

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.01.06

VLBI 测控信号群时延及相时延解算 方法研究

郑 鑫, 陈冠磊, 陈 明, 刘庆会, 吴亚军,
戴志强, 史 弦, 赵融冰, 陈少伍

(中国科学院 上海天文台, 上海 200030)

摘要: 由于探测器天线没有对准地球, 遥测信号时有时无或卫星飞离地球更远, 导致地面接收到的测控信号带宽变窄, 使 VLBI 群时延测量误差增大, 野值点增多。针对这些情况比较了剔除野值点加权幅度的直线拟合、剔除野值点加权幅度平方的直线拟合、剔除野值点加权幅度 3 次方的直线拟合和剔除野值点加权幅度 4 次方的直线拟合在求解测控信号群时延时的优劣, 得出剔除野值点加权幅度平方的直线拟合 3 基线群时延闭合效果最好和可决系数平均值较大的结论, 并作为测控信号群时延拟合方法。为了进一步减小 VLBI 时延测量误差, 还研究了将含有整周模糊度的相时延在整个观测期间内进行连接, 并整体移至群时延中间位置的处理方法, 从而得到了含微小偏移量的相时延数据。含微小偏移量的相时延随机误差与群时延相比大幅降低, 系统误差相对来说更易在定轨处理中解算。这为嫦娥二号奔向远方等信号变弱情况下的时延测量精度的提高提供了一种新方法。

关键词: 深空探测; VLBI; 测控信号; 群时延; 相时延

中图分类号: P164

文献标识码: A

1 引 言

深空探测器的定位定轨主要有测速测距和测角 3 种手段^[1]。其中 2 程测速测距在视线方向对距离和速度的变化具有很高灵敏度, 而对视线垂直方向灵敏度较差。VLBI(very long baseline interferometry) 技术则是深空探测中主要的测角手段, 其在与视线垂直方向上有很高的灵敏度, 所以 VLBI 技术和测速测距在测定轨测定位中形成优势互补。迄今为止, VLBI 的观测量一般是群时延而不是相位时延^[2-4], 群时延是根据观测带宽内的相位-频率变化关系得到, 而相时延是根据观测频率的总相位计算得到。在深空探测器中, 探测器发射电磁波如

收稿日期: 2012-04-03; 修回日期: 2012-09-10

资助项目: 中国科学院百人计划; 国家自然科学基金 (11073048); 上海市浦江人才计划 (10PJ1411700); 863 计划 (2012AA121203)

测控信号的带宽一般为数 MHz 甚至更小, 解算的群时延误差一般为数纳秒。如何利用较窄频带的测控信号或数传信号提取较高精度的 VLBI 时延数据是个值得研究的问题。

探月工程中, 嫦娥一号 (CE-1) 和嫦娥二号 (CE-2)^[5] 探月卫星都发射了带宽约 1 MHz 的两个 S 波段测控信号, 在实时 VLBI 测定轨中, VLBI 测轨分系统利用这两个测控信号得到了 VLBI 时延和时延率数据。但是由于卫星慢旋、变轨时卫星天线未对准地球、遥测信号时有时无或卫星飞离地球越来越远等原因, 地面测站接收到的测控信号有时带宽会变窄及信噪比下降, 进而导致解算出的时延误差增大。针对这种情况, 本文研究了剔除野值点加权幅度的直线拟合 (方法一)、剔除野值点加权幅度平方的直线拟合 (方法二)、剔除野值点加权幅度 3 次方的直线拟合 (方法三) 和剔除野值点加权幅度的 4 次方直线拟合 (方法四) 4 种方法来解算 VLBI 群时延, 并根据群时延拟合可决系数平均值和 3 基线时延闭合结果分析了不同方法的优劣。另外, 为了进一步减小时延测量误差, 本文还解算出含整周模糊度的相时延, 并利用多项式拟合将几个观测时间段的相时延数据连接且整体平移至群时延中间位置的方法, 成功得到了含微小偏移量的相时延数据。含微小偏移量的相时延随机误差比群时延随机误差小两个量级, 含有的微小偏移量相对也容易在后续的定轨定位中解算出。

2 嫦娥一号和二号卫星的测控信号

嫦娥一号和二号卫星发射了带宽约 1 MHz, 中心频率为 2210.8 MHz 和 2234.5 MHz 的两个 S 波段测控信号。这两个信号发射天线位于探测器的两端, 地面测站基本上只能接收到其中一个信号。以上海佘山、北京密云、昆明凤凰山和乌鲁木齐南山测站及上海 VLBI 数据处理中心组成的 VLBI 测轨分系统对嫦娥一号和二号卫星进行了全程观测。图 1 为接收信号正常情况下的中心频率 2210.8 MHz 的测控信号的互相关幅频图、相频图和功率信噪比图。横轴表示 FFT 频点数, 512 个频点对应着 1 MHz 的带宽。如图 1(a) 和 1(c) 所示, 最大相关幅度可以达到 200, 功率信噪比最大可以达到 50 dB, 在 1800~2300 频点间均明显地检出了测控信号, 并得到了较好的相关相位 (图 1(b)), 对相关相位进行直线拟合可得到较高精度的群时延数据。

图 1(d)-(f) 给出了卫星慢旋或变轨时卫星天线没有对准地球等接收信号不正常情况下测控信号的互相关幅频图、相频图和功率信噪比图。测控信号互相关的有效带宽由正常时约 0.8 MHz 下降至 0.3 MHz, 有效频点由 400 多个点减少到 150 点左右。在这种异常情况下, 必须采用更合适的方法进行处理, 才能得到有效的 VLBI 时延测量数据。

3 群时延解算拟合方法的研究

VLBI 残余群时延是由相关相位对频率的直线拟合给出。加权直线拟合的目的是提高信噪比较高的载波附近的信号在拟合中的权重, 减弱信噪比较低的信号的权重。在这里我们比较了加权为幅度、幅度平方、幅度 3 次方、幅度 4 次方时的拟合结果。在加大载波附近信号

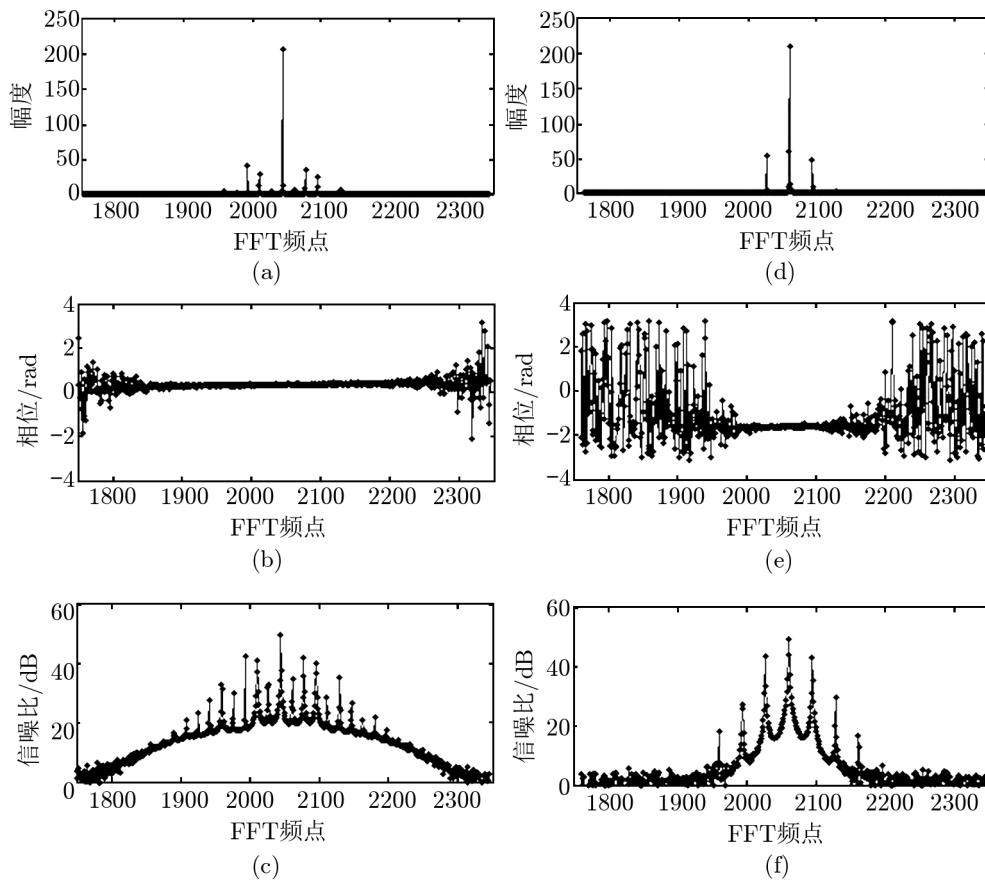


图1 嫦娥二号 S 波段测控信号正常情况 (a-c) 和异常情况 (d-f) 下的幅频图、相频图和功率信噪比图。积分时间 1 s, 下图同。

拟合权重的同时,剔除两边的信噪比很低的点也可以提高拟合效果。因此,本文分析了剔除野值点加权幅度的直线拟合(方法一)、剔除野值点加权幅度平方的直线拟合(方法二)、剔除野值点加权幅度 3 次方的直线拟合(方法三)和剔除野值点加权幅度的 4 次方直线拟合(方法四)4 种方法用于解算群时延。

加权因子幅度平方是根据信号幅度,对每一个频点幅度进行平方,得到总的幅度平方值,再对每个频点幅度平方值除以总的幅度平方值计算而得到。剔除野值点加权幅度的直线拟合处理步骤分 5 步:

第一,对互相关数据求幅度和相位。

第二,找到载波附近 600 个频点的 1.17 MHz 带宽的相位。

第三,对这 600 个频点相位进行加权为幅度平方的直线拟合,将拟合后得到的 600 个频点的拟合相位和实际相位进行差分,得到残余相位。

第四, 根据时延测量误差计算得到相关相位的变化范围及阈值, 拟合相位和实际相位的差小于阈值的频点予以保留, 超出的作为野值点剔除; 剔除的野值点超过总点数的 83.3% 时, 认为信号信噪比太低, 群时延赋零。

第五, 对剔除野值点后的相关相位进行加权幅度的直线拟合从而得到群时延数据。

剔除野值点加权幅度平方的直线拟合、剔除野值点加权幅度 3 次方的直线拟合和剔除野值点加权幅度 4 次方的直线拟合只是第五步加权因子不同, 其他的处理过程和剔除野值点加权幅度的直线拟合一样。

剔除野值点存在阈值的选取问题。一般条件下, 阈值选择是以信噪比为第一判据, 信噪比与相位的误差成反比关系。本文给出了通过工程统计结果来反算相位误差的方法。在 CE-2 工程中, S 波段群时延测量误差在 3 ns 左右。根据公式 $\Delta\phi = 2\pi\Delta f\tau$, 在 1 MHz 带宽的测控信号条件下, 3 ns 的群时延误差对应着 0.019 rad 的相位变化; 而 1 MHz 带宽的测控信号在频域上有 512 个频点, 每一个频点都是相互独立的, 所以对应到每一个频点的相位变化乘以 $\sqrt{512}$ 即是 0.42 rad, 即取阈值为 ± 0.21 rad。

图 2 给出了图 1 的互相关相位剔除野值点后的结果。图 2a 是剔除图 1(b) 在 1900 点前和 2300 点附近野值点的互相关相位。图 2(b) 只保留了图 1(e) 载波附近的相关相位, 其他的几乎都是野值点。正常情况下信号相位误差不大, 野值点不多, 异常情况下需要剔除的野值点会大幅增加。

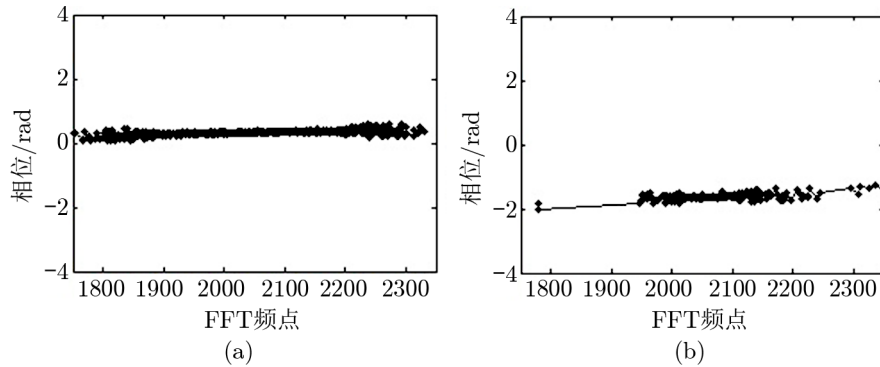


图 2 剔除野值点后的相频图。图 2(a) 与图 1(b), 图 2(b) 与图 1(e) 对应的是同一时间的数据。

4 群时延解算 4 种拟合方法的比较

同一观测数据的 4 种方法解算的群时延有明显差别。本文用两个参数比较 4 种方法的优劣。参数一是对一次观测数据中的测控信号进行直线拟合时的可决系数平均值。可决系数 (R) 是度量拟合优度的统计量, 其取值范围是 $[0, 1]$, 它的值越接近 1, 说明拟合直线对观测值的拟合程度越好; 反之, R 的值越接近 0, 说明回归直线对观测值的拟合程度越差^[7]。可决

系数计算公式是:

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad , \quad (1)$$

$$SSR = \sum_{i=1}^N \omega_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad , \quad (2)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^N \omega_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad , \quad (3)$$

$$SST = \sum_{i=1}^N \omega_i (y_i - \bar{y})^2 \quad , \quad (4)$$

其中, SSR 是回归平方和, SSE 是残差平方和, SST 是总离差平方和, ω_i 是加权系数。参数二是 3 条基线闭合群时延的均方根。群时延均方根计算公式为:

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \cdots + \tau_N^2}{N}} \quad . \quad (5)$$

τ_i 为闭合时延。

4.1 拟合后可决系数平均值

图 3 是用 4 种方法分别对 2011 年 4 月 8 日 (观测代码 s1408a)CE-2 的观测数据处理得到的北京 (bj)-昆明 (km) 基线的 S 波段第一通道群时延结果。s1408a 为 Δ DOR(Delta Differential One-way Range) 观测模式, 即先观测 35 min 的强射电源, 然后交替观测卫星和弱射电源, 最后再观测 35 min 的强射电源。中间隔一段时间会将射电源观测时间增加到 40 min, 所以解算的群时延如图 3 所示有 4 段。图 3(a)-(d) 分别为利用方法一到四得到的解算结果。比较 4 幅图可以看到 4 种方法解算的群时延都在 20 ns 左右变化, 而且变化趋势基本一致。

表 1 给出了 4 种方法处理第一段数据得到的 6 条基线的拟合可决系数平均值。上海-昆明、北京-昆明和昆明-乌鲁木齐 3 条基线 4 种方法可决系数最大的是方法三, 其他 3 条基线可决系数最大的是方法 4, 总体来看, 方法二、三、四拟合可决系数基本一致, 方法一较差。

表 1 4 种方法得到的 6 条基线的拟合可决系数平均值

	方法一	方法二	方法三	方法四
sh-bj	0.5466	0.9789	0.9896	0.9898
sh-km	0.9161	0.9963	0.9974	0.9968
sh-ur	0.1813	0.9147	0.9648	0.9717
bj-km	0.8792	0.9946	0.9965	0.9962
bj-ur	0.2637	0.9387	0.9727	0.9760
km-ur	0.8765	0.9954	0.9972	0.9964

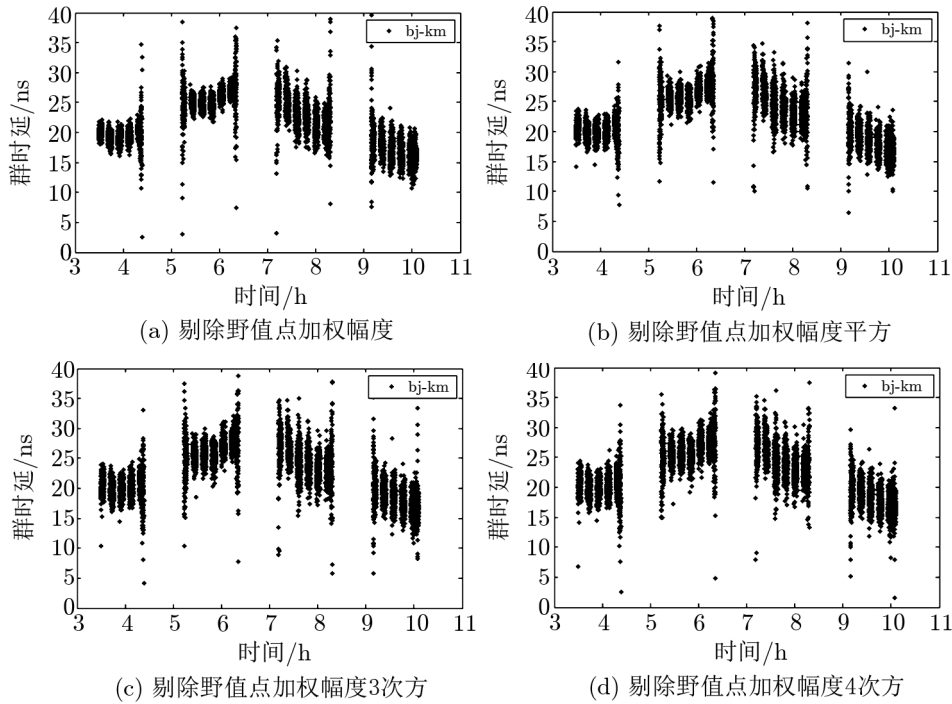


图 3 4 种拟合方法解算得到的北京-昆明基线群时延

4.2 群时延闭合比较结果

图 4 给出了 s1408a 观测数据北京-昆明、北京-乌鲁木齐和昆明-乌鲁木齐 3 条基线的群时延闭合结果 (射电源修正时延闭合误差约 0.1 ns, 电离层修正闭合误差约 0.05 ns)。图 4(a)–4(c) 分别为利用方法一至四得到的闭合时延结果。4 张图中总点数都是 7353 个, 图 4(a) 中, 闭合时延在 ± 1 ns 范围内的点数有 3349 个, 比例为 45.5%; 在 ± 5 ns 范围内的点数有 6433, 比例为 87.5%。图 4(b) 中, 在 ± 1 ns 范围内的点数有 6327, 比例 86.0%; ± 5 ns 范围内有 6613 个, 比例 89.9%。图 4(c) 中, 在 ± 1 ns 范围内的点数有 6316, 比例 85.9%; ± 5 ns 范围内有 6612 个, 比例 89.9%。图 4(d) 中, 闭合时延在 ± 1 ns 范围内的点数有 6267 个, 比例 85.2%; 在 ± 5 ns 范围内的点数有 6543 个, 比例 89.0%。可以看到图 4(a) 闭合时延在 ± 1 ns 范围内的比例最小, 而其他三幅图比例比较接近, 其中图 4(b) 中比例最高, 图 4(c) 次之。方法一闭合时延效果明显差于其他 3 种方法是因为信号两侧的相关相位受到噪声的强烈干扰, 这些干扰影响了群时延解算, 使群时延与真值存在大的偏差, 而其他 3 种方法减小了这些干扰在群时延解算中的影响。

表 2 和表 3 给出了利用 4 种方法得到的 6 条基线 4 种不同 3 基线闭合时延 RMS(最小均方误差) 值。其中表 2 是根据 s1408a 完整的数据计算得到的结果, 表 3 是对第一段数据计算得到的结果。表 2 剔除了闭合时延大于 100 ns 的少量野值点, 且与上海观测站有关的基线在世界时 9:00 以后, 信号信噪比大幅下降, 致使解算出的上海-北京、上海-昆明和上海-乌鲁

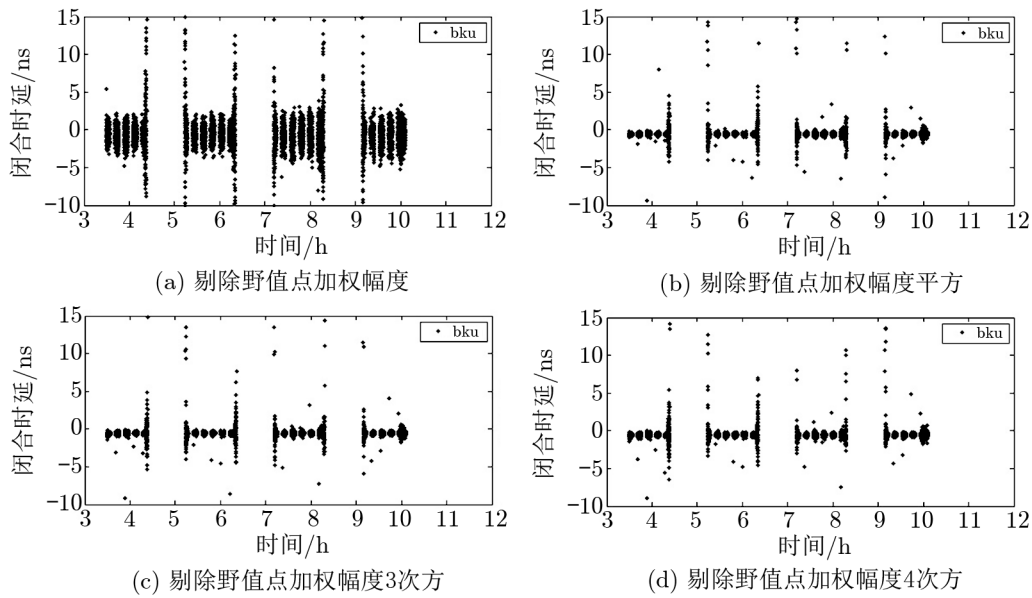


图 4 4 种方法得到的北京-昆明、北京-乌鲁木齐和昆明-乌鲁木齐 3 基线的闭合时延

木齐 3 条基线群时延误差太大, 所以这 3 条基线计算得到的闭合时延 RMS 值较大。表 3 因为第一段数据群时延野值点很少, 去掉不能解算而置零的零点后, 时延闭合都在 0 ns 左右, 计算的 RMS 值能更真实反应群时延闭合情况。可以看到方法二、三和四闭合时延 RMS 值近似, 方法一最差, 其中方法二闭合时延 RMS 值最小, 方法三稍大。结合闭合时延分布范围和 RMS 平均值可以确定方法二即剔除野值点加权幅度平方的直线拟合时延闭合情况最好, 方法三即剔除野值点加权幅度 3 次方的直线拟合次之。

表 2 4 种方法得到的 s1408a 完整数据 3 条基线闭合时延 RMS 值

	方法一	方法二	方法三	方法四
sbk	8.3511	8.3121	8.3672	8.3026
sbu	4.7118	3.4359	3.4848	3.6344
sku	6.4286	6.2351	6.3331	6.3665
bku	4.3554	3.3351	3.3919	3.4601

注: sbk 指上海北京昆明 3 台站组成的三基线; sku 指上海昆明乌鲁木齐 3 台站组成的 3 基线; bku 指北京昆明乌鲁木齐 3 台站组成的 3 基线。下同。

综上所述, 方法二、三、四可决系数平均值和闭合时延 RMS 值近似, 方法一较差。在解算可决系数过程中发现方法三和方法四加权系数过于集中在载波上, 可能导致解算的群时延存在偏差, 而方法二闭合时延 RMS 值最小也证明了这一点。故方法二即剔除野值点加权幅度平方的直线拟合效果最好、最可靠。事实上, 由于相关相位测量误差反比于功率信噪比

表 3 4 种方法得到的 s1408a 第一段数据 3 条基线闭合时延 RMS 值

	方法一	方法二	方法三	方法四
sbk	1.0647	0.1232	0.1294	0.1360
sbu	1.2106	0.1532	0.1635	0.1678
sku	1.2346	0.1602	0.1732	0.1784
bku	1.0564	0.1309	0.1390	0.1448

(换算成幅度为平方关系), 剔除野值点加权幅度平方的直线拟合效果最好也反映了这一物理含义。

5 相时延解算

CE-2 测控信号解算的群时延误差为数 ns, 在信号异常或卫星飞离地球更远时误差更大。比如, 现在 CE-2 卫星正在飞往近 1×10^7 km 远的小行星, 为了降低带宽有限的测控信号的时延测量误差, 本文研究了 VLBI 相时延的解算方法。相时延可通过较强的载波相关相位除以观测频率得到, 得到的相时延随机误差很小但存在整周模糊度。对于频率为 2.21 GHz 的信号来说, 一个整周模糊度对应着 0.45 ns 的相时延误差。目前群时延随机误差能达到数 ns, 3 基线群时延闭合 80% 多的点数误差小于 1 ns, 这说明解算的群时延系统误差不大, 群时延在真值附近变化, 将相时延调整到群时延中间可以估算出相时延的绝对值。在 Δ DOR 观测模式下, 先观测 5 min 卫星, 中间观测 5 min 弱射电源, 然后再观测 5 min 卫星。在总共 18 min 的 3 次交替观测过程中, 由于卫星轨道是连续的, 所以地面 VLBI 相时延实际上应该是连续的; 而解算的载波相时延因为存在整周模糊度等导致相邻 5 min 的卫星相时延并不连续, 所以这里提出一种解算含微小偏移量相时延的方法。考虑到电磁波通过电离层对群时延和相时延的影响相反, 需要对解算出的群时延和相时延去掉电离层的时延影响。

具体解算方法如下:

第一步, 将一定时间的载波相位进行解卷绕, 计算出含整周模糊度的相时延。

第二步, 将含整周模糊度的相时延分段调整到群时延中间。

第三步, 对前后两个 5 min 的相时延数据进行 4 阶多项式拟合, 同时上下调整后 5 min 的相时延数据, 使拟合残差 RMS 值最小, 从而把前后观测弧段的相时延连接起来。图 5 给出了北京-昆明基线第一小段和第二小段调整过程中拟合残差 RMS 的变化曲线。从图中可以看出, 当第二小段的相时延向下调整约 0.4 ns 后, 拟合残差 RMS 值最小, 表明此时前后两个 5 min 的相时延数据很好地连接起来了。

第四步, 整个观测弧段内的相时延连接成功后, 再整体调整到群时延的中间位置。

图 6 给出了 s1408a 观测的含微小系统差的相时延解算结果。图 6(a) 是群时延和含微小偏移量相时延。相时延穿过群时延中间并较好地反映了时延的变化趋势。图 6(b) 是对两段含

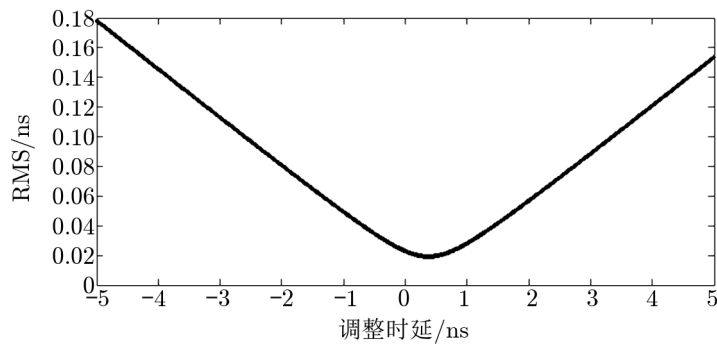


图 5 s1408a 第一小段和第二小段调整过程中拟合残差 RMS 的变化曲线

微小偏移量相时延分别进行 14 阶多项式拟合得到的时延残差。图 6(c) 是调整前和调整后的相时延, 可以看到调整前的相时延连续性不好, 而调整后的相时延基本平滑。图 6(d) 是对上海-北京、上海-乌鲁木齐和北京-乌鲁木齐 3 基线前两段群时延和含微小偏移量相时延闭合结果。这 3 条基线闭合群时延和闭合相时延都有一个微小的偏移量, 但相时延闭合随机误差明显好于群时延, 在后续的定轨解算中相对来说更易作为系统差解算出来。

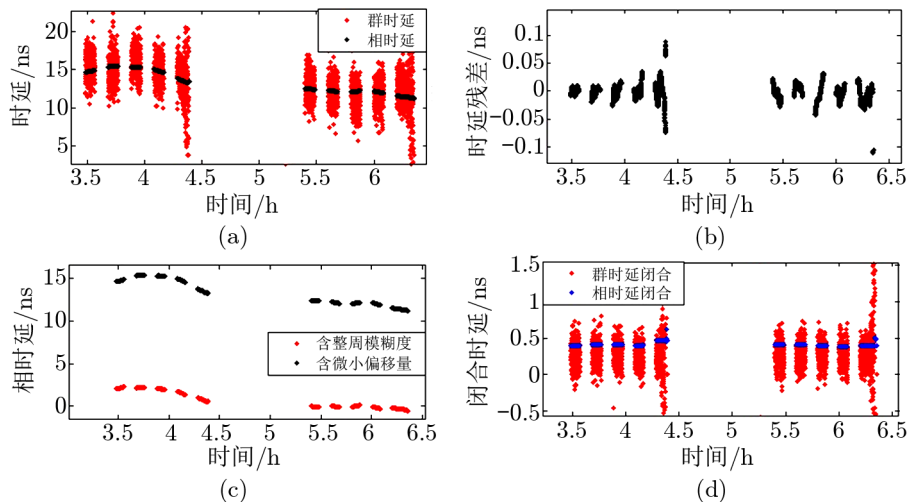


图 6 (a) 群时延和含微小偏移量相时延; (b) 含微小偏移量相时延 14 阶多项式拟合后残差; (c) 含整周模糊度相时延和含微小偏移量相时延; (d) 上海-北京、上海-乌鲁木齐和北京-乌鲁木齐 3 基线前两段群时延和相时延闭合情况。

6 结 论

本文利用嫦娥二号 VLBI 观测数据, 分析比较了剔除野值点加权幅度、剔除野值点加权幅度平方、剔除野值点加权幅度 3 次方和剔除野值点加权幅度 4 次方的直线拟合这 4 种方法在求解测控信号群时延时的优劣, 得出了剔除野值点加权幅度平方的直线拟合 3 基线群时延闭合效果最好、拟合可决系数平均值较大的结论, 并作为解算群时延的方法。为了进一步减小 VLBI 时延测量误差, 本文还研究了将含有整周模糊度的相时延在整个观测弧段内进行连接, 并整体平移至群时延中间位置的方法, 得到了含微小偏移量的相时延数据。含微小偏移量的相时延与群时延闭合时延系统差类似, 但其随机误差降低两个数量级。本研究为嫦娥二号奔向远方等信号变弱情况下时延精度的提高提供了一种可能的解算方法。

致谢

本文使用的是上海天文台 VLBI 中心提供的相关处理数据, 在此感谢 VLBI 中心同仁, 并特别感谢钱志瀚研究员、蒋栋荣研究员、张秀忠研究员、王广利研究员和郑为民研究员在 VLBI 观测及处理工作中对本文的帮助。

参考文献:

- [1] Thornton C L, Border J S. Radiometric Tracking Techniques for Deep-Space Navigation. New York: John Wiley & Sons, Inc. 2003: 47
- [2] 刘庆会, 陈明, Sander 等. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2010,40: 809
- [3] 刘庆会, 史弦, 菊池东彦, 等. 中国科学 G 辑: 物理学力学天文学, 2009, 39(10): 1410
- [4] 陈明, 刘庆会. 天文学进展. 2012, 28(4): 415
- [5] 吴伟仁, 黄磊, 节德刚等. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(10): 1171
- [6] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Radio Sci, RS2004, doi: 10.1029/2009rs004203, 2010: 45
- [7] <http://baike.baidu.com/view/657906.htm>, 2012

Resolution of VLBI Group Delay and Phase Delay from Telemetry Signal

ZHENG xin, CHEN Guan-lei, CHEN Ming, LIU Qing-hui, WU Ya-jun,
SHI Xian, ZHAO Rong-bing, CHEN Shao-wu

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

Abstract: The misalignment of spacecraft antenna with the Earth, the discontinuity of the telemetry signal and the distance between spacecraft and the Earth farther and farther etc,

which narrow the signal bandwidth and reduce the signal strength, contribute to the increase in VLBI group delay error and outliers. In order to acquire better group delay measurements in these situations, we studied four fitting methods, namely weighted linear fitting with amplitude after outlier-elimination, weighted linear fitting with squared amplitude after outlier-elimination, weighted linear fitting with cubic amplitude after outlier-elimination and weighted linear fitting with quartic amplitude after outlier-elimination. By evaluating the pros and cons of these four methods, we found that by using the second method can minimize the closure error of delays from three baselines and can relatively maximize the average coefficient of determination of group delay fitting. In order to further reduce the error of VLBI delay measurement, we introduce a method to connect the phase delay with cycle ambiguity in the entire observation period, and then eliminate its offset by minimizing its difference from the group delay. In this way, we are able to get phase delay measurements with relatively small offsets. Since the random error of phase delay is usually much lower than that of the group delay, the systematic error of phase delay can be reduced more easily, and be better applied in orbit determination process.

Key words: deep space exploration; VLBI; telemetry signal; group delay; phase delay