



国防电子信息技术丛书

Principles of GPS and Receiver Design

GPS

原理与接收机设计

谢 钢 著



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国防电子信息技术丛书

GPS 原理与接收机设计

Principles of GPS and Receiver Design

谢 钢 著



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统、透彻地阐述了 GPS 及其接收机设计的各项相关内容,包括 GPS 信号结构、时空坐标系、测量值、定位原理、卡尔曼滤波、接收机的射频前端、信号捕获和信号跟踪。此外,本书还介绍了差分精密定位、GPS 与惯性导航的组合和地图匹配三方面 GPS 应用技术,并对多路径、电磁干扰、互相关干扰、高灵敏度 GPS、辅助 GPS 等关键课题做了论述。本书理论分析清晰,实用性强,并且内容力求反映近些年来出现的 GPS 最新技术和成果。

本书可以作为本科生高年级和研究生的教材或教材参考书,也是所有与 GPS 等卫星导航系统及其接收机设计有关的工程技术人员和科技工作者都应当配备的一本不可多得优秀参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

GPS 原理与接收机设计/谢钢著. —北京:电子工业出版社,2017.1

(国防电子信息技术丛书)

ISBN 978-7-121-30539-9

I. ①G… II. ①谢… III. ①全球定位系统—GPS 接收机—设计 IV. ①P228.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 290036 号

策划编辑:谭海平

责任编辑:谭海平

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:27.25 字数:785 千字

版 次:2017 年 1 月第 1 版

印 次:2017 年 1 月第 1 次印刷

定 价:79.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zits@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254552, tan02@phei.com.cn。

前 言

科技的进步已经深刻地改变了我们的日常生活方式，而美国的全球定位系统（GPS）就是其中的一项。自 20 世纪 70 年代开始研制以来，GPS 已经在世界各国的各行各业中得到了广泛的应用，它正带领着人类进入定位、导航的新纪元。

在全球卫星定位技术方兴未艾之际，关于 GPS 及其接收机设计的文献也大量涌现。这些年来，国内外出版了几本相当优秀的关于 GPS 的书籍，受到了广大 GPS 专业爱好者的喜爱。与这些书籍不同，本书一方面加大了 GPS 接收机设计这部分内容的篇幅，使对其的讨论更加系统、深入；另一方面，本书还介绍了最近出现的一些 GPS 接收机新技术、新成果，使该书知识能及时、真实地反映当前状况。

全书共 13 章，大致分成 GPS 基础知识、定位算法、GPS 应用以及信号的捕获与跟踪四部分，而全书也是按照这一顺序展开叙述的。大多数读者对 GPS 的认识是从了解 GPS 的定位原理及其算法开始的，然后其中一些读者有机会去进一步探索接收机的内部构造和信号的捕获与跟踪原理。因此，这种先介绍定位算法再介绍信号跟踪的叙述顺序比较适合大多数读者的 GPS 学习过程，并且也可以认为是一种由简到难的顺序，尽管 GPS 接收机事实上是先跟踪卫星信号再完成定位计算这一倒过来的顺序。

第 1 章和第 2 章将介绍 GPS 的一些基础知识。通过对这两章内容的学习，读者会接触到大量的 GPS 术语，能从宏观上了解 GPS 整个系统的运行机理，并认识 GPS 定位原理，掌握 GPS 信号结构。GPS 定位原理是如此简单，以至于它可在一小段文字内解释清楚，然而为了实现定位和提高定位性能，我们还需要阅读接下来的 11 章内容。

第 3 章至第 6 章将介绍 GPS 定位算法。首先，在 GPS 定位原理中，GPS 卫星的位置视为已知的，于是第 3 章将解决如何计算卫星在某一时刻的位置坐标这一问题；然后，由于实现 GPS 定位还需要测量 GPS 接收机至各颗可见卫星的距离，因而第 4 章将讨论 GPS 测量值及其误差源；接着，有了卫星的位置和接收机至卫星的距离，我们就可以实现定位，于是第 5 章将分析定位算法及其定位精度，它是这一部分内容的核心；最后，第 6 章将介绍卡尔曼滤波定位算法，它有着非常高的实际应用价值，并且本书在随后的多个章节都会提到这种滤波技术。

第 7 章至第 9 章将介绍用来提高 GPS 定位性能的三方面技术与应用。其中，第 7 章将介绍差分 GPS 和高精度 GPS，第 8 章将介绍 GPS 与惯性导航系统的组合，第 9 章将介绍 GPS 定位结果的地图匹配。尽管这三章内容非常具有现实意义，但是对于只关心接收机内部设计的读者而言，略过这三章而直接跳到第 10 章并不会产生前后内容不连贯的感觉。

最后，第 10 章至第 13 章将剖析接收机的内部组成及其运行，这四章中每一章的篇幅都很大。对于希望理解接收机内部究竟是如何运作的读者而言，这一部分是一定要花精力去阅读的。其中，第 10 章将介绍接收机组成概况和其中的射频前端模块，第 11 章将详细分析载波跟踪环路，第 12 章将探讨码跟踪环路和描述接收机在信号跟踪过程中所需完成的位同步、帧同步等一系列信号处理任务，第 13 章将讨论接收机对信号的搜索与捕获。在此基础上，这一部分还对多路径、连续波干扰、互相关干扰、高灵敏度 GPS 和辅助 GPS（AGPS）等多个关键课题进行论述。

通过对大量公开发表的 GPS 书籍、期刊论文、会议论文、学位论文和专利等文献资料的研读，作者才把这些知识汇集起来而写成这一专著。因此，本书每一章的最后均列出了一堆参考文献，用以表明原文或相关知识的参考来源，以示作者的敬意和感谢。此外，作者还参考了无数公开的国际互联网网页，然而考虑到网址的变动性较强，它们很少被一一列出。对某一课题做进一步深入研究的读者而言，希望这些参考文献能给读者一个高而良好的起点。

本书语言平实、简练，内容丰富又重点突出。它不但非常适合作为本科生高年级和研究生的教材或教材参考书，而且是所有与 GPS/GNSS 及其接收机有关的工程技术人员和科技工作者都应当配备的参考用书。对于书中提及但未能予以充分展开讨论的许多方法、技术，它们可作为硕士生、博士生的研究课题之用。正当我在写这一序言之时，喜闻中国成功地发射了第二颗北斗导航卫星，希望这本书的出版能给我国的卫星导航事业添砖加瓦。

感谢父亲谢逸仙、母亲傅珠珍对我的养育和教导，他们对我勤奋进取的要求和言传身教是我能利用空余时间写完这本书的动力源泉。在一字一句写书期间，我也得到了妻子和孩子对我的理解和支持。感谢电子工业出版社的谭海平先生对该书出版所提供的很大帮助和方便，他对书中的内容安排也提出了一些宝贵意见。绍兴文理学院的沈龙先生对全书文字进行了通读与校正，在此深表感谢。我在写书期间还得到了许多同事、亲朋的支持，在此均对他们表示诚挚的谢意！

由于作者水平有限，书中必定会出现一些不妥和错误，敬请读者不吝指正。读者可通过电子邮箱 gang.xie.1999@stanfordalumni.org 与我直接联系。

作者

2009年5月

修订出版感谢

自 2009 年该书出版以来，我已经陆续收到许多读者的来信，他们对本书的内容和质量做了高度的赞赏，并认为从中受益匪浅。承蒙各位读者的厚爱，该书在所有有关 GPS 的畅销书籍中正脱颖而出。看到我四年心血之结晶为大家所爱，我深感欣慰，更深受鼓励。

正如一名读者来信说，虽然书中错误非常少，但为了使它更加完美，因而在阅读过程中发现的即使一两个小错误都要来信告诉我。我真的很感动！感谢北京航空航天大学学生王晨和博士后刘青格、黑龙江省八五二农场农机中级工程师马成燕、浙江大学控制系研究生李子月、西安电子科技大学微电子学院硕士生李廷、中国空间技术研究院西安分院工程师边朗、中兴通讯工程师邵贵阳、南京解放军理工大学网络工程教研中心讲师刘鹏、西安交通大学微波与光通信研究所博士生李建星、江南大学学生刘冉旭、南京六九零二科技有限公司工程师陈雨、武汉大学测绘学院导航工程专业本科生彭益堂和易通星云（北京）科技发展有限公司卫星导航工程师任江南等诸多读者，你们所指出的错误在这次修订出版中已经得到更正，谢谢你们！

作者

2016年11月于美国加州橙县

目 录

| | |
|----------------------|----|
| 第 1 章 导引 | 1 |
| 1.1 GPS 的起源 | 1 |
| 1.2 GPS 的组成概况 | 2 |
| 1.2.1 空间星座部分 | 3 |
| 1.2.2 地面监控部分 | 5 |
| 1.2.3 用户设备部分 | 6 |
| 1.3 GPS 提供的服务和限制 | 8 |
| 1.4 各国卫星导航系统的概况 | 9 |
| 1.5 GPS 的性能指标 | 11 |
| 1.6 GPS 的应用 | 13 |
| 参考文献 | 13 |
| 第 2 章 GPS 信号及其导航电文 | 16 |
| 2.1 载波 | 16 |
| 2.2 伪码 | 17 |
| 2.2.1 二进制数随机序列 | 17 |
| 2.2.2 m 序列 | 18 |
| 2.2.3 金码 | 22 |
| 2.2.4 C/A 码 | 24 |
| 2.2.5 P 码 | 27 |
| 2.3 数据码 | 28 |
| 2.4 GPS 信号结构 | 28 |
| 2.5 导航电文 | 32 |
| 2.5.1 导航电文的格式 | 33 |
| 2.5.2 遥测字 | 33 |
| 2.5.3 交接字 | 34 |
| 2.5.4 第一数据块 | 35 |
| 2.5.5 第二数据块 | 36 |
| 2.5.6 第三数据块 | 37 |
| 2.6 GPS 现代化计划 | 38 |
| 参考文献 | 40 |
| 第 3 章 GPS 卫星轨道的理论和计算 | 42 |
| 3.1 空间坐标系 | 42 |
| 3.1.1 惯性坐标系 | 42 |
| 3.1.2 地球坐标系 | 43 |

| | | |
|--------------|----------------------|-----------|
| 3.1.3 | WGS-84 坐标系 | 46 |
| 3.1.4 | 直角坐标系间的旋转变换 | 47 |
| 3.1.5 | 站心坐标系 | 48 |
| 3.2 | 时间系统 | 50 |
| 3.2.1 | 世界时和原子时 | 50 |
| 3.2.2 | GPS 时间 | 51 |
| 3.2.3 | 晶体振荡器 | 52 |
| 3.2.4 | GPS 与相对论 | 54 |
| 3.3 | GPS 卫星轨道的理论 | 55 |
| 3.3.1 | 卫星的无摄运行轨道 | 55 |
| 3.3.2 | 开普勒轨道参数 | 57 |
| 3.3.3 | 卫星星历和历书参数 | 59 |
| 3.4 | 卫星空间位置的计算 | 61 |
| 3.5 | 卫星运行速度的计算 | 63 |
| 3.6 | 卫星轨道的插值计算 | 65 |
| | 参考文献 | 67 |
| 第 4 章 | GPS 测量及其误差 | 69 |
| 4.1 | 伪距测量值 | 69 |
| 4.1.1 | 伪距的概念 | 69 |
| 4.1.2 | 伪距与测距码相位 | 71 |
| 4.2 | 载波相位测量值 | 72 |
| 4.2.1 | 载波相位的概念 | 72 |
| 4.2.2 | 多普勒频移与积分多普勒 | 74 |
| 4.2.3 | 伪距与载波相位的对比 | 77 |
| 4.3 | 测量误差 | 78 |
| 4.3.1 | 卫星时钟误差 | 78 |
| 4.3.2 | 卫星星历误差 | 79 |
| 4.3.3 | 电离层延时 | 80 |
| 4.3.4 | 对流层延时 | 85 |
| 4.3.5 | 多路径 | 87 |
| 4.3.6 | 接收机噪声 | 89 |
| 4.4 | 差分 GPS 的原理 | 90 |
| 4.5 | 伪距与载波相位的组合 | 92 |
| 4.5.1 | 载波相位平滑伪距 | 92 |
| 4.5.2 | 整周模糊度估算 | 94 |
| | 参考文献 | 94 |
| 第 5 章 | GPS 定位原理与精度分析 | 96 |
| 5.1 | 牛顿迭代及其线性化方法 | 96 |
| 5.2 | 最小二乘法 | 98 |

| | | |
|--------------|-----------------------|------------|
| 5.3 | 伪距定位 | 100 |
| 5.3.1 | 伪距定位原理 | 101 |
| 5.3.2 | 伪距定位算法 | 103 |
| 5.3.3 | 二维定位及其辅助方程 | 106 |
| 5.4 | 定位精度分析 | 108 |
| 5.4.1 | 定位误差的方差分析 | 108 |
| 5.4.2 | 精度因子 | 110 |
| 5.4.3 | 卫星几何分布 | 113 |
| 5.4.4 | 伪卫星 | 116 |
| 5.5 | 接收机自主正直性监测 | 116 |
| 5.5.1 | 正直性监测的概念 | 117 |
| 5.5.2 | 伪距残余检测法 | 118 |
| 5.5.3 | 最小平方残余法 | 119 |
| 5.5.4 | 最大解分离法 | 120 |
| 5.6 | 多普勒定速 | 120 |
| 5.7 | 定时、授时与校频 | 122 |
| | 参考文献 | 123 |
| 第 6 章 | 卡尔曼滤波及其应用 | 127 |
| 6.1 | 滤波的意义 | 127 |
| 6.2 | α - β 滤波 | 128 |
| 6.3 | 卡尔曼滤波 | 129 |
| 6.3.1 | 滤波模型 | 130 |
| 6.3.2 | 滤波算法 | 131 |
| 6.3.3 | 举例与讨论 | 134 |
| 6.3.4 | 滤波数值计算 | 138 |
| 6.3.5 | 非线性滤波 | 141 |
| 6.4 | 系统模型的建立 | 143 |
| 6.4.1 | 连续时间系统的建模 | 143 |
| 6.4.2 | 离散时间系统的建模 | 146 |
| 6.5 | GPS 定位的卡尔曼滤波算法 | 147 |
| 6.5.1 | 接收机时钟模型 | 148 |
| 6.5.2 | 用户运动模型 | 149 |
| 6.5.3 | 卡尔曼滤波定位算法 | 151 |
| 6.6 | 其他滤波技术 | 152 |
| | 参考文献 | 153 |
| 第 7 章 | 差分定位和精密定位 | 156 |
| 7.1 | 差分定位 | 156 |
| 7.1.1 | 差分的种类 | 156 |
| 7.1.2 | 差分校正量 | 158 |

| | | |
|--------------|-----------------------|------------|
| 7.1.3 | 局域差分系统 | 161 |
| 7.1.4 | 广域差分系统 | 163 |
| 7.2 | 精密定位系统 | 166 |
| 7.2.1 | 单差 | 166 |
| 7.2.2 | 双差 | 169 |
| 7.2.3 | 三差 | 171 |
| 7.2.4 | 相对定位的根本问题 | 172 |
| 7.3 | 多频测量值的组合 | 174 |
| 7.3.1 | 线性组合 | 174 |
| 7.3.2 | 窄巷、宽巷和超宽巷组合 | 177 |
| 7.4 | 整周模糊度的求解技术 | 179 |
| 7.4.1 | 交换天线位置 | 180 |
| 7.4.2 | 几何多样性 | 181 |
| 7.4.3 | 利用伪距的取整估算法 | 181 |
| 7.4.4 | LAMBDA 算法 | 183 |
| 7.4.5 | 逐级模糊度确定法 | 186 |
| | 参考文献 | 188 |
| 第 8 章 | GPS 与航位推测系统的组合 | 192 |
| 8.1 | 惯性导航系统 | 192 |
| 8.1.1 | 惯性传感器的种类 | 192 |
| 8.1.2 | 惯性导航的分类 | 194 |
| 8.1.3 | 惯性导航的基本原理 | 194 |
| 8.1.4 | 惯性传感测量误差 | 195 |
| 8.2 | 航位推测系统 | 196 |
| 8.2.1 | 航位推测的基本原理 | 196 |
| 8.2.2 | ABS 车轮转速传感器 | 197 |
| 8.3 | 组合的意义 | 201 |
| 8.4 | 组合的工具 | 202 |
| 8.4.1 | 互补型滤波器 | 202 |
| 8.4.2 | 分散卡尔曼滤波 | 203 |
| 8.5 | 组合的方式 | 204 |
| 8.5.1 | 松性组合 | 204 |
| 8.5.2 | 紧性组合 | 205 |
| 8.5.3 | 深性组合 | 206 |
| | 参考文献 | 207 |
| 第 9 章 | 地图匹配 | 210 |
| 9.1 | 地图匹配的意义 | 210 |
| 9.2 | 电子地图 | 211 |
| 9.2.1 | UTM 投影系统 | 211 |

| | | |
|---------------|----------------------|------------|
| 9.2.2 | 数字高程模型 | 212 |
| 9.2.3 | 道路网数据库 | 213 |
| 9.3 | 地图匹配算法综述 | 214 |
| 9.4 | 几何匹配算法 | 217 |
| 9.4.1 | 点-点匹配法 | 218 |
| 9.4.2 | 点-线匹配法 | 218 |
| 9.4.3 | 线-线匹配法 | 219 |
| 9.4.4 | 改良型几何匹配算法 | 220 |
| 9.5 | 概率匹配算法 | 223 |
| 9.6 | 紧性组合匹配算法 | 225 |
| 9.7 | 综合匹配算法 | 226 |
| 9.7.1 | 加权法 | 227 |
| 9.7.2 | D-S 理论 | 227 |
| 9.7.3 | 模糊推理 | 230 |
| 9.8 | 匹配路段上的位置点匹配 | 231 |
| | 参考文献 | 233 |
| 第 10 章 | GPS 接收机及其射频前端 | 236 |
| 10.1 | GPS 接收机的概况 | 237 |
| 10.2 | 接收天线 | 241 |
| 10.2.1 | 自由空间传播公式 | 241 |
| 10.2.2 | 信噪比和载噪比 | 244 |
| 10.2.3 | 串联器件的噪声指数 | 246 |
| 10.2.4 | 右旋圆极化 | 248 |
| 10.2.5 | 天线的种类 | 250 |
| 10.3 | 射频前端处理 | 252 |
| 10.3.1 | 射频信号调整 | 252 |
| 10.3.2 | 下变频混频 | 254 |
| 10.3.3 | 中频信号滤波放大 | 259 |
| 10.3.4 | 模数转换 | 260 |
| | 参考文献 | 263 |
| 第 11 章 | 载波环 | 266 |
| 11.1 | 信号跟踪原理 | 266 |
| 11.2 | 相位锁定环路 | 268 |
| 11.2.1 | 基本工作原理 | 269 |
| 11.2.2 | 环路阶数 | 271 |
| 11.2.3 | 稳态响应 | 275 |
| 11.2.4 | 环路参数 | 278 |
| 11.2.5 | I/Q 解调 | 281 |
| 11.2.6 | 相干积分 | 286 |

| | | |
|---------------|--------------------|------------|
| 11.2.7 | 鉴相方法的种类 | 291 |
| 11.2.8 | 测量误差与跟踪门限 | 292 |
| 11.3 | 频率锁定环路 | 295 |
| 11.3.1 | 基本工作原理 | 295 |
| 11.3.2 | 鉴频方法的种类 | 298 |
| 11.3.3 | 测量误差与跟踪门限 | 300 |
| 11.4 | 锁相环与锁频环的对比与组合 | 301 |
| | 参考文献 | 302 |
| 第 12 章 | 码环和基带数字信号处理 | 304 |
| 12.1 | 码环 | 304 |
| 12.1.1 | 延迟锁定环路 | 304 |
| 12.1.2 | 相关器与自相关函数 | 307 |
| 12.1.3 | 非相干积分 | 310 |
| 12.1.4 | 鉴相方法的种类 | 314 |
| 12.1.5 | 测量误差与跟踪门限 | 317 |
| 12.2 | 信号的跟踪 | 320 |
| 12.2.1 | 载波环与码环的组合 | 320 |
| 12.2.2 | 锁定检测 | 323 |
| 12.3 | 基带数字信号处理 | 324 |
| 12.3.1 | 位同步 | 324 |
| 12.3.2 | 帧同步 | 328 |
| 12.3.3 | 奇偶检验和电文译码 | 330 |
| 12.3.4 | 测量值的生成 | 332 |
| 12.4 | 多路径效应及其抑制 | 333 |
| 12.4.1 | 多路径效应 | 334 |
| 12.4.2 | 多路径抑制 | 337 |
| 12.5 | 干扰 | 341 |
| | 参考文献 | 344 |
| 第 13 章 | 信号的捕获 | 349 |
| 13.1 | 信号捕获的概况 | 349 |
| 13.1.1 | 三维搜索 | 349 |
| 13.1.2 | 启动方式 | 352 |
| 13.1.3 | 搜索范围估算 | 354 |
| 13.1.4 | 信号检测 | 358 |
| 13.1.5 | 载噪比的测定 | 362 |
| 13.1.6 | 捕获与跟踪之间的转换 | 364 |
| 13.2 | 信号搜索捕获算法 | 366 |
| 13.2.1 | 线性搜索 | 366 |
| 13.2.2 | 并行频率搜索 | 370 |

| | | |
|--------|---------------|-----|
| 13.2.3 | 并行码相位搜索 | 372 |
| 13.2.4 | 其他信号捕获算法 | 374 |
| 13.2.5 | 卫星搜索次序 | 375 |
| 13.3 | 高灵敏度 GPS | 376 |
| 13.3.1 | 加长积分时间 | 377 |
| 13.3.2 | 大块相关器设计 | 380 |
| 13.3.3 | 辅助 GPS (AGPS) | 381 |
| 13.4 | 互相关干扰及其抑制 | 384 |
| 13.4.1 | 互相关干扰 | 384 |
| 13.4.2 | 互相关干扰抑制 | 385 |
| 13.5 | 接收机设计的发展趋势 | 387 |
| | 参考文献 | 389 |
| 附录 A | 缩写词中英对照 | 394 |
| 附录 B | 单位制及其换算 | 400 |
| 附录 C | 随机变量和随机过程 | 401 |
| 附录 D | 拉普拉斯变换 | 407 |
| 附录 E | Z 变换 | 410 |
| 附录 F | 傅里叶变换和采样定理 | 413 |
| 附录 G | 离散傅里叶变换 | 417 |
| 附录 H | GPS 数据格式 | 420 |

第 1 章 导 引

在本章和下一章中，我们将介绍全球定位系统（GPS）的基础知识。第 1 章将宏观地讲述 GPS 的发展历史、构造、性能和应用等多方面的内容，以激发读者对 GPS 的兴趣；第 2 章将具体分析 GPS 的信号结构。

首先，1.1 节将简要回顾 GPS 的发展史。接着，1.2 节将介绍 GPS 三个组成部分的功能和概况。1.3 节将解释 GPS 提供的两种定位服务以及美国政府对 GPS 的限制性政策。1.4 节将简单提及 GPS 以外的其他卫星导航系统。然后，1.5 节将介绍用来衡量 GPS 定位系统和 GPS 接收机性能的各项指标。最后在 1.6 节，我们将简单指出 GPS 在各方面的重要应用。

1.1 GPS 的起源

导航在人类历史的发展进程中一直起着相当重要的作用。1957 年 10 月 4 日，前苏联成功发射了世界上第一颗名为 Sputnik 的人造地球卫星，由此揭开了人类利用卫星来开发导航、定位系统的序幕。

尽管 Sputnik 的构造相当简单，几乎只是一个无线电信号播发器，但它在当时却引起了世界各国科学家的高度关注^[24,29]。美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的 W. Guier 博士和 G. Wieffenbach 博士通过跟踪、检测该卫星所发射的信号，描绘出所接收到的卫星信号的多普勒频移曲线图。在日常生活中，我们对多普勒效应并不陌生。例如，站在火车轨道附近，当火车迎面开来时，我们听起来会觉得火车鸣笛声的音调变高，而当火车驶过我们而离去时，同样的鸣笛声听起来却音调变低。这种测量到的声波频率随声源和接收机之间的相对移动而发生变化的现象，就是声波的多普勒效应，而无线电波也存在这种效应。这两位科学家认为，如果在一个位置坐标已知的地面固定点上测量卫星信号的多普勒频移，那么根据多普勒频移测量值，我们就能推算出卫星的运行轨道^[8]。不久，他们用实验数据证实了他们的想法。

对于这种通过测量卫星信号的多普勒频移来推算卫星运行轨道的做法，当时同在约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的 F. McClure 博士提出了相应的逆命题。他认为，如果卫星的运行轨道是已知的，那么根据卫星信号的多普勒频移测量值，我们反过来能推算出在地面上这一测量点的位置。随着这一开创性想法的深入与成熟，1958 年美国海军决定研究、开发基于多普勒频移的海军导航卫星系统（NNSS），并于 1960 年 4 月发射了该系统的第一颗导航卫星。因为所有海军导航卫星系统中 6 颗卫星的运行轨道全部都通过地极，所以它又称为子午（Transit）卫星系统。子午卫星系统是世界上第一个成功运行的卫星导航系统，它能提供精度较低的二维定位，并且每次定位的时间长达 30~110 分钟。随着 GPS 的建成，子午卫星系统于 1996 年宣告结束，然而该系统中的许多构思对 GPS 的开发相当重要，有些甚至被直接应用于 GPS。

为了满足军方和民用领域对连续、实时、精确导航的需求，美国国防部（DoD）于 1973 年 4 月提出了研究、创建新一代卫星导航与定位系统的计划，并由空军上校 B. Parkinson 博士出任这个项目的办公室主任。他充分发挥自己的学术背景与游说技能，召集多方人士，综合各种思想，最终于 1973 年 12 月提出了一个可以让美国军方接受的方案。这个方案就是授时与测距导航系统/全球定位系统（NAVSTAR/GPS），通常简称为全球定位系统（GPS），它是一个基于人造卫星、

面向全球的全天候无线电定位、定时系统。

GPS 的开发过程可分为三个阶段。第一阶段为可行性研究,其工作主要集中在对用户设备的测试,即利用安装在地面上的信号发射器代替卫星,通过大量的实验,证实 GPS 接收机在该系统中能获得很高的定位精度。随后于 1978 年 2 月 22 日,美国在其范登堡空军基地发射了第一颗 GPS 实验卫星。GPS 的第二阶段开发自 1979 年始,其目标是让一部分特许用户获得 GPS 的全球二维定位功能。接着自 1985 年始, GPS 进入了其开发、生产的第三阶段。值得一提的是,在 1991 年美国与伊拉克展开的海湾战争中, GPS 首次被美国空军使用,并在战争中展示了其卓越的性能和非凡的价值。海湾战争后,各方新闻媒体对 GPS 进行了不断的报道与赞誉,这使得 GPS 名噪一时,进而极大地激发了人们对民用 GPS 的兴趣。1995 年,美国宣告 GPS 正式进入全面的运行状态。

GPS 是继人类登月和发明航天飞机后在空间技术领域的又一个重大成就。同时,现代计算机、微处理器、固态半导体、原子钟、信号处理和通信等相关领域内科学技术突飞猛进的发展,为造就今天的 GPS 系统奠定了坚实的基础。

1.2 GPS 的组成概况

历时 20 年、耗资 200 亿美元的 GPS 由如图 1.1 所示的三个独立部分组成:空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。这样,整个 GPS 系统的工作原理可简单地描述如下:首先,空间星座部分的各颗 GPS 卫星向地面发射信号;其次,地面监控部分通过接收、测量各个卫星信号,进而确定卫星的运行轨道,并将卫星的运行轨道信息发射给卫星,让卫星在其发射的信号上转播这些卫星运行轨道信息;最后,用户设备部分通过接收、测量各颗可见卫星的信号,并从信号中获取卫星的运行轨道信息,进而确定用户接收机自身的空间位置。可见,这一工作原理正是上一节所介绍的正、逆定位命题的联合应用。然而, GPS 与子午卫星系统的一个重大区别在于: GPS 用户设备部分测量的是它们到卫星的距离,而不再以信号的多普勒频移为主要测量值。

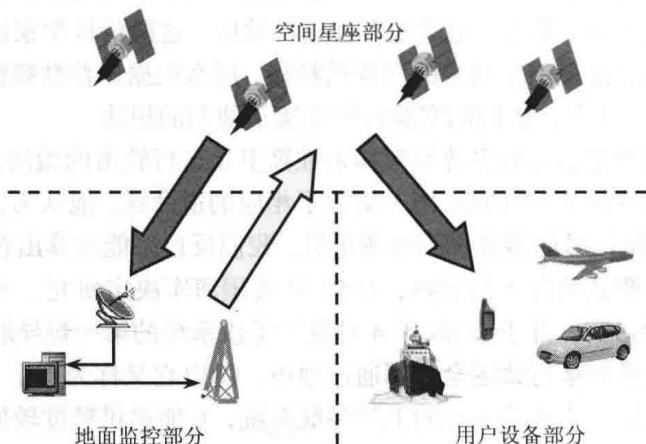


图 1.1 GPS 的三个组成部分

虽然以上只是对 GPS 工作原理的简单概括,但是它很清楚地表明了 GPS 三个组成部分之间如图 1.1 所示的信号传递关系。特别需要强调的是,空间星座部分与用户设备部分有联系,但这种联系是单向的,信号、信息只从空间星座部分向用户设备部分传递。下面将简单介绍这三个组成部分的功能,从中我们不但可以进一步认识 GPS 整个系统的工作机制,而且会即刻明白 GPS 用以实现定位的基本原理。

1.2.1 空间星座部分

GPS 的空间星座部分由 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星构成,但目前(即 2008 年 6 月)处于正常运行状态的实际卫星数目为 30 颗左右。如图 1.2 和图 1.3 所示,这 24 颗卫星分布在 6 个轨道上,每个轨道上不均匀地分布着 4 颗卫星。每个轨道面与地球赤道面的夹角约为 55° ,相邻两个轨道面的升交点经度相差 60° ,而在相邻轨道上邻近卫星的升交点角距又相差约 30° 。GPS 卫星属于地球中轨卫星,卫星轨道的平均高度约为 20 200 km,运行轨道是一个很接近于正圆的椭圆,运行周期为 11 小时 58 分。考虑到周期为 24 小时的地球自转,那么相对于地面上的一个固定观测点来讲,卫星的运行和分布状况大约每隔 23 小时 56 分重复一次。需要说明的是,对于在这一小节中出现的升交点等一些卫星轨道参数和地理术语,我们将在第 3 章给予详细解释,故对此不熟悉的读者现在不必感到焦急。

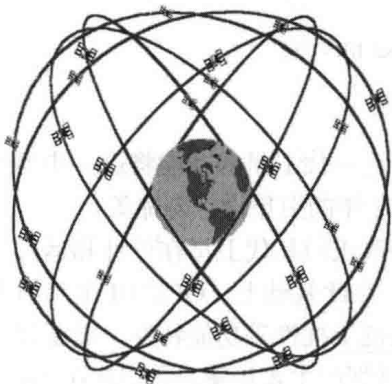


图 1.2 GPS 卫星星座

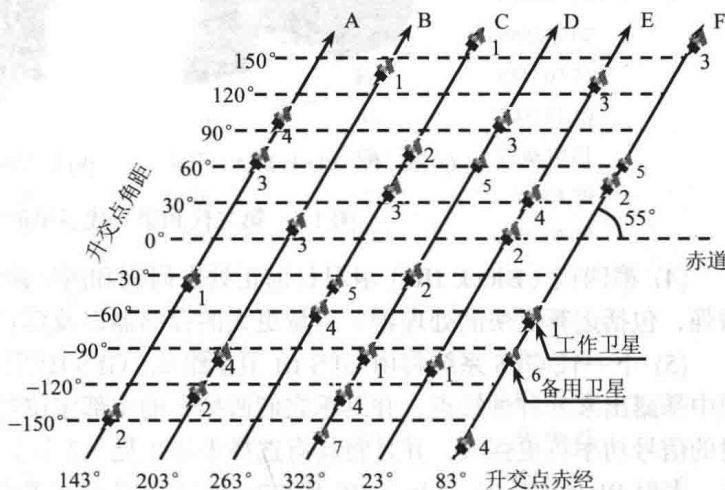


图 1.3 GPS 卫星星座平面图

为了进一步清晰地描绘出星座中各卫星的分布情况,图 1.3 将 2005 年 9 月某时刻的 6 个椭圆轨道分别展开成了一条直线^[9]。这 6 个轨道面沿着经度方向依次用字母 A, B, C, D, E 和 F 表示,而每个轨道面上的工作卫星又用 1~4 的数字加以区别,但数字的编排顺序并没有一定规律。这样,卫星的轨道编号就由一个字母和一个数字组成,例如 A1, A2, A3, A4, B1 和 F4 等。备用卫星用一个大于 4 的数字表示,例如 C5, D5 和 D7 等。

在地面上一观测点处可见卫星的数目及其分布状况随时间和地点的不同而异,一般说来少则 4 颗,多则可达 11 颗。GPS 卫星星座之所以设计成如上所述的构架,其目的之一是使地面上的任一点在任一时刻都能同时观测到足够数量的卫星以供定位之用,目的之二是考虑了它的容错性能。也就是说,如果某一轨道面上的一颗卫星因发生故障而失效,那么由于相邻轨道面上邻近卫星的存在, GPS 的卫星信号覆盖性能和定位性能不至于会遭到剧烈破坏而大幅度下降;同时, 3 颗备用卫星可在必要时替代故障卫星,这对于确保空间星座部分的正常运转也起了相当重要的作用。

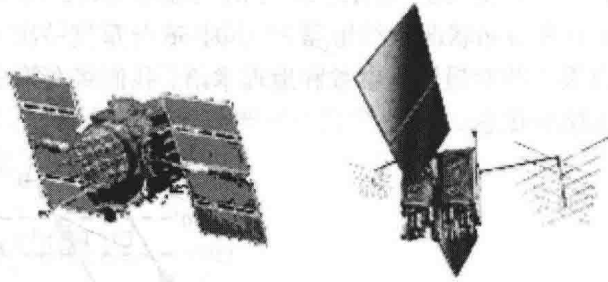
作为导航卫星, GPS 卫星的硬件主要包括无线电收发装置、原子钟、计算机、太阳能板和推进系统等。至今, GPS 卫星的设计一般可分成以下五代^[15,32]。

(1) 第一代 (Block I) 11 颗 GPS 实验卫星的用意在于验证 GPS 的可行性。该代卫星的设计寿命为 5 年,而 GPS 星座中的所有这款卫星自 1995 年起已经被全部废止。

(2) 从 1989 年 4 月起开始陆续发射的第二代 (Block II 和 Block IIA) 卫星共计 28 颗。第二

代卫星的实物如图 1.4(a)所示,其质量约为 987 kg,宽约 1.5 m,长约 5.3 m,主体呈圆柱形状^[25]。卫星两侧设有太阳能板,能自动对日定向,以保证卫星的正常工作用电。卫星的设计寿命为 7.5 年,而实际有效工作寿命一般均比设计寿命长,很多卫星的实际工作寿命超过设计寿命 6~7 年。

(3) 自 1997 年 7 月起,在性能上比前两代卫星有很大提高的第三代 (Block IIR 和 Block IIR-M) 卫星正在逐步替换掉第二代卫星,以改进全球定位系统。第三代卫星的实物如图 1.4(b)所示,它宽约 1.5 m,高约 1.9 m,太阳能板展开后宽度约为 11.6 m,而设计寿命为 10 年。截至 2008 年, GPS 卫星星座是由 Block IIA、IIR 和 IIR-M 卫星混合构成的。



(a) 第二代 (Block II/IIA) 卫星

(b) 第三代 (Block IIR) 卫星

图 1.4 第二代和第三代卫星的实物照

(4) 第四代 (Block IIF) 卫星目前正处在研制和测试阶段。这一代卫星的功能将进一步得到增强,包括运算更快的处理器、容量更大的存储器以及延长至 12 年的卫星设计寿命等。

(5) 下一代 GPS 系统将由 GPS III 卫星组成。GPS III 卫星将改正前几代卫星在设计和运行过程中暴露出来的种种缺点,并继承它们所拥有的全部定位功能。在此基础上, GPS III 卫星所发射的信号功率将更强大,并且将具有选择失效 (见 1.3 节) 和高抗干扰性功能特性。顺便提一下,发射 Block IIR-M、Block IIF 和 GPS III 卫星是 GPS 现代化计划的主要步骤,它们将在 2.6 节中再予以评论。

卫星信号从 20 200 km 的高空被播发后,大约只需 70 ms 的时间就到达地面。卫星信号中包含着信号发射时间的精确信息,这是用户设备用来准确测量其本身到卫星距离的一个必要条件。鉴于此,每颗第二代 GPS 卫星配置有四台原子钟,包括两台铷 (Rb) 原子钟和两台铯 (Cs) 原子钟,而每颗第三代卫星则配置有三台铷原子钟。高精度的原子钟是卫星的核心设备,它不但为卫星发射信号提供了基准频率,而且为确定整个 GPS 系统的时间标准提供了依据。

表 1.1 列出了在截至 2005 年 11 月 18 日的 GPS 卫星星座中各颗运行卫星的状况^[36]。为了区别各个卫星实体,每颗卫星均有一个相互不同的空间飞行器编号 (SVN),其中 Block II 卫星的 SVN 被分配为 13~21, IIA 卫星的 SVN 被分配为 22~40,而 IIR/IIR-M 的 SVN 被分配为 41~62。在任一时刻,不同工作卫星发射的信号中又含有一个互不相同的伪随机噪声码 (PRN),下一章将会详细解释 PRN 的特性和功能。不同 SVN 的卫星有可能曾发射过相同的 PRN,例如当一颗旧卫星淘汰后由另一颗新卫星接替,那么这两颗有着不同 SVN 的卫星都能发射同一个 PRN 信号。对于用户设备部分来说,PRN 编号通常已经足够用来指定、区别 GPS 星座中运行的不同卫星,因而本书以后的各个章节将不再提及 SVN。美国海军天文台 (USNO) 和美国海岸警卫队 (USCG) 会在其各自的全球互联网网页上即时公布、更新当前 GPS 星座中各颗运行卫星的状况,包括各颗卫星的轨道编号、SVN、PRN 和频率标准等。此外,美国海岸警卫队还即时预告星座的变更情况,例如哪颗卫星何时需要进行调试而中断其正常的信号发射等。

表 1.1 GPS 星座中各颗运行卫星的状况 (截至 2005 年 11 月 18 日)

| SVN | PRN 编号 | 轨道编号 | 代 号 | 频率标准 | 发射时间 |
|-----|--------|------|-----|------|------------|
| 32 | 1 | F6 | IIA | Cs | 1992.11.22 |
| 61 | 2 | D7 | IIR | Rb | 2004.11.06 |
| 33 | 3 | C2 | IIA | Cs | 1996.03.28 |
| 34 | 4 | D4 | IIA | Rb | 1993.10.26 |
| 35 | 5 | B4 | IIA | Rb | 1993.08.30 |
| 36 | 6 | C1 | IIA | Rb | 1994.03.10 |
| 37 | 7 | C4 | IIA | Rb | 1993.05.13 |
| 38 | 8 | A3 | IIA | Cs | 1997.11.06 |
| 39 | 9 | A1 | IIA | Cs | 1993.06.26 |
| 40 | 10 | E3 | IIA | Cs | 1996.07.16 |
| 46 | 11 | D2 | IIR | Rb | 1999.10.07 |
| 43 | 13 | F3 | IIR | Rb | 1997.07.23 |
| 41 | 14 | F1 | IIR | Rb | 2000.11.10 |
| 15 | 15 | D5 | II | Cs | 1990.10.01 |
| 56 | 16 | B1 | IIR | Rb | 2003.01.29 |
| 54 | 18 | E4 | IIR | Rb | 2001.01.30 |
| 59 | 19 | C3 | IIR | Rb | 2004.03.20 |
| 51 | 20 | E1 | IIR | Rb | 2000.05.11 |
| 45 | 21 | D3 | IIR | Rb | 2003.03.31 |
| 47 | 22 | E2 | IIR | Rb | 2003.12.21 |
| 60 | 23 | F4 | IIR | Rb | 2004.06.23 |
| 24 | 24 | D1 | IIA | Cs | 1991.07.04 |
| 25 | 25 | A2 | IIA | Cs | 1992.02.23 |
| 26 | 26 | F2 | IIA | Rb | 1992.07.07 |
| 27 | 27 | A4 | IIA | Cs | 1992.09.09 |
| 44 | 28 | B3 | IIR | Rb | 2000.07.16 |
| 29 | 29 | F5 | IIA | Rb | 1992.12.18 |
| 30 | 30 | B2 | IIA | Rb | 1996.09.12 |
| 31 | 31 | C5 | IIA | Cs | 1993.03.30 |

GPS 卫星的基本功能可总结如下: 接收从地面监控部分发射的导航信息, 执行从地面监控部分发射的控制指令, 进行部分必要的数据处理, 向地面发送导航信息, 以及通过推进器调整自身的运行姿态。

1.2.2 地面监控部分

地面监控部分主要由分布在全球的 1 个主控站、4 个注入站和 6 个监测站组成。从所处的地理位置来讲, 监测站同时又可能是注入站或主控站。如图 1.5 所示, 这 6 个地面监测站沿着经度方向依次位于美国的夏威夷 (Hawaii)、科罗拉多 (Colorado Springs)、佛罗里达 (Florida Cape Canaveral)、南大西洋的阿松森群岛 (Ascension Island)、印度洋的迭哥加西亚 (Diego Garcia) 和南太平洋的卡瓦加兰 (Kwajalein) [7,22]。

监测站是在主控站控制下的一个数据自动采集中心, 其主要装置包括双频 GPS 接收机、高