

空间 VLBI 观测量估计大地测量参数的模拟计算

魏二虎¹ 刘经南^{2,3} 李征航¹ 施 闯³

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

(2 武汉大学校长办公室, 武汉市珞珈山, 430072)

(3 武汉大学卫星导航定位技术研究中心, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要:介绍了研究空间 VLBI 在大地测量等领域应用的意义,探讨了空间 VLBI 的观测量类型、观测模型及其涉及的大地测量所关心的参数;并采用 1980~2004 年的 VLBI 观测数据进行了计算,对大地测量所关心的几种参数的计算结果进行了分析。

关键词:空间 VLBI; 观测模型; 大地测量参数

中图法分类号:P228.6

空间 VLBI 能够使得 VLBI 基线的延伸超过地球的实际尺寸,在空间这样的高度上观测,没有对流层的影响,受到的电离层影响很小,从而可能在更高和更低频率上观测,因此,需要研究新的模型来应用于天体测量、大地测量、地球动力学和地球物理等领域。

笔者在研究有关 VLBI 和空间 VLBI 技术的基础上,初步编制了模拟空间 VLBI 观测量解算大地测量参数的软件 PANDA-SVLBI。目前,对 VSOP 实测的数据通过空间 VLBI 大地测量实验(GEDEX)表明^[1],距离空间 VLBI 延迟残差达到了几 m,而且 HALCA 卫星每天只能对准一个射电源,因此,空间 VLBI 实测数据从质量和数量上不能满足精密估计大地测量参数的要求。本文采用 VLBI 的真实观测数据进行了软件调试和计算,并进行了分析。

1 空间 VLBI 观测模型及涉及的大地测量参数

1.1 空间 VLBI 观测量

在空间 VLBI 中,由于两个联合观测的天线中至少有一个在空间,可能存在以下三种类型的观测量:①地面-地面的时间延迟和延迟率,这同

地基 VLBI 观测量相同。②地面-空间的时间延迟和延迟率,是地面天线和安装在空间 VLBI 卫星上的天线之间的观测量。③空间-空间的时间延迟和延迟率,是安装在两个空间 VLBI 卫星上的天线之间的观测量。其中,第一种观测量已经有很详细的研究,第三种观测量将只有在至少发射了两个空间 VLBI 卫星时才能实现,因此,第二种观测量是最重要的观测量类型。

1.2 空间 VLBI 地面-空间的观测模型及有关的大地测量参数

如图 1 所示^[2],在空间 VLBI 网络中,一个地球轨道中的 VLBI 望远镜 S 和一个地面 VLBI 测站 G 所形成的地面-空间时间延迟(τ)和延迟率($\dot{\tau}$)的几何关系在协议惯性天球坐标系(CIS)中可表示为:

$$\tau = - X_B \cdot X_Q / c \quad (1)$$

$$\dot{\tau} = - (X_B \cdot \dot{X}_Q + \dot{X}_B \cdot X_Q) / c \quad (2)$$

式中,地面测站 G 到卫星 S 的基线向量为 $X_B = X_S - X_G$,其中,卫星坐标矢量 X_S 又是卫星轨道参数 $E_i (i = 1, \dots, 6)$ 和重力场与非重力场等参数 $P_k (k = 1, 2, \dots, m, \dots, n)$ 的函数,这样的几何关系就变成了动力学关系;地面测站 G 的 CIS 坐标可以通过将它的协议地球坐标系(CTS)坐标 X_G 经过岁差(P)、章动(N)和地球自转(UT1-UTC, x_p ,

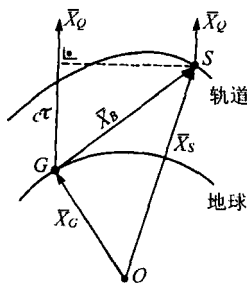


图1 空间 VLBI 地面-卫星基线的几何图形
Fig.1 Geometry Graph of Ground to Satellite Baseline Space-VLBI

y_p) 转换而获得。

再考虑测站钟差和钟漂率 ($\Delta C_0, \Delta C_1$), 空间 VLBI 的时间延迟成为以下参数的隐函数:

$$\tau = \tau(X_Q, E_i, P_k, X_G, UT1 - UTC, x_p, y_p, N, P, \Delta C_0, \Delta C_1) \quad (3)$$

$$\tau = \tau(X_Q, E_i, P_k, X_G, UT1 - UTC, x_p, y_p, N, P, \Delta C_1) \quad (4)$$

式(4)中所包括的大地测量的主要估计参数是:

- ① 测站参数: X_G, X_S 或卫星的开普勒轨道元素 $E_i(a, e, i, \omega, \Omega, M)$ 。
- ② 天体测量参数: 观测射电源 l 的位置 X_Q , 即赤经、赤纬坐标 (α, δ) 。
- ③ 连接 CIS 和 CTS 的参数: 地球自转参数序列 ERP's $(x_p, y_p, UT1 - UTC)$ 、章动参数(黄经章动 $d\phi$ 和黄赤交角章动 $d\epsilon$)。
- ④ 固体潮参数: 固体潮勒夫数 (η, λ) 。
- ⑤ 多余参数: $(\Delta C_0, \Delta C_1)$ 、大气天顶延迟 τ 。其中岁差参数可以通过公式直接计算而出^[3]。

2 PANDA-SVLBI 软件的模型和构建

2.1 PANDA-SVLBI 软件的模型

2.1.1 插值模型

在计算过程中, 线性化观测方程中需要每一个观测时刻的瞬时天球坐标系下的射电源坐标和 VLBI 测站在每个观测时刻的瞬时地球坐标系坐标, 而射电源星历表中查取的观测射电源坐标只有一组协议天球坐标 (J2000.0 天球参考系), 且从 IERS 通过网站 <http://hpiers.obspm.fr/eop-pc> 发布的地球定向参数 (EOP) 序列 (即连接 CIS 和 CTS 的参数) 是一天一组数据; 还有, 对连接 CIS 和 CTS 的参数产生影响的太阳、行星和月球的历表参数 (DE405/LE405) 也没有按照 VLBI 的观测时刻给出。因此, 都需要内插每一个观测时刻的数据, 才能计算获得连接 CIS 和 CTS 的 5 个

参数 ($x_p, y_p, UT1 - UTC, d\phi, d\epsilon$) 在每个观测时刻的近似值。PANDA-SVLBI 软件中采用了 IERS 推荐的拉格朗日插值法。

2.1.2 海洋潮汐对 UT1 与极移的影响模型

在软件中, 采用了 Eanes 模型 (IERS 2000 协议) 来计算海洋潮汐对 UT1 与极移的影响, 因为它考虑到了更多的潮汐条件。

2.1.3 章动计算模型

软件中包含了三种章动模型 (IAU 1980 NUT MODEL、HERRING MODEL 和 MBH_2000 MODEL), 其中第一种作为缺省选项, 在研究过程中可根据具体情况而选择。

2.1.4 测站改正和观测值大气改正

对 VLBI 测站进行的改正因素有地球固体潮汐引起的测站坐标改正, 以及由 VLBI 天线变形、海洋负荷、大气负荷与长期地极点潮汐引起的改正、天线轴偏移量改正, 对观测延迟采用的 Niell 的对流层模型等。

2.1.5 参数估计模型

传统的 VLBI 数据处理软件中一般采用最小二乘法或最小二乘配置的方法, 本文利用卡尔曼滤波技术^[4]和空间 VLBI 观测量解算大地测量的参数时, 将用随机模型取代原来最小二乘方法中的测站时钟和大气延迟的多项式参数模型, 估计参数也分为非随机参数和随机参数两类。非随机参数包括地面 VLBI 测站位置、空间 VLBI 卫星的开普勒轨道参数、射电源坐标和连接 CIS 和 CTS 的参数等, 而随机参数则包括用于表示钟和大气延迟扰动的随机过程分量。

2.2 PANDA-SVLBI 软件的构建

目前, 有很多软件^[5]包括观测量模拟、误差分析、数据相关和处理真实数据与模拟数据来估计大地测量参数, 但很少有关于处理空间 VLBI 数据的研究软件。本文采用的 PANDA-SVLBI 软件的基本结构如下。

- 1) 数据预处理。① 读入观测数据: 观测数据包括 VLBI 或空间 VLBI 的时间延迟和时间延迟量、IERS 预报的地球定向参数 EOP's; 从国际天球参考框架 (ICRF) 表中读取被观测的射电源协议天球坐标; 从 ITRF 表中读取参与观测的 VLBI 测站协议地球坐标系坐标; 各 VLBI 测站观测的测站改正数据或通过模型计算的测站改正数据, 如气象、固体潮汐、海洋潮汐、天线变化数据。
- ② 数值内插和坐标转换: 将 IERS 预报的地球定向参数 EOP's 内插到每个观测时刻; 将观测射电源的协议天球坐标转换为每个观测时刻的瞬时天

球坐标;将观测射电源的协议天球坐标转换为每个观测时刻的瞬时天球坐标。③ 观测量改正:VLBI 或空间 VLBI 的时间延迟或延迟率观测量进行气象改正、相对论效应改正等。

2) 结果平差计算。采用卡尔曼滤波技术来估计大地测量参数^[4]。

3 实例计算

3.1 模拟条件和方法

如前所述,VSOP 项目的空间 VLBI 实测数据从质量和数量上不能满足精密估计大地测量参数的要求,无法检验 PANDA-SVLBI 软件,只有获得 1980~2004 年的国际 VLBI 观测资料进行模拟计算。

在本文的数据处理中,将在同一期中观测时间最长的一个地面观测站台站假设为空间观测站,用它在每一个观测时刻的坐标代替卫星的开普勒轨道参数,地面测站坐标、射电源坐标和 CIS 与 CTS 连接参数的先验值来自 IERS^[4] 年报(2004)中所发表的结果。

在这次估计大地测量参数的试验中,固定了 VLBI 台站坐标和射电源位置,将其余参数如测站时钟误差和钟漂、大气天顶延迟、CIS 和 CTS 的连接参数以及空间 VLBI 卫星坐标改正数作为未知数来求解。

3.2 1980~2004 年的数据处理

首先将 VLBI 测站坐标和射电源位置固定,解算出 7 d 间隔的 1980~2004 年 4 月的 CIS 和 CTS 连接参数结果,绘制了极移图形如图 2 所示,与国际极移服务发表的对应时间段的极移形状^[2]基本相同。同时,还绘制了图 3 和图 4,它们分别显示了黄经 ϕ 和黄赤交角 ϵ 的章动变化。图中, ϕ 和 ϵ 随时间频繁上下周期性变化,分别就是黄经章动和黄赤交角章动的短周期项(一般有 4.7 d 到几十 d)和周年项,其横断面图接近一个椭圆;而在长时间段内所显示的周期性变化就是相应的主周期章动,周期大约为 18.6 a(合 6 789 d),由于数据量有限,只看到了不到两个周期的变化。图 5 绘出了 1980~2004 年黄经和黄赤交角章动的变化图。这些结果表明计算结果符合岁差和章动的理论变化^[3]。

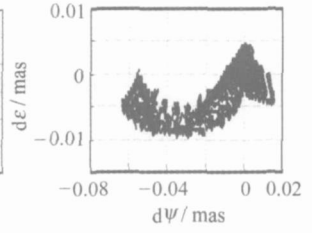
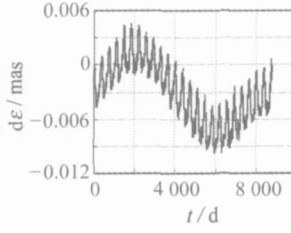
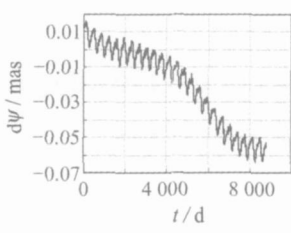
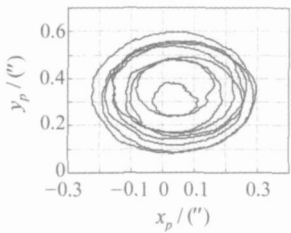


图 2 地球极移轨线
Fig.2 Track of Earth Polar Motion

图 3 黄经章动轨线
Fig.3 Track of Nutation $d\phi$

图 4 黄赤交角章动轨线
Fig.4 Track of Nutation $d\epsilon$

图 5 黄经和交角章动轨线
Fig.5 Track of Nutation $d\phi$ and $d\epsilon$

3.3 2003 年的数据精密解算和分析

由于 1980~2004 年 4 月的数据量太大,因此选择了 2003 年的 VLBI 计算进行分析。在解算 2003 年每隔 7 d 的 VLBI 观测数据时,其中 5 月 7 日的的数据量太大,没有计算出成果,还有 7 月 31 日、10 月 9 日和 12 月 29 日的的数据质量太差,处理结果误差太大而没有采用。在解算参数中, x_p 、 y_p 、UT1、 $d\phi$ 、 $d\epsilon$ 等 5 个参数在 2003 年的平均解算精度分别为 0.16 mas、0.13 ms、0.006 9 ms、0.29 mas 和 0.12 mas。图 6 为 2003 年的极移轨线图。

3.4 2004 年的数据解算分析

为考察 PANDA-SVLBI 软件系统解算 CIS 和 CTS 连接参数的可靠性,对 2004 年 1~4 月的资料进行了 CIS 和 CTS 连接参数的解算,并将其中观测日期与 IERS 年报(2004)的 CIS 和 CTS

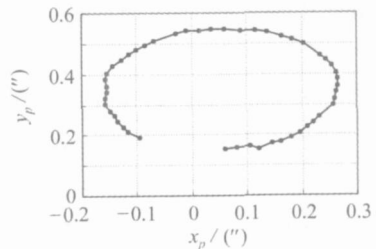


图 6 2003 年极移轨线
Fig.6 Track of Earth Polar Motion (2003)

连接参数的表列日期一致的结果进行了比较,发现两个序列符合得非常好,大多数小于 1 mas。取绝对值后的平均差中, x 、 y 极移的平均值为 1.24 mas, UT1 为 0.82 mas, $d\phi$ 为 0.57 mas, 而 $d\epsilon$ 为 0.68 mas, $d\phi$ 、 $d\epsilon$ 取平均后为 0.63 mas。另外,与 2003 年的计算结果相比较,除了 $d\phi$ 、 $d\epsilon$ 的

计算精度提高较小外,其他参数 x 、 y 、UT1-UTC 的平均解算精度分别提高了 6%、8.3%、51%,这说明 2004 年的观测资料精度比 2003 年又有很大的提高。

4 结 语

目前,PANDA-SVLBI 软件在固定 VLBI 测站坐标和射电源位置时,解算 CIS 和 CTS 连接参数的精度比较满意。其次,解算近几年的 VLBI 数据时,发现增加了很多新的射电源目标和新的地面 VLBI 测站,但目前的射电源历表中还缺乏它们准确的位置信息,地面 VLBI 测站列表中没有这些新测站的精确坐标及测站位置的变化速度,从而不同程度地影响了估计参数的精度,这有待进一步弥补。最后,还需要空间 VLBI 的真实观测数据来做试验计算,不断改善软件和进一步研究空间 VLBI 应用于大地测量的潜能和将面临的新问题。

参 考 文 献

[1] Frey S, Meyer U, Fejes I, et al. Geodetic Space

VLBI: the First Test Observations[J]. Adv Space Res, 2002, 30(2): 357-361

[2] Fejes I, Almlr I, Ádm J, et al. Space-VLBI: A New Technique for Unification of Reference Frames [C]. Mueller I I. International Association of Geodesy Symposia 105. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 158-165

[3] 李征航,徐德宝,董挹英,等.空间大地测量理论基础[M].武汉:武汉测绘科技大学出版社,1998

[4] Herring T A, Davis J L, Shapiro I I. Geodesy by Radio Interferometry: the Application of Kalman Filtering to the Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data[J]. Geophys J Res, 1990, 95 (B8): 12 561-12 581

[5] Kulkarni M N, Ádm J, Fejes I, et al. Geodesy Demonstration Experiment (GEDEX) for Space VLBI: State of the Art and Software Development [OL]. <http://www.sgo.fornu.hu/gedex-rio97.pdf>, 1997

第一作者简介:魏二虎,副教授,博士。现主要从事空间大地测量和地球动力学研究。

E-mail: ehwei@sgg.whu.edu.cn

Simulated Computation of Geodetic Parameters with Space VLBI Observations

WEI Erhu¹ LIU Jingnan^{2,3} LI Zhenghang¹ SHI Chuang³

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

(2 Presidential Secretariat, Wuhan University, Luojia Hill, Wuhan 430072, China)

(3 Research Center of GNSS, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

Abstract: The meaning to research the potential of space VLBI for geodetic applications is summarized. The observation types of space VLBI are investigated, and so are the observation models and their related parameters of geodetic interest. With the world wide VLBI data from 1980~2004, the conditions to compute the parameters of geodetic interest are introduced, and so are the computing methods and processes. And the computed results of the parameters of geodetic interest are analyzed.

Key words: space VLBI; observation model; parameters of geodetic interest

About the first author: WEI Erhu, associate professor, Ph. D, engaged in the research on spatial geodesy and geodynamics.

E-mail: ehwei@sgg.whu.edu.cn