

地基GPS气象站网 建设指南

曹云昌 方宗义 夏青等◆编著

电离层

对流层

actual tropospheric path length

Excess path length

气象出版社

地基 GPS 气象站网 建设指南

曹云昌 方宗义 夏青等 编著

气象出版社

内 容 简 介

本书汇集了多位专家在 GPS 气象学方面的研究成果和应用数据资料。全书共分 6 章:第 1 章主要介绍了 GPS 气象学的发展历程、探测原理以及应用领域;第 2 章对中国气象局地基 GPS 气象学的应用规划进行了展望;第 3 章汇编了中国气象局 GPS 气象站网建设的规范性文件;第 4 章编著者翻译了 RINEX 版本 2.10 的格式;第 5、第 6 和第 7 章汇编了 GPS 气象学的数据传输、资料收集和产品格式等业务应用的内容。

本书可为广大 GPS 气象站网工作者提供重要参考,也可供相关专业的本科生、研究生以及测绘、海洋、水文、天文等从事 GPS 工作的人员学习和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

地基 GPS 气象站网建设指南/曹云昌等编著. —北京:
气象出版社, 2007. 12

ISBN 978-7-5029-4421-6

I. 地… II. 曹… III. 全球定位系统 (GPS) —应用—
气象—计算机网络—指南 IV. P228.4-62 P4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 186076 号

出版发行: 气象出版社

地 址: 北京市海淀区中关村南大街 46 号

邮政编码: 100081

网 址: <http://cmp.cma.gov.cn>

E-mail: qxcbs@263.net

电 话: 总编室 010-68407112, 发行部 010-68409198

责任编辑: 王桂梅

终 审: 章澄昌

封面设计: 索彼工作室

责任技编: 刘祥玉

责任校对: 牛 雷

印 刷 者: 北京中新伟业印刷有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 6

字 数: 154 千字

版 次: 2007 年 12 月第 1 版

印 次: 2007 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 19.80 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

20 世纪末建成的卫星导航定位系统（如美国的 GPS、俄罗斯的 GLONASS 等）已经在军事和民用的诸多领域发挥着重大的作用，显示出巨大的生命力。从事地球科学研究和应用的部门，利用它具有高准确度（毫米量级）测量和定位功能应用于测绘、地壳形变监测、电离层电子浓度监测等方面；大气科学工作者则利用 GPS 无线电波与大气的相互作用而产生的信号时延和电波射线的弯曲来测量大气参数，这就是 GPS 气象学（GPS/MET）。

GPS 气象学包括两方面内容：①利用地面双频 GPS 接收机接收的 GPS 信号的时延来反演大气整个气柱的水汽含量；②把 GPS 接收机置于山顶、飞机或低轨道卫星上，通过对掩星时 GPS 接收机接收的临边 GPS 信号的处理，反演出大气参数的垂直分布。由于无线电波不受云层和降雨的影响，GPS 气象站网探测具有全天候、不需要定标、高频率采样、探测准确度高和经济实惠等诸多优点，这项技术受到了广泛的关注并得到迅速发展。

以地基 GPS 为例，美国、日本、德国等发达国家均已建成了综合利用的 GPS 测站网，探测大气水汽总量的分布和演变是其中最基本的任务之一。中国在中央政府和地方政府的支持下，已经或正在建设分布于全国和某些地区的大尺度 GPS 气象站网及中尺度气象站网，探测大气水汽总量当然是其中任务之一。

中国气象局和有关部门正面临着参加国家和地方 GPS 网建设的任务，迫切需要有关地基 GPS 气象站网建设方面的知识、文件和文档。国家卫星气象中心从 20 世纪末就开始了 GPS 气象站网的应用研究工作，2000 年以来，致力于地基 GPS 气象站网的业务化工作。2005 年，国家卫星气象中心作为主要单位、参加京、津、冀地基 GPS 气象站网的建设、数据传输与处理的业务化试验，积累了一些经验并制定了业务化规范试用文件。为了满足各部门对这方面的需求，国家卫星气象中心组织了本书的编写并选编了与地基 GPS 气象站网建设和资料处理及应用有关的文件，与全国同行共享，若有不妥之处敬请批评指正。

方宗义

（国家卫星气象中心）

2007 年 4 月

目 录

1	GPS 气象学及其应用	(1)
1.1	GPS 气象学(GPS/MET)	(1)
1.2	地基 GPS 遥感水汽的原理和方法	(7)
1.3	GPS 遥感水汽的外场试验	(14)
1.4	GPS 探测在中尺度暴雨分析中的应用	(18)
1.5	GPS 遥感资料四维变分同化的初步应用	(32)
	参考文献	(36)
2	中国地基 GPS 气象应用站网建设展望	(38)
2.1	发展 GPS 气象应用的意义和需求	(38)
2.2	导航卫星探测大气参数的发展趋势	(39)
2.3	我国 GPS 气象应用的展望	(42)
2.4	结语	(43)
	参考文献	(44)
3	全球导航卫星系统大气探测基准站网建设指南(试行)	(45)
3.1	范围	(46)
3.2	规范性引用文件	(46)
3.3	术语和定义	(46)
3.4	缩略语	(47)
3.5	构成	(47)
3.6	基准站分类与布设原则	(48)
3.7	基准站建设	(48)
3.8	数据中心	(53)
3.9	数据通信网络	(55)
4	RINEX(与接收机无关的 GPS 文件交换格式)	(56)
4.1	版本历史	(56)
4.2	RINEX 思想	(58)
4.3	总体格式说明	(59)
4.4	观测量的定义	(60)
4.5	RINEX 文件的交换	(60)
4.6	RINEX 版本 2 的特征	(61)
4.7	附加提示及要点	(62)
4.8	反电子欺骗下的 RINEX(AS)	(63)

4.9	GLONASS 扩展	(64)
4.10	地球同步卫星的 RINEX 扩展 (GPS 信号载荷)	(65)
4.11	RINEX 2.10 版本格式定义和举例	(66)
	参考文献	(82)
5	GPS 气象站网数据传输规范(试行)	(83)
5.1	传输内容和时次	(83)
5.2	传输数据的文件命名规范	(83)
5.3	GPS 数据传输流程	(84)
5.4	气象数据与 GPS 观测数据的匹配	(85)
6	地基 GPS 遥感水汽产品文件命名及格式(试行)	(86)
6.1	地基 GPS 遥感水汽产品文件命名规定	(86)
6.2	地基 GPS 遥感水汽产品文件内容和格式	(87)
6.3	地基 GPS 遥感水汽数据产品实例	(87)
7	自动气象站与 GPS 资料匹配的规定(试行)	(88)
7.1	规定	(88)
7.2	气象文件命名格式	(88)
7.3	内容格式	(88)
7.4	范例	(89)
7.5	GPS 和气象文件打包压缩资料文件的命名格式	(90)

1 GPS 气象学及其应用^①

1.1 GPS 气象学(GPS/MET)

1.1.1 GPS 全球导航定位系统

全球定位系统 GPS(Global Positioning System)由美国国防部从 1973 年开始组织实施,于 1994 年 7 月全部完成,是目前技术最成熟且已真正实用的一种卫星导航和定位系统。

GPS 系统共包括三大部分:卫星星座部分、地面监控部分和用户设备部分。GPS 卫星星座由均匀分布在 6 个轨道面上的 24 颗卫星组成,每个轨道面上分布有 4 颗卫星,轨道面倾角 55° ,各轨道面升交点赤经相差 60° ,轨道平均高度 20 200 km(图 1.1),卫星运行周期为 11 h 58 min。对地面上任一接收站点,每颗卫星每天大约有 5 h 在地平线以上,同时位于地平线以上的卫星最多 11 颗,最少 4 颗,以满足计算 GPS 接收机三维位置和速度的要求。地面监控部分的主要作用是对空间 GPS 卫星进行跟踪定轨并把推算和编制的卫星星历、钟差、导航电文及其他指令等注入相应卫星的存储系统,包括设在美国科罗拉多州的主控制站和 5 个分布各地的监测注入站。用户设备,也就是 GPS 接收机、天线等(周忠谟等 1992)。



图 1.1 全球定位系统 GPS 星座

GPS 卫星的核心是一个高质量的振荡器(由四台高精度原子钟提供时间标准),发射两种相关的载波,即 L 频段的 L_1 (1.575 42 GHz)和 L_2 (1.227 60 GHz)(2007 年还要增加 L_5 波段

^① 本文由曹云昌 方宗义 夏青 毕研盟执笔。

1.176 45 GHz)。GPS 的信息是由相位调制技术加载到上述二个频段上发射的。这些信息包括所谓的 C/A 码和 P 码,或复合成的 Y 码(在 L_1 和 L_2 上都有)。信号的构成见表 1.1。

表 1.1 GPS 卫星发射的信号特征

载波	测距码	数据码
L_1 (1.575 42 GHz)	C/A 码(粗码) P 码 1.023 MHz 10.20 MHz	D 码(导航电文) 50BPS
L_2 (1.227 60 GHz)	C/A 码 P 码(精码) 10.23 MHz	D 码(导航电文) 50BPS

GPS 测距码是一种伪随机噪声码,它的主要特点是具有类似随机码的良好自相关特性,而且具有特定的编码规则,可以容易地复制,导航电文(数据码)中包含了有关 GPS 卫星星历、工作状态和时钟校正等导航信息,它是利用 GPS 导航和定位的数据基础,GPS 卫星的三维位置和速度以及卫星钟差校正信息可从中计算得到。

从所利用的 GPS 信号成分不同,可把导航定位的方法分为两种:测码伪距法(采用测距码相位观测值)和测相伪距法(采用载波相位观测值)。测码伪距法是测量 GPS 卫星发射的测距码信号到达用户接收机天线的传播时间,再用传播时间乘以光速即得到接收机和卫星之间的距离(站星距离)。为了测量上述码信号的时间延迟,需要在用户接收机内复制码信号,因此必须精确知道码信号的结构。测向伪距法是通过测量接收机收到的载波信号与接收机产生的参考信号之间的相位差并计算得到站星距离,这种方法的复杂之处在于载波相位测量中整周待定值的确定和整周跳变分析。实际上,两种方法所测得的站星距离都不可避免地会含有卫星中和接收机非同步误差的影响。为了与站星之间真实的几何距离相区别,把这种含钟差影响的距离称为伪距。

另外,在观测过程中,由于 GPS 卫星与接收机存在着相对运动,接收机收到的载波信号的频率对于卫星发射频率存在多普勒频移:

$$f_d = f_s - f_r = \frac{u}{c} f_s \quad (1.1)$$

式中, f_s 和 f_r 分别为接收机和发射机的频率; c 为光速, u 为卫星与接收机的相对运动线速度,当二者远离时, u 为正,多普勒频移 f_d 是已知的观测量,故可利用(1.1)式计算接收机的相对运动线速度。

对于单点绝对定位测速,只要同步观测 4 颗 GPS 卫星就可得到 4 个伪距和 4 个多普勒频移测值,组成 8 个观测方程,从而解得接收机的 8 个待求未知量(三维位置和速度、接收机钟差和钟差变化率)。

目前,全球导航定位系统除美国 GPS 系统外,还有俄罗斯的 GLONASS 系统、欧洲的伽利略系统和中国的北斗卫星导航系统,它们和 GPS 相类似,都能提供导航定位及其他应用服务。

1.1.2 GPS 定位原理

地面 GPS 接收机同时接收 4 颗以上 GPS 卫星发送的信息并进行解码,可以由卫星发送

的导航电文计算出当时卫星所在的空间位置和发送时间。在以地心为原点的坐标系中,设4颗卫星的位置为 (x_i, y_i, z_i) , $i=1, 2, 3, 4$ 。根据GPS接收机内部的时钟可记录信号的接收时间,从接收时间 t'_i 和每颗卫星信号中所携带的信号发送时间 t_i 可计算出信号从卫星传到接收机所花的时间,并进一步计算出这四颗卫星距接收机的距离:

$$l_i = c_0(t'_i - t_i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1.2)$$

式中 c_0 为真空中的光速,可以看出这样计算出的距离是不准确的,一方面是波在实际大气中传播的速度并非 c_0 ;另一方面,用户的GPS接收机中的时钟也未必准确,而且上面计算中也没有考虑到射线弯曲而引起的几何路径的增加,因此(1.2)式计算出的距离称为“伪距”。

不考虑大气的影响,设GPS接收机的位置为 (x, y, z) ,接收机时钟的误差为 δ_i ,则可列出下列方程组:

$$\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = c_0(t'_i - \delta_i - t_i) \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1.3)$$

通过求解可得到 (x, y, z) 和 δ_i 这四个未知量,这就是GPS定位的基本原理。

导航定位的方法根据观测量的不同可分为两种:测码伪距法和测相伪距法,前者具有速度快、无多值性、低精度的特点,而后的精度高,但计算过程复杂,这两种方法所测得的站星距离都不可避免地会含有卫星钟和接收机钟非同步误差的影响。

1.1.3 GPS 气象学

L波段的GPS无线电信号通过地球大气层时,其传播路径受到大气介质的折射而弯曲,传播路径比几何距离变长,传播速度也因此变慢,信号到达时间变晚,这称为大气对GPS信号的延迟。可分为电离层延迟和对流层延迟。

对流层延迟一般泛指非电离大气对电磁波的折射。非电离大气包括对流层和平流层,大约是大气层中从地面向上50 km的部分。由于折射的80%发生在对流层,所以通常叫做对流层折射。对流层大气对于直至15 GHz的射电频率呈中性,信号传播产生非色散延迟,使电磁波传播路径变长,因而这一延迟用距离表示通常叫做过剩路径长度。对于一个海平面上的中纬度站,其典型值在天顶方向大约为2.3 m,在85°天顶角方向大约为25 m。这种延迟和大气的折射率有关。

从折射角度而言,电离层泛指大约50 km向上的大气层。受太阳辐射(主要是X射线和紫外线区能量辐射)作用,电离层中的物质以正离子和自由电子的形式存在,电磁波的入射使带电粒子向不同方向运动,从而产生一附加的辐射波,并叠加到入射波上,这就是电离层对电磁波的折射作用。电离层折射作用使入射波的相位传播速度(相速度)加快,而波内能量传播速度(群速度)减慢。

中纬度地区,测站天顶方向电离层延迟白天达到30 ns(相当于10 m),夜间为3~10 ns(相当于1~3 m)。传播方向的延迟约为天顶方向延迟乘以与传播路径高度角有关的倾斜因子。高度角很低时,倾斜因子可能达到3。因此,路径上的电离层延迟可能在30~150 ns(相当于9~45 m)之间变动,这种延迟和GPS信号的频率有关。

GPS气象学是指利用全球卫星导航技术(GPS)主动遥感地球大气层的学科技术,也就是通过测量穿过大气层的GPS信号的延迟来获得大气折射率进而从中得到温、压、湿等信息。

利用地基GPS接收机进行气象探测,来获得固定点上的准确连续的大气水汽总量,称为地基GPS气象学。使用低轨卫星上GPS接收机利用掩星观测探测地球大气的方法,称为空

基 GPS 气象学。这两种技术合称为 GPS 气象学(GPS/MET)。

1.1.3.1 地基 GPS 气象学

利用 GPS 进行地基大气遥感的建议最早是由 Dixon 等 1990 年提出的(Dixon 1991),根据 Bevis 等(1992)提出的方法,在 1993—1994 年进行了一系列试验,证明了通过在地面建立固定的 GPS 站,可以连续监测站点上空整层大气的水汽量——大气水汽总量,精度可达几毫米,时间分辨率小于 1h(Rocken 等 1993, Rocken 等 1995),且不受大气中云的影响。这些外场试验是:1993 年春由大学联合会和北卡罗来纳大学开展的 GPS/STORM 试验;NOAA 和 UNAVCO 在 1994 年 1—2 月开展的 GPS-WISP94 试验。GPS/STORM 试验在实际外场条件下检验了利用 GPS 接收机估计大气水汽总量的技术,通过与水汽辐射计的比较,发现它们之间存在很好的一致性,即使在变化较大和高值的情况下,偏差小于 0.2 cm,均方根小于 0.2 cm。GPS-WISP 试验也得出了同样的结论,证明了利用 GPS 无论在干、湿情况下,都能连续监测大气的水汽总量,精度和水汽辐射计及探空探测的结果相当。

从 GPS/STORM 和 GPS-WISP94 试验证明地基 GPS/MET 的应用价值和特点以来,美国、日本、德国、欧盟冰岛、韩国等纷纷建立起包含地基 GPS/MET 应用的连续运行网络。GPS-IPW 示范网络是美国 NOAA 预报系统实验室(FSL)在 UNAVCO 帮助下建立的、实时运行的地基 GPS 网络,其主要目的是探讨地基 GPS/MET 的科学工程基础,研究高时间分辨率的大气水汽总量资料对天气预报的影响,现有 200 多个站点。2008 年,NOAA 计划将地基 GPS 探测网主干站扩充到 400 多个,填充站扩充到 600 多个,组成一个覆盖全国的业务运行的地基 GPS 水汽探测网络并投入业务运行。

连续运行参考站(CORS)是美国海洋大气署(NOAA)和美国国家大地动力学服务中心(NGS)共同管理的应用于大地测量和气象研究的 GPS 运行网络,共有 120 个站点。目前,美国大学大气研究中心(UCAR)利用这两个网络的数据,处理出每小时一次的美国本土的大气水汽总量和电子总量(TEC)的分布。

Suominet 网是充分利用各大学 GPS 研究资源建立的一个为科学研究和教育而实时运行的 GPS 网络。Suominet 的 100 多个站点主要位于美国国内,包括 2 个位于北极,8 个位于热带海岸,7 个位于海岛;2 个浮标,1 个热带浮标;12 个站用于水文研究。Suominet 的目标是利用广泛分布的实时的 GPS 数据来获取大气高低层的状态(GPS 水汽和电子浓度),促进 GPS 在气象学、气候学、水文学、地学和天文学等交叉学科的应用。

在日本,由日本地质调查所(GSI)管理的超过 1 000 台 GPS 接收机组成的一个密集的观测网络,除进行地震预测研究外,还包括气象、气候和电离层研究。

在德国,包含地基 GPS/MET 计划的有 CHAMP 计划,它的目的在于了解岩石圈、水圈和大气圈的变化和相互作用,研究任务包括重力研究、地磁研究和大气圈电离层的研究。

另外,欧盟由法国、意大利、西班牙和丹麦等国联合发起的 MAGIC 计划,旨在获取并验证 GPS 数据,同化并检验 GPS/MET 资料对天气模式(HIRLAM)和气候模式(HIRHAM)的作用,具有准实时的应用,其主要作用是利用后处理的 GPS 资料对模式进行验证。

“九五”期间,我国地震局联合国内相关部委建立了 25 个基准站的用于大地测量的 GPS 观测网络,深圳率先建立起我国城市 GPS 应用网络。2001 年,上海地区则建立了第一个集气象服务、大地测量、地壳形变、地面沉降和地理信息系统(GIS)多种应用的 GPS 综合网络,并可推广到交通智能化管理、电离层变化监测和城市规划等方面。它是由 14 个地面 GPS 基准站

和中心处理站组成,覆盖上海及周边江、浙、皖地区。

国内从 20 世纪 90 年代中期由国家卫星气象中心和北京大学联合进行了地基 GPS/MET 的研究,利用地基 GPS 资料,对大气水汽总量进行了反演分析(李成才等 1999,曹云昌等 2004),上海气象局和上海天文台通过合作,对上海暴雨进行了 GPS 观测,得到反演的 GPS 大气水汽总量。中国气象科学研究院和中国地震局第一地形变监测中心在华南暴雨试验中也进行了 GPS 观测。2000 年,国家卫星气象中心和北京大学联合北京市气象局进行了我国第一次北京地区地基 GPS/VAPOR 试验,2001 和 2002 年则联合在安徽进行了 GPS 水汽观测的外场试验。

1.1.3.2 空基 GPS/MET

如果在低轨卫星上装载 GPS 接收机,在 GPS 信号传送到低轨卫星接收机时,其路径穿过大气层的那个一分钟左右的观测,称为一个掩星事件。在一个掩星事件中,从 GPS 信号开始横切大约 85 km 高的中层顶到横切地球表面,其信号延迟,从最小可观测到的 $1\text{ mm}(3 \times 10^{-12}\text{ s})$ 增加到接近 $1\text{ km}(3 \times 10^{-6}\text{ s})$ 。也就是说,大气创造了一个独特的大约有 6 个数量级动态范围的信号,这是获得高精度大气参数测值的基础。同时,在掩星期间和掩星前后,还会收到其他没有被大气掩星的 GPS 信号,这将有利的低轨卫星位置和速度的精密测定。

卫星处于地球大气的临边状态时,到达星载 GPS 接收机的 GPS 信号会被经过的大气层折射,星载 GPS 接收机可以观测到多普勒频移,加上接收机的位置和速度信息,可反演得到 GPS 信号路径上近地点高度处的电离层电子浓度分布和大气折射率,进而反演出密度、气压、温度和湿度等大气参数。

无线电掩星技术最早是在 18 世纪天文学的研究中建立的。最初由斯坦福大学射电天文学中心发展用于研究行星大气。美国喷气推进实验室 JPL 的无线电掩星试验在 20 多年的美国宇航局(NASA)的太阳系探索计划中起到非常重要的作用。20 世纪 80 年代初,科学家开始应用掩星技术来研究地球大气。苏联科学家把太阳作为射电源,利用太阳被地球大气掩星期间,空间轨道卫星得到的太阳运动图像来反演大气垂直温度廓线。1988 年,Melbourne 等提出利用 GPS 掩星来探测地球大气。1991 年,JPL 的 Meehan 等(1991)利用一个置于山顶的高性能 GPS 接收机对 GPS 卫星进行掩星观测试验。1992 年,Hardy 等在理论上研究了用 LEO 星载 GPS 接收机与 GPS 卫星之间的掩星测量来反演大气参数的方法。1995 年,通过 Microlab-1 的发射,UCAR 科学家证明了利用临边探测技术使用低轨卫星上 GPS 接收机掩星观测探测地球大气的方法。目前,发射和尚未发射的 GPS 小卫星计划有很多,如中国的台湾省和美国的 COSMIC 计划,德国的 CHAMP 计划,阿根廷的 SAC-C、南非的 SUNSAT、丹麦的 ORSTED、澳大利亚的 FEDSAT、巴西 EQUARS 等小卫星。

图 1.2 是 GPS 掩星观测的几何示意图,图上的发射机为 GPS 卫星上的信号发射机,接收机为 LEO 卫星上的高精度 GPS 信号接收机,可以把它们视为雷达的发射端和接收端。 ϵ 为不均匀地球大气介质对 GPS 信号产生的折射效应,使电波信号弯曲的角度,简称弯曲角; a 为电波与介质发生相互作用的高度,称为碰撞高度,也称折合距离; v_2 和 v_1 分别为 GPS 卫星和 LEO 卫星的运动速度。

按图 1.2 的几何示意,GPS 信号的多普勒频移 f_a 可表示为:

$$f_a = f_0 c^{-1} (\mathbf{V}_1^i \cos \varphi_1 + \mathbf{V}_2^i \cos \varphi_2 + \mathbf{V}_1^t \sin \varphi_1 - \mathbf{V}_2^t \sin \varphi_2) \quad (1.4)$$

式中, f_0 是载波频率, c 为光速, $\mathbf{V}_i^t$ 和 $\mathbf{V}_i^i$ 分别为卫星 i 的法向和切向速度分量, φ 是信号瞬时方向对当地天顶的夹角, r_i 是卫星 i 与地心之间的距离。

弯曲角 ϵ 和碰撞高度 a 可分别表示为:

$$\epsilon = \varphi_1 + \varphi_2 + \theta_1 + \theta_2 - \pi \quad (1.5)$$

$$a = r_1 \sin \varphi_1 = r_2 \sin \varphi_2 \quad (1.6)$$

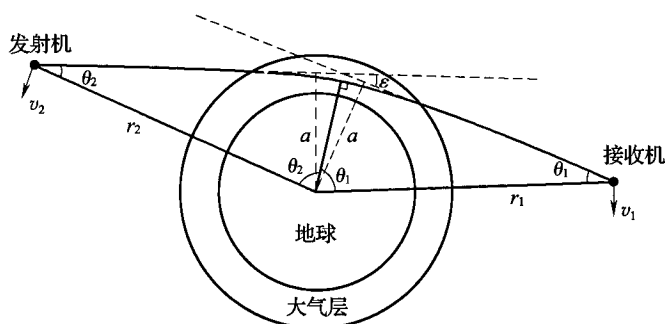


图 1.2 GPS 掩星观测的几何示意图

对于球面分层大气, 折射率 n 是 r 的函数, 即 $n(r)$ 。由广义 Snell 定律可知:

$$r n \sin \alpha = C \quad (1.7)$$

式中 r 为电磁波的位置矢量的绝对值, α 为电磁波传播路径与折射率梯度之间的夹角, C 为常数。

在极坐标下有:

$$d\epsilon = -\frac{1}{n} \left(\frac{dn}{dr} \right) r d\theta \quad (1.8)$$

令 $x = rn$, 则

$$d\epsilon = - \left(\frac{\partial \ln n}{\partial x} \right) a (x^2 - a^2)^{-\frac{1}{2}} dx \quad (1.9)$$

$$\epsilon(a) = \int d\epsilon = -2a \int_a^\infty \left(\frac{\partial \ln n}{\partial x} \right) (x^2 - a^2)^{-\frac{1}{2}} dx \quad (1.10)$$

经 Abel 变换后, 有

$$n(x) = \exp \left\{ \frac{1}{\pi} \int_x^\infty \epsilon(a) (a^2 - x^2)^{-\frac{1}{2}} da \right\} \quad (1.11)$$

引入折射指数 $N = (n-1) \times 10^6$, 代入上式, 得

$$N(x) = \frac{10^6}{\pi} \int_x^\infty \frac{\epsilon(a)}{\sqrt{a^2 - x^2}} da \quad (1.12)$$

对(1.12)式积分就可以得到不同高度的折射指数 $N(x)$ 。

另一方面, 根据大气对无线电波的作用, 大气对电磁波的折射主要取决于介电常数, 即介质的绝对介电常数和绝对磁导率。通过一系列推导, 可以得到大气折射指数 N :

$$N = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} + 40.3 \times 10^6 \frac{N_e}{f^2} + 1.4W \quad (1.13)$$

式中, p 为大气的干空气气压(单位: hPa), T 为大气温(单位为 K), e 是大气的水汽压(单位: hPa), N_e 为电离层的电子密度(单位: 电子数/ m^3), f 是载波频率(单位为 Hz), W 表示液态水滴。

在高度为 90 km 以上的大气中, 对电磁波产生折射作用的主要介质是电离层中的电子,

气体分子的作用可以略去。因此,在高度为 90 km 以上,

$$N \approx 40.3 \times 10^6 \frac{N_e}{f^2} \quad (1.14)$$

在 5~60 km 这一高度范围内,对无线电波产生折射的主要介质是干空气,(1.13)式可简化为:

$$N \approx 77.6 \frac{p}{T} \quad (1.15)$$

然后,根据大气状态方程和静力方程等,可得到以下反演大气参数的方程组:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \\ T = 77.6 \frac{p}{N} \\ \rho = 0.003\,484 \frac{p}{T} = 4.489\,7 \times 10^{-5} N \end{cases} \quad (1.16)$$

式中, p 、 ρ 、 T 分别为待求的大气的干空气气压、密度和温度。

0~5 km 高度范围内,大气中的水汽占有一定份额,这时折射指数的表达式为:

$$N \approx 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \quad (1.17)$$

式中, T 和 e 分别为大气的温度和水汽压。

因此,一般而言,利用无线电掩星技术无法得到 0~5 km 范围内大气温度的垂直分布。但是,如果能利用其他技术或方法得到 0~5 km 范围内的湿度垂直分布,利用掩星技术可以获取从地面到 60 km 范围内的大气温度垂直分布。

1.2 地基 GPS 遥感水汽的原理和方法

1.2.1 大气对 GPS 无线电波信号的影响

GPS 卫星发射的无线电波信号在穿过大气层时,要受到电离层电子和平流层、对流层大气的折射,由于速度的减弱和路径的弯曲,从而造成信号的延迟。其中电离层的影响部分称为电离层延迟;受到对流层和平流层非电离大气影响部分,由于折射的 80% 发生在对流层,所以通常叫做对流层延迟。

为了准确测定大气水汽总量,首先必须将中性大气引起的对流层延迟从其他定位误差中分离出来,然后把中性大气的延迟转换为大气中的水汽含量。

由对流层折射引起的过剩路径长度可表示为:

$$\Delta L = \int_L n(s) ds - R \quad (1.18)$$

式中, ΔL 是由于 GPS 信号受到大气折射率的影响所多走的距离, L 为传播路径, $n(s)$ 为折射率, R 为直线距离。

(1.18)式可写为:

$$\Delta L = \int_L (n(s) - 1) ds + (G - R) \quad (1.19)$$

式中, G 是沿传播路径 L 的长度, 等式右边第一项是由于 GPS 信号减速造成的类似于路径的延长, 第二项是由于 GPS 信号受到大气折射弯曲所造成的距离的延长, 由于路径弯曲在天顶距小于 80° 时, 其值很小, 在数据处理中常不考虑。

传播路径上的对流层延迟通常表示为天顶方向的对流层延迟 ΔD_z 与同高度角有关的映射函数 $M(E)$ 之积:

$$\Delta L = \Delta D_z M(E) \quad (1.20)$$

对流层延迟的 90% 是由大气中的干燥气体引起的, 称为干延迟, 其余的 10% 是由水汽引起的, 称为湿项延迟。干延迟可以由大气处于流体静力平衡状态的理想气体来模拟, 因此又称为静力延迟。对流层延迟用天顶方向的静力延迟和湿项延迟表示为:

$$\Delta L = \Delta D_{z, \text{dry}} M_{\text{dry}}(E) + \Delta D_{z, \text{wet}} M_{\text{wet}}(E) \quad (1.21)$$

式中, ΔL 为由对流层折射引起的过剩路径长度, $\Delta D_{z, \text{dry}}$ 和 $\Delta D_{z, \text{wet}}$ 分别为天顶方向对流层的干和湿延迟, $M_{\text{dry}}(E)$ 和 $M_{\text{wet}}(E)$ 分别为干和湿映射函数。

利用 GPS 处理软件可以估计天顶对流层延迟, 然后通过对这种延迟的监测来反演大气折射率, 进一步遥感大气参数。

1.2.2 GPS 处理软件中对天顶对流层延迟的估计

利用双差相位观测值进行精密定位定轨时, 卫星钟差、接收机钟差和选择可用性 (SA) 频率抖动 (现已取消) 均可以很好地消除。电离层延迟的影响可以根据它与频率的相关性, 用两个频率的观测值的线性组合消除。对流层延迟的静力延迟部分可以很好地模拟, 但湿项延迟由于时间和空间的变化, 必须作为一个被估计参数在模型中出现。在 GAMIT 软件中, 它是在先验模型改正的基础上, 采用进一步附加天顶方向的延迟改正参数的方法估计出来的。

首先, 利用对流层延迟模型, 根据测站的气象参数计算先验的天顶对流层延迟; 然后, 湿天顶延迟参数用一阶的高斯-马尔可夫随机过程模拟, 并在解算中估计出来。这一改正量加上原来先验的天顶对流层延迟, 就得到每个测站上空的天顶对流层延迟 (魏子卿等 1997)。

在地基 GPS 遥感水汽中, 关键是估计对流层延迟, 在估计对流层天顶延迟时, 可分为相对估计方法 (又称为举托法) 和绝对估计方法。对于间距小于 500 km 的 GPS 接收网点, 在用来组网估计对流层天顶延迟时, 用最小平方方法和卡门滤波技术对相对时延的敏感性都高于对绝对时延的敏感性, 因为两个或更多 GPS 接收机所见的同一颗 GPS 卫星的高度角几乎相同, 导致对时延的估计值高度相关。因此, 由小区域站网得到的湿延迟 (ZWD) 在每一个取样期存在一种未知的偏差。偏差的大小在整个网点上是常数 (即偏差随时间变化但没有空间变化), 估计此偏差大小的一个可能途径是, 在一个参考点上用地基水汽辐射计测量大气水汽总量, 然后用 GPS 数据估算网点中其他站相对于这一参考点的大气水汽总量, 这个过程称为“举托法”。

1996 年, Duan 等发展了对 GPS 水汽进行绝对估计的方法, 这种方法要求在估计小的网点的 GPS 水汽时, 可以利用间距大于 500 km, 位置精确已知的站点的 GPS 接收机的同步观测, 使整个观测网的尺度大于 500 km。Duan 分析了 GPS/STORM 试验场和加拿大、加利福尼亚、法属圭亚那的 GPS 资料, 发现相应的误差比使用“举托法”要小。

1.2.3 天顶对流层延迟到 GPS 大气水汽总量

天顶对流层延迟可写为:

$$\Delta D_z = \int_L (n(s) - 1) ds \quad (1.22)$$

定义折射指数为: $N = (n - 1) \times 10^6$

折射指数与大气温度、压力和湿度有如下关系:

$$N = 77.6 \left(\frac{p}{T} \right) + 22.0 \left(\frac{e}{T} \right) + 3.739 \times 10^5 \left(\frac{e}{T^2} \right) \quad (1.23)$$

$$\begin{aligned} \Delta D_z &= \int_L (n(s) - 1) ds = 10^{-6} \int_z 77.6 \frac{p}{T} dz + 10^{-6} \int_z \left(22.0 \frac{e}{T} + 3.739 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \right) dz \\ &= Z_h + Z_w \end{aligned} \quad (1.24)$$

式中, Z_h 为天顶静力延迟, Z_w 为湿项延迟, z 为高度, p 为大气压力。

静力延迟在卫星信号自上传输至 1 000 hPa 时大约有 230 cm。假设静力平衡, 地面气压观测的精度为 0.5 hPa, 这项延迟的估算精度优于 1 mm。Elgered 等(1993)在假设静力平衡, 理想气体的情况下给出公式:

$$Z_h = [(2.2779 \pm 0.0024)] \frac{p_0}{f(\lambda, H)} \quad (1.25)$$

式中, p_0 为地面气压(单位: hPa), $f(\lambda, H) = (1 - 0.00266 \cos(2\lambda) - 0.00028H)$, λ 为地理纬度, H 为海拔高度(单位: km)。

从天顶对流层延迟中减去天顶静力延迟 Z_h 而得到湿项延迟 Z_w , 其数值大约为 0~40 cm,

$$\begin{aligned} Z_w &= 10^{-6} \int_z \left(22.0 \frac{e}{T} + 3.739 \times 10^5 \frac{e}{T^2} \right) dz \\ &= 10^{-6} \cdot P_w \left[R_v \left[k'_2 + k_3 \frac{\int_z \frac{e}{T^2} dz}{\int_z \frac{e}{T} dz} \right] \right] \end{aligned} \quad (1.26)$$

$$Z_w = 10^{-6} \cdot P_w \left[R_v \left(k'_2 + \frac{k_3}{T_m} \right) \right] \quad (1.27)$$

$R_v = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 为水汽的比气体常数, P_w 为大气水汽总量。

$$T_m = \frac{\int (e/T) dz}{\int (e/T^2) dz} \quad (1.28)$$

T_m 称为加权平均温度。

可采用以下关系来将延迟数值转化为 P_w :

$$P_w = \Pi \cdot Z_w \quad (1.29)$$

$$\Pi = 10^6 \left[R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) \right]^{-1} \quad (1.30)$$

加权平均温度 T_m 可由数值天气预报模式提供或通过地面温度(T_s)的观测来估算:

$$T_m = a + b \cdot T_s \quad (1.31)$$

Bevis 等(1994)给出经验系数 $a = 70.2$, $b = 0.72$; 李建国等(1999)给出了北京地区的回归

系数, $a=44.05, b=0.81$ 。

1.2.4 地基 GPS 层析大气湿度廓线的方法

随着 GPS 探测大气技术的深入研究,新的产品和方法不断出现。GPS 探测的天顶方向上的水汽总量,不能直接提供水汽的廓线分层信息,这在一定程度上影响了它在数值预报和分析方面的应用。利用 GPS 可以观测到大气延迟的水平梯度信息,反映了大气折射率分布的三维结构(Bar-Sever 等 1998),GPS 气象学家开始尝试利用这些新的产品信息来研究大气延迟和水汽的三维结构,提出了一些计算大气斜路径延迟的方法(Ware 等 1997, Flores 等 2000),斜路径的延迟进而可以转换为斜路径的水汽(李成才等 1998),这样在地面密集布设 GPS 接收机,接收来自天空各个方向的卫星信号,就形成了对其上大气的断层扫描,通过一定的模型,可以重建大气参数的三维结构(层析),获取大气三维结构的折射率或水汽廓线信息。

1.2.4.1 GPS 确定斜路径延迟和水汽的方法

在高精度的 GPS 软件处理中,通常使用 GPS 观测量(伪距和载波相位)或观测量的组合(如用两站的观测量作差称为单差,如用两个卫星的单差作差则称为双差)组成观测方程。所以,确定斜路径湿延迟的方法可分为直接非差(观测量本身)估计斜路径延迟法和从双差残差到非差残差估计斜路径延迟法。

(1)直接非差估计斜路径延迟法。对于 GPS 非差载波相位的观测方程可写为:

$$\bar{\rho} = d + \delta_{\rho_{\text{ion}}} + \delta_{\rho_{\text{trop}}} + c \cdot \delta_{t_R} - c \cdot \delta_{t_S} - \lambda \cdot N_0 + \epsilon \quad (1.32)$$

式中, c 为光速, λ 为载波信号波长, $\bar{\rho}$ 为接收机载波相位观测量, d 为卫星至接收机的实际距离, $\delta_{\rho_{\text{ion}}}$ 为电离层延迟, $\delta_{\rho_{\text{trop}}}$ 为斜路径对流层延迟, δ_{t_R} 为接收机钟差, δ_{t_S} 为卫星钟差, N_0 为载波相位的整周模糊数, ϵ 为其他因素的误差,从而斜路径的延迟为:

$$SPD = \delta_{\rho_{\text{trop}}} = (d - \bar{\rho}) + \delta_{\rho_{\text{ion}}} - c \cdot \delta_{t_R} - c \cdot \delta_{t_S} - \lambda \cdot N_0 + \epsilon \quad (1.33)$$

为了得到精确的斜路径延迟,必须消除式中影响达厘米级的误差因素,首先要保证得到高精度的毫米级的站坐标估计,然后消除电离层延迟、接收机和卫星钟差以及其他因素(如海潮影响,相对论效应、卫星天线相位中心改正),并且正确确定整周模糊度。这种方法又称为精确单点定位技术(PPP, Precise Point Positioning)(Zumberge 等 1997),直接适用于如 GIPSY/OASIS 等使用非差观测量估计参数的软件。这种方法的关键是消除各种误差和正确确定整周模糊度,一般使用 L_1 相位观测量,而宋淑丽等(2004)则发展了 LC 组合观测量的算法。

当使用 L_1 观测量时,整周模糊度为整数,比较容易确定,在接收机和卫星钟差、海潮影响、相对论效应、卫星天线相位中心改正模型精确模拟后,确定精确的斜路径延迟需要好的电离层延迟模型。

当使用相位组合观测量 LC 时,组合波长变为:

$$\varphi_{LC} = \frac{f_1^2 \varphi_1 \lambda_1 - f_2^2 \varphi_2 \lambda_2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (1.34)$$

式中, f_1 和 f_2 为 GPS 两信号的频率, λ_1 和 λ_2 为两信号的波长, φ_1 和 φ_2 为两信号的相位观测量。方程中可以消去电离层延迟参数,但由于此时整周模糊度不再具有整数特性,所以模糊度的分离成为算法的关键。

计算出斜路径的总延迟后,斜路径的湿延迟可以由如下公式获得:

$$SWD = SPD - m(\theta)ZTD \quad (1.35)$$

式中, SWD 为斜路径湿延迟, SPD 为斜路径总延迟, ZTD 为天顶干延迟, $m(\theta)$ 为映射函数。

(2) 从双差残差到非差残差估计法。利用双差观测量来估计位置和大气延迟等参数时(如 GAMIT 和 BERNESSE 软件), 假设最后的残差是由大气折射率非各向同性造成的, 斜路径的延迟可从大气模型的拟合和最后的残差相加得到。由于残差是双差, 因此首先需要将双差残差转变为非差残差(Alber 等 2000)。

设在历元时刻 t 接收机 A, B 同步观测卫星 1 和卫星 2, 相位观测分别为 $\varphi_1^A, \varphi_1^B, \varphi_2^A, \varphi_2^B$, 则单差为:

$$S_1^{AB} = \varphi_1^A - \varphi_1^B \quad (1.36)$$

$$S_2^{AB} = \varphi_2^A - \varphi_2^B \quad (1.37)$$

再组成双差为:

$$dd^{AB} = S_1^{AB} - S_2^{AB} \quad (1.38)$$

矩阵形式可写成:

$$Ds = dd \quad (1.39)$$

由单差方程形成双差方程, 方程少 1, 因此假设 s 为 n 行, 则 dd 只有 $n-1$ 行, 所以从双差无法得到单差, 必须附加约束条件, 即:

$$\begin{bmatrix} w_1 & w_2 & w_3 & \cdots & w_n \\ 1 & -1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1^{ij} \\ s_2^{ij} \\ s_3^{ij} \\ \vdots \\ s_n^{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum w_k s_k^{ij} \\ dd_{12}^{ij} \\ dd_{13}^{ij} \\ \vdots \\ dd_{1n}^{ij} \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

w_k 为约束系数, 假设 $\sum w_k s_k^{ij} = 0$, 则解以上方程可得到单差, 从单差到非差的求解也是同样的过程。

假设估计的天顶延迟为 ZTD , $m(\theta)$ 为映射函数, 水平延迟梯度为 G_{NS} 和 G_{EW} , 非差残差为 σ , 则斜路径的天顶总延迟为:

$$SPD(\theta, \lambda) = m(\theta) \times [ZTD + \cot\theta(G_{NS} \cos\lambda + G_{EW} \sin\lambda)] + \sigma \quad (1.41)$$

斜路径的湿延迟为:

$$SWD(\theta, \lambda) = m(\theta) \times [ZWD + \cot\theta(G_{NS} \cos\lambda + G_{EW} \sin\lambda)] + \sigma \quad (1.42)$$

(3) 斜路径的水汽含量估算。采用同 GPS 大气水汽总量相同的计算方法, 由地面温度计算加权平均温度(Bevis 等 1994, 李建国等 1999)

$$T_m = a + b \cdot T_s \quad (1.43)$$

估计出换算系数:

$$\Pi = 10^6 \left[R_v \left(\frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right) \right]^{-1} \quad (1.44)$$

式中, $R_v = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, $k'_2 = k_2 - m \cdot k_1$, m 为水汽和干空气的分子量比。 k_1, k_2, k_3 源于大气折射指数 N 的表达式: $N = k_1 \cdot \left(\frac{p_d}{T} \right) + k_2 \cdot \left(\frac{p_w}{T} \right) + k_3 \cdot \left(\frac{p_w}{T^2} \right)$, p_d 和 p_w 分别为干空气和水汽的分压, T 为绝对温度。

斜路径的水汽含量为: