

 新技术系列丛书



# GPS 参考站系统 原理与应用

吴俐民 丁仁军 李凤霞·著

The Principle and Application  
of GPS Reference  
Stations System

3S 新技术系列丛书

# GPS 参考站系统原理与应用

吴俐民 丁仁军 李凤霞 著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内 容 简 介

本书作者多年从事 GPS 参考站系统研究与应用,故本书是在长期理论研究和实际应用的基础上撰写而成的。内容共分 10 章:第 1 章主要介绍了 GPS 原理,第 2 章主要介绍了网络 RTK 技术,第 3 章主要介绍了 GPS 参考站系统,第 4 章主要介绍了 GPS 参考站系统在测量中的应用,第 5 章至第 10 章分别介绍了 GPS 参考站系统在智能交通、气象、物流、农业、林业、环保等方面的应用。

本书可供 GPS 参考站系统应用的工程技术人员使用,也可以供相关专业师生、研究人员及测绘专业技术人员参考。

---

### 图书在版编目(CIP)数据

GPS 参考站系统原理与应用 / 吴俐民, 丁仁军, 李凤霞  
著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2008.12  
(3S 新技术系列丛书)  
ISBN 978-7-5643-0007-4

I. G… II. ①吴…②丁…③李… III. 全球定位系统  
(GPS) — 研究 IV. P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 204647 号

---

3S 新技术系列丛书

### GPS 参考站系统原理与应用

吴俐民 丁仁军 李凤霞 著

\*

责任编辑 阳 晓

特邀编辑 杨 勇

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 170 mm×230 mm 印张: 12.625

字数: 234 千字

2008 年 12 月第 1 版 2008 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5643-0007-4

定价: 30.00 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

# 前 言

近年来,全国各地都在积极开展 GPS 参考站系统的建设,许多省级、城市级连续运行 GPS 参考站系统已经建成投入使用,国家 GPS 参考站系统也正在建设中。系统的建设将能为政府和社会提供多层次、多方面的服务:① 提供 4 个层次的定位信息服务,即毫米级、厘米级、分米级和米级定位精度的服务。毫米级精度的定位信息可用于地表及建(构)筑物的形变监测;厘米级精度的定位信息可用于快速建立测量控制网,测图及工程测量等;分米级精度的定位信息可用于城市基础地理信息的动态更新及通信、电力、石油、化工、林业、精细农业、土地平整等方面;米级精度的定位信息可用于智能交通管理、公共安全(110、120、119 等特种车辆监控、事态应急等),同时还为各行各业提供导航服务。② 提供非定位信息的服务,如准确授时、精确气象预报、电离层及对流层研究、环境保护等。因此,把 GPS 参考站系统这一高新技术应用于城市规划、市政建设、交通管理、城市基础测量和工程测量、气象预报等,可服务于多个领域,以达到“一个平台,一次投资、多种服务”的效果,促进城市的现代化建设和管理。

作者多年从事 GPS 参考站系统的技术研究与应用工作,2005 年完成了昆明市连续运行 GPS 参考站系统的建设。该系统实时产生的厘米级的控制点已应用于城市基础测绘、土地利用现状调查、呈贡新城建设和昆明市东南二环改造等项目,产生了巨大的经济效益和社会效益,在数字昆明和昆明市的城市规划、建设和管理中也发挥了巨大的作用。同时,作者已开始 GPS 参考站系统在其他方面的应用开发与推广工作,如气象预报、智能交通、公共安全等。

为了推动 GPS 参考站系统技术更加广泛的应用,为了让更多用户了解连续运行 GPS 参考站技术,作者根据多年积累的 GPS 参考站系统研究与应用的经验,结合昆明市连续运行 GPS 参考站系统的建设和应用,撰写了此书,对 GPS 的原理、网络 RTK 原理、GPS 参考站系统及其应用进行了详细的阐述,这样便于有兴趣的读者更好地了解 GPS 参考站系统及其在诸多行业中的应用,同时也为正在推广应用 GPS 参考站系统的地区和单位提供参考。

在撰写本书的过程中，作者参阅了国内各院校及有关设计、科研和施工单位的研究成果和相关资料，获益匪浅，并引用了国内外有关 GPS 领域专家、学者的研究成果，在此向本书所列参考文献的作者表示衷心的感谢，同时特别感谢昆明市测绘研究院对本书的大力支持。

本书注重理论与应用实际相结合，反映了当前 GPS 参考站系统的最新技术和应用领域，特别是参考站系统在测量中的应用情况。由于时间紧，加之参考站技术及其应用技术的空前发展，又限于作者水平，书中难免存在不妥之处，恳请各位专家和广大读者批评指正。

**吴俐民**

2008 年 10 月于云南昆明

# 目 录

第 1 章 GPS 定位原理	1
1.1 全球卫星定位系统简介	1
1.2 GPS 全球卫星定位系统的组成	4
1.3 GPS 全球卫星定位系统的特点	7
1.4 GPS 定位原理与误差来源	8
1.5 差分 GPS 原理	16
1.6 广域差分 GPS	22
第 2 章 网络 RTK	27
2.1 常规 RTK	27
2.2 网络 RTK 原理及其改正数计算	28
2.3 常用的网络 RTK 技术	37
2.4 网络 RTK 的技术特点及优势	44
2.5 网络 RTK 定位的误差因素	45
第 3 章 GPS 参考站系统	47
3.1 GPS 参考站系统的应用现状	47
3.2 GPS 参考站系统的组成及功能	50
3.3 GPS 参考站系统的建设	52
3.4 GPS 参考站的关键技术	62
3.5 GPS 参考站系统性能的技术参数	62
3.6 GPS 参考站系统的应用前景	63
第 4 章 GPS 参考站系统在测量中的应用	66
4.1 建立并维护一个高精度地心坐标基准	66
4.2 网络 RTK 控制测量	70
4.3 实时网络 RTK 测量	89
4.4 后处理技术服务	89
4.5 质量控制	89

第 5 章 GPS 参考站系统在智能交通中的应用 .....	93
5.1 在公交车辆管理调度系统中的应用 .....	93
5.2 在出租车辆智能管理系统中的应用 .....	95
5.3 在旅游客运车辆营运监控调度管理系统中的应用 .....	102
5.4 在特种车辆管理系统中的应用 .....	103
第 6 章 GPS 参考站系统在气象学中的应用 .....	106
6.1 GPS 气象学 .....	106
6.2 天气预报和研究 .....	108
6.3 电离层监测和研究 .....	114
第 7 章 GPS 参考站系统在物流领域中的应用 .....	118
7.1 基于 GPS 的物流管理原理 .....	118
7.2 基于 GPS 的高精度物流管理监控系统的组成 .....	118
7.3 在物流中的应用 .....	119
第 8 章 GPS 参考站系统在农业和林业中的应用 .....	125
8.1 GPS 技术在农业中的应用 .....	125
8.2 GPS 技术在林业中的应用 .....	127
第 9 章 GPS 参考站系统在环保中的应用 .....	134
9.1 “数字环保” .....	134
9.2 在环保疏浚中的应用 .....	136
9.3 在生态环境建设方面的应用 .....	137
9.4 在城市环境实时稽查中的应用 .....	137
9.5 在海上溢油跟踪监测方面的应用 .....	138
第 10 章 GPS 参考站系统在其他领域中的应用 .....	140
10.1 在旅游及生活中的应用 .....	140
10.2 在监测地震与地壳运动中的应用 .....	141
10.3 在石油行业中的应用 .....	144
10.4 在其他行业中的应用 .....	145
附录 A 南方 GPS 参考站系统 .....	153
附录 B 华测连续运行参考站系统 (HC-CORS) .....	169
参考文献 .....	194

# 第 1 章 GPS 定位原理

---

## 1.1 全球卫星定位系统简介

20 世纪 60 年代末 70 年代初,美国和苏联分别开始研制全天候、连续实时提供精确定位服务的新一代全球卫星导航系统,至 90 年代全球卫星导航系统 GPS 和 GLONASS 均已建成并投入运行。自 2000 年以来,中国开始建设自主知识产权的 CNSS 北斗卫星导航系统,2003 年底正式开通运行。欧盟筹建的 GALILEO 伽利略全球卫星导航系统正在计划实施之中。

### 1.1.1 GPS 全球卫星定位系统

GPS (Global Positioning System) 全球卫星定位系统是美国第二代空间卫星导航定位系统。具体来说,即通过 GPS 接收设备,接受美国发射的 24 颗卫星中任意 3 颗以上卫星所发射的导航信号,在任何时候、任何地点都能准确地测量到物体瞬时位置的一种定位系统(包括物体的经纬度、高度、速度等位置信息)。它是一个基于被动式定位原理的卫星导航定位系统,由美国陆海空三军于 20 世纪 70 年代联合研制。

经过 20 余年的研究实验,耗资 300 亿美元,到 1994 年 3 月,全球覆盖率高达 98% 的 24 颗 GPS 卫星已布设完成并投入运营。它不仅成为军事的重要手段,而且也成为车辆导航、交通管理(海、陆、空)、物流、救助、娱乐业、安保市场等民用产业必不可少的通信手段。

GPS 全球卫星定位系统所有权、控制权和运营权均属于美国国防部。为了限制不同用户对 GPS 的应用,GPS 通过发射不同的无线电信号来分别为军事部门和民间用户提供两种不同的定位服务。如今,GPS 技术已广泛应用于大地测量、工程测量、航空摄影测量、运载工具导航和管制、地壳运动监测、工程变形监测、资源勘察、地球动力学等多学科领域,从而在导航定位领域发生了深刻的技术变革。



### 1.1.2 GLONASS 全球卫星定位系统

俄罗斯于 2002 年 12 月 25 日在哈萨克斯坦的拜科努尔航天发射场用一枚“质子-K”火箭成功发射了 3 颗 GLONASS 全球导航系统卫星。截至 2004 年,除了上面提到的 3 颗卫星以外,在太空运行的 GLONASS 卫星已有 10 颗,其中的 8 颗已经启用,另外两颗是备用卫星。GLONASS 与 GPS 一样也由 24 颗卫星组成,原理和方案都与 GPS 类似。地面控制部分全部都在俄罗斯领土境内。多功能的 GLONASS 系统定位精度可达 1 m,速度误差为 15 cm/s。GLONASS 没有施加 SA 干扰,所以它的民用精度优于施加 SA 干扰的 GPS 系统。但是,它的应用普及情况则远不及 GPS,这主要是因为俄罗斯没有开发民用市场。另外, GLONASS 卫星在轨道上的平均寿命较短,在轨的可用卫星较少。

### 1.1.3 GALILEO 全球卫星定位系统

为打破美国十几年来在全球卫星导航定位市场一统天下的格局,2002 年 3 月,当时的欧盟 15 国交通部长在西班牙巴塞罗那会议上正式决定启动“伽利略”(GALILEO)计划。“伽利略”系统是全球多模式卫星定位导航系统,原理和 GPS 相似,可以进行覆盖全球的导航和定位功能,将为用户提供误差不超过 1 m 的高精度、高可靠性的定位服务。GALILEO 系统是由欧盟与欧空局(ESA)策划和组织实施,采用公私伙伴关系的商业运作模式共同运营和管理的民用卫星系统,但该系统所发送的公共特许服务(PRS)信号也可用于军事目的。除欧盟国家外,还有 6 个非欧盟国家——中国、印度、以色列、摩洛哥、沙特阿拉伯和乌克兰已经加入该计划。

2005 年 12 月 28 日,格林尼治时间清晨 05:19, GALILEO 系统的首颗实验卫星“GIOVE-A”由俄罗斯“联盟-FG”火箭从哈萨克斯坦的拜科努尔航天中心发射升空,标志着 GALILEO 计划已进入实质性实施阶段。GALILEO 卫星定位系统由 30 颗轨道卫星组成,从设计目标来看,它的最大优势是更多地用于民用,包括免费使用的信号、加密且需交费使用的信号、加密且需满足更高要求的信号。GALILEO 系统的另一优势在于能够与美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 系统实现多系统内的相互兼容。GALILEO 系统拟在卫星上安装高精度氢原子钟,这是目前 GPS 系统所不具备的。

中国是第一个加入 GALILEO 计划的非欧盟国家,2004 年 10 月 9 日我国与欧盟正式签署中欧 GALILEO 计划技术合作协议。根据中欧双方签署的协议,中国将参与开发全球卫星导航系统在渔业中的应用、基于位置的服务标准化、电离层中定位信号的修复。中国的参与将使这一系统在交通、科学、土地利用以及战胜自然灾害等方面的优势得到充分发挥。

## 1.1.4 CNSS 卫星导航定位系统

北斗卫星导航定位系统 (Compass Navigation Satellite System, CNSS) 始于 2000 年, 是中国自行研制开发的区域性有源卫星定位与通信系统, 是除美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 之后第三个成熟的卫星导航系统。中国的北斗分为两代: 第一代是区域系统, 包含 4 颗卫星, 已经发挥效用; 第二代是全球系统, 包含 35 颗卫星, 正在建设中。

2007 年 4 月 14 日凌晨 04: 11, 中国在西昌卫星发射中心用“长征三号甲”运载火箭, 成功将北斗导航卫星 COMPASS-M1 (非静止轨道卫星) 送入太空。第一颗不再以“试验”冠名的北斗导航卫星顺利升空, 标志着中国自行研制的北斗卫星导航系统进入新的发展建设阶段。在这之前, 自 2000 年以来, 中国已成功发射了 4 颗北斗导航试验卫星, 运行至今, 导航定位系统工作稳定, 状态良好。

北斗卫星导航系统由空间卫星、地面控制中心站和用户终端等 3 部分构成。北斗导航定位系统主要有 3 大功能: 快速定位, 为服务区域内的用户提供全天候、实时定位服务, 定位精度与 GPS 相当; 短报文通信, 一次可传送多达 120 个汉字的信息; 精密授时, 精度达 20 ns。

GLONASS、GALILEO、CNSS 卫星导航定位系统原理和方法与 GPS 相似, 目前应用最广泛的是 GPS 全球卫星定位系统。四者空间分布如图 1.1 所示。

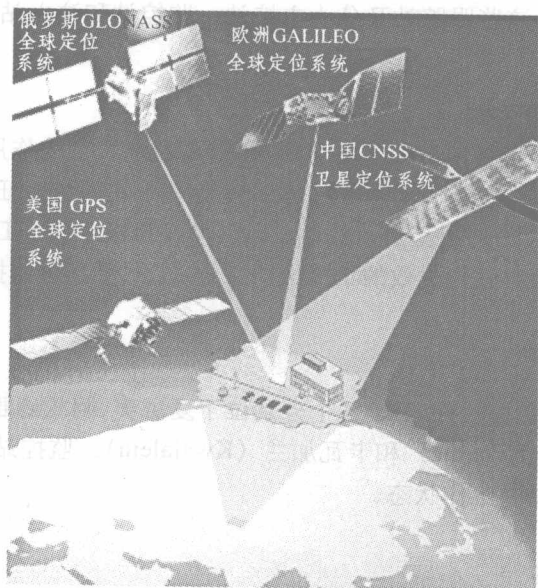


图 1.1 4 种卫星定位系统示意图

## 1.2 GPS 全球卫星定位系统的组成

GPS 包括 3 大部分：地面控制部分、空间部分、用户设备部分。三者有各自独立的功能和作用，但又是有机地配合而缺一不可的整体系统。图 1.2 显示了 GPS 的 3 个组成部分及其相互关系。

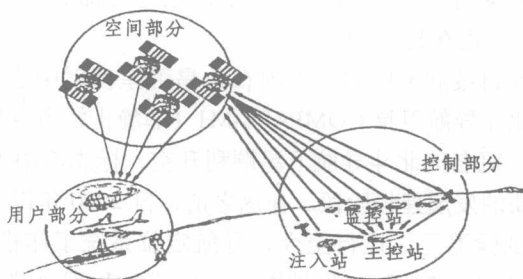


图 1.2 GPS 系统 3 大组成部分

### 1.2.1 地面控制部分

GPS 地面控制部分由分布在全球的若干个跟踪站组成的监控系统构成。根据其作用的不同，这些跟踪站又分为主控站、监测站和注入站（见图 1.3）。

#### 1. 主控站

有 1 个，位于美国科罗拉多的 Falcon 空军基地。它的作用是：① 根据各监测站对 GPS 的观测数据，计算出卫星的星历和卫星时钟改正参数等，通过注入站注入卫星中；② 对卫星进行控制，向卫星发布指令，当工作卫星出现故障时，调控备用卫星，替代失效的工作卫星工作；③ 还具有监测站的功能。

#### 2. 监测站

有 5 个，除了主控站外，其他 4 个分别位于夏威夷、阿松森群岛 (Ascencion)、迭哥伽西亚 (Diego Garcia) 和卡瓦加兰 (Kwajalein)。监测站的作用是接收卫星信号，监测卫星的工作状态。

#### 3. 注入站

有 3 个，它们分别位于阿松森群岛 (Ascencion)、迭哥伽西亚 (Diego Garcia)

和卡瓦加兰 (Kwajalein)。注入站的作用是将主控站计算的卫星星历和卫星时钟的改正参数等注入卫星中去。

地面监控系统的另一个重要作用是确保各颗卫星处于同一时间标准——GPS 时间系统 (GPST)，这就需要地面站监测各颗卫星的时间，求出卫星钟差，然后由注入站注入卫星，再由卫星通过导航电文发给用户设备。

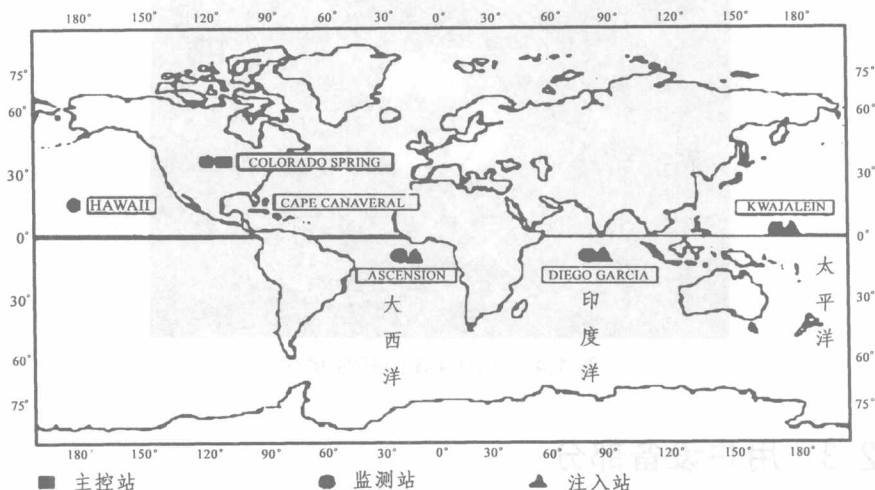


图 1.3 GPS 地面控制部分

## 1.2.2 空间部分

GPS 空间部分由 21 颗工作卫星和 3 颗在轨备用卫星组成，记为 (21+3) GPS 星座 (见图 1.4)。24 颗卫星均匀分布在 6 个轨道平面内，轨道倾角为  $55^\circ$ ，各个轨道平面之间相距  $60^\circ$ ，即轨道的升交点赤经各相差  $60^\circ$ 。每个轨道平面内各颗卫星之间的升交角距相差  $90^\circ$ 。GPS 工作卫星平均距离地面 2 万多 km，绕地球旋转一周的时间为 12 恒星时。对于地面观测者来说，每天将提前 4 min 见到同一颗 GPS 卫星。位于地平线以上的卫星颗数随着时间和地点的不同而不同，最少可见到 4 颗，最多可见到 11 颗。在 GPS 导航定位时，GPS 卫星是一个动态的已知点，为了计算测站的三维坐标，必须观测至少 4 颗 GPS 卫星，称为定位星座，其中，卫星的位置是依据卫星发射的星历 (描述卫星运动及其轨道参数) 计算得到。这 4 颗卫星在观测过程中与测站所形成的几何构形对定位精度有一定的影响。对于某地某时，不能测得精确的点位坐标，这种时间段叫做“间

隙段”。但这种时间间隙段是很短暂的，并不影响全球绝大多数地方的全天候、高精度、连续实时的定位工作。

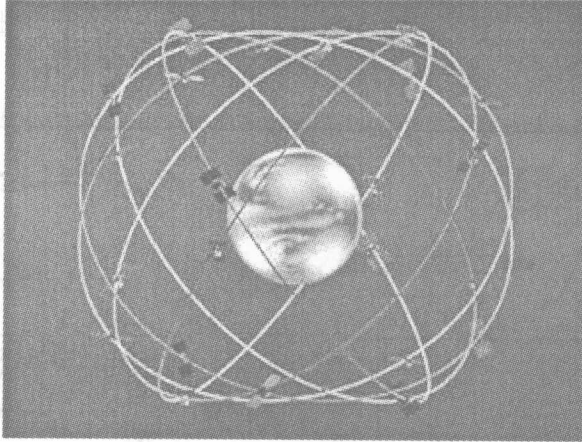


图 1.4 (21+3) GPS 星座

### 1.2.3 用户设备部分

用户设备部分主要由 GPS 接收机和接收机天线组成（见图 1.5）。

GPS 接收机的任务是：按一定卫星高度截止角捕获 GPS 卫星的信号，并跟踪这些卫星的运行，对所接收到的 GPS 信号进行变换、放大和处理，以便测量出 GPS 信号从卫星到接收机天线的传播时间，解译出 GPS 卫星所发送的导航电文，实时地计算出测站的三维位置、三维速度和时间。

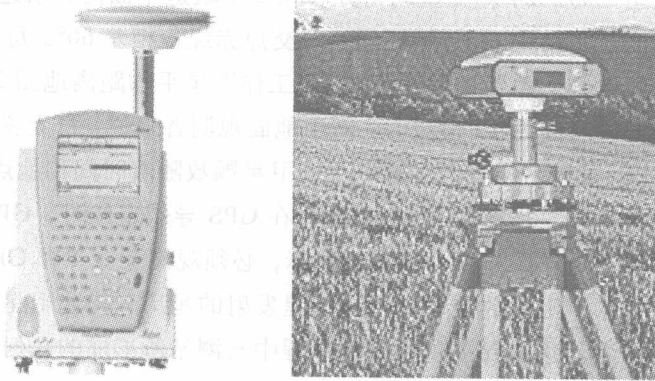


图 1.5 GPS 用户设备

## 1.3 GPS 全球卫星定位系统的特点

GPS 全球卫星定位系统的特点有：高精度、全天候、高效率、多功能、操作简便、应用广泛等。

### 1. 定位精度高

应用实践已经证明，GPS 相对定位精度在 50 km 以内可达  $10^{-6}$ ，100~500 km 可达  $10^{-7}$ ，1 000 km 可达  $10^{-9}$ 。在 300~1 500 m 工程精密定位中，1 h 以上观测的解，其平面位置误差小于 1 mm，与 ME-5000 电磁波测距仪测定的边长比较，其边长校差最大为 0.5 mm，校差中误差为 0.3 mm。

### 2. 观测时间短

随着 GPS 系统的不断完善，软件的不断更新，目前，20 km 以内快速静态相对定位，仅需 15~20 min。RTK 测量时，当每个流动站与参考站相距在 15 km 以内时，流动站观测时间只需 1~2 min。

### 3. 测站间无需通视

GPS 测量不要求测站之间互相通视，只需测站上空开阔即可，因此可节省大量的造标费用。由于无需点间通视，点位位置根据需要可稀可密，使选点工作甚为灵活，也可省去经典大地网中的传算点、过渡点的测量工作。

### 4. 可提供三维坐标

经典大地测量对平面与高程采用不同方法分别施测。GPS 可同时精确测定测站点的三维坐标（平面+大地高）。目前，通过局部大地水准面精化，GPS 水准可满足四等水准测量的精度。

### 5. 操作简便

随着 GPS 接收机不断改进，自动化程度越来越高，有的已达“傻瓜化”的程度，接收机的体积越来越小，质量越来越轻，极大地减轻了测量工作者的工作紧张程度和劳动强度。

### 6. 全天候作业

目前 GPS 观测可在一天 24 h 内的任何时间进行，不受阴天黑夜、起雾刮风、下雨下雪等气候的影响。

## 7. 功能多，应用广

GPS 系统不仅可用于测量、导航及精密工程的变形监测，还可用于测速、测时。测速的精度可达  $0.1 \text{ m/s}$ ，测时的精度优于  $0.2 \text{ ns}$ ，其应用领域在不断扩大。当初，设计 GPS 系统的主要目的是用于导航、收集情报等军事方面。但是，后来的应用开表明，GPS 系统不仅能够达到上述目的，而且用 GPS 卫星发来的导航定位信号能够进行厘米级甚至毫米级精度的静态相对定位，米级至亚米级精度的动态定位，亚米级至厘米级精度的速度测量和毫秒级精度的时间测量。因此，GPS 展现了极其广阔的应用前景。

## 1.4 GPS 定位原理与误差来源

### 1.4.1 GPS 定位原理

利用 GPS 进行定位的基本原理是，以 GPS 卫星和用户接收机天线之间距离（或距离差）的观测为基础，并根据已知的卫星瞬间坐标来确定用户接收机所对应的点位，即待定点的三维坐标  $(x, y, z)$ 。GPS 定位的关键是测定用户接收机天线至 GPS 卫星之间的距离。

#### 1. 伪距的概念及伪距测量

GPS 卫星能够按照星载时钟发射结构为“伪随机噪声码”的信号，称为测距码信号（即粗码 C/A 码或精码 P 码）。该信号从卫星发射经时间  $t$  后，到达接收机天线，卫星至接收机的空间几何距离  $\rho = c \times t$ （ $c$  表示电磁波传播速度， $t$  表示传播时间）。

实际上，由于传播时间  $t$  中包含有卫星时钟与接收机时钟不同步的误差及测距码在大气中传播的延迟误差等，求得的距离值并非真正的站星几何距离，故习惯上称之为“伪距”，用  $\rho$  表示，与之相对应的定位方法称为伪距法定位。

为了测定上述测距码的时间延迟，即 GPS 卫星信号的传播时间，需要在用户接收机内复制测距码信号，并通过接收机内的可调延时器进行相移，使得复制的码信号与接收到的相应码信号达到最大相关，即使之相应的码元对齐。为此，所调整的相移量便是卫星发射的测距码信号到达接收机天线的传播时间，即时间延迟。

假设在某一标准时刻  $T_a$  卫星发出一个信号，该瞬间卫星钟的时刻为  $t_a$ ，该

信号在标准时刻  $T_b$  到达接收机, 此时相应接收机时钟的读数为  $t_b$ , 于是伪距测量测得的时间延迟, 即为  $t_b$  与  $t_a$  之差。

由于卫星钟和接收机时钟与标准时间存在着误差, 设信号发射与接收时刻的卫星和接收机钟差改正数分别为  $V_a$  和  $V_b$ , 则  $(T_b - T_a) + (V_b - V_a)$  即为测距码从卫星到接收机的实际传播时间  $\Delta T$ 。由上述分析可知, 在  $\Delta T$  中已对钟差进行了改正, 但由  $\Delta T \times c$  所计算出的距离中仍包含有测距码在大气中传播的延迟误差, 必须加以改正。设定位测量时, 大气中电离层折射改正数为  $\delta\rho_1$ , 对流层折射改正数为  $\delta\rho_T$ , 则所求 GPS 卫星至接收机的真正空间几何距离  $\rho$  应为:

$$\rho = c \times t - \delta\rho_1 - \delta\rho_T \quad (1.1)$$

伪距测量的精度与测量信号(测距码)的波长及其与接收机复制码的对齐精度有关。目前, 接收机的复制码精度一般取 1/100, 而公开的 C/A 码码元宽度(即波长)为 293 m, 故上述伪距测量的精度最高仅能达到 3 m ( $293 \times 1/100 \approx 3$  m), 难以满足高精度测量定位工作的要求, 而用 C/A 码测距时, 通常采用窄相关技术, 测距精度可达码元宽度 1/1 000 左右。由于美国于 1994 年 1 月 31 日实施了 AS 技术, 将 P 码和保密的 W 码进行模二相加以形成保密的 Y 码, 使得民用用户只能用精度较低的 C/A 码进行测距, 利用 Z 跟踪技术可对精度较高的 P 码进行相关处理, 与 C/A 码相结合, 可在一定程度上提高测距精度。

实际上, 在伪距测量观测方程中, 由于卫星上配有高精度的原子钟, 信号发射瞬间的卫星钟差改正数  $V_a$  可由导航电文中给出的有关时间信息求得。但用户接收机中仅配备一般的石英钟, 在接收信号的瞬间, 接收机的钟差改正数不可能预先精确求得。因此, 在伪距法定位中, 把接收机钟差  $V_b$  作为未知数, 与待定点坐标在数据处理时一并求解。由此可见, 在实际单点定位工作中, 在一个观测站上为了实时求解 4 个未知数  $x$ 、 $y$ 、 $z$  和  $V_b$ , 便至少需要 4 个同步伪距观测值  $\rho_i$ 。也就是说, 至少必须同时观测 4 颗卫星。伪距法的数学模型为:

$$\rho_i - cV_b = \sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2} \quad (1.2)$$

## 2. 载波相位测量

### 1) 原理

利用 GPS 卫星发射的载波为测距信号。由于载波的波长 ( $\lambda_{L1} = 19.03$  cm,  $\lambda_{L2} = 24.42$  cm) 比测距码波长要短得多, 因此对载波进行相位测量, 就可能得到较高的测量定位精度。

假设卫星  $S$  在  $t_0$  时刻发出一载波信号, 其相位为  $\phi(S)$ , 而此时若接收机产



生一个频率和初相位与卫星载波信号完全一致的基准信号，在  $t_0$  瞬间的相位为  $\phi(R)$ 。假设这两个相位之间相差  $N$  个整周信号和不足一周的相位  $\text{Fr}(\psi)$ ，则相位差：

$$\phi(R) - \phi(S) = \text{Fr}(\psi) + N \quad (1.3)$$

载波信号是一个单纯的余弦波。在载波相位测量中，接收机无法判定所量测信号的整周数，但可精确测定其零数  $\text{Fr}(\psi)$ ，并且当接收机对空中飞行的卫星作连续观测时，接收机借助于内含多普勒频移计数器，可累计得到载波信号的整周变化数  $\text{Int}(\psi)$ 。因此， $\psi = \text{Int}(\psi) + \text{Fr}(\psi)$  才是载波相位测量的真正观测值。而  $N_0$  称为整周模糊度，它是一个未知数，但只要观测是连续的，则各次观测的完整测量值中应含有相同的，也就是说，完整的载波相位观测值应为：

$$\tilde{\psi} = \psi + N_0 = \text{Int}(\psi) + \text{Fr}(\psi) + N_0 \quad (1.4)$$

在  $t_0$  时刻首次观测值中  $\text{Int}(\psi) = 0$ ，不足整周的零数为  $\text{Fr}^0(\psi)$ ， $N_0$  是未知数；在  $t_1$  时刻  $N_0$  值不变，接收机实际观测值  $\psi$  由信号整周变化数  $\text{Int}^i(\psi)$  和其零数  $\text{Fr}^i(\psi)$  组成。与伪距测量一样，考虑到卫星和接收机的钟差改正数  $V_a$ 、 $V_b$  以及电离层折射改正和对流层折射改正  $\delta\rho_I$ 、 $\delta\rho_T$  的影响，可得到载波相位测量的基本观测方程为  $\rho = \tilde{\psi} \cdot \lambda$ ，其中  $\lambda$  为载波波长。将其代入伪距方程中，得：

$$\rho = \sqrt{(X_s - X)^2 + (Y_s - Y)^2 + (Z_s - Z)^2} - \delta\rho_I - \delta\rho_T + cV_b \quad (1.5)$$

两式比较可看出，载波相位测量观测方程中，除增加了整周未知数  $N_0$  外，与伪距测量的观测方程在形式上完全相同。

## 2) 周跳

如果由于某种原因在两个观测历元之间的某一段时间工作计数器中止了正常的累积工作，从而使整周计数较应有值少了  $n$  周，那么当计数器恢复正常工作后，所有的载波相位观测值中的整周计数  $\text{Int}(\psi)$  便都会含有同一偏差值——较正常值少  $n$  周。这种整周计数  $\text{Int}(\psi)$  出现系统偏差而不足一周的部分  $\text{Fr}(\psi)$  仍然保持正确的现象称为整周跳变，简称周跳。

周跳的探测与修复，卫星在空间的运行轨迹是一条平滑的曲线，因而卫星至接收机的载波相位观测值的变化也应是平缓而有规律的。周跳破坏这种规律性，使观测值产生一种系统性的误差。周跳的探测及修复从本质上讲就是如何从载波相位观测值的时间序列中寻找可能存在的这种系统性的粗差并加以改