

GPS 气象学及其应用研究

徐伟声^{1,2}, 李江凤^{*}

(1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074; 2. 湖北民族学院资源与环境科学系, 湖北恩施 445000)

摘要 GPS 系统在气象中的应用, 为探测大气有关气象要素提供了一个新的技术方法。对 GPS 气象学概念作简单介绍之后, 着重地阐述了 GPS 气象学的基本原理和 GPS 气象学的广阔应用领域。

关键词 GPS 气象学; 大气折射; 信号延迟

中图分类号 S16 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2009)13-06098-03

GPS Meteorology and Its Application Research

XU Wei-sheng et al (Faculty of Resources Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074)

Abstract The application of GPS system in meteorology provided a new technical method for detecting the atmosphere meteorological factors. The concept of GPS meteorology was briefly introduced. The basic principles and wide application fields of GPS meteorology were emphatically elaborated.

Key words GPS meteorology; Atmosphere refraction; Signal delay

GPS 即全球定位系统, 是美国从 20 世纪 70 年代开始研制, 耗资 200 亿美元, 于 1994 年全面建成, 具有在海、陆、空进行全方位实时三维导航与定位能力的新一代卫星导航与定位系统。该系统在气象上的应用研究起源于美国, 1992 年 Bevis 等讨论了 GPS 气象学的思想, 提出了用地面 GPS 测量水汽含量的一种方法^[1], 这一技术迅速得到广泛关注, 逐渐形成一门新的交叉学科——GPS 气象学, 此时主要是针对地基 GPS 气象学而言。1995 年的 GPS/MET 试验, 验证了利用 GPS 无线电掩星探测大气的可行性, 增加了 GPS 气象学的内涵, 即空基 GPS 气象学。近几年, GPS 气象学的理论与应用研究得到了很大发展。这一领域的著名学者包括美国喷气推进实验室的 Kursinski 及哈佛大学 Palmer 等。GPS 气象学虽从产生至今仅 10 年时间, 但在气象科学研究以及业务应用方面已显示出广阔的应用前景和巨大的潜力。GPS 气象探测已成为支持 21 世纪 WMO 计划的一种新的全球综合高空观测系统。

1 GPS 气象学概念

GPS 技术经过 20 多年的发展, 其应用研究及应用领域得到了极大地扩展, 其中一个重要的应用领域就是气象学研究。利用 GPS 理论和技术来遥感地球大气, 进行气象学的理论和方法研究, 如测定大气温度及水汽含量, 监测气候变化等, 称为 GPS 气象学 (GPS/MET Meteorology, 简称为 GPS/MET)。GPS 气象学研究于 20 世纪 80 年代后期最先在美国起步, 在取得理想的试验结果之后, 其他国家如日本等也逐步开始 GPS 在气象学中的应用研究^[2]。

根据 GPS/MET 观测站的空间分布来分类 GPS/MET 可以分为 2 大类^[3]: 地基 GPS 气象学 (Ground-based GPS/MET)。地基 GPS 气象学就是将 GPS 接收机安放在地面上, 与常规的 GPS 测量一样, 通过地面布设 GPS 接收机网络, 来估计一个地区的气象元素。空基 GPS 气象学 (Space-based GPS/MET)。空基 GPS 气象学就是利用安装在低轨卫星 (Low Earth Orbit, 简称为 LEO) 上的 GPS 接收机来接收 GPS 信号。当 GPS 信号与 LEO 卫星上 GPS 接收机经过地球上空对流层时, GPS 信号会发生折射。这一测量大气折射的方法叫做掩星

法, 该方法是 20 世纪 60 年代美国喷气推进实验室和 Stanford 大学为研究行星大气和电离层而发展起来的。通过对含有折射信息的数据进行处理, 可以计算出大气折射量而估计出研究所需要的气象元素的大小。地基 GPS 气象学和空基 GPS 气象学相互补充, 互相促进, 统称为 GPS 气象学。

但无论是地基 GPS/MET 还是空基 GPS/MET, 其目标都是一样, 即计算出大气折射量。其不同之处在于空基 GPS/MET 涉及的数据处理更麻烦一些, 因为安装在低轨卫星上的 GPS 接收机跟 GPS 卫星一样, 也是运动的, 而且在接收机接收到的所有卫星的信号中, 并不像地面上的接收机那样, 所接收到的卫星信号中必定包含有大气折射信息。

2 GPS 气象学原理

2.1 GPS 观测水汽和气温^[4] 气温、气压和水汽含量等物理量是描述大气状态最重要的参数, 无线电探测、卫星红外探测和微波探测等手段是获取气温、气压和湿度的传统手段。作为常规高空大气探测手段, 无线电探测方法的观测值精度较好, 垂直分辨率高, 但地区覆盖非常不均匀, 在地域广大的海洋上几乎没有观测数据。被动式的卫星遥感技术虽可以获得较好的全球覆盖率和较高的水平分辨率, 但垂直分辨率和时间分辨率却很低。利用 GPS 手段来遥感大气的最大优点是: 全球覆盖、费用低廉、精度高、垂直分辨率高 (1 km)。利用 GPS 技术, 许多研究证实^[1-3]: 对于干空气, 在从 5~7 km 到 35~40 km 的高度上, 所获得的大气温度可以精确到 ± 1.0 之内; 可反演出精度高达 1 mm 的可降水量; 可获得 6 km 以下误差为 10%~20%、而边界层 PBL 内只有 5% 误差的水汽廓线剖面; GPS/MET 资料在垂直方向的高密度可完整解析出目前全球大气模式无法揭示的中尺度现象。正是这些优点使得 GPS/MET 技术成为高层大气探测最有效、最具发展前途的方法之一。

当 GPS 发出的信号穿过大气层中的对流层时, 会受到对流层大气的折射影响, 信号要发生弯曲和延迟, 其中信号的弯曲量很小, 而信号的延迟量却很大, 通常在 2.3 m 左右。在 GPS 精密定位测量中, 大气折射的影响被当作主要误差源而要设法消除掉, 这种情况下了解大气特征是为了订正大气对精密定位的影响, 这就是 GPS 定位中将大气影响作为数据误差源“噪声”需要去除的所谓正问题。因此, GPS 气象学在大地测量学和气象学中是一对正逆问题, 也可理解为从测量

基金项目 国家自然科学基金 (40274005)。

作者简介 徐伟声 (1972 -), 男, 湖北巴东人, 在读博士, 讲师, 从事“3S”技术应用研究。* 通讯作者, 博士生导师, 教授。

收稿日期 2009-03-02

学噪声转变为气象学信号的一门学科,即作为大地测量学“去噪”问题的逆问题,需要求得量正是大气折射量。因此把大地测量学需要滤掉的“噪声”转换视角看作气象学中有意义、需要捕捉的大气“信号”,就促成了一门新兴学科——GPS 气象学的诞生,同时也极大地拓展了 GPS 的应用领域。目前, GPS 气象学已成为大地测量学的前沿性研究之一。

根据接收到的 GPS 观测数据,通过 GPS 解算软件的分析可得到天顶总延迟 (Zenith Total Delay, 简称 ZTD 值)。

由于电波在大气中的延迟 L 与大气折射量有如下关系:

$$L = \int [n(s) - 1] ds = 10^{-6} N ds \quad (1)$$

其中, $n(s) = C/C_0$ 称为折射指数, C_0 是真实波速, C 是真空中光速。 N 称为折射率, 并且 $N = [n(s) - 1] \times 10^6$ 。 GPS 信号在大气中的总延迟是对流层大气(也称中性大气)延迟和电离层大气延迟之和,而后者通过 GPS 双频技术几乎可以完全消除,因此由 GPS 软件解算的对流层天顶总延迟可求得大气折射率。而大气折射率又与气温、气压、和水汽压力有关或可构成这些量的函数。例如,0.5%精度的对流层大气的折射率计算公式为:

$$N = 77.6(P/T) + 3.73 \times 10^5 (P_v/T^2) \quad (2)$$

其中, P 为大气压(hPa), P_v 为水汽分压(hPa), T 为大气温度(K)。这样就可以通过一定的处理方法最终求得研究所需要的大气物理量,如水汽总量也称可降水量(Precipitable Water-Vapor, 简称 PWV 或用 GPS2PWV 表示)以及水汽、气温垂直分布的廓线。

2.2 GPS 测风 GPS 探空测风系统由 GPS 无线电探空仪、地面 GPS 接收机、GPS 卫星观测网以及计算机数据处理系统 4 部分组成,其测风原理为:在高空探测过程中,无线电探空仪和地面站均装有 GPS 天线,可接收由 24 颗 GPS 卫星组成的全球高精度定位导航系统中最少 4 颗卫星发出的信号。地面站接收到 GPS 信号后会选出所需数据,再加入有关卫星轨道的数据,便可计算出无线电探空仪的位置,从而计算出高空风向、风速以及气压、气温和湿度。与传统无线电探空仪相比, GPS 测风系统的准确度极高,可探测到探空仪所在大气中更为准确的气象数据,并且不易受闪电及雷暴等恶劣天气影响,因此正成为下一代高空气象探测系统中新的重要的成员。

3 地空基 GPS 探测应用研究

3.1 地基 GPS 探测的应用^[5] 通过在地面上架设 GPS 接收机建设 GPS 参考站接收 GPS 卫星发射的无线电信号,来获取该站上空大气可降水量(气柱水汽总含量)和电子密度总量(TEC)等参数,称为地基 GPS 气象探测。把这一技术应用到气象、气候等学科的研究称为地基 GPS 气象学。

GPS 卫星 L 波段的电磁波穿过大气层到达接收机时,要受到大气层的折射而延迟,总延迟量可以通过对多颗 GPS 卫星的连续观测和解算模型获得,该延迟包含了电离层的折射延迟、电离层延迟及对流层、平流层中性大气的折射延迟(对流层延迟)。电离层延迟可以通过 GPS 信号的 L1 和 L2 波段的组合测量进行确定。对流层延迟是大气折射率的函数,大气折射率是大气温度、气压和湿度的函数。通过一定的关

系,可确定对流层延迟和大气可降水量的函数关系,反演得到台站上空的大气可降水量。

目前地基 GPS 测量水汽总含量的技术已成熟,研究的热点集中在以下 3 个领域:倾斜路径上的延迟估计、动态映射函数和水汽层析技术,海上移动平台的水汽估计技术,地基 GPS 观测量在数值模式中的同化应用。

3.1.1 倾斜路径上的延迟和层析技术。 Ware 等建议通过获取 GPS 网的倾斜路径观测来获取大气的廓线信息,与微波水汽辐射计的观测对比发现, GPS 测量和水汽辐射计的测量均方根误差 $(1.5/\sin \alpha + 0.5)$ mm 通过提供观测网适当的外部大气廓线信息(如 Ram Lidar 观测),给倾斜路径的延迟附加约束,就可以获得整个网点上一定分辨率的水汽廓线信息^[6]。2001 年,日本气象厅在国际上进行了水汽层析的首次试验。

3.1.2 海上平台水汽测量技术。 尽管 GPS 可以得到精确的水汽信息,但大多数参考站建设在陆地上,在海洋上如何通过海上平台的 GPS 观测获取水汽资料, Chadwell 进行了这方面的尝试。圣迭戈大学海洋研究所研究和开发了用于海上平台计算大气可降水量的软件。因此,对于海上航行的装有 GPS 的船舶,也可以成为气象资料的采集平台。

3.1.3 地基 GPS 资料的应用。 以往的 GPS 观测试验表明, GPS 测量的大气可降水量与局地降水存在密切的关系,每次降水过程都和大气可降水量的迅速增加联系在一起。用大气可降水量作为指标预报降水,准确率可达 60%。科学家进行了很多把 GPS 资料应用到数值预报中的研究,主要是用三维或四维变分同化方法,把大气可降水量或大气延迟量等非模式变量加入到数值模式中。

3.2 空基 GPS 探测和应用 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 1 min 左右的观测,称为一个掩星观测。在一个掩星观测事件中,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,可从最小观测到的 1 mm (3×10^{-12} km) 增加到接近 1 km (3×10^{-6} s)。利用 GPS 信号进行掩星观测技术基于一个简单的事实:地球大气像一块球形棱镜,使穿过它的微波信号折射弯曲并且减慢传播速度,弯曲效应和大气折射率有关。通过测量星载 GPS 接收机的 Doppler 频移,加上接收机的位置和速度信息,就可反演得到 GPS 信号路径近地点高度处的电离层电子浓度分布和大气折射率。根据折射率与大气密度、温度和水汽的关系从而反演 GPS 信号传播路径上的大气密度、温度或水汽信息。1995 年, GPS/MET 计划第一次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,已实施和发射的 GPS 小卫星有:德国 CHAMP, 阿根廷 SAC C, 南非 SUNSAT, 丹麦 ORSTED, 澳大利亚 FEDSAT 卫星;在实施阶段尚未发射的 GPS 小卫星星座计划有:欧盟和欧空局全球大气气候探测计划(Atmosphere and Climate Explorer Plus ACE+), 台湾和美国气象气候电离层星座观测计划(Constellation Observing System for Meteorology Ionosphere and Climate: COSMIC), 以及巴西 EQUARS 卫星等,其中 ACE+ 和 COSMIC 是多颗卫星的星座观测计划^[7]。

3.3 地空基 GPS 探测的应用领域 GPS 气象探测的应用领域非常广泛,有以下几方面。

(1) 对流层低层的水汽探测(积分可降水分和水汽垂直分布),用于强对流天气和降雨的短期预报、水汽的全球气候学、水汽循环研究。

(2) 在数值模式中直接同化应用偏转角或折射率资料,用于业务数值天气预报、气候研究的再分析(Reanalysis)。

(3) 对流层高层的高分辨率的温度廓线,用于对流层顶研究,平流层/对流层交换、平流层臭氧、高层锋面研究,火山效应、气候变率和气候变化的研究。

(4) 高层等压面的位势高度计算,用于气候研究。

(5) 通过地转梯度风关系估计高纬度地区风,用于航空工业。

(6) 其他遥感系统的相互比较、检定、初值,用于微波探测单元、地球静止业务环境卫星(GOES)、泰罗斯业务垂直探测器(TOVS)、EOS。

(7) 电离层电子密度剖面:电离层研究气候(Space Weather)、空间天气、通信工业。

(8) 代替雷达定位探空仪器,测量高空风。

4 GPS/MET 的应用前景

GPS/MET 探测数据具有覆盖范围广(全球),高垂直分辨率,高精度和高长期稳定的特点。对它的研究将给天气预报、气候和全球变化监测等领域产生深刻的影响^[8]。

4.1 天气预报 数值天气预报(NWP)模式必须用三维温、压、湿和风数据作为初值。目前,提供这些初始化数据的探测网络的时空密度极大地限制了预报模式的精度。无线电探空资料一般只在大陆地区存在,而在重要的海洋区域,资料极为缺乏。即使在大陆地区,探测一般也只是每隔12 h 进行1次。虽然目前气象卫星资料可以反演得到温度轮廓线,但这些轮廓线有限的垂直分辨率使得它们对预报模式的影响相当小。而GPS/MET 观测系统可以进行全天候的全球探测,加上观测值的高精度和高垂直分辨率,使得NWP 精度的

提高成为可能。这样,可以提高数值天气预报的准确性和可靠性。

4.2 气候和全球变化监测 全球平均温度和水汽是全球气候变化的2个重要指标。与当前的传统探测方法相比,GPS/MET 探测系统能够长期稳定地提供相对高精度和高垂直分辨率的温度轮廓线,尤其是在对流层顶和平流层下部区域。更重要的是,从GPS/MET 数据计算得到的大气折射率是大气温度、湿度和气压的函数,因此可以直接把大气折射率作为“全球变化指示器”。

4.3 其他应用 GPS/MET 观测数据有可能以足够的时空分辨率来提供全球电离层映像,这将有助于电离层/热层系统中许多重要的动力过程及其与地气过程关系的研究。例如,重力波使中层大气与电离层之间进行能量和动量交换,通过测量LEO 卫星和GPS 卫星之间信号路径上总的电子含量(TEC)来追踪重力波可能是一种方法。

GPS/MET 提供的温度轮廓线还可以用于其他的卫星应用系统中。例如03 的遥感系统中需要提供精确的温度轮廓线,利用GPS/MET 数据可以很好地满足这一要求。

参考文献

- [1] BEIMS M, BUSINGERS, HERRING T A, et al. GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system[J]. *J Geophys Research*, 1992, 97: 15787 - 1580.
- [2] 徐晓华, 李征航. GPS 气象学研究的最新进展[J]. *黑龙江工程学院学报*, 2002(1): 14 - 18.
- [3] 刘志赵, 刘经南, 李征航. GPS 技术在气象学中的应用[J]. *测绘通报*, 2000(2): 7 - 8.
- [4] 李国平, 黄丁发. GPS 气象学研究及应用的进展与前景[J]. *气象科学*, 2005(6): 651 - 660.
- [5] 雷国文, 李丽, 李卫红, 等. GPS 在气象中的应用[J]. *山西气象*, 2005(3): 57 - 59.
- [6] WARE R, EXNER M, FENG D, et al. GPS sounding of the atmosphere from low earth orbit: preliminary results[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 77: 19 - 40.
- [7] 曹云昌, 方宗义, 夏青. 地空基GPS 探测应用研究进展[J]. *南京气象学院学报*, 2004(4): 565 - 570.
- [8] 宋淑丽, 朱文耀, 廖新浩. 地基GPS 气象学研究的主要问题及最新进展[J]. *地球科学进展*, 2004(2): 250 - 258.

社, 2003.

- [2] 郑平. 环境微生物学[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2002.
- [3] 蔡卫权. 微生物絮凝剂的研究和进展[J]. *邵阳师范高等专科学校学报*, 2000, 20(3): 54 - 58.
- [4] 马放, 刘俊良, 李淑更, 等. 复合型微生物絮凝剂的开发[J]. *中国给排水*, 2002, 19(4): 1 - 4.
- [5] 李和平. 微生物絮凝剂[J]. *重庆环境科学*, 2000, 22(2): 18 - 21.
- [6] 严三强, 邓正栋. 微生物絮凝剂及其在污水处理中的应用[J]. *四川环境*, 2002(2): 31 - 34.
- [7] 湛含辉, 湛雪辉, 张晓琪, 等. 水处理中微生物絮凝剂的研究进展及方法[J]. *株洲工学院学报*, 2002, 16(4): 103 - 104.
- [8] 叶晶菁, 谭天伟. 微生物絮凝剂产生菌分离选育及提取鉴定[J]. *北京化工大学学报*, 2001(1): 10 - 13, 17.
- [9] 蒋巍, 钟方丽, 史晋宜, 等. 生物膜胞外聚合物的研究进展[J]. *吉林化工学院学报*, 2001(3): 85 - 88.
- [10] 曹亚莉, 田沈, 赵军, 等. 固定化微生物细胞技术在废水处理中的应用[J]. *微生物学通报*, 2003(3): 77 - 81.
- [11] 周本军, 林波. 微生物絮凝剂——新型无毒水处理剂[J]. *江西化工*, 2003(2): 5 - 8.
- [12] 王建龙. 核酸杂交技术用于废水处理的微生物学研究[J]. *中国给排水*, 2003(5): 23 - 27.

(上接第6086 页)

生物细胞技术。该技术用于氨氮废水处理,最早是Nilsson 用海藻酸钙固定假单胞反硝化菌,采用填充柱对硝酸盐浓度为20 ng/L 的地下水进行两个月的连续脱氮实验。脱氮效果良好,容积负荷为3.6 kg/(m³·d),反硝化速度为66 ng/(h·K 凝胶)^[12]。因此,将固定化微生物细胞技术应用于废水脱氮能大大提高处理率。

4 小结

贵阳市污水处理率低,应大量采用现今最重要的处理手段——废水生物处理法,并应用近年来国内外新兴的污水处理技术,针对不同类型的工业废水和城市生活污水进行更有效的处理,从总体上提高污水处理率。同时,鉴于微生物絮凝剂的优点,还应多研究其特性,开发成本低、除污率高的絮凝剂。相信通过政府宏观管理和新技术的应用,贵阳市污水处理能力将有很大提高,该市水质会有好转。

参考文献

- [1] 吴婉娥, 葛红光, 张克峰. 废水生物处理技术[S]. 北京: 化学工业出版社