



VLBI深空测控的单光纤多测站频率传递系统设计

常捷, 王锦清, 舒逢春, 江永琛

Design of Multi-Station Frequency Transfer System for VLBI Deep Space TT&C Based on Single Fiber

CHANG Jie, WANG Jinqing, SHU Fengchun, and JIANG Yongchen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210057>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中国深空测控系统建设与技术发展

Development and Future of China's Deep Space TT&C System

深空探测学报(中英文). 2018, 5(2): 99-114

深空测控网干涉测量系统在“鹊桥”任务中的应用分析

Application of Deep Space VLBI System in Queqiao Mission

深空探测学报(中英文). 2018, 5(6): 539-543

大气湍流对深空天线组阵相位影响分析

Analysis of the Effect of Atmosphere Turbulence on Antenna Arraying Phase Fluctuations

深空探测学报(中英文). 2017, 4(6): 571-576

一种应用于实时深空干涉测量的电离层时延修正方法

A Method of Ionosphere Delay Calibration in Real-Time Deep Space Interferometric Tracking

深空探测学报(中英文). 2019, 6(3): 232-235,300

基于波束分离技术的空间时延补偿方法研究

Research on Space Time Delay Compensation Method Based on Beam Squint Technique

深空探测学报(中英文). 2018, 5(2): 124-128,146

深空测角测速组合导航系统时间配准方法研究

Study on Deep Space Time Registration Method of Integrated Navigation System Based on Celestial Angle and Velocity Measurement

深空探测学报(中英文). 2017, 4(4): 373-378



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

VLBI深空测控的单光纤多测站频率传递系统设计

常 捷^{1,2}, 王锦清^{1,3,4}, 舒逢春¹, 江永琛¹

(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; 3. 中国科学院 射电天文重点实验室, 南京 210008;
4. 上海市空间导航与定位技术重点实验室, 上海 200030)

摘 要: 月球与行星探测中, 甚长基线干涉 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 技术为实现高精度测角, 需要稳定的频率基准。设计了一种仅用单套设备、单根光纤实现多用户传输的频率传递系统。该系统通过混频器与环形器等组合实现无锁相环的全自动快速往返校正, 以补偿频率标准信号传输中的相位漂移, 为测站提供稳定的频率基准, 降低测量误差。该系统兼容电缆和光纤传输介质, 兼具实时补偿和事后补偿模式, 能满足有多天线的测站的需求。经地面验证, 实时补偿模式天稳达 10^{-17} 量级, 并有能力升级到天稳 10^{-19} 量级; 事后补偿模式天稳达 10^{-18} 量级。经VLBI射电源观测和对“天问一号”火星探测器的观测验证, 两站钟速差降至 10^{-14} 量级, 能满足为多天线或多测站提供稳定本振进行VLBI观测的需求。目前该系统已在VLBI深空测控和地球定向参数 (Earth Orientation Parameters, EOP) 测量中应用, 表现出较高可靠性。

关键词: 深空测控; 甚长基线干涉测量; 频率稳定度; 残余时延率

中图分类号: V556.3

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2021)06-0600-08

DOI:10.15982/j.issn.2096-9287.2021.20210057

引用格式: 常捷, 王锦清, 舒逢春, 等. VLBI深空测控的单光纤多测站频率传递系统设计[J]. 深空探测学报 (中英文), 2021, 8 (6): 600-607.

Reference format: CHANG J, WANG J Q, SHU F C, et al. Design of multi-station frequency transfer system for VLBI deep space TT&C based on single fiber[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2021, 8 (6): 600-607.

引 言

随着月球、火星乃至木星、太阳系边际等更遥远深空探测活动的测控要求^[1-3], 甚长基线干涉 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 技术须进一步提升测角能力。同时, 更高精度的地球定向参数 (Earth Orientation Parameters, EOP) 测量是提高深空测控精度的前提。以上要求VLBI向更高精度发展, 而实现VLBI需要稳定的频率标准信号。目前, 频率标准信号由放置在恒温钟房内的氢原子钟提供, 但温度变化和伸缩, 使传输介质的长度和折射率等特性发生变化, 从而导致相位漂移, 天线端的参考信号频率稳定度随之降低。

位置如图1所示的测站, 目前有5台天线, 为了提升EOP测量能力, 天马园区和25 m园区的两台13 m天线基于VLBI全球观测系统 (VLBI Global Observing System, VGOS) 标准设计建造^[4], 要求天线转速不低于 $12 (^{\circ})/s$, 线缆频繁剧烈伸缩, 因此要求频率传递系统有较大的工作范围、较宽松的工作环境和较高的可

靠性。



图 1 天线位置分布

Fig. 1 Location distribution of antennas

现有国内外频率传递系统按鉴相方法可以分为3类: 光纤微波频率传递、全光方案和基于飞秒光学频率梳的方案^[5-6]。其中全光方案: Droste等^[7]在1 840 km光纤链路中实现了秒稳 10^{-15} 量级, 刘涛等^[8]在112 km光纤链路中实现了秒稳 10^{-16} 、天稳 10^{-20} 量级。基于飞秒光学频率梳的方案: 如张志刚等^[9]在120 km光纤链路中

收稿日期: 2021-06-21 修回日期: 2021-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助基于可变形副面的射电望远镜补偿算法与技术研究项目 (11873015); 国家重点研发计划资助 (2021YFC2203501, 2018YFA0404702); 中国科学院关键技术人才项目资助

实现了秒稳 10^{-16} 量级。光纤微波频率传递:清华大学Wang等^[10-11]基于共轭稳相法,采用压控振荡器预补偿9.1 GHz微波信号,实现了天稳 10^{-19} 量级。目前,天马65 m单台天线已有基于电缆传输的地面稳相频标传输系统^[12],进行了电缆改双光纤传输的测试^[13]。

基于应用中的多用户、大工作范围、低工作环境要求等需求,光纤微波频率传递成为技术路线的首选,加之在深空探测中,可靠性要求较高,同时为了兼容现有电缆传输装置,本文设计了一种基于单光纤传输,通过混频器与环形器等组合的全自动快速往返校正的系统。该系统兼具实时补偿和事后补偿模式,可以让多台天线共享一个频率基准。本文对该设计的系统进行了仿真和实测并分析,并用天马65 m和余山25 m分别对射电源和“天问一号”火星探测器作了实际干涉测量。

1 系统设计

该频率传递系统至少需要一个发送站和主接收站,且发送站和主接收站位于传输链路两端,其余接收站则设置在链路中间。

如图2所示,测站A为发送站,氢原子钟安装于此站,频率基准分信号经倍频后分别送入实时补偿模式和事后补偿模式的发送端,经光切换电器件或光波分复用器件后送入光纤链路。测站B为主接收站,一方面提供返程校正信号,让系统实现往返校正;另一方面还原频率基准信号,供测站使用。

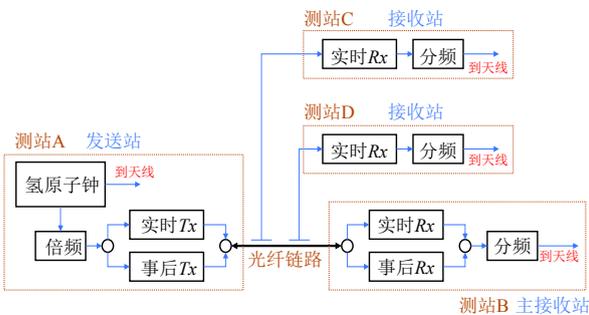


图 2 频率传递系统总框图
Fig. 2 Diagram of frequency transfer system

其余测站内部无主动器件,以耦合的方式分别提取去程和回程信号并还原出频率标准信号,供测站使用。

2 实时补偿模式

2.1 设计及仿真

在实时补偿模式下,该系统有两个频率源,其中

氢原子钟经倍频产生频率标准信号 f_0 ,接收端1内的独立振荡器产生 f_1 。该系统的本质是根据回程信号产生的相位漂移,预先让去程信号产生相反方向的相位漂移,再经光纤传输后,相位漂移与预先产生的相反方向相位漂移抵消,以达到改善的目的,如图3和表1所示。

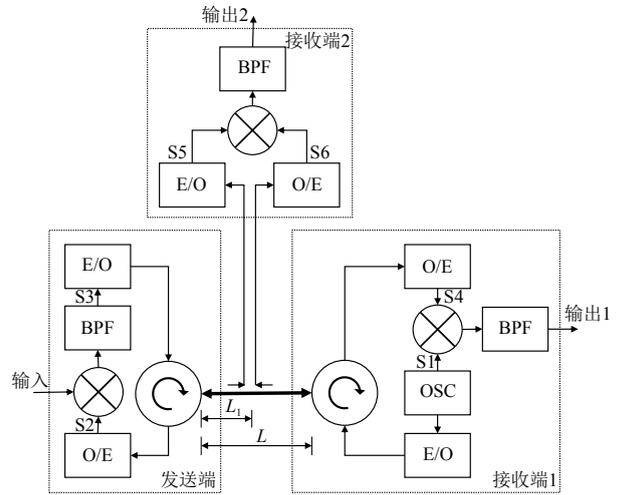


图 3 实时补偿模式原理框图
Fig. 3 Block diagram of real-time mode

表 1 各节点相位
Table 1 Phase at each node

节点	相位	备注
输入	π_0	
S1	π_1	
S2	$\pi_1 - 2\pi f_1 \frac{L}{v}$	
S3	$2\pi f_1 \frac{L}{v} + \pi_0 - \pi_1$	滤除高频
S4	$2\pi(2f_1 - f_0) \frac{L}{v} + \pi_0 - \pi_1$	
S5	$2\pi f_1 \frac{L+L_1}{v} - 2\pi f_0 \frac{L_1}{v} + \pi_0 - \pi_1$	
S6	$\pi_1 - 2\pi f_1 \frac{(L-L_1)}{v}$	
输出1	$2\pi(2f_1 - f_0) \frac{L}{v} + \pi_0$	滤除低频
输出2	$2\pi(2f_1 - f_0) \frac{L_1}{v} + \pi_0$	滤除低频

在温度和因外力导致的轴向应变作用下,光纤长度和折射率均发生变化。其中温度变化主要导致光纤折射率改变,其变化率即光纤的热光系数^[14],约为 10^{-5} 或 10^{-6} 量级。折射率的改变使光在光纤中传播的群速度改变,从而改变传输延迟,造成相位漂移。同时外力导致的轴向应变使光纤长度改变,也是造成相位漂移的重要因素^[15]。

如果没有该系统,当光纤在温度变化和应变条件

下产生长度 ΔL 、群速度 Δv 时,会产生 $2\pi f_0(\frac{\Delta L}{v} - \frac{L\Delta v}{v^2})$ 的相位漂移。加入该系统后,相位漂移变为 $2\pi(2f_1 - f_0)(\frac{\Delta L}{v} - \frac{L\Delta v}{v^2})$,改善倍数为 $\frac{f_0}{2f_1 - f_0}$ 。

在该系统中,接收端1必须设在频率传递链路的末端,因为要靠其内部的独立振荡器产生回程信号,让本系统正常工作。接收端2以及其它多用户接收端均为选配,设在链路中间,内部无主动器件,用光耦合器即可分别提取去程和回程信号(表1中S5、S6),并混频还原出需要的频率标准信号。在接收端2中,相位漂移由 $2\pi f_0(\frac{\Delta L_1}{v} - \frac{L_1\Delta v}{v^2})$ 改善为 $2\pi(2f_1 - f_0)(\frac{\Delta L_1}{v} - \frac{L_1\Delta v}{v^2})$,改善倍数同为 $\frac{f_0}{2f_1 - f_0}$ 。

考虑到实际系统中的混频交调,来回信号的最小频率差下限设为10 MHz。此时改善倍数与工作频率成正比。同时,有别于纯地理光纤的缓慢变化,天线应用必须考虑机械振动、拉伸应力等剧烈变化的情况。因此,为了该系统在实时补偿和事后补偿模式下均能稳定工作、补偿连续,光纤长度的短时跳变控制在1个波长范围内。表2展示了不同工作频率时的改善倍数与工作范围。

表2 不同工作频率的改善倍数与工作范围

Table 2 Improvement multiple & work range at different frequencies

f_0/MHz	f_1/MHz	改善倍数	范围/cm
500	245	50	42
1 500	745	150	14
10 000	4 995	1 000	2

由于光纤衰减、受激布里渊散射和光电二极管探测噪声,无中继单级传输距离限制为不超过100 km^[11]。选用低温漂系数稳相光缆^[16],在地理敷设100 km光纤时将产生昼夜 ± 2 ns的相位漂移(为方便不同频率之间的对比,本文涉及的相位漂移均通过 $\Delta\tau = \frac{\Delta\phi}{2\pi f}$ 转换为时延尺度),而对于测站实际地理12 km光纤,昼夜相位漂移约 ± 240 ps。

如图1所示,该测站光纤单程约12 km。针对其进行双向打环实验(25 km)进行仿真,考虑极端情形,仿真制造 ± 600 ps且变化的相位漂移,模拟周日温差变化。同时加入反射干扰和随机噪声,模拟长距离传输带来的其它误差。将相位漂移计算Allan方差得到频率稳定度^[17]为

$$\sigma(T) = \frac{1}{\sqrt{2T}} \text{RMS} [\tau(t+2T) - 2\tau(t+T) + \tau(t)] \quad (1)$$

其中: T 为积分时间; τ 为相位漂移。

经人为制造产生相位漂移,并调整该系统工作频率参数,得到不同的仿真结果,如图4所示,在1.5 GHz的工作频率下可实现 10^{-14} 量级的秒稳和 10^{-17} 量级的天稳,在10 GHz的工作频率下可实现 10^{-15} 量级的秒稳和 10^{-19} 量级的天稳。若选用100 km地理光纤,比上述结果增大不超过1个量级。考虑到目前VLBI测站的实际,1.5 GHz工作频率下的频率稳定度已经足够使用(远好于氢钟)。相反,10 GHz的高频会导致工作范围受限,对环境要求较高。同时,1.5 GHz工作频率也能与现有系统兼容。因此,综合各方面考虑,本文选择1.5 GHz为实际的工作频率。

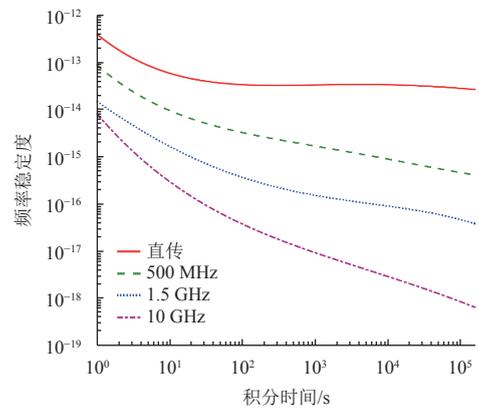


图4 不同工作频率下的频率稳定度

Fig. 4 Frequency stability at different frequencies

2.2 地面验证

如图5所示,将发送端、接收端1和接收端2置于40 °C主动式恒温箱中。为方便鉴相,以上装置均置于钟房内,发送端与接收端2之间用1 500 m光纤连接,接收端1与接收端2之间用500 m光纤连接,光纤均直接裸露放置于室外,选择温差较大的天气进行实验,接受日光暴晒。最后,分别将氢钟、接收端1、接收端2和开环直传对照组接入相关机,采用互相关法分别测试接收端1-氢钟、接收端2-氢钟和开环直传的相位漂移。

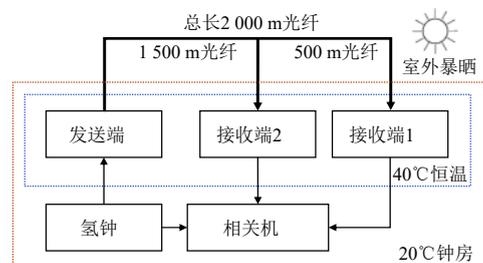


图5 实测装置框图

Fig. 5 Block diagram of measuring devices

如图6所示,在未稳相的情况下,相位均出现 ± 500 ps的漂移,而稳相后的相位漂移在 ± 4 ps以内波动。频率稳定度结果如图7所示,秒稳均有1个量级的改善,千秒稳和天稳有2~3个量级的改善。

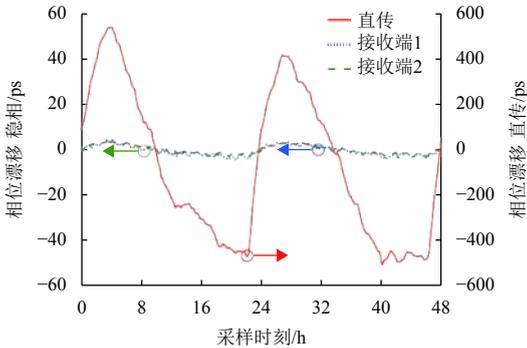


图 6 实时补偿模式的相位漂移
Fig. 6 Phase drift for real-time mode

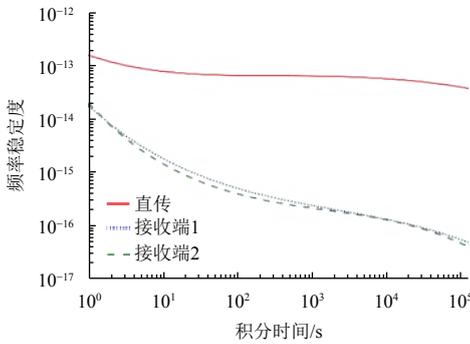


图 7 实时补偿模式的频率稳定度
Fig. 7 Frequency stability for real-time mode

以上结果表明,该系统在经大温差日光暴晒的极端环境下能正常工作、达到设计指标。为了验证该系统在实际光纤链路中的表现,本文用A和E之间的地理光纤进行双程环路实验。如图1所示,该光纤单程约12 km,双程约25 km。测试结果如图8所示,相比裸露光纤,虽然地理光纤更长,但本身的温度变化更小。因此,最终25 km地理光纤的实测性能表现,与裸露测试总体在同一数量级,长稳表现略微更好。在实际VLBI应用中,只需单程12 km光纤即可,预计性能会更好。

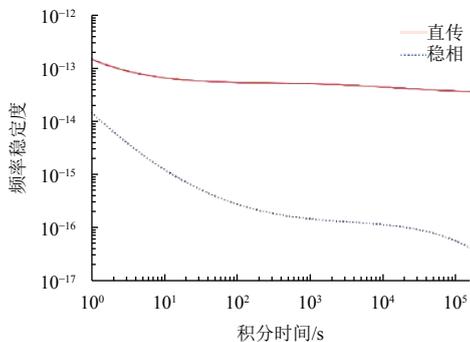


图 8 经25 km光纤传输的频率稳定度
Fig. 8 Frequency stability of optical fiber transmission after 25 km

将图5所示装置中的长光纤更换为2 m短光纤,短光纤放在钟房内,用同样的方法进行测试系统背景噪声。结果如图9所示,秒稳为 10^{-15} 量级,天稳为 10^{-19} 量级,说明该系统性能主要受改善倍数影响。同时,系统背景噪声测试也验证了提高工作频率以实现天稳 10^{-19} 量级的可行性。

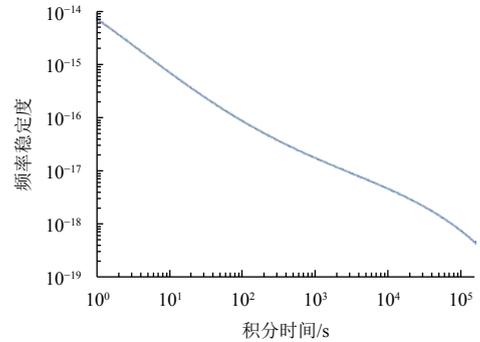


图 9 系统背景噪声的频率稳定度
Fig. 9 Frequency stability for system noise

3 事后补偿模式

如图10所示,在事后补偿模式下,由氢钟产生1.5 GHz频率标准信号,传到接收端后分为两路:其中一路成为输出信号供天线使用;另一路返回发送端,与输入信号送入鉴相器,测量其相位差。在该模式下,输出信号与输入信号的相位差为 L/v ,返回信号与输入信号的相位差为 $2L/v$,因此只需将鉴相器测得的相位差的一半补偿给输出信号即可。

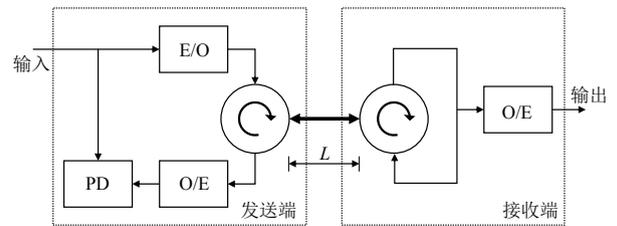


图 10 事后补偿模式原理框图
Fig. 10 Block diagram of post mode

选择温差较大的天气,用1 500 m裸露暴晒的光纤进行实测。结果如图11所示,红色曲线表示输出信号与输入信号的单程相位差,相位漂移达 ± 500 ps,绿色曲线为返回信号与输入信号的双程相位差,其正好约为单程相位差的2倍。补偿后的相位漂移如蓝色曲线所示,降低至 ± 2 ps以内。频率稳定度结果如图12所示,秒稳有1个量级的改善,千秒稳和天稳有2~4个量级的改善。

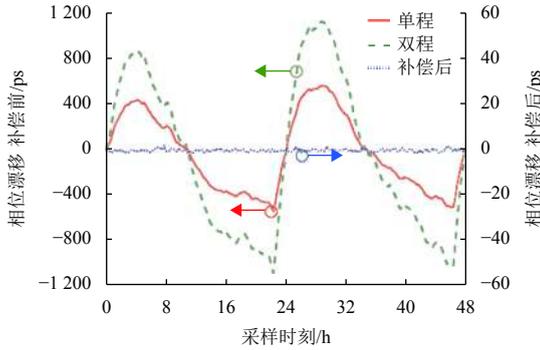


图 11 事后补偿模式的相位漂移
Fig. 11 Phase drift for post mode

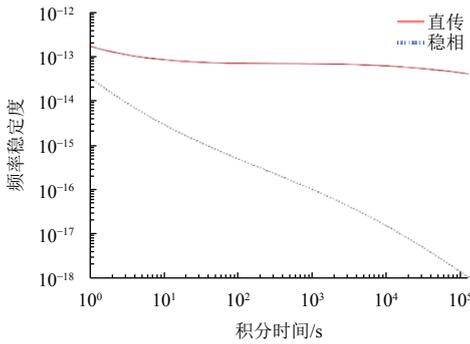


图 12 事后补偿模式的频率稳定度
Fig. 12 Frequency stability for post mode

事后补偿模式也可以通过在链路中间增加光耦合器和鉴相器实现多用户观测。但相比实时补偿模式中多用户接收端仅需成本较低的被动器件, 事后补偿模式下, 每增加一个接收端, 就需要增加一组独立鉴相器、记录器等, 增加成本和系统复杂性。

如表3所示, 在实时补偿模式和事后补偿模式下, 稳定度均优于SHOM-4A型主动式氢原子钟1~2个量级, 性能方面均符合设计要求。

表 3 不同模式下的性能对比

Table 3 Performance in different modes

积分时间	SHOM-4A型氢钟	实时补偿模式	事后补偿模式
1 s	3×10^{-13}	2×10^{-14}	3×10^{-14}
10 s	6×10^{-14}	2×10^{-15}	3×10^{-15}
100 s	1×10^{-14}	4×10^{-16}	4×10^{-16}
1 000 s	5×10^{-15}	2×10^{-16}	1×10^{-16}
10 000 s	2×10^{-15}	1×10^{-16}	2×10^{-17}
1 d	2×10^{-15}	6×10^{-17}	2×10^{-18}

4 VLBI观测应用

用天马65 m和余山25 m对进行VLBI观测验证。如图13所示, 分为实验组和对照组。其中实验组采用频

率传递, 天马65 m为发送站, 余山25 m为主接收站, 即两测站均共享天马65 m的氢原子钟, 两测站间的光纤链路长度为12 km。对照组为独立本振, 即两测站分别使用各测站自身的氢原子钟。

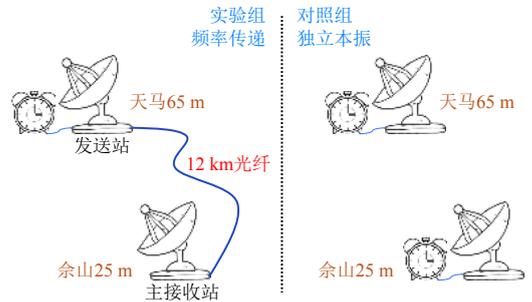


图 13 VLBI实际观测验证示意图
Fig. 13 Diagram of VLBI observation experiment

为了验证该系统在不同观测任务下的性能表现, 观测验证实验分为射电源观测验证和“天问一号”火星探测器观测验证, 由于两种观测任务的频率特性完全不同, 因此分别采用不同的方法。

4.1 射电源观测验证

观测数据采用DiFX软件相关处理机进行互相关处理, 相关处理采用的时延模型包含几何时延和钟差, 其中几何时延根据台站坐标和射电源位置自动计算^[18-19], 钟差根据台站日志文件中的格式器与全球导航卫星系统 (Global Navigation Satellite System, GNSS) 的钟差进行计算。基于相关处理机输出的射电源干涉条纹, 可拟合出残余时延和残余时延率^[20-24]。

图14为某射电源在天马65 m和余山25 m基线的互相关谱, 带宽为16 MHz, 积分时间为220 s, 蓝色部分为互相关谱在频域上的幅度变化, 未做幅度定标, 红色部分为互相关谱的相位。

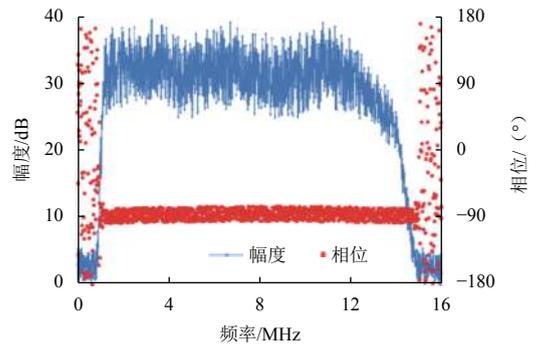


图 14 干涉条纹 (应用频率传递系统)
Fig. 14 Fringe (frequency transfer applied)

观测数据经过相关处理和后处理后, 可获得观测总时延率为 $\dot{\tau}_{\text{obs}}$

$$\dot{\tau}_{\text{obs}} = \dot{\tau}_{\text{g}} + \dot{\tau}_{\text{clk}} + \dot{\tau}_{\text{res}} \quad (2)$$

其中: $\dot{\tau}_{\text{g}}$ 是几何时延率, 主要由地球自转引起; $\dot{\tau}_{\text{clk}}$ 是钟速差, 表示站间时钟速率之差; $\dot{\tau}_{\text{res}}$ 是残余时延率, 包含了大气层、电离层和残余钟速差等因素的贡献。

由于天马65 m和余山25 m相距不远, 大气层和电离层效应影响较小, 主要误差为残余钟速差。

如表4所示, 通过实际VLBI观测对比了采用独立本振和频率传递方式获得的钟速差和残余时延率。使用同一本振后, 两站钟速差降低至 10^{-14} 量级, 与使用独立本振相比, 降低1~2个数量级。

表 4 实际VLBI观测对比 (射电源)

Table 4 Comparison of VLBI observations in engineering applications (radio source)

本振类型	独立本振	频率传递
观测代码	AOV025a	W9227a
钟速差/ (ps·s ⁻¹)	-0.313	0.015
残余时延率/ (ps·s ⁻¹)	-0.064	-0.011

4.2 “天问一号”观测验证

选择相近观测弧段对“天问一号”环绕器进行观测验证。与射电源不同, 火星探测器的信标为窄带信号。因此, 为了实现在高动态、低信噪比情形下的高精度相位比对, 采用三阶锁相环算法跟踪“天问一号”主载波^[25-26], 并将跟踪的载波频率根据多普勒公式换算为时延率, 用几何时延模型根据测站坐标和探测器位置自动计算, 补偿后得到包含钟速差的残余时延率, 结果如图15所示。最后根据测站日志文件中的格式器与GNSS的钟差进行长时间拟合得到钟速差, 扣除后得到最终的结果。

如表5所示, “天问一号”的观测结果与射电源类似, 使用同一本振后, 两站钟速差降低至 10^{-14} 量级, 与使用独立本振相比, 降低1~2个数量级。该结果表明, 使用本文所设计的频率传递系统, 能满足多台天线共享同一本振进行VLBI观测的需求, 显著消除两站之间的钟速差, 充分验证了该方案的实际意义。

表 5 实际VLBI观测对比 (“天问一号”环绕器SAT-H1HR)
Table 5 Comparison of VLBI observations in engineering applications (SAT-H1HR)

本振类型	独立本振	频率传递
观测代码	S1618x	S1625x
钟速差/ (ps·s ⁻¹)	-0.126	0.010
残余时延率/ (ps·s ⁻¹)	0.026	0.021

5 结 论

本文设计了一款仅用单套设备、单根光纤实现多用户传输的频率传递系统。该系统兼具实时补偿和事后补偿模式, 兼容电缆和光纤传输介质, 通过混频器与环形器等组合实现无锁相环的全自动快速往返校正, 能满足有多天线的测站的需求。本文所设计的系统拥有较简单的结构、相对低的成本、相对高的可靠性、较大的多用户扩充空间和良好的兼容性。

在实时补偿模式下, 可实现秒稳 10^{-14} 、天稳 10^{-17} 量级, 并有通过提高工作频率升级到天稳 10^{-19} 量级的潜力。在事后补偿模式下, 可实现秒稳 10^{-14} 、天稳 10^{-18} 量级。

经VLBI实际观测, 两站钟速差降至 10^{-14} 量级, 验证了该系统在射电源观测和月球行星探测方面都满足实际应用和大规模推广的需求。同时, 该系统已在某测站VLBI月球和行星探测以及EOP测量中应用, 表现出较高可靠性。

参 考 文 献

[1] 吴伟仁, 刘继忠, 唐玉华, 等. 中国探月工程[J]. 深空探测学报(中英文), 2019, 6(5): 405-416.
WU W R, LIU J Z, TANG Y H, et al. China lunar exploration program[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6(5): 405-416.

[2] 洪晓瑜, 张秀忠, 郑为民, 等. VLBI技术研究进展及在中国探月工程的应用[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, 7(4): 321-331.
HONG X Y, ZHANG X Z, ZHENG W M, et al. Research progress of VLBI technology and application to China lunar exploration project[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2020, 7(4): 321-331.

[3] 吴伟仁, 李海涛, 李赞, 等. 中国深空测控网现状与展望[J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(1): 93-114.
WU W R, LI H T, LI Z, et al. Status and prospect of China's deep

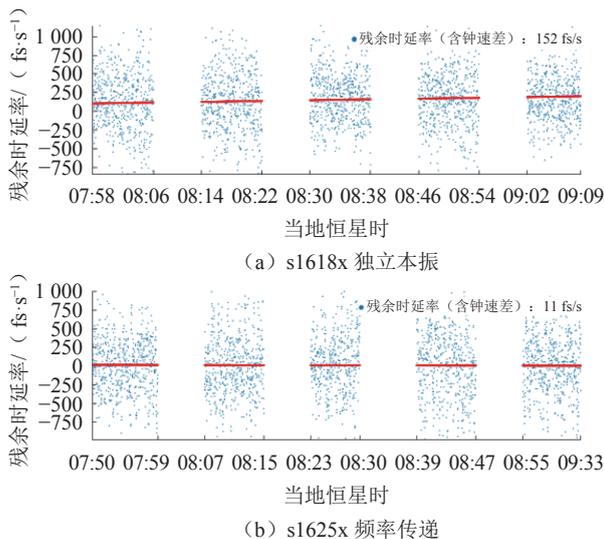


图 15 残余时延率 (含钟速差)

Fig. 15 Residual delay rate with clock rate included

- space TT&C network[J]. *SCIENTIA SINICA Informationis*, 2020, 50(1): 93-114.
- [4] NIELL A, BARRETT J, BURNS A, et al. Demonstration of a broadband very long baseline interferometer system: a new instrument for high-precision space geodesy[J]. *Radio Science*, 2018, 53(10): 1269-1291.
- [5] 杨文哲, 杨宏雷, 赵环, 等. 光纤时频传递技术进展[J]. *时间频率学报*, 2019(3): 214-223.
- YANG W Z, YANG H L, ZHAO H, et al. Technical progress of fiber-based time and frequency transfer[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2019(3): 214-223.
- [6] CALONICO D, BERTACCO E K, CALOSSO C E, et al. High-accuracy coherent optical frequency transfer over a doubled 642-km fiber link[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(3): 979-986.
- [7] DROSTE S, OZIMEK F, UDEM T, et al. Optical-frequency transfer over a single-span 1 840 km fiber link[J]. *Physical Review Letters*, 2013, 111(11): 110801.
- [8] 刘涛, 刘杰, 邓雪, 等. 光纤时间频率信号传递研究[J]. *时间频率学报*, 2016, 39(3): 207-215.
- LIU T, LIU J, DENG X, et al. Research on fiber-based time and frequency transfer[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2016, 39(3): 207-215.
- [9] CHEN X, LU J, CUI Y, et al. Simultaneously precise frequency transfer and time synchronization using feed-forward compensation technique via 120 km fiber link[J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 18343.
- [10] WANG B, GAO C, CHEN W L, et al. Precise and continuous time and frequency synchronisation at the 5×10^{-19} accuracy level[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2(2): 556.
- [11] GAO C, WANG B, CHEN W L, et al. Fiber-based multiple-access ultrastable frequency dissemination[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(22): 4690-4692.
- [12] 王锦清, 江永琛, 苟伟, 等. 地面稳相频标传输系统设计和测试[J]. *天文学报*, 2014(5): 427-436.
- WANG J Q, JIANG Y C, GOU W, et al. Design and testing of a ground-based system for phase stabilized standard frequency transmission[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2014(5): 427-436.
- [13] 江永琛, 王锦清, 苟伟, 等. 基于光纤传输的1.5 GHz信号的稳相系统设计及测试[J]. *时间频率学报*, 2017, 40(3): 137-145.
- JIANG Y C, WANG J Q, GOU W, et al. Design and test of a 1.5 GHz phase stabilization system based on optical fiber transmission[J]. *Journal of Time and Frequency*, 2017, 40(3): 137-145.
- [14] YANG N, QIU Q, SU J, et al. Research on the temperature characteristics of optical fiber refractive index[J]. *Optik*, 2014, 125(19): 5813-5815.
- [15] JIN L, ZHANG W, HAO Z, et al. An embedded FBG sensor for simultaneous measurement of stress and temperature[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2005, 18(1): 154-156.
- [16] THOMPSON A R, MORAN J M, SWENSON G, et al. Interferometry and synthesis in radio astronomy[M]. Berlin: Springer, 2017.
- [17] TAKAHASHI F, KONDO T, TAKAHASHI Y, et al. Very long baseline interferometer[J]. *Electronic Systems Magazine IEEE*, 2002, 17(8): 43-44.
- [18] 舒逢春. 人造卫星实时射电干涉测量方法研究[D]. 上海: 中国科学院上海天文台, 2008.
- SHU F C. Study on the real time application of radio interferometry for satellite tracking[D]. Shanghai: Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 2008.
- [19] LITTLE A G. A phase-measuring scheme for a large radio telescope[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1969, 17(5): 547-550.
- [20] SIGMAN E H. Phase calibration generator[C]//The Telecommunications and Data Acquisition Report. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1988: 89-104.
- [21] MCCOOL R, BENTLEY M, GARRINGTON S, et al. Phase transfer for radio astronomy interferometers, over installed fiber networks, using a round-trip correction system[C]//Annual Precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting. Reston: Naval Observatory, 2008: 107-116.
- [22] PRIMAS L E, LUTES G F, SYDNOR R L. Stabilized fiber optic frequency distribution system[C]// Telecommunications and Data Acquisition Progress Report. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1989: 88-97.
- [23] SHILLUE B. ALMA LO distribution round trip phase correction[EB/OL]. (2002-11-14)[2021-06-21]. <http://www.alma.nrao.edu/memos/html-memos/alma443/memo443.pdf>.
- [24] OH H J, KONDO T, LEE J, et al. Round-trip system available to measure path length variation in korea VLBI system for geodesy[C]//Proceedings from the 2010 General Meeting. [S. l.]: International VLBI Service for Geodesy and Astronomy, 2010: 449-453.
- [25] NAPIER P J, THOMPSON A R, EKERS R D. The very large array: design and performance of a modern synthesis radio telescope[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1983, 71(11): 1295-1320.
- [26] DENG T, MA M, LIU Q, et al. High-precision carrier tracking algorithm for extremely weak and high-dynamic signals[J]. *Radio Science*, 2021, 56(5): e2021RS007277.

作者简介:

常捷(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向: VLBI测控技术。

通讯地址: 上海市南丹路80号(200030)

电话: (021) 34775586

E-mail: changj@shao.ac.cn

王锦清(1978-), 男, 研究员, 主要研究方向: VLBI测控技术。**本文通讯作者。**

通讯地址: 上海市南丹路80号(200030)

电话: (021) 34775586

E-mail: jqwang@shao.ac.cn

Design of Multi-Station Frequency Transfer System for VLBI Deep Space TT&C Based on Single Fiber

CHANG Jie^{1,2}, WANG Jinqing^{1,3,4}, SHU Fengchun¹, JIANG Yongchen¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;

4. Shanghai Key Laboratory of Space Navigation and Positioning Techniques, Shanghai 200030, China)

Abstract: Very Long Baseline Interferometry (VLBI) technology requires a stable frequency datum for high-precision angular measurement in lunar and planetary explorations. A multi-user frequency transfer system for VLBI stations using only single optical fiber is designed. It realizes full-automatic fast round-trip correction phase loop without PLLs, using mixer and circulator to deliver stable standard frequency signal to antennas. The system has both real-time compensation mode and post compensation mode, and supports multiple receivers to meet the needs of VLBI stations with multiple radio telescopes. The practical results show that the frequency stability reach 10^{-17} /day level within the ability to the 10^{-19} in real-time compensation mode and 10^{-18} /day in post compensation mode. VLBI observation for radio source and HX-1 shows that the clock rate difference is reduced to 10^{-14} level, which can effectively reduce errors. The requirements that multiple antennas share the same oscillator has been fulfilled. At present, the system has been applied in VLBI deep space TT&C and EOP observation, maintaining high reliability.

Keywords: deep space TT&C; VLBI; frequency stability; residual delay rate

Highlights:

- Only using a single fiber meets the needs of high stability frequency reference with multiple antennas station.
- The system structure by the combination of mixer and circulator is simple, highly stable and reliable without PLL.
- It is compatible with the characteristics of optical fiber and cable.
- Frequency stability is up to 10^{-18} level and capable of upgrading to 10^{-19} level.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]