

空间 VLBI 与天文地球动力学

胡 小 工 黄 城 钱 志 翰

(中国科学院上海天文台 上海 200030)

摘 要

介绍了空间 VLBI 的精密定轨及其在天文地球动力学应用研究中的最新进展。指出因为空间 VLBI 的时延和时延率观测量同时涉及到射电参考系、动力学参考系和地固参考系, 所以特别适合于参考系的直接连接工作。对为评价参考系连接的精度而发展的协方差分析理论也作了介绍, 还分析了将时延和时延率资料用于精密定轨时遇到的困难及其解决办法。

关键词 空间 VLBI—精密定轨—参考系连接

分类号: P164

1 引 言

甚长基线干涉技术 VLBI 诞生于本世纪 60 年代, 已经在天文地球动力学和大地测量中得到了富有成果的应用。地面 VLBI 技术大大提高了射电参考系和地固参考系的测量和维持精度, 并通过章动序列和地球定向参数序列的解算将这两个参考系联系起来^[7,13,17,18]。它虽然可获得高精度的地面基线矢量, 但其缺陷是对地球的质心位矢不敏感。原因在于其观测量只涉及地面基线和射电源间的相对几何位形, 而和地球引力场无关。由于地固系的原点假定在地球质心, 因此单由地面 VLBI 技术实现的地固系存在原点漂移的问题^[18,19]。为克服此困难, 一般采用将 VLBI 与其他空间技术(如 SLR、GPS)并址观测的办法^[6]。由于不同空间技术之间可能存在复杂的系统差, 因此采用并址观测方法间接实现的地固系是一种综合或协议的地固系。

空间 VLBI 是地面 VLBI 技术的自然延伸, 其目的是增加基线的长度^[17,18]: 两个地面 VLBI 站间的基线长度不超过地球直径, 而一个地面站和空间 VLBI 天线之间的基线长度可大大超过此值。考虑到 VLBI 的最小分辨角与基线长度成反比, 对射电天体物理研究而言, 分辨率的提高意味着可分辨出更精细的射电源结构和更好地作射电源成图。空间 VLBI 技术的另一显著特征是空间 VLBI 天线受到地球引力场的影响, 其观测量(两天线接收同一射电源信号的时延和时延变率)同时涉及到三个参考系: 由射电源星表实现的射电天球参考系、由空间 VLBI 的轨道运动方程实现的动力学参考系和由地面测站网实现的地固参考系。与此相比较, 其他的空间大地测量技术(SLR、DORIS、GPS 或卫星测高)的基本观测量都只与地固系和动力

学参考系有关, 未涉及到由射电源所定义的射电参考系(见表 1)。而空间 VLBI 不仅能直接实现一个概念清晰的地固系, 即同时解算出测站坐标位置、地心原点和地球定向参数 EOP 序列, 而且还是目前唯一可用于直接连接这三个参考系的空间技术。

表 1 各种空间技术的天文地球动力学应用的比较

技 术	涉及的参考系	章 动	UT1	日 长	x_p	y_p	地心坐标	测站坐标
地面 VLBI	射电、地固	**	**	**	**	**		**
GPS	动力、地固			**	**	**	*	**
GLONASS	动力、地固			**	**	**	*	**
SLR	动力、地固			*	*	*	**	**
LLR	动力、地固			*	*	*	*	*
PRARE	动力、地固			**	**	**	**	**
DORIS	动力、地固			*	*	*	*	*
空间 VLBI	射电、动力、地固	**	**	**	**	**	**	**

注: * 表示可获得较好的精度和时间分辨率, 而 ** 表示可获得很好的精度和时间分辨率。第二栏中的射电、地固、动力分别是射电地球参考系、地固参考系和动力学参考系的简称, 其中空间 VLBI 技术所列为理论上可达到的精度和时间分辨率而目前尚未实现。

天文地球动力学研究的重要任务之一是建立统一而自洽的天球参考系、动力学参考系以及地固参考系, 具体地说就是根据实测资料给出表 1 中所有参数的时间序列。事实上, 在天文地球动力学中无论是研究地球的整体运动、地壳的板块运动还是研究地球内各圈层之间、岩石圈和大气海洋之间的复杂相互作用都依赖于恰当的参考系的选取和维持。在空间 VLBI 技术出现以前, 每个参考系本身具有较高的内部精度, 但它们之间的连接却没有很好地建立 [7,12,19]。例如由依赖于射电地球参考系和地固参考系的地面 VLBI 技术和依赖于动力学参考系和地固参考系的 SLR 技术给出的地球定向参数序列和站坐标可能有较大的差异。(间接)连接参考系最主要的困难在于不同技术间的系统差的确定和消除问题。除了并址观测外, 各种综合多种技术资料的解算方法也得到了广泛的关注。但是间接连接参考系的方法仍有较大的困难, 特别是其结果具有较强的“协议”性质而在概念上较不明确。空间 VLBI 技术在天文地球动力学应用中的重要意义在于, 由于它直接连接了三个参考系, 所以从理论上说可以同时解出表 1 中的所有参数, 因而避免了系统差的问题。事实上通过比较空间 VLBI 技术给出的参考系与其它技术给出的参考系将有助于发现系统差 [11,12,16]。

早在 1986 年, 匈牙利卫星大地测量天文台的 Fejes^[10] 就在空间研究委员会 (COSPAR) 会议上提出了空间 VLBI 技术应用到天文地球动力学和空间大地测量中的设想。具体地说就是用来连接三个参考系。国际大地测量和地球物理学联合会 IUGG 迅速意识到空间 VLBI 的潜在应用价值并于 1987 年在国际大地测量学协会 IAG 上成立了空间 VLBI 专门组 (SSG2.109) 来研究“空间 VLBI 在天体测量学和地球动力学领域中的应用”。1991 年的 IAG 大会决定将上述专门组的工作延伸到 1995 年。在 1997 年于巴西召开的 IUGG 大会上仍有关于空间 VLBI 的天文地球动力学应用的报告。上海天文台也积极参与了其应用研究并讨论了空间 VLBI 的精密定轨问题。

随着 1997 年 2 月日本的空间天线 VSOP 的顺利升空, 空间 VLBI 技术已经开始进行实测数据的处理和分析工作。经过一段时间的系统测试后, VSOP 已开始观测并于 1997 年 5 月首次获得了干涉条纹。上海天文台的 25m 天线参加了 VSOP 的观测。另一空间 VLBI 天线——俄罗斯的 RadioAstro 也在积极的筹划准备之中 [11,12]。

本文介绍空间 VLBI 的精密定轨及其在天文地球动力学中应用研究的一些进展。注意到空间天线的定轨精度与连接三个参考系的参数的误差密切相关, 所以精密定轨和参考系连接应该同时进行。另一方面, 作为最直接的应用, 空间 VLBI 独立于其它空间技术也给出的一组地球定向参数序列。在协方差分析理论的基础上, 本文介绍目前关于利用空间 VLBI 确定地球定向参数的精度分析的工作。

2 空间 VLBI 的协方差分析

协方差分析理论是研究利用某种观测手段(空间 VLBI、SLR 或 GPS 等)解算参数(卫星轨道根数、EOP、地面站坐标等)的可解性(estimability)并评估其精度的一种重要的数学工具。作为统计轨道理论中的一个重要部分^[3,4], 它的主要内容是: (1) 分析在动力学和测量模型中未被估计的常数参数的误差对待解参数的解算精度的影响; (2) 分析待解参数的先验误差对解算精度的影响; (3) 分析在动力学和测量模型中未被考虑的随机与非随机误差对解算结果的影响。最早将协方差分析理论用于空间大地测量和精密定轨研究的是 Texas 大学 Austin 分校的 Tapley。在已有工作的基础上, 我们也建立了一套协方差分析的理论并研制了相应的数据处理软件^[3,4], 并应用到空间 VLBI 的情形。

类似于地面 VLBI, 空间 VLBI 的观测方程可写为:

$$\tau = \tau_{\text{geom}} + \tau_{\text{trop}} + \tau_{\text{ion}} + \tau_{\text{antgeom}} + \tau_{\text{aber}} + \tau_{\text{rel}} \quad (1)$$

$$\tau' = \tau'_{\text{geom}} + \tau'_{\text{trop}} + \tau'_{\text{ion}} + [\tau_{\text{other}}(t+1\text{s}) - \tau_{\text{other}}(t-1\text{s})]/2\text{s} \quad (2)$$

其中时延 τ 是空间天线与地面天线接受同一射电源信号的时间差。 τ' 是其时间导数即时延变化率, (1) 式右端的各项依次为: 几何时延、大气平流层时延改正、大气电离层时延改正、空间天线的归心时延改正、由空间天线相对于地面天线的运动引起的光行差时延改正和相对论时延改正(包括狭义相对论效应和广义相对论效应)。(2) 式右端的前三项则分别是相应改正的时间导数。后面方括号中的项是为了避免复杂的求导运算而用差分代替微分运算。关于(1)、(2)式右端各项, 已有比较成熟的理论模型^[7,18]。实际上, 地面 VLBI 的模型在很大程度上都适用于空间 VLBI。

时延和时延率中包含的空间天线的轨道运动信息反映在 τ_{geom} 和 τ'_{geom} 中,

$$\tau_{\text{geom}} = (\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_g)\mathbf{s}/c, \quad \tau'_{\text{geom}} = (\mathbf{r}'_s - \mathbf{r}'_g)\mathbf{s}/c \quad (3)$$

其中 \mathbf{r}_s , \mathbf{r}'_s 和 \mathbf{r}_g , \mathbf{r}'_g 分别为空间天线和地面站的位矢和速度, 而 \mathbf{s} 是射电源方向的单位矢量(忽略了射电源自行), c 是光速。从(3)式不难看出, 不可能从空间 VLBI 观测量中同时解出射电参考系和地固系之间的三个欧拉角(假设已将轨道平面旋转至射电参考系)。这是因为观测量只涉及到两个矢量的内积, 因而实际上在坐标旋转下保持不变。但是利用协方差分析理论可以证明^[15], 虽然上述三个角度量不可求解, 但它们关于某个参考值的改正量却是可以解出的。

关于空间 VLBI 的天文地球动力学应用的协方差分析的主要结果反映在 Adam 和 Kulkarni 的两篇重要的博士论文中^[5,15]。具体地说, Adam 和 Kulkarni 讨论了下述几个问题^[5,15]: 假定空间 VLBI 的轨道已知, 哪些测地参数可从时延和时延率观测中用最小二乘方法解出; 观

测数据的多少、地面观测站的几何位形以及不同的数值计算方法对参数可解性的影响；解算地球定向参数的最佳观测位形及其估计精度；先验误差对解算精度的影响；其他未估计的参数精度对解算精度的影响等。应该指出，他们对这些问题的考虑较简单，还不是本节介绍的完全意义下的协方差分析。

将空间 VLBI 的观测方程线性化以后，观测方程可写成：

$$y_i = \sum_{j=1}^n H_{ij}^x x_j + \sum_{k=1}^m H_{ik}^c c_k + \varepsilon_i \quad (4)$$

其中 y_i 是第 i ($i = 1, \dots, l$) 次观测的 $O-C$ ， x_j 是第 j 个待解参数的改正量， c_k 是第 k 个考察参数（即不参加解算但其误差需加以考虑的参数）的误差， ε_i 是第 i 次观测的观测误差。

时延和时延率观测量中与天文地球动力学有关的参数有^[5,10-12]：地面测站坐标、空间 VLBI 的轨道、射电源坐标、地球定向参数 (x_p 、 y_p 和 UT1-UTC) 和钟差参数等。协方差分析表明^[5,15]，其它参数不参加估计而只求解地球定向参数和钟差参数总是可行的。作为初步近似，地面 VLBI 站的测站坐标和射电源的坐标不大可能通过空间 VLBI 的观测来进一步提高精度^[12,13,15]，但是它们的误差对定轨和地球自转参数解算的精度有影响。在文献 [5] 和 [15] 中，待解参数就是 EOP，而考察参数包括站坐标、空间天线的轨道以及射电源坐标。

设 $\mathbf{X} = (x_1, \dots, x_n)^T$ ，并假定 x_j 的先验估计为 0，则 \mathbf{X} 线性无偏最优估计是^[1,2]：

$$\bar{\mathbf{X}} = (\mathbf{H}_x^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_x + \mathbf{P}_0^{-1})^{-1} \mathbf{H}_x^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{Y} - \mathbf{H}_c \mathbf{C}) \quad (5)$$

其中 $\mathbf{Y} = (y_1, \dots, y_l)^T$ ， $\mathbf{C} = (c_1, \dots, c_m)^T$ ， $\mathbf{H}_x = (\mathbf{H}_{ij}^x)$ ， $\mathbf{H}_c = (\mathbf{H}_{ik}^c)$ 。 \mathbf{R}^{-1} 是观测方程所对应的权矩阵， $(R_{ij}) = E(\varepsilon_i \varepsilon_j)$ 决定于单次观测的噪声水平。 \mathbf{P}_0 是待解参数的先验协方差矩阵。Adam 和 Kulkarni 的工作的核心就是计算不同情况下的法矩阵 $\mathbf{N} = (\mathbf{H}_x^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_x + \mathbf{P}_0^{-1})$ ，并对其秩和特征值进行详细的分析^[5,15]。

在协方差分析理论中，考察参数对待解参数的解算精度的影响可通过计算考察协方差 (considered covariance) 矩阵、灵敏度 (sensitivity) 矩阵和摄动 (perturbation) 矩阵等统计量来加以评估。定义计算协方差 (computed covariance) 矩阵为^[3,4]：

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}_x^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_x + \mathbf{P}_0^{-1})^{-1} \quad (6)$$

其意义是当考察参数没有误差时，用最小二乘法解出的待解参数的协方差。若假定考察参数的先验误差协方差矩阵为 $\mathbf{\Pi}$ ，可证明此时的待求解参数的协方差，即考察协方差应为^[3,4]：

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{H}_x^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_c \mathbf{\Pi} \mathbf{H}_c^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_x \mathbf{P} \quad (7)$$

其中下标 c 表示考察协方差，而右端的 \mathbf{P} 即是 (6) 式的计算协方差矩阵。

定义另一个重要的统计量灵敏度矩阵 \mathbf{S} ^[3,4]：

$$\mathbf{S} = \partial \bar{\mathbf{X}} / \partial \mathbf{C} \quad (8)$$

将 (5) 式代入，矢量 \mathbf{C} 取其先验值（不妨取为 0），则

$$\mathbf{S} = \mathbf{P} \mathbf{H}_x^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_c \quad (9)$$

利用灵敏度矩阵可将考察协方差写成简洁的形式:

$$P_c = P + S I I S^T \quad (10)$$

从 (10) 式可看出, P_c 的对角元总比相应的 P 的对角元来得大, 这说明考察参数的误差降低了待解参数的解算精度。

在合理地给定考察参数的先验误差协方差以后, Adam 和 Kulkarni 计算了用空间 VLBI 的时延和时延率求解地球定向参数 EOP 可达到的精度^[5,15]: x_p 和 y_p , 0.7mas; UT1-UTC, 0.06ms。这些精度水平与其他空间技术(地面 VLBI、SLR 或 GPS)所得到的精度大致相当。

在观测资料较多的情况下, (8) 式和 (10) 式的计算涉及到大矩阵的乘法。我们^[3,4] 将精密定轨中的一套比较简单同时又可避免直接作矩阵乘法所产生的数值不稳定的算法(即所谓不开平方根的 Givens-Gentleman 正交变换方法)推广到协方差分析计算中。实际计算表明, 这种方法比 Adam 和 Kulkarni 采用的方法好。

3 空间 VLBI 天线的精密定轨

JPL 和日本航天局 (ISAS) 各有一个导航组负责确定 VSOP 的轨道, 并作短期和中期预报。采用的定轨资料是本节将要介绍的 Doppler 计数, 得到的轨道数据用契比谢夫多项式来内插和压缩。用户只需指定历元, 就可得到相应历元的 VSOP 位矢和速度。不同的空间 VLBI 应用对轨道有不同的精度要求^[12]。以 VSOP 为例, 空间天线的控制、预报和跟踪需要约 1km 的轨道精度; 若要搜索干涉条纹, 则需要约 50m 的轨道精度。Kulkarni 估计^[15] 为了满足天文地球动力学应用和大地测量的需要, 轨道精度应达到 1m 左右的水平。轨道精度要求越高意味着对摄动模型精度的要求也相应提高。

Adam^[5] 和 Kulkarni^[15] 的工作只考察了空间 VLBI 的轨道误差对 EOP 和地心漂移解算精度的影响, 而未考虑轨道本身的确定问题。但一个更自然的解算方案是仿照其他空间技术如 SLR 中的做法: 将空间 VLBI 的轨道作为待解参量, 和其它参数一起参加解算^[16]。考虑到空间 VLBI 天线的复杂的形状和姿态, 准确模拟受到的太阳辐射压摄动进而提高轨道确定的精度是空间 VLBI 应用中的最大问题。

Estefan^[8,9] 研究了利用 Doppler 跟踪技术来确定 VSOP 这种偏心率很大的飞行器轨道的问题。Doppler 技术作为一种成熟的跟踪手段已在天文地球动力学研究中得到了广泛的应用, 其优点是性能可靠, 安装简单, 且造价便宜。但一般来说, 其精度并不高。随着技术的进一步完善, 特别是在美国进行的一系列行星际探测工作(如深空网计划 Deep Space Network Project)中, Doppler 技术的观测精度已大大提高。其理论观测精度可达几个 mm。改进的 Doppler 技术测量在一段跟踪时间内发射的 X-波段(频率为 8.4GHz)载波相对于从飞行器上反射的载波信号的相位累积, 即 Doppler 计数或积分 Doppler。在传统的 Doppler 应用中, 需要将上述相位累积作差分和平局处理, 以克服当载波频率较高且变化较快或载波信噪比较小时可能在测量中出现的周跳现象。随着周跳问题的解决, 人们越来越多地倾向于直接采用 Doppler 计数来作为观测量, 其好处是保证了测量精度。研究表明^[8,9], 若将其 Doppler 计数转化为传统的 Doppler 频率漂移数据必然会增加噪声水平, 同时也使噪声的模型复杂化(差

分后的噪声将不再是高斯白噪声)。Doppler 计数的测量数学模型^[8,9]可简单表示为:

$$\phi_k = \int_{t_0}^{t_k} \phi' dt + \phi_0 + \eta_k = f(\rho_k - \rho_0) + \phi_0 + \eta_k \quad (11)$$

其中 ϕ_k 是从 t_0 至 t_k 所测的相位累积, ϕ_0 是 t_0 时刻的相位零漂移, ρ_k 是 t_k 时刻空间 VLBI 天线至测站的距离, f 是载波的发射频率, η_k 是瞬时相位测量误差, 假定为高斯白噪声。Doppler 计数本质上就是两个不同历元时飞行器到地面站的距离差。相对于传统的 Doppler 频漂数据, 直接采用 Doppler 计数来定轨可提高精度约 2—4 倍^[8,9]。

一旦确定了观测模型, 统计定轨的整个框架也随之建立。根据 JPL 的说明, 实际的 Doppler 计数资料并不完全是 (11) 式, 而是:

$$\phi(t) = \text{mod}(f(\rho(t) - \rho(t - 1\text{min}))) + f_{\text{bias}} \cdot 60, 2^{42}) \quad (12)$$

其中 $f_{\text{bias}} \cdot 60$ 这一项是为了保证在 1min 间隔内记录到的 $\phi(t)$ 是一个正数而引进的。作一个模 2^{42} 运算是为了避免 $\phi(t)$ 的数值太大以致超过计算机的字长极限。这样在解算时采用的线性化模型应该是:

$$\phi(t) - \phi^*(t) = \text{mod}(f[\partial\rho_k/\partial x\Gamma(t_k, t_0) - \partial\rho_0/\partial x\Gamma(t_{k-1}, t_0)]\Delta x_0 + \eta_k, 2^{42}) \quad (13)$$

其中 t_0 是初始历元, t_k 对应于观测历元, t_{k-1} 是这次观测开始时的历元。 $\phi^*(t)$ 是按参考轨道计算的预报值。 $\Gamma(t, t_0)$ 是从 t_0 至 t 的状态转移矩阵^[1,2], Δx_0 是参考轨道误差。在一段连续的观测弧段内, $t_k = t_{k-1} + 1\text{min}$ 。而当 VSOP 飞到地平之下时, 计数将中断; 下一个弧段 VSOP 从地平升起时, 计数从零开始。

不同于 JPL 和 ISAS 的做法, 文献 [16] 考虑直接利用空间 VLBI 的观测量来定轨。作为一种新的定轨观测资料, 空间 VLBI 的时延和时延率观测量具有以下特点: 其观测量不仅包含了空间天线相对于地面站的距离信息, 而且包含了空间天线的方向信息。具体地说, SLR 和 GPS 的观测量本质上都是从飞行器到地面测站的距离, 传统的 Doppler 观测量是飞行器相对于地面站的视向速度。而对空间 VLBI 而言, 当观测不同的射电源时, 几何时延和时延率观测量分别是相对距离和相对速度在不同射电源方向上的投影(见 (3)、(4) 式)。这意味着空间 VLBI 观测量中包含了更丰富的轨道信息^[12,13]。

如果利用 JPL 提供的 VSOP 轨道, 再加上 VLBI 的时延和时延率资料, 可部分避开太阳辐射压摄动模型的困难。这是因为 JPL 提供的 VSOP 轨道并未利用时延和时延率资料。另外这条轨道并不是一条预报轨道即不是从某一初始历元积分生成, 而是采用了某些数值平滑方法使得给出的轨道在较长的一段时间内其(外符)精度都保持在 10m 或几十 m 的水平。因此应当有:

$$|\tau - \tau_{\text{JPL}}| < |\tau - \tau_{\text{predicted}}| \quad (14)$$

其中 τ 是时延观测量, τ_{JPL} 是根据 JPL 提供的 SPICE 轨道算出的理论值, 而 $\tau_{\text{predicted}}$ 是根据参考轨道的预报值算出的理论值。O-C 方程为:

$$\tau - \tau_{\text{JPL}} = \partial\tau/\partial x[\Gamma(t, t_0) + \varepsilon]\Delta x_0 + \eta_k \quad (15)$$

其中的 ε 是由于摄动模型的误差引起的状态转移阵的误差。由于 JPL 轨道的误差小于参考轨道的误差: $\Delta x_0(\text{JPL}) < \Delta x_0(\text{参考轨道})$, 因此 ε 对 O-C 的贡献较小, 从 (15) 式解出的 Δx_0

受 ϵ 的影响也较小。这说明即使没有很好的摄动模型, 也可以改进轨道。但弧段不能太长, 否则模型误差会迅速增长。

考虑到空间 VLBI 定轨的困难, 同时解算轨道和参考系连接参数收敛较慢, 模拟计算表明^[11,12], 可采用如下的循环叠代方法:

(1) 首先利用地面的 VLBI 观测量进行大气参数和地面钟差参数的解算, 在空间 VLBI 的观测中, 地面基线间的时延和时延率也可同时得到;

(2) 利用地面 VLBI 资料解算射电源坐标、章动序列、台站坐标和 EOP;

(3) 利用 (2) 的结果及空间天线与地面天线的时延和时延率资料解算空间天线的轨道;

(4) 将轨道固定, 利用空间 VLBI 资料解算射电源坐标、章动序列、台站坐标、地球质心的运动和 EOP;

(5) 循环上述 4 个步骤, 直至收敛。

上述解算方案的特点在于将地面部分的资料与空间部分的资料分开处理, 将地面部分得到的结果作为空间部分解算的近似值, 减少了叠代计算的次数^[11,12]。

在精密定轨中, 除了要求尽量完善的观测模型外, 重要的是摄动力的模制问题^[1,2]。空间 VLBI 天线受到的力可大致分为三类: (1) 保守力, 包括地球的中心引力和非球形摄动、日、月摄动和地球的固体潮、海潮摄动等; (2) 非保守力, 包括大气阻力、太阳的直接辐射压和地球反射的间接太阳辐射压等; (3) 由于空间天线调整姿态时向外喷射气体而产生的微小助推力。对摄动量级的分析表明^[8,9,15], 除了直接太阳辐射压和助推力外, 空间 VLBI 所受到的摄动都可以比较简单地模制。

4 空间 VLBI 天线的随机摄动模型

为了进行空间 VLBI 天线的精密定轨, 首先要选择恰当的数值积分器来计算预报轨道和状态转移矩阵。有两类数值积分器可供选择: 定步长多步积分器和可变步长单步积分器。前者如 KSG, 后者如 RKF 等。多步积分器的主要优点是在计算下一个步点值时只需较少次数的右函数赋值(相比于同阶单步积分器), 其缺点是不能在计算过程中改变步长, 在起步时也比较麻烦, 需迭代计算或采用单步法。单步积分器的主要优点是灵活改变步长, 程序实现比较简单。考虑到在一个轨道周期内大偏心率轨道受力情况变化较大, 其数值积分应该采用可变步长的单步方法^[16]。而空间 VLBI 天线 VSOP 和 RadioAstro 的轨道正是这种情况, 前者偏心率为 0.587, 而后者偏心率达到 0.82。

为了准确计算空间 VLBI 天线的轨道, 其受摄模型应包括:

(1) 地球的非球形摄动。可采用 GEM-T3 模型或 IERS 最新推荐的 JGM3 模型。固体潮和海潮模型也采用 IERS 规范中的相应模型。

(2) 太阳和月球的引力摄动(若有必要, 可加上其他大行星的摄动)。太阳和月球的位置矢量可从 DE403/LE403 历表^[19]中读出。这里应当指出, 虽然一般将历表对应的参考系看成是射电参考系, 但其实质应该是动力学参考系。从理论上说, 空间 VLBI 技术是可以分辨出这两个参考系的差别的。

(3) 大气阻力摄动。由于空间 VLBI 的空间天线主要在高层大气中飞行(地面高度大于 800km), 因此大气阻力的影响较小。可采用较好的 Jacchia 77 大气模型来计算大气密度。

(4) 由地球的 Schwartzchild 引力场产生对空间 VLBI 天线的相对论摄动也应加以考虑。

(5) 太阳辐射压摄动和助推力采用了随机摄动模型。

本节主要讨论太阳辐射压摄动和助推力两个随机摄动模型的处理办法。其它的摄动模型都已较好地建立并已在 SLR 和 GPS 的实测资料处理中得到了检验^[19]。

空间 VLBI 天线由三个相对独立的部分构成：天线反射面、两个太阳能电池翼板和支持主体。太阳辐射压产生于上述三部分反射或吸收了太阳辐射所带来的动量，因此完整的太阳辐射压计算是非常复杂的^[20,21]：需要知道天线表面各处的太阳辐射场强和各点的光学性质。在一些简化假设下，太阳辐射压的计算等价于其有效截面积的计算。可以证明^[20,21]，Lageos 之类的球形卫星的有效截面积是常数。而对于空间 VLBI 这类复杂外形且表面光学性质不均匀的飞行器，常用的有四种截面积模型^[13]：炮弹 (Cannon-ball) 模型，截面积为常数；可变面积 (Variable-area) 模型，截面积与其飞行器轨道运动的平近点角 M 有关，其变化周期就是轨道周期；主体-翼板 (Box-wing) 模型，将支持主体与太阳翼板分开考虑；以及更复杂的 ROCK4 模型。在 GPS 精密定轨中的应用表明^[19]，前两种模型适合于长弧定轨，因其模型本身反映的就是一种平均效应，而后两种更适合于短弧定轨，虽然其考虑要细致得多，用于长弧定轨的效果并不好。相比于 GPS 卫星，空间 VLBI 增加了天线面这一部分，且天线总是指向射电源而不是太阳。简单的量级估计表明^[16,19]，上述四种模型都不能满足精密定轨的要求。因此 JPL 首先发展了所谓的随机摄动理论 (stochastic perturbation) 来处理太阳辐射压中难以模制的部分^[8,9,16]。

以 VSOP 为例，其截面积可分为三部分：(1) 不变部分 (待解参数)，包括太阳翼板和支持主体，以及天线反射面的一部分，总共约 25m^2 ；(2) 可变部分，包括反射面的一部分，其最大值 (待解参数) 约为 9m^2 ，其瞬时值与从天线上看到的太阳方向和射电源方向的夹角有关；(3) 随机部分，均值 (待解参数) 约为 0，标准方差 (调节参数) 约 $3-4\text{m}^2$ 。考虑到太阳辐射压正比于有效截面积，上述截面积的划分意味着太阳辐射压也可分为相应的三部分。对于统计轨道理论来说，其中的第三部分，即随机摄动的处理是一个比较新的课题。由于姿态调整而产生的微小助推力也可作为随机摄动看待。

具体地说，假设随机摄动是一个一阶 Markov 过程，线性化后的变分方程的解可写为：

$$\Delta x = \Gamma(t, t_0)\Delta x_0 + \int_{t_0}^t \Gamma(t, \tau)f(\tau)d\tau \quad (16)$$

其中 $f(\tau)$ 是随机摄动加速度， $\Gamma(t, t_0)$ 是状态转移矩阵。上式右端第二项是随机摄动的贡献。假定随机摄动与观测噪声独立，则 $O-C$ 的误差方差应该是这两项贡献的和：

$$D_{\text{total}} = D \left[\frac{\partial C}{\partial X} \int_{t_0}^t \Gamma(t, \tau)f(\tau)d\tau \right] + D(\varepsilon) = D_1 + R \quad (17)$$

其中 D 表示方差， $R = D(\varepsilon) = E(\varepsilon\varepsilon^T)$ 是观测噪声的方差。利用 $f(\tau)$ 是一个一阶 Markov 过程的假设： $E[f(\tau)f^T(\tau')] = Q\delta(\tau - \tau')$ (其中 Q 为过程噪声)，可以证明当弧段不长时，随机摄动对 $O-C$ 的误差方差的贡献可简单地表示为：

$$D_1 = \text{diag}(1 - \exp(-2t/\tau_1), \dots, 1 - \exp(-2t/\tau_n))\sigma^2 \quad (18)$$

其中 σ 是与 Q 和 $\frac{\partial C}{\partial X}$ 有关的常数，而 τ_1, \dots, τ_n 是与轨道有关的常数。diag 是对角矩阵的简写。

从(18)式知,考虑随机摄动后,该观测的误差方差从 R 增大为 $D_1 + R$ 。由(2)式可知,这意味着随机摄动的影响等价于改变最小二乘解算中的权矩阵。注意到 D_1 与时间有关,这意味着在考虑随机摄动后,不同时间的相同观测噪声的资料对应的权不同。Estefan^[8,9]证明,用这种随机摄动模型来处理太阳辐射压中的不确定部分和助推力,可以达到较好的定轨效果。当然由于没有实测数据,Estefan的结论是对模拟的随机摄动和模拟的资料而言的。如果随机摄动不是一阶Markov过程,可类似地建立相应的随机摄动算法。需要指出,这种方法并不能完全克服摄动模型不准的困难。当弧段较长时, D_1 的计算要比(18)式复杂得多。另外 σ 的确定也较麻烦:在实际资料处理中需要反复调整 σ 的值,当对应的解的加权残差平方和为最小时,可认为对应的 σ 最好。

值得庆幸的是,VSOP的天线盘采用了网结构^[8,9,12,16],大量的太阳辐射(据估计80%以上)可从网格中透过,所以其太阳辐射反射系数 C_r 较小。虽然空间VLBI反射面的面质比达到0.01(Lageos约为0.001),但其太阳辐射压摄动仍较小。采用随机摄动的方法再加上尽量详细的模制,应该可以在几天的弧段内使其误差对轨道的影响小于米级。

5 小 结

空间VLBI在天文地球动力学中的主要应用是直接连接射电地球参考系、动力学参考系和地固系。仅利用空间VLBI,而不借助于其他技术(SLR或GPS)来直接连接不同参考系的优点是使结果具有清晰的物理意义。为了克服不同的空间技术之间存在的复杂系统差,不同的工作采用不同的技巧把各种技术得到的数据进行综合处理^[6],因而其结果的物理意义也随之而不同。空间VLBI技术由于其观测量直接包含了上述三个参考系,必然会在参考系连接工作中占有重要的地位。

目前已有的空间VLBI天线(日本的VSOP和即将发射的俄罗斯的RadioAstro)的主要任务都是天体物理应用,因此其物理性质和轨道特征并不完全适用于天文地球动力学应用。后者希望卫星有较规则的外形、较小的面质比和较长的工作寿命,其定轨精度应达到与观测精度相当的水平(好于几cm)。而VSOP的外形极不规则,面质比较大,寿命不长(估计为3—5年),其定轨精度据估计很难达到10cm的水平。VSOP还不适合于频繁地改变观测对象,而这正是天文地球动力学研究所需要的。JPL于1994年提出过一个专门用于天文地球动力学研究的空间VLBI计划—SURF(Satellite for Unification of Reference Frames)^[12]。其卫星的形状较规则(四面体或六面体),每个面上都装有一个VLBI天线接收面。为了减小非引力摄动模型(如太阳辐射压摄动)的误差,还将安装一个测量加速度的仪器。利用VSOP得到的任何有意义的天文地球动力学研究结果,对SURF计划的实施都将是极大的推动。

应该指出,本文介绍的关于空间VLBI的协方差分析和精密定轨研究还没达到Lageos的水平,比如说在解算时没有采用多级复弧法^[1,2],即未将某些参数作为长弧全局量而将某些参数作为短弧局部量分段处理。分段解算在Lageos的解算中是必不可少的数据处理技巧。主要的一个原因是没有专门用于空间VLBI数据处理的软件系统。从某种意义上说,这种软件系统应该是地面VLBI数据处理软件(如GLOGK或OCCAM)和人造卫星精密定轨软件(如UTOPIA或GEODYM)的综合。显然,建立一个功能齐全的空间VLBI数据处理软件,是目前精密定轨和参考系连接工作的关键。

总之,空间VLBI作为一种新的空间技术,为天文地球动力学的研究提供了诱人的前景。

虽然其他空间技术已经可以获得精度很高的章动和地球自转序列以及地心坐标等量,但作为一种同时连接三个参考系的空间技术,空间 VLBI 的解算结果具有更清晰和更直接的含义。除了可用于进行三个参考系的连接工作外,空间 VLBI 的时延和时延率资料还可像导航观测资料(Doppler 计数)一样用于精密定轨。随着 VSOP 观测的正常进行和数据处理软件的进一步完善,空间 VLBI 技术也将渐渐成熟,并获得一些新的结果。

参 考 文 献

- 1 刘林,朱文耀,黄斌.天文学进展,1988,6:42
- 2 朱文耀,黄斌,刘林.天文学进展,1988,6:52
- 3 胡小工,黄斌.人造卫星观测与研究,1993,1:24
- 4 胡小工,黄斌.人造卫星观测与研究,1994,1:9
- 5 Adam J. Ph.D Thesis, Columbus, Ohio, USA: The Ohio State University, 1990
- 6 Anderson P H. Ph.D Thesis, Oslo, Norway: the University of Oslo, 1995
- 7 Charlot P. (ed.) IERS Annual Report 1996, Paris Observatory, France
- 8 Estefan J.A. TDA Progress Report 42-106, Jet Propulsion Laboratory, USA, 1991
- 9 Estefan J.A. TDA Progress Report 42-120, Jet Propulsion Laboratory, USA, 1995
- 10 Fejes I. In: Willis P ed. Report on IAG. SSG. 2. 109, 1992, Tome: 29: 189
- 11 Fejes I, Mihaly Sz. Adv. Space Res., 1991, 11: 429
- 12 Fejes I, Kawaguchi N, Mihaly Sz. Astro. Space Sci., 1996, 239: 275
- 13 Fliegel H F, Gallini T E, Swift E. J. Geophys. Res., 1992, 97: 559
- 14 Herring T, Davis J L, Shapiro I I. J. Geophys Res., 1990, 95(B5): 12
- 15 Kulkarni M. Ph.D Thesis, Columbus, Ohio, USA: The Ohio State University, 1992
- 16 Klatt C G. Ph.D Thesis, North York, Ontario, Canada: York University, 1995
- 17 Levy G S. Science, 1986, 234: 187
- 18 Liekse J. Astro. Astrophys., 1977, 58: 1
- 19 McCarthy D. ed. IERS Technical Note 21, Naval Observatory, USA
- 20 Vokrouhlicky D, Farinella P, Mignard F. Astron. Astrophys. 1993, 280: 295
- 21 Vokrouhlicky D, Farinella P, Mignard F. Astron. Astrophys. 1996, 307: 635

Space VLBI and Its Applications in Astrodynamics

Hu Xiaogong Huang Cheng Qian Zhihan

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

Abstract

This paper reviews the latest progress in the space VLBI orbit determination and its astrodynamical applications. The Space VLBI observables involve simultaneously radio celestial reference frame, dynamical reference frame and terrestrial reference frame. Therefore it is the only existing technique that is able to connect the above three independent reference frames directly. As new, precise observables, space VLBI delay and delay rate can also be used to improve the accuracy of orbit determination. Theory of Covariance analysis to assess the possible precision of reference connecting and stochastic perturbation model to treat the solar radiation pressure are introduced.

Key words Space VLBI—Orbit Determination—Reference Frames Connecting