

(瑞士)让-马利·佐格 (Jean-Marie Zogg) 著

GPS

卫星导航基础

GPS
Essentials of
Satellite Navigation



卫星导航理论与原理
GPS/GNSS及应用概览

航空工业出版社

GPS 卫星导航基础

(瑞士) 让 - 马利 · 佐格

(Jean-Marie Zogg) 著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书旨在详细描述全球定位系统及相关的技术,讲述 GPS 如何工作以及如何应用,包括基本原理、系统结构、信号特点、坐标系转换、位置计算、差分技术、辅助 GPS、GLONASS、GALILEO 与北斗等其他 GNSS 介绍、数据格式与硬件结构,并包含了 GNSS 领域的新技术,以及 GNSS 应用等内容。本书条理清楚、内容丰富,易于理解和掌握,为 GPS 开发和 GPS 应用人员提供所需的参考内容,帮助读者快速和全面地理解 GPS 相关技术。

本书可以作为卫星导航定位技术开发者、导航技术应用者、软件工程师、硬件工程师、高等院校师生的工具书和参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

GPS 卫星导航基础/ (瑞士) 佐格 (Zogg, J. M.) 著
—北京: 航空工业出版社, 2011. 8
ISBN 978 - 7 - 80243 - 789 - 0

I. ①G… II. ①佐… III. ①全球定位系统 IV.
①P228. 4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 138680 号

GPS 卫星导航基础 GPS Weixing Daohang Jichu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010 - 64815615 010 - 64978486

中国电影出版社印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2011 年 8 月第 1 版

2011 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 10. 75

字数: 211 千字

印数: 1—2000

定价: 39.00 元

前言

我身在地球何处？

对这个看似简单的问题的回答有时会关乎生死。试想一下对于急于找到一处安全着陆地点的飞行员，或者遇险船只上寻求救助的船员，或者在群山因恶劣天气迷失了方向的徒步旅行者，了解自己的位置是多么重要，它蕴含了不可胜数的含义和用途。

尽管未必会遇到上述的戏剧性场面，但在我们的日常生活中，有时位置信息的确会对我们有重要影响。我该如何找到我要去的地方？企业如何跟踪其移动资产？政府如何实施道路收费系统？公交车应该在何时何地触发下一个红绿灯？位置信息潜在的应用和使用似乎是无止境的。对人类而言，我们在这颗蓝色星球上的位置始终都是一件极为重要的事情，而今天获得我们的准确位置已容易得令人难以置信。

在近年来最令人眼花缭乱的技术进步中，卫星导航或全球导航卫星系统（GNSS）技术发展可谓突飞猛进。在短短几年内，卫星导航从科幻层面变为科学现实，形成了一个充满活力、快速成长的产业，为全世界客户提供了迅速可靠、按需随用的定位技术。

作为这个引人入胜、生机勃勃的行业的领军者，u-blox AG 团队秉承创新和质量理念致力于为卫星导航爱好者提供服务。作为客户服务承诺的一部分，u-blox 很荣幸地为您提供这本帮助您进入非凡的卫星导航世界的著作。

本书旨在提供对卫星导航系统的功能及其应用的综合概览，同时审视当前的研发水平、变化和进展。本书是为对此项技术感兴趣的用户和与卫星导航应用有关的专家而编写的。本书在结构上由浅入深，读者能够从简单的事实过渡到较为复杂的概念。既介绍了卫星导航的基本理论，又补充了一些其他的重要内容。本书还可了解此项技术提供一些额外帮助，尤其是在现有的卫星导航接收



机、模块和集成电路方面。重要的新进展将在各个章节加以介绍。要了解GNSS设备目前所使用的各种坐标系并非易事，为此专门用一个独立的章节介绍地图学。

我们希望本书能够对您有所帮助，而您也能像我们一样热衷于与定位有关的技术。这个能够回答“我身在地球何处？”的世界和产业的确是魅力无穷。

自序

1990 年，我从瑞士库尔乘火车到布里格。为打发旅途中的时间，我随身带了几本旅行杂志。当我翻阅一本美国杂志时，不经意间看到了一篇介绍有关新的卫星定位和导航系统的技术文章。这种新系统称为全球定位系统或 GPS，利用一些美国卫星来确定全球任意一点的位置，精度约为 100m^①。

作为一名热爱运动的运动员和登山者，我有很多次在危险的情况下由于对所处的地区不了解而放弃。因此，这种即便在雾中或是夜间都能通过 GPS 接收机确定我所处的位置的革命性的前景深深地吸引了我。

GPS 开始占据我的生活。我还唤起了我所在学校里大批热衷此项技术的学生们的热情，他们最终花费了数个学期并在此科目上毕业。我感到自己已逐渐成为这个学科真正的专家，开始为各类出版物撰写有关 GPS 的技术文章。

为何要阅读本书？

要想了解卫星导航的许多新兴和迷人的潜在应用的发展，需要先了解这些系统工作的方式。如果你熟悉该系统的技术背景，就能够开发和使用新的定位和导航设备。本书既探讨了可行性，也探讨了该系统的一些限制，以便你抛开不切实际的期望。

本书是怎样诞生的？

2000 年，我决定减少花在我所在大学授课上的时间，以便去了解商业卫星导航产业的全貌。我希望能直接从事卫星导航的公司工作，而正好有一家名为 u-blox AG 的公司热情地接纳了我。u-blox AG 要求我编写一本送给客户的介绍材料，于是就有了这个由以往文章和新编章节组成的概述。

真诚祝福

我真心地希望在全球卫星的导航下你的旅程一帆风顺，并深信借助这一迷人

^① 那是在 1990 年，而现在定位数据的精度已达 5 ~ 10m！

的技术领域你能引领自己踏上成功之路。愿你在阅读中获得乐趣！

如果你有疑问或发现书中有误，请发送邮件到 GPScompendium@u-blox.com 与我们联系。

Jean-Marie Zogg

2009 年 2 月

目 录

导论	1
第 1 章 卫星导航快速入门	3
1.1 测量信号传输时间的原理	3
1.1.1 卫星导航的基本原理	4
1.1.2 信号行程时间	6
1.1.3 测定位置	6
1.1.4 时间误差的影响和修正	7
第 2 章 坐标系	9
2.1 引言	9
2.2 地球体	9
2.3 椭球与基准面	10
2.3.1 椭球	10
2.3.2 制定本地参考椭球与基准面	11
2.3.2.1 本地参考椭球	11
2.3.2.2 基准面、地图参考系	11
2.3.3 国家参考系	11
2.3.4 国际参考椭球 WGS-84	12
2.3.5 从本地参考系变换至世界参考椭球	13
2.3.5.1 大地基准面	13
2.3.5.2 基准面转换	14
2.3.6 转换坐标系	14
2.3.6.1 将笛卡儿坐标转换为椭球坐标	14
2.3.6.2 将椭球坐标转换为笛卡儿坐标	15
2.4 平面地区坐标、投影	15
2.4.1 高斯-克吕格投影（横切墨卡托投影）	15
2.4.2 UTM 投影	16

2.4.3	瑞士投影系（正形双重投影）	18
2.4.4	全球范围的坐标转换	18
2.4.4.1	示例：将 WGS-84 坐标转换为 CH-1903 坐标	19
2.5	栅格地图地理对位	19
2.5.1	引言	19
2.5.2	变换基础	20
2.5.3	确定变换坐标	20
2.5.4	确定变换参数 a, b, c, d, e, f	21
2.5.5	示例（将栅格地图变换为 WGS-84）	22
第 3 章	卫星技术基础	25
3.1	开普勒定律	25
3.1.1	开普勒第一定律	25
3.1.2	开普勒第二定律	26
3.1.3	开普勒第三定律	26
3.2	卫星轨道	27
3.3	轨道高度	28
3.4	无线电频率	29
3.5	时间系统	30
3.5.1	国际原子时（TAI）	30
3.5.2	协调世界时（UTC）	31
3.5.3	GPS 时	31
3.5.4	卫星时	31
3.5.5	地方时	31
第 4 章	GNSS 技术：GPS 示例	33
4.1	引言	33
4.2	全系统描述	34
4.3	空间部分	34
4.3.1	卫星的分布和运动	34
4.3.2	GPS 卫星	36
4.3.2.1	卫星结构	36

4.3.2.2 通信链路预算分析	37
4.3.2.3 卫星信号	37
4.3.3 生成卫星信号	39
4.3.3.1 简化框图	39
4.3.3.2 详细框图	40
4.4 控制部分	41
4.4.1 失效可能性与人为信号失真 (SA)	41
4.5 用户部分	43
4.6 GPS 导航电文	45
4.6.1 引言	45
4.6.2 导航电文的结构	46
4.6.3 子帧包含的信息	47
4.6.4 遥测字 (TLM) 与转换字 (HOW)	47
4.6.5 25 页的细分	47
4.6.6 星历与年历数据比较	48
4.7 GPS 现代化	48
4.7.1 新调制方法, BOC 和 MBOC	48
4.7.1.1 BPSK (1) —调制	48
4.7.1.2 BOC—调制简介	49
4.7.1.3 MBOC 调制 (多路 BOC, MBOC (6, 1, 1/11))	51
4.7.2 GPS 现代化	52
第 5 章 GLONASS、GALILEO 和北斗系统	54
5.1 引言	54
5.2 GLONASS: 俄罗斯系统	54
5.2.1 GLONASS 的建成	56
5.3 GALILEO	58
5.3.1 概述	58
5.3.2 计划中的 GALILEO 服务	60
5.3.2.1 开放服务, OS	60
5.3.2.2 商业服务, CS	60
5.3.2.3 人身安全服务, SoL	60

5.3.2.4 公共管制服务, PRS	60
5.3.2.5 搜索和救援, SAR	61
5.3.3 精度	62
5.3.4 GALILEO 技术	62
5.3.4.1 信号频率	64
5.3.4.2 时间计划	65
5.3.5 GNSS 最重要的三个特性	67
5.4 中国的北斗 1 代和北斗 2 代系统	68
5.4.1 目前的系统: 北斗 1 代	68
5.4.2 未来的系统: 北斗 2 代	68

第 6 章 计算位置	70
6.1 引言	70
6.2 计算位置	70
6.2.1 测量信号行程时间的原理 (伪距估算)	70
6.2.2 方程的线性化	72
6.2.3 解方程	73
6.2.4 小结	74
6.3 确定行程时间的具体方法	75
6.3.1 时间系统	75
6.3.2 确定行程时间的具体方法	75
6.3.2.1 第 1 步: 通过相关性确定信号到达时间	75
6.3.2.2 第 2 步: 对数据和/或导航电文进行重构	77
6.3.2.3 第 3 步: 确定发送时间	77
6.3.3 确定行程时间误差	78
6.3.4 影响行程时间的其他因素	78
6.4 误差分析与精度因子	79
6.4.1 引言	79
6.4.2 卫星几何形态对精度的影响, DOP 值	80
6.4.2.1 引言	80
6.4.2.2 图解 DOP 值成因	81
6.4.2.3 DOP 值的实际含义	82

6.4.2.4 总误差	83
6.4.2.5 计算 DOP 值	85
第 7 章 改进的 GPS: DGPS、SBAS、A-GPS 和 HSGPS	87
7.1 引言	87
7.2 GPS 误差源	87
7.3 减小测量误差的可行性	89
7.3.1 基于信号行程时间延迟测量的 DGPS	90
7.3.1.1 工作原理详细说明	91
7.3.1.2 确定修正系数	91
7.3.1.3 发送修正值	92
7.3.1.4 对测量伪距的修正	93
7.3.2 基于载波相位测量的 DGPS	93
7.3.3 DGPS 后处理 (信号行程时间和相位测量)	94
7.3.4 发送修正数据	94
7.3.5 根据播发范围对 DGPS 进行分类	95
7.3.6 修正信号发送标准	95
7.3.7 差分修正服务概览	96
7.4 DGPS 实时修正服务	96
7.4.1 引言	96
7.4.2 基于 RTCM SC-104 的地面服务	97
7.4.3 基于 RTCM SC-104 的卫星服务	97
7.5 广域 DGPS (WADGPS)	99
7.5.1 星基增强系统, SBAS (WAAS, EGNOS)	99
7.5.1.1 引言	99
7.5.1.2 最重要的 SBAS 功能	99
7.5.2 现有系统和计划中的系统概览	100
7.5.3 计划中的 RNSS 概览	103
7.5.4 SBAS 系统描述	103
7.5.5 使用 RTCM SC-104 的卫星 DGPS 服务	104
7.6 使用 DGPS 和 SBAS 可达到的精度	105
7.7 辅助 GPS (A-GPS, AGPS)	105

7.7.1	引言	105
7.7.2	A-GPS 原理	106
7.7.3	基准网络	108
7.7.4	A-GPS 网络	109
7.7.5	采用在线辅助数据的 A-GPS 方式 (实时 A-GPS)	109
7.7.6	采用离线辅助数据的 A-GPS 方式 (预测轨道)	110
7.7.7	架构	111
7.7.8	控制平面架构	111
7.7.9	用户平面架构	112
7.7.10	架构优势	112
7.7.11	OMA 安全用户平面定位架构 (OMA-SUPL)	113
7.8	高灵敏度 GPS (HSGPS)	114
7.8.1	提高振荡器稳定性	114
7.8.2	天线	114
7.8.3	噪声系数因素	114
7.8.4	相关器和相关时间	115
7.9	GNSS 转发器或转发天线	116
7.10	室内用伪卫星	116

第 8 章 数据格式与硬件接口

8.1	引言	117
8.2	数据接口	117
8.2.1	NMEA-0183 数据接口	117
8.2.1.1	NMEA 协议结构	118
8.2.1.2	GGA 数据集	120
8.2.1.3	GLL 数据集	121
8.2.1.4	GSA 数据集	122
8.2.1.5	GSV 数据集	123
8.2.1.6	RMC 数据集	124
8.2.1.7	VTG 数据集	125
8.2.1.8	ZDA 数据集	126
8.2.1.9	计算校验和	126

8.2.2 从 NMEA 转换为 KML	128
8.2.2.1 Google Earth 和 KML 简介	128
8.2.2.2 将 NMEA 转换为 KML 的方法	128
8.2.3 DGPS 修正数据 (RTCM SC-104)	131
8.2.3.1 RTCM 电文头 (2.3 版)	132
8.2.3.2 RTCM 电文类型 1 (2.3 版)	133
8.2.3.3 RTCM 电文类型 2~9 (2.3 版)	134
8.2.4 私有数据接口	136
8.2.4.1 示例: 用于 u-blox GNSS 接收机的 UBX 协议	136
8.3 硬件接口	138
8.3.1 天线	138
8.3.2 供电	139
8.3.3 时间脉冲: 1PPS 与时间系统	139
8.3.4 将 TTL 电平转换为 RS-232	140
8.3.4.1 串行通信基础	140
8.3.4.2 确定电平及其逻辑分配	140
8.3.4.3 将 TTL 电平转换为 RS-232	141
第 9 章 GNSS 接收机	143
9.1 GNSS 手持接收机基础	143
9.2 GNSS 接收机模块	144
9.2.1 GNSS 模块基本设计	144
第 10 章 GNSS 应用	146
10.1 引言	146
10.2 各种应用介绍	146
10.2.1 基于位置的服务 (LBS)	147
10.2.2 商业和工业应用	147
10.2.3 通信技术	149
10.2.4 农业和林业	149
10.2.5 科学与研究	150
10.2.6 旅游和运动	151

10.2.7 军事	151
10.2.8 时间测定	151
附录	153
A 互联网上的资源	153
A.1 概要报告和链接	153
A.2 差分 GPS	153
A.3 GPS 机构	154
A.4 GNSS 新闻组和 GNSS 技术刊物	154
B 资料来源	155
C 版本历史	156

导 论

卫星导航是一种通过全球导航卫星系统（GNSS）精确测定地球上任何一点的位置和时间的办法。目前，卫星导航接收机可供个人定位、商业定位、导航、勘测和测定精确时间之用，用作个人、休闲和商业方面的用途也日渐增多。

使用 GNSS 可在地球表面上的任何一点精确测定以下数值（见图 1）：



图 1 卫星导航的基本功能

(1) 精确位置（经度、纬度和高度坐标），精度范围在 20m 到约 1mm 之间。

(2) 精确时间（协调世界时，即 UTC），精度范围在 60ns 到约 5ns 之间。

可由上述数值推导出行程（路径）的速度和方向，这些数值由围绕地球运行的卫星提供。行程的速度也可通过多普勒频移测量直接确定。

截至 2009 年，美国国防部（DoD）研发和运营的全球定位系统（GPS）是唯一全面运营的 GNSS。高速发展的卫星导航产业以 GPS 为中心迅猛成长，因此术语 GPS 与卫星导航有时可互换使用。本文着重介绍 GPS，同时也介绍和讨论其他一些新出现的 GNSS。

GPS（该系统的全称为：授时与测距导航系统/全球定位系统，即 NAVSTAR - GPS），设计为军民两用。民用信号 SPS（标准定位服务）可由公众自由使用，而军用信号 PPS（精确定位服务）只有经授权的政府部门才能使用。首颗卫星于 1978 年 2 月 22 日入轨，计划在高度为 20180km 的 6 个不同轨道平面内配置 32 颗围绕地球运转的卫星。卫星轨道与赤道之间的倾角为 55° ，确保在地球上的任何一点至少可与 4 颗卫星进行无线电通信。每颗卫星绕地球转一周约需 12h，卫星上载有 4 个原子钟。

在 GPS 的研制过程中，重点放在以下三个方面：

(1) 无论其是处于运动状态还是静止状态，它必须能够为用户提供测定位置、速度和时间的能力。

(2) 它必须具有连续性、全球性、全天候的高精度三维定位能力。

(3) 它必须具有民用潜力。

在此后的 5~6 年里，可能会有 3 个完全独立的 GNSS 投入使用。美国将继续提供 GPS 服务，而俄罗斯的 GLONASS 和欧盟的 GALILEO 也将全面投入运营。所有这些系统都将进行更新和改进，以提高可靠性并实现新的潜在服务和应用^①。

本概述将探讨卫星导航的基本原理，进而介绍具体应用和技术。作为先驱和行业标准的 GPS 因其重要性而受到特别关注，而对于差分 GPS (DGPS)、辅助 GPS (AGPS) 以及设备接口等这些重大的发展，将在单独的章节加以介绍。这样安排的目的是为了让读者打下牢固的基础，以了解这一令人着迷且日益重要的领域。

^① 这里面将有一些重要的航空学进展，其中包括通过卫星导航来实现进场和着陆。