5 Siesser W G. Paleoproductivity of the Indian Ocean during the Tertiary period. Global & Planetary Change, 1995, 7(1-2): 71~ 88
6 Guo Y J. Primary productivity and Phytoplankton in China Seas. In: Zhou D, et al. eds. Oceanology of China Seas, 1994, 1: 227~ 242
7 黄良民. 南沙群岛海区的光合色素和初级生产力的分布特征初探. 见: 中国科学院南沙综合科学考察队编, 南沙群岛及其邻近海区海洋生物研究论文集(2). 北京: 海洋出版社, 1991. 34~ 49
8 Huang L, Chen Q, Yuan W. Characteristics of chlorophyll distribution and estimation of primary productivity in Daya Bay. Asian Marine Biology, 1989. 6: 115~ 128
9 陈木宏, 谭智源. 南海中、北部沉积物中的放射虫. 北京: 科学出版社, 1996. 1~ 271 (附 54 个图版)
10 Chen M, Tan Z. Radiolarian distribution in surface sediments of the northern and central South China Sea. Marine Micropaleontology, 1997, 32: 173~ 194
11 陈木宏, 涂 霞, 蔡慧梅, 等. 南海放射虫的古温度转换函数研究. 见: 北京大学地质学系编, 北京大学国际地质科学学术研讨会论文集. 北京: 地震出版社, 1998. 1 053~ 1 066

(1998-04-05 收稿, 1998-09-17 收修改稿)

全球定位系统遥感水汽总量

李成才 毛节泰 李建国 夏 青④
(北京大学国家暴雨监测与预报重点实验室, 北京 100871; ④国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要 介绍了全球定位系统(GPS)地基遥感水汽的基本原理和方法. 利用 1997 年夏季共 3 周的东亚地区 GPS 跟踪站数据和 IGS 星历, 应用 GAMIT 软件进行了解算. 结合相应的地面气象资料反演了上海和武汉 GPS 遥感水汽总量 30 min 间隔的变化曲线, 与探空资料进行对照均方根偏差为 0.50 cm 左右.

关键词 **全球定位系统 遥感 水汽**

水汽监测在天气预报和气候研究领域越来越占有重要的地位. 全球定位系统(Global positioning system, GPS)技术的发展为遥感水汽提供了新的手段. Bevis 等人[1]提出了采用地基 GPS 技术探测大气水汽含量的原理. Yuan 等人[2]、Gorbunow 等人[3]论证了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的可行性. Rocken 等人[4]在美国 Kansas 和 Oklahoma 组织了 GPS/STORM 观测试验, 并提出在参考站引入水汽微波辐射计(Water vapor radiometer, WVR)以消除差分法所带来的系统误差的"相对 GPS 方案", 应用 Bernese 软件和 IGS 轨道处理了数据. Duan 等人[5]利用 MIT 的 GAMIT/GLOBK 软件, 也处理了这批数据, 提出引入距离观测网遥远的 GPS 跟踪站的数据以降低系统误差的"绝对 GPS 方案"(无需 WVR 定标)可以得到良好的结果. GPS 遥感水汽总量具有不受降水的影响、时间分辨率高、设备维护简单、不需校准等优势. 研究在我国利用东亚地区跟踪站和一般观测站的观测数据来反演水汽的试验方案和反演技术, 可为将来的气象业务应用提供重要参考依据.

1 基本原理和处理方法

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接收机天线的位置,

卫星信号经过大气层时, 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, 逐项考虑误差来源和消除办法, 精密的大气延迟量(毫米级) 可以与定位参数一同求解出来. 大气延迟量可划分为电离层延迟、静力延迟和湿项延迟. 通过采用双频技术, 可以将电离层延迟几乎完全消除. 静力延迟与地面观测量(气压) 具有很好的相关, 可以订正到毫米量级. 这样就得到了毫米量级的湿项延迟. 湿项延迟与水汽总量(PW) 可建立严格的正比关系, 精确的水汽总量就求解出来. 应用 MIT 的 GAMIT 软件进行解算. 软件要求试验采用双频载波相位观测, 应用差分法以消除源于卫星钟和接收机钟的误差, 同时可采用"轨道松弛法", 以对轨道的准确度进行修正和调整.

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 N_0 的出现. 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. 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), 假设大气特性或变化率保持定常, 在观测站局地上空水平均一或球面分层均一, 大气延迟未知量大致依照 $\sec\theta$(θ 为卫星天顶角) 的映射函数而变化. 这决定了 GPS 遥感大气的时间分辨率. GAMIT 软件中可首先设定对流层大气延迟参数的个数.

1.1 静力延迟项的计算

对流层大气延迟(中性延迟) 可分为静力延迟项和湿项延迟. 静力延迟在自上传输至 1 000 hPa 时大约有 230 cm. 假设静力平衡, 地面气压观测有 0.5 hPa 的精度, 这项延迟可被估计到好于 1 mm(见公式(1)). 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 0.2 mm 的天顶距. 极端情况也只能引起几毫米的误差(Elgered[6]). 采用 Elgered 等人[7]的天顶流体静力学延迟公式

$$Z_h = [(2.277\,9 \pm 0.002\,4)\,\mathrm{mm}\cdot\mathrm{hPa}^{-1}]\,\frac{P_0}{f(\lambda, H)}, \qquad (1)$$

其中 P_0 为地面气压, $f(\lambda, H) = (1 - 0.002\,66\cos(2\lambda) - 0.000\,28H)$, λ为地理纬度, H 为测站海拔高度. 由于气象观测站和 GPS 观测站有一定距离和海拔高度差, 将气象站的气压按实际探空观测的压高变率订正为 GPS 站的气压.

1.2 水汽总量的计算

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~ 40 cm, 进而采用关系式来将伪距数值转化[8]

$$\mathrm{PW} = \Pi\cdot Z_w, \qquad (2)$$

水汽总量(Precipitable water, 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. 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

$$\Pi = 10^6 \left| R_v \left| \frac{k_3}{T_m} + k'_2 \right| \right|^{-1}, \quad R_v = 461.495\,\mathrm{J/(kg\cdot K)},$$

$k'_2 = k_2 - m\cdot k_1$, k_1, k_2 和 k_3 为大气的折射指数; m 为水汽和干空气的分子量比. 取 k_3=

3.739×10^5 $K^2\cdot hPa^{-1}$, $k'_2=22$ $K\cdot hPa^{-1}$. T_m 为加权平均温度, 通过地面温度(T_s)的观测来估算: $T_m=a+b\cdot T_s$, 取 $a=70.2$, $b=0.72$[1].

2　结果及讨论

选定我国上海(SHAO)、武汉(WUHN)、西安(XIAN)和台湾(TAIW)、日本的 TSKB 和 USUD, 韩国的 TAEJ, 印度的 IISC 及俄罗斯的 IRKT 共 9 个全球跟踪站, 从 1997 年 7 月 31 日到 1997 年 8 月 21 日 3 周的 GPS 观测数据, 下载了 IGS 相应的轨道数据. 同时得到上海(58362)和武汉(57494)的地面气象资料(6 h)和探空气象资料(12 h).

在 GAMIT 软件运行前设定每日对流层大气延迟参数 49 个(间隔 30 min). 在 GPS 站点进行气压观测非常重要(利用气象站的资料是不得已而为之). 在计算静力延迟和湿项延迟时, 对应用的地面气压和温度资料进行线性内差. 由于地面气压 6 h 变化较小, 而且 T_m 对湿延迟的计算不敏感, 这样内差是满足要求的. 按实际探空观测的压高变率由气象站的气压值订正出 GPS 站的气压, 对于海拔高度大大高于气象站的 GPS 站非常必要. 如对武汉站, 由于 GPS 站点海拔为 93.4 m, 气象站为 27.0 m, 订正值为 7.0 hPa 左右, 显著地减小了由静力延迟不准确带来的系统误差. 另外, 在上海和武汉, 气象站的海拔都低于 GPS 站, 在计算气象站的水汽总量时, 为了与 GPS 站对比, 首先按海拔高度差减去了低层部分水汽量.

图 1 和图 2 分别为上海和武汉的 GPS 反演结果(实线)及其与探空数据(圆点)的对照. 由两站的反演结果可见, 利用 GPS 遥感大气水汽可以取得较好的结果. 虽然在上海、武汉两地气象站与 GPS 站相距分别为 58.8 和 35.4 km, 海拔高度分别相差 13.8 和66.4 m, 这种情况下, GPS 遥感水汽与探空水汽总量的均方根偏差仅分别为 0.54 和 0.50 cm. 对水汽变化的总体描述二者是相吻合的. 在图 1 中 8 月 8~ 9 日(192~ 240 h)探空水汽在 24 h 内急剧变化 3.25~ 3.79 cm, GPS 遥感也反映出了基本符合的情况. 偏差的存在由许多因素决定, 其中探空资料的精度限制是主要的因素, 使用的是地面, (1 000 hPa), 925, …100 hPa 标准层数据计算水汽积分总量, 水汽又主要存在于低层大气. 两者探测的方式和反映的时间空间情况不同, 探空资料反映的是气球随风飘曳路径的情况, GPS 反演的水汽代表 30 min 内 15°仰角以上到

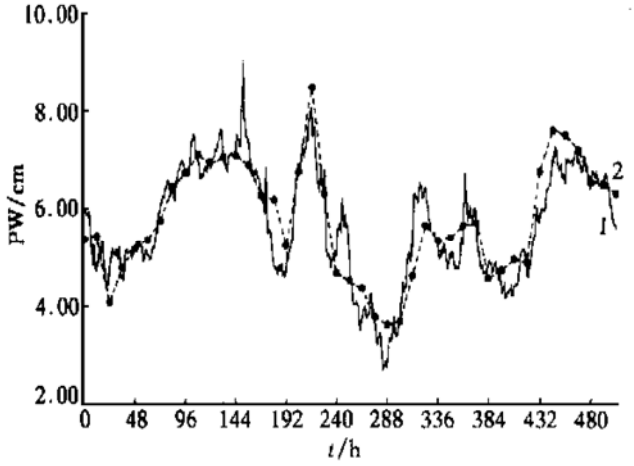

图 1　上海站 GPS 遥感与探空对照(1997 年 7 月 31 日世界时 0 时至 8 月 21 日世界时 0 时)
1——GPS 遥感, 2——探空

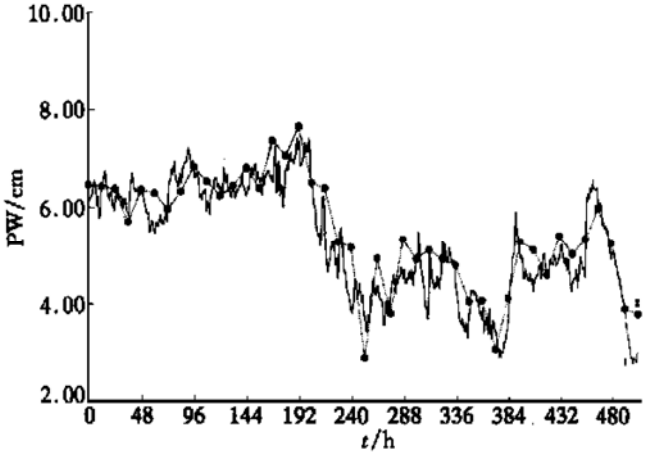

图 2　武汉站 GPS 遥感与探空对照(1997 年 7 月 31 日世界时 0 时至 8 月 21 日世界时 0 时)
1——GPS 遥感, 2——探空

天顶多方向的平均水汽总量. GPS 站与气象站存在水平距离、大气状态水平不均一. 在由中性大气延迟计算水汽总量时, 在 GPS 站使用的由气象站订正的气压与实际情况存在误差. T_m 的计算如果使用该地历史资料统计的 a 和 b 值, 结果将更为准确.

在 GPS 站如果具有气压、气温观测, 具有状态良好定标可靠的微波辐射计观测, 可进一步对照研究 GPS 遥感水汽的精度问题. 同时也计算了大气延迟 2 h 间隔参数的情况, 运算结果与 30 min 相比较, 除了具有平滑效果外, 整体上是一致的. 较高时间分辨率(30 min)的水汽监测结果, 对于中小尺度雷暴天气的研究具有重要价值.

关于实时应用 GPS 遥感大气水汽可以进一步研究如何应用广播星历以及组网通讯等方面的问题, 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. 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, 将各类用户的设备资源集中组网, 在广阔范围进行 GPS 同步观测, 实现集中处理和资源共享, 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.

致谢 本项研究得到 MIT 授权使用 GAMIT 软件, MIT 地球、大气和行星科学系 W. K. Robert 博士给予了热情帮助. 中国地震局监测一中心二队、国家基础地理信息中心、清华大学建筑系测量教研室给予了部分支持, 作者表示感谢.

参 考 文 献

1 Bevis M, Businger S, Herring T A, et al. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. J Geophys Res, 1992, 97: 15 787~ 15 801

2 Yuan L, Anthes R A, Ware R H, et al. Sensing climate change using the global positioning system. J Geophys Res, 1993, 98(D8): 14 925~ 14 937

3 Gorbunov M E, Sokolovskiy S V. Remote sensing of refractivity from space for global observations of atmospheric parameters. Max-Planck-Institute fur Meteorologie Report, 1993, 119: 937~ 1 060

4 Rocken C, VanHove T, Johnson J, et al. GPS/STORM-GPS Sencing of atmospheric water vapor for meteorology. J Atmos Oceanic Technol, 1995, 12: 468~ 478

5 Duan J, Bevis M. GPS meteorology: direct estimation of the absolute value of precipitable water. J Appl Meteor, 1996, 35: 830~ 838

6 Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry. Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry, 1993, 215~ 258

7 Elgered G, Divis J L, Herring T A, et al. Geodesy by radio interferometry: water vapor radiometry for estimation of the Wet Delay. J G R, 1991, 96: 6 541~ 6 555

8 Bevis M, Businger S, Chiswell T, et al. GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water. J Appl Meteor, 1994: 33, 379~ 386

9 毛节泰. GPS 的气象应用. 气象科技, 1993, 4: 45~ 49

10 李成才, 毛节泰. GPS 地基遥感大气水汽总量分析. 应用气象学报, 1998, 4: 470~ 477

11 Dept. of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences of MIT and Scripps Institution of Oceanography Univ. of California at San Diego. Document for the GAMIT GPS Analysis Software, Rlease 9.6, Sept, 1997

(1998-03-16 收稿, 1998-07-01 收修改稿)