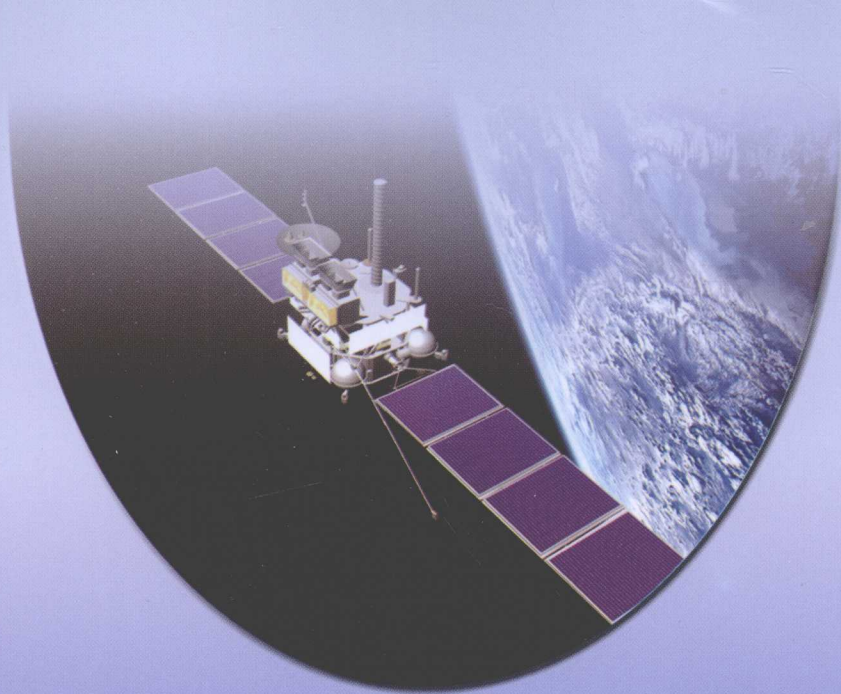




GPS气象学及其应用

丁金才 主编



气象出版社

China Meteorological Press

GPS 气象学及其应用

主编 丁金才

编著 丁金才 袁招洪 杨引明

叶其欣 郭 鹏 刘 敏

杜明斌 张 洁 朱雪松

图书在版编目(CIP)数据

GPS 气象学及其应用/丁金才等编著. —北京:气象出版社, 2009. 11

ISBN 978-7-5029-4853-5

I. G… II. 丁… III. 全球定位系统(GPS)-应用-气象学 IV. P228.4 P4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 196062 号

GPS Qixiangxue Jiqi Yingyong

GPS 气象学及其应用

丁金才 主编

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室: 010-68407112

网 址: <http://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑: 陶国庆

封面设计: 王 伟

责任校对: 永 通

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1092 mm 1/16

字 数: 450 千字

版 次: 2009 年 11 月第 1 版

印 数: 1~2000

邮政编码: 100081

发 行 部: 010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审: 黄润恒

责任技编: 吴庭芳

印 张: 17.25

彩 插: 2

印 次: 2009 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

前 言

自从全球定位系统(Global Positioning System, GPS)问世以来,不仅在导航和定位领域,而且在其他许多领域引发了革命性变化。20 世纪 80 年代后期开始,大气科学家研究利用 GPS 卫星信号穿过地球大气层时的延迟量来反演大气温度、湿度和气压等要素的方法,由于它具有高精度、全天候、不用定标和使用成本低廉等诸多优点,很快发展成为一种全新的探测大气的技术,显示出广阔的应用前景,形成了气象学的一个新分支“GPS 气象学”,简称 GPS/MET。

GPS 气象学分为两大类:

地基 GPS 气象学:通过安置在地面的 GPS 接收机来测量 GPS 卫星信号纵向穿过整个大气层的累计延迟量,估算出接收机上空的水汽总量,或叫可降水量。目前世界上许多国家和地区都建立了地基 GPS 网,获得连续的大气中水汽资料,用于对天气和气候的研究和预报。

空基 GPS 气象学,利用安置在低轨小卫星上的 GPS 接收机来测量 GPS 卫星信号在掩星过程中横向穿过大气层所产生的折射角,反演得到信号路径近地点高度处的大气折射率,进而导出大气的气压、温度和湿度等参数的廓线。

从 1995 年到现在,美国、丹麦、德国、阿根廷等国相继发射了单颗的载有 GPS 接收机的低轨卫星,实施了近 10 次空基掩星观测试验计划。2006 年 4 月中国台湾地区和美国联合实现了有 6 颗低轨卫星组成的用于天气、气候和电离层观测的空基 GPS 星座观测计划,即 COSMIC 计划,每天可获得覆盖全球 2500 个左右掩星点的高垂直分辨率的大气温、压、湿的资料,使空基 GPS 气象学进入业务应用发展阶段。截至 2008 年 3 月,全球已有 40 多个国家和地区把 COSMIC 资料应用到研究和业务工作中。

目前除了 GPS 系统,俄罗斯的 GLONASS 系统在 2004 年已完全恢复正常运行,欧盟的 Galileo 计划将在近年内建成,我国正在建设名为北斗二代的全球导航卫星系统。可以预见,在不久的将来,GPS 接收机所接收到的导航卫星信号的量将增加几倍,GPS 反演大气参数的精度和时空分辨率将大大提高,从而进一步拓展 GPS 气象学的发展前景。

我国从 20 世纪 90 年代中期开始由国家卫星气象中心和北京大学等单位进行了地基 GPS 气象学的研究,并在华南暴雨试验计划等一些重大科学试验计划中进行了 GPS 水汽观测的外场试验。从 2000 年起我国开始陆续建立区域 GPS 气象网,2002 年 6 月上海地区 GPS 综合服务网建立,成为我国第一个准业务运行的区域 GPS 网,实时提供半小时间隔的长江三角洲地区的可降水量资料,正式开展了 GPS 气象业务工作。最近几年来,中国气象局把建设地基 GPS 探测大气和电离层参数的系统列入了建设我国现代化气象探测系统的一个重要内容,并制定了“中国气象局导航卫星接收站网建设规划”。截至 2008 年 6 月,我国已有 16 个省市建立了区域 GPS 网,其中有 148 站组成全国实时 GPS/MET 网,提供一小时间隔的全国范围的可降水量图。其他省市和地区正在或计划建设 GPS 网,全国的 GPS 站预计会超过 1000

个。我国在地基 GPS 气象学的应用研究上已取得了一些成果,在空基 GPS 气象学的建设和研究也已经起步。

目前,我国的 GPS 气象学正处于方兴未艾的发展阶段,许多部门和有关单位正面临着承担区域 GPS 网的建设和 GPS 气象学的应用研究的任务,广大科技人员迫切需要了解 GPS 气象学方面的知识,有关院校在教学上需要 GPS 气象学的相关教材。编著本书的目的是为了适应我国开展 GPS 气象学的这些需要。上海市气象局从 1997 年开始了 GPS 气象学的研究,是“上海地区 GPS 综合应用服务网”的主要承建单位之一,并负责该 GPS 网的维护和管理,积累了一定的地基 GPS 网的建设、维护和管理经验。我们利用该 GPS 网的资料开展了一系列的 GPS 气象学的应用研究,发表了 20 余篇论文,汇编了一本“GPS 气象学译文集”。2006 年上海市气象局成立了上海市卫星遥感和测量应用中心,成为 GPS 气象学研究和应用的专业机构。2006 年底我们又开始进行了空基 GPS 反演资料的应用研究。多年来,我们和国内外同行保持着学术交流,跟踪国际 GPS 气象学的最新动态。我们在编著本书时,除了综合介绍国内外同行的研究成果外,着重介绍了我们自己在地基 GPS 网的建设和维护经验以及在 GPS 气象学应用研究方面的工作成果和著作,力求使本书的内容适合我国的实际情况,达到易懂实用的目标,既能满足气象部门人员的需求,也能适用于学校的教学。

本书由丁金才主要编著,共分 15 章。第 1 章、第 2 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章由丁金才编著;第 3 章由叶其欣编著;第 4 章、第 10 章由刘敏编著;第 9 章由张洁、袁招洪和杨引明等编著;第 11 章、第 13 章由郭鹏编著;第 12 章由朱雪松编著,第 14 章由杜明斌和郭鹏编著,第 15 章由丁金才、杜明斌、郭鹏和张洁等编著。

在编著本书的过程中,得到了气象出版社和编著者所在单位上海市气象局/上海市卫星遥感和测量应用中心的大力支持,得到了科技部 863 计划(2006AA12a107),(2009AA12Z319)和中国气象局推广项目(CMTG2007M16)的资助,崔林丽博士帮助制作了部分图形,在此一并致谢。

限于编著者的水平、时间及经验,书中定有错误和不当之处,敬请专家和读者批评指正。

编著者

2009 年 4 月于上海

目 录

前言

第 1 章 GPS 系统和定位原理	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 GPS 系统	(1)
1.2.1 GPS 系统的组成	(1)
1.2.2 GPS 卫星信号	(2)
1.2.3 全球导航卫星系统 GNSS	(3)
1.3 GPS 卫星定位的基本原理	(6)
1.3.1 测距码伪距法定位	(6)
1.3.2 载波相位法定位	(7)
1.3.3 载波相位测量差分法	(8)
参考文献	(10)
第 2 章 地基 GPS 气象学原理	(11)
2.1 引言	(11)
2.2 大气对 GPS 信号传播的影响	(11)
2.3 大气延迟,天顶延迟和地图函数	(12)
2.4 大气天顶延迟和可降水量的计算	(16)
2.4.1 用双频法消除电离层的延迟	(16)
2.4.2 天顶静力延迟的计算	(17)
2.4.3 天顶湿延迟和可降水量	(17)
2.5 地基 GPS 气象学的发展	(18)
2.5.1 国际地基 GPS 气象学的发展	(18)
2.5.2 我国地基 GPS 气象学的发展	(24)
2.5.3 GPS 气象学的发展前景	(29)
参考文献	(29)
第 3 章 GPS 气象网的建设、运行和维护	(33)
3.1 GPS 气象网的基本组成	(33)
3.2 GPS 气象网的站点布局	(34)
3.3 GPS 基准站的建设	(35)
3.3.1 基准站设备	(35)

3.3.2	GPS 基准站的站址和环境选择	(37)
3.3.3	基建	(37)
3.3.4	设备安装	(38)
3.3.5	接收机设置	(39)
3.3.6	设备安装建档	(39)
3.4	GPS 和气象观测数据的采集	(39)
3.5	GPS 资料的解算	(40)
3.6	GPS 气象应用产品的生成	(41)
3.7	GPS 气象网的运行维护	(41)
	参考文献	(44)
第 4 章	地基 GPS 气象网的资料解算	(45)
4.1	引言	(45)
4.2	实时解算软件(以 GAMIT 软件为例)	(45)
4.2.1	GPS 数据处理软件	(45)
4.2.2	解算前的资料准备	(45)
4.2.3	软件参数设置	(47)
4.2.4	天顶总延迟量的计算(GAMIT 的解算过程)	(49)
4.2.5	可降水量的计算	(52)
4.3	GAMIT 解算软件的下载和安装	(52)
4.3.1	软件下载	(52)
4.3.2	软件安装	(52)
	参考文献	(53)
第 5 章	地基 GPS 反演水汽结果的精度检验和误差分析	(54)
5.1	检验工具和方法	(54)
5.1.1	检验工具	(54)
5.1.2	GPS/PWV 与 Radio/PWV、WVR/PWV 的差别	(55)
5.1.3	检验方法	(57)
5.2	GPS/PWV 的精度检验	(57)
5.2.1	中国长江三角洲 GPS 网的 GPS/PWV 精度检验:(GPS 与探空比较)	(57)
5.2.2	美国中部 GPS 网准实时的 PWV 的检验 (GPS 与探空、水汽辐射仪比较)	(61)
5.2.3	水汽梯度对 GPS/PWV 计算精度的影响(GPS 与水汽辐射仪比较)	(62)
5.2.4	GPS/PWV 误差的日变化	(65)
5.3	GPS/PWV 的误差源分析	(67)
5.3.1	对流层总延迟量的观测误差	(67)
5.3.2	静力延迟量估算误差	(68)
5.3.3	GPS/PWV 的反演误差	(69)
	参考文献	(73)

第 6 章 GPS 气象工作站的产品和应用	(75)
6.1 用于实时监测和预报的产品	(75)
6.1.1 单站 PWV 的 7 天时序图和 1 天时序图	(75)
6.1.2 PWV 的分布图和动画显示	(76)
6.1.3 PWV 的梯度图	(78)
6.1.4 PWV 的 3 小时变化图	(78)
6.1.5 与其他天气资料图的叠加显示	(78)
6.1.6 PWV 层析资料和产品	(82)
6.2 整编后的历史资料和产品	(84)
6.2.1 整编后的历史资料	(84)
6.2.2 单站月 PWV 和小时雨量时序图	(84)
6.3 电离层电子含量的产品	(84)
第 7 章 GPS/PWV 资料在气候分析中的应用	(86)
7.1 长江三角洲地区的水汽在时间变化上的气候分析	(86)
7.1.1 年间变化	(86)
7.1.2 季节变化	(86)
7.1.3 月内变化	(88)
7.1.4 日变化	(88)
7.2 长江三角洲地区的水汽在空间分布上的气候分析	(89)
7.3 利用 PWV 资料诊断长江三角洲地区入梅的方法	(91)
7.3.1 利用 GPS/PWV 资料诊断入梅日期的方法	(92)
7.3.2 历史资料的验证	(95)
7.3.3 在诊断 2006 年入梅的应用	(99)
参考文献	(99)
第 8 章 GPS/PWV 资料在天气预报和分析中的应用	(100)
8.1 利用单站 GPS/PWV 的阈值预报降水过程的方法	(100)
8.1.1 GPS/PWV 的预报阈值的选择	(100)
8.1.2 预报检验和 PWV 阈值的调整	(103)
8.1.3 预报时效	(104)
8.1.4 两个降水过程的预报个例	(105)
8.2 利用 GPS/PWV 资料分析台风期间大气中水汽的变化	(108)
8.2.1 1998 年台风 Zeb 影响期间的水汽的变化	(109)
8.2.2 2002 年台风 Ramasun 影响华东期间 PWV 演变分析	(109)
8.3 GPS/PWV 资料在暴雨等强对流天气过程分析和预报中的应用	(116)
8.3.1 2008 年 8 月 25 日上海地区特大暴雨的个例	(116)
8.3.2 2002 年 8 月 24 日长江三角洲地区的一次飑线天气过程	(119)
8.3.3 PWV 变化图对暴雨预报的指示作用	(125)
参考文献	(129)

第 9 章 GPS 资料在数值天气预报模式中的资料同化	(130)
9.1 引言	(130)
9.2 GPS 资料同化技术简介	(130)
9.2.1 资料同化的基本原理	(130)
9.2.2 WRF/3DVAR 同化系统介绍	(131)
9.2.3 WRF/3DVAR 系统中 GPS 同化资料输入/输出格式说明	(131)
9.3 GPS/PWV 资料同化研究实例	(134)
9.3.1 利用 GPS/PWV 资料调整数值模式初始场的研究	(134)
9.3.2 GPS/PWV 资料同化改进降水预报的个例试验	(137)
9.3.3 GPS/PWV 资料变分同化改进降水预报的连续试验	(139)
9.4 GPS 观测延迟量资料的同化试验	(142)
9.4.1 天顶总延迟 GPS/ZTD 资料的同化试验	(142)
9.4.2 天顶湿延迟 GPS/ZWD 资料的同化试验	(144)
9.4.3 斜路径湿延迟 GPS/SWD 资料的同化试验	(146)
参考文献	(146)
第 10 章 GPS 信号斜路径方向可降水量的计算和层析技术	(148)
10.1 引言	(148)
10.2 斜路径大气湿延迟量和可降水量的计算方法	(149)
10.2.1 斜路径大气湿延迟量 SWD 的求解	(149)
10.2.2 斜路径可降水量 SWV 的求解	(153)
10.2.3 斜路径可降水量 SWV 的实验验证	(153)
10.2.4 斜路径大气可降水量 SWV 的气象应用	(155)
10.3 三维层析技术	(155)
10.3.1 层析原理	(156)
10.3.2 层析方程组的解法	(158)
10.3.3 网格划分	(158)
10.3.4 水汽三维层析初步结果及检验	(158)
10.3.5 水汽三维层析的产品和应用	(159)
参考文献	(161)
第 11 章 地基 GPS 技术探测电离层的原理和电离层资料同化	(163)
11.1 电离层探测技术及研究内容	(163)
11.2 国内外在地基 GPS 电离层探测和应用方面的进展	(163)
11.3 地基 GPS 技术探测电离层的基本原理	(164)
11.3.1 电离层折射率指数	(164)
11.3.2 电离层传播延迟	(165)
11.3.3 天顶方向总电子含量 VTEC	(167)
11.3.4 单层模型	(167)

11.4 电离层电子总量 TEC 的计算流程和产品	(168)
11.4.1 计算流程	(168)
11.4.2 GPS/TEC 计算的产品	(168)
11.5 全球电离层同化模型研究	(170)
11.5.1 全球电离层同化研究的历史和背景	(170)
11.5.2 USC/JPL 的 GAIM 系统	(171)
11.5.3 正演模型	(175)
11.5.4 四维变分同化	(176)
11.5.5 递推估计方法	(178)
11.5.6 GAIM 同化结果的验证	(180)
11.5.7 小结和展望	(182)
参考文献	(182)
第 12 章 GPS 反射信号新技术的应用	(184)
12.1 引言	(184)
12.2 GNSS—R 海浪探测技术	(185)
12.2.1 地基反演有效浪高的 GNSS 接收机的技术要求	(185)
12.2.2 实验设备、安排	(185)
12.2.3 数据分析及产品	(186)
12.2.4 实验基本原理及反演方法	(187)
12.3 GNSS—R 信号反演土壤湿度的技术	(192)
12.3.1 干涉复合场	(192)
12.3.2 Oceanpal 土壤湿度反演的基本原理	(192)
12.3.3 土壤湿度反演的约束条件	(193)
12.3.4 系统噪声	(194)
12.3.5 实验及其结果	(195)
12.4 有待考虑的问题	(196)
参考文献	(196)
第 13 章 空基 GPS 气象学的基本原理	(198)
13.1 空基 GPS 气象学的发展历史	(198)
13.2 GPS 掩星技术反演电离层的原理	(200)
13.3 GPS 掩星技术反演中性大气的原理	(202)
13.3.1 总折射角的计算	(202)
13.3.2 折射率廓线的反演	(204)
13.3.3 从折射率廓线导出大气参数廓线	(204)
13.4 GPS 掩星技术反演中性大气的特点	(206)
13.5 GPS 掩星反演的折射率的一维变分同化方法	(207)
13.6 GPS 掩星反演技术中存在的问题和改进	(211)
13.6.1 低层大气多路径效应	(211)

13.6.2 超折射效应·····	(214)
参考文献·····	(215)
第 14 章 空基 GPS 气象学的试验计划和资料处理 ·····	(219)
14.1 空基 GPS 气象学的试验计划的进展·····	(219)
14.1.1 GPS/MET 实验卫星 MicroLab1·····	(219)
14.1.2 Ørsted 和 Sunsat 计划·····	(220)
14.1.3 SAC-C 计划和 CHAMP 计划·····	(220)
14.2 COSMIC 系统·····	(221)
14.3 COSMIC 资料的介绍·····	(224)
14.4 COSMIC 资料的下载和解码·····	(225)
14.4.1 从 COSMIC 网页直接查看和下载·····	(225)
14.4.2 编程下载资料文件·····	(227)
14.4.3 COSMIC 资料的解码·····	(228)
14.5 COSMIC 的 wetPrf 和 brfPrf 资料的解码范例·····	(235)
14.5.1 wetPrf 资料解码范例·····	(235)
14.5.2 bfrPrf 资料解码范例·····	(242)
参考文献·····	(245)
第 15 章 COSMIC 资料的检验和应用 ·····	(246)
15.1 COSMIC 资料的精度和有关特性的检验·····	(246)
15.1.1 总体精度检验方法·····	(246)
15.1.2 COSMIC 资料精度的检验结果·····	(247)
15.1.3 结论·····	(251)
15.2 COSMIC 资料在实时天气资料分析中的应用·····	(254)
15.3 COSMIC 资料在台风热力结构的分析中的应用·····	(255)
15.3.1 资料收集和处理·····	(256)
15.3.2 台风范围内大气各热力要素的特征分析·····	(257)
15.4 COSMIC 资料探测大气边界层的应用·····	(258)
15.4.1 大气边界层·····	(258)
15.4.2 掩星观测自动监测大气边界层高度算法·····	(259)
15.4.3 大气边界层高度在时间和空间上的结构和变化·····	(259)
15.5 COSMIC 资料在数值预报模式中的资料同化·····	(261)
15.5.1 COSMIC 资料同化的数据处理·····	(261)
15.5.2 COSMIC 资料同化的试验个例·····	(262)
参考文献·····	(263)

第 1 章 GPS 系统和定位原理

1.1 引言

1973 年 12 月,美国政府为了满足军事部门在全球范围内进行高精度导航和定位的需要,提出了建立“导航卫星测时和测距/全球定位系统”(Navigation Satellite Timing and Ranging/Global Positioning System)的计划,简称 GPS 定位系统,或直接简写为 GPS。

该计划经历了方案论证(1974—1978),系统论证(1979—1987)及生产实验(1988—1993)三个阶段,总投资 200 多亿美元,在 1994 年 4 月整个 GPS 系统终于完成。令人始料不及的是,自 GPS 问世以来,不仅在导航和定位领域显示了充分的优越性,而且在其他许多领域引发了革命性变化,得到了广泛的应用,正如人们所说:“GPS 的应用,仅受人们的想象力制约”。GPS 卫星信号穿过地球大气层时会引起折射和延迟,这本来是 GPS 定位的误差源,但是 20 世纪 80 年代后期开始,大气科学家研究利用这种 GPS 定位的误差源来反演大气温度、湿度和气压等参数的方法。由于它具有高精度、全天候、不用定标和使用成本低廉等诸多优点,很快发展成为一种全新的探测大气的技术,显示出广阔的应用前景,形成了气象学的一个新分支“GPS 气象学”,简称 GPS/MET。

本章先对 GPS 系统和定位的原理及方法作介绍,为介绍 GPS 气象学的原理做准备。1.2 节介绍 GPS 系统的组成,1.3 节介绍 GPS 的信号组成,1.4 节介绍 GPS 定位原理,1.5 节介绍全球导航卫星系统(GNSS)。

1.2 GPS 系统

1.2.1 GPS 系统的组成

GPS 系统共包括三大部分:卫星星座部分、地面监控部分和用户设备部分。

(1)卫星星座部分:GPS 卫星星座由 24 颗卫星组成,均匀分布在 6 个轨道面上,每个轨道面内有 4 颗卫星运行,卫星距地面的平均高度为 20200 km。每个轨道面相对于地球赤道面的倾角为 55° ,各轨道面之间的交角为 60° 。卫星环绕地球运行一周的时间为 11 h 58 min.,每颗卫星每天位于地平线上的时间约为 5 h(图 1.1)。这样设计的目的使地球上任一位置,任一时刻可同时观测到至少 4 颗,最多 11 颗的卫星,以满足计算 GPS 接收机三维位置和速度的要求。GPS 卫星的设计寿命为 7.5 a,事实上超过半数的卫星已工作 10 a 以上。1978 年 2 月至 1985 年共发射了 11 颗 BLOCK I 的实验卫星。1989 年 2 月至 1994 年 4 月共发射了 35 颗工作卫星。为了备用和替换过期的卫星,在这以后需要不断补充发射新的卫星。截至 2008 年 9

月, GPS 在轨工作的卫星有 31 颗, 编号为 1—32 号, 其中 1 号为空缺。GPS 定位主要是依据 GPS 卫星发出信号与 GPS 接收机接收到信号的时间差来确定两者的距离, 因此, 稳定和精确的时间测量特别重要, 当有 1×10^{-9} s 的时间误差时, 将引起 30 cm 的距离误差。每一颗 GPS 卫星设置有 4 台高精度的原子钟, 一台工作, 其余备用, 以保证提供高稳定的频率和时间。GPS 卫星的主要作用有三个: 接收地面注入站发出的导航电文和其他信号; 接收地面主控站的命令, 修正在轨运行偏差及启用备件; 连续向广大用户发送 GPS 导航位信号。

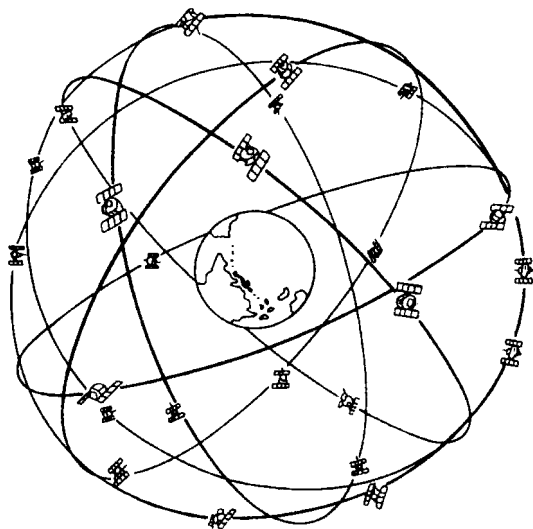


图 1.1 GPS 卫星的工作星座

(2)地面监控部分: GPS 系统的地面监控部分有一个主控站, 三个注入站和五个监测站组成。主控站设在美国 Colorado 的联合空间执行中心; 三个注入站分别设在大西洋的 Ascension 岛、太平洋的 Kwajalein 岛和印度洋的 Diego Garcia 岛上; 五个监测站有四个分设在主控站和注入站站内, 另外一个设在太平洋的夏威夷。地面监控部分的工作程序是: 由监测站连续接收 GPS 卫星信号, 不断积累测距数据, 并将这些测距数据以及气象数据、卫星状态数据等发送到主控站; 主控站对测距数据进行包括电离层、对流层、相对论效应、天线相位中心的偏移及地球自转等引起的传播时延进行订正, 并用卡尔曼滤波器进行连续数据平滑及最小二乘法或二项式拟合, 以提供 GPS 卫星的位置和速度, 卫星的钟差和漂移率, 对流层残余偏差及三个极移偏差等数据, 并将这些数据编成导航文件送到注入站; 最后由注入站将这些导航文件注入到 GPS 卫星上的存储器。

(3)用户接收部分: 用户接收部分的基本设备是 GPS 接收天线和信号接收机, 其作用是接收、跟踪、变换和测量 GPS 卫星发射的信号, 达到导航和定位的目的。GPS 信号接收机按用途不同可分为许多种。用于 GPS 气象学的 GPS 信号接收机要求高精度的双频接收机。鉴于成本考虑, GPS 接收机内的时钟一般用石英钟, 因此接收机的钟差比卫星上钟差大, 是 GPS 定位的误差源之一。

1.2.2 GPS 卫星信号

GPS 卫星播发的信号包括载波、测距码(C/A 码、P 码)、数据码(导航电文, 或称 D 码), 以

满足各种用户的不同的导航和定位精度的需要。所有这些信号的频率都是一个基准频率 $f_0 = 10.23 \text{ MHz}$ 的倍数。

GPS载波信号取无线电波 L 波段的两种不同频率的电磁波,它们的频率和波长分别为:

L_1 载波: $f_1 = 154 \times f_0 = 1575.42 \text{ MHz}$, $\lambda_1 = 19.03 \text{ cm}$, L_1 上调制有C/A码、P码和数据码;

L_2 载波: $f_2 = 120 \times f_0 = 1227.60 \text{ MHz}$, $\lambda_2 = 24.42 \text{ cm}$, L_2 上只调制有P码和数据码。

在GPS载波上调制加载的两种测距码C/A码和P码均为伪随机码,不仅具有良好的自相关特性,而且是一种结构稳定,容易复制的周期性序列。

C/A码: $f_C = 0.1 \times f_0 = 1.023 \text{ MHz}$, $\lambda_C = 2.93 \text{ m}$ 。定位精度为 $29.3 \sim 2.9 \text{ m}$,也称为粗码。

P码: $f_P = 1.0 \times f_0 = 10.23 \text{ MHz}$, $\lambda_P = 0.29 \text{ m}$ 。定位精度为 $2.9 \sim 0.29 \text{ m}$,也称为细码。

数据码:二进制码,依规定的格式组成,按帧向外播送,每帧电文长度为 1500 bit ,播送速率为 50 bit/s 。

GPS定位的主要原理把GPS接收机内复制的信号和接收到的卫星发出的信号对齐,测量卫星信号从卫星到测站的传播时间,再根据数据码提供的卫星轨道数据,计算卫星和接收机之间的距离,进行定位。而载波除了用于加载和传递数据码信号外,其本身就可以用来测量卫星和接收机之间的距离。

美国出于军事保密的需要,对P码是不公开的。为了防止人们破译,实施了反电子欺骗AS(Anti-Spoofing)技术,它由P码和保密的W码相加而形成Y码,代替P码,使一般用户无法解码。另外还实施选择可用性SA(Selective Availability)政策,在广播星历中对GPS卫星的基准频率采用 δ 技术使其变为无规律的随机变化;对卫星钟的钟频信号采用 ϵ 技术,产生高频抖动,降低定位精度。由于GPS气象学要求定位的精度在 $\text{cm} \sim \text{mm}$ 级,不用C/A码和P码,是通过测量GPS卫星传播的载波相位来计算信号传播的延迟量,因此不受AS和SA政策的影响。

1.2.3 全球导航卫星系统 GNSS

目前,GPS气象学只基于美国一家的GPS导航卫星系统。出于国家安全和需要,俄罗斯、欧盟和中国都在建设自己的导航卫星系统。这些新建立的导航卫星系统和GPS系统一起将组成一个整体性的全球导航卫星系统GNSS(Global Navigation Satellite System),供大家共享。

1.2.3.1 俄罗斯的GLONASS导航卫星系统

GLONASS系统由前苏联从1982年10月开始建设,于1996年1月基本建成,开始运行。1999年、2000年、2001年和2004年分别补网发射了卫星,从2004年开始进入完好的运行状态。GLONASS卫星星座由24颗卫星组成,21颗工作卫星,3颗备用卫星。24颗卫星均匀分布在3个椭圆轨道上,每个轨道8颗卫星,平均高度 19100 km 。轨道面间的夹角为 120° ,轨道倾角为 64.8° ,轨道的偏心率为 0.01 。卫星运行周期 $11 \text{ h } 15 \text{ min}$ 。由于GLONASS卫星的轨道倾角大于GPS卫星的轨道倾角,在高纬度地区的可视性较好(图1.2)。卫星发射两个载波频率的信号,分别为 $1246 \sim 1257 \text{ MHz}$ 和 $1602 \sim 1616 \text{ MHz}$ 。像GPS一样,这些信号给用户提

供卫星星历数据、原子钟校正值和历书数据等。卫星的设计使用寿命为 3 年。GLONASS 与 GPS 类似,也提供军用和民用两种精度服务。民用的水平定位精度为 26 m,垂直定位精度为 45 m,比 GPS 略差。俄罗斯正在进行 GLONASS-M 的改进计划,引入两代新卫星计划,水平定位提高到 10~15 m。(周建郑,2004;丘致和,2004)

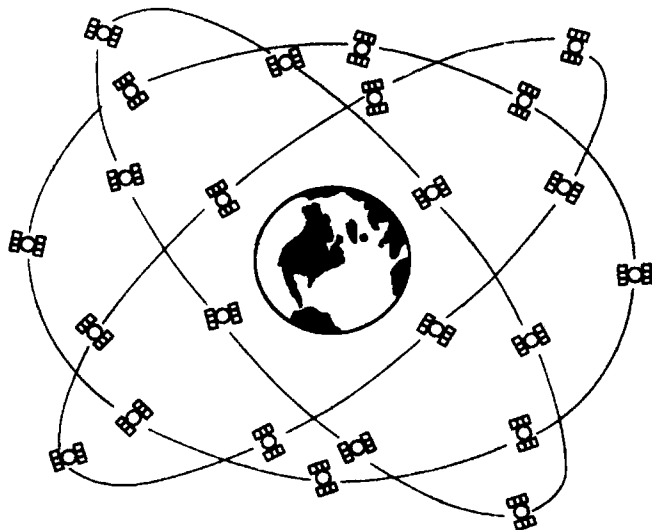


图 1.2 俄罗斯 GLONASS 导航系统的卫星星座

1.2.3.2 欧盟的 Galileo 导航卫星系统

欧盟在 1999 年 2 月提出 Galileo 计划,计划原定 4 个阶段,2000 年为论证阶段,投资 32.5 万亿欧元,建立频率资源;2001—2005 年为系统研制和在轨确认阶段,包括研制卫星及地面设施,系统在轨确认;2006—2007 年为星座布设阶段,包括制造和发射卫星,地面设施建设并投入使用;2008 年起整个系统投入运行。但是由于种种原因,该系统可能要推迟 2012 年才能完成。我国也是 Galileo 系统的合作伙伴,拥有 20% 的所有权和全部的使用权。Galileo 系统由 30 颗卫星组成,27 颗工作卫星,3 颗备用卫星。卫星采用中等地球轨道,均匀分布在 3 个轨道上,轨道倾角为 56° 。每个轨道 9 颗工作卫星,1 颗备用卫星,卫星的平均高度为 23616 km(图 1.3)。该系统使用 4 个载波向全球发布 5 种导航信号,支持开放、商用、生命安全及管理 and 搜救服务。该系统的地面部分包括 2 个控制中心、5 个跟踪传输和控制站、10 个上行站和 29 个伽利略传感器站。Galileo 卫星导航系统比 GPS 系统具有三个优点:一是全部公开民用;二是它的定位测量精度将是美国 GPS 的 10 倍以上,定位时间缩短;三是用户接收机采用多模式制式,可同时接收 GPS、GLONASS 和 Galileo 的导航信号。

1.2.3.3 中国北斗卫星导航系统

中国作为发展中的大国,拥有广阔的领土和海域,高度重视卫星导航系统的建设,一直在努力探索和发展拥有自主知识产权的卫星导航定位系统。中国自 2000 年以来陆续发射了 3 颗“北斗导航试验卫星”,并在 2003 年 6 月 1 日正式开通第一代北斗导航试验系统。“北斗一代”卫星定位系统由两颗地球静止卫星、一颗在轨备份卫星、中心控制系统、标校系统和各类用户机等部分组成。目前三颗地球静止卫星的位置分别在 140°E 、 110.5°E 和 80°E 。由于北斗

一代导航系统只有三颗卫星,只能覆盖我国本土的区域,覆盖范围东经约 70° — 140° ,北纬 5° — 55° 。定位精度约 50 m。

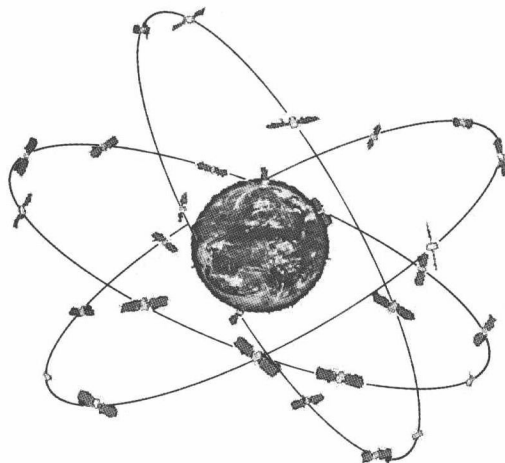


图 1.3 欧盟的 Galileo 导航系统的卫星星座

2006 年开始,我国开始北斗二代卫星导航系统的立项建设。北斗二代卫星导航系统由空间卫星系统、地面运控系统和用户应用系统三大部分组成。

北斗二代空间卫星系统由 4 颗静止星+12 颗中轨星(20000 km)+9 颗高轨道星(36000 km)组成。如图 1.4 所示。目前已经成功发射了两颗卫星,计划 2011 年完成系统组网,建成一个覆盖中国及周边地区的区域导航定位系统;预计在 2020 年完成系统建设任务,形成覆盖全球的卫星导航定位系统。发射信号的基本频率和 GPS 一样也在 L 波段,已经考虑到接收机能同时接收 GPS 信号和伽利略信号。

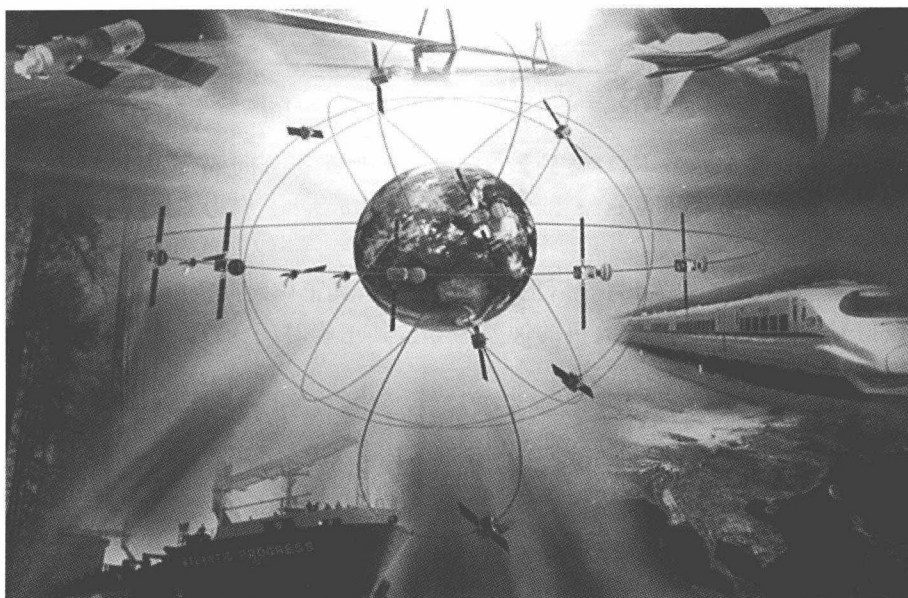


图 1.4 中国北斗二号卫星导航系统的星座

地面运控系统由主控站、注入站和监测站等若干个地面站构成;用户端由北斗用户终端和与 GPS、GLONASS、伽利略其他导航系统兼容的终端组成。

用户应用系统包括所有服务于陆、海、空、天等不同用户、不同性能的各种谱型用户设备,主要任务是接收卫星发射的导航信号,实现用户的导航定位、定时、测速和报文通信。提供两种服务方式,即开放服务和授权服务。开放服务是在服务区免费提供定位、测速和授时服务,定位精度为 10 m,授时精度为 50 ns,测速精度达到 0.2 m/s。授权服务是向授权用户提供更安全的定位、测速、授时和通信服务以及系统完好性信息。

全球导航卫星系统 GNSS 的发展,使一个接收机可同时接收的卫星个数是现在的 3 倍以上。这样不仅有利于提高定位精度,而且提高系统使用的安全性。同时,使 GPS 气象学反演大气参数的精度和时空分辨率大大提高,明显提升 GPS 气象学的实用性。GPS 气象学将很快发展成 GNSS 气象学。

1.3 GPS 卫星定位的基本原理

利用 GPS 信号定位是基于 GPS 接收站和 GPS 卫星之间的距离测量。由于在测定的卫星和接收机的距离中,不可避免地包含着时钟的钟差和电离层、对流层延迟等影响,不同于卫星和接收机的实际距离,所以应该称之为伪距。从所利用的 GPS 信号成分不同,定位方法分为两种:测距码伪距法定位和载波相位法定位。

1.3.1 测距码伪距法定位

当卫星发出的含有测距码的调制信号,经过 Δt 到达接收机,接收机在 t 时刻收到的测距码应为 $U(t-\Delta t)$ 。而接收机的伪随机噪声码发生器会产生一个与卫星发播的测距码结构完全相同的复制码 $U_r(t-\tau)$ 。接收机内的时延器通过不断调整 τ ,对测距码和复制码作相关处理

$$R(t) = \frac{1}{T} \int_{\tau} U(t-\Delta t) U_r(t-\tau) dt \quad (1.1)$$

当信号之间的自相关系数 $R(t)$ 达到最大时,可认为在积分间隔 T 内复制码和测距码对齐,测定 GPS 信号的传播时间为 τ 。 τ 和光速 c_0 的乘积 $\rho' = c_0 \tau$ 应为 GPS 测量到的卫星和接收机的伪距。

设 GPS 卫星时钟为 t_s 时发出信号,卫星钟差为 δt_s ,其正确时间为 $T_s = t_s + \delta t_s$; GPS 接收机接收到该信号时的时钟为 t_r ,接收机的钟差为 δt_r ,其正确时间为 $T_r = t_r + \delta t_r$ 。则测量得到的信号从卫星到接收机的传播时间为

$$t_r - t_s = (T_r - \delta t_r) - (T_s - \delta t_s) = (T_r - T_s) - \delta t_r + \delta t_s \quad (1.2)$$

如果不考虑大气的影响,两边乘真空中光速 c_0 ,测得 GPS 卫星 i 到接收机的伪距

$$\begin{aligned} \rho'_i &= \rho_i - c_0 \delta t_r + c_0 \delta t_s \\ &= \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - c_0 \delta t_r + c_0 \delta t_s \end{aligned} \quad (1.3)$$

式中 (x, y, z) 为以地心为原点的坐标系的 GPS 接收站的位置坐标, (x_i, y_i, z_i) 为所观测到的 GPS 卫星 i 的坐标, $\rho_i = c_0 (T_r - T_s) = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}$ 为卫星 i 到接收机的