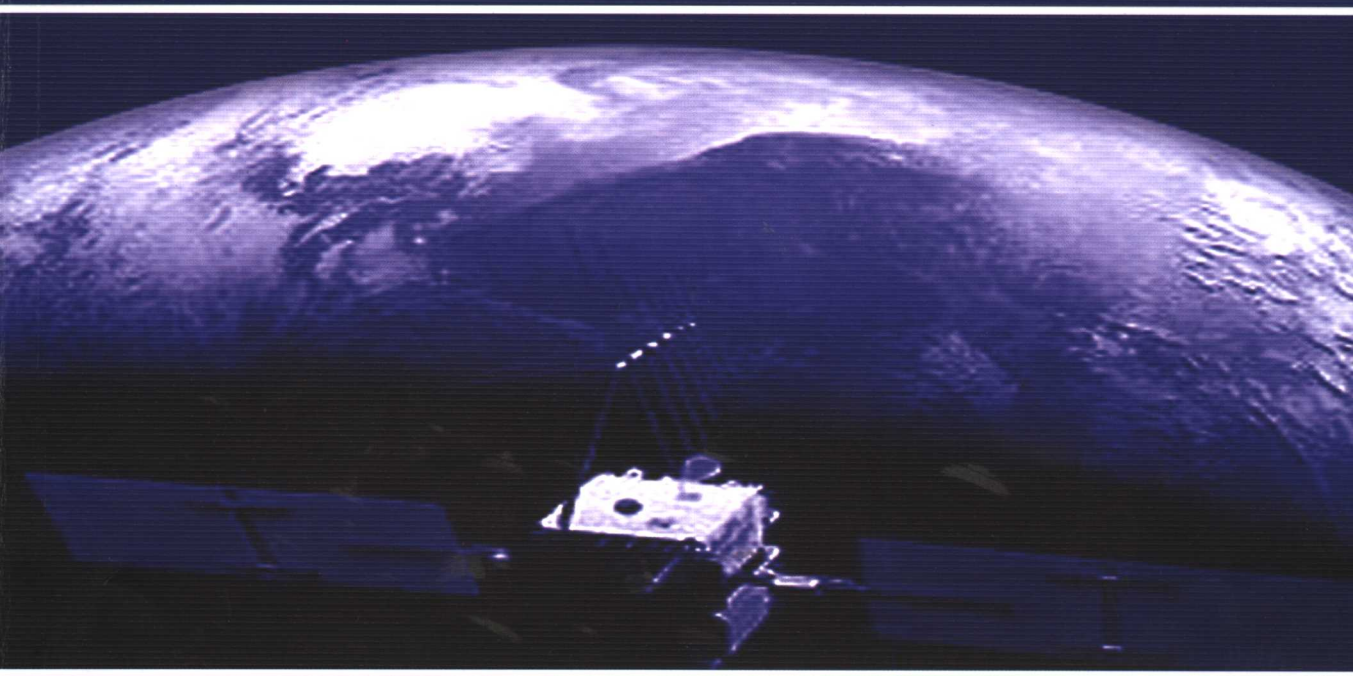


QUANQIU DINGWEI XITONG  
LILUN YU SHIJIAN

# 全球定位系统(GPS) ——理论与实践

■ 黄丁发 熊永良 袁林果 著



国家自然科学基金项目(编号:49771062,40271091)

教育部优秀青年教师基金项目(编号:2003109)

教育部留学回国人员科研启动基金项目

香港特别行政区政府研究资助局项目(编号:PolyU5051/98E,-CRC4/99A/C:3-ZB39)

四川省重点选题

# 全球定位系统(GPS) ——理论与实践

黄丁发 熊永良 袁林果 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

-----  
**图书在版编目 ( C I P ) 数据**

全球定位系统 (GPS): 理论与实践 / 黄丁发, 熊永良, 袁林果著. —成都: 西南交通大学出版社, 2006.10  
ISBN 7-81104-328-9

I. 全... II. ①黄...②熊...③袁... III. 全球定位系统 (GPS) IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 058033 号  
-----

**全球定位系统 (GPS) ——理论与实践**

**黄丁发 熊永良 袁林果 著**

责任编辑	秦 薇 张宝华
封面设计	何东琳设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (成都二环路北一段 111 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮 编	610031
网 址	<a href="http://press.swjtu.edu.cn">http://press.swjtu.edu.cn</a>
印 刷	四川森林印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm×260 mm
印 张	16.75
印 数	1—3 000 册
字 数	417 千字
版 次	2006 年 10 月第 1 版
印 次	2006 年 10 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 7-81104-328-9
定 价	29.80 元

图书如有印装问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 作者简介



黄丁发, 西南交通大学教授, 博士生导师。现任中国测绘学会理事、四川省测绘学会和四川省地震学会常务理事、四川省测绘学会空间定位专业委员会副主任、四川省测绘经济管理与咨询委员会委员。1985年和1988年在武汉测绘科技大学(现武汉大学)获学士和硕士学位, 1996年在西南交通大学获博士学位。先后被选为西南交通大学科技拔尖人才、铁道部青年科技拔尖人才、四川省学术和技术带头人。主要从事GNSS、InSAR的理论、算法以及系统集成的研究。代表成果: 通用GPS数据处理软件、基于小波分析的GPS数据处理理论、多天线GPS自动变形监测系统、基于Internet的虚拟参考站(VRS)系统软件(Venus)、GPS/InSAR数据融合方法等, 已在国内外学术刊物上发表论文80余篇。



熊永良, 1964年生于四川泸州, 1981年考入武汉测绘科技大学(现武汉大学), 1988年在该校获硕士学位, 2000年在西南交通大学获博士学位。2001年公派美国, 在俄亥俄州立大学访问一年。主要研究领域涉及GPS基线解算、相位周跳探测与模糊度分解、小波分析与GPS数据处理、对流层与多路径建模等, 发表论文40余篇。

# 前言



GPS自1993年12月正式投入运行至今只有短短的十余年,但其应用领域却已远远超出设计者的最初设想。其最初目的只是为美国军事服务,如今却已扩展到诸多民用领域,包括民用导航与监控、交通管理、测绘科学与技术、土木工程、空间科学、地球动力学、环境与气象科学、精细农业、动物保护、休闲旅游等。

我们的研究组早在上世纪80年代就开展了GPS理论与应用的研究,先后承担了国家自然科学基金、教育部优秀教师资助计划、教育部留学回国人员科研启动基金等多项GPS理论与应用相关课题,提出了一些新的算法,并研制了一系列具有自主知识产权的GPS数据处理软件。可以说,本书是作者多年研究成果的结晶,特点是紧跟国际研究前沿,理论与实践并重,书中还附有大量应用实例。

本书作为研究成果专著,在介绍研究成果的同时,也顾及了理论的系统性,在章节编排上力求理论体系的完整,但对于一般性的基础理论则力求在论述上尽量简洁。实际上,在GPS技术的发展历程中,数据处理与分析理论的进展发挥了极其重要的作用,它实际上也构成了GPS理论与应用研究的核心之一。本书在介绍GPS基本观测量与观测方程的基础上,详细分析了基本观测量及其线性组合、误差来源等,对卫星定位的数学模型,如短基线与长基线定位数学模型等进行了详细论述。对于GPS数据处理中的两个关键问题,周跳探测与模糊度分解理论及研究成果,本书单列一章进行详细阐述,内容包括模糊度分解的FARA方法与LAMBDA方法、模糊度分解快速算法与单历元单法,以及小波分析在GPS数据处理中的应用等。卫星导航是GPS应用的重要方面,本书也从差分改正数发布的标准、数据链(包括地基、空基数据链),以及广域增强方法等方面进行了论述。对于高精度GPS应用研究,介绍了多天线GPS变形监测系统的研究成果、数据处理方法、GPS网与地面网的联合处理及其变换,以及GPS高程测量等。在网络GPS研究方面,则论述了最新研究成果、网络GPS虚拟参考站(VRS)理论、服务网络体系及系统开发与实现等。

本书得到了中国工程院院士、武汉大学校长刘经南教授的精心指导和热情鼓励,特此表示深深的敬意和感谢;感谢武汉大学地球空间环境与大地测量教育部重点实验室的宁津生院士、陶本藻教授,感谢他们长期以来所给予的关心、支持与鼓励。感谢四川省地震局局长吴耀强高级工程师、副局长吕弋培高级工程师、四川省地震局减灾救助研究所所长陈维锋高级工程师、副所长廖华高级工程师,很多研究成果的取得是与他们的合作与交流,以及所提供的有力支持分不开的。感谢香港理工大学的丁晓利教授、殷建华教授、陈武教授,还有中南大学的朱建军教授、南京航空航天大学的孙永荣教授,正是在与他们长期的合作研究与交流中使我们受益匪浅。参加本书相关项目研究工作的人员还包括博士研究生周乐韬、李成钢、

徐锐、殷海涛等，他们刻苦钻研，付出了大量艰辛的劳动。特别感谢西南交通大学 211 办公室为本书的出版提供资金资助。

本书及其研究工作得到了国家自然科学基金项目（编号：49771062，40271091）、教育部优秀青年教师资助计划（编号：2003109）、教育部留学回国人员科研启动基金项目，以及香港特别行政区政府研究资助局项目（编号：PolyU5051/98E，-CRC4/99A/C：3-ZB39）的联合资助，在此表示衷心感谢！

GPS 理论与应用领域日新月异，由于作者水平所限，书中错误与不妥之处在所难免，恳切希望得到同行专家、学者及广大读者的批评指正。

**著者**

**2006 年 8 月**

# 目 录



1	导航与定位概论	( 1 )
1.1	导航定位技术概论	( 1 )
1.2	无线电导航定位方法	( 6 )
1.3	无线电导航系统	( 8 )
2	全球定位系统	( 20 )
2.1	GPS 系统组成	( 20 )
2.2	GPS 参考系统	( 23 )
2.3	GPS 信号与接收处理	( 33 )
2.4	GPS 卫星轨道运动	( 41 )
3	基本观测量与观测方程	( 48 )
3.1	GPS 基本观测量	( 48 )
3.2	观测量的线性组合	( 50 )
3.3	各类误差影响源分析	( 52 )
4	卫星定位数学模型	( 66 )
4.1	绝对定位及其观测方程	( 66 )
4.2	相对定位及其观测方程	( 69 )
4.3	GPS 测量数据处理模型	( 71 )
4.4	中长距离相对定位	( 74 )
5	周跳探测与模糊度分解	( 84 )
5.1	周跳探测	( 84 )
5.2	整周模糊度分解理论	( 92 )
5.3	整周模糊度分解的搜索法	( 96 )
5.4	最小二乘降相关分解法 (Least - Square Ambiguity Decorrelation Adjustment - LAMBDA 法)	( 98 )
5.5	模糊度函数法求解整周模糊度	( 109 )
5.6	双频宽巷模糊度分解法	( 110 )
5.7	动态定位模糊度求解	( 111 )
5.8	含约束条件的单历元求解算法	( 114 )
5.9	基于概率计算与模糊度变换的模糊度分解	( 120 )

5.10	基于小波变换的基线解算	(127)
6	GPS 卫星导航	(132)
6.1	GPS 导航综述	(132)
6.2	DGPS 方法、RTCM SC-104 及 NMEA 0183 标准	(133)
6.3	几个概念	(135)
6.4	远程数据通讯链	(136)
6.5	完好性监测	(140)
6.6	增强系统实例	(142)
7	高精度 GPS 自动变形监测	(145)
7.1	概述	(145)
7.2	高精度 GPS 自动变形监测理论	(147)
7.3	多天线 GPS 系统及在局部变形监测中的应用	(159)
7.4	高精度 GPS 数据处理分析软件 GAMIT/GLOBK	(167)
8	GPS 网与地面网的联合处理与变换	(171)
8.1	WGS-84 坐标系	(171)
8.2	常用坐标系之间的变换	(172)
8.3	GPS 网整体三维平差原理	(175)
8.4	GPS 网与地面网的联合平差	(180)
8.5	高程基准及其高程测定	(186)
8.6	通用 GPS 网数据处理软件——GeoNAS 介绍	(192)
9	虚拟参考站系统理论与实现	(196)
9.1	概论	(196)
9.2	VRS/RTK 定位原理	(201)
9.3	VRS/RTK 的关键技术	(205)
9.4	虚拟参考站系统实现	(216)
10	GPS 定位技术的应用	(220)
10.1	GPS 定位技术在科学研究中的应用	(220)
10.2	GPS 定位技术在工程技术中的应用	(226)
10.3	GPS 定位技术在军事技术中的应用	(229)
10.4	GPS 定位技术在其他领域的应用	(231)
附录一	RINEX 2.10 格式标准	(233)
附录二	GAMIT 入门指导手册	(251)
参考文献		(258)





# 1 导航与定位概论

导航 (Navigation), 原为“航行”之意。它源于海洋船舶航行, 初始形式是指罗盘领航和天文导航, 此后应用于陆地车辆和航空飞行器的行驶中。广而言之, 导航是通过实时测定运载体在行进途中的位置和速度, 引导运载体沿一定航线经济而安全地到达目的地的技术。

1519年, 葡萄牙航海家费迪南德·麦哲伦进行环球航行时, 就携带了“海图、地球仪、木制和金属的经纬仪、木制和青铜铸的四分仪、圆规、磁针、沙漏计时器和安装在船尾的测速器”等导航和定位设备。借助于这些设备和他超凡的个人能力, 他能够确定船的速度、方向和纬度, 但是却不能确定其经度。直到250年以后, 船员才能够在海上决定他们所在的地理经度。1957年10月, 世界上第一颗人造卫星发射成功, 空间科学技术的发展由此跨入了一个崭新的时代。稳定的空间平台、超稳定性能的原子钟频率标准和微电子学等技术的发展为GPS技术的成功提供了有力保障。现在, 卫星导航定位系统以人造地球卫星作为平台的星基无线电导航系统, 能为全球陆、海、空各类军民载体, 提供全天候、24小时连续、高精度的三维位置、速度和精密时间服务。

本章将首先对近代导航定位技术的发展过程作一简要叙述。

## 1.1 导航定位技术概论

要想准确地从A点到达另一点B, 关键是要知道这两点的位置, 并且最好在地图上表示出来。为此, 从16, 17世纪到20世纪, 人类花了近300多年的时间。我们如今可以准确地表示地球上任一点毫米级精度的位置。当然, 这也得益于数学、天文学和时钟制造等科学和技术的飞速发展。

早期的航海家和地图制造者依靠天文观测来确定地球上的时间和位置。因此, 这激发了对天体运动学的研究, 同时也促进了17, 18世纪精确时钟制造技术的发展。20世纪以来, 电信工业和时间同步技术的飞速发展, 导致了无线电导航系统的出现, 以及今天GPS技术的广泛使用。

为了准确无误地确定点位, 我们需要一个坐标参考框架。这个概念的出现要追溯到两千多年前, 那时的希腊人就知道地球是呈椭圆形状的。他们对地球的形状和大小已经有了较为深刻的认识, 有了用经纬度来描述地球上点位的概念, 而这种坐标系统目前仍在使用。

地球上一点的纬度是容易定义和测量的: 赤道就是一个天然的起点, 两极离赤道最远, 分别为北或南 $90^\circ$ , 那地球上任意一点的纬度就是离赤道北或南的角距离。纬度可以通过测量北极星(或太阳)的高度角来获得。但是, 经度相对来说, 是人为定义的, 因为没有天然固定的参照来定义经度。当然我们可以通过已达成共识的一个参考子午线作为起始子午



线(子午线就是过两极的大圆,一个通过地球表面南北两极的假想线圈)。可以说经度的测量,对于地理学家来说,是一个挑战。陆地上测量经度的实用方法到16世纪50年代才得以实现,而海上的则到17世纪70年代才得以实现。

像早期其他许多航海家一样,哥伦布(Columbus)知道纬度的概念,但却不知道如何去测量它。当然,经度的测量对他们来说,根本就是不可能的。但是,他们这些开路先锋是怎样设法穿越海洋并回到他们家乡的呢?应该说这主要还是依靠他们高超的航海术、过人的胆识和当时的推算定位(DR—Dead Reckoning)技术,当然也有运气的成分。发现新航线、新大陆,以及不同大陆之间的商业贸易都促进了航海事业的发展。

早期的导航不是借助天文观测仪器,而是通过航行的方向和距离来推算其所在位置,这种导航和定位技术称为推算定位。推算定位需要测量方位、速度和时间。而中国早在12世纪就发明了磁罗盘仪用于测量方位。距离则可通过测量船的速度和时间来计算。也可以说推算定位就是向量的简单叠加。但是,在椭球表面上二维的推算定位就会出现问題,因为在不同纬度上东西方向上的距离不可能相同。

把地球表面映射到平面上也会产生问题。因为椭球面是一个凸起的、不可展平的曲面。如果将这个面上的元素,比如一段距离、一个角度、一个图形投影到平面上,就会和原来的距离、角度、图形产生差异,这一差异称为投影变形。1569年,麦卡托(Gerardus Mercator)发明了一种把椭球表面投影到圆柱表面的投影方法,从而使导航制图领域取得了巨大进步。

### 1.1.1 经度和时间

地球上两点经度之差与它们的当地时间之差密切相关。地球自转速度是每小时 $15^\circ$ ,或者说是每天地球自转一周。因此,假如已知两点之间的当地时间差,他们之间的经度之差就能确定下来。两点之间一小时的当地时间差将导致他们之间的经度相差 $15^\circ$ 。当地时间能够用地球自转作为时钟来计算:白天可以用日晷来计算,晚上可以用恒星的位置来计算。但是,问题的关键在于如何同时知道两点的当地时间,这是一个巨大的挑战。在天文学家和机械发明家之间相互促进发展的200年,一种是利用天文的方法,另一种是利用时钟制造工艺技术。

机械时钟在一个参考点上对当地时间进行计时,然后把它带到另外一个地方和当地时间进行比较来确定两点之间的当地时间差。对于航海员来讲,就是在他们航行开始时进行计时。问题的解决办法在理论上都很好理解,但当时的关键在于时钟制造技术需要不断发展和提高。15世纪初,一个好的时钟的误差一天在10 min左右。当地时间4 min的差异将造成经度上 $1^\circ$ 的差异。因此,在16世纪,计时的精确性和可靠性成了最大的难点。

另一方面,观测一个天文事件,然后与参考点上观测的同样的天文事件的时间作比较。地图制作者可以在一个天文事件发生几周或者几个月之后,再来比较它们的当地时间,由此决定经度之差。这个方法对于航海家来说,他们需要提前知道天文事件发生的时间,而预测天文事件发生的时间必须基于对过去观测以及对天体运动模式的理解。

这两种方法都曾用于陆地地图的制作。但是,在海上,精确的天文测量非常困难。为了海上航行的需要,精确计时时钟的发展就迫在眉睫。



Christian Huygens (1629—1696 年) 于 1657 年发明了钟摆, 这项发明对计时时钟设计方面的进步起了关键性的作用, 使得时钟误差减小至一天 10 s 的范围内。George Harrison (1693—1776 年) 在 1726 年建造了一个摆钟, 大约为一个月 1 s 的误差, 他取得的最大成功则是 1761 年和 1764 年在海上试验的海上计时器。后来的试验中, 在航行 46 天以后, 计时器的误差小于 40 s。这项计时成果获得当时 18 世纪金额最高的奖金。而后计时器陆续在欧洲和美国被用来确定经度, 直到电报的出现。有趣的是, 目前在所有物理量中, 时间测量的精度和准确性总是最高的。GPS 也可以非常容易地确定世界上任意一点的精确时间。

### 1.1.2 天文方法

对月球轨道的认识和了解, 使得确定时间的方法, 前进了一大步, 这包括如 Isaac Newton (1642—1727 年)、Edmond Halley (1656—1742 年) 等科学家的一些重大发现, 主要是基于月亮相对于恒星位置的改变来决定日期和时间。为了使这个方法更加实用, 需要给出在已知经度位置上月球和某一恒星之间距离的当地时间表。问题在于恒星的位置没有确定, 月球的运动轨迹没有很好地认识和理解。但通过预测月球的运动轨迹来进行导航, 促成了 1667 年巴黎天文台和 1675 年格林尼治天文台的建立。

计算星历表的前提是月球运动理论, 即利用足够多的观测数据, 来预测月球相对于远离恒星的位置。基于二体运动的理论可以给出 5 分的误差, 远远达不到实用的要求。而且, 月球运动是一个三体运动问题: 月球围绕地球运动, 而地球又围绕太阳运动。瑞士数学家 Leonhard Euler (1707—1783 年) 对微积分的开创性贡献使得天文方法产生了巨大进步。

观测月球并不是基于天文观测定位和导航的唯一方法。17 世纪望远镜的发展导致了木星运动的发现, 从地球上来看, 当卫星被木星遮挡时, 这种遮挡对地球上任意一点的观测者看来, 都几乎发生在同一时刻。假如这种天蚀能够准确地预测, 那么木星的运动也可以作为决定经度的天文时钟。Galileo Galilei (1564—1642 年) 依据此原理建立了卫星运动的周期, 计算出它们运动的星表, 提议西班牙国王派遣航海员观测木星的运动来确定他们所处位置的经度。但是, 他的这个愿望没有在海上变成现实。直到 17 世纪末, 观测木星运动的方法才由法国在陆地上作为确定经度的正式方法。

17 世纪和 18 世纪, 由于天文导航的需要, 海上精密测角技术也得到了较大发展。17 世纪后半叶, Robert Hooke 反射四分仪和 Newton 反射八分圆, 促进了测角仪器的发展。四分仪、八分圆, 以及最终的六分仪, 再配以望远镜、反射镜、棱镜和游标尺等设备, 使得测角仪器的精度逐步提高。到了 18 世纪末, 六分仪被用于测量天体的高度, 精密时钟决定观测的时间, 历书预测天体的位置, 磁罗盘仪决定方位和维持天文观测的连续性。

19 世纪, 木船被铁船所代替。因此, 磁罗盘仪无法再用于测量船体的方位, 而需要非磁性的罗盘仪。然而直到 20 世纪初陀螺罗经的发明才使得这个问题得以解决。

### 1.1.3 20 世纪惯性和无线电导航的发展

20 世纪两个早期的事件预示了科技的发展方向。事件之一是, 1901 年以莫尔斯电码形



式的无线信号发射字母“S”，跨越大西洋，从英格兰到纽芬兰传送成功，表明20世纪注定会成为无线电世纪，Guglielmo Marconi (1874—1937年)对此作出了巨大贡献。其二，1903年莱特兄弟在北卡罗来纳的凯第霍克附近，作了第一次可操纵的、有动力的飞行，成功发明了飞机。这样，20世纪也将成为航空世纪。借助于这些成果，喷气式客机可以搭载上千乘客，借助于无线电导航系统和惯性导航系统，进行环球飞行。核潜艇使用惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)不仅用于导航，而且用于初始化发射位置、速度和方位。在本节，我们将对惯性导航和无线电导航作一简单介绍。

导航系统可作如下分类：

- 推算定位系统 (Dead Reckoning Systems)。
- 引导系统 (Guidance Systems)：提供用户到达目的地的引导信息，不需要知道用户的具体位置。灯塔和无线电信标就是这类系统。仪表着陆系统 (Instrument Landing System, ILS) 和微波着陆系统 (Microwave Landing System, MLS)，以及热传感器引导的防空导弹等都属引导系统 (这类系统在本书不作讨论)。
- 定位系统 (Positioning Finding Systems)：在一个定义的坐标参考框架内，准确确定用户所在的位置。如罗兰 (Loran)、奥米加 (Omega)、子午卫星 (Transit) 和 GPS 等。GPS 作为定位系统，实际上还提供了用户速度和时间信息，不仅仅只是定位。

### 1. 惯性导航系统

惯性导航系统 (惯导系统) 是20世纪初发展起来的。基本原理是根据牛顿提出的相对惯性空间的力学定律，利用陀螺、加速度计等惯性元件感受运动载体在运动过程中的加速度，然后进行积分运算，从而得到运动载体的位置和速度等信息。1923年，德国科学家舒拉发表了一篇经典论文，提出了舒拉摆原理，他在此文中的论断对惯导系统的产生与发展起了十分重要的作用。1942年，德国科学家裴纳蒙德第一次在V-2火箭上装上了初级型的惯性导航系统，这是当时世界上独一无二的实际应用的惯导系统。这一创举在世界上引起了极大反响，并由此把惯导系统的研究推进到一个迅速发展的阶段。

20世纪60年代开始，惯性导航系统首先是在航海，然后在航空大量投入使用。而80年代以前所用的惯性导航系统都是平台式的，它以陀螺为基础构成一个不随载体姿态和地球上的位置而变动的稳定平台，保持着指向东、北、天顶三个方向的坐标系。固定在平台上的加速度计分别测量出在这三个方向上的载体加速度，将其对时间进行一次和二次积分，从而求出载体的速度和所经过的距离。载体的航向与姿态 (俯仰和横滚) 由陀螺及框架构成的稳定平台输出。加速度测量实际上是对力的测量，众所周知，按牛顿第二定律，力 = 质量 × 加速度。

惯性导航系统有许多优点，诸如它不依赖外界导航台和电磁波的传播，因此应用不受环境限制，可任意应用于海陆空及水下；隐蔽性好，不会被干扰，无法反利用，生存能力强；此外还可产生多种信息，包括载体的三维位置、三维速度与航向姿态。但是它的垂直定位信息不好，误差是发散的，不能单独使用。

1955年，舰用惯导技术取得了突破性进展。随着舰船和弹道导弹技术的发展，从20世纪60年代初起，军舰开始大量装备惯导，经过不断改进，在保持一定的定位精度的条件下，可以几个小时才校准一次。美国几乎所有的核潜艇和大型海军舰只都装上了惯导，不仅用来



为舰只导航，而且对舰载导弹的位置、速度和方位进行初始化，还可作为舰炮的垂直和方位基准，在航空母舰上可用于对起飞飞机的惯导系统作初始校准。

机载惯性导航系统虽然在 20 世纪 50 年代就开始试用，但直到 20 世纪 60 年代才开始装备军用飞机。1968 年以前，所有空载惯导都采用模拟计算机，再加上陀螺体积太大，因此只有少数飞机装备。20 世纪 70 年代由于电子计算机的使用，加上越南战争的刺激，以及宽体飞机的发展，航空惯导开始飞速发展，大型民航机和主要军用飞机上都装上了惯导。当前空载平台式惯导平均无故障时间已超过 600 h，定位误差漂移率为  $0.5 \sim 1.5 \text{ n mile/h}$ ，速度精度  $0.8 \text{ m/s}$ ，初始化时间 8 min 左右。

## 2. 无线电导航系统

电磁波的一个应用领域是通信，而另一个应用领域就是导航。早在 1912 年人们就开始研制世界上第一台无线电导航设备，即振幅式侧向仪，或称无线电罗盘 (Radio Compass)，工作频率  $0.1 \sim 1.75 \text{ MHz}$ 。1929 年，根据信号指示航道工作原理，研制了四航道信标，工作频率为  $0.2 \sim 0.4 \text{ MHz}$ 。1939 年开始研制仪表着陆系统，1940 年研制出世界上第一个脉冲双曲线型无线电定位系统——奇异 (Gee)，工作频率为  $28 \sim 85 \text{ MHz}$ 。1943 年，脉冲双曲线型中程无线电导航系统罗兰 A 步入开发。由此，无线电导航技术、系统和设备如雨后春笋般地蓬勃发展起来。

无线电导航是所有导航手段中最重要的一种。它是根据电磁波在理想均匀媒质中按直线传播，且速度为常数，并在任两种媒质界面上一定产生反射，入射波和反射波同在一铅垂面内的特性来进行导航定位。因为电磁波的传播基本上不受昼夜与气候的限制，无论距离远近，即使在恶劣气候与能见度不良的条件下，也随时都可借助各种频率的无线电信号有效地对空中、海上与地面的各种运载体乃至人进行精确定位，并将它（他）们安全、准确、经济地由出发点，沿预定的航行路线驶达目的地，同时其测量速度快、精度高、可靠性好。不足之处在于电磁波难免会受到外界干扰。

无线电导航，按测量方式可分为测向（测角）、测距、测距离差以及测距测向等。按作用距离分：近程  $100 \sim 500 \text{ km}$ ；中程  $500 \sim 1000 \text{ km}$ ；远程  $3000 \text{ km}$  以内；超远程  $10000 \text{ km}$  以上。全球导航要求导航信号覆盖全世界各地，它们有航路导航、着陆引导、河港导航、空港交通管制等。其定位精度由数公里到几米，乃至几厘米。由于电子科学技术的飞速发展，大规模与超大规模集成电路的面世，以及微处理器的普遍应用，使得导航设备小型化、微型化、数字化与全自动化，进而使导航台实现无人值守成为现实。

随着电子科学技术和空间科学技术的发展，无线电导航已经由陆基发展到空基与星基，由单一系统、单一功能发展到多系统与多功能的组合导航及综合导航；由简单的仪表借助目视着陆发展到多批次多架次真正的盲目着陆；作用距离也由近及远，以至全球；定位精度亦由粗到精，甚至高达几米，几厘米，乃至更高；不仅应用于军事领域，而且也广泛应用于国民经济各个领域；其设备已实现了全自动化、微型化和高稳定性、高可靠性。在未来 20~30 年内，无线电导航系统主要发展的趋势是：全球、全天候、高精度、连续、实时的全球卫星导航系统；由多种导航设备有机组合在一起的组合导航系统；一个既能完成导航定位，又具有通信、识别等功能的综合系统；能在复杂情况下正确引导多批次、多架次飞机实现自动着陆的微波着陆系统和更先进的着陆手段。



## 1.2 无线电导航定位方法

无线电用于导航和通讯几乎是同步的。无线电首先用于船只或飞机导航是用定向天线测量到两个或者更多的无线电信标的方位。在第二次世界大战期间及其后,引导飞机航行的无线电导航系统加速发展,比较著名的无线电导航系统有:伏尔(Very-High-Frequency Omnidirectional Radio Range, VOR)、塔康(TACTical Air Navigation—TACAN)、仪表着陆系统(Instrument Landing System—ILS),微波着陆系统(Microwave Landing System—MLS)。这些都是陆基、短距离、视线系统,本书则只讨论长距离、全球无线电导航系统,重点是GPS。

在陆地上或海上导航通常只需要水平或者二维的位置估计量。但是,大地测量学者和测绘工作者为了地形图制图的需要,需要知道高度,飞行员需要实时了解飞行的高度。对于这两种情况,过去我们都是分别采用不同的设备和技术把水平位置估计和垂直高度估计分开进行,而现在采用卫星导航系统就可以实时提供三维坐标。

### 1.2.1 测边交会法

无线电传播最简单的原理就是以已知的速度(光速 $c$ )进行传播,称为恒速特性。因此,如果测量出信号发射台和信号接收台之间的传输时间,那么他们之间的距离也随之而定。当测得的传播时间为 $\tau$ 时,利用物理学中距离等于速度乘时间这个简单的公式,就可以得到发射台和待测点之间的真实距离 $R = \tau c$ 。而利用测量待测点到已知点之间的距离,求得待测点坐标的方法就称为测边交会法,也称为 Time Of Arrival (TOA) 方式。

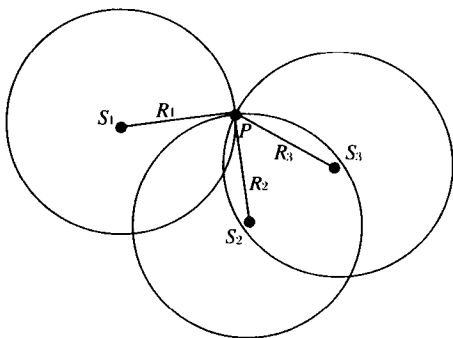


图 1.1 测边交会法几何原理

如图 1.1 所示,如果待测点到已知点 $S_1$ 的真实距离为 $R_1$ ,那么待测点的位置必定在以 $S_1$ 为球心, $R_1$ 为半径的球面 $C_1$ 上;同样,若待测点到已知点 $S_2$ 的真实距离为 $R_2$ ,那么待测点的位置也必定在以 $S_2$ 为球心, $R_2$ 为半径的另一球面 $C_2$ 上。类似地,如果再有一个以 $S_3$ 为球心, $R_3$ 为半径的球面 $C_3$ ,三个球面必定相交于一点 $P$ ,就是待测点的位置,也即是测边交会法的几何原理。GPS、GLONASS、GALILEO 等卫星定位系统的定位原理就是依据测边交会法建立起来的。

### 1.2.2 双曲线定位

双曲线定位,主要是采用 Time Difference Of Arrival (TDOA) 的方式,其原理是通过测量无线电波到达两个基站的时间差,而不是由到达的时间来确定待测点的位置。待测点必须位于以两个基站为焦点的双曲线上,确定待测点的二维位置坐标需要建立两个以上双曲



线方程，两双曲线的交点即为待测点的二维位置坐标。

如图 1.2 所示，在平面上，用户站到基站的距离差和基站的间距决定一条双曲线。同样，可以得到用户站与其他基站决定的双曲线，曲线的交点即为用户站的坐标。设  $(x, y)$  为待测点的待估计位置， $(X_i, Y_i)$  为第  $i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 个基站的已知位置，则待测点和第  $i$  个基站之间的距离为

$$R_i = \sqrt{(X_i - x)^2 + (Y_i - y)^2}$$

那么相应的距离差为

$$R_{21} = ct_{21} = R_2 - R_1 = \sqrt{(X_2 - x)^2 + (Y_2 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$$

$$R_{31} = ct_{31} = R_3 - R_1 = \sqrt{(X_3 - x)^2 + (Y_3 - y)^2} - \sqrt{(X_1 - x)^2 + (Y_1 - y)^2}$$

对上面的方程组进行求解，即可得到用户站的坐标  $(x, y)$ 。利用双曲线原理建立的无线电导航系统有罗兰 A、罗兰 C、台卡和奥米伽等。

### 1.2.3 多普勒定位

如图 1.3 所示，多普勒定位原理是通过测定同一信号发射源不同间隔时段其信号的多普勒频移，从而确定发射源在各时段相对观察者的视向速度和视向位移，再利用发射源所给定的  $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$  时刻的空间坐标，结合对应的视向位移解算出测站空间坐标  $P(X, Y, Z)$ 。多普勒定位的几何原理是：发射源在  $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$  点上的坐标是已知的，而任意两个相邻已知点到待定点  $P$  的距离差（即视向位移），是根据给定发射源经过期间，发射源和观测点  $P$  之间距离改变引起的频移的测量值得。信号发射已知的频率信号  $f_s$ ，由观测点信号接收机跟踪。接收机与发射器之间的相对运动  $ds/dt$  产生的接收频率  $f_s(t)$  随时间变化的关系为

$$f_s(t) = f_s \left( 1 - \frac{1}{c} \cdot \frac{ds}{dt} \right)$$

这就是多普勒效应。给定时间间隔  $t_j, t_k$  上观测到的频移，并转换为距离差值  $\Delta r_p^{jk}$ 。与此相关的观测方程为

$$|r^k - r_p| - |r^j - r_p| = |\Delta r_p^k - \Delta r_p^j| = |\Delta r_p^{jk}|$$

从数学上我们知道，一个动点  $P$  到两个定点的距离差为一定值时，该动点  $P$  则构成一

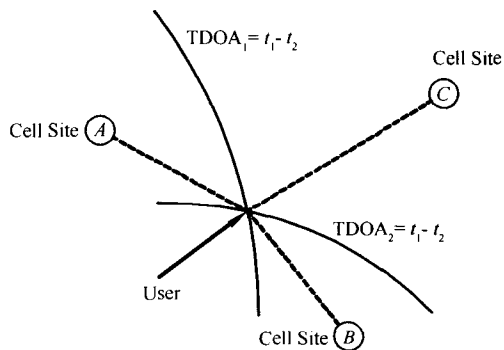


图 1.2 双曲线定位原理

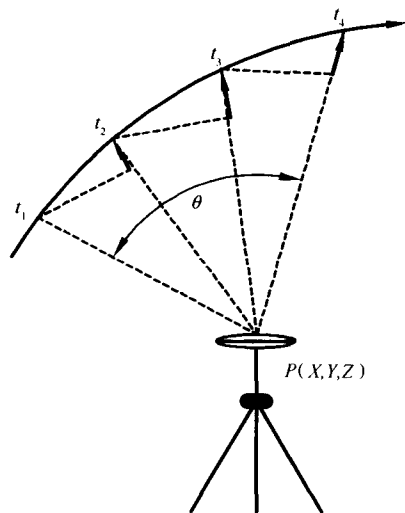


图 1.3 多普勒定位原理



个旋转双曲面,这两个定点就是该双曲面的焦点。于是以卫星所在的  $t_1, t_2, t_3, t_4, \dots$  任意两个相邻已知定点作焦点,未知点  $P$  作动点构成对应的特定旋转双曲面。其中,两个双曲面相交为一曲线 ( $P$  点必在该曲线上),曲线与第三个双曲面相交于两点 (其中一点必为  $P$  点),第四个双曲面必与其中一点相交——该点就是待定的  $P$  点。因此,要解算  $P$  点的三维坐标,必须对同一发射器有四个积分间隔时段的观测,得出发射器在四段时间间隔的视向位移,从而获得四个旋转双曲面,它们的公共交点就是待定点  $P(X, Y, Z)$ 。

当发射频率固定时,这种技术总是可行的。利用多普勒定位原理的导航定位系统有 TANSIT 子午卫星系统、DORIS 星载多普勒无线电定轨定位系统等。

## 1.3 无线电导航系统

### 1.3.1 陆基无线电导航系统

#### 1. 罗兰 C (Loran-C)

罗兰 C 系统是美国最先开发建设的远程无线电导航系统。罗兰一词就是英文“Long Range Navigation”词头缩写的音译。最早的罗兰系统是罗兰 A,也称标准罗兰,是美国在第二次世界大战初期研制成功的海上中程无线电导航系统。罗兰 A 系统的工作频段为 1.30~1.95 MHz,该频段信号在陆地上传播时衰减很快,仅适用于海上工作,其作用距离也仅有 500~700 n mile,罗兰 A 定位精度大约是 1~2 n mile。

罗兰 C 系统是第二次世界大战末期在罗兰 A 的基础上研制的。当时,军事上需要一种比罗兰 A 覆盖范围更大、定位精度更高,而且可以在陆地上应用的新型导航系统。经过大约 10 年的研究和试验,美国海岸警卫队 (USCG) 终于在 1957 年建成了世界上第一个罗兰 C 台链。工程鉴定表明,该系统在覆盖范围、定位精度、可靠性、应用范围等方面都可以满足军方要求。此后,逐步扩展到世界其他许多国家,从航海民用发展到航空和陆地民用。全球共建设了 17 个罗兰 C 台链,其信号覆盖北美、西北欧、地中海、远东、夏威夷及美国本土 48 个州。1994 年底,美国已退出它所在的海外罗兰 C 台链 (加拿大除外),而移交给台链驻在国。我国对罗兰 C 技术的研究工作早在 20 世纪 60 年代初就已开始,1979 年,国家正式确定在我国建立罗兰 C 系统,即“长河二号”工程。自 1990 年 4 月以来,我国先后在南海、东海和北海等地区建立了多个罗兰 C 台链。

罗兰 C 导航系统采用脉冲相位双曲面定位原理,如 1.2.2 节所述。其工作频率为 90~110 kHz,该波段有地波和天波两种传播方式,用地波定位的作用距离为 2 000 km 左右,用天波定位的作用距离是 4 000 km。地波定位精度为 460 m ( $2\sigma$ ),重复测量和相对定位精度为 18~90 cm ( $2\sigma$ )。此外,罗兰 C 信号还具有定时功能,可以用于精确的时间比对测量。因此,罗兰 C 在航海、航空和陆地上得到了较为广泛的应用,截至 1993 年,全球罗兰 C 用户超过 100 万。但是,罗兰 C 台链覆盖地区有限,定位精度也较低,所以美国国防部决定,美军在 1994 年开始停止使用罗兰 C 导航系统,而采用性能更优越的 GPS 全球定位系统。





## 2. 奥米伽 (OMEGA)

奥米伽是甚低频超远程无线电导航系统, 可以为全球绝大部分区域提供全天候定位、导航, 其研究始于 1947 年。第一个试验奥米伽系统于 20 世纪 60 年代初开始工作, 到 20 世纪 70 年代有 7 个台投入使用, 最后一个台在 1982 年 8 月开放。

奥米伽系统由分布于世界范围的 8 个地面台组成, 分别位于挪威 (A 台)、利比里亚 (B 台)、夏威夷 (C 台)、美国的北达科他 (D 台)、非洲的留尼旺岛 (E 台)、阿根廷 (F 台)、澳大利亚 (G 台) 和日本 (H 台)。各发射台之间具有严密的关系, 但又是相互独立的, 没有主台和副台之分。然而由于 GPS 卫星导航系统的日益成熟和广泛应用, 美国已于 1997 年关闭了奥米伽超远程无线电导航系统。

奥米伽采用相位双曲面定位原理, 工作频率为 10.2 ~ 13.6 kHz, 作用距离可达 15 000 km, 定位精度为 3.7~7.4 km( $2\sigma$ ), 相对定位精度约 460 m( $2\sigma$ )。下面概要介绍一下接收机中关于段同步、巷识别和传播预测修正等技术, 这些技术在后来的导航卫星定位系统 (GPS, GLONASS 等) 中得到借鉴和广泛应用。

### (1) 段同步

接收机为了能收到各地面台按时间分割方式发射的各个频率信号, 必须将本机产生的时分脉冲 (或称段信号) 与各发射台的各个频率信号时间相应对齐, 这个过程就叫段同步。

早期段同步的方法, 是由航海员通过收听从全部奥米伽台来的 10.2 kHz 信号声音, 辨认出距离最近的一个发射台 (最近台的声音最强) 信号出现时刻来实现的, 后来发展到由计算机实现自动同步。

奥米伽自动段同步的方法, 是利用一个重复周期中的 8 个时间段的持续时间的编码特性来实现的。在 8 个台各三个频率共 24 个信号中, 采用信号积累技术, 通过微处理机来判定其中最强的两个信号的信号频率、持续时间以及它们之间的间隔, 就可以利用时间编码特性判定重复周期的起始时刻, 从而实现段同步。段同步之后的长期信号跟踪过程中, 在一个最强信号的前、后沿各设置一个 0.05 s 宽度的取样时间, 根据它们的信号累积值, 判断本机信号格式是超前还是滞后, 进行相应调整, 实现段同步微调。

### (2) 巷识别

甚低频导航采用相位双曲线定位, 距离差的变化使相应的相位差测量结果超过一个相位周 (即  $360^\circ$ , 称为一巷) 时, 就需要进行相位整周数的识别, 即巷识别。由于其低频信号包络测量误差大大超过一个巷宽, 因而无法用包络测量来解决, 而是用测量两个不同频率信号的差频相位来识别精测相位的相位周数 (即巷道数目), 其方法简述如下:

甚低频导航系统有三个基本导航频率。为了判别奥米伽精测频率 10.2 kHz 上精测相位差的相位周数, 需要测量 13.6 kHz 与 10.2 kHz 的差额 (3.4 kHz) 的相位。差频 3.4 kHz 的巷宽是 10.2 kHz 的巷宽的 3 倍, 因此可以在 3.4 kHz 巷宽范围内识别出 10.2 kHz 的巷道数。同理, 11.33 kHz 与 10.2 kHz 的差额 1.13 kHz 的巷宽是 3.4 kHz 巷宽的 3 倍, 可以在 1.13 kHz 巷宽范围内识别出 3.4 kHz 的巷道数, 进而识别出 1.13 kHz 范围内 10.2 kHz 的巷道数, 也就是在 1.13 kHz 所包含的 9 个 10.2 kHz 中识别出它的巷道数。

巷识别的相位测量要涉及三个频率的信号, 其测量的随机误差会比单一频率信号相位误差大一些, 但利用不同频率信号传播的相关性, 当传播相速预测足够精确时, 巷识别是可靠的, 否则就会使巷识别出现错误。