

中国科学院测量与地球物理研究所编辑

测量与地球物理集刊

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA

7

科学出版社

测量与地球物理集刊 第7号

(1986 年)

目 录

应用射电干涉技术研究现代地壳运动·····	张承泽 林为民 (1)
VLBI 定位和测定勒夫数的基线优化分布及预期精度估算 ·····	许国昌 (10)
VLBI 观测方程中钟差参数的消除方法 ·····	许国昌 (15)
新丰江水库监测网形变分析的假设检验·····	刘烈昭 欧吉坤 刘 钢 (20)
论拟合推估在秩亏问题中的应用·····	王跃进 (28)
全球定位系统 (GPS) 卫星信号的多路性和相关性 ·····	陈增强 (39)
对长期极移若干机制的讨论·····	高布锡 (50)
新老方法计算恒星视位置结果比较·····	朱耀仲 顾秀莲 (55)
地球自由振荡·····	方 俊 (65)
空间扰动重力确定方法的比较·····	孟嘉春 蒋福珍 操华胜 (84)
旋转椭球地球的潮汐响应·····	韩大仲 (103)
精密重力测量中的垂直梯度改正·····	张赤军 (108)
海洋重力仪的内格值标定方法·····	梁础坚 (112)
光电中星仪自动记录装置·····	谢亮云 何思文 (117)

ACTA GEODAETICA ET GEOPHYSICA, No. 7

(1986)

CONTENTS

Research on Present Crustal Movements by Applying Radio Interferometric Techniques	Zhang Chengze Lin Weimin (9)
The Better Baseline Distribution and Estimates Accuracy of VLBI in Positioning and Determining Love Numbers	Xu Guochang (14)
Methods for Eliminating Clock-Error Parameters in VLBI Observation Equations	Xu Guochang (19)
Test of Hypothesis in Deformation Analysis of the Monitoring Network in the Area of Xinfengjiang Reservoir	Liu Liezhao Ou Jikun Liu Gang (27)
On Application of Collocation in Finding a Definite Solution of the Rank Defect Problem	Wang Yuejin (38)
The Signal Multiple Access and Correlation Properties of GPS	Chen Zengqiang (49)
A Discussion About the Causes of the Secular Motion of the Earth's Pole	Gao Buxi (54)
The Comparison of Results of Apparent Places of Stars Obtained from the New and the Old Methods	Zhu Yaozhong Gu Xiulian (64)
The Free Oscillation of the Earth	Fang Jun (83)
Comparison of the Methods for Determining the Gravity Disturbances Outside the Earth	Meng Jiachun Jiang Fuzhen Cao Huasheng (102)
The Tidal Response of a Rotating Slightly Elliptic Earth	Han Dazhong (107)
Vertical Gradient Correction in Precise Gravimetry	Zhang Chijun (111)
Method of Internal Calibration of Seagravimeter	Liang Chujian (116)
An Auto-Recording Equipment for Photoelectric Transit Instrument	Xie Liangyun He Siwen (122)

应用射电干涉技术研究现代地壳运动*

张承泽 林为民

(中国科学院测量与地球物理研究所)

摘 要

射电干涉技术(包括独立站射电干涉(VLBI)和卫星源射电干涉)是近年来发展起来的空
间大地测量的主要技术手段之一。由于其精度高、测程长;独立站射电干涉技术以类星体为观
测对象,可以建立准惯性参考系,从而可以对现代地壳运动进行“绝对”测量;卫星源射电干涉
技术的设备体积小,便于流动,可以在独立站射电干涉网内进行加密观测,形成不同层次的观
测网。因而是研究现代地壳运动的最为有效的方法。此外,射电干涉技术的建立对国民经济
建设和国防建设也有实际意义。

文中还简介了国外地壳运动研究的现状,并论述了在我国开展应用射电干涉技术研究现
代地壳运动的必要性。

一、前 言

大地测量学是研究地球形状和大小及其重力场、精确确定地面点位的一门学科。近
年来由于大陆漂移、海底扩张和板块运动学说的兴起,新型的高精度大地测量新技术,如
独立站射电干涉测量技术(VLBI,也直译为甚长基线干涉测量)、激光测月(LLR)、激光
测卫(星)(SLR)和全球定位系统(GPS)的出现,使大地测量学进入了新的革命时期。作为
大地测量学研究对象的地球不再被看成是静态的,人们已经发现它的形状和大小及其重
力场是随时间而变化的。对于这种变化的深入研究不仅有助于地球内部构造、地球的起源
和演化等理论问题的解决,而且对地震预报的研究,国民经济建设和国防建设也有重要意
义。从而使大地测量学与地球动力学、地球物理学、地质学、天文学和大型工程建设发生
了更为密切的关系。因此国际大地测量协会1982年5月在日本东京召开的全体会议上
通过的第五项决议指出“鉴于已经证明新的空间大地测量技术能够对地球科学的整个领
域作出贡献,……。促请各科学技术组织和政府部门优先发展有关的仪器设备和观测计
划”。

我国幅员辽阔,在地理位置上处于环太平洋地震带和地中海—喜马拉雅地震带之间,
有些地区本身就是这两个带的组成部分。这两个地震带是世界上最活动的地震带,环太
平洋地震带所释放的能量约占全球地震能量的80%,地中海—喜马拉雅地震带释放的能
量约占全球地震能量的15%。从地质角度来看,这两个地震带也是两个巨大的活动构造

* 1984年10月收稿。

带,即太平洋构造带和特提斯(古地中海)构造带。根据板块构造学说,这两个地震带正处于太平洋板块、欧亚板块、印度洋板块相互交接的部位,这里的构造运动极为强烈,并且影响达到很深的地幔中。此外,南北构造带和东西构造带又将整个中国大陆分成了五个各具自己地质发展特征和地震活动特征的大断块。其中南北构造带是由一系列规模巨大,活动明显的大断裂组成,是长期存在和活动着的地壳断裂。沿着这个带目前仍存在强烈的构造运动。在我国西部地区还分布着世界上最大的高原和最高的山系——青藏高原和喜马拉雅山系,它们是印度板块和欧亚板块碰撞的产物,是大陆碰撞的典型例子,这一地区新构造运动非常明显。因此我国是开展地壳运动研究的重要场所。

由于我国处于这样一个特定的地质环境中,所以时有强烈的破坏性地震发生,使我国成为世界上多地震的国家之一。近20年来,在一些人口稠密地区发生了多次破坏性地震,给人民的生命财产带来了重大损失。因此地震预报在我国也成了极其重要的研究课题。因为地震发生于地壳的构造形变过程中,所以强震能量的积累和释放必然表现在应变能量的长期积累和突然释放方面。但无论那一种形成都会引起地壳不同部位的升降、平移错动和旋扭等运动。而高精度的地壳形变测量是确定地壳运动和地质构造活动性的有效方法之一,因此也是解决地震预报问题的一项重要手段。自1966年邢台地震以来,地震系统用常规大地测量技术开展了一些地壳形变测量的工作。但是,由于常规技术在精度、速度和测程等方面的局限性,鉴于国外用空间大地测量技术研究地壳运动所取得的进展和预期的发展潜力,为了加速我国地壳运动和地震预报的研究,开展用空间大地测量技术研究地壳运动已十分必要。

在国民经济建设和国防建设中,现代地壳运动的研究 also 具有重要的实际意义。工程地质、石油地质、矿山地质、水文地质等地质学科的分枝都需要地壳形变方面的准确数据以提高地质分析的水平。一些重大工程建设项目(如大型水利枢纽、核电站等),耗资巨大,施工前需要场地稳定性的准确数据以资抗震设计;竣工后又需要对场地稳定性进行监测以确保工程安全运行。这种区域性地壳运动的监测要求精度高,有的地区内地形十分复杂,常规大地测量方法无法胜任。由于空间大地测量技术具有精度高、速度快、测程长、全天候工作、测站间不要求通视、同时测定三维点位等优点,可以满足区域性地壳运动研究的要求。

此外,由于空间大地测量技术具有高精度地快速测定地面点位的能力,因而可以建立高精度空间大地测量控制网,为空间技术的发展提供跟踪站的精确坐标,从而提高弹道和飞行器轨道的测算精度;还可以为国防工程和国家重点建设项目(如石油勘探、输电工程、铁路建设等)提供高精度的三维定位成果,为设计和施工提供必须的数据。

二、用空间大地测量方法研究现代地壳运动

板块运动的速度是很缓慢的,一般认为约每年1—10厘米。据现已掌握的资料发现有的板块运动的速度要大些,如沿纳茨卡板块和太平洋板块边界的相对运动速度最大达到每年18厘米;有的则小一些,如大西洋板块和欧亚板块边界处的相对运动速度在每年1厘米以下。板块内部的形变量则更小,如在美国加利福尼亚州和日本观测到的水平

剪切应变速率约为每年 3×10^{-7} 的量级,我国在一些地震活动区观测到的应变积累也仅 10^{-6} 的量级。因此要研究现代地壳运动和板块运动,必须使用高精度的测量仪器,并进行长期的重复观测。

常规大地测量方法在地球动力学研究中(如与地震有关的地壳形变测量)曾起过重要作用。但是由于常规大地测量的观测误差是累积的,在短距离上观测尚能达到较高的精度,可以用于局部区域的地壳运动的研究。但是要研究大范围的地壳运动或全球板块运动,则不能胜任。

我们知道精密水准测量的观测精度由下式计算

$$\sigma = 0.7 \sqrt{L} \text{ (毫米)}$$

式中 L 为水准路线的长度,以公里为单位。当测线很短时,可以达到毫米级的精度;但当测线很长或高差很大时,精度就不够了。而且在这个精度估算公式中还没有包括尺长标定和其他一些系统误差(这些误差可达 2×10^{-4} 的量级)。

地面水平距离的测量,如果使用最好的测距仪器,在 10—30 公里的距离上可以达到 2×10^{-6} 的精度。由于测距仪的测程限制,要测量相距数百公里远的两点间距离,则只有用精密导线,三角网或三边网,由于误差的传递和积累将使精度下降到差于 10^{-5} 的量级。

空间大地测量技术的测程长,可以直接测定相距数百公里甚至数千公里的两点间的距离,而不需接力传递,不会发生误差累积问题,因而可以达到很高的精度。如独立站射电干涉测量技术,对于相距数千公里的距离测量精度达 1×10^{-8} 的量级;卫星源射电干涉测量方法经鉴定的精度也达 1×10^{-6} ,测程也达到了八百多公里。应用空间技术的另一突出优点是同一手段可以同时完成三维测量。

应用独立站射电干涉测量技术可以建立准惯性参考坐标系,从而可以对板块运动和现代地壳运动进行“绝对测量”。而常规大地测量方法是以地球本身为参考,只能测量相对运动。

在相距数百甚至数千公里的两点间进行距离测量,用空间大地测量技术只要数小时就可达到上述精度;而常规方法完成几百公里的水准路线或三角锁的测量,所需时间则要以月或年来计算,其耗费的经费也是可想而知的。

综上所述与常规方法相比较,空间大地测量技术具有精度高、测程长、观测时间短、速度快、观测费用低(指远距离测量)、全天候工作和能进行“绝对测量”等优点,所以空间大地测量技术是研究大范围现代地壳运动和全球板块运动的唯一有效手段,空间大地测量将会在弄清楚引起地震和其他地球动力学现象的动力学过程中起很重要的作用。

三、独立站射电干涉测量简介

独立站射电干涉测量(VLBI),最先由天文工作者用来精确测定射电源的空间位置和结构,后来才发展为观测已知位置的河外源来研究地球动力学问题。

这一方法的基本原理是地面上彼此相距很远的两个以上的测站,同时接收河外射电源发射的射电信号,经比较记录和相关处理求得时延——河外源信号的同一波前到达两

个测站的天线的时间差。时延与两天线间基线在射电源方向上的投影成正比,且与两站间钟的同步差有关:

$$\tau = -\frac{1}{c} \mathbf{b} \cdot \mathbf{s} + \Delta\tau$$

式中 τ 为经相关处理后得到的时延, c 为光速, $\mathbf{b}$ 为基线矢量, $\mathbf{s}$ 为源方向的单位矢量, $\Delta\tau$ 为两站间钟的同步差。接收四个以上方向已知的射电源信号后,便可求得基线矢量的三个分量和钟差。

由于 VLBI 系统使用了记录带宽很宽的 Mark III 记录终端(记录带宽为 56 兆赫)和高稳定度的频率标准氢钟(稳定度为 10^{-14} — 10^{-15}),使时延的测定精度达到 0.1 毫微秒,相应的距离测定精度为 3 厘米。由于地面两测站间距离即基线长度可达数千公里,完成一次观测仅需数小时的时间,因此引起基线长度微小变化的各种因素(如板块运动、板内地壳形变、固体潮、极移和地球自转等)和引起时延变化的各种因素(传播介质、相对论效应、射电源结构等)都将进入观测方程,从而使我们可以利用这种技术来研究上述两类现象。

因为独立站射电干涉技术的观测对象是河外射电源,它们远离地球达四十亿光年,因此由这种观测建立的河外射电源参考系是一准惯性坐标系,可以作为板块运动和地球动力学研究的“绝对”参考。同时这种观测也是纯几何的,所以既避开了地球引力场模型误差的影响,也不受卫星定轨和卫星寿命的牵连。

由于天空中均匀分布着百余颗位置已知的射电源,可以根据需要随时进行观测;又因为射电信号可以穿过云层,因此是一种真正的全天候观测手段。

综上所述,独立站射电干涉测量技术具有精度高、应用范围广、观测周期短、测程长、能建立惯性坐标系、全天候工作等优点,因此在地学应用中具有广阔的前景,应该建立这种技术系统作为地学研究的基本台站。

四、卫星源射电干涉测量简介

全球定位系统(GPS)是美国国防部计划建立的一个卫星导航系统。该系统由均匀分布在六个圆形轨道面上的 18 颗卫星组成,各轨道面的倾角均为 55° ,卫星高度约为 20000 公里,卫星运行周期约 12 小时。整个系统将于 1988 年投入使用。系统建成后可以保证全球任何地方、任何时刻都可以对四颗卫星进行同时观测。

与以往的卫星导航系统一样, GPS 完全是为军事目的而建立的,因为其精度更高,保密性也更强。但是民用部门仍然设法开发它在民用导航和大地定位方面的应用,并已取得了突破性的进展。其中最具有代表性的是美国麻省理工学院的 C. C. 康塞门教授研制的仪器 Macrometer。该仪器接受 GPS 卫星发射的射电信号,利用干涉原理进行相关处理,使三维相对定位精度达到 1×10^{-6} ,而不需要知道每个卫星发射的射电信号的具体结构,从而打破了美国国防部不提供密码就不能进行高精度测量的技术封锁。与用于军事目的的接收机相比,这种方法的缺点是需要自己确定卫星轨道和不能实时处理。前者不难解决,后者对于大地测量和地壳形变测量不算什么问题。这种仪器为大地测量开辟了诱

人的前景,因此 1983 年在西德汉堡召开的 IUGG 大会上授予康塞门教授卡尔·普尔弗莱策奖。

使用卫星系统的大地测量,其精度受制于定轨精度。目前定轨精度还不够理想($0.5-2 \times 10^{-6}$),要获得厘米级的大地定位精度,测程不能超过 100 公里。现在正努力提高定轨精度。如果使用双频仪器并配备氢钟来定轨,精度可以达到高于 10^{-7} 。则定位观测精度还可以进一步提高,测程也可以进一步加长。

由于地面接收到的卫星发射的射电功率比接收到的类星体信号功率强 10^5 倍,因此接收卫星射电的接收机及其天线的体积大为缩小,可以装于一部吉普车内,便于流动观测。这样,可以建立以观测类星体的射电干涉固定站为基准站,中间辅以观测卫星射电的流动站,形成完整的地球动力学观测网。经过近十年来的探索,目前大部分从事这方面工作的科学家都相信这是正确可行的方向。美国,西欧国家正致力于此,澳大利亚和日本也在开展这一工作。

现今 Macrometer 已有商品供应。在 1988 年全部 GPS 系统投入工作前,可以观测六颗试验卫星,对于我国这些卫星也提供了必要的时空覆盖,仪器可以正常运行。

五、国外现代地壳运动研究概况

世界各国,特别是美国、日本和一些欧洲国家,对现代地壳运动的研究非常重视,所使用的最主要观测手段是空间大地测量技术——射电干涉测量、激光测月、人卫激光测距和全球定位系统。美国的技术实力最为雄厚,因而这方面的工作也走在最前头。他们于七十年代初期最先意识到空间技术用于现代地壳运动的可能性,便着手开展工作。到目前为止,多次试验观测已经证实,独立站射电干涉技术的测地精度在几千公里的距离上只有几厘米的误差,其相对精度达到 1×10^{-8} 的量级(参阅表 1,图 1),为了地球动力学研究的

表 1 应用 MARK III 系统的 VLBI 网部分测量结果一览表

基线名称 (矢量)	纬度差 (度)	经度差 (度)	距 离 (米)	均方根差 (厘米)	相对精度 ($\times 10^{-8}$)	次 数
Haystack-Onsala	11	70	5599714.55	2.3	0.40	16
Haystack-OVRO	-7	180	3928881.65	1.7	0.43	14
Haystack-HRAS	-20	197	3135641.03	2.3	0.72	20
Haystack-Effelsberg	6	63	5591903.61	4.0	0.72	3
HRAS-Effelsberg	12	47	8084185.01	1.1	0.14	3
HRAS-Onsala	15	52	7940732.32	7.2	0.91	16
HRAS-OVRO	24	142	1508195.37	1.7	1.13	14
OVRO-Effelsberg	7	38	8203742.64	4.2	0.51	3
OVRO-Onsala	11	42	7914131.10	4.8	0.61	14
Onsala-Effelsberg	-33	341	832210.53	0.7	0.84	3
Chilbolton-Onsala	21	128	1109864.35	1.3	1.17	7
Chilbolton-Haystack	-7	240	5072314.51	4.1	0.81	7
Chilbolton-HRAS	-13	224	7663737.47	9.3	1.21	7
Chilbolton-OVRO	-8	214	7846991.37	7.6	0.97	7
HRAS-Westford	20	17	3134928.06	1.7	0.54	31

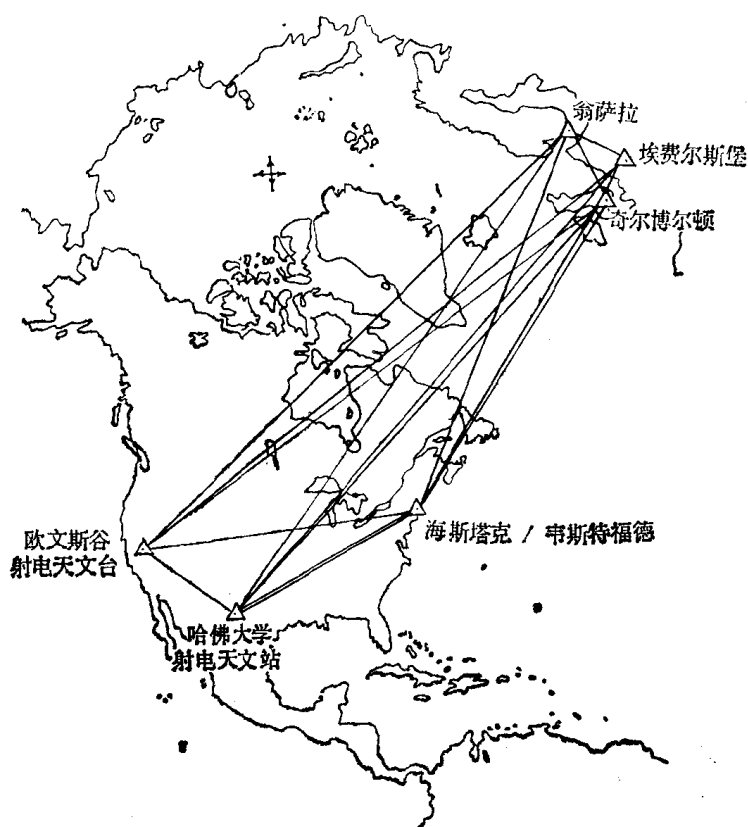


图1 使用 MARK III 系统的 VLBI 网简图

需要,还研制了三台流动式河外源射电干涉仪,在圣安德列斯断层附近,阿拉斯加和一些太平洋岛屿上进行了观测。1983年1月更加小型的,可以用于加密网点的卫星源射电干涉仪器也通过了鉴定。一批激光测月和人卫激光测距的固定站和流动站也先后投入了观测。各种观测手段都取得了有用的观测成果。

在射电干涉技术和其他空间大地测量技术试验获得成功的基础上,他们先后制定并实施了一系列的观测计划,如地壳动力学计划、太平洋板块运动实验、圣安德列斯断层实验、ARIES (天文射电干涉测地)计划、POLARIS (用射电干涉测量方法分析地极移动)计划等。其中以1979年美国宇航局(NASA)等单位制定并组织实施的空间大地测量在地壳动力学和地震预报中的应用计划(简称地壳动力学计划)最为全面,目前已有25个国家的科学工作者参加了这项全球性的合作。

1983年美国宇航局回顾了地壳动力学计划的执行情况,并对计划做了修订。到目前为止,已经取得下列主要成果

(1) 根据自1972年以来在圣安德列斯断层附近的观测表明,北美板块和太平洋板块间的相对运动保持每年 8 ± 2 (厘米)的常量,比根据地质资料推断的每年5.5厘米高了很多(图2)。

(2) 根据自1974年以来,在圣安德列斯断层附近的三个站——欧文斯谷射电天文台(OVRO)、哥德斯通(Goldstone)和喷气推进实验室(JPL)的观测发现: (a) 1979年1月至1979年8月之间 JPL 站向北西方向移动20厘米; (b) 1978年8月至1979年底

JPL 站在不同方向上移动达 10 厘米；(c) 1980 年初 JPL 站回到了 1978 年的位置。与此同时该区域内水井的氢含量、重力异常和断层的蠕动率均出现异常变化。这些现象在地球物理学中具有重大价值,但其结果仅是初步的,还有待进一步验证。

(3) 根据美国麻省的海斯塔克 (Haystack) 与瑞典的翁萨拉 (Onsala)、西德的埃费尔斯堡 (Effelsberg) 间的观测发现大西洋板块和欧亚板块间的相对运动在每年 1 厘米以下。

(4) 根据 1972 年以来在美国麻省和加州的两面射电望远镜组成的约 4000 公里长的基线上的 36 组观测,发现其长度变化约每年 0.3 厘米。因此北美板块内部如有变形的话,也低于每年 1 厘米的水平。

根据已经取得的成果,美国宇航局提出,在本十年度余下的时间和以后的数十年内,地壳动力学研究的目标是测量和模拟北美、太平洋、欧亚、澳洲诸板块的运动和其他某些重点地区的地壳运动和形变;不仅要定量描述这些地区的构造运动、阐明地质构造对运动的约束,还要通过研究地极移动的短期项、地球自转的变化、地球内部动力学过程与地壳运动的关系,精化全球板块运动的模式和重点地区地壳运动的模式。这些结果将直接用于地震预报和地球内部物理的研究。

为达到上述目标,美国宇航局、国家海洋和气象局、美国地质调查所、国防制图局和国家科学基金会成立了联合组织致力于发展和移植所必需的空间技术到地球动力学的研究中去。

西欧各国,如联邦德国、荷兰、瑞典、法国、意大利、西班牙等国除参加美国宇航局组织实施的全球动力学计划外,还制定并实施了一些区域性的研究计划,如欧洲 VLBI 观测计划、欧洲地震预报计划、欧洲射电干涉测量和多普勒观测会战等。

日本也利用北海道、东京天文台、鹿岛、水泽国际纬度站和国土地理院的射电望远镜组成 VLBI 网,主要致力于日本列岛的地壳运动研究。

此外,澳大利亚、加拿大、英国、巴西、墨西哥、智利、秘鲁、南非等国也先后开展了 VLBI 的观测工作。他们大都参加了美国宇航局组织的全球地壳动力学计划的工作。

六、结 束 语

进入空间时代的大地测量新技术,使得测量数千公里长的基线每年 1—2 厘米的变化成为可能。这样的精度与常规大地测量相比高了几十到一百倍。从而可以用来测量板块运动、研究全球地壳形变。这些问题的深入研究将会促进众多的地学问题(如地震预报、板块运动机制,地球内部物理等)的解决,对国民经济建设和国防也有实际意义。

在国际上如果说七十年代是空间大地测量的技术发展阶段的话,则八十年代已进入

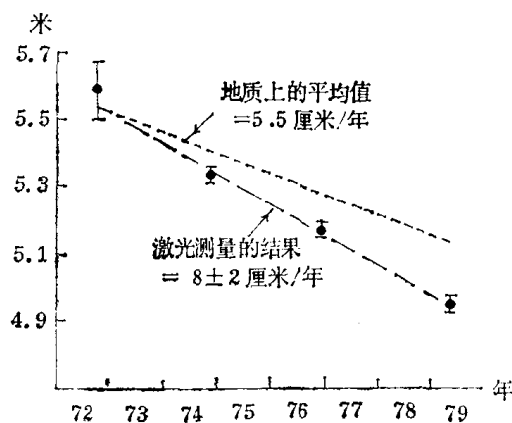


图 2 沿圣安德列斯断裂的运动
圣地亚哥—昆赛基线(896275 米)

了实测阶段。鉴于目前有关的一些技术已日趋成熟,许多实验结果也已证明这些新的技术在地学研究所起的作用,世界上众多国家已相继开展了应用空间大地测量技术研究现代地壳运动的工作,并已取得了一些初步成果。

我国是世界上人口最多的国家,面积占世界第三位,所处地理位置在全球板块构造和地球动力学研究中非常重要,因此应该对地球科学事业作出应有的贡献,逐步开展应用空间大地测量技术研究现代地壳运动的工作。

空间大地测量技术除研究地壳运动外,还可以直接用于国民经济建设和国防建设项目的测绘保障。空间大地测量技术的建立也是改变我国测绘技术落后面貌的唯一途径,应当给予高度重视。

本文论述了我国开展应用射电干涉技术研究现代地壳运动的必要性。当然,要开展这项工作,需要花费国家大量投资;加之这项技术难度大、涉及面广,必须花很大力气,并与有关单位通力合作,才能取得成功。

参 考 文 献

- [1] 李善邦:中国地震,地震出版社,1981年。
- [2] 中国科学院地质研究所:中国地震地质概论,科学出版社,1974年。
- [3] 国家地震局西南烈度队:西南地区地震地质及烈度区划探讨,地质出版社,1977年。
- [4] 中国科学院地球物理研究所:中国强地震简目,地图出版社,1976年。
- [5] NASA: Application of Space Technology to Crustal Dynamic and Earthquake Research, Washington, D. C., 1979.
- [6] NNAS, RNAE, CIOM: Geodetic Monitoring of Tectonic Deformation—Toward a strategy, National Academy Press., Washington, D. C., 1981.
- [7] Committee on Geodesy, Assembly of Mathematical and Physical Sciences, The National Research Council: Geodesy: Trends and Prospects, National Academy of Sciences, Washington, D. C., 1978.
- [8] NASA: The NASA Geodynamics Program: An Overview NASA Technical Paper 2147, Washington, D. C., 1983.
- [9] Hothem, L. D. and Fronczek, C. J., Report on Test and Demonstration of Macrometer Model V-1000 Interferometric Surveyor, FGCC Report: FGCC-IS-82-2, Washington, D. C., 1983.
- [10] Carter, W. E. and Robertson D. S., Geodynamic Measurements from the HRAS-Westford POLARIS Radio Interferometer, Proceeding of General Meeting of the IAG., Tokyo, May 7—15, 1982, p.p. 146—155.
- [11] Campbell, J.: Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Geophysics: Status and Prospects.
- [12] Sawking, F. J., Chase, C. G., Darby, D. G., Rapp, G. Jr.: The Evolving Earth, Macmillan Publishing Co., Inc., 1978.
- [13] Bock, Y. et al.: Geodetic Accuracy of the Macrometer Model V-1000, *Bulletin Geodesique*, 58., 1984.

RESEARCH ON PRESENT CRUSTAL MOVEMENTS BY APPLYING RADIO INTERFEROMETRIC TECHNIQUES

Zhang Chengze Lin Weimin

(Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences)

Abstract

Radio interferometry, including very Long Baseline Interferometry (VLBI) and Satellite Interferometry (Macrometer), is one of main space geodetic techniques proposed and expanded in recent years. The objects observed by VLBI are quasars. As a result, the reference frame established is a quasi-inertial system which can be used for "absolute" monitoring of present movements of earth crust; Macrometer interferometric surveyor is a transportable system, one can use it to densify the basic network formed by VLBI stations, and to construct different orders of deformation network. Moreover, the advantages of high accuracy and long measuring range make radio interferometric technique be the most effective ones for crustal movement studies. In addition, the establishment of radio interferometric techniques is of practical significance in national economic construction and building up of national defence.

In this context, the status of studies on crustal movements done by foreign scientists is presented briefly, and the necessity of launching the studies on temporal movements of earth crust in China by applying radio interferometric techniques is discussed.

VLBI 定位和测定勒夫数的基线优化 分布及预期精度估算*

许 国 昌

(中国科学院测量与地球物理研究所)

摘 要

本文就 VLBI 定位和测定勒夫数的较优基线分布问题进行了分析和估算;定量地研究了固体潮对各种基线分布的影响情况;最后,对武汉-乌鲁木齐基线,一方面按固体潮理论对台站坐标进行三维潮汐位移改正的计算,另一方面计算了用 VLBI 测定勒夫数的预期精度,论证了 VLBI 以合乎要求的精度测定勒夫数的可能性。

一、前 言

精密定位和测定勒夫数是 VLBI 技术在测地方面的重要应用,国内这方面的工作,目前仍处于准备和发展的阶段,因而研究定位和测定勒夫数的精度与基线布设之间的关系,定量地了解固体潮对各种基线分布的影响情况,以及估算 VLBI 定位和测定勒夫数的预期精度是必要的。本文目的在于根据 VLBI 观测量的分析理论,试图对上述问题作一初步的定量分析和讨论。

观测的射电源取 OJ287, 3C273, 3C454.5, 3C345, 4C67.05, 照顾了源赤经 α 、赤纬 δ 分布的均匀性和源的强度。计算时间取为 1984 年 1 月 1 日 0:00 至 24:00, 每 15 分钟一个计算值。基线三分量 b_x, b_y, b_z , 勒夫数 h, l 和钟差参数 a_0, a_1 作为平差参数, 源的九个坐标 (不含 3C273 的赤经) 和地球自转三参数 UT1, $x_{\text{BIH}}, y_{\text{BIH}}$ 作为非平差参数。并取 $\sigma_r = 0.2$ 毫微秒 (相当于 6 厘米), $\sigma_{\text{源各坐标误差}} = 0''.01, \sigma_{\text{UT1}} = 1$ 毫秒, 对极移取 $\sigma_x = \sigma_y = 0''.07$ (相当于 20 厘米) 进行计算。

VLBI 观测方程按下式建立

$$\begin{aligned} & a_{i1}\Delta b_x + a_{i2}\Delta b_y + a_{i3}\Delta b_z + a_{i4}\Delta h + a_{i5}\Delta l + a_0 + t_i a_1 \\ & = \tau_i - \tau_{i0} - b_{i1}\Delta \text{UT1} - b_{i2}\Delta x_{\text{BIH}} - b_{i3}\Delta y_{\text{BIH}} - \sum_{j=1}^{M-1} b'_{ij}\Delta \alpha_j - \sum_{j=1}^M b''_{ij}\Delta \delta_j \end{aligned}$$

式中 i 为观测值序列的标号, j 为源的编号, M 为观测源总数, $\tau_i - \tau_{i0}$ 为第 i 个观测值与理论观测值之差, t_i 为 τ_i 取得的时间。其中由于非平差参数的系数 $b_{ij}, b'_{ij}, b''_{ij}$ 均与基线分量有关, 因而由非平差参数误差引起的模型误差 MDE 会随基线的增长而增大; 平差参

* 1984 年 9 月收稿。

数的系数 a_{i1}, a_{i2}, a_{i3} 均与基线无关,因而基线分量的噪声误差 NOE 与基线长度无关,且因 a_{i3} 只与源有关,所以观测方程系数阵的对应列实际上是由 M 个数重复排列而成的,因而基线极分量解算结果的可靠性要差些,即极分量的 NOE 会大于另两个分量的 NOE。

二、结果与分析

寻求较优的基线分布和定量了解潮汐对各种基线的影响情况,是通过计算和比较以武汉为基线的一端的各种基线的预期结果来实现的。自武汉向北纬度每增加 20° 设一个站,共设五站,然后依次向西北方面旋转 22.5° 左右,到向西方向为止,各站与武汉分别组成 25 条基线,根据东西对称和南北准对称,近似相当于布设了 100 条基线。参照上述各基线的计算结果,选设武汉—乌鲁木齐基线进行其他精度估算和潮汐改正。

(1) 各基线测定基线分量、勒夫数的预期精度

各基线观测解算平差参数的 NOE, MDE, Total Error 和基线长度的测量精度 σ_B 由计算机统一输出,这里只给出主要结果与基线长度、方向的关系曲线图及其分析结论。

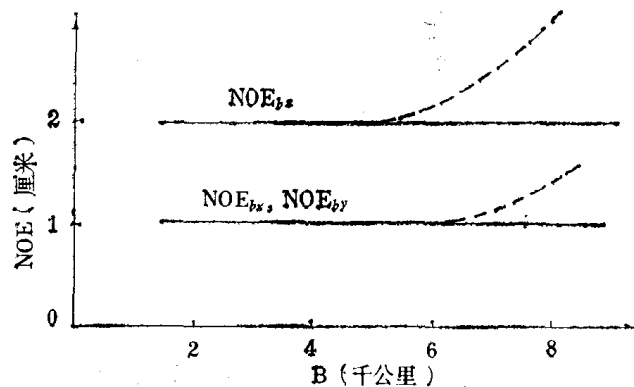


图1 基线三分量的 NOE 与 B 的关系曲线

虚线表示南北向基线,实线表示东西向基线,其他偏西北向基线的结果介于虚实线之间(下同)。

图1表明基线分量的 NOE 与基线长度无关,且 NOE_{b_z} 大于 NOE_{b_x}, NOE_{b_y} ,这与前言中的定性分析一致,此外,基线分量的 NOE 也与基线方向无关,偏北向基线的 NOE 在基线较长后,有上升的趋势,这主要是由于南北向基线的观测纲要变差引起的。

图2显示勒夫数的 NOE 随基线的增长而减小,到达最低点后,又略有增大的趋势;且随基线自北向西旋转,该最低点逐渐降低前移。可见测定勒夫数,偏东西向的基线的 NOE 较小。

基线三分量的 MDE 一般呈随基线增长而线性地增大的趋向,且与基线方向基本无关,见图3。

勒夫数的 MDE 与基线三分量的情形类似,这些均与前言中的定性分析一致(图4)。

各参数的 Total Error 是由 NOE 和 MDE 决定的,所以在本计算的约定前提下,VLBI 定位和测定勒夫数的较优基线分布,以偏东西向的基线优于偏南北向的,基线长度

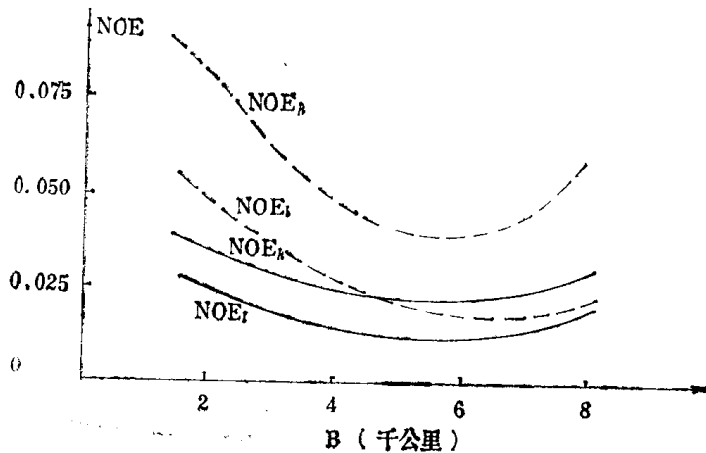
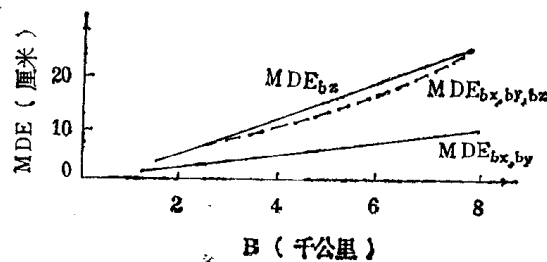
图2 测定 h, l 的 NOE 与 B 的关系曲线

图3 基线三分量的 MDE 与 B 的关系

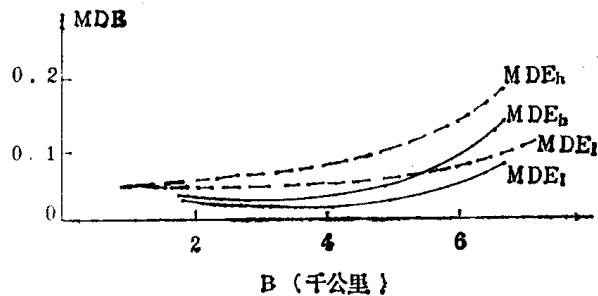


图4 勒夫数的 MDE 与基线 B 的关系

以 2000—4000 公里左右为较优。

可见在测地方面,上海天文台钱志瀚老师提出的“沪—昆—乌” VLBI 网是接近于最优的。另外, MDE 在 Total Error 中占主要地位,故适当减少非平差参数而增加平差参数的数目,是提高平差参数解算精度的途径之一。

(2) 固体潮对各基线长度影响的振幅

固体潮对基线长度的影响全幅与基线长度的关系示于图 5。

可见固体潮对基线长度的影响是随基线的增长而增大,到达峰值之后,又随基线的增长而缓慢减小的趋势,且随基线自北向西旋转,这个峰值逐渐增大并前移。可见偏东西向的基线受固体潮影响大于偏南北向的基线,故偏东西向的基线测定勒夫数的灵敏度高些。

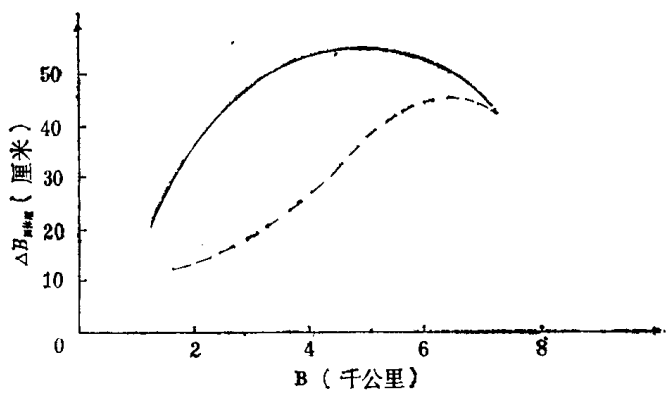


图5 $\Delta B_{\text{固体潮}}$ 与 B 的关系

(3) 武一乌基线测量精度的估算

非平差参数的精度改变时,通过比较平差参数预期精度的变化情况,可以了解非平差参数与平差参数之间的内在联系,取 $\sigma_r = 0.2$ 毫微秒, $\sigma_{UT1} = 1$ 毫秒,结果列于表 1:

表 1

Total Error 参数 采用的参量								
	$b_x(\text{米})$	$b_y(\text{米})$	$b_z(\text{米})$	h	l	$a_0(\text{ns})$	$a_1(\times 10^{-12})$	$\sigma_B(\text{米})$
$\sigma_{\text{源}} = 0''01, \sigma_{x,y} = 0''07$	0.048	0.062	0.089	0.057	0.038	0.115	9.13	0.058
$\sigma_{\text{源}} = 0''01, \sigma_{x,y} = 0''035$	0.033	0.052	0.050	0.057	0.038	0.115	9.13	0.037
$\sigma_{\text{源}} = 0''005, \sigma_{x,y} = 0''07$	0.043	0.048	0.088	0.039	0.026	0.072	5.58	0.055
$\sigma_{\text{源}} = 0''005, \sigma_{x,y} = 0''035$	0.026	0.033	0.048	0.039	0.026	0.072	5.58	0.031

可见非平差参数 $x_{\text{BIH}}, y_{\text{BIH}}$ 精度的提高使 b_x, b_y 尤其是 b_x 的解算精度显著提高,因而着重于基线测量的 VLBI 观测,把极移参数作为平差参数,可以使精度提高;而源位置精度的提高,使 h, l 的解算精度显著提高,因而观测定位精度较高的源或把源参数作为平差参数,可大大提高勒夫数的解算精度。另外,本计算的另一重要结果是:武一乌基线的 VLBI 测量,以合乎要求的精度检测基线和勒夫数,是能够做到的。

(4) 测站坐标的三维潮汐位移改正

仅示例性地给出武汉站 1984 年 1 月 1 日的径向潮汐位移计算结果,其波形呈一小波一大波的特征,最大变化量达 58.6 厘米,因此,精密测量时必须考虑潮汐的影响。

表 2 径向潮汐位移量 $u_r(t)$

单位: 厘米

t $u_r(t)$		t $u_r(t)$		t $u_r(t)$		t $u_r(t)$	
0:00	-18.4	6:00	-1.6	12:00	-12.3	18:00	+39.1
2:00	-11.5	8:00	-11.7	14:00	+10.3	20:00	+23.0
4:00	-1.7	10:00	-19.6	16:00	+33.3	22:00	-2.6

三、结 论

现将上述结论概括如下:

(1) VLBI 测定勒夫数,以偏东西向基线优于偏南北向基线,基线长度以 2000—4000 公里为较优。把地球极移参数作为平差参数可以提高定位精度,把源参数作为平差参数可以提高勒夫数的解算精度。

(2) 偏东西向的基线受固体潮影响大于偏南北向的基线。

(3) 武汉—乌鲁木齐基线的 VLBI 测量,以合乎要求的精度定位和测定勒夫数,是能够做到的。

参 考 文 献

- [1] 周江文: 误差理论,测绘出版社,1978 年。

THE BETTER BASELINE DISTRIBUTION AND ESTIMATES ACCURACY OF VLBI IN POSITIONING AND DETERMINING LOVE NUMBERS

Xu Guochang

(*Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences*)

Abstract

In this paper, the better baseline distribution of VLBI in positioning and determining Love numbers has been analysed and the body tidal effects on various baseline distributions has been studied quantitatively. Finally, as to the Wuhan-Ürümqi base line, on the one hand the calculation of three-dimensional tidal displacements for station coordinates has been carried out; on the other hand, the expectant accuracy of determining Love numbers with VLBI has been estimated. And the possibility of determining Love numbers with sufficient accuracy has been also confirmed.