

普通高等教育“九五”国家级重点教材



九五



# 空间大地测量学

——卫星导航与精密定位

许其凤 著

解放军出版社



普通高等教育“九五”国家级重点教材

# 空间大地测量学

——卫星导航与精密定位

许其凤 著

解放军出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

空间大地测量学:卫星导航与精密定位/许其凤著. —北京:  
解放军出版社, 2001

ISBN 7-5065-4100-9

I. 空… I. 许… II. 空间测量; 大地测量 N. P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 049841 号

解放军出版社出版

(北京地安门西大街 40 号 邮政编码:100035)

一二〇一工厂印刷 解放军出版社发行

2001 年 7 月第 1 版 2001 年 9 月第 1 次印刷

开本:787 毫米×1092 毫米 1/16 印张:19.75

字数:488 千字 印数:3000 册

定价:40.00 元

## 内 容 提 要

近 40 年来卫星导航定位技术的发展,是导航的阶段性进展也是大地测量的阶段性的进展。就卫星导航而言,除了大幅度提高精度和可用于高动态用户,还从二维导航发展为三维导航;不仅用于海上航行,还可用于陆地、空中和近地空间。就大地测量精密定位而言,空间大地测量的高精度、高效率 and 远距离使大地测量具有了新的高效手段;同时大地测量也从平面加高程测量步入三维测量;卫星大地测量技术已成为动态大地测量主要技术手段。不论建设卫星导航定位系统的初始目的如何,其效果是使两个学科同时取得飞跃式发展;其内在因素是他们都是以测距为基本手段,以定位为主要目的,只是使用条件和要求不尽相同。鉴于此,本书将导航与精密定位并重,一并作为主要内容讲述。

卫星导航定位系统涉及伪随机噪声码、导航定位、大地测量、卫星轨道等诸多理论和技术,为使读者了解系统全貌并为我国卫星导航事业的发展提供基础知识,为适应不同专业和不同基础的读者,本书作者对相关学科的有关理论和技术作了择要介绍,择要的原则是卫星导航定位系统的需要及其本身的系统性。

卫星精密定轨是卫星导航定位系统的重要组成部分,也是发展我国卫星导航系统所必须掌握的技术。它涉及对于卫星轨道特定问题的微分方程的数值解法和卫星轨道改进,本书也将其作为重要内容。

本书主要包括四部分,第一部分(一、二、三章)为基础知识,第二部分(四、五章)为卫星导航及其应用技术,第三部分(六、七章)为卫星大地测量及其应用技术,第四部分(八、九章)为卫星轨道理论。除基础部分外,其他部分具有一定的独立性,读者可按需求选择。

# 目 录

绪论	1
第一章 卫星导航原理和坐标系统	13
第一节 卫星定位与全球定位系统概况	13
第二节 卫星导航原理	15
第三节 卫星测量中的坐标系统和坐标变换	18
第二章 卫星的运动	34
第一节 二体问题的运动方程和运动方程的解	34
第二节 二体问题的卫星星历计算	48
第三节 卫星的受摄运动	51
第三章 伪随机码与伪随机码测距	60
第一节 伪随机码	60
第二节 截短码与复合码	72
第三节 伪随机码测距原理	77
第四节 码的捕获和锁定	79
第五节 电文码的调制解调及 m 码的功率谱	81
第四章 GPS 卫星导航	84
第一节 GPS 卫星发播信号结构和导航电文	84
第二节 GPS 导航解和精度分析	92
第三节 美国政府的 GPS 政策	104
第四节 差分导航与广域差分	107
第五节 导航接收机	118
第五章 其他卫星导航系统	121
第一节 GLONASS 卫星导航系统	121
第二节 地球同步卫星导航系统	130
第三节 区域卫星导航系统	144
第六章 卫星大地测量	159
第一节 载波相位测量	160
第二节 载波相位测量的同步观测解	164
第三节 载波相位测量改正	176
第四节 影响相对定位精度的因素	182
第五节 快速测量和准动态测量	191
第六节 GPS 相位测量接收机及其随机软件	200
第七章 卫星测量的应用技术	206

第一节	大范围高精度大地控制网或监测网·····	206
第二节	我国几个主要的高精度 GPS 网简介 ·····	222
第三节	局部地区工程控制网·····	226
第四节	GPS 测定大地方位角和垂线偏差 ·····	235
<b>第八章</b>	<b>卫星受摄运动方程的数值解·····</b>	<b>247</b>
第一节	单步法与多步法解受摄运动方程·····	248
第二节	阶数与步长的选取·····	267
第三节	卫星所受作用力的计算·····	272
<b>第九章</b>	<b>卫星的轨道测定·····</b>	<b>282</b>
第一节	局部地区 GPS 卫星定轨 ·····	282
第二节	卫星轨道根数的改进·····	284
第三节	轨道改进在定位中的应用·····	303
<b>参考文献</b>	·····	<b>307</b>

# 绪 论

运动是人类活动的主要形式之一,随着科学技术的发展和需求的不断增加,运动的范围从陆地、海洋、天空到太空。这种运动往往是自主的运动,即按照人们的意志,从一个特定位置(当前位置)到另一特定位置(目的位置)。例外的是卫星和宇宙飞船的在轨飞行(它在作用力的作用下飞行),但从发射到入轨、返回,以至变轨和调姿仍属自主运动。随着运动,当前的位置是经常变化的,要解决的问题是:确定当前的位置、当前位置和目的位置的几何关系以确定正确的运动方向和运动方向周边的环境以选择最佳运动路线。传统测量学各分支(大地测量、航空摄影测量、地图制图)的综合产品——地图是用于解决以上问题的传统技术。使用地图,参考周围的地形与用户点的相关位置,可以在图上相应地确定用户目前的位置;按照图上目的位置借助于指南针,可以确定正确的运动方向;在地图上可以了解该方向的周边环境(如道路、水系、地形),选择最佳运动路线。

尽管近代发展的数字地图(电子地图)可供漫游和方便地改变比例尺和主题,解决了图幅和比例尺等问题带来的不便,但地图的使用还受到一些限制。例如受到能见度的限制,当夜间或气象条件很差时难于观察周围的地形;还受到地形特征的影响,在沙漠、丛林、海上、高空等很难找到可供利用的参照物。也就是说,在不少情况下靠地图无法确定当前所在位置,尤其是在日趋广泛的海上、空中和高动态应用。现代导航是对陆、海、空的动态用户(包括高动态用户)即时提供当前位置和速度的理论和技术(以当前速度矢量调整正确航向,代替指北器件)。在运动中还结合使用各种形式的“地图”(可以是纸质图或数字图,也可以是一系列坐标)以完成预定的运动。在现代技术的支持下,这一过程可以是人工控制的,也可以是计算机智能化控制的。由此可见,在运动的应用中测量与导航有着十分密切的关系。

从技术上讲,不论是导航还是大地测量中的精密定位,它们的目的是确定一点的几何位置,其基本技术手段都是借助观测量建立未知点(待测量点或导航用户点)和已知点间的数学关系,从已知的点位求定未知的点位。这种观测量可以是方向(光学技术),可以是距离或距离差(无线电测距技术);其中已知点可以是恒星(方向),可以是地面点(控制点或导航台站)。已知点、未知点和观测量间的数学关系,也可称为数学模型,通常是建立在几何学基础上的数学关系式(方程),通过观测取得一定数量的方程,进而解算未知点的位置。在发展过程中,它们都与取得观测量的技术手段密切相关。这些共性体现为导航与测量定位在总体上有着相近和互相渗透的发展史。这种相近和渗透在现代卫星导航和卫星大地测量的发展过程中表现的更为明显。

导航与测量定位的工作条件不同、技术要求不同,因而具体技术、应用范围和发展也有所不同。一般测量定位要求的定位精度较高(例如厘米级或更高);导航所要求的定位精度较低(例如十米到千米级)。测量定位的点位大多处于静止状态,它允许采用多次观测以取得高精度,允许事后处理取得定位结果;导航测定的用户点大多是处于运动状态的,因而它要求实时(即时)提供定位结果,一般也不能以多次观测以提高精度。测量定位的作用范围(测量的范

围)可以是较大的(例如数千千米),也可以是较小的(例如千米,几十千米);现代导航还提供测速功能,测量则是处于零速状态;导航一般作用距离较大。导航要求在时间上提供连续服务,而测量不作要求。就总体而言,二者在时域和空域方面的要求存在差异,正是存在着这些差异,它们又具有不同的发展过程和方式。

导航和测量都是古老的学科,它们都是天文学的最早应用之一。最早的天文导航约在公元前一千年从希腊到埃及的航海,那时只是用观察太阳和大熊星座的 $\beta$ 星以确定北的方向。18世纪以后,天文学的发展支持了大地测量(法国科学院于1735~1752年完成的弧度测量)和具有定位意义的导航(六分仪测定船位)。这些都可以说是实用天文学的应用技术。虽然它们所取得的精度差别很大,但各自满足当时本领域的要求。

19世纪末英国物理学家马克斯威尔(James Clerk Maxwell)的电磁波理论及随后测定的电磁波传播速度(约为300000km/s)是无线电测距的基础,也是近代无线电导航与测量的基础。

近代导航始于第二次世界大战。大战期间德国首先发展的无线电导航系统实际上是一种导向系统,它利用几个发射源(站),例如三个,以相位延迟构成功率波瓣图,用户选择并沿着一个指向目标的波瓣,始终保持接收功率最大即可到达目标。战后改进并在挪威、英国等地取得应用的CONSOL-CONSOLAN属这一类。此后20年间无线电导航取得较大的发展。先后有DECCA、LORAN-A、LORAN-C和OMEGA等导航系统,它们都是双曲面定位系统。

无线电测距是测量无线电信号在两点间的传播时间从而确定两点间的距离。

$$D = \Delta t \cdot v$$

式中 $D$ 为两点间距离, $\Delta t$ 为电波传播时间, $v$ 为电波传播速度。取得点间(已知点到未知点)距离观测量,不难得到联系已知点和未知点位置的方程,从而解算未知点位置。

这一简单数学公式的实现(用于测距)却并不简单,它涉及一系列技术问题,这些技术问题解决的完善程度决定了测距的精度,进而决定了导航定位的精度。

主要技术问题之一是传播时间的测定。由于电波在真空中的传播速度约300000km/s,如果时间测定误差为30万分之一秒(0.0033ms),将产生1km的测距误差;定位解算还将使结果的精度降低(称为定位解算的精度衰减)。要达到较高的时间测定精度,除了精密时间记录设备外还要求信号具有陡峭的前沿。具有陡峭前沿的信号将产生大量的谐波,这就要求发射和接收设备具有很大的带宽。

另一主要技术问题是时钟的同步。自己知点到未知点的电波传播时间为

$$\Delta t = t_{\text{收}} - t_{\text{发}}$$

式中 $t_{\text{收}}$ 是未知点收到电波信号(测距信号)的时刻, $t_{\text{发}}$ 是已知点发播电波信号的时刻。通常测距信号是按约定时刻发播的,但 $t_{\text{收}}$ 和 $t_{\text{发}}$ 都是以各自的时钟为准发播和记录的,这就要求用户(未知点)钟和已知点的钟同步。以0.0033ms的精度保持时钟同步,在当时(20世纪中期)并非易事;传统的天文测量测时精度只有1~0.1ms,搬运钟的方法可以达到很高的精度,但难于在导航用户或定位接收机中应用。

要求用户钟与已知点(导航台站)的钟同步是困难的,若要求两导航台站的钟同步则相对易于实现。假定两个导航台站的钟保持同步并发播测距信号,并为用户机所接收:

$$\Delta t^1 = t_{\text{收}}^1 - t_{\text{发}}^1 + \delta,$$

$$\Delta t^2 = t_{\text{收}}^2 - t_{\text{发}}^2 + \delta,$$



式中  $\delta t$  为用户钟相对导航台站种的差异(通常称为钟差),上标 1,2 表示 1,2 导航台站,下标表示发播或接收。若两导航台站都在约定时刻发播信号

$$\Delta_2^2 - \Delta_1^2 = t_{\text{收}}^2 - t_{\text{收}}^1$$

乘以电波传播速度

$$D^2 - D^1 = (t_{\text{收}}^2 - t_{\text{收}}^1)c \quad (0-1)$$

式中不涉及用户机与导航台站的时钟同步这一棘手问题。所得到的是用户到两导航台站的距离差。

不难看出,观测量为距离差,则用户在导航台站坐标及其到用户的距离差所决定的双曲面上,它与地球椭球面相交为一曲线,称位置线,用户即在此位置线上;两条不同的位置线(不同导航台对取得的距离差)交点即为用户站的位置。这种导航系统假定用户在地球椭球体上,故一般限于海上导航。

测量距离差取代测量距离,避开了导航用户钟与台站的时钟同步问题,是无线电导航系统,如 DECCA、LORAN 和 OMEGA 系统,均采用双曲面导航的主要技术原因。

由于导航台的作用距离(可提供有效测距)有限,常由多站组网,这样就扩大了系统的作用范围,这种作用范围,称为导航系统的覆盖。

精确的电波传播速度也是取得正确测距的基础,它以相对误差影响测距误差。

$$\delta D = \Delta t \delta v$$

$$\frac{\delta D}{D} = \frac{\delta v}{v}$$

早在 1676 年就开始测定光(也是电磁波)的传播速度,20 世纪 40 年代测定的传播速度已相当精确。如 1946 年的测定值为 299793.0km/s,1947 年的测定值为 299792.0km/s,它与目前采用的精确值之差约为  $1.6 \times 10^{-6}$ ,当所测距离为 1000km 时仅产生 1.6m 的误差,可以说具有了足够的精度。

上述测定值是电波传播在真空中的传播速度,电波在地面或海面的传播速度不同于真空中的传播速度,它和传播路径(地面或海面)的介电系数、气象和采用电磁波的频率有关。这一因素限制了无线电测距进而限制了导航的精度。

另一个与测距精度有关的问题是多路径效应。导航台站发播的无线电信号不仅沿地面或海面传播,也经电离层反射后传至用户站(称为天波),由于天波受到电离层高度的影响,对测距精度影响很大。天波的强弱与传播距离和信号的载波频率有关,低频具有较少的地面(海面)吸收和天波干扰,对提高导航精度有利。夜间电离层高度较稳定,也可以利用天波进行远距离导航(当然精度严重下降)。例如 LORAN-C 发播的信号是不连续的脉冲串,它的间断足以使用户机分离地波和天波信号(天波滞后)。

综合考虑传播速度、传播吸收(设计发射功率和作用距离)、天波的削弱(或利用)选择合适的无线电频率是发展导航系统的重要议题。经分析和实验,小于 100kHz 的低频和 10kHz 左右的甚低频具有综合的优势,为主要的导航系统采用。

这一时期发展的差分导航技术、相位差测量的应用对以后发展的导航理论和技术有重要影响。为了校正传播速度引起的测距误差,LORAN-C 导航系统首先采用了差分导航,这一技术也用于 OMEGA。在覆盖区域内布设一些监测站,由于监测站的位置已知,可以准确地计算到各导航台站的距离及距离差,它和实测的距离差存在差异,该差异包括了传播速度采用值

的误差和两导航站时钟不同步的误差。监测站向用户广播这种差异作为修正信息,附近的导航用户可以使用这种差异修正并提高测距和定位精度。这种精度的提高与用户站到监测站的距离有关,越近效果越好,远离监测站则效果降低。

OMEGA 系统采用了两导航站调制信号的相位比较(相位差测定)代替接受信号时间差测定,以提高距离差的测定精度。例如在 10~50kHz 的载波上调制 200Hz 的正弦信号用于相位差测量。与脉冲信号相较,它占用频带窄(甚低频载波难于使用较大的带宽)、测量分辨率高。至于采用周期信号产生的多值解问题(也称模糊问题)由于其模糊波长约为 1500km,一般不会引起实质性问题。

这些无线电导航系统的单站作用距离在 1000km 左右,多采用多站组网(导航链),以加大覆盖范围。它们的定位精度约为 1km 左右;采用差分导航可达 100m 左右。

与此同时,无线电测距技术也成功地应用于测量。不同的是它沿着短距离和高精度方向发展。尽管无线电测距技术也曾用于长距离测量(如跨海连测、海岛测量、航空摄影测量的摄影站(飞机)位置测定等),但因前述诸多因素的影响,定位精度不是很高,不能很好地满足大地测量对定位的要求,未能取得广泛的应用。

电磁波(包括其高端的光波)及其传播的理论在测量应用中有不同发展形式,它不是以系统,而是以设备为主要代表的。

测距在测量定位中有重要的、不可替代的作用。传统的方法是以经过检定的因瓦基线尺量测距离,因瓦尺具有良好的热稳定性(经气象修正后尺长有很高的准确度),可以达到  $10^{-6}$  的相对测距精度(10km 边长,精度为 1cm)。这种测距方法需要较平坦的场地,测量是一尺一尺(每尺 24m)地进行,再经严格的归算取得的。尽管理论上早以证实测距结合测向对提高定位精度和作业的灵活性有很大贡献,但技术要求和相对较低的效率使得测距在测量定位中未能普遍应用。

20 世纪 40 年代瑞典 Bergstrand 和 AGA 公司制成世界第一台用于测量的光电测距仪和商品化的 AGA Geodimeter-2A,它是以可见光为载波,以克尔效应和偏振片进行低频调制。测量时主站发射经调制的光波,副站置角反射镜(保持按原方向反射),主站接收返回信号测量传播时间。这是一种双程测距,即所测距离是光程的一半。由于所测量的周期信号(正弦波)相位,存在多值性(模糊)问题,测距仪采用 2~3 种调制频率,以粗测(频率较低)和精测(频率较高)解决模糊度。

20 世纪 60 年代以 AGA-8 和 AGA-600 为代表的光电测距仪采用当时发展的激光作为载波,它具有很好的方向性(窄波束),在同样测程时降低了功耗,提高了精度。80 年代发展的红外测距仪也属激光测距,它采用了晶体管激光发射器件和数字化测相技术,使仪器功耗降低、数字化和小型化,甚至与测向的经纬仪结合成为全站仪。

50 年代南非 Wadley 设计并商品化的 Teurometer-MRA1 测距仪是以微波为载波的测距仪器,虽然精度略低于光波测距仪,但具有全天候作业能力。70 到 80 年代的 Teurometer-MRA3、CMW-20 以体效应管代替速调管,载波频率提高到 130MHz,更窄的波束减少了地面杂散回波,提高了精度。

除了以相位方式工作的测距仪,也有以脉冲方式工作的测距仪,由于激光具有极窄的波束,可以在极短的时间取得极高的功率,可以对远目标进行测量,例如卫星激光测距仪。60 年代它的精度约为米级,80 年代可达厘米级。近来可用于工程测量的轻便脉冲式测距仪的精度

为厘米级,测程约为千米。

1957年人造地球卫星的发射成功(前苏联的 CPVTHIK)开始了卫星导航和卫星测量的发展。

卫星导航和卫星测量是将卫星作为导航台站或测量定位的已知点,由卫星发播无线电测距信号进行测距、导航或定位。一个显著的不同是卫星是在不断运动的,必须精确测定它的轨道才可以通过计算得到它的精确位置。用卫星进行导航或测量的优点也是十分显著的,它采用超高频信号,穿过电离层(不是反射)和大气层到达用户,其传播路径中大部分接近真空,速度恒定;穿过电离层时引起的速度改变可以通过双频信号计算、修正;因而测距精度显著提高。此外,卫星,尤其是高轨卫星的覆盖范围大,可用不多的卫星达到全球覆盖。由于卫星离地面很远(近地卫星覆盖小)、信号功率有限,低电平接收是必须解决的技术问题。此外,作为信号传播时间测量的基准,卫星上必须有高稳定度的时钟(频标)。

60年代发展的铷原子频标和随后发展的铯频标、氢频标及其小型化以及可供低电平接收和测距的伪随机噪声码通讯的理论和实践奠定了卫星导航和测量的基础;连同随后的电子计算机的高速发展都为卫星导航提供了技术基础。卫星导航和定位就是在这样的技术背景下发展的。

50年代末和60年代初期卫星大地测量取得明显成就之一当属地球引力场的测定。卫星主要在地球引力场的作用力(还包括其他摄动力,但小得多)下运动,尽管大地测量为此曾作了许多努力,但地球引力场测定的精确程度还不能很好满足精密计算卫星轨道的要求。正是由于卫星主要是在重力场作用下运动的,对卫星运动的监测(当时主要是光学观测)可以精确地反解地球重力场。对低轨卫星观测所取得的地球重力场足以满足导航卫星(高轨)的精密轨道计算。在解算地球引力场的同时也解算了监测站的地心坐标。1966年斯密松标准地球 I 率先给出了一组地球引力场球协函数展开式的系数以及跟踪站的地心坐标。这些结果及其以后的精化为精密确定卫星轨道作了必需的技术准备。

第一个卫星导航系统是美国的军用子午仪系统(Transit),这一系统的研制始于1958年12月,1964年1月投入使用;初期仅供军用,1967年解密提供民用。子午仪系统是一种以卫星为“基站”(导航站)的距离差测量系统。这种距离差是靠接收卫星发播连续信号的多普勒频移取得的,常称为卫星多普勒导航或卫星多普勒测量。用户机使用与发播信号相同频率的本振对接收信号进行混频,如果卫星相对用户的距离始终不变,则混频后为一正弦波,如距离变化则产生多普勒频移,混频后为正弦波形,该正弦波的频率即为多普勒频率

$$f_d = f^s - f^u \quad (0-1)$$

式中  $f_d$  为多普勒频移,  $f^s$  为卫星发播信号频率,  $f^u$  为用户机本振频率。以一定的时间段通过计数器对正弦波正过零计数(也称多普勒计数)

$$N = \int_{t_1}^{t_2} f_d dt \quad (0-2)$$

多普勒频移是距离变化率的反映:

$$\frac{d\rho}{dt} = \lambda f_d$$

$\lambda$  是信号的载波波长。

$$N\lambda = \int_{t_1}^{t_2} \frac{d\rho(t)}{dt} dt = [\rho(t_2) - \rho(t_1)] \quad (0-3)$$

这样,通过测量多普勒计数  $N$  取得卫星在  $t_1$  和  $t_2$  时刻两个位置到用户的距离差。典型的一次卫星通过大约 10~18 分钟,可以获得 20~40 个这样的距离差。和前述双曲面导航系统一样,可以在地球椭球面上取得一系列位置线,用户位置在位置线上。或者说,用户的位置(经度  $L$  纬度  $B$ ) 满足位置线方程,该方程是  $L$ 、 $B$  以及卫星在  $t_1$ 、 $t_2$  时刻的位置  $\vec{r}(t_1)$ 、 $\vec{r}(t_2)$  和距离差的函数。

$$F = F[L, B, \vec{r}(t_1), \vec{r}(t_2), \rho(t_2) - \rho(t_1)] = 0$$

由于  $\rho(t_2) - \rho(t_1)$  是多普勒计数  $N$  的函数,上式还可写为

$$F = F[L, B, \vec{r}(t_1), \vec{r}(t_2), N] = 0$$

或改化为

$$N = E[L, B, \vec{r}(t_1), \vec{r}(t_2)] \quad (0-4)$$

式中卫星位置  $\vec{r}(t_1)$ 、 $\vec{r}(t_2)$  为已知量,  $B$ 、 $L$  为变量,以  $B$ 、 $L$  的近似值  $B_0$ 、 $L_0$  代入上式,并以级数展开,取至一阶项

$$\begin{aligned} B &= B_0 + \Delta B \\ L &= L_0 + \Delta L \\ N &= \frac{\partial E}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial E}{\partial L} \Delta L + E(L_0, B_0, \vec{r}(t_1), \vec{r}(t_2)) \end{aligned} \quad (0-5)$$

在导出(0-2)式时曾假定用户机的本振频率与卫星发播频率相同,实际上这难以做到,本振与卫星发播频率之差在相同时间间隔产生常值的附加多普勒计数  $\Delta N$ ,此外多普勒计数还有随机误差  $\epsilon$ , (0-5)式应改写为:

$$\epsilon = \frac{\partial E}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial E}{\partial L} \Delta L + \Delta N + [E(L_0, B_0, \vec{r}(t_1), \vec{r}(t_2)) - N] \quad (0-6)$$

(0-6)式是对应一次卫星通过中在  $t_1$ 、 $t_2$  时刻间所得多普勒计数的方程(也称为观测方程)。对应  $t_i$  和  $t_{i-1}$  的观测方程可写为:

$$\epsilon_i = \frac{\partial E_i}{\partial B} \Delta B + \frac{\partial E_i}{\partial L} \Delta L + \Delta N + [E_i(L_0, B_0, \vec{r}(t_i), \vec{r}(t_{i-1})) - N] \quad (0-7)$$

式中的偏导数可以用解析式也可以用数值差分求得。

一次卫星通过可以取得几十个如(0-7)式的方程,可以采用最小二乘的方法求解经纬度初值的修正值( $\Delta L$ 、 $\Delta B$ )和  $\Delta N$ 。

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (0-8)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta B \\ \Delta L \\ \Delta N \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial E_1}{\partial B} & \frac{\partial E_1}{\partial L} & 1 \\ \frac{\partial E_2}{\partial B} & \frac{\partial E_2}{\partial L} & 1 \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial E_i}{\partial B} & \frac{\partial E_i}{\partial L} & 1 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} E_{10} - N_1 \\ E_{20} - N_2 \\ \vdots \\ E_{i0} - N_i \end{bmatrix}$$

$E_{i0}$  是以用户的近似位置  $B_{i0}$ 、 $L_{i0}$  代入函数  $E$  计算的值。当近似值不精确时需要迭代解算。

在实时进行上述解算时必须已知对应时刻  $t_1, t_2, \dots, t_i$  的卫星位置  $\vec{r}(t_i)$ , 这可在卫星发播的载波信号调制电文码(称导航电文),其中包括计算卫星位置所需的卫星轨道参数(称为广

播星历)、卫星实际发播频率相对标称频率的修正值以及时间同步信号,用户依广播星历自行计算所需的卫星位置。而这些卫星轨道参数则是由地面监测站对卫星进行观测,经计算中心汇总计算卫星轨道参数,再由注入站注入到卫星上的存储器,并发播给用户的。

子午仪导航系统的配置就是为了实现上述诸多功能。可以把系统分为三部分:

(1)空间部分:包括6颗高度约1000km的圆形轨道卫星,绕地飞行周期约为120分钟,轨道面与赤道的夹角为 $90^\circ$ 。卫星发播两个载波频率,分别为400MHz和150MHz,采用两个频率是为了计算电波通过电离层时因传播速度改变引起的修正值。发播信号调制导航电文,其中包括时间同步信号、卫星频率修正、卫星轨道参数。

(2)地面监控部分:包括若干地面监测站、计算中心、通讯链路和注入站。监测站对所有的卫星进行观测并将观测数据通过数据传输链路送往计算中心。计算中心计算卫星轨道参数、卫星钟频偏并连同用于统一时间系统的时标经注入站对通过的卫星进行数据注入。

(3)用户部分:用户部分指各种型号的用户机,也称接收机。用户机接收卫星发播的信号,以锁相技术进行多普勒测量(计数)并利用双频修正电离层传播延迟、调解导航电文,进行时间同步,依卫星星历计算卫星位置和广播星历中卫星钟频偏解算用户位置(必要时进行迭代)。

按前述,不难看出子午仪卫星导航系统仍属双曲面导航系统,它应用了与地球椭球体相交的位置线,其应用范围也是在海上或高程近于0的大陆。不同的是它具有较多的多余观测量,以最小二乘法一并解出用户本振的频偏并提高解的精度。

卫星导航的优越性在于信号以近于直线传播,在很大程度上避免了多路径问题、信号在空中传播,较好地解决了传播速度不准确问题、高频多普勒测量(400MHz载波,每周相当0.75m)提高了测量分辨率。子午仪卫星导航系统的导航定位精度约为40~100m。

子午仪系统是以卫星作为定位基准的星基导航,它改变了传统无线电导航以地面导航台站作为定位基准的地基导航,技术上有较大突破,在导航精度上有大幅度提高,应该说是一种阶段性的跨越。

作为第一代卫星导航系统,子午仪系统也存在一些不足。由于卫星的运动和地球自转,子午仪系统轻易地作到了全球海域的覆盖,但因卫星轨道不高,少量卫星(例如6颗卫星)难于作到连续导航,平均每一个多小时才有一次卫星通过可提供定位,通常要与其他导航系统(例如惯性导航系统)组合,才能提供时间连续的导航。此外随着对导航范围需求的增长,不仅在海上而且在大陆和空中也需要导航的支持,子午仪系统只能用于海上(是一种二维定位技术)不能满足日益增长的需求。卫星多普勒导航一次定位时间约需10分钟,在一定程度上限制了动态用户的使用。

子午仪系统提供民用后,卫星导航定位系统在大地测量中取得广泛应用,它解决了传统测量无有效办法进行绝对定位(不依托已知点进行未知点定位)和长距离连测定位。70年代发展的差分定位、短弧轨道改进定位,提高了定位精度;用于高精度监测地球自转和极移(地球自转轴的变化)取得成功。

大地测量是静态测量,可以利用多次观测提高性能和精度。在大地测量中卫星的多普勒观测不只对一次卫星通过,而是几十次卫星通过,统一进行数据处理。一次卫星通过(如导航)卫星几乎在一个平面内运动,不能取得三维定位解。多次卫星通过相对测站分布在多个平面,从而可以取得三维定位解。在定位解算中不利用与地球椭球体相交的位置线,而是直接利用空间

距离差:

$$(N_i + \Delta N^j)\lambda = [\rho^j(t_i) - \rho^j(t_{i-1})]$$

式中  $\Delta N^j$  为用户接收机本振频偏在积分期间内引起的附加多普勒计数, 上标表示卫星的第  $j$  次通过(可以是同一卫星的不同次通过, 也可以是不同卫星通过),  $t_i$  为第  $i$  次多普勒计数的结束时刻。利用两点距离公式可得

$$N_i^j = F_i^j(\vec{r}^j(t_i), \vec{r}^j(t_{i-1}), \vec{r}, \Delta N^j)$$

式中  $\vec{r}^j(t_i)$  为卫星在  $t_i$  时的位置  $(x', y', z')$ ,  $\vec{r} = (x, y, z)^T$  为测站位置。式中未知数为用户位置和  $\Delta N^j$ , 应用最小二乘法

$$X = (A^T A)^{-1} A^T L \quad (0-9)$$

$$X = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta N^1 \\ \vdots \\ \Delta N^j \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1^1}{\partial x} & \frac{\partial F_1^1}{\partial y} & \frac{\partial F_1^1}{\partial z} & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial F_2^1}{\partial x} & \frac{\partial F_2^1}{\partial y} & \frac{\partial F_2^1}{\partial z} & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial F_j^1}{\partial x} & \frac{\partial F_j^1}{\partial y} & \frac{\partial F_j^1}{\partial z} & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial F_1^2}{\partial x} & \frac{\partial F_1^2}{\partial y} & \frac{\partial F_1^2}{\partial z} & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & 0 & \cdots & 0 & \cdots & 0 \\ \frac{\partial F_j^2}{\partial x} & \frac{\partial F_j^2}{\partial y} & \frac{\partial F_j^2}{\partial z} & 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial F_1^j}{\partial x} & \frac{\partial F_1^j}{\partial y} & \frac{\partial F_1^j}{\partial z} & 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad L = \begin{bmatrix} F_1^1 - N_1^1 \\ F_2^1 - N_2^1 \\ \vdots \\ F_j^1 - N_j^1 \\ F_1^2 - N_1^2 \\ \vdots \\ F_j^2 - N_j^2 \\ \vdots \\ F_j^j - N_j^j \end{bmatrix}$$

与导航应用不同, 这样取得的解是三维(空间)定位。由于相邻的卫星通过约间隔一小时, 这样的观测往往要进行数天。选择卫星相对测站的良好分布和使卫星视轨迹上行和下行对称还可进一步削弱卫星轨道误差的影响, 使精度提高。这样的测量定位可以达到 5m 左右的三维定位精度。卫星多普勒定位使大地测量获得绝对定位的高精度测量手段。

大地测量除取得了三维定位, 还在提高相对定位精度方面取得进展。

卫星导航系统以运动的卫星作为定位的基准, 卫星轨道的精确程度会影响定位精度。如果说在导航中定位精度不高, 卫星轨道误差的影响还不十分明显, 当定位精度提高到数米时, 卫星轨道误差的影响就成为进一步提高精度的限制。在测量工作中发现在卫星多普勒定位中, 点间坐标差的精度高于单个点的定位精度; 这可以解释为在相距不远(例如几百千米)的两点受到卫星轨道误差的影响以及大气传播延迟的影响带有很大的系统性, 或是说它们是相近的, 在坐标取差时削弱了这种影响, 从而提高了精度。这种定位称为差分定位, 或称坐标差分。使用中是以一个已知点的卫星多普勒定位解与已知坐标比较得出差值作为改正数, 用于未知点的修正(需采用共同的卫星通过)。已知点与未知点的距离一般不超过数百千米。尽管差分定位的解是未知点的坐标值, 但它属相对定位。

为了提高观测量的分辨率, 大地测量中使用的接收机, 除了进行多普勒整周计数外还采用了细分技术, 使多普勒计数不仅包括整数, 还包括了周的小数, 这实际相当于包括整周计数的

相位测量。

连续计数的多普勒测量和网的短弧法平差是数据处理方面的新探索,并取得了成功。在相距 300~500km 一些点的多普勒同步观测中,将各段的多普勒计数累加成连续的采样(载波相位测量的雏形),并在数据处理中将卫星的轨道修正作为待定参数(对于短弧近似为平移)一并求解,这样可以提高网的相对定位精度(精度为几十厘米),实际上这已是卫星轨道改进定位的雏形。在短弧法平差中还根据残差进行“滑周”的整周调整(类似 GPS 技术中的周跳处理)。可以毫不夸张地说,卫星多普勒测量的后期发展已为现代卫星测量(包括 GPS)奠定了技术基础。

GPS 是美国第二代卫星导航系统。早在 1964 年,美国第一代卫星导航系统——子午仪卫星导航系统投入使用后不久,美国海军和空军就已着手进行新一代卫星导航系统的研究工作,并分别提出了“621B”计划和“TIMATION”计划。

美国空军研究的“621B”计划拟采用 3~4 个卫星星座覆盖全球,每个卫星星座由 4~5 颗卫星组成,中间一颗为地球同步卫星,其余为轨道面倾斜一定角度(相对赤道)的 24 小时卫星。每个星座分别覆盖地球的一部分地区。这一卫星分布对两极地区覆盖不好,且要求卫星监测跟踪站的分布范围广。海军的“TIMAION”计划拟采用 12~18 颗高度为 10000km 的卫星覆盖全球。两个计划都采用 60 年代才进入实际应用阶段的伪随机码测距技术。1973 年美国国防部正式批准陆海空三军共同研制国防卫星导航系统——全球定位系统(Global Positioning System)简称 GPS。全球定位系统由 24 颗高度为 20000km 的卫星形成空间部分——卫星星座。这样的卫星星座,连同设在美国本土的地面监测部分和采用伪随机码测距技术的接收机基本上满足了全球范围、时间连续、全天候、实时、三维导航的要求。

和子午仪系统相似 GPS 也由空间、地面监测和用户机三部分组成。

与子午仪系统主要的不同,可以用多星、高轨、同步测距概括。多星是指一次导航定位不是只测量一颗卫星(如子午仪系统只对一颗卫星进行多次测量)而是同步测量 4 颗或 4 颗以上的卫星。高轨是指卫星的轨道高度(约 20000km)。高轨卫星单星的地面覆盖面积大,才有可能使用少量卫星保障全球各地在任意时间均可对 4 颗卫星实施观测;高的卫星轨道才有可能在已掌握的地球重力场测定结果保障高精度定轨(精度稍低的高阶系数对高轨卫星影响很小)。系统采用了 60 年代发展的伪随机码测距技术(测定传播时间),同步测距指对可观测的 4 颗或 4 颗以上卫星在同一瞬间测距(或称采样)。

如果说传统的导航系统多属双曲面导航系统,则 GPS 属球面导航系统,它的观测量不是距离差而是距离,用户钟差靠多星同步观测解决。依距离观测量可以直接列出三维距离方程,4 个这样的方程,将可解出采样瞬间的钟差( $\delta t_r$ )和用户的三维位置( $x, y, z$ )4 个未知数。

$$\begin{aligned} \rho_j^r &= c(t_r + \delta t_r - t_j^r) \\ c(t_r - t_j^r) &= \sqrt{(x_j^r - x)^2 + (y_j^r - y)^2 + (z_j^r - z)^2} - c\delta t_r \end{aligned} \quad (0-10)$$

式中带有上标  $j$  的  $x, y, z$  表示所测  $j$  卫星的坐标,  $\rho_j^r$  表示用户至所测  $j$  卫星的距离,  $c$  为光速。上式即为通过传播时间观测量( $t_r - t_j^r$ )建立的卫星与用户坐标间的关系式,当卫星坐标已知时,上式有 4 个未知参数,即用户坐标和用户机钟差。观测 4 颗卫星可解该 4 个参数,完成定位;当观测卫星数大于 4 时,可应用与(0-8)式类似的最小二乘法解算。

GPS 是三维定位系统,可用于海洋、大陆和近地空间;它瞬时完成距离观测,解算瞬时位置,可用于动态甚至高动态用户;它在时域和空域都是连续的。可以说,第二代卫星导航系统

GPS全面地完善了第一代卫星导航系统的不足。成为现代导航手段的主流技术。

GPS采用双频载波,调制发播两种测距码,即粗捕获码(C/A码)和精码(P码),前者供捕获P码和民用,后者供军用。两者都是伪随机码,但码频率不同(P码10MHz,C/A码1MHz)因而测距精度不同,所取得的定位精度不同。设计的定位精度为民用100m,军用10m。系统部分投入使用后测试,民用定位精度可达30m,军用5~7m。1992年美国人为降低民用精度为100m(SA)。

早在GPS实验阶段就开始研究GPS差分定位,美国的政策(SA)在一定意义上促使这一技术的发展(现已取消SA)。差分在LORAN-C,OMEGA和Transit中的成功应用自然地用于GPS。GPS的有利条件和定轨技术又使GPS差分导航有了新的发展。坐标差分、伪距差分和在一定数量地面站(差分参考站)支持下的广域差分、广域增强差分系统相继出现,不仅把C/A码定位精度提高到5m左右,而且提高了系统的可用性。GPS差分导航的局限性在于它是区域性系统,其覆盖范围取决于设置的地面参考站。应该说,GPS差分导航是在传统差分导航的基础上,充分利用GPS系统特点和新技术条件的发展,并取得了广泛的应用和效益。如果说差分技术在LORAN-C,OMEGA和Transit都取得了成功的应用,则GPS差分在理论上和精度提高的幅度上都取得了突破性进展。

在子午仪系统的大地测量应用基础上,GPS用于大地测量也得到了快速发展,它取得了较卫星多普勒测量更多的进展,已成为大地测量的主流技术。

大地测量定位采用载波相位作为基本观测量,这实际上是前述连续多普勒计数的另一种形式,但具有更高的分辨率;它除了带有一个整周不定度(也称整周模糊度)外,是一系列离散的距离观测量。借助于可进行较长时间的多次测量可以解算整周模糊度。利用空间点的距离公式不难建立观测方程,并解算点位坐标(连同整周模糊度)。大地测量多为相对定位,可利用多站同步观测的站间取差消除或削弱卫星钟频率误差(包括频偏和频漂)、大气传播误差修正后残余误差和卫星星历误差;近年来发展的优秀数据处理软件包括轨道改进功能和对流层随机模型参数改进,进一步削弱卫星星历和大气传播误差的影响,定位精度得到进一步提高。通常GPS相对测量可以在1~1000km的距离上取得 $10^{-6}$ 的相对精度(10km距离,精度1cm),这需要观测0.5~3小时(视距已知点的距离而定)。长时间观测和精细的数据处理可以在较长的距离(数百千米到上千千米)取得优于 $10^{-8}$ 的精度。

同一个GPS系统在用于导航和测量同属卫星定位何以精度差别如此之大?首先这两类定位工作条件不同,这两个精度概念也不完全相同,二者不宜直接比较。导航中的精度是绝对定位精度,它是用户点相对坐标系原点的位置精度,定位中不需已知点的支持;大地测量中的精度是未知点相对已知点的位置精度属相对精度,它需要已知点的支持(与之同步观测)。此外,不论导航还是测量其观测量和解的关系都是建立在几何学基础上(严格)的,其解的精度取决于观测量的精度。观测量的精度,或者说观测量中的误差,在导航应用和测量应用中有很大差别。导航使用的观测量是伪距,其测量精度一般为2m,而大地测量使用的观测量是载波相位,其单次测量精度的等效距离优于1mm。除测量误差,观测量中包含的其他误差对解的影响方式和修正程度对定位精度有重要影响。例如卫星轨道误差对相对定位(相同部分可消除)的影响要小于绝对定位,卫星钟的频偏和频漂在相对定位中可在两站同步观测取观测量之差中予以消除,静态定位的大量多余观测(冗余)不但可进一步削弱随机误差的影响,还可设置随机参数削弱系统误差的影响。一个可供参考的事实是当采用载波相位测量进行绝对定位(同样采用



较长的观测时间,并于事后处理)时,其精度就不是厘米级而是米级。可见在相对定位中多种误差得以充分地削弱或消除起到至关重要的作用;而高精度的观测、相对定位和大量冗余观测是充分削弱或消除多种误差的必需条件。正是这些因素导致大地测量和导航的定位精度有较大差别。

卫星测量的相对定位大体沿两个方向发展,一是以高精度为主要目标;一是以高效率为主要目标。前者主要供高精度控制网和地学研究,后者主要是工程应用。

近年来在高精度方面的发展,除接收机性能和天线的改进外,数据处理方法和软件的进展起了重要作用。例如轨道改进(轨道松弛)、已知点改进、对流层天顶延迟的参数估计以及相对论修正、地球固体潮修正等技术处理使得在长距离(几百或上千千米)相对定位中达到  $10^{-8}$ ~ $10^{-9}$  的精度。取得这样的精度要进行数天的连续同步观测。GPS 同样用于监测地球自转和极移并取得很高的精度,反过来,高精度的地球自转监测又给高精度 GPS 定位提供数据保障。

在多数工程测量中定位精度要求不高,但要求高效率。一般 GPS 测量时间较长,对于距离不长的工程测量而言效率不高。80 年代中期提出的 *Kinematic Surveying* 就是出于这一目的。不同于动态定位(*Dynamic Positioning*)它是一种测量,只是在测量中具有运动的特征。GPS 测量之所以要求观测时间较长是由于采用周期信号(载波)测距,存在整周不定问题(模糊度),只有较长的观测时间取得卫星空间图形较大变化才能取得整周的解(第一次采样时的相位整周数)和定位解,称为初始化。在取得整周数的解后,只要保持不失锁,到临近的另一未知点时就不需长时间观测以求定整周数的解,只需很短时间即可完成定位,提高了效率(精度约 3cm)。通常把这种方法叫做‘走—停’定位;其作用范围一般不超过 10km。近年来的研究进展主要围绕行进中失锁的检测和周跳的恢复和加入数据通讯的实时走——停定位(*Real Time Kinematic Surveying* 简称 RTK)。目前已用于小范围工程控制网、工程放样和测图。原则上这一方法也可用于动态定位,但其作用范围和高机动时的可靠性受到一定限制,只用于特定条件下的动态定位。

GPS 展示了广泛的应用领域,具有重要的军用、民用价值。由于 GPS 是美国军用导航系统,受美国的军事、政治等因素控制,为了摆脱美国的控制,一些国家或集团发展了或计划发展符合自身应用目的的卫星导航定位系统;如前苏联发展的 GLONASS 卫星导航定位系统、欧空局计划发展的卫星导航定位系统(GNSS)等,还可能还有其他系统的计划。不同导航定位系统的卫星星座分布和卫星总数可能不同,可提供的覆盖范围和精度可能不同,它们所采用的编码和电文格式也会有所不同。但这些卫星导航系统的导航原理相似,而且有很多共同的技术特点。例如,它们都可分为空间部分、地面监测部分和用户机部分;它们都采用了伪随机噪声码测距作为取得观测量的技术手段等。它们的应用,包括导航和精密定位理论也是相近的。

卫星导航定位不论在导航或在大地测量的精密定位领域都取得了阶段性的突破,它们逐步成为各自领域的主导技术手段。卫星导航与定位中有些理论和技术已趋成熟,有些理论和技术还在发展,例如卫星导航系统的完善性监测和加强、用户设备的数字化、低功耗和小型化。尤其是近年来发展的窄相关技术,它提高了伪随机码测距的精度,使 C/A 码的测距精度达到几十厘米。观测量精度的提高至关重要,它可以综合地提高系统性能和精度,例如提高导航信息(广播星历、钟差)的精度,降低对卫星几何分布的要求,提高导航精度。以载波相位测量和相对定位为特征的精密定位正在向区域性的精密动态定位发展,届时导航和精密定位的界限将更加模糊。正处于发展阶段的地面服务网络将综合地提高完善性和导航精度,将改变精密定位的