

利用 GPS 掩星资料反演地球中性大气参数 折射角方法研究

徐晓华¹ 李征航¹ 罗 佳¹

(1 武汉大学测绘学院, 武汉市珞喻路 129 号, 430079)

摘 要: 对利用 GPS 掩星资料反演地球中性大气参数的原理作了简要介绍, 在此基础上对消除电离层影响的改正方法、Abel 反演积分上限的确定、上边界测量折射角的优化方法进行了探讨。针对 UCAR 的 Level2 数据, 在数据预处理工作的基础上, 利用特定掩星事件的数据进行了反演计算, 并对计算结果进行了分析。

关键词: GPS 掩星; 反演; 中性大气参数; 折射角

中图法分类号: P228.42; P407

在过去几十年里, 无线电掩星方法广泛地应用于各种行星探测任务, 提供了关于太阳系其他行星大气的重要信息。其原理是利用飞船发射的无线电信号在到达地球的传播过程中受到行星大气的折射影响, 通过研究信号路径的改变和传播时间的延迟来探测行星大气^[1]。

自 Fischbach 于 1965 年提出将掩星技术应用于地球大气探测的思想以来, Gorbunov 等人在这领域里作了大量理论研究和模拟计算工作^[2]。20 世纪 90 年代初, GPS 卫星的成功发射和运行试验提供了必要条件。1995 年 4 月, 由美国大学大气研究联合会 (UCAR) 主持的 GPS/MET 项目正式启动, 发射了一颗低轨 (LEO) 卫星 MicroLab-1, 从此拉开了利用低轨卫星探测地球大气研究的序幕。2000 年 7 月, 德国地学研究中心 (GFZ) 发射的 CHAMP 卫星的主要任务之一就是, 利用 GPS 掩星技术反演地球大气层并取得了比较满意的初步成果^[3]。目前, 我国台湾与美国计划联合发射的 COSMIC 卫星将为这一领域的研究提供更丰富的 GPS 掩星资料^[4]。由于掩星探测基本上在全球是均匀分布的, 掩星资料是对传统气象探测手段 (如无线电探空仪、气象卫星观测) 的有力补充^[5], 将掩星数据资料同化到数值天气预报 (NWP, numerical weather forecasting) 模式中, 将会显著地提高天气预报的精度。

1 反演原理与方法

1.1 基本原理

LEO 星载 GPS 接收机以 50Hz 对 GPS 信号进行采样。信号从 GPS 到达 LEO 卫星, 穿过地球大气层持续 1~2min 的过程, 称为一个掩星事件^[6]。由于地球大气层 (主要是除电离层以外的中性大气层) 的影响, 每次采样中 GPS 载波相位路径测量值 L 与卫星之间的几何距离 R_{LG} 之间存在差异 $\Delta L_i (i=1, 2)$:

$$\Delta L_i = L_i - R_{LG} = \int \mu_i ds, \quad i = 1, 2 \quad (1)$$

式中, ΔL_i 为附加相位延迟; μ_i 为折射率。在大气球对称假设的条件下, 对于每条射线路径, 附加多普勒与卫星的位置和速度之间满足多普勒观测方程^[5]:

$$\Delta L + R_{LG} - (|\dot{R}_L| \cos \varphi(a) - |\dot{R}_G| \cos \chi(a)) = 0 \quad (2)$$

式中, ΔL 为附加多普勒; R_{LG} 为 GPS 卫星到 LEO 卫星的距离对时间的导数; \dot{R}_L 为 LEO 卫星速度在 GPS 卫星与 LEO 卫星及折射中心三点构成的掩星平面上的投影; \dot{R}_G 为 GPS 卫星速度在掩星平面上的投影; a 为该条射线路径的影响参数;

φ 为信号入射方向与 \vec{R}_L 的夹角; χ 为信号出射方向与 \vec{R}_G 的夹角。该射线路径对应的折射角为:

$$\alpha = \theta - \arccos(a/|\vec{R}_L|) - \arccos(a/|\vec{R}_G|) \quad (3)$$

式中, θ 为 GPS 与 LEO 卫星相对于折射中心的位置矢量之间的夹角; \vec{R}_L 为折射中心到 LEO 卫星位置的矢量; \vec{R}_G 为折射中心到 GPS 卫星位置的矢量。

对多普勒观测方程求解, 得到了折射角与影响参数之间的对应关系 $\alpha(a)$ 。下一步利用 Abel 积分反演方法得到大气折射率廓线, Abel 方程可以表达为^[7]:

$$\alpha(a_0) = 2a_0 \int_{a=a_0}^{a=\infty} \frac{d \ln \mu(a)}{da} \frac{1}{\sqrt{a^2 - a_0^2}} da \quad (4)$$

对式(4)反演得到:

$$\ln(\mu(a_0)) = \frac{1}{\pi} \int_{a=a_0}^{a=\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_0^2}} da \quad (5)$$

在理想气体法则下, 利用大气状态方程并忽略水汽含量影响可以解算各大气参数^[8]:

$$\rho(h) = C_1 N(h) \quad (6)$$

式中, h 为影响参数为 a 处对应的几何高度, $h = a/\mu - R_E$; R_E 为地球平均曲率半径; $N(h)$ 代表 h 高度处的大气折射指数, 它与对应高度处的折射率 μ 之间的关系为 $N(h) = 10^6(\mu(a) - 1)$; C_1 为常数; $\rho(h)$ 为 h 高度处的大气密度。

h 高度处的气压和气温分别为:

$$p(h) = \int_h^\infty g(h') \rho(h') dh' \quad (7)$$

$$T(h) = C_2 p(h) / \rho(h) \quad (8)$$

式中, $g(h')$ 为 h' 高度处的重力加速度; $\rho(h')$ 、 $\rho(h)$ 由式(6)得到, C_2 为常数。

1.2 电离层影响改正

实际上, 信号路径不仅受到中性大气层的影响, 还受到电离层的影响, 在反演的过程中还必须进行电离层改正, 改正的思想是基于双频组合的。

1.2.1 传统的相位组合法(LC方法)

在解算多普勒观测方程之前, 利用双频组合得到无电离层影响的附加相位延迟序列:

$$\Delta L_{LC}(t) = \frac{f_1^2 \Delta L_1(t) - f_2^2 \Delta L_2(t)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (9)$$

1.2.2 折射角线性组合法^[7,9]

对 f_1 与 f_2 分别解算多普勒观测方程, 得到分别对应于影响参数 a_1 与 a_2 序列的折射角 α_1 与 α_2 序列。对 α_1 与 α_2 组合得到大气折射角 α :

$$\alpha(a) = \frac{f_1^2 \alpha_1(a) - f_2^2 \alpha_2(a)}{f_1^2 - f_2^2} \quad (10)$$

式中, α_1 、 α_2 对应于相同的影响参数。在实际计算中, 首先对 $\alpha_2(t)$ 与 $a_2(t)$ 序列进行内插, 然后相应于 a_1 的 $\alpha_2(a_1)$ 的值被选入, 所以最后组合时采用的 a 与 a_1 相等。

1.3 上边界问题

由于 α 的测量值不可能到达无穷远处, 因此, 式(5)中的 Abel 反演的积分上限需要根据经验确定, 可以选定 $a = R_E + 110 \text{ km}$ ^[7], 在此影响参数对应的高度之上, 大气对射线路径的影响忽略不计。

随着高度的增加, 由于残余电离层误差和其他各种误差源的影响, 由掩星数据计算的折射角(称为测量折射角)误差越来越大。在积分反演的上限高度之下, 还需要确定一边界高度 h_U , 作为应用测量折射角的分界点。这时式(5)变为^[7]:

$$\ln(\mu(a_0)) = \frac{1}{\pi} \int_{a_0}^{a_U} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_0^2}} da + \frac{1}{\pi} \int_{a_U}^{R_E + 110 \text{ km}} \frac{\alpha'(a)}{\sqrt{a^2 - a_0^2}} da \quad (11)$$

式中, a_U 为 h_U 高度处对应的影响参数; α' 由函数外推法或大气模型计算的折射角来确定。

在实际计算中, 如果 h_U 为某一确定值, 反演的温度廓线会因该值的选取不同, 在平流层区间内的差别很大, 有时甚至导致反演失败^[7]。利用大气模型进行的统计优化方法可以避免这一问题, 其思想是设置一过渡区间, 在这一区间内通过对两种折射角定权, 用测量折射角和模型折射角的组合值取代测量折射角, 在该区间之中采用模型折射角, 区间外则采用测量折射角。

2 计算实例

2.1 数据预处理

本文所采用的数据是由 UCAR 提供的 GPS/MET 试验“第二段最佳时间”的 Level2 数据。Level2 数据中包含 50Hz 采样率的 LEO 和 GPS 卫星位置和速度以及两种频率的附加相位延迟 $(\Delta L_1, \Delta L_2)$ ^[8]。在进行反演之前, 需要进行几项数据预处理的工作。

1) 坐标转化。由于 Level2 数据提供的卫星位置与速度是在地心惯性系下的值, 而反演计算是在地固坐标系下进行的, 因此, 需要将卫星的位置与速度转换到地固坐标系下。

2) 对附加相位延迟进行低通滤波。一种方法是采用约束线性反演方法^[9], 但这种方法要计算大型矩阵的逆矩阵, 计算速度太慢。如果掩星事件持续 1min, 共有 3 000 个采样值, 需要计算

3 000×3 000矩阵的逆, 即使使用优化算法, 在工作站上进行, 也得两个多小时。这里采用滑动窗口平滑方法, 这种方法在剔除数据系列奇异值的基础之上, 按固定宽度的滑动窗口向前推进滤波。由于无需构成大型矩阵求逆, 这种方法大大加快了计算速度。

2.2 计算结果与分析

本研究对 1995 年 7 月 9 日的 15 号掩星事件进行了分析, 采用 EGOPS 软件进行了计算。这次事件于 0 :27 :43 开始进行, 共 2 750 个采样值, 分别选取了相位和折射角组合法进行了电离层改正, 上部边界分别采用了不利用大气模型对折射角进行修正和利用 MSISE-90 模型对折射角进行修正的方法。反演结果如图 1。

由图 1 可见, 在都利用大气模型对测量折射角进行统计优化的情况下, 得到的温度反演结果的差

别在 8~32km 之间, 特别是 10km 附近的区域。通过与网上 UCAR 公布的结果进行对比, 发现折射角组合法的结果与 UCAR 的结果符合得更好。

由图 2 可见, 当在上边界不用大气模型对测量折射角进行修正时, 折射角廓线从 $h=30\text{km}$ ($a=6\ 405\text{km}$) 高度附近开始向上误差增大, 这是由于 EGOPS 中 Abel 反演的上限高度统一设定为 110km, 边界高度 h_U 为 60km ($a_U=6\ 435\text{km}$), 60km 之上采用函数外推法求折射角, 之下则直接使用测量折射角。由于电离层残余误差的影响, $h=30\sim 60\text{km}$ 之间的测量折射角误差较大; 当采用大气模型对测量折射角进行修正时, 40~70km 之间为统计优化的过渡区间, 之内采用模型折射角, 之外采用测量折射角, 所以测量折射角的误差得到了较大控制。

由图 3 可见, 不采用大气模型对折射角进行

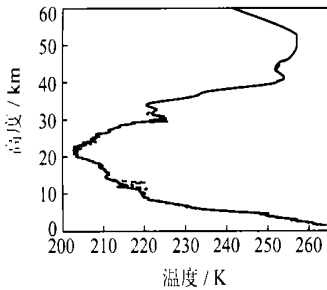


图 1 相位组合(虚线)与折射角组合(实线)进行电离层改正后反演的温度廓线

Fig. 1 Temperature Profiles Retrieved by Phase Combination and Bending Angle

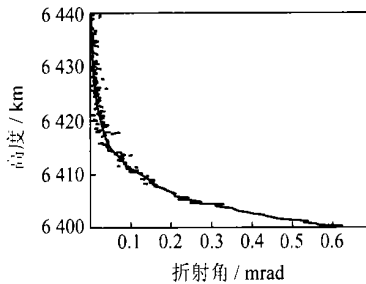


图 2 上边界不用模型(虚线)与采用模型(实线)修正后的折射角廓线

Fig. 2 Bending Angle Profiles not Corrected with Model and Corrected with Model

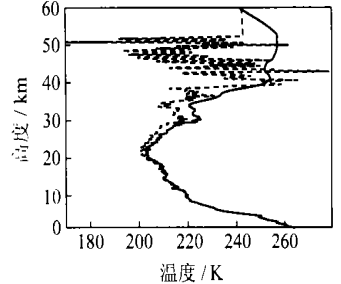


图 3 上边界不用模型(虚线)与采用模型(实线)修正后的温度廓线

Fig. 3 Temperature Profiles not Corrected with Model and Corrected with Model

修正的情况下, 折射角噪声影响到 20km 以上温度廓线的反演。当采用模型进行修正以后, 温度廓线的噪声得到了很大程度的削弱。与网上 UCAR 公布的结果比较发现, 差别主要体现在 40km 以上, 这主要是两者上部边界条件的选取不同造成的^[7]。

3 结 语

利用 GPS 掩星反演地球大气参数的研究在国际上一些研究机构已取得了比较显著的成果, 如奥地利 Graz 大学、美国 Arizona 大学、丹麦气象局等^[5,6,8]。我国在这个领域的起步相对较晚, 成果也比较少。GPS/MET 试验成功地验证了 GPS 掩星探测大气的概念, 目前国内外相关学者正在研究如何将掩星成果同化到数值天气预报模型

中^[10,11]。其他低轨卫星和星座为研究提供的更有价值的资料数据和试验条件, 将会进一步促进 GPS 在气象应用领域的发展。

致谢: 对奥地利 Graz 大学的地球物理、天体物理和气象研究所 (IGAM/UG) 提供的 EGOPS 软件和美国 UCAR 提供的资料数据表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Anthes RA, Rocken C, Kuo Y H. Applications of COSMIC to Meteorology and Climate. Special Issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science, 2000, 11(1): 115~156
- 2 Gorunov M E. Accuracy of the Refractometric Method in a Horizontally Nonuniform Atmosphere. Izv., Atmos. Ocean. Phys., 1988, 5: 381~384
- 3 Jens W, Christoph R, Georg B et al. Atmosphere Sounding by GPS Radio Occultation: First Results from CHAMP. Geophysical Research Letters 2001, 28(17): 3 263~3 266

- 4 Rocken C, Kuo Y H, Schreiner W, et al. COSMIC System Description. Special Issue of Terrestrial, Atmosphere and Oceanic Science, 2000, 11(1): 21~52
- 5 Syndergaard S. Retrieval Analysis and Methodologies in Atmospheric Limb Sounding Using the GNSS Radio Occultation Technique. [Ph. D Thesis]. Denmark: Danish Meteorological Institute, 1999
- 6 Rocken C, Anthes R, Exner M, et al. Analysis and Validation of GPS/MET Data in the Neutral Atmosphere. J. Geophys. Res., 1997, 102(D25): 29 849~29 866
- 7 Hocke K. Inversion of GPS Meteorology Data. Ann. Geophysicae, 1997, 15: 443~450
- 8 Steiner A K, Kirchengast G, Ladreiter H P. Inversion, Error Analysis and Validation of GPS/MET Occultation Data. Ann. Geophysicae, 1999, 17: 122~138
- 9 Liu Y A, Huang C Y. Development of the Retrieval Algorithms for Atmospheric Refractivity from GPS/MET Occultation. ACRS 2000 Conference, 2000
- 10 Kuo Y H, Sokolovskiy S, Anthes R A, et al. Assimilation of GPS Radio Occultation Data for Numerical Weather Prediction. Special Issue of Terrestrial, Atmosphere and Oceanic Science, 2000, 11(1): 157~186
- 11 Kursinski E R, Hajj G A. A Comparison of Water Vapor Derived from GPS Occultations and Global Weather Analyses. J. Geophys. Res., 2001, 106 (D1): 1 113~1 138
- 12 蒋 虎. 空基 GPS 遥感地球大气参数方法研究. 测绘学报, 2001, 30 (3): 238~241

第一作者简介: 徐晓华, 博士生。现主要从事 GPS 气象学方面的研究。

E-mail: xhxu@sgg.wtusm.edu.cn

Inversion of Earth's Neutral Atmospheric Parameters and Bending Angles with GPS Occultation Data

XU Xiaohua¹ LI Zhenghang¹ LUO Jia¹

(1 School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan, China 430079)

Abstract: The theory and the procedure of inversion of Earth's neutral atmospheric parameters and bending angles with GPS Occultation data with Abel integral method are introduced. Based on the theory, two methods of ionospheric correction, linear phase correction and linear bending angle correction, are described. Two approaches to determine the upper bound of Abel inversion are discussed. The method for optimizing the measured bending angles on the upper bound are also analyzed. Pre-processing steps of Level 2 data of UCAR, including transferring the coordinates of GPS and LEO satellites from the coordinate system of ECI to ECEF and low-pass filtering of the phase delay data, are discussed. Last, the computation with data of certain occultation event is done and the results are analyzed. Some conclusions have been drawn.

Key words: GPS occultation; inversion; neutral atmospheric parameters; bending angles

About the first author: XU Xiaohua, Ph. D candidate. She is concentrated on the research in GPS meteorology.

E-mail: xhxu@sgg.wtusm.edu.cn

(责任编辑: 平子)