

RUANJIAN JIESHOUI YUANLI
JI DUOJING WUCHA YANJIU

软件接收机原理 及多径误差研究

程 兰 编著



软件接收机原理及 多径误差研究

程 兰 编 著

国防工业出版社

· 北京

内 容 简 介

本书采用软件接收机的观点,详细介绍了 GPS 软件接收机原理,并对多径误差进行了深入研究。软件接收机原理方面的内容涉及 GPS 时间系统、坐标系、信号结构、定位原理、射频前端、信号的捕获与跟踪和影响定位精度的误差源等。多径误差研究方面的内容包括多径误差研究现状、多径误差建模以及多径误差消除算法。本书语言浅显易懂,实用性强,力求反映软件接收机和多径误差消除的新技术和新成果。

本书适合初学者自学,亦可供研究生和专业技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

软件接收机原理及多径误差研究 / 程兰编著. —北京:国防工业出版社, 2015. 2
ISBN 978-7-118-09959-1

I. ①软… II. ①程… III. ①GPS 接收机—误差—研究 IV. ①TN965.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 031158 号

※

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 13 字数 229 千字
2015 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 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

前 言

导航在人类文明的发展史上一直发挥着重要的作用,从古代的星象导航到现代的卫星导航,都是人类智慧的结晶。随着美国全球卫星导航系统(GPS)的建成和应用,卫星导航开启了人类导航的新时代,给人类的生活带来了巨大的变化,但因GPS的军用背景,给各国的国家安全也带来了威胁。为了打破GPS的垄断地位,很多国家开始组建自己的全球卫星导航系统,如俄罗斯的GLONASS、欧盟的Galileo系统以及我国的北斗卫星导航系统(BDS)。

作为卫星导航三大组成部分之一,接收机一直是研究的热点。随着我国BDS的发展以及国家政策的扶持,越来越多的工作者投入到北斗接收机的研究中。BDS和GPS一样采用码分多址信号,但BDS信号采用正交相移键控(QPSK)调制,GPS采用二进制相移键控(BPSK)调制,同时BDS信号的导航电文调制了二次编码并采用纠错编码方式,即BDS信号的调制和实现方法比GPS更复杂,在接收机的设计方面难度也更大。对于初学者来说,直接设计BDS接收机非常困难,如果先了解了GPS接收机的设计方法和步骤,再进行BDS接收机的设计就会容易得多。而软件接收机设计是研制各种硬件接收机时必须经过的阶段。本书以GPS软件接收机的设计为例介绍了软件接收机设计的一般原理和方法,并深入讨论了其多径误差抑制方法。

本书包括两大部分。第一部分为软件接收机设计的基本原理,由前7章组成,包括全球卫星导航系统的发展、GPS的时间系统和坐标系统、定位的基本原理、GPS信号组成、接收机前端、信号的捕获和跟踪以及影响定位结果的各种因素。这部分内容遵循从简单到复杂、从基本原理到具体实现的阐述方法,目的是让即使没有任何接收机设计的初学者也能通过自学的方法掌握软件接收机设计的一般方法。第二部分为接收机的多径误差研究,包括第八章、第九章和第十章,这部分内容专业性和理论性较强,适合具有一定通信基础知识且对接收机的跟踪环路比较熟悉的研究者阅读。其中:第八章对多径误差的国内外研究现状进行了详细的阐述;第9章对跟踪环路的多径误差进行建模和分析;第十章提出了两种多径误差抑制方法,分别适用于高斯噪声和非高斯噪声下的多径误差抑制。这部分内容是作者近年来研究成果的总结,能够反映当前国内外多径误差

的研究现状和发展趋势。

本书在撰写和出版过程中,田秀岩编辑给予了大力支持和帮助,王志远和郭雨帆同学为本书的文字校对提供了帮助,在此表示感谢。同时,对在撰写过程中给予我支持和帮助的家人也表示诚挚的谢意!

本书的出版得到了山西省自然科学基金项目编号:800104-02020180)和北京理工大学“复杂系统智能控制与决策”国家重点实验室开放基金(项目编号:900101-03910353)的资助。

由于作者水平有限,书中难免会出现错误和不妥之处,敬请读者不吝指正,可发邮件至 taolan_1983@126.com 与作者直接联系。

作者

2014 年 11 月

目 录

第一章 绪论	1
1.1 卫星导航系统的发展	1
1.1.1 GPS 的发展	1
1.1.2 其他卫星导航系统的发展	3
1.2 软件接收机	5
1.3 多径干扰	7
参考文献	7
第二章 GPS 中的时间系统和坐标系统	9
2.1 时间系统	9
2.1.1 UTC 时间	9
2.1.2 GPS 时间	10
2.2 坐标系统	11
2.2.1 地理术语	11
2.2.2 天球坐标系和地球坐标系	13
2.2.3 卫星轨道坐标系	14
2.2.4 ECI 坐标系	15
2.2.5 ECEF 坐标系	16
2.2.6 WGS-84 坐标系	21
2.2.7 站心坐标系	23
参考文献	26
第三章 GPS 定位原理	27
3.1 用户位置解算的基本方程	27
3.2 卫星位置的确定	28

3.2.1	摄动	29
3.2.2	发射时刻 GPS 系统时间的修正	29
3.2.3	卫星在 ECEF 坐标系中的位置	30
3.3	伪距测量	32
3.4	求解用户位置	33
	参考文献	35
第四章	GPS 信号和导航电文	36
4.1	GPS 信号	36
4.1.1	载波	36
4.1.2	伪码	37
4.1.3	数据码	41
4.2	导航电文	42
4.2.1	导航电文格式	42
4.2.2	遥测字和交接字	43
4.2.3	子帧匹配和奇偶校验	44
4.2.4	子帧 1 的导航数据	47
4.2.5	子帧 2 的导航数据	49
4.2.6	子帧 3 的导航数据	50
4.2.7	子帧 4 和子帧 5 的导航数据	50
4.3	伪距的获取	51
	参考文献	55
第五章	射频前端	56
5.1	天线与前端	56
5.1.1	天线	57
5.1.2	前端	57
5.2	相关知识	58
5.2.1	卫星信号的接收功率	58
5.2.2	前端的功率放大倍数	60
5.2.3	采样频率与理论中频	61
5.2.4	中频信号与基带信号	62

5.2.5 射频载噪比与基带信噪比	62
5.3 A/DC 量化电平和采样频率的选择	64
5.3.1 A/DC 量化电平	64
5.3.2 采样频率的选择	64
参考文献	65
第六章 信号的捕获与跟踪	66
6.1 信号捕获和跟踪的基本概念	66
6.2 信号捕获	68
6.2.1 基于滑动相关的捕获算法	69
6.2.2 基于 FFT 的捕获算法	70
6.3 信号跟踪	74
6.3.1 锁相环	75
6.3.2 数字延迟锁定环	77
6.3.3 数字载波跟踪环	84
6.3.4 伪码跟踪环和载波跟踪环的组合	91
6.4 将跟踪结果转换为导航数据	93
参考文献	93
第七章 接收机定位中的误差源	95
7.1 卫星星历误差	96
7.2 卫星钟误差	97
7.3 相对论效应	98
7.4 电离层延迟	99
7.5 对流层延迟	101
7.6 多路径误差	103
7.7 接收机噪声	104
参考文献	104
第八章 多径误差抑制问题	105
8.1 引言	105
8.2 多径误差研究现状	106

8.2.1	伪码多径误差	107
8.2.2	载波多径误差	109
8.3	多径误差消除技术研究现状	110
8.3.1	基于前端技术的多径误差消除	110
8.3.2	基于相关器和鉴相器的多径误差消除	111
8.3.3	基于数据处理的多径误差消除	113
	参考文献	117
第九章	多径误差建模	124
9.1	信号模型	124
9.2	系统描述	127
9.3	信号跟踪结构	128
9.3.1	信号跟踪的通用结构	128
9.3.2	传统的信号跟踪结构	129
9.3.3	基于鉴相器的抗多径信号跟踪结构	131
9.3.4	基于数据处理的抗多径信号跟踪结构	132
9.4	相干和非相干型 DLL 的误差建模与分析	133
9.4.1	问题描述	133
9.4.2	三种 DLL 的多径误差模型	134
9.4.3	基于 DLL 多径误差显式模型的载波多径误差模型	140
9.4.4	多径误差模型验证	142
9.4.5	多径误差分析	144
9.5	基于鉴相器的 DLL 多径误差建模	152
9.5.1	问题描述	152
9.5.2	误差建模	155
9.5.3	模型验证	161
9.5.4	多径误差理论分析	161
9.5.5	仿真验证与分析	162
	参考文献	166
第十章	基于数据处理的多径误差消除算法	169
10.1	高斯噪声下的多径误差消除算法	170

10.1.1	问题描述	170
10.1.2	基于 Kalman 滤波和 TK/LS 的多径误差消除算法	171
10.1.3	性能比较	176
10.2	非高斯噪声下的多径误差消除算法	183
10.2.1	问题描述	183
10.2.2	切片高斯混合滤波	184
10.2.3	扩展切片高斯混合滤波	186
10.2.4	扩展切片高斯混合滤波的实现	191
10.2.5	多径误差消除	193
	参考文献	198

第一章 绪 论

本章将讲述卫星导航定位系统的产生背景、发展和应用等基础知识,并介绍软件接收机和多径误差的研究意义。目的是让读者了解人类为什么要研制全球导航卫星定位系统(GNSS),其初衷和功能是什么,以及GNSS如何随着社会的发展而不断升级改进和多样化,明确软件接收机的研究意义和多径干扰对定位精度的影响。

本章1.1节将简要回顾人类追求定位自身位置的历史,介绍首个全球卫星定位系统(GPS),包括其发展、组成、功能、应用和现代化,概述除GPS外的其他卫星导航定位系统的现状。1.2节将阐述软件接收机的概念和研究意义。1.3节将介绍影响定位精度的因素,重点介绍多径干扰对定位精度的影响。

1.1 卫星导航系统的发展

人类历史从某种意义上可以看作人类对自身位置进行定位的发展史。从循声定位到烽火传信,从指南针到望远镜,从月距法到灯塔导航,从钟表法到卫星导航,都是人类定位自己或他人的方法。这些方法在不断改进和发展的过程中推动了其他领域的发展,例如:指南针的出现推动了电磁理论的研究;月距法促进了天文科学的发展;钟表法带来了钟表业的辉煌;而灯塔的制作使人类偶然发明了水泥,进而推动了建筑业的发展^[1]。对定位和导航理论的研究也延伸到了医学领域,2014年诺贝尔医学奖得主J. O'Keefe、M. Moser和E. Moser夫妇发现了大脑的定位系统,解决了“我们如何知道自己在哪里?我们如何从一个地方到另一个地方?我们如何在脑中存储这些信息,以便下次能够找到相同的路径”的问题,将会极大地推动医学领域的发展。卫星导航系统的发展和成熟使人类真正实现了对自己的定位和导航,而随着定位和导航理论的发展和应用,人类将不断加深对自身和大自然的了解和研究,进一步促进人类文明的发展。

1.1.1 GPS的发展^[2-6]

卫星导航在1957年10月4日拉开序幕,当天苏联成功地发射了世界上第

一颗名为 Sputnik 的人造地球卫星。Sputnik 的构造很简单,几乎只是一个无线电信号播发器,但在当时却引起了各国科学家的关注。美国约翰·霍普金斯大学应用物理实验室的 W. Guier 博士和 G. Wiffenbach 博士对该卫星发射的无线电信号的多普勒频移产生了浓厚的兴趣,他们的研究表明:利用地面跟踪站上测得的卫星信号的多普勒频移可以精确确定卫星轨道。对这项研究结果,应用物理实验室的另外两名科学家 F. McClure 博士和 R. Kershner 博士则做了反向研究,他们指出:对一颗轨道已被精确确定的卫星的信号进行多普勒测量,可以根据该测量值确定用户的位置。F. McClure 博士和 R. Kershner 博士的研究工作作为美国子午卫星系统的诞生奠定了基础。

子午卫星系统(Transit)是由美国海军研制、开发和管理的第一代卫星导航系统,其初衷是为了对“北极星”潜艇的惯性导航系统进行间断地、精确地校正。R. Kershner 博士的研究引起了美国海军的兴趣,1958 年美国海军资助了应用物理实验室开展进一步的研究,研究内容包括:研究子午卫星;建立地球重力场模型,以便准确地确定和预报卫星轨道;研制多普勒接收机。1964 年 1 月 Transit 正式投入军用,1967 年该系统解密并供民用,1996 年随着 GPS 的建成该系统宣告退役。Transit 是世界上第一个成功运行的卫星导航系统,但它仅能够提供精度较低的二维定位,定位精度为分米级至米级,且所需的定位时间也较长。

鉴于 Transit 的局限性,美国国防部(DoD)于 1973 年决定研制新一代的卫星导航与定位系统,即 GPS,以满足军用和民用领域对连续、实时和精确导航的需求。历经 20 年努力,耗资 200 亿美元,该系统终于建成并投入使用。1993 年 12 月 8 日,DoD 宣布 GPS 已具备初步工作能力。

GPS 共有 24 颗卫星,分布在 6 个轨道平面上,每个轨道面上有 4 颗卫星,轨道倾角为 55° 。各个轨道面之间相隔 60° ,6 个轨道面覆盖了全部 360° 的范围。卫星的轨道半径为 26560 km,运行周期为 11 h 56 min 04s。GPS 在 L1 波段上发射第一个民用的 C/A 码信号,并在 L1 和 L2 波段上分别发射两个军用的 P(Y) 码信号,称为 L1 P(Y) 码信号和 L2 P(Y) 码信号。

GPS 的定位精度可达 $\pm 15 \sim \pm 40$ m,该精度远远优于美国军方预先估计的精度。考虑到国家安全,美国于 1991 年 7 月 1 日起对所有卫星实施选择可用性(SA)政策,即通过人为地给卫星信号中加入干扰以降低定位精度。在 SA 政策下,未经许可的用户只能使用 GPS 提供的标准定位服务(SPS),其平面位置的定位误差为 ± 100 m,高程误差为 ± 156 m。而美国军方和盟国的军方以及美国政府授权的少数非军方用户可以获得精密定位服务(PPS),其定位精度为 ± 16 m 或更好。

随着国际形势的变化、民用领域对 GPS 需求的增长、俄罗斯全球卫星导航

系统(GLONASS)的建设,美国调整了 GPS 政策,于 2000 年 5 月 2 日宣布取消 SA 政策。美国 GPS 政策的变化,一方面是忌惮别国 GNSS 的精确定位威胁美国的国家安全,另一方面是害怕 GPS 在卫星导航领域的垄断地位被打破。因此,美国借助取消 SA 政策来宣扬建立新的 GNSS 是不必要的,同时为了巩固 GPS 的垄断地位,美国开始了 GPS 现代化的计划。GPS 现代化是为了更好地满足军事需要和扩展 GPS 民用市场而对全球定位系统实施的一项计划。在 GPS 现代化的实施过程中,新发射升空的 GPS 卫星信号首先在 L2 波段上增加播发第二个民用信号 L2C,并分别在 L1 和 L2 波段上增加播发名为 L1M 和 L2M 的军用 M 码信号,然后在 L5 频段上增加 L5C 的第三个民用信号,最后将在 L1 波段上增发第四个民用信号 L1C。这样 GPS 现代化实现之后,将有 4 个民用信号和 4 个军用信号。

1.1.2 其他卫星导航系统的发展

虽然美国取消了 SA 政策并开始了 GPS 的现代化建设,但其对 GPS 仍有绝对的控制权,而且 GPS 现代化的实质是加强 GPS 对美军现代化战争中的支撑和保持 GPS 在全球导航领域的霸主地位。因此,为了维护自身的国家安全,彻底摆脱对 GPS 的依赖,一些国家和地区开始积极发展自己的卫星导航定位系统,如俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 Galileo 系统、中国的北斗系统、日本的准天顶卫星系统(QZSS)和印度的区域卫星导航系统(IRNSS)。其中,GPS、GLONASS 和 Galileo 系统统称为 GNSS,而我国的北斗系统(北斗一代)和 QZSS 以及 IRNSS 为区域卫星导航定位系统。本书主要以 GNSS 系统为基础,介绍卫星信号的接收及其相关知识。

20 世纪 80 年代初,俄罗斯开始研制 GLONASS,意在打破美国对卫星导航的垄断地位。GLONASS 由分布在三个轨道平面上的 24 颗卫星组成,卫星轨道倾角为 64.8° ,这个较大的轨道倾角使其在高纬度地区具有比 GPS 更好的信号覆盖度。与 GPS 信号的码分多址(CDMA)技术不同,GLONASS 采用频分多址(FDMA)技术,即根据不同的频率来分辨不同的卫星信号。这种技术的优点是:敌方发出的干扰信号只会影响与其频率相仿的卫星信号,对其他卫星信号不会产生影响;不同卫星信号之间也不会产生严重的干扰;测距码的结构比 CDMA 要简单得多。缺点是 GLONASS 接收机的体积大、成本高,因为处理不同频率的卫星信号需要配备更多的前端部件。虽然俄罗斯一度因为资金问题终止了系统的扩建,导致 GLONASS 不能独立组网,但目前该系统正处于重建和现代化阶段。

2002 年 3 月,欧盟不顾美国政府的阻挠,决定启动伽利略(Galileo)系统的

建设计划,以使欧盟拥有自己的卫星导航定位系统。Galileo 系统的建设不仅能使欧洲在安全防务和军事方面保持主动,在航天领域继续充当重要角色,而且可以获得很好的社会效益和经济效益。Galileo 计划决定投资 36 亿欧元,整个卫星星座由 30 颗卫星组成,这些卫星均匀地分布在三个倾角为 56° 的轨道面上,每个轨道面有 9 颗工作卫星和 1 颗备用卫星。卫星轨道半径为 29600 km,运行周期为 14 h 7 min,地面跟踪的重复时间为 10 天。Galileo 系统不仅具有全球导航定位功能,还具有搜救功能,并向用户提供公开服务、安全服务、商业服务、政府服务等不同模式的服务,其中前两种服务对全体用户公开;后两种服务需要经过许可才能使用。

2000 年 10 月 31 日和 12 月 31 日,我国自行研制的两颗北斗导航试验卫星相继从西昌卫星发射中心升空并准确进入预定的地球同步轨道,组成了我国北斗一代卫星导航系统,随后我国又将另一颗备用卫星准确送入预定轨道。北斗一代导航系统于 2002 年试验运行,并于 2004 年全面对民用客户开放。该系统是一个区域卫星导航系统,为中国及周边地区提供定位和导航服务,具有定位、授时和双向短报文通信三大功能,并计划提供开放服务和授权服务两种方式。其短报文通信服务曾在 2008 年汶川大地震的搜救过程中发挥了重要作用。与 GPS、GNOLASS 和 Galileo 系统的被动式、单向定位不同,北斗一代导航系统是主动式、双向定位系统。其工作过程可以描述为:首先,用户设备接收卫星发射的信号,并向卫星发射应答信号;然后,卫星将应答信号送往地面中心控制站,由控制站计算出用户位置;最后,地面中心控制站将计算结果发射给卫星,并由卫星将结果告诉用户^[7]。北斗接收机具有接收和发射无线电信号的功能,因此其用户设备的体积和造价都比较大。同时,由于北斗接收机具有双向通信功能,使接收机的隐蔽性变差,在战时容易暴露用户位置,而 GPS、GNOLASS 和 Galileo 系统的单向定位则使其接收机更加轻便、隐蔽。在北斗一代的基础上,我国于 2007 年开始正式建设北斗二代卫星导航系统 (COMPASS),建成的 COMPASS 的空间星座由 5 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星、27 颗中圆地球轨道 (MEO) 卫星和 3 颗倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星组成。GEO 卫星轨道高度 35786 km,分别定点于东经 58.75° 、 80° 、 110.5° 、 140° 和 160° ;MEO 卫星轨道高度 21528 km,轨道倾角 55° ;IGSO 卫星轨道高度 35786 km,轨道倾角 55° 。截止到 2012 年底,在轨工作卫星有 5 颗地球静止轨道 (GEO) 卫星、4 颗中圆地球轨道 (MEO) 卫星和 5 颗倾斜地球同步轨道 (IGSO) 卫星。预计到 2020 年,30 颗 COMPASS 卫星将全部发生升空,建成全球性的卫星导航系统。

2006 年,日本政府开始筹建准天顶卫星系统 (QZSS),该系统旨在为日本及其邻近国家提供区域性卫星导航服务。QZSS 卫星星座由 7 颗卫星组成,包括 1

颗地球 GEO 卫星、3 颗 IGSO 卫星、3 颗大椭圆轨道 (HEO) 卫星,其中 1 颗 QZSS 卫星已于 2010 年 9 月 11 日发射升空。QZSS 除了发射与 GPS 和 Galileo 卫星信号兼容的导航信号以外,还播发 GPS、GNOLASS 和 Galileo 系统的差分校正量,与 GPS 和 Galileo 具有较好的兼容性和互操作性。另外,QZSS 采用的时间系统和坐标系统也与 GPS 几乎如出一辙。

与日本一样,印度在 2006 年也开始筹建属于自己的区域卫星导航系统 (IRNSS),并力图使其与其他的全球卫星导航系统和区域增强系统兼容。IRNSS 星座由 7 颗卫星组成,包括 3 颗 GEO 卫星和 4 颗 IGSO 卫星,其中 3 颗 GEO 卫星原本属于为南亚地区提供服务的印度 GPS 辅助型静地轨道增强 (GAGAN) 卫星。IRNSS 卫星在 L5 和 S 这两个波段上发射 CDMA 信号,该系统预计于 2015 年建成。

1.2 软件接收机

完整的 GNSS 是由三个独立部分组成:空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分。空间星座部分主要是指分布在太空中的卫星,这些卫星的主要功能是向地球发射导航信号,使地球上任一时刻都能观测到足够多数目的卫星。地面监控部分负责整个系统的平稳运行,包括若干个组成卫星跟踪网的监测站、将导航电文和控制命令播发给卫星的注入站和一个协调各方面运作的主控站,其功能是跟踪卫星星座并测量其发射的信号、计算各卫星的时钟误差以确保卫星时钟与系统时钟同步、计算各卫星的轨道参数、计算大气延时等导航电文中所包含的各项参数、更新导航电文数据并将其上传给卫星、监视卫星是否发生故障并发送卫星的轨道控制命令、启动备用卫星、安排发射新卫星等事项。用户设备部分主要是指接收机,负责接收、跟踪卫星导航信号。接收机通过一系列的数字信号处理,测量出卫星信号从卫星到接收机所经过的传播时间,并解调出导航电文,进而求出接收机的位置、速度和时间,即导航解算。

卫星导航系统的三大组成部分中,空间星座和地面监控站是实现定位的先决条件,而接收机真正实现对用户的定位,因为只有接收机才能最终输出用户的位置信息。随着不同卫星导航定位系统的建设,对需要利用卫星进行导航定位的用户而言是非常有利的,因为随着卫星定位系统的增加,空中的可见星数目也会随之增加,用户可以选择不同系统的卫星进行定位,以获得最优的几何精度因子,尽可能高地提高定位精度。但这也给接收机的研发带来了挑战和难题,因为不同的 GNSS、相同的 GNSS 提供的不同服务、相同服务的不同档次需求都需要不同的接收机。按照传统的硬件接收机的研制方法,不同接收机必须采用不同

的基带专用集成电路(ASIC),研发成本提高,研发周期加长。为了应对这种局面,出现了软件接收机。软件接收机不使用基带 ASIC,而是用可编程的微处理器或数字信号处理器(DSP)完成接收机的基带信号处理和导航解算。设计不同的接收机可能只需在现有的微处理器或 DSP 上修改程序,即只需采用不同的软件。因此,软件接收机具有方便灵活、开发成本低的特点。

所谓软件接收机,就是在接收机中融入了软件无线电的思想,其宗旨是在尽可能靠近天线处开始灵活可配置的软件化数字处理^[8]。软件接收机因其具有前端可重用性、软件可升级性、功能的可配置性以及平台的通用性、灵活性、开放性,而成为卫星导航接收机的重要发展方向。一方面,更靠近天线(或射频前端,RF)的软件数字信号处理,使设计者或研发者可以方便地利用数字信号处理的各种优化方法,获得高精度的观测量。例如,采用软相关器可以有效滤除 RF 中的带外噪声,采用多径干扰抑制技术可以消除多径信号的影响,这些方法可以有效改进接收机性能,提高定位精度。另一方面,对于从事科研和产品开发的人员而言,软件接收机可以作为深入接收机内部、尝试新算法、新应用和新系统的有效研发平台。而且,软件接收机在用户接收机的开发和测试中也一直发挥着重要作用。

自从美国空军研究实验室的 J. B. Tsui 于 2000 年出版了第一本基于软件无线电思想的 GPS 接收机专著^[9],越来越多的公司和研究机构投入到软件接收机的研制中。美国的 Data Fusion Corporation 于 2001 年推出了 Matlab/C Toolkits 形式的中频(IF)软件接收机,可以灵活测评各种技术改进^[10],并开发了信号源工具,形成了一套完整的 GPS 单频 L1 C/A 码软件接收机开发测试平台。国外其他公司和科研机构,如美国 Stanford 大学、瑞典的 Lulea 科技大学、美国的 Center for Remote Sensing Inc.、美国的 Cornell 大学以及日本的 Kyoto 大学^[11],都相继开发了自己的软件接收机。在国内,北京航空航天大学张其善教授领导的课题组于 20 世纪 90 年代末研制出了 GPS 软件接收机^[12]。近年来,以上海交通大学、北京理工大学、桂林电子科技大学、国防科技大学、电子科技大学、武汉大学、南京航空航天大学、复旦大学、浙江大学、哈尔滨工业大学等为代表的科研机构也加入了软件接收机的研究行列^[13-18]。虽然软件接收机在前期的产品开发过程具有很大的优势,但在实际应用中仍具有局限性。软件接收机通常需要对具有一定时长的接收信号进行处理,而且软件部分通常用高级语言来实现高性能的复杂算法,因此通常应用于实时性要求不高或需要数据后处理的场合,如测绘。

本书前 7 章采用读者易于接受的方式,使用浅显易懂的语言,介绍了 GPS 软件接收机设计的基本原理,希望能为从事软件接收机研究的人员提供参考。

1.3 多径干扰

随着 GNSS 和我国北斗卫星导航系统的深入发展,基于位置服务的需求在我国将会日益增长,而高精度定位已成为导航领域的研究热点^[19]。然而,接收机在输出最终的位置信息前受多种干扰的影响,这些干扰带来的误差可以分为系统公共误差和系统非公共误差。系统公共误差可以通过差分技术进行消除^[20-23],消除程度达到 90% 以上。系统非公共误差主要包括热噪声、动态跟踪误差和多径干扰。其中热噪声可以通过滤波技术进行消除,动态跟踪误差可以通过合理的设计接收机来控制。而多径干扰随着接收机天线位置和接收机位置的不同而不同,具有很大不确定性,不能通过差分技术、滤波技术或合理的接收机设计来消除^[24-26]。因此,为了实现高精度定位,必须采用高性能的多径误差消除算法,以消除多径干扰的影响。而软件接收机恰好为采用这种高性能的多径误差消除算法提供了便利,研究人员可以采用各种有效的数据处理方法实现多径误差抑制,而 DSP 在实现复杂算法时具有很大的优势。因此,多径干扰抑制已成为软件接收机领域的一个重要研究课题。

本书第八章到第十章,对多径干扰进行了深入研究,包括多径误差建模及其抑制方法研究。为了保证后三章内容的完整性,使其可以自成一体,本节并未对多径干扰的研究现状进行叙述,而是在第八章进行阐述。对于已有软件接收机相关知识的读者,可以直接跳到第八章阅读有关多径干扰的相关内容。

需要说明的是,通常所说的多径误差消除技术实际上并不能完全消除多径误差,总是存在残差,从这个角度来说多径误差消除应该称为多径误差抑制,而已有文献对这两个概念的区分并不明显,因此本书对这两个概念也并不加以区分。同时,本书借鉴了文献[2]、[9]和[27]等相关内容,这些专著确实是软件接收机研究领域非常优秀的书籍,所以读者会发现这些专著在某几章的参考文献后面重复出现。在此,对这些优秀书籍的作者表示感谢。

参考文献

- [1] 李孝辉,李静怡. 导航 1 号档案——导航方法之完全揭秘[M]. 北京:人民邮电出版社,2013.
- [2] 谢钢. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- [3] 谢钢. 全球导航卫星系统原理——GPS、格洛纳斯和伽利略系统[M]. 北京:电子工业出版社,2013.
- [4] 李征航,黄劲松. GPS 测量与数据处理[M]. 2 版. 武汉:武汉大学出版社,2010.
- [5] 中国卫星导航系统管理办公室. 北斗卫星导航系统空间信号接口控制文件:公开服务信号. 2.0 版. 2013 年 12 月.
- [6] 李跃,邱致和. 导航与定位——信息化战争的北斗星[M]. 2 版. 北京:国防工业出版社. 2012.