

探测大气参数的 GPS/MET 方法

刘志权 方宗义 徐建平 夏青

(国家卫星气象中心)

摘要 文章介绍了美国在近年发展起来的一种新的遥测地球大气的方法——GPS/MET,它是 GPS 导航定位技术与无线电掩星技术相结合的产物。文中比较详细地描述了 GPS/MET 反演折射率和大气参数的方法和步骤。从国外得到的初步反演结果可看出,在 5—40km 之间,反演出的温度廓线与探空资料吻合得很好;而在 5km 以下和 40km 以上,反演的结果误差较大。GPS/MET 探测系统的进一步发展,可能会对天气预报和全球变化研究等领域产生深刻的影响。

关键词 GPS/MET 掩星 反演 大气参数

1 引言

全球定位系统(Global Positioning System——GPS)是美国政府主要为满足军事部门对海、陆、空设施进行高精度导航和定位的要求而建立的。该系统从本世纪 70 年代初开始设计、研制,历经 20 多年,目前 24 颗 GPS 卫星星座已全部建成。全球定位系统的迅速发展,引起了各国军事部门和广大民用部门的普遍关注。目前, GPS 精密定位技术已经广泛地渗透到经济建设和科学技术的许多领域,而且新的应用领域还在不断开拓。

八十年代后期开始,国外兴起了一种新的探测地球大气的方法,即通过测量穿过大气层的 GPS 信号的延迟(由减速和弯曲引起)来获得大气中温、压、湿等信息。这种方法被称为“GPS 气象学”。GPS 气象学分为两大类:

地面 GPS 气象学。在标准大地测量的分析中,要估算从 GPS 卫星向地面的 GPS 接收机传送的信号在大气层中累计的延迟。这种延迟对沿信号路径的总水汽量非常敏感。连续工作的地基 GPS 接收机网络,可用于估算每一测站上空的水汽量,其时间分辨率优

于 30 分钟。Businger 等^[1]最近的文章指出,用地基 GPS 接收机来估计可降水量,在某些情况下比用水汽辐射计测量更精确。

空间 GPS 气象学。如图 1^[2]所示,在 GPS 信号穿过大气层到达低轨道星载 GPS 接收机的过程中,信号会发生折射。利用星载 GPS 接收机测到的 Doppler 频移与低轨道卫星的位置和速度信息,可反演得到信号路径近地点高度处的大气折射率,并进而导出密度、压力和温度等大气参数。它最根本的物理依据是无线电波在大气中的折射与大气的气压、温度和湿度有关。

这里讨论空间 GPS 气象学。

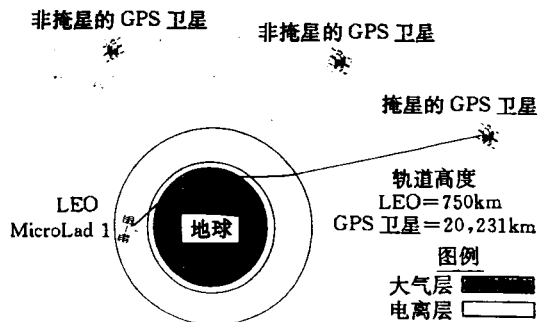


图 1 GPS/MET 探测地球大气原理图

2 掩星(Occultation)方法的历史和现状

空间 GPS 气象学的产生和发展是建立在无线电掩星技术的基础上的。这种技术是十八世纪在天文学的研究中建立的。在本世纪六十年代,美国喷气推进实验室(JPL)和 Stanford 大学发展了掩星技术,用来研究行星大气和电离层^[3, 4]。在国家航空和航天局(NASA)已进行了 30 多年的太阳系探测计划中,掩星实验一直起着重要的作用。图 2 给出了研究行星大气的掩星实验示意图。实验包括一个太空船发射机和地球接收机。两者之间通过厘米波长的无线电信号进行联系。选择好太空船轨道,当太空船到地球的信号传播路径通过所研究的行星大气时,接收到的信号的振幅和频率(或相位)会产生明显的变化。这些变化被用来研究行星大气的热动力结构。

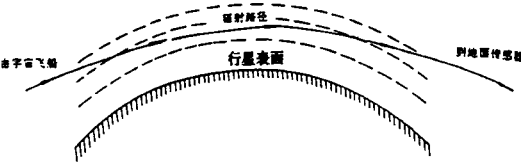


图 2 行星大气掩星探测的示意图

八十年代初,科学家们开始应用掩星技术来研究地球大气。前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,空间轨道卫星所得到的太阳运动图象来反演大气垂直温度廓线。图 3^[5]是一次太阳掩星观测的示意图和反演得到的温度廓线。1988 年, Melbourne 等^[6]提出利用 GPS 掩星来探测地球大气。1991 年, JPL 的 Meehan 等^[7]利用一个置于山顶的高性能 GPS 接收机对 GPS 卫星进行了掩星观测实验。1992 年, Hardy 等^[8]在理论上研究了用 LEO(低轨道地球卫星)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。

这些实验和理论研究以及 GPS 卫星星座的建成,为利用 GPS 掩星技术来遥感地球

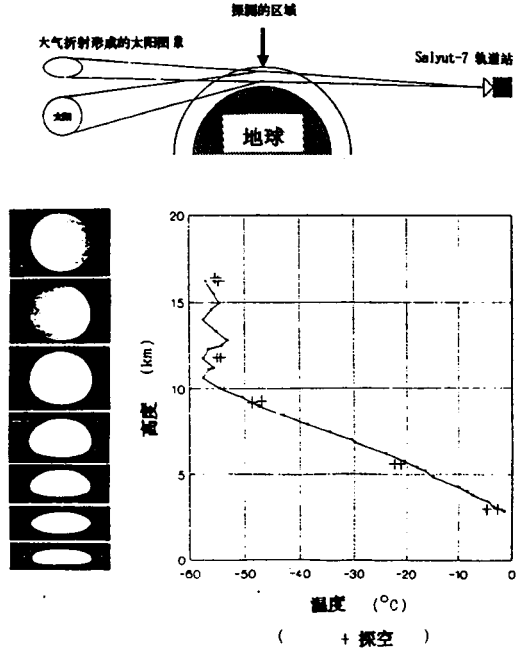


图 3 从空间轨道站观察太阳运动图象及反演得到的大气垂直温度廓线

大气提供了坚实的理论依据和技术基础。1992 年底, SCURA (Stanford University Center for Radar Astronomy) 和 UCAR (The University Corporation for Atmospheric Research) 先后向 NSF (The National Science Foundation) 提交了建立 GPS-LEO 试验系统来研究地球大气的项目申请报告。其中 UCAR 的 GPS/MET 计划已在实施当中,并于 1995 年 4 月 3 日成功地发射了一颗 LEO (Microlab-1), 已获得数据的初步分析结果是极其令人鼓舞的。

3 GPS 导航定位原理概述^[9, 10]

全球定位系统(GPS)主要有三个组成部分,即空间星座部分、地面监控部分和用户设备部分(见图 4)。GPS 卫星星座由均匀分布在 6 个轨道平面内的 24 颗卫星组成(图 5)。每个轨道面分布有 4 颗卫星,轨道面倾角为 55°,各轨道面升交点赤经相差 60°,轨道平均高度约 20200 公里,卫星运行周期为 11 小时 58 分。每颗卫星每天约有 5 小时在地

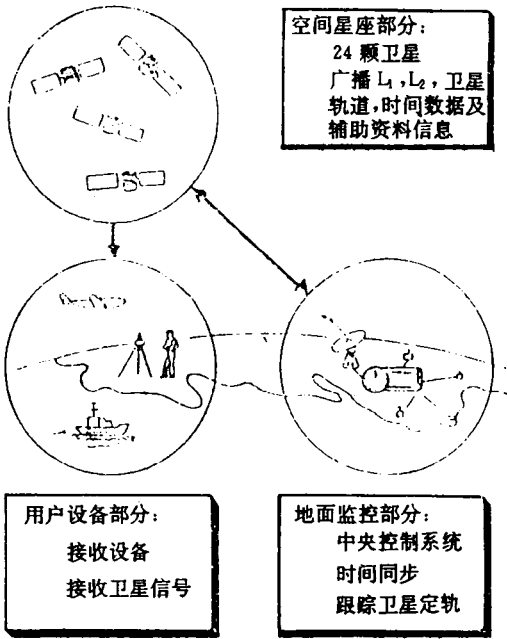


图 4 全球定位系统(GPS)构成示意图

每颗卫星装有 4 台高精度原子钟来提供时间标准,并发射两种不同频率的 L 波段载波信号,信号的构成如下表所示:

载波	测距码	数据码
L_1 (1575.42MHz)	C/A 码(粗码) 1.023MHz	P 码(精码) 10.23MHz D 码(导航电文) 50BPS
L_2 (1227.60MHz)		P 码(精码) 10.23MHz D 码(导航电文) 50BPS

由此可见, GPS 信号是用测距码和数据码调制载波 L_1 、 L_2 而成。测距码(C/A 码和 P 码)是一种伪随机噪声码(Pseudo Random Noise-PRN),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 进行导航和定位的数据基础, GPS 卫星的三维位置和速度及卫星钟差校正信息可从中计算得到。

从所利用的 GPS 信号成分的不同,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。测相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载波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的分析。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钟和接收机钟非同步误差的影响。为了与站星之间真实的几何距离有所区别,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相对于卫星发射频率存在一个 Doppler 频移:

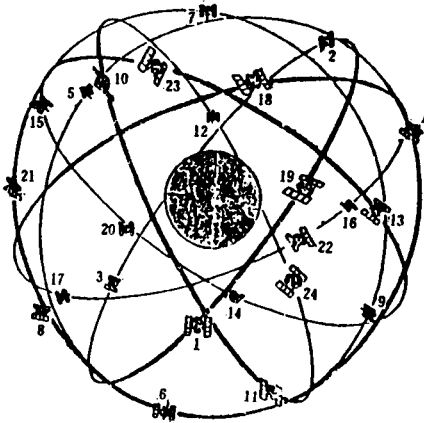


图 5 GPS 卫星星座

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、导航电文和其它控制指令等注入到相应卫星的存储系统。海、陆、空的静止或运动的利用所携带的 GPS 接收机接收空间 GPS 卫星发射的信号,以获得必要的导航和定位信息及观测量,并经数据处理而确定自身的三维位置和速度。

$$f_d = f_s - f_r = f_s \cdot u/c \quad (1)$$

式中 f_s 、 f_r 分别为发射频率和接收频率， c 为光速， u 为卫星与接收机的相对运动线速度，当两者远离时 u 为正。频移 f_d 是已知的观测值，故可利用式(1)计算接收机速度。

对于单点绝对定位和测速，只要同步观测 4 颗 GPS 卫星就可得到 4 个伪距和 4 个 Doppler 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)。

4 GPS/MET 原理

4.1 掩星事件的描述

如图 6^[11]所示，在 GPS 信号传送到 LEO 星载接收机时，其路径穿过大气层的那一分钟左右的观测，称为一个掩星事件。在这一个掩星事件中，从 GPS 信号开始横切大约 85 公里高的中层顶到横切地球表面，其信号延迟，从最小可测到的 1mm(3×10^{-12} 秒)增加到接近 1km(3×10^{-6} 秒)。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，还会收到其它没有被大气掩星的 GPS 信号(图 7^[11])，这将有利于 LEO 位置和速度的精密确定。

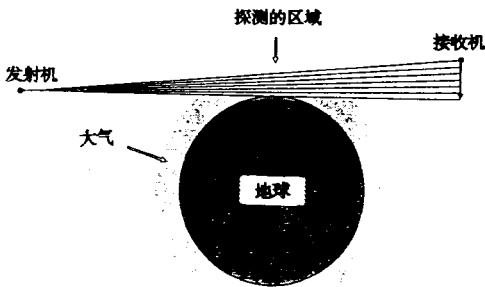


图 6 一个完整掩星事件示意图

4.2 低轨道卫星位置和速度的确定

GPS/MET 掩星观测首先需要高精度地获得 LEO 的三维位置和速度。前面已经叙述了 GPS 定位和测速的基本原理。根据经验，GPS 伪距观测精度约为所用信号波长的 1%。对于采用 C/A 码、P 码、载波 L_1 或 L_2

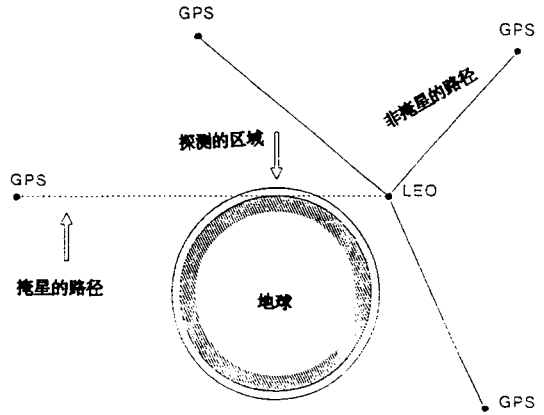


图 7 掩星与非掩星的测量

的观测，精度分别为 2.93m、0.29m、2.0mm 和 2.5mm。可见，载波相位观测是最精确的观测方法。而且这种方法还有一个优点就是不必一定知道测距码信号的结构，这样当美国军方采用 A/S (Anti-Spoofing, 反电子诱骗) 技术把 P 码加密成 Y 码时，仍能进行精密的定位测量。另外，如果采用双差技术，可以有效地消除 GPS 卫星钟和接收机钟误差的影响，进一步提高观测精度。图 8^[12]说明了双差方法。在对 LEO 进行导航定位时，选择一位置已精确知道的基准地基 GPS 接收机与星载接收机进行同步测量，并对两颗 GPS 卫星进行解算。单差 $\Delta_1 = \Phi_{A1} - \Phi_{A2}$ ， $\Delta_2 = \Phi_{B1} - \Phi_{B2}$ 有效地消除了卫星钟差。双差 $\Delta\Delta = \Delta_1 - \Delta_2$ 消除了接收机钟差的影响。

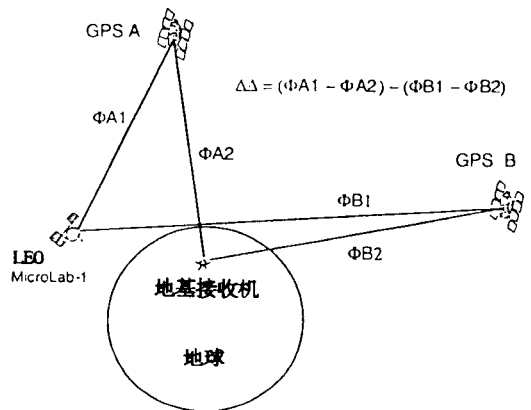


图 8 双差载波相位测量示意图

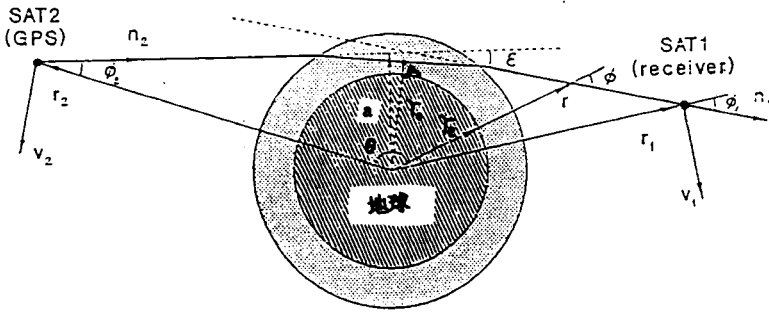


图 9 无线电波在大气中的折射

LEO 上携带的是双频 GPS 接收机, 可以同时载波 L_1 、 L_2 进行观测, 以便很好地消除电离层的影响。

4.3 反演方法

图 9^[11] 是一个掩星事件中某个瞬时的几何关系示意图。GPS 卫星发射的信号在大气中传播时会向折射率大的方向弯曲, 在近地点 A 处折射率达到最大。我们要求的就是在一个掩星事件中不同近地点高度处的折射率和大气参数。在图中, 信号的总折射角 ϵ 被明显地夸大了。仿真结果表明^[11], 当信号路径横切地球表面时, 最大的 ϵ 值约为 0.02 弧度 (1.15 度)。

4.3.1 总折射角廓线的计算

为了使问题简化, 做局地球对称大气假定, 即大气折射率 n 只是 r 的函数。应用 Snell 定律, 信号折射路径轨迹方程^[12]为

$$r \cdot n \cdot \sin\Phi = a \quad (2)$$

Φ 是信号瞬时方向与当地天顶的夹角, a 是一沿光线不变量。GPS 卫星和 LEO 可以认为是在真空中运行, 真空中折射率为 1。在信号发射点和接收点应用轨迹方程 (2) 式有

$$a = r_1 \sin\Phi_1 = r_2 \sin\Phi_2 \quad (3)$$

再对掩星的 GPS 卫星应用多普勒频移公式有

$$f_d = f_0 \cdot c^{-1} (V_1' \cos\Phi_1 + V_2' \cos\Phi_2 + V_1' \sin\Phi_1 - V_2' \sin\Phi_2) \quad (4)$$

其中 f_0 是载波发射频率, c 为光速。 V_1' 、 V_2' 分别是卫星 i 的法向、切向速度分量, 可从非掩星的多普勒频移测值计算得到, (3) 式中的

r_1 、 r_2 也是已知的定位信息, 则组合 (3)、(4) 式可解得 Φ_1 、 Φ_2 和 a 。另外, 显然还有几何关系

$$\epsilon = \Phi_1 + \Phi_2 + \theta - \pi \quad (5)$$

θ 可由余弦定理很容易求得, 则 ϵ 可相应解出。对整个掩星事件中的一系列信号折射轨迹求解, 就可获得总折射角廓线 $\epsilon(a)$ 。

4.3.2 折射率廓线的反演

定义 $x = r \cdot n$, 信号的瞬时微分折射角

$$d\epsilon = - \left(\frac{d \ln n}{dx} \right) \cdot a \cdot (x^2 - a^2)^{-1/2} dx \quad (6)$$

对信号全路径进行积分, 得到总折射角的积分表达式

$$\epsilon(a) = - 2a \int_a^\infty \left(\frac{d \ln n}{dx} \right) \cdot (x^2 - a^2)^{-1/2} dx \quad (7)$$

利用 Abel 变换, (7) 式可变为

$$\ln[n(x)] = \frac{1}{\pi} \int_x^\infty \epsilon(a) (a^2 - x^2)^{-1/2} da \quad (8)$$

上式积分中的 $\epsilon(a)$ 在前面已计算得到, 则对不同的 x 值进行数值积分运算可解得廓线 $n(x)$, 并进一步求出折射率廓线 $n(r)$ 。

4.3.3 从折射率廓线导出大气参数廓线

无线电波在大气中传播不存在色散的问题, 也即不同波长的无线电波在对流层和平流层大气中传播的折射率是相同的, 其折射率仅与实时的气压、温度和湿度有关。大气中的折射率与 1 很接近, 为方便起见, 定义折射数 $N = (n - 1) \times 10^6$ 。在上部对流层和平流层, 水汽含量很少, 可近似作为干空气对待。

在干空气中 N 的表达式为

$$N = 77.60 \times P/T \quad (9)$$

式中气压 P 以 hPa 为单位, 温度 T 以 K 为单位。干空气状态方程为

$$\rho = 0.3484 \times P/T \quad (10)$$

$\rho(\text{kg/m}^3)$ 是干空气密度。从(9)、(10)式可很容易地从 $N(r)$ 导出 $\rho(r)$ 。接着通过解流体静力方程

$$\delta P/\delta h = -g\rho \quad (11)$$

可从 $\rho(r)$ 导出 $P(r)$ 。式中 h 是高度, g 是重力加速度。最后把解得的 $\rho(r)$ 、 $P(r)$ 再代回到(9)或(10)式得到 $T(r)$ 。

在对流层中下部, 水汽的影响很大, 此时 N 的一般表达式为

$$N = 77.60 \times P/T + 3.730 \times 10^5 \times e/T^2 \quad (12)$$

(干分量) (湿分量)

式中 $e(\text{hPa})$ 为水汽压。在目前只有一颗 LEO 的情况下, 只从 N 并不能分离出干湿分量, 也即不能同时反演出温度和水汽廓线。LEO 星座的逐步建立可能会解决这一问题。另一种方法是通过其他途径得到其中的一个量, 然后再代入(12)式导出另一个量。例如, 可从无线电探空或模式计算得到温度廓线, 再用掩星资料反演水汽廓线。

综上所述, 对于球对称分布的干空气大气模型, 反演步骤可归纳如下:

(1) 用双差载波相位观测方法确定 LEO 的位置和速度。

(2) 由掩星的多普勒频移测值和 GPS 卫星与 LEO 的位置、速度信息计算总折射角廓线。

(3) 对折射角廓线数值积分得到折射率廓线。

(4) 由折射率廓线反演得到密度、压力和温度廓线。

对于折射率为三维分布的真实大气, 信号的折射轨迹方程没有解析解, 在某些情况下可采用光线追迹算法来求得数值解。

4.4 GPS/MET 探测系统的特点

4.4.1 空间覆盖范围和分辨率

对于目前只有单个 LEO 的 GPS/MET 试验系统, 每天可产生大约 500 个廓线数据(包括上升掩星和下降掩星)。合理地选择 LEO 轨道, 可使这些廓线大体均匀地分布于全球。廓线的垂直范围可从大约 60km 高一直到陆地或海洋的表面。一个由 20 颗 LEO 星座构成的业务运行系统, 每天将产生 10000 个廓线数据, 可对地球大气进行全天候的监测^[14]。

掩星数据的垂直分辨率可从接近地面的几百米变化到 60km 高附近的 1km^[14]。这要比在天底作卫星辐射计观测的垂直分辨率高得多。另一方面, 在一个掩星事件中, 不同高度近地点的水平位置是变化的, 因此掩星探测提供的是几百公里水平范围内的一个平均测值。这可能会限制它在小尺度问题上的应用, 但可能会提高它在大尺度天气和气候应用上的价值。

4.4.2 精度

GPS/MET 采用的是具有高信噪比(SNR)的载波相位测量方法, 所测到的相位延迟动态范围的量级约为 10^6 , 因此会产生很高精度的数据。相比之下, 所有的被动式辐射计都采用具有低 SNR 的信号振幅测量方法, 这直接导致测值的低动态范围和较低的精度。

4.4.3 稳定性

GPS/MET 最吸引人的特性之一就是 GPS 卫星和 LEO 上的仪器设备所固有的稳定性。卫星在轨运行之后并不需要对仪器进行定标。这与需要进行在轨定标的气象卫星等被动式系统相比, 具有很大的优越性。

4.5 初步的反演结果^[2]

GPS/MET 的 Microlab-1 研究卫星在约 750km 高的近圆形轨道上运行, 轨道倾角为 70° , 周期为 100 分钟。星载双频 GPS 接收机的采样速率为 50Hz。在全球范围内, 设置了 5 个 1Hz 采样速率的地基跟踪站以便

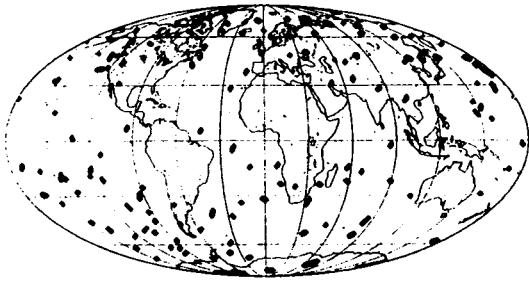


图 10 1995 年 6 月 23 日 7 个小时内所观测到的掩星的位置分布

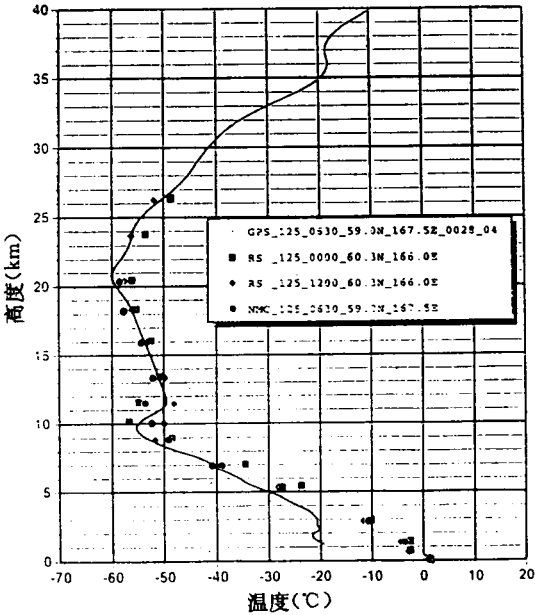


图 11 1995 年 5 月 5 日 28 号掩星结果进行双差计算。

图 10 是 1995 年 6 月 23 日在 7 个小时内所观测到的掩星的位置分布。由于 LEO 本身的原因(内存容量、天线指向和只观测下降掩星)和地基同步跟踪站数目的限制,使得每天产生的掩星数要少于 500 个。

图 11 给出了采用干空气模式反演得到的一条温度廓线。图中对流层顶的拐点和 20km 以上平流层的逆温现象符合大气的一般特征。在对流层上部 7km 以上,反演结果与附近探空资料及模式计算结果符合得较好;在 7km 以下,水汽的忽略导致反演的温度值偏低,在 1km 高度处最大偏低可达

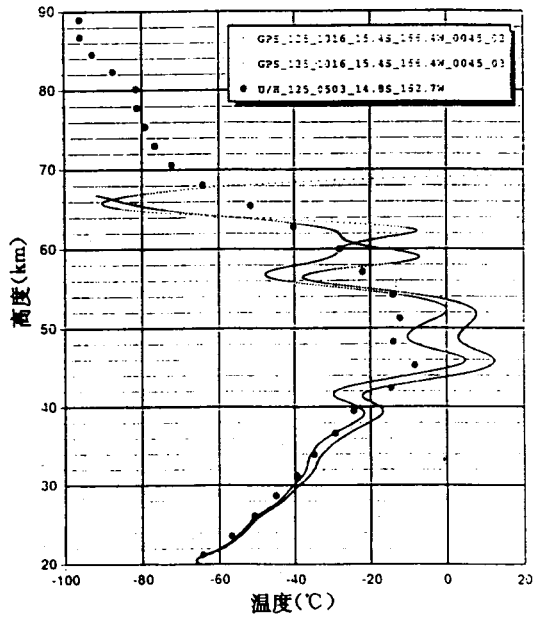


图 12 1995 年 5 月 5 日 45 号掩星结果 17°C。

图 12 是一个掩星事件用两个不同的地基跟踪站分别进行双差计算的结果。在高层大气区域,没有探空资料和模式计算结果,因此选了一个高层大气研究卫星(UARS)的 Halogen 掩星实验(HALOE)结果与之比较。在 40km 以上,GPS/MET 值相对于 HALOE 值有较大的振荡,而且两条 GPS/MET 廓线之间也有不小的差值,这可能与反演算法中所采用的高层大气的边界条件模式有关。在 40km 以下,两种掩星方法的结果符合得很好,而且两条 GPS/MET 廓线也逐渐收敛以至重叠。

总的来说,对目前采用的球对称干空气大气模式,在 40km 到大约 5—7km 高度之间,反演的温度廓线具有较好的精度,与其它方法得到的值相差在 2 °C 以内;在 5km 以下和 40km 以上,反演结果有较大的误差,这要求在未来的反演中对模型加以改进。

5 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

定的特性。它可能会对天气预报、气候和全球变化研究领域产生深刻的影响。

5.1 天气预报

我们知道,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业务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,资料是极为缺乏的,即使在大陆地区,探测一般也只每隔 12 小时进行一次,而且几百公里的站距对一些重要的中尺度天气结构的分析也难以适应。虽然从气象卫星资料可以反演得到温度廓线,但这些廓线有限的垂直分辨率使得它们对预报模式的贡献相当小。

一个业务运行的 GPS/MET 系统将可以进行全天候的全球探测,加上测值的高精度和高垂直分辨率,使 NWP 精度的提高成为可能。Eyre^[15]研究了把不同级别的掩星反演数据同化进 NWP 模式的方法。更近一些时候 Zou 等^[16]进行了折射率数据同化的仿真研究。结果表明,由于减少了中间步骤所产生的误差,直接把折射率甚至折射角数据同化进 NWP,这将比同化最后得到的温度和气压等气象参数产生更好的精度。

5.2 全球变化研究

全球平均温度和水汽是全球气候变化的两个重要指标。与当前的其它一些探测方法比较,GPS/MET 探测系统能长期稳定地提供相对高精度和高垂直分辨率的温度廓线,尤其是在对流层顶和平流层下部区域。更为重要的是,从 GPS/MET 掩星数据反演得到的大气折射率是大气温度和湿度的函数,因此可直接把大气折射率廓线作为“全球变化指示器”。模式研究的结果也有力地支持了这一论点。Yuan 等^[15]证明了大气中 CO₂ 的含量加倍时,大气折射率的变化将是非常明显的。而且 Yuan 等还发现,作为高度函数的 GPS 临边探测传播延迟测值甚至可以作为全球变化的一个更为基本的指标。随着全球

变暖,如果温度和湿度增大,则总的传播延迟也将增大,这提供了全球变化的另一种监测方法。

5.3 其它的应用

GPS 临边探测方法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 和 GPS 卫星之间信号路径上的总电子含量(TEC)^[18]来追踪重力波可能是一种可行的方法。

许多现有的和计划中的被动式卫星遥感系统(如 O₃ 的遥感)需要提供精确的温度廓线作为初始条件。GPS/MET 有助于提供这些廓线。

另外,如果 LEO-GPS 系统导出的折射率廓线数据与地基 GPS 接收机测得的可降水量数据组合起来同化进数值天气预报模式,这将会提高整个陆地区域温度和湿度值的分辨率。

参考文献

- 1 Businger S, S R Chiswell, M Bevis, J Duan, R A Anthes, C Rocken, R Ware, T Van Hove and F Solbeim. The Promise of GPS in Atmospheric Monitoring. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77(1)
- 2 Ware R, M Exner 等. GPS Sounding of The Atmosphere from Low Earth Orbit: Preliminary Results. Bull. Amer. Meteor. Soc., 1996, 77(1)
- 3 Phinney R A and D L Anderson. On the Radio Occultation Method for Studying Planetary Atmospheres. J. Geophys. Res., 1968, 73(5)
- 4 Fjeldbo G, A J Kliore and V R Eshleman. The Neutral Atmosphere of Venus as Studied with The Mariner V Radio Occultation Experiments. Astronom. J., 1971, 76(2)
- 5 Volkov A A, G M Grechko, A S Gurvich, V Kan and S V Sokolovskiy. Recovery of the Vertical Temperature Profile of The Atmosphere from Refraction-Measurements Made from The Salyut - 7 Station. Atmospheric and Oceanic Physics, 1987, 23(11)
- 6 Melbourne W G, T P Yunck, B H Hager, G F Lindal, C

- H Liu and G H Born. GPS Geoscience Instrument for EOS and Space Station. JPL proposal to NASA AO OS-SA-1-88
- 7 Meehan T K, E R Kursinski, G A Hajj, J M Srinivasan and S J Dinardo. Analysis of GPS signals Occulted by The Atmosphere as Tracked from Mauna Kea Using the TurboRogue GPS Receiver. Trans. Am. Geophys. Union, 1991(EOS), 72, 372
- 8 Hardy K R, D P Hinson, G L Tyler and E R Kursinski. Atmospheric Profiles from Active Space-based Radio Measurements. Proc. Conf. on Satellite Meteorology and Oceanography, AMS, 1992
- 9 周忠谟, 易杰军. GPS 卫星测量原理与应用. 测绘出版社, 1992, 12
- 10 刘基余, 李征航, 王跃虎, 桑吉章编著. 全球定位系统原理及其应用. 测绘出版社, 1993, 10
- 11 Gorbunov M E and S V Sokolovskiy. Remote Sensing of Refractivity from Space for Global Observations of Atmospheric Parameters, Max-Planck-Institute fur Meteorologie Report, No. 119, Hamburg, Germany, 1993
- 12 R H Ware 等. GPS/MET Program Phase 1; Proof of Concept, June 93-July 95
- 13 乔亚夫著. 梯度折射率光学. 科学出版社, 1991, 9
- 14 Melbourne W G 等. The Application of Spaceborne GPS to Atmospheric Limb Sounding and Global Change Monitoring. JPL Publication 94-18
- 15 Eyre J R. Assimilation of Radio Occultation Measurements into a Numerical Weather Prediction System. ECMWF Technical Memorandum, 1994, 199
- 16 Zou X Y, -H Kuo and Y -R Guo. Assimilation of Atmospheric Radio Refractivity Using a Nonhydrostatic Mesoscale Model. Mon. Wea. Rev., 1995, 123
- 17 Yuan L, R A Anthes, R H Ware, C Rocken, W Bonner, M Bevis and S Businger. Sensing Climate Change Using the Global Positioning System. J. Geophys. Res. 98, 1993 (D8)
- 18 Chiu Y T, K R Hardy, L Tyler and D Hinson. Sensing Tropospheric Temperature and Ionospheric Structures with Space-borne GPS receivers. Proc. US-Taiwan Workshop on Space, Taipei, Taiwan, 1991