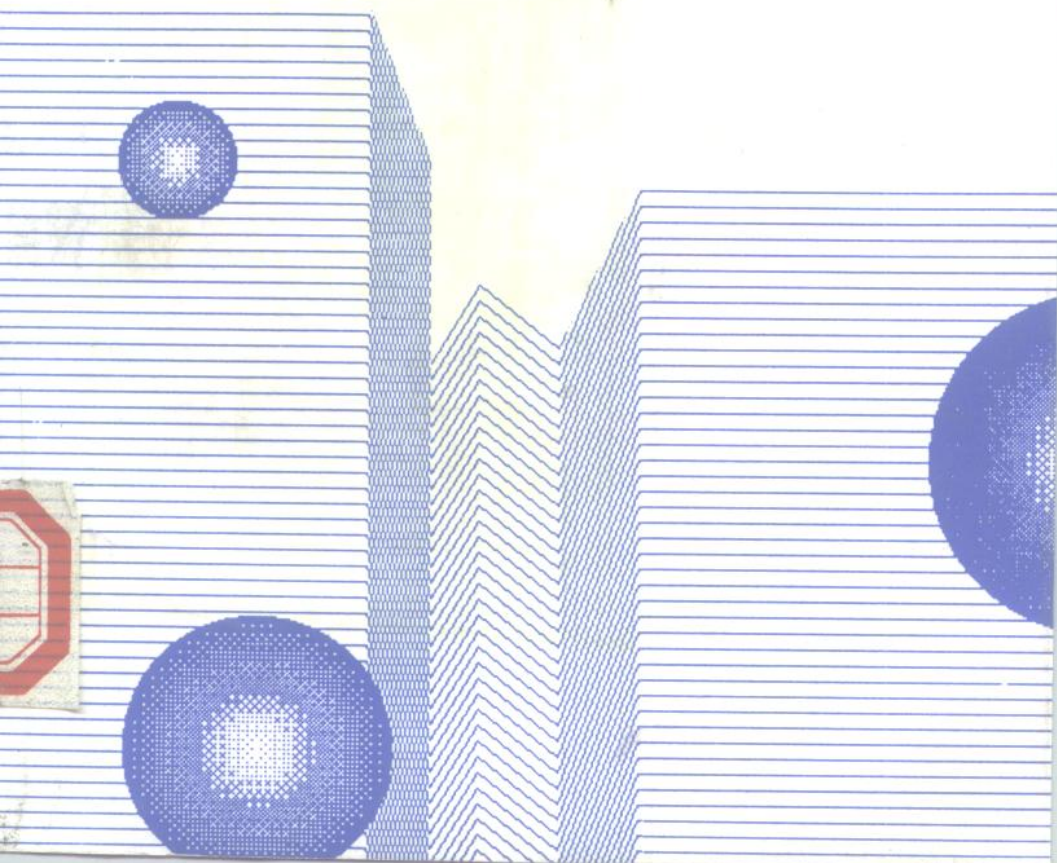


高技术系列教材

GPS/INS 组合导航定位及其应用

董绪荣 张守信 华仲春



TN363.1

D75

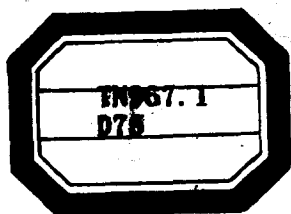
428756

GPS/INS 组合导航定位及其应用

董绪荣 张守信 华仲春 编著



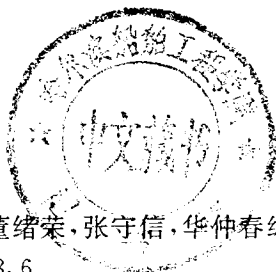
00428756



国防科技大学出版社

· 长沙 ·

428753



图书在版编目(CIP)数据

GPS/INS 组合导航定位及其应用/董绪荣,张守信,华仲春编著. —长沙:国防科技大学出版社,1998. 6

ISBN 7-81024-472-8

I GPS/INS 组合导航定位及其应用

II ①董绪荣②张守信③华仲春

III ①卫星导航定位②惯性导航定位

IV TN967

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)4555681 邮政编码:410073

E-mail:gfkdcbs@public.cs.hn.cn

责任编辑:何晋 责任校对:张建军

新华书店总店北京发行所经销

长沙环境保护学校印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:11.25 字数:282 千

1998年6月第1版第1次印刷 印数:1—3000册

*

定价:14.00 元

国家自然科学基金资助项目(项目编号:49304046)

国防科技大学图书馆

D282/22
内 容 简 介

GPS/INS 组合系统集 GPS 与 INS 之长,是一种高性能、高精度、高可靠性的导航定位系统,已经成为导航定位技术的重要发展方向。

本书是根据 GPS 与 INS 研究领域内国内外的最新进展,结合作者自己的研究成果撰写的。全书从理论与实际应用角度,较全面、系统地介绍了GPS/INS组合系统的原理、理论设计、数据处理、质量控制、应用领域及其发展现状。全书主要由基础准备、组合理论与方法、应用技术三部分组成。

本书可作为导航定位专业教学用书;也可供从事航空、航天、自动控制、测绘、惯性技术及卫星应用等领域的专业技术人员和有关专业院校师生参考。

前 言

GPS 是当前最先进的卫星导航定位系统,具有全球、全天候、高精度、实时定位等优点。但是其动态性能和抗干扰能力较差。INS 具有自主导航能力,不需要任何外界电磁信号就可以独立给出载体的姿态、速度和位置信息,抗外界干扰能力强。但是 INS 定们误差随时间的延续不断增大,即误差积累、漂移大。GPS/INS 组合可以充分发挥各自的优点、克服缺点,实现在高动态和强电子干扰的环境下实时、高精度的导航定位。因此,GPS/INS 组合导航定位系统具有广泛的应用前景,特别是在航空、航天导航和武器制导等方面,具有非常重要的作用。本书就是为适应这些技术领域的需要而撰写的。

GPS/INS 组合导航定位系统涉及坐标系统、自动控制、地球及其重力场等学科。为了便于系统理解、掌握和应用 GPS/INS 导航定位理论和方法,本书第一部分重点介绍了坐标系统、四元数代数理论和地球重力场等基础知识。第二部分系统地论述了惯性导航定位方程及其解算,GPS 伪距测量和载波相位测量,GPS/INS 组合导航定位系统原理、设计和误差估计、质量控制等内容,是本书的重点。第三部分讨论了 GPS/INS 的应用。

本书是在国防科工委司令部训练部的热情关怀和支持下出版的,特别是苏惠琴同志对本书的撰写和出版,给予了热情的指导和帮助。国防科工委指挥技术学院领导和解海中、徐冬梅等同志都给予了很大支持。在此一并表示最衷心的感谢。

由于作者水平和实践经验有限,书中可能会存在错误和不妥之处,敬请读者指正。

编著者

目 录

第一章 GPS 与 INS 导航定位初论

1.1 导航与导航系统的简短回顾.....	(1)
1.1.1 导航.....	(2)
1.1.2 无线电导航与惯性导航系统.....	(2)
1.1.3 卫星导航系统.....	(2)
1.2 GPS 导航与精密定位	(4)
1.2.1 GPS 概况	(4)
1.2.2 GPS 导航定位的基本原理	(6)
1.2.3 GPS 精密定位	(8)
1.3 INS 导航与精密定位	(9)
1.3.1 惯性导航的基本原理.....	(9)
1.3.2 惯导系统的基本结构及发展	(11)
1.3.3 INS 精密定位与惯性大地测量	(16)
1.4 GPS/INS 组合导航定位及其发展	(22)
1.4.1 GPS/INS 组合系统的提出	(22)
1.4.2 GPS/INS 组合的优点	(25)
1.4.3 GPS/INS 组合系统的发展	(28)

第二章 GPS/INS 导航定位理论基础

2.1 数学基础	(33)
2.2 导航定位常用坐标系及其相互关系	(38)
2.2.1 INS 常用坐标系及其相互关系	(38)
2.2.2 GPS 测量中的坐标系统和时间系统	(44)
2.3 四元数代数理论及其在 SINS/GPS 中的应用	(48)
2.3.1 四元数代数	(49)

2.3.2 四元数在 SINS/GPS 问题中的应用	(54)
----------------------------------	------

第三章 地球形状及其外部重力场

3.1 地球的几何形状及其数学描述	(60)
3.1.1 大地水准面和参考椭球面	(60)
3.1.2 参考椭球上的主要面和线及曲率半径	(62)
3.1.3 大地坐标系和空间直角坐标系及其变换	(65)
3.2 地球引力场和重力场及其时间导数	(68)
3.2.1 地球引力场及其时间导数	(68)
3.2.2 地球重力场及地球重力场模型	(70)
3.3 应用于 GPS/INS 技术中的重力向量计算模型	(74)
3.3.1 正常引力位与正常重力位	(75)
3.3.2 当地水平坐标系力学编排中的正常重力公式	(76)
3.3.3 地固直角坐标系力学编排中的正常重力模型	(78)
3.3.4 惯性坐标系中的正常引力模型	(83)
3.3.5 减弱扰动重力场影响的几个方法	(85)

第四章 惯导系统的导航定位方程及其解算

4.1 导航参数状态空间模型	(89)
4.1.1 惯性坐标系里表示的导航方程	(89)
4.1.2 地固坐标系里表示的导航方程	(92)
4.1.3 当地水平坐标系里表示的导航方程	(93)
4.1.4 INS 用于重力梯度测量的状态空间模型	(95)
4.2 坐标变换矩阵的解算	(98)
4.2.1 坐标变换矩阵微分方程的解法	(98)
4.2.2 坐标变换矩阵的四元数积分解法	(100)
4.2.3 坐标变换矩阵的数值积分解法	(101)
4.3 地固坐标系中的力学编排	(105)
4.4 游移方位坐标系中的力学编排	(112)

第五章 GPS 测量技术与方法

5.1 GPS 定位的状态空间模型	(122)
5.1.1 动态建模	(124)
5.1.2 动态 GPS 的状态空间模型	(125)
5.2 伪距导航与精度分析	(131)
5.2.1 伪距导航(定位)解算	(132)
5.2.2 伪随机码测距与导航接收机工作原理	(134)
5.2.3 GPS 卫星的导航电文和卫星位置、钟差计算	(148)
5.2.4 导航定位的精度估计及最佳选星	(154)
5.3 美国政府对 GPS 的控制	(158)
5.4 GPS 载波相位测量和多普勒测量	(160)
5.4.1 载波相位测量	(160)
5.4.2 多普勒测量	(165)
5.5 GPS 定位的主要误差源分析	(168)
5.5.1 卫星星历误差	(168)
5.5.2 卫星钟差的误差	(169)
5.5.3 接收机钟差	(169)
5.5.4 接收机的测量误差	(169)
5.5.5 多路径效应误差	(170)
5.5.6 电离层延迟误差	(170)
5.5.7 对流层传播延迟误差	(173)
5.6 差分 GPS 与相对定位法	(174)
5.6.1 差分 GPS 方法	(175)
5.6.2 提高伪距精度的方法	(179)
5.6.3 GPS 相对定位	(182)
5.7 相位整周模糊度参数解算与周跳修复	(187)
5.7.1 初始整周模糊度 N 的确定	(188)
5.7.2 周跳探测与修复	(189)
5.8 用于组合系统的 GPS 观测量及其误差源分析	(193)

5.8.1	GPS 动态定位发展过程的简单小结	(194)
5.8.2	可应用于组合系统的 GPS 观测量及其误差源分析	(195)
5.9	GPS 定位方法的最新发展	(199)
5.9.1	定位模式的进展	(199)
5.9.2	GPS 动态定位 OTF 算法的新进展	(204)
5.10	导航/定位/通讯卫星系统与 GPS 的新政策	(208)

第六章 GPS/INS 组合系统的理论设计

6.1	系统组合原理	(213)
6.1.1	经典组合方法	(213)
6.1.2	采用卡尔曼滤波器的组合方法	(215)
6.2	GPS 与 INS 硬件一体化组合	(216)
6.3	GPS 与 SINS 软件组合方式	(219)
6.3.1	组合方案	(220)
6.3.2	双差相位观测值闭环校正组合方法	(224)
6.4	分布式滤波与全组合滤波	(229)
6.4.1	问题描述	(229)
6.4.2	全组合滤波法	(230)
6.4.3	分布式滤波法	(231)
6.4.4	应用示例——GPS/INS 组合滤波器	(232)
6.5	INS 用于周跳检测与模糊度参数修复	(235)
6.6	应用 GPS 速度信息提高惯性平台姿态精度	(237)
6.6.1	关于惯性平台	(237)
6.6.2	用 GPS 速度辅助提高惯性平台水平姿态精度	(238)
6.6.3	用卡尔曼滤波估计平台水平失准误差	(240)

第七章 组合系统的误差估计与质量控制

7.1	组合系统误差状态方程	(242)
7.1.1	误差状态模型	(243)
7.1.2	惯性坐标系(i)中的误差状态方程	(245)

7.1.3	地固坐标系(e)中的误差状态方程	(248)
7.1.4	当地水平坐标系(L)中的误差状态方程	(252)
7.1.5	组合系统中有关 GPS 的误差状态变量	(256)
7.2	组合系统误差估计与最优滤波的实现	(257)
7.2.1	SINS/GPS 组合系统 Kalman 滤波算法的实现	(258)
7.2.2	一个数值稳定性高、快速高效的 Kalman 滤波算法	(265)
7.3	组合系统 Kalman 滤波器的可测性分析方法	(271)
7.4	组合系统的统计质量控制理论	(275)
7.4.1	统计质量控制方法概述	(276)
7.4.2	SINS/GPS 滤波器的质量控制方法	(276)
7.4.3	SINS/GPS 滤波器的可靠性分析	(281)

第八章 GPS/INS 应用技术

8.1	测定三维运动轨迹及刚体运动参数	(284)
8.1.1	质点运动和刚体运动方程	(284)
8.1.2	刚体运动参数的测定	(286)
8.1.3	应用领域探讨	(287)
8.2	姿态信息测定	(290)
8.3	运动轨迹局部曲率参数测定	(292)
8.3.1	利用 SINS 数据提取局部曲率参数的原理及数学模型	(292)
8.3.2	应用领域探讨	(298)
8.4	扰动重力与垂线偏差测量	(299)
8.4.1	概述	(299)
8.4.2	状态空间法估计重力扰动矢量	(301)
8.4.3	SINS、GPS 数据直接求差法估计重力扰动矢量	(307)
8.4.4	用 GPS 双差相位观测量直接计算载体运动加速度	(311)
8.4.5	SINS/GPS 动态重力测量的分辨率和误差分析	(316)
8.5	相对大地水准面求定与 GPS/INS 水准方法	(325)
8.6	GPS/INS 应用介绍	(328)
8.6.1	公路监测系统	(328)

8.6.2	地下油气管道监测·····	(331)
8.6.3	航天航空遥感·····	(332)
8.6.4	机载重力测量·····	(333)
8.6.5	矿井测量·····	(335)
8.6.6	激光断面测量·····	(335)
8.6.7	飞机进场着陆中的应用·····	(337)

附录

参考文献

第一章 GPS 与 INS 导航定位初论

1.1 导航与导航系统的简短回顾

1.1.1 导航

导航(Navigation)就是指引一个运动物体(人或载体)从某个位置出发,安全且低费用地到达某目标点。自古以来,人们一直在利用天上的星星进行导航,特别是利用北极星来确定方向。考古发现,我们的祖先早在 17 000 年以前的古石器时代就发明了导航方法,当时为了进行打猎等活动,人们利用了简单的恒星导航方法,这就是早期的天文导航方法[P. Hartl, 1988]。

随着科学技术的发展,导航渐渐发展成为一门专门研究导航原理方法和导航技术装置的学科。在舰船、飞机、导弹、宇宙飞行器等航行体上,导航系统是必不可少的重要设备。按照近代科技术语,导航的主要工作就是定位、定向、授时和测速。导航需要连续提供此类信息,运动愈快,更新愈快,但精度要求不高。相比而言,精密定位则是导航的一个极端情况:虽然也定位甚至定向,但并不要求实时性,对精度要求很高(cm 级或 mm 级)。由于能够测得上述导航参数、完成导航任务的物理原理和技术方法很多,因此,随后便出现了各种类型的导航系统,例如无线电导航系统、卫星导航系统、惯性导航系统等。

1.1.2 无线电导航与惯性导航系统

无线电导航(Radio Navigation System),是利用无线电技术测量导航参数,包括用多普勒效应测速、用雷达测距和测方位、用导航台定位等。惯性导航系统(INS, Inertial Navigation System)是本世纪初发展起来的。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行体在运动过程中的加速度。然后通过计算机进行积分运算,从而得到运动体的位置与速度等导航参数。1923年,德国科学家舒拉(Schlar)发表了一篇经典论文,提出了具有84.4min的舒拉摆原理,他在此文中的一些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在V-2火箭上第一次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。这一创举引起世界上的极大重视,并把惯导系统的研究推进到一个迅速发展的阶段。

1.1.3 卫星导航系统

卫星导航是继惯性导航以后导航技术的又一重大进展。可以说,卫星导航是天文导航与无线电导航的结合物,不过是把无线电导航台放在人造地球卫星上罢了。当然,这种导航方法只有在航天技术充分发展的今天才有实现的可能。20世纪60年代初,旨在服务于美海军舰只的TRANSIT子午仪卫星导航系统出现。70年代提供给民用,利用装在航行体上的接收机,接收导航卫星发播的无线电信号,并测量因卫星相对用户接收机不断运动而产生的多普勒频移,由此确定航行体在地球上的位置等导航参数。作为第一代卫星导航系统,子午仪系统实现了全球范围内的核潜艇、导弹测量船、各种军用、民用舰船的全天候导航,并在大地测量精密定位、高精度授时、监测地球自转等方面得到了广泛应用,显示了卫星导航

定位的优越性。

全球定位系统(GPS, Global Positioning System)是美国国防部研制的第二代卫星导航系统。早在 1964 年,子午仪系统投入使用后不久,尽管该系统在作用范围和导航精度上都较已有的导航系统(如罗兰 C、欧米茄等)优越,但是子午仪系统的单星、低轨、测速体制限制了它在陆地、空中(不知高程)和高动态用户的应用。即使是对海上用户而言,由于它在时间上的不连续(间隔约 1.5h 的断续定位),也需要和惯性导航系统结合,而不能作为一种独立的导航手段。正是由于这些原因,美国空、海军还是在它投入使用后不久就开始研究取代它的新一代卫星导航系统,分别提出了“621B”计划和“TIMATION”计划。这两个方案差别很大,各有优缺点。海军的“TIMATION”方案基本上是一个二维系统,而且在高动态环境中缺乏连续更新位置的能力。空军的“621B”方案,虽然能在高动态环境下工作,但为了能提供全球覆盖,至少需要四个分离的卫星星座,每个星座需要一个独立的地面控制站为它服务。1973 年,美国国防部在这两个方案的基础上,决定发展各军兵种共同使用的国防卫星导航系统——全球定位系统 GPS。这项计划由空军牵头负责研制,并专门设立了一个联合办公室,具体负责 GPS 的研制、试验、采购和部署,参加单位有空军、海军、陆军、海军陆战队、海岸卫队、运输部、国防部制图局和国防预研计划局。1978 年,一些北大西洋公约组织的国家与美国签订了一项谅解备忘录,同美国一起参加 GPS 的研制与部署。这些国家包括比利时、加拿大、丹麦、法国、原联邦德国、意大利、荷兰、挪威和英国。此外,澳大利亚也通过双边协议参加了 GPS 计划。

GPS 与惯性导航都是目前世界上最先进的导航方法,二者各有优缺点,谁也代替不了谁。两种系统组合起来使用,可以取长补短,充分发挥各自的长处。可以预言:20 世纪 90 年代乃至 21 世纪初的先进导航系统将是 GPS 与惯性导航的组合导航系统 GPS/INS。

1.2 GPS 导航与精密定位

全球定位系统(GPS)是在子午仪卫星导航系统的基础上发展起来的,它采纳了子午仪系统的成功经验,具有全球性、全天候、高精度、三维定位等优点。利用其高精度(mm 级)载波相位观测量进行相对定位的精度可达 0.5ppm,短基线上精度达到 cm 级。而且,其用途广泛:导航、精密定位、测速、授时等。

1.2.1 GPS 概况

全球定位系统由空间部分、地面监控部分和用户接收机三大部分组成。

1. 空间部分

空间部分由 21+3 颗(备用 3 颗)卫星组成,分布在六个轨道面上。卫星主体呈柱形,直径为 1.5m,两侧装有太阳能电池板,其总面积为 5m^2 ,当卫星进入地球阴影区时,则由镍镉蓄电池供电。每颗卫星可覆盖全球 38% 的面积,轨道面与赤道面交角为 $50^\circ \sim 65^\circ$,每个轨道面上有 4 颗卫星,按等间隔分布,轨道面间相差 60° 。相邻轨道邻近卫星相位相差 30° 。图 1.2.1 是将六个轨道面展成平面时的卫星分布情况。卫星轨道为近圆形,卫星离地面高约 20200km,卫星的速度为 3800m/s,运行周期是 0.5 恒星日,约 11h58min。卫星的分布,可保证在地球上任何地点、任何时刻、在高度角为 15° 以上的天空同时能观测到 4 颗以上卫星。平均可同时看到 6 颗卫星,有时可达 9 颗。

卫星上装有原子钟(铷钟或铯钟),发播 2 个频率的载波无线电信号: $L_1=1575.42\text{MHz}$ 载波(波长为 19.03cm),其上调制有 1.023MHz(波长约 293m)的伪随机噪声码(称 C/A 码,Coarse Acquisition 或称粗码),10.23MHz(波长约 29.3m)的伪随机噪声

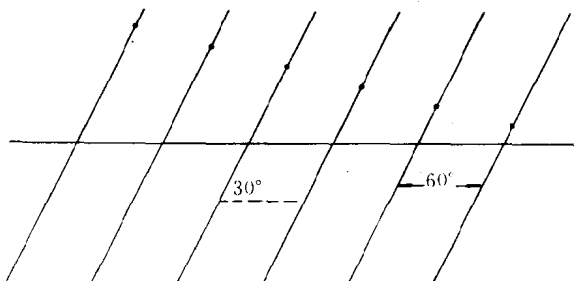


图 1.2.1 卫星星座

码(称 P 码, Precise code 或称精码)及每秒 50bit 的导航电文(称 D 码); $L_2 = 1227.6\text{MHz}$ 载波(波长为 24.42cm), 其上只调制精码和导航电文。P 码和 C/A 码是供伪距测量的测距码, 而 D 码用于发播导航电文, 提供卫星位置、卫星钟差等信息。设置 L_1 、 L_2 双载波, 利用双频观测可以有效减弱电离层传播延迟的影响。另外还可以注意到: L_1 、 L_2 载波频率分别等于 P 码频率(10.23MHz)的 154 及 120 倍。这样选频的优点是: 卫星信号接近于直线传播, 大气衰减最小, 便于全天候应用。

GPS 系统的第一颗卫星于 1978 年 2 月 2 日发射, 至 1993 年 6 月 26 日止有 24 颗卫星在天空运转, 其中工作卫星 21 颗, 研制样星 3 颗。1994 年 3 月 28 日建成了由 9 颗 Block I 卫星和 15 颗 Block II A 卫星组成的 GPS 卫星工作星座, 1985 年 11 月以前发射的 11 颗 Block I 型试验样星已完成了历史使命。

2. 地面监控部分

监控部分包括一个主控站、3 个注入站和 5 个监控站。监控站设在夏威夷、阿森松、迪戈加西亚岛、夸贾林岛和科罗拉多的斯普林斯。主要任务是监测卫星取得观测资料, 算出每颗卫星的 15 分钟平滑数据, 传送给主控站。为提高监测精度, 在英国、南美洲、澳

大利亚和阿拉斯加等地增设了观测站。主控站在科罗拉多的统一空间探测中心,根据各监控站观测资料,计算每颗卫星的轨道和卫星钟改正数,并外推一天以上的卫星星历和钟差,并转化为导航电文发送给注入站。3个注入站设在迪戈加西亚、夸贾林岛和阿森松岛,其任务是在每颗卫星运动到上空时,把卫星星历、控制参数的指令注入到卫星存储器。卫星上不断储备导航信息,即使地面站不注入,也能持续180天预报,但精度有所降低。

3. 用户接收机

由天线、控制显示器、电缆、电源等部分组成。天线接收卫星信号,在控制显示器获得的是天线相位中心的三维坐标。有的接收机将天线与部分控制处理装置合在一起,称为传感器。用户接收机主要功能是接收卫星发射的信号和导航电文,并进行码测量或者相位测量,然后根据导航电文提供的卫星位置和钟差改正信息计算接收机的位置。

自第一台接收机问世以来,据不完全统计,目前已有11个国家50个厂家,生产200多种GPS接收机。有单频和双频、导航型和定位型、低动态和高动态、伪距测量和相位测量等类别之分。近十几年内迅速发展起来的相位测量型接收机,本来并不是全球定位系统总体设计序列,它的观测量是载波频率与本机振荡器的相位差。从本质上讲,它不需已知伪随机噪声码序列。由于其观测量的高精度(mm级),可以取得很高的定位精度又不需已知保密的P码,因而广泛引起了精密定位用户的十分重视。定位型(测地型)的接收机就有48种。

1.2.2 GPS 导航定位的基本原理

全球定位系统采用多星、高轨、测距体制,以距离作为基本观测量。通过对四颗卫星同时进行距离测量,即可解算出接收机的位置。