

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2014.01.08

# 异源信标对同波束 VLBI 差分时分 实时解算的影响

贺庆宝, 刘庆会, 吴亚军, 陈冠磊, 郑 鑫

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

**摘要:** 日本 SELENE 的两个小卫星 Rstar 和 Vstar 都搭载两个晶振作为 VLBI 多频点信标源的基准, 其中一个晶振产生信号  $f_1$ , 另一个晶振产生信号  $f_2$  和  $f_3$ 。通过分析 Rstar 和 Vstar 的同波束 VLBI 观测数据, 发现利用来自异源的两对频点信号 ( $f_1, f_3$ ) 的相关相位解算差分时分, 由差分频率与仪器时延差相乘所引起的相位误差较大, 从而导致差分群时延的精度不高以及差分相时延的实时解算成功率不高。利用来自同源的两对频点信号 ( $f_2, f_3$ ) 的相关相位来求解差分时分, 与利用异源信标相比, 上述误差值为原来的 1/64, 使得差分群时延精度提高, 差分相时延实时解算成功率也大幅提高。分析结果表明, 若把台站间的仪器时延差 (包括钟差) 修正至 1  $\mu\text{s}$  时, 将有望进一步提高差分相时延的解算成功率。基于上述分析结果给出了适宜于同波束 VLBI 观测的同源信标源设计方案。

**关键词:** 同波束 VLBI; 信标源; 钟差; 差分群时延; 差分相时延

**中图分类号:** P228.6      **文献标识码:** A

## 1 引 言

甚长基线干涉测量 (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) 技术是深空探测中航天器精密测定轨的重要手段之一<sup>[1]</sup>, 而同波束 VLBI 技术由于其超高的测量精度被应用于多个航天器的精密测定轨及行星科学探测中<sup>[2]</sup>。日本的 SELENE (SELEnological and ENgineering Explorer) 任务使用同波束 VLBI 技术, 实现了月球卫星 10 m 左右的精密测定轨<sup>[3]</sup>。SELENE 由 3 个卫星组成, 即绕 100 km 极轨圆轨道飞行的三轴稳定主卫星和绕椭圆轨道飞行的 2 个自旋稳定小卫星 Rstar 和 Vstar<sup>[2,4]</sup>。2 个小卫星上分别发送 S 频段的 3 个点

收稿日期: 2013-03-22; 修回日期: 2013-11-18

资助项目: 中国科学院百人计划; 国家自然科学基金 (11273049, 11073048); 863 项目 (2012AA121603); 空间毫米波 VLBI 阵列背景型号 (XDA04060705); 上海市科学委员会 (08DZ1160100)

通讯作者: 贺庆宝, qbhe@shao.ac.cn

频信号 ( $f_1, f_2, f_3$ )<sup>[2,5]</sup>, 频率均为 2212、2218、2287.3125 MHz<sup>[3,6]</sup>。SELENE 任务在利用这 3 对信号的相关相位求解差分相延时, 采用的是事后模式解算, 即在约 30 min 弧段内统一求解整周模糊度, 取其出现次数最多的值为解算值; 然后通过差分相延时轨道拟合后的残差再对整周模糊度进行修正, 最终获得了 85% 的差分相延时解算成功率<sup>[3]</sup>。

SELENE 的同波束 VLBI 观测主要是为了进行重力场反演等科学研究, 可采用事后解算的模式。在我国今后的月球采样返回和载人登月等任务中, 将利用同波束 VLBI 技术对轨道器和返回器进行快速测定轨, 需要在 1 min 之内实时地解算出差分时延。针对这种需求, 我们对 SELENE 数据进行实时模式的求解, 发现差分相延的解算成功率偏低。经分析, 我们发现其主要原因在于 Rstar 与 Vstar 分别利用 2 个晶振作为 3 个点频信号的基准以及地面台站间的仪器时延差 (包含钟差和装置时延差) 未修正所引起的。利用来自同一个晶振的 2 个频点的差分相关相位来求解差分相延时, 与原来的利用异源信标相比, 解算成功率大幅提高。分析结果表明, 在两台站间仪器时延差修正至 1  $\mu$ s 时, 有望进一步提高差分相延的解算成功率。基于上述分析结果本文给出了适宜于同波束 VLBI 观测的同源信标源设计方案。

## 2 异源信标与同源信标的卫星频率差分

日本 VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) 有 4 个 VLBI 台站 (MZSW、IRIK、ISGK、OGSW), 其天线口径均为 20 m, 根据对天线的指向特性和相位特性的实测结果, 在 Rstar 和 Vstar 角距离小于  $0.56^\circ$  时, 具有对其进行同波束 VLBI 观测的能力<sup>[2,7]</sup>。我们对 VLBI 台站同时接收到的 Rstar 和 Vstar 信号的频率进行差分处理, 发现其结果与理论值存在较大差异。图 1 给出了 2008 年 3 月 9 日 IRIK 站的两卫星 3 个频点实测频率的差分。图中  $\Delta f_1$  是 Rstar 的  $f_1$  频点实测值减去 Vstar 的  $f_1$  频点实测值,  $\Delta f_2$ 、 $\Delta f_3$  含义类似。

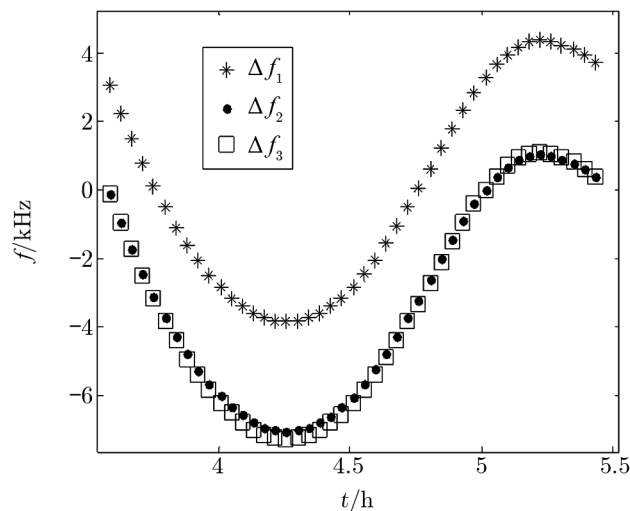


图 1 Rstar 对 Vstar 实测频率的差分

地面台站实际接收到的信号的频率包括两部分,即卫星的真实发射频率与多普勒频移。计算可知频点  $f_1$  和  $f_2$  多普勒频移之差在  $\pm 65$  Hz 以内,  $f_2$  和  $f_3$  多普勒频移之差在  $\pm 750$  Hz 以内。如果 Rstar 和 Vstar 的实际发射频率相等,图 1 中的  $\Delta f_1$  与  $\Delta f_2$  应十分接近,而得到的结果却是  $\Delta f_1$  与  $\Delta f_2$  差别较大,  $\Delta f_2$  与  $\Delta f_3$  较接近。

我们把卫星间差分后的频率再在 3 个频点间进行差分,结果如图 2 所示。图 2 中  $\Delta\Delta f_{12}$  是图 1 中的  $\Delta f_2$  减去  $\Delta f_1$  的值,  $\Delta\Delta f_{13}$ 、 $\Delta\Delta f_{23}$  的含义类似。由图 2 可看到,曲线  $\Delta\Delta f_{12}$  较平,因为  $f_1$  和  $f_2$  多普勒频移的差分较小。曲线  $\Delta\Delta f_{13}$  与  $\Delta\Delta f_{23}$  有约 250 Hz 的波动,反映了  $f_1$  与  $f_3$  之间、 $f_2$  与  $f_3$  之间多普勒效应的差异。由于在相关处理时根据轨道预测值对多普勒频移进行了改正,其对相关相位的影响不大,为简便起见,本文后面只重点研究卫星发射频率的影响。图 2 中曲线  $\Delta\Delta f_{12}$  与  $\Delta\Delta f_{13}$  的值在  $-3200$  Hz 左右,曲线  $\Delta\Delta f_{23}$  的值在  $0$  Hz 附近波动。这样的结果并不是偶然现象,我们随机分析了十几天的观测数据,结果都非常类似。

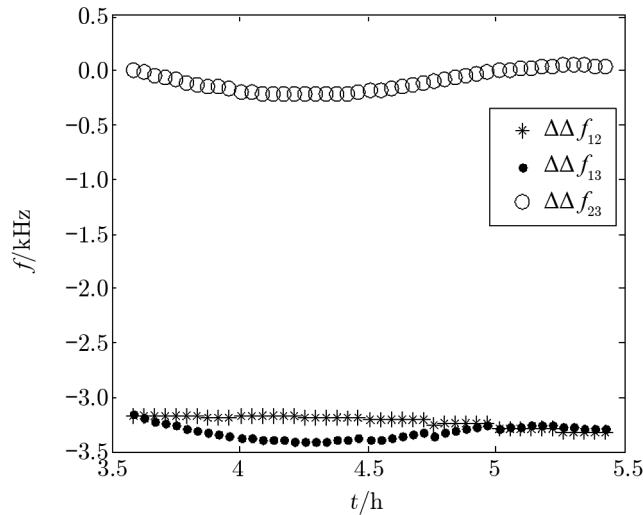


图 2 两卫星频率差分后再在  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  之间差分

由 SELENE 卫星设计文献可知, Rstar 与 Vstar 各自利用 2 个晶振作为信标源的基准。图 3 给出了 Rstar 和 Vstar 的信标源结构图<sup>[8]</sup>。如图所示,  $f_1$  频点的基准为一个晶振,  $f_2$  和  $f_3$  频点的基准为另一个晶振。

结合图 3 的信标源结构图,图 2 中 3 条曲线的卫星发射频率的差值部分可表示如下:

$$\Delta\Delta f'_{12} = (f_{R2} - f_{V2}) - (f_{R1} - f_{V1}) = 32(f_{OR2} - f_{OV2}) - 32(f_{OR1} - f_{OV1}) \quad (1)$$

$$\Delta\Delta f'_{13} = (f_{R3} - f_{V3}) - (f_{R1} - f_{V1}) = 33(f_{OR2} - f_{OV2}) - 32(f_{OR1} - f_{OV1}) \quad (2)$$

$$\Delta\Delta f'_{23} = (f_{R3} - f_{V3}) - (f_{R2} - f_{V2}) = f_{OR2} - f_{OV2} \quad (3)$$

其中,  $f_{R1}$ 、 $f_{R2}$ 、 $f_{R3}$  分别是 Rstar 的 3 个发射频率,  $f_{V1}$ 、 $f_{V2}$ 、 $f_{V3}$  分别是 Vstar 的 3 个发射频率。  $f_{OR1}$ 、 $f_{OR2}$  分别是 Rstar 的 2 个晶振的输出频率,  $f_{OV1}$ 、 $f_{OV2}$  分别是 Vstar 的 2

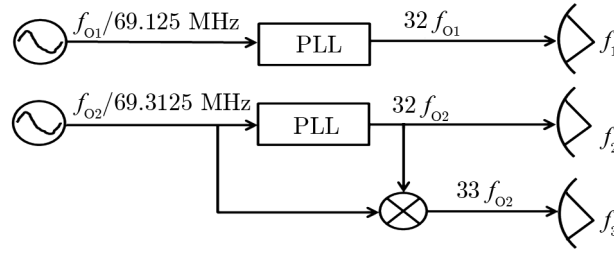


图 3 Rstar 和 Vstar 的信标源结构图

个晶振的输出频率,  $\Delta\Delta f'_{12}$ 、 $\Delta\Delta f'_{13}$ 、 $\Delta\Delta f'_{23}$  分别是卫星发射频率间的差分值。事实上, 尽管 Rstar 和 Vstar 的晶振标称频率相同, 但实际中存在差异。图 2 中曲线  $\Delta\Delta f'_{12}$  的值约为  $-3200$  Hz, 且含多普勒效应的值非常小, 结合式 (1) 可得晶振差异值:

$$(f_{OR2} - f_{OV2}) - (f_{OR1} - f_{OV1}) \approx -100 \quad (4)$$

结合式 (4) 与图 2 中曲线  $\Delta\Delta f'_{23}$  的值, 可得式 (3) 的值  $\Delta\Delta f'_{23}$  在  $-50$  Hz 左右。式 (3) 中两个频点的基准为同一晶振, 使得晶振差异值未被放大, 而式 (1)、(2) 中两个频点的基准为不同晶振, 致使晶振频率差异值被放大 32 或 33 倍, 这将对差分延时的实时解算产生不利影响。

### 3 异源信标与同源信标的差分延实时解算

Rstar 和 Vstar 的差分延时是先由较窄带宽的差分群时延求出较宽带宽的差分群时延, 再由较宽带宽的差分群时延解算差分相时延, 其详细解算过程在文献 [1] 中给出。本文着重分析文献 [1] 的算法中未考虑的两卫星频率差分结果不一致所带来的影响。考虑到此影响后, 差分相关相位表示如下:

$$\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = 2\pi[(f_{R2} - f_{R1})\Delta\tau_R - (f_{V2} - f_{V1})\Delta\tau_V] + 2\pi\Delta\Delta f'_{12}\tau_c - 2\pi\Delta N_{12} + \sigma_{12} \quad (5)$$

$$\Delta\phi_3 - \Delta\phi_1 = 2\pi[(f_{R3} - f_{R1})\Delta\tau_R - (f_{V3} - f_{V1})\Delta\tau_V] + 2\pi\Delta\Delta f'_{13}\tau_c - 2\pi\Delta N_{13} + \sigma_{13} \quad (6)$$

$$\Delta\phi_3 - \Delta\phi_2 = 2\pi[(f_{R3} - f_{R2})\Delta\tau_R - (f_{V3} - f_{V2})\Delta\tau_V] + 2\pi\Delta\Delta f'_{23}\tau_c - 2\pi\Delta N_{23} + \sigma_{23} \quad (7)$$

其中  $\Delta\phi$  是 Rstar 与 Vstar 相关相位的差分,  $\Delta\tau_R$ 、 $\Delta\tau_V$  分别是 Rstar 与 Vstar 的残余时延,  $\tau_c$  是两个台站的仪器时延差 (包括钟差和装置时延差) 以及由大气和电离层等引起的介质时延差<sup>[3]</sup>, 其中仪器时延差为微秒量级, 而大气和电离层时延差在纳秒量级,  $N$  是对应的整周模糊度,  $\sigma$  是由噪声引起的相位误差。

在 Rstar 和 Vstar 的同波束 VLBI 差分相时延解算中, 考虑到  $f_{R1}$ 、 $f_{R2}$ 、 $f_{R3}$  分别与  $f_{V1}$ 、 $f_{V2}$ 、 $f_{V3}$  的标称值相同, 所以 SELENE 任务后来在解算差分延时认为  $f_{R2} - f_{R1} =$

$f_{V2} - f_{V1}$ ,  $f_{R3} - f_{R1} = f_{V3} - f_{V1}$ ,  $f_{R3} - f_{R2} = f_{V3} - f_{V2}$ , 这样式 (5)、(6)、(7) 简化为:

$$\Delta\phi_2 - \Delta\phi_1 = 2\pi(f_2 - f_1)\Delta\tau_{12} - 2\pi\Delta N_{12} + \sigma_{12} \quad , \quad (8)$$

$$\Delta\phi_3 - \Delta\phi_1 = 2\pi(f_3 - f_1)\Delta\tau_{13} - 2\pi\Delta N_{13} + \sigma_{13} \quad , \quad (9)$$

$$\Delta\phi_3 - \Delta\phi_2 = 2\pi(f_3 - f_2)\Delta\tau_{23} - 2\pi\Delta N_{23} + \sigma_{23} \quad , \quad (10)$$

其中差分群时延  $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{13}$ 、 $\Delta\tau_{23}$  由  $\Delta\tau_R$  减  $\Delta\tau_V$  得来。

理论上, 带宽越宽, 解算的差分群时延精度越高, 所以 SELENE 的传统算法是先解算  $\Delta\tau_{12}$ , 再用  $\Delta\tau_{12}$  解算  $\Delta\tau_{13}$ , 最后用  $\Delta\tau_{13}$  解算差分相时延  $\Delta\tau_1$ 。图 4 给出了 2008 年 3 月 9 日 IRIK-OGSW 基线用差分群时延  $\Delta\tau_{13}$  求解的差分相时延  $\Delta\tau_1$  结果。

理论上  $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{13}$ 、 $\Delta\tau_1$  相等, 图 4 中的  $\Delta\tau_{12}$  与  $\Delta\tau_{13}$  相隔 3 ns 左右,  $\Delta\tau_1$  有一个模糊度的上下跳变,  $\Delta\tau_{13}$  的值在  $\Delta\tau_1$  中间附近, 这些现象是由式 (5)、(6) 简化为式 (8)、(9) 所造成的。式 (5)、(6) 与式 (8)、(9) 右边的第一项有差别, 但因为 Rstar 和 Vstar 轨道预测精度高, 残余时延在纳秒量级, 所以它们第一项的相位差值在  $10^{-5}$  rad 水平。式 (5)、(6) 右边的第二项在式 (8)、(9) 中被省略, 它可看作是差分频率与仪器时延差的乘积。在 Rstar 和 Vstar 同波束 VLBI 观测中, 由于记录带宽只有 100 kHz, 仪器时延差不能通过射电源观测进行修正, 再由第 2 章分析得知差分频率  $\Delta\Delta f'_{12}$ 、 $\Delta\Delta f'_{13}$  约为  $-3200$  Hz, 且仪器时延差一般为微秒量级, 可知式 (5)、(6) 右边的第二项是影响解算差分相时延的主要因素, 本文称为主要影响因素。

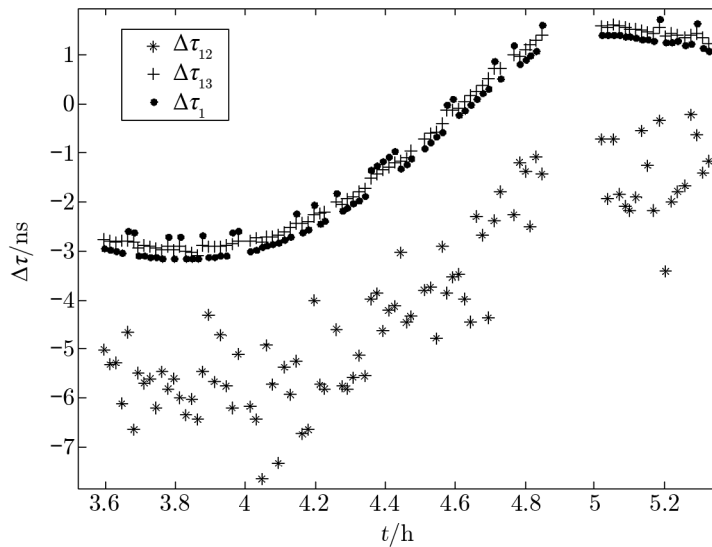


图 4 由差分群时延  $\Delta\tau_{13}$  求解的差分相时延  $\Delta\tau_1$  的结果

因  $\Delta\Delta f'_{12}$ 、 $\Delta\Delta f'_{13}$  的值在  $-3200$  Hz 左右, 解算  $\Delta\tau_{12}$  与  $\Delta\tau_{13}$  时的带宽分别为  $6$  MHz 与  $75.3125$  MHz, 且图 4 中的  $\Delta\tau_{12}$  与  $\Delta\tau_{13}$  相隔  $3$  ns 左右, 因此有:

$$\frac{\Delta\Delta f'_{12}\tau_c}{6 \times 10^6} - \frac{\Delta\Delta f'_{13}\tau_c}{75.3125 \times 10^6} \approx -3 \times 10^{-9}, \quad (11)$$

解得:

$$\tau_c \approx 6.11 \times 10^{-6} \text{ s}. \quad (12)$$

由此算得式 (5) 与式 (6) 中的主要影响因子约为  $-0.123$  rad。用  $\Delta\tau_{12}$  成功解算  $\Delta\tau_{13}$  的条件是  $\Delta\tau_{12}$  的误差小于  $75.3125$  MHz 波长的一半, 即  $6.67$  ns, 而式 (5) 的主要影响因子在  $\Delta\tau_{12}$  里的含量约为  $-3.26$  ns,  $\Delta\tau_{13}$  可由  $\Delta\tau_{12}$  解算出而不产生模糊度, 故图 4 中的  $\Delta\tau_{13}$  没有产生跳变。用  $\Delta\tau_{13}$  成功解算  $\Delta\tau_1$  的条件是其值误差小于  $2212$  MHz 波长的一半, 即  $0.226$  ns, 而式 (6) 的主要影响因子在  $\Delta\tau_{13}$  里的含量约为  $-0.26$  ns, 再考虑到大气电离层以及噪声的误差, 从而绝大多数点的  $\Delta\tau_1$  无法正确地解算出, 故图 4 中的  $\Delta\tau_1$  有一个模糊度的上下跳变。

由第 2 章分析得知  $\Delta\Delta f'_{23}$  的值在  $-50$  Hz 左右, 可得式 (7) 中的主要影响因子约为  $-0.002$  rad, 在带宽为  $69.3125$  MHz 条件下, 对应的差分群时  $\Delta\tau_{23}$  的含量约为  $-0.4$  ps, 这意味着  $\Delta\tau_{23}$  的精度将能够满足求解差分相时延的要求。图 5 给出了 2008 年 3 月 9 日 IRIK-OGSW 基线用差分群时延  $\Delta\tau_{23}$  解算差分相时延  $\Delta\tau_1$  的结果。

图 5 中的  $\Delta\tau_1$  没有出现跳变, 且  $\Delta\tau_{23}$  的值与  $\Delta\tau_1$  的值十分接近, 这证明了  $\Delta\tau_1$  求解正确和  $\Delta\tau_{23}$  的精度较高。图 5 中  $\Delta\tau_1$  的值与  $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{13}$  的值分别相差  $3.2$ 、 $0.25$  ns 左右, 验证了前面关于主要影响因子推导的正确性。从结果看, 正是因为  $f_1$  与  $f_2$ 、 $f_3$  是异源信标, 所以解算结果不理想; 而  $f_2$  与  $f_3$  是同源信标, 所以解算结果较好。

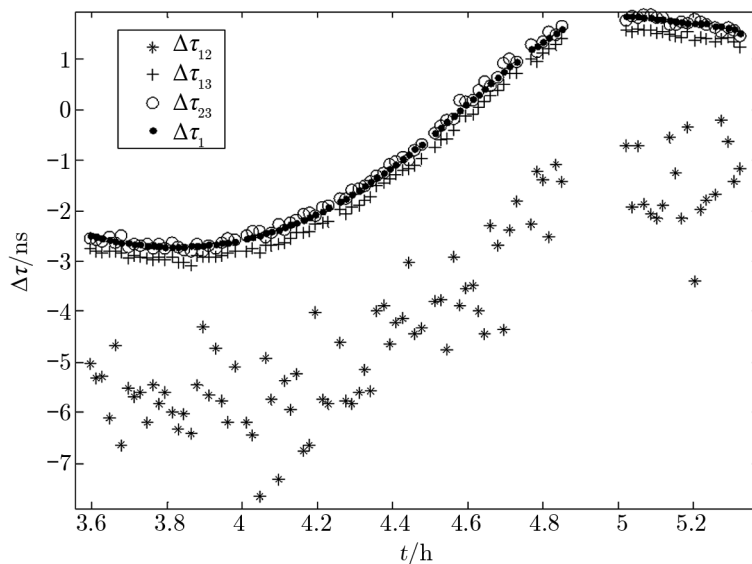


图 5 由差分群时延  $\Delta\tau_{23}$  求解的差分相时延  $\Delta\tau_1$  的结果

## 4 同波束 VLBI 星载信标源设计

差分相时延只有在差分群时延精度较高的情况下才能被正确地解算出,而差分群时延的高精度解算方法是利用 3 频点差分相位进行直线拟合,但前提条件是 3 个差分群时延  $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{13}$ 、 $\Delta\tau_{23}$  都要接近真值。为满足这一条件,根据前文分析,其各自主要影响因子需尽可能小。为此,多频点信号同源为合理设计方案。图 6 给出了 3 频点同源的一个设计例子。

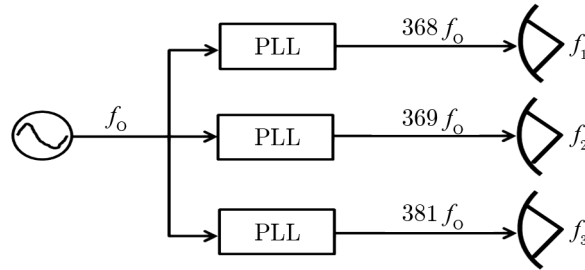


图 6 3 频点同源的设计框图

由于 SELENE 的 Rstar 与 Vstar 是绕月飞行,相关处理时可利用多普勒频移来区分接收信号来自哪个卫星,比如我们把 Rstar 与 Vstar 的基准信号频率  $f_0$  都设计为 6 MHz。由图 6 的设计再次分析式 (1)、(2)、(3),则

$$(f_{R2} - f_{V2}) - (f_{R1} - f_{V1}) = f_{OR} - f_{OV} , \quad (13)$$

$$(f_{R3} - f_{V3}) - (f_{R1} - f_{V1}) = 13(f_{OR} - f_{OV}) , \quad (14)$$

$$(f_{R3} - f_{V3}) - (f_{R2} - f_{V2}) = 12(f_{OR} - f_{OV}) . \quad (15)$$

其中  $f_{OR}$ 、 $f_{OV}$  分别是 Rstar 与 Vstar 的基准信号频率。可以看到, (13) 式的值将比较小,而 (14)、(15) 式的值将较大。比如  $f_{OR} - f_{OV} = 20$  Hz 时,仪器时延差较大时为  $5 \times 10^{-5}$  s,即  $\tau_c \approx 5 \times 10^{-5}$  s,主要影响因子在带宽分别为 6、78、72 MHz 时,对差分群时延  $\Delta\tau_{12}$ 、 $\Delta\tau_{13}$ 、 $\Delta\tau_{23}$  的影响均为 167 ps;和利用异源信标相比可大幅提高差分群时延的精度和差分相时延的解算成功率。如果通过射电源观测把仪器时延差修正至  $10^{-6}$  s 的水平,主要影响因子对应的差分时延为 3.4 ps,将更大地提高差分群时延的精度和差分相时延的解算成功率。

在我国今后的月球采样返回和载人登月等任务中,当两卫星相距较近、相对运动速度较小时,将不易根据各自的多普勒频移来区分所接收到的信号来自哪个卫星。需要把两个卫星的基准信号频率 ( $f_{O1}$ 、 $f_{O2}$ ) 分别设计为 6 MHz 与 6.00008 MHz。图 7 为依据图 6 的原理计算出的两卫星的 S 波段频率。 $f_{O1}$  与  $f_{O2}$  相差 80 Hz,根据上述分析可知,在仪器时延差较大时 ( $\tau_c \approx 5 \times 10^{-5}$  s),其主要影响因子对应的差分时延为 667 ps,可满足差分群时延的正确求解条件。在利用射电源观测修正仪器时延差至  $10^{-6}$  s 的水平时,主要影响因子对应的差分群时延为 13.3 ps,可满足解算差分相时延的条件,从而提高其解算成功率。

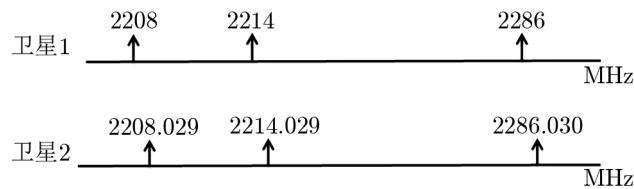


图 7 两卫星的信标源

## 5 结 论

在同波束 VLBI 中, 一个卫星搭载 2 个晶振作为信标源的基准对差分延时的实时解算带来较大不利影响, 而利用多频点同源设计可大幅减少此类不利影响, 从而提高差分群延时的解算精度和差分相延时的解算成功率。在同时修正仪器时延差至  $10^{-6}$  s 水平时, 可更大幅度地提高差分相延时的解算成功率。

### 参考文献:

- [1] 刘庆会, 史弦, 王伟华等. 物理, 2009, 38: 712
- [2] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Radio Science, 2010, 45: RS2004
- [3] 刘庆会, 陈明, Sander Goossens 等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2010, 40: 809
- [4] 刘庆会, 史弦, 菊池东彦等. 中国科学: 物理学力学天文学, 2009, 39: 1410
- [5] Kikuchi F, Liu Q, Hanada H, et al. Radio Science, 2009, 44: RS2008
- [6] Iwata T, Takahashi M, Namiki N, et al. Journal of the Geodetic Society of Japan, 2001, 47: 558
- [7] Liu Q, Fuyuhiko K, Seiitsu T, et al. IEEE Trans., Antenna and Propa, 2007, 55: 5
- [8] Iwata T, Minamino H, Sasaki T, et al. Journal of the Geodetic society of Japan, 2009, 55: 135

## Influence of Signals from Different Sources on the Real-time Resolution of Differential Time Delay in Same Beam VLBI

HE Qing-bao, LIU Qing-hui, WU Ya-jun, CHEN Guan-lei, ZHENG Xin

(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Rstar and Vstar are two satellites of Japanese SELENE project, each carries two crystal oscillators on board as the sources of VLBI signals, one generates frequency  $f_1$ , the other generates frequency  $f_2$  and  $f_3$ . Analysis of the VLBI same-beam data from Rstar and Vstar shows that much phase error was generated by differential frequency multiplies



differential instrumental delay, when using the correlation phases of frequency  $f_1$  and  $f_3$  to resolve differential time delay, thus the accuracy of differential group delay was impaired, and the chances of successfully resolving differential phase delay were low. This paper shows the error mentioned above can be reduced by 64 times, when using the correlation phases of frequency  $f_2$  and  $f_3$  to resolve differential time delay, this improves the accuracy of differential group delay comparing to the first method, and increases the chances of successfully resolving differential phase delay. In addition, this paper shows if instrumental delay (including clock offset) between each two VLBI stations are to be corrected to 1 micro-second level by observing quasars, the chances of successfully resolving differential phase delay can be improved further. We also present a design of onboard radio sources, which is suitable for same beam VLBI observations.

**Key words:** VLBI; crystal oscillator; clock offset; differential group delay; differential phase delay