

一种快速 DOR 信号提取方法及其软件实现

任 贺^{1,2}, 舒逢春¹, 江 悟¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了实现对深空探测器发射的 DOR 信号的射电干涉测量, 可以采用单站接收信号与本地模型信号进行本地相关处理的方法, 提取 DOR 信号的幅度和相位。本文考察了一种基于线性相位模型计算的快速 DOR 信号提取算法, 采用并行编程技术, 开发了算法验证软件。利用该软件对嫦娥二号 DOR 数据的处理结果表明, 在 4 核普通商用计算机上可实现单站 32 Mb/s 数据的实时处理, 0.5 s 积分时间内 DOR 信号相位精度可达到 2° 左右, 频率精度约为 20 mHz。

关 键 词: 射电干涉测量; 深空探测器; 本地相关处理; 信号提取; 并行处理

中图分类号: P228.6; TP311

1 引 言

一般来讲, 对月球以及更远天体和空间的探测被称之为深空探测, 实施深空探测的航天器称为深空探测器^[1]。由于深空探测器距离地球较远, 因此对测控技术提出了更高的要求。甚长基线干涉测量 (very long baseline interferometry, VLBI) 与传统的无线电测量相比, 能够达到极高的角分辨率, 因此被广泛应用于天文、测地以及深空导航。

Δ DOR(delta differential one-way ranging) 技术是一种用来确定探测器位置的差分 VLBI 技术, 自 1980 年代开始, 相继用于美国航天局 (NASA)、欧洲空间局 (ESA) 和日本宇宙航空研究开发机构 (JAXA) 的深空探测任务, 例如“旅行者号”行星际探测器、“伽利略号”木星探测器、“火星快车”探测器 (Mars Express) 和“隼”探测器 (Hayabusa)^[2-4]。在深空探测任务中, 受限于卫星能量以及可用频段的影响, 探测器发射的信号带宽一般会小于 10 MHz, 因此, 群时延的精度一般限制在 1 ns 量级。解决此种限制的方式之一就是让卫星发送多频点的 DOR 信号进行带宽综合, 各频点的频率间隔就相当于带宽, 因此频点的间隔越大, 由此求出的群时延的测量误差就越小^[5]。DOR 音是调制到探测器下行链路的 S、X 或 Ka 波段的正弦或者矩形信号, 作为探月二期先导星的嫦娥二号卫星的六大工程目标之一就是实验 X 频段深空测控技术。卫星发射的下行 X 频段载波信号调制两个 DOR 侧音。X 频段 DOR 信标具有节省卫星能量, 测量精度高的特点, 但对信标的稳定性要求较高。

对于探测器 DOR 信号的 VLBI 相关处理方法, 可以采用 FX 型处理方式。FX 型方式一

收稿日期: 2012-04-01; 修回日期: 2012-04-27

资助项目: 国家自然科学基金 (10973033), 上海市空间导航与定位技术重点实验室

般过程为: 对每个台站的时域信号分别进行整数比特延迟补偿、条纹旋转、快速傅里叶变换和小数时延补偿, 获得各个台站的频域数据, 台站之间再通过两两交叉相乘和累加等步骤后得到互相关谱。但 DOR 信号为几个单频信号, 采用常规的 FX 相关处理方法, 需要很高的谱分辨率才能达到足够的信噪比和计算精度, 计算效率较低^[6,7]。

针对 DOR 信号的特殊性, 美国深空网已经实现了基于本地相关的 DOR 信号处理技术。本地相关方法的关键在于构造精确的本地相位模型, 提取准确的信号幅度和相位, 此过程称为信号提取^[8]。为了支持月球探测卫星等探测器在轨道机动等情况下的实时导航定位, 在精度符合要求的情况下需要一种高效率的信号提取方法。为此, 本文将考虑在没有探测器精确预报轨道的条件下, 对本地相关处理算法进行简化, 考察在线性相位模型的情况下, DOR 信号快速提取的软件实现方法和精度评估。

2 深空探测器 DOR 信号提取

2.1 本地相关处理原理

本地相关处理方法适用于接收到的探测器单音信号的幅度和相位提取。由于信号频率的变化, 需要人工构造一个无噪声的本地相位模型信号, 该相位模型通常由一个 4 次或 6 次相位多项式表达。

相位多项式根据 DOR 信号的发射频率和探测器到地面接收站的传播时延模型计算^[6]。DOR 信号发射频率的初始值可通过对观测数据的高分辨率频谱分析获得, 传播时延可根据探测器轨道和接收站位置的几何关系计算。相位多项式模型的频率预测精度通常应好于 10 Hz, 频率变化精度好于 0.1 Hz/s。与常规的 FX 型相关处理方式相比, 利用此模型信号跟踪探测器 DOR 信号的相位, 可以有效提高相关处理计算效率和点频信号提取的信噪比^[9,10]。

当探测器轨道预报误差较大时, 探测器到接收站的传播时延误差相应增大, 从而使得相位多项式模型的频率和频率变化率预测精度大大降低。考虑到 DOR 信号在积分时间短至 0.5 s 情况下, 相位多项式模型可近似表示为线性变化模型, 我们可以参考相位校正信号 (PCAL) 的提取方法, 针对没有先验的传播时延模型的情况, 对 DOR 信号提取方法进行简化、软件实现和原理验证。

2.2 DOR 信号的快速提取

DOR 信号的标称发射频率是已知的, 所以需要先在已知频率的附近搜索经过多普勒频移的精确频率。

假设卫星信号经过下变频、滤波、采样后信号序列为 $s(n)$ 。对数据序列 $s(n)$ 做 FFT 变换, 得到高分辨率的信号功率谱。在发射频率附近找到最大功率点对应的频率 f_0 , 此频率称为初始频率。需要指出的是, 此频率是由 FFT 得到, 精度有限, 因此我们也称之为粗频率。

对时间长度为 t_{int} 的数据每隔 t_{tick} 提取一次信号结果, 从而得到长度为 L 的结果序列:

$$C(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=N(k-1)+1}^{Nk} s(i) \cdot \exp(j2\pi f_0 t_i), \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (1)$$

$$N = \lfloor t_{\text{tick}} \cdot f_s \rfloor, \quad (2)$$

$$L = \left\lfloor \frac{t_{\text{int}}}{t_{\text{tick}}} \right\rfloor, \quad (3)$$

其中式(2)中 f_s 为信号采样率。由于前面得到的信号频率只是粗频率,因此,提取结果存在残余频率的影响,存在周期性变化,需要通过变化的周期进一步找到残余的频率。对式(1)的相关结果 $C(k)$ 序列再做 FFT 变换,找到最大值对应点的频率 f' ,则残余频率就在此频率附近。由于这一步的 FFT 点数有限,需要通过拟合的方法获得精确的残余频率 f_{rem} 。

将残余频率加到捕获的初始粗频率 f_0 ,从而得到较为精确的频率 f 。以此残余频率构造信号模型 $\exp(j2\pi f_{\text{rem}} L N t_i)$,将此模型与 $C(k)$ 相关,就得到改正的提取结果 $C'(k)$ 。

$$C'(k) = C(k) \cdot \exp(j2\pi f_{\text{rem}} k N t_i), \quad k = 1, 2, \dots, L, \quad (4)$$

$$A_{\text{DOR}} = 2 \times |C'(k)|, \quad (5)$$

$$\Phi_{\text{DOR}} = -\text{phase}(C'(k)), \quad (6)$$

其中 $C'(k)$ 是相关运算的结果,为复数, N 和 L 的表示与式(2)和式(3)相同。 A_{DOR} 是提取得到的 DOR 信号的幅值, Φ_{DOR} 是提取得到的 DOR 信号的残余相位。对 Φ_{DOR} 残余相位序列进行拟合即可得到拟合残余相位及频率。

3 DOR 信号提取的软件实现

3.1 DOR 信号提取软件的设计

依据单元的不同功能软件可分为计算单元和外围功能单元两个部分。计算单元是实现信号提取算法的功能单元,外围功能单元主要是指为实现信号提取而做准备以及实现程序控制的功能部分。外围功能是满足软件灵活性的必备部分,有利于软件的升级以及观测条件改变时可以使软件适应不同的应用。

计算单元是软件的核心部分,用于实现 DOR 信号的快速提取,基本算法流程为:

(1) 读取台站 1 s 原始观测数据,对其各通道数据的一小段进行超高分辨率 FFT 运算,捕获粗略的初始频率;

(2) 以初始频率建立本地信号模型,对 0.5 s 数据提取 DOR 信号的幅度和相位,通过 FFT 和相位拟合等方法获得信号的残余频率;

(3) 利用得到的残余频率对初始信号提取结果进行修正,得到精确提取结果;

(4) 每 0.5 s 对相关结果进行拟合和积分,获得信号的平均幅度、相位和频率。

外围功能单元是为了保证程序的灵活性以及实现程序的控制而设置的单元。在 DOR 信号提取中会有一些参数是经常变化的,如:观测代码每次都不一样。一些参数变化比较小,但也并非是不变的,如:参加观测的台站数。而有些参数现在是固定的,将来不一定是固定的。因此为保证程序能够适应参数多变的要求,可以采用命令行和配置文件相结合的方法进行参数的设置。将比较固定的参数放置在配置文件之中,将经常变的参数采用命令行输入的方法进行设定。此外软件还应该具备基本的容错功能。我们将软件的外围功能设置为以下几种:

- (1) **命令行解析** 对命令行进行解析, 并把解析到的命令行参数存放到命令行参数结构;
- (2) **命令行参数检查** 检查命令行参数是否符合程序预期, 以防止用户输入非法参数;
- (3) **配置文件解析** 对配置文件进行解析, 将解析到的结果存放到配置文件参数结构;
- (4) **配置文件参数检查** 检查配置参数是否符合程序预期;
- (5) **控制单元** 控制程序的开始和结束。

将两个功能单元进行综合, 软件的流程如图 1 所示。

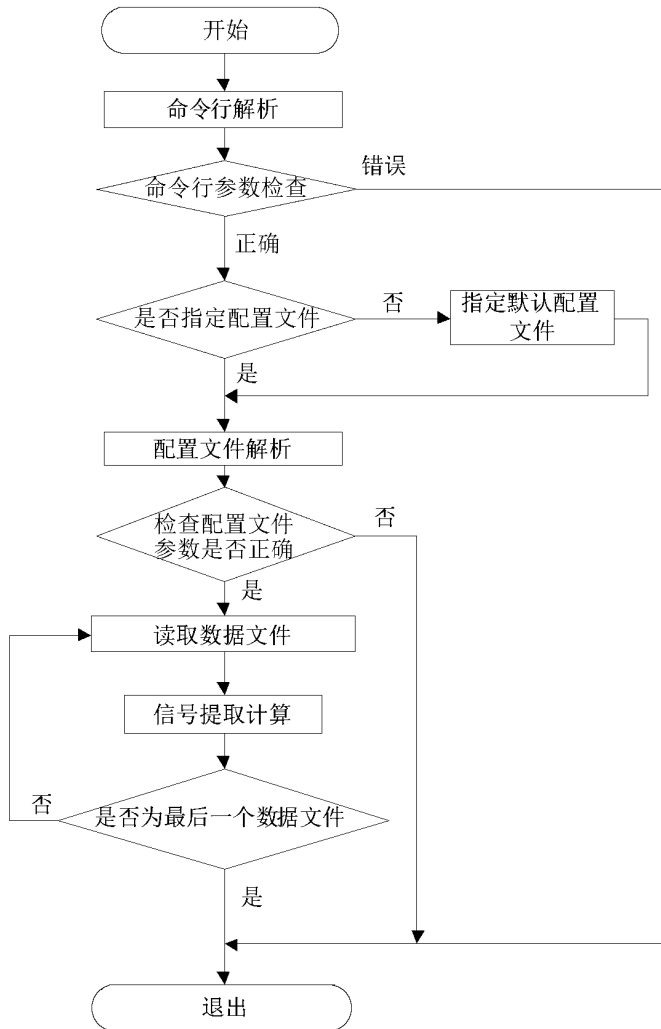


图 1 信号提取软件流程图

3.2 并行编程技术的应用

与相关处理机一样, DOR 信号的提取具有数据密集和计算密集的双重特点, 这就需要一些高速的数据处理技术, 才能保证数据处理的速度。现代的计算机已经发展为具有大内

存、多处理器等特点。多核电脑已经成为主流,占2010年PC发货量的83%^[11]。内核的数量正在不断增长,预计2012年PC发货量中的60%将具备4个或更多的核。为了充分利用这些资源,并行计算技术近年来得到了广泛应用。在基本的C等语言的基础上,相继开发出了MPI、OpenMP、PVM等编程接口。

将现有的串行程序改造成并行程序,需要根据串行程序的应用结构来决定采用功能分解或结构分解:如果程序具备独立的功能运用,那么可以将它们并行运行;如果程序是运行在大量的数据之上的,且可能将数据分解成若干能够独立处理的更小单元,就可以采用数据分解来提高并行的粒度。程序开发人员通常使用的三种并行编程技术分别为多线程、共享存储模式和消息传递^[11,12]。

多线程支持在单个进程中存在多个共享内存和其他资源的线程,从而使多核系统运行更快。信号提取软件的功能比较单一,但是需要处理大量的数据,我们可以采用数据分解的方法对信号提取软件进行并行化。在主线程读取一定时间的数据后,将数据分配在不同的线程上进行信号提取操作,完成后由主线程进行同步,按顺序收集计算结果。将结果输出后再进行下一时间段的数据处理。其并行示意图如图2所示。

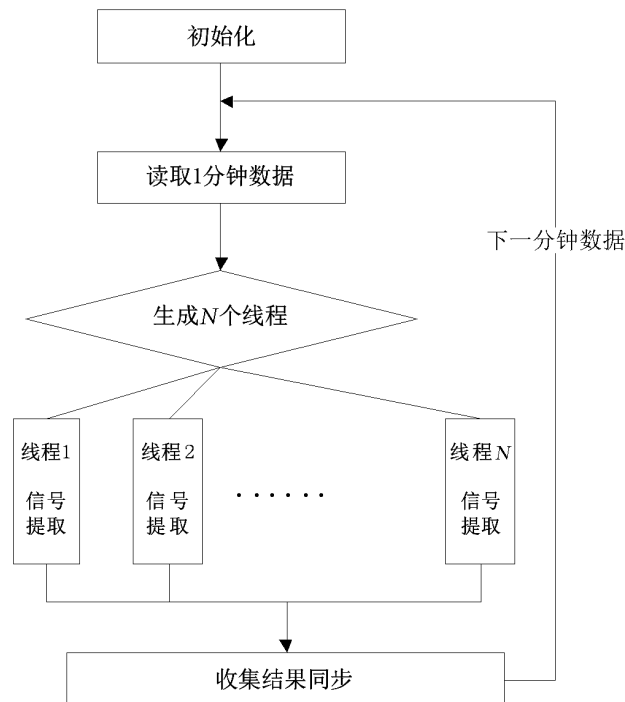


图2 并行模型图

4 数据处理实例

使用的数据为上海VLBI站2010年10月4日UTC 00h49m02s至01h49m01s对嫦娥二号卫星的DOR观测数据。其观测设置为:8通道,5、6、7、8为DOR信号通道,带宽为

2 MHz, 1 比特量化。表 1 显示了各通道参数配置情况, 图 3 显示了嫦娥卫星 DOR 信标设置情况。

表 1 通道参数表

通道	频率/MHz	边带	带宽/MHz
5	8456.***	下边带	2
6	8475.***	下边带	2
7	8479.***	下边带	2
8	8495.***	下边带	2

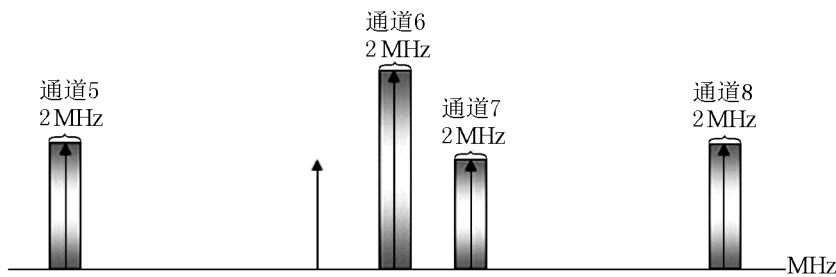


图 3 嫦娥二号卫星 DOR 信号频谱图

图 4 所示为第 6 通道 0.5 s 数据的信号提取结果, 其中图 4(a) 显示的是经相位线性拟合后的残余相位结果, 图 4(b) 显示的是信号幅度 (本文中幅度没有进行归一化处理, 仅表示信号强弱的相对变化)。其起始时刻为 UTC 01h08m01s, 每 1 ms 数据段输出一组信号幅度和相位, 对相位进行线性拟合, 得到一次项系数的估计误差即为频率精度, 常数项的估计误差即为相位精度。经计算得到频率精度和相位精度分别为 5 mHz 和 0.51° 左右。在对 0.5 s 数据进行线性拟合过程中, 要求信噪比至少好于 10。对于信号极其微弱的情况, 可以采用非线性相位模型, 通过增加积分时间提高信噪比。

在嫦娥二号的 VLBI 观测中, 采用的是射电源与卫星交替观测的方式, 在我们处理的此段时间的数据, 每段射电源与卫星的观测时间均为 5 min。所以对此段数据的处理可以得到数个观测周期 (scan) 的卫星信号的处理结果。图 5(a) 给出了积分时间为 0.5 s 的 4 个 scan (每个 scan 时长 5 min) 的信号幅度提取结果, 其值在 0.253 1 到 0.285 6 之间。图 5(b) 给出了与图 5(a) 对应的频率结果 (减去 1.08 MHz), 此段时间内, 频率有线性变化的趋势, 在一个 scan 内大约有 400 Hz 的变化。图 5(c) 给出的是对应此段时间的频率精度结果, 均在 5.5 mHz 附近。图 5(d) 给出了对图 5(b) 的频率结果进行关于时间的 5 次多项式拟合后的残差结果。

定义 β_i 为对频率测量值进行关于时间的 5 次多项式拟合后第 i 个的残差, 则频率拟合

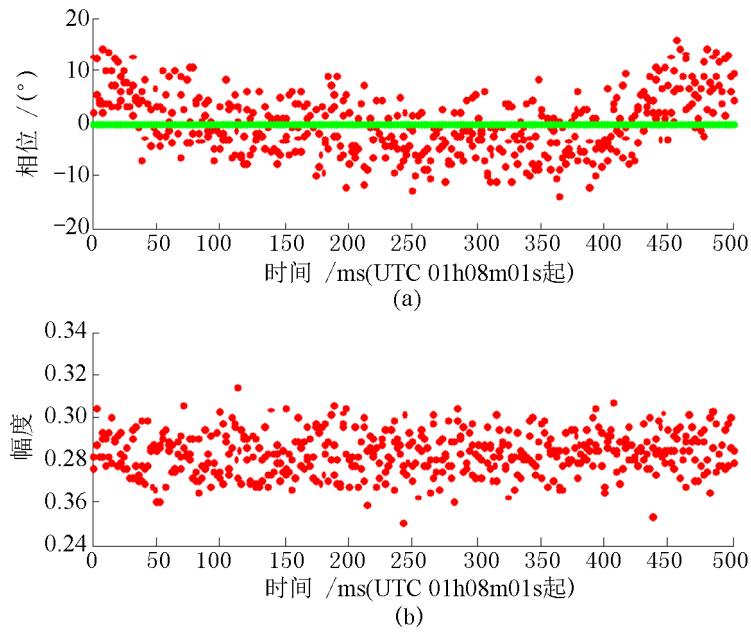


图4 上海站 DOR 信号提取结果
(a) 残余相位; (b) 信号幅度

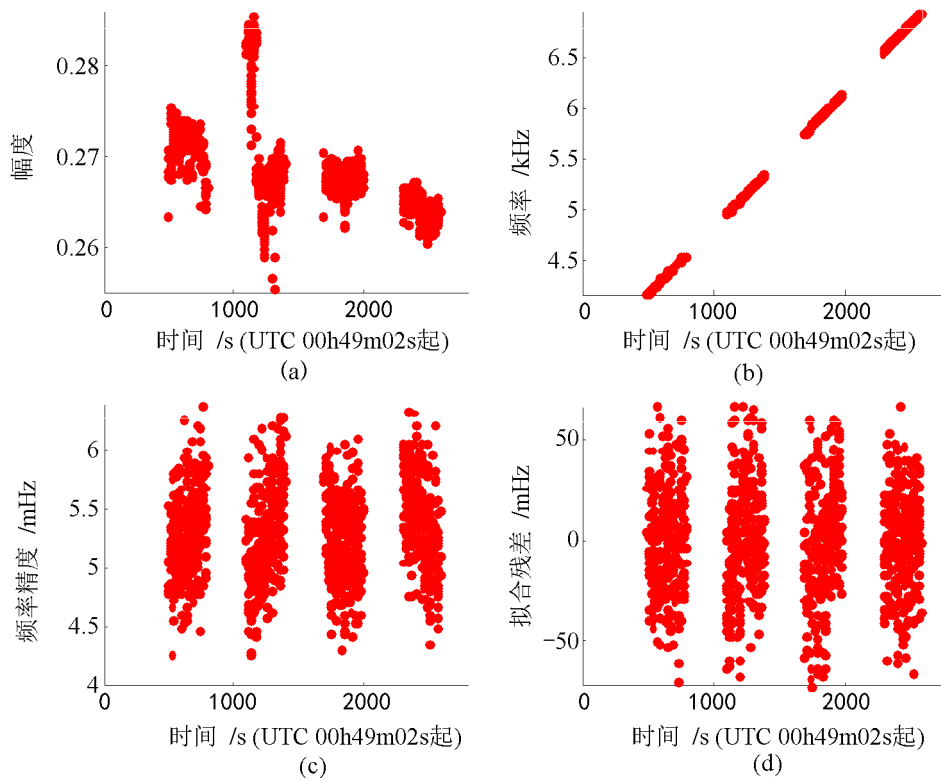


图5 第6通道4个scan提取结果(积分时间0.5s)

误差 S 定义为:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\beta_i - \bar{\beta})^2}{N - 1}}, \quad (7)$$

式 (7) 中 $\bar{\beta}$ 表示为:

$$\bar{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^N \beta_i}{N}. \quad (8)$$

表 2 分别统计了 4 个通道的 DOR 信号平均幅度、相位平均精度、频率平均精度和频率拟合误差。为了评估 DOR 信号频率的波动情况, 我们对整个时间段的信号频率进行了 5 次多项式拟合, 通过对频率残差的标准偏差计算, 得到了反应信号频率时域波动情况的频率拟合误差。从表中可以看出, 第 6 通道的主载波信号较强, 幅度大约是其 10 倍, 提取精度较高, 其他三个通道信号相对较弱, 与第 6 通道相比, 测量噪声增加了 7~8 mHz。此外, 4 个通道的频率拟合误差都在 30 mHz 左右, 这一方面反应了探测器 DOR 信号的稳定度, 另一方面也说明了获得的信号频率精度的合理性。

表 2 4 个通道信号提取结果

通道	信号平均幅度	相位平均精度/(°)	频率平均精度/mHz	频率拟合误差/mHz
5	3.06e-2	2.19	21.2	34.4
6	26.8e-2	0.55	5.3	26.7
7	3.05e-2	2.21	21.4	34.0
8	3.20e-2	2.04	19.7	33.4

嫦娥二号卫星发射的 DOR 信号频率间隔是固定的, 但由于多普勒效应的影响, 频率间隔将发生变化。图 6 显示的是其他通道与第 6 通道 (主载波) 的频差变化, 从上到下依次为第 5 通道 (符号应反号)、第 7 通道和第 8 通道与第 6 通道的频差。需要说明的是, 图示的结果是将信号的天空频差值进行了下移, 从上到下依次分别移动了 19.2609 MHz, 3.8522 MHz, 19.2609 MHz。从图中可以看出 3 个频差结果都呈现线性变化趋势。利用此种特点, 在进行频率搜索时, 我们可以在获得主载波的频率结果后, 计算得到其他通道的信号初始频率结果, 以省去多个通道的初始频率捕获, 从而提高计算效率。

同时, 我们在多核计算机上测试了不同线程下软件的数据处理速度。软件运行的硬件环境为 DELL 多核 PC, 机器配置见表 3。软件环境为: 运行在 VMware 虚拟机上的 Linux 操作系统。

表 3 机器配置

计算机名称	CPU 型号	核心数	机器内存/G	虚拟机内存/G	主频/GHz
DELL PC	Intel i5-2400	4	4	1.0	3.1

对上海佘山站该次观测的数据处理时间如表 4, 此处时间是指信号提取算法及读取文件数据所消耗的计算时间, 参数初始化等所用时间均不计算在内。每个文件包含 1 s 数据。从

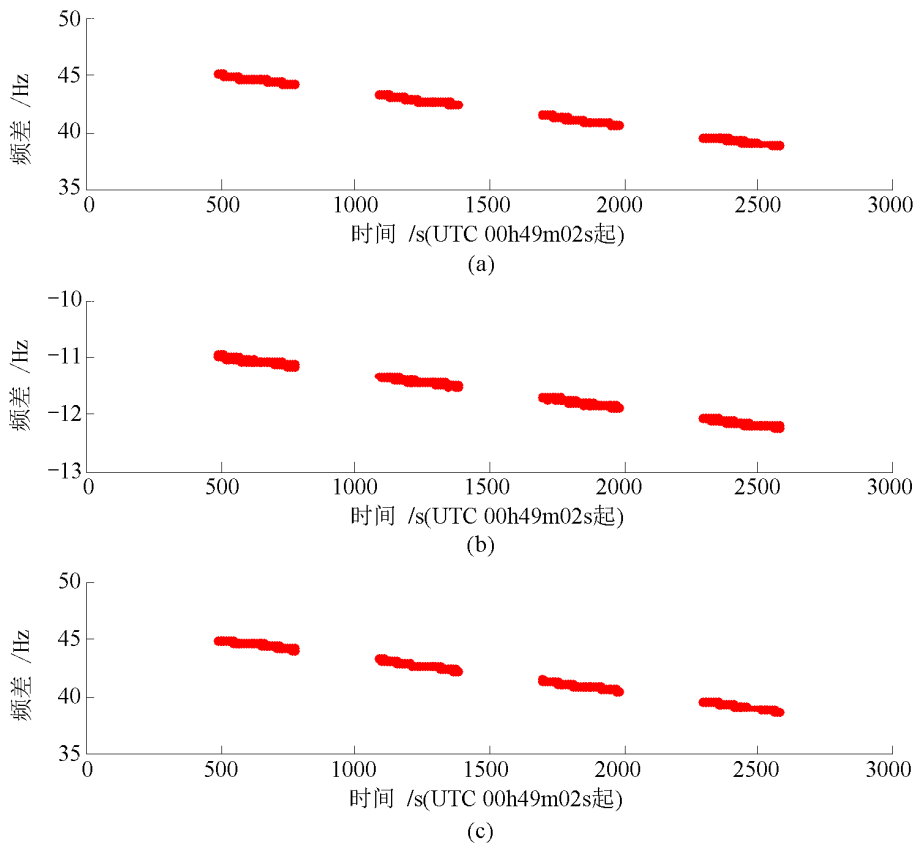


图 6 4 个 scan 通道间频差变化

(a) 第 6 通道与第 5 通道频差; (b) 第 7 通道与第 6 通道频差; (c) 第 8 通道与第 6 通道频差。

表中可以看出,在由 1 个线程变为 2 个线程时,速度提高幅度较大,呈线性关系,但是 3、4 个线程时,速度提升不明显。其原因主要有两点:①线程的创建和撤销都要消耗时间;②由于沿用串行版本的 FFTW 库进行 FFT 运算,FFTW 库函数均为线程不安全函数,多个线程在引用库函数时,需要加线程锁进行互斥处理,因此,这成为并行性的一个瓶颈;③从同一块硬盘读取数据时,线程越多平均的寻道时间越长。

表 4 不同线程下速度比较

线程数	处理文件数/个	处理时间/s	平均处理时间/s
1	3000	4929	1.369 1
2	3000	2625	0.729 1
3	3000	1963	0.545 2
4	3000	1708	0.474 4

5 结论和讨论

针对单音的 DOR 信号, 采用本地相关处理方式可以有效提高计算效率和信噪比。通过对本地模型信号产生方式的简化, 我们考察了一种基于线性相位模型提取 DOR 信号幅度和相位的方法, 开发了并行处理软件, 在普通的 4 核 PC 机上获得了单台站 32 Mb/s 的数据处理速度, 而且并行计算软件还有优化的空间。

利用并行处理软件对嫦娥二号的 DOR 数据进行了处理, 在 0.5 s 积分时间内 DOR 信号相位精度可达到 2° 左右, 频率精度 20 mHz 左右。对信号频率进行 5 次多项式拟合表明, 拟合误差约为 30 mHz 左右。结果表明, 此种方法处理嫦娥二号卫星 DOR 信号能够获得精度较高的信号提取结果, 为进一步计算 DOR 和 Δ DOR 观测量奠定了基础。

对于探测器在变轨阶段的信号提取, 或者对信号进行长时间积分, 由于信号频率的快速变化, 基于线性相位模型精确地跟踪 DOR 信号相位会变得较为困难。考虑到嫦娥二号在变轨阶段没有发射 DOR 信号, 下一步我们将利用变轨阶段的遥测信号观测数据进行主载波的信号提取, 研究基于 2 次相位模型的信号提取方法。

致谢: 特别感谢中国科学院上海天文台 VLBI 中心提供嫦娥二号观测数据, 也感谢王伟华老师在程序设计方面给予的指导。

参考文献:

- [1] 刘嘉兴. 飞行器测控学报, 2005, 12(24): 1
- [2] Fukushima T. A & A, 1994, 291: 320
- [3] 周小坤, 陈竹. 全球导航定位系统, 2010, 35(2): 52
- [4] Berry D S, Border J S. CCSDS Concept Paper: Delta-DOR. Jet Propulsion Laboratory, August 4, 2005
- [5] 刘庆会, 陈明, Sander Goossens, 等. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2010, 40(6): 809
- [6] 舒逢春, 平劲松, 郑为民, 等. 深空探测器 DOR 信号的本地相关处理模型//中国宇航学会深空探测技术专业委员会第七届学术年会论文集. 哈尔滨: 中国宇航学会深空探测技术专业委员会, 2010
- [7] Shu F, Zhang X, Kondo T. Development of correlator model for differential VLBI observations of satellites//ICMMT 2008 Proceedings Vol 1. Nanjing: IEEE Computer Society, 2008
- [8] 冯礼和, 平劲松. 深空探测研究, 2010, 8(2): 2
- [9] Thomas J B. An Analysis of Long Baseline Radio Interferometry, Part III, Technical Report 32-156, Vol XVI. Pasadena, Calif: Jet Propulsion Laboratory, 1972: 47
- [10] 郑为民, 舒逢春, 张冬. 宇航学报, 2008, 29(1): 18
- [11] <http://software.intel.com/file/37780>
- [12] 陈国良. 并行算法实践. 北京: 高等教育出版社, 2004: 189

A High Efficiency DOR Signal Extraction Method and Its Software Implementation

REN He^{1,2}, SHU Feng-chun¹, JIANG Wu¹

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030; 2. Graduate

University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: In order to carry out the radio interferometry using DOR(differential one-way ranging) signals transmitted by deep space probes, the amplitude and the phase of the DOR tones received in a station can be precisely acquired by local correlation of the received signal with a local generated model signal. In this paper, we investigated a high efficiency DOR signal extraction algorithm based on a linear phase model, while a software tool has been developed with the parallel processing technique to validate the algorithm. A set of DOR data of one station for the Chang'E-2 lunar satellite has been processed with this software tool, the results indicated data throughput of 32 Mb/s could be achieved with a commercial 4-kernels computer. The phase precisions of DOR tones are about 2° with 0.5 s integration time, while the frequency precisions are about 0.02 Hz.

Key words: radio interferometry; deep space probe; local correlation; signal extraction; parallel processing