

上边界的选取对 GPS 掩星反演结果影响的分析

曲建光^{1,2}, 郝燕玲¹

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江工程学院 测绘工程系, 黑龙江 哈尔滨 150050)

Analysis of Influence of Upper Boundary on GPS Occultation Retrieval Results

QU Jian-guang, HAO Yan-ling

摘要:介绍利用 GPS 掩星数据反演大气参数的方法。对 GPS/MET 和 CHAMP 数据不同上边界和统计优化方法的反演结果进行研究和分析,并与 UCAR, GFZ 网上公布的结果进行对比,指出合理的上边界条件。

关键词:掩星;大气参数;GPS/MET;CHAMP

一、引言

1995年4月,由美国大学大气研究联合会(UCAR)主持的利用无线电掩星技术探测地球大气的GPS/MET试验进入了实施阶段。通过对GPS/MET试验中掩星数据的处理和分析,成功地反演出了大气折射率廓线、温度廓线及电子密度廓线等,证明了利用GPS无线电掩星技术探测大气的可行性^[1,2]。其后阿根廷的SAC-C、德国的CHAMP和GRACE、我国台湾的COSMIC等掩星实验进一步成功验证了利用GPS无线电掩星技术探测大气的可行性^[3]。

在掩星数据处理中可以采用不同的反演方法进行大气参数的反演,目前各个掩星数据处理中心主要是采用几何光学反演方法。本文将通过GPS/MET和CHAMP数据的计算结果,讨论几何光学反演中上边界条件对反演结果的影响。

二、反演原理

GPS卫星所发出的无线电信号穿过大气层,到达低轨(LEO)卫星上的GPS接收机,就发生了掩星事件。由于传播介质的密度不同,信号在传播过程中会发生折射,因此在大气中传播路线会产生弯曲和延迟,其几何关系如图1所示。如果假设是球对称大气,有下列关系式^[4]

$$\frac{d\Delta L_i}{dt} = -(V_C \cos(\varphi_C - \delta_C) + V_L \cos(\varphi_L - \delta_L)) - (V_C \cos \varphi_C + V_L \cos \varphi_L) \quad (1)$$

式中, $i=1$ 或 2 , 代表载波 L_1 或 L_2 ; ΔL_i 代表大气附加

延迟; V_L, V_C 分别为 LEO 和 GPS 卫星速度在掩星平面内的投影; φ_L, φ_C 是 V_L, V_C 与 LEO 卫星至 GPS 卫星连线的夹角; δ_L, δ_C 是入射信号路径、出射信号路径与 LEO 卫星至 GPS 卫星连线的夹角。

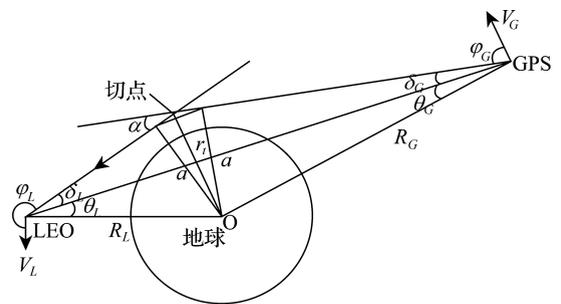


图1 掩星的几何图形及有关变量

根据 Snell 法则有下式:

$$a = R_L \sin(\theta_L + \delta_L) = R_C \sin(\theta_C + \delta_C) \quad (2)$$

式中, R_L, R_C 分别为 LEO 和 GPS 卫星的地心向径; a 是射线路径的影响参数; θ_L, θ_C 是 LEO 卫星至 GPS 卫星连线与 LEO 卫星、GPS 卫星至折射中心连线的夹角。

从图1可知总折射角 α 和 δ_L, δ_C 的关系为

$$\alpha = \delta_L + \delta_C \quad (3)$$

因此对式(1)和式(2)进行迭代计算解算出 δ_L, δ_C 后,即可推算出 a 和 α 。

求出折射角 α (a) 随影响参数变化的廓线,则可利用 Abel 积分的逆变换求得大气折射率 $n(a)$ 随影响参数变化的廓线,其方程如下^[5]

$$\ln(n(a_i)) = \frac{1}{\pi} \int_{a=a_i}^{a=\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_i^2}} da \quad (4)$$

式中, $n(a_i)$ 是第 i 条射线路径在其切点处的折射率; a_i 是第 i 条射线路径的影响参数。

在理想大气的情况下, 利用大气状态方程, 即可由大气折射率推算出大气密度、温度、气压等大气参数。

三、上边界条件的确定

1. 测量折射角的上边界的确定

随着高度的增加, 大气折射角呈指数性减小, 而残余电离层误差的影响越来越大。此外, 在 50 km 以上大气折射引起的附加相位延迟要小于 10 cm, 也使得 GPS 接收机的热噪声、时钟误差和轨道误差的影响更加明显, 从而限制了测量的精度。这些因素使得在 50 ~ 60 km 以上高度的反演折射角的误差超过了 100% [2], 因此需要确定测量折射角的一个合适的上边界。如果假设反演折射角的上边界对应的影响参数和高度分别为 a_U 和 h_U , 则式(4)可以写为

$$\ln(n(a_i)) = \frac{1}{\pi} \int_{a=a_i}^{a=a_U} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_i^2}} da + \frac{1}{\pi} \int_{a=r_E+110 \text{ km}}^{a=r_E+110 \text{ km}} \frac{\alpha_m(a)}{\sqrt{a^2 - a_i^2}} da \quad (5)$$

式中, $r_E < a_i < a_U$, $r_E + 45 \text{ km} < a_U < r_E + 60 \text{ km}$, r_E 是掩星平面内地球的半径; $\alpha_m(a)$ 是模型折射角, 通常是根根据 MSISE-90 模型给出的大气密度数据计算的。

2. 统计优化法

统计优化法不是采用一个固定的 h_U , 而是采用一个高度范围, 通过加权计算的方式实现由测量折射角 α 向模型折射角 α_m 的过渡, 这样在上边界高度以上改正后的折射角是平滑的。改正后的折射角 $\bar{\alpha}$ 可以表示为 [2]

$$\bar{\alpha} = \alpha_m + C(\alpha - \alpha_m) = C\alpha + (1 - C)\alpha_m \quad (6)$$

C 值一般取 0.3 ~ 0.5 比较合适, 对应的高度区间是 40 ~ 60 km 左右。

四、GPS 掩星数据反演结果的分析

本文采用不同的上边界和统计优化的方法对 GPS/MET(0020_05_27_95_175) 和 CHAMP(2001_147_00_0001) 掩星数据进行了处理, 并以 GPS/MET 数据为例说明上边界的选取对反演结果的影响。由于 UCAR 公布的结果是经过气象资料验证的, 精度是可靠的, 因此可以作为比较的基准值。图 2 给出了不同的上边界反演温度与 UCAR 公布的温度的差值。从图 2 中可以看出上边界 $h_U = 55 \text{ km}$ 的反演温度与 UCAR 公布的温度最接近, 也就是说最符合实际的天气情况。在 40 km 以下温度的差值均小于 2 K; $h_U = 60 \text{ km}$ 时, 在 40 km 以下的温度差值大约小于 3 K; $h_U = 50 \text{ km}$ 时, 在 40 km 处的温度差值已经达到 12 K 左右; 而在 $h_U = 45 \text{ km}$ 时, 在 40 km 处的温度差值已经超过了 20 K。显然选取不同的 h_U 反演结果差别很大, 将影响到大气参数的反演精度。

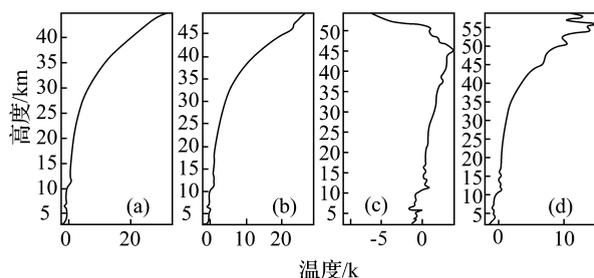


图 2 h_U 分别取为 45 km (a), 50 km (b), 55 km (c) 和 60 km (d) 时的反演温度与 UCAR 公布的温度的差值

在温度反演过程中, 通常采用 MSISE-90 模型给出的在高度 h_U 处的模型温度作为其上边界条件, 即有 $T_U = T_{\text{MSISE-90}}(h_U)$ 。因此分析温度上界 T_U 的变化情况将有助于选取合适的 h_U 。表 1 列出了各种上边界高度对应的温度上界 T_U 及其相邻的温度值。各种上边界反演的温度廓线见图 3。

表 1 各种上边界高度对应的温度上界及其相邻的温度值

$h_U = 45 \text{ km}$		$h_U = 50 \text{ km}$		$h_U = 55 \text{ km}$		$h_U = 60 \text{ km}$	
高度/km	温度/K	高度/km	温度/K	高度/km	温度/K	高度/km	温度/K
45	281.9	50	282.6	55	273.8	60	259.3
44.8	312.003	49.8	312.715	54.8	274.545	59.8	
44.6	307.407	49.6	311.474	54.6	274.294	59.6	290.503
44.4	304.905	49.4	310.899	54.4	273.717	59.4	290.265
44.2	303.006	49.2	310.798	54.2	272.395	59.2	290.100
44	301.655	49	310.589	54	270.775	59	289.846

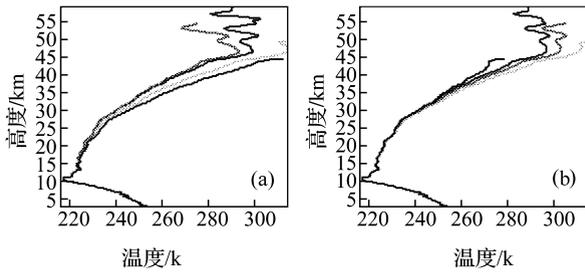


图3 GPS/MET 数据优化前反演的温度廓线(a)和优化后反演的温度廓线(b)

从表1中可以看出在 $h_U = 45$ km, 50 km 和 60 km 时模型温度 T_U 与下层相邻温度的变化趋势是不一致的, 与相邻温度的差值均达到了 30 K 左右; 而在 $h_U = 55$ km 时模型温度 T_U 与下层相邻温度的变化趋势是比较一致的, 与相邻的温度值只相差 0.7 K。 $h_U = 55$ km 时反演的温度廓线最接近 UCAR 公布的温度廓线, 笔者认为这主要是因为 T_U 的值接近反演温度的变化趋势, 能在反演时很好地控制温度的走向使其接近于温度的真值, 相应的 h_U 也是一个比较合理的上边界高度。如果 T_U 的值与温度变化的趋势不一致, 产生了突变, 显然是不合理的, 将会导致反演结果偏离真实的值。

图3和图4给出了GPS/MET数据和CHAMP数据不同上界优化前后的温度廓线。从图中可以看出用GPS/MET数据反演的温度廓线优化后明显地收拢, 即优化后比优化前更趋于一致, 受高度上界的

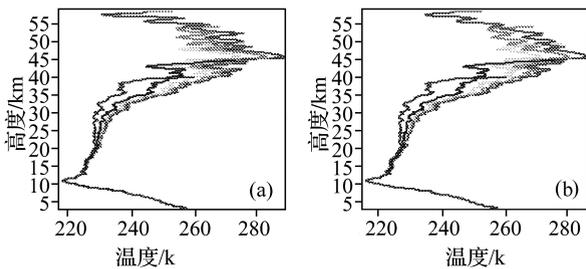


图4 CHAMP 数据优化前反演的温度廓线(a)和优化后反演的温度廓线(b)

影响要明显地小于优化前。而利用CHAMP数据反演的温度廓线优化后变化较小, 优化的效果并不明显。这说明统计优化的方法对不同的数据敏感程度也是不同的, 对CHAMP数据是否能有效地削弱 h_U 的影响, 还需要进一步的验证。

五、结束语

高度上边界 h_U 的选取对反演温度的精度有很大的影响, 因此只有选取合理的上边界 h_U , 才会得到符合实际情况的反演结果。通过分析和比较上层温度的变化趋势可以得到一个相对合理的上边界 h_U 。统计优化的方法能较好地弱化上边界 h_U 对GPS/MET数据反演结果的影响, 但对CHAMP等其他掩星数据反演结果的影响还有待进一步的研究和验证。

致谢: 感谢 UCAR 和 GFZ 提供的掩星数据。

参考文献:

- [1] STEINER A K, KIRCHENGAST G, LADREITER H P. Inversion, Error Analysis, and Validation of GPSMET Occultation Data[J]. *Annales Geophysicae*, 1999, 17: 122-138.
- [2] HOCKE K. Inversion of GPS Meteorology Data[J]. *Annales Geophysicae*, 1997, 15: 443-450.
- [3] CUCURULL L, KUO Y H, BARKER D, *et al.* Assessing the Impact of Simulated COSMIC GPS Radio Occultation Data on Weather Analysis over the Antarctic: A Case Study[J]. *Monthly Weather Review*, 2006, 134(11): 3 283-3 296.
- [4] HAJJ G A, KURSINSKI E R, ROMANS L J, *et al.* A Technical Description of Atmospheric Sounding by GPS Occultation[J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2002, 64: 451-469.
- [5] FJEDBO G, KLIORÉ A R, ESHELMAN V R. The Neutral Atmosphere of Venus as Studied with the Mariner V Radio Occultation Experiments[J]. *Astron. J.*, 1971, 76: 123-140.