

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2020.04.08

13 m 天线观测深空探测器数据的 处理与分析

贺庆宝^{1,2}, 陈祎豪², 杨 轩², 鄢建国², 李 斐²

(1. 南方科技大学 地球与空间科学系, 深圳 518055; 2. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079)

摘要: 武汉大学近年来逐步完善了 13 m 天线中用于深空探测的硬件设施, 且收集了大量观测数据, 包括月球探测器嫦娥三号 (Chang'E-3, CE3)、火星探测器火星快车 (Mars Express, MEX) 和火星轨道勘察器 (Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)、土星探测器 Juno 等。对近两年的观测数据做了整体分析, 包括信号接收功率、接收频率精度、氢钟稳定性、总相位抖动等方面。分析结果显示, 接收信号的信噪比在制冷接收机安装之后提高了 1 倍, 接收频率的精度在氢钟安装之后也提高了 1 倍, 达到 20 mHz。13 m 天线的氢钟在 ms 量级稳定性较差, 但 1 s 稳定度达到 10^{-12} 量级, 能够满足当前深空探测的需求。另外, 还提出一种事后计算总相位的方法, 能够适应于极低信噪比情况。总相位受等离子体影响的分析结果与国际上研究结果接近。整体分析结果表明, 13 m 天线的观测数据除了可提取高精度多普勒频率应用于测定轨之外, 还可提取相位抖动做空间介质等科学研究。

关键词: 等离子体; 氢钟; 总相位; 信噪比

中图分类号: P171.2 **文献标识码:** A

1 引 言

武汉大学 13 m 天线于 2013 年建成, 主要应用于地球遥感卫星数据的接收, 同时也肩负深空探测学科的建设、教学和科研工作^[1]。为应用于深空探测, 天线陆续配备了 X 波段制冷接收机、氢原子钟、数据采集系统, 同时也对深空探测器进行了观测, 如我国的月球探测器嫦娥三号 (Chang'E-3, CE3)、欧空局及美国的火星探测器火星快车 (Mars Express, MEX) 和火星轨道勘察器 (Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)、美国的木星探测器 Juno 等。在观测时间安排上, 我们在安装制冷接收机前后以及安装氢原子钟前后都观测了嫦娥三号, 用

收稿日期: 2020-03-16; 修回日期: 2020-05-12

资助项目: 测绘遥感信息工程国家重点实验室专项科研经费

通讯作者: 贺庆宝, xy365685520@163.com

于对比分析接收信号信噪比 (signal to noise ratio, SNR) 的强弱和接收频率精度的高低。同时我们在火星与太阳角距离较小和较大时都对火星探测器 (MRO\MEX) 进行了观测, 用以分析等离子体对信号相位的影响。

接收信号信噪比的强弱直接决定信号能否被成功提取, 同时也会影响后续提取频率与相位的精度。提取得到的多普勒频率可用来对探测器进行测定轨, 也可用来做行星科学的研究, 如重力场提取与行星大气的研究^[2,3]; 提取得到的相位抖动可以用来研究空间介质对电磁波影响的特性与规律^[4,5]。随着我国深空探测项目的开展, 如后续的探月项目嫦娥五号 (Chang'E-5, CE5)、火星探测、小行星探测等, 13 m 天线不仅可用来做深空探测学科建设, 将来也有可能应用在深空探测任务中。本文通过分析 13 m 天线近两年来观测深空探测器的数据, 及介绍天线接收功率以及多普勒频率精度、相位抖动情况, 为相关学科建设以及加入深空探测任务、空间科学研究等做参考与准备。

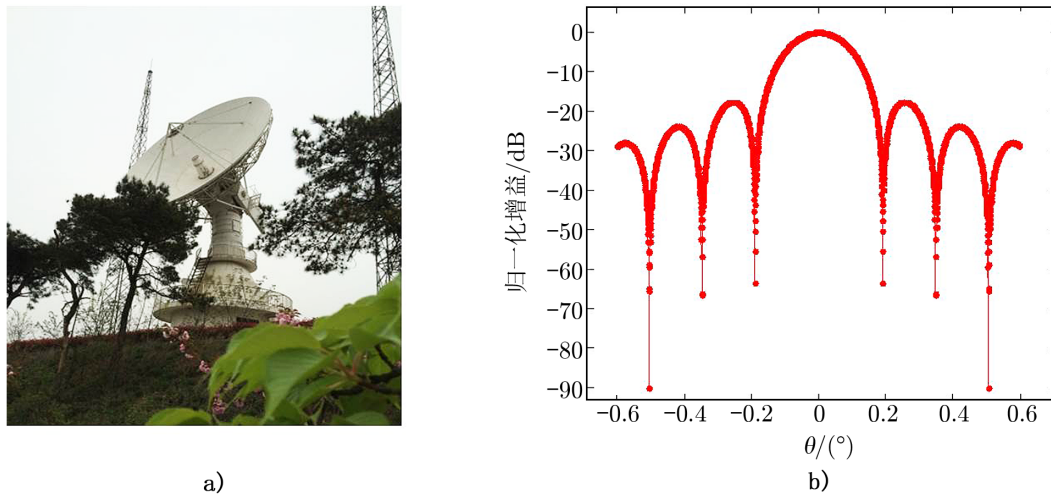
本文第 2 章主要介绍用 13 m 天线观测不同深空探测器的功率谱及制冷接收机安装前后的信噪比变化。第 3 章主要介绍多普勒频率的精度及稳定性。第 4 章主要介绍一种事后计算总相位的方法及相位抖动分析。第 5 章对全文做了总结。全文时间均为协调世界时 (coordinated universal time, UTC)。

2 接收功率分析

目前深空探测任务的下行频率大部分使用的都是 X 波段频率, 13 m 天线配备 X 波段接收机能对大部分深空探测器进行观测。在深空探测中, 探测器距离地球小于 2×10^6 km 时, X 波段下行频率限制在 8 450~8 500 MHz; 当探测器距离地球大于 2×10^6 km 时, X 波段下行频率限制在 8 400~8 450 MHz^[6]。我们以接收频率 8 470 MHz 为例, 计算了 13 m 天线归一化的增益曲线, 计算方法见参考文献 [7]。图 1a) 展示了 13 m 天线的实物图, 图 1b) 给出了天线在 8 470 MHz 的波束图。由图 1b) 中数据可知, 13 m 天线 X 波段的主波束宽度 (两边各下降 3 dB) 为 0.16° 。

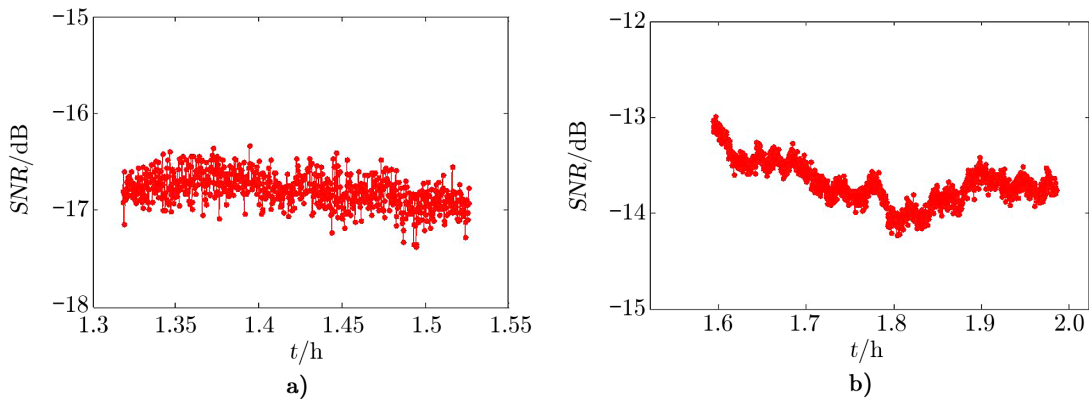
13 m 天线 X 波段接收机的制冷装置在 2017 年 12 月 2 日进行安装, 我们在安装前后分别对 CE3 进行了观测。图 2a) 与图 2b) 分别是 2017 年 11 月 10 日和 2018 年 1 月 9 日观测 CE3 得到载波通道信噪比的结果。在计算信噪比时, 采用 1 024 点做快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT), 然后 1 s 积分, 具体方法见参考文献 [7]。由图 2 结果可知, 在接收机制冷装置安装后, 信噪比提高了约 3 dB。考虑 CE3 发射功率不变, 信噪比提高 3 dB 意味着天线系统噪声温度降低了一半, 说明制冷效果良好。

在制冷接收机安装之后, 我们利用 13 m 天线对火星探测器 MRO, MEX 以及木星探测器 Juno 也进行了观测。火星离地球最近时约 5.5×10^7 km, 13 m 天线 X 波段主波束在此距离上对应的平面宽度约为 1.5×10^5 km, 远大于目前火星探测器的轨道高度^[8]。因此在观测火星探测器时, 只需将天线对准火星即可。另外, 我们在 2018 年 1 月 10 日也对木星探测器 Juno 进行了观测, 此时木星距离地球约 8.7×10^8 km。由于 Juno 飞行轨道距离木星很远^[9],



注: a) 13 m 天线的实物图; b) 13 m 天线的 X 波段波束图。

图 1 13 m 天线的实物图以及 X 波段波束图

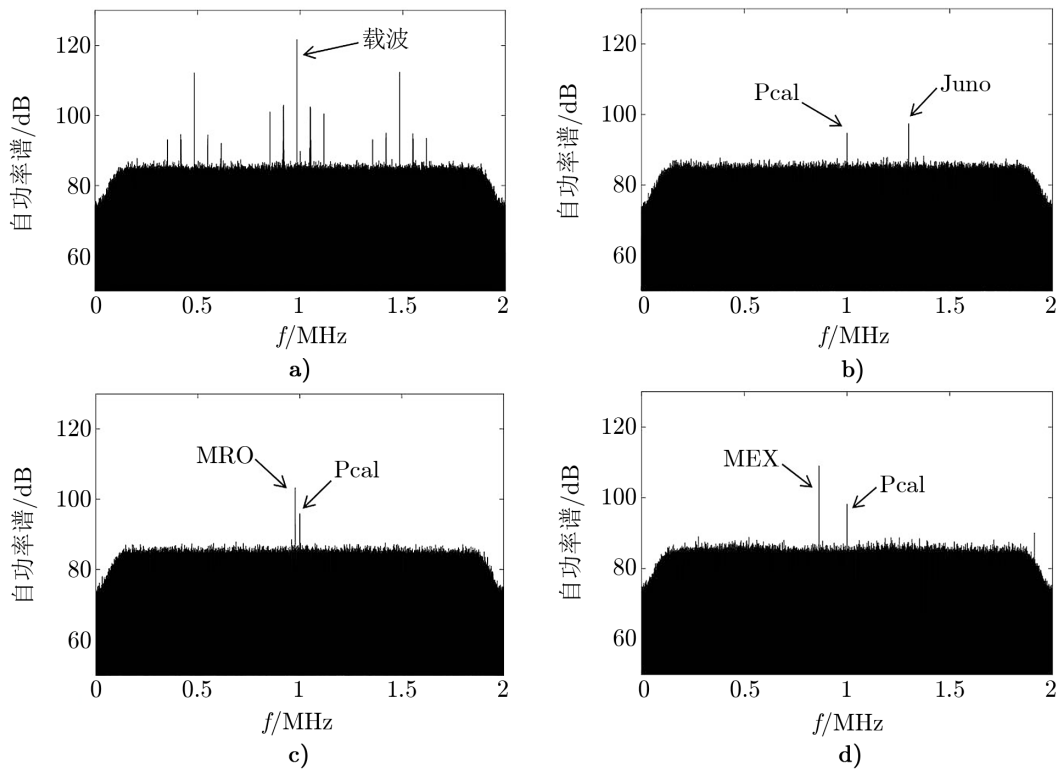


注: a) 制冷接收机安装前CE3信号的信噪比; b) 制冷接收机安装后CE3信号的信噪比。

图 2 制冷接收机安装前后CE3信号的信噪比

观测时我们根据轨道预报文件计算 Juno 的位置, 然后将天线对准 Juno 进行观测。

图 3 给出了 13 m 天线观测各个探测器信号得到的自功率谱。自功率谱是通过利用 1 s 数据做 FFT 然后平方所得, 频率分辨率为 1 Hz。图中的 Pcal 信号为相位校准信号。图 3a) 是 2018 年 1 月 9 日观测 CE3 得到的自功率谱; 图 3b) 是 2018 年 1 月 10 日观测 Juno 得到的自功率谱; 图 3c) 是 2018 年 1 月 11 日观测 MRO 得到的自功率谱, 此时火星距离地球约 2.8×10^8 km; 图 3d) 是 2018 年 3 月 5 日观测 MEX 得到的自功率谱, 此时火星距离地球约 2×10^8 km。从图 3 可见, CE3 信号最强, 其次是 MRO 和 MEX, 最弱的是 Juno, 这主要是因为接收信号的功率与距离的平方成反比。尽管如此, 我们还是成功接收并提取到了远在 8.7×10^8 km 外的 Juno 探测器信号。



注: a) 月球探测器 CE3 自功率谱; b) 木星探测器 Juno 自功率谱; c) 火星探测器 MRO 自功率谱; d) 火星探测器 MEX 自功率谱。

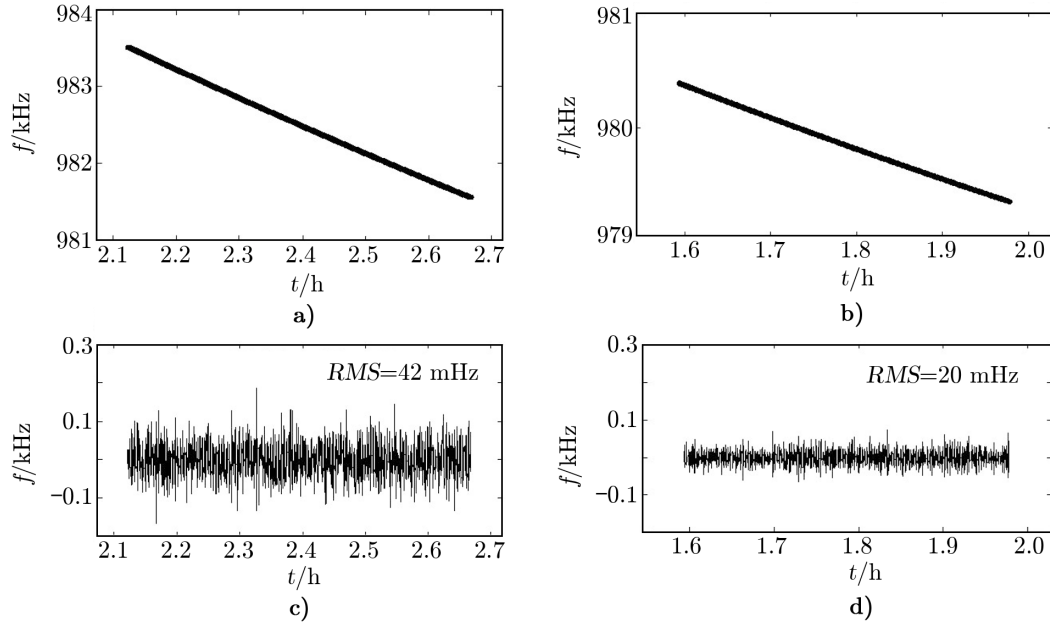
图 3 13 m 天线观测月球、火星、木星探测器信号的自功率谱

3 频率分析

3.1 接收频率精度分析

接收频率扣除探测器的发射频率即为多普勒频移,它可用来对探测器进行测定轨及开展行星科学研究;因此,接收频率精度的高低会影响测定轨及科学研究的结果。接收频率的精度主要受频率发射端与接收端基准频率的稳定性、随机噪声、空间介质等影响。为提高 13 m 天线基准频率的稳定性,13 m 天线于 2017 年 12 月 19 日安装了氢钟,替代了之前所用的铷钟。理论上氢钟能提供更稳定的基准频率。图 4 给出了氢钟安装前后接收频率的精度对比,积分时间均为 1 s。图 4a) 与图 4b) 分别是 2017 年 12 月 10 日和 2018 年 1 月 9 日观测 CE3 计算得到的接收频率。图中显示的是转换成基带之后的频率,真实的接收频率等于基带频率加上本振频率 8 469 MHz。频率计算方法见参考文献 [10]。图 4c) 是 2017 年 12 月 10 日 CE3 接收频率的 9 次多项式拟合残差,其均方根 (root mean square, RMS) 为 42 mHz。不仅如此,2017 年 11 月 10 日观测 CE3 的接收频率,其精度也约为 42 mHz。可见在氢钟安装之前,13 m 天线观测 CE3 的接收频率所能达到的精度即为 42 mHz。图 4d) 是 2018 年

1月9日即氢钟安装之后观测 CE3 的接收频率 9 次多项式拟合残差, 其 RMS 为 20 mHz。考虑 CE3 的发射信号都是由地面上行站提供频率基准, 图 4d) 中接收频率精度提高一倍的主要原因则来自于 13 m 天线氢钟的安装。

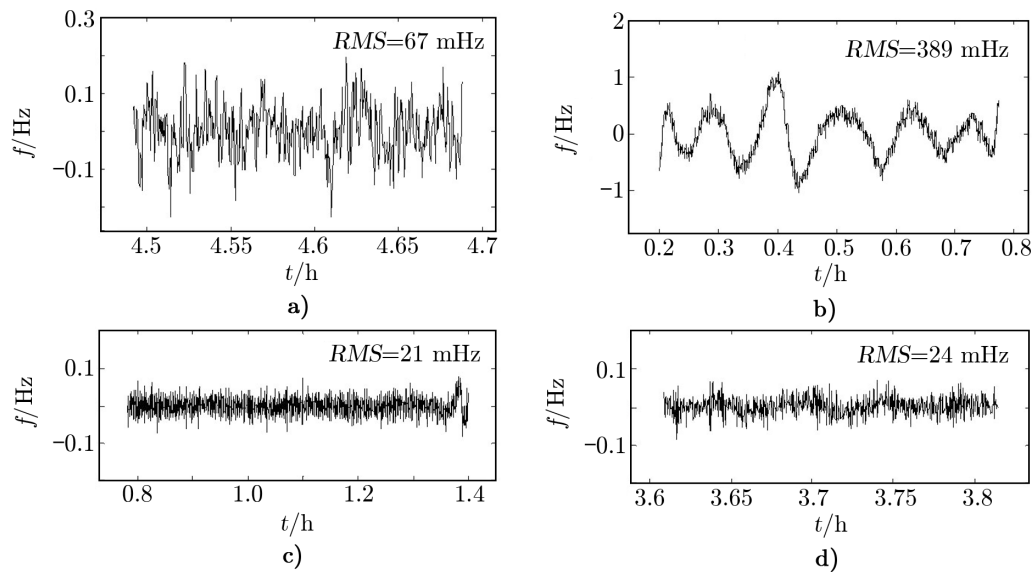


注: a) 2017年12月10日观测 CE3 的接收频率; b) 2018年1月9日观测 CE3 的接收频率; c) 2017年12月10日接收频率的拟合残差; d) 2018年1月9日接收频率的拟合残差。

图 4 氢钟安装前后 13 m 天线观测 CE3 得到的接收频率

如第 2 章所提到, 13 m 天线除了观测 CE3, 还多次观测了火星探测器 MRO 和 MEX, 以及木星探测器 Juno。我们对这些观测数据都进行了处理, 计算了其接收频率, 并分析其精度。图 5 给出了氢钟安装后不同探测器接收频率的拟合残差, 积分时间均为 1 s。图 5a) 给出了 2018 年 1 月 10 日观测 Juno 的频率拟合残差, RMS 为 0.067 Hz。当天观测时段 Juno 距离木星约 7.93×10^6 km。图中结果有一些波动, 这可能是由空间介质或者信号穿过小行星带引起。图 5b) 给出了 2018 年 1 月 11 日观测 MRO 的频率拟合残差, RMS 为 0.389 Hz。当天观测时段 MRO 距离火星从约 260 km 变化至 290 km。图中结果有明显的大幅度变化, 周期约数百秒, 这应主要由 MRO 当时离火星较近, 受火星重力场影响较大而引起。图 5c) 给出了 2018 年 3 月 5 日观测 MEX 的频率拟合残差, RMS 为 0.021 Hz。当天观测时段 MEX 距离火星从约 8 400 km 变化到 6 000 km。图中结果整体非常平稳, 这应主要由此时飞行器轨道较高, 对火星重力场高阶变化不敏感所致。图 5d) 给出了 2019 年 9 月 28 日观测 MRO 的频率拟合残差, RMS 为 0.024 Hz。当天观测时段 MRO 距离火星约 260 km。图中结果没有类似图 5b) 中大幅度抖动, 原因是此数据的时间跨度较短, 重力场引起的长周期抖动已被高阶拟合去除。图中有很小幅度的波动, 这可能是受空间等离子体的

影响而引起, 当天火星与太阳夹角为 8.6° 。



注: a) 2018年1月10日观测 Juno 频率拟合残差; b) 2018年1月11日观测 MRO 频率拟合残差; c) 2018年3月5日观测 MEX 频率拟合残差; d) 2019年9月28日观测 MRO 频率拟合残差。

图5 13 m 天线观测不同深空探测器的频率拟合残差

综上所述, 13 m 天线观测 CE3 以及火星探测器的接收频率精度约为 20 mHz, 且能以较高精度提取木星探测器的接收频率。

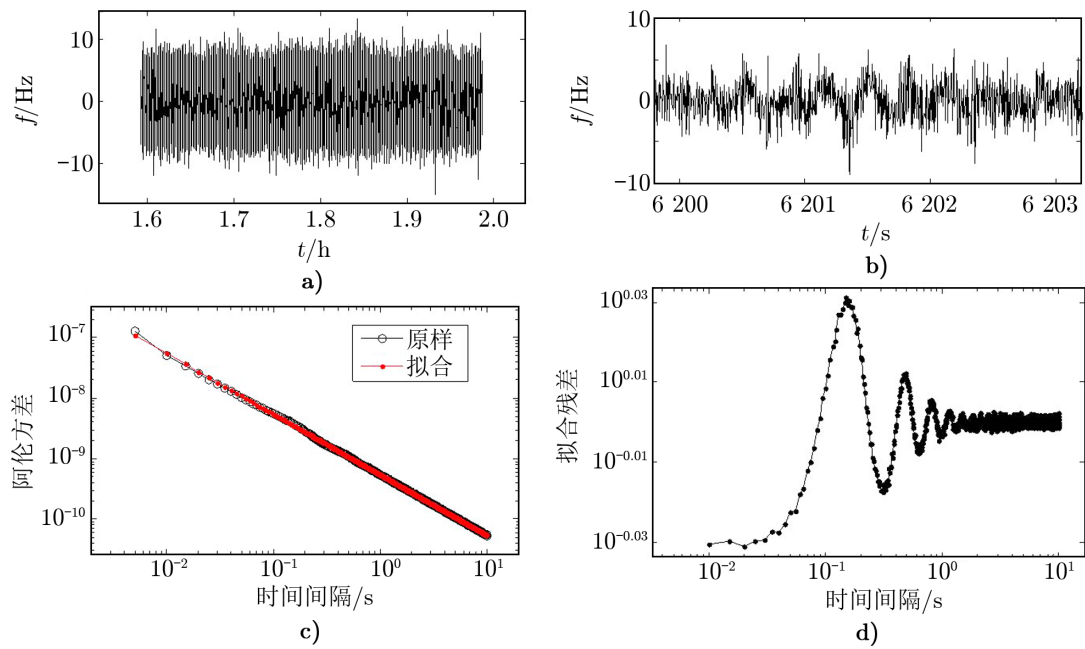
3.2 频率稳定性分析

前面给出了 1 s 积分的接收频率结果。除此之外, 我们还计算了 5 ms 积分的接收频率, 然后分别利用 5 ms 积分和 1 s 积分的结果做阿伦方差以分析其频率稳定性。

图 6a) 给出了 2018 年 1 月 9 日 13 m 天线观测 CE3 得到 5 ms 积分的接收频率拟合残差, 其变化范围在 ± 10 Hz 左右, 这主要是由短时间积分随机误差较大引起。图 6b) 是图 6a) 的部分放大图, 为了看清其变化的周期, 我们把横轴转换成了秒。由图 6b) 可知, 其频率拟合残差存在明显的毫秒量级周期抖动。我们将图 6a) 结果做阿伦方差, 得到结果如图 6c) 黑色圈线所示, 红色点线为直线拟合结果 (斜率为 -1 , 代表随机噪声的理论变化趋势)。图 6d) 是阿伦方差的直线拟合残差, 其结果显示时间间隔在毫秒量级时抖动较大, 但随着时间间隔越长, 抖动幅度越小, 最后在时间间隔为 1 s 左右稳定下来。这种现象不仅存在于 CE3 观测数据中, 也存在于火星和木星探测器的观测数据中。

鉴于此抖动普遍存在于观测数据中, 说明其原因来自于 13 m 观测台站, 而最有可能产生此抖动的环节则是由氢钟提供的混频信号。经与氢钟设计方交流后得知, 氢钟毫秒量级频率稳定度取决于氢钟锁相接收机所采用恒温晶振的等级, 武汉大学 13 m 天线的氢钟所采用的是常规瑞士 oscilloquartz 的 8789 晶振, 其毫秒量级稳定度较差, 从而造成了抖动现象。

另外, 我们利用相同观测数据得到 1 s 积分的频率结果做阿伦方差, 结果如图 7 所示。



注: a) 5 ms 积分接收频率的拟合残差; b) 频率拟合残差部分放大图; c) 频率拟合残差的阿伦方差; d) 阿伦方差的直线拟合残差。

图 6 2018 年 1 月 9 日 13 m 天线观测 CE3 得到 5 ms 积分接收频率的拟合残差以及阿伦方差

由于观测数据长度有限, 我们做阿伦方差所使用的时间间隔只设置从 1 s 到 100 s。由图 7 可知, 13 m 天线观测 CE3 的接收频率 1 s 稳定度约为 5.6×10^{-12} 。这与利用上海佘山 25 m 天线进行 CE3 天地对接得到的频率稳定度 (7.0×10^{-12}) 基本相当^[11]。

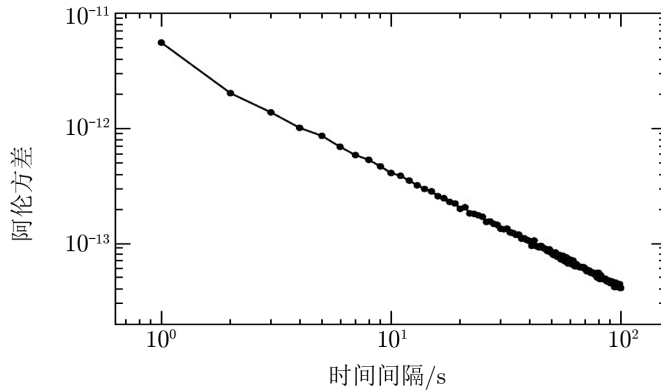


图 7 13 m 天线观测 CE3 得到 1 s 积分接收频率的阿伦方差

综上所述, 13 m 天线的氢钟在毫秒量级的频率稳定度较差, 但 1 s 稳定度较高 (10^{-12} 量级)。目前深空探测的数据处理基本使用 1 s 甚至更长时间积分以提高 *SNR*, 因此 13 m

天线氢钟的频率稳定度能够满足目前深空探测的需求。

4 总相位计算与分析

深空探测器发射的电磁波信号先穿过空间介质(包括空间等离子体、地球大气电离层),然后到达地面。与频率相比,电磁波总相位对空间介质的影响更敏感。接收信号总相位的计算一般与频率计算同时进行,如利用锁相环计算频率和总相位。但此方法有其局限性,如锁相环在信噪比较低时容易失锁。由于13 m天线接收深空探测器信号的信噪比一般较低,为此我们提出一种事后计算总相位的方法,能适用于极低信噪比情况。我们用此方法分别计算了CE3以及火星探测器观测数据的总相位并做了分析。

4.1 总相位计算方法

此方法的总体思路为:先计算得出1 s积分的接收频率并做多项式拟合;然后拿拟合频率构建混频函数并与接收信号混频,得到残余相位;最后把残余相位与混频相位相加,得到总相位。下面我们将做具体说明。

(1) 计算频率并做拟合

我们先利用参考文献[10]提出的方法计算得到当天接收信号1 s积分的频率,然后再回到原始数据,并把原始数据分为若干段,每段数据的时间跨度为5 s,后面每次计算5 s数据的总相位。每一段5 s数据的信号表达式可表示为:

$$y(t) = \cos(\varphi_{\text{total}}) , \quad (1)$$

φ_{total} 表示为:

$$\varphi_{\text{total}} = 2\pi(f_0 + at^2 + bt)t + \theta , \quad (2)$$

其中, f_0 表示这段数据起始点的频率, t 为时间,变化范围为0~5 s, θ 为初始相位。由于有多普勒效应且时间跨度为5 s,我们设定其频率满足二次多项式变化, a 和 b 分别是二次和一次多项式的系数。如此,将式(2)对时间 t 求导再除以 2π ,则可得到理论频率的表达式:

$$f_{\text{real}} = 3at^2 + 2bt + f_0 . \quad (3)$$

此时我们在之前已计算得到的频率中找到相同时间段的结果,并做二次多项式拟合。拟合后的频率可表示为:

$$f_{\text{fit}} = p_1t^2 + p_2t + p_3 , \quad (4)$$

其中, p_1, p_2, p_3 为二次拟合后得到的多项式系数,则有 $p_1 \approx 3a, p_2 \approx 2b, p_3 \approx f_0$ 。

(2) 混频并平均

此时我们利用前面频率拟合结果来构建两路正交的混频函数,并与此5 s原始数据做混频处理。混频运算的目的是为了将频率搬移至0 Hz附近,以便最后提取残余相位。混频之

后, 我们得到两路信号, 即 I 路与 Q 路。混频运算公式如下:

$$y_I(t) = y(t) \cdot \cos(\varphi_{\text{mix}}) \quad , \quad (5)$$

$$y_Q(t) = y(t) \cdot [-\sin(\varphi_{\text{mix}})] \quad , \quad (6)$$

其中, 两路混频信号的相位表示为:

$$\varphi_{\text{mix}} = 2\pi \left(\frac{p_1}{3}t^2 + \frac{p_2}{2}t + p_3 \right) t \quad , \quad (7)$$

混频信号相位的参数设计主要由式 (3), (4) 得来, 目的是尽可能地逼近真实相位。

混频运算不仅把原始数据的频率搬移至低频, 同时也把频率搬移到了高频。为了消除其高频频率, 我们将混频后得到的 I 路与 Q 路信号分别进行平均处理即积分。采用多长时间积分可根据信号的强弱来决定, 对于极弱信号, 可使用 1 s 甚至更长时间积分, 以保证相位能够被正确提取, 这也是此方法的优势所在。平均之后的结果可表示为:

$$y_I(t)' = \cos(\Delta\varphi) \quad , \quad (8)$$

$$y_Q(t)' = \sin(\Delta\varphi) \quad , \quad (9)$$

其中,

$$\Delta\varphi = \varphi_{\text{total}} - \varphi_{\text{mix}} \quad . \quad (10)$$

此时, 我们得到了两路超低频信号, 两路信号的相位约等于原始信号的初始相位, 即 $\Delta\varphi \approx \theta$ 。

(3) 得到残余相位和总相位

在混频并平均处理后, 我们将两路信号进行反正切运算, 得到残余相位:

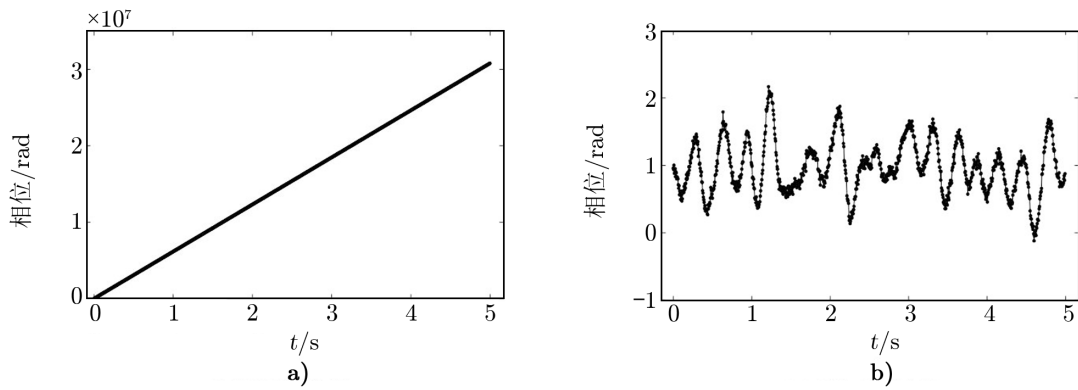
$$\Delta\varphi = \arctan \left(\frac{y_Q(t)'}{y_I(t)'} \right) \quad . \quad (11)$$

之后把残余相位与混频相位叠加, 即得到每一段数据 (5 s) 的总相位。最后再把每段数据的总相位通过调整 2π 模糊度以连接起来, 即可得到整段观测数据的总相位。

4.2 总相位计算结果与分析

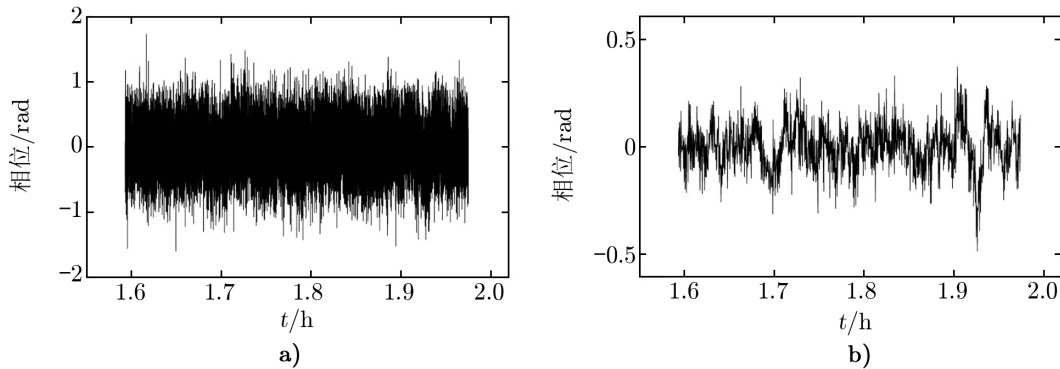
我们利用上述方法计算了 13 m 天线于 2018 年 1 月 9 日观测 CE3 的总相位。图 8a) 和 b) 分别给出了计算第一段 5 s 原始数据时得到的混频相位以及残余相位结果, 其中残余相位结果使用的是 5 ms 积分。残余相位值理论上约等于信号的初始相位, 短时间内应稳定不变, 但图 8b) 中结果存在明显毫秒量级的周期抖动, 抖动幅度约为 1 rad, 这主要是由 13 m 天线氢钟提供的本振频率在毫秒量级的稳定性比较差造成。图 8a) 与 b) 结果之和即为总相位。

我们把每一段 5 s 数据的总相位连接起来, 并做 9 次多项式拟合, 得到拟合残差, 其结果如图 9a) 所示。图中整体的变化范围在 ± 1.5 rad 内, 主要原因如前所述, 为氢钟引起。另外我们还根据同样的计算步骤得到了 1 s 积分的总相位结果, 并做 9 次多项式拟合, 拟合残差如图 9b) 所示。图 9b) 中结果并无类似图 8b) 中的大幅度抖动, 其变化范围在 ± 0.5 rad



注: a) 混频相位; b) 残余相位。

图8 2018年1月9日13 m观测CE3数据计算总相位的中间值



注: a) 5 ms 积分; b) 1 s 积分。

图9 2018年1月9日13 m天线观测CE3的总相位拟合残差

内, 此量级恰好反映地球大气电离层的影响。由此也说明, 尽管13 m天线氢钟在毫秒量级稳定性差, 但总相位1 s积分的结果基本不受此影响。

除了计算CE3数据的总相位之外, 我们还计算了13 m天线观测火星探测器(MRO\MEX)信号的总相位。火星距离地球遥远, 其绕飞的探测器发送回来的电磁波信号需穿过长距离的空间等离子体区域, 而该过程会引起电磁波相位的波动, 特别是在火星与太阳角距离较小时。图10是从地球视角测量火星与太阳的角距离示意图, 图中的 β 即为两者的角距离。

我们计算了13 m天线于2018年3月5日观测火星探测器MEX的总相位, 积分时间为1 s, 其拟合残差结果如图11a)中蓝色点线所示, RMS 为0.18 rad。当天火星与太阳的夹角为 81.8° , 信号的传播路径距太阳较远, 受等离子体的影响相对较小。另外我们还计算了2019年9月28日13 m天线观测火星探测器MRO的总相位, 积分时间为1 s。当天火星距离地球约 4×10^8 km, 且接收机的制冷设备因检修而暂停工作, 造成接收信号的信噪比非常低。我们利用前面提出的方法依然计算得到了其总相位, 它的拟合残差如图11a)中红色点

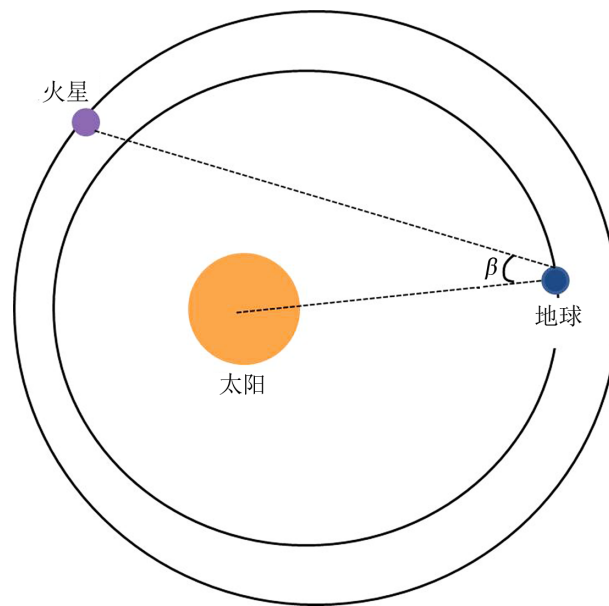
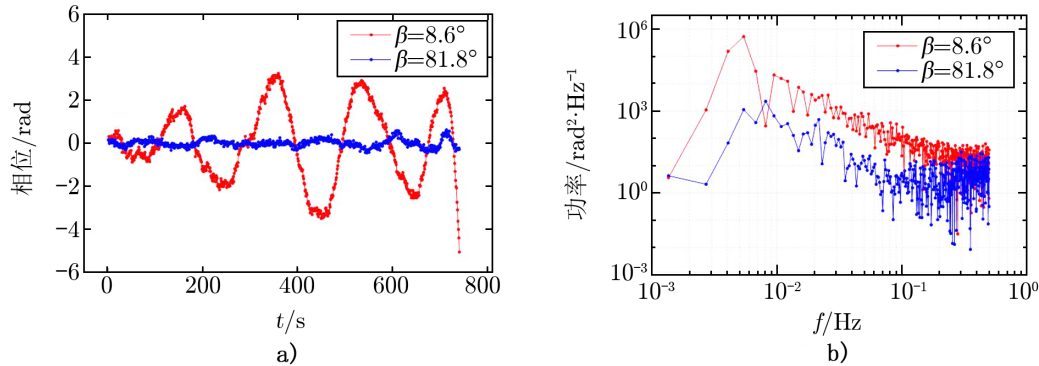


图 10 火星与太阳的角距离关系图

线所示, RMS 为 1.73 rad, 远大于图中蓝色点线的波动幅度。这主要是因为当天火星与太阳夹角较小, 约为 8.6° , 信号传播路径靠近太阳, 穿过较高浓度的等离子体区域, 使得电磁波相位产生较大波动。



注: a) 总相位拟合残差; b) 拟合残差的功率谱。

图 11 火星探测器的总相位拟合残差及功率谱

图 11a) 中没有选用两次 MRO 的观测数据做比较, 而是选用了 MEX 和 MRO 的数据, 是因为之前几次观测 MRO 结果均显示其受重力场变化的影响较大, 如图 5b) 所示, 不利于用来分析等离子体的影响。2018 年 3 月 5 日观测 MEX 结果和 2019 年 9 月 28 日观测 MRO 结果均显示其受重力场变化的影响极小, 如图 5c) 和 d) 所示, 且考虑 MEX 及 MRO 下行频

率的标准都由地面台站氢钟提供,因此它们总相位的抖动主要由空间介质引起,变化幅度的不同则主要与火星和太阳夹角有关。

我们把拟合残差做了功率谱分析,结果如图 11b) 所示。图中在 x 轴频率小于 $10^{-2.4}$ Hz 区域主要由测频精度引起,频率大于 10^{-1} Hz 区域主要由装置随机噪声引起,频率在 $10^{-2.4} \sim 10^{-1}$ 之间区域主要由空间介质引起。我们把 x 轴频率在 $10^{-2.4} \sim 10^{-1}$ 之间的数据做直线拟合,得到红色点线和蓝色点线拟合直线的斜率分别为 -2.2 和 -2.3 。Woo 等人^[12]利用 S 和 X 双频的相位数据研究等离子体时获得直线拟合斜率为 -2.45 ,这与图 11b) 的结果较接近,可见利用 13 m 天线的观测数据也可用来做等离子体的相关研究。

5 总结

文中分析了近两年来 13 m 天线观测深空探测器的数据,得到接收信号的信噪比在制冷接收机安装后提高了 3 dB,其接收频率精度在氢钟安装之后提高了约 1 倍,达到 0.02 Hz。分析结果显示 13 m 天线氢钟在毫秒量级的稳定度较差,但 1 s 的稳定度较高 (10^{-12} 量级),能够满足目前深空探测的需求。文中还提出一种事后计算总相位的方法,此方法能够适应于极低信噪比情况。在火星与太阳较近时,其火星探测器观测数据的总相位受等离子体影响引起较大幅度抖动。整体分析结果表明,13 m 天线除了可提取高精度多普勒数据做测定轨之外,也能利用总相位抖动做空间介质等科学研究。

致谢

感谢曲春凯、金炜桐、邓青云、郭茜和冯鹏等人利用 13 m 天线收集深空探测器的数据。感谢王云博和杨永章的建议与帮助。

参考文献:

- [1] <http://www.lmars.whu.edu.cn/geojrl/index.php/kyss/260.html>, 2020
- [2] Asmar S, Armstrong J, Less L, et al. *Radio Science*, 2005, 40: 1
- [3] Showman A, Fortney J, Lewis N, et al. *ApJ*, 2013, 762: 1.
- [4] 马茂莉, 郑为民, 昌胜骐, 等. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2016, 11: 77
- [5] Martin P, Matthias H, Silvia T, et al. *Solar Physics*, 2012, 279: 127
- [6] 钱志翰, 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: 50
- [7] He Q, Liu Q, Li P, et al. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2016, 29: 470.
- [8] Patzold M, Hausler B, Tyler G, et al. *Planetary and Space Science*, 2016, 127: 44
- [9] Tommei G, Dimare L, Serra D, et al. *MNRNS*, 2015, 446: 3089
- [10] He Q, Yang Y, Li F, et al. *Advances in Space Research*, 2020, 65: 1772
- [11] 马茂莉. 博士论文. 上海: 中国科学院上海天文台, 2017: 38
- [12] Woo R, Yang F, Yip K, et al. *ApJ*, 1976, 210: 568.

Analysis of Deep Space Probes Observational Data by 13-m Antenna

HE Qing-bao^{1,2}, CHEN Yi-hao², YANG Xuan², YAN Jian-guo², LI Fei²

(1. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China; 2. LIESMARS Laboratory, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: The 13 m antenna of Wuhan University has now equipped with hydrogen atomic clock, X-band cryogenic receiver and digital back ends. It performed observations on Chang'E-3 (CE3), MRO (Mars Reconnaissance Orbiter), MEX (Mars Express) and Juno. We processed and analyzed the observational data of the past two years. The results showed SNR (Signal to Noise Ratio) increased by 3 dB after installing the cryogenic equipment on receiver, and the accuracy of received frequency with 1 s integration reached 20 mHz after replacing rubidium atomic clock by the hydrogen atomic clock. Analysis found that the stability of local frequency generated by hydrogen atomic clock was low when the integration time was in the order of millisecond. However, the stability reached the level of 10^{-12} when the integration time was 1 s, which indicated it could meet the requirements of current space missions. What's more, we presented a new method of calculating total phase of received signals. It can be feasible in the case of signals with very low SNR. We calculated the total phases of MRO and MEX. Power spectrum results were in good agreements with studies carried out by other researchers. The overall results showed that Doppler frequency with high accuracy and total phase fluctuations can be obtained by the 13 m antenna observing deep space probes. They can be used not only in orbit determination, but also in the study of solar plasma.

Key words: Solar plasma; hydrogen atomic clock; total phase; SNR