

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2013.02.08

VLBI 天线参考点监测模型与分析

张津维^{1,2}, 李金岭¹

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在不同定向时模型化天线对测量时延的影响、提高台站坐标与源坐标等天测与测地参数的解析精度等方面, 高精度监测 VLBI 天线参考点和轴线偏差等参数, 具有重要意义。基于对天线旋转模式的特殊限定 VLBI 天线参数的常规监测方式, 占用望远镜工作时间, 且监测效率低、所得参数精度差。通过参数化 VLBI 天线的旋转运动, 及建立天线固连合作目标在局域网中坐标的数学模型, 有望实现全自动天线参数监测而不影响望远镜的正常观测运行时间。在监测模型构建、解算参数设置和约束条件选取等方面提出了见解, 仿真分析验证了其合理性与有效性, 并考察了 VLBI 天线上安装靶标的数目、VLBI 天线定向数目、靶标定位精度以及编辑靶标定位数据等因素对天线参数解析精度的影响, 所得初步结论供参考。

关键词: VLBI; 参考点; 轴线偏差; 监测模型; 仿真分析

中图分类号: P228.6

文献标识码: A

1 引 言

甚长基线干涉测量 (VLBI) 技术自 20 世纪 60 年代诞生以来, 已在天测与测地等研究领域获得了重要应用, 比如建立了以河外致密射电源为标志点的准惯性天球参考架, 与其他技术共同实现了国际地固参考架 (ITRF), 精密测定了现代板块运动和地球定向参数 (EOP) 等。VLBI 技术还应用于深空探测支持, 比如在我国月球探测工程中用于嫦娥卫星的测定轨。

当 VLBI 观测应用于天测与测地等研究领域时, 人们期望观测数据应仅反映天线参考点随 EOP 及其变化或板块运动等所产生的空间变化信息, 而与天线参考点在局域监控网内的空间变化无关。因设备维护、重要器件更换或地震等灾害性原因造成的参考点位置变化, 称为参考点自身的变化。如果忽视参考点自身的空间位置变化, 则有可能导致 VLBI 观测资料序列的不连续, 甚至误将参考点自身的变化归因于其它物理因素, 误导科学研究的开展。因而对 VLBI 天线参考点自身变化的高精度监测长期以来一直是天测与测地领域重点关注的研究课题之一^[1]。国际天测与测地 VLBI 服务 (IVS) 正在推进新一代 VLBI 测量系统, 即

收稿日期: 2012-11-23; 修回日期: 2013-01-23

资助项目: 国家自然科学基金 (11178024, 10973030)

VLBI2010^[2], 提出以 1 mm 精度监测台站的坐标与变化, 并实现 EOP 连续测定等。因此在提高 VLBI 天线参考点测量精度的同时, 设法实现对参考点的连续和实时监测具有重要意义。

至今较为成熟的 VLBI 天线参考点监测方法为: 特别限定天线的单向旋转, 从局域监测网对天线上安装的多个合作靶标进行定位测量, 通过数据解析获得旋转轴在局域网中的位置和定向^[3-5]。测量仪器包括全站仪、经纬仪和激光测距类仪器等。该方法的主要局限为效率低下, 由于获得有效监测数据必须令望远镜作特定模式的旋转, 所以会占用望远镜的有效观测时间, 不能实现 VLBI2010 系统所要求的全天 24 h 不间断观测。近年来提出并逐渐完善不再特别限定天线旋转模式的全新监测理念^[6-11], 即基于天线具体的座架情况和场地条件, 建立天线旋转的参数化数学模型, 进而将天线上某合作靶标的坐标与局域网联系起来; 通过一定技术手段获得局域网中的靶标监测数据, 进而解算天线旋转模型的参数, 实现对天线参考点等的监测。此种天线监测理念的优越性在于, 不影响望远镜的正常观测运行时间, 而是在天测与测地观测运行的同时来完成对天线的监测。如此有望进行 VLBI 天线的全时段、全自动化监测, 并可望实现高精度和高时效性监测。

本文针对新的 VLBI 天线监测理念, 在观测方程构建、解算参数设置和约束条件选取等方面提出了新见解, 并通过仿真计算讨论了多种可能影响天线参数解析精度的因素, 以设计测量方案, 发展资料分析软件, 为新监测理念的实际应用进行必要准备。

2 几何模型

2.1 VLBI 天线参考点

由于参考点通常位于 VLBI 天线设备内部, 是天线整体系统空间内的一个几何点, 往往无法直接进行定位观测, 只能通过间接测量来确定其空间位置, 即利用固连在天线系统结构上的靶标位置随着天线转动而发生的变化, 解析计算天线参考点的坐标、旋转轴定向、轴线偏差等天线参数。固连于 VLBI 天线上的靶标可以是 GPS 接收机, 通过与局域网中其他 GPS 接收机的同步观测获得其定位数据; 也可以通过自动全站仪获得合作目标在局域网中的位置数据。

理想天线模型中, 固连于地基上的主轴垂直相交于绕主轴旋转的副轴, 参考点定义为两轴的(几何)交点^[12]。实际条件下, VLBI 天线的口径通常超过 10 m, 比如上海佘山已经投入运行的 VLBI 天线口径为 65 m, 国际上有的天线口径达上百米。大尺度天线面板和支撑架构的机械加工与安装误差、建设施工复杂程度、材料局限性导致的天线重力和温度及压强等形变, 都可能导致天线两驱动轴的实际不相交、不垂直, 以及轴线间距随天线定向和随时间的变化, 表现为对观测时延的不同影响^[13,14]。通常将参考点(reference point)定义为两轴公垂线在主轴上的交点, 并将公垂线的长度称为轴线偏差(axis offset)。设法测定这些天线参数及随时间的变化, 有利于提高天测与测地 VLBI 观测时延的精度, 进而提高源坐标、站坐标等重要天测与测地参数的解析精度。

以上海佘山 25 m 天线为例, 其为方位-俯仰(Az-El)座架。在设计上, 天线固连于副轴,

虽然相对于天线固定的馈源相位中心不一定与主、副轴公垂线在副轴上的交点相重合,但是参考点与相位中心的空间距离与相对方位不随天线的不同定向而变化,此不重合对观测时延的影响可以归并于仪器时延,并在天测与测地 VLBI 资料处理中予以参数化解算。本文讨论仅局限于天线参考点和轴线偏差等的测定,不讨论馈源相位中心的具体位置问题。

2.2 天线测量模型

基于 VLBI 天线构架直接建立天线上某点 T 的坐标在局域网中的参数化数学模型,在天线常规观测期间设法获得 T 的局域网坐标观测值,进而通过资料解析确定模型化参数,实现对天线参数的测定。其显著优点为,无需为天线参数监测另外安排望远镜运行时间,而是在常规天测与测地观测期间伴随对天线参数的测量;有望实现对天线参数的全时段和自动化与高精度监测,因而在理念上与特别限定天线特殊旋转模式的常规监测存在重要区别。

新理念首先出现在一次会议报告中^[6],对模型进行了详细说明和公式推导。方法主要基于绕坐标轴的旋转变换、坐标轴定向改正和坐标系平移等^[6,7](下文简称为模型 I)。其后的主要改进为引入绕矢量旋转的变换^[10],使模型更加简洁和直观(下文简称模型 II)。

两模型均适用于各种两轴驱动天线架构,如 Az-EI 式、赤道式和 X-Y 式等。但为了方便讨论,以下仅以最常见的 Az-EI 式为例。如图 1 所示,相关参考架和主要特性为:

- (1) 本地参考架,代表天线周围的局域监控网,记作 $O-ijk$, O 为原点, (i, j, k) 为右手三元基,分别为东、北、上方向。假设已经通过常规的大地测量手段获得了各控制点的局域网坐标,并通过 GPS 观测定位等手段已经建立了局域网与 ITRF 之间的高精度转换关系,如平移、旋转等。
- (2) 望远镜参考架,原点为天线参考点 F ,自地面沿主轴(方位轴)方向 a 为坐标系第 3 轴,第 1、第 2 轴分别(基本)为东、北方向,构成右手三元基,记作 $F-12a$ 。
- (3) 天线参考架,与(可转动的)天线固连,原点为 a 、 e 公垂线在 e 上的垂足 S ,第 1 轴沿副轴(俯仰轴)方向 e 、第 2 轴为 f (公垂线)方向、第 3 轴对应于 a ,且 $f = a \times e$,记作 $S-ef3$ 。

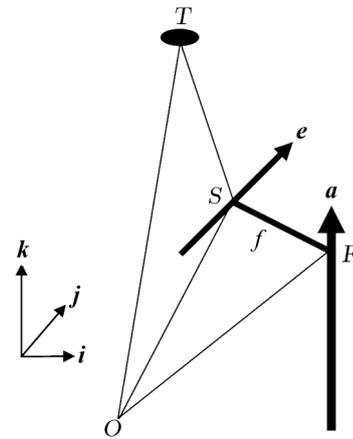


图 1 天线监测几何示意

模型 I 具体为:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix} + R_1(\beta)R_2(\alpha)R_3(A + \phi)R_2(\gamma) \begin{pmatrix} 0 \\ f \\ 0 \end{pmatrix} + R_1(E)R_1(E_0) \begin{pmatrix} b \\ a \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中,

- (1) a 、 b 、 E_0 用于描述与天线固连的合作目标 T 在 $S-ef3$ 中的坐标,分别为至 e 的距离、在 e 轴上的坐标、相对于 e 与 f 所在平面的仰角,均视为待求参数。
- (2) $R_i, i = 1, 2, 3$ 分别为绕第 1、2、3 坐标轴的右旋转换矩阵。

- (3) A 、 E 为天线相对于 $O-ijk$ 的定向, 即方位 (自北向东为正) 和俯仰 (自地平向天顶为正), 由天线控制系统给出读数, 视为已知量。
- (4) f 即轴线偏差, 视为待求参数。
- (5) γ 为 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 轴不垂直的偏差改正, 为待求参数。
- (6) α 、 β 、 ϕ 为 $F-12a$ 相对于 $O-ijk$ 的定向改正, 为待求参数。
- (7) $(x_0, y_0, z_0)^T$ 为参考点 F 在 $O-ijk$ 中的坐标, 为待求参数。
- (8) $(x, y, z)^T$ 为合作目标 T 在 $O-ijk$ 中的坐标, 通过观测获得, 为已知量。

总之, 式 (1) 通过获得 $(x, y, z)^T$ 、 A 、 E , 解算得到参考点坐标 $(x_0, y_0, z_0)^T$ 、轴线偏差 f 、轴向改正参数 α 、 β 、 ϕ 、 γ 及 T 在天线固连参考架 $S-ef3$ 中的坐标等。

模型 II 具体为:

$$OT = OF + R_a(A)(OS - OF) + R_a(A)R_e(E)ST \quad , \quad (2)$$

其中,

- (1) OT 即 T 在 $O-ijk$ 中的位矢, 为观测量。
- (2) OF 为参考点 F 在 $O-ijk$ 中的位矢, 不随天线定向变化, 为待求参数。
- (3) A 、 E 为天线定向的方位、俯仰角, 为已知量。
- (4) $R_a(A)$ 、 $R_e(E)$ 分别为绕 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 轴旋转 A 、 E 角度的转换矩阵。右手系中绕矢量 $\mathbf{r} = (l, m, n)^T$ 旋转 θ 角 (向原点方向逆时针为正) 的转换矩阵 $R_r(\theta)$ 为:

$$\begin{aligned} R_r(\theta) &= R_3(-\lambda)R_2(\phi - \pi/2)R_3(\theta)R_2(\pi/2 - \phi)R_3(\lambda) \\ &= \cos\theta \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} + (1 - \cos\theta) \begin{pmatrix} l^2 & lm & ln \\ lm & m^2 & mn \\ ln & mn & n^2 \end{pmatrix} + \sin\theta \begin{pmatrix} 0 & n & -m \\ -n & 0 & l \\ m & -l & 0 \end{pmatrix}, \quad (3) \end{aligned}$$

其中 (λ, ϕ) 为与 (l, m, n) 对应的球面坐标, 按常规定义。

- (5) OS 为 $A = 0$ 、 $E = 0$ 时 S 在 $O-ijk$ 中的位矢, 为待求参数。
- (6) ST 为目标 T 在天线固连参考架中的位矢, 为待求参数。简单起见, 令天线固连参考架在 $A = 0$ 、 $E = 0$ 时的坐标轴分别与 $O-ijk$ 的平行, 且原点位于 S 点, 随天线旋转, 记作 $S-ijk$ 。由于 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 不一定垂直, 因而 $S-ijk$ 与模型 I 中的 $S-ef3$ 不同。

总之式 (2) 以 OF 、 OS 、 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 、 ST 为待求参数, 且其中 OS 、 \mathbf{e} 、 ST 均对应于 $A = 0$ 、 $E = 0$ 时的天线状态。解算中附加以下约束^[10],

$$|\mathbf{a}| = 1 \quad , \quad |\mathbf{e}| = 1 \quad ; \quad (4)$$

$$(\mathbf{OS} - \mathbf{OF}) \cdot \mathbf{a} = 0 \quad , \quad (\mathbf{OS} - \mathbf{OF}) \cdot \mathbf{e} = 0 \quad . \quad (5)$$

即约束轴向矢量 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 的模为 1, 且公垂线分别与 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 垂直。参数解 OF 即参考点坐标, $f = |\mathbf{OS} - \mathbf{OF}|$ 即轴线偏差, 由 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 的解可判断轴向与设计指标的偏离, 并可获得两轴在 $A = 0$ 、 $E = 0$ 下的交角, 即 $\cos^{-1}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{e})$ 。

2.3 模型分析

模型 I 主要应用了绕坐标轴的右旋转换矩阵, 虽然形式相对复杂不便于理解, 但每一项或每一因子都具有明确的物理意义。模型 II 通过引入绕矢量的旋转, 使得形式简单直观。而且相比于模型 I, 用于描述合作目标与天线相对位置的天线固连参考架在模型 II 中的定义 ($S-i\text{jk}$) 非常简洁, 合作目标 T 的三维坐标易于理解。两模型经资料解析可直接或经参数简单计算给出参考点坐标与轴线偏差, 模型 I 得到的天线轴向改正参数 α 、 β 、 ϕ 、 γ 与模型 II 得到的旋转轴空间定向 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 之间具有确定的关系, 不难证明:

$$\gamma = \pi/2 - \cos^{-1}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{e}) \quad ; \quad (6)$$

以及令 $\mathbf{v} = (v_1 \ v_2 \ v_3)^T = R_2(-\gamma)\mathbf{e}$, 则

$$\alpha = \tan^{-1}(v_3 / \sqrt{v_1^2 + v_2^2}) \quad ; \quad (7)$$

令 $\mathbf{u} = \mathbf{v} \times \mathbf{a}$, 则

$$\beta = \tan^{-1}(u_3 / \sqrt{u_1^2 + u_2^2}) \quad ; \quad (8)$$

令 $\mathbf{w} = R_2(-\alpha)\mathbf{v}$, 则

$$\begin{cases} \phi = -\cos^{-1}(w_3 / \sqrt{w_1^2 + w_2^2}), & w_2 \geq 0 \\ \phi = \cos^{-1}(w_3 / \sqrt{w_1^2 + w_2^2}), & w_2 < 0 \end{cases} \quad (9)$$

可见, 两模型基本上是等价的, 主要表现为形式上的区别。

但是仔细考察式 (1), 除了合作目标在天线固连参考架中的坐标描述略显复杂之外, 主要的疑问为望远镜参考架 $F-12a$ 至本地参考架 $O-ijk$ 的坐标转换参数设置, 即 $R_1(\beta)R_2(\alpha)R_3(A+\phi)$ 。方位角 A 一般自北向东计量, 即顺时针为正, 而 α 、 β 、 ϕ 为坐标系转换的 3 个欧拉角, 逆时针为正, 因而将 A 与 ϕ 不加区别地表示为 $R_3(A+\phi)$ 是不确切的。 $R_1(\beta)$ 、 $R_2(\alpha)$ 也被表示成为左旋矩阵^[6], 这些都是值得讨论和有待分析检验的。

参考图 1 并考察式 (2) 及解算参数设置, 根据轴线偏差的定义有

$$\mathbf{OS} = f(\mathbf{a} \times \mathbf{e}) + \mathbf{OF} \quad , \quad (10)$$

即 \mathbf{OF} 、 \mathbf{OS} 并非独立, 式 (2) 中将两者同时设置为待解参数的方式是值得商榷的, 很可能对方程的解算条件、参数解算的收敛速度和解算精度造成不良影响。以上海佘山 25 m 天线为例, 点 F 至地面约 15 m, 但是 f 仅厘米级^[4]。其他实用座架还有赤道式、X-Y 式等, 但是都不可回避天线运行时的地面物体遮掩问题, 因而主轴地面高度必须大于天线半径, 甚至可达 50 m。除了特别设计的偏轴天线系统之外, f 不可能大至米级, 因而 \mathbf{OF} 、 \mathbf{OS} 之间的相关性通常会很强 (地面高度相近)。为此将 (2) 式调整为

$$\mathbf{OT} = \mathbf{OF} + R_a(A)f(\mathbf{a} \times \mathbf{e}) + R_a(A)R_e(E)\mathbf{ST} \quad , \quad (11)$$

即直接将 f 作为待求参数, 而非导出参数, 以避免 \mathbf{OF} 、 \mathbf{OS} 之间可能存在的强相关。

关于式 (4) 所示约束条件, \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 矢量的坐标分量或对应的球坐标是通过式 (3) 进入式 (2) 或 (11) 的, 理论上必为单位矢量, 因而式 (4) 约束条件具有合理性。但是对于式 (5) 所示约束条件, 由式 (10) 立得 $f(\mathbf{a} \times \mathbf{e}) \cdot \mathbf{a}$ 、 $f(\mathbf{a} \times \mathbf{e}) \cdot \mathbf{e}$ 必为 0, 且无关于 f 、 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 的具体取值, 因而应属于无效约束, 甚至可能对法方程的解算条件带来不利影响。

为检验关于监测模型、法方程解算条件、参数设置和约束条件的上述讨论, 以佘山 25 m 天线为参考设计进行了仿真验算, 并通过仿真结果分析可能影响参数解析精度的因素, 包括观测数据的精度, 观测数据的数目, 待解参数初值的精度, 靶标在 VLBI 天线上的分布, 无效数据的剔除等。

3 仿真分析

给定 VLBI 天线参数与靶标在天线上的安放位置等作为参数真值 $True$, 带入监测模型 (式 (1)、(2)、(11)) 计算靶标在局域网内坐标, 叠加一定的白噪声后作为靶标在局域网中的定位观测值 $O(\mathbf{X})$ 。对参数真值 $True$ 置偏后作为参数估值 Est 的初值采用值, 由监测模型计算观测量的理论值 $C(\mathbf{X})$ 。由于监测模型为解算参数的非线性函数, 所以需要依照常规进行线性化:

$$O - C = BdEst + v, \quad (12)$$

其中 B 为参数偏导数矩阵、由初值 Est 确定, $dEst$ 为对参数初值的改正, v 为拟合残差。式 (12) 经最小二乘法拟合可解算得到 $dEst$, 经迭代获得参数估值 $Est + dEst$ 。

无特殊说明下的仿真条件设置为 4 个靶标沿 VLBI 天线边缘均匀分布, 天线定向数为 60, 俯仰范围为 $10^\circ \sim 82^\circ$ 、步长 8° , 方位范围为 $0^\circ \sim 360^\circ$ 、步长由设定的观测总数确定; 天线每一定向的 (A, E) 由驱动系统给出, 视为准确已知, 天线静置时的 \mathbf{e} 轴约为东西定向。靶标三维定位观测的各维坐标标准偏差设为 $\sigma_0 = 5 \text{ mm}$, 参数初值采用值相对于真值的偏置为 5%, 即 $Est = (1 - 5\%)True$; 解算参数改正值的绝对值小于 1×10^{-6} 或迭代求解次数大于 50 时终止迭代计算。

由于所添加的白噪声观测误差的影响, 即使在相同设置条件下的重复计算结果之间也存在较强的波动。虽然波动不影响解算参数总体变化趋势的判断, 但为了尽量压缩白噪声的影响, 此处仿真计算均采取了多次独立计算平均结果的形式。

3.1 监测模型检验

在设置的仿真条件下分别考察式 (1)、(2)、(11) 所示监测模型的可解算性、参数收敛速度、参数估值 Est 与真值 $True$ 之差、形式精度、拟后残差、加权中误差和归一化 χ^2 等。

具体验算表明, 将 α 、 β 、 ϕ 分别或全部作为左旋角度时式 (1) 均发散, 只有作为右旋坐标系之间 3 个欧拉旋转角时才能得到收敛的参数解。式 (2) 的参数收敛速度很慢 (上百次迭代), 尤其是 OF 、 OS 垂向分量之间存在强烈反相关, 且增加式 (4)、(5) 约束条件后的情况无明显改观。

在完全相同的设置条件下改用式 (11), 验算表明一般经 5~10 次迭代后参数即收敛至毫

米量级水平, 形式误差与 $Est - True$ 量级相当。增加式 (4) 约束后的参数收敛速度略为减慢, 但估值形式误差和 $Est - True$ 略有改进, 表明可以应用此约束。增加式 (5) 约束后的参数形式误差无显著变化, 但 $Est - True$ 明显变差, 尤其是对 f 估值的不利影响特别显著, 表明不可应用此约束。

另外, 给定 α 、 β 、 ϕ 、 γ (均右旋为正) 等天线轴向改正参数, 由式 (1) 仿真生成观测量, 并由式 (11) 求解参数值, 将所得 \mathbf{a} 、 \mathbf{e} 代入式 (6)–(9), 估算所得的天线轴向改正参数值与设定值相符, 表明 (11) 式不仅简洁明了, 而且完全可以替代式 (1) 所示监测模型。总之, 仿真验算表明上述关于天线参数监测模型的分析是合理和有效的。

3.2 参数拟合精度检验

利用式 (11) 的仿真计算分别考察了靶标数目、天线定向数目、靶标定位观测精度、观测数据编辑、靶标沿天线边缘分布和参数初值动态范围等因素对天线参数拟合精度的影响。

3.2.1 观测资料个数对参数拟合的影响

分别只改变靶标数目, 从 2 逐渐增加至 10, 或只改变天线定向数目, 从 50 逐次增加 30 至 320, 进行 15 次仿真计算取平均。结果如图 2、图 3 所示, 具体为参考点坐标估值与真值之差、轴线偏差估值与真值之差的绝对值 (下文简称为估值的偏差) 随观测资料数目的变化。可见随着观测资料数目的增加, 参数估值相对于真值的偏差逐渐减小。靶标的数目或天线定向数目的增加, 都与靶标空间定位点数目的增加相对应, 即随观测方程个数的增加, 参数拟合精度有所提高, 这是易于理解的。

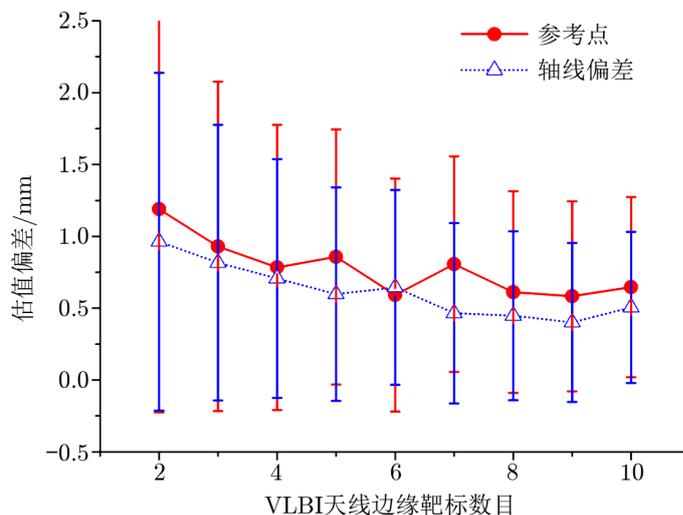


图 2 参考点坐标与轴线偏差估值偏差随靶标数目的变化

另外如图 2、图 3 所示, 当靶标或天线定向数目增加到一定程度时, 参数拟合精度的优化速率逐渐减慢并趋向于平缓, 使用这种方法很难再有明显提高。要进一步提高拟合精度, 需要通过其他方法, 例如提高靶标定位观测的精度。

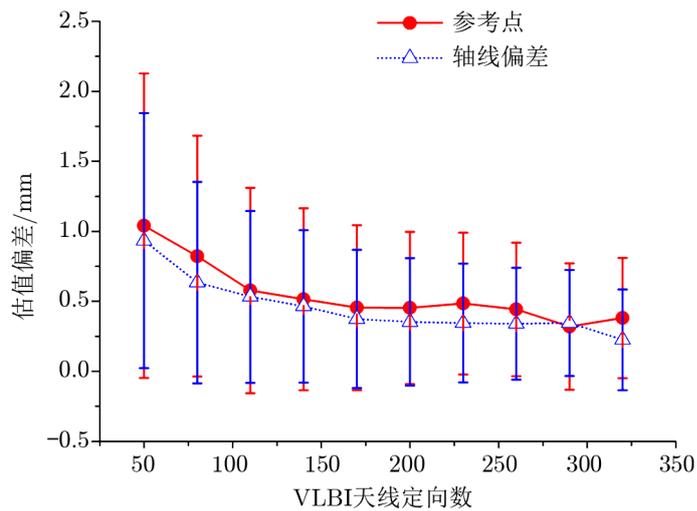


图3 参考点坐标与轴线偏差估值偏差随 VLBI 天线定向数的变化

3.2.2 靶标定位精度对参数拟合的影响

将靶标定位观测的坐标分量误差 σ_0 从 5 mm 逐次增加 5 mm 至 50 mm，参数估值的偏差如图 4 所示，可见随着观测误差的累次增加，参考点坐标和轴线偏差的估值偏差近似呈线性增加。在相同观测数量条件下，拟合精度由观测数据质量决定，即由观测误差决定。在 VLBI 天线监测中，尽可能提高靶标定位观测精度可望提高天线参数的监测精度。

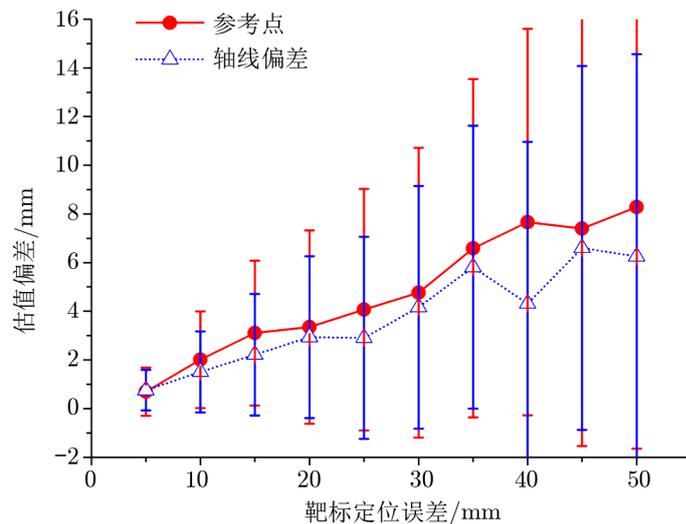


图4 参考点坐标与轴线偏差的估值偏差随靶标定位误差的变化

3.2.3 数据编辑

在实际监测中，因为障碍物遮掩、仪器故障、VLBI 天线更换观测目标过程中的靶标单点

定位所需时间不足等因素, 均可导致部分无效的靶标定位数据的出现。如果不加区分而直接使用所有观测数据, 将会降低参数拟合结果的精度。因此需要对靶标定位数据进行必要的编辑, 以优化对天线参数的估值, 提高监测精度。

实际资料解析中可对靶标定位数据进行粗选和精选。所谓粗选为: 依据天线参数估值和天线定向资料 (A, E) 等预估 $C(\mathbf{X})$, 并与实测数据 $O(\mathbf{X})$ 进行比较, 直接将 $O - C$ 大于某设定阈值的观测数据作为无效数据。所谓精选为: 在最小二乘法拟合过程中采用统计方法进一步对观测数据进行遴选, 比如剔除拟后残差较大的靶标定位数据点。在本次仿真计算中没有实际观测数据供使用, 因而不进行数据粗选, 只进行根据拟后残差的数据精选, 以考察参数拟合效果。

令天线定向数目从 35 逐次增加 5 至 80, 选择其中 10% 的靶标定位数据附加额外的误差 $\varepsilon = 10 \text{ cm}$ 之后作为观测值 $O(\mathbf{X})$, 与其他数据一并进行最小二乘法拟合并考察拟后残差 $psig(i)$, 剔除数据的阈值条件为:

$$|psig| \geq (2 \times std) \quad (13)$$

其中 std 为拟后残差的加权中误差。

仿真计算表明, 在未作观测资料编辑时参考点和轴线偏差的估值偏差分别约为 8 mm 和 4 mm, 差异显著, 如图 5 实线所示。根据阈值条件式 (13) 数据编辑后, 额外附加了较大误差的 10% 的数据被全部剔除, 尚有约 2% 的其他数据因所加随机噪声较大的缘故而被剔除, 剩余观测约 88%, 估值偏差如图 5 虚线所示。可见对数据进行编辑后的效果是非常明显的, 有利于提高参数拟合的精度。

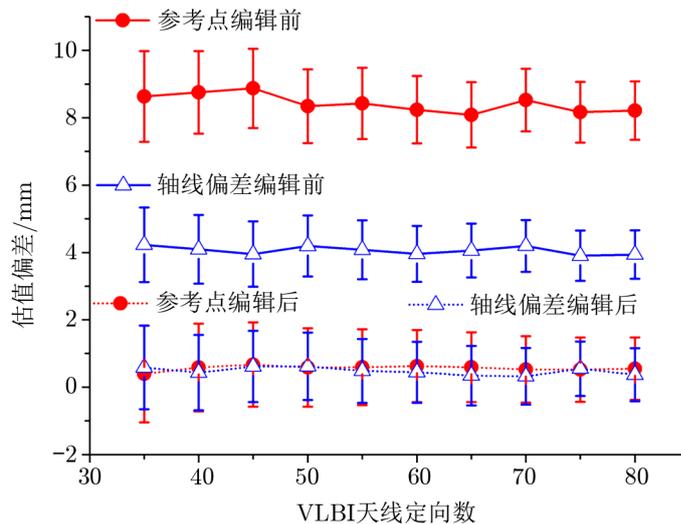


图 5 参考点坐标与轴线偏差估值偏差在数据编辑后的变化

3.2.4 靶标分布对拟合精度的影响

以上仿真计算中的靶标都是沿天线外缘均匀安置, 在其他设置条件不变的前提下令天线

定向数目从 35 逐次增加 5 至 80, 分靶标沿天线外缘均匀和非均匀两种分布方式, 观察参数拟合情况 (如图 6 所示), 可见靶标的分布是否均匀对参数拟合的影响不显著。由此推论, 即使因靶标非均匀分布、天线空间定向非均匀分布, 或经数据编辑后导致了靶标定位点的非均匀空间分布等, 只要有效数据的数量和精度足够, 都可以获得可靠的天线参数估计。

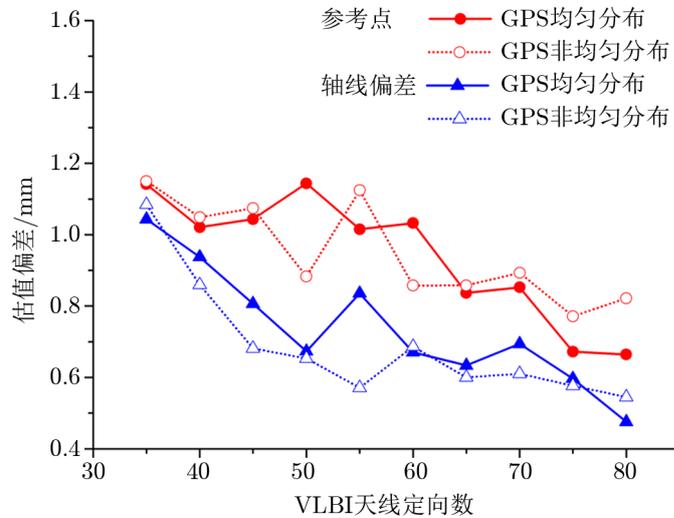


图 6 参考点坐标与轴线偏差估值偏差随靶标沿天线外缘分布方式的变化

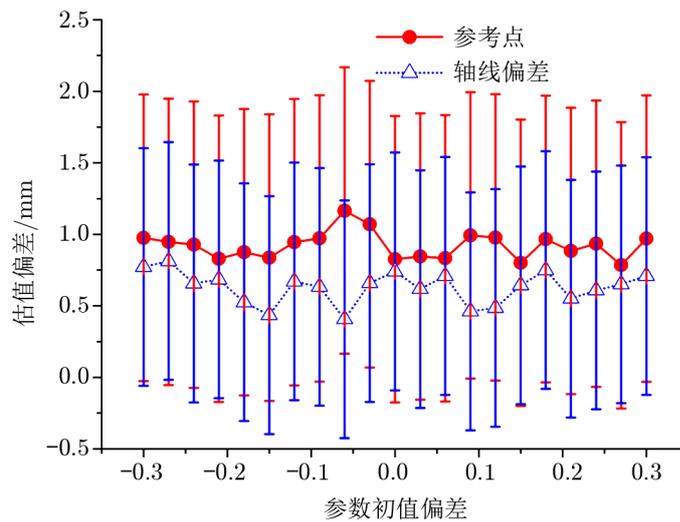


图 7 参考点和轴线偏差的估值偏差随参数初值采用值偏差的变化

3.2.5 参数初值的动态范围

逐次改变拟合参数初值采用值相对于真值的偏置因子, 重复计算 15 次, 取平均的参数估

值, 结果如图 7 所示, 可见初值采用值分别从真值的 70% 变化至 130% 时, 最终参数估值均收敛于同一精度水平, 表明参数初值采用值的动态范围较广, 误差方程解算条件稳定。

4 结束语

仿真验算结果表明, 在 VLBI 天线上安置靶标, 用以监测天线参考点、轴线偏差以及转动轴定向的理念是可行的; 不需要对天线旋转方式做特别限制, 可以在 VLBI 天线进行常规天测与测地观测的同时实现对天线参数的监测, 并有望实现高精度、实时监测。这对于实现 VLBI2010 技术指标下的高精度站坐标连续测量具有积极意义。

仿真验算表明本文针对监测模型、参数设置、约束条件选取等方面的分析是合理的, 影响天线参数监测精度的主要因素为靶标的数目、天线定向数目以及靶标定位观测的精度, 同时表明对靶标定位观测数据进行编辑是必要的。

实际监测中遮掩、仪器和数据处理等方面的问题很难避免, 而且在 VLBI 天线更换观测目标的过程中靶标在局域网中的坐标是 (较为快速地) 变化的, 这时的定位精度肯定不高。由驱动控制系统给出的 VLBI 天线定向的方位俯仰读数不可避免存在一定的系统差和偶然差, 将其作为准确已知的输入参数显然将影响天线参数的实际监测精度。靶标定位数据的处理、软件处理的自动化等也值得考虑。总之还需要进一步的分析、核实与实践检验。

参考文献:

- [1] Eschelbach C, Haas R. Proceeding for the 16th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astromomy, 2003, 203: 109
- [2] Petrachenko B, Niell A, Behrend D, et al. IVS Annual Report 2008, NASA/TP-2009-214183, 2009: 13
- [3] Dawson J, Sarti P, Johnston G, et al. Journal of Geodesy, 2006, 81: 433
- [4] 李金岭, 乔书波, 刘鹏等. 武汉大学学报信息科学版, 2010, 35: 1387
- [5] 李金岭, 刘鹏, 乔书波等. 测绘科学, 2010, 35: 76
- [6] Lösler M. Journal of Applied Geodesy, 2008, 2: 233
- [7] Lösler M. Journal of Surveying Engineering, 2009, 135: 131
- [8] Neidhardt A, Lösler M, Eschelbach C, et al. IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, 2010: 133
- [9] Schmeing B, Behrend D, Gipson J, et al. IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, 2010: 138
- [10] Kallio U, Poutanen M. IVS 2010 General Meeting Proceedings, NASA/CP-2010-215864, 2010: 360
- [11] Lösler M, Hennes M. Proceeding of the FIG2008 — Measuring the changes, 2008
- [12] Johnston G, Dawson J. Geoscience Australia record, 2004, 19: 27
- [13] Sarti P, Sillard P, Vittuari L. J Geodesy, 2004, 78: 210
- [14] Sarti P, Abbondanza C, Petrov L, et al. J Geodesy, 2011, 85: 1

Analysis of the Monitoring Model of VLBI Antenna Reference Point

ZHANG Jin-wei^{1,2}, LI Jin-ling¹

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

Abstract: The monitoring of the reference point and axis offset of VLBI antenna with high precision is of importance to modeling the spatial variation of delay observations as the changing of antenna orientation, the improvement of determination precision of astrometric and geodetic parameters such as station and source coordinates and so on. The nowadays ordinary monitoring method of VLBI antenna is mainly based on some special restrictions to the rotation mode of antenna, which would occupy the effective time of operation of the telescope, the efficiency of the monitoring and the precision of determined parameters are limited. By parameterizing the rotation of VLBI antenna and modeling the coordinates of targets fixed on VLBI antenna in the local control network, it is expected to perform automatic monitoring of antenna parameters without any interruption of normal observation operations of the telescope. Some insights and analysis are presented concerning the establishment of monitoring model, the settings of parameters and the selection of constraints to observation equations, which are verified via simulation analysis to be rational and effective. The effects of the number of targets, the number of antenna orientations, the precision of target positioning observations and the selection of target positioning observations on the determination precision of antenna parameters are also analyzed, and some preliminary conclusions are given for reference for readers.

Key words: VLBI; reference point; axis offset; monitoring model; simulation analysis