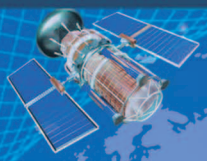
本书受重庆市科普项目资助，项目编号：cstc2016kp-yszcA0007



曾建奎◎编著

轻松学科学

——卫星定位与导航技术

QINGSONG XUE KEXUE

WEIXING DINGWEI YU DAOHANG JISHU

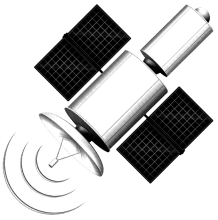
西南交通大学出版社

轻松学科学

——卫星定位与导航技术

QINGSONG XUE KEXUE

WEIXING DINGWEI YU DAOHANG JISHU



曾建奎 ◎ 编著

西南交通大学出版社

·成都·

图书在版编目（CIP）数据

轻松学科学：卫星定位与导航技术 / 曾建奎编著.
—成都：西南交通大学出版社，2017.8
ISBN 978-7-5643-5659-0

Ⅰ. ①轻… Ⅱ. ①曾… Ⅲ. ①全球定位系统—卫星导航—基本知识 Ⅳ. ①P228.4②TN967.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 195513 号

轻松学科学
——卫星定位与导航技术

曾建奎　编著

责任编辑	柳堰龙
封面设计	严春艳
出版发行	西南交通大学出版社 （四川省成都市二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼）
发行部电话	028-87600564　028-87600533
邮政编码	610031
网　　址	http://www.xnjdcbs.com
印　　刷	成都勤德印务有限公司
成品尺寸	170 mm×230 mm
印　　张	8.75
字　　数	94 千
版　　次	2017 年 8 月第 1 版
印　　次	2017 年 8 月第 1 次
书　　号	ISBN 978-7-5643-5659-0
定　　价	45.00 元

图书如有印装质量问题　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，卫星导航技术越来越多地应用到日常生活以及工作中，它正在成为推动国家经济变革的大产业。但是，我国卫星导航产业面临科技工作者少、科技水平低的问题。为充分利用实现国家经济结构转型和经济发展方式改变的重大机遇，实现导航产业的高速度、跨越式、可持续发展，必须让广大普通群众和科技工作者了解这门技术，热爱这门技术。

为推动卫星导航事业的发展，让更多的初学者了解这门技术。在重庆市科学技术委员会科普出版项目的资助下，撰写了此书。图书的语言浅显易懂，摈弃枯燥专业的学术术语，方便读者理解。全书首先介绍卫星导航技术的发展历史，然后介绍它的工作原理，最后描述这门技术的发展。

全书的内容分为 6 章。第 1 章先介绍了雷达系统，然后由雷达引出了 GPS 的发展。第 2 章详细地介绍常见雷达的应用。第 3 章介绍 GPS 的组成、工作原理常见的定位方法以及信号接收机。第 4 章介绍 GPS 数据处理方法以及误差来源。第 5 章介绍其他的定位系统。第 6 章介绍 GPS 技术的应用。

本书由重庆科技学院曾建奎和刘爽共同完成。曾建奎负责了整书的构思以及第 1，2，5，6 章的编写；刘爽负责第 3，4 章的编写。感谢重庆市科技传播与普及项目对本书的资助（项目编号 cstc2016kp-ysczA0007）。感谢杨唏、杨镒丞、张红、刘廷嘉、奚港等同志对本书出版所作的贡献。

对于本书中出现的疏漏与不足恳请广大读者斧正。

作　者

2017 年 5 月

目录
Contents

第 1 章　认识卫星导航技术　1

1.1　早期雷达　2
1.2　第二次世界大战前后雷达的发展　3
1.3　雷达的工作原理　7
1.4　从雷达到 GPS　9

第 2 章　雷达的作用——神奇的“眼睛”　15

2.1　监视雷达的作用　16
2.2　跟踪雷达的作用　17
2.3　机械雷达的作用　18
2.4　气象雷达的作用　19

第 3 章　卫星导航系统的主要组成及原理——卫星挂帅　23

3.1　导航系统　24
3.2　相对定位系统　32
3.3　绝对定位原理　40
3.4　差分 GPS　42

第 4 章　卫星导航系统数据处理——导航技术的血液　51

4.1　误差的分类　52

4.2 来源于卫星的误差 55
4.3 与传播途径有关的误差 59
4.4 接收设备的误差 63

第 5 章 GPS 的小伙伴们 67

5.1 中国的“北斗”卫星导航系统 68
5.2 俄罗斯“GLONASS”系统 74
5.3 欧洲“伽利略”系统 81
5.4 GSM 定位系统 85

第 6 章 卫星导航系统的应用 91

6.1 航 空 92
6.2 航 海 98
6.3 通信与导航的融合 106
6.4 人员跟踪 110
6.5 消费娱乐 113
6.6 测 绘 119
6.7 授 时 123
6.8 车辆监控管理 124

参考文献 129

第 1 章

认识卫星导航技术

1.1 早期雷达
1.2 第二次世界大战前后雷达的发展
1.3 雷达的工作原理
1.4 从雷达到 GPS

1.1 早期雷达

现代雷达起源的准确日期很难确定，因为约在 20 世界 30 年代中期，世界好几个国家几乎同时独立发明了雷达。1888 年，赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）用实验证实了雷达的基本原理。20 世纪初期，德国以赫兹的实验为基础，做出了一部检测舰船的装置，并做了实验。此后很长的一段时间里，这方面没有什么进展，直到 20 世纪 30 年代中期，才有了有关目标反射无线电波的报告，雷达真正出现。然而应该指出的是，早在 20 世纪 30 年代雷达出现之前，研制雷达所需要的无线电基本工艺技术就已经为人们所掌握，一些国家已经具备了良好的无线电技术基础。30 年代初期又出现了远距离军用轰炸机，它具有很大杀伤力，这就促使了用无线电探测飞机的雷达的产生。因此可以说，雷达是作为对现代轰炸机的一种对抗而发明的。

20 世纪 30 年代，不少国家研制出来的是一种双基地连续波雷达，它的主要特征是收发天线分开而且相距很远。飞机穿过收发天线时，发射机直接传到接收机的基准信号与飞机目标散射回来的信号之间进行相拍（当时称作连续波干涉），雷达就是利用了这个多普勒相拍信号原理对飞机进行探测。尽管法国和苏联军队在他们参加第二次世界大战之前都已经有了双基地连续波雷达，但成功探测飞机的军事应用还是单基地脉冲雷达。当时的双基地雷达

局限性很大。雷达的基本概念形成于 20 世纪初。但直到第二次世界大战前后，雷达才得到迅速发展。1922 年，意大利马可尼发表了无线电波可能检测物体的论文。同年，美国海军实验室利用双基地连续波雷达检测到在其间通过的木船。1925 年，美国开始研制能测距的脉冲调制雷达，并首先用它来测量电离层的高度。1936 年，美国研制出作用距离达 40 km、分辨率为 457 m 的探测飞机的脉冲雷达。1938 年，英国已在邻近法国的本土海岸线上布设了一条观测敌方飞机的早期报警雷达链 CH（Chain Home）。

1.2　第二次世界大战前后雷达的发展

起初各国家都把雷达从其原型发展和推广成某种形式的军用雷达，因而各个国家的最初发展阶段都处于保密状态。

美国陆军着手脉冲雷达研制是在 1936 年春，他们于 1936 年 12 月进行了首次外场试验，第一部实用雷达 SCR-268 是在 1938 年年底开始运转的。英国雷达的起步迟于美国，但发展很快。

苏联是从 1934 年开始发展雷达的。他们在下列三种雷达体制上进行开拓：(1) 双基地连续波雷达（RUS-1），工作波长 4 m（75 MHz），收发相距 35 km，苏联军方于 1939 年 9 月验收了这部雷达；(2) 脉冲雷达（RUS-2）、工作波长 4 m，最大工作距离 150 km，1940 年 7 月交付使用，用于截击机的导引；(3) 实验型的各种反飞机：火控

雷达，工作频率高达 2 000 MHz，作用距离 12～20 km。

法国沿着两个方向发展他们的雷达。一种是 4 m 波长的连续波雷达，在 Pierre David 指导下研制，以后演变为边境雷达警戒网中的双基地连续波实用雷达（David 早在 1928 年首先提出过这种概念）。依靠边境的多站系统，还可求出目标的轨迹和速度（如果仅单个双基地雷达，飞机穿过收发站时只能探测到目标，还不能算出位置和速度）。另一种是 16 cm 波长的微波连续波雷达。虽然 David 本人早在 1938 年 10 月曾提出过单站雷达的设想，可惜法国人在这方面没有什么进展，直到 1939 年 4 月英国人告诉了他们后才开始转向单站体制发展。

同法国与苏联相仿，德国人早在 1934 年就进行了 13.5 cm 波长的微波雷达试验，也由于功率不够而没有继续下去。曾被广泛使用的德国早期预警雷达 Freya，于 1936 年做出了第一部样机，其工作波长为 2.4 m。1938 年，第一部 125 MHz 的 Freya 雷达交付给德国海军使用，它探测飞机的作用距离为 128～240 km，波束宽度为 20°。第二次世界大战初期，德国的雷达性能较好，有一种说法说德国雷达的某些性能超过美国，另一种提供的资料说德国人的地面精密装备比谁都不差。

20 世纪 40 年代初期（在第二次世界大战期间），由于英国发明了谐振腔式磁控管，从而在先驱的 VHF 雷达发展的同时，引入了微波雷达发展的可能性。它具有窄波束宽通带的特点，克服了 VHF 的主要局限性，开拓了发展 L 波段（23 cm 波长）和 S 波段（10 cm 波长）大型地面对空搜索雷达和 X 波段（3 cm 波长）小型机载雷达的美好前景。

20 世纪 40 年代初期，美国各方曾决定继续发展 30 年代盛行的 VHF 和 UHF 雷达，雷达研制的任务交给了麻省理工学院（MIT）的辐射实验室。MIT 辐射实验室非常成功地利用新的微波工艺技术研制了机载、地面与舰载的各类军用雷达，大约有 150 种不同的雷达系统被研制成功，成为了 MIT 辐射试验计划的一项重大成果。

在第二次世界大战初期，德国人在发展与推广雷达使用方面曾是领先的。但在 40 年代初期，英美两国追了上来，战争期间德国人并没有把雷达发展作为重点，1940 年年底，德国高级司令认为战争很快就会胜利结束，现有的雷达够用了，因此他们停止了研究工作，定型装备也不生产了，大批各级人员被征募入伍。这种政策一直推行到 1943 年年初，这时他们才认识到自己落后了，想再赶上来已经晚了。

圣彼得堡原是苏联雷达发展的主要基地，当圣彼得堡市受围和变成战场的一部分时，雷达工业基地就向东部撤退。尽管在撤退过程中损失严重，但到战争快结束阶段，苏联的几个工厂已具有生产几百部 RUS-2 和 RUS-2C 雷达的能力。

在美国，已经在战争期间发展起来的微波雷达，虽然战后仍继续发展，但步子很小，速度很慢。直到 40 年代末期才有了突破性的进展，进入实用阶段。单脉冲体制，由于它的高精度和有效的抗干扰性，已成为当今有用的基本的跟踪雷达体制。几乎所有现代对空搜索雷达中都采用了动目标显示技术，以保证从地物杂波和海面杂波中检测出有用的活动目标（飞机）。

40 年代末期，McGraw-Hill 图书公司出版了 28 卷雷达丛书，它详尽地包括了第二次世界大战期间 MIT 辐射实验室在微波雷达研究方面的出色成就。遗憾的是，第二次世界大战期间发展起来的其他雷达没有像 MIT 那样被记载下来。

50 年代代表雷达发展的一个动向是：又回到较低频段——VHF 和 UHF。40 年代，曾有过从 HF 和 VHF 向微波快速发展的趋势，高达 K 波段（1 cm 波长）。然而为了探测远距离的飞机与洲际导弹，回过头来又选用了 VHF 和 UHF 频段，因为在这两个频段内，可获得兆瓦级的平均功率，线性尺寸为大天线，另外 MT 和抗雨滴杂波也都比高频段好。在这十年中，还研制出了观察月球、极光、流星和金星的各种大型雷达。也是在这十年中，高功率速调管放大器首次在雷达中获得应用，它使雷达体系结构产生了巨大变化。与以往磁控管相比，它不但使功率幅值提高了约两个数量级，而且还可选用更复杂的发射波形（过去是简单的非相干脉冲序列），还允许多管并联。

雷达理论在 50 年代有了很大的进展。在此之前，雷达设计基本上是根据工程经验、技巧和人们判断进行的。雷达理论的引入使雷达设计具有比以往更扎实的基础。幸运的是，新发展的雷达理论与多年积累起来的工程实践经验并没有多大的矛盾，相反，它使工程经验更具有信赖性，还从理论上阐明了雷达技术的潜在极限，虽然不少理论工作在 50 年代还处于保密阶段，不能公开发表，但是雷达理论在工程设计中已经起到重要作用，已经被广大雷达工程师们所采用。归纳起来，这个时期所发明的雷达理论概

念有如下几个方面：匹配滤波器、统计监测理论、模糊函数、动目标显示（MIT）理论。

60 年代后期，数字技术的日益成熟引起了雷达信号处理的革命，直到今天这场革命还在继续。在以模拟技术为主的时候，雷达只能有限地被应用，只有数字处理技术才能使雷达理论付诸实践。目前，除了个别的模拟脉压器件外，雷达信号分析与数据处理几乎全部可用数字化来实现了。

1.3　雷达的工作原理

雷达技术就是利用电磁波对目标进行测向和定位。它发射电磁波对目标进行照射并接收其回波，经过处理来获取目标的距离、方位和高度等信息。雷达主要由天线、发射机、接收机（包括信号处理机）和显示器等部分组成。

雷达发射机产生足够的电磁能量，经过收发转换开关传送给天线。天线将这些电磁能量辐射至大气中，集中在某一个很窄的方向上形成波束，向前传播。电磁波遇到波束内的目标后，将沿着各个方向产生反射，其中的一部分电磁能量反射回雷达的方向，被雷达天线获取。天线获取的能量经过收发转换开关送到接收机，形成雷达的回波信号。由于在传播过程中电磁波会随着传播距离而衰减，雷达回波信号非常微弱，几乎被噪声所淹没。接收机放大微弱的回波信号，经过信号处理机处理，提取出包含在回波中的信息，送到显示器，显示出目标的距离、方向、速度等。

为了测定目标的距离，雷达准确测量从电磁波发射时刻到接收到回波时刻的延迟时间，这个延迟时间是电磁波从发射机到目标，再由目标返回雷达接收机的传播时间。根据电磁波的传播速度，可以确定目标的距离公式为：

$$S=CT/2$$

式中：S 为目标距离；T 为电磁波从雷达发射出去到接收到目标回波的时间；C 为光速。

雷达测定目标的方向是利用天线的方向性来实现的。通过机械和电气上的组合作用，雷达把天线的小事指向雷达要探测的方向，一旦发现目标，雷达读出此时天线小事的指向角，就是目标的方向角。两坐标雷达只能测定目标的方位角，三坐标雷达可以测定方位角和俯仰角。

测定目标的运动速度是雷达的一个重要功能。雷达测速利用了物理学中的多普勒原理：当目标和雷达之间存在着相对位置运动时，目标回波的频率就会发生改变，频率的改变量称为多普勒频移，用于确定目标的相对径向速度。通常，具有测速能力的雷达，例如脉冲多普勒雷达，要比一般雷达复杂得多。

雷达的技术参数主要包括工作频率（波长）、脉冲重复频率、脉冲宽度、发射功率、天线波束宽度、天线波束扫描方式、接收机灵敏度等。技术参数是根据雷达的战术性能与指标要求来选择和设计的，因此它们的数值在某种程度上反映了雷达具有的功能。例如，为提高远距离发现目标的能力，预警雷达采用比较低的工作频率和脉冲重复频率，而机载雷达则为减小体积、重量等，使用比较高的工作频率和脉冲重复频率。这说明，如果知道了雷达的技

术参数，就可在一定程度上识别出雷达的种类。雷达的用途广泛，种类繁多，分类的方法也非常复杂。我们通常可以按照雷达的用途分类，如预警雷达、搜索警戒雷达、无线电测高雷达、气象雷达、航管雷达、引导雷达、炮瞄雷达、雷达引信、战场监视雷达、机载截击雷达、导航雷达以及防撞和敌我识别雷达等。

1.4　从雷达到 GPS

雷达作为早期定位工具，为人们的工作生活提供了巨大的便利。但是，它也有自己的缺点，比如成本过高，定位精度较差等。受到雷达的工作原理启发，人们发明了 GPS 定位系统。进一步改善了定位的精度，降低成本。

1.4.1　GPS 系统及构成

全球定位系统（Global Positioning System，GPS）是美国国防部为军事目的而研制的导航定位授时系统，旨在彻底解决陆地、海上和空中运载工具的导航和定位问题。该系统从 1973 年开始设计研制，在经过了方案论证、系统试验后，于 1989 年开始发射工作卫星，1994 年全部建成并投入使用。GPS 利用围绕地球的 24 颗卫星发射信号进行经纬度和高度的定位，最早是为了在海军军舰上进行海上定位使用。GPS 围绕地球的 24 颗卫星成互差 120°的平面排列。也就是说理想状态下我们同时应该能够接收到 12 颗卫星所传来的信号。

GPS 卫星同时发射两种码：一种为 P 码，我们称之为细码；一种是 C/A 码，我们称之为粗码。P 码的精度非常高，通常可以控制在误差 3 m 以内，但只为军方服务。而我们使用的为 C/A 码，精度在 14 m 以内。

我们知道，如果知道两个坐标点，我们可以确定一个平面内的一点，如果知道三个坐标点我们就能够知道空间当中的任意一点位置。而 GPS 可以利用三颗卫星进行经纬度 X，Y 的定位，而四颗卫星可以进行经纬度和高度 X，Y，Z 三维定位，四颗卫星中三颗进行坐标定位，一颗卫星进行时钟校正。

1.4.2 完整的 GPS 包括三部分

1. 空间部分

GPS 的空间部分由 24 颗卫星组成（21 颗工作卫星，3 颗备用卫星），它位于距地表 20 200 km 的上空，均匀分布在 6 个轨道面上（每个轨道面 4 颗），轨道倾角为 55°。卫星的分布使得在全球任何地方、任何时间都可观测到 4 颗以上的卫星，并能使用在卫星中预存的导航信息。GPS 的卫星因为大气摩擦等问题，随着时间的推移，导航精度会逐渐降低。

2. 地面控制系统

地面控制系统由监测站（Monitor Station）、主控制站（Master Monitor Station）、地面天线（Ground Antenna）所组成，主控制站位于美国科罗拉多州春田市（Colorado

Spring)。地面控制站负责收集由卫星传回的讯息，并计算卫星星历、相对距离、大气校正等数据。

3. 用户设备部分

用户设备部分即 GPS 信号接收机。其主要功能是能够捕获到按一定卫星截止角所选择的待测卫星，并跟踪这些卫星的运行。当接收机捕获到跟踪的卫星信号后，就可测量出接收天线至卫星的伪距离和距离的变化率，解调出卫星轨道参数等数据。根据这些数据，接收机中的微处理计算机就可按定位解算方法进行定位计算，计算出用户所在地理位置的经纬度、高度、速度、时间等信息。接收机硬件和机内软件以及 GPS 数据的后处理软件包构成完整的 GPS 用户设备。GPS 接收机的结构分为天线单元和接收单元两部分。接收机一般采用机内和机外两种直流电源。设置机内电源的目的在于更换外电源时不中断连续观测。在用机外电源时机内电池自动充电。关机后，机内电池为 RAM 存储器供电，以防止数据丢失。目前各种类型的接收机体积越来越小，质量越来越轻，便于野外观测使用。其次则为使用者接收器，现有单频与双频两种，但由于价格因素，一般使用者所购买的多为单频接收器。

我们通常所说的 GPS 往往只有用户设备部分，它通过接收天空不同位置的三颗以上的卫星信号，测定手持机所在的位置。