



弱信号全球导航 卫星系统接收机

GNSS Receivers for Weak Signals

(美) Nesreen I. Ziedan 著
张欣 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书由总装备部装备科技译著出版基金资助出版

弱信号全球导航 卫星系统接收机

GNSS Receivers for Weak Signals

(美) Nesreen I. Ziedan 著

张欣 译

国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字：军—2007—070 号

图书在版编目 (CIP) 数据

弱信号全球导航卫星系统接收机 / (美) 齐德娜
(Ziedan, N. I.) 著; 张欣译. —北京: 国防工业出版社,
2008. 5

ISBN 978 - 7 - 118 - 05452 - 1

I. 弱... II. ①齐...②张... III. 卫星导航—导航接收机
IV. TN965.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 175750 号

GNSS Receivers for Weak Signals

Nesreen I. Ziedan

© 2006 Nesreen I. Ziedan

Published by ARTECH HOUSE, Inc.

本书中文简体版由 ARTECH HOUSE 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 100044)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 9 字数 230 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

译者的话

GNSS(全球导航卫星系统)的应用几乎是无处不在的。美国的 GPS 导航系统已经深入且广泛地应用于诸多领域,俄罗斯的 GLONASS、欧盟的 GALILEO 以及我国的北斗导航系统等,也将逐渐地普及。在非常微弱的卫星信号环境中,例如室内、潜艇内部隧道或浓密的植被下,以及对静止轨道卫星和 HEO 卫星的定轨,传统的 GNSS 接收机几乎无法正常地工作。在这些特殊的应用场合下,就必须开发出适合于低 C/N_0 的卫星导航接收机的先进算法来。这是将本书推荐给国内从事该算法研究和开发的读者的目的。

从目前已经公开的各种 GNSS 接收机的文献来看,关于弱信号 GNSS 接收机的文献是不多见的。该书是国内外第一本以弱信号 GNSS 接收机为专题论述的公开出版的学术专著,它由美国著名的出版防御类电子工程专业图书的 Artech House 公司出版。目前,国内在弱信号 GNSS 接收机的算法研究方面还处于初期阶段,鉴于我国的深空探测、各种太空任务以及国防武器装备的需要,弱信号 GNSS 接收机也将会得到广泛的应用。希望该书中文译本的出版能为我国从事导航接收机研究和开发的科技人员提供有意义的参考。

本书的作者 N. I. Ziedan 博士曾经是加拿大卡尔加里大学电子工程系的一位研究型科学家,她拥有多项关于弱信号 GNSS 接收机的算法设计专利。开发运算效率高的弱信号 GNSS 接收机的算法是一件极其困难的事情,而 N. I. Ziedan 博士却将这些非常复

杂的弱信号处理算法设计得很精巧,应用于各种处理时间、程序存储空间以及电池寿命受限的不同 GNSS 接收机中。虽然可以通过书中介绍的十多种弱信号 GNSS 接收机算法来适应诸如强干扰、高动态、 C/N_0 小于 25dB - Hz 的各种应用环境,但是,我认为书中的部分算法仍可以进行精简和改进。因此,希望我国的相关学者和研究人员能够开发出各种新颖、先进的弱信号 GNSS 接收机算法。

笔者用了近半年的时间来完成此书的翻译工作,并反复校对其译稿,竭力忠实于原著。N. I. Ziedan 博士的写作风格简洁明了,因此,某些算法还需要读者去认真推演才会有所心得。在本书的翻译过程中,有很多朋友发来 E-mail 关心此书的翻译进程,这也促使我更加努力地保证本书的翻译质量;同时,本书的翻译还得到了钱小航、周世谊、李燕平、张林等同志的帮助。译稿中的部分框图和表格由曾瑄进行了重新绘制。在本书申请装备科技译著出版基金的过程中,还得到了国防工业出版社陈洁女士的大力支持,同时,也得到了电子科技大学皮亦鸣教授的帮助,在此表示最诚挚的谢意。由于译者水平有限,不妥之处在所难免,恳请读者予以指正 (xinzhang@ieee.org)。

译 者

前 言

在大多数应用中,需要有全球导航卫星系统(GNSS)的精确定位。一些应用存在于衰减的 GNSS 信号环境中,所接收的 GNSS 信号就变得非常微弱。这样的应用例子主要有无线设备定位、检测自然灾害的传感网络定位以及静止轨道卫星和高地球轨道(HEO)卫星的定轨。传统的 GNSS 接收机无法在弱信号下正常工作。本书将介绍在极弱信号下,能够正常工作的 GNSS 接收机的算法设计。

无线设备接收非常低的功率信号,由于周围环境所引起的衰减,例如,工作于室内或浓密的植被下,通常载噪比 C/N_0 小于 $25\text{dB} - \text{Hz}$ 。另外,这样的设备通常只有一个很小的处理器和较小的存储空间以及有限的电池寿命。

静止轨道和 HEO 卫星,它们位于 GNSS 星座之上,由于 GNSS 信号的高路径损失就使得接收的 GNSS 信号功率变得非常低。这是因为 GNSS 天线总是指向地球,所以传输信号不容易到达 GNSS 卫星以上的任何接收机。然而,天线的辐射方向图使得这些信号可以覆盖地球以外的空间,因而,地球背面的接收机可以接收到该信号。但是可视卫星的数量非常少,而且每个卫星只是在很短的时间可用。

本书集中讨论工作于各种动态条件下的弱信号 GNSS 接收机的有效算法开发,这些算法不需要来源于外界源(如网络)的任何辅助信息,它们可以在单台 GNSS 接收机上实现。开发的算法适合于所有接收机的主要功能,包括信号捕获、精细捕获、位同步、数

据检测、码和载波跟踪以及导航信息的解析。

已经开发的 15 种算法是：两种用于弱信号捕获算法；一种用于存在强干扰信号的弱信号捕获算法；一种用于高动态捕获算法；两种用于精细捕获和高动态精细捕获算法；两种用于位同步和数据检测算法；两种工作于低、高动态条件下的码跟踪和载波跟踪算法；一种检测和修正大的载波跟踪误差算法；一种检测和修正大的码跟踪误差算法；一种处理接收机动态的、大的突变算法；两种用于前导码识别、子帧识别及导航信息的解析算法。

在这些算法的设计中，依照的主要原则是满足处理时间和存储空间的需要，以便使得它们更能够适合某些资源受到限制的特定制应用场合。

本书的组织概览

本书组织如下：

- 第 1 章介绍 GNSS, 全球定位系统 (GPS) 信号结构, 不同捕获和跟踪技术, 新的 GPS 信号和伽利略导航系统的概述, 一些弱信号应用的摘要, 以及将应用于本书所介绍的算法中的一些技术概念。
- 第 2 章介绍关于码长的多普勒频移效应的详细推导, 同时提供了接收的和本地产生的信号模型。利用这些信号模型推导用于各种级别 GPS 接收机信号处理的模型。另外介绍时钟噪声模型。
- 第 3 章介绍所开发的弱信号捕获算法, 该算法也适合于存在强干扰信号的弱信号捕获和高动态捕获等问题。还讨论了虚警概率和检测概率的分析和推导, 介绍门限的计算。
- 第 4 章介绍精细捕获和位同步以及数据检测算法, 这些算法都基于维特比 (Viterbi) 算法 (VA) 和扩展卡尔曼滤波 (EKF)。同时介绍在高多普勒速率误差情况中的精细

捕获。

- 第5章介绍码跟踪和载波跟踪算法,这些算法是基于EKF方法的;介绍几种EKF的设计方案,包括一阶EKF、二阶EKF和平方根EKF;介绍一些增加失锁时间的方法。另外介绍了导航信息解析算法,该算法利用导航信息的结构对高误码率(BER)的信号进行译码。
- 第6章介绍诸算法及其性能的总结,同时分析和比较所开发的算法和一些传统辅助的(或未辅助)的捕获及跟踪算法。

作者简介

Nesreen I. Ziedan 在 2004 年 12 月在美国 Purdue 大学电子与计算机工程系获得博士学位;2000 年 3 月在埃及 Mansoura 大学控制与计算机工程系获得硕士学位;1998 年 9 月获埃及信息技术协会颁发的计算机网络荣誉证书;1997 年 7 月以第一名的成绩在埃及 Zagazig 大学电子工程系获得学士学位。

Ziedan 博士是加拿大 Calgary 大学的一位研究型科学家,长期受聘于埃及 Zagazig 大学计算机系统与工程系的助理教授职位。她的主要工作经历包括:2005 年任美国 Miami 大学任副研究员,1998—1999 年任埃及 Zagazig 大学计算机系统及工程系讲师,2004—2005 年任该校顾问。

Ziedan 博士曾入选 2004—2005 年美国名人录。她在 Purdue 大学攻读博士学位期间曾获得美国政府的全额奖学金。并荣获 1997—1998 年度的埃及信息技术学院奖学金;她还拥有各种荣誉称号。她荣获 1997 年度的埃及协会特殊贡献奖及荣誉会员称号。

Ziedan 博士涉足多个研究领域,包括全球导航卫星系统(GNSS)接收机的设计,惯性导航系统的 GNSS 深入集成,异步传输模式(ATM)的网络控制、拥塞控制和管理等软件设计以及局域网卡的设计和实现,人工智能和神经网络在通信和计算机上的应用,以及计算机安全和拒绝服务。

Ziedan 在弱信号 GNSS 接收机的算法设计方面还拥有多项专利(部分在申请)。

内容简介

本书是目前首部介绍弱信号全球卫星导航系统(GNSS)接收机算法设计的专著,共介绍了15种适合不同条件的弱信号GNSS接收机算法,涉及接收机的主要功能:信号捕获、精细捕获、位同步、数据检测、码和载波跟踪以及导航信息的解析等。书中主要讨论了两种弱信号捕获算法、基于维特比算法的精细捕获算法、基于扩展卡尔曼滤波理论的码和载波跟踪算法,还讨论了在多普勒频移和各种动态、随机突变条件下,导航卫星信号的捕获和跟踪等问题,并给出了每种算法的仿真结论。

本书的读者对象是从事扩频通信、弱信号卫星导航系统接收机算法研究和设计的人员,信息与通信工程、电子科学与技术等专业研究生和高年级本科生。

目 录

第 1 章 GNSS 原理概述及弱信号处理技术	1
1.1 引言	1
1.2 GPS 系统的组成	2
1.2.1 空间段	2
1.2.2 控制段	3
1.2.3 用户段	3
1.3 用户定位、速度及时间测量的原理	3
1.4 GPS 信号结构	5
1.5 GPS 导航信息结构	6
1.6 预相关信号处理	7
1.6.1 频率下变频	7
1.6.2 采样及量化	8
1.7 捕获技术的回顾	9
1.8 位同步及数据估计技术的回顾	15
1.9 卫星信号跟踪的回顾	18
1.9.1 传统 GPS 跟踪环	18
1.9.2 卫星信号跟踪技术	22
1.10 导航信息的译码	27
1.11 现代化的 GPS 及 Galileo 全球导航卫星系统	28
1.11.1 现代化的 GPS	28

1. 11. 2 Galileo 欧洲卫星导航系统	31
1. 12 弱信号应用	32
1. 12. 1 无线和室内的定位	32
1. 12. 2 静止和高地球轨道卫星的轨道确定	35
1. 13 一些技术概念的回顾	35
1. 13. 1 维特比算法	35
1. 13. 2 估计技术	36
1. 13. 3 卡尔曼滤波	38
1. 14 利用弱信号 GNSS 定位	41
1. 14. 1 弱信号定位问题	41
1. 14. 2 本书所开发的算法的评述	42
参考文献	43
第 2 章 信号模型	49
2. 1 引言	49
2. 2 接收信号	49
2. 3 码速率的多普勒效应	50
2. 4 本地信号	52
2. 5 捕获的信号模型	52
2. 6 精细捕获的信号模型	53
2. 7 跟踪的信号模型	55
2. 8 时钟噪声	58
参考文献	59
第 3 章 信号捕获	60
3. 1 引言	60

3.2	算法1:多重数据位循环相关	61
3.2.1	处理码长的多普勒效应	63
3.2.2	处理未知位边沿位置	64
3.2.3	处理未知数据位	65
3.2.4	消除多普勒仓	66
3.2.5	递增预检测积分时间	68
3.2.6	多重数据位循环相关的实现	69
3.2.7	确定最可靠的数据位组合	73
3.2.8	CCMDB 的计算量分析	76
3.3	算法2:修改的二倍分组块补零	77
3.3.1	多普勒效应的补偿	77
3.3.2	处理未知数据位和位边沿	80
3.3.3	MDBZP 算法的实现	80
3.3.4	计算量的分析	86
3.4	存在强干扰的信号检测	88
3.4.1	干扰能量小于所期望的信号能量	89
3.4.2	干扰能量大于或等于所期望的信号 能量	90
3.5	高动态捕获	91
3.5.1	捕获的多普勒速率效应	91
3.5.2	高动态捕获算法	94
3.6	检测概率和虚警概率	96
3.6.1	总积分	96
3.6.2	虚警概率	98
3.6.3	无数据组合的 p_f	99
3.6.4	有数据组合的 p_f	102

3.6.5	检测概率	107
3.6.6	门限计算	114
3.6.7	信号检测的损失	114
3.6.8	在存在强干扰情况下信号检测的 p_d 和 p_f	115
3.7	仿真及结论	116
3.8	小结	132
	参考文献	133
第4章	精细捕获和位同步及数据检测	134
4.1	引言	134
4.2	信号模型	135
4.3	捕获、精细捕获和位同步模块之间的关系	136
4.4	位同步和数据位检测算法	138
4.4.1	求解最小值	141
4.5	精细捕获的扩展状态 VA 算法	143
4.6	高动态的精细捕获	147
4.7	存在载波跟踪误差的位同步和导航信息检测	150
4.7.1	EKF 的 VA 算法	150
4.7.2	扩展卡尔曼滤波模型	152
4.7.3	EKF 估计	154
4.8	利用重复子帧	158
4.9	计算量的分析	160
4.10	仿真和结论	164
4.11	小结	175
	参考文献	176

第 5 章 码和载波跟踪及导航信息解析	178
5.1 引言	178
5.2 跟踪模块的相互关系	179
5.3 码跟踪	181
5.3.1 定时恢复和本地信号产生	182
5.3.2 EKF 算法的码跟踪	186
5.3.3 一阶 EKF 算法的码跟踪	194
5.3.4 二阶 EKF 算法	195
5.3.5 二阶 EKF 算法的码跟踪	197
5.4 载波跟踪	199
5.4.1 EKF 载波跟踪	199
5.4.2 平方根 EKF 算法	200
5.4.3 平方根 EKF 算法的载波跟踪	201
5.4.4 二阶 EKF 算法的载波跟踪	203
5.4.5 二阶平方根 EKF 的载波跟踪	204
5.5 导航信息解析	205
5.5.1 获得前导码	205
5.5.2 识别子帧 ID 号	206
5.5.3 重复子帧数据的译码	209
5.6 最小化失锁时间	211
5.6.1 自适应积分时间	212
5.6.2 自适应超前(或滞后)码时延间隔	214
5.6.3 载波参数的重初始化	216
5.6.4 码时延的重捕获	217
5.7 多普勒速率或多普勒频移随机突变的处理	218

5.8 计算量的分析	219
5.9 仿真和结论	220
5.10 小结	233
参考文献	234
第6章 摘要和总结	235
6.1 引言	235
6.2 算法摘要	235
6.3 捕获算法及其性能摘要	237
6.3.1 捕获算法的功能	237
6.3.2 捕获性能	238
6.4 精细捕获和跟踪算法的摘要及其性能	243
6.4.1 精细捕获和跟踪算法的功能	243
6.4.2 跟踪性能	244
6.5 新的民用 L2C 和 L5 GPS 信号	249
参考文献	250
缩略语	252
符号表	256
索引	260
作者简介	273

第 1 章 GNSS 原理概述及 弱信号处理技术

1.1 引言

目前,有两种正在运行的全球导航卫星系统(GNSS)^[1-3]:一种是受美国政府管理的全球定位系统(GPS);另一种是由俄罗斯联邦政府管理的全球轨道运行导航卫星系统(GLONASS)。新的GPS信号已经开发完成,并将开始发射具有现代化的Blocks IIR-M及IIF卫星。另外,在欧洲联盟(EU)和欧洲太空署(ESA)之间努力合作开发,并即将实现的一种新的称之为伽利略(Galileo)全球导航卫星系统,它将由民间来进行控制和管理。

在大多数新的GNSS应用中,因为实际运行的需要,已出现了超过传统GNSS接收机所提供的性能。这就是在GNSS接收机中开发适合不同应用需求的算法的根本动因。

本章将提供一些关于GPS导论性的材料,不同的捕获和跟踪技术,以及在本书算法中应用的一些技术概念,这将给读者提供本书中相关课题的概貌。

在本书中,术语算法(algorithm)及模块(module)将是指两种不同的事件。算法是指做某件事情的一种方法。而模块是一种对象或者说是一个实体;它涉及到完成一件任务的相互关联的算法集合。

本章组织如下:

第1.2节讨论GPS的组成;第1.3节讨论用户定位及速度、时间测量的原理;第1.4节给出GPS信号结构的概述;第