

分类号.....

密级.....

U D C.....

编号.....

中南大学

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目 基于 OEM 板的差分 GPS 定位系统的研究与实现

学科、专业 大地测量学与测量工程

研究生姓名 文继超

导师姓名及

专业技术职务 刘庆元 教授

分类号VDC _____

密级 _____



硕士学位论文

基于OEM板的差分GPS定位系统 的研究与实现

The Research and Implementation of DGPS Positioning
System Based On OEM Board

作者姓名：文继超

学科专业：大地测量学与测量工程

二级学院：地球科学与信息物理学院

指导教师：刘庆元 教授

论文答辩日期 2011.5.22 答辩委员会主席 钟涛峰

中 南 大 学

2011年5月

原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名：文建强 日期：2011年5月22日

学位论文版权使用授权书

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名：文建强 导师签名：刘永亮 日期：2011年5月22日

摘 要

GPS（全球定位系统）由于其高效率、全球性、全天候等诸多优点而在测量、导航定位等领域得到了广泛的应用。随着应用的深入，人们对采用 GPS 技术进行测量、定位提出了越来越高的精度要求。一系列能提高 GPS 定位精度的增强技术应运而生，其中最基本的就是差分 GPS 技术。由于 GPS 测量具有较强的空间和时间相关性，差分 GPS 技术是通过测站间、星间或者历元间的观测量求差，从而削弱甚至消除观测量中的公共误差，以提高测量定位的精度。由于差分 GPS 设备价格昂贵，而 GPS-OEM（原始设备制造商）板价格低廉、使用灵活，采用 OEM 板进行差分 GPS 定位的研究具有较大的实用性。

本文采用法国泰雷兹公司生产的 AC-12 GPS-OEM 板作为基准站接收机，对差分 GPS 技术的几个关键问题进行了研究和探讨，并编写了相应的程序，实现了一个简易的差分 GPS 定位系统。具体研究内容如下：1. 探讨了单点定位技术的原理和误差来源，分析了差分 GPS 技术对于误差项的改正，对比了位置差分、伪距差分、相位平滑伪距差分和载波相位差分的原理、模型和各自的优缺点。2. 研究了 AC12 OEM 板的原始数据格式和 GPS 数据处理通用的 RINEX 数据格式，并编程实现 OEM 原始数据向 RINEX 格式数据的转换。3. 研究了分别采用广播星历和精密星历计算卫星位置和卫星钟差的方法。4. 在 MATLAB7.0 平台上编写相应的程序，实现亚米级伪距差分定位，并通过大量实验验证程序的有效性。

关键词 OEM，RINEX，差分 GPS，卫星星历

ABSTRACT

GPS (global positioning system) has been widely used in survey, navigation, positioning and other fields due to its high efficiency, global, all-weather, and many other advantages. Along with GPS applied thorough, people put forward with measuring accuracy more higher request for using GPS technology in measuring and positioning. a variety of enhancement techniques that can improve positioning accuracy have emerged, one of the most basic techniques is DGPS. It can weaken or even eliminate the public error of measurement to improve the precision of positioning through calculation difference between stations, satellites, or neighbor epochs due to the strong spatial correlation and temporal correlation of GPS measurement. The research of DGPS based on OEM (original equipment manufacturer) board has high practicability, because DGPS device is expensive but OEM board is cheap and flexible.

In this paper, the AC - 12 GPS - OEM board produced by THALES Co. of France is adopted as the base station receiver, the key problems of DGPS are been researched, the relevant program is compiled and a summary of pseudo-range DGPS system is implemented. The main work in this paper is concluded as follows: 1. The principle of single-point positioning and error sources are discussed, the error correction of DGPS is analysed, the principles, models and their respective advantages and disadvantages of position DGPS, pseudo-range DGPS, phase smoothing pseudo-range DGPS and carrier phase DGPS are compared. 2. The original data formats of AC12 OEM board and the GPS data processing general format RINEX are studied, and the program applied to conversion of OEM raw data to RINEX format is realized. 3. The methods of calculate satellite position and clock offset by using broadcast ephemeris or precise ephemerides. 4. The corresponding program is compiled on the platform MATLAB7.0 to realize the sub-meter pseudo-range DGPS, and a lot of experiments are done to prove the effectiveness of the program.

KEY WORDS OEM, RINEX, DGPS, epheme

目录

摘 要.....	I
ABSTRACT.....	III
目录.....	V
第一章 绪论.....	1
1.1 引言.....	1
1.2 研究背景和意义.....	2
1.3 国内外研究现状.....	3
1.4 论文主要内容和结构安排.....	4
第二章 差分 GPS 技术.....	5
2.1 GPS 伪距单点定位.....	5
2.1.1 观测量.....	5
2.1.2 伪距观测方程.....	6
2.2 GPS 测量误差来源.....	6
2.2.1 与 GPS 卫星有关的因素.....	7
2.2.2 与信号传播有关的误差.....	7
2.2.3 接收机本身的误差.....	8
2.3 差分 GPS 定位原理.....	8
2.4 差分 GPS 定位的分类.....	10
2.4.1 位置差分.....	10
2.4.2 伪距差分.....	11
2.4.3 相位平滑伪距差分.....	12
2.4.4 载波相位差分.....	13
2.5 本章小结.....	14
第三章 OEM 板特性及数据的标准化.....	15
3.1 AC12 GPS-OEM 板.....	15
3.1.1 AC12 技术参数.....	15
3.1.2 AC12 OEM 原始数据格式.....	17
3.1.3 AC12 接口.....	20
3.2 RINEX 标准数据格式.....	20
3.2.1 观测数据文件.....	22
3.2.2 导航电文文件.....	24
3.2.3 气象数据文件.....	26
3.3 本章小结.....	26
第四章 卫星坐标及钟差计算.....	27
4.1 GPS 广播星历及卫星坐标计算.....	27
4.1.1 GPS 广播星历参数.....	27
4.1.2 广播星历计算卫星位置.....	28
4.1.3 算例一广播星历计算卫星坐标.....	30
4.2 IGS 精密星历及轨道标准化.....	31

4.2.1 精密星历.....	31
4.2.2 卫星轨道的标准化.....	32
4.2.3 算例—精密星历插值与拟合.....	35
4.3 卫星钟差计算.....	36
4.3.1 广播星历计算卫星钟差.....	36
4.3.2 精密卫星钟差.....	37
4.4 本章小结.....	38
第五章 程序设计与实验.....	39
5.1 MATLAB 简介.....	39
5.2 功能模块设计.....	39
5.2.1 数据接收与转换模块.....	40
5.2.2 文件读取模块.....	42
5.2.3 卫星位置及钟差计算模块.....	44
5.2.4 测站位置解算模块.....	44
5.3 实验与精度分析.....	45
5.3.1 实验数据.....	45
5.3.2 数据处理与精度分析.....	47
5.4 本章小结.....	48
第六章 总结与展望.....	49
6.1 论文总结.....	49
6.2 研究展望.....	49
参考文献.....	51
致谢.....	55
攻读学位期间主要的研究成果.....	56

第一章 绪论

1.1 引言

1973 年 12 月，美国国防部批准它的陆海空三军联合研制一种新的军用卫星导航系统—Navigation Satellite Timing and Ranging (NAVSTAR)/Global Positioning System (GPS)，我们称之为 GPS 卫星全球定位系统，简称为 GPS 系统^[1]。它具有全球性、全能性（陆地、海洋、航空、航天）、全天候性优势的导航定位、授时、测速系统。利用该系统，用户可以在全球范围内实现全天候、连续、实时的三位导航定位和测速，并且能够进行高精度的时间传递和高精度的精密定位。

GPS 定位系统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。空间星座部分由 21 颗工作卫星和 3 颗备用卫星组成，这 24 颗卫星分布在 6 个轨道面上，平均高度大约为 20200km，运行周期为 11 小时 58 分钟。地面监控部分由分布在全球的 1 个主控站、3 个注入站和 5 个监测站组成。GPS 用户设备部分由 GPS 接收机硬件（移动站、基准站等）、数据处理软件、微处理机和终端设备组成。

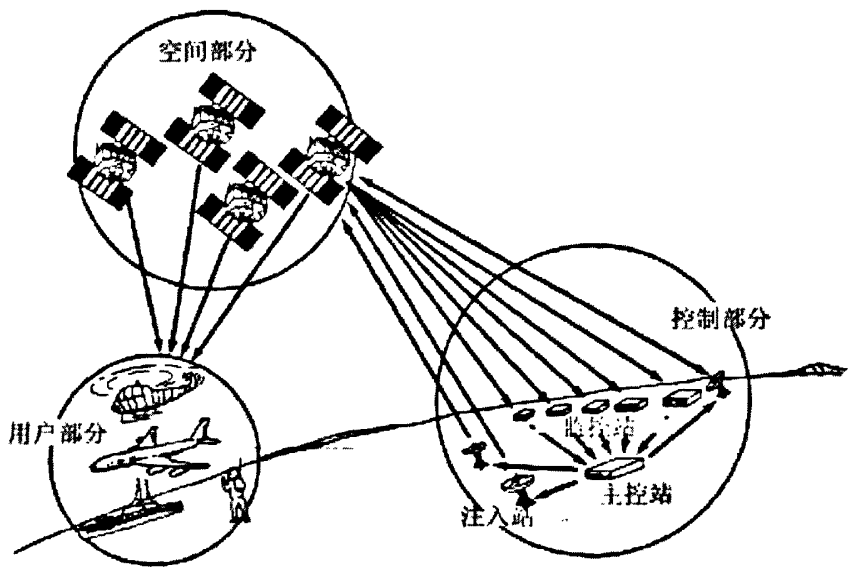


图 1-1 GPS 定位系统三部分

其中，地面监控部分的监测站通过接收机对 GPS 卫星进行连续的观测和数据采集，并采集当地的气象信息，将所收集到的数据传送给主控站；主控站将收集到的监测站数据进行处理，并编制导航电文发送给注入站；注入站将导航电文注

入 GPS 卫星。GPS 卫星以 L 波段频率 (1227.60MHz 和 1575.42MHz) 向地面发射调制有伪随机噪声码和广播星历的载波信号。用户通过接收机接收 GPS 卫星发出的信号, 得到卫星位置和卫星到接收机的距离, 从而根据距离后方交会原理确定用户接收机的位置。

1.2 研究背景和意义

美国政府在 GPS 的最初设计中, 针对不同等级的用户提供两种不同的定位服务: 一种为标准定位服务 (SPS- Standard Positioning Service), 它对全世界的所有用户都是免费可用的, 使用 C/A 码单频接收机, 预期精度只有 100m 左右。另一种为精密定位服务 (PPS- Precise Positioning Service), 它计划用于美国军事部门和一些得到美国国防部特别批准的用户 (如北约国家的军方等), 使用双频 GPS 接收机, 预期定位精度在 10m 之内。然而, GPS 还处在试验的阶段时, 由于卫星时钟的稳定性得到了提高, 卫星轨道的测定方法也得到了改进, 这导致了利用 C/A 码进行标准定位时精度达到了 14m 左右, 利用 P 码进行精密定位时精度达到了 3m 左右, 这比预期的定位精度高出了一个数量级, 严重的威胁到美国的国防安全^[2]。

美国政府为了限制除本国军事部门之外的普通用户, 从而保证国家的国防安全, 于 1991 年 7 月在 Block II 卫星上实施 SA 和 AS 政策, 以降低 GPS 的定位精度。SA (Selective Availability, 选择可用性) 技术, 它通过对 GPS 信号进行人为的干扰, 以故意降低标准定位服务的精度。包括故意更改卫星星历数据, 降低广播星历中卫星轨道参数的精度和在卫星的基准时间信号中故意加入一个高频抖动干扰, 以降低接收机对卫星信号的测量精度。除此之外, 美国政府还采用了 AS (anti-spoofing, 反电子诱骗) 技术, 即对公开的 P 码进行加密, 加密后的 P 码称为 Y 码。只有美国军方和特许用户能够破译出 P 码, 其他用户不能破译 P 码, 因此不能获得高精度的定位信息^[4]。这导致了民间用户定位精度严重下降, 为了能充分利用 GPS, 实现高精度的定位, 各种 GPS 增强技术也应运而生, 其中最基本的技术就是 DGPS (Differential Global Positioning System, 差分 GPS)。

差分 GPS 技术是通过在一个测站上对两颗卫星进行的观测量、两个测站上对一颗卫星进行的观测量或者是一个测站上对一颗卫星的两个历元观测量之间进行求差。由于这些观测量之间具有较强的空间和时间相关性, 差分 GPS 技术能极大地削弱甚至是消除公共误差和公共参数, 从而能提高定位的精度。

由于卫星导航定位技术的发展显示出了巨大的优越性, 各个国家从本国的利益和安全性考虑, 都意识到发展自身的卫星导航定位系统迫在眉睫, 许多拥有先进卫星技术的国家都着力发展自身的卫星导航系统, 这包括俄罗斯的 GLONASS (Global Navigation Satellite System) 系统、欧盟的 Galileo 系统和

我国的北斗卫星导航系统,这些系统的发展将打破美国 GPS 在卫星导航上一统天下的局面,给美国造成了巨大的压力。这也动摇了美国 GPS 的霸主地位,影响 GPS 的国际市场,从而也影响美国的政治和经济利益。

为了抢占民用导航服务的市场,提高民用导航服务的竞争力,美国总统克林顿于 2000 年 5 月 1 日批准美国军事部门关闭选择可用性(SA)软件,2007 年布什总统则宣布将永久性地取消 SA 政策,这使得采用单频的 C/A 码接收机单点定位精度提高到 20m(95%)左右。

美国放弃使用 SA 政策,虽然使得民用的定位精度得到了很大的提升,但是这并没有让国内外的学者们停止对差分 GPS 技术的研究。随着 GPS 技术在民用中应用越来越广泛,人们对采用 GPS 进行定位提出了厘米甚至毫米级的精度要求。GPS 卫星在 20200km 高空作高速运动,卫星播发的信号要穿过厚厚的大气层才到达接收机,这个过程势必会产生很多误差,使得测量结果精度下降。人们希望通过采用差分 GPS 技术,能削弱甚至消除这些误差对定位精度的影响。

1.3 国内外研究现状

差分 GPS 技术能够较好的提高 GPS 测量定位的精度,在这二三十年中得到了迅速的发展。其表现为几个方面:1. 改正数形式由最初的坐标改正数和距离改正数发展为现在能够把各种误差项分离开来,向用户分别提供星历改正数、卫星钟差改正数和大气延迟改正数等各种改正信息^[5]。2. 数据的传输通讯方面,由无线电台发展为目的利用广播电视信号或者卫星通讯等手段来发送改正信息。3. 差分改正信号的结构、格式和标准经过这些年的发展,也日趋完善。4. 差分 GPS 定位系统从简单的单基站发展到多基站的局域差分 and 广域差分系统。

西方国家非常重视差分 GPS 系统的研究与应用,美国海岸警卫队(US Coast Guard)于 1999 年已经在东海岸建立了以无线电信标台为基础的海事差分 GPS 系统,而英、德、法、加等国都已经建立和正在筹备建立自己的差分 GPS 系统^[6]。在我国,中国海事局“九五”期间重点建设项目就包括建设沿海无线电指向标-差分全球定位系统(RBN/DGPS, Radio Beacons/DGPS)。该系统在我国的渤海、黄海、东海和南海四大海域建立 20 个航海无线电指向标播发台,每一个 RBN 播发台处均设置了 GPS 基准站,测定各颗在视卫星的伪距改正数,并将改正数由 RBN 播发台发向各个 GPS 动态用户。用户只需持有一台能够接收 DGPS 改正数据的 GPS 接收机,便可实现 DGPS 测量。截止 2000 年底中国沿海 20 个 RBN/DGPS 基准台已全部建成,并于 2002 年 1 月 1 日零时起全面开通,正式向公共用户无偿提供服务。

为了向全球推广差分 GPS 业务,国际海事无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Maritime Service,简称 RTCM)于 1983 年 11 月设立

了 RTCM SC-104 专门委员会,便于研究差分 GPS 技术的各种方法和制定差分协议。自 1985 年发布了 Ver1.0 版本开始,RTCM 根据导航定位的需求和定位技术的发展,不断的发布更新版本,目前最新发布的 Ver3.0 版本已经增加了用于传输网络差分改正数据的电文。大多 GPS 厂商生产的 GPS 接收机,除了制定本厂商专用的格式之外,基本上都具有能接收 RTCM SC-104 标准差分数据格式的接口。购买差分 GPS 设备成品能够直接进行差分定位,但由于能发送 RTCM SC-104 标准格式电文的差分 GPS 设备,价格非常昂贵甚至高达几万几十万元,因此差分 GPS 技术一直未得到普及^[8]。而 GPS-OEM (Original Equipment Manufacturer, 原始设备制造商)板价格低廉,千元左右就能买到,使用灵活方便。因此,国内许多学者对利用普通的 GPS-OEM 板设计差分 GPS 定位系统进行了研究和试验^[6]。

1.4 论文主要内容和结构安排

本文以法国泰雷兹公司生产的 AC-12 GPS-OEM 板作为基准站接收机,对差分 GPS 技术的几个关键问题进行了研究和探讨,并编写了相应的定位程序,实现了一个简易的差分 GPS 定位系统。全文共分 7 章,主要研究内容如下:

第一章 绪论。简单介绍了 GPS 技术的发展,差分 GPS 的研究背景和国内外的发展现状,并概括了本文的研究内容。

第二章 差分 GPS 测量定位技术探讨与分析。首先介绍了 GPS 伪距单点定位的原理和误差来源,接着介绍差分 GPS 的原理以及差分 GPS 与单点定位对于各种误差源的改正,最后介绍差分 GPS 的分类,详细介绍位置差分、伪距差分、相位平滑伪距差分和载波相位差分的原理、模型和各自的优缺点。

第三章 GPS-OEM 板特性以及数据的标准化。首先简单介绍了本实验所用的 AC12 OEM 板的产品性能和技术参数,接着研究了 AC12 OEM 板的原始数据格式和数据接口,最后介绍 GPS 数据处理通用的 RINEX 数据格式,并编程实现 OEM 原始数据向 RINEX 格式数据的转换。

第四章 实验数据的预处理。主要内容包括卫星坐标及钟差的计算:广播星历和由广播星历计算卫星位置的方法,精密星历和拉格朗日插值、切比雪夫多项式拟合在卫星轨道标准化中的应用,接着介绍分别由广播星历和精密星历计算卫星钟差的方法,并用 MATLAB7.0 编写解算模块,用实例对实验数据进行处理,验证程序的有效性。

第五章 程序设计与实验。用 MATLAB7.0 编写程序实现对 RINEX 格式数据的读取,对精密星历数据的读取,实现卫星位置和钟差的计算,以及伪距差分定位,并通过大量的试验,证实程序的有效性。

第六章 总结和展望。对论文的工作和遗留的问题做简单的总结,并提出今后需要进一步研究的工作。

第二章 差分 GPS 技术

与差分 GPS 定位技术相对应的是 GPS 单点定位。GPS 单点定位是指用户只用一台 GPS 信号接收机,通过接收卫星发送的 C/A 码、P 码或者载波相位作为测距信号,测得用户与卫星之间的距离,进而根据空间后方交会原理,解算出用户的三维坐标。单点定位技术是 GPS 测量定位中最基本的定位方法,模型中含有的误差项较多,定位精度较低。由于 GPS 测量中的误差项在空间和时间上都具有较强的相关性,于是学者们提出了将 GPS 测量中的观测量之间作差的方法,以削弱或者消除一些误差项,从而提高测量定位的精度,这就是差分 GPS 技术。

本章首先以伪距单点定位为例来说明 GPS 单点定位的原理和模型,并指出其中的误差项,然后再介绍差分 GPS 技术的原理及对定位精度的提高,最后介绍差分 GPS 技术的种类及各自的优缺点。

2.1 GPS 伪距单点定位

2.1.1 观测量

GPS 单点定位是一种较简易而又非常实用的卫星导航定位方法,根据观测值使用的不同,又可以分为伪距单点定位、载波相位单点定位和相位平滑伪距单点定位。GPS 观测值主要是伪距和相位,有些接收机还可以输出多普勒频移观测值。目前,每个 GPS 卫星都能够发射可区分的信号,每颗卫星的信息都调制在两个 L 波段当中,这些信息包括 C/A 码、P 码以及卫星的导航电文。卫星钟振荡器的基准频率是 $f_0=10.23\text{MHz}$,卫星发送的载波和调制在载波上的测距码和数据码都是由此基准频率产生的:

(1) L1 载波频率 $f_{L1}=154\times 10.23=1575.42\text{MHz}$,波长为 19.03cm;

(2) L2 载波频率 $f_{L2}=120\times 10.23=1227.60\text{MHz}$,波长为 24.42cm;

(3) C/A 码载波频率 $f_{C/A}=10.23\div 10=1.023\text{MHz}$,波长约为 300m;

(4) P 码载波频率 $f_P=10.23\times 1=10.23\text{MHz}$,波长约为 30m。

GPS 观测值可以是载波相位观测值,在 L1 和 L2 都存在;也可以是伪距观测值,其中 C/A 码伪距只在 L1 上存在,P 码在 L 和 1L2 上都存在。伪距观测值是指卫星与接收机之间的含有误差的距离,它是通过测量卫星信号从卫星的发射时刻到接收机的接受时刻之间的时间差 Δt ,来求得卫星与接收机的距离:

$\rho=\Delta t*c$,其中 c 为光速,但是由于卫星钟存在钟差、接收机存在钟差以及信号经过电离层和对流层时产生的延迟等,测出的距离和卫星至接收机的实际几何距

离存在误差, 所以, 式中的 ρ 称为伪距。

2.1.2 伪距观测方程

GPS 信号接收机只接收来自卫星的导航定位信号, 自身并不发送任何的信号, 是数据被动式测距的原理, 它存在三种时间系统^[1]:

- (1) 各颗 GPS 卫星的时间标准;
- (2) 各台 GPS 接收机的时间标准;
- (3) 统一上两种时间标准的 GPS 时间系统 (GPST)。

设卫星信号发射时刻卫星 S 的钟面时为 t^S , 对应的 GPST 为 T^S , 信号到达接收机时, 接收机的钟面时刻为 t_u , 对应的 GPST 为 T_u , 卫星钟和接收机钟钟面时相对于 GPST 的钟差分别为 δ^S 和 δ_u , 于是有关系如下:

$$\begin{cases} T^S = t^S - \delta^S \\ T_u = t_u - \delta_u \end{cases} \quad (2-1)$$

设信号从卫星到接收机的真实传播时间是 τ , 通过伪随机噪声码测得的观测量为 τ' , 那么

$$\tau' = t_u - t^S = (T_u + \delta_u) - (T^S + \delta^S) = (T_u - T^S) + (\delta_u - \delta^S) = \tau + \delta_u - \delta^S \quad (2-2)$$

那么, 伪距测量的基本模型为:

$$\rho = c\tau' = R + c\delta_u - c\delta^S \quad (2-3)$$

式中, c 为真空中的光速, 值为 $2.99792458 \times 10^8 \text{m/s}$, R 为卫星与接收机之间的几何距离: $R = ((X^S - X_u)^2 + (Y^S - Y_u)^2 + (Z^S - Z_u)^2)^{\frac{1}{2}}$ 。GPS 信号要通过很厚的电离层和对流层才能到达地面, 如考虑到电离层和对流层引起的误差, 则观测方程应改为:

$$\rho = c\tau' = R + c\delta_u - c\delta^S + d_{ion} + d_{trop} \quad (2-4)$$

式中, d_{ion} 为电离层效应引起的偏差, d_{trop} 为对流层引起的偏差。综上, 观测方程中 (X^S, Y^S, Z^S) 为卫星在某时刻的三维位置坐标值, 它们可根据导航电文提供的卫星星历计算或者通过 IGS 站提供的精密星历插值得 (方法将在第四章介绍), 即为已知值。卫星钟差 δ^S 同样可以根据导航电文或者 IGS 站提供的精密钟差求出。电离层延迟 d_{ion} 以及对流层延迟 d_{trop} 可以通过相应的模型解算求得。所以这些都可以算是已知值, 因此, 在观测方程中, 就存在着接收机三维坐标 (X_u, Y_u, Z_u) 和接收机钟差 δ_u 4 个带求解的未知数, 于是至少要观测 4 颗卫星, 列出 4 个观测方程, 才能求解出用户的三维位置坐标值和接收机钟差。

2.2 GPS 测量误差来源

GPS 卫星在大约 20 万 km 的高空作高速运动, 播发的信号要穿过厚厚的大气层才到达接收机, 这个过程受到各种因素的影响, 使得测量结果产生误差, 精度下降。影响 GPS 定位精度的因素概况起来可以分为三个方面: 一类与 GPS 卫星有

关的因素，一类与信号传播有关的因素，第三类与接收机本身有关的因素。这些因素按性质又可以分为系统误差和偶然误差，其中系统误差是 GPS 测量的主要误差，是 GPS 数据处理着重要削弱甚至消除的误差。

2.2.1 与 GPS 卫星有关的因素

1. SA 政策：美国政府从其国家安全利益出发，限制除本国军事部门之外的普通用户，通过对导航电文采用 ϵ 技术、对 GPS 卫星基准频率加入高频抖动（ δ 技术）、对 P 码采用译密技术，人为降低普通用户利用 GPS 进行定位的精度。但是，随着世界各国的卫星导航定位技术的发展，美国 GPS 的霸主地位已经发生动摇，为了抢占民用导航服务的市场，提高民用导航服务的竞争力，这项政策于 2000 年被迫取消。

2. 卫星星历误差：卫星星历是 GPS 定位中的重要数据。GPS 地面监控部分跟踪监测 GPS 卫星，用 16 个星历参数来描述和预测卫星的运行轨道，但是因为卫星在运行中受到各种复杂的摄动力影响并且这些摄动力并不能够真实准确的测定，所以这一轨道模型与卫星实际的运行轨道之间必然是存在着误差的。广播星历的误差在 260cm 之内，这对于精密的测量和定位来说是远远不够的，所以对于高精度的测量，经常采用的是 IGS 站提供的精密卫星星历，它的精度能保证在 $3\sim 10\text{cm}$ 之内，能满足较高精度的测量定位。

3. 卫星钟差：卫星钟差是指 GPS 卫星上安装的原子钟的钟面时与 GPS 系统时间之间会有偏差和漂移，并随着时间的推移发生改变。GPS 定位所需的观测量都是以精密测时为依据的，卫星钟差会对伪距测量和载波相位测量产生偏差。为了保证卫星的时钟与 GPS 系统时间同步，GPS 地面监控部分通过对卫星信号的监测，讲卫星时钟在 GPS 时间为 t 的卫星钟差描述成这样的一个二次项 $\Delta t = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2$ 。三个系数以及参考时间都可以从导航电文的第一数据块中获得。另外，对于高精度的测量定位来说，同样可以通过 IGS 站提供的精密卫星钟差插值来求得。

4. 地球自转的影响：GPS 定位测量采用的坐标是协议地球坐标系，接收机接收到卫星信号时与地球固连的协议坐标系相对于卫星信号发射瞬间的位置已产生了旋转，这样接收到的卫星信号会有时间上的延迟。

5. 发射天线相位中心偏差：卫星天线几何中心和相位中心的偏差，GPS 卫星星历是相对于卫星的几何中心，而卫星信号是从相位中心发出的，它们之间是存在一定的误差的。

2.2.2 与信号传播有关的误差

1. 电离层延迟：离地面大约 70 至 1000km 的大气层为电离层，电离层中的大气分子在太阳光的照射下会分解成大气电离子和电子，当 GPS 信号穿过充满电子

的电离层时,传播速度和方向会发生改变,这种改变叫做电离层延迟。电离层延迟对于测距的影响在几米到几十米甚至上百米之间,可以利用相应的模型加以改正,常见的模型有 Klobuchar 等,利用这些模型进行改正时可以将延迟量改正 50%至 70%。

2. 对流层延迟:对流层位于大气层的底部,其顶部距离地面大约 40km,各种气象现象主要都是发生在这一层。GPS 卫星信号穿过对流层时会产生延迟,是的观测得到的卫星至接收机距离变长,从而影响定位精度。对流层延迟也可以通过相应的模型加以改正,常用的模型有 Hopfield 模型。

3. 多路径效应:由于接收机所处的周围环境的影响,使得接收机所接收到的卫星信号中除了一个从 GPS 卫星发射后经直线传播的电磁波信号之外,还可能接收到一个或者多个由该电磁波经过周围的反射物体发射之后的信号,而每一个反射信号又有可能是经过一次或者多次发射后到达天线的,这些信号会相互叠加,从而影响到测距码和相位的测量,这就是多路径效应。

2.2.3 接收机本身的误差

1. 接收机钟差:由于 GPS 接收机内石英钟晶体振荡器频率的漂移,引起的接收机钟面时与 GPS 标准时间之间的偏差。GPS 接收机一般采用的是高精度的石英钟,其稳定度大约为 10^{-9} ,由于接收机钟差的存在,会影响到卫星坐标的计算和卫星与测站之间的距离计算,并且在非差单点定位中,这项误差不能消除,只能当做未知数参与求解。

2. 接收机天线相位中心偏差:与卫星相位中心偏差类似,在 GPS 测量中,其观测值是以接收机天线的相位中心为准。理论上接收机天线的相位中心应与其几何中心一致,但由于接收到的卫星信号的强度和方向不同,每次观测的相位中心与几何中心并不能保持一致,这两者的偏差我们称为接收机天线相位中心偏差。

3. GPS 接收机软硬件造成的偏差:GPS 测量定位,其结果还会受到像处理或控制软件和硬件等的影响,这些影响没有模型可以改正,其大小也未知,可以有偶然的也可以有系统的,可以统称为接收机其它噪声。

2.3 差分 GPS 定位原理

差分 GPS 是指由于 GPS 观测量之间存在着较强的空间和时间相关性,通过站间观测量、星间观测量或者历元间观测量之间的求差,可以很大程度上削弱公共误差,从而提高定位精度,其基本原理可以简单的概括为下面三个步骤:

1. 基准站接收 GPS 信号,通过和已知的基准站精确坐标数据进行比较,计算出各种改正参数值。

2. 基准站将计算出来的各种改正参数值发送给用户接收机。

3. 用户利用基准站的改正信息对原始的 GPS 观测数据进行改正,从而获得

较高精度的定位数据。

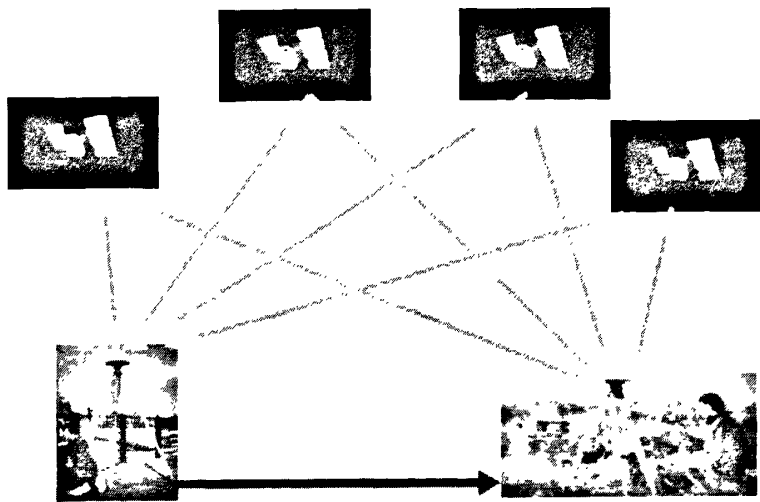


图 2-1 DGPS 的基本原理图。

差分 GPS 定位测量能够很大程度上削弱和消除公共误差，是因为 GPS 观测量之间较强的时间和空间相关性，随着基准站和流动站之间的距离加大，差分定位的效果也会有相应的降低。下表给出了当差分基准站和流动站在距离 100km 左右时，用 C/A 码做差分 GPS 测量时对单点定位误差项的改正精度估计，当距离小于 100km 时，精度会有所提高。

表 2-1 C/A 码伪距单点定位和差分定位精度估计（m）

类型	误差项	单点 GPS	差分 GPS
空间部分	卫星钟误差	3.0	0.0
	卫星摄动误差	1.0	0.0
	SA 技术误差	32.3	0.0
	其他误差	0.5	0.0
控制部分	星历预报误差	4.2	0.0
	其他误差	0.9	0.0
用户部分	电离层误差	5.0	0.0
	对流层误差	1.5	0.0
	接收机噪声误差	1.5	2.1
	多路径	2.5	2.5
	其他误差	0.5	0.5
用户测距误差	总误差(RMS)	33.3 (有 SA)	3.3
		8.1 (无 SA)	
用户二维位置误差 (2DRMS, HDOP=1.5 2DRMS=2×HDOP× m_p)		99.9 (有 SA) 24.3 (无 SA)	9.9

2.4 差分 GPS 定位的分类

差分 GPS 定位技术按不同的分类方法可以分为很多种不同的模式,不同的差分方法,技术难度、作用范围以及定位精度都会有所差别。

按差分的时间和 DGPS 数据处理方式不同可以分为:实时差分和后处理差分。实时差分是基准站接收到 GPS 卫星信号后,即时计算出观测值或观测值的改正数,并通过某种通讯设备将观测值或者改正数发送出去,动态用户接收到该值后实时改正自己的观测值,不断解出用户坐标。后处理差分不进行实时数据传输,基站接收到卫星信号后,保存记录成文件,动态用户也将采集的数据记录成计算机文件,野外作业完成后把文件导入计算机中,通过 GPS 数据解算软件,用基准站文件来对移动站文件进行差分,从而得到改正后的移动站数据,以提高精度。

按工作方式和基站数量、作用域大小之异分为:单基站差分、局域差分 and 广域差分。单基站差分算法简单,技术成熟,可用于小区域内的差分测量工作。对于较大范围的区域(如几个省市),多基站的局域差分效果会比较好,而对于数个国家的大范围区域应当使用广域差分技术。

依据 DGPS 数据类型的不同,差分 GPS 技术又可以分 4 种:位置差分、伪距差分、载波相位差分和载波相位平滑伪距差分。这 4 种差分技术的工作原理是一样的,即由基站发送观测值或者观测值的改正数,动态用户接收基站差分信号并对自身的测量项进行改正,消除公共误差,从而获得较高测量精度的用户三维坐标。但它们所发送的差分数据内容和方式却不相同,各自的定位模型也不一样。

2.4.1 位置差分

位置差分从系统的构成和原理上讲,是最简单的一种差分定位模式。其原理为:架设在位置精确已知的基准站上的 GPS 接收机通过接收 4 颗或以上的卫星信号后可进行单点定位,可求得基站的三维坐标值。但是由于观测值中存在着如 2.2 节中所说的各种误差项,求解出来的基站坐标值与已知的精确坐标值是存在偏差的。即:

$$\left. \begin{aligned} \Delta X &= X_0 - X \\ \Delta Y &= Y_0 - Y \\ \Delta Z &= Z_0 - Z \end{aligned} \right\} \quad (2-5)$$

式中:

(X_0, Y_0, Z_0) 为已知的基站在 WGS-84 坐标系下(若不是该坐标系,则需要经过坐标转换)的精确坐标值;

(X, Y, Z) 为基站接收机所测的三维坐标值;

$(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$ 为基站坐标值的改正数。

基站通过电台等通讯设备,将此坐标值改正数广播出去,动态接收机接收卫

星信号,测定自身的三维位置,又接收来自基站的坐标改正数,并用接收到的改正数对本身测算的坐标值进行改正,以求得较高精度的移动站坐标值:

$$\left. \begin{aligned} X_u &= X'_u + \Delta X \\ Y_u &= Y'_u + \Delta Y \\ Z_u &= Z'_u + \Delta Z \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

式中:

(X'_u, Y'_u, Z'_u) 为移动站接收机测定的用户三维坐标值;

(X_u, Y_u, Z_u) 为经过差分改正后的移动用户站坐标值;

若连续进行观测,并考虑到移动站用户位置改正值的瞬间变化,则上式可以进一步改写成:

$$\left. \begin{aligned} X_u &= X'_u + \Delta X + \frac{d(\Delta X)}{dt}(t - t_0) \\ Y_u &= Y'_u + \Delta Y + \frac{d(\Delta Y)}{dt}(t - t_0) \\ Z_u &= Z'_u + \Delta Z + \frac{d(\Delta Z)}{dt}(t - t_0) \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

式中 t_0 为校正的有效时刻。

显然,这种差分方式的优点是计算方法简单,基站只需要向移动站发送三个位置校正值,数据量较小,易于进行数据传输通讯,适合各种型号的接收机。它能较好的削弱或者消除移动站和基准站的公共误差,提高定位精度。但是它的缺点也非常明显,因为必须保证动态用户观测的卫星和基准站观测的卫星一致,否则它们的公共误差并不一样,甚至相差较大,当在视的卫星较多,观测的组合很多时,很难保证动态用户和基站观测的是同一组卫星,在这种情况下,位置差分的效果并不十分理想,所以它的使用也很有限。

2.4.2 伪距差分

伪距差分技术是目前各 GPS 厂商采用最多的差分 GPS 技术。由于其快速、高效、较高精度等优点,大多数商用差分 GPS 接收机都选择采用这种技术。而国际海事无线电委员会 (RTCM) 推荐的 RTCM SC-104 标准差分数据格式也是采用了这种技术^[3]。

伪距差分的原理是:基站 GPS 接收机连续观测卫星信号,收集全部卫星的星历文件,根据星历文件求出各个时刻各颗卫星的精确坐标 $(X, Y, Z)_i$, 同时测量出全部卫星的伪距 ρ_i 。由于基站坐标 $(X, Y, Z)_r$ 是精确已知的,这样就可以求出每一时刻基准站到卫星 i 的真实几何距离 R_i :

$$R_i = \sqrt{(X_i - X_r)^2 + (Y_i - Y_r)^2 + (Z_i - Z_r)^2} \quad (2-8)$$

式中,下标 i 表示第 i 颗卫星。

于是,可以求得伪距改正数:

$$\Delta \rho_i = R_i - \rho_i \quad (2-9)$$

以及伪距改正数的变化率为:

$$\dot{\Delta \rho_i} = \frac{\Delta \rho_i}{\Delta t} \quad (2-10)$$

基站通过通讯设备将 $\Delta \rho_i$ 和 $\dot{\Delta \rho_i}$ 发送给移动站, 移动站测得的伪距 ρ_i^u 加上伪距校正值, 便可求得改正后的伪距值:

$$\rho_{i(cor)}^u = \rho_i^u(t) + \Delta \rho_i + \dot{\Delta \rho_i}(t - t_0) \quad (2-11)$$

利用 4 颗或以上的卫星经过校正的伪距值, 就可以计算出移动站的三维坐标值。伪距差分技术的优点是:

1. 基站发送的是所有在视卫星的伪距改正数及其改正数变化率给移动站, 这就允许移动站接收机能选择任意 4 颗分布较好的卫星进行解算, 而不必考虑两站的观测卫星是否一致。

2. 伪距改正数是直接在 WGS-84 坐标系统进行运算的, 移动站可以直接用于改正, 不必进行坐标变换。

3. 伪距差分技术提供改正数和改正数的变化率, 当通讯设备出现意外, 差分信号丢失时, 也可利用伪距改正数的变化率继续进行差分定位, 效率更高, 符合 RTCM SC-104 所制定的标准。

2.4.3 相位平滑伪距差分

当前的大多数 GPS 接收机能同时提供伪距测量和载波相位测量。因为载波相位测量的精度要比伪距测量的精度高两个数量级别, 并且载波相位测量受多路径效应的影响比伪距测量小两个数量级别, 因此, 要是能够获得载波相位的整周模糊度, 即可获得认为误差很小的伪距测量值。在多数情况下, 载波的整周模糊度无法获得, 但能获得载波多普勒频率计数。事实上, 载频多普勒计数测量反映了载波相位变化信息, 也就是说, 它精确地反映了伪距的变化率, 因此利用这一信息来辅助测距码伪距观测量能够获得比单独采用测距码伪距测量更高的精度。这种思想称为相位平滑伪距测量^[5]。它的原理为: 某一时刻的伪距观测值, 等于前一时刻的伪距观测值和这两个时刻的载波相位测量值之差:

$$P^j(t_k) = \lambda[C^j(t_k) - C^j(t_{k-1})] + \phi^j(t_k) - \phi^j(t_{k-1}) + P^j(t_{k-1}) \quad (2-12)$$

式中, $C^j(t_k)$ 表示对第 j 颗卫星作载波相位测量在 t 时刻的多普勒计数, $\phi^j(t_k)$ 表示对第 j 颗卫星作载波相位测量在 t 时刻小于一个周期的观测值, $P^j(t_k)$ 表示在 t 时刻的伪距观测值, 如果用若干个时刻的伪距观测值和载波相位测量值, 可以求得同一时刻的多个伪距值, 将这几个伪距值取其平均值, 就是伪距平滑值。

相位平滑伪距差分 GPS 技术的基本思路为: 按照伪距差分 GPS 的方法, 利用基准站发送的伪距改正数及其变化率对移动站接收机观测的伪距值进行校正, 得到移动站校正后的伪距值; 接着利用移动站接收机接收的载波相位值对校正后的

伪距按式 (2-12) 进行平滑处理, 即可得到移动站平滑后的伪距值; 最后再按照伪距差分方法求解移动站的坐标值并进行精度的评价^[9]。

采用相位平滑伪距差分 GPS 技术, 虽然可以获得比单独采用伪距进行差分定位更高的精度, 但这种方法也有自身的局限性, 并不适用于所有的情况。首先, 此方法虽然消除了载波相位整周模糊度的问题, 但是对整周跳变却没有很好的办法, 如果发生大的周跳, 采用相位平滑伪距差分其精度甚至可能不如单纯的伪距差分。其次, 由于流动站接收机通常是在运动的状态下来采集数据的, 而且, 并不是所有的在视卫星高度角都理想, 甚至某些 GPS 卫星的伪距测量值还很有可能含有粗差。用含有粗差的历元参与平滑伪距对伪距改正值产生什么样的影响, 还有待继续研究^[9]。所以在不能保证观测条件非常好的情况下, 相位平滑伪距差分的应用是较难推广的。

2.4.4 载波相位差分

载波相位差分也被称为 RTK 技术 (Real Time Kinematic), 与伪距差分的原理类似, 只不过它实时处理的是两个测站的载波相位测量值。它能够快速高效的提供动态用户的三维坐标值, 并能够达到厘米级精度, 广泛应用于各种动态高精度实时测量定位当中。

载波相位差分技术有两种作业模式: 一种称为改正法, 另一种称为差分法。改正法是利用精确已知的基站坐标, 将基站的 GPS 接收机接收到的载波相位的改正数解算出来, 再通过电台等通讯设备发播给动态用户, 动态用户用此相位改正数校正自身接收的载波相位观测值, 从而获得较高精度的站星距离, 然后采用改正后的站星距离组成方程, 求解动态用户的坐标值。改正法要获得载波相位的改正数, 是通过求得相位测距与站星几何距离之差而获得的, 此方法中一个关键问题是相位整周数初始值的确定, 求解起始相位模糊度最常用的方法有: 删除法、模糊度函数法、FARA 法和消去法。而差分法是指基站不再计算相位的改正数, 而是将基准站采集到的载波相位观测值由通讯设备实时的发播给动态用户, 由动态用户在流动站上进行组差 (可组成 4 个单差方程、2 个双差方程、1 个三差方程) 求解坐标。前者传送的数据量较小, 对差分系统的通讯设备要求不高, 后者传送的数据量较大, 对系统通讯设备要求较高, 并且移动站的计算量比前者大, 但是精度也高于前者。

运用载波相位差分技术 (RTK) 测量精度高, 并且所需观测时间短, 在快速高精度动态测量中得到了非常广泛的应用, 其前景也很广阔。另外, 载波相位差分技术模型复杂, 实施也有一定的局限性, 对通讯设备要求也很高, 而基准站差分信号的传送延时, 信号丢失, 数据传输的可靠性和通讯设备受到一些干扰等等都会成为影响载波相位差分工作的关键问题, 会给运用 RTK 进行实时定位带来影

响和误差。

2.5 本章小结

本章主要是差分 GPS 技术理论介绍。第一节首先介绍了单点定位的原理和模型，并以伪距单点定位为例，引出 GPS 测量的误差来源，包括：与 GPS 卫星有关的因素、与信号传播有关的误差和仪器本身的误差这三大方面。第三节简单介绍了差分 GPS 的原理及其相对于单点定位对测量误差项改正的优势。最后在第四节中介绍差分 GPS 技术的分类，依差分时间的不同、工作方式的不同和传输的信息方式不同可以有不同的分类，并详细介绍了位置差分、伪距差分、相位平滑伪距差分和载波相位差分的原理、模型，对比了四种差分方式的优缺点。

第三章 OEM 板特性及数据的标准化

3.1 AC12 GPS-OEM 板

本实验是采用法国 THALES——泰雷兹导航定位公司的 AC12 GPS-OEM 板。THALES 公司是一家在航空、国防电子和信息技术与服务领域从事专业电子产品和数据处理系统出口并居于世界领先地位的国际化公司。GPS-OEM 板是 GPS 接收机的核心部件。该电路板具有接收 GPS 信号、处理信号、输出观测信号和定位结果等功能。

3.1.1 AC12 技术参数

AC12 是一款低成本且具有载波相位测量功能的 OEM 板,它所表现出的高精度和高可靠性的特点以前只有在昂贵的专业级 GPS 产品中才能发现。AC12 极为精确的载波相位数据可以被用于导航和为各种应用提供优势,能够使用户应用载波相位平滑算法提高伪距定位的精度,甚至可以进行载波相位差分定位。另外 AC12 支持远端差分操作并且具有跟踪 (SBAS-WAAS/EGNOS/MSAS) 卫星以便增强和免费地进行差分 DGPS 定位功能。AC12 GPS-OEM 板外观如图 2-1 所示。

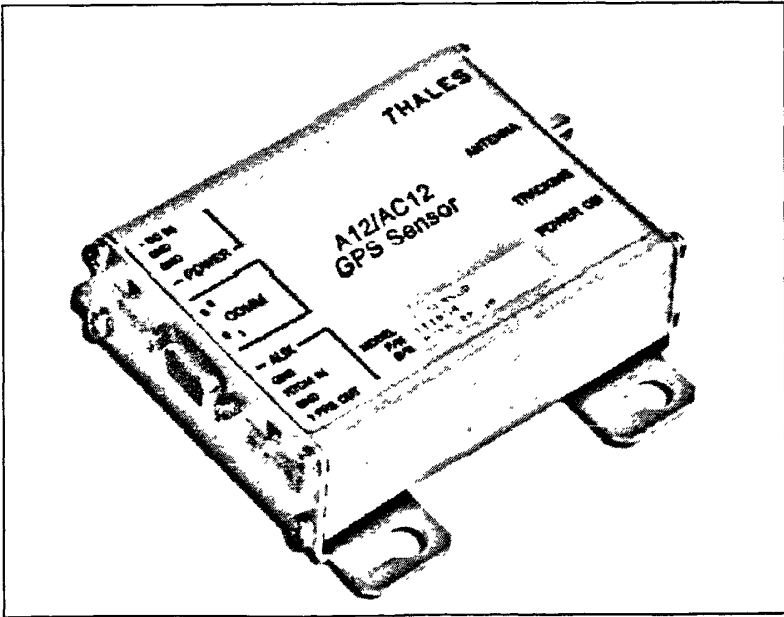


图 3-1 AC12 GPS-OEM 板

AC12 是泰雷兹公司推出的一款性价比极高的 OEM 板,其性能参数如下表。其中定位精度是在假定至少有 4 颗清晰可视的卫星,且在低多路径影响的净空环境下实验计算得到的结果,若在高多路径影响下,精度会有所降低。

表 3-1 AC12 GPS-OEM 板技术参数

性能类型	技术参数
基本性能:	<div><ul style="list-style-type: none">• 12 通道 GPS 接收机附带 2 通道的 SBAS• L1 单频, C/A 码和载波相位输出• 支持远端 DGPS 差分模式• 1Hz 更新率• 1 PPS (TTL 电平)输出, 精度 250 ns, 差分可达 100ns• 单串口实现差分输入, 控制与数据输出等操作• 支持用户自定义地图基准• 预制 99 个地图基准• 支持 WAAS/EGNOS 星基增强系统差分• 最大速度: 514 m/s• 最大高度: 18288 m</div>
实时定位 精度:	<div>自主模式: -水平 CEP: 3.0 m -水平 95%: 5.0 m SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS) 星基增强模式: -水平 CEP: 1.0 m -水平 95%: 3.0 m 当地 DGPS 模式: -水平 CEP: 0.8 m -水平 95%: 1.5 m 载波相位测量精度: 3 mm (均方根误差)</div>
捕获时间:	<div>典型捕获时间: 热启动小于 10 s 温启动小于 45 s 冷启动小于 150 s 典型重捕时间: 所有卫星被遮挡在 20 秒之内:需要 1 - 2 s 所有卫星被遮挡在 180 秒之内:需要 3 - 5 s</div>
通 讯:	<div><ul style="list-style-type: none">• 采用泰雷兹导航定位公司通用的 OEM 接收机设置命令, 标准的 NMEA 0183 V3.0 数据输出• 兼容标准的 RTCM V2.2 格式进行远端差分 (数据类型 1, 3 和 9)</div>

	• 可以通过软件选择通讯参数:1200~115K bps
其它:	尺寸: 111.2 x 104.6 x 29.5 mm 重量: 240.0g I/O 接口: 2 个 RS-232 接口 输入电压 :10-18 VDC 电流消耗 :70-90 mA 功率(典型): 1 瓦

3.1.2 AC12 OEM 原始数据格式

AC12 采用泰雷兹导航定位公司通用的 OEM 接收机设置命令, 标准的 NMEA 0183 V3.0 数据输出, 除此之外, 它还能提供精确的载波相位输出等原始数据。其中, 数据块 PBN 包含信号达到接收机的时间、接收机钟差改正、天线位置和速度等信息; 数据块 MCA 含有伪距、卫星数量、方位角和多普勒变化率等信息; 数据块 SNV 中包含有卫星轨道参数等。用户通过向接收机发送命令, 获得数据块记录, 并按照相应的格式提取信息。

命令: \$PASHS,NME,PBN,c,s,d

回复: \$PASHR,PBN,<Raw position data + checksum>

Raw position data (站点原始数据): 包括数据接收时刻、天线位置、速度、接收机钟差、位置精度因子等。

表 3-2 PBN:原始位置数据电文

字段	字节	内容
long [rcvtime]	4 字节	信号到达时间, 以毫秒为单位的周参考全球定位系统时间。这一次标记是用来作为提及的所有时间和位置的测量
char [sitename]	4 字节	用户输入的 4 个字符站名
double navx	8 字节	天线位置的 x 坐标 (米)
double navy	8 字节	天线位置的 y 坐标 (米)
double navz	8 字节	天线位置的 z 坐标 (米)
float navt	4 字节	接收机的时钟偏移 (错误) 米
float navxdot	4 字节	该天线 x 速度每秒
float navydot	4 字节	该天线 y 速度每秒
float navzdot	4 字节	该天线 z 速度每秒
float navtdot	4 字节	接收机时钟漂移每秒
unsigned short PDOP	2 字节	PDOP 乘以 100

checksum	2 字节	校验
Total bytes	56 字节	总共

命令: \$PASHS,NME,MCA,A,OFF<Enter>

回复: \$PASHR,MCA,<Ashtech type 3 data string + checksum>

接收机至少锁定一个卫星, 否则 MCA 不输出。包含多普勒频率, 伪距, 卫星数量, 高度, 和方位角。

表 3-3 MCA:原始观测数据电文

字段	字节	内容
unsigned short [sequence tag]	2 字节	序列编号 单位为 50 毫秒, 模 30 分钟
unsigned char [left]	1 字节	字节当前历元要发送的剩余 MCA 消息数
unsigned char [svprn]	1 字节	卫星号(1 - 56)
unsigned char [elev]	1 字节	仰角 (度)
unsigned char [azim]	1 字节	方位角 (2 ° 递增)
unsigned char[chnind]	1 字节	通道 (1-12)
测量数据来源于 C / A 码 (29 字节)		
unsigned char [warning]	1 字节	警告
unsigned char [goodbad]	1 字节	表明的质量状况的测量
char [polarity_known]	1 字节	这个号码是零或五: 0—卫星刚刚被锁定; 5—指第一帧的导航讯息已收到
unsigned char [ireg]	1 字节	信噪比
double [full phase]	8 字节	全载波相位的卫星中引用
double [raw_range]	8 字节	原始距离 (秒) 的卫星中引用。使用公式: 接收时间*传播时间=原始距离
long [doppler]	4 字节	多普勒测量 (10 ⁻⁴ 赫兹) 的卫星中引用
long [smoothing]	4 字节	31-24 位代表 [smooth_count]他们正整数, 说明平滑类型: 0—非光滑; 1—不平滑; 100—大多数平滑
unsigned short [checksum]	1 字节	校验
Total bytes	37 字节	总共

命令: \$PASHS, NME, SNV, A, ON<Enter>

回复: \$PASHR, SNV, <Ephemeris data string + checksum>

接收机至少锁定一个卫星, 否则 SNV 不输出。信息包含还包含轨道参数、时钟修正参数和调和校正参数。

表 3-4 SNV:原始星历数据

字段	字节	内容
Short wn	2 字节	GPS 周
Long tow	4 字节	GPS 秒
Float tgd	4 字节	电离层延迟
Long aodc	4 字节	卫星钟数据龄期
Long toc	4 字节	第一数据块参考时间
Float af2	4 字节	卫星钟差漂移速率项
Float af1	4 字节	卫星钟差漂移项
Float af0	4 字节	卫星钟差常数项
Long aode	4 字节	星历数据龄期
Float deltan	4 字节	平近点角改正
Double m0	8 字节	参考时刻平近点角
Double e	8 字节	偏心率
Double roota	8 字节	卫星轨道长半轴的平方根
Long toe	4 字节	星历参考时刻
Float cic	4 字节	在星历参考时刻 t_{oe} 轨道倾角(近似于法向)周期改正余弦项的振幅, 弧度
Float crc	4 字节	在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道径向方向上周期改正余弦项的振幅, 米
Float cis	4 字节	在星历参考时刻 t_{oe} 轨道倾角(近似于法向)周期改正正弦项的振幅, 弧度
Float crs	4 字节	在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道径向方向上周期改正正弦项的振幅, 米
Float cuc	4 字节	在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道延迹方向上周期改正余弦项的振幅, 弧度
Float cus	4 字节	在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道延迹方向上周期改正正弦项的振幅, 弧度
Double omega0	8 字节	参考时刻升交点赤经, 弧度
Double omega	8 字节	近地点角距

Double i0	8 字节	参考时刻轨道倾角，弧度
Float omegadot	4 字节	升交点赤经变化率
Float idot	4 字节	轨道倾角变化率
Short accuracy	2 字节	精度指标
Short health	2 字节	卫星健康指标
Short fit	2 字节	间隔
Char prnnum	1 字节	卫星编号
Char res	1 字节	预留字符
Checksum	2 字节	校验
Total bytes	132 字节	总共

3.1.3 AC12 接口

AC12 OEM 板采用的是 9 针 RS-232 串口封装。RS-232 是个人计算机上的通讯接口之一，是由电子工业协会(Electronic Industries Association, EIA) 所制定的异步传输标准接口，通常 RS-232 接口以 9 针接脚 (DB-9) 或者是 25 针接脚 (DB-25) 的形态出现，而一般的计算机上会有两组 RS-232 接口，分别为 COM1 和 COM2。很多编程语言都能实现串口通讯，这为 OEM 板和计算机之间的通讯实现成为可能。

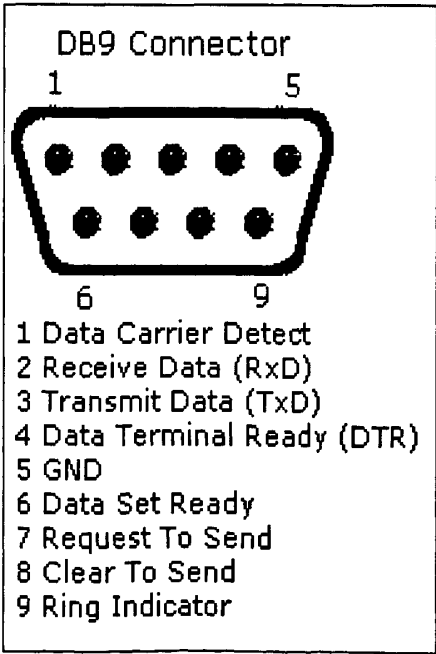


图 3-2 DB-9 RS-232 接口

3.2 RINEX 标准数据格式

由于接收机的型号很多，厂商设计的数据格式也各不相同，国际上为了能够统一使用不同型号接收机的数据，设计了一种与接收机无关的 RINEX(The

Receiver Independent Exchange Format)格式。RINEX 是一种在 GPS 测量应用中普遍采用的标准数据格式,该格式采用文本形式存储数据。最早由瑞士伯尔尼大学天文学院(Astronomical Institute University of Berne)的 Werner Gartner 于 1989 年提出。当时提出该数据格式的目的是为了能够综合处理在 EUREF89 中所采集的 GPS 数据。目前,RINEX 格式已经成为了 GPS 测量数据处理的标准数据格式,几乎所有测量型 GPS 接收机厂商都提供将其格式文件转换为 RINEX 格式文件的工具,而且几乎所有的数据分析处理软件都能够直接读取 RINEX 格式的数据。目前应用最为普遍的是 RINEX 格式的第 2 版本。

RINEX 2 格式的 GPS 数据文件的命名规则为: *ssssdddf.yyt*

其中: *ssss*: 表示的是 4 个字母的测站点名称;

ddd: 表示文件的第一组数据观测时刻的年积日;

f: 表示某测站某日接收到的某种文件的顺序号,0 则表示只有一个;

yy: 表示某年(以两位数表示,例如:97 表示 1997 年);

t: 表示 RINEX 格式文件的类型,它有以下六种:

C: 钟文件;

H: 同步卫星 GPS 载荷的导航电文;

G: GLONASS 卫星导航电文;

M: 气象数据文件;

N: 导航电文文件;

O: 观测数据文件。

RINEX 格式数据中含有 6 种不同种类的数据文件,用于存放各种类型的数据:它们是观测数据文件(存储 GPS 观测数据:伪距、载波、多普勒频移)、导航电文文件(存储 GPS 卫星广播星历数据)、气象数据文件(存储在观测站附近的气象数据:气压、相对湿度等)、GLONASS 导航电文文件(存储 GLONASS 卫星星历数据)、同步卫星 GPS 载荷的导航电文文件(存储在增强系统中搭载有类 GPS 信号发生器的地球同步卫星(GEO)的导航电文)以及卫星和接收机钟文件(存储卫星和接收机时钟信息)^[20]。

所有 RINEX 标准交换格式文件结构是都以节、记录、字段以及列为单位逐级进行组织的。所有的 RINEX 格式文件都分为两节:文件头和数据记录。每个记录占一行,每行都不超过 80 列宽。RINEX 格式的头文件用于存储与整个文件相关的信息,位于每个文件的前部,并以“END OF HEADER”作为文件头结束的标注。文件头中每个记录的第 61-80 列为注释标签,用于解释说明相应行上第 1-60 列中所表示的内容的含义^[21]。

在实际的定位和 GPS 数据处理中,经常要用到的是观测数据文件和导航电文

文件，精密定位时也会用到气象数据文件，本文的实验重点做了观测数据文件和导航电文文件的格式转换，其它数据文件转换方式类似。

3.2.1 观测数据文件

在观测数据文件中记录的主要是每一个观测历元的伪距观测值、载波相位观测值和积分多普勒等类型的观测数据。伪距观测值的单位为 m，载波相位观测值的单位为周。

观测文件前几行是文件头，文件头通常以“END OF HEADER”或空行表示结束，文件头中每行的60~80字符为给出本行内容的说明，观测文件的文件头中一般会列出了RINEX版本号、文件类型、定位系统、项目执行者、测量点编号、测量点名称、观测人员与单位、接收机编号与类型版本、天线编号与类型、测站近似坐标、天线L1相位中心与点位的关系(向上、向东、向北的偏离量)、采样间隔、波长因子、观测值种类数及观测值类型、第一个观测历元时刻、最后一个观测历元时刻、测得卫星的编号等。

2.10 OBSERVATION DATA M (MIXED)										RINEX VERSION / TYPE
DAT2RINW 3.10 001										PGM / RUN BY / DATE
										COMMENT
242										MARKER NAME
										MARKER NUMBER
										OBSERVER / AGENCY
1234567 Trimble GNSS										REC # / TYPE / VERS
										ANT # / TYPE
-2193601.6672 5182660.1465 2991461.0263										APPROX POSITION XYZ
0.0400 0.0000 0.0000										ANTENNA: DELTA H/E/N
1 1										WAVELENGTH FACT L1/2
15										LEAP SECONDS
2011 1 17 7 8 38.000000 GPS										TIME OF FIRST OBS
2011 1 17 8 41 37.000000 GPS										TIME OF LAST OBS
										END OF HEADER
11 1 17 7 8 38.000000 0 12R01R18R24R11R02G29G02G26G21G05G08G15										
22305838.344 22305842.105 119237483.126 92740282.733										
22889109.125 22889115.469 122183591.137 95031710.172										
20878044.883 20878049.660 111644284.372 86834454.984										
22605593.203 22605598.855 120797419.324 93953576.686										
20477708.102 20477713.871 109272973.836 84990101.924										
21409284.281 21409291.586 112506545.321 87667469.256										
22138979.539 22138985.484 116341121.772 90655441.871										
19793272.359 19793279.387 104014346.066 81050166.638										
24064889.781 24064895.969 126461841.893 98541725.527										
21785894.609 21785901.746 114485648.767 89209621.727										
24348027.961 24348034.656 127949751.681 99701115.170										
20701508.359 20701515.492 108787162.293 84769244.407										

图3-3 RINEX格式的观测数据文件

其中的波长因子为1指采用相关技术恢复载波，整周模糊度和失周数只能是整数，即整周模糊度；波长因子为2指采用平方技术生成载波，整周模糊度和失周数可能是0.5周的倍数，即半周模糊度。观测类型中的：

- C1: L1上的C/A码伪距观测量 (米);
- P1: L1上的P码伪距观测量 (米);
- P2: L2上的P码伪距观测量 (米);
- L1: L1上的载波相位观测量 (周);
- L2: L2上的载波相位观测量 (周);
- D1: L1上的多普勒伪距观测量 (Hz);
- D2: L2上的多普勒伪距观测量 (Hz)。

文件头之后, 是各个历元的观测数据, 每个历元数据是由一个历元时间行和若干个观测数据行组成, 每个历元时间行内容包括: 年, 月, 日, 时, 分, 秒, 质量标记, 在视卫星数, 卫星编号, 钟差。其中:

1. 卫星数指该历元时刻接收到信号的卫星总数, 之后是这些卫星的编号。

质量标记(Event Flag)的数字分别表示的含义为:

- 0: 这一历元数据正常;
- 1: 上一历元和这一历元间中断;
- 2: 开始移动接收机天线;
- 3: 安置在新点位, 移动结束, 重新开始观测;
- 4: 新的字头信息;
- 5: 异常 (历元太大);
- 6: 周跳记录。

2. 卫星编号 *snn*:

S 是指卫星系统, 有以下几种:

- G~美国 GPS;
- R~俄罗斯 GLONASS;
- T~多普勒卫星定位系统。

nn: GPS 系统用 PRN 编号;
GLONASS 系统则是通道号;
其它卫星定位系统是两位数的编号。

3. 历元行中的钟差, 是接收机钟差, 列于 68~80 位, 此项不一定存在, 若存在, 则历元时刻、伪距观测值和相位观测值应当作如下改正:

历元时刻 = 给出历元时刻 - 钟差

伪距 = 伪距观测值 - 钟差 × 光速

相位 = 相位观测值 - 钟差 × 频率

历元行下面的观测数据行, 是接收机对各颗卫星观测值, 每行中的数据个数等于表头中的观测值种类数 (取决于接收机类型), 数据类型按表头中的观测值

类型排列，观测值后面会跟着一个失周指示（一位数）和一个信号强度指示（一位数）。当某个数据没有测到时，计为 0.0 或空格。当失周指示(取值范围是 0~7)为 0 或空格时数据正常。信号强度指示数字含义为：

- 0 或空格表示正常；
- 1 表示信号强度最小；
- 5 表示信号强度适中，最理想的信噪比；
- 9 表示信号强度最大。

3.2.2 导航电文文件

导航电文文件也称作广播星历文件，接收机锁定卫星并解出 C/A 码后，就能取得广播星历（导航电文的第一、第二数据块），它是用户定位和导航的基础数据，根据这些信息就可以计算出任意时刻的卫星位置和速度。在实时 GPS 应用中，它是必不可少的，并且大多数的工程网观测数据的后处理也采用广播星历。卫星发送的广播导航电文每 2 个小时更新一次，所以每次观测只需记录一组广播导航电文。

与观测数据文件一样，导航电文中的前几行也是表头，表头中的第 60 至 80 列是相应行的说明，第一行的“2”是 RINEX 格式版本，“NAVIGATION DATA”是指本文件类型为导航数据文件；第二行是建立该文件的机构名称、执行人、建立日期。表头中“ION ALPHA”和“ION BETA”的两行指相应的参数是电离层改正参数(采用差分模型相对定位时，该参数无用)；注释为“DELTA-UTC”给出的是计算 UTC 时间的历书参数，其中 A0, A1 是计算时间改正参数，T 是 UTC 数据的参考时间，W 是 UTC 参考星期数；注释为“LEAP SECONDS”的行给出了 GPST 与 UTC 之间由于跳秒引起的时间变化，在表头结束前可插入无限多的注解行，注解行的说明为“COMMENT”。表头一般以“END OF HEADER”结束。

2.00	NAVIGATION DATA				RINEX VERSION / TYPE			
DAT2RINW 3.10 001					PGM / RUN BY / DATE			
GPS RECEIVER NAVIGATION DATA					COMMENT			
7.451D-09	-1.490D-08	-5.960D-08	1.192D-07		ION ALPHA			
8.806D+04	-4.915D+04	-1.966D+05	3.277D+05		ION BETA			
5.58793544769D-09	1.15463194561D-14	319488		83	DELTA-UTC: A0, A1, T, W			
15					LEAP SECONDS			
					END OF HEADER			
02 11	1 17	7 59 44.0	3.15155368298D-04	2.16004991671D-12	0.0000000000D+00			
			0.0000000000D+00	-5.9062500000D+00	5.56094592143D-09	4.16686357802D-01		
			-3.63215804100D-07	9.92871623021D-03	5.19864261150D-06	5.15368321609D+03		
			1.1518400000D+05	2.04890966415D-07	1.37377208228D+00	6.14672899246D-08		
			9.38794638828D-01	2.6753125000D+02	-3.10247593869D+00	-8.52142638018D-09		
			-2.60010830495D-10	0.0000000000D+00	1.6190000000D+03	0.0000000000D+00		
			0.0000000000D+00	0.0000000000D+00	-1.72294676304D-08	9.0000000000D+00		
			1.1457600000D+05	0.0000000000D+00	0.0000000000D+00	0.0000000000D+00		

图3-4 RINEX格式的导航电文文件

表头结束后，为数据记录行，每 8 行表示一颗卫星的广播星历，第一行的第 1 个数字是卫星的 PRN 伪随机编号。每行中的数据含义如下表：

表 3-5 RINEX 格式的导航电文数据含义

卫星PRN号，年，月，日，时，分，秒， a_{f0} ， a_{f1} ， a_{f2}
$aode$ ， C_{rs} ， Δn ， M_0
C_{uc} ， e ， C_{us} ， \sqrt{A}
t_{oe} ， C_{ic} ， Ω_0 ， C_{is}
i_0 ， C_{rc} ， ω ， $\dot{\Omega}$
\dot{i} ， $cf\lg l2$ ， $weekno$ ， $pf\lg l2$
$svacc$ ， $svhlth$ ， $tgdt$ ， $aodc$
ttm

上表中各符号含义如下：

- a_{f0} ：卫星时钟偏差常数项(s)；
- a_{f1} ：卫星时钟漂移项(s/s)；
- a_{f2} ：卫星时钟漂移速率项(s/s²)；
- Δn ：平近点角速度的改正数(rad/s)；
- M_0 ：参考时刻 t_{oe} 的平近点角(rad)；
- e ：卫星轨道扁心率；
- \sqrt{A} ：卫星轨道长半轴的平方根(m^{1/2})；
- Ω_0 ：参考时刻 t_{oe} 升交点赤经(rad)；
- i_0 ：参考时刻 t_{oe} 轨道倾角(rad)；
- ω ：近地点角距(rad)；
- $\dot{\Omega}$ ：升交点赤经变化率(rad/s)；
- C_{uc} ：在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道延迹方向上周期改正余弦项的振幅(rad)；
- C_{us} ：在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道延迹方向上周期改正正弦项的振幅(rad)；
- C_{rc} ：在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道径向方向上周期改正余弦项的振幅(m)；
- C_{rs} ：在星历参考时刻 t_{oe} 在轨道径向方向上周期改正正弦项的振幅(m)；
- C_{ic} ：在星历参考时刻 t_{oe} 轨道倾角周期改正余弦项的振幅(rad)；
- C_{is} ：在星历参考时刻 t_{oe} 轨道倾角周期改正正弦项的振幅(rad)；
- t_{oe} ：星历参考时刻(星期中的秒数)(s)；
- $aode$ ：星历数据的龄期；
- \dot{i} ：轨道倾角变化率(rad/s)；
- $cf\lg l2$ ：l2上存在哪些码指示；
- $weekno$ ：GPS星期数；

pf1g12: I2 上 P 码伪距指示;

svacc: 本广播星历精度指标(m);

svhlth: 卫星是否健康指标;

tgdc: 电离层群延迟改正参数(s);

aodc: 卫星钟数据龄期;

ttm: 信息传送时间(与接收机对接收到的卫星信号解码有关)(s)。

3.2.3 气象数据文件

完整的RINEX格式文件应当包含有气象数据文件,虽然在大多数测量工作不需要这个文件,在数据处理时,只要简单的输入气象参数就可以,但是在高精度观测时,有时需要记录气象数据。RINEX格式的气象数据文件与导航数据文件、观测数据文件类似,表头也列出了RINEX版本号,文件建立的单位、名称和日期,测站名称与测站数,不同的观测类型,其中:PR表示大气压力(mbar)、TD表示大气干分量温度(摄氏度)、HR表示相对湿度(百分比)、ZW表示湿分量天顶路径延迟(毫米)。表头也以“END OF HEADER”作为结束符。数据记录块记录的是每个GPS历元的气象数据。

3.3 本章小结

本章首先介绍了 AC12 GPS-OEM 板的性能和技术参数,接着介绍 OEM 板原始数据格式以及数据接口,然后介绍了 RINEX 格式数据的命名规则和数据种类,并详细介绍了 RINEX 格式数据中的观测数据文件和导航电文文件的文件结构和参数含义,为 OEM 板原始数据向 RINEX 格式数据转换提供了理论基础,为后续的卫星位置计算和程序设计打下铺垫。接收数据的标准化是 GPS 数据处理的基础,目前很多 GPS 接收机厂商提供输出 RINEX 格式数据,国内外也有厂商提供专门的 RINEX 格式标准化的软件。

第四章 卫星坐标及钟差计算

从第二章知道,在 GPS 定位模型中,不管是单点定位还是差分定位,我们都要解决两个最基本的问题:卫星信号发射时刻的卫星位置和星站之间的距离。卫星的位置是通过卫星星历求得的,卫星星历是描述卫星运动轨道的信息,是一组对应于某一时刻的卫星轨道的参数及其变率。卫星坐标的偏差(也叫卫星星历误差)精确与否,会对定位的结果产生很大的影响。由于卫星星历是由地面监控系统根据卫星测轨结果计算求得的,所以其准确性取决于卫星跟踪站的数量及空间分布、轨道计算时所用的轨道模型以及定轨软件的完善程度决定。另外,在非差分定位模型中,卫星钟差也要求能尽量高精度的测出,以提高定位的精度。

用户要获得卫星位置的坐标有两种方法:一是通过 GPS 接收机实时接收 GPS 广播星历,通过广播星历计算卫星信号发射时刻的位置;另一种方法是从国际 GPS 服务(IGS——International GPS Service)网站下载精密星历,通过对一定间隔时间段的精密星历进行卫星轨道的标准化,从而获得各个时间点的卫星位置。同样,对于卫星钟差也可以分别从广播星历求得和通过下载精密钟差进行插值或拟合求出。

4.1 GPS 广播星历及卫星坐标计算

GPS 卫星的广播星历是通过卫星发射载波信号搭载含有轨道信息的导航电文,传递给用户的。用户接收机接收到这些信号,经过解码便可获得所需要的卫星广播星历。GPS 卫星的广播星历,通常包括相对与某一参考历元的开普勒轨道参数和必要的轨道摄动项参数。这些参数是根据 GPS 监测站约一周的观测资料推算得到的。参考星历只是代表卫星在参考历元的瞬时轨道参数,实际上,由于摄动力的影响,真实轨道是偏离于参考轨道的,偏离程度由观测历元和参考历元之间的时间差决定。通常认为一套星历参数的有效期是以参考时刻 t_{oe} 为中心的 4 个小时之内,超过这个时间的星历被认为是过期和无效的。用轨道参数的摄动项对已知的卫星参考星历作改正,就可外推出其它观测历元的星历^[19]。

4.1.1 GPS 广播星历参数

GPS 用户通过 GPS 接收机进行实时的数据采集,接收的广播星历是 RINEX 数据格式的导航电文。GPS 用户通过导航电文,可以获得的有关卫星星历参数,共有 16 个,其中包括 1 个参考时刻、6 个相应参考时刻的开普勒轨道参数和 9 个反映摄动力影响的修正参数。

表 4-1 GPS 广播星历参数

轨道参数	$t_{oe} \sqrt{A} e \Omega_0 \omega M_0$
摄动参数	$Crs \ Crc \ Cis \ Cic \ Cuc \ Cus \ \dot{\Omega} \ \Delta n \ i$
坐标系	WGS-84
更新频率	1小时
外推能力	≥ 2 小时，跟拟合数据弧段长度有关
精度	约20米，其中径向约2米

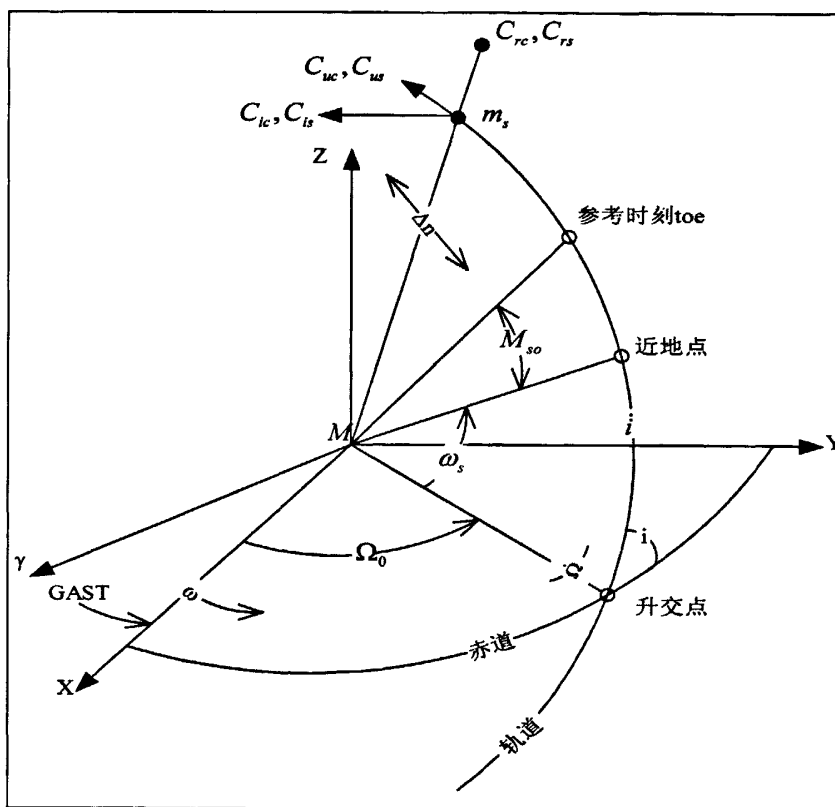


图 4-1 GPS 广播星历参数示意图

4.1.2 广播星历计算卫星位置

GPS 广播星历表中的时间和坐标分别属于 GPS 时间系统和 WGS-84 坐标系，利用广播星历参数来计算卫星天线相位中心在 WGS-84 坐标系中的位置，其具体过程如下：

1. 计算卫星运行的平均角速度 n_0 ：

$$n_0 = \sqrt{\frac{GM}{A^3}} \quad (4-1)$$

式中的 GM 为地球引力常数, A 为卫星轨道长半轴。

2. 计算从观测时刻到参考时刻的时间差 t_r ：

GPS 广播星历参数是相对于参考时刻 t_{sc} 给出的, 它是相对于 GPS 周开始时刻

的积秒数,所以需要将观测时刻给出的 GPS 时间 t 归算到相对参考的相对时间 t_k ,
 t 也是相对于 GPS 周开始时刻的积秒数。

$$\begin{aligned} t &= t' - \Delta t \\ \Delta t &= a_0 + a_1(t' - t_{oc}) + a_2(t' - t_{oc})^2 \\ t_k &= t - t_{oc} \end{aligned} \quad (4-2)$$

式中的 t' 为观测时刻卫星的钟面时, t 为经过卫星钟差改正的观测时刻。

3. 改正平均角速度 n :

$$n = n_0 + \Delta n \quad (4-3)$$

4. 计算信号发射时刻卫星的平近点角 M_k :

$$M_k = M_0 + n \times t_k \quad (4-4)$$

5. 按下式迭代计算信号发射时刻偏近点角 E_k :

$$M_k = E_k - e \times \sin E_k \quad (4-5)$$

6. 由下两式计算信号发射时刻真近点角 v_k :

$$\begin{cases} \cos v_k = \frac{(\cos E_k - e)}{(1 - e \times \cos E_k)} \\ \sin v_k = \frac{\sqrt{1 - e^2} \sin E_k}{(1 - e \times \cos E_k)} \end{cases} \quad (4-6)$$

7. 计算信号发射时刻升交点角距 ϕ_k :

$$\phi_k = v_k + \omega \quad (4-7)$$

8. 计算信号发射时刻摄动改正项:

$$\begin{cases} \delta u_k = C_{us} \sin(2\phi_k) + C_{uc} \cos(2\phi_k) \\ \delta r_k = C_{rs} \sin(2\phi_k) + C_{rc} \cos(2\phi_k) \\ \delta i_k = C_{is} \sin(2\phi_k) + C_{ic} \cos(2\phi_k) \end{cases} \quad (4-8)$$

9. 计算改正后的升交点角距 u_k :

$$u_k = \phi_k + \delta u_k \quad (4-9)$$

10. 计算改正后的向径 r_k :

$$r_k = A(1 - e \cos E_k) + \delta r_k \quad (4-10)$$

11. 计算改正后的轨道倾角 i_k :

$$i_k = i_0 + \delta i_k + i^* t_k \quad (4-11)$$

12. 计算信号发射时刻卫星在轨道平面内的坐标 (x'_k, y'_k) :

$$\begin{cases} x'_k = r_k \cos(u_k) \\ y'_k = r_k \sin(u_k) \end{cases} \quad (4-12)$$

13. 改正升交点的经度:

$$\Omega_k = \Omega_0 + (\dot{\Omega} - \dot{\Omega}_e) t_k - \dot{\Omega}_e t_{oc} \quad (4-13)$$

式中的 $\dot{\Omega}_e$ 是地球自转的角速度。

14. 最后计算卫星在地固坐标系 WGS-84 中的坐标 (X_k, Y_k, Z_k) :

$$\begin{cases} X_k = x'_k \times \cos(\Omega_k) - y'_k \times \cos(i_k) \times \sin(\Omega_k) \\ Y_k = x'_k \times \sin(\Omega_k) + y'_k \times \cos(i_k) \times \cos(\Omega_k) \\ Z_k = y'_k \times \sin(i_k) \end{cases} \quad (4-14)$$

4.1.3 算例—广播星历计算卫星坐标

根据上一节卫星空间位置的计算步骤, 运用 MATLAB7.0 编写解算模块 ComSatPos.m 文件。采用 GPS 接收机于 2011 年 1 月 17 日在中南大学新校区某控制点上接收卫星信号, 选取 26 号卫星, 参考时刻 $t_{oe} = 122400$ 的历元, 推算观测时刻 $t = 123300$ 时卫星的坐标。广播星历如下:

```
26 11 1 17 10 0 0.0 -9.82545316219D-05 -9.20863385545D-12 0.00000000000D+00
0.00000000000D+00 1.38156250000D+02 3.90587698117D-09 1.16549445308D+00
7.08922743797D-06 2.00736855622D-02 5.60283660889D-06 5.15364598846D+03
1.22400000000D+05 -2.99885869026D-07 -2.72627978861D+00 1.30385160446D-08
9.88902912644D-01 2.89687500000D+02 1.11983165522D+00 -8.20998483597D-09
1.43577409147D-10 0.00000000000D+00 1.61900000000D+03 0.00000000000D+00
0.00000000000D+00 0.00000000000D+00 0.00000000000D+00 0.00000000000D+00
0.00000000000D+00 0.00000000000D+00 0.00000000000D+00 0.00000000000D+00
```

经解算, 求得此观测时刻 26 号卫星的坐标值为 $(-20416942.214\text{m}, -9266007.022\text{m}, 13985979.181\text{m})$ 。此观测时刻下该卫星的精密星历可以从 IGS 站下载得到, 用以对比。要下载精密星历, 必须知道该观测时刻对应的 GPS 周。在 GPS 定位中, 历元常用 GPS 星期加 GPS 秒表示, GPS 星期为从 1980 年 1 月 6 日 0 时时刻的整星期数, GPS 秒为从刚过去的星期日 0 时开始至当前时刻的秒数。从民用时间转换到 GPS 时间方法如下:

$$JD = \text{INT}(365.25y) + \text{INT}[30.6001(m+1)] + D + H/24 + 1720981.5 \quad (4-15)$$

其中 JD 为 Julian Date (儒略日)

其中 y, m 按以下规则计算:

若 $M \leq 2$, 那么 $y = Y - 1$, $m = M + 12$

若 $M > 2$, 那么 $y = Y$, $m = M$

其中, Y, M, D 分别为民用的年、月、日 (整数); H 为以小时为单位时间 (实数)。

$$\text{GPS 周} = \text{INT}[(JD - 2444244.5)/7] \quad (4-16)$$

$$\text{GPS 秒} = (JD - 2444244.5 - 7 * \text{GPS 周}) * 86400 \quad (4-17)$$

用上述方法可求得算例中的参考历元属于 GPS 时间的 1619 周的周一, 于是从 IGS 站下载名为 igr16191.sp3 的精密星历文件。精密星历文件提供的改观测时刻下 26 号卫星的坐标值及坐标值对比如 4-2 所示。

表 4-2 坐标值对比

坐标分量	广播星历计算卫星坐标	精密星历卫星坐标	差值
X	-20416942.214m	-20416942.870m	-0.656m
Y	-9266007.022m	-9266005.223m	1.799m
Z	13985979.181m	13985981.287m	2.100m

从表中可以看出，广播星历计算出的观测时刻卫星坐标值与 IGS 站提供的精密星历卫星坐标值之间存在偏差，偏差最大值为 2.100m，符合 IGS 站说明的广播星历误差不超过 260cm 的精度，这也说明程序是可靠的。

4.2 IGS 精密星历及轨道标准化

广播星历精度较低，在进行高精度的 GPS 测量时，一般会采用经过了后处理的精密星历。精密星历是为了满足大地测量、地球动力学研究等精密应用领域的需要而研制、生产的一种高精度的事后星历。目前使用的精密星历大都是由国际 GPS 服务 (IGS) 生产的。IGS 是国际大地测量协会 IAG 为支持大地测量和地球动力学研究于 1993 年组建的一个国际协作组织，1994 年 1 月 1 日正式开始工作。IGS 的主要功能包括：提供各跟踪站的 GPS 观测资料和 IGS 的各种产品，为大地测量和地球动力学研究服务、广泛支持各国政府和各单位组织的相关活动、研究制定必要的标准和细则。

4.2.1 精密星历

目前，IGS 站提供的星历除了广播星历之外，还包括了精度较高的超快速精密星历 (IGU 星历)、快速精密星历 (IGR 星历) 和最终精密星历 (IGS 星历)。轨道精度由高到低分别为 IGS 星历、IGR 星历、IGU 星历和广播星历。

表 4-3 GPS 星历产品质量指标

星历类型	精度指标	时延	更新率	采样率
广播星历	260cm	实时	两小时	一天
IGU 星历 (预报部分)	10cm	实时	每天 4 次	15min
IGU 星历 (事后部分)	<5cm	3h	每天 4 次	15min
IGR 星历	<5cm	17h	每天	15min
最终精密星历	<3cm	13d	每周	15min

随着 GPS 定轨理论、轨道计算模型与数据处理软件的不断完善，全球跟踪站数目的增多和跟踪站几何分布的改善，IGS 组织提供的卫星轨道有了很大的提高。表 4-3 给出了 IGS 网站 08 年公布的卫星轨道精度信息。

目前 IGS 组织提供的精密星历采用 SP3(Standard Product #3, 标准产品第 3 号)格式。它是一种在卫星大地测量中广泛采用的数据格式，由美国国家大地测

量委员会(NGS---National Geodetic Survey)提出，专门用于存储 GPS 卫星的精密轨道数据。SP3 格式文件存储方式为 ASCII 文本文件，其基本内容是卫星位置和卫星钟纪录，另外，还可以包含卫星的运行速度和钟的变率。常用的 SP3 格式星历文件采用 8+3 的命名规则：tttwwwd.sp3。其中：ttt 表示精密星历的类型，包括超快速精密星历（IGU 星历）、快速精密星历（IGR 星历）和最终精密星历（IGS 星历）三种；www 表示 GPS 周；d 表示星期，0 表示星期日，1~6 表示星期一至星期六。

```
#cP2011 1 17 0 0 0.00000000 96 ORBIT IGS05 HLM IGS,
## 1619 86400.00000000 900.00000000 55578 0.00000000000000
+ 32 G01G02G03G04G05G06G07G08G09G10G11G12G13G14G15G16G17
+ G18G19G20G21G22G23G24G25G26G27G28G29G30G31G32 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
+ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 3 2 2 2 3 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2
++ 2 2 2 2 2 2 2 2 3 2 2 3 2 2 2 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
++ 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%c G cc GPS ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%c cc cc ccc ccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc cccc
%f 1.2500000 1.025000000 0.000000000000 0.0000000000000000
%f 0.0000000 0.000000000 0.000000000000 0.0000000000000000
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
%i 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
/* RAPID ORBIT COMBINATION FROM WEIGHTED AVERAGE OF:
/* cod emr esa gfz jpl ngs sio usn
/* REFERENCED TO IGS TIME (IGST) AND TO WEIGHTED MEAN POLE:
/* PCV:IGS05_1617 OL/AL:FES2004 NONE Y ORB:CMB CLK:CMB
* 2011 1 17 0 0 0.00000000
PG01 -3298.843947 -16231.394825 -20844.221696 999999.999999
PG02 13315.992672 19883.685407 -12005.057469 315.095164 10 11 8 142
PG03 -23199.857346 -10856.067654 -8031.424660 663.467612 12 10 13 133
PG04 7058.603493 25278.911292 -2712.241886 10.555381 8 8 10 132
PG05 15169.989901 6312.634659 -20905.384662 -99.972625 8 10 10 112
PG06 -20162.696899 -13741.165542 -10564.798133 -13.729899 11 9 13 142
PG07 -7163.728876 19929.216373 -15897.317570 1.937173 10 10 11 124
PG08 -1045.566790 25494.754548 -6226.143808 7.183605 8 7 9 129
```

图 4-2 SP3 格式文件内容

SP3 格式文件是以节、纪录、字段和列为单位逐级组织的，其内容上分为文件头和数据纪录两节，每一节由若干纪录所组成。SP3 格式文件的文件头含有文件版本号、轨道数据首历元的时间、数据历元间隔、文件中具有数据的卫星 PRN 号、数据的精度指数及注释等。数据记录则包括每个历元每颗卫星的三维坐标和钟改正。SP3 格式文件内容如图 4-2 所示。

4.2.2 卫星轨道的标准化

在进行 GPS 数据处理时，计算卫星位置的坐标是一个必不可少的过程，利

用广播星历求得的卫星位置坐标含有较大的误差,在一般的定位测量中可以使用,但是对于高精度的 GPS 测量,往往对卫星坐标的精度提出更高的要求。与广播星历不同的是,IGS 站提供的精密星历是每 15 分钟一组卫星坐标和钟差数据,这并不能保证测量时采集的数据刚好是和精密星历给出卫星位置的时刻相符,为了得到其它任意时刻卫星位置的精确坐标值,就需要利用精密星历对卫星轨道进行标准化。国内外很多学者专家都做过此方面的研究,最经典的就是采用拉格朗日插值方法和切比雪夫多项式拟合。

1. 拉格朗日卫星坐标插值:

对于一系列的离散点 $y_i = f(x_i)$, 若存在一个次数为 n 的多项式 $l_k(x) (k=0,1,\dots,n)$, 在给定的互异点 x_0, x_1, \dots, x_n 上 $l_k(x)$ 满足条件

$$l_k(x_i) = \begin{cases} 1, & i=k \\ 0, & i \neq k \end{cases} \quad (i, k=0, 1, 2, \dots, n) \quad (4-18)$$

则称 $l_k(x)$ 为节点 $x_i (i=0,1,\dots,k-1,k,k+1,\dots,n)$ 上的拉格朗日插值基函数。由 $l_k(x_i) = 0 (i \neq k)$ 知 $x_i (i=0,1,\dots,k-1,k,k+1,\dots,n)$ 是 $l_k(x)$ 的零点, 因此可设

$$l_k(x) = A_k(x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\cdots(x-x_n)$$

其中, A_k 为待定系数。由条件 $l_k(x_k)=1$ 和 x_i 互异可定 A_k , 于是

$$\begin{aligned} l_k(x) &= \frac{(x-x_0)(x-x_1)\cdots(x-x_{k-1})(x-x_{k+1})\cdots(x-x_n)}{(x_k-x_0)(x_k-x_1)\cdots(x_k-x_{k-1})(x_k-x_{k+1})\cdots(x_k-x_n)} \\ &= \prod_{\substack{i=0 \\ i \neq k}}^n \frac{x-x_i}{x_k-x_i} \end{aligned} \quad (4-19)$$

取 $k=0,1,\dots,n$, 就得到 $n+1$ 个拉格朗日插值基函数。以 $l_0(x), l_1(x), \dots, l_n(x)$ 的线性组合表示的 n 次多项式为:

$$p(x) = a_0 l_0(x) + a_1 l_1(x) + \cdots + a_n l_n(x) \quad (4-20)$$

式中, a_0, a_1, \dots, a_n 为待定系数, 令

$$p(x_i) = \sum_{i=0}^n a_i l_i(x_i) = y_i \quad (i=0,1,\dots,n) \quad (4-21)$$

利用 $l_i(x)$ 的性质得 $a_i = y_i \quad (i=0,1,\dots,n)$ 代入上式, 所得多项式即为拉格朗日插值多项式 $L_n(x)$:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i l_i(x) = \sum_{i=0}^n y_i \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x-x_j}{x_i-x_j} \quad (4-22)$$

设在时间间隔 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 内的 $n+1$ 个节点上的卫星为 $[X, Y, Z]_i (i=0,1,\dots,n)$, 则在该时段内卫星的坐标可用下面的拉格朗日插值公式来表示:

$$X(t) = \sum_{i=0}^n X(i) l_i(t) \quad (4-23)$$

$$Y(t) = \sum_{i=0}^n Y(i) l_i(t) \quad (4-24)$$

$$Z(t) = \sum_{i=0}^n Z(i) l_i(t) \quad (4-25)$$

式中 $l_i(t) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{t-t_j}{t_i-t_j}$ 即为数学模型中拉格朗日插值基函数。由于拉格朗日内

插在插值弧段的中间逼近效果很好, 在靠近两端位置容易出现数据跳跃的现象, 所以应该尽可能地使内插点位于插值弧段的中间部分。

2. 切比雪夫拟合卫星轨道:

切比雪夫多项式拟合就是根据已知的数据拟合出一个多项式函数, 使得拟合出的函数在已知点的函数值与给定的函数值的方差和最小, 且该函数是以切比雪夫多项式为基函数构成的。

在区间 $[-1, 1]$ 上的权函数 $\rho(x) = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}$ 的正交多项式称为切比雪夫多项式, 它可表示为

$$T_n(x) = \cos(n \arccos x) \quad (n = 0, 1, \dots) \quad (4-26)$$

若令 $x = \cos(\theta)$, 则 $T_n(x) = \cos n\theta$ ($0 \leq \theta \leq \pi$), 利用三角公式可以将 $\cos n\theta$ 展开成 $\cos \theta$ 的一个 n 次多项式, 故上式可表示为 x 的 n 次多项式。

假设在时间间隔 $[t_0, t_0 + \Delta t]$ 进行卫星位置的切比雪夫拟合。其中 t_0 为起始历元时刻, Δt 为拟合时间区间的长度。首先将变量 $t \in [t_0, t_0 + \Delta t]$ 变换成 $\tau \in [-1, 1]$

$$\tau = \frac{2}{\Delta t}(t - t_0) - 1, \quad t \in [t_0, t_0 + \Delta t] \quad (4-27)$$

则卫星坐标 X, Y, Z 的切比雪夫多项式为:

$$X(t) = \sum_{i=0}^n C_{x_i} T_i(\tau); \quad Y(t) = \sum_{i=0}^n C_{y_i} T_i(\tau); \quad Z(t) = \sum_{i=0}^n C_{z_i} T_i(\tau) \quad (4-28)$$

式中, n 为切比雪夫多项式的阶数。 $C_{x_i}, C_{y_i}, C_{z_i}$ 分别为计算 X 坐标、 Y 坐标、 Z 坐标的切比雪夫多项式系数。 T_i 是 τ 的递推函数:

$$T_0(\tau) = 1$$

$$T_1(\tau) = \tau$$

$$T_n(\tau) = 2\tau T_{n-1}(\tau) - T_{n-2}(\tau), \quad |\tau| \leq 1, n \geq 2. \quad (4-29)$$

根据卫星星历, 设卫星的 X_k 坐标为观测值, 则可组成误差方程:

$$V_{X_k} = \sum_{i=0}^n C_{x_i} T_i(\tau) - X_k \quad (4-30)$$

上式为间接平差方程式, 根据最小二乘原理, 即可求出切比雪夫多项式系数, 进而可以确定切比雪夫拟合模型, 便可求出相应时间区间内的任意时刻卫星坐标。为了检核拟合的质量, 需要求解拟合方程的方差以评定精度:

$$\delta = \pm \sqrt{\frac{V^T V}{m - n - 1}} \quad (4-31)$$

4.2.3 算例—精密星历插值与拟合

根据 4.2.2 节的介绍，按照拉格朗日插值和切比雪夫多项式拟合的模型，运用 MATLAB7.0 编写精密星历插值与拟合的程序：Lagrange.m 和 Chebyshev.m。从 IGS 站下载精密星历 igr16191.sp3 文件，选取 1 号卫星坐标值为数据点，分别做拉格朗日插值和切比雪夫多项式拟合，研究拉格朗日插值阶数与精度的关系，切比雪夫多项式拟合阶数，数据点个数与精度的关系。

实验一：以 2011 年 1 月 17 日 6 时 0 分 0 秒为待求的插值坐标点，选取该时刻两侧的数据分别作 7 阶、8 阶、9 阶、10 阶、11 阶拉格朗日插值，求得的坐标值与理论值（16452.735497，-2827.644229，20575.635809）之间的差值如表 4-4 所示。

由实验结果可以得到几点结论：1.作相同阶数的拉格朗日插值，不同坐标轴方向上的分量精度并不一样；2.一般情况下，8 阶拉格朗日插值就能达到厘米级，10 阶插值精度最高；3 并不是阶数越高插值精度就越高，9 阶以上时精度提高的程度并不明显，当达到 11 阶时精度反而下降。综上，在做拉格朗日插值时，根据数据点和运算的速度考虑，选择 8、9、10 阶插值效果较好。

表 4-4 Lagrange 插值不同阶数插值结果

	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶	11 阶
X	16452.7355	16452.7355	16452.7354	16452.7354	16452.7354
Y	-2827.6444	-2827.6442	-2827.6442	-2827.6442	-2827.6442
Z	20575.6357	20575.6358	20575.6358	20575.6358	20575.6358
δ_x	0.0764m	0.0210m	0.0002m	0.0000m	-0.0004m
δ_y	-0.1795m	0.0056m	-0.0016m	0.0002m	0.0006m
δ_z	-0.1006m	-0.0035m	-0.0010m	-0.0008m	-0.0010m

实验二：以 2011 年 1 月 17 日 0 时 0 分 0 秒到 11 时 45 分 0 秒为拟合区间，选取卫星坐标的 X 分量为拟合数据点，分别取 32 个、36 个、40 个、48 个数据点作 12 阶、16 阶、20 阶、24 阶、28 阶切比雪夫多项式拟合，并求出不同数据点个数和不同阶数的拟合精度，结果如表 4-5 所示。

表 4-5 Chebyshev 不同数据点个数不同阶数拟合精度

	32 个	36 个	40 个	48 个
12 阶	3.4772e-003	4.3360e-003	4.05775e-003	4.0868e-003
16 阶	2.2703e-005	2.8655e-005	2.9294e-005	3.9249e-005
20 阶	7.9249e-007	7.3768e-007	7.1867e-007	7.5420e-007
24 阶	1.6921e-005	3.9384e-006	7.4694e-007	7.5841e-007
28 阶	2.5418e-001	2.8915e-002	1.4834e-004	7.9096e-007

由实验二结果可以得到几点结论：1.数据点增多对拟合精度的提高效果并不明显；2.在相同数据点个数的情况下，一般精度会随着拟合阶数的增大而提高，16阶时就能达到厘米级，在20阶达到拟合的最高精度；3.但是20阶之后精度提高并不明显，24阶之后甚至还出现了精度降低的情况。综上，在进行切比雪夫多项式拟合卫星坐标时，建议选择16到20的阶数。

4.3 卫星钟差计算

卫星时钟误差，即卫星钟差，是指每一颗卫星的时钟相对于GPS时系的差值。GPS时系是以地面监控系统的主控站的主钟为基准的连续时间尺度，但是由于协调世界时UTC时间尺度的跳秒和主控站时钟的不稳定，GPS时间和UTC时间之间存在变化差值^[22]。它由地面监控系统检测，通过导航电文发送给用户接收机。从第三章的非差伪距定位模型可以知道，卫星钟差的存在会降低单点定位的精度，卫星钟差的改正非差定位中必不可少的一个步骤。由广播星历提供的时钟参数可以求出卫星时钟改正，但是对于精密定位的用户来说，其精度较低，而IGS站提供的间隔5min的精密钟差精度能达到0.1~0.2纳秒，能运用在高精度的测量及定位中。

4.3.1 广播星历计算卫星钟差

为了确保各颗卫星时钟与GPS时系同步，GPS地面监控部分通过对卫星信号的监测，将卫星时钟在GPS时间 t 时的卫星钟差描述成以下二项式：

$$\Delta t = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2 \quad (4-32)$$

上式中，三个系数 a_0 ， a_1 ， a_2 以及参考时间 t_{oc} 都是由卫星导航电文的第一数据块提供的。但是上式仅仅代表了从频率信号的产生到GPS卫星信号的发射这一段卫星设备延时，除此之外，卫星时钟误差还应该包括相对论效应的改正量 Δt_r ，它的计算式为：

$$\Delta t_r = F e_s \sqrt{a_s} \sin E_k \quad (4-33)$$

其中， e_s 是卫星轨道偏心率， a_s 是轨道的长半径， E_k 是卫星轨道的偏近点角， F 为常数值：

$$F = \frac{-2\sqrt{\mu}}{c^2} = -4.442807633 \times 10^{-10} [s/m^{1/2}] \quad (4-34)$$

上式中， μ 为地球引力常数 $3.986005 \times 10^{14} [m^3/s^2]$ ， c 为真空中的光速 $2.99792458 \times 10^8 [m/s]$ 。

综上，由广播星历提供的时钟参数将每颗卫星的时间 t_s 化算为同一的GPS时间系统：

$$t_{GPS} = t_s - \Delta t - \Delta t_r \quad (4-35)$$

4.3.2 精密卫星钟差

对于进行精密定位测量的用户来说，广播星历求解的卫星钟差精度还较低，为了获得高精度的卫星钟差，通常采用 IGS 站提供的精密卫星钟差。精密卫星钟差是以后缀名为.clk 的文件格式，其内容格式如表 4-5 所示。

表 4-6 clk 格式卫星精密钟差文件说明

字头名称	说明	格式
RINEX VERSION/TYPE	版本号：3.00 文件类型：c 表示为钟数据 卫星系统：G 表示为 GPS R 表示为 GLONASS E 表示为 Galileo S 表示 SBAS 星基增强系统 M 表示为 mixed	F9.2,11X, A1,19X, A1,19X,
PGM/RUN BY/DATE	项目的纲要 项目的执行者 项目的建立时间	A20 A20 A20
COMMENT	注释	A60
LEAP SECONDS	由于跳秒引起的时间变化改正	I6
#OF SOLN STA/TRF	钟数据记录接收机数 参考框架	I6, 4X A50
SOLN STA NAME/NUM	测量点名称 测量点编号 测量点地心坐标	A4,1X A20 I11, X,I11, X,I11
#OF SOLN SATS	观测卫星编号数	I6,54X
PRN LIST	卫星编号	15(A1,I2,1X)
END OF HEADER	字头结束符	60X
TYP/EPOCH/CL	数据类型 卫星、接收机名 历元 可用数据 钟差 钟漂	A2,1X A4,1X I4,413, F10.6 I3,3X E19.12, X E19.12
TYP/EPOCH/CLK	钟率 卫星时钟漂移	E19.12, X E19.12, X

	卫星时钟加速度	E19.12, X
	卫星时钟加速度率	E19.12, X

IGS 站提供的精密卫星钟差文件是 15min 或者 5min 间隔的精密卫星钟差参数，然而在实际的测量定位中，GPS 采样率一般为 30 秒、15 秒甚至更高。由于美国的 SA 政策取消之后，加在 GPS 卫星钟上的高频抖动部分随之就消失了，这使得卫星钟差的变化趋于平稳，于是采用适当的算法对精密钟差文件进行插值或者拟合同样可以得到任意时刻的高精度的卫星钟差。插值或者拟合算法类似于 4.2.2 节的介绍，同样可以采用拉格朗日插值法或者切比雪夫多项式拟合，选取一定数量的数据点和阶数，求得任意时刻卫星钟差。

4.4 本章小结

本章第一节首先介绍了 GPS 广播星历的参数，然后介绍利用广播星历参数计算卫星位置的方法，并运用 MATLAB7.0 编写程序实现该方法。用 GPS 接收机接受卫星导航电文，通过程序读取导航电文计算得某时刻的卫星位置，并从 IGS 网站下载精密星历对比，以验证程序的有效性。

第二节介绍了 IGS 站提供的各种星历的种类，精度以及数据格式，然后介绍了利用精密星历进行卫星轨道标准化的经典方法，详细介绍了拉格朗日插值和切比雪夫多项式拟合的数学模型以及在卫星轨道标准化中的应用，编写程序实现以上两个算法。从 IGS 站下载精密星历，通过实验验证程序的有效性，并得到了一些关于插值阶数、拟合阶数、数据点个数与精度的关系，给出一些有益的结论。

第三节介绍了通过广播星历计算卫星钟差的方法，clk 格式精密星历文件的内容格式说明以及采用插值或拟合的方法可以求得任意时刻的精密卫星钟差。

第五章 程序设计与实验

5.1 MATLAB 简介

在前面几章的研究基础之上,作者在 MATLAB7.0 平台上进行了相应的程序编写。MATLAB 是 matrix laboratory (矩阵实验室) 的缩写,由美国 MathWorks 公司 1984 年推出的一款科学计算软件,它含有总包和若干个工具箱。它的矩阵计算和数据可视化能力非常强大,它不但可以实现数值分析、优化和统计;偏微分方程的求解以及信号处理等领域的科学数学计算,还能够实现二维和三维的图形绘制、图像的处理、地图制作和虚拟现实等图形图像的处理,并且这些功能都集成在一个易于使用的视窗环境中,很大程度上摆脱了诸如 C 等非交互式程序设计语言的编辑模式^[23]。

该软件的特点可以概括为以下几个几方面:

(1) 简单易学: MATLAB 为一门编程语言,它的语法规则类似于一般的结构化高级编程语言,且使用更为方便,具有一般语言基础的用户可以很快掌握。

(2) 工作平台和编程环境友好: MATLAB 是由一系列的工具组成的。这些工具使用户对 MATLAB 的函数和文件使用更为方便,并且多数工具采用的是图形用户界面,随着 MATLAB 软件的不断完善,其用户界面越来越精致,更接近于 Windows 的标准界面,人机交互性越来越强,操作更为简单。另外, MATLAB 的编程环境简单却提供了较完备的调试工具,程序不需要经过编译可直接运行,且可以快速地提示错误并进行原因分析。

(3) 计算功能强大: MATLAB 具有强大的矩阵计算能力,它包含了大量计算算法集合,拥有数十个工具箱和几百个工程中要用到的数学函数,非常容易满足用户所需要的各种计算功能。

(4) 绘图能力强大: MATLAB 可以绘制常见的二维、三维图,例如条形图、线形图、散点图、饼图、直方图、误差条图、极坐标图等。

(5) 可扩展性能: 用户可以根据自身的需要编写 M 文件,组成自己的工具箱。另外,利用软件的编译器还可以生成独立的可执行程序,从而隐藏其中的算法,脱离 MATLAB 工作平台。除此之外, MATLAB 还支持 DDE、OLE 和 COM 组件等机制,可以与同样支持该技术的应用程序接口,实现与 VB、VC 等的混合编程。

5.2 功能模块设计

由于 MATLAB 拥有上述的诸多优点,特别是强大的矩阵计算功能,而 GPS 测

量定位解算基本都是针对矩阵进行的,运用 MATLAB 进行程序的设计,非常方便。整个程序分为几个模块:原始数据接收与转换、观测数据的读取、精密星历和精密钟差文件的读取、由广播星历计算卫星坐标、利用精密星历进行卫星轨道标准化、卫星钟差计算、伪距差分解算。

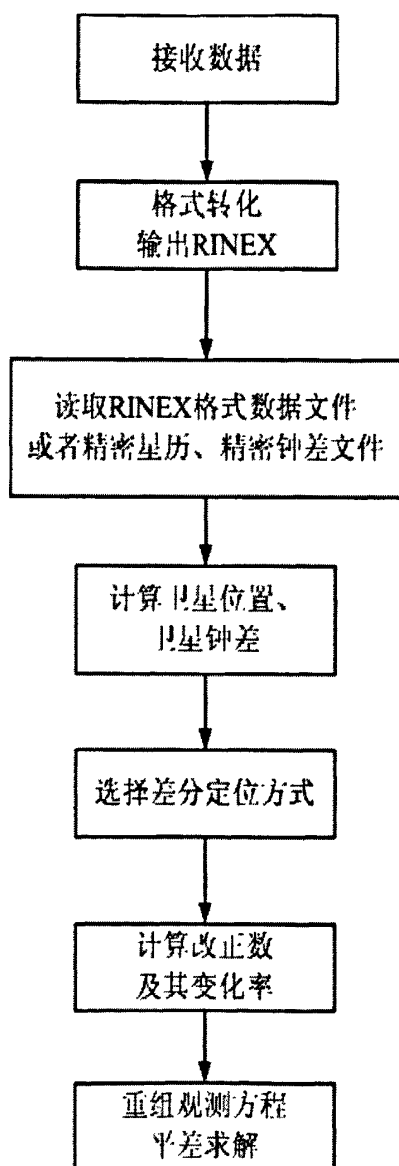


图 5-1 程序总体流程图

5.2.1 数据接收与转换模块

在第三章已经介绍了 AC12 OEM 板的原始数据格式,其中 PBN、MCA、SNV 数据块含有原始的数据信息,PBN 包含信号达到接收机的时间、接收机钟差改正、天线位置和速度等信息;数据块 MCA 含有伪距、卫星数量、方位角和多普勒变化率等信息;数据块 SNV 中包含有卫星轨道参数等。要获取数据必须向接收机发送

接收记录的命令和提取代码的命令。该接收器默认协议设置 8 数据位, 1 停止位, 无奇偶校验, 默认波特率为 4800, 端口 A 和 B。用户发给接收机的所有命令都是设置或者查询命令。一般 Set 命令改变接收器参数, 并开始输出数据。Query 命令一般要求接收状态信息。所有 Set 命令以\$ PASHS 开头, 所有的 Query 命令以\$ PASHQ 开头。所有的命令必须以回车或<CR> <LF>结尾发给接收机。适用的命令是: \$PASHS, NME, PBN; \$PASHS, NME, MCA; \$PASHS, NME, SNV。数据接收记录模块如图 5-2 所示。

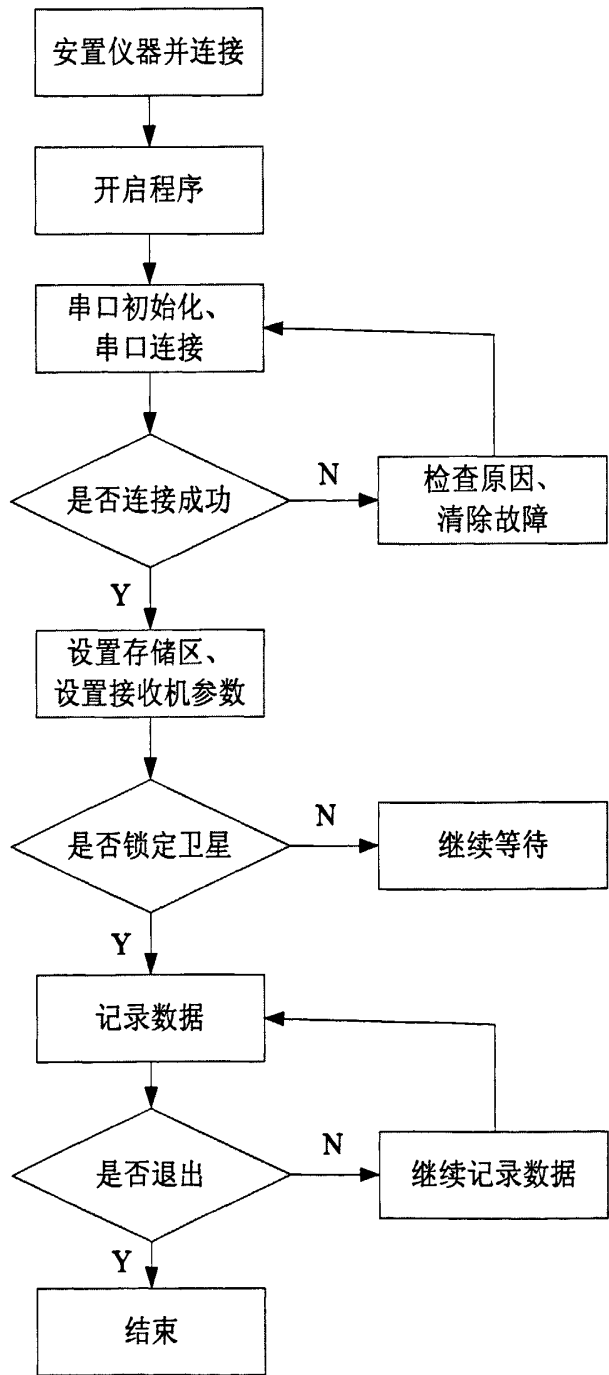


图 5-2 接收记录流程图

5.2.2 文件读取模块

在进行 GPS 数据处理前,首先必须准确的读取 GPS 的各类相关的文件,以便在进行数据处理时能准确的调用,这些文件主要包括接收机接收到的导航数据文件、观测数据文件、气象数据文件以及从 IGS 站下载的精密星历和精密钟差文件。根据 MATLAB 具有强大的矩阵处理能力,可以把 GPS 文件读取并存储为全矩阵或者结构体数组的形式。用 MATLAB 读取文件的方式就是由程序命令按照字符串进行读取。在第三章和第四章中以及介绍,这些 GPS 文件都有固定的格式,每个文件都分为文件字头块和数据块,读取的方法类似,下面以读取导航电文数据为例。

读取导航文件时,以“END OF HEADER”字符串作为分界点。此字符串之前为文件字头块,之后为数据块。通过简单的循环结构,将文件读取并存储于结构体数组中,具体流程见图 5-3。

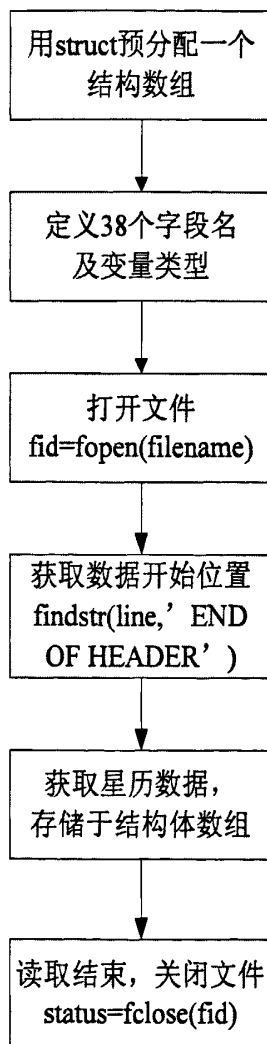



图 5-3 导航文件读取流程图

读取的导航数据文件存储于一个定义好的结构体数组里,可以通过使用结构体数组索引,获取数组中的任何字段值或者字段元素,例如可以获得某个卫星的

所有参数。也可以利用 MATLAB 元包数组，将数据存放并显示出来，效果图如图 5-4 所示。

Array Editor - new.dat

File Edit View Graphics Debug Desktop Window Help

 Stack Base

	1	2	3	4	5	6	7
1	'pm'	2	2	2	8	9	9
2	'year'	2009	2009	2009	2009	2009	2009
3	'month'	3	3	3	3	3	3
4	'day'	10	10	10	10	10	10
5	'hour'	5	6	7	6	6	8
6	'minute'	59	0	59	0	0	0
7	'second'	44	0	44	0	0	0
8	'a0'	0.00015523	0.00015523	0.00015523	-0.00019382	4.4588e-005	4.4602e-005
9	'a1'	-9.0949e-...	-9.0949e-...	-9.0949e-...	-1.4779e-...	2.0464e-012	2.0464e-012
10	'a2'	0	0	0	0	0	0
11	'aode'	0	0	0	0	0	0
12	'crs'	66.5	66.5	80.375	86.938	96.188	95.469
13	'dn'	5.3284e-009	5.3284e-009	5.2316e-009	4.4298e-009	4.4309e-009	4.6427e-009
14	'Manomaly'	0.64885	0.65119	1.6989	-1.8343	-2.0827	-1.0326
15	'cuc'	3.3695e-006	3.3714e-006	4.2524e-006	4.3493e-006	5.1633e-006	5.3383e-006
16	'ecc'	0.0089971	0.0089971	0.0089976	0.010474	0.020226	0.020226
17	'cus'	5.9251e-006	5.9269e-006	6.0797e-006	4.9025e-006	4.7423e-006	5.9679e-006
18	'at'	5153.6	5153.6	5153.6	5153.7	5153.6	5153.6
19	'toe'	1.9438e+...	1.944e+005	2.0158e+...	1.944e+005	1.944e+005	2.016e+005
20	'cic'	1.7695e-007	1.7695e-007	7.0781e-008	-5.7742e-...	2.6636e-007	-2.794e-007
21	'om0'	0.9704	0.9704	0.97034	-2.1002	-2.1935	-2.1935
22	'cis'	-6.333e-008	-6.333e-008	8.9407e-008	-2.4401e-...	1.5832e-007	3.4086e-007
23	'i0'	0.94165	0.94165	0.94165	0.98733	0.97517	0.97517
24	'crc'	254.41	254.41	250.66	303.22	291.78	279
25	'w'	2.7408	2.7408	2.741	2.9816	1.464	1.4641
26	'omd'	-8.6589e-...	-8.6589e-...	-8.5204e-...	-8.2389e-...	-7.9443e-...	-8.4993e-...
27	'idt'	4.7216e-010	4.7288e-010	3.7216e-010	5.6288e-010	5.5967e-010	5.1609e-010
28	'cflg12'	0	0	0	0	0	0
29	'weekno'	1522	1522	1522	1522	1522	1522
30	'pflg12'	0	0	0	0	0	0
31	'svaccuracy'	0	0	0	0	0	0
32	'svhealth'	0	0	0	0	0	0
33	'tgd'	0	0	0	0	0	0
34	'aodc'	0	0	0	0	0	0

图 5-4 读取导航文件结果

采用 MATLAB 读取 GPS 文件，可以将文件里的所有数据都用矩阵存储，数据显示精度不会影响到计算的精度，并且可以利用 MATLAB 矩阵的计算优势，非常方便的获取其中的数据，以计算不同时刻的卫星坐标值，还可以很方便的查看每颗卫星各个历元的数据质量。

5.2.3 卫星位置及钟差计算模块

GPS 导航定位测量是以卫星为已知的基准点，通过量测卫星至接收机的距离，并利用空间后方交会的原理来确定测站的位置。因此，在 GPS 定位测量过程当中，计算卫星位置贯穿整个 GPS 数据处理的始终。计算卫星位置的方法，在第四章已经探讨过，存在两种方法：一是通过接收机接收到的导航电文广播星历，解译出卫星参考时刻的轨道参数，从而计算卫星的位置；另一方法是从 IGS 站下载间隔 15min 的精密星历，并进行卫星轨道标准化。卫星钟差的计算也类似，也可通过两种方法得到：一是通过卫星星历提供的钟差常数项、钟速以及钟漂，再根据二次项 $\Delta t = a_0 + a_1(t - t_{oc}) + a_2(t - t_{oc})^2$ 求得；另一方法是通过 IGS 站提供的 5min 或者 15min 的精密钟差插值或者拟合求得。

卫星位置及钟差的计算在第四章已经详细讨论过，其原理、方法以及实验精度都在第四章给出，这里不再重复。

5.2.4 测站位置解算模块

在测站位置解算模块，采用的是伪距差分的方法。伪距差分是目前应用最为普遍的差分方式，本文通过程序编写，重点实现这一差分方式。伪距差分流程图见图 5-5 所示。

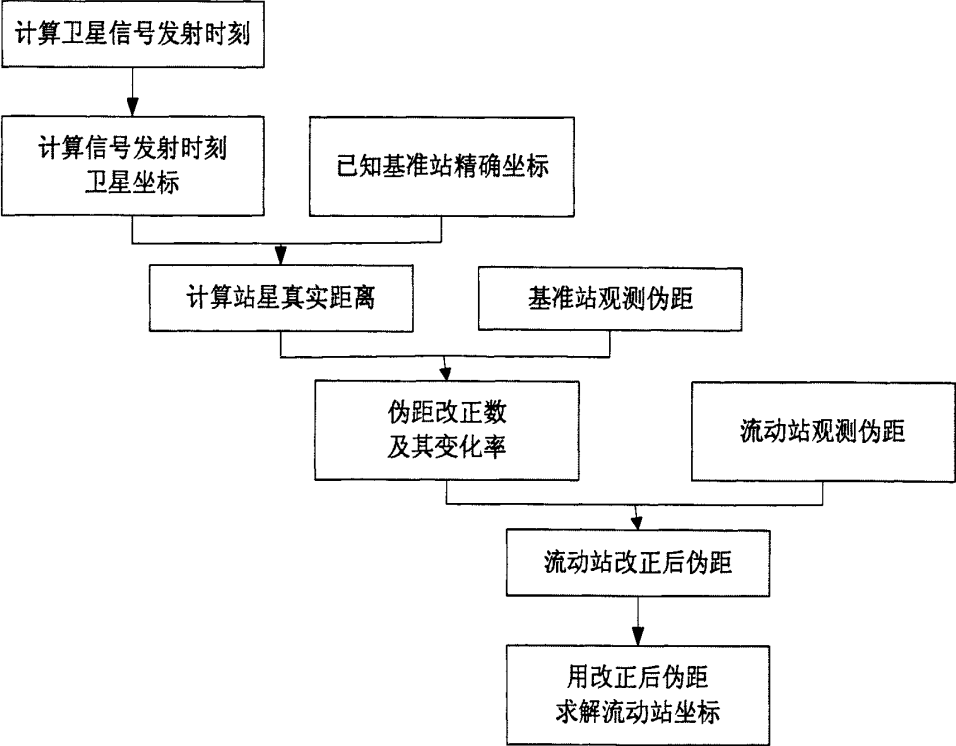


图 5-5 伪距差分流程图

伪距差分定位解算步骤通常可以分为以下五步：1. 初始值设置；2. 非线性方程组线性化；3. 利用最小二乘求解线性方程组；4. 更新线性方程组的根；5. 判断牛顿迭代的收敛性。

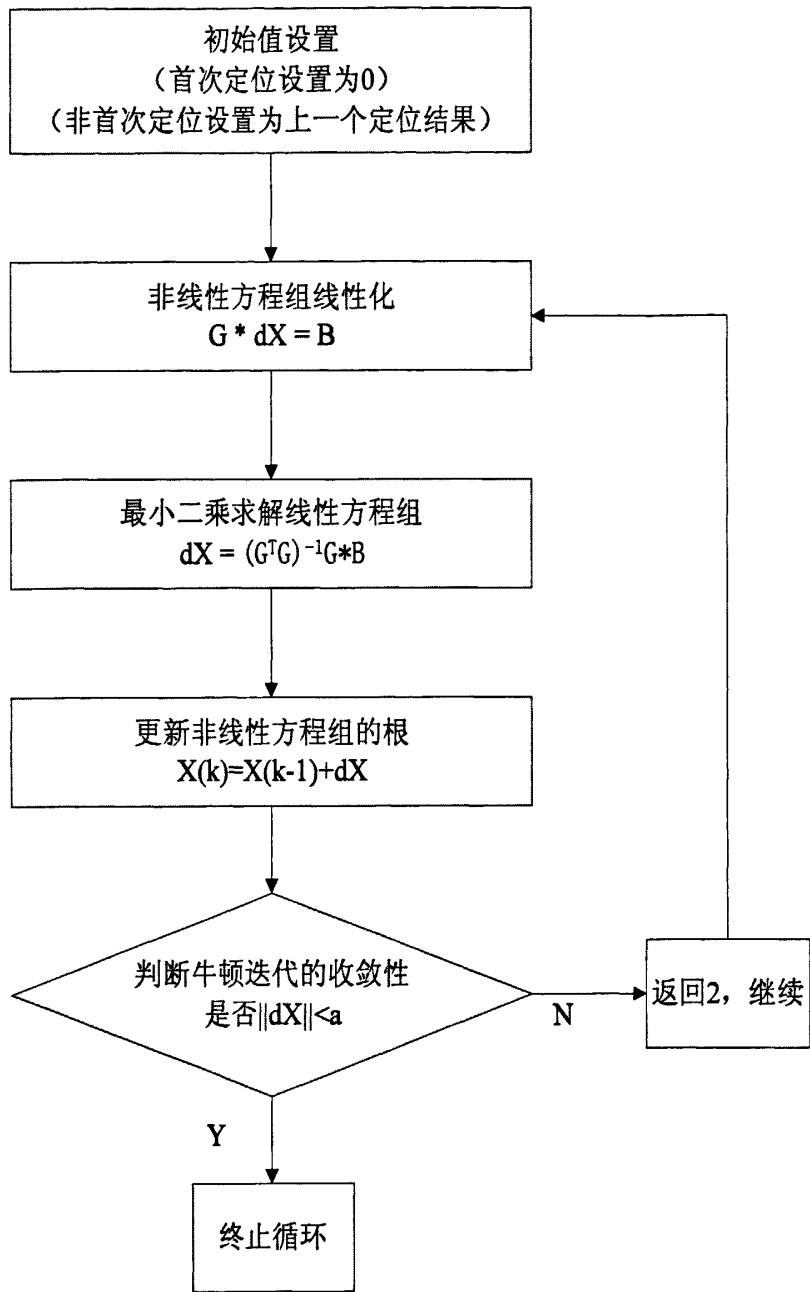


图 5-6 伪距差分解算步骤

5.3 实验与精度分析

5.3.1 实验数据

为了验证作者自主开发的伪距差分程序模块的有效性及精度,在中南大学新校区图书馆前采集一段车载 GPS 动态后处理差分数据, GPS 接收机采用中海达 GNSS 接收机,其中基站天线相位中心坐标(WGS-84)精确已知(X: -2193595.055 ± 0.015 m; Y: 5182649.388 ± 0.039 m; Z: 2991458.367 ± 0.017 m), 仪器设备如图所示。

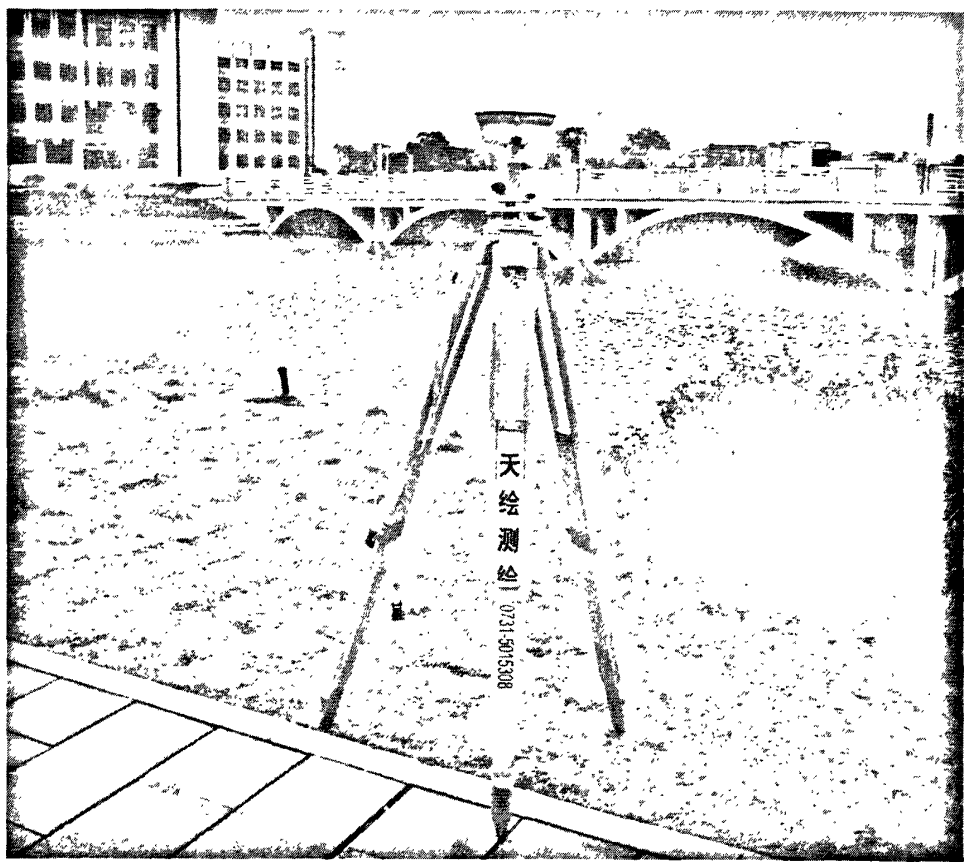


图 5-7 后处理差分基站

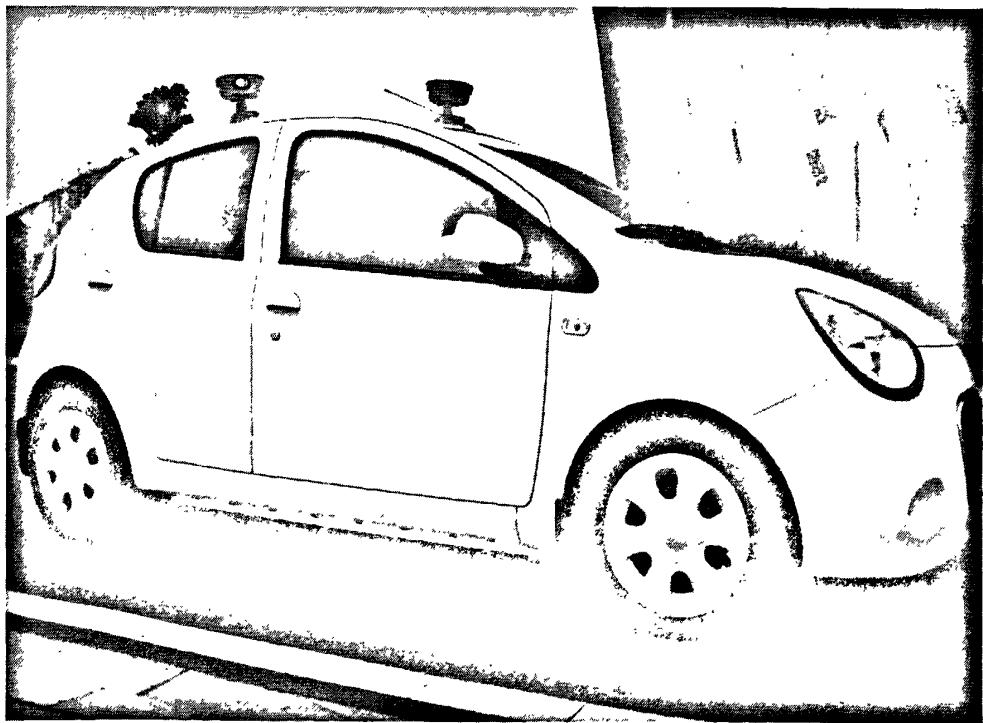


图 5-8 动态后处理车载 GPS

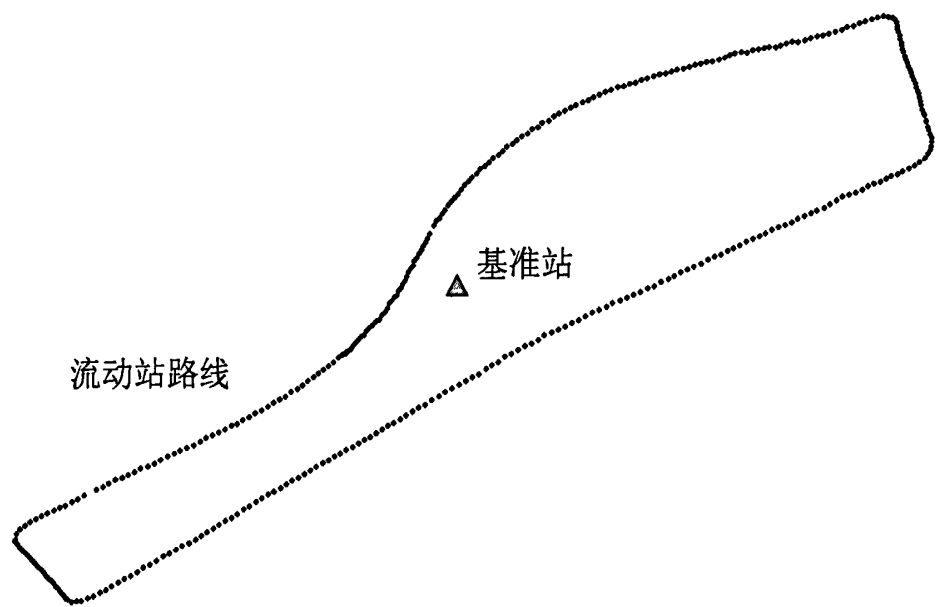


图 5-9 动态后处理差分数据示意图

5.3.2 数据处理与精度分析

将 RINEX 格式观测数据文件和 sp3 格式的精密星历文件 igr16191.sp3 导入自主开发的差分程序解算模块中，将基准站已知坐标录入之后，选择精密星历+伪距差分，经解算，其结果及精度如下表所示。

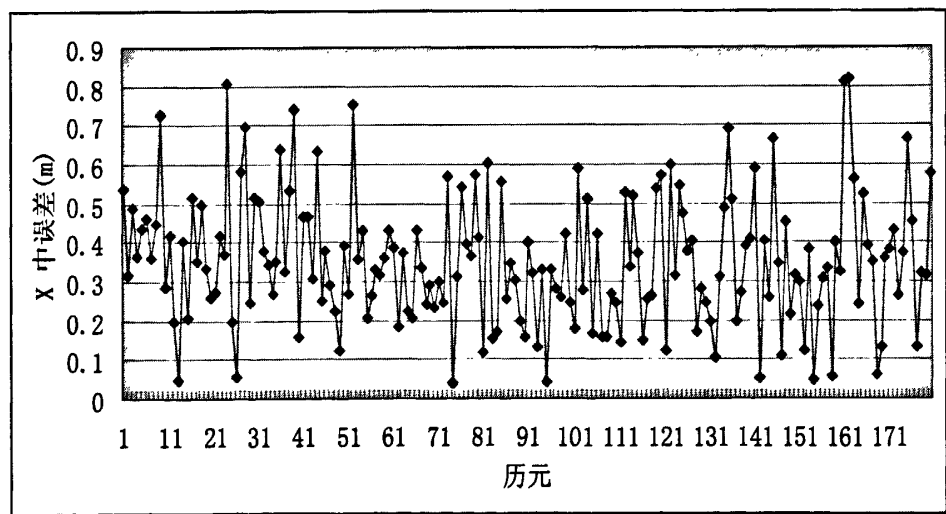


图 5-10 各历元 X 方向中误差

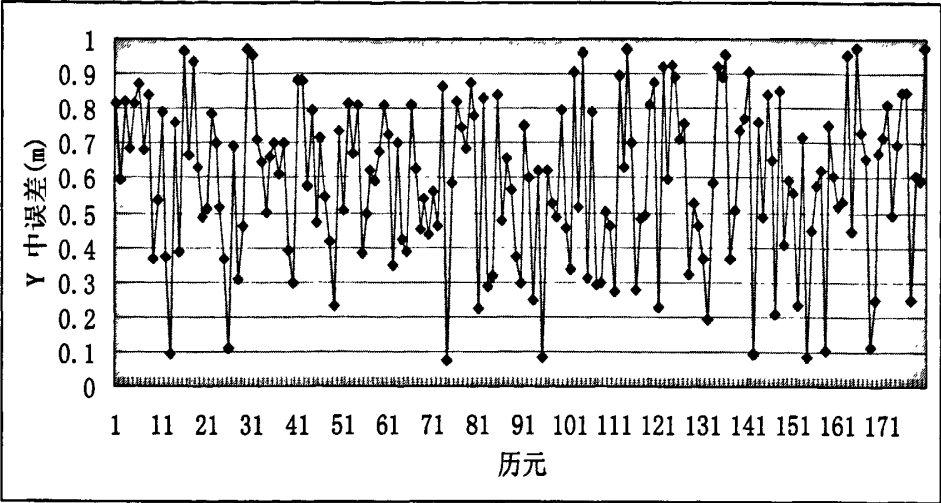


图 5-11 各历元 Y 方向中误差

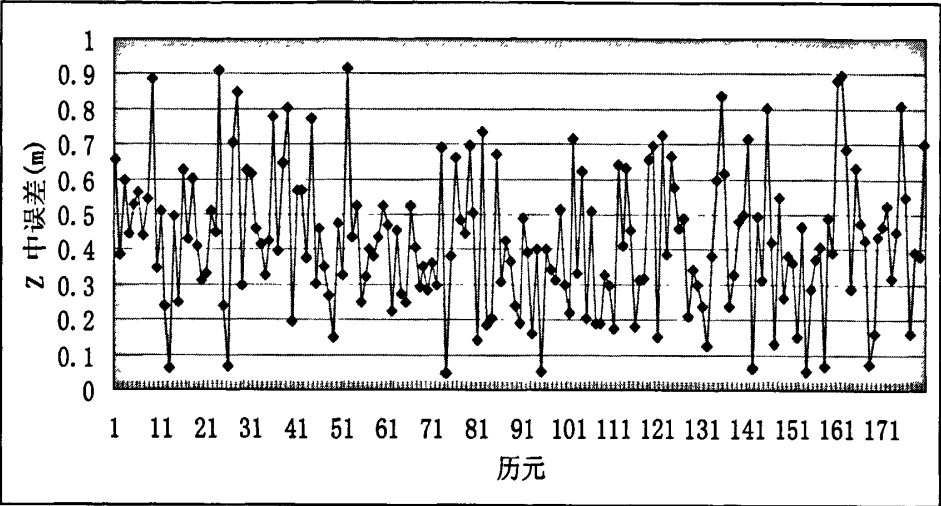


图 5-12 各历元 Z 方向中误差

由以上解算结果可以看出，选择快速精密星历进行伪距差分，定位精度基本上都能保持在亚米的级别。亚米级的测量定位精度能够应用于土地调查、土地执法、矿产资源调查、精细农业和林业以及环境监测等方面。

5.4 本章小结

本章介绍了程序的设计以及实验。首先介绍了程序编写的平台 MATLAB7.0，及其具有的各种优势，特别是强大的矩阵数据处理功能对于 GPS 数据处理来说特别方便。第二节介绍了程序中各模块的设计以及编程中的若干问题的解决。第三节运用自主开发的差分程序模块进行了伪距差分的实验，精度较好，证实了程序编写的有效性。

第六章 总结与展望

6.1 论文总结

随着 GPS 技术的不断成熟, GPS 的应用也将变得越来越广泛, 也对其定位精度提出了越来越高的要求。如何提高 GPS 定位的精度是目前很长一段时间内的研究热点。论文围绕基于 OEM 板的差分 GPS 定位系统这一中心展开研究, 旨在能够实现一款价格实惠, 精度较高的 GPS 定位软硬件系统。论文以法国泰雷兹导航定位公司生产的 AC12 GPS-OEM 板为实验器材, 研究了 OEM 板的原始数据格式、GPS 数据处理的 RINEX 标准格式、GPS 单点定位模型、GPS 测量的误差源、差分 GPS 定位技术的模型、广播星历计算卫星位置的方法、利用精密星历进行卫星轨道标准化的方法以及卫星钟差的计算方法。并在此基础上, 利用 MATLAB7.0 平台, 对以上研究内容编写了相应的解算模块, 并运用该 GPS-OEM 板接收卫星信号采集数据作实验, 精度较好。

总结全文, 完成的主要工作如下:

1. 深入研究了 GPS 伪距单点定位的原理和模型, 分析了 GPS 测量中的误差来源, 对比了差分 GPS 与单点 GPS 对于误差项的改正精度, 并详细的对比了位置差分、伪距差分、相位平滑伪距差分和载波相位差分的原理、模型和各自的优缺点。
2. 研究了泰雷兹公司的 AC12 OEM 板的原始数据格式、GPS 数据处理的 RINEX 标准格式, 实现了由原始数据向 RINEX 格式的数据转换。
3. 研究了由广播星历计算卫星位置的方法, 深入探讨拉格朗日插值、切比雪夫多项式拟合在卫星轨道标准化中的应用, 研究了分别由广播星历和精密星历计算卫星钟差的方法。
4. MATLAB7.0 平台编写程序, 实现了数据格式的转换、观测数据的读取、精密星历和精密钟差文件的读取、由广播星历计算卫星坐标、利用精密星历进行卫星轨道标准化、卫星钟差计算和伪距差分等功能, 经过实验验证, 精度能达到亚米级别。

6.2 研究展望

GPS 数据处理理论与应用方面的研究是一项极其复杂的工作, 由于本人能力和时间的限制, 论文只是对这方面理论和应用进行了尝试, 今后还有很多需要改进和进行深入的地方, 具体如下:

1. 论文在做利用精密星历进行卫星轨道标准化时, 采用了比较经典的拉格朗

日插值和切比雪夫多项式拟合，但是目前国内很多学者还运用到了埃尔米特插值、牛顿插值、勒让德多项式拟合、三角多项式拟合等方法，文献说明效果也很好，论文并没有对这些方法的精度进行对比。

2. 程序编写并没有用到模型更为复杂的相位平滑伪距差分和载波相位差分，而相位差分技术是精度最高、前景最为广阔，当然也是难度最大的差分方法，这是论文下一阶段的研究重点之一。

3. 论文中所研究的差分技术，是简单的单基站事后差分方法，对于多基站的情况以及实时差分的研究并没有涉及，而实时的多基站的差分方法情况和模型要更为复杂得多，这也是下一阶段的研究方向。

参考文献

- [1] 刘基余 编著. GPS 卫星导航定位原理与方法[M]. 科学出版社. 2003.
- [2] 李杰. 关于提高 DGPS 精度的方法的研究[D]. 大连:大连海事大学, 2009.
- [3] 王广运 编著. 差分 GPS 定位技术与应用[M]. 北京电子工业出版社. 1996.
- [4] 姚慧海, 吕善伟, 张其善. GPS 系统 SA 模型的研究[J]. 无线电工程. 1996, (01).
- [5] 徐周. GPS 差分定位技术及实现方法的研究[D]. 郑州:解放军信息工程大学, 2006.
- [6] 袁翠. 差分 GPS 算法及仿真研究[D]. 大连:大连海事大学, 2007.
- [7] RTCM Special Committee No.104. RTCM Recommended Standards for Differential GNSS[S]. Radio Technical Commission for Maritime Services, 1998.
- [8] 龚真春, 宋执环, 李平等. 一种低成本的差分 GPS 定位系统的设计与试验[J]. 计算机测量与控制. 2005, 13(1):86-88.
- [9] 张勇. GPS 事后差分定位数据处理理论与应用研究[D]. 淮南:安徽理工大学, 2009.
- [10] 刘庆元, 于文坤等. GPS-OEM 板原始数据像 RINEX 格式转换程序设计[J]. 矿山测量. 2009, (05).
- [11] 蔡艳辉, 程鹏飞, 李夕银. 卫星坐标的内插与拟合[J]. 全球定位系统, 2003, (3):10~13.
- [12] 王海英, 王峰波, 陈国军. 实用高精度 GPS 算法研究及 A120EM 板接收机设计[J]. 电子技术应用, 2006, 32(7).
- [13] 魏子卿, 葛茂荣. GPS 相对定位的数学模型[M]. 北京:测绘出版社, 1998.
- [14] 王潜心. GPS 数据处理软件中若干问题的研究[D]. 长沙:中南大学, 2005.
- [15] 余鹏, 孙学金, 赵世军. GPS 卫星广播星历轨道误差的探讨[J]. 2004, (04).
- [16] 刘庆元, 文继超, 黄文嘉. 基于嵌入式系统的多功能差分 GPS 在土地调查中的应用研究[J]. 测绘通报, 2011(03):38-40.

- [17] 刘大杰,施一民,过静珺.全球定位系统(GPS)的原理与数据处理[M].上海:同济大学出版社,1996,1-137.
- [18] 刘忠.高精度 GPS 数据处理若干理论与技术问题研究[D].西安:长安大学,2006.
- [19] 周忠谟,易杰军 编著.GPS 卫星测量原理与应用[M].北京:测绘出版社,1992.
- [20] 苟长龙.广播星历插值和精密星历外推方法研究[D].长沙:中南大学,2009.
- [21] 张妮,王标标.基于 Matlab 读取标准 RINEX 格式的 GPS 星历数据[J].电子设计工程,2010(08).
- [22] 陈蕾.单频 GPS 精密单点定位算法及模型研究[D].桂林:桂林理工大学,2009.
- [23] 苏金明 阮沈勇.MATLAB 实用教程[M].北京:电子工业出版社,2008.
- [24] 陈东银,刘立龙,陈雷.GPS 导航定位技术中面向对象读取 RINEX 格式数据[J]测绘与空间地理信息.上海:同济大学出版社,1998,1-239.
- [25] LoomisP,KremerG.Correction Algorithm for Differential GPS Reference Stations.Navigation:Journal of The Institute of Navigation,1989.
- [26] Xin-xiang JIN.Theory of Carrier Adjusted DGPS Positioning Approach an Some Experimental Results.Delft University,1996.
- [27] Wu J T.Processing mixed pseudo-rang and carrier phase GPS data,Manuscripta Geodaetica,1995.
- [28] 陈桂珍.利用 MATLAB 实现 GPS OEM 板与计算机的通讯及信息处理[J].盐城工学院学报,2006,3.
- [29] 熊振翔 编著.插值多项式与插值样条[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [30] 吴钦.基于公网的差分 GPS 技术[D].南京:南京理工大学,2007.
- [31] 林成森 编著.数值计算方法[M].北京:科学出版社,1999.
- [32] 韦建超.GPS 精密单点定位的数据处理研究[D].长沙:中南大学,2007.
- [33] 曹意.GPS 软件接收机的实现与定位算法研究[D].上海:上海交通大学,2009.
- [34] 赵毅.GPS 事后相位差分解算数据处理中相关问题研究[D].南京:东南大学,2005.
- [35] 曾凡河.基于时间差分的单机单频伪距定位及应用[D].长沙:中南大

学, 2007.

[36] 王慧青. 进一步提高 GPS 应用定位精度的理论和方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2009.

[37] 郝金明. 利用地面测轨资料拟合 GPS 广播星历[D]. 郑州: 解放军测绘学院, 1989.

[38] 王齐林, 陈凯. 基于 Internet 的差分 GPS 定位系统[J]. 北京测绘, 2002, (4).

[39] 刘迎春, 林宝军, 张晓坤. 一种卫星精密星历的插值方法[J]. 飞行器控制学报, 2004, 23(4): 43-46.

[40] 何光林, 马宝华. 计算机与 GPS-OEM 板之间的通讯研究[J]. 探测与控制学报, 2002, 6.

[41] 张怡, 张亮, 廉保旺. 差分 GPS 定位系统的卫星位置算法研究[J]. 弹箭与制导学报, 2002, 23(1).

[42] 李洪涛, 许国昌, 薛鸿印. GPS 应用程序设计[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

[43] ZHANG Shufang, YUAN Ancun. Position differential GPS system. Journal of Dalian Maritime University. 2002.

[44] Trimble. Trimble Virtual Reference Station VRS. Brochure, 2001.

[45] The Cooperative CORS networks: www.ngs.noaa.gov/CORS/Coop/

[46] Hatch R. GPS carrier-phase ambiguity resolution. Navcom Technology, Inc. A John Deere Company, 2000.

[47] Deng Qiang, Huang Shunji. Design and Evaluation of GPS Code Pseudo-range Smoothing Algorithm Based on Carrier Observables. Journal of UEST of China, 1997.

[48] 杨永平. GPS 相位平滑伪距差分定位技术的研究及应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.

[49] Ding Shengxi, Zhang Qishan. Research on the Methods of Improving DGPS Positioning Precision. Chinese Journal of Aeronautics, 2000, 13(4).

[50] Technical Characteristics of the NAVSTAR GPS. 1991(6).

[51] GPS Receiver Interface Language (GRIL), Javad Positioning Systems. Version 1.8. 1998.

[52] 于洋, 周学伟, 赵亚威. COM 组件在实现 VB 调用 MATLAB 中的应用[J]. 计算机工程与科学, 2008, 30(5).

[53] 林霖. DGPS 差分信息传输协议研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2010.

[54] John A. Klobuchar Joseph M. Kunches Comparative range delay and variability of the earth's troposphere and the ionosphere. GPS solution, (2003), Volume7, Number1, pp55-58.

[55] Kaplan E D. Understanding GPS, Principles and Applications[M]. Boston: Artech House, Inc, 1996.

[56] Kouba J and Heroux P. Precise Positioning Using IGS Orbit Products[J], GPS Solutions, 2000, 5(2).

[57] 冯文江, 杨士中. GPS 伪距测量直接解算研究[J]. 遥测遥控, 2000(9).

[58] Warren D and Raquet J. Broadcast vs. precise GPS ephemerides: a historical perspective[J]. GPS Solutions, 2003, 7:151-156.

[59] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins. Global positioning system. New York: Springer-Verlag, 2001, 1-382.

[60] William H. Press. Numerical recipes. Cambridge: Cambridge University Press, 1986, 1-818.

致谢

回想读书生活，已有二十个年头，如今就要走出校园，跨入社会，心中感慨万千。

在中南大学三年的研究生学习中，导师刘庆元教授给予了我非常大的帮助。刘老师扎实的理论、渊博的知识、严谨的治学使我崇敬万分。刘老师传授给我的学习方法，使我在独立研究的过程中受益匪浅。另外，刘老师让我独立的负责二调项目，也极大的培养了我对工程项目的管理能力。师母殷老师对学生慈母般的关爱，也让我永远铭记在心。

感谢中南大学测绘系所有给予过我帮助的老师，祝愿你们工作顺利，身体健康。

感谢这三年中同门曾毅、杨文杰、姜柱、刘有等师兄弟对我学习上的帮助；感谢女友黄文嘉对我生活上无微不至的照顾和一贯的支持；感谢研究生的全体同窗，是你们让我的研究生生活充满欢乐。

另外，特别要感谢我的家人。父母为家庭，为儿女操劳一生。自己勤俭节约，却从来不让子女受到来自经济的压力。父母的爱总是灌注在我生活中的点点滴滴，让我时刻都能感受得到。养育之恩，无以为报，衷心祝愿二老永远健康快乐。姐姐作为家中老大，总是主动承担更多的家务。哥哥让我在球场上驰骋的时候永远不会是一个人。在这样一个简单却又温馨的家庭中，我快乐幸福的成长。

最后，再次感谢关心、帮助过我的所有老师、同学和亲人们，也许文中未提及你们的姓名，但是我的每一次成长和进步都离不开你们的帮助和关爱，我将永远铭记于心，衷心的祝愿你们永远快乐，健康！

文继超

2011年5月

于长沙

攻读学位期间主要的研究成果

发表论文:

1. 刘庆元, 文继超, 黄文嘉. 基于嵌入式系统的多功能差分 GPS 在土地调查中的应用研究. 测绘通报 (已发表于 2011 年第三期)
2. 黄文嘉, 周晓光, 文继超, 杨小晴, 袁愈才. 遥感影像增量更新中影像块生成方法研究. 遥感信息 (已录用)

参与项目:

1. 2008 年 9 月-2011 年 1 月, 湖南省凤凰县第二次全国土地调查农村部分。
2. 2009 年 4 月-2009 年 7 月, 甘肃省岷县第二次全国土地调查农村部分。
3. 2009 年 8 月, 中南大学升华学生公寓 17、18、19 栋施工放样。