

文章编号: 1007- 2985(2004) 04- 0010- 04

基于 GPS 掩星技术反演大气参数模型的优化

盛 崢, 黄思训, 方涵先

(解放军理工大学气象学院, 南京 江苏 211101)

摘 要: 准确掌握地球大气中的水气分布, 了解水气变化趋势对天气现象、全球气候变化、数值预报有重的理论价值和实用价值. 以无线电掩星技术为基础, 利用掩星数据反演大气参数剖面, 论证了原反演模型的不足, 并给出了反演个例. 引入 ECMWF 先验温度 T , 再通过线性迭代的方法反演对流层下部水汽廓线原理, 给出了优化后模型反演个例, 并对模型优化后反演廓线中存在的问题进行了分析, 提出了下一步优化方向.

关键词: 空基 GPS; 反演; 优化

中图分类号: TP872

文献标识码: A

利用无线电掩星技术遥感地球大气的方法是在 20 世纪 60 年代由 Fishbach 提出来的. 但受到当时条件的限制, 实施该方法费用十分昂贵, 因而被搁浅. 进入 20 世纪 80 年代末和 90 年代初, Yunck 等人提出借用 GPS 星座资源, 开展无线电掩星技术监测地球大气的设想. 1995 年美国大学大气研究联合会(简称 UCAR) 对搭载有 Turbo/Rogue GPS 接收机的 Micro-Lab1 卫星(属于地球低轨道卫星, 简称 LEO 卫星) 发回地面的相关数据进行了分析, 成功地反演出地球大气的折射率剖面结构、气象参数(温度 T 和压力 P) 的分布情况, 以及电离层的电子柱密度的剖面结构与由无线电探空仪 Radiosonde 和高分辨率的探空气球等途径而获得的结果相比较, 发现它们相互之间符合的较好. 这初步论证了 GPS 无线电掩星技术^[1] 在测地球大气的对流层、电离层和地球引力场改进等方面具有开发应用价值.

1 空基 GPS 掩星技术介绍

GPS 携带射线发射器, 近地轨道卫星(LEO) 携带着射线接收器. 当 GPS 上发射的射线通过地球大气时, 由于地球的层结作用, 各高度层大气的折射率都各不相同, 射线会发生折射现象. 一般来说, 射线都是向近地点弯曲. 如果顺利穿过地球大气而没有撞击地球表面, 射出方向一般都已经偏离了原先的射入方向. 射线在射入和射出地球大气时的偏离角, 称作折射角, 记为 θ . 此时光线路径穿过大气层的那 1 min 的过程, 即为 1 个掩星事件. GPS 信号在大气中传播时会向折射率大的方向弯曲, 在近地点处折射率达到最大. 我们所要求的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. 传统的分析方法是使问题简化, 在球面分层大气介质条件下, 折射角 θ 与折射指数 n 的关系^[2] 为:

$$\theta = -2a \int_{r_0}^{r_p} \frac{dn}{dx} \frac{dr}{\sqrt{2r^2 - a^2}} \quad (1)$$

其中: r 为地心向径; a 为影响参数是一沿光线不变量. (1) 式中可由测量的多普勒频移和 LEO 卫星的速度信息得到, 利用 Abel 变换或射线追踪法可反演折射率廓线, 进而导出温度、水汽等大气参数廓线.

收稿日期: 2004- 09- 06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(400705014, 40175014)

作者简介: 盛 崢(1983-), 男, 江西省南昌市人, 解放军理工大学气象学院硕士研究生, 主要从事 GPS 气象学研究; 黄思训(1946-), 男, 上海人, 解放军理工大学博士生导师, 主要从事大气科学中的反问题研究.

2 基于传统反演方法的反演模型

传统的反演方法在反演的过程中由于忽略大气中水气的作用只能反演出在大气对流层顶以上的大气参数, 这使得对人类空间活动影响最大的有关对流层顶大气参数不能反演出来. 在传统的反演方法中, 在球面对称的假设下, 利用 Abel 反演公式求算大气的折射率指数 n :

$$n(p) = e^{\frac{1}{p} \int_{p_{top}}^p \frac{(x)}{(x^2 - p^2)^{1/2}} dx} \tag{2}$$

其中: p 是影响参数; $p_{top} = 90 \text{ km}$. 或写成折射率 N 的形式为:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \tag{3}$$

由于折射率 N 同时又表示为气压 P 、气温 T 和水汽比湿 q 的函数^[3] 为

$$N = 77.6 \frac{P}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{Pq}{T^2(0.622 + 0.378q)} \tag{4}$$

所以如果假设空气是干燥的, 即有 $q = 0$ 就可以将气压 P 和气温 T 反演出来. 在 $q = 0$ 的条件下, 由(4) 可得

$$N = 77.6 \frac{P}{T} \tag{5}$$

利用状态方程 $P = RT$ 和静力方程 $dP = -g dz$, 则有

$$dP = - \frac{gN}{77.6R} dz, \tag{6}$$

$$T = \frac{77.6P}{N} \tag{7}$$

由积分(6) 可以得到干空气的气压 P , 并由(7) 得到温度 T . 这就是传统反演的方法. 图 1 为利用此模型反演气温的 1 个实例.

从图 1 中可以看出: 在 800 Pa 以下由于误差过大没有反演结果, 在 500 Pa 以下反演的误差比较大. 这主要是由于在此反演模型中没有考虑水汽的作用即只考虑在干空气形态下进行反演. 而在 500 Pa 以上是由于此时的空气水汽含量很小, 基本接近于干空气, 故此时代的反演精度有所提高.

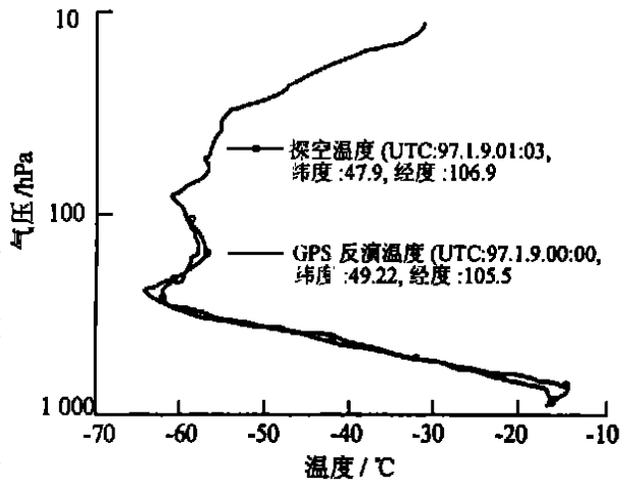


图 1 反演气温廓线与探空资料相比的个例

3 优化反演方法后的反演模型

传统的反演模型是有问题的. 也许在某一高度之上, 可以假设空气是干的, 这时误差不算太大. 但是, 当空气并不干燥时, 这样做不仅无法得到水汽场, 同时求算出来的气压 P 和温度 T 也不准确. 从(4) 式可以看出, 水汽 q 对于折射率的影响还是很大的. 因此, 必须找到一种方法, 可以较为准确地反演出水汽场. 笔者引进 ECMWF(欧洲中期天气预报中心) 的先验温度 T 来反演大气参数.

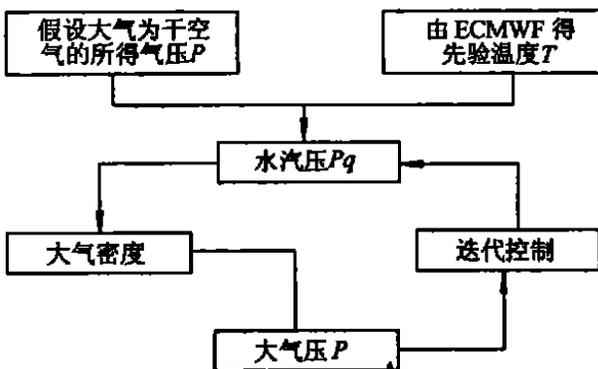


图 2 优化后的反演模型

此时将干空气的气压 P 和 ECMWF 先验温度 T 再代入(4) 中, 便可以求得比湿 q , 当然这时得到的水汽比湿还不是最后的准确值. 然后计算虚温:

$$T_v = T[1 + 0.608q]. \tag{8}$$

并通过积分气压方程

$$d \ln P = - \frac{g}{RT_v} dz \tag{9}$$

来计算气压廓线. 然后计算比湿廓线

$$P_w = \frac{1}{3.75 \cdot 10^5} T^2 [N - 77.6 \frac{P}{T}] \tag{10}$$

$$q = 0.622 P_w / [P - 0.378 P_w]. \tag{11}$$

在得到水汽比湿 q 之后, 回到方程(8), 然后重复求解方程(8), (9), (10), (11), 通过几次迭代后结果收敛求得最终的解. 反演模型如图 2 所示. 图 3 是利用改进后的模型反演大气参数的 1 个实例.

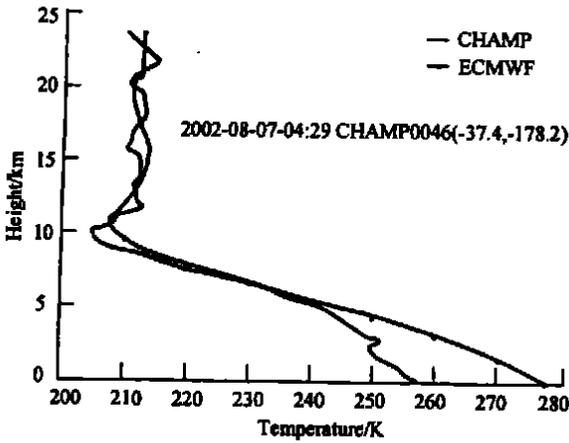


图3 反演大气参数廓线与 ECMWF 资料相比的个例

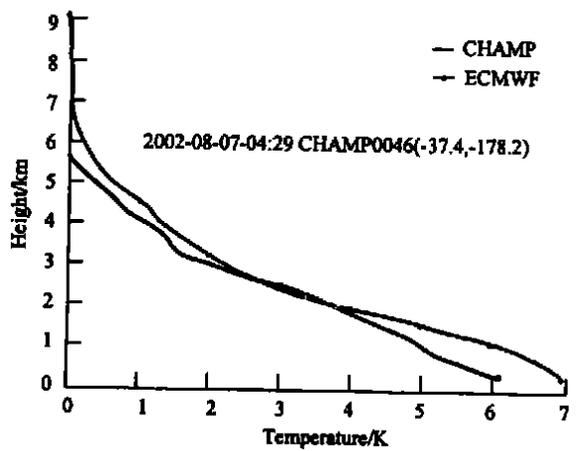


图4 引入 ECMWF 的反演水汽压剖面图

从图 3 的空气气温反演廓线中可看出在 5 km 以下反演效果不是很理想, 这主要是由于在此反演模型中没有考虑水汽的作用即只考虑在干空气形态下进行反演, 与图 1 所示的情况相似. 模型的改进之处体现在图 4 中, 此时引入 ECMWF 的先验温度 T 来反演水汽压剖面, 可以看出反演水汽压廓线在 2 km 高度以上的空间与 ECMWF 提供的剖面相当吻合. 但在 2 km 高度以下时反演精度有所下降, 这主要是由于在 2 km 高度以下时存在大气多路径效应和假设大气折射率是关于球形对称所引起的误差^[4] 比较明显, 这正是我们需要进一步改进的.

根据 Fermat 原理, 电磁波以最短的时间通过空间的 2 点, 也就是说泛函

$$J = \int_s ds \tag{12}$$

取得极值. 采用球坐标后可转化为

$$J = \int_0^1 \sqrt{r^2 + r'^2} dr \tag{13}$$

(13) 式以 r 为自变量, 利用欧拉方程对(13) 式求变分可得

$$r = r + \frac{2}{r}r'^2 + \frac{1}{r} \left[\frac{r}{r} - \frac{r}{r} \right] (r + r'^2) \tag{14}$$

在假设大气折射率是关于球形对称时 $n(r)$ 对 r 的偏导数为 0, 故(14) 式简化为

$$r = r + \frac{2}{r}r'^2 + \frac{1}{r} \left[\frac{r}{r} \right] (r + r'^2) \tag{15}$$

(15) 式等价于 Bouguer 定律: $(r) r \sin \theta = \text{const}$. 下面对 $n(r)$ 进行修正, 令

$$n(r) = (r) + (r'), \tag{17}$$

同是假定 (r) 满足 Bouguer 定律, 将(17) 式代入(14) 式可得

$$\left[r - r - \frac{2}{r}r'^2 \right] \left[(r) + (r') \right] = \frac{(r)}{r} - \frac{r}{r} \frac{(r')}{r} (r + r'^2) \tag{18}$$

由于此时的 (r) 满足 Bouguer 定律, 故可将(18) 式进行变量分离:

$$\left[r - r - \frac{2}{r}r'^2 \right] (r) = \frac{(r)}{r} (r + r'^2), \tag{19}$$

$$\left[r - r - \frac{2}{r}r'^2 \right] (r') = \frac{r}{r} \frac{(r')}{r} (r + r'^2) \tag{20}$$

利用(19), (20) 式可求出

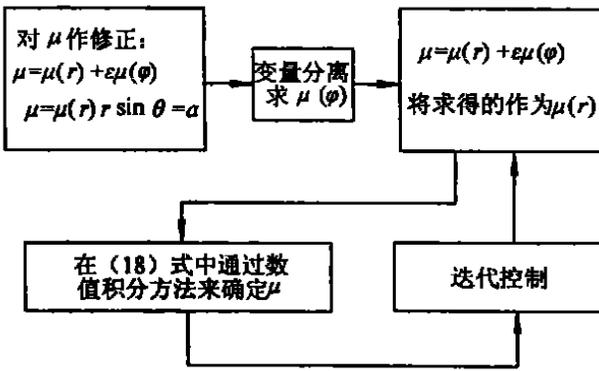


图 5 的反演优化模型

$$d \ln \left(\frac{r}{\tan \theta} \right) = \frac{r}{\tan \theta} d \left(\frac{a}{r} \right). \quad (21)$$

此时将 $\mu = \mu(r) + \epsilon\mu(\phi)$ 作为下一次的 $\mu(r)$ 代入 (18) 式进行计算, 由于此时的 $\mu(r)$ 不再满足 Bouguer 定律, 故不能再次通过变量分离法来求解. 但可通过数值积分方法来确定 μ 作为下一次叠代的 $\mu(r)$, 经过叠代以后若能得到收敛的 μ , 则 μ 作为最后的结果. 模型如图 5 所示.

以上是笔者的初步研究工作, 在下一步的工作中笔者还要研究 μ 是否能迅速收敛以及 μ 的取值情况对 μ 收敛的影响.

4 结语

下一步优化主要是对各种误差进行修正, 如大气多路径效应所引起误差的修正(目前普遍采用物理反演方法如全谱反演、正则变化、滑动频谱、后传播、衍射法来修正), 电离层二级效应的修正问题, 地面波反射引起误差的修正, LEO 低轨卫星轨道的计算与修正(目前的设想是在低轨卫星上安装一小型推动器来改变 LEO 卫星的运行轨道), 超折射现象导致折射率负偏差的修正问题, 以及在今后发展单频反演技术从而消除电离层的影响误差等. 这些问题值得在今后的工作中去探讨与解决, 以提高利用 GPS 掩星技术反演大气参数精度.

参考文献:

[1] 胡 雄, 曾 桢, 张训械, 等. 无线电掩星技术及其应用[J]. 电波科学学报, 2002, 17(5): 549- 556.
 [2] KURSINSKI E R. THESIS PH D. Pasadena[D]. California: CIT, 1997.
 [3] KURSINSKI E R, HAJJ G A, LEORY S S, et al. The GPS Radio Occultation Technique[J]. TAO, 2000, 11(1): 53- 114.
 [4] 蒋 虎, 黄 成, 严豪健. 无线电掩星反演大气参数误差分析及其应用进展[J]. 地球物理学报, 2001, 16(1): 82- 88.

Optimization the Inversion Model of Atmospheric Parameter Using Radio Occultation Data

SHENG Zheng, HUANG Si-xun, FANG Han-xian
 (Institute of Meteorology, PLAUSF, Nanjing Jiansu 211101, China)

Abstract: To sound water vapor precisely in the atmosphere is essential for weather phenomenon research, global climate change research and numerical weather forecast. The main purpose of this paper is to develop an inverse model for atmospheric parameter profiles using radio occultation data. This paper demonstrates the deficiency of the old retrieval model and some atmospheric parameter profiles are obtained. Through the linear retrieval and using the ECMWF S temperature, the new retrieval model is established, and some atmospheric parameter profiles are given. Then the author analyses the bug in the atmospheric parameter profiles; and finally, brings forward the next way to optimize the retrieval model.

Key words: space based GPS; retrieval; optimize