doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2021.02.001

嫦娥四号VLBI群时延跳变研究*

蒋健华1,2† 刘庆会1‡ 郑 鑫1 邓 涛1,2

(1 中国科学院上海天文台上海 200030)(2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要 相时延处理软件是嫦娥四号(CE-4)任务甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)测轨分系统软件配置项之一,利用其处理着陆巡视器X波段DOR (Differential One-way Ranging)信号时,观测弧段(scan)内偶尔存在残余群时延跳变问题. 论文主要分为两部分:一是根据VLBI信号接收和数据处理流程,从相关相位、频率、幅度和功率方面进行分析,最终将影响因素定位在昆明测站模拟信号异常;二是以scan内时延跳变影响因素分析为基础,通过修正异常基线相关相位,研究残余群时延跳变事后改正方法,并利用定轨软件验证其有效性,升级了相时延处理软件.

关键词 射电天文: 甚长基线干涉测量, 射电天文: 时延跳变, 方法: 数据分析 中图分类号: P164; 文献标识码: A

1 引言

深空探测一般指对月球及以远的地外天体进行空间探测的活动^[1]. 它主要通过发 射探测器来进行,而探测器的跟踪及精密测定轨在探测任务中占据重要地位,是完成 工程任务和科学探测的基础. 甚长基线干涉测量(Very Long Baseline Interferometry, VLBI)技术是目前角分辨率最高的天文观测技术,可以测定探测器的角位置,它与视线 方向的测距与测速方法联合,可以快速且精确地测定探测器在空间的位置和速度,对于 探测器的定位和定轨,特别在探测器变轨、捕获及下降着陆等关键弧段具有重要作用^[2].

中国VLBI网(Chinese VLBI Network, CVN)执行我国探月和深空探测的VLBI测定轨任务, 嫦娥四号(CE-4)任务中, 它由4个VLBI测站即北京密云(BJ)站、云南昆明(KM)站、乌鲁木齐(UR)站、上海天马(TM)站和上海VLBI数据处理中心组成. VL-BI测站的主要设备有: 天线(Antenna)、接收机(Receiver)、数据采集终端(Chinese Data Acquisition System, CDAS)、时间频率(Time frequency)系统、气象测量(Meteorological measurement)系统等; 数据处理中心主要设备为软件相关处理机(Software correlator)、硬件相关处理机(Hardware correlator), 主要软件有相关后(Post correlation)处

*国家自然科学基金项目(11973074、11773060、11803069),中国科学院射电天文重点实验室和 上海市空间导航与定位技术重点实验室资助

²⁰²⁰⁻⁰⁵⁻¹⁰收到原稿, 2020-10-12收到修改稿

[†]jjhua@shao.ac.cn

[‡]liuqh@shao.ac.cn

理软件、相时延(Phase delay)处理软件、定位(Position determination)和定轨(Orbit determination)软件,其他配置项有观测纲要(Task scheduling)、台站监管(Station monitoring)、实时VLBI数据传输(e-VLBI data transmission)、误差修正(Medium correction)、运行管理(Operation management)等^[2].

VLBI信号接收和数据处理流程如图1所示. CVN在执行嫦娥四号任务时, 各VLBI测 站交替观测河外射电源和探测器. 天线利用反射面将射电源或探测器发出的电波汇集起 来,聚焦至天线的馈源系统,馈源系统将射频信号传送至接收机进行放大. 放大后的射 频信号和基于氢钟的本振信号进行混频,变换为中频信号传送至数据采集终端^[2];终端 对中频信号进行模数转换采样,采样后利用FPGA (Field Programmable Gate Array)进 一步信号处理,包括数字下变频、提取基带信号、格式封装和协议封装,并发送给记录 设备. 利用e-VLBI技术将记录的数据从观测站传至VLBI数据处理中心;软、硬件相关 处理机对VLBI观测数据进行相关处理,获得互相关条纹. 后处理和相时延配置项从互相 关条纹中,利用带宽综合技术得到VLBI时延和时延率等基本观测量,并进行各项误差改 正. 改正的基本技术为求取各频点的探测器和射电源的差分相位,从而去除大气时延、 电离层时延和观测装置时延的大部分影响,并进一步利用GPS (Global Positioning System)和气象数据得到电离层和中性大气时延予以精确修正. 利用误差改正后的时延、时 延率数据以及北京航天飞行控制中心(Beijing Aerospace Control Center, BACC)的测 速测距数据,由定位和定轨系统对探测器进行轨道计算和定位归算^[2].



图 1 VLBI信号接收和VLBI数据处理流程图(嫦娥四号用户手册)

Fig. 1 The flow chart of VLBI station signal reception and VLBI center data processing (CE-4 user manual)

嫦娥四号是世界上首个在月球背面软着陆巡视探测的航天器^[3].在VLBI测定轨任 务中,利用相时延配置项处理UTC (Coordinated Universal Time)时间2018年12月8日 至29日着陆巡视器X波段DOR信号时,发现残余群时延偶尔存在跳变问题.跳变分 为两种类型:第1种是观测弧段(scan)间跳变,即整个scan的残余群时延跳变;第2种 是scan内跳变,即scan内部分残余群时延跳变.两种跳变独立发生、没有共同出现,应 分别进行研究.本文主要研究第2种跳变情况,比如着陆巡视器的VLBI时延在UTC时 间2018年12月10日出现跳变,对应观测代码为s8c10a.本文中所涉及到的观测时间均为UTC时间.

残余群时延跳变会引起观测量群时延测量误差增大,VLBI测角准确度下降,进而影 响探测器的定位定轨精度.后续,我国嫦娥五号、火星探测、木星探测等深空探测项目 陆续开展.解决残余群时延跳变问题,对完善VLBI测定轨系统,保障我国深空探测任务 中探测器的精密测定轨,具有重要意义.

根据VLBI信号接收和数据处理流程,本文主要对VLBI数据处理中心相时延配置项 数据和各测站记录数据进行处理,从相关相位、频率、幅度和功率方面,来寻找时延跳 变的影响因素.继而通过修正异常基线相关相位,研究残余群时延跳变事后改正方法, 并利用测定轨软件验证其有效性,升级了相时延处理软件.

2 时延分析

在嫦娥四号VLBI测定轨任务中,采用ΔDOR (Delta-Differential One-way Ranging)型VLBI技术,即通过交替观测河外射电源和探测器,并利用射电源的相关相位改正 探测器的相关相位,从而大幅降低大气、电离层、观测装置时延等公共误差的影响^[4-7]. 嫦娥四号DOR信号以载波频率(Fc) 8470 MHz为中心,分别调制±65 KHz的遥测信号、 ±0.5 MHz的测距信号、±3.8 MHz和±19.2 MHz的侧音信号.

迄今为止, VLBI观测量一般是群时延^[8]. 在嫦娥四号着陆巡视器的VLBI观测中,利用带宽4 MHz的4个通道分别记录X波段DOR信号主载波Fc和Fc-19.2 MHz (-DOR2)、Fc-3.8 MHz (-DOR1)、Fc+19.2 MHz (+DOR2)的侧音信号,实际观测中未记录Fc+3.8 MHz (+DOR1)的侧音信号. 在ΔDOR型VLBI技术中,首先利用主载波、±65 KHz的遥测信号和±0.5 MHz的测距信号解算主载波通道的初始残余群时延,再以此为基础并综合考虑4个通道修正装置内部时延后的探测器各频点相关相位,利用修正后的4个频点相关相位,进行最小二乘拟合,得到带宽综合残余群时延. 然后通过大气和电离层时延进一步修正带宽综合残余群时延,再加上几何时延预测值,最终得到探测器的带宽综合群时延.

利用上海天文台相时延处理软件分析嫦娥四号数据时,着陆巡视器s8c10a数据存在scan内时延跳变问题.在相时延处理软件中,利用5 s基线相关相位进行时域积分并进行直线拟合得到一个残余群时延数据,时延时间为这5 s的中间时刻.因此每5 s输出一个时延数据,文中的时延虽均用中间时刻来标记,但反映的是这5 s内的时延情况.跳变发生在2018年12月10日05:31:00左右,而UR测站在当日06:28:00才开始参与观测探测器,因此仅列出不包含UR测站的3条基线残余群时延,如图2所示,其中图2 (a)列为残余群时延的缩略图,图2 (b)列为残余群时延的放大图.

跳变所在scan的时间段为05:29:00—05:31:59, BJ-KM和KM-TM基线残余群时延出 现跳变,时延跳变幅度约为9 ns.随后残余群时延在该scan内恢复正常, BJ-TM基线残 余群时延正常.在05:31:00之后, BJ-KM基线第17 s、22 s、27 s、32 s、37 s 5个时延数据 跳变;时延数据有两部分缺失,分别是跳变前第7 s、12 s和跳变后第42 s、47 s;第52 s、 57 s时延数据恢复正常.KM-UR基线第12 s、17 s、22 s、27 s、32 s、37 s 6个点时延跳 变;时延数据也有两部分缺失,分别是跳变前第7 s和跳变后第42 s、47 s;第52 s、57 s时 延数据恢复正常.





Fig. 2 The residual group delay of BJ-KM, BJ-TM and KM-TM baselines, column (a) is thumbnail view and column (b) is enlarged view.

3 时延跳变因素分析

本节利用相时延处理软件以及3阶锁相环、快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法,对s8c10a的互相关数据和各测站输出数据进行处理,得到VLBI数据的相 关相位、频率和幅度信息,同时分析终端记录的信号功率,来研究时延跳变影响因素.

3.1 相关相位

利用相时延处理软件处理互相关数据得到基线相关相位,包括卷绕相关相位和解卷绕相关相位.卷绕相关相位反映相时延处理软件生成的初始相位数据质量,解卷绕相关相位则反映相位的趋势变化情况.

3.1.1 卷绕相关相位

在相时延处理软件中, 探测器卷绕相关相位的范围是(-π, +π). 探测器4个频点相 关相位减去对应频率校准射电源初相得到修正装置内部残余时延的探测器卷绕相关相 位, 数据输出间隔为1 s. 在发生跳变的scan, 以BJ-KM基线为例, 修正装置内部残余时 延的探测器卷绕相关相位如图3所示.





Fig. 3 $\,$ The wrap phase of BJ-KM baseline at each frequency point

在05:31:00之后, BJ-KM基线卷绕相关相位出现两次缺失, 即第5-11s和第41-46s相 关相位为零. KM-TM基线相关相位出现两次缺失, 即第6-10s和第41-46s相关相位为 零. 两条基线卷绕相关相位为零导致残余群时延缺失. 利用同样方法分析未发生时延跳 变的BJ-TM基线, 不存在相关相位跳变为零的情况.

3.1.2 解卷绕相关相位

利用相时延处理软件处理互相关数据,得到修正装置内部残余时延的探测器解卷绕相关相位. 在发生跳变的scan, 以BJ-KM基线为例, 解卷绕相关相位如图4所示.

在卷绕相关相位等于零对应时刻之后, 解卷绕相关相位异常. 主载波和DOR侧音的 相关相位出现跳变, 且每个频点的相关相位跳变大小不同, 从而引起了残余群时延的跳 变. 每个频点的相关相位变化趋势相同, 时延跳变大小相对恒定.



Fig. 4 The unwrap phase of BJ-KM baseline at each frequency point

3.2 频率

分别利用3阶锁相环和FFT算法处理各测站终端记录数据,得到两组频率.前者精度高,后者精度低.但FFT算法得到的频率可靠性更高,可用来评估锁相环跟踪的频率.以KM测站为例,终端记录的主载波数据频率如图5所示.





Fig. 5 The output frequency (a) and residual frequency (b) of KM station CDAS

图5 (a)中红色数据为利用FFT算法得到的频率,采样率为8 MHz, FFT点数 为8×10⁶,分辨率达到1 Hz,频率输出间隔为1 s. 在该scan, KM测站终端输出的主

载波数据中有10个点FFT频率发生跳变,且跳变具有随机性.两段跳变时间为:第127-131s,即05:31:00之后的第6-10s;第162-166s,即05:31:00之后的第41-45s.跟踪KM测站终端输出的-DOR2、-DOR1和+DOR2数据,侧音频率跳变的情况与主载波相同.KM测站记录数据频率跳变时间与时延缺失时间相同.利用相同算法处理BJ和TM测站终端记录的主载波、-DOR2、-DOR1和+DOR2数据,FFT求得的频率没有出现跳变.

图5 (a)中黑色数据为利用3阶锁相环跟踪得到的频率,每秒输出1000个频率数据; 图5 (b)为对3阶锁相环跟踪的频率进行4次多项式拟合得到的残差.各测站的VLBI信号 频率拟合残差均小于3 Hz,没有出现明显跳变.主要原因是3阶锁相环跟踪频率的精度 高,在数据处理过程中剔除了频率粗差.

3.3 幅度

利用第3.2节中的FFT算法处理各测站终端记录的原始数据,得到数据长度为1 s的 幅度信息,即在这1 s内各频点幅度与最大幅度的相对值.在发生跳变的scan,以KM测站 第50 s (05:29:49)、127 s (05:31:06)、132 s (05:31:11)为例,得到的主载波数据幅度谱如 图6所示.





在该scan第127-131s和第162-166s, KM测站终端输出的主载波数据和侧音数据的 幅度极低,信号数据极少,且时间与时延缺失时间相同.以第127s为例,得到的主载波数 据幅度谱如图6 (b)所示.在该scan第132-161 s, KM测站终端输出的主载波数据和侧音数据的幅度均小于正常值,且时间与时延跳变的时间相同.以第132 s为例,得到的主载波数据幅度谱如图6 (c)所示.在该scan其他时间段,KM测站终端输出的主载波数据和侧音数据正常.以第50 s为例,得到的主载波数据幅度谱如图6 (a)所示.利用相同算法处理BJ和TM测站终端输出的主载波和侧音数据,幅度正常.

3.4 功率

本文第3.2和3.3节对频率和幅度的研究表明, BJ、TM测站记录数据正常, KM测站 记录数据存在异常. KM测站由天线、接收机、数据采集终端、时间频率系统、气象测 量系统等组成. 嫦娥四号VLBI测定轨任务中, KM测站的数据由主终端采集, 同时搭配 一个备用终端, 用于进一步验证主终端的可靠性以及在主终端出现异常时代替其进行正 常工作. 终端的日志(log)文件主要记录A/D (Analogue to Digital)单元输出数字信号各 通道的相对功率, 即各通道功率与总通道功率的相对值. 在跳变scan, 具体功率如图7所 示, 主要给出主载波和各侧音所在4个通道的相对功率, 其中图7 (a)表示主终端相对功 率, 图7 (b)表示备用终端相对功率.



图 7 主终端(a)和备用终端(b) A/D单元输出数字信号所在通道的相对功率

在时延数据缺失的对应时间, KM测站数字信号通道相对功率异常, 比正常功率高6.5 dB左右, 约为正常功率的4.5倍. 在时延跳变的对应时间, KM测站数字信号相对功率发生跳变, 比正常功率高1.3 dB 左右. 主备用终端A/D单元输出数字信号通道相对功率跳变情况相同, 表明问题出现在终端A/D单元之前, 表现为KM测站模拟信号异常.

3.5 讨论

理论上需要对KM测站终端A/D单元前各组成部分的信号逐一进行分析,但在测站 的信号处理流程中,并未记录天线及接收机输出模拟信号的相关数据,仅记录了测站终端A/D单元输出数字信号各通道的相对功率,无法进一步准确定位跳变因素.对引起时 延跳变的原因在本节做了如下简要讨论.

Fig. 7 The channels' relative power of the digital signal output from the A/D unit of the master (a) and backup (b) CDAS $% A^{\prime}$

当KM测站信号接收系统串入很强干扰信号时,会引起数字信号通道功率过大,进 而导致终端数据记录系统饱和,不能有效记录探测器信号数据.KM测站终端输出数据 则表现为幅度极低、信号数据极少,相关处理机无法进行互相关处理,与KM测站相关 的两条基线的卷绕相关相位为零,最终导致残余群时延数据缺失.当KM测站信号接收 系统有部分干扰信号串入时,会导致终端记录和传输的信号数据异常.KM测站终端输 出数据则表现为幅度低于正常值,在互相关处理之后,与KM相关的两条基线的卷绕相 关相位出现跳变,最终导致残余群时延跳变.因此,推测KM测站信号接收系统可能串入 干扰信号,导致了时延跳变.

根据VLBI测站信号处理流程, 气象测量系统主要用于中性大气、电离层的时延改 正, 与残余群时延跳变无关. 时间频率系统主要提供测站基准频率和时间, 分析包含跳 变时间段的30 min的钟速信息, 台站监管时每30 s记录一次, 结果表明数据正常、无跳 变. 因此, KM测站接收系统其他组成部分如接收机系统、馈源舱至观测室的电缆传输 部分等, 可能串入干扰信号. 执行嫦娥四号任务时, 各测站接收机放置于馈源舱, 终端放 置在观测室, 接收机输出的中频信号通过馈源舱至观测室的电缆传输至数据采集终端.

嫦娥四号任务结束后,在2020年5月8日和7月17日分别完成了对KM、BJ测站馈源 舱至观测室约100 m长电缆的更换,并整理了原先较为凌乱的电路走线.更换和整理电 缆之后,截至2020年10月10日,在VLBI 测定轨试验和任务中,与KM、BJ测站相关的基 线未再出现时延跳变问题.UR和TM测站信号接收系统工作稳定,相关基线出现时延跳 变的情况较少.因此,推测馈源舱至观测室的电缆部分极有可能串入干扰信号,进而导 致了时延跳变.根据VLBI测站信号处理流程,从接收机输出到终端的信号频率较高,约 数百MHz,因此电磁兼容的设计水平对信号质量有较大影响.在测站更换电缆之前,可 能由于电缆等电器件的老化以及走线凌乱等原因,造成了电路走线之间的串扰.比如不 同走线之间存在电势差,而走线之间又存在分布式电容,这样走线之间的信号就会产生 较大的串扰.

此外,在我国火星探测任务中,还对昆明测站的接收机变频系统进行了更新,同时安装了新的前置型终端,即把新终端安装于馈源舱内,直接数字化,后续我们将继续关注是 否还有时延跳变问题出现.

4 跳变时延改正及定轨软件评定

4.1 残余群时延改正方法研究

VLBI残余群时延是由相关相位对频率直线拟合给出的.根据第3.1.2节中对解卷绕 相关相位的分析,时延跳变时间段的解卷绕相关相位异常,该scan其他时间段的解卷绕 相关相位正常.在异常段,主载波和DOR各侧音解卷绕相关相位整体跳变.跳变大小虽 不同,但依然保留正常段的变化趋势,跳变相关相位与理论相关相位存在一个常数差. 因此,可通过调整解卷绕跳变相关相位来改正残余群时延.优化后的调整常数如下式:

$$\delta = \Delta \varphi_A^2 + \Delta \varphi_B^2$$

= $[\varphi_A - (\varphi_{A'} + \Delta \varphi)]^2 + [\varphi_B - (\varphi_{B'} + \Delta \varphi)]^2$
= $2\Delta \varphi^2 - 2(\varphi_A - \varphi_{A'} + \varphi_B - \varphi_{B'})\Delta \varphi + (\varphi_A - \varphi_{A'})^2 + (\varphi_B - \varphi_{B'})^2$, (1)

其中, δ 为调整常数的优化衡量指标, $\Delta \varphi_A$ 为调整段起始相关相位与跳变前最邻近正常相 关相位的差值, $\Delta \varphi_B$ 为调整段最末相关相位与跳变后最邻近正常相关相位的差值, φ_A 为 跳变前最邻近的正常相关相位, $\varphi_{A'}$ 为跳变起始时刻的相关相位, $\varphi_{B'}$ 为跳变结束时刻的 相关相位, φ_B 为跳变后最邻近的正常相关相位, $\Delta \varphi$ 为异常段相关相位的调整常数.

分析上述公式, 当 $\Delta \varphi = \frac{\varphi_A - \varphi_{A'} + \varphi_B - \varphi_{B'}}{2}$ 时, 得到 δ_{\min} , 此时 $\Delta \varphi$ 即为最优解. 分别求 解异常段的主载波和DOR侧音解卷绕相关相位的优化调整常数, 利用调整后的相关相 位进行带宽综合, 得到改正后的残余群时延. 将s8c10a改正前后的残余群时延进行对比, 跳变的残余群时延得到修正, 如图8所示. 其中图8 (a)表示改正前残余群时延, 图8 (b)表 示改正后残余群时延.

分别求解异常段的主载波和DOR侧音解卷绕相关相位的优化调整常数,利用调整 后的相关相位进行带宽综合,得到改正后的残余群时延.将s8c10a改正前后的残余群时 延进行对比,跳变的残余群时延得到修正,如图8所示.其中图8 (a)表示改正前残余群时 延,图8 (b)表示改正后残余群时延.



图 8 BJ-KM、BJ-TM和KM-TM基线的残余群时延, (a)列为改正前的结果, (b)列为改正后的结果.

Fig. 8 The residual group delay of BJ-KM , BJ-TM and KM-TM baselines, column (a) is the original result and column (b) is the corrected result.

4.2 定轨软件精度评定

利用上海天文台VLBI定轨软件^[9-10],对嫦娥四号s8c10a残余群时延改正前后的数据进行分析. 各基线定轨后的VLBI时延残差如图9所示,其中图9 (a)表示时延跳变改正前的定轨时延残差,图9 (b)表示时延跳变改正后的定轨时延残差.

2 期



图 9 BJ-KM、BJ-TM和KM-TM基线的测定轨残差, (a)列为改正前的结果, (b)列为改正后的结果.

Fig. 9 The orbital residual of BJ-KM, BJ-TM and KM-TM baselines, column (a) is the original result and column (b) is the corrected result.

对定轨后的VLBI时延残差进行直线拟合,得到拟合后的RMS (Root Mean Square) 值. BJ-KM基线时延跳变改正前RMS值为0.9037 ns,时延跳变改正后RMS值为0.2491 ns; BJ-TM基线时延跳变改正前RMS值为0.1823 ns,时延跳变改正后RMS值为0.1341 ns; KM-TM基线时延跳变改正前RMS值为0.9731 ns,时延跳变改正后RMS值为0.2242 ns. 时延跳变改正后,定轨残差直线拟合的RMS值明显减小,定轨精度得到提高,验证了 第4.1节scan内残余群时延跳变改正方法的可行性.

5 结论

本文对嫦娥四号VLBI测定轨任务中scan内残余群时延发生跳变的数据进行研究, 主要从相关相位、频率、幅度和功率方面,分析了VLBI数据处理中心相时延配置项的 数据以及各测站终端的记录数据,最终发现KM测站模拟信号异常导致scan内残余群时 延跳变.利用上述分析结果,研究scan内残余群时延跳变事后改正方法,尝试通过调整异 常段的基线相关相位,得到改正后的残余群时延.利用上海天文台定轨软件处理改正前 后的时延数据,验证残余群时延事后改正方法的可行性,同时升级了上海天文台相时延 处理软件.

参考文献

- [1] 叶培建, 邹乐洋, 王大轶, 等. 国际太空, 2018, 10: 4
- [2] 钱志瀚, 李金岭. 甚长基线干涉测量技术在深空探测中的应用. 北京: 中国科学技术出版社, 2012: 1-15
- [3] 叶培建, 孙泽洲, 张熇, 等. 中国科学: 技术科学, 2019, 49: 124
- [4] 刘庆会. 深空探测学报, 2018, 5: 435
- [5] 刘庆会, 贺庆宝, 郑鑫, 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2015, 45: 83
- [6]~Liu Q H, Kikuchi F, Goossens S, et al. JGSJ, 2009, 55: 243
- [7] 吴伟仁, 王广利, 节德刚, 等. 中国科学: 信息科学, 2013, 43: 185
- [8] 刘庆会, 吴亚军. 深空探测学报, 2015, 2: 208
- [9] 黄勇,昌胜骐,李培佳,等.科学通报, 2014, 59: 2268
- [10] 李培佳. 天文学报, 2015, 56: 412

The Study on the Group Delay Jumping of CE-4 VLBI System

JIANG Jian-hua^{1,2} LIU Qing-hui¹ ZHENG Xin¹ DENG Tao^{1,2}

(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030) (2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

ABSTRACT The phase delay software is a key component of VLBI (Very Long Baseline Interferometry) orbit determination system in CE-4 mission, which is critical to deep space exploration. When processing X-band DOR (Differential One-way Ranging) signals of probes in the past, group delay jumping occasionally occurred in the observed scan. This paper consists of two parts. First, according to the VLBI station signal reception and VLBI center data processing steps, we analyzed the frequency, phase, power and self-correlation spectrum of the signal and located the influencing factor at the abnormal analog signal of Kunming (KM) station. Second, the group delay jumping was revised by the post-correction method which was based on the analysis of the abnormal unwrap phase. We used the corrected phase to get the new group delay and used orbit determination software to verify the effectiveness of the post-correction method which upgraded the phase delay processing software.

Key words radio astronomy: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), radio astronomy: group delay jumping, methods: data analysis