

GNSS 接收机 基带信号处理算法

何秋生 著



電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

GNSS 接收机基带信号 处理算法

何秋生 著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍全球卫星导航系统(GNSS)接收机基带信号处理算法和相应的电路结构。全书分为7章,共介绍了有关GPS的C/A码和Galileo的E1码的11种不同的基带信号处理算法,包括本地信号的产生、捕获和跟踪算法、抗远近干扰及抗多径干扰算法等。捕获算法包括串并行相关捕获算法、改变积分长度提高相关处理增益的捕获方法、匹配滤波捕获算法及快速捕获算法、弱信号的捕获算法等。跟踪算法包括多径干扰下的码跟踪算法、抑制互相关的高灵敏度码跟踪算法等。本书中还讨论了实现相关算法的电路结构及算法的仿真结果和结论。

本书适用于从事扩频通信、卫星导航接收机技术研究和设计的人员阅读、使用,也可以作为高等学校信息与通信工程,以及电子科学与技术专业的研究生的教学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

GNSS接收机基带信号处理算法 / 何秋生著. —北京: 电子工业出版社, 2012.9

ISBN 978-7-121-18316-4

I. ①G… II. ①何… III. ①卫星导航—全球定位系统—信号处理—算法 IV. ①TN967.1②P228.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第212187号

策划编辑: 赵 娜

责任编辑: 谭丽莎

印 刷:

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 12.25 字数: 274千字

印 次: 2012年9月第1次印刷

定 价: 36.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

总 序

2012年，太原科技大学将迎来60周年华诞。值此六秩荣庆之际，我校的专家学者推出了这套学术丛书，以此献礼，共襄盛举。

六十年前，伴随着新中国的成立，伟业初创，百废待兴，以民族工业为先锋的社会主义现代化建设蓬勃兴起，太原科技大学应运而生。六十年来，几代科大人始终心系民族振兴大业，胸怀制造强国梦想，潜心教书育人，勇担科技难题，积极服务社会，为国家装备制造行业发展壮大和社会主义现代化建设做出了积极贡献。四万余名优秀学子从这里奔赴国民经济建设的各个战场，涌现出一大批杰出的科学家、优秀的工程师和知名的企业家。作为新中国独立建设的两所“重型机械”院校之一，今天的太原科技大学已发展成为一所以工业为主，“重大技术装备”领域主流学科特色鲜明，多学科协调发展的教学研究型大学，成为国家重型机械工业高层次人才培养和高水平科技研发的重要基地之一。

太原科技大学一直拥有浓郁的科研和学术氛围，众位同仁在教学科研岗位上辛勤耕耘，硕果累累。这套丛书的编撰出版，定能让广大读者、校友和在校求学深造的莘莘学子共享我校科技百花园散发的诱人芬芳。

愿太原科技大学在新的征途上继往开来、再创辉煌。

谨以为序。

太原科技大学校长 郭勇义

2012年6月

序

自 1980 年美国的全球定位系统 (GPS) 正式运行以来, 导航领域步入了一个全新的时代, 此后前苏联的 GLONASS 系统、中国的北斗系统及欧洲的 Galileo 系统相继出现, 将卫星导航技术的应用推向普及。现在, 无论你身处地球的哪个地方, 只要凭借手中的全球卫星导航系统 (GNSS) 的接收机, 你就会知道你的精确位置。三十多年来, GNSS 的应用范围也得到了极大的扩展, 从军用领域的导弹制导, 舰船和飞机导航, 延伸到民用的智能交通、大地测量、精细农业、户外探险、海事救援等许多领域, 使我们更深入地了解了我们所赖以生活的地球。如同计算机、移动通信和网络技术一样, GNSS 系统也悄然改变着我们的生活方式。

目前国内在卫星导航领域的研究正迅速开展, 然而国内有关 GNSS 接收机技术的著作并不多, 而且多为译著, 其内容主要是关于软件接收机的相关算法和程序实现。电子科技大学张欣翻译的美国 Nesreen I. Ziedan 的《弱信号全球导航卫星接收机》一书, 介绍了一些软件接收机中弱信号接收的一些算法, 并没有涉及具体电路, 其他如 BaoYinTsui 的《软件接收机》一书也是如此。作者写这本书的目的是介绍一些硬件相关的算法, 使大家能够了解这些算法在接近硬件的层面上如何实现。本书的作者从事 GNSS 接收机技术研究多年, 2005 年至 2007 年, 我与作者一起从事过欧洲伽利略计划的中国 Galileo 测试接收机 (CGTR) 项目, 以及后来的高性能 GPS 接收机基带芯片的开发, 这些经历使作者在基带信号处理方面积累了丰富的经验。

本书是一部关于 GNSS 接收机基带信号处理的学术著作, 主要包括 GPS 系统 C/A 码信号, 以及 Galileo 系统 OS 信号的捕获与跟踪算法, 这些算法都来自作者本人及与合作者共同发表的论文、申请的专利, 且其中一些内容涉及所从事项目的核心技术。出于保密原因, 本书的内容无法涵盖相关技术的全部细节, 但希望能为相关学者和研究人员提供借鉴, 以开发出更先进、更新颖的算法, 共同推动 GNSS 接收机技术的发展。

程亚奇



中国科学院微电子研究所

2012 年 5 月

前 言

全球卫星导航系统 (GNSS) 是一个包括美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、欧洲的 Galileo 和中国的 CNSS 等系统在内的综合星座系统。未来若干年内, GNSS 将经历前所未有的重大转变, 从单一的 GPS 变为多系统并存且各具特色的全球卫星导航系统: 2013 年左右, 美国将完成 GPS 的现代化进程; 近几年, 俄罗斯的 GLONASS 正在快速复苏和进行技术更新; 2020 年左右, 由 5 颗地球静止轨道和 30 颗地球非静止轨道卫星组网覆盖全球的中国卫星导航系统将建设完成; 欧洲的 Galileo 的建设虽然受到各种因素的影响而延期, 但是系统的建设应该只是时间问题; 日本、印度等国家也在规划着自己的全球卫星导航系统。

随着 GNSS 的建设和完善, 系统信号的结构越来越复杂, GNSS 接收机的结构也越来越复杂。目前, 关于 GNSS 的捕获跟踪算法的研究成果也很丰富, 但是它们的理念各异, 形式多样。本书是作者近年来在 GNSS 信号捕获和跟踪方面科研成果的总结。本书共分 7 章, 内容可分为以下几部分。

(1) 第 1、2 章介绍了 GNSS 信号的特性, GNSS 接收机的结构和 GNSS 接收机常用的信号捕获和跟踪技术。

(2) 第 3 章介绍了 GNSS 信号的数字下变频算法, 以及下变频过程中的离散正弦和余弦波形成算法。

(3) 第 4 章介绍了作者研究的 GNSS 信号的捕获算法, 尤其是基于时分复用技术的相关捕获算法和匹配滤波器的捕获算法的研究, 最后还对影响匹配滤波算法的因素做了详细分析。

(4) 第 5 章介绍了作者研究的 GNSS 信号的跟踪算法, 包括码环设计、载波环设计、窄相关码跟踪算法研究、抑制强信号干扰弱信号的跟踪算法研究, 以及基于位跳变检测提高 GPS 信号处理增益的算法研究等。

(5) 第 6、7 章介绍了 GNSS 接收机基带处理单元结构的设计 (主要包括时分复用通道结构的设计、抗远近效应接收机结构的设计和抑制多径干扰跟踪环路的设计等), 以及基带信号处理算法在 GNSS 接收机中的应用。

本书中还讨论了实现相关算法的电路结构, 以及算法的仿真结果和结论。

本书是在太原科技大学博士科研启动项目《多星座卫星导航接收机捕获方法的

研究》(项目编号: 200779)的研究基础上, 进一步研究完善而成的。本书在理论研究的同时, 注重理论和实践相结合, 并且首次在学校开设并讲授了校级选修课程《全球定位系统原理及应用》。

本书的完成得到了山东科技大学郝建军老师的大力支持及多方面的指导; 西安华迅微电子有限公司在部分算法的验证方面给予了大力支持; 太原科技大学自动化教研室各位同人给出了意见或建议。在此对他们表示诚挚的谢意和衷心的感谢! 在本书内容的研究和撰写过程中, 笔者参考了许多研究文献和相关资料, 在此, 向书中引用到其学术论著及研究成果的中外学者同行致谢。

在本书出版之际, 由衷地感谢中科院微电子所程亚奇研究员为本书作序。

因笔者水平的限制, 难免存在不妥之处, 恳请相关领域的专家、学者及广大读者给予批评指正。

何秋生

2012年6月

目 录

第1章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 GNSS 接收机的结构	(4)
1.3 常用信号捕获技术	(5)
1.4 常用信号跟踪技术	(7)
1.5 本书的安排	(7)
第2章 GNSS 系统信号特性	(9)
2.1 GPS 信号特性	(9)
2.1.1 C/A 码调制信号特性	(9)
2.1.2 自相关函数和功率谱密度	(12)
2.2 GPS 信号功率电平	(14)
2.3 Galileo 系统信号特性	(15)
2.3.1 BOC 调制	(15)
2.3.2 MBOC 调制	(20)
2.3.3 BOC 调制信号的频谱和相关函数	(25)
2.4 GLONASS 信号特性	(29)
2.5 北斗系统信号特性	(30)
第3章 GNSS 信号的数字下变频算法	(32)
3.1 数字下变频器的原理及实现	(32)
3.1.1 数字下变频器的原理	(32)
3.1.2 数字下变频器的实现方法	(34)
3.2 快速计算特殊角度的正弦和余弦值	(35)
3.2.1 传统特殊角度的正弦和余弦值的算法	(35)
3.2.2 快速生成正弦和余弦离散波形的算法	(38)
3.2.3 三种算法计算精度的比较	(42)
3.3 直接数字下变频抽取算法	(43)
3.3.1 压缩抽取算法的原理	(44)
3.3.2 DDC 对灵敏度和精度的影响分析	(47)

3.3.3	直接数字下变频压缩抽取算法的仿真	(48)
3.3.4	算法总结	(51)
3.4	本章小结	(51)
第4章	GNSS 信号的捕获算法	(52)
4.1	优化的串并行时分复用相关捕获算法	(52)
4.1.1	影响捕获 GNSS 信号的因素分析	(52)
4.1.2	传统的捕获方法	(57)
4.1.3	优化的混合串并行时分复用相关捕获算法	(62)
4.1.4	优化的混合串并行时分复用相关捕获方法的性能分析	(70)
4.2	匹配滤波捕获算法	(73)
4.2.1	匹配滤波捕获算法设计的理论基础	(73)
4.2.2	优化的数字匹配滤波捕获算法	(77)
4.2.3	影响优化匹配滤波捕获算法的因素分析	(87)
4.3	本章小结	(94)
第5章	GNSS 信号的跟踪算法	(95)
5.1	码跟踪环的设计	(95)
5.2	载波跟踪环的设计	(99)
5.3	GPS 信号的窄相关码跟踪算法	(102)
5.3.1	传统多径干扰抑制方法	(102)
5.3.2	窄相关抗多径算法	(104)
5.3.3	基于相关函数形变估计的多径误差补偿方法	(109)
5.3.4	多径估计辅助的 LMS 信号合成方法	(113)
5.4	抑制强信号干扰的弱信号跟踪算法	(115)
5.4.1	卫星信号的互相关特点	(115)
5.4.2	互相关抑制算法	(121)
5.4.3	多普勒效应影响下的互相关特性	(132)
5.4.4	计算频移下粗码之间的互相关值	(134)
5.5	基于位跳变检测提高 GPS 信号处理增益方法	(137)
5.5.1	位跳变检测原理	(137)
5.5.2	基于位跳变检测提高增益的方法	(140)
5.5.3	位跳变检测方法的仿真结果	(142)
5.6	本章小结	(144)

第6章 GNSS 接收机基带处理单元结构的设计	(145)
6.1 时分复用多通道捕获结构的设计.....	(145)
6.2 强信号干扰弱信号的问题.....	(148)
6.2.1 远近效应情况下弱信号的捕获.....	(148)
6.2.2 远近效应情况下弱信号的跟踪.....	(149)
6.3 抗远近(强弱)效应接收机结构的设计.....	(151)
6.3.1 逐次干扰消除(SIC)抑制伪卫星强信号干扰算法.....	(151)
6.3.2 子空间投影法.....	(151)
6.3.3 伪卫星测试场环境.....	(153)
6.3.4 接收机分离通道结构设计.....	(155)
6.3.5 MATLAB 仿真及结果分析.....	(156)
6.4 抑制多径干扰跟踪环路的设计.....	(159)
6.5 本章小结.....	(162)
第7章 基带信号处理算法在GNSS接收机中的应用	(163)
7.1 捕获算法在GNSS接收机中的应用.....	(163)
7.1.1 HXM001-BB 芯片中的相关处理.....	(163)
7.1.2 HXM002-BB 芯片中的信号处理.....	(165)
7.2 多径处理算法在HXM001芯片中的实现.....	(165)
7.3 HXM001 芯片组的性能测试及功能验证.....	(166)
附录 缩略词	(170)
参考文献	(178)

第 1 章 绪 论



1.1 引 言

全球卫星导航系统 (GNSS) 最初是在军事应用背景的情况下出现的, 随着社会的发展, 它在民用方面的应用也迅速而广泛地发展起来, 这个情况恐怕连 20 世纪 80 年代初最乐观的预言家也没有预料到。卫星导航系统的出现极大地促进了人类对所赖以生存星球的全面且深入的认识, 也为人类的生活带来了极大的方便。

卫星导航定位系统是一种以卫星为参考基准的无线电导航系统 (RNSS), 包括全球卫星导航系统和区域卫星导航系统。与其他陆基导航系统不同的是, 卫星导航定位系统的参考基准是运动着的卫星, 包括中轨道卫星和同步卫星, 这些卫星的运行轨道是预知的。目前, 世界上已有的卫星导航定位系统主要有美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS、中国的北斗系统 (Compass, 也称 CNS) 和欧盟的伽利略卫星导航系统 (Galileo) 及欧洲的 EGNOS 区域增强系统, 还有日本正在规划的“准天顶”系统和印度筹划研发的“印度区域导航卫星系统” (IRNSS)。导航卫星定位系统的出现, 解决了大范围、高精度快速定位的问题。卫星导航定位系统最早应用于定位和导航, 是为车、船、飞机和导弹等机动工具提供导航定位信息的。随着技术的发展与完善, 卫星导航定位系统在交通运输业、航天飞行、精细农业、林业、渔业、土建工程、矿山、物理勘探、资源调查、陆地与海洋测绘、地理信息产业、海上和沙漠中石油作业、地震预测、气象预报、环保研究、电信、旅游、娱乐、个人移动电话定位、管理、社会治安、医疗急救、搜索救援及时间传递、电离层测量等领域已得到大量应用^[1~7], 显示出了巨大的应用潜力。

GPS 作为第一个全球卫星导航系统, 自 1980 年正式投入运行以来, 已经发展成一个涵盖各领域的服务系统, 其接收机技术在近 30 年的时间里得到了突飞猛进的发展。目前, 大型的 GPS 生产商已经有几十家, 如美国的 SiRF、Zarlink、Nemerix



和 Trimble、Gaeming、Magellan，瑞士的 u-Blox，日本的 Sony、NEC，加拿大的 SiGe 和 NovAtel，荷兰的 PHYLIPS 及法国的 THALES 等来自各个国家的公司正在开发自己的 GPS 接收机芯片组或接收机，而且各有特点。接收 GLONASS 信号的接收机主要是由圣·彼得堡的俄罗斯无线电导航和时间研究所、Kampas 设计局联合俄罗斯科学和航天研究所一起来设计的，由于星座完整性的影响，因而其生产厂家也仅有几家，如莫斯科无线电厂，NPO 航天设备工程公司等。

Galileo 系统信号的接收机主要由已经与欧盟签署协议的几个国家的公司或集团来设计和生产，如加拿大的 NovAtel 公司、比利时的 Septentrio 公司、德国的 Ifen 研究所、中国电子集团第 20 所和第 54 所、捷克技术大学等。2007 年，MAXIM 公司宣布推出首款兼容 GPS、Galileo 和 GLONASS 的芯片 MAX2769E/W。随后，SiGe 公司也宣布推出首款单片兼容 GPS 和 Galileo 的芯片 SE4120L。但是这些芯片都是 RF 前端芯片，至今并没有完整的 GPS 和 Galileo 兼容芯片组。常用的接收机类型如表 1-1 所示。

表 1-1 常用的接收机类型

分类方法	接收机类型
按照用途	军用，民用，导航，测地，授时
按照接收的频率	单频接收机、双频接收机及多频接收机
按照通道	多通道接收机、序贯通道接收机及多路多用通道接收机
按照工作原理	码相关型接收机、平方型接收机、混合型接收机及干涉型接收机等
按照芯片组的数量	多芯接收机、双芯接收机及单芯接收机
按照处理信号的类型	模拟接收机、数字接收机及全数字接收机
按照信息的来源	自主接收机和辅助接收机
按照工作模式	单点定位、相对定位和差分定位
按照编码信息	有码接收机和无码接收机

从开放的文献来看，这些单位和厂家基本上都是在使用专用的数字处理芯片或芯片组来设计和生产接收单个卫星星座信号的接收机的，后来出现了 GPS/GLONASS 兼容接收机。随着 Galileo 系统的启动和 Galileo 信号的传送，一些文献开始提出要开发兼容多个卫星定位系统的接收机^[8-12]。由于 GPS 和 GLONASS 的定位精度差距较大，所以 GPS/GLONASS 兼容接收机对精度的提高作用并不大。Galileo 系统的出现，为多星座联合定位提高精度提供了可能，如德国 Ifen 公司的 Andreas Schmid



等人提出针对消费市场应用的联合 Galileo 和 GPS 的接收机结构^[13]。以 Ifen 为主的联盟启动了 HIGAPS (High sensitivity Galileo/GPS) 项目, 其目的就是为了开发大规模集成化的 Galileo/GPS 接收机芯片组, 它主要瞄准将来 Galileo 与 GPS 集成后的 OS 市场。该联盟包括 Infineon、Fraunhofer 等。美国的兰德 (RAND) 公司经过分析, 发现 Galileo OS (Open Server) 与 GPS 结合后, 能得到精度上的改善。其实在性能上, Galileo 系统本身比增强 GPS 系统并没有显著改进, 但 Galileo/GPS 兼容接收机比单一的 GPS 或 Galileo 接收机将在定位灵敏度、精度、完好性、可用性、连续性等方面得到改善, 如表 1-2 所示。

表 1-2 Galileo/GPS 的双模精度改善

	10°仰角, 遮蔽, 单频		10°仰角, 遮蔽, 双频		30°仰角, 遮蔽, 单频	
	Galileo OS	Galileo OS	Galileo OS	Galileo OS	Galileo OS	Galileo OS
模式		+GPS		+GPS		+GPS
水平精度 (m)	15	7~11	4	3~4	14~54	11~21
垂直精度 (m)	35	13~26	8	6~8	21~81	17~32

比利时的 Septentrio 公司于 2004 年夏开发了世界上第一台 Galileo 接收机, 该接收机具备同时接收 Galileo 与 GPS 信号的能力。现在, 欧空局 (ESA) 已经开始从 Septentrio 公司订购接收机, 而且也签下了下一阶段的 Galileo 用户测试接收机的合同, 即由 Septentrio, QinetiQ, Delft University of Technology, UrsaMinor, OMP, Deimos 和 SkySoft 等组成的联盟来开发 Galileo 在轨验证阶段的用户测试接收机^[14]。

2005 年 5 月, NovAtel 为加拿大空间局 (CSA) 演示了北美第一台 Galileo/GPS 多模双频 (L1/E5A) 接收机, 并获得了 CSA 160 万美元的新合同以进一步开发 Galileo 接收机。这台 Galileo 接收机是 NovAtel 在其 GPS 接收机 WAAS-G2 上进行改进而得到的产品。

还有前面介绍的德国的 Ifen 公司也针对在以后的 Galileo 与 GPS 集成后的 OS 市场中开发兼容两个系统甚至多个系统的接收机芯片组, 提出了多种方案。

以上介绍了目前接收机的开发情况, 从中不难看出, 各个国家及公司都在致力于开发相关芯片组以实现接收卫星信号的能力。但是从 GPS 接收机的开发过程及更新过程可以看出, 芯片组的开发每更新一次都需要几年的时间, 如著名的 GPS 芯片组开发公司 SiRF 从第一代三片组合接收、处理 GPS 信号到两片芯片接收、处理 GPS 信号, 直到实现单芯片接收、处理 GPS 信号耗费了 10 年的时间。

1.2 GNSS 接收机的结构

GNSS 接收机的主要功能是首先接收并处理来自导航卫星的信号，并将卫星信号所携带的导航电文解调出来，然后由导航解算软件按照导航电文提供的参数将接收机当前所处的位置解算出来，并输出地理位置、移动速度等信息。接收机主要由天线部分、射频部分、基带信号处理部分、导航解算部分及外接终端设备等构成，如图 1-1 所示。目前，虽然许多芯片采用单片式接收机，但是其内部仍然分为射频和基带两大处理部分。

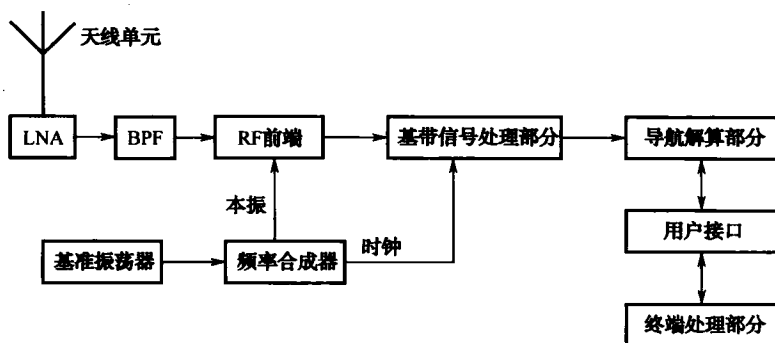


图 1-1 接收机的结构示意图

由图 1-1 可知，天线单元接收来自卫星的信号，经低噪放大(LNA)和滤波(BPF)后送到射频(RF)前端处理。射频前端的功能是将卫星信号与来自本地振荡器的混频信号相混频，经滤波得到下变频后的信号，如 GPS 系统 C/A 码接收机将本振频率为 1575.42MHz 的信号下变频为中频信号或基频信号。传统的接收机为超外差结构，需经多次混频完成下变频。随着集成电路技术的发展，现在出现了一次混频的低中频和零中频的下变频方式。得到的模拟基频信号被转换成数字信号输出至基带信号处理部分进行处理。

基带信号处理部分主要完成卫星信号的同步和导航电文的解调，其基带单元由 N 个接收机通道组成，这些数字接收机通道一般由专用集成电路(ASIC)来实现。接收机通道主要完成信号的捕获、跟踪和导航电文的解调等基带信号的处理，这些通道的工作方式通常为并行方式。这些 ASIC 主要包括相关器、环路鉴相器、环路滤波器、数据解调模块等。接收到的卫星信号进入通道后，通道首先利用本地复现



的载波（加多普勒补偿）信号剥离载波，以产生同相（I）信号和正交相（Q）信号，然后由通道内的捕获和跟踪环路对 I 信号和 Q 信号进行处理。

1.3 常用信号捕获技术

接收的卫星信号经过射频单元的处理后，进入数字接收机通道，接收机通道的主要任务是完成对卫星信号的捕获和跟踪，并在跟踪的过程中完成卫星导航电文的解调。接收机要对接收的卫星信号进行跟踪和锁定，必须先完成卫星信号的捕获。捕获是信号的粗同步，捕获的过程实际就是一个搜索的过程——一个在时域和频域上的二维搜索过程。

最常见的三种 GPS 信号的捕获方法为传统的时域相关方法、循环相关方法和延迟相乘方法。传统的时域相关方法包括时域串行和时域并行两种搜索方法，其中时域串行法是运用比较早的方法，具有方法比较简单、搜索速度慢的特点；时域并行法是针对时域串行法的缺点设计的一种方法，可以加快搜索速度。循环相关方法是基于卫星伪码具有周期性的特点而提出的一种相关方法，该方法结合了时域搜索和频域搜索的特点，是从减小计算量的角度考虑而提出的一种搜索方法，它需要在硬件上设计固定点数的 FFT 转换模块，不能适应新的搜索方法。而延迟相乘方法目前从理论上来说虽然已经基本成熟而且该方法不受到导航数据位跳变的影响，但是在实际使用过程中，由于信号要受到噪声的干扰，其计算过程中的延迟时间不能任意设定，所以还需要进行进一步研究。延迟相乘方法具体是指将接收的复信号乘以自身延迟的复共轭，相乘的结果将产生一个不受多普勒频移影响的信号，该信号的扩频码仍然是 GOLD 码。多普勒频移可以通过对相关运算的结果求 FFT 计算获得。

随着时域相关方法的发展，出现了时域滑动相关捕获算法，它是采用码相关器和载波相关器，对码相位和载波进行串行的搜索方式。首先设置载波频率为某一值，在这个基础上将当地产生的某一卫星的 C/A 码码元每次移动一位，与输入信号进行相关运算，再将每次的相关结果与捕获门限进行比较。如果当地码元移动了一个 C/A 码周期时仍未超过捕获门限，则重新设置载波频率，再次重复上述过程；只有当载波频率、当地码元与信号的真实值一致时，相关结果会超过捕获门限；如果遍历所有情况仍然未超过捕获门限；则说明信号中不存在该卫星的信号。



GNSS 信号的捕获是从搜索过程开始的, 搜索的目的是确定扩频码的码相位和多普勒频移, 完成信号的粗同步。Parkinson 和 J. Spilker 在文献[15]中给出了序贯搜索卫星的传统硬件实现方法, 在每一个搜索步骤中, 通过一个不确定的码延时产生多普勒补偿的复现滑动码, 与接收信号进行相乘运算, 求积分值并判断是否超过预设的门限值, 此搜索过程直到积分值超过所设阈值为止。文献[16]中提出了一种基于快速 FFT 的循环相关法, 这是一种快速捕获方法, 其相干积分值实际上是通过将接收信号的 FFT 与本地信号的 FFT 的复共轭进行相乘累加, 再进行 IFFT 变换所得, 如图 1-2 所示。当本地信号的码相位和多普勒频移与接收的卫星信号的码相位和多普勒频移相近时, 相关运算得到的能量值才会超过门限值。

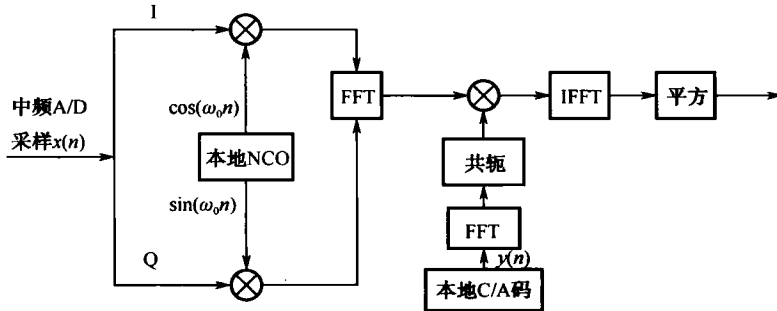


图 1-2 频域捕获示意图

文献[17]提到了先采用 20ms 相干积分时间, 接着又采用非相干积分来完成的捕获。因为不知道数据位跃变位置, 所以其采用的方法是构建 20 个累加组, 每个累加组起始于某个不确定的数据位边沿位置, 含能量最大组的起始位置将对应于正确的位跃变边沿位置, 进而可以从能量最大组的数据中估计码时延和多普勒频差。该算法利用 199 个非相干积分, 能够捕获载噪比为 21dB-Hz 的信号。

2000 年, Lin^[18]提出利用移位相乘技术实现信号捕获并在软件接收机上实现了这种差分方法。该方法可以直接捕获码相位, 但由于这种码片级的前相关差分仅仅进行了 PRN 码的部分相关, 所以会造成信噪比严重损失。目前还没能解决前相关差分检测方法信噪比损失过大的问题, 因此, 移位相乘对 GPS 系统中 L1 信号捕获的性能不理想, 实际中很少应用。



1.4 常用信号跟踪技术

信号在完成捕获之后,就要转入跟踪过程,在这个过程中,本地信号会随卫星信号的变化而相应变化,并始终保持与卫星信号的码同步和载波同步。

传统的 GNSS 接收机的跟踪方法是利用反馈环路将鉴别器获得的误差估计值作为反馈调整量来实现的。跟踪环的性能通常可以用失锁平均时间来衡量,它主要由环路滤波器带宽 B_n 、输入信号载噪比 C/N_0 及信号积分时间确定。

GNSS 接收机对卫星信号的跟踪方法主要有两大类:基于硬件电路实现的硬件跟踪方法和基于软件技术实现的软件跟踪方法。硬件跟踪方法是指采用传统的跟踪环技术,利用延迟锁定环(DLL)电路、锁相环(PLL)电路来实现对接收到的卫星信号的跟踪。软件跟踪方法则是用算法程序来实现跟踪环(如 DLL 环)的功能,这种方法具有更高的灵活性,可以采用更好的技术来获得更高的性能。

跟踪环包括码跟踪环和载波跟踪环。常用的码跟踪环有单 Δ 跟踪环和双 Δ 跟踪环,以及 τ 摆动环,其主要功能是完成扩频码的同步。载波跟踪环通常采用 COSTAS 环,利用 I、Q 两路的运算估计相位差,进而对载波进行相位的锁定。

软件实现的跟踪方法具有更大的灵活性,可以更好地利用现代信号处理算法抑制多径干扰误差,改善跟踪的精度和灵敏度。V. A. Jilnrotter 等于 1989 年发表论文^[19],将新近提出的基于最大似然估计和扩展卡尔曼滤波方法的高动态 GPS 信号参数估计算法与传统的相位锁定环和叉积自动功率控制环做了性能分析与比较,结果表明最大似然估计器和扩展卡尔曼滤波器在失锁门限和 RMS 频率估计误差方面具有极大的优越性。但是在硬件的实现上,该新方法比传统方法要复杂一些。Zeidan 提出了利用自适应调整 E-L 间隔的跟踪方法^[20],该方法能在提高跟踪灵敏度和抑制多径干扰方面做较好的折中,但其实现复杂度太高。

1.5 本书的安排

本书的结构安排如下。

第 1 章,主要分析目前的全球卫星导航系统、相应接收机的现状和发展趋势,以及实现多星座卫星联合导航接收机的发展现状和发展趋势,最后总结本书的主要工作。