第21卷 第3期 空 间 科 学 学 报 Vol.21, No.3
2001 年 7月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE July, 2001

LEO 卫星轨道误差对无线电掩星反演大气参数的影响*

蒋 虎 黄 珹
(中国科学院上海天文台 200030)

摘 要

采用数值方法估计了 LEO 卫星轨道误差对无线电掩星反演大气参数的影响. 并将其应用于 1995 年 10 月 11 日的某次掩星事件的观测资料处理和分析, 得到了 LEO 卫星轨道误差对无线电掩星反演大气参数影响的定量结果.

关键词 LEO 卫星—掩星—反演大气参数

目前国外先进定轨软件对 LEO 卫星的定轨精度已经达到 dm 级甚至 cm 级, 这种水平下的 LEO 卫星轨道误差几乎不影响无线电掩星反演大气参数的结果, 因而国外往往忽略这方面的研究工作. 在国内, 对 LEO 卫星的定轨精度大多在 m 级左右, 这一误差水平是否影响反演大气参数结果, 对此尚无文献加以定量的分析和讨论.

1 反演过程

对 GPS 信号的相位观测值进行处理得到时延率, 利用经过卫星精密定轨 (POD) 得到的 LEO 卫星和 GPS 卫星的精密轨道, 再经过 Doppler 观测方程约束后得到 GPS 卫星信号的偏折角序列; 若希望考察电离层, 则需要进一步扣除中性大气引起的偏折效应; 若希望考察中性大气, 则需要采取适当的方法, 如 LC 组合法, 消除由电离层产生的偏折效应; 通过 Abel 变换将偏折角序列转化为折射率剖面; 而已知折射率, 可以得到相应的大气密度分布, 经有关积分可得到气压的分布情况; 若将大气近似成理想气体并且在湿度可忽略的大气环境下, 则通过理想气体方程可得到大气的温度分布情况; 而在湿度不可忽略的大气环境下, 若可从其他途径获得温度分布, 则可以给出水汽密度的分布, 从而为气象预报部门提供观测数据. 这就是无线电掩星技术反演地球大气参数的基本过程 [1]. 该过程表示如图 1 所示.

2 评估方法

GPS 无线电掩星技术测定地球大气参数的准观测方程为 [1]

* 国家自然科学基金重点项目 (19833030), 上海市科学技术发展基金项目 (JC14012) 共同资助
2000-05-18 收到原稿, 2001-04-25 收到修定稿

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

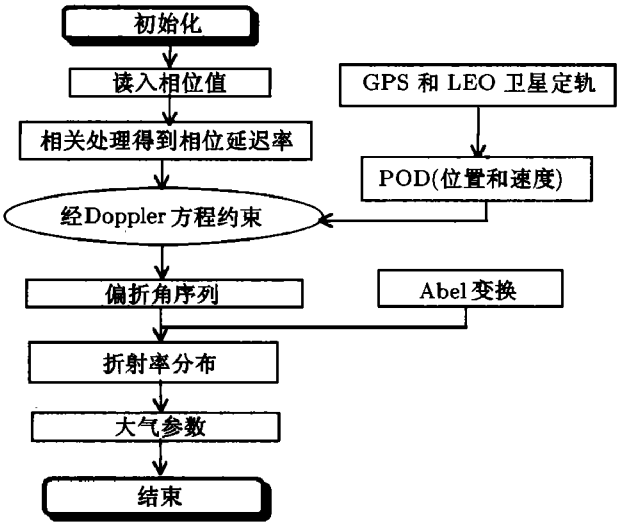


图 1 无线电掩星反演地球大气参数资料处理流程
Fig.1 Flow-chart for data reduction in radio occultation

$$\Delta\dot{\rho} \approx v_{\perp L}\gamma - v_{\perp G}\delta. \tag{1}$$

方程 (1) 中的 $v_{\perp L}$ 和 $v_{\perp G}$ 是 LEO 和 GPS 卫星垂直于 LEO-GPS 卫星联线的速度分量，δ 和 γ 分别为进入和离开中性大气的 GPS 信号的传播方向与 GPS 卫星和 LEO 卫星的联线所围成的锐角，两者之和构成了无线电信号经中性层折射后的折射角；$\Delta\dot{\rho}$ 为中性大气的时延率；卫星位置对反演中间参数 γ 和 δ 的影响是通过速度向 LEO-GPS 卫星联线进行投影求解垂直联线分量时反映出来的. 我们利用的是美国大学大气研究联合会 (UCAR) 提供的 Level 2 资料，其中包括无线电信号经地球中性大气折射的时延序列、LEO 卫星和 GPS 卫星的 POD 信息. 由于 LEO 卫星的 POD 对 GPS 无线电掩星反演地球大气参数的影响无法用解析的方法给出 (主要是由于反演过程为非线性 [1])，因而这里设法用数值方法来对 POD 给出反演地球大气参数造成的影响作出定量估计. 由于 Level 2 生成过程中时延序列和卫星 POD 的确定是独立进行的，故我们可采用这样的办法来进行轨道对反演参数的影响大小的估计：将准观测方程式 (1) 左边的量保持原状，而把方程 (1) 右边与速度和位置发生相关的项作为速度和位置的函数；分别给予 LEO 卫星的位置 (径向、横向和法向，亦称 rtn 分量) 或速度一定的误差，利用我们自行设计的无线电掩星资料处理软件对附加误差的和不附加误差的 Level 2 资料各自进行反演归算，从而确定出两种情况下的大气气象参数的差异.

3 结果与分析

按照以上的流程，我们编制了相应的资料处理软件. 对历元为 1995 年 10 月 11 日 064524 标号为 0188 的掩星事件实测资料进行了大气参数反演归算 (该资料由 UCAR 提供). 为证明我们处理结果的可信度，因此将 UCAR 的相应资料处理结果用来对照 [2]. 比对结果参见图 2.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

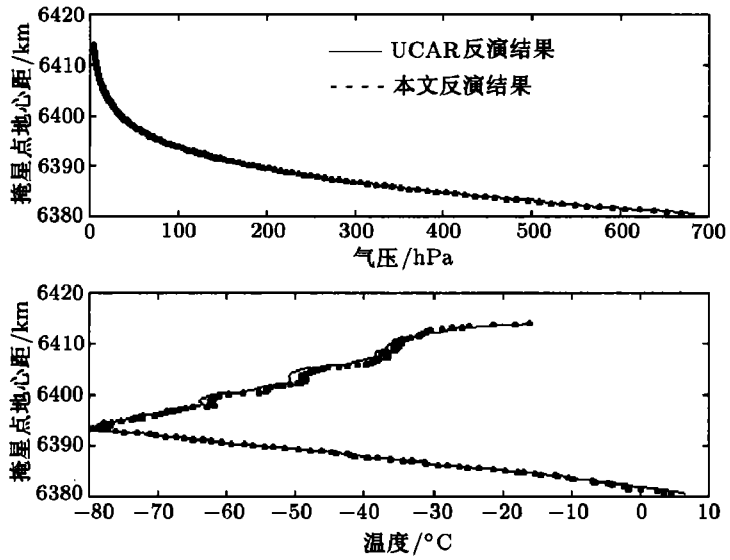


图 2　气压和温度对照图

Fig.2　Contrast of pressure and that of temperature

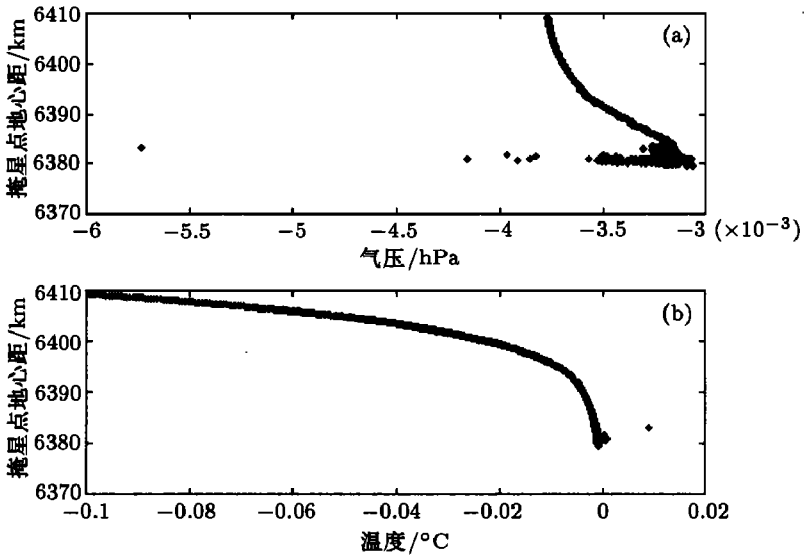


图 3　50 m 径向偏差引起的气压 (a) 和温度 (b) 变化

Fig.3　Variations in pressure (a) and temperature (b) caused by 50 m radial positional bias

从图 2 可以看出，我们反演的温度与 UCAR 的反演结果在 ±(1—2)°C 的水平上保持一致，气压在 1 hPa 水平上保持一致．鉴于我们与 UCAR 反演结果的一致性 (目前 GPS 无线电掩星反演地球大气温度的外部符合精度约为 1—2°C)，故可以认为基于这样的处理软件和 #0188 这次掩星事件来进行误差分析是比较合理和可靠的．

在 LEO 卫星的径向 r 或横向 t 或法向 n 分别赋予 50 m 的偏差，气压和温度反演差异随掩星点地心距的分布情况分别如图 3—5 所示．从中我们可以发现：在 r 和 t 方向，

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

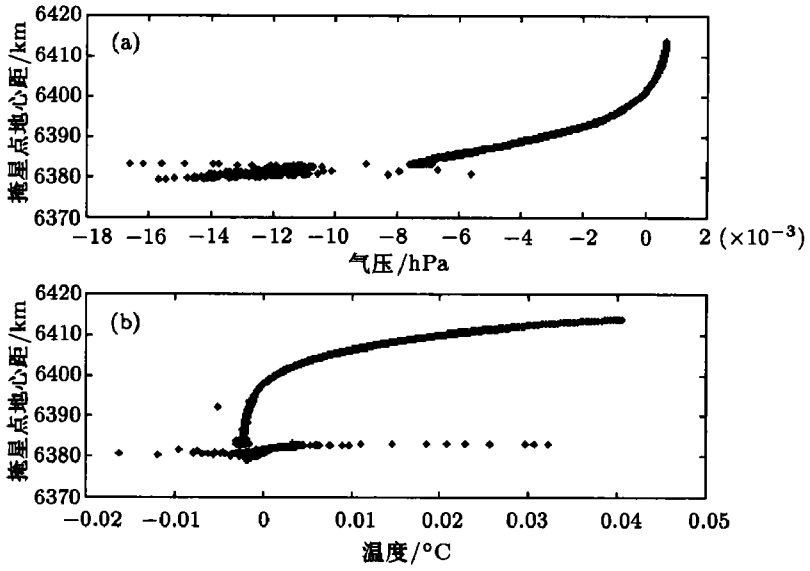


图 4 50 m 横向偏差引起的气压 (a) 和温度 (b) 变化

Fig.4 Variations in pressure (a) and temperature (b) caused by 50 m transverse positional bias

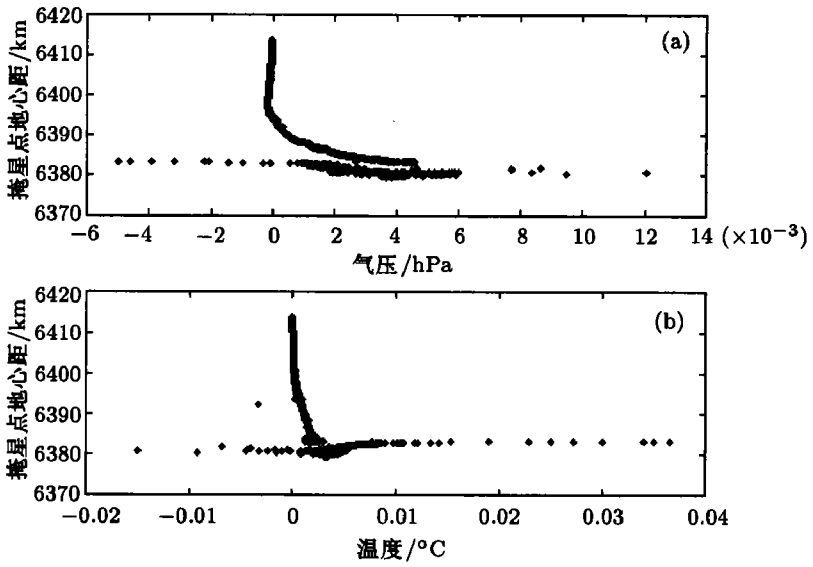


图 5 50 m 法向偏差引起的气压 (a) 和温度 (b) 变化

Fig.5 Variations in pressure (a) and temperature (b) caused by 50 m normal positional bias

高层大气温度反演对 LEO 卫星的位置确定精度要求比低层大气的温度反演对 LEO 卫星的位置要求高一些，而 n 方向的情况则相反. 气压差异分布在 t 和 n 方向大体上表现为自下而上差异逐渐不明显，而在 r 方向则出现相反趋势.

就速度情况而言，速度偏差为 1 m/s 时，反演参数差异随掩星点地心距的分布特点如图 6 所示，我们发现反演参数对速度偏差的敏感度自下而上逐渐衰减.

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

通常就测地应用而言，人们往往直观地认为观测精度越高，从中衍生出的物理量的值越精确和可信．但是，GPS 无线电掩星技术监测地球大气方法在实施过程中的成本往往与中间参数所需要的精度直接相关．一旦中间参数的精度要求水平下降，该方法的实施就大为简化，从而大大节省成本．正是出于类似的考虑，Bertiger 等人提出了利用单频 GPS 观测代替双频 GPS 观测确定 LEO 卫星的 POD 方法来简化对观测硬件设备的要求，从而降低项目实施的成本 [3]．与常规的观测技术 Radiosonde 比对的结果表明：目前无线电掩星技术反演大气温度的外符精度为 1°C 左右．即使在考虑引起 0.1°C 温度误差的误差源的情况下，就本次掩星事件而言，LEO 卫星 50 m 的定位精度与目前 LEO 卫星的亚 cm 级的最佳定位精度对反演大气参数的效果是没有差别的．然而，达到前一种定位精度的要求远远低于后者，从而节约了成本．因此，从某种意义上说，本文为寻找降低 GPS 无线电掩星反演大气项目实施成本的途径的可能性提供了一定的理论支持．

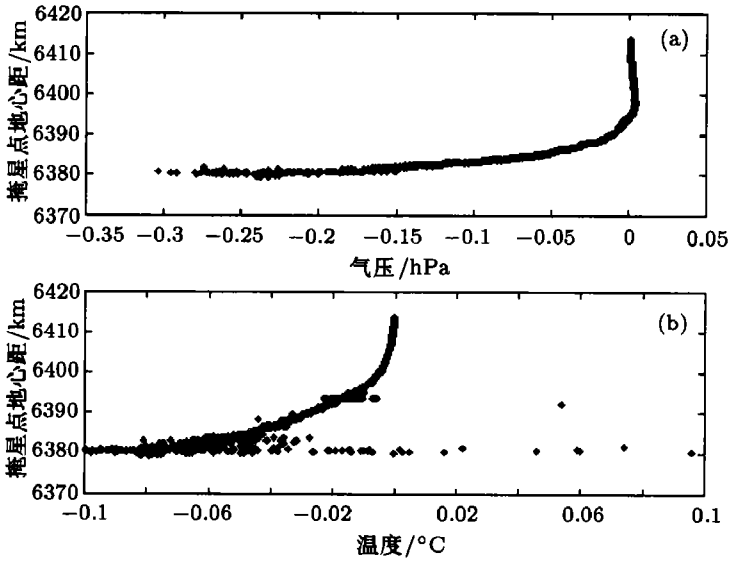


图 6　1 m/s 速度偏差引起的气压 (a) 和温度 (b) 变化

Fig.6　Variations in pressure (a) and temperature (b) caused by 1 m/s velocity bias

参　考　文　献

[1] Melbourne W *et al.* The application of space borne GPS to atmospheric limb sounding and global change monitoring. *JPL Pub.*, 1994, **18**: 147

[2] 蒋虎, 黄珹, 严豪健. 空间 GPS 无线电掩星反演大气参数方法及其应用. 地球科学进展, 2000, **15**(5):565—570

[3] Bertiger W I, Wu Sienchong. Single frequency GPS orbit determination for low Earth orbiters. In: Technology and Operations: Partnership for Success in Navigation. California: Inst. Nav. Press, 1996. 463—473

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com

EFFECTS OF LEO'S ORBITAL ERRORS ON THE INVERTED PARAMETERS OF TERRESTRIAL ATMOSPHERE

JIANG Hu HUANG Cheng

(*Shanghai Astronomical Observatory, The Chinese Academy of Sciences*, 200030)

Abstract

A numerical method is put forward to describe the effect of LEO's orbital errors on the inverted parameters of terrestrial atmosphere. Quantitative results are presented based on an occultation event on Oct.11, 1995. LEO's orbital errors show some features: temperature inversion precision at higher altitudes depends more on LEO's positional accuracy than that at lower altitudes in radial and transverse components, while it holds true the other way round in the normal component. Pressure inversion precision at higher altitudes depends less on LEO's positional accuracy than that at lower altitudes in normal and transverse components, while it holds true the other way round in the radial component. Inversion parameters at higher altitude are more insensitive to the velocity bias than that at lower altitude.

Key words Low earth orbit satellite, Occultation, Inversion of atmospheric parameters

PDF created with pdfFactory Pro trial version www.pdffactory.com