

# YH-1 星载超稳定晶振的频率稳定性的测试与分析

王震<sup>1,2</sup>, 简念川<sup>3</sup>, 张素君<sup>3</sup>, 尚堃<sup>3</sup>, 高峰<sup>3</sup>, 王娜<sup>1,2</sup>, 平劲松<sup>3</sup>

(1. 中国科学院新疆天文台, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院射电天文重点实验室, 乌鲁木齐 830011;  
3. 中国科学院上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 中国首个火星探测器“萤火1号”拟定在2011年发射升空。探测器上配备了一组(2个)超稳定晶体振荡器, 该组晶体振荡器为X波段发射机提供频率标准, 向地球发射下行信号。地面台站采用无线电开环多普勒和甚长基线干涉测量技术, 对其进行通信、导航和跟踪。分析处理了“萤火1号”的超稳定晶体振荡器频率实验测试数据, 确认晶体振荡器的频率稳定度约为 $1 \times 10^{-12}$ , 此结果可以作为火星探测器精密测定轨的有力支撑。

**关键词:** 火星探测器, 超稳定晶体振荡器, 开环多普勒

**中图分类号:** TN752.2

## 1 引言

火星是太阳系中的一颗类地行星, 近地点高度约0.6 AU, 远地点高度约2.6 AU, 有昼夜变化及四季的交替。20世纪60年代以来, 美国、苏联和欧洲航天局发射了大量火星轨道器, 对火星进行全方位、多手段的探测, 积累了海量的数据。中国的“萤火1号”(YH-1)卫星与俄罗斯的火卫一着陆器福布斯-土壤(Phobos-Grunt Spacecraft)将于2011年一起发射<sup>[1,2]</sup>。火星探测器的飞行轨道分为环绕地球轨道、巡航轨道和环绕火星轨道3个阶段。卫星精确位置测量等价于精确时间的测量, 即使是的时间误差也会引起30 m测距误差。高精度的卫星导航必须具有高准确、高稳定的时间系统(原子频标)的支持。精准的频率源相当于电子设备时间系统的“心脏”, YH-1配置超稳定晶体振荡器(Ultra Stable Oscillator, 简称USO)作为频率源, 实施单程多普勒开环测量<sup>[3]</sup>结合地面甚长基线干涉测量(VLBI)技术, 执行精密测控<sup>[4,5]</sup>。

## 2 USO 测试实验

2010年1月和3月, 我们对YH-1的USO进行了测试, 测试设备的链路图分别如图1和图2所示。YH-1的射频发射机和功率衰减器放置在恒温房间里, 发射机发出8424.407040 MHz的单频点电波信号。图1中, 我们采用GPS-铷钟模式, 铷钟提供10 MHz标准参考信号。实验测试前上海天文台时频中心利用氢原子钟(VCH1003), 对铷钟稳定性进行评估, 铷钟的阿伦方差在1 s, 10 s, 100 s, 1000 s和10000 s分别为 $6.87 \times 10^{-13}$ ,  $8.10 \times 10^{-13}$ ,

$9.92 \times 10^{-13}$ ,  $1.16 \times 10^{-12}$  和  $6.21 \times 10^{-13}$ 。图 2 实验中, 上海天文台佘山观测站提供氢钟 (MHM-2010) 作为频率参考, MHM-2010 的阿伦方差在 10 s, 100 s, 1000 s 和 10000 s 分别为  $3.06 \times 10^{-14}$ ,  $6.04 \times 10^{-15}$ ,  $2.83 \times 10^{-15}$  和  $3.48 \times 10^{-15}$ 。我们采用 150 m 室外电缆与 S/X 双频制冷接收机连接, 发射机发出的单频点信号由 4 个功能相似的数字终端记录设备 K5、IF Doppler、微分 Doppler 和 VLBI MK5B 接收。

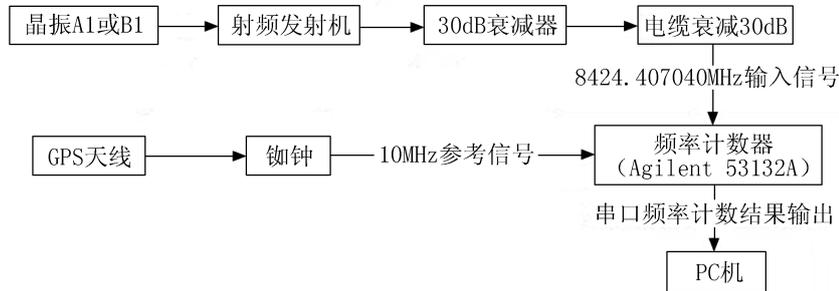


图 1 晶振测试设备连接图 (1)

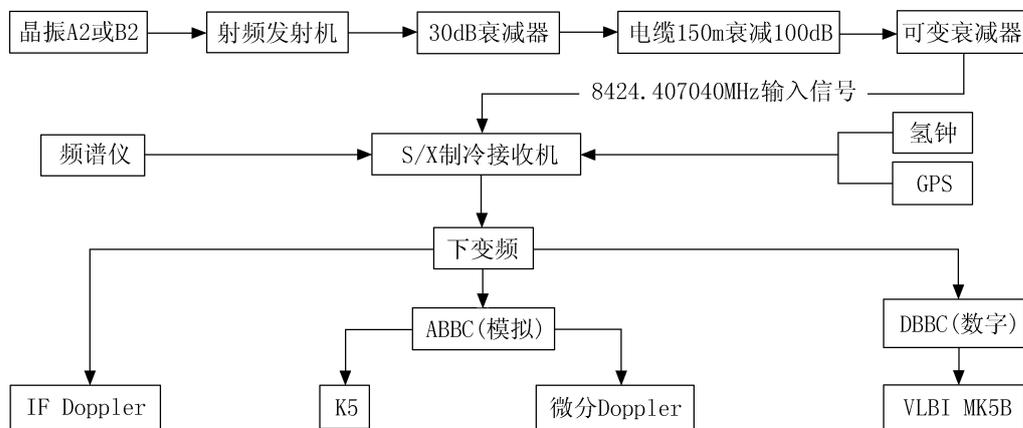


图 2 晶振测试设备连接图 (2)

### 3 USO 测试结果

2010年1月, 进行晶振 B1、A1 的 USO 测试。晶振 B1 的测试结果如图 3 所示, 测试开始约 2 h 后, 频率出现比较大的抖动, 变化范围约为  $\pm 10$  Hz, 该状态持续到测试结束; 晶振 A1 的测试结果如图 4 所示, 测试开始频率出现比较大的抖动, 20 h 之后去掉 GPS 信号, 抖动现象得到明显改善。

2010年3月的晶振测试中, 频率数据提取使用 K5 设备。日本 NICT 开发的 K5 数据采集卡设计为 1, 4 通道 2 种工作模式的 VLBI 数据采集设备, 单通道采样率最高可达到 64 Mbps, 4 通道可以达到 256 Mbps, 量化率最高可以达到 8 bit。信号首先经过 S/X 双频接收机得到射频信号, 然后降频到中频信号, 最后输入到基带转换器得到基带信号, 再利用 K5

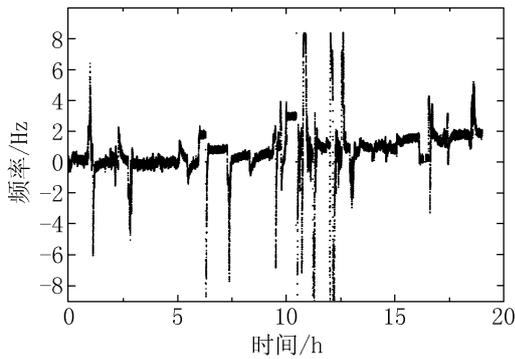


图 3 晶振 B1 频率随时间的变化

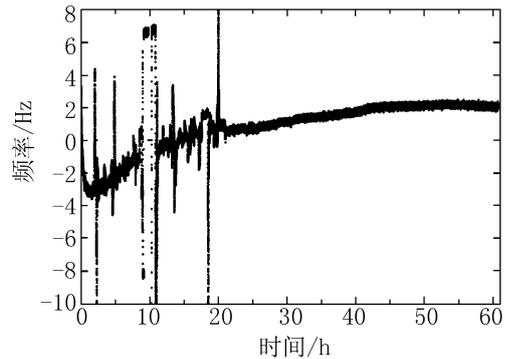


图 4 晶振 A1 频率随时间的变化

数据采集卡<sup>[6]</sup>对信号 A/D 采样,把数据记录到计算机硬盘,对原始数据滤波变频后,利用多项式拟合得到的相位对积分时间求平均,得到基带原始多普勒值。删除实验测试中存在的明显数据坏点,得到晶振 B2 和 A2 的测试时间分别约为 17 h 和 75 h,如图 5、图 6 所示。发射机开机后需要一段时间稳定设备,测试的最初 3 h,频率以指数形式变化,频率值漂移约 3 Hz,之后频率的变化趋于稳定,晶振 B2 频率值在约 0.35 Hz 范围内抖动,晶振 A2 频率值在约 0.8 Hz 范围内变化。

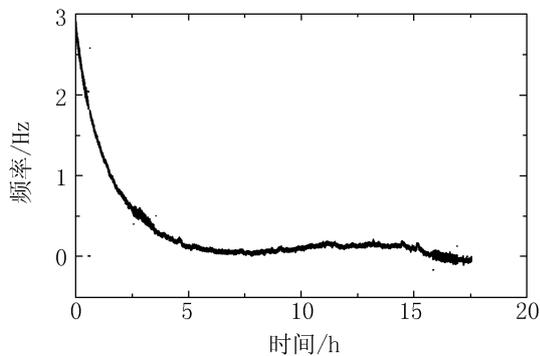


图 5 晶振 B2 频率随时间的变化

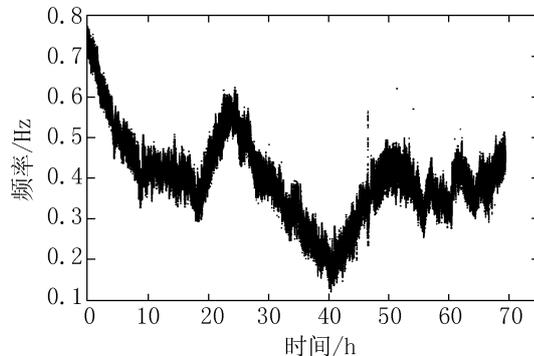


图 6 晶振 A2 频率随时间的变化

#### 4 USO 频率稳定性测试分析

对 2010 年 3 月晶振 B2、晶振 A2 数据做分段多项式拟合,即每 100 个点用 5 次多项式拟合,拟合数据残差的均方根 (Root Mean Square) 表示数据的记录精度。图 7 给出分段多项式拟合的残差 (左图为 B2 晶振,右图为 A2 晶振),单位为 Hz。晶振 B2 和 A2 的频率残差均方根解算结果分别为 0.007 07 Hz 和 0.007 80 Hz。

频标提供高准确度、高稳定度的标准频率信号,比如 USO。衡量频标的重要指标有:频率准确度、频率稳定度和频率漂移率等。频率准确度是频率标准源输出频率的实际值与标称值的相对偏差。频率稳定度表示频率标准源输出频率受随机噪声影响产生的随机起伏特性。频率漂移率是指频标在连续运行过程中,受本身元器件老化作用,以及环境因素和负载能量

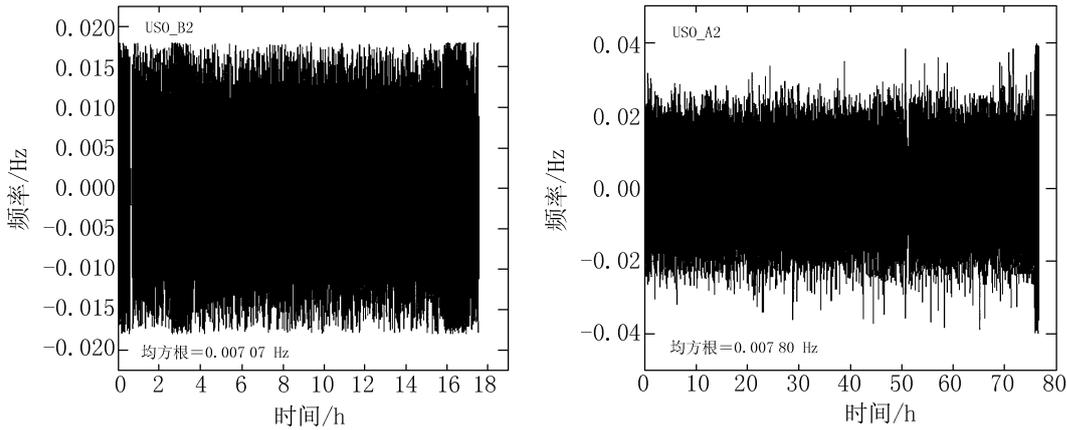


图7 晶振 B2、晶振 A2 数据分段多项式拟合残差

变化影响,其输出频率随运行时间单调增加或减少,且频率变化呈现线性规律。频标的频率准确度与频率稳定度之间的关系相当于可靠性与精度之间的关系。可靠性高表明系统误差和随机误差均小,精度高表明数据的离散程度小。减小频标输出频率的系统误差是提高频标输出频率可靠性的重要途径;减小频标输出频率的离散程度是提高频标输出频率稳定度的重要手段。一个性能好的频标输出的频率应该又准又稳。晶振的简单演化模型为:

$$f_T = f_{T_0} + Bt + A \cdot \text{rand}(t) \quad , \quad (1)$$

其中,  $f_{T_0}$  为晶振标称值,  $B$  为线性演化因子,  $A$  为晶振相位噪声对应的频率随机分布,可以用阿伦方差来衡量。

对于单程多普勒测量,晶振稳定度对多普勒观测值的影响为:

$$\Delta f_R^{1-way} \Delta f_T \left(1 - \frac{v}{c}\right) \approx \Delta f_T \quad . \quad (2)$$

对于单程站间差分多普勒测量,晶振稳定度对多普勒观测值的影响为:

$$\Delta D_{-f_{R12}}^{1-way} \approx \Delta f_T(t_{T_2}) - \Delta f_T(t_{T_1}) \quad , \quad (3)$$

其中,  $t_{T_1}$  和  $t_{T_2}$  是相同接收时刻对应的信号发射时的不同时刻。

从上面的分析可以看出:如果不考虑其他因素的影响,晶振自身的误差和单程多普勒观测误差相当,而差分多普勒取决于在 2 次发射时刻  $t_{T_1}$  和  $t_{T_2}$  间隔内晶振的稳定度,当  $t_{T_1}$  和  $t_{T_2}$  相差不大时,可以认为排除了晶振长期漂移对观测量带来的影响,因此,单程多普勒精度取决于晶振的稳定度,而站间差分多普勒测量的精度取决于时刻  $t_{T_1}$  和  $t_{T_2}$  间隔内晶振的稳定度。由于排除了晶振长期漂移的误差,站间差分多普勒精度要高于单程多普勒精度。

频率时域表征是指在某一段时间内频率平均值的随机起伏量。阿伦方差<sup>[7]</sup>为无间歇连续双采样的方差,是最常用的从时间域角度研究瞬时相对频率稳定性的分析方法。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(M'-1)} \sum_{i=1}^{M'-1} [\bar{y}_{i+1}(m) - \bar{y}_i(m)]^2 \quad , \quad (4)$$

式中,  $m$  为数据平滑点数,  $\tau = m\tau_0$ ,  $\tau_0$  为数据采集的间隔;  $M'$  为  $\bar{y}_i$  的个数,  $M' = M/m$ ,  $M$  为数据采集总数;  $\bar{y}_i(m) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m y_{j,i}$ ,  $y_{j,i}$  为相对频率偏差序列。

地面台站对卫星进行连续多普勒测量时, 信号频率的稳定度对测量的精度有直接影响, 频率波动产生的测量噪声误差约为  $\Delta f = f_0 \cdot \sigma(\tau)$ ,  $f_0$  为卫星发射标称频率,  $\sigma(\tau)$  为阿伦方差; 径向速度误差约为  $\Delta v = c \cdot \sigma(\tau)$ ,  $c$  为光速。

晶振 A1、B1 的数据质量不是很好, 稳定度的测试结果仅供参考, 如图 8、图 9 所示。晶振 A2、B2 数据的时间序列中没有去除长趋势变化, 得到的频率稳定度如图 10、图 11 所示。

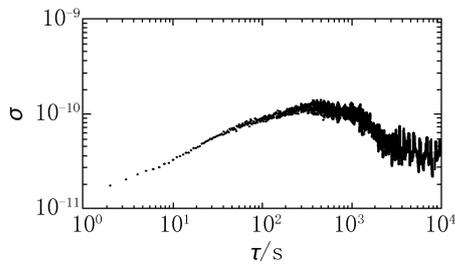


图 8 晶振 B1 的频率稳定度

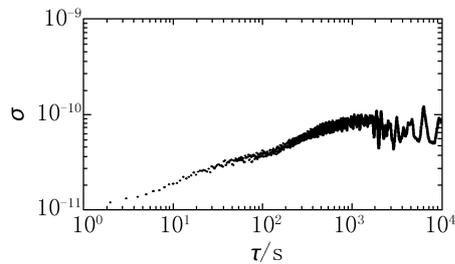


图 9 晶振 A1 的频率稳定度

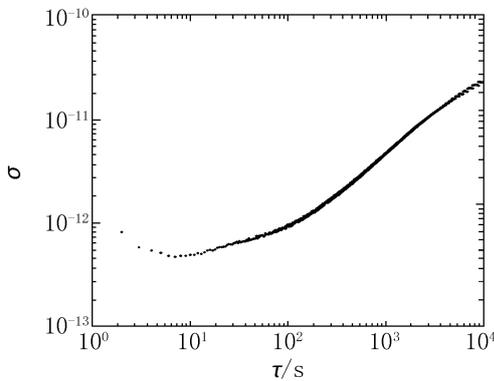


图 10 晶振 B2 的频率稳定度

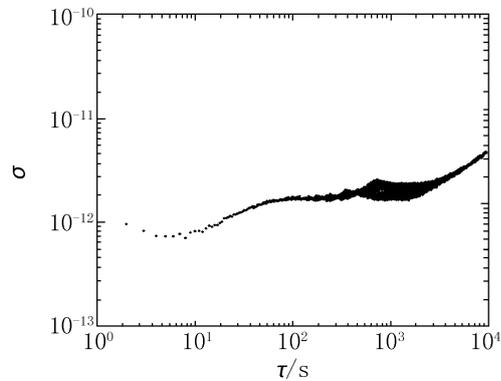


图 11 晶振 A2 的频率稳定度

## 5 结 论

本文通过解算 YH-1 的超稳定晶体振荡器的频率数据, 在 100~1000 s 积分时间段内, 晶振 A2 的频率稳定度约为  $1 \times 10^{-12}$ , 由此可以得出 X 波段信号引起的测量误差约为 8.4 mHz 或 0.3 mm/s。一个连续的测量弧段时间可持续 8 h 以上, 此时  $\sigma(\tau)$  将小于  $1 \times 10^{-11}$ , 则该时段因频率不稳定引起的测量数据的偏差约为 3 mm/s。此结果对中国的 YH-1 火星探测器的实时精密测定轨有参考和借鉴作用。

**致 谢:** 本研究得到了中俄合作“萤火-1”火星探测工程 VLBI 测控系统、中科院上海天文台佘山观测站的支持, 特此致谢。

**参考文献:**

- [1] 平劲松, 尚堃, 张素君等. 物理, 2009, 38(11): 779
- [2] 尚堃, 简念川, 张素君等. 物理, 2009, 38(11): 799
- [3] O'Reilly B D, Chao C C . DSN Progress Report, 1974, 12: 22
- [4] 王震, 叶楠, 尚堃等. 天文学进展, 2010, 28(4): 424
- [5] Liu Q H, Shi X, Kikuchi F et al. Sci China Ser G-Phys Mech Astron, 2009, 52(12): 1858
- [6] Jian N C, Shang K, Zhang S J et al. Sci China Ser G-Phys Mech Astron, 2009, 52(12): 1849
- [7] Allan D W. Proc IEEE, 1966, 54: 221

## Test and Analysis of Frequency Stability of USO in YH-1

WANG Zhen<sup>1,2</sup>, JIAN Nian-chuan<sup>3</sup>, ZHANG Su-jun<sup>3</sup>, SHANG Kun<sup>3</sup>,  
GAO Feng<sup>3</sup>, WANG Na<sup>1,2</sup>, PING Jin-song<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 2. Key Laboratory of Radio Astronomy, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011; 3. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)

**Abstract:** As an important milestone in the exploration of Mars in China, “YingHuo-1”, Chinese first Mars probe, is planned to be launched in 2011. The kernel payload of “YingHuo-1” is Ultra Stable Oscillator (USO) which provides frequency standard and transmits downlink signal. The ground-based radio Open-Loop-Doppler technology and VLBI system will be used to receive radio signal and support communication, navigation and tracking. In this article, the experimental data of YingHuo-1’s USO is presented. Results show that the frequency stability of USO is about  $1 \times 10^{-12}$ , which can support real-time precise orbit determination.

**Key words:** Ultra Stable Oscillator; Frequency Stability; One-way Doppler