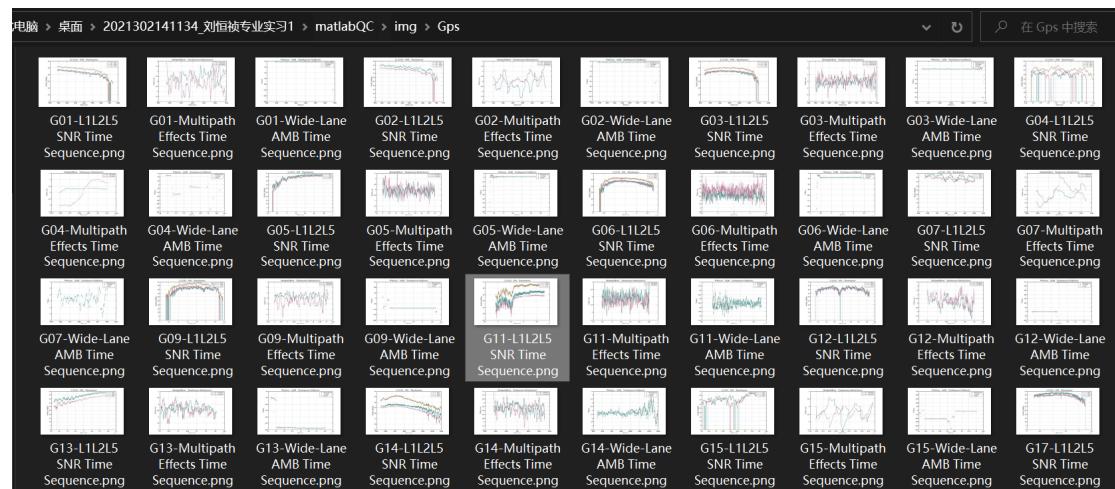
载噪比如公式(5)所示：

$$C/N_0 = \frac{P_R}{kT} \quad (5)$$

式中，接收机中的热噪声用大小相同的热噪声功率所对应的温度 T 等价表示。其中， C/N_0 的单位为 Hz(或 dBHz)。

在自编程序内，SNR 数据的获取较易，直接从 Rinex 的观测值 O 文件中可读取。所有 GPS/BDS 卫星的 SNR 时序图共 54 张均保存在目录中，现展示图片目录的全部图片概略图，如(a)(b)所示。

(SNR、Cycle Slip、Multipath)



(a)



(b)

图 4.2.3.1 GPS 的 Visualization 保存目录

下面摘取两个卫星系统部分具有代表性的可视化 SNR 结果进行分析。首先分析 GPS 的部分卫星 SNR 图，现选择 G03 卫星，如下图所示，按照天内秒的时间序列绘制了 SNR-观测时间图。

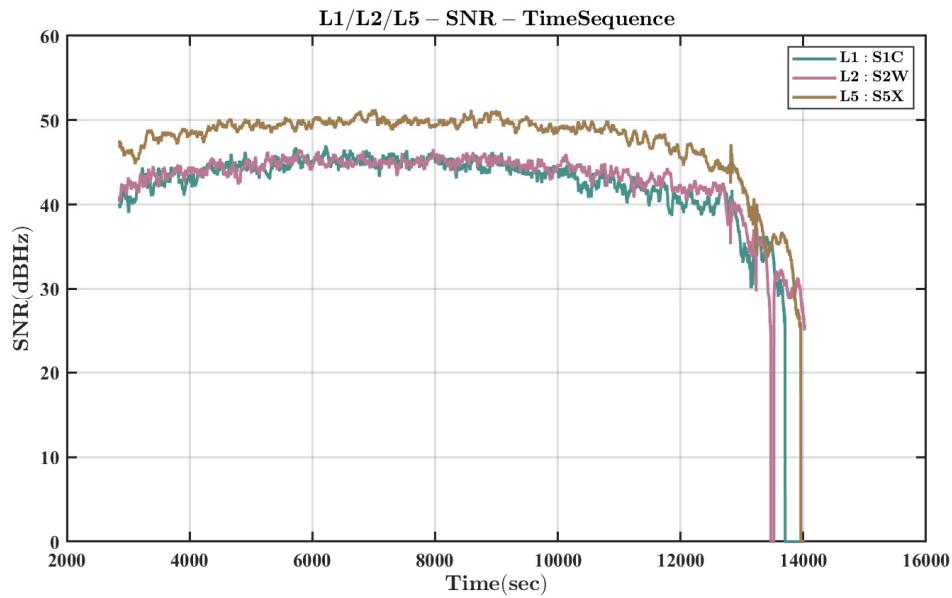


图 4.2.3.2 GPS: G03 各波段 SNR 时序图

分析可得：

①G03 的 SNR 时序图随观测时间的推移，L1、L2、L5 波段的 SNR 呈现出先上升后下降的趋势，反映出接收机相对卫星的卫星高度角变化为先增大后减小，进一步推测：SNR 较好时周跳较少，而 12000s 后的观测时段 SNR 迅速减小，卫星高度角降低，观测条件较差，周跳频繁；

②L5 频点的 SNR 要优于 L1、L2 频点的。这是因为 L5 码是 GPS 现代化新增的码，码



元宽度: 29.3m (码元宽度同 P 码, 测距精度与 P 码相当), 码速率: 10.23Mbps (码速率同 P 码), 可提供更长的积分时间, 利于捕获树林等隐蔽环境较弱的卫星信号, 用于生命安全、交通等领域, 其 SNR 较好;

③大部分观测时段三个频点的 SNR 均保持在 40dB_H 以上, G03 的观测质量相对较高。且由理论推知当 SNR 过小时 (小于 40dB_H 就需要引起注意, 30dB_H 已经很差了), 观测条件过差, 模糊度难以固定, 易发生周跳, 往往此时卫星高度角也很小, 受到大气延迟的影响加重。

相似的分析可应用在 GPS 其他卫星, 下面简要展示 G09、G11 的 SNR 时序图, 得到的结论与 G03 是相似的:

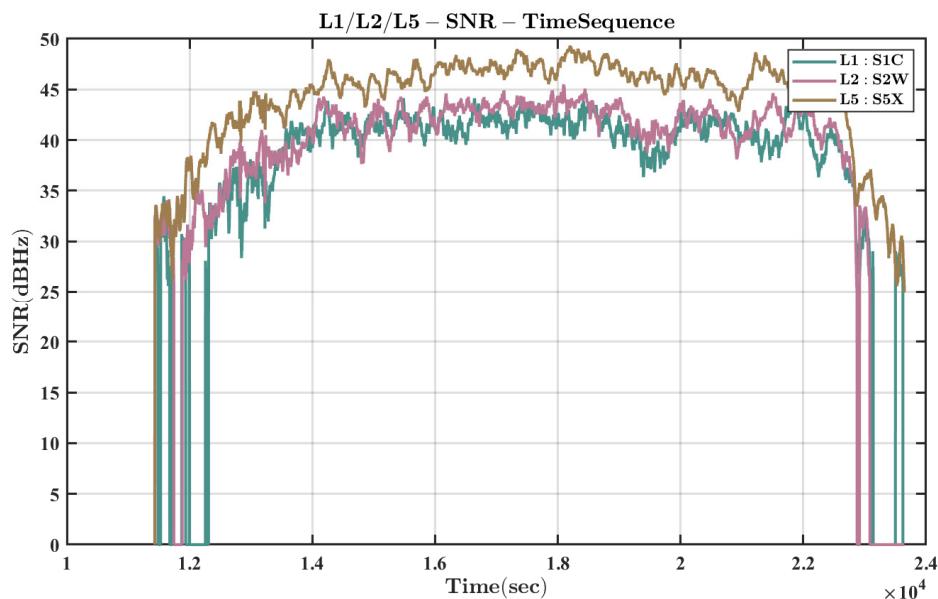


图 4.2.3.3 GPS: G09 各波段 SNR 时序图

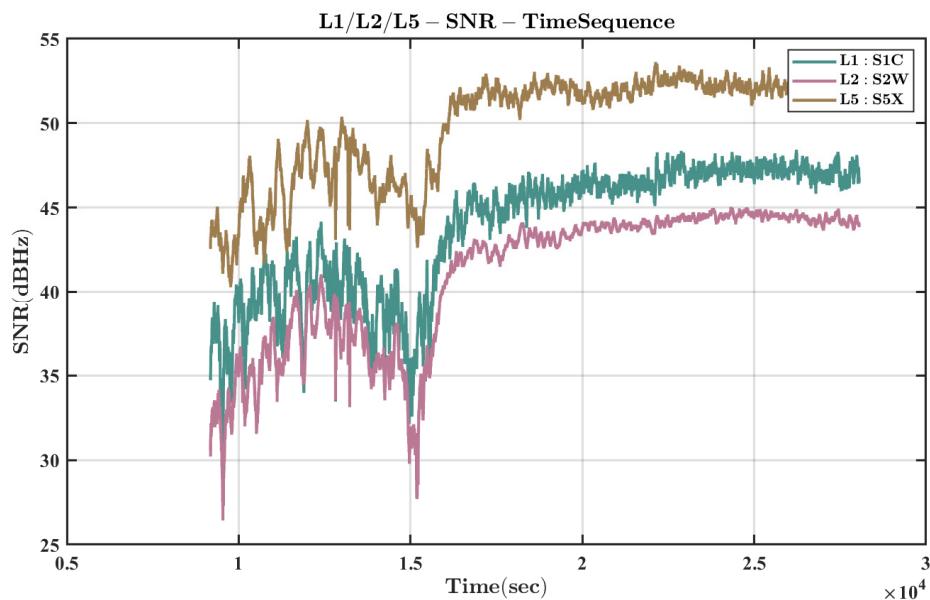


图 4.2.3.4 GPS: G11 各波段 SNR 时序图



对于 BDS，自编程序的 SNR 方面完整地获取了 Renix 观测值文件中的 B1I/B2I/B3I 频段的数据，同 GPS 的数据处理模型。

而对于我国的 BDS 系统由 GEO/IGSO/MEO 三种卫星组成，由于 GPS 只由 MEO 卫星组成，所以对 BDS 卫星的分析，可以举三个例子分别对应三种卫星，分别是：GEO->C01, IGSO->C07, MEO->C24；下面依次对其分析。

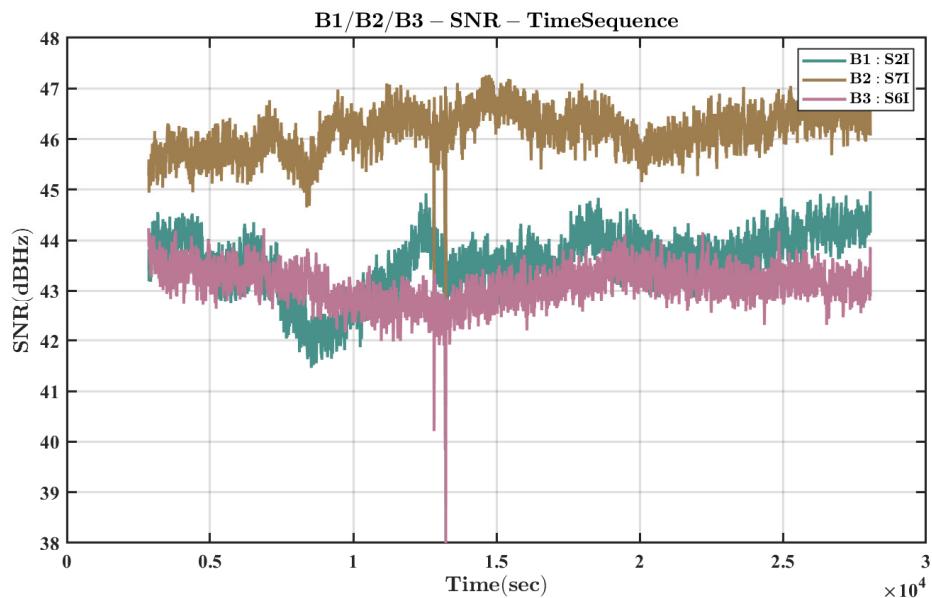


图 4.2.3.5 BDS: C01(GEO) 各波段 SNR 时序图

分析可得：

①C01 的 SNR 时序图随观测时间的推移，B1、B2、B3 波段的 SNR 并没有呈现出像 GPS 的 MEO 上升与下降的相同规律性趋势，而是以小范围的波动，上下界之差在 2 dBHz 左右，反映出接收机相对卫星的卫星高度角发生小范围的小角度变化，这是因为 GEO 是地球同步轨道卫星，卫星与接收机的相对位置基本不变，受站星相对位置导致的观测条件变化影响较小，此时主要受大气的变化（对流层水汽变化、电离层 TEC 等）。进一步推测：北斗的 GEO SNR 相对都很好，如果 GEO 卫星的平均 SNR 较高，那么也不会发生 SNR 的规律性大范围变化，发生的周跳一般较少，数据可靠性高。卫星高度角始终较高；

②C01 B2I 频点的 SNR 要优于 B1I、B3I 频点的。推测原因为卫星在 B2I 频点发射功率较大。另外 B2I 是北斗二号卫星的工作频点即仅存在于而 C01~C16，在北斗三号中，不存在 B2I 频点，而是 B1C/B2a/B2b 频点；

③除了 13500s 时刻左右发生的 SNR 突变外，其他所有观测时段三个频点的 SNR 均保持在 41dBHz 以上，C01 的观测质量非常高。而且由理论推知 GEO 的 SNR 整体上随时间序列推移变化不大，与时间相关性小（同①的分析）。

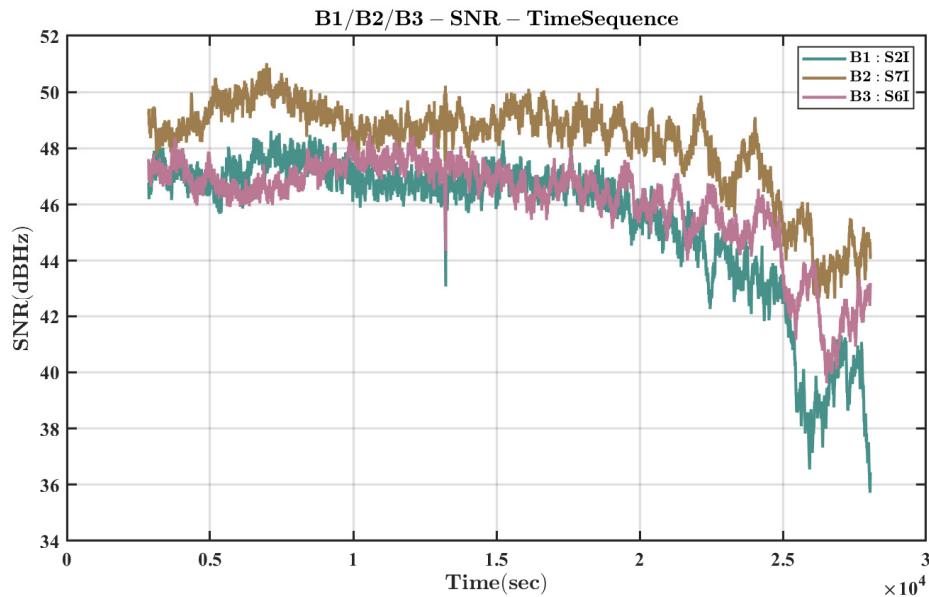


图 4.2.3.6 BDS: C07(IGSO) 各波段 SNR 时序图

对于 IGSO（倾斜地球同步轨道卫星）的分析是相似的，明显不同的一点是 SNR 随时间推移的变化趋势：以 C07 为例的 IGSO 卫星 SNR 的变化趋势不同于 MEO/GEO 卫星，在本次观测时段内，C07 呈现出整体上 SNR 变小，局部 SNR 出现增大极值的趋势。

原因为，IGSO 卫星轨道高度与 GEO 卫星相同，轨道倾角为 55 度，星下点轨迹为“8”字，类似约两个周期的正弦波。因而 IGSO 卫星信号抗遮挡能力强，尤其在低纬度地区，图中可以看到 C07 在大部分观测时段的 SNR 在 46~50dBHz，SNR 非常优秀。

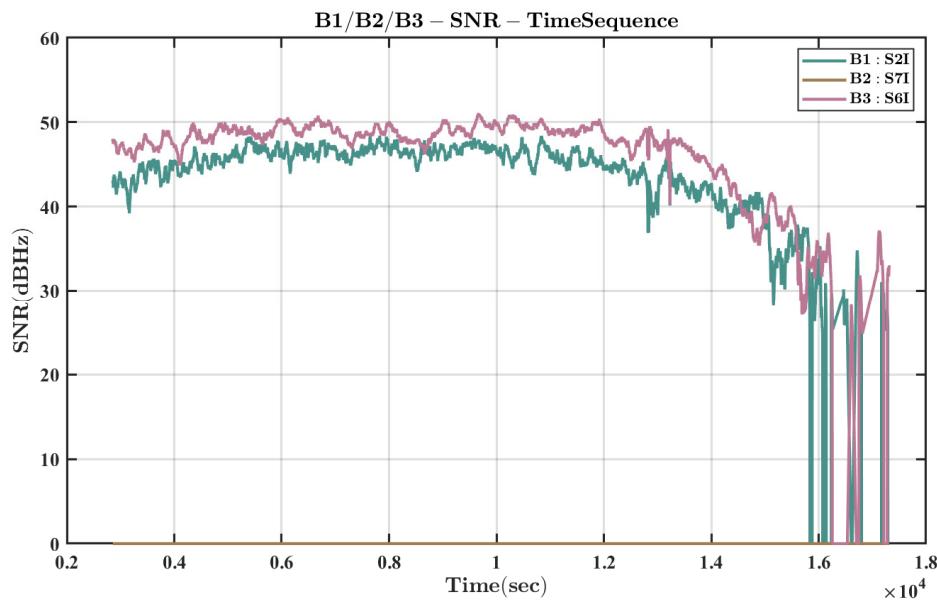


图 4.2.3.7 BDS: C24(MEO) 各波段 SNR 时序图

而 BDS 的 MEO 卫星的 SNR 变化规律，与 GPS 是相似的。观测时段内，SNR 整体上总是呈现出增大->减小->增大->减小的循环；对应的卫星高度角变化趋势是，低高度角->增大->90°->减小->低高度角。



4.2.4 载波相位周跳探测分析

在此，程序采用 MW 组合进行粗差和周跳分类的第一步探测，而后使用 GF 组合双差对历元间（第一步判断后，有效的无问题的历元）双差观测值进行二次周跳加强探测。

A) 第一步，采用 MW 组合观测量 LMW 为检测量进行粗差探测。按公式(6)、公式(7)、公式(8)构造 MW 组合观测量 L_{MW} 和递推公式

$$L_{MW} = \frac{1}{f_{k_1} - f_{k_2}} (f_{k_1} \varphi_{k_1} - f_{k_2} \varphi_{k_2}) - \frac{1}{f_{k_1} + f_{k_2}} (f_{k_1} \varphi_{k_1} + f_{k_2} \varphi_{k_2}) \quad (6)$$

$$\overline{L_{MW}(t_i)} = \frac{i-1}{i} \overline{L_{MW}(t_{i-1})} + \frac{1}{i} L_{MW}(t_i) \quad (7)$$

$$\sigma^2(t_i) = \frac{i-1}{i} \sigma^2(t_{i-1}) + \frac{1}{i} (L_{MW}(t_i) - \overline{L_{MW}(t_{i-1})})^2 \quad (8)$$

式中：

f_{k_1} ——导航信号 k_1 载波的频率，单位 MHz

f_{k_2} ——导航信号 k_2 载波的频率，单位 MHz

φ_{k_1} —— k_1 频率载波相位观测量，单位 m

φ_{k_2} —— k_2 频率载波相位观测量，单位 m

ρ_{k_1} —— k_1 频率伪距观测量，单位 m

ρ_{k_2} —— k_2 频率伪距观测量，单位 m

$\overline{L_{MW}(t_i)}$ ——前 i 个历元 MW 组合观测量的均值，单位 m

$\overline{L_{MW}(t_{i-1})}$ ——前 $i-1$ 个历元 MW 组合观测量的均值，单位 m

$L_{MW}(t_i)$ ——第 i 个历元 MW 组合观测量，单位 m

$\sigma(t_i)$ ——前 i 个历元 MW 组合观测量的均方根误差，单位 m

$\sigma(t_{i-1})$ ——前 $i-1$ 个历元 MW 组合观测量的均方根误差，单位 m

B) 对于第 i 个历元 MW 组合观测量 $L_{MW}(t_i)$ ，若 $|L_{MW}(t_i) - \overline{L_{MW}(t_{i-1})}| \geq 4\sigma_{(t_{i-1})}$ ，则为超限，历元 t_i 可能是周跳，也可能是粗差。

C) 为判断历元 t_i 是粗差还是发生了周跳，进一步分析 $t_{i-1}/t_i/t_{i+1}$ 相邻 3 个历元之间的数据特征。由历元 t_{i-1} 的宽巷模糊度及方差按公式(9)、公式(10)计算历元 t_{i+1} 的宽巷模糊度及方差。

$$\overline{L_{MW}(t_{i+1})} = \frac{i}{i+1} \overline{L_{MW}(t_i)} + \frac{1}{i+1} L_{MW}(t_{i+1}) \quad (9)$$



$$\sigma^2(t_{i+1}) = \frac{i}{i+1} \sigma^2(t_i) + \frac{1}{i+1} (L_{MW}(t_{i+1}) - \overline{L_{MW}(t_i)})^2 \quad (10)$$

D) 若历元 t_{i+1} 的宽巷模糊度不超限，或者历元 t_i 和 t_{i+1} 的宽巷模糊度都超限且 $|L_{MW}(t_{i+1}) - L_{MW}(t_i)| > 1$ ，则判定历元 t_i 为粗差；若历元 t_i 和历元 t_{i+1} 的宽巷模糊度都超限且 $|L_{MW}(t_{i+1}) - L_{MW}(t_i)| \leq 1$ ，则判定历元 t_i 为周跳。把前面 $i-1$ 个历元作为一弧段，记录其 $\overline{L_{MW}(t_{i-1})}$ 值和方差 $\sigma^2(t_{i-1})$ 用于后续处理，并从历元 t_i 开始划分为一个新的弧段。

E) 采用 MW 组合观测量 L_{MW} 和 GF 组合观测量 L_{GF} 联合进行周跳检测。按照 A~D 中的判定方法进行周跳的第一次探测，如果没有周跳，则利用 GF 组合观测量进行补充探测，下面说明历元间双差 GF 组合的探测原理及其主要步骤。

F) GF 组合是利用 GNSS 信号中两个频率的载波相位观测数据组成无几何距离组合以探测周跳，以 L_1 和 L_2 载波为例，如公式(11)所示，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，该组合仅包含电离层延迟、整周模糊度、观测噪声及多路径效应误差。

$$L_{GF} = \varphi_1 - \varphi_2 = \lambda_1 \phi_1 - \lambda_2 \phi_2 = V_{Iono} + AMB + \varepsilon_{GF} \quad (11)$$

G) 如公式(12)所示，通过历元间差分得到 ΔL_{GF} 。当 GNSS 观测的采样率为 1s 时，电离层在时域上变化较为缓慢，历元间差分可以消除大部分电离层延迟残差影响，即可认为 $\Delta V_{Iono} \approx 0$ 。在没有发生周跳即 $\Delta AMB = 0$ 时， ΔL_{GF} 仅包含观测噪声和多路径效应误差，因此，可以设定一个适当的阈值(μ)进行周跳探测，当 $\Delta L_{GF} > \mu$ 时，认为发生了周跳。

$$\Delta L_{GF}(t_i) = L_{GF}(t_{i+1}) - L_{GF}(t_i) = \Delta V_{Iono} + \Delta AMB + \Delta \varepsilon_{GF} \quad (12)$$

H) 在实际的 GNSS 数据处理过程中，电离层较为活跃时历元间差分并不能完全消除电离层残差($\Delta V_{Iono} > \mu$)，容易发生在无周跳时误判为周跳的情况。对此，在历元间做二次差，如公式(13)所示。

$$\Delta \nabla L_{GF}(t_i) = \Delta L_{GF}(t_i) - \Delta L_{GF}(t_{i-1}) = \Delta \nabla V_{Iono} + \Delta \nabla AMB + \nabla \Delta \varepsilon_{GF} \quad (13)$$

在公式(13)中，一般认为 $\Delta \nabla V_{Iono} \approx 0$ ，假设观测噪声为 0.01 周，即 0.002 米，则二次差的 GF 组合噪声约为 0.006 米，考虑多路径效应误差等原因，可在计算中设定阈值为 0.02 米。当 $abs(\Delta \nabla L_{GF}(t_i)) > 0.02$ 且 $abs(\Delta \nabla L_{GF}(t_i) + \Delta \nabla L_{GF}(t_{i+1})) < 0.006$ 时，判断双差序列 $\Delta \nabla L_{GF}(t_i)$ 在 t_i 时刻发生周跳，由于双差观测值个数=原始观测值个数-2，所以判断在 $i+2$ 历元发生周跳。



如下图为 matlab 工作区的周跳数据，下面根据程序对周跳数据的统计结果及可视化结果进行分析。

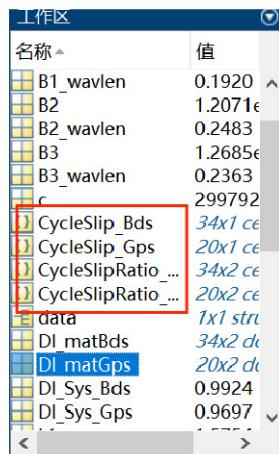


图 4.2.4.1 matlab 工作区周跳数据

下面展示 GPS、BDS 的单卫星粗差/周跳统计数据。其中，标识符=0 为正常历元，标识符=1 为发生周跳，标识符=2 判断为粗差，标识符=-1 为缺少双频观测数据，历元不可用。

表 4.2.4.1 GPS 单卫星周跳/粗差历元统计数据

卫星编号	标识符	历元数	比例(%)
G01	-1	618	9.39352485180119
	0	5902	89.7096823225414
	1	48	0.729594163246694
G02	2	11	0.167198662410701
	-1	331	7.81766650921115
	0	3863	91.2376003778932
G03	1	31	0.732168162494095
	2	9	0.212564950401512
	-1	393	3.51835273052820
G04	0	10716	95.9355416293644
	1	40	0.358102059086840
	2	21	0.188003581020591
G05	-1	769	47.5278121137206
	0	790	48.8257107540173
	1	44	2.71940667490729
	2	15	0.927070457354759
	-1	174	1.55190866928291
	0	10949	97.6542989653942

	1	58	0.517302889760970
	2	31	0.276489475561898
	-1	445	1.76776705200016
G06	0	24612	97.7714217614110
	1	85	0.337663369483176
	2	31	0.123147817105629
	-1	0	0
G07	0	2617	97.8683620044877
	1	47	1.75766641735228
	2	10	0.373971578160060
	-1	1225	10.0302955866699
G09	0	10892	89.1836567591910
	1	72	0.589535740604274
	2	24	0.196511913534758
	-1	0	0
G11	0	18725	99.1790254237288
	1	132	0.699152542372881
	2	23	0.121822033898305
	-1	43	0.318920121634651
G12	0	13285	98.5314840910777
	1	112	0.830675665653045
	2	43	0.318920121634651
	-1	31	0.461035098155860
G13	0	6594	98.0666270077335
	1	86	1.27900059488400
	2	13	0.193337299226651
	-1	0	0
G14	0	13075	99.5811119573496
	1	47	0.357958872810358
	2	8	0.0609291698400609
	-1	449	11.1028684470821
G15	0	3435	84.9406528189911
	1	125	3.09099901088032
	2	35	0.865479723046489
G17	-1	23	0.115845673415936

	0	19740	99.4258084013297
	1	66	0.332426715019643
	2	25	0.125919210234713
	-1	91	0.424281984334204
G19	0	21271	99.1747482282730
	1	72	0.335695635956733
	2	14	0.0652741514360313
	-1	877	6.00520405368392
G20	0	13635	93.3648315529992
	1	50	0.342371952889619
	2	42	0.287592440427280
	-1	368	15.8552348125808
G21	0	1912	82.3782852218871
	1	33	1.42180094786730
	2	8	0.344679017664800
	-1	142	1.82121328716173
G25	0	7364	94.4465820187252
	1	226	2.89855072463768
	2	65	0.833653969475439
	-1	2	0.0409668168783286
G29	0	4844	99.2216304793118
	1	27	0.553052027857436
	2	9	0.184350675952479
	-1	310	5.51405193881181
G30	0	5149	91.5866239772323
	1	115	2.04553539665599
	2	48	0.853788687299893

表 4.2.4.2 BDS 单卫星周跳/粗差历元统计数据

卫星编号	标识符	历元数	比例(%)
C01	-1	0	0
	0	25191	99.9563526704230
	1	10	0.0396793905245615
C02	2	1	0.00396793905245615
	-1	0	0



	0	25144	99.7698595349576
	1	49	0.194429013570352
	2	9	0.0357114514721054
	-1	0	0
C03	0	25200	99.9920641218951
	1	1	0.00396793905245615
	2	1	0.00396793905245615
	-1	0	0
C04	0	25195	99.9722244266328
	1	7	0.0277755733671931
	2	0	0
	-1	2	0.00795102170628926
C05	0	25035	99.5269142084758
	1	113	0.449232726405343
	2	4	0.0159020434125785
	-1	0	0
C06	0	6120	97.5765306122449
	1	133	2.12053571428571
	2	19	0.302933673469388
	-1	0	0
C07	0	25188	99.9444488532656
	1	10	0.0396793905245615
	2	4	0.0158717562098246
	-1	0	0
C08	0	25199	99.9880961828426
	1	2	0.00793587810491231
	2	1	0.00396793905245615
	-1	1967	47.1476510067114
C09	0	2048	49.0891658676894
	1	115	2.75647171620326
	2	42	1.00671140939597
	-1	0	0
C10	0	25187	99.9404809142132
	1	13	0.0515832076819300
	2	2	0.00793587810491231



	-1	0	0
C11	0	14576	99.7946049568671
	1	24	0.164316034506367
	2	6	0.0410790086265918
C12	-1	0	0
	0	25148	99.7857312911674
	1	41	0.162685501150702
C13	2	13	0.0515832076819300
	-1	0	0
	0	25162	99.8412824379018
C14	1	27	0.107134354416316
	2	13	0.0515832076819300
	-1	798	8.90426244141933
C16	0	8050	89.8237000669493
	1	91	1.01539834858291
	2	23	0.256639143048427
C19	-1	0	0
	0	6032	97.7633711507293
	1	112	1.81523500810373
C21	2	26	0.421393841166937
	-1	343	3.46779900920028
	0	9506	96.1075725406936
C22	1	31	0.313416236983116
	2	11	0.111212213123041
	-1	0	0
C24	0	18449	99.9512406544588
	1	7	0.0379239354209557
	2	2	0.0108354101202731
	-1	333	2.00759631036354
	0	16216	97.7633086151806
	1	30	0.180864532465184
	2	8	0.0482305419907156
	-1	532	3.84615384615385
	0	13242	95.7345286292655
	1	50	0.361480624638519

	2	8	0.0578368999421631
	-1	0	0
C25	0	8250	98.7550873832894
	1	77	0.921714148910702
C26	2	27	0.323198467799856
	-1	0	0
C29	0	10426	99.7512437810945
	1	21	0.200918484500574
C33	2	5	0.0478377344048986
	-1	93	3.91249474127051
C34	0	2248	94.5729911653345
	1	31	1.30416491375684
C35	2	5	0.210349179638199
	-1	0	0
C38	0	3524	99.4918125352908
	1	13	0.367024280067758
C39	2	5	0.141163184641446
	-1	0	0
C40	0	20149	99.6390070220552
	1	57	0.281871229354169
C35	2	16	0.0791217485906439
	-1	3	0.0195873596239227
C38	0	15267	99.6800731261426
	1	39	0.254635675110995
C39	2	7	0.0457038391224863
	-1	0	0
C40	0	25202	100
	1	0	0
C38	2	0	0
	-1	0	0
C39	0	6067	99.2637434554974
	1	37	0.605366492146597
C40	2	8	0.130890052356021
	-1	0	0
C40	0	25191	99.9563526704230



	1	9	0.0357114514721054
	2	2	0.00793587810491231
	-1	148	0.612228013568297
C44	0	23995	99.2595350376437
	1	26	0.107553569951187
	2	5	0.0206833788367668
	-1	0	0
C45	0	4104	99.8540145985402
	1	3	0.0729927007299270
	2	3	0.0729927007299270
	-1	1	0.00396793905245615
C56	0	25019	99.2738671534005
	1	158	0.626934370288072
	2	24	0.0952305372589477
	-1	243	1.24030216414863
C57	0	19290	98.4585545120457
	1	50	0.255206206614945
	2	9	0.0459371171906901
	-1	0	0
C59	0	25202	100
	1	0	0
	2	0	0
	-1	0	0
C60	0	25198	99.9920634920635
	1	2	0.00793650793650794
	2	0	0

以上数据统计展示完毕，可以看出不同卫星的周跳状况有着很大的差别，如 GPS 卫星中，G04 的周跳比低于 20，质量很差，而 G03 的周跳比达到 270；从 BDS 卫星的 GEO、IGSO、MEO 对比也可以看出不同类卫星之间存在差异，同类之间也存在差异。如 C59(GEO)、C38(IGSO)均未判断发生周跳，而 C05(GEO)的周跳有 100 多次。



下面结合周跳/粗差标记的可视化宽巷(Wide-Lane)模糊度(AMB)-时序图像进一步对观测质量进行分析。与(4.2.3)信噪比/载噪比中的举例相同，我们依旧以 G03(MEO)、C01(GEO)/C07(IGSO)/C24(MEO)为代表，进行质量分析研究。

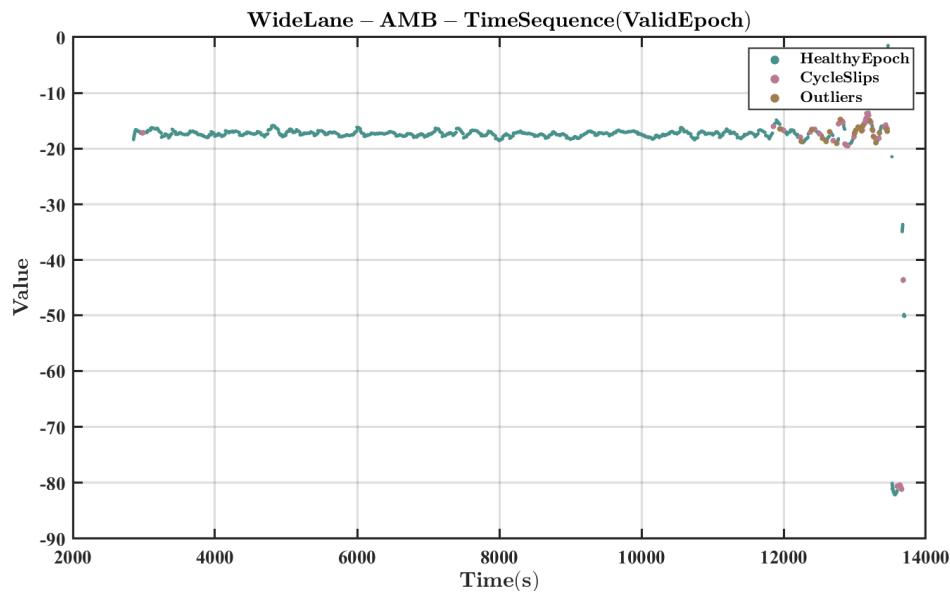


图 4.2.4.2 GPS: G03(MEO) 宽巷(Wide-Lane)模糊度(AMB)时序图

研究 G03 由可视化结果可知：

①MW 组合的模糊度，即宽巷模糊度的变化随时间推移变化在 3000~11000s 比较稳定，周跳很少；在 11500s 以后，出现观测时段中断的现象，并在期间发生频繁的粗差和周跳。结合(4.2.3)信噪比/载噪比的图像可推论，此观测时段的信噪比也不好，卫星高度角较低，卫星几何构型变差，观测条件变差，数据精度下降。

②观察可视化图像需注意横纵坐标的刻度大小与间隔。发现在 13500s 左右短时间内宽巷模糊度 (AMB) 发生了剧烈数值变化(-20->-80)，此时接收机难以对 G03 进行有效跟踪。

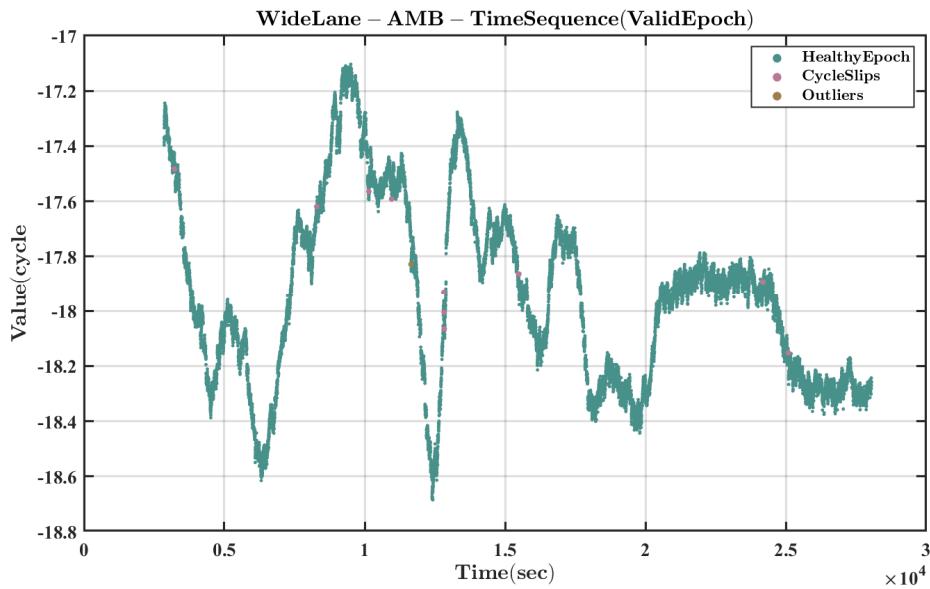


图 4.2.4.3 BDS: C01(GEO) 宽巷(Wide-Lane)模糊度(AMB)时序图

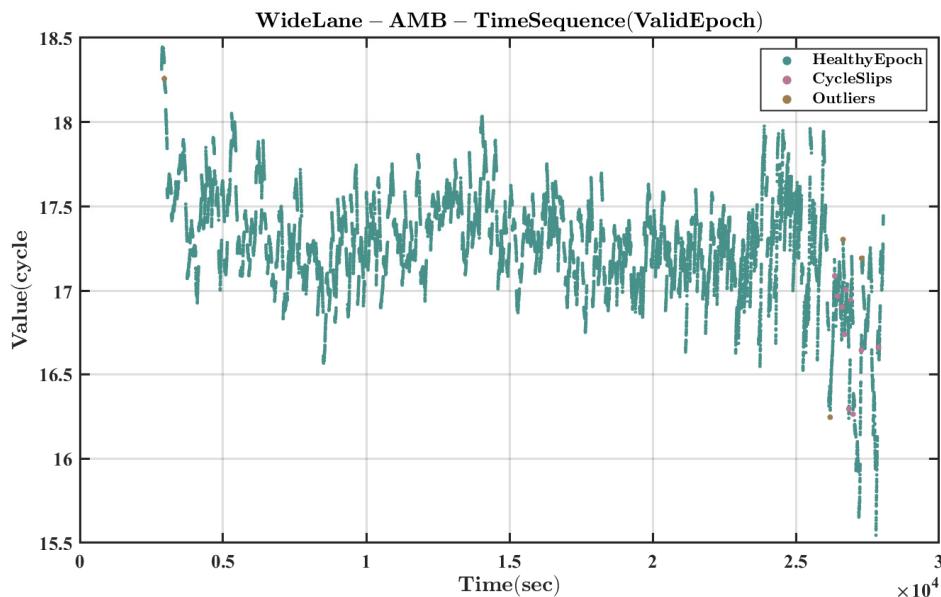


图 4.2.4.4 BDS: C07(IGSO) 宽巷(Wide-Lane)模糊度(AMB)时序图

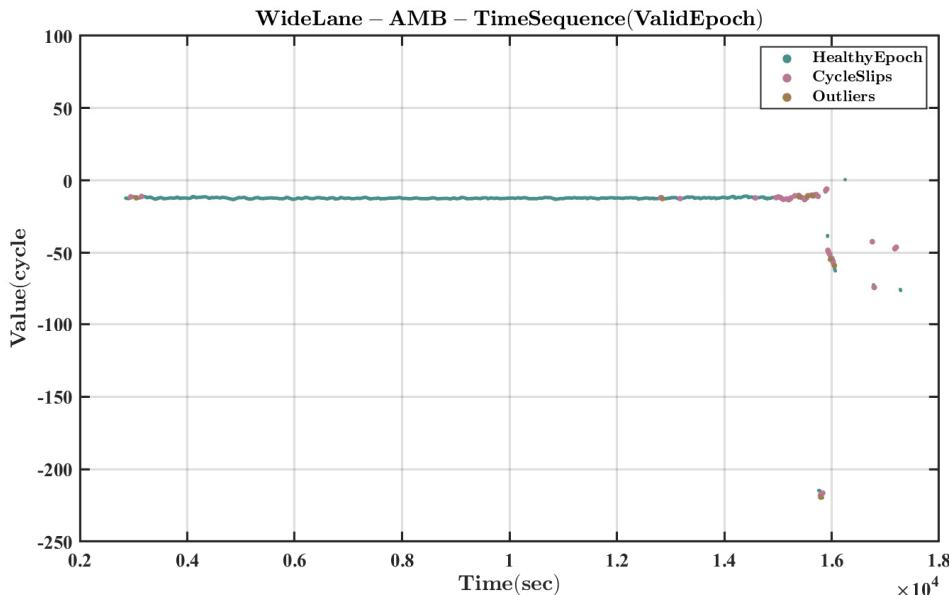


图 4.2.4.5 BDS: C24(MEO) 宽巷(Wide-Lane)模糊度(AMB)时序图

在对 GPS 卫星 G03 的周跳分析基础上，分析三张不同类别的 BDS，得到以下结论：

①所有卫星系统，不同的卫星类型在 SNR、CycleSlip 的检测结果得出的结论都是具有一致性的，即观测数据具有一致性的特点。卫星高度角变小的同时，SNR 变差、CycleSlip/Outlier 明显增多，信号易失锁(Lock-Loss)，即易出现双频观测数据中断的现象，同时观测条件的变差使接收机对 AMB 的重新初始化更加困难。

②C01、C07 的 N_{MW} 的变化看上去抖动大，但一定需要注意到纵坐标的刻度量级，实际的抖动在约正负一个宽巷模糊度以内(± 1 周)。实际上，观察三张图总结可以发现当整体上 N_{MW} 的变化超过一周时，存在某个历元值一定是周跳(或者粗差)，在图中相应有品红色或者褐色的标记。



4.2.5 伪距多路径效应分析

在 GPS 接收机接收卫星信号的过程中，除了接收到通过直线路径到达接收机的信号以外，还可能收到经接收机周围物体的反射再传播过来的卫星信号，这些反射的信号改变了传播方向、振幅、极化以及相位等，与直线信号产生叠加，从而使观测值偏离其真值而产生误差，这种现象称为多路径效应（Multi-Path Effect），有时也简称多径效应。

多路径效应即是评价周围环境对观测值影响的重要指标之一，也是定位中对观测值进行定权的一个重要依据。在一般反射环境下，多路径效应对伪码测距的影响可达米级，对载波相位测距的影响可达厘米级；在高反射环境下，其影响将显著增大，常常导致接收的卫星信号失锁和使载波相位观测量产生周跳；多路径效应的影响，可以分为常数部分和周期性部分。其中常数部分，在同一地点将会日复一日地重复出现；周期性部分则周期性的出现。一般低高度角的卫星比高高度角的卫星多路径效应更大。

计算伪距多路径误差，必须依赖双频观测数据。采用伪距观测方程和载波相位观测方程组合，消除对流层和电离层延迟影响。在完成了周跳探测与修复后，需对各频点观测值上的多路径效应通过 GNSS 伪距和相位观测量以线性组合的方式加以分析。以 L_1 、 L_2 载波上的多路径效应为例，其对伪距影响的综合指标如下：

$$MP_1 = -\frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 \phi_1 + \frac{2f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 \phi_2 + P_1 - N_{P_1} \quad (14)$$

$$MP_2 = -\frac{2f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_1 \phi_1 + \frac{f_1^2 + f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \lambda_2 \phi_2 + P_2 - N_{P_2} \quad (15)$$

式中， MP_1 、 MP_2 分别表示不同频率伪距的多路径效应； λ_1 、 λ_2 分别为 L_1 、 L_2 载波的波长； f_1 、 f_2 分别为载波的频率； ϕ_1 、 ϕ_2 分别为载波相位观测值； P_1 、 P_2 分别为伪距观测值， N_{P_1} 、 N_{P_2} 分别代表 L_1 、 L_2 载波相位观测值的整周模糊度。从而伪距多路径误差 MP_1 、 MP_2 可由伪距、载波相位观测值和整周模糊度来表示。通过逐历元处理伪距观测值和载波相位得出各历元伪距多路径误差的时序信息。

对于单个卫星的整体平均多路径效应误差的指标，需要按公式(16)进行计算。对于同一颗卫星在连续观测且无周跳的情况下，组合的模糊度参数不会变化，在无周跳的多个连续历元间按公式(16)进行计算，得到多路径误差。

$$\overline{MP}_k = \sqrt{\frac{1}{N_{sw}-1} \sum_{i=1}^{N_{sw}} (MP_k(t_i) - \frac{\sum_{i=1}^{N_{sw}} MP_k(t_i)}{N_{sw}})^2} \quad (16)$$

其中， \overline{MP}_k 为接收机观测到卫星在 k 频率上多路径误差的评估值； N_{sw} 为滑动窗口的历元个数，默认为 50，具体以研究的卫星自身连续观测历元的粗差周跳情况而定； $MP_k(t_i)$ 为在历元 t_i 接收机观测到卫星在 k 频率上包含多路径误差和整周模糊度信息的计算量。



表 4.2.5.1 GPS 与 BDS 单卫星平均多路径效应误差

GPS 卫星	MP-L ₁ (m)	MP-L ₂ (m)	BDS 卫星	MP-B ₁ (m)	MP-B ₃ (m)
G01	-0.393721	0.1590011	C01	0.2479919	0.2180968
G02	-0.277208	0.2738864	C02	0.3036578	-0.356175
G03	0.1494162	-0.102179	C03	0.2997250	0.0154226
G04	-0.206918	0.1311914	C04	0.4261448	-0.294378
G05	-0.130191	0.0249629	C05	0.0145688	0.3642519
G06	0.4043044	-0.200841	C06	-0.017033	-0.136322
G07	0.4943535	0.4305797	C07	0.3230069	0.2575888
G09	-0.460239	0.5036745	C08	0.0735129	-0.234420
G11	0.0319623	0.2630431	C09	-0.483043	-0.149846
G12	0.0818474	0.3385948	C10	-0.478700	0.3193273
G13	0.3656784	0.4784390	C11	-0.350786	-0.355535
G14	0.3074038	0.3329572	C12	-0.056933	0.5186058
G15	0.5795019	0.4657475	C13	0.4967016	0.1920444
G17	0.0730469	0.0092061	C14	-0.088262	0.2956789
G19	0.1257836	-0.131058	C16	0.4053516	-0.273823
G20	0.4011093	-0.475126	C19	-0.038526	0.0750338
G21	0.7706749	0.4799822	C21	-0.350147	0.3648824
G25	-0.070524	-0.247287	C22	0.2251885	-0.130936
G29	-0.169809	-0.295804	C24	0.2739506	0.3144623
G30	0.2952537	0.4954517	C25	0.3959043	-0.298363
			C26	0.0874089	-0.217352
			C29	-0.350055	-0.341930
			C33	0.4618379	-0.410331
			C34	0.1699874	0.2746243
			C35	-0.368066	-0.340563
			C38	-0.023855	-0.104108
			C39	0.0092170	-0.473851
			C40	-0.319695	-0.422772
			C44	-0.144256	0.0408220
			C45	-0.332583	-0.455914
			C56	0.2259468	-0.275609
			C57	0.3565681	-0.228356
			C59	0.2256986	-0.030426
			C60	-0.306067	0.4297125



下面结合基于周跳/粗差标记处理后的可视化多路径效应误差(Multipath)-时序图像进一步对观测质量进行分析。与(4.2.3)信噪比/载噪比、(4.2.4)载波相位周跳探测分析中的举例相同，我们依旧以 G03(MEO)、C01(GEO)/C07(IGSO)/C24(MEO)为代表，研究多路径的情况。分析观测质量。

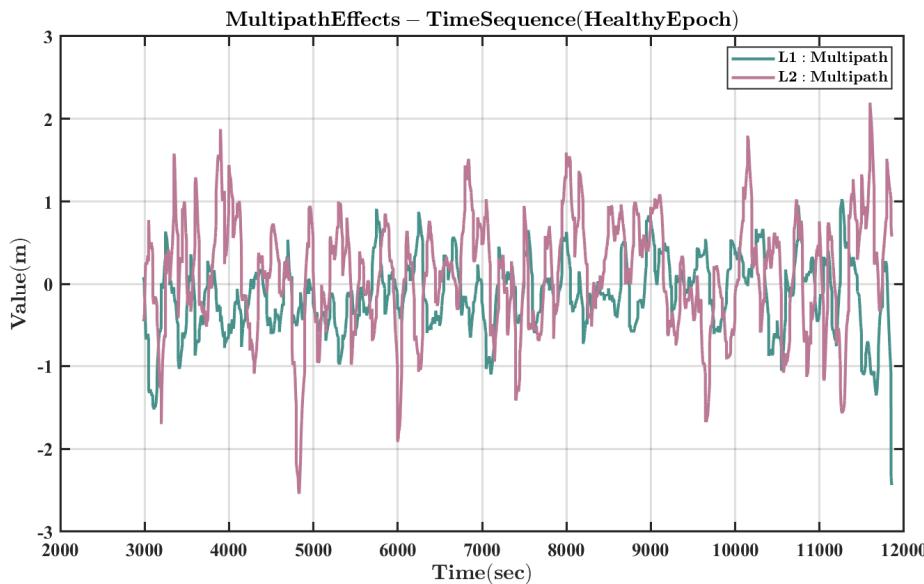


图 4.2.5.1 GPS: G03(MEO) 多路径(Multipath)效应时序图

分析 G03 的多路径时序图可得出结论：

①L1 波段的多路径效应抖动相对 L2 波段要小一些；在整个观测时段内，整体上 L1 波段的多路径误差在±1m 以内，L2 波段的多路径误差在±1.5m 以内。

②在部分时段的抖动超过 2m，在 5000s 附近和 11500~12000s 区间较为明显，推测其原因，除了卫星高度角降低带来的信号反射延时增强之外，也不排除低高度角带来的数据发生小范围的周跳但未被探测出。但由于 2m 左右的多路径误差周跳的可能性不大，所以在此仅探讨存在周跳未被探测出的可能，并没有很大的把握。

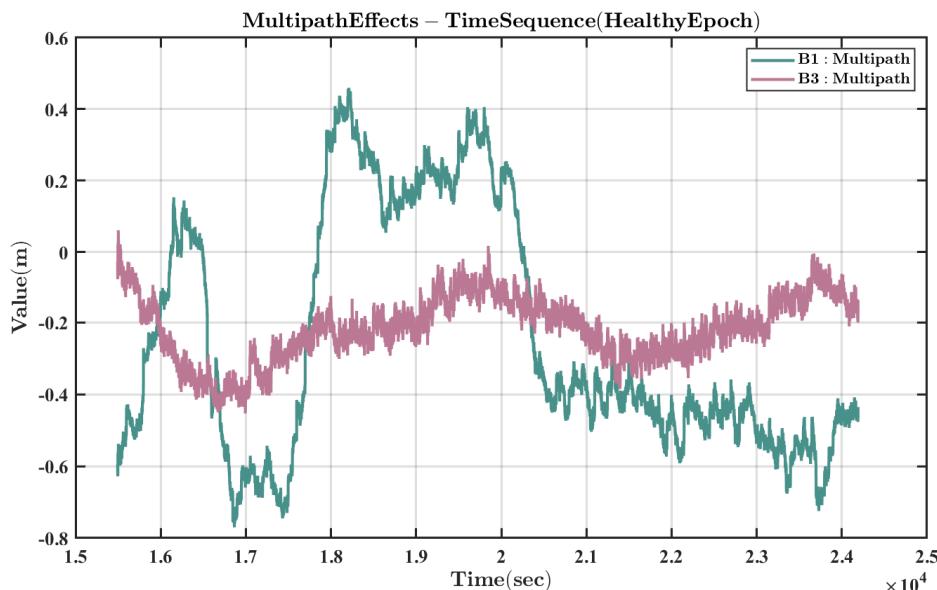


图 4.2.5.2 BDS: C01(GEO) 多路径(Multipath)效应时序图

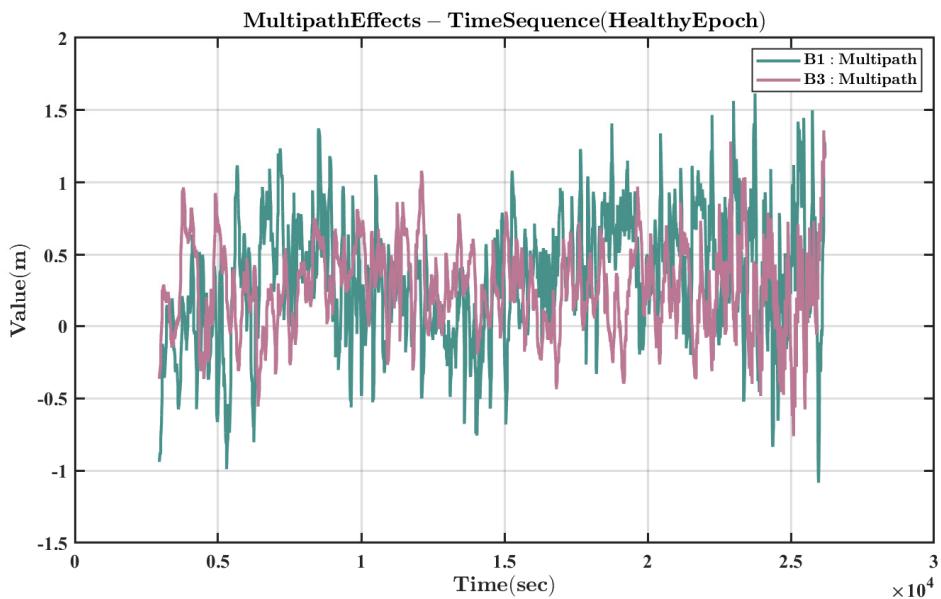


图 4.2.5.3 BDS: C07(IGSO) 多路径(Multipath)效应时序图

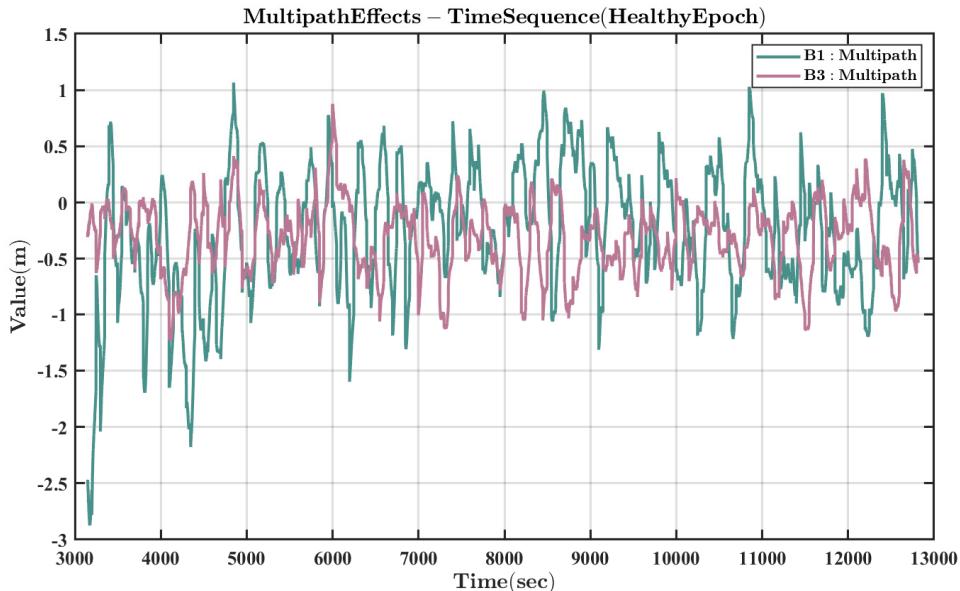


图 4.2.5.4 BDS: C24(MEO) 多路径(Multipath)效应时序图

在 GPS 卫星 G03 的分析得到的结论基础上，继续分析 BDS，且结合(4.2.3)信噪比/载噪比、(4.2.4)载波相位周跳探测分析，综合可以得到以下结论：

①相比于 C01/C07，从 C24 的多路径时序图中可以看出，在时段的开始存在多路径效应指标的较大抖动，C24 在 3000s 时的多路径跳跃到了-3m。对此，有较大的把握可以判断出存在时段开始存在未检测出的周跳。因为出现观测数据连续，但判断出连续周跳或者粗差的时段情况，极易在这个差质量时段的始末出现漏检和误检。

比如下例：假如 2998 历元正常，但 2999、3000、3001、3002...历元均存在粗差或周跳，3003 历元以后的数据又正常，那么我们把 2998 作为上一个连续正常历元时段的结束，2999 作为下一时段的开始，进行粗差周跳探测。那 2999-3002 数据都是不准的，并不一定能够探



测出来，而且探测出来也不一定准。再者，3003 历元受连续粗差/周跳时段数据的影响，原本正常也可能会判断为周跳，因而假如出现 3005 历元周跳，会判断为正常，出现混乱与矛盾。总之，周跳探测的难点在于短时间的正常序列与短时间的连续问题序列混杂的问题，而在大批的正常历元背景下检测出偶有的粗差是相对容易的。

所以，在程序计算出的连续正常时段中，可能在时段的开始出现未探测出的粗差，在质量分析时，尤其需要注意。

②(4.2.3)信噪比/载噪比、(4.2.4)载波相位周跳探测、(4.2.5)伪距多路径效应的质量分析结果具有一致性，在本节及前面三节的分析中，我们可以注意到观测数据具有一致性的特点：

卫星高度角变小的同时，SNR 变差、CycleSlip/Outlier 明显增多，信号易失锁(Lock-Loss)，即易出现双频观测数据中断的现象，同时观测条件的变差使接收机对 AMB 的重新初始化更加困难。多路径效应的起始容易漏检周跳，易受到低高度角或者天气剧烈变化导致大气延迟的影响，出现跳跃。

由此而延伸，实际上，一致性的分析需要几步策略：对接收机采集的观测数据进行综合质量评估，利用数据完整率、周跳比、多路径误差、电离层延迟变化率、伪距噪声、载波相位噪声和载噪比等进行评估。其步骤为：

A) 指标的同趋势化：在综合指标体系中，如当数据完整率越大、多路径数值越小、周跳比越大时，观测数据质量越好，故需将多路径指标按照取倒数的方法将其极小型的指标值转化为极大型。

B) 指标的无量纲化：综合评价的各指标值必须都是无量纲的数值，按照相关公式对同趋势化后的各指标值进行处理；

C) 指标权重系数的确定：按公式计算指标的熵值、指标的差异系数、指标的权重系数。

D) 按照给定的打分公式计算综合评估分数，设置线性映射关系或者相关关系，研究得分的大小，从而对研究对象综合数据质量进行评判。



5. 实习总结

这次实习任务总体上很综合。从数据采集、数据处理、自编软件、报告汇总几部分依次做好，是高投入产生高回报的事情。

一开始的将近一个周，我们导航工程的同学们随带队老师去湖北省孝感市天紫湖景区进行测绘外业的实习，做了 GNSS 静态测量、RTK，以及与湖北省/华测 CORS 基站联测进行相对定位。感受到了外业工作者的辛苦，在夏日的蚊虫叮咬与太阳暴晒下，没有人可以逃避。俗话说实践出真知，通过切身地进行小组分工合作，采集原始观测数据，感受到了测绘外业工作者的辛苦。

之后是使用 CGO 软件进行静态数据处理如基线解算等，以及 PPK 后处理；使用开源的 RTKLib 软件进行 PPK 处理，并进行精度评定等等。当然不仅仅是这两款软件的使用方法，我觉得应该更应该掌握扎实的是对 GNSS 的数据进行分析和评价的思路，评定数据质量的好坏的标准与方式，如何在观测数据已定的情况下选用更优的配置，以及打通这些表面东西背后的原理。我花费了很多时间看用户手册，以及郭老师发的讲义资料，实际上要把上面的问题弄的很清楚不是易事，比如 RTKLib 的 rtkplot 的设置（options），里面的参数，是 GNSS 数据处理涉及到的一整套体系，从原始数据种类、解算方式，滤波优化方式，结果呈现方式等等。一个好的数据分析程序必定是完整的，以及完善的可视化界面。

补充一点是，关于 TEQC 的使用，我使用 RTKLib 将 Renix3.0 的观测文件转为 2.0，试着去分析，但会提示“invalid value for no. of observation types”并退出程序。我对其的解释是，头文件中的每个卫星的观测历元总数出现统计错误，或者频段名称以及频点出现了更新（因为 TEQC 很久没有继续维护）。

我想重点谈谈自编程序的分析，从中得到的收获与教训：

①语言的选择。这次实习我基于 matlab 完成，相对另一个方便做可视化的语言 C#，matlab 语句更加简洁，可以让我将重心放在数据处理算法上：筛选，分割，提取，组合；此外，matlab 可选择通过 latex 解释器完成绘图的可视化，加一个循环就可以本地保存所有的数据可视化结果，精美而强大。但我此次的 matlab 脚本没有做成窗体，也没有进行封装和打包成不依赖于 matlab 平台的可执行文件（*.exe），不利于用户和软件的动态实时交互。此前我主要使用 C# 编程，而 C# 在这些方面都是有优势的。

②数据操作。Matlab 尽管支持类的使用，但如果涉及到继承，以及修改 proportions 等，会大幅度降低效率，增大时间开销，所以 matlab 主要面向一个脚本化基于过程的语言。为简化编程，提高编程效率，我也采取了编写函数的方式，主函数仅为初始化以及函数的调用，结构也更加清晰，增加了可读性。整个程序，涉及到了 numeric、cell、struct、table、timetable、logical 六种类型的数据，加上 function handle 一共是七类数据类型（容器）。与算法结合在一起，类型的转换



也极为重要，而决定主要采用哪种容器存放一整类数据，需要一开始做决定，这也一定会直接影响到后面编程的难易程度。我主要采取 cell+struct（标量）/cell+二维矩阵这两种方式，便于索引。如下图所示。而 matlab 的串联并联操作，以及与 C 语言相对比，动态数组的操作也是基础的（若提高效率那么需要一开始给出矩阵（数组）size 或者是 length）。

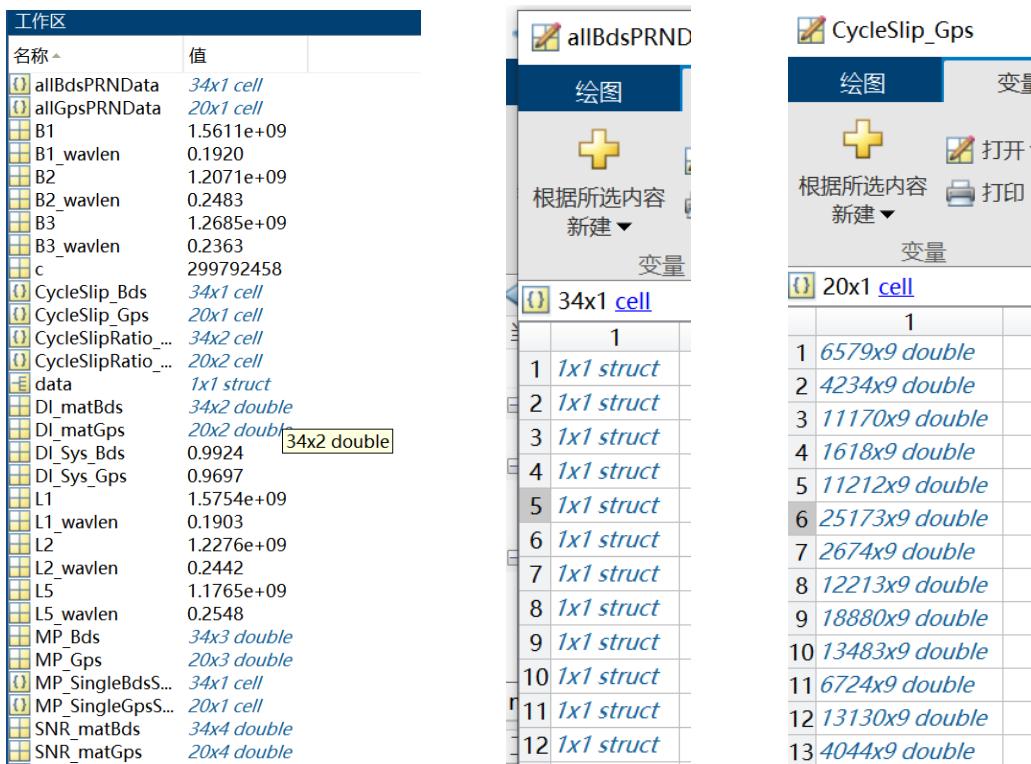


图 5.1 matlab 工作区变量

③算法。算法方面，matlab 我最不熟悉的就是 debug 的环节，我只好采用 disp 函数将相跟踪的值打印到命令栏，函数的断点跟踪我也没有成功（相比之下我远更熟悉 C#，此次编程选用 matlab 原因也在于想让自己多熟悉一些语言）。而我 debug 的语句往往都是自己写的分类讨论的逻辑欠缺，即 if-else 与 for/while 的多重相互嵌套。举个例子如(6.7)节的周跳检测，我在这个函数里做了这样的流程：MW 组合采用滤波的方式先一步判断粗差或者周跳，而这至少需要 i-1, i, i+1 三个滑动历元窗口的数据，当当前历元数据判定为下面三个条件之一即周跳/粗差/双频数据不连续不可用的情况，都需要 break 掉一直往下找没被探测的连续观测的起始数据，找到后，重新初始化 rms 第一次迭代经验值，以及至少列举下两个历元的基础上再进入 for 循环判断，这就对容器的索引产生了很大的挑战，我也是一步步 debug 完善条件判断，最后做成了。这里由于我采用 mw 组合+滤波的方式处理初步探测 mw 异常值并进行粗差和周跳的分类，滑动窗口的处理是难题，尤其是对于连续粗差周跳和极短连续观测时段（比如一个连续时段只有 2~5 个历元），准确度还是不够的。所以我又加上历元间双差的 GF 组合加强周跳



探测，利用历元双差 GF 观测值的数学特性（正负两个峰，峰的大小）与数组索引对应关系（双差观测值序列个数是原始观测值个数-2），设立多个阈值，联合 MW 组合探测周跳，获得了不错的结果，即后续在 multipath 处理时得到的连续时段的模糊度基本都是固定的，从多路径的结果可以看出大部分周跳都已经探测出，周跳探测的有效性也得到了确认。所以实际上数据分析就是一步套一步，上一步花功夫了，中间结果处理的好，最终结果就是优秀。但还可以进行改进，比如 GF 组合可以采用滑动窗口拟合高阶多项式对数据进行平滑，通过设置差值阈值探测出离群点，因为做这一步还需要对于滑动窗口的分类、判断、索引，而且在第一步 mw 组合未探测出的历元中做历元间双差实现加强探测，精度已经较好，算法更简单，故未采取滑动窗口拟合高阶多项式的 GF 组合方法。

另外，此次实习自编程序的所有代码请详见本文附录，或结合压缩包中的代码文件，点击就可运行之，检查结果。

总之，这次实习除了外业实操的体会以外，最重要的是锻炼了我分析问题解决问题的能力。重点就是自编程序，此次实习我的参考资料仅为《北斗_全球卫星导航系统(GNSS)测量型接收机观测数据质量评估方法》，此外全部都在 matlab 的官网查询容器操作方式，算法自主实现 100%，以及尤其是采用优化的周跳探测算法，显著地保证了数据分析的精度。

最后，感谢老师们在实习过程中的辛勤的付出和耐心的解答！



6.附录

6.1 main.m

```
clc,clear,close all; %designed by hzLiu, July 9th,2023
%% Load data
filename = "D005.23o";
data = rinexread(filename);
structGps=table2struct(data.GPS,"ToScalar",true);
structBds=table2struct(data.BeiDou,"ToScalar",true);
% calculate time in day
[GpsDateSec,BdsDateSec]=GetSatelliteTime(data.GPS,data.BeiDou);
% add field in struct: Time
structGps.Time=GpsDateSec;
structBds.Time=BdsDateSec;
% get target type: table
tableGps=struct2table(structGps);
tableBds=struct2table(structBds);
clear GpsDateSec BdsDateSec GpsDateString BdsDateString i sec strh strm strs
filename;
disp("Loading is done");
% carrier frequency / wavelength / c : Gps Bds
c=299792458.0;
[L1,L2,L5,B1,B2,B3]=deal(1575420000,1227600000,1176450000,1561098000,120714
0000,1268520000);
[L1_wavlen,L2_wavlen,L5_wavlen,B1_wavlen,B2_wavlen,B3_wavlen]=deal(c/L1,c/L
2,c/L5,c/B1,c/B2,c/B3);

%% Get all single PRN data: Gps/Bds
allGpsPRNData=GetPRNData(tableGps);
allBdsPRNData=GetPRNData(tableBds);
disp("Have already got all single PRN data: Gps/Bds");
%% Intergrity rate of observations
[DI_Sys_Gps,DI_Sys_Bds]=GetSysIntergrity(structGps,structBds);
[DI_matGps,DI_matBds]=GetFrqIntergrity(allGpsPRNData,allBdsPRNData);
disp("Have already got results of Intergrity rate of observations: Gps/Bds");
%% SNR data
[SNR_Sys_Gps,SNR_Sys_Bds,SNR_matGps,SNR_matBds]=GetSNR(allGpsPRNData,allBds
PRNData);
disp("Have already got results of SNR data: Gps/Bds");
%% Carrier Phase Cycle Slip Detection
[CycleSlip_Gps,CycleSlip_Bds,CycleSlipRatio_Gps,CycleSlipRatio_Bds]=GetCycl
eSlip(allGpsPRNData,allBdsPRNData);
disp("Have already got results of Cycle Slip data: Gps/Bds");
```



```
%% Pseudo-range multipath effects
[MP_Gps,MP_Bds,MP_SingleGpsSequence,MP_SingleBdsSequence]=GetMultipath(CycleSlip_Gps,CycleSlip_Bds);
disp("Have already got results of Pseudo-range multipath effects: Gps/Bds");

%% Visualization
Visualization(CycleSlip_Gps,CycleSlip_Bds,MP_SingleGpsSequence,MP_SingleBdsSequence,allGpsPRNData,allBdsPRNData);
disp("Visualization is done");
```



6.2 GetSatelliteTime.m

```
function [GpsDateSec,BdsDateSec] = GetSatelliteTime(dataGps,dataBds)
GpsDateString = datestr(dataGps.Time);
GpsDateSec=zeros(length(GpsDateString),1);
for i=1:length(GpsDateString)
    strh=GpsDateString(i,13:14);
    strm=GpsDateString(i,16:17);
    strs=GpsDateString(i,19:20);
    sec=str2double(strh)*3600+str2double(strm)*60+str2double(strs);
    GpsDateSec(i,1)=sec;
end
BdsDateString = datestr(dataBds.Time);
BdsDateSec=zeros(length(BdsDateString),1);
for i=1:length(BdsDateString)
    strh=BdsDateString(i,13:14);
    strm=BdsDateString(i,16:17);
    strs=BdsDateString(i,19:20);
    sec=str2double(strh)*3600+str2double(strm)*60+str2double(strs);
    BdsDateSec(i,1)=sec;
end
end
```

6.3 GetPRNData.m

```
function c = GetPRNData(tableData)
%matData=['Time','allPRNnum',(2)
%          'C1C','C1C_SSI','C2W','C2W_SSI','C5X','C5X_SSI',(8)
%
'L1C','L1C_LLI','L1C_SSI','L2W','L2W_LLI','L2W_SSI','L5X','L5X_LLI','L5X_SS
I',(17)
%          'S1C','S2W','S5X'(20)]
c={};
for PRNnum=1:60
    rows = (tableData.EpochFlag==0 & tableData.SatelliteID==PRNnum);
    if all(rows==0)
        continue;
    end
    PRNtableData=tableData(rows,:);
    PRNtableData.Properties.Description=int2str(PRNnum);
    sPRN=table2struct(PRNtableData,"ToScalar",true);
    c=[c;{sPRN}];
end
end
```



6.4 GetSysIntergrity.m

```
function [DI_Sys_Gps,DI_Sys_Bds] =
GetSysIntergrity(struct_SysGpsData,struct_SysBdsData)
len=length(struct_SysGpsData.SatelliteID);
num=0;
for i=1:len
    if struct_SysGpsData.C1C(i)~=0 && struct_SysGpsData.C2W(i)~=0 &&
    struct_SysGpsData.L1C(i)~=0 && struct_SysGpsData.L2W(i)~=0
        %if struct_SysGpsData.C1C(i)~=0 && struct_SysGpsData.C2W(i)~=0 &&
        %struct_SysGpsData.C5X(i)~=0 && struct_SysGpsData.L1C(i)~=0 &&
        %struct_SysGpsData.L2W(i)~=0 && struct_SysGpsData.L5X(i)~=0
        num=num+1;
    end
end
DI_Sys_Gps=num/len;

len=length(struct_SysBdsData.SatelliteID);
num=0;
for i=1:len
    if struct_SysBdsData.C2I(i)~=0 && struct_SysBdsData.C6I(i)~=0 &&
    struct_SysBdsData.L2I(i)~=0 && struct_SysBdsData.L6I(i)~=0
        %if struct_SysBdsData.C2I(i)~=0 && struct_SysBdsData.C7I(i)~=0 &&
        %struct_SysBdsData.C6I(i)~=0 && struct_SysBdsData.L2I(i)~=0 &&
        %struct_SysBdsData.L7I(i)~=0 && struct_SysBdsData.L6I(i)~=0
        num=num+1;
    end
end
DI_Sys_Bds=num/len;

end
```



6.5 GetFrqIntergrity.m

```
function [DI_matGps,DI_matBds] = GetFrqIntergrity(cell_allGps,cell_allBds)
DI_matGps=zeros(length(cell_allGps),2);
DI_matBds=zeros(length(cell_allBds),2);

len=length(cell_allGps);
for i=1:len
    num=0;
    nums=length(cell_allGps{i,1}.SatelliteID);
    PRN=cell_allGps{i,1}.SatelliteID(1);
    for j=1:nums
        %if cell_allGps{i,1}.C1C(j)~=0 && cell_allGps{i,1}.C2W(j)~=0 &&
        cell_allGps{i,1}.C5X(j)~=0 && cell_allGps{i,1}.L1C(j)~=0 &&
        cell_allGps{i,1}.L2W(j)~=0 && cell_allGps{i,1}.L5X(j)~=0
            if cell_allGps{i,1}.C1C(j)~=0 && cell_allGps{i,1}.C2W(j)~=0 &&
            cell_allGps{i,1}.L1C(j)~=0 && cell_allGps{i,1}.L2W(j)~=0
                num=num+1;
            end
        end
        [DI_matGps(i,1),DI_matGps(i,2)]=deal(PRN,num/nums);
    end

len=length(cell_allBds);
for i=1:len
    num=0;
    nums=length(cell_allBds{i,1}.SatelliteID);
    PRN=cell_allBds{i,1}.SatelliteID(1);
    for j=1:nums
        if cell_allBds{i,1}.C2I(j)~=0 && cell_allBds{i,1}.C6I(j)~=0 &&
        cell_allBds{i,1}.L2I(j)~=0 && cell_allBds{i,1}.L6I(j)~=0
            %if cell_allBds{i,1}.C2I(j)~=0 && cell_allBds{i,1}.C7I(j)~=0 &&
            cell_allBds{i,1}.C6I(j)~=0 && cell_allBds{i,1}.L2I(j)~=0 &&
            cell_allBds{i,1}.L7I(j)~=0 && cell_allBds{i,1}.L6I(j)~=0
                num=num+1;
            end
        end
        [DI_matBds(i,1),DI_matBds(i,2)]=deal(PRN,num/nums);
    end
end
```



6.6 GetSNR.m

```
function [SNR_Sys_Gps,SNR_Sys_Bds,SNR_matGps,SNR_matBds] =  
GetSNR(cell_allGps,cell_allBds)  
SNR_matGps=zeros(length(cell_allGps),4);%['PRN','SNR_L1','SNR_L2','SNR_L5']  
SNR_matBds=zeros(length(cell_allBds),4);%['PRN','SNR_C2','SNR_C7','SNR_C6']  
SNR_Sys_Gps=zeros(4,1);%['AllFreq_meanSNR','meanSNR_L1','meanSNR_L2','meanSNR_L5']  
SNR_Sys_Bds=zeros(4,1);%['AllFreq_meanSNR','meanSNR_C2','meanSNR_C7','meanSNR_C6']  
sumSNR_Sys_Gps=0;  
sumSNR1_Sys_Gps=0;  
sumSNR2_Sys_Gps=0;  
sumSNR5_Sys_Gps=0;  
sumnums=0;  
sumnums1=0;  
sumnums2=0;  
sumnums5=0;  
  
len=length(cell_allGps);  
for i=1:len  
    sumSNR1=0;  
    sumSNR2=0;  
    sumSNR5=0;  
    nums=length(cell_allGps{i,1}.SatelliteID);  
    nums1=length(cell_allGps{i,1}.S1C(cell_allGps{i,1}.S1C~=0));  
    nums2=length(cell_allGps{i,1}.S2W(cell_allGps{i,1}.S2W~=0));  
    nums5=length(cell_allGps{i,1}.S5X(cell_allGps{i,1}.S5X~=0));  
    PRN=cell_allGps{i,1}.SatelliteID(1);  
    for j=1:nums  
        sumSNR1=sumSNR1+cell_allGps{i,1}.S1C(j);  
        sumSNR2=sumSNR2+cell_allGps{i,1}.S2W(j);  
        sumSNR5=sumSNR5+cell_allGps{i,1}.S5X(j);  
    end  
    [SNR_matGps(i,1),SNR_matGps(i,2),SNR_matGps(i,3),SNR_matGps(i,4)]=deal(PRN,  
    sumSNR1/nums1,sumSNR2/nums2,sumSNR5/nums5);  
    sumSNR_Sys_Gps=sumSNR_Sys_Gps+sumSNR1+sumSNR2+sumSNR5;  
    sumSNR1_Sys_Gps=sumSNR1_Sys_Gps+sumSNR1;  
    sumSNR2_Sys_Gps=sumSNR2_Sys_Gps+sumSNR2;  
    sumSNR5_Sys_Gps=sumSNR5_Sys_Gps+sumSNR5;  
    sumnums=sumnums+nums1+nums2+nums5;  
    sumnums1=sumnums1+nums1;  
    sumnums2=sumnums2+nums2;  
    sumnums5=sumnums5+nums5;
```



```
end
[SNR_Sys_Gps(1,1),SNR_Sys_Gps(2,1),SNR_Sys_Gps(3,1),SNR_Sys_Gps(4,1)]=deal(
sumSNR_Sys_Gps/sumnums,sumSNR1_Sys_Gps/sumnums1,sumSNR2_Sys_Gps/sumnums2,sum
SNR5_Sys_Gps/sumnums5);

sumSNR_Sys_Bds=0;
sumSNR2_Sys_Bds=0;
sumSNR7_Sys_Bds=0;
sumSNR6_Sys_Bds=0;
sumnums=0;
sumnums2=0;
sumnums7=0;
sumnums6=0;
len=length(cell_allBds);
for i=1:len
    sumSNR2=0;
    sumSNR7=0;
    sumSNR6=0;
    nums=length(cell_allBds{i,1}.SatelliteID);
    nums2=length(cell_allBds{i,1}.S2I(cell_allBds{i,1}.S2I~=0));
    nums7=length(cell_allBds{i,1}.S7I(cell_allBds{i,1}.S7I~=0));
    nums6=length(cell_allBds{i,1}.S6I(cell_allBds{i,1}.S6I~=0));
    PRN=cell_allBds{i,1}.SatelliteID(1);
    for j=1:nums
        sumSNR2=sumSNR2+cell_allBds{i,1}.S2I(j);
        sumSNR7=sumSNR7+cell_allBds{i,1}.S7I(j);
        sumSNR6=sumSNR6+cell_allBds{i,1}.S6I(j);
    end

[SNR_matBds(i,1),SNR_matBds(i,2),SNR_matBds(i,3),SNR_matBds(i,4)]=deal(PRN,
sumSNR2/nums2,sumSNR7/nums7,sumSNR6/nums6);
    sumSNR_Sys_Bds=sumSNR_Sys_Bds+sumSNR2+sumSNR7+sumSNR6;
    sumSNR2_Sys_Bds=sumSNR2_Sys_Bds+sumSNR2;
    sumSNR7_Sys_Bds=sumSNR7_Sys_Bds+sumSNR7;
    sumSNR6_Sys_Bds=sumSNR6_Sys_Bds+sumSNR6;
    sumnums=sumnums+nums2+nums7+nums6;
    sumnums2=sumnums2+nums2;
    sumnums7=sumnums7+nums7;
    sumnums6=sumnums6+nums6;
end
[SNR_Sys_Bds(1,1),SNR_Sys_Bds(2,1),SNR_Sys_Bds(3,1),SNR_Sys_Bds(4,1)]=deal(
sumSNR_Sys_Bds/sumnums,sumSNR2_Sys_Bds/sumnums2,sumSNR7_Sys_Bds/sumnums7,sum
SNR6_Sys_Bds/sumnums6);
end
```



6.7 GetCycleSlip.m

```
function [CycleSlip_Gps,CycleSlip_Bds,CycleSlipRatio_Gps,CycleSlipRatio_Bds]=GetCycleSlip(cell_allGps,cell_allBds)
CycleSlip_Gps=cell(length(cell_allGps),1);
CycleSlip_Bds=cell(length(cell_allBds),1);
CycleSlipRatio_Gps=cell(length(cell_allGps),2);
CycleSlipRatio_Bds=cell(length(cell_allBds),2);
c=299792458.0;
%Gps:L1/L2->L1C/L2W, Bds:B1/B3->L2I/L6I
[L1,L2,L5,B1,B2,B3]=deal(1575420000,1227600000,1176450000,1561098000,1207140000,1268520000);
[L1_wavlen,L2_wavlen,~,B1_wavlen,~,B3_wavlen]=deal(c/L1,c/L2,c/L5,c/B1,c/B2,c/B3);
%Undifferenced pseudorange accuracy
SigmaC=0.3;

%GPS
%-----
wavlen_mw=c/(L1-L2);
len=length(cell_allGps);
for i=1:len
    %disp('i=');disp(i);
    nums=length(cell_allGps{i,1}.SatelliteID);
    PRN=cell_allGps{i,1}.SatelliteID;
    TimeSequence=cell_allGps{i,1}.Time;
    CycleSlipMark=zeros(nums,1);%CycleSlipMark: 0:healthy 1:cycle slip
    2:outlier -1:lock-loss
    Nmw_list=[];
    Lmw_list=[];
    LGF_list=[];
    PGF_list=[];
    rms0_Lmw=SigmaC/(L1+L2)*sqrt(L1^2+L2^2);
    % mark the Time-Interruption and calculate the MW value for every epoch
    for j=1:nums
        %judge the lock-loss
        if cell_allGps{i,1}.L1C(j)==0 || cell_allGps{i,1}.L2W(j)==0 ||
        cell_allGps{i,1}.C1C(j)==0 || cell_allGps{i,1}.C2W(j)==0
            CycleSlipMark(j)=-1;
        end
        %save the MW value

        Nmw=(cell_allGps{i,1}.L1C(j)-cell_allGps{i,1}.L2W(j))-1/((L1+L2)*wavlen_mw)
        *(L1*cell_allGps{i,1}.C1C(j)+L2*cell_allGps{i,1}.C2W(j));
    end
end
```



```
Nmw_list=[Nmw_list;Nmw];
Lmw_list=wavlen_mw.*Nmw_list;
%save the GF value

LGF=L1_wavlen*cell_allGps{i,1}.L1C(j)-L2_wavlen*cell_allGps{i,1}.L2W(j);
PGF=cell_allGps{i,1}.C1C(j)-cell_allGps{i,1}.C2W(j);
LGF_list=[LGF_list;LGF];
PGF_list=[PGF_list;PGF];
end
%Get dLGF
dLGF_list=zeros(length(LGF_list)-1,1);
for m=2:length(LGF_list)
    dLGF_list(m-1)=LGF_list(m)-LGF_list(m-1);
end
%Get ddLGF
ddLGF_list=zeros(length(LGF_list)-2,1);
for m=2:length(dLGF_list)
    ddLGF_list(m-1)=dLGF_list(m)-dLGF_list(m-1);
end

k=1;%k th MW observation as the fisrt MW value for a continuous time span
n=1;%n th continuous time span
while true
    if CycleSlipMark(k)==0 && k~=1
        k=k+1;
        if k==nums || k==nums+1
            break;
        end
    elseif CycleSlipMark(k)==-1
        %at least 3 continuous obs epoches for a time span for detection
        while CycleSlipMark(k)==-1 || CycleSlipMark(k+1)==-1 ||
CycleSlipMark(k+2)==-1
            k=k+1;
            if k==nums-2
                break;
            end
        end
    end
    if k==nums-2 || k==nums-1
        break;
    end
    %disp('k=');disp(k);
    % especially, j=k: initialize rms
    rms_Lmw=rms0_Lmw;
```



```
mean_Lmw=Lmw_list(k);

rms_Lmw_list=[rms_Lmw];%initialize list
mean_Lmw_list=[mean_Lmw];

% j=k+1
rms_Lmw=sqrt((2-1)/2*rms_Lmw^2+1/2*(Lmw_list(k+1)-mean_Lmw)^2);
mean_Lmw=(2-1)/2*mean_Lmw+1/2*Lmw_list(k+1);

rms_Lmw_list=[rms_Lmw_list;rms_Lmw];
mean_Lmw_list=[mean_Lmw_list;mean_Lmw];

width=2;
for j=(k+2):nums
    width=width+1;
    if CycleSlipMark(j)==-1
        break;
    end

rms_Lmw=sqrt((j-k)/(j-k+1)*rms_Lmw^2+1/(j-k+1)*(Lmw_list(j)-mean_Lmw)^2);
mean_Lmw=(j-k)/(j-k+1)*mean_Lmw+1/(j-k+1)*Lmw_list(j);

% 1:cycle slip 2:outlier
% we start from 'k+1'th MW value, (meanly j-1,j=k+2)
judge1=abs(Lmw_list(j-1)-mean_Lmw_list(j-k+1-2));
threshold1=4*rms_Lmw_list(j-k+1-2);
judge2=abs(Lmw_list(j)-Lmw_list(j-1));
threshold2=1;
judge3=abs(Lmw_list(j)-mean_Lmw_list(j-k+1-1));
threshold3=4*rms_Lmw_list(j-k+1-1);

if width==3
    mm=0;
    nn=0;
else
    mm=ddLGF_list(j-3)+ddLGF_list(j-2);
    nn=ddLGF_list(j-3);
end

if (judge1>=threshold1 && judge3>=threshold3 && judge2>threshold2)
|| (judge1>=threshold1 && judge3<threshold3)
    CycleSlipMark(j-1)=2;
    break;
elseif judge1>=threshold1 && judge3>=threshold3 &&
```



```
judge2<=threshold2
    CycleSlipMark(j-1)=1;
    break;
elseif abs(nn)>=0.02 && abs(mm)<0.006 && width>3
    CycleSlipMark(j-1)=1;
    break;
else
    rms_Lmw_list=[rms_Lmw_list;rms_Lmw];
    mean_Lmw_list=[mean_Lmw_list;mean_Lmw];
end
end
% save the data for each continuous time span, aligned with TimeSequence
k=j;
%disp('j=');disp(k);
if(j==nums)
    break;
end
n=n+1;
end

ratio=tabulate(CycleSlipMark);
CycleSlipRatio_Gps(i,:)={{PRN(1)},ratio};

data=[PRN,TimeSequence,CycleSlipMark,Nmw_list,Lmw_list,cell_allGps{i,1}.C1C,
cell_allGps{i,1}.L1C,cell_allGps{i,1}.C2W,cell_allGps{i,1}.L2W];
CycleSlip_Gps(i,1)={data};
end

%BDS
%-----
wavlen_mw=c/(B1-B3);
len=length(cell_allBds);
for i=1:len
    %disp('i=');disp(i);
    nums=length(cell_allBds{i,1}.SatelliteID);
    PRN=cell_allBds{i,1}.SatelliteID;
    TimeSequence=cell_allBds{i,1}.Time;
    CycleSlipMark=zeros(nums,1);%CycleSlipMark: 0:healthy 1:cycle slip
    2:outlier -1:lock-loss
    Nmw_list=[];
    Lmw_list=[];
    LGF_list=[];
    PGF_list=[];
```



```
rms0_Lmw=SigmaC/(B1+B3)*sqrt(B1^2+B3^2);
% mark the Time-Interruption and calculate the MW value for every epoch
for j=1:nums
    %judge the lock-loss
    if cell_allBds{i,1}.L2I(j)==0 || cell_allBds{i,1}.L6I(j)==0 ||
cell_allBds{i,1}.C2I(j)==0 || cell_allBds{i,1}.C6I(j)==0
        CycleSlipMark(j)=-1;
    end
    %save the MW value

Nmw=(cell_allBds{i,1}.L2I(j)-cell_allBds{i,1}.L6I(j))-1/((B1+B3)*wavlen_mw)
*(B1*cell_allBds{i,1}.C2I(j)+B3*cell_allBds{i,1}.C6I(j));
Nmw_list=[Nmw_list;Nmw];
Lmw_list=wavlen_mw.*Nmw_list;
%save the GF value

LGF=B1_wavlen*cell_allBds{i,1}.L2I(j)-B3_wavlen*cell_allBds{i,1}.L6I(j);
PGF=cell_allBds{i,1}.C2I(j)-cell_allBds{i,1}.C6I(j);
LGF_list=[LGF_list;LGF];
PGF_list=[PGF_list;PGF];
end
%Get dLGF
dLGF_list=zeros(length(LGF_list)-1,1);
for m=2:length(LGF_list)
    dLGF_list(m-1)=LGF_list(m)-LGF_list(m-1);
end
%Get ddLGF
ddLGF_list=zeros(length(LGF_list)-2,1);
for m=2:length(dLGF_list)
    ddLGF_list(m-1)=dLGF_list(m)-dLGF_list(m-1);
end

k=1;%k th MW observation as the fisrt MW value for a continuous time span
n=1;%n th continuous time span
while true
    if CycleSlipMark(k)==0 && k~=1
        k=k+1;
        if k==nums || k==nums+1
            break;
        end
    elseif CycleSlipMark(k)==-1
        %at least 3 continuous obs epoches for a time span for detection
        while CycleSlipMark(k)==-1 || CycleSlipMark(k+1)==-1 ||
CycleSlipMark(k+2)==-1
```



```
k=k+1;
if k==nums-2
    break;
end
end
if k==nums-2 || k==nums-1
    break;
end
%disp('k=');disp(k);
% especially, j=k: initialize rms
rms_Lmw=rms0_Lmw;
mean_Lmw=Lmw_list(k);

rms_Lmw_list=[rms_Lmw];%initialize list
mean_Lmw_list=[mean_Lmw];

% j=k+1
rms_Lmw=sqrt((2-1)/2*rms_Lmw^2+1/2*(Lmw_list(k+1)-mean_Lmw)^2);
mean_Lmw=(2-1)/2*mean_Lmw+1/2*Lmw_list(k+1);

rms_Lmw_list=[rms_Lmw_list;rms_Lmw];
mean_Lmw_list=[mean_Lmw_list;mean_Lmw];

width=2;
for j=(k+2):nums
    width=width+1;
    if CycleSlipMark(j)==-1
        break;
    end

rms_Lmw=sqrt((j-k)/(j-k+1)*rms_Lmw^2+1/(j-k+1)*(Lmw_list(j)-mean_Lmw)^2);
mean_Lmw=(j-k)/(j-k+1)*mean_Lmw+1/(j-k+1)*Lmw_list(j);

% 1:cycle slip 2:outlier
% we start from 'k+1'th MW value, (mainly j-1,j=k+2)
judge1=abs(Lmw_list(j-1)-mean_Lmw_list(j-k+1-2));
threshold1=4*rms_Lmw_list(j-k+1-2);
judge2=abs(Lmw_list(j)-Lmw_list(j-1));
threshold2=1;
judge3=abs(Lmw_list(j)-mean_Lmw_list(j-k+1-1));
threshold3=4*rms_Lmw_list(j-k+1-1);

if width==3
```



```
mm=0;
nn=0;
else
    mm=ddLGF_list(j-3)+ddLGF_list(j-2);
    nn=ddLGF_list(j-3);
end

if (judge1>=threshold1 && judge3>=threshold3 && judge2>threshold2)
|| (judge1>=threshold1 && judge3<threshold3)
    CycleSlipMark(j-1)=2;
    break;
elseif judge1>=threshold1 && judge3>=threshold3 &&
judge2<=threshold2
    CycleSlipMark(j-1)=1;
    break;
elseif abs(nn)>=0.02 && abs(mm)<0.006 && width>3
    CycleSlipMark(j-1)=1;
    break;
else
    rms_Lmw_list=[rms_Lmw_list;rms_Lmw];
    mean_Lmw_list=[mean_Lmw_list;mean_Lmw];
end
end

% save the data for each continuous time span, aligned with Timesequence
k=j;
%disp('j=');disp(k);
if(j==nums)
    break;
end
n=n+1;
end

ratio=tabulate(CycleSlipMark);
CycleSlipRatio_Bds(i,:)={{PRN(1)}, {ratio}};

data=[PRN,TimeSequence,CycleSlipMark,Nmw_list,Lmw_list,cell_allBds{i,1}.C2I,
cell_allBds{i,1}.L2I,cell_allBds{i,1}.C6I,cell_allBds{i,1}.L6I];
CycleSlip_Bds(i,1)={data};
end

end
```



6.8 GetMultipath.m

```
function [MP_Gps,MP_Bds,MP_SingleGpsSequence,MP_SingleBdsSequence] =  
GetMultipath(Slipdata_Gps,Slipdata_Bds)  
% Gps:L1/L2->L1C/L2W, Bds:B1/B3->L2I/L6I  
c=299792458.0;  
[L1,L2,L5,B1,B2,B3]=deal(1575420000,1227600000,1176450000,1561098000,120714  
0000,1268520000);  
[L1_wavlen,L2_wavlen,~,B1_wavlen,~,B3_wavlen]=deal(c/L1,c/L2,c/L5,c/B1,c/B2,  
c/B3);  
MP_Gps=zeros(length(Slipdata_Gps),3);  
MP_Bds=zeros(length(Slipdata_Bds),3);  
MP_SingleGpsSequence=cell(length(Slipdata_Gps),1);  
MP_SingleBdsSequence=cell(length(Slipdata_Bds),1);  
  
% GPS  
%-----  
AMB=[];  
len=length(Slipdata_Gps);  
for i=1:len  
    num=0;  
    nums=length(Slipdata_Gps{i,1});  
    PRN=Slipdata_Gps{i,1}(1,1);  
    Time=Slipdata_Gps{i,1}(:,2);  
    CycleSlipMark=Slipdata_Gps{i,1}(:,3);  
    C1C=Slipdata_Gps{i,1}(:,6);  
    L1C=Slipdata_Gps{i,1}(:,7);  
    C2W=Slipdata_Gps{i,1}(:,8);  
    L2W=Slipdata_Gps{i,1}(:,9);  
    sequence_mark=[];  
    delta=Time(1)-1;  
    k=1;  
  
    % find ALL continuous time sequence without outliers or cycle slips  
    while k<nums  
        if k==nums  
            break;  
        end  
        if CycleSlipMark(k)~=0  
            k=k+1;  
            continue;  
        end  
        if CycleSlipMark(k)==0  
            num_start=k;
```



```
for p=(k+1):nums
    if p==nums
        num_end=p;
        sequence_mark=[sequence_mark;num_start,num_end];
        break;
    elseif CycleSlipMark(p)~=0
        k=p;
        num_end=p-1;
        sequence_mark=[sequence_mark;num_start,num_end];
        break;
    end
end
if p==nums
    break;
end
end
k=k+1;
end

% find BEST continuous time sequence without outliers or cycle slips
if length(sequence_mark(:,1))==1
    m=1;
else
    m=1;
    max=sequence_mark(1,2)-sequence_mark(1,1);
    for w=1:length(sequence_mark)-1
        d=sequence_mark(w,2)-sequence_mark(w,1);
        d1=sequence_mark(w+1,2)-sequence_mark(w+1,1);
        if (d1>d && d1>max)
            m=w+1;
            max=d1;
        end
    end
end
end

% get span-time
span=sequence_mark(m,:);
spantime=zeros(span(2)-span(1)+1,1);
t=span(1):1:span(2);
prn=zeros(span(2)-span(1)+1,1);
for q=1:span(2)-span(1)+1
    spantime(q)=t(q)+delta;
    prn(q)=PRN(1);
end
```



```
% get Single-MP-TimeSequence
N=span(1,2)-span(1,1)+1;
MP_Sequence=zeros(N,4);
for j=span(1,1):span(1,2)

MP1=C1C(j)-(L1^2+L2^2)/(L1^2-L2^2)*L1_wavlen*L1C(j)+2*L2^2/(L1^2-L2^2)*L2_w
avlen*L2W(j);

MP2=C2W(j)-2*L1^2/(L1^2-L2^2)*L1_wavlen*L1C(j)+(L1^2+L2^2)/(L1^2-L2^2)*L2_w
avlen*L2W(j);
    MP_Sequence(j,3)=MP1;
    MP_Sequence(j,4)=MP2;
end
MP_Sequence(all(MP_Sequence==0,2),:)=[];
MP_Sequence(:,1)=prn;
MP_Sequence(:,2)=spantime;

% Estimate AMBIGUITY
mMP1=round(mean(MP_Sequence(:,3)));
mMP2=round(mean(MP_Sequence(:,4)));
AMB=[AMB;PRN,mMP1,mMP2];
for u=1:length(MP_Sequence)
    MP_Sequence(u,3)=MP_Sequence(u,3)-mMP1;
    MP_Sequence(u,4)=MP_Sequence(u,4)-mMP2;
end

% MP_Sequence: [prn, spantime, L1_multi, L2_multi]
MP_SingleGpsSequence(i)={MP_Sequence};

% get bar-MP for each PRN
b1=0;
b2=0;
for u=1:length(MP_Sequence)
    b1=b1+(MP_Sequence(u,3)-mMP1)^2;
    b2=b2+(MP_Sequence(u,4)-mMP2)^2;
end
barMP1=sqrt((1/(N-1)*b1));
barMP2=sqrt((1/(N-1)*b2));

MP_Gps(i,1)=PRN;
MP_Gps(i,2)=barMP1-mMP1;
MP_Gps(i,3)=barMP2-mMP2;
```



```
% output correction
if MP_Gps(i,2)>2 || MP_Gps(i,3)>2 % failure of fixing AMB
    MP_Gps(i,2)=mean(MP_Sequence(:,3));
    MP_Gps(i,3)=mean(MP_Sequence(:,4));
end
end
% BDS
%-----
AMB=[];
len=length(Slipdata_Bds);
for i=1:len
    num=0;
    nums=length(Slipdata_Bds{i,1});
    PRN=Slipdata_Bds{i,1}(1,1);
    Time=Slipdata_Bds{i,1}(:,2);
    CycleSlipMark=Slipdata_Bds{i,1}(:,3);
    C2I=Slipdata_Bds{i,1}(:,6);
    L2I=Slipdata_Bds{i,1}(:,7);
    C6I=Slipdata_Bds{i,1}(:,8);
    L6I=Slipdata_Bds{i,1}(:,9);
    sequence_mark=[];
    delta=Time(1)-1;
    k=1;

    % find ALL continuous time sequence without outliers or cycle slips
    while k<nums
        if k==nums
            break;
        end
        if CycleSlipMark(k)~=0
            k=k+1;
            continue;
        end
        if CycleSlipMark(k)==0
            num_start=k;
            for p=(k+1):nums
                if p==nums
                    num_end=p;
                    sequence_mark=[sequence_mark;num_start,num_end];
                    break;
                elseif CycleSlipMark(p)~=0
                    k=p;
                    num_end=p-1;
                    sequence_mark=[sequence_mark;num_start,num_end];
                end
            end
        end
    end
end
```



```
        break;
    end
end
if p==nums
    break;
end
k=k+1;
end

% find BEST continuous time sequence without outliers or cycle slips
if length(sequence_mark(:,1))==1
    m=1;
else
    m=1;
    max=sequence_mark(1,2)-sequence_mark(1,1);
    for w=1:length(sequence_mark)-1
        d=sequence_mark(w,2)-sequence_mark(w,1);
        d1=sequence_mark(w+1,2)-sequence_mark(w+1,1);
        if (d1>d && d1>max)
            m=w+1;
            max=d1;
        end
    end
end
end

% get span-time
span=sequence_mark(m,:);
spantime=zeros(span(2)-span(1)+1,1);
t=span(1):1:span(2);
prn=zeros(span(2)-span(1)+1,1);
for q=1:span(2)-span(1)+1
    spantime(q)=t(q)+delta;
    prn(q)=PRN(1);
end

% get Single-MP-TimeSequence
N=span(1,2)-span(1,1)+1;
MP_Sequence=zeros(N,4);
for j=span(1,1):span(1,2)

MP1=C2I(j)-(B1^2+B3^2)/(B1^2-B3^2)*B1_wavlen*L2I(j)+2*B3^2/(B1^2-B3^2)*B3_w
avlen*L6I(j);
```



```
MP2=C6I(j)-2*B1^2/(B1^2-B3^2)*B1_wavlen*L2I(j)+(B1^2+B3^2)/(B1^2-B3^2)*B3_w
avlen*L6I(j);
    MP_Sequence(j,3)=MP1;
    MP_Sequence(j,4)=MP2;
end
MP_Sequence(all(MP_Sequence==0,2),:)=[];
MP_Sequence(:,1)=prn;
MP_Sequence(:,2)=spantime;

% Estimate AMBIGUITY
mMP1=round(mean(MP_Sequence(:,3)));
mMP2=round(mean(MP_Sequence(:,4)));
AMB=[AMB;PRN,mMP1,mMP2];
for u=1:length(MP_Sequence)
    MP_Sequence(u,3)=MP_Sequence(u,3)-mMP1;
    MP_Sequence(u,4)=MP_Sequence(u,4)-mMP2;
end

% MP_Sequence: [prn, spantime, L1_multi, L2_multi]
MP_SingleBdsSequence(i)={MP_Sequence};

% get bar-MP for each PRN
b1=0;
b2=0;
for u=1:length(MP_Sequence)
    b1=b1+(MP_Sequence(u,3)-mMP1)^2;
    b2=b2+(MP_Sequence(u,4)-mMP2)^2;
end
barMP1=sqrt((1/(N-1)*b1));
barMP2=sqrt((1/(N-1)*b2));

MP_Bds(i,1)=PRN;
MP_Bds(i,2)=barMP1-mMP1;
MP_Bds(i,3)=barMP2-mMP2;

% output correction
if MP_Bds(i,2)>2 || MP_Bds(i,3)>2 % failure of fixing AMB
    MP_Bds(i,2)=mean(MP_Sequence(:,3));
    MP_Bds(i,3)=mean(MP_Sequence(:,4));
end

end
End
```



6.9 Visualization.m

```
function [] =
Visualization(CSlip_Gps,CSlip_Bds,MP_GpsSequence,MP_BdsSequence,allGpsData,
allBdsData)%designed by hzLiu,2023.7.14
clf;
%% Cycle-Slip : Single PRN TimeSequence
for i=1:length(CSlip_Gps)
    clf;
    figure(1);
    PRN=CSlip_Gps{i,1}(1,1);
    if PRN<10
        Sat=strcat('G0',int2str(PRN));
    else
        Sat=strcat('G',int2str(PRN));
    end
    name=strcat(Sat,'-', 'Wide-Lane AMB Time Sequence');
    set(gcf,'Position',[50 50 1000 560])
    %MW: Wide-Lane AMB of Healthy Epoch

    scatter(CSlip_Gps{i,1}(CSlip_Gps{i,1}(:,3)==0&(abs(CSlip_Gps{i,1}(:,4))<100
0),2),CSlip_Gps{i,1}(CSlip_Gps{i,1}(:,3)==0&(abs(CSlip_Gps{i,1}(:,4))<1000),
4),6,[0.28 0.57 0.54],"filled");hold on
    %MW: Wide-Lane AMB of Epoch with Cycle-Slips

    scatter(CSlip_Gps{i,1}(CSlip_Gps{i,1}(:,3)==1&(abs(CSlip_Gps{i,1}(:,4))<100
0),2),CSlip_Gps{i,1}(CSlip_Gps{i,1}(:,3)==1&(abs(CSlip_Gps{i,1}(:,4))<1000),
4),15,[0.73 0.47 0.58],"filled");hold on
    %MW: Wide-Lane AMB of Epoch with Outliers

    scatter(CSlip_Gps{i,1}(CSlip_Gps{i,1}(:,3)==2&(abs(CSlip_Gps{i,1}(:,4))<100
0),2),CSlip_Gps{i,1}(CSlip_Gps{i,1}(:,3)==2&(abs(CSlip_Gps{i,1}(:,4))<1000),
4),15,[0.62 0.49 0.31],"filled");hold on

    legend1=legend('$\bf{Healthy}$',
'$\bf{CycleSlips}$',
'$\bf{Outliers}$',
'interpreter','latex',
'FontSize',10.5);
    set(legend1,'LineWidth',1,'Interpreter','latex','FontSize',10.5);
    xlabel('$\bf{Time(s)}$', 'interpreter','latex','FontSize', 17)
    ylabel('$\bf{Value}$', 'interpreter','latex','FontSize', 17)
    title({'$\bf{WideLane-AMB-TimeSequence(ValidEpoch)}$'},
'interpreter','latex','FontSize', 19);
    set(gca,'linewidth',1.5);
```



```
set(gca,'XGrid','on','XMinorGrid','off','YGrid','on','YMinorGrid','off');
    set(gca,'fontsize',13,'Fontname','Times','FontWeight','bold')
    box on
    cd ..\img\Gps\
    saveas(gcf, name, 'png');
    cd ..\..\code\
    hold off
end
for i=1:length(CSlip_Bds)
    clf;
    figure(1);
    PRN=CSlip_Bds{i,1}(1,1);
    if PRN<10
        Sat=strcat('C0',int2str(PRN));
    else
        Sat=strcat('C',int2str(PRN));
    end
    name=strcat(Sat,'-', 'Wide-Lane AMB Time Sequence');
    set(gcf,'Position',[50 50 1000 560])
    %MW: Wide-Lane AMB of Healthy Epoch

    scatter(CSlip_Bds{i,1}(CSlip_Bds{i,1}(:,3)==0&(abs(CSlip_Bds{i,1}(:,4))<100
0),2),CSlip_Bds{i,1}(CSlip_Bds{i,1}(:,3)==0&(abs(CSlip_Bds{i,1}(:,4))<1000),
4),6,[0.28 0.57 0.54],"filled");hold on
    %MW: Wide-Lane AMB of Epoch with Cycle-Slips

    scatter(CSlip_Bds{i,1}(CSlip_Bds{i,1}(:,3)==1&(abs(CSlip_Bds{i,1}(:,4))<100
0),2),CSlip_Bds{i,1}(CSlip_Bds{i,1}(:,3)==1&(abs(CSlip_Bds{i,1}(:,4))<1000),
4),15,[0.73 0.47 0.58],"filled");hold on
    %MW: Wide-Lane AMB of Epoch with Outliers

    scatter(CSlip_Bds{i,1}(CSlip_Bds{i,1}(:,3)==2&(abs(CSlip_Bds{i,1}(:,4))<100
0),2),CSlip_Bds{i,1}(CSlip_Bds{i,1}(:,3)==2&(abs(CSlip_Bds{i,1}(:,4))<1000),
4),15,[0.62 0.49 0.31],"filled");hold on

    legend1=legend('$\bf{Healthy}$',
'$\bf{CycleSlips}$',
'$\bf{Outliers}$',
'interpreter','latex','FontSize',10.5);
    set(legend1,'LineWidth',1,'Interpreter','latex','FontSize',10.5);
    xlabel('$\bf{Time(sec)}$', 'interpreter','latex','FontSize', 17)
    ylabel('$\bf{Value(cycle)}$', 'interpreter','latex','FontSize', 17)
    title({'$\bf{WideLane-AMB-TimeSequence(ValidEpoch)}$'},
'interpreter','latex','FontSize', 19);
    set(gca,'linewidth',1.5);
```



```
set(gca,'XGrid','on','XMinorGrid','off','YGrid','on','YMinorGrid','off'));
    set(gca,'fontsize',13,'Fontname','Times','FontWeight','bold')

    box on
    cd ..\img\Bds\
    saveas(gcf, name, 'png');
    cd ..\..\code\
    hold off
end
%% SNR : Single PRN TimeSequence
for i=1:length(allGpsData)
    clf;
    figure(1);
    PRN=allGpsData{i,1}.SatelliteID(1,1);
    if PRN<10
        Sat=strcat('G0',int2str(PRN));
    else
        Sat=strcat('G',int2str(PRN));
    end
    name=strcat(Sat,'-', 'L1L2L5 SNR Time Sequence');
    set(gcf,'Position',[50 50 1000 560])

    %SNR: L1
    plot(allGpsData{i,1}.Time,allGpsData{i,1}.S1C,'Color',[0.28 0.57
0.54],LineWidth=2);hold on
    %SNR: L2
    plot(allGpsData{i,1}.Time,allGpsData{i,1}.S2W,'Color',[0.73 0.47
0.58],LineWidth=2);hold on
    %SNR: L5
    plot(allGpsData{i,1}.Time,allGpsData{i,1}.S5X,'Color',[0.62 0.49
0.31],LineWidth=2);hold on

legend1=legend('$\bf{L1:S1C}$','$\bf{L2:S2W}$','$\bf{L5:S5X}$','interpreter
','latex','FontSize',10.5);
    set(legend1,'LineWidth',1,'Interpreter','latex','FontSize',10.5);
    xlabel('$\bf{Time(sec)}$','interpreter','latex','FontSize', 17)
    ylabel('$\bf{SNR(dBHz)}$','interpreter','latex','FontSize', 17)
    title({'$\bf{L1/L2/L5-SNR-Time Sequence}$'},
'interpreter','latex','FontSize', 19);
    set(gca,'linewidth',1.5);

set(gca,'XGrid','on','XMinorGrid','off','YGrid','on','YMinorGrid','off');
```



```
set(gca,'FontSize',13,'Fontname','Times','FontWeight','bold')
box on
cd ..\img\Gps\
saveas(gcf, name, 'png');
cd ..\..\code\
hold off
end
for i=1:length(allBdsData)
clf;
figure(1);
PRN=allBdsData{i,1}.SatelliteID(1,1);
if PRN<10
    Sat=strcat('C0',int2str(PRN));
else
    Sat=strcat('C',int2str(PRN));
end
name=strcat(Sat,'-', 'B1B2B3 SNR Time Sequence');
set(gcf,'Position',[50 50 1000 560])
%SNR: B1
plot(allBdsData{i,1}.Time,allBdsData{i,1}.S2I,'Color',[0.28 0.57
0.54],LineWidth=2);hold on
%SNR: B2
plot(allBdsData{i,1}.Time,allBdsData{i,1}.S7I,'Color',[0.73 0.47
0.58],LineWidth=2);hold on
%SNR: B3
plot(allBdsData{i,1}.Time,allBdsData{i,1}.S6I,'Color',[0.62 0.49
0.31],LineWidth=2);hold on

legend1=legend('$\bf{B1:S2I}$','$\bf{B2:S7I}$','$\bf{B3:S6I}$','interpreter
','latex','FontSize',10.5);
set(legend1,'LineWidth',1,'Interpreter','latex','FontSize',10.5);
xlabel('$\bf{Time(sec)}$','interpreter','latex','FontSize', 17)
ylabel('$\bf{SNR(dBHz)}$','interpreter','latex','FontSize', 17)
title({'$\bf{B1/B2/B3-SNR-Time Sequence}$'},
'interpreter','latex','FontSize', 19);
set(gca,'linewidth',1.5);

set(gca,'XGrid','on','XMinorGrid','off','YGrid','on','YMinorGrid','off');
set(gca,'FontSize',13,'Fontname','Times','FontWeight','bold')
box on
cd ..\img\Bds\
saveas(gcf, name, 'png');
cd ..\..\code\
```



```
hold off
end

%% Multipath Effects : Single PRN TimeSequence
for i=1:length(MP_GpsSequence)
    clf;
    figure(1);
    PRN=MP_GpsSequence{i,1}(1,1);
    if PRN<10
        Sat=strcat('G0',int2str(PRN));
    else
        Sat=strcat('G',int2str(PRN));
    end
    name=strcat(Sat,'--','Multipath Effects Time Sequence');
    set(gcf,'Position',[50 50 1000 560])

    %Multipath: L1
    plot(MP_GpsSequence{i,1}(:,2),MP_GpsSequence{i,1}(:,3), 'Color',[0.28
0.57 0.54],LineWidth=2);hold on
    %Multipath: L2
    plot(MP_GpsSequence{i,1}(:,2),MP_GpsSequence{i,1}(:,4), 'Color',[0.73
0.47 0.58],LineWidth=2);hold on

legend1=legend('$\bf{L1:Multipath}$','$\bf{L2:Multipath}$','interpreter','l
atex','FontSize',10.5);
set(legend1,'LineWidth',1,'Interpreter','latex','FontSize',10.5);
xlabel('$\bf{Time(sec)}$', 'interpreter','latex','FontSize', 17)
ylabel('$\bf{Value(m)}$', 'interpreter','latex','FontSize', 17)
title({'$\bf{Multipath Effects-Time Sequence(HealthyEpoch)}$'},
'interpreter','latex','FontSize', 19);
set(gca,'linewidth',1.5);

set(gca,'XGrid','on','XMinorGrid','off','YGrid','on','YMinorGrid','off');
set(gca,'fontsize',13,'fontname','Times','FontWeight','bold')
box on
cd ..\img\Gps\
saveas(gcf, name, 'png');
cd ..\..\code\
hold off
end
for i=1:length(MP_BdsSequence)
    clf;
    figure(1);
```



```
PRN=MP_BdsSequence{i,1}(1,1);
if PRN<10
    Sat=strcat('C0',int2str(PRN));
else
    Sat=strcat('C',int2str(PRN));
end
name=strcat(Sat,'-', 'Multipath Effects Time Sequence');
set(gcf, 'Position',[50 50 1000 560])

%Multipath: B1
plot(MP_BdsSequence{i,1}(:,2),MP_BdsSequence{i,1}(:,3), 'Color',[0.28
0.57 0.54],LineWidth=2);hold on
%Multipath: B3
plot(MP_BdsSequence{i,1}(:,2),MP_BdsSequence{i,1}(:,4), 'Color',[0.73
0.47 0.58],LineWidth=2);hold on

legend1=legend('$\bf{B1:Multipath}$','$\bf{B3:Multipath}$', 'interpreter',
' latex', 'FontSize',10.5);
set(legend1,'LineWidth',1,'Interpreter','latex','FontSize',10.5);
xlabel('$\bf{Time(sec)}$', 'interpreter', ' latex', 'FontSize', 17)
ylabel('$\bf{Value(m)}$', 'interpreter', ' latex', 'FontSize', 17)
title({'$\bf{Multipath Effects-Time Sequence(HealthyEpoch)}$'},
'interpreter', ' latex', 'FontSize', 19);
set(gca, 'linewidth',1.5);

set(gca, 'XGrid','on','XMinorGrid','off','YGrid','on','YMinorGrid','off');
set(gca, 'fontsize',13, 'fontname','Times', 'FontWeight','bold')
box on
cd ..\img\Bds\
saveas(gcf, name, 'png');
cd ..\..\code\
hold off
end
end
```