



装备科技译著出版基金



高新科技译丛



Springer

Fundamentals of GPS Receivers:
A Hardware Approach

GPS接收机硬件 实现方法

【美】Dan Doberstein 著 王新龙 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

GPS 接收机硬件实现方法

Fundamentals of GPS Receivers:
A Hardware Approach

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记:图字:军一2013-005号

图书在版编目(CIP)数据

GPS接收机硬件实现方法/(美)多贝斯泰恩
(Doberstein, D.)著;王新龙译. —北京:国防工业
出版社,2013.3

(高新科技译丛)

书名原文:Fundamentals of GPS receivers: A
hardware approach

ISBN 978-7-118-08696-6

I. ①G... II. ①多... ②王... III. ①全球定位
系统(GPS)—接收机—硬件 IV. ①P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第035268号

Translation from English language edition:

Fundamentals of GPS Receivers

by Dan Doberstein

Copyright © 2012 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science+Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

※

开本 710×1000 1/16 印张 15 $\frac{3}{4}$ 字数 304千字
2013年3月第1版第1次印刷 印数 1—2500册 定价 58.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776

发行业务:(010)88540717

译者序

以 GPS 为代表的卫星导航定位系统性能优异,具有全球覆盖、全天候、高精度、三维导航定位、被动式测量以及抗干扰性能好等特点,目前已经获得了极为广泛的应用。可以说,凡是需要导航、定位、测量和定时的部门,都可以使用 GPS。GPS 的建成和应用,是导航技术的一场革命,影响深远。

GPS 卫星信号是一种可供无限多用户共享的信息资源。对于陆地、海洋和空间等应用的广大用户,只要拥有能够接收、跟踪、变换和测量 GPS 信号的接收设备,即 GPS(信号)接收机,就可以在任何时候使用 GPS 信号进行导航定位及定时。因此,当人们谈到“GPS”时,通常就是指 GPS 接收机,它也是 GPS 导航广泛应用的物质基础。根据使用目的的不同,用户所要求的 GPS 接收机也各有差异,类别多种多样,如军用与民用、C/A 码与 P 码、单频与双频、导航定位、授时与测量、手持、车载、机载、弹载、星载以及其它各种不同类型。近年来,GPS 接收机技术获得了长足的进步,其功能也越来越强大。

从目前国内已经出版的多种与 GPS 相关的书籍来看,涉及到 GPS 接收机硬件设计相关的书籍并不多见,《GPS 接收机硬件实现方法》一书的翻译与出版恰好解决了这一问题,它为国内广大从事 GPS 接收机以及其它卫星导航接收机硬件设计与开发的读者,提供了一套完善的 GPS 接收机理论体系和硬件开发与实现方法。

原书 *Fundamentals of GPS Receiver: A Hardware Approach* 的作者 Dan Doberstein 是一位从事 RF 与 GPS 接收机设计的著名专家,具有多年的理论研究和工程实践经验,在 GPS 接收机硬件设计方面积累了丰富的知识、经验和素材。该书从 GPS 导航定位的基础知识开始讲解,并逐渐向更先进更深入的内容过渡。书中重点讲述了 GPS 时间、运动的测量原理和 GPS 接收机核心功能的硬件实现。其中探讨了三种类型的 GPS 接收机设计与实现方法:第一种是作者依据理论和工程经验进行的自定义设计;第二种是行业标准设计,现已成为开源设计网络的一部分;第三种则涉及由喷气推进实验室(JPL)/美国国家航空航天局(NASA)设计的 GPS 接收机。每种 GPS 接收机的设计都非常独特,能够帮助读者对比理解在不同设计方案中针对同一问题的不同解决方法。部分章节也讨论了 GPS 载波相位测量和 GPS 时间与频率测量。对需要接触和了解 GPS 接收机硬件设计的人员,无论是科研人员、开发人员,还是学生、教师,相信都可以从这本书中获益良多。

本书由北京航空航天大学宇航学院教授王新龙博士完成翻译工作,并多次

校对译稿,竭力忠实于原著。北京航空航天大学 2010 级—2012 级研究生纪新春、王君帅、宋见、张洋、莫凡、何竹、管叙军、金光瑞等参与了部分章节的翻译,并对译稿的图表和文字进行了编辑整理。在本书申请装备科技译著出版基金的过程中,得到了国防工业出版社牛旭东等同志的大力帮助,译者在此表示最诚挚的感谢。

由于译者水平有限,译文中的不妥之处在所难免,敬请广大读者批评指正。

译者

原著前言

查阅目前关于 GPS 接收机设计的一些著作,就会发现其中的大部分内容都明显高于初学读者所能够接受的水平。这些著作认为,读者在开始阅读前就已经具备了相当程度的专业知识。而本书将尝试从一些最基本的概念和电路知识讲起,以使读者能够理解与掌握 GPS 接收机从天线到用户位置解算的工作原理。

编写这样一本书确属不易,因为 GPS 接收机的一些专业知识很容易使人陷入迷茫与困惑。许多论文和文献仅从接收机系统中抽取最后的细节——精度问题进行研究。而本书的主要目的是帮助读者理解“为了构造一个最简化的,且能够向用户提供约 300m 定位精度的 GPS 接收机系统,我们需要如何去做”。使读者明白,随着对位置和时间解算精度要求的提高,GPS 接收机也将变得越复杂。在完成 300m 定位精度目标的同时,读者将会掌握目前 GPS 接收机所共有的一些基本原理。希望届时,读者能够在此基础上进一步理解后续为了获得更高定位精度而需要掌握的一些相关新技术。

本书编写过程中的一个主要问题是考虑了读者的知识背景。由于书中不可能从与接收机所有相关的基础知识开始讲起。因此,读者需要具有的基本知识背景包括窄带模拟无线电接收机、数字电路原理、代数学、三角函数和微积分概念。书中关于用户位置方程的推算部分对数学知识的要求较高,线性代数和微积分也会涉及到。另外,书中尽量避免复杂的数学公式、方程推导及类似的内容,而采用了更为实用的方法,尝试应用尽量少的数学知识对相关概念和现象进行描述。

GPS 接收机需要解决两个最基本的问题:第一个是接收机自身,获取相对于每颗可见卫星的原始距离和多普勒值;第二个是对这些原始数据进行计算处理,以解算出用户的位置。这两个问题在一定程度上相互影响,而不能将二者完全分开考虑。因此,本书将分为三个部分进行阐述。

第 1 部分将向读者介绍 GPS 接收机的基本工作原理。将尽可能地使用简化的模型,并将探讨 GPS 信号和相关数据流的细节。拥有了这部分知识,在不涉及接收机硬件的前提下,对用户位置的解算进行分析。因此,理解本书的第 1 部分并不要求读者熟知无线电接收机的实现方法。

第 2 部分则研究了接收机的具体细节。为了能够完全理解书中讨论的内容,读者需要非常好好地掌握无线电原理。本文将使用混合设计的思想对接收机中所包含的概念进行阐述。尽管当今大多数商业接收机(或者并不是全部)均采用了 DSP 的实现方法,但作者认为从这些技术中很难学习到 GPS 的基本原理。文中所阐述的数字方法则相对容易理解,与其相对应的模拟部分也将会讨论到。

第 3 部分讲述了更为先进的接收机和相应主题。第 8 章中,将探讨 GPS 时间接收机、用于时间与频率测量的 GPS 接收机以及简单的时间传递。第 9 章,将以对 Zarlink GPS 接收机芯片组的讨论为引导,来介绍更加现代化的基于 DSP 技术的接收机。第 10 章和第 11 章,将提供一些最新的材料,这些材料主要与载波相位测量方法有关。第 11 章则论述了 Turbo Rogue 系列接收机,它是目前最为精确的 GPS 接收机之一。其中这一章中对新的 GPS L2C 信号以及 L2C 信号的接收方法进行了详细的阐述,第 12 章的内容由 Danilo Llanes 编写。

最后需要说明的是,许多读者可能会有这样一种观点,认为 GPS 仅是用于处理用户和卫星之间的物理位置。但随着读者对 GPS 学习的逐步深入将会发现,时间和运动才是 GPS 处理的本质问题。GPS 接收机正是通过对时间(时钟)的观测来测量运动的。结果是,在 GPS 接收机内部接收到的电子时钟信号也将认为在时间上是变化的,并直接关系到接收机/卫星系统的物理运动。

Nipomo, CA, USA

Dan Doberstein

目 录

第 1 部分

第 1 章 利用同步时钟进行距离测量的基本概念	2
1.1 距离测量的基本过程	2
1.2 关于使用的模型和 ICD-200 资料的讨论	2
1.3 通过测量到达时间实现定位	2
1.4 时钟同步的实际过程	3
1.5 神奇的双筒望远镜	4
1.6 利用简单的光脉冲发射机和接收机来测量距离	5
1.7 简单的光脉冲发射机/接收机系统的问题	6
1.8 一种新的时钟模型	6
1.9 一种线型的“时间传送”模型	8
1.10 时钟同步	9
1.11 接收机的时钟与 A 点、B 点处的时钟不同步的线型 时间传递模型	10
1.12 主时钟	12
1.13 时钟的秒计数表盘(改进的 TOW)	13
1.14 给照片加时间标签	14
1.15 接收机的时间延迟问题	15
1.16 拓展到 3D 空间内进行定位	16
1.17 总结	16
第 2 章 全球定位系统介绍	17
2.1 卫星系统	17
2.2 恰好经过用户头顶上方的 GPS 卫星轨道的物理参数	18
2.3 GPS 卫星时钟系统模型	19
2.4 在用户位置已知的情况下,用一个颗卫星来计算 T_{bias}	19
2.5 使用主时钟与延迟项 T_{atm} 的 GPS 时间接收机	20

2.6	用四颗卫星求解用户的位置	22
2.7	伪距	24
2.8	GPS 接收机的一种简化模型	24
2.9	接收机的参考振荡器	26
2.10	卫星位置信息	26
2.11	总结	27
第 3 章	GPS 信号结构及应用	28
3.1	GPS 卫星信号发射器模型	28
3.1.1	50Hz 数据的时间嵌入	30
3.1.2	BPSK 调制载波	30
3.1.3	复位线	31
3.2	虚拟时间对准	31
3.3	GPS 接收机中的 C/A 码	32
3.4	隐藏信号	32
3.4.1	数据隐藏和数据调制后载波的频谱	33
3.5	地表用户接收到的信号功率	34
3.6	P 码接收机	34
3.7	GPS 数据结构概述	35
3.8	多普勒问题	37
3.9	总结	38
第 4 章	卫星位置的求解	39
4.1	卫星的位置	39
4.2	坐标系	39
4.3	多时钟、一个主时钟和一个时间单位	39
4.3.1	卫星时钟修正项	40
4.3.2	星历的时间参考变量 t_{oc} 和 t_k	41
4.3.3	星历参考时间 t_{oc}	41
4.3.4	时间差 t_k	42
4.3.5	对任何给定的发送时间计算 t_k	43
4.3.6	关于 t_{oc} 和 t_k 时间量度的讨论	43
4.4	GPS 卫星轨道描述	44
4.4.1	解算卫星速度和位置的方程	44
4.4.2	二级和三级修正项	44

4.4.3	关于星历数据和求解卫星位置的几点讨论	47
4.4.4	其他卫星轨道信息和历书数据	50
4.5	数据项的年限和发布问题	50
4.6	t_{oc} 卫星时钟参考时间	50
4.7	总结	51
第 5 章	用户位置解算	52
5.1	迭代与直接解算	52
5.2	线性近似	52
5.3	四颗卫星的伪距方程组	53
5.4	解算参考伪距	53
5.5	求解每颗卫星的伪距估值	53
5.6	列写线性方程组	54
5.7	估算 ΔPR_i	54
5.8	矩阵形式的解算	55
5.9	流程图、C 代码程序、假设初始位置/用户时钟偏差	55
5.10	解算测试	56
5.11	几何因子	58
5.12	将地心地固直角坐标系下的用户坐标转换为经纬高坐标系	59
5.13	非球面地球的修正	59
5.14	总结	60
 第 2 部分		
第 6 章	GPS 接收机硬件基础	62
6.1	模拟与数字 GPS 接收机对比	62
6.2	GPS 接收机硬件的五个基本步骤	62
6.2.1	接收射频和转换到一个较低的中频	63
6.2.2	信号捕获	63
6.2.3	数据解调和数据时钟恢复	63
6.2.4	正确设置 1s 表盘和秒计数表盘	63
6.2.5	发射时间(T_{sent})与接收时间(T_{rec})测量	63
6.3	单通道接收机通用信号处理模块框图	64
6.3.1	天线	64
6.3.2	前置放大器	64

6.3.3	带通滤波和第二中频混频器	65
6.4	第二级中频处理概述	65
6.4.1	多普勒扫描/跟踪子系统	65
6.4.2	第二级混频器,第二级本地振荡器和多普勒 扫描/跟踪	66
6.4.3	相关器和 C/A 扫描/跟踪子系统	66
6.5	信号捕获	67
6.5.1	C/A 码时钟多普勒频移	67
6.5.2	码搜索与多普勒频移锁定需要的时间	67
6.5.3	利用先验信息缩短时间	67
6.5.4	信号捕获时间的估计	68
6.6	数据解调器	68
6.7	卫星副本时钟框图	68
6.8	数据时钟恢复问题(20ms 表盘副本时钟)	69
6.8.1	数据时钟相位恢复(设置 20ms 表盘)	70
6.8.2	噪声对 50Hz 数据抖动的影响	71
6.9	恢复 1s 表盘的正确相位	71
6.10	接收卫星时钟的秒计数表盘	71
6.11	生成 SNAP_SHOT 信号(接收机基准时钟)	72
6.12	在 SNAP_SHOT 瞬时记录卫星副本时钟	73
6.13	数据记录方法	73
6.14	数据处理	74
6.15	缺省 AGC	74
6.16	总结	74

第 7 章 GPS 接收机的功能实现

7.1	射频(RF)转换为第一中频(IF)	75
7.1.1	天线和前置放大器	75
7.1.2	1575MHz 带通滤波器	75
7.1.3	一级混频器、46MHz 中频和滤波器、中频信号 功率分配器	76
7.2	二次变频至 10.7MHz 中频	78
7.2.1	混频器和压控晶振去除多普勒频移	78
7.2.2	10.7MHz 带通滤波器和放大器	79
7.2.3	使用晶体滤波器的 10.7MHz 相关器	79

7.3	使用 SA615 处理 10.7MHz 中频信号	81
7.3.1	SA615 中频处理器	81
7.3.2	用 RSSI 功能进行相关检测和解调抖动调幅信号	81
7.3.3	50HZBPSK 数据正交检测	81
7.3.4	将 10.7MHz 中频信号限制到频率计数器	82
7.4	多普勒扫描跟踪子系统	82
7.4.1	频率计数器频率鉴别器	83
7.4.2	中心频率控制	83
7.4.3	数字多普勒环路滤波器	83
7.4.4	电平检测及扫描/跟踪	83
7.5	码跟踪	84
7.5.1	τ 抖动码锁定	84
7.5.2	码误差的异或检测	84
7.5.3	有源带通滤波器恢复 τ 抖动调幅信号	84
7.5.4	码误差符号位的抖动滤波	86
7.5.5	码时钟调制器	87
7.5.6	C/A 码发生器、卫星副本时钟、相位状态计数器和 锁定器	88
7.5.7	一个 C/A 码发生器 ω/τ 抖动的实例	89
7.6	信号捕获过程	91
7.6.1	信号搜索、搜索速率和交替方法	91
7.6.2	检测码或多普勒锁定情况以转换为跟踪模式	92
7.7	数据解调	92
7.7.1	数据解调框图及操作	92
7.7.2	50Hz 数据重置的 20 分频器模块	93
7.8	总结	94

第 3 部分

第 8 章	接收 GPS 时间和频率	96
8.1	时间和频率 GPS 接收机的速率和相位误差	96
8.1.1	GPS 接收机时钟速率和相位测量的仪表模型	96
8.1.2	报告速率和相位的精度和范围	98
8.1.3	修正和未修正的接收机时钟	98
8.1.4	典型接收机参考时钟系统和速率误差传播	99

8.2	估计接收机时钟速率和相位误差的限制	100
8.2.1	估计由于用户位置未知引起的预测多普勒误差	100
8.2.2	可检测的 L1 载波相位速率限制和时钟速率 误差精度	101
8.2.3	接收机参考时钟质量及速率误差限制	102
8.2.4	测量载波速率、多普勒、接收机时钟速率误差	102
8.2.5	估计接收机时钟速率误差	103
8.2.6	C/A 码相位测量对 L1 时间转换(时钟模式) 精度的限制	104
8.3	GPS 时间的初始估计	104
8.3.1	卫星到用户的信号延时	105
8.3.2	估计路径延时	105
8.4	验证接收机报告时钟速率和相位误差的真实性	107
8.5	采用基于 DDS 的接收机时钟介绍精确的速率和相位误差	109
8.6	GPS 自律振荡器	110
8.7	基于 10MHz 时钟的速率修正 DDS 5/10MHz 基准	112
8.8	GPS 时间转换中的接收机延时	116
8.9	天线相位中心	118
8.10	总结	119
第 9 章	卓联 12 通道 GPS 接收机	120
9.1	卓联 GP2015 射频下变频器	120
9.1.1	转换到 4.039MHz 中频信号的三个步骤	120
9.1.2	数字采样生成 1.405MHz 的中频信号	121
9.1.3	GP2015/2021 的时钟信号和复杂模型	122
9.1.4	起始时间(TIC)信号	122
9.2	卓联 GP2021 的 12 通道基带处理器	122
9.2.1	单通道框图	123
9.2.2	去除多普勒频移	123
9.2.3	C/A 码滑动相关器	124
9.2.4	C/A 码时钟发生器	125
9.2.5	即时(PROMPT)通道、超前、滞后和抖动码	125
9.2.6	C/A 码扫描和旋转	125
9.2.7	码相位计数器和码时钟相位	126
9.3	16 位累加器	127

9.3.1	16 位累加器是如何工作的?	127
9.3.2	清零(DUMP)信号	127
9.3.3	积分数字累加器	127
9.3.4	将数字累加器近似为模拟低通滤波器	128
9.4	一个多普勒环的模拟模型	129
9.4.1	假设压控振荡器的相位和频率是完全正确的	129
9.4.2	基带带宽可调以便于跟踪	130
9.4.3	多普勒,码扫描和阈值检测	130
9.4.4	多普勒捕获和跟踪	130
9.5	未锁定的输出波形近似的模拟模型	131
9.5.1	第一种情况,压控振荡器的频率误差为 90Hz	131
9.5.2	第二种情况,压控振荡器的频率误差为 10Hz	131
9.5.3	第三种情况,压控振荡器频率误差是 0,有很小的 相位残差	133
9.5.4	利用 I 路和 Q 路数据实现码锁定	133
9.6	从 I 路和 Q 路中获得鉴频器的信息	133
9.7	在 GP2021 中循环计数	135
9.8	总结	135
第 10 章	载波相位测量和 Turbo Rogue 接收机	136
10.1	载波相位距离测量的机械时钟模型	136
10.1.1	差分时钟表盘上观测到的纯多普勒频移和静态 相位偏移	136
10.1.2	差分时钟随多普勒频移改变符号而改变 运转方向	136
10.1.3	整周计数,部分周期以及符号问题	137
10.1.4	使用整周和小数周差分表盘测量距离, 积分多普勒	138
10.1.5	整周计数器的初始值	138
10.1.6	实现过程中的问题	138
10.1.7	周跳	139
10.2	L1 载波环路处理	139
10.2.1	L1 载波跟踪环的模拟基带模型	140
10.2.2	开环状态,输入信号是常值,环路滤波器 输入为零	140

10.2.3	开环状态, t_1 时刻输入信号频率以斜坡形式增加	141
10.2.4	$\delta\phi$ 是对卫星相对接收机(LOS 方向)的加速度的估计	141
10.2.5	环路滤波器对加速度和速度的加权求和	141
10.2.6	全数字基带载波环路	141
10.2.7	典型环路更新关系	142
10.2.8	$\sum \delta\phi_k$ 的初始值	142
10.2.9	累加载波相位的斜率可能倒转(即倒转曲线)	143
10.2.10	累积相位最典型的是总相位	143
10.2.11	提取已测的相位信息减去标称中频频率的循环数	143
10.2.12	累积载波相位的单位可以以周期或者计数等来定义	143
10.3	使用 L1 和 L2 载波相位表盘建立一个新的表盘	143
10.4	分析量测量和载波相位总积分 $\Phi(t)$ 的用途	145
10.4.1	分析载波相位总积分和它的用途	146
10.4.2	载波相位总积分的推导	147
10.4.3	$\Phi(t)$ 的误差和比率	147
10.4.4	$\Phi_1(t)$ 和 $\Phi_2(t)$ 的比率	147
10.4.5	$\Phi(t)$, 或者 $\Delta\Phi(t)$ 的单载波误差	148
10.4.6	载波相位之间的误差, $\Phi_1(t) : \Phi_2(t)$ (比率和各自的误差)	149
10.5	Turbo Rouge 接收机的时间精度和时间分辨率	149
10.5.1	载波相位干扰概述	151
10.5.2	Turbo Rouge 时间分辨率	151
10.5.3	Turbo Rouge 时间精度	152
10.5.4	Turbo Rouge 接收机内部产生的相位噪声	152
10.5.5	输入有相位量化噪声的载波跟踪环基带模型	154
10.5.6	载波处理中的时间抖动估计	155
10.5.7	Turbo Rouge 接收机采样相位分析总结	156
10.6	总结	157
	参考文献	157
第 11 章	JPL Turbo Rouge 接收机	158
11.1	L1C/A 码 TR 接收机	158

11.1.1	TR 接收机 L1 C/A 码通道处理的机械时钟模型	158
11.1.2	基于 22.156MHz 主振荡器的一种全一致设计	159
11.1.3	载波和码相位残差测量值	160
11.1.4	码片表盘和载波相位表盘的相位速率测量值	160
11.1.5	时钟同步装置	160
11.1.6	延迟或距离延迟估计 $\tau_{C/A}(t)$	160
11.1.7	依赖于载波速率的码速率	161
11.1.8	载波相位速率 $\Delta\phi$ 减去标称中频频率可以得到 码相位速率 $\Delta\tau_{C/A}$ 的原因	161
11.1.9	20ms 更新速率	161
11.2	综合 20ms 表盘机械模型和时间标签	162
11.3	TR 处理器结构框图	164
11.3.1	下变频和采样	165
11.3.2	基准时钟	165
11.3.3	累加器启动/停止的控制和处理	166
11.3.4	载波相位、码和码片表盘	166
11.3.5	C/A 历元信号、20ms 和 1s 计数器或副本 表盘的缺失	166
11.3.6	C/A 码发生器	166
11.3.7	从积分载波相位中提取载波相位 NCO 指令	167
11.3.8	控制相位和速率的载波相位环路	167
11.3.9	时间标签信息	167
11.4	TR 接收机的 DSP 运算和性能综述	168
11.5	GP 处理器执行 DSP 计算的细节	169
11.6	术语:反旋转器	171
11.7	TR 时间标签和延迟 $\tau_{C/A}$ 观测量的总结	172
11.8	总结	173

第 12 章 L2C 信号 174

12.1	引言	174
12.2	L2C 信号的历史	174
12.3	L2 信号要求	177
12.3.1	L2 信号结构	178
12.3.2	详述 L2C 信号	179
12.4	L2C 导航数据的解调	187

12.4.1	构建非 FEC 的传统导航数据	187
12.4.2	构建采用 FEC 的传统导航数据	187
12.4.3	构建民用导航数据电文	188
12.4.4	维特比解码器	188
12.5	观测量	190
12.5.1	伪距	191
12.5.2	相位	193
12.5.3	多普勒频率	196
附录 A	.....	197
附录 B	.....	211
附录 C	.....	218
附录 D	.....	224
附录 E	.....	226