

DOI: 10.13875/j.issn.1674-0637.2020-03-0231-09

# VLBI 观测北斗 GEO 卫星的相关处理试验

张继荣<sup>1</sup>, 李辉<sup>1</sup>, 弓剑军<sup>2</sup>, 杨旭海<sup>2</sup>

(1. 西安邮电大学, 西安 710121;  
2. 中国科学院 国家授时中心, 西安 710600)

**摘要:** 对北斗地球同步卫星 (GEO) 使用甚长基线干涉测量技术 (VLBI) 进行测量, VLBI 测量的是目标横向位置与速度, 从而与测距测速技术形成互补。研究了 VLBI 观测卫星的基本原理和 DiFX (distributed FX correlator) 对卫星处理主要流程。利用适合于卫星的 DiFX 软件相关器进行数据处理分析获得了清晰的干涉条纹。针对中国科学院国家授时中心宽带 VLBI 系统在观测北斗卫星信号时, 由于观测带宽远大于信号带宽, 导致必须要处理大量的无用信息, 提出了用 Zoom 方法对观测带宽频率进行截取有效信号的方法。利用 Zoom 方法和常规方法进行相关处理及后处理, 结果表明在观测有效带宽的情况下, Zoom 方法可以有效地提高信号观测质量和观测精度。

**关键词:** 分布式 FX 相关机; 干涉测量; 地球同步轨道

## Correlation processing experiment of VLBI BeiDou geostationary satellite observation

ZHANG Ji-rong<sup>1</sup>, LI Hui<sup>1</sup>, GONG Jian-jun<sup>2</sup>, YANG Xu-hai<sup>2</sup>

(1. Xi'an University of Posts & Telecommunications, Xi'an 710121, China;  
2. National Time Service Center, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710600, China)

**Abstract:** The Beidou geostationary earth orbit (GEO) is measured using very long baseline interferometry (VLBI). The VLBI observables are sensitive to the lateral position and velocity of the target, thus can be a complement to the range and speed measurement technology. The basic principle of the VLBI satellite tracking and the correlation processes of DiFX (distributed FX correlator) are investigated. Using the DiFX software correlator, clear interference fringes were obtained. As the observation bandwidth is much larger than the signal bandwidth of satellite signals, a large amount of useless information have to be processed in correlator. In this paper, we propose an approach that intercepting satellite signals within the observation bandwidth frequency by the Zoom method. We correlate the satellite signals with both the Zoom method and the conventional DiFX method, and find the zoom method can effectively improve the quality of the satellite signals and increase the accuracy of satellite observable, group delay.

**Key words:** distributed FX correlator (DiFX); interferometry; geostationary earth orbit

收稿日期: 2020-01-21; 接受日期: 2020-04-09

作者简介: 张继荣, 女, 教授, 主要从事宽带通信网研究。

## 0 引言

作为全球第三个逐渐成熟的卫星导航系统,由中国自主研发,独立运行的全球卫星导航和定位系统的北斗导航卫星系统,预计将于 2020 年内全面完成建设<sup>[1]</sup>。为增强北斗导航卫星能够提供可靠连续稳定的定位导航及授时功能,需进行大量观测试验。GEO (geostationary earth orbit) 同步卫星因为随时要保持星下点位置,经常要进行卫星姿态调整和机动,利用 VLBI (very long baseline interferometry) 和伪距技术观测能够缩短同步卫星的轨道恢复时间,提高了导航同步卫星的利用效率。正是因为 VLBI 能提供目标横向位置和速度信息,可应用与测距测速技术联合实现 GEO 导航卫星精密测定轨<sup>[2-4]</sup>。

目前,各国不断开展 VLBI 观测航天器的试验,2007 年 9 月日本发射的“月亮女神号”月球探测器通过同波束 VLBI 观测,使得相对相位的测量精度达到 ps 量级<sup>[5]</sup>。欧洲 VLBI 联合研究所 JIVE (Joint Institute for VLBI ERIC) 利用 VLBI 技术跟踪惠更斯卫星降落土卫六过程<sup>[6]</sup>。而在国内多次利用中国 VLBI 网 (Chinese VLBI network, CVN) 相继对中国探月工程“嫦娥系列”进行观测,在 2007 年 10 月 24 日嫦娥一号探测器成功发射,严韦等<sup>[7]</sup>用差分 VLBI 应用于完成地月转移轨道定轨地球定位参数 (EOP) 解算;2013 年 12 月 14 日嫦娥三号成功软着陆后,郑鑫等<sup>[8]</sup>利用同波束 VLBI 技术分析其电离层差分相时延。另外我国将于 2020 年首次发射由环绕器和着陆巡视器组成的火星探测器,一次发射实现“环绕”“着陆”“巡视”3 个探测目标,火星探测器的跟踪和测定轨主要采用测距测速和 VLBI 测角 3 种手段<sup>[9]</sup>。同样中国科学院国家授时中心利用最新研制的我国首套 VGOS (VLBI 2010 global observation) 系统,对中星 12 号卫星成功开展观测试验并获得干涉条纹<sup>[10]</sup>。之后国家授时中心徐磊等<sup>[11]</sup>对卫星共视与基线长度及卫星高度关系的研究,表明观测北斗导航卫星的可能性。

在利用国家授时中心的宽带 VLBI 系统观测卫星时,由于国家授时中心的宽带 VLBI 系统最小跟踪观测带宽为 32 MHz,而本次北斗卫星信号观测带宽仅为 8 MHz。在观测北斗 GEO 导航卫星信号时,若采用国家授时中心宽带 VLBI 系统的最小观测带宽进行相关处理,会将噪声干扰信号同时处理,对结果会造成一定影响。本文利用 Zoom 方法提取卫星有效信号,提高观测信噪比和时延精度,改进国家授时中心宽带 VLBI 观测窄带卫星信号相关处理方法,并提高了时延观测精度。

## 1 VLBI 基本原理

### 1.1 观测原理

由两台相距为  $B$  的射电天文望远镜同时观测某一信号源,各台站独立进行记录信号后对信号进行相关处理,得到 VLBI 基本观测量时延<sup>[12]</sup>。干涉测量其测角精度为

$$\delta\theta = \frac{c\delta\tau}{B\sin\theta}, \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\delta\theta$  为测角精度,  $\delta\tau$  为时延的测量精度,  $c$  为光速,  $B$  为基线长度,  $\theta$  为观测目标与基线之间的夹角<sup>[13]</sup>。

VLBI 使用两台天线同时观测某信号源,经过长时间的传播,信号的同一波前到达两站的时间不同。VLBI 观测射电源示意于图 1。

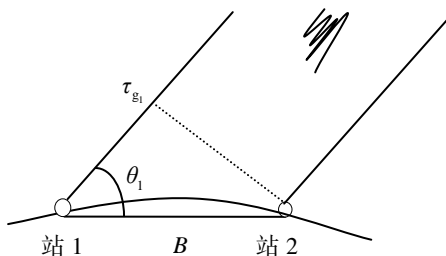


图 1 VLBI 观测射电源示意图

在观测射电源时,由于射电源离地球位于无限远点,经过长距离传输,它到达观测站时可以近似地看成是平面波,从图 1 中可知信号的时延差为时延  $\tau_{g_1}$ :

$$\tau_{g_1} = B \cdot \cos(\theta_1) / c, \quad (2)$$

式(2)中,  $B$  为两观测站的基线,  $\theta_1$  是射电源与基线的夹角,  $c$  为光速。

图 2 为 VLBI 观测卫星示意图。卫星相较射电源离地球较近,其发射的射电波不能近似为平面波,应当作球面波处理<sup>[14]</sup>。

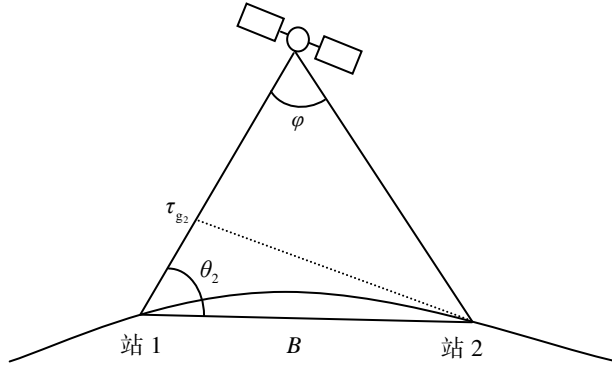


图 2 VLBI 观测卫星示意图

时延  $\tau_{g_2}$  是接收到卫星某一波前信号的两时刻差值。根据图 2 中几何关系,可求得

$$\tau_{g_2} = B/c \cdot (\cos\theta_2 - \sin\theta_2(1 - \cos\varphi)/\sin\varphi), \quad (3)$$

式(3)中,  $B$  为基线,  $\theta_2$  是接收卫星信号与基线的夹角,  $\varphi$  为接收两束卫星信号之间的夹角,  $c$  为光速。

## 1.2 相关处理原理

对观测得到的信号进行相关处理,首先必需通过信号的时移使得信号都拥有大致的波前,这也称作时延补偿。一般时延补偿分为两步,整数补偿和小数补偿。设信号的采样周期是  $\Delta T$ , 根据几何时延值计算整数部分为  $\tau_i = n\Delta T$ , 小数部分为  $\tau_f = \tau_g - \tau_i$ , 整数部分和小数部分构成了模型时延值  $\tau_m$ , 它与真实几何延迟值  $\tau_g$  之间存着微小误差  $\Delta\tau_g$ , 即有:

$$\tau_g = \tau_i + \tau_f + \Delta\tau_g. \quad (4)$$

为了简化计算假设两观测站无钟差,则接受到信号经过整数时延补偿可表示为

$$x(t) = x(t - \tau_i) \cdot e^{-2\pi f_0(t - \tau_i) + \varphi} = x(t - \tau_g + \tau_f + \Delta\tau_g) \cdot e^{-2\pi f_0(t - \tau_g + \tau_f + \Delta\tau_g) + \varphi}, \quad (5)$$

式(5)中,  $x(t)$  表示观测站接收到的信号,  $f_0$  为信号的中心频率,  $\varphi$  为信号相位噪声。为了消除对基频信号进行时延补偿引入的相位因子  $e^{j2\pi f \tau_m}$ , 需要进行条纹反转, 即

$$x(t) = x(t - \tau_g + \tau_f + \Delta\tau_g) \cdot e^{-2\pi f_0(t + \tau_f) + \varphi}. \quad (6)$$

将条纹反转后的数据经过傅里叶变换,消除剩余的分数延迟导致的整个频带的相位误差, 即

$$F(f) = F(f + f_0) \cdot e^{j2\pi[(f + f_0)\Delta\tau_m] + \varphi}. \quad (7)$$

经过以上分别对观测站 1、2 处理就可以得到傅里叶变换后的信号  $F_1$ ,  $F_2$ , 最后在频域内交叉相乘就可得到互相关功率谱:

$$P = F_1 \cdot F_2^* = A(f + f_0) \cdot e^{-j2\pi[(f + f_0)\Delta\tau_{g12}] + \varphi_2} = A(f + f_0) \cdot e^{\varphi(f)}, \quad (8)$$

式 (8) 中,  $P$  为互功率谱函数,  $A$  为互相关函数幅度值,  $\Delta\tau_{g12} = \Delta\tau_{g1} - \Delta\tau_{g2}$  表示两站与真实几何时延值之间的差值,  $\varphi_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$  表示两站相位噪声差值,  $\varphi(f)$  为残余相位。

## 2 DiFX 软相关器

目前, 国际上有各种不同的相关处理软件, 例如日本情报通信研究机构 (National Institute of Information and Communications Technology, NICT) 的 K5 相关处理软件、俄罗斯科学院应用天文研究所 (IAA RAS) 的 IAA 软件相关处理机, 中国上海天文台的 CVN 相关处理软件, 欧洲 VLBI 联合研究所 JIVE 研制的 SFXC (super FX correlator) 软件, 以及在 2005 年由澳大利亚 Adam Deller 博士在 Swinburne 大学开发的 DiFX (distributed FX correlator) 软件相关处理机, 比较流行和较为成熟的是 DiFX 软件相关机, 具有灵活、移植性高、计算速率高等特点<sup>[15-16]</sup>。它是一个分布式 MPI 应用程序, 并部署在一个通用 Linux 计算集群上, 是整个 VLBI 观测目标后数据进行处理的核心部分。它采用 C++ 语言进行开发, 并且高度模块化, 使用英特尔集成性能函数库 (intel's integrated performance primitive library, IPP) 用于优化运行速度, 数据传输用的是消息传递接口 (message passing interface, MPI)<sup>[17]</sup>。

最初为处理射电源数据而设计的 DiFX 相关处理软件, 默认时延模型是戈达德航天中心开发的 CALC 9 软件, 对每个台站的观测数据进行基于地心的延迟补偿<sup>[18]</sup>。当用 DiFX 处理卫星数据时, 需将原本的时延模型替换成近场时延模型。所以使用 DiFX 处理卫星数据时, 最重要的步骤就是替换为适合卫星的时延模型。卫星处理流程如图 3 所示。

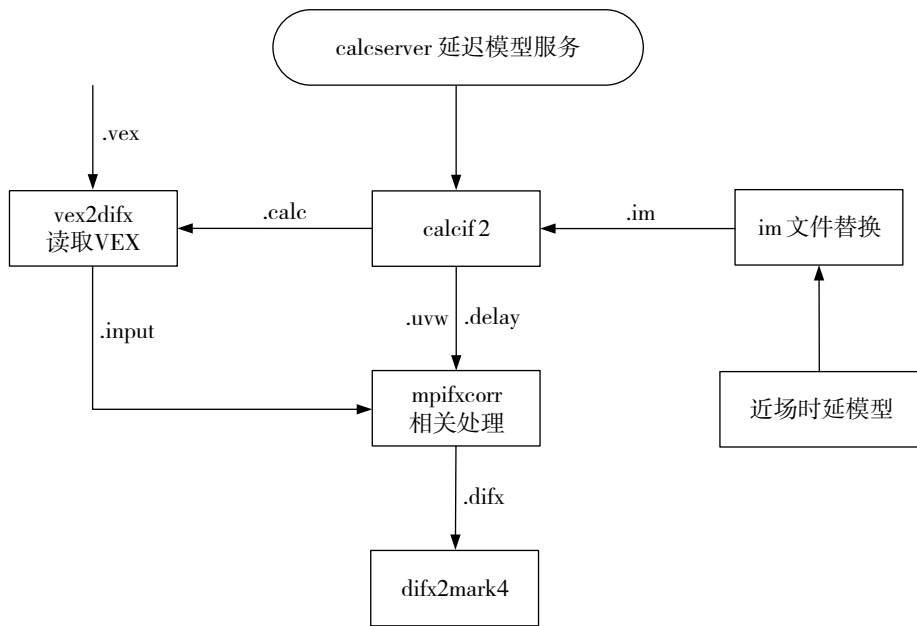


图 3 卫星处理流程图

在处理数据时, 需要观测纲要文件, 即 VLBI 纲要文件 (VLBI experiment, VEX), 包含实验编号、观测模式、地球定向参数、天线基本信息和频率等信息, 使用美国国立射电天文台 (NRAO) 开发专用于射电天文 VLBI 观测纲要的 SCHED<sup>[19]</sup> 软件生成的 VEX 文件。

DiFX 处理卫星数据步骤示于图 3。

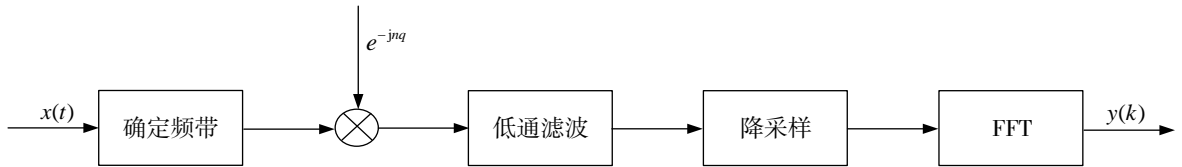
① 利用 SCHED 软件事先生成本次所需要的纲要文件 (VEX 文件), 运行 DiFX 中的子程序 vex2difx 读取纲要信息, 生成后缀为 calc 文件和 input 文件, 前者主要是用于接下来几何模型的计算, 后者是 DiFX

核心子程序 mpifxcorr 的输入文件。

- ② 输入命令 calserver 启动用于计算 VLBI 应用程序的几何延迟模型, 之后运行 calcif2 子程序生成干涉模型 im 文件、基线投影 uvw 文件和几何延迟 delay 文件。
- ③ 利用卫星近场时延模型软件生成卫星近场模型 im 文件。
- ④ 将原先模型文件替换为卫星近场模型 im 文件。
- ⑤ 运行核心子程序 mpifxcorr 进行相关处理得到 DiFX 文件。
- ⑥ 再利用 difx2mark4 子程序将其转换成按 SCAN 编号的文件夹。

### 3 Zoom 频带缩放

DiFX 中 Zoom 算法是根据第 1 次经过相关处理后的互功率谱数据, 得出需要观测频带的带宽后, 利用纲要文件计算出最大、最小频率, 再将这些参数添加到纲要配置 v2d 文件中, 之后经过 DiFX 相关处理机就可获得所需观测频带的互功率谱数据。Zoom 频带缩放的基本原理如图 4 所示。设  $f_s$  为采样频率,  $q$  为频移量,  $M$  为整数比例因子<sup>[20]</sup> (缩放倍数),  $x(t)$  为输入信号,  $y(k)$  为经过傅里叶变换的离散频谱。



注: FFT 为 fast Fourier transform

图 4 Zoom 频带缩放原理图

Zoom 频带缩放的基本过程是频移后进行低通滤波和降采样, 最后做傅里叶变换。当所需分析的频带范围内的信号频率间隔很小, 分辨率过低, 无法区分出这一频带内的频率特性。使用 Zoom 频带缩放算法, 就可以把所要分析的密集频点进行放大, 使得各自频率信息显示出来。把信号通过频移之后通过数字滤波器的截止频率滤波后, 再降采样得到滤波后的信号, 经过 FFT (fast Fourier transform) 变换就可以得到所需分析的频谱, 具体原理如下:

① 根据经过 DiFX 相关处理过后的互功率谱来确定所需要观测的频带范围是  $f_1$  到  $f_2$ , 并求出频带内的中心频率为  $f_c$ 。

② 得到所要增大频谱分辨率的频带内的中心频率后, 对信号乘以频移量进行复调制频移。复调制频移根据傅里叶变换性质, 即将信号频谱在频域内的频率坐标进行左右移动, 将所移动的频移量移动到零频位置进行分析, 即

$$y(n) = x(n) \cdot e^{-j2\pi n f_c / f_s} = x(n) \cos(2\pi n f_c / f_s) - j x(n) \sin(2\pi n f_c / f_s) \quad (9)$$

式 (9) 中,  $f_c$  为频带内的中心频率,  $f_s$  为采样频率。

③ 经过复调制频移后的信号接下来将其进行低通滤波, 过滤掉大于中心频率的频带, 滤出所需分析的频带, 也保证了下一步中降采样后不会发生频谱混叠现象。低通滤波器的截止频率设为  $f_s/2M$ , 其中  $M$  称作整数比例因子)。一般在某一区间内进行频谱分析, 整数比例因子取值为

$$M = \frac{f_s}{f_2 - f_1} \quad (10)$$

那么经过频率响应为  $H(K)$  的滤波器抗混叠滤波后的信号输出为

$$y(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k) H(K) w_N^{-nk} \quad (11)$$

式(11)中,  $H(K)$ 为滤波器的频率响应,  $y(n)$ 为经过滤波后的信号,  $X(k)$ 为原信号的频谱。

④ 再对  $Z(n)$ 以较低的采样率为  $f_s/M$ 进行采样后, 并做傅里叶变换就可以得到所需观测带宽的互功率谱。

在 DiFX 中实现 Zoom 算法可以只针对有效信号进行相关处理, 减轻相关处理中交叉相乘部分的运算量, 从而减轻了在主节点的数据量<sup>[21]</sup>, 提高了运算效率、获得了高分辨率的频谱。

## 4 试验结果及分析

本次试验利用国家授时中心的 VLBI 观测系统, 对北斗导航 GEO 卫星进行试验观测, 观测总时长 24 h, 时间为 2019 年 7 月 16 日 UTC 13:00:00 至 2019 年 7 月 17 日 UTC 12:58:00。卫星信号中心频率为 3 868 MHz, 观测带宽 32 MHz, 数据 2 比特采样。参与的相关台站来自国家授时中心搭建的吉林、喀什和三亚 3 个台站, 构成 3 条基线, 且每个台站均采用 13 m 口径天线。

试验数据在总观测时长中选取 2019 年第 197 d UTC 16:46:20 至 16:50:00 时间内的 VLBI 观测数据进行分析。北斗导航 GEO 卫星下行信号经过 VLBI 相关处理及后处理后, 用 HOPS 的 Fourfit 子程序进行条纹拟合后在频域内的相位和幅度分布如图 5 至图 7 所示。图 5 为吉林—三亚基线的互相关谱, 图 6 为吉林—喀什基线的互相关谱, 图 7 为喀什—三亚基线的互相关谱, 横坐标表示频率, 单位为 MHz; 纵坐标表示幅度, 单位为 dB。3 幅图中的上图表示相位随频率变化曲线, 下图表示幅度随频率变化曲线。

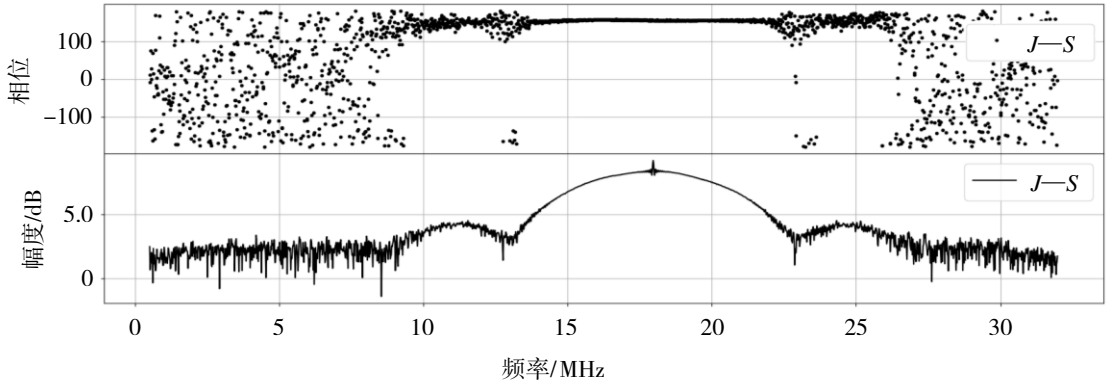


图 5 吉林—三亚互相关谱

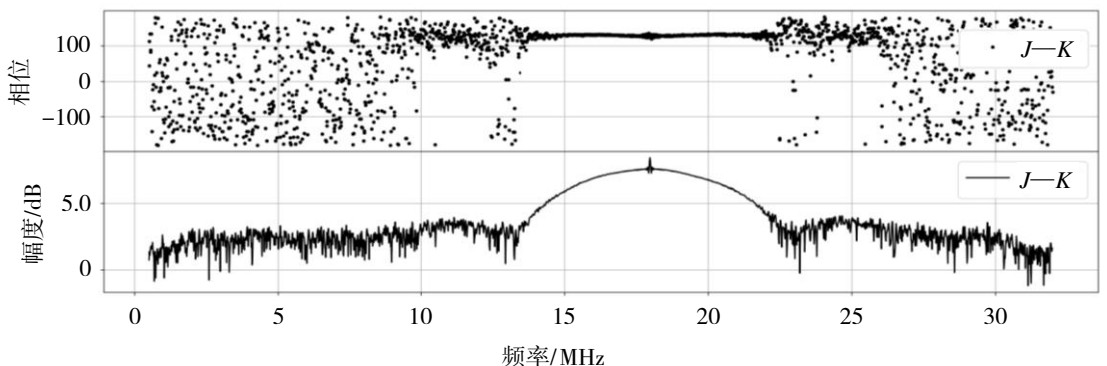


图 6 吉林—喀什互相关谱

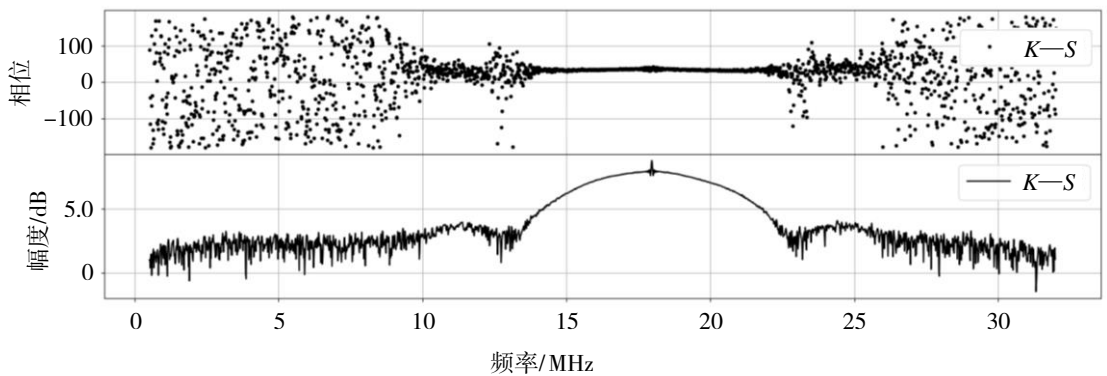


图7 喀什—三亚互相关谱

利用 HOPS 的 Fourfit 程序计算得到 VLBI 观测值, 得到 8 MHz 有效信号内的吉林—三亚的时延精度为 69 ps, 吉林—喀什的时延精度为 152 ps, 喀什—三亚的时延精度为 112 ps。

从图 5 至图 7 中可以看出卫星的有效信号均落在 14~22 MHz 之间, 其他频率范围内噪声干扰较大, 并且可以看出 3 条基线都在 14~22 MHz, 8 MHz 带宽之间出现较为清晰的干涉条纹, 通过 HOPS 进行干涉条纹的互功率谱拟合有较为理想的结果。在 8 MHz 带宽之外由于噪声干扰信号较大, 可以看到其拟合结果并不理想, 各个相位与频率, 幅度与频率的关系无规则的分布于图内, 无法进行有效拟合。另外可以看出在数据相关处理过程中明显会对干扰噪声和有效信号同时进行相关处理, 这就会对最终的时延结果造成一定影响。

在整个频带中我们只对某段频带的局部特性感兴趣, 而不是包含干扰信号的整个频带, 但由于宽带 VLBI 观测卫星的限制, VGOS 系统的最小观测带宽仅为 32 MHz, 无法支持任意的指定带宽进行处理, 同时考虑到干扰噪声信号处理过程中所带来的影响, 所以需要源信号进行截取 8 MHz 带宽来提取有效信号, 滤掉干扰噪声信号再进行相关处理。

图 8 到图 10 分别为吉林—三亚、吉林—喀什、喀什—三亚 3 条基线分别截取 8 MHz 带宽后, 提取出有效信号进行相关处理及条纹拟合后的互功率谱。可以看到在整个带宽内都为有效信号, 并且拟合后均出现清晰的干涉条纹。经过截取 8 MHz 带宽后得到时延精度吉林—三亚为 29 ps, 吉林—喀什为 47 ps, 喀什—三亚为 44 ps。

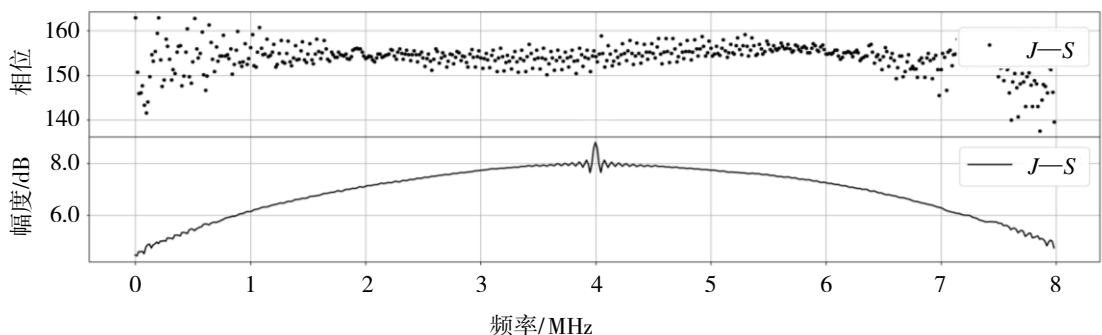


图8 吉林—三亚 8 MHz 带宽互相关谱

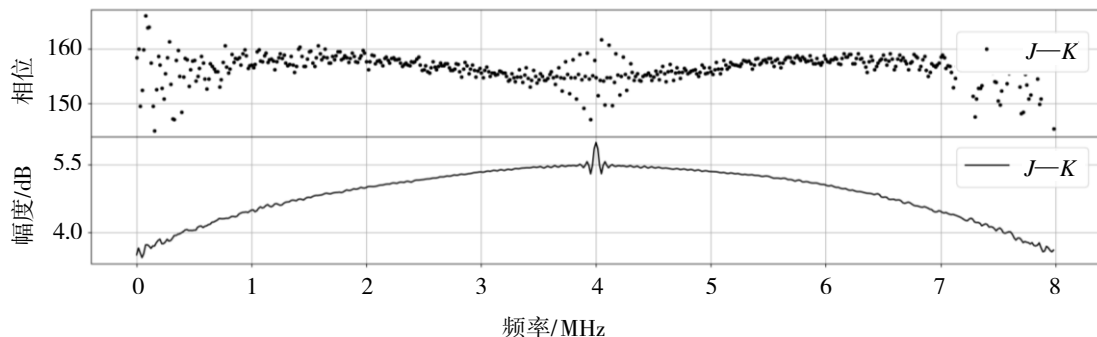


图 9 吉林—喀什 8 MHz 带宽互相关谱

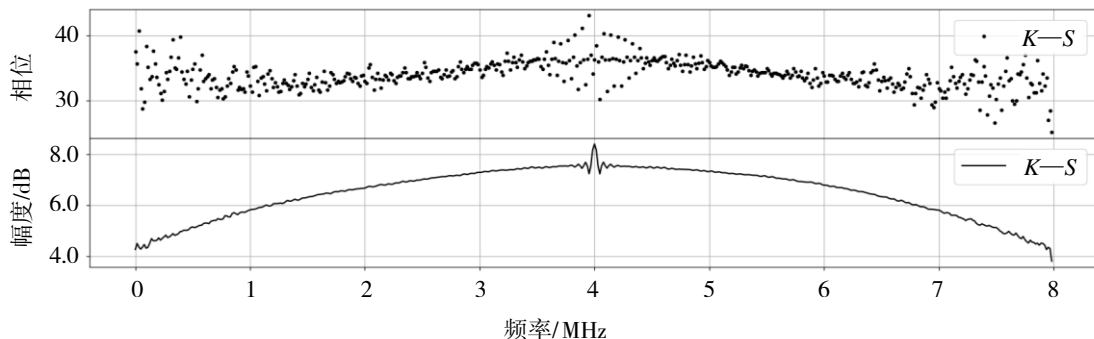


图 10 喀什—三亚 8 MHz 带宽互相关谱

表 1 为不同带宽之间时延精度和信噪比的对比, 可以看到利用 Zoom 频带缩放截取 8 MHz 带宽 3 条基线的时延精度, 相比于 32 MHz 带宽内有效信号 3 条基线的时延精度的均有所提高, 分别提高了 58%, 68%, 51% 左右。经过截取有效信号后各个基线的信噪比同样也有所提升, 分别提升了 24%, 69%, 30% 左右。一方面是由于通过截取信号滤掉了一些噪声信号, 另一方面是因为信噪比与互相关幅度成正比, 所以会对时延精度和信噪比带来变化。

表 1 不同带宽之间时延精度和信噪比对比

基线	32 MHz 带宽 时延精度/ps	8 MHz 带宽 时延精度/ps	32 MHz 带宽 信噪比/dB	8 MHz 带宽 信噪比/dB
吉林—三亚	69	29	1 916.1	2 371.4
吉林—喀什	152	47	878.4	1 480.5
喀什—三亚	112	44	1 196.2	1 554.1

## 5 结语

本文介绍了 VLBI 观测卫星的原理及卫星相关处理的过程, 并根据国家授时中心的宽带 VLBI 观测卫星中存在的问题, 提出了一种在宽带 VLBI 观测卫星系统中, 应用于窄带卫星信号相关处理的改进方法, 该方法通过频移滤波后经过相关处理计算, 避免了无用数据的处理, 提高了观测时延精度, 结果表明 Zoom 频带缩放对宽带 VLBI 观测窄带卫星信号具有重要作用。



## 参考文献:

- [1] 刘聪, 孟鹏飞, 刘鑫. 基于 VLBI 与 BDS 联合解算 ERP 的算法研究[J]. 全球定位系统, 2018, 43(3): 26–31+38.
- [2] 黄勇, 胡小工, 张秀忠, 等. VLBI 应用于 GEO 导航卫星的测定轨[J]. 科学通报, 2011, 56(24): 1974–1981.
- [3] 杨旭海, 丁硕, 雷辉, 等. 转发式测定轨技术及其研究进展[J]. 时间频率学报, 2016, 39(3): 216–224.
- [4] 杜兰, 郑勇, 李杰. VLBI 在 GEO 卫星精密定轨中的应用[J]. 测绘科学技术学报, 2006, 23(4): 269–271.
- [5] LIU Q, KIKUCHI F, MATSUMOTO K, et al. Same-beam VLBI observations of SELENE for improving lunar gravity field model[J]. Radio Science, 2010, 45(2): 1–16.
- [6] KEIMPEMA A, KETTENIS M, POGREBENKO S, et al. The SFXC software correlator for very long baseline interferometry: algorithms and implementation[J]. Experimental Astronomy, 2015, 39(2): 259–279.
- [7] 严韦, 魏二虎, 刘经南.  $\Delta$  VLBI 用于“嫦娥一号”地月转移轨道段定轨及 EOP 解算[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(8): 960–962+975+1010.
- [8] 郑鑫, 刘庆会, 吴亚军, 等. 基于中国 VLBI 网嫦娥三号差分相时延研究[J]. 天文研究与技术, 2016, 13(4): 400–407.
- [9] 刘庆会. 火星探测 VLBI 测定轨技术[J]. 深空探测学报, 2018, 5(5): 435–441.
- [10] 弓剑军, 马浪明, 姚当, 等. 基于 VGOS 的 GEO 卫星观测试验[J]. 时间频率学报, 2018, 41(4): 354–361.
- [11] 徐磊, 杨旭海, 弓剑军, 等. 卫星共视与基线长度及卫星高度关系的研究[J]. 时间频率学报, 2019, 42(3): 256–265.
- [12] 孙焱, 张波, 舒逢春. 地球卫星 VLBI 观测研究进展[J]. 天文学进展, 2019, 37(1): 45–60.
- [13] 陈略, 唐歌实, 王美. 干涉测量宽带相关处理算法与验证[J]. 飞行器测控学报, 2011, 30(6): 77–81.
- [14] 孟书宇, 王伟华, 吴晓平, 等. 高精度甚长基线干涉测量理论时延软件的实现[J]. 测绘科学, 2017, 42(2): 159–165.
- [15] DELLER A T. Precision VLBI astrometry: instrumentation, algorithms and pulsar parallax determination[D]. Melbourne: Swinburne University of Technology, 2009.
- [16] ZHU P, RIVOLDINI A, KOOT L, et al. Basic earth's parameters as estimated from VLBI observations[J]. Geodesy and Geodynamics, 2017, 8(6): 427–432.
- [17] 吕林蔚, 杨旭海, 杨颖, 等. GEO 卫星信号相关处理关键技术研究及 DiFX 自相关实现[J]. 时间频率学报, 2015, 38(3): 171–176.
- [18] DELLER A T, TINGAY S J, BAILES M, et al. DiFX: a software correlator for very long baseline interferometry using multiprocessor environments[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2007, 119(853): 318–336.
- [19] 陈永强, 周欢, 李伟, 等. 深空探测器无线电干涉测量开源数据处理系统构建及试验[J]. 飞行器测控学报, 2017, 36(3): 187–195.
- [20] MADSEN R E, FENG L, HUANG J X. Zoom-FFT Spectrum Analyzer[M]. England: Applied Digital Signal Processing, 2003.
- [21] DELLER A T, BRISKEN W F, PHILLIPS C J, et al. DiFX-2: a more flexible, efficient, robust, and powerful software correlator[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 2011, 123(901): 275–287.