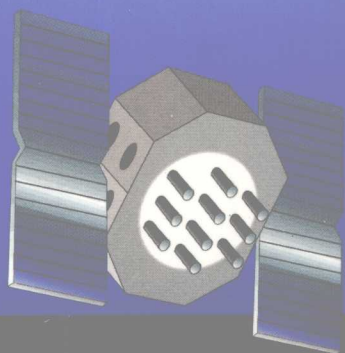
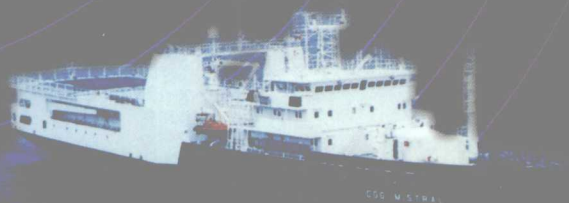
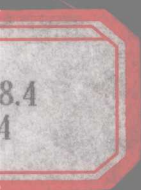


广域差分GPS 原理和方法



刘经南 陈俊勇 张燕平
李毓麟 葛茂荣 编著



测绘出版社

广域差分 GPS 原理和方法

刘经南 陈俊勇 张燕平 李毓麟 葛茂荣 编著

测绘出版社

• 北 京 •

内 容 提 要

本文概述了各类差分 GPS 系统建立的一般原理和方法,详细介绍了中国广域差分 GPS 的建立方案,讨论了广域差分 GPS 系统的数据处理模型和方法,初步提出了技术标准和实用通信方案,介绍了工程性试验过程和结果等。

本书适用于 GPS 系统应用研究与开发人员,对于通信、广播等行业的科技工作者也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

广域差分 GPS 原理和方法/刘经南等编著.-北京:测绘出版社,1998.11

ISBN 7-5030-0915-2

I. 广… II. 刘… III. 全球定位系统(GPS) IV. P228

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 25724 号

测绘出版社出版发行

(100054 北京市宣武区白纸坊西街 3 号 (010)63529246)

三河市艺苑印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所经销

1999 年 1 月第 1 版·1999 年 1 月第 1 次印刷

开本:787×1092 1/16·印张:9.75

字数:249 千字·印数:0001~2000 册

定价:30.00 元

前言

广域差分 GPS(WADGPS),包括基于同一原理、只是数据通信手段不同并增加了卫星信号测距源的广域 GPS 增强系统(WAAS),是近几年来全球卫星定位系统(GPS)研究最热门和最具应用前景的方向。从它 1992 年左右提出以来,立即受到全世界导航定位界、产业界乃至政府部门的高度重视。目前,北美已经出现了若干商业化的或政府部门资助的广域差分系统。欧洲、日本、澳大利亚、印度都在探索发展地区的和本国的广域差分 GPS 或广域 GPS 增强系统。

广域差分 GPS 技术是为了抵制美国政府人为降低 GPS 定位精度限制非特许用户使用 GPS 的 SA 政策而发展起来的改进型的差分导航系统,同时也是为了避免常规差分(CDGPS 或 DGPS)精度随着差分距离的增加而明显下降的现象,确保陆地、海上、空中导航的广域可用性、可靠性而提出的新型差分导航系统。它的主要特点是在一个广大的区域内建立起若干 GPS 跟踪站组成差分基准网,通过数据通信以实现区域实时精密定轨并提供预报精密星历,克服 SA 中广播星历精度人为降低的影响;实现精确实时测定 SA 中频率抖动对卫星钟差的影响;实现较为精确地确定区域电离层模型以削弱电离层延迟的影响。系统连续实时地将这三种误差影响直接广播给广大区域内的导航定位用户,用户用以修正单机导航定位结果,从而满足系统所覆盖的广大区域内精度优于 5m 的差分导航。除此之外,长期连续运行且适当分布的 GPS 跟踪站系统也同时为现代实时大地测量和地壳运动监测提供了基础设施和数据服务。因此,美国 GPS 产业协会认为:这一系统本身的发展以及它广阔的应用范围和市场前景“为产业的拓展和生长提供了巨大的希望和刺激”。

随着我国社会经济的迅速发展,我国已成为世界上 GPS 最大的用户国之一。GPS 的引进虽已产生巨大的经济效益,但由于受制于美国的 SA 政策,我国使用 GPS 不仅在精度和应用领域方面受到制约,而且还存在安全性、可靠性方面的风险。为抵制 SA 影响,许多部门在同一地区重复引进常规差分 GPS,造成了资源的浪费和效率效益的低下。因此,我国也迫切需要建立一个国家统一的广域差分服务体系,用以提供覆盖全国及周边区域的连续安全可靠的导航定位服务。

正是在这一背景下,国家测绘局和国防科工委不失时机地先后设立了有关中国广域差分 GPS 系统研究与建站方案的研究项目,支持国内开展这一领域的研究。在陈俊勇院士带头下,武汉测绘科技大学、中国测绘科学研究院、国家基础地理信息中心联合承担了这一研究任务。三年来,项目组通过消化吸收国外先进理论技术、开展模拟和实测的广域差分 GPS 试验、建站方案探索、差分系统软件开发和硬件研制、系统的联调与集成、工程性试验等一系列科研攻关,取得了以下几个方面的研究成果:

1)利用国内 4~6 个卫星跟踪站 GPS 的观测数据,实现了精度优于 8m 的 GPS 卫星外推精密星历计算;实现了精度优于 50ns 卫星绝对钟差和精度优于 5ns 相对钟差的确定;实现了精度优于 1m 的区域性电离层模型建立和算法;完成了相应软件的研制。

2)完成了广域差分基准站与中心站间的实时数据通信试验;完成了中心站至差分信号发播台的实时通信以及发播台与动态用户间的实时通信;证明了利用调频副载波进行大范围差分导航服务的可行性和实用性。

3)针对当前中国通信技术和通信费用的现状,提出了中国广域差分系统建设分成两步走的

整体方案:第一步,建成分布式广域差分 GPS 系统;第二步,建立与国际标准接轨的中国广域增强系统。其中,分布式广域差分方案的核心思想是:根据卫星星历、卫星钟差和电离层三项差分改正对数据通信频度要求不同的特点,同时根据卫星钟差确定与地面基准站几何位置分布无关的特性,提出了仅由中心站计算卫星星历,而由地区差分基准站计算区域内所见卫星的钟差和区域电离层模型的思想,用以避免基准站与中心站之间为计算快速变化的卫星钟差所必须的高频度,海量数据通信要求,克服了现阶段实施广域差分系统的一个瓶颈问题。

4)成功地完成了分布式广域差分的工程性试验。利用 4 个 GPS 跟踪站卫星观测实测数据实现了实时卫星定轨和外推星历计算,实现了实时卫星钟差和电离层延迟计算与外推,实现了广域差分信号的实时发射与接收。试验表明:近距离和中远距离广域差分精度完全满足现代各类动态目标米级导航定位的要求。

本书是这些研究和试验成果的总结和汇编。书中概述了现代几类差分 GPS 导航系统的一般原理,介绍了中国广域差分 GPS 的建立方案,讨论了广域差分 GPS 系统的数据处理模型和方法,初步提出了技术标准和实用通信方案,介绍了工程性试验过程和结果等等。全书按照项目研究内容分为七章。其中,第一章由陈俊勇撰写,第二章由陈俊勇、胡建国撰写,第三章由刘经南、葛茂荣撰写,第四章由李毓麟撰写,第五章由李征航撰写,第六章由张燕平、马振江撰写,第七章由刘经南、葛茂荣、戴礼文撰写。全书由刘经南、葛茂荣负责统稿,并由刘经南最后修改校定成文。在项目完成过程和本书的编写中,张江齐、王权、王新华、王泽民、张建军、刘焱雄、赵珞成等同志参加了部分研究工作,因此,项目研究成果和本书是集体智慧的结晶。但是,由于本书编著者的水平限制,加之成书时间的紧迫,书中错误疏漏之处在所难免,作者在衷心希望本书出版有助于推动我国广域差分 GPS 系统研究和实现的同时,也恳请读者们不吝批评指正,我们将非常感谢。

编著者

1997. 11. 30

目 录

第一章 全球定位系统实时差分定位技术概论	(1)
1.1 局域差分 GPS 实时定位技术	(1)
1.2 广域差分 GPS 实时定位系统概论	(4)
1.3 WADGPS 系统中差分改正值的计算原理	(7)
1.4 电离层模型参数计算	(10)
1.5 差分 GPS 的数据通信和电文格式	(15)
1.6 WADGPS 系统对技术标准和运行功能的要求	(18)
第二章 中国分布式广域差分 GPS 定位系统的技术方案	(20)
2.1 差分 GPS 技术的应用概况	(20)
2.2 中国建立 WADGPS 实时定位系统的必要性	(22)
2.3 建立中国 WADGPS 的可能性	(23)
2.4 分布式 WADGPS 技术方案	(24)
2.5 分布式 WADGPS 系统应达到的技术指标和功能标准	(28)
2.6 分布式 WADGPS 的优点及与其他差分系统的比较	(29)
2.7 分布式 WADGPS 实施方案	(31)
2.8 建立我国 WADGPS 系统的策略	(31)
第三章 广域差分 GPS 数据处理原理及方法	(33)
3.1 WADGPS 数据处理的一般过程	(33)
3.2 WADGPS 基准站的数据分流和预处理	(34)
3.3 WADGPS 系统中的卫星轨道确定	(40)
3.4 WADGPS 系统中卫星钟差的确定	(55)
3.5 用户定位	(63)
3.6 WADGPS 系统的完备性监测	(65)
第四章 广域差分 GPS 的技术标准	(67)
4.1 WADGPS 技术及其技术标准综述	(67)
4.2 WADGPS 系统的技术指标和技术标准	(69)
4.3 WAAS 系统的技术标准	(77)
4.4 分布式 WADGPS 实时定位系统的技术方案与技术标准	(87)
第五章 电离层延迟模型	(90)
5.1 电离层概况	(90)
5.2 电磁波在电离层中的传播	(91)
5.3 利用 GPS 观测值建立区域性电离层延迟模型	(95)
5.4 计算软件及试算结果	(102)
5.5 顾及卫星和接收机延迟偏差后的电离层延迟模型	(106)
5.6 格网算法	(108)

5.7	用户电离层延迟改正算法及软件	(109)
5.8	改进模型的算例	(111)
第六章	分布式广域差分 GPS 通信方案研究及试验	(115)
6.1	分布式 WADGPS 系统的数据链	(115)
6.2	跟踪站到主控站的数据传输链路	(115)
6.3	主控站至地区基准站的数据传输	(117)
6.4	地区基准站差分信息服务数据链	(118)
6.5	公共电话网(PSTN)数据通信试验	(119)
6.6	广播数据系统(RDS)基本原理及应用	(126)
6.7	RDS 播发分布式 WADGPS 差分信息试验	(129)
第七章	分布式广域差分 GPS 工程性试验与结果分析	(135)
7.1	试验背景及目的	(135)
7.2	试验系统组成	(135)
7.3	试验方案	(136)
7.4	试验结果及分析	(139)
参考文献		(145)

第一章 全球定位系统实时差分定位技术概论

全球定位系统 GPS 的定位精度受美国的 AS 和 SA 政策影响,我国的 GPS 用户已收不到 P 码,其实时定位精度已降低到 100m 左右。美国政府于 1996 年 3 月底曾宣布该国关于 GPS 的政策性决定,其主要内容有二个方面:一是继续向全球用户免费提供 GPS 信号;二是在今后 10 年中考虑分阶段停止 SA。但与此同时,美国国防部解释说,SA 可能一直要维持至 2000 年以后,国防部正在研究一种技术,以保护 GPS 信号不受美国的敌人利用,而完成此项研究和实际使用这一技术,从现在看来,需 4~10 年^[44]。从目前情况来看,即使停止 SA 政策的实施,GPS 实时定位精度也难于高过±(15~30)m。因此,不论从目前和将来的需要考虑,发展差分 GPS 技术,提高 GPS 的实时定位精度是必要的。

差分 GPS 实时定位技术基本上可分为二种类型,即局域差分 GPS 和广域差分 GPS。局域差分的技术特点是向用户提供综合的差分 GPS 改正信息——观测值改正,而不是提供单个误差源的改正。它的作用范围比较小,例如在 150km 之内。广域差分的技术特点是将 GPS 定位中主要的误差源分别加以计算,并分别向用户提供这些差分信息,它作用的范围比较大,往往在 1000km 以上。

1.1 局域差分 GPS 实时定位技术

1.1.1 概述

局域差分 GPS(Local Area Differential GPS,简称为 LADGPS)实时定位技术是由基准站、数据通信链和用户站组成。它提高用户站定位精度的原理是建立在基准站和用户站对 GPS 卫星的同步同轨跟踪的基础上。通常认为,若基准站和用户站同步观测同一颗卫星,且基准站和用户站间隔在一定距离内(一般不超过 150km),则这两种站上的观测值相应于同一卫星的同一轨道弧段,它们之间存在强相关性,即它们都包含相同的误差。因此,以伪距差分为例,将基准站所观测的每一颗 GPS 卫星的伪距误差按伪距比例改正的信息(一般还需加上伪距改正变率信息)通过数据通信链传输至邻近的用户站,用户站利用这一信息对其所观测的伪距进行改正,即可提高用户站定位精度。根据国外经验,当基准站和用户站间隔小于 150km 时,伪距 LADGPS 实时相对定位误差约为 $3 \times 10^{-5} \sim 10 \times 10^{-5}$ 。也就是说,基准站和用户站之间的距离在 150km 范围内时,用户站定位的精度约为±(3~10)m。若利用相位 LADGPS,则定位精度可以提高几倍,但技术比较复杂,而基准站的作用范围目前一般不大于 30km,它对于某些高精度导航系统(如飞行器着陆,即所谓的 I、II、III 类近进)有重要意义。

由于 LADGPS 削弱用户站定位误差是基于同步同轨性原理的,即认为主控站和用户站的误差都与同一时空强相关,所以对基准站和用户站之间的距离间隔的要求和对用户站定位精度的改善都有较大限制。

1.1.2 LADGPS 的计算模型

LADGPS 基本分为两种计算或工作模式,即伪距差分 and 相位差分。

1. 实时 GPS 伪距差分技术的计算模式

L_1 频率的伪距观测方程为:

$$P = \rho + C \cdot \Delta t_r - C \cdot \Delta t_s - T + \epsilon \quad (1-1-1)$$

式中 P 是 L_1 伪距观测值,已作对流层、相对论效应改正, ρ 是地面站到卫星的几何距离, Δt_r 、 Δt_s 分别为接收机钟差和卫星钟差, T 是电离层改正, ϵ 为观测噪声。

由于 AS 政策的实施,未经美国政府授权的用户不能获得 L_2 上精码伪距,但一些新型的 GPS 接收机(如 Trimble SSE, Turbo Rogue, Ashtech Z12, Novatel 等)虽然不能辨认 Y 码,但用互相关技术可以辨认在 L_1 和 L_2 频率上的 $(Y_1 - Y_2)$ 值,由此可以导出相应于 $(Y_1 - Y_2)$ 的伪距 $P_{Y_1 - Y_2}$ 。用下列等式可以求得相应于 L_2 上的伪距 P_{L_2}

$$P_{L_2} = P_{L_1} + P_{Y_1 - Y_2} \quad (1-1-2)$$

式中 P_{L_1} 是 L_1 频率的伪距观测值,由此得到的 P_{L_2} 具有高于 P_{L_1} 的精度。

实时伪距差分 GPS 定位可以直接使用伪距,伪距观测值精度较差时,可以用载波相位平滑后的伪距观测值。平滑技术参见 3.2.3。

在 LADGPS 系统的基准站上,根据该站已知的高精度地心坐标和跟踪 GPS 卫星的广播星历,算得基准站至卫星的几何距离值 ρ ,因此根据式(1-1-1),伪距改正值 ΔP 可表示为:

$$\Delta P = \rho - P \quad (1-1-3)$$

一般情况下,基准站向用户站提供的伪距差分信息为 $\Delta P/P$ 及其变率。用户站通过数据通信链接收到上述差分信息后,进行定位计算。用户站的计算模式类似于 GPS 单点定位,只是对用户站观测到的伪距,须利用上述差分信息进行相应改正。伪距差分变率的作用参见以后将提到的差分信息的“讯龄”(1.5.3)。总之伪距差分的有效作用距离实际上取决于基准站和用户站二者误差的时空相关程度,在平原和丘陵地区,这一差分改正信号的有效覆盖距离一般不大于 100~150km,相对基准站的定位精度约在 $\pm(5 \sim 10)\text{m}$ 。

2. 实时 GPS 相位差分技术的计算模式

设在 L_1 和 L_2 的载波相位观测值的数学模型为:

$$\bar{\varphi} = \varphi\lambda = \rho + C \cdot \Delta t_r - C \cdot \Delta t_s + T - N\lambda + \epsilon \quad (1-1-4)$$

式中 φ 表示载波相位观测值的小数部分值, $\bar{\varphi}$ 表示 φ 对应的距离量(相距), N 是载波相位的整周模糊度, λ 是相应频率的波长。式(1-1-4)中其他符号意义同式(1-1-1)。但要指出一点,式(1-1-1)中电离层改正前面为负号,相反于式(1-1-4)。这是因为在式(1-1-1)中是群波,一般应是延迟,而式(1-1-4)中是相波,则一般为超前。

利用载波相位差分进行实时 GPS 定位是当前研究的一个热点。众所周知,利用伪距进行 GPS 定位相对于载波相位来说精度较差,但后者最大的缺点或者说困难是要解决整周模糊度问题,即求定 N 。可以在开始动态 GPS 定位测量前的静止状态下,用某种技术来确定整周模糊度。即使如此,当用户站在动态状况下,还会出现 GPS 信号的失锁(即出现周跳),这样就需要重新确定整周模糊度,这意味着整个动态实时载波相位差分 GPS 的工作(如导航)要重新开始。最近几年发展的动态实时快速确定整周模糊度技术(简称 OTF 技术)虽已有长足进展,但在通常情况下,即使用户站周围没有无线干扰和障碍物,且周跳也很少发生,利用这一技术的有效作用距离

目前一般还难于超过 50km。这一技术相对定位精度较高,可以达到和优于 dm 量级,有可能用于飞行器着陆(一般要求高于 $\pm 0.6\text{m}$)等高精度导航。

类似于式(1-1-3),载波相位的差分改正 $\Delta\varphi$ ^[21]可由下式表示:

$$\Delta\varphi = \rho/\lambda - N - \varphi \quad (1-1-5)$$

基准站将 $\Delta\varphi$ 和 N 以及它们的变率传输给用户站,作为用户站定位之用。但用户站必须用 OTF 技术迅速决定相位整周模糊度,以求定自己的位置。由于利用相位差分定位的精度很高,因此不少专家建议还应顾及基准站的钟差,因此国际无线电技术委员会海事组(RTCM)推荐在传送相位差分信息的同时,也应考虑传送钟差改正及其变率信息^[40]。

1.1.3 LADGPS 系统的基本构成

1. 基准站

作为 LADGPS 的基准站首先应有优于 $\pm 1\text{m}$ 精度的三维地心坐标,以此作为用户差分定位计算的参考基准。其次,基准站周围在 360° 视野内至少应有高度角 5° 以上的敞开天空。目前在中国使用的 GPS 接收机,大致可分为五类。(一)只能接收 L_1 波段的 C/A 码伪距;(二)能接收 L_1 的 C/A 码伪距和的载波相位;(三)能接收 L_1 的码伪距和的载波相位及 L_2 的载波相位(无码,平方技术所得的半波长);(四)能接收 L_1 的 C/A 码伪距和载波相位、互相关 Y 码的 Y_1-Y_2 ,以及 L_2 全周相位。(五)能接收 L_1 的 C/A 码伪距和载波相位、 P_1 码伪距、 L_2 上的 P_2 码伪距,以及载波全周相位(无论 SA 处于 on 或 off)。LADGPS 中的基准站至少应配置上述第四或第五类(双频)的能提供(伪距或相位)差分信息的 GPS 接收机,以及与之匹配的自动气象记录仪。

2. 用户站

用户站可以是单频,也可以是双频 GPS 接收机,但都应具备接收差分信号和调制解码的功能。

3. 数据通信链

要将基准站的差分信号传输至用户站,基准站首先应将这一信号传输至播发站,然后由播发站传输至用户站,它们之间都需要有一个数据通信链进行连接。它包括差分信息调制编码器、差分信号播发器、差分信号接收器、差分信号调制解码器等四部分。目前商用的 GPS 数据通信链往往采用 VHF(频率为 $30\text{MHz}\sim 300\text{MHz}$)或 UHF(频率为 $300\text{MHz}\sim 3\text{GHz}$)的小型发射机和接收机,这对局部的和临时性的 GPS 作业比较合适,但其作用距离往往受到天线架设高度和发射功率等限制,有效作用距离一般只能达到 $15\sim 40\text{km}$ 。若考虑 LADGPS 系统持续工作的话,则目前往往将数据通讯链和广播电台中的调频台结合起来,这样用户就可以持续、方便地获得 LADGPS 信号。播发差分信号时,只占用了广播电台中调频信号基带的高于 53kHz 的部分频率(副载波),因此不影响和干扰调频台的正常播音质量。播发 LADGPS 差分信息的更新率一般要求较高,如 $1\sim 5\text{s}$ 。

1.1.4 LADGPS 的应用

LADGPS 的应用,主要有两个列两个方面:1. 在局部地区建立控制网。如布设城市控制网,若在城市中设立了一个基准站,就可以高效率、高精度、经济而又快速地建立新的或改善旧的城市控制网。这时,需要利用实时相位差分技术。2. 在局部地区提供较高精度的实时导航和定位服务。若结合地理信息系统(或电子地图),就可在陆地、海洋、空中的导航、定位和相应的交通管理等方面作出重大贡献。在一个较大地区内若建立一个含有若干个基准站和播发站的 LADGPS

网,而各主控站之间的间隔不超过 200km,用户站从相距最近的 LADGPS 主控站(播发站)中获取差分信息,或用多个主控站的差分信息加权内插获取差分信息,这就组成了局域差分网。差分网主要应用于大范围的导航,如近海船舶导航等领域。

1.1.5 LADGPS 的主要优缺点

总的来说,LADGPS 对硬软件的要求不高,大部分已商品化,维持费用也较低。其中伪距差分系统对于大中城市和近海海域精度要求不高的定位和导航比较适用。它主要的弱点是当基准站和用户站的间距增大时,二者误差的相关性就会减弱,定位精度就会迅速降低,因为这时除了对流层影响在二者地形类似的情况下相差不大以外,卫星星历误差的影响和电离层的影响对二者将明显不同。因此当二者间距不大于 100~150km 时,由基准站发出的伪距差分改正信息对用户站来说很难达到 LADGPS 预定的改正效果。因此,在大区域工作时,LADGPS 的站网分布必须具有足够的密度,才能保证定位精度。

LADGPS 若要覆盖整个中国 17000km 海岸线的近海导航,即使尽可能利用有条件的岛屿设置 LADGPS 主控站,若要达到士(2~5)m 的实时定位精度,则至少要 20 多个基准站。若将 LADGPS 应用于我国陆上定位和导航,以作用半径 150km 考虑,也至少应有 350 个左右的基准站才能构成覆盖全国的 LADGPS 网。

1.2 广域差分 GPS 实时定位系统概论

1.2.1 广域差分 GPS 的基本思想

广域差分 GPS(Wide Area DGPS,WADGPS)技术的基本思想是对 GPS 观测量的误差源加以区分,并对每一个误差源分别加以“模型化”,然后将计算出来的每一个误差源的误差修正值(差分改正值),通过数据通讯链传输给用户,对用户 GPS 接收机的观测值误差加以改正,以达到削弱这些误差源影响,改善用户 GPS 定位精度的目的。因此既削弱了 LADGPS 技术中对基准站和用户站之间时空相关性的要求,又保持了 LADGPS 的定位精度。因此在 WADGPS 系统中,只要数据通信链有足够能力,基准站和用户站间的距离原则上是没有限制的。

WADGPS 所针对的这些误差源主要表现在以下三个方面:

- (1)卫星星历误差,包括 SA 中 ϵ 技术的影响。
- (2)卫星钟差,包括 SA 中 δ 技术的影响。
- (3)电离层对 GPS 信号传播产生的时间延迟。改正这项影响,即使用户接收机为单频时,也可能获得较好的定位精度。

WADGPS 系统就是为削弱这三种主要误差源而设计的一种导航定位系统工程。

1.2.2 WADGPS 的工作流程

WADGPS 系统一般由一个主控站、若干个 GPS 卫星跟踪站(又称基准站或参考站)、一个差分信号播发站、若干个监测站、相应的数据通信网络和若干个用户站组成。系统的工作流程分解来看,可以分为下面五个步骤:

- (1)在已知精确地心坐标的若干个 GPS 卫星跟踪站上,跟踪接收 GPS 卫星的广播星历、伪距、载波相位等信息。
- (2)跟踪站所获得的这些信息,通过数据通讯网络全部传输至主控站。

(3)在主控站计算出相对于卫星广播星历的卫星轨道误差改正、卫星钟差改正及电离层时间延迟改正。

(4)将这些改正值通过差分信号播发站(数据通讯网络)传输至用户站。

(5)用户站利用这些改正值来改正他们所接收到的 GPS 信息,进行 C/A 码伪距单点定位以改善用户站 GPS 导航定位精度。

1.2.3 WADGPS 系统的基本构成

1. 卫星跟踪站

对卫星跟踪站的要求首先是必须精确知道该站址的三维地心坐标,一般其点位精度(相对 ITRF 而言)应不低于 $\pm 0.2\text{m}$ 。对站址周围环境的主要要求是希望在 360° 视野内至少能有高度角 5° 以上的开阔天空。此外,跟踪站还应配备原子钟、能测定电离层时间延迟的双频 GPS 接收机(如 1.1.3 中第四类接收机)、自动气象记录仪等。

跟踪站的任务是将其原始伪距观测数据、气象数据和当地电离层时间延迟改正等各类数据实时地或准实时地传输至主控站,其中伪距观测数据主要用来计算卫星钟差,一般要求 1 秒钟一个采样,因而 1 秒就应传输一组观测数据。

为了使主控站能正确算出这三项差分改正,至少需要三个跟踪站。但为了改善计算结果的精度和进行检核,一般在 WADGPS 系统中,跟踪站个数不宜低于 4~6 个。

2. 用户站

WADGPS 系统中的标准用户站应是利用 C/A 码的单频 GPS 接收机(即 1.1.3 中第一、二类接收机)。用户站周围也希望在 360° 视野内有高度角 15° 以上的开阔天空。

用户站还应具有能接收由差分信号播发站发送的差分改正信息的能力,用户站 GPS 接收机中的软件应保证这些差分信息能实时地直接用于用户所接收的 GPS 原始数据上,然后实时解出用户站的坐标。

3. 主控站

在 WADGPS 系统中最关键的是主控站。它通过数据通信网络接收各跟踪站传输的 GPS 伪距观测值和电离层时间延迟改正值,结合本站相应的 GPS 数据,计算出三类广域差分修正值,即对每一颗 GPS 卫星的星历改正、钟差改正和电离层时间延迟改正的 8 个参数。然后通过数据通信网络将这些差分信息传输给差分信息播发站。

4. 差分信息播发站和数据通信网络

WADGPS 的数据通信网和 LADGPS 的数据通讯链的主要区别在于多了跟踪站与主控站之间的数据通讯。主控站或播发站的数据传输和播发、数据通讯中的编码器和用户的解码器的功能都和 LADGPS 类似。但由于该系统要求覆盖面广,传输的信息量大,因此 WADGPS 中的跟踪站至主控站的数据传输和播发站向用户站的差分信息传输,常常须选用长波,卫星通讯等。显而易见,WADGPS 系统中的数据通讯具有数据量大、速度要求快、通讯距离长、覆盖面大的特点。因此数据通讯网络是 WADGPS 技术中最为复杂,投资最为昂贵的部分。

1.2.4 WADGPS 技术的特点

WADGPS 向用户站提供主控站计算出的主要误差源的差分改正值,从而顾及了误差源对不同位置测站观测值影响的差别。所以 WADGPS 技术克服了 LADGPS 技术对时空的依赖性,而且保持和改善了 LADGPS 中实时差分定位的精度。WADGPS 技术的特点是:(1)主控站和用户

站的间隔可以增大至 1000~1500km 甚至更长,且不会显著降低用户站定位精度。因此在中国这样大的国家里若要是维持一定的 GPS 导航和定位精度,相对于 LADGPS 系统而言,WADGPS 系统大大减少了基准站的数量。(2)由于能实时给出主要误差源的差分改正值,对于削弱 SA 的影响,WADGPS 技术的效果要比 LADGPS 好(参见表 1-1 和图 1-1)。(3)WADGPS 系统的作用覆盖区域可扩展到一些困难地区,如远洋、沙漠。(4)WADGPS 技术由于要求有较好的硬软件和高效率的强大通讯设备,因此投资、运行和维护费用相对来说就比较高,对操作和维持这一系统的技术要求也比 LADGPS 复杂得多。同时,用户的 GPS 接收机在进行这种类型的差分改正时,需要有更完善的接收设施和计算软件。

下面将 GPS 单点定位、伪距差分 LADGPS 定位和 WADGPS 定位的精度列于表 1-1,表列结果是 1992 年 12 月美国斯坦福大学的 C. Kee 等人^[23]在有 SA 影响时试验得出的。

表 1-1 GPS(单点),LADGPS 和 WADGPS 三种技术的定位精度

技术类型	GPS	LADGPS	WADGPS
经度误差 (m)	12	0.6	0.36
纬度误差 (m)	26	3.7	0.26
高程误差 (m)	49	12.7	0.54
总误差 (m)	57	13.2	0.71

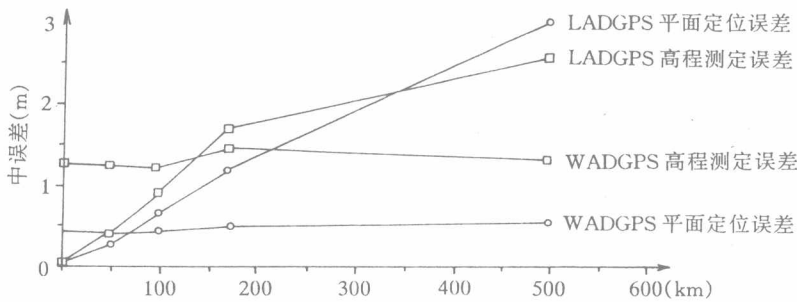


图 1-1 WADGPS 技术和 LADGPS 技术定位精度比较

1.2.5 广域增强差分 GPS 和局域增强差分 GPS

除了上面介绍的典型的 LADGPS 和 WADGPS 外,国外还提出了广域增强差分 GPS(Wide area augmentation differential GPS system,简称 WAAS)。它的主要工作方式是将主控站所算得的广域差分改正信息,通过地球站传输至地球同步卫星,该同步卫星以 GPS 的 L₁ 频率为载波,将上述差分改正信息当作 GPS 导航电文转发给用户站。它的技术特点是:(1)由于数据传输链所采用的载波频率和 GPS 卫星的信号一致,因此用户 GPS 接收机可以直接接收到 WAAS 中的差分改正信息而无需外加通信链;(2)同步卫星信号的实时传输能力强,而且可覆盖很大的区域,从而较好地解决了主控站与播发站,播发站与用户站之间数据传输问题;(3)若在 WAAS 中要求同步卫星所传输的信号不仅仅是差分改正信息,而且还包括 C/A 码和同步卫星星历,则这一同步卫星就成为空基的“伪”GPS 卫星,相当于增加了卫星测距源,因而用户的定位精度和可靠性都要高于 WADGPS 系统。美国联邦航空局(FAA)和欧洲空间局(ESA)分别提出了基于 GPS 和 GPS+GLONASS 全球卫星定位系统的 WAAS。WAAS 的实现将最终实现全球范围内的连续导航。

WADGPS 和 WAAS 虽然能在大范围内满足用户较高精度,如 $\pm(2\sim5)\text{m}$ 的导航和实时定位的需要,但对某些要求很高精度(如高于 $\pm 1\text{m}$)的实时定位用户是不够的,例如航空港的Ⅱ、Ⅲ类近进和着陆问题。在 1.1.2 中曾经提到,用载波相位差分进行实时定位可以获得很高精度。因此,出现了局域增强差分 GPS 系统(Local area augmentation differential GPS system 简称 LAAS)。它的主要工作方式是将基准站所算得的伪距差分和载波相位差分改正值,以及 C/A 码测距信号,一起由地基播发站调制在 L_1 频道上传输给用户站。同 WAAS 一样,用户用一般 GPS 接收机就能接收到上述信息,改善实时定位的可靠性和精度。这些基准站称为陆基“伪”GPS 卫星,这一技术目前还处于研究阶段。

1.3 WADGPS 系统中差分改正值的计算原理

WADGPS 系统中的核心问题是在主控站上如何确定广域差分改正值。WADGPS 的差分修正值包括三部分内容:卫星星历误差,卫星钟差和电离层时间延迟参数。由于 WADGPS 系统实现的技术方案不同,差分改正信息计算方法也不同(见 4.1.3)。这里着重讨论差分改正信息计算的原理。

1.3.1 GPS 星历、星钟和电离层差分改正值的观测方程式

设跟踪站 $i(i=1,2,\dots,n)$ 至 GPS 卫星 $j(j=1,2,\dots,m)$ 所观测的伪距为 p_{ij} ,这里的下标注记中第一个字母表示测站号,第二个字母表示卫星号,则伪距观测方程为:

$$\begin{aligned} p_{ij} &= \underline{D}_{ij} \cdot \underline{e}_{ij} - b_j + B_i \cdots I_{ij} + \epsilon_{ij} \\ &= [(\underline{R}_j + \delta \underline{R}_j) - \underline{S}_i] \cdot \underline{e}_{ij} + b_j + B_i - T_{ij}^0 + \delta T_j \cdot \underline{h}_{ij} + \epsilon_{ij} \\ &= \delta \underline{R}_j \cdot \underline{e}_{ij} - b_j + B_i - \delta T_j \cdot \underline{h}_{ij} + [(\underline{R}_j - \underline{S}_i) \cdot \underline{e}_{ij} - T_{ij}^0 + \epsilon_{ij}] \end{aligned} \quad (1-3-1)$$

式中: p_{ij} 是观测得到的伪距,已作对流层、相对论和多路径改正;

$\underline{D}_{ij}$ 是跟踪站 i 至卫星 j 的距离矢量;

$\underline{e}_{ij}$ 是卫星星历改正矢量的系数矩阵;

$\underline{R}_j$ 是由卫星 j 的电文算得的卫星 j 的位置矢量(作为概略值);

$\delta \underline{R}_j$ 是卫星 j 的星历改正矢量;

$\underline{S}_i$ 是跟踪站 i 的已知地心位置矢量;

(以上注记可参见图 1-2。)

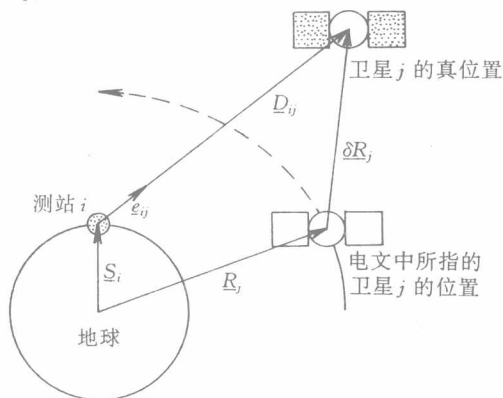


图 1-2 GPS 星历误差示意图

B_i 是已化算为相应距离的跟踪站的接收机钟差；

b_j 是已化算为相应距离的卫星 j 的钟差；

ϵ_{ij} 是噪声；

T_{ij} 是由跟踪站 i 至卫星 j 的伪距的电离层改正之真值；

T_{ij}^0 是由跟踪站 i 至卫星 j 的伪距的电离层延迟改正值的近似值，由卫星电文中的电离层参数算得；

δT_j 是卫星电文中电离层参数改正值矢量，设有 t 个参数；

h_{ij} 是计算电离层参数差分改正值的系数矩阵。

这里要指出的是上述观测方程式(1-3-1)相应于 L_1 (C/A)码伪距情况，是最一般的情况，即不在观测值中利用双频进行电离层改正，而是将它和星历及星钟差一并求定。

1.3.2 广域差分改正值统一解算的原理

若将所有观测方程式(1-3-1)集合起来，即有 $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ ，则得下列观测方程组：

$$\underline{z} = \underline{H} \underline{x} + \underline{\epsilon} \quad (1-3-2)$$

1. $\underline{z}$ 的表达式

式(1-3-2)中 $\underline{z}$ 表示伪距测量减去相应伪距概略值，可写为：

$$\underline{z} = \underline{p} - \begin{bmatrix} \underline{E}_1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \underline{E}_2 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & & & & & \cdot \\ \cdot & \cdot & & & & & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{E}_n \end{bmatrix} \underline{d} - \underline{T}^0 \quad (1-3-3)$$

$(mn \times 1) \quad (mn \times 3mn) \quad (3mn \times 1) \quad (mn \times 1)$

式(1-3-3)中 $\underline{p}$ 为伪距观测值，即：

$$\underline{p} = [\underline{p}_1^T, \underline{p}_2^T, \dots, \underline{p}_n^T]^T \quad (1-3-4)$$

其中：

$$\underline{p}_i = [p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{im}]^T \quad (1-3-5)$$

式(1-3-3)中 $\underline{E}_i$ 是系数矩阵，可表示为：

$$\underline{E}_i = \begin{bmatrix} \underline{e}_{i1}^T & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & \underline{e}_{i2}^T & 0 & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \underline{e}_{im}^T \end{bmatrix} \quad (m \times 3m) \quad (1-3-6)$$

式(1-3-6)中 $\underline{e}_{ij}$ 表示观测值 p_{ij} 中 i 卫星星历改正的系数矩阵，它的具体形式取决于星历改正的模式是坐标量改正还是轨道根数改正等等。

式(1-3-3)中张量 $\underline{d}$ 表示跟踪站至卫星的位置矢量的概略值，它的真值是 $\underline{D}$ (参见式(1-3-1))。

$$\underline{d} = [\underline{d}_1^T, \underline{d}_2^T, \dots, \underline{d}_n^T]^T \quad (1-3-7)$$

$$\text{其中: } \underline{d}_i = [(\underline{R}_1 - \underline{S}_i)^T, (\underline{R}_2 - \underline{S}_i)^T, \dots, (\underline{R}_m - \underline{S}_i)^T]^T \quad (1-3-8)$$

$\underline{d}$ 是一个 $(3mn \times 1)$ 矩阵。

式(1-3-3)中张量 $\underline{T}^0$ 表示电离层延迟改正的概略值,它由卫星电文算得。

$$\underline{T}^0 = [\underline{T}_1^{0T}, \underline{T}_2^{0T}, \dots, \underline{T}_n^{0T}]^T \quad (1-3-9)$$

$$\underline{T}_i^0 = [\underline{T}_{i1}^0, \underline{T}_{i2}^0, \dots, \underline{T}_{im}^0]^T \quad (1-3-10)$$

$\underline{T}^0$ 若以跟踪站至卫星间伪距的电离层延迟改正近似值 T_{ij}^0 表示,则它是一个 $(mn \times 1)$ 的矩阵。

2. $\underline{H}$ 的表达式

现在考虑式(1-3-2)的右方系数矩阵 $\underline{H}$,它可表示为:

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} \underline{E}_1 & -\underline{I} & \underline{I}_1 & \underline{h}_1 \\ \underline{E}_2 & -\underline{I} & \underline{I}_2 & \underline{h}_2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \underline{E}_n & -\underline{I} & \underline{I}_n & \underline{h}_n \end{bmatrix} \quad [mn \times (3m + m + n - 1 + t)] \quad (1-3-11)$$

式(1-3-11)右方的 $\underline{E}_i$ 同式(1-3-6), $\underline{I}$ 是 $(m \times m)$ 的单位矩阵,而 $\underline{I}_i$ 为(第 i 列):

$$\underline{I}_i = \begin{bmatrix} 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \\ 0 & & 1 & & 0 \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ \cdot & & \cdot & & \cdot \\ 0 & \dots & 1 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad [m \times (n - 1)], (i = 1, 2, \dots, n - 1) \quad (1-3-12)$$

$$\underline{I}_n = 0 (\text{零矩阵}) \quad [m \times (n - 1)] \quad (1-3-13)$$

$\underline{I}_n = 0$ 的原因是第 n 站是钟差参考站,假定该站没有钟差,其他站的钟差均相对于该站进行推算。

式(1-3-11)右方的 $\underline{h}_i$ 为:

$$\underline{h}_i = \begin{bmatrix} \underline{h}_{i1}^T \\ \underline{h}_{i2}^T \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \underline{h}_{im}^T \end{bmatrix} \quad (m \times t) \quad (1-3-14)$$

上式中的 $\underline{h}_{ij}$ 的意义同式(1-3-1)。

3. $\underline{x}$ 的表达式

式(1-3-2)右方的差分改正数向量 $\underline{x}$,即未知数矩阵,应包括卫星星历差分改正值 δR 、卫星钟差 $\underline{b}$ 、接收机钟差 $\underline{B}$ (实质是相对于第 n 个跟踪站钟的相对钟差)和 δT ,即对卫星电文中电离层参数的改正值。故 $\underline{x}$ 可表示为:

$$\underline{x} = [\delta R^T, \underline{b}^T, \underline{B}^T, \delta T^T] \quad [(3m + m + n - 1 + t) \times 1] \quad (1-3-15)$$

上式中右方各个量可表示为:

$$\delta R = [\delta R_1^T, \delta R_2^T, \dots, \delta R_m^T]^T \quad (3m \times 1) \quad (1-3-16)$$

$$\underline{b} = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T \quad (m \times 1) \quad (1-3-17)$$

$$\underline{B} = [B_1, B_2, \dots, B_{n-1}]^T \quad [(n-1) \times 1] \quad (1-3-18)$$

$$\underline{\delta T} = [\delta T_1, \delta T_2, \dots, \delta T_t]^T \quad (t \times 1) \quad (1-3-19)$$

式(1-3-2)右方的 ε 为噪声,其矩阵形式就不再列出。

4. 差分改正值 $\underline{x}$ 的求解

在观测方程式集合(1-3-2)的基础上,用最小二乘法(或最小二乘滤波)进行整体平差,求解卫星星历、钟差、电离层等差分改正值,在有多余观测情况下,未知数向量可表示为:

$$\underline{x} = (\underline{H}^T \underline{H})^{-1} \underline{H}^T \underline{z} \quad (1-3-20)$$

若为秩亏情况下,则噪声二阶矩为极小时的最优估计为:

$$\underline{x} = \underline{H}^T (\underline{H} \underline{H}^T)^{-1} \underline{z} \quad (1-3-21)$$

由式(1-3-21)解出的广域差分改正信息的每项改正本身(如星历改正,钟差改正)可能不精确,但基本上可以保证用户定位精度。这是因为这些差分改正值具有很好的内部一致性,其综合影响具有一定的精度。

1.3.3 差分改正值的其它解算方法

上一节讨论的同时确定卫星星历改正、卫星钟差改正和电离层模型参数的方法,是差分改正信息计算的最一般形式。这种方法存在几个不足:(1)这种方法的计算结果中星历改正和电离层改正具有强相关性。也就是说两类差分改正信息虽然有很好的内部一致性,但本身的精度不高。对于双频接收机用户如果用双频观测值消除电离层影响,再用钟差和星历改正信息位,则定位结果精度会下降。(2)由于算法中未知数个数很多,增加了对主控站计算机贮存和计算速度的要求。

针对这些不足,WADGPS 系统中通常把电离层模型参数与卫星星历和钟差分开计算。例如,用基准站的双频伪距或相位观测值直接求解电离层参数。同时,用该模型改正伪距观测值,仅计算卫星钟差和星历改正。其具体做法,只要在(1-3-1)式的观测方程中去掉电离层模型参数。通常为了保证三类差分改正信息的内部一致性,这里不用两个频率上的观测值消去电离层折射影响,而是用计算出来的电离层改正模型计算观测值中的电离层影响。

另一方面,根据卫星轨道误差的变化缓慢且具有系统性的事实,又可以先用消除电离层影响的双差观测值,确定并外推卫星轨道。然后把电离层改正模型和卫星轨道作为已知值,用伪距观测值确定卫星钟差。这样做可以将电离层模型和外推卫星轨道的剩余误差,合并到卫星钟差中,保证差分改正信息的一致性,从而保证用户定位精度。其中卫星轨道的确定,可以采用纯几何轨道修正方法,也可以根据卫星运动方程精确确定并外推卫星轨道(见 3.3)。这种方法在保证差分改正信息计算精度的同时,将差分改正信息计算分成独立的三个部分,减小了对主控站计算机内存和计算速度的要求。

1.4 电离层模型参数计算

电离层对 GPS 信号的折射效应产生的信号传播的时间延迟,在最坏的情况下可达 300ns,相当于 90m 的距离误差。因此,它是 GPS 定位中的一个重要误差源。根据电离层折射影响的空间相关性,当两个站之间距离较近时,可以用差分的方法消除其影响。而一般情况下,电离层折射影响的处理方法有三类:(一)观测值组合方法:根据电离层折射与信号频率的关系,用两个频率上的观测值组合消除;或者根据电离层折射对相位和伪距影响的不同,用半和法消除。(二)经验改正模型:根据长期的电离层研究结果,建立相对固定的计算模型,如 Bent 模型^[23]等。(三)实测模