

GPS 地基遥感大气水汽总量分析*

李成才 毛节泰

(北京大学地球物理系, 暴雨监测与预报国家重点实验室, 北京 100871)

提 要

概述了利用地基 GPS 接收机遥感大气水汽总量的一般方案, 分析了各种因素导致的误差以及相应的消除或降低办法, 总结了由湿项延迟计算水汽总量的方法. 介绍了 GPS/STORM 试验和两种解算方案. 最后提出试验研究方案 and 在我国进行业务应用要解决的问题.

关键词: 全球定位系统 遥感 水汽

引 言

水汽在天气分析和预报、微气象学以及全球气候变化等各个领域中都扮演一个极为重要的角色. 各种探测水汽的水平 and 垂直分布的方法被逐渐提出 and 发展. 目前常规无线电探空每天 2 次的标准观测和台站密度以及探测的精度不能满足水汽时间空间多变性的要求. 水汽微波辐射计 (Water Vapor Radiometer-WVR) 的发展提供了依靠所测亮温反演扫描方向积分水汽总量 and 积分液水总量的手段. 星载微波辐射计测量地球提供的热背景下相应的吸收线, 由于地表温度的多变性而呈现复杂性, 应用于洋面的遥感比应用于陆地更为适用. 同时由于云的存在使这种应用受到限制. 地基微波辐射计不受低的中等覆盖云量的影响, 但云量较多时同样受到影响. 降水发生时雨滴的存在对于辐射的影响以及雨滴打湿仪器天线的影晌, 使得微波辐射计这时很难提供可用的数据. 极轨卫星所载辐射计提供很好的空间分辨率但比较差的时间分辨率, 而地基辐射计正好相反.

随着全球定位系统 (Global Positioning System-GPS) 这一技术的迅速发展, GPS 接收机逐渐被许多领域所应用. Bevis 等^[1] 提出了采用地基 GPS 技术探测大气水汽含量的原理. 结合掩星技术通过对大气折射率的遥感来反演大气的温湿特性也被论证可行 (Yuan 等^[2], Gorbunow 等^[3]). 从此开辟了 GPS 技术的新领域——GPS 气象 (GPS/MET). 由于 GPS 卫星信号传输经过大气层时, 要受到大气的折射而延迟, 将该延迟量作为待定参数引入到观测模型和解算方案中, 并逐项考虑误差的来源 and 消除的办法, 精密的大气延迟量 (毫米级) 可以与定位参数一同求解出来, 而大气延迟量可划分为电离层延迟、静力延迟 and 湿项延迟. 通过采用双频技术, 可以将电离层延迟订正到毫米级. 静力延迟与地面观测量 (气压) 具有很好的相关, 也可以订正到毫米量级. 这样就得到了毫米量级的湿

* 1997-05-04 收到, 1998-02-20 收到修改稿.

项延迟. 湿项延迟与水汽总量(PW)可建立严格的正比关系^[1], 精确的水汽总量就求解出来.

较丰富时空密度的 PW 具有重要的应用价值. 通过 GPS 遥感得到的 PW 可以补充常规探空资料时间和空间密度上的不足. 与微波辐射计相比又具有维护简单、不受降水和云的影响等优势. 硬件集成化程度高, 随着各个领域应用的发展, 精密接收机的价格也会不断下降.

1 GPS 观测的初步分析及 GPS 遥感大气水汽的基本原理

GPS 技术通过观测 GPS 卫星信号传输到 GPS 接收机的时间来测量卫星至接收机的距离^[4], 在接收站通过对几颗卫星的同时观测来实现定位. 由于地球大气的存在导致对信号传输产生折射影响. 当采用一定的观测方案和求解模型将这种影响消除后, 定位才达到一定精度. 同时, 这种影响作为未知量也可解算出来. GPS 气象正是基于此而发展起来.

1.1 观测方程和各项误差分析

GPS 信号穿过大气层因折射而“延迟”, 其中电离层延迟变化较大(在天顶方向约 1~15m). 由于 GPS 信号采用双频传送, 并且电离层延迟与信号频率的平方成反比, 电离层延迟误差可订正到毫米精度. 对流层大气延迟(中性延迟)可达 250cm 左右, 可分为静力延迟项和湿项延迟. 其中湿项延迟由水汽引起, 静力延迟由其他的大气组成成份引起. 静力延迟在自上传输至 1000hPa 时大约有 230cm. 假设静力平衡, 地面气压观测有 0.5hPa 的精度, 这项延迟可被估计到好于 1mm. 由于静力平衡引入的误差依赖于实际的风场和地势, 一般为正常情况的 0.01%, 对应 0.2mm 的天顶距. 极端情况也只能引起几毫米的误差^[5].

GPS 技术通过码相位观测和载波相位观测来测量信号传输时间. 一般认为, 码相位和载波相位的分辨误差约为信号波长的 1%. 由于 P 码和 C/A 码的码元宽分别为 29.3m 和 293m, 而载波 L_1 和 L_2 的波长仅为 19.05cm 和 24.45cm, 所以精密测量必须采用载波相位观测. 水汽对于光程的影响为厘米的量级, 利用 GPS 观测结果计算湿项延迟进行反演水汽的工作也必须采用载波相位观测的方式.

由于存在着源于卫星钟、卫星轨道、接收机钟和载波相位观测等方面的误差, 在观测方案和解算模型建立过程中它们必须予以考虑. 首先来分析比较简单的非差载波相位的观测方程:

$$\tilde{\rho} = \rho + \delta\rho_{ion} + \delta\rho_{trop} + c \cdot \delta t_R - c \cdot \delta t_s - \lambda \cdot N_0 \quad (1)$$

其中 c 为光速, λ 为载波信号波长, 以下说明各项意义及存在的误差:

(1) $\tilde{\rho}$: 接收机载波相位观测量(以长度为单位)

前面已经分析, 在载波相位观测时因相位“对齐”存在波长的 1% 即 2.0~2.5 mm 的误差. 另外目前 GPS 接收机采用高质量的晶体振荡器, 其频率的相对稳定度在短时间内(如 1s 内)可达 10^{-11} ~ 10^{-12} , 由此引起的频率漂移约为 0.0016~0.016 Hz. 而信号从 GPS 卫星传输至地面的时间在 0.066~0.090s 范围, 由此可见因频率漂移产生的误差是可以忽略的.

(2) ρ : 卫星至接收机的实际距离

该项中包含接收机三维位置未知量和由卫星轨道参数计算的卫星相对地心的位置. 卫星轨道参数可通过卫星星历获得. 卫星星历分为两类: 一是预报星历, 预报星历是一种外推星历; 二是实测星历, 也称精密星历. 卫星星历误差严重影响单点定位的精度, 在相对定位中也是一个重要的误差来源.

(3) $\delta\rho_{ion}$: 电离层延迟

电离层延迟的影响在精密测量时采用双频技术消除. 利用电离层延迟与频率的平方成反比的简单关系, 消除后的精度达毫米级. 在电子含量很大, 卫星的高度角又很小时, 残差达几个厘米. Fritz K. Brunner 等^[6]提出了一个电离层延迟改进模型, 考虑了折射率 n 中的高阶项影响以及地磁场的影响, 并考虑信号传播路径弯曲的效应, 精度优于 2mm. 可见 GPS 的气象遥感应应用应采用双频接收机, 可有效地消除电离层延迟.

(4) $\delta\rho_{trop}$: 对流层延迟(中性延迟)

对流层延迟作为遥感大气的未知量来求解, 其误差由其他几项的误差来确定. 求解以后划分为静力延迟和湿项延迟两项.

(5) δt_R : 接收机钟差

GPS 接收机一般应用高精度的石英钟, 稳定度约为 10^{-11} . 如果接收机钟和卫星钟的同步差相差 $1\mu s$, 由此引起的等效距离误差也将达 300m. 有效地消除接收机钟差的影响采用对不同的卫星的观测求差的方法, 能满足精密定位的要求.

(6) δt_s : 卫星钟差

尽管 GPS 卫星钟均安装了高精度的原子钟(铷钟和铯钟), 但它们与理想的 GPS 钟之间仍存在着难免的偏差和漂移. 这些偏差的总量在 1ms 以内. 通过导航电文提供的校正参数改正后, 各卫星间的同步差会小于 20ns. 如果采用相对定位, 在两个接收机对同一颗卫星求差, 将几乎完全消除卫星钟差的影响. 这种方法是目前使用 GPS 估算对流层参数必须采用相对定位的主要原因.

相对定位对于短基线来说对卫星轨道误差也有一定消除, 所带来的一个主要问题是站间相关误差的产生, 基线越短越为严重. 而对长基线, 要求卫星星历要有一定的精确度. 基线越长, 对星历精度要求越高.

(7) N_0 : 载波相位的整周未知数

采用载波相位观测产生的主要难题是载波相位的整周未知数的出现. 在锁定信号的整个观测过程中, 整周未知数应保持不变. 由于外界干扰和接收机所处的动态条件的恶劣, 偶尔可能使载波跟踪环路无法锁定载波信号引起信号的暂时失锁, 表现为 N_0 的突变即“整周跳变”. N_0 一般采用“三差法”来确定, 即不仅通过同一接收机对两颗卫星求差来消除接收机钟差和同一卫星对不同的接收机求差来消除卫星钟差, 还通过连续观测历元的求差来确定整周未知数 N_0 . 对于含大气延迟未知量的观测方程, 处理软件应该可以区分两者, 因为后者大致依照 $\sec(\theta)$ (θ 为卫星天顶角) 而变化. 这就要求不同观测历元的卫星仰角要有一定的变化, 而在这个变化期内(如 15~30 min), 假设大气特性保持定常, 在观测站局地上空水平均一或球面分层均一, 这决定了 GPS 遥感大气的时间精度.

1.2 卫星星历及其误差的解决办法

由全球定位系统的地面控制部分提供的经 GPS 卫星向用户播发的广播星历是一种预报星历. 由于对作用在卫星上的各种摄动因素了解得不够充分, 因而预报星历存在一定的误差. 在 GPS 完全投入使用以后, 由预报星历计算卫星位置的精度应该达 5~10m. 但由于美国国防部的 SA(选择可用性)政策, 广播星历的精度大大降低, 影响精密定位.

精密星历是一种实测星历, 是全球 GPS 卫星跟踪站根据实测资料进行后处理而得出的星历, 精度较高. 但一般要在观测后一段时间(1~2 周)才能得到, 对实时定位无意义. 由于精密星历在精密定位中的重要作用, 许多国家和组织纷纷建立自己的 GPS 卫星跟踪网. 我国在八五期间已经建立了自己的 GPS 卫星跟踪网, 有关部门可提供使相对定位达 10^{-7} 级精度的精密星历.

气象遥感应用是一种准实时的精密观测, 广播星历显然达不到要求. 解决的方案除了寄希望于能尽快获得 GPS 卫星跟踪网取得的精密星历外, 在广播星历的使用上可以探索新的方法: 由于广播星历的误差对于同一卫星来说, 在一段时间内有很强的相关性, 可以建立修正的模型. 一般利用所谓“轨道松弛法”, 引入轨道参数修正未知数, 在平差计算过程中同时解算出来. 这种方法要求测区有一定的规模. 计算处理也变得较为复杂.

1.3 利用中性延迟计算水汽总量

综合以上的讨论, 如果建立了利用双频接收机观测来消除电离层误差、基线测量双差分消除接收机钟差和卫星钟差的观测方案, 并考虑了星历问题的解决办法, 解决了“整周变跳”和整周未知数的求解问题, 就可以建立精确定位和大气层中性延迟的求解模型.

任意观测角度的中性延迟 $\delta\rho_{\text{neut}}$ 解出后, 可通过变换函数映射到中性天顶延迟 Z_n . 变换函数 $m(\theta)$ (θ 为卫星对接收机仰角) 描述了天顶与任一角度大约 $\csc(\theta)$ 的关系, 并包含了曲线因折射而弯曲以及地球的球形订正过程. 并且在 $\theta > 15^\circ$ 的情况下, 湿项和静力变换函数差异很小, 可以用同一个形式来描述.

变换函数结合精确的气压测量可以使静力项在 15° 的仰角以上观测时达毫米精度 (Bevis 等^[7]).

从中性天顶延迟中减去静力天顶延迟项 Z_h 而得到湿项天顶延迟 Z_w , 其数值大约为 0~40cm, 进而采用以下关系式来将伪距数值转化为水汽总量 (PW)^[7]:

$$PW = \Pi \cdot Z_w \quad (2)$$

PW 定义为气柱内所有水汽折算为液态水时的水柱高, 代表水汽的积分总量. 常数比例 Π 大约为 0.15, 即 1cm 的 PW 可引起大约 6.5cm 的信号延迟. 精确的形式和参数可通过地面气温的观测和历史资料的统计而建立:

$$\Pi = 10^6 [R_0 (\frac{k_3}{T_m} + k'_2)]^{-1} \quad (3)$$

$R_0 = 461.495 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 为水汽的气体常数.

$$k'_2 = k_2 - m \cdot k_1 \quad (4)$$

m 为水汽和干空气的分子量比. k_1, k_2 和 k_3 源于大气折射率 N 的表达式:

$$N = k_1 \cdot (\frac{P_d}{T}) + k_2 \cdot (\frac{P_v}{T}) + k_3 \cdot (\frac{P_v}{T^2}) \quad (5)$$

P_d 和 P_v 分别为干空气和水汽的分压. T 为绝对温度.

T_m 为一个加权平均温度,按如下公式定义:

$$T_m = \frac{\int (P_v/T) dz}{\int (P_v/T^2) dz} \quad (6)$$

P_v 为水汽的分压, T 为温度,积分沿着整个大气垂直路径. 参数 T_m 虽然随季节和地区变化,但可通过地面温度(T_s)的观测来估算^[1]:

$$T_m = a + b \cdot T_s \quad (7)$$

或由数值天气预报提供^[7],其精度比较高.

毛节泰、李建国^[8]利用 1992 年气象资料计算了我国东部地区台站按月回归的 a 和 b 系数,逐月及全年的结果 T_m 与 T_s 相关系数在 0.90 以上.

由以上的讨论可见, PW 估算的不确定性主要源于 Z_w 估算的不确定性. Z_w 到 PW 的转换(式(2))假设了湿项延迟完全由水汽引起,而认为液水和冰晶没有贡献,大量理论分析表明厚而密的云可引起约 7.5mm 的延迟,导致 PW 产生 1mm 的误差^[5]. 以雨滴的形式存在的液态水引起的延迟更小. 若气柱内存在大量的雨夹雪,可能是一个难题,但这种情况在观测中遇到的几率也较小^[9].

2 GPS 遥感大气水汽的试验 GPS/STORM 及其结果分析

1993 年 5~6 月, Rocken 和 Bevis 等^[10]在美国 Kansas 和 Oklahoma 州的一个风暴多发地区组织了一个称为 GPS/STORM 的观测试验,并同时获得 Colorado 州的 Platteville 永久 GPS 测站的数据作为相对定位参考点,共用了 6 套 GPS 接收系统布网观测,其中在 4 个站点使用微波辐射计(WVR)进行了同步观测. 相对 Platteville 站的基线长为 562~922 km.

Rocken 等^[10]利用 Bernese 软件和 CODE(Center for Orbit Determination, in Berne, Switzerland)提供的精密轨道数据处理了资料. 考虑到相对定位时,如果基线较短,基线两端测站对卫星仰角接近,由此利用求差法得到的结果高度相关,引起的系统误差在整个观测网随时间变化但随空间定常,他们采用称为“相对 PW 测算”的方法,即以某一参考点上可靠的 WVR 的观测值预先确定湿项延迟,其他点与其用求差法解算. 与单纯使用 GPS 来解算 PW 的“绝对 PW 测算”方法相比,相对测算的优点在于它对于基线的长度没有要求,尤其是可应用于短基线测量采用实时广播星历来解算的方案. 缺点当然是它必须要求在一个参考站有一台 WVR 或其他测积分水汽的设施. 绝对测算方法的优点是不要其他测水汽总量的设备,缺点是短基线测量时系统相关误差太大.

他们取得了以 GPS 估算水汽与微波辐射计对照精度达 1~2mm 的结果. 误差的主要来源是参考点 WVR 的误差. 提出了提高 WVR 反演算法和技术以及选择 WVR 是缩小这一误差的途径. 同时得到“绝对 PW 测算”的结果,比“相对 PW 测算”的结果差 15%.

而 Duan 等^[9]在此基础上,完善了“绝对 PW 测算”方法,他们也用这次试验获取的 GPS 数据资料,同时结合了 4 个位于南北美遥远地点的全球 GPS 跟踪站的同步 GPS 数据来引入长基线,使相对定位中两站对同一卫星的仰角存在较大的差异. 使用了 GAMIT

软件和 SOPAF(Scripps Orbit and Permanent Array Facility)提供的精密轨道星历。

他们的结论是:通过将远距离的 GPS 全球跟踪观测站引入局地 GPS 观测网来一同分析,解算出天顶中性延迟,省去了观测网内水汽微波辐射计观测的必要性。“纯 GPS”测水汽的方案是可行的。该方案用于处理 GPS/STORM 试验所取得的资料,得到其测量水汽总量与微波辐射计相比的均方差为 1.0~1.5mm。该方案隐含的要求是必须使用精密星历。

3 立足现有条件开展 GPS 遥感水汽的试验研究

结合现有的条件对利用 GPS 遥感大气水汽的研究,我们提出了新的方案。在研究过程中,应用了 MIT 的 GAMIT 处理软件,并得到测绘部门的合作支持。主要内容如下:

(1)利用双频接收机观测,以消除电离层影响。

(2)利用三差法建立观测计划和处理模型,以消除接收机钟差、卫星钟差和确定载波相位的整周未知数。

(3)选取长基线相对定位方式,初步确定基线大于 500km,以降低求差法对基线较短时所带来的系统相关误差。

(4)利用我国自己建立的永久跟踪站所提供的 GPS 卫星精密星历,计算卫星历史位置。将跟踪站数据结合处理以引入长基线。

(5)整个方案是一种“绝对 *PW* 测算”方案,即不通过微波辐射计等设备在参考点的测量作为预先值。

(6)以相应的探空数据与 GPS 解算结果作对照分析。

4 地基 GPS 遥感水汽的业务应用问题

关于地基 GPS 遥感水汽的准实时业务应用,主要考虑以下问题:

(1)星历问题

第一种方案是寄希望于我国的永久跟踪站能对气象部门提供尽可能提前的 GPS 卫星精密星历,气象应用利用它来推算精度比广播星历高的预报星历。这可能要受到技术和其他因素的影响。

第二种方案也是目前适用的方案,采用短基线(大约 50km)相对定位方式以应用广播星历。同时采用“相对 *PW* 测算”方法即引入微波辐射计的观测作为参考点的预先值,以校准短基线相对定位带来的系统性相关误差。这要求所用的微波辐射计必须具有一定的精度并经过严格的校准,同时采用较先进的微波辐射反演方法。

第三种方案也是应用广播星历,利用如“轨道松弛法”,引入轨道误差未知参量,与站坐标、大气湿延迟等未知数一同解算。这需要建立应用良好的数学解算软件模型。

(2)数据通讯网和处理中心建设

由于必须采用相对定位和组网观测,因此实时接收的数据依靠状态良好的数据通讯网可汇集到处理中心集中分析,这可依赖气象部门现有和正在建设的数据通讯设施。

5 结束语

精密 GPS 接收机正逐渐被越来越多的部门所采用,许多领域对精密定位提出越来越高的要求.在这种情况下,研究大气折射的影响同时为气象应用提供有价值的大气参数具有重要意义.

将各类用户的设备资源集中组网,在遍布我国广阔领土领海范围进行 GPS 同步观测,实现集中处理和资源共享,对所有部门都可以提高定位精度、简化观测方案和降低观测成本.为气象研究和业务应用提供丰富的水汽观测资料,将促进天气预报、气候变化等方面研究和业务工作的进展.

参考文献

- 1 Bevis M, Businger S, Herring T A, Rocken C, Anthes R A and Ware R H. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 15787~15801.
- 2 Yuan L, Anthes R A, Ware R H, Rocken C, Bonner W D, Bevis M and Businger S. Sensing climate change using the global positioning system. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D8): 14925~14937.
- 3 Gorbunov M E and Sokolovskiy S V. Remote sensing of refractivity from space for global observations of atmospheric parameters. Max-Planck-Institute fur Meteorologie Report, 1993, No. 119, 937~1060.
- 4 毛节泰. GPS 的气象应用. *气象科技*, 1993, (4): 45~49.
- 5 Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry. *Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry*. 1993, 215~258.
- 6 Fritz K B and Min Gu. An improved model for the dual frequency ionospheric correction of GPS observation. *Manuscripta Geodaetica*, 1991, (16): 205~214.
- 7 Bevis M S, Businger S R, Chiswell T A, et al. GPS meteorology. Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, 1994, **33**: 379~386.
- 8 毛节泰, 李建国. 使用 GPS 系统遥感中国东部地区水汽分布(1)—原理和回归分析. 见: 中国气象局国家卫星气象中心编. 全球定位系统-气象学(GPS/MET)研究论文汇编, 1997, 12~20.
- 9 Duan J and Coauthors. GPS meteorology: Direct estimation of the absolute value of precipitable water. *J. Appl. Meteor.*, 1996, **35**: 830~838.
- 10 Rocken C, VanHove T, Johnson J, et al. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 1995, **12**: 468~478.

ANALYSIS FOR REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC PRECIPITABLE WATER USING GROUND-BASED GPS RECEIVER

Li Chengcai Mao Jietai

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

The general scheme of remote sensing of atmospheric precipitable water (*PW*) using ground-based GPS receiver is reviewed. The errors caused by different factors and the corresponding ways to avoid or reduce the errors are elaborated, and then the stepping of estimating water vapor from zenith wet delay is summarized. The GPS/STORM experiment and two methods to resolve *PW* are recommended. Finally, a set of solution to experiment and research is provided, and the problems on operational application in China are discussed.

Key words: Global Positioning System(GPS) Remote sensing Water vapor