

文章编号: 1000-8349(2010)04-415-09



探月卫星同波束 VLBI 差分相位时延闭合计算与分析

陈 明^{1,2}, 刘庆会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: 针对同波束干涉测量中差分相位时延模型验证、解算结果周跳检测与校正问题进行分析。给出了相位闭合和差分相位时延闭合计算原理与方法, 并以 SELENE 任务中解算的差分相位时延数据为算例进行分析, 差分相位时延闭合计算结果小于几皮秒。验证了差分相位时延基于同一波前的模型, 可用于对差分相位时延中周跳问题进行检测, 可对数据波动情况进行监视, 为数据后处理提供依据。在实际应用中, 该方法可随着数据处理过程的推进同步进行, 因此, 十分有利于同波束干涉测量方法的实时实施, 并应用于卫星导航。

关键词: 月球探测; 同波束干涉测量; 差分相位时延闭合

中图分类号: P184.5 **文献标识码:** A

1 背景介绍

月球重力场的测定是研究月球内部结构及其演化的重要依据。俄罗斯与美国均发射过多颗卫星进行月球重力场的测定与研究, 并取得丰硕成果。但在月球重力场的测定上仍有两方面的问题需要解决: 一是缺少月球重力场背面的测量信息; 二是月球侧面重力场模型精度不高, 这主要是因为传统的多普勒和距离测量对与视线垂直方向不敏感所致。日本 SELENE 探月卫星的科学目标之一就是采用新的测量方式获取更精确的重力场模型。SELENE 卫星于 2007 年 9 月 14 日发射升空, 该卫星由 1 个三轴稳定的主卫星和 2 个自由飞行自旋稳定的小卫星组

收稿日期: 2010-01-09; **修回日期:** 2010-04-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11043004, 11703048); 上海市浦江人才计划资助项目 (10PJ1411700); 上海市空间导航与定位技术重点实验室开放课题 (Y054262001); 中国科学院百人计划

成。2 个小卫星分别被称为 Rstar 和 Vstar^[1]，主卫星在 100 km 高度的近圆极轨上运行，2 个小卫星由主卫星释放后分别进入 100 km×2 400 km 和 100 km×800 km 高的极月椭圆轨道运行。当主卫星进入月球背面以后，Rstar 在主卫星和地面站间起到中继作用，实现对月球背面的四程多普勒测量，该测量可对月球背面重力场模型进行改善^[2]。在 Rstar 和 Vstar 间进行差分 VLBI 测量，可提高作为数据中继的 Rstar 的位置确定精度；差分 VLBI 测量也有利于改善月球边缘重力场模型精度。

Rstar 和 Vstar 分别发送 3 个 S 波段载波 (2 212 MHz、2 218 MHz、2 287 MHz) 和 1 个 X 波段载波 (8 456 MHz)。在 Rstar 和 Vstar 间获得 4 个载波频点的差分相关相位，采用同波束干涉测量技术 (SBI) 获取高精度相对角位置测量信息^[3]。在 SBI 测量中，地面接收天线在同一个主波束内同时接收到 Rstar 和 Vstar 信号，经差分处理后，来自大气、电离层和接收机的误差基本消除^[4]，差分相位时延 (DPD) 测量精度可达几皮秒。在多频点同波束观测中，各基线整周模糊度通过不同频点间的差分相关相位直接导出，并受严格条件约束^[3]。在 X 波段可获得更高测量精度，但 X 波段 SBI 观测要求角距小于 0.1° (天线直径为 20 m 时)，观测机会不足其观测弧段的 6%，这对于确定月球重力场模型是远远不够的。2008 年 3 月以后，VLBI 观测方式更改为天线直接对准 Rstar 和 Vstar 夹角中线，对 S 波段分离角约束增大为不超过 0.56°。

2 SBI 测量方法

SELENE 的 VLBI 观测网由 4 个位于日本、口径为 20 m 的天线网 (VERA) 和 4 个国际站组成，4 个国际站分别位于中国上海 (25 m)、中国乌鲁木齐 (25 m)，澳大利亚 Hobart (26 m) 和德国 Wettzell (20 m)。基线长度从 796 km 至 12 247 km。VERA 承担了 VLBI 观测的主要任务，从 2007 年 11 月至 2009 年 2 月它参与了大约 1 600 h 的观测，包括对 Rstar、Vstar、主卫星和射电源的观测，2009 年 2 月以后用于观测 Vstar 和主卫星。4 个国际站分别于 2008 年 1 月、5—7 月、2009 年 2 月参与了对 Rstar 和 Vstar 的共约 200 h 的观测^[5]。

从 2007 年 11 月至 2008 年 2 月，SBI 跟踪采取天线对准 Rstar 和 Vstar 夹角中线，同时跟踪两个目标的方式，跟踪条件为夹角小于 0.1°，这是兼顾 S 波段和 X 波段。若夹角大于 0.1° 采取交替跟踪 Rstar 或 Vstar 的方式，若 Rstar 和 Vstar 夹角小于 0.3°，则 S 波段 SBI 跟踪可以实现。2008 年 3 月至 12 月，SBI 跟踪条件改为夹角小于 0.56°，这是为了更好地获得 S 波段的跟踪数据，该方式下约 69% 跟踪弧度可获取 SBI 观测数据，当然在夹角小于 0.1° 时仍可获得 X 波段跟踪数据。0.56° 夹角的选取是综合考虑了天线相位特性、指向特性及前期数据处理情况^[6]，在此之前的 SBI 观测中，当天线对准 Rstar 或 Vstar 时，在夹角小于 0.3° 条件下一般可解出整周模糊数。在 2008 年共 179 d 的 VLBI 观测中，S 波段 SBI 观测弧长约为 476 h，平均每天观测弧长为 2.66 h。当 Rstar 和 Vstar 的轨道面朝向地球时，1 d 的跟踪弧长可超出 5 h，而这正好有利于反映出月球侧面重力场特性。

多频点 SBI (MFSBI) 数据处理计算方法可参见文献 [3] 和 [7]，这里不再详述。在 MFSBI

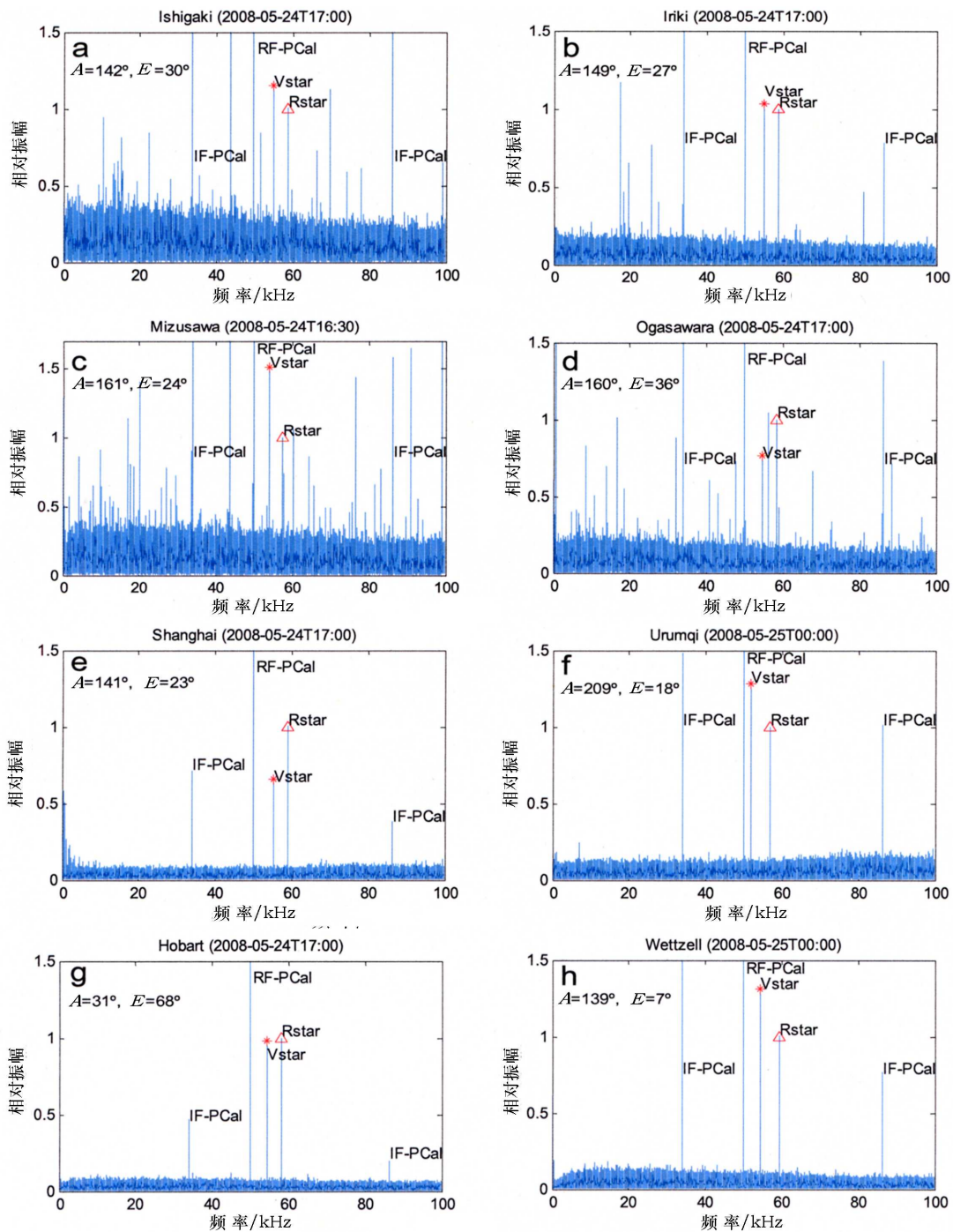


图 1 SELENE 中 SBI 观测站信号频谱相对振幅关系图

a, b, c, d 为 VERA 4 个站的信号频谱; e, f 为中国的上海站、乌鲁木齐站信号频谱;

g 为澳大利亚的 Hobart 站信号频谱; h 为德国的 Wettzell 站信号频谱。

解算条件严格满足的情况下可以正确求解相位时延。一般相位时延的解算基于同一波前的假设,即相位时延是由于同一波前相位到达不同测站的时间差引起的,该条件可以通过对解算结果的相位闭合计算来验证。在实际测量中,由于观测系统中各种因素和大气导致的相位抖动及电离层扰动产生的影响^[5],使相位出现较大的波动,一般需要先经过积分处理后才可以在正确解算出相位时延。在实际解算中也存在模糊度不能正确解算的情况,即解算结果中含有周跳,这主要由以下两方面原因造成:在观测中为获取尽可能长的 SBI 观测弧长,常允许 Rstar 和 Vstar 有较大的角距离,而大的角距直接导致两个卫星信号传播路径的大气波动和电离层抖动存在较大的差异,两者差分后仍存在较大的残余量;同样为了增加观测弧长,跟踪中将天线对准 Rstar 和 Vstar 的中线,因此导致信噪比降低,不利于信号的检出。

此外,VERA 系统本身存在较大的装置噪声,导致有些噪声谱线比 Rstar/Vstar 的信号谱线还强,由于 Doppler 效应,导致有时信号和噪声无法分离。图 1 给出了 1 组信号频谱相对振幅关系图。为便于进行信噪比的比较,图中各信号振幅统一相对于 Rstar 信号振幅。图中可见,上海、乌鲁木齐、Hobart 和 Wettzell 4 站噪声较少,而 VERA 4 站无线电干扰较多。这是因为上海、乌鲁木齐、Hobart 及 Wettzell 4 站采用喇叭口型馈源,波束宽度较窄,馈源舱内其他装置产生的干扰不易进入接收机;VERA 系统 4 个站馈源不是喇叭口型,是由螺旋天线阵组成,螺旋天线波束很宽,且 VERA 天线馈源舱内有很多电子装置,如 K 波段、Q 波段的接收机和其他电器装置,致使其干扰较多。图 1 给出的是角距较小时的信号频谱情况,随着 RStar 和 VStar 间角距的增大,接收信号强度将进一步降低。上述原因导致相位有时存在较大波动和不连续。若波动超了解算要求的条件,则会产生周跳。目前作者正在进行这方面的研究工作,以期在误差较大时仍能有效地解算出差分相位时延。

时延闭合常用来作为计算结果的检测^[8],但关于高精度相位时延闭合的讨论很少。下面将首先给出相位时延闭合计算原理分析,然后给出差分相位时延闭合计算原理分析,并以 SELENE 中的差分相位时延数据为例进行具体的计算分析,最后给出结论。

3 相位时延闭合计算原理及算例分析

相位时延闭合计算基本依据为同一波前传输原理,即相位时延为同一波前到达两个测站的时间差。设有 3 个地面站 A、B、C,来自同一信号源信号的同一波前到达各站的时刻分别记为 t_A 、 t_B 、 t_C ,则各基线的时延定义为:基线 AB, $\tau_{AB} = t_B - t_A$,对于基线 AC, A 为参考站, B 为从属站(以下与此相同);基线 AC, $\tau_{AC} = t_C - t_A$;基线 BC, $\tau_{BC} = t_C - t_B$ 。显然有, $\tau_{AB} = -\tau_{BA}$, $\tau_{AC} = -\tau_{CA}$, $\tau_{BC} = -\tau_{CB}$ 。数据时标一般定义在基站数据时刻,因而 τ_{AB} 、 τ_{BA} 对应的数据时标分别为 t_A 、 t_B 。则同一波前相位时延闭合计算式为: $\tau_{ABC} = \tau_{AB} + \tau_{BC} + \tau_{CA} = 0$ 。在数据相关处理过程中,一般在同一时刻得到多条基线的相位时延值,而不是不同基线的同一波前的相位时延值。因此这里分为两种情况进行相位时延闭合计算分析:一是考虑同一时刻相位时延闭合,二是修正数据至同一波前相位时延闭合。

3.1 相位时延闭合计算

由 3 条基线同一时刻的 3 个相位时延数据, 直接进行相位时延闭合计算。设同一数据时刻为 t , 相位时延量分别为 τ_{AB} 、 τ_{AC} 、 τ_{BC} , 则相位时延闭合计算为: $\tau_{ABC} = \tau_{AB} - \tau_{AC} + \tau_{BC}$ 。

修正上式中的时延数据, 使它们对应到同一波前。由于基线 AB、基线 AC 对应同一参考站, 故 τ_{AB} 、 τ_{AC} 是同一波前信号引起的时延; 而该波前到达 B 站的时刻 t_B 由时延 τ_{AB} 确定为: $t_B = t_A + \tau_{AB}$, 于是可将 BC 基线的时延 τ_{BC} 插值到同一波前的 t_B 时刻得到相应的时延, τ'_{BC} 。线性插值实现方式如下:

若 $\tau_{AB} > 0$, 则 $\tau'_{BC} = \tau_{BC} + \tau_{AB}[\tau_{BC}(n+1) - \tau_{BC}]/[t_A(n+1) - t_A]$;

若 $\tau_{AB} < 0$, 则 $\tau'_{BC} = \tau_{BC} + \tau_{AB}[\tau_{BC} - \tau_{BC}(n-1)]/[t_A - t_A(n-1)]$ 。

式中: $n-1$ 为前一时刻点数值, $n+1$ 为后一时刻点数值。新的相位时延闭合计算公式为: $\tau'_{ABC} = \tau_{AB} - \tau_{AC} + \tau'_{BC}$ 。若相位时延闭合计算结果为 0 或近于 0, 则称基线间的相位时延闭合。由上述计算结果可以判断 3 站组成的 3 条基线相位时延是否闭合及闭合程度。

对于多站 (3 站以上) 构成的多基线情况, 可以推知: 若多站中的任意 3 站相位时延闭合, 则多站任意组合的相位时延仍然闭合; 否则, 若多站相位时延不闭合, 则至少有 1 组 3 站相位时延不闭合。如对于 A、B、C、D 这 4 站, 则有 $\tau_{ABCD} = \tau_{AB} + \tau_{BC} + \tau_{CD} + \tau_{DA} = (\tau_{AB} + \tau_{BC} + \tau_{CA}) + (\tau_{AC} + \tau_{CD} + \tau_{DA})$ 。若任意 3 站相位时延闭合, 上式右端为 0 (或近于 0), 则 $\tau_{ABCD} = 0$ (或近于 0), 这说明该 4 站相位时延闭合。这样, 多站相位时延闭合分析可完全转化为 3 站相位时延闭合分析。故应用中仅需对任意 3 站相位时延闭合情况进行分析即可。

3.2 算例分析

以 2008 年 5 月 20 日 Rstar 预报时延为例, 计算分析相位时延闭合情况。时延数据为 ISGK(Ishigaki)、IRIK(Iriki)、MZSW(Mizusawa) 3 站组成的 3 条基线相应的数据。分别进行同一时刻相位时延闭合计算与将相位修正到同一波前的相位时延闭合计算, 结果如图 2 所示。

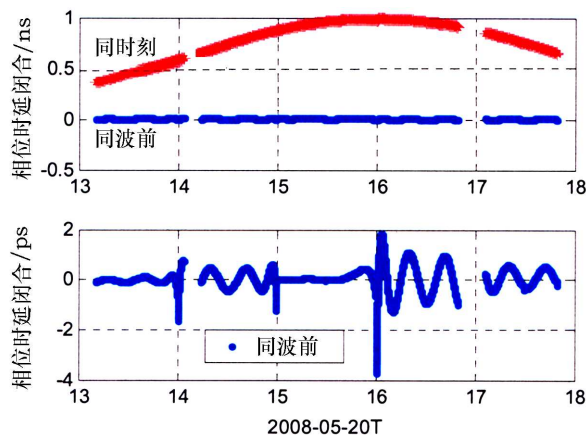


图 2 闭合相位计算实例

由图2可见,同一时刻相位时延闭合计算结果为1 ns,修正至同一波前的相位时延闭合计算结果为1~2 ps。这表明依据同一波前计算的相位时延闭合计算结果精度更高。同一时刻相位时延闭合计算结果约为1 ns,这主要是由于相位时延波前没有对齐引起的,考虑到时延测量精度已接近这一水平,因此对相位时延数据进行相位修正至同一波前是必要的。修正后相位时延闭合计算结果最大可达几皮秒,这主要是计算误差和采用的线性修正模型引入误差造成的。这一结果同时验证了预报时延使用的模型为同一波前相位到达各站时间差。

4 差分相位时延闭合计算原理及算例分析

4.1 差分相位时延闭合计算原理分析

设 t_A 时刻,差分相位时延为 $\Delta\tau_{AB}^{R-V}$ 。基线分别为AB、AC、BC,则3条基线的差分相位时延闭合。事实上,由差分相位时延定义可知,对基线AB、AC、BC,差分相位时延分别为, $\Delta\tau_{AB}^{R-V} = (\tau_B^R - \tau_A^R) - (\tau_B^V - \tau_A^V)$, $\Delta\tau_{AC}^{R-V} = (\tau_C^R - \tau_A^R) - (\tau_C^V - \tau_A^V)$, $\Delta\tau_{BC}^{R-V} = (\tau_C^R - \tau_B^R) - (\tau_C^V - \tau_B^V)$ 。若时延对应同一波前,则差分相位时延闭合计算为 $\Delta\tau_{ABC}^{R-V} = \Delta\tau_{AB}^{R-V} - \Delta\tau_{AC}^{R-V} + \Delta\tau_{BC}^{R-V} = 0$,即差分相位时延闭合。否则,若时延对应同一时标,则须将数据修正至同一波前后再进行差分相位时延闭合计算。修正方法与相位时延波前修正类似。但由于Rstar和Vstar为两个独立的飞行器,严格来说对同一波前的修正应分开进行。但Rstar和Vstar位置十分接近,其时延量也很接近,故其时延量可近似认为一致。差分相位时延线性修正与相位时延线性修正的差分相等,即 $\delta(\Delta\tau_{BC}^{R-V}) = \delta(\tau_{BC}^R) - \delta(\tau_{BC}^V)$ 。而相位时延线性修正已在上文论述。修正后的差分相位时延闭合计算公式为 $\Delta\tau_{ABC}^{R-V} = (\Delta\tau_{AB}^{R-V} - \Delta\tau_{AC}^{R-V} + \Delta\tau_{BC}^{R-V}) + \delta(\Delta\tau_{BC}^{R-V})$ 。差分相位时延闭合计算可依此公式计算。

4.2 算例分析

以2008年5月22日ISGK、MZSW、IRIK 3站组成的3条基线测量数据为例,差分相位时延闭合计算结果如图3所示。图中可见修正后的差分相位时延闭合计算结果显著减小,其均值基本为零。

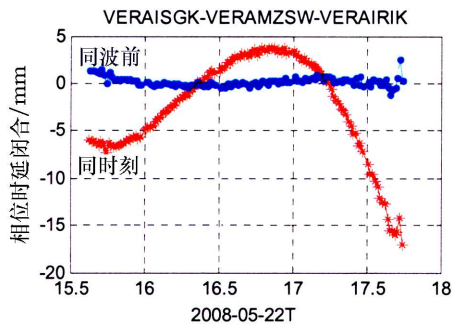


图3 差分相位时延闭合计算

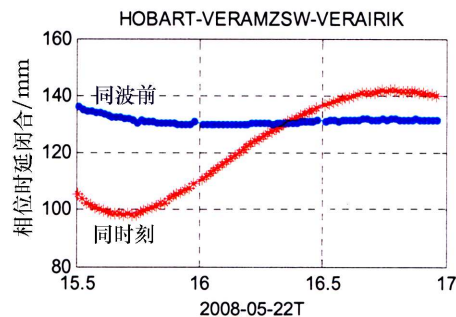


图4 存在周跳差分相位时延闭合计算

计算同一天 HOBART、MZSW、IRIK 3 测站组成的 3 条基线的差分相位闭合计算结果如图 4 所示。图中可见, 修正至同一波前的差分相位时延闭合计算结果波动显著减小, 但数据并不近于零, 而是接近于另外 1 个约 13 cm 的常数, 该值十分接近于 S 波段的一个波长, 这说明差分相位时延数据中存在周跳, 幅度大小为 1 周。该周跳在差分相位时延闭合计算时引入并被保留在计算结果中。比较图 3 与图 4 可知, 该周跳发生在与 HOBART 站有关的 1 条基线中, 因而基本可以判定周跳与 HOBART 站的数据有关。下面的例子将说明如何确定发生周跳的基线, 以及如何根据差分相位时延闭合计算结果对发生周跳的数据进行修正。对于 2008-10-16T13:30-14:00 的数据进行差分相位时延闭合计算, 结果如图 5 所示。

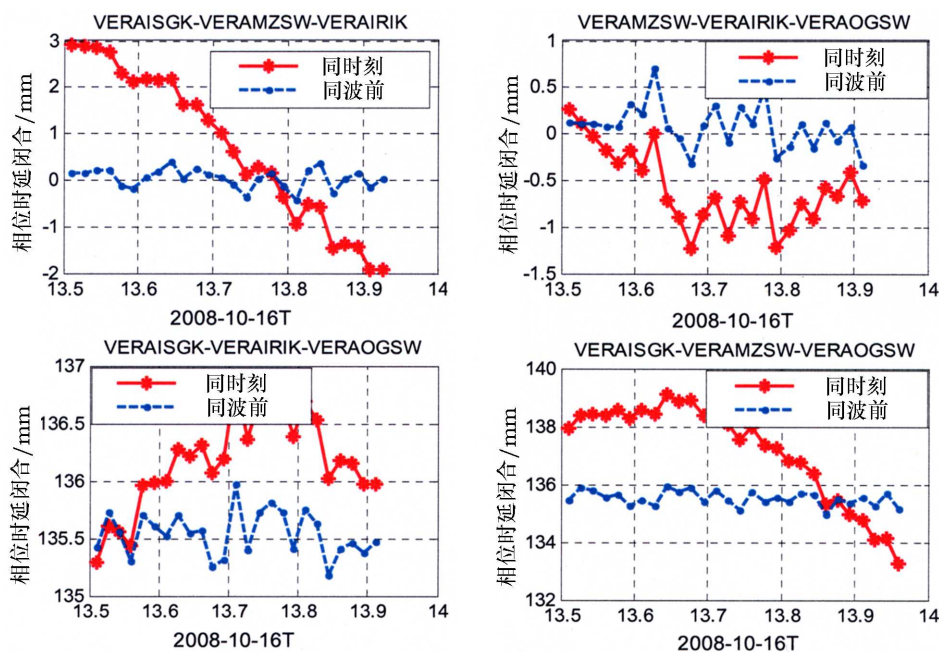


图 5 ISGK-IRIK-OGSW-MZSW 4 站中任意 3 站组合差分相位时延闭合计算

4 站中任意 3 站组合差分相位时延闭合计算结果如图 5 所示, 其中不含基线 ISGK-OGSW 的组合差分相位时延闭合, 而含有基线 ISGK-OGSW 的组合差分相位时延闭合计算结果存在周跳, 因而可以确定基线 ISGK-OGSW 数据中存在一个正向周跳。将基线 ISGK-OGSW 差分相位时延数据校正后重新进行差分相位时延闭合计算, 结果如图 6 所示, 可见校正后的差分相位时延闭合。

对于较长观测弧段的差分相位时延闭合计算结果表明, 不同时段数据质量存在差异, 有时可达数毫米。抖动较大的差分相位时延闭合计算结果表明, 差分相位时延数据本身抖动较大, 这主要是因为角距较大时, 大气和电离层的相位变化在 SBI 中还有一些影响所致。

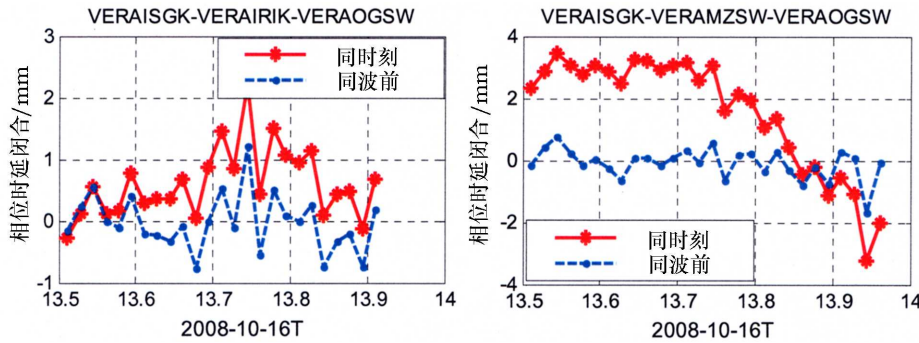


图6 修正 ISGK-OGSW 基线数据中周跳后的差分相位时延闭合计算

5 结 论

分析表明,差分相位时延闭合计算方法正确,经修正至同一波前的差分相位时延闭合计算结果闭合程度显著好于同一时刻差分相位时延闭合效果,这说明实测数据处理结果与用于差分相位时延闭合计算使用的同一波前的模型有较好的吻合,该方法可以实现对相位时延同一波前模型的验证。差分相位时延闭合计算结果可以用于 SBI 差分相位时延计算中的周跳监测与校正。差分相位时延闭合计算结果还可以用于差分相位时延数据质量的评定,那些相位抖动较大的差分相位时延数据,其差分相位时延闭合计算结果也呈现出较大的抖动。差分相位时延闭合计算的这些功能对于 SBI 处理结果的评估、校正与选用有着重要的意义。本文给出的差分相位时延闭合计算结果精度在 1 mm 精度水平,这对于模型的验证、周跳的监测与校正、数据质量的监视来说是足够的。若要求更高的精度,则需要具体分析导致 1 mm 量级偏差存在的原因,如数据本身变化范围、基线长度、同一波前差分相位时延修正方法等。

参考文献:

- [1] Iwata T, Takahashi M, Namiki N, et al. Journal of the Geodetic Society of Japan, 2001, 47: 558
- [2] Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Science, 2009, 323: 900
- [3] Kono Y, Hanada H, Ping J, et al. Earth Planets Space, 2003, 55: 581
- [4] Liu Q, Matsumoto K, Kikuchi F, et al. IEICE-JB, 2006, J89B-B: 602
- [5] Liu Q, Kikuchi F, Matsumoto K, Goossens S, et al. Radio Science, 2010, 45: RS2004
- [6] Liu Q, Kikuchi F, Tsuruta S, et al. IEEE Trans., Antenna and Propa., 2007, 55: 1466
- [7] Kikuchi F, Liu Q, Hanada H, et al. Radio Science, 2009, 44: 1
- [8] 郑为民, 张秀忠, 舒逢春. 天文学进展, 2005, 23: 272

Calculation and Analysis of Same Beam VLBI Differential Phase Delay Closure of Lunar Satellite

CHEN Ming^{1,2}, LIU Qing-hui¹

(1. *Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*; 2. *Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

Abstract: The paper focuses on verifying the differential phase delay model, detecting and correcting the cycle ambiguity existing in the differential phase delay data of same-beam VLBI. We confirm the methods of calculating the phase delay closure and the differential phase delay closure with the same wave front. We use the method to analyze the differential phase delay data of the same-beam VLBI from SELENE project. The result of the differential phase delay closure is less than several picoseconds. The method in the article can be used to verify the same wave front differential phase delay model, to detect and correct the cycle ambiguity existing in the differential phase delay data. It can also be used to monitor the fluctuations of the differential phase delay. These results are very useful to select the data for scientific research and to process same-beam VLBI data in real-time for navigation.

Key words: lunar exploration; Same-Beam VLBI; differential phase delay closure