

# GPS 掩星一维弯曲角算子在四维变分资料同化系统中的实现方法研究\*

朱孟斌<sup>†</sup> 张卫民 曹小群

(国防科学技术大学计算机学院, 长沙 410073)

(2013年5月1日收到; 2013年6月4日收到修改稿)

GPS 无线电掩星资料的良好特性使其作为十分重要的观测资料在欧洲及美国数值天气预报中效果明显. 本文设计了一维弯曲角算子在四维变分资料同化系统中的实现方法和质量控制策略. 详细阐述了一维弯曲角正演算子及其切线性/伴随算子在全球四维变分资料同化系统中的实现步骤和过程, 其中折射率计算中采用 Rüeiger 的折射率最佳平均因子的三项表达式, 计算出更加精确的折射率值. 对 2012 年 8 月份的 GPS 无线电掩星资料进行了观测误差统计, 引入了更加符合四维变分资料同化系统实际情况的一维弯曲角观测误差模型和质量控制策略. 同时, 对比了观测误差统计试验中同化 GPS 无线电掩星资料的模式背景场和未同化 GPS 无线电掩星资料的背景场的观测误差统计结果, 发现同化 GPS 无线电掩星资料之后的观测误差统计结果在全球区域正作用十分明显, 尤其是在中低纬度地区, 高度在 10 km 以上的区域观测误差减小十分明显.

**关键词:** GPS 无线电掩星, 一维弯曲角算子, 四维变分同化系统, 质量控制

**PACS:** 92.60.Wc, 95.10.Gi, 04.20.Fy, 92.60.hv

**DOI:** 10.7498/aps.62.189203

## 1 引言

GPS 无线电掩星观测技术利用卫星及地球的相互运动, 以及电磁波与大气的相互作用而引起的无线电波附加相位延迟和振幅变化, 从而获取无线电波因大气折射梯度造成的弯曲角廓线, 或者在地球大气局部球对称假设下, 利用 Abel 积分变换反演得到大气折射率廓线. GPS 无线电掩星观测由于具有准实时、不受云雨影响、高垂直分辨率、不需要校验和平均分布于全球等优良特性, 已经在改善数值天气预报模式的温度、湿度以及其他要素的初始场质量方面起到了重要作用. 图 1 是欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 利用观测资料敏感性试验给出的各种观测资料对同化系统同化效果的贡献值 (2011 年 6 月), 表明掩星观测资料的贡献值仅次于微波温度和红外高光谱, 超过了高空报和飞机

报<sup>[1]</sup>. 同时 ECMWF 观测资料控制试验表明, GPS 掩星资料对全球 100 hPa 温度预报效果的改进十分明显<sup>[2]</sup>.

GPS 无线电掩星资料同化通常采用弯曲角或折射率观测资料. 从原理上讲, 在地球大气局部球对称假设下, 由于弯曲角与折射率可以通过 Abel 变换相互转换, 对弯曲角或折射率廓线资料进行同化得到的结果应当是相同的. 但是在实际计算过程中, 弯曲角同化比折射率同化更有优势: 首先弯曲角资料更为原始, 是由原始观测的光学路径长度直接得到, 具有相对简单的观测误差特性, 资料处理早期就引入先验信息, 从而减少了物理假设的误差; 其次是避免了在折射率廓线计算的 Abel 逆积分过程中, 由于 Abel 积分的不适定性导致的弯曲角观测误差在折射率误差上的扩散, 以及 Abel 弱奇性核在数值计算离散过程中造成的不必要的误差的问题.

\* 国家自然科学基金 (批准号: 40775064, 41105063) 和公益性行业 (气象) 科研专项基金 (批准号: GYHY201006015, GYHY201206007) 资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: zhumengbin@nudt.edu.cn

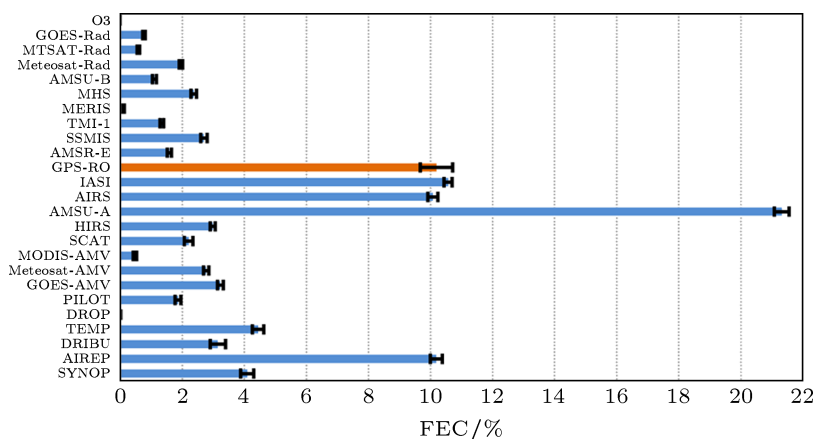


图1 ECMWF 系统各种观测资料的贡献值 (引自 ECMWF Seminar 2011)

到目前为止,对 GPS 掩星资料同化已开展了大量的研究,欧洲和美国最早开始研究 GPS 掩星气象学. ECMWF 于 2006 年在四维变分同化业务系统中实现了一维弯曲角资料同化方法, Healy 和 Thépaut<sup>[3]</sup> 的试验表明, GPS RO 弯曲角资料能提供高准确度的温度信息,并证明有助于提升温度预报的准确度,特别是南半球 300 到 50 hPa 高度的区域. NCEP 的 Cucurull<sup>[4]</sup> 研究了弯曲角资料应用到 GFS 三维变分同化的方法,提出了 NBAM 算子,改进了业务系统的同化效果.

本文主要研究一维弯曲角算子在全球气象资料四维变分同化系统 (YH4DVAR) 中的实现方式和方法,以及质量控制策略的选择<sup>[5-7]</sup>,第 2 节和第 3 节分别给出了 GPS 掩星一维弯曲角正演算子和切线性/伴随算子的设计,第 4 节引入了 GPS 掩星弯曲角观测误差特性模型和质量控制策略,第 5 节给出了 YH4DVAR 在同化 GPS 掩星弯曲角资料后的统计观测误差对比试验情况分析,第 6 节对主要结论进行了总结并对未来的工作计划进行了详细阐述.

## 2 GPS 掩星一维弯曲角算子设计

GPS 掩星弯曲角是无线电穿过大气层后引起的路径整体变化. 假设不考虑无线电经过路径上大气环境的水平梯度变化,并且满足球对称假设,则可以得到一维弯曲角观测算子:

$$\alpha = H_A F_I H_N(T, p, q), \quad (1)$$

其中,  $H_N(T, p, q)$  为利用模式网格点上的温度、压强和湿度计算折射率,  $F_I$  表示将模式面上折射率插

值到射线近地面切点位置上,  $H_A$  表示根据近地面切点位置的折射率利用 Abel 变换计算弯曲角.

### 2.1 折射率计算

忽略非理想气体的影响,大气折射率  $N$  的计算公式  $H_N(T, p, q)$  可以近似为一个三项表达式:

$$N = k_1 \frac{P}{T} + k_2' \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2}, \quad (2)$$

其中  $P$  是整体大气压 ( $P = P_d + e$ ),  $e$  是水汽压力分量 (hPa),  $T$  是温度 (K), 其中系数  $k_1, k_2$  和  $k_3$  通过经验得到<sup>[8]</sup>.

此前, GPS 气象社区广泛采用的是 Smith 和 Weintraub 于 1953 年 (SW53) 利用试验得到两项近似表达式<sup>[9]</sup>:

$$N \approx \frac{77.6P}{T} + \frac{3.73 \times 10^5 e}{T^2}. \quad (3)$$

最近的一些研究工作正致力于通过修正该计算公式增加折射率计算精度. 其中, Rüeger 在 2002 年 (RU02) 采用了相近的统计学分析方法,产生了一组新的最佳平均折射率因子, Rüeger 对试验数据进行重分析后同时考虑到大气中二氧化碳的含量从 0.03% 上升到 0.0375%, 给出折射率计算公式<sup>[10]</sup>:

$$N = \frac{77.6890P}{T} - \frac{6.3896e}{T} + \frac{3.75463 \times 10^5 e}{T^2}. \quad (4)$$

GPS 掩星观测资料具有非常高的时间和空间分辨率,对时间和空间变化极其敏感,所以需要采用更加精确的折射率三项表达式和最佳平均折射率因子计算得到更加精确的各垂直层折射率的值.

## 2.2 折射率从模式面到射线近地面切点的插值

YH4DVAR 在垂直方向采用的是混合 sigma 坐标, 温度、压强和比湿这些大气状态量被定义在 sigma 模式面上, 如图 2 所示. 而 GPS 掩星获取的弯曲角观测资料是定义在几何高度上, 背景场位势高度  $Z$  上计算的折射率值  $N$  需要插值到观测高度, 以便直接和观测量进行比较, 因此弯曲角观测算子需要设计将模式面上折射率插值到射线近地面切点位置上的算子  $F_l$ .

图 2 显示的是垂直模式层结构, 大气被分成了  $NLEV$  层, 在模式层上定义了温度  $T$  和比湿  $q$ . 模式层是通过层与层之间接触面 (半层) 的压强进行的定义.

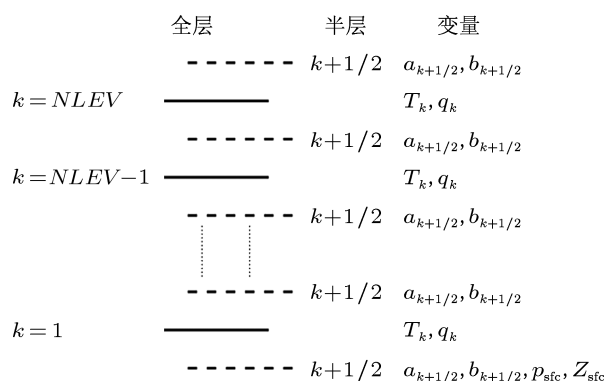


图 2 背景场垂直层结构示意图

所有半层大气压强不是直接存储的, 而是通过表面气压  $p_{sfc}$  和系数  $a_{k+1/2}, b_{k+1/2}$  计算得出:

$$p_{k+1/2} = a_{k+1/2} + b_{k+1/2} p_{sfc}, \quad (5)$$

其中  $0 \leq k \leq NLEV$ . 这样每个模式层气压就能利用 (6) 式计算得到:

$$pres = \frac{1}{2}(p_{k-1/2} + p_{k+1/2}), \quad (6)$$

其中  $1 \leq k \leq NLEV$ , 系数  $a_{k+1/2}, b_{k+1/2}$  是模式层大气压强预定义数据.

对于每一个观测层  $k$ , 输出折射率  $refrac$  利用 (7) 式进行计算:

$$\ln(refrac(k)) = \ln(N_j) + \frac{geop(k)_y - geop(j)_x}{geop(j-1)_x - geop(j)_x} \times (\ln(N_{j-1}) - \ln(N_j)), \quad (7)$$

其中观测层  $k$  在背景场模式层  $j-1$  和  $j$  之间.

## 2.3 弯曲角廓线计算

假定地球大气状态呈 (近似) 球对称分布, 弯角 (作为影响参数  $a$  的函数) 与折射率指数 (作为半径  $r$  的函数) 之间具有一一对应的函数关系, 如 (8) 式所示 [11]:

$$\alpha(a) = -2a \int_{r_1}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 n^2 - a^2}} \frac{d \ln(n)}{dr} dr. \quad (8)$$

将  $x = nr$  代入 (8) 式, 折射率的值非常小, 近似为  $\frac{d \ln(n)}{dx} \approx 10^{-6} \frac{dN}{dx}$ . 同时, 折射率标高相对于地球半径也可忽略,  $\sqrt{x^2 - a^2} \approx \sqrt{2a(x-a)}$ .

从而 (8) 式可以简化为

$$\alpha(a) = -\sqrt{2a} 10^{-6} \int_a^{\infty} \frac{1}{\sqrt{x-a}} \frac{dN}{dx}. \quad (9)$$

假定折射率在背景场垂直层之间随着  $x = nr$  以指数形式变化, 这样可以得到  $j$  和  $j+1$  层之间折射率梯度的计算公式:

$$\frac{dN}{dx} = -k_j N_j \exp(-k_j(x-x_j)), \quad (10)$$

其中,  $k_j = \frac{\ln(N_j/N_{j+1})}{(x_{j+1}-x_j)}$  并且  $k_j$  的值需要为正, 其最小正值

为  $k_j^{\min} = 10^{-6}$ , 一个更严格的约束是  $k_j$  不能大于  $0.157N_j$ , 以避免当大气接近超折射状态时在四维变分同化系统中遇到非线性问题.

从而可以得到在  $j$  和  $j+1$  层之间的弯曲角表达式:

$$\Delta \alpha_j = 10^{-6} k_j N_j \exp(-k_j(x_j-a)) \times \sqrt{2a} \int_{x_j}^{x_{j+1}} \frac{\exp(-k_j(x-a))}{\sqrt{x-a}} dx. \quad (11)$$

进一步利用变量变换得到:

$$\Delta \alpha_j = 10^{-6} \sqrt{2\pi a} k_j N_j \exp(-k_j(x_j-a)) \times \left[ erf\left(\sqrt{k_j(x_{j+1}-a)}\right) - erf\left(\sqrt{k_j(x_j-a)}\right) \right], \quad (12)$$

其中误差方程  $erf(x)$  表示为  $erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ .

在确定的一个影响参数下通过加和在  $a$  和背景场廓线的最高处之间的每一层的贡献值得到总弯角值.

### 3 GPS 掩星一维弯曲角的切线性/伴随算子设计

YH4DVAR 采用的是多增量四维变分同化方法, 代价函数是以增量的形式进行最小化的, 最小化的过程中计算增量更新时, 需要将非线性的弯曲角算子线性化, 因此需要引入切线性算子, 计算代价函数梯度时则需要引入切线性算子的伴随模式.

切线性算子及其伴随算子一直是四维变分同化方法实现中的技术难点, 尤其是伴随算子的实现. 根据以上正演算子的设计, 一维弯曲角的切线性算子设计如下.

1) 计算位势高度和几何高度的切线性. 因为位势高度是大气压强和温度的一个函数, 大气压强和温度是背景场提供的. 几何高度

$$h = \frac{R_{\text{earth}} \times \text{geop}}{\frac{g_{\text{sfc}}}{g_{\text{wmo}}} \times R_{\text{earth}} - \text{geop}},$$

那么几何高度的切线性模式为

$$h_{\text{tl}} = \text{geop}_{\text{tl}} \times \left( \frac{R_{\text{earth}}}{(g_{\text{sfc}}/g_{\text{wmo}}) \times R_{\text{earth}} - \text{geop}} + \frac{R_{\text{earth}} \times \text{geop}}{((g_{\text{sfc}}/g_{\text{wmo}}) \times R_{\text{earth}} - \text{geop})^2} \right). \quad (13)$$

2) 计算折射率函数的切线性, 折射率  $N$  的公式为 (4) 式, 那么 (4) 式的切线性算子为

$$N_{\text{tl}} = \frac{k_1(P_{\text{tl}} - e_{\text{tl}})}{T} + \frac{k_2 e_{\text{tl}}}{T^2} + \frac{k_3 e_{\text{tl}}}{T} - \left( \frac{k_1 P_d}{T^2} + 2 \frac{k_2 e}{T^3} + \frac{k_3 e}{T^2} \right) \times T_{\text{tl}}, \quad (14)$$

其中  $P_{\text{tl}}$  是大气的切线性值,  $e_{\text{tl}} = e \times \left( \frac{P_{\text{tl}}}{P} + \frac{q_{\text{tl}}}{q} - \frac{q_{\text{tl}} \times e \times (1 - \varepsilon)}{P \times q} \right)$ ,  $e_{\text{tl}}$  是水汽分压的切线性值.

3) 计算影响因子的切线性公式为

$$\text{impact}_{\text{tl}} = 10^{-6} \times N_{\text{tl}} \times (h + \text{roc} + \text{undulation}) + h_{\text{tl}} \times (1.0 - 10^{-6} \times N). \quad (15)$$

4) 计算弯曲角  $\alpha$  的切线性公式, 参考正演算子中一维弯曲角的求取过程, 可以得到切线性算子. 首先定义 Abel 变换的切线性算子, 然后记:

$$\text{factor} = 10^{-6} \times \sqrt{2\pi a} \exp(k_j(x_j - a)), \quad (16a)$$

$$\begin{aligned} \text{Zerf} &= \text{erf}\left(\sqrt{k_j(x_{j+1} - a)}\right) \\ &\quad - \text{erf}\left(\sqrt{k_j(x_j - a)}\right), \end{aligned} \quad (16b)$$

则可以得到:

$$\alpha_{\text{tl}} = \alpha_{\text{tl}} + x_{j\text{tl}} \times \text{factor} \times \sqrt{k_j} \times N_j \times \text{Zerf} \times k_j$$

$$\begin{aligned} &+ \text{Zerf}_{\text{tl}} \times \text{factor} \times \sqrt{k_j} \times N_j \\ &+ k_{j\text{tl}} \times \text{factor} \times N_j \times \text{Zerf} \\ &\times \left( \frac{0.5}{\sqrt{k_j}} + \sqrt{k_j} \right) \times (x_j - \text{impact}) \\ &+ N_{j\text{tl}} \times \text{factor} \times \sqrt{k_j} \times \text{Zerf}. \end{aligned} \quad (16c)$$

伴随算子是切线性算子的转置, 是切线性算子计算过程的逆过程, 虽然是逆过程, 但是其复杂程度要远远大于切线性算子. 一维弯曲角的伴随算子的设计如下.

1) 利用  $\alpha$  角的伴随模式, 评估对于每一个影响因子参数的弯曲角积分, 首先对于每一个影响因子评估弯曲角积分, 然后计算模式层之间折射率及  $nr$  的指数级衰减, 通过 Abel 变换的伴随算子得到  $nr_{\text{ad}}$ .

2) 通过得到的模式层上折射率指数和半径的乘积  $nr_{\text{ad}}$ , 计算模式层上的几何高度和半径的伴随模式, 其中需要注意的是半径是用来将位势高度转换到几何高度, 同时重力加速度是随着纬度发生变化的.

$$N_{\text{ad}} = N_{\text{ad}} + 10^{-6} \times nr_{\text{ad}} \times (h + \text{roc} + \text{undulation}), \quad (17)$$

$$h_{\text{ad}} = h_{\text{ad}} + nr_{\text{ad}} \times (1.0 + 10^{-6} \times N), \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \text{geop}_{\text{ad}} &= \text{geop}_{\text{ad}} + h_{\text{ad}} \\ &\times \frac{R_{\text{earth}}}{(g_{\text{sfc}}/g_{\text{wmo}}) \times R_{\text{earth}} - \text{geop}} \\ &+ \frac{R_{\text{earth}} \times \text{geop}}{((g_{\text{sfc}}/g_{\text{wmo}}) \times R_{\text{earth}} - \text{geop})^2}, \end{aligned} \quad (19)$$

$$P_{\text{dry-ad}} = P_{\text{dry-ad}} + \frac{N_{\text{ad}} k_1}{T}, \quad (20)$$

$$e_{\text{ad}} = e_{\text{ad}} + N_{\text{ad}} \times \left( \frac{k_2}{T^2} + \frac{k_3}{T} \right), \quad (21)$$

其中,  $\text{geop}_{\text{ad}}$  是模式层的位势高度的伴随值,  $h_{\text{ad}}$  是模式层几何高度伴随值,  $P_{\text{dry-ad}}$  是干气压的伴随值,  $e_{\text{ad}}$  是部分水汽压的伴随值.

3) 最后通过以上干气压的伴随值、湿气压的伴随值, 计算得到温度、气压和比湿的伴随算式:

$$T_{\text{ad}} = T_{\text{ad}} - N_{\text{ad}} \times \left( \frac{k_1 P_{\text{dry}}}{T^2} + 2 \frac{k_2 e}{T^3} + \frac{k_3 e}{T^2} \right), \quad (22)$$

$$P_{\text{ad}} = P_{\text{ad}} + e_{\text{ad}} \times \left( \frac{q}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q} \right), \quad (23)$$

$$\begin{aligned} q_{\text{ad}} &= q_{\text{ad}} + e_{\text{ad}} \\ &\times \left( \frac{P}{\varepsilon + (1 - \varepsilon)q} - \frac{P \times q \times (1 - \varepsilon)}{(\varepsilon + (1 - \varepsilon)q)^2} \right), \end{aligned} \quad (24)$$

$$GEOP_{ad} = GEOP_{ad} + geop_{ad}, \quad (25)$$

### 4 GPS 掩星弯曲角误差特性和质量控制

合理有效的质量控制需要根据观测资料和观测算子的误差特性进行设计, 对同化系统得到的残差  $H(x_b) - y_0$  进行统计是进行观测与观测算子误差特性研究的常用方法. 将第 2, 3 节定义的一维弯曲角正算子和切线性伴随算子在 YH4DVAR 中实现, 然后利用实际观测计算弯曲角残差, 其统计方法是采用 Desroziers<sup>[12]</sup>2005 年的方法, 并针对弯曲角进行了相应改动. 针对  $\alpha_{re} = (\alpha_{obs} - \alpha_{model})/\alpha_{obs}$  的值, 对 2012 年 8 月 1 日到 8 月 31 日的 GPS 掩星观测数据和模式背景场数据进行统计分析, 利用一维弯曲角正演算子和模式背景场数据计算得到  $\alpha_{model}$  的值. 由于受到背景场时次的限制, 每天统计八个时次, 每个时次统计观测的时间间隔为 30 min, 这与 GPS 掩星观测资料进行四维变分同化的时间步长相等. 观测数据在垂直方向上严格插值到经过简化之后的模式层上, 背景场数据水平方向上线性插值到观测点处, 此处忽略了 GPS 掩星观测数据的切点漂移现象. 统计采用计算得到每个时次的偏差比值的平均值  $\bar{\alpha}_{re}$ , 然后再计算所有时次偏差比值平均值  $\bar{\alpha}_{re}$  的标准偏差, 得到最后相应的标准偏差的值. 统计所需的观测资料来自于 COSMIC-1/4/6 号星, CHAMP 卫星, GRACE-A 卫星及 METOP 卫星. 图 3—7 分别是热带低纬度和南北半球中高纬度地区的弯曲角残差统计廓线.

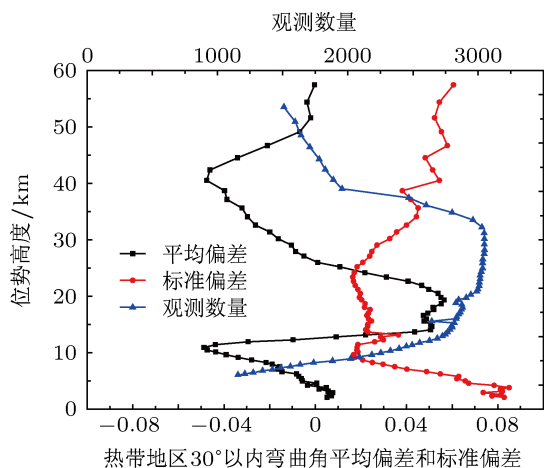


图 3 2012 年 8 月热带地区 30° 以内弯曲角平均偏差和标准偏差统计

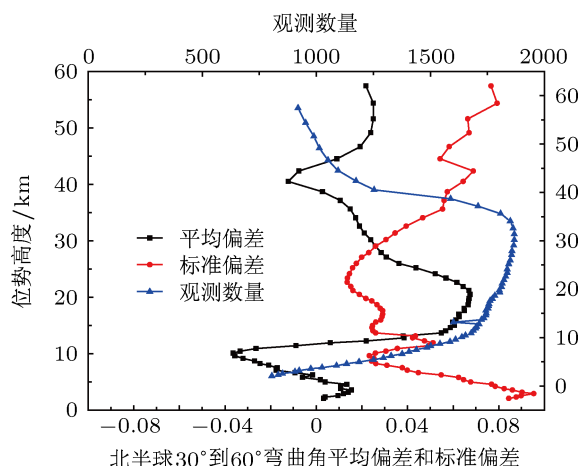


图 4 2012 年 8 月北半球 30° 到 60° 以内弯曲角平均偏差和标准偏差统计

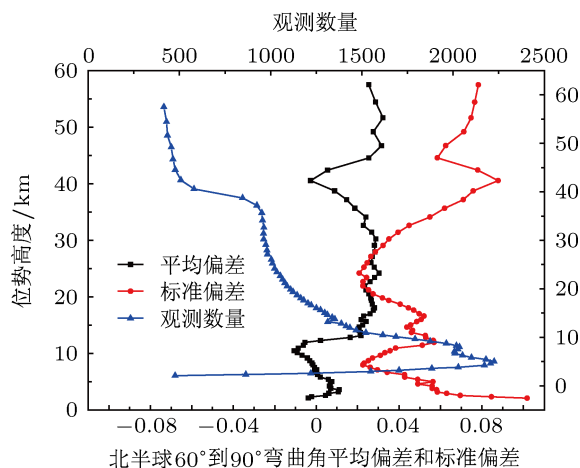


图 5 2012 年 8 月北半球 60° 到 90° 以内弯曲角平均偏差和标准偏差统计

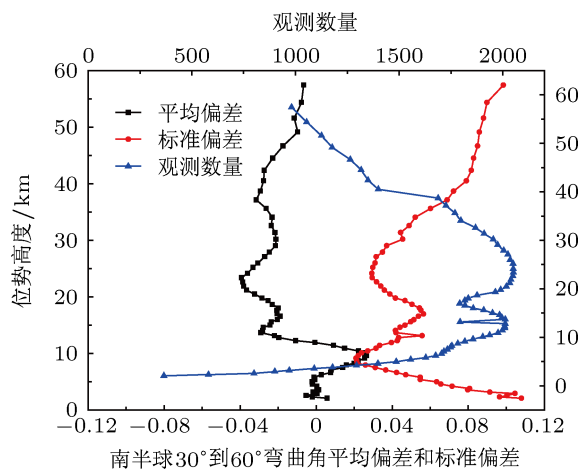


图 6 2012 年 8 月南半球 30° 到 60° 以内弯曲角平均偏差和标准偏差统计

本文只列出了 2012 年 8 月的统计结果, 实际上

一年中的其他月份的统计结果也是类似的. 根据以上统计结果, 设计 GPS RO 弯曲角资料的质量控制策略. 首先进行观测高度范围的控制. 现在 GPS 掩星观测的高度可以达到 60 km 以上, 不同高度的掩星资料的观测误差的标准偏差不同, 因此其可信度不同. 我们设定了一个高度范围, 在这个范围以外的掩星观测资料就会被拒绝. 在折射率同化观测资料质量控制方案中, 这个高度一般设定为 30 km, 利用 YH4DVAR 进行的弯曲角观测试验表明, 50 km 以下弯曲角观测的可信度非常高, 因此将弯曲角高度限制在 50 km. 同时, 2 km 以下的弯曲角观测误差标准差非常大, 观测数量也非常少, 所以在 2 km 以下的所有观测都会被拒绝.

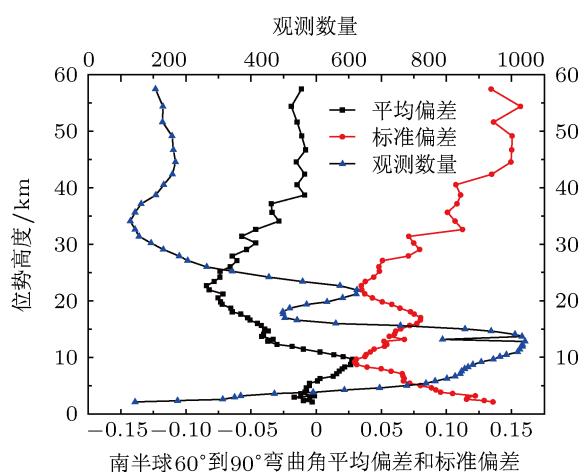


图7 2012年8月南半球60°到90°以内弯曲角平均偏差和标准偏差统计

根据以上统计结果, 采用预定义的误差百分比设计弯曲角观测误差模型, 弯曲角观测误差随着纬度和高度变化. 弯曲角观测误差模型定义如下:

$$\begin{aligned} \text{latitude} &= (/0, 30, 60, 90/) \\ \text{frac} &= (/0.2, 0.2, 0.25, 0.3/) \\ \text{ilev} &= \text{MAXVAL}(\text{WHERE}(\text{ABS}(\text{lat}(j)) \\ &> \text{latitude}(1:4))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_{\text{bangle}}(j) &= \text{frac}(\text{ilev}) + (0.002 - 0.2) \\ &\times \min(\text{impact}(j)/10000.0, 1.0) \end{aligned}$$

ECMWF 提供的弯曲角观测误差观测模型相对来说比较简单, 其将观测误差的百分比定义为

$$\begin{aligned} S_{\text{bangle}}(j) &= 0.2 + (0.001 - 0.2) \\ &\times \min(\text{impact}(j)/10000.0, 1.0), \end{aligned}$$

其误差只与高度相关, 并且其在 10 km 以上高度引入的标准偏差值较低. 针对不同的变分同化系统会

有不同的参数化方程, 我们引入的弯曲角观测误差模型对于 YH4DVAR 更加合理, 模式误差是随着纬度和高度的变化而发生变化的.

## 5 观测误差统计对比试验

利用我们引入的观测误差模型, 将 GPS 掩星观测数据同化进入背景场, 重新生成 2012 年 8 月份的分析场. 再按照同样的方法进行观测误差统计, 其针对标准偏差值的差值比值 (NOGPS-GPS)/NOGPS 的统计检验结果如图 8—12 所示.

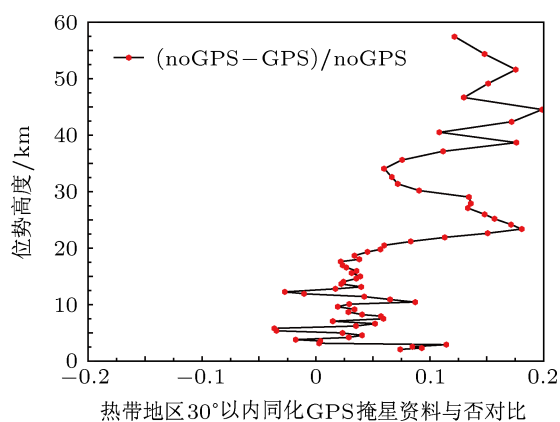


图8 2012年8月热带地区30°以内标准偏差差值比值

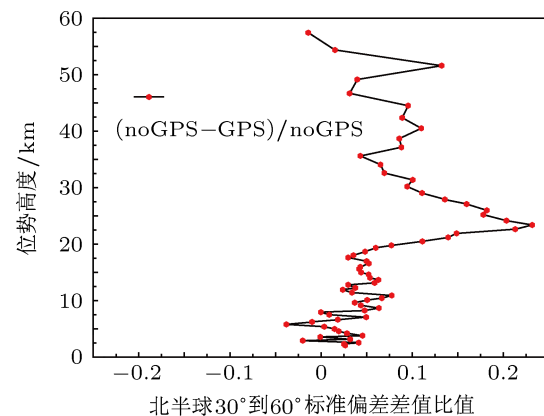


图9 2012年8月北半球30°到60°以内标准偏差差值比值

以上观测误差统计对比试验的结果显示, 加入 GPS 无线电掩星观测资料有减小全球观测误差的正影响. 其中, 热带和北半球产生的正影响要大于南半球的正影响. 分析其原因在于, 南半球大部分面积被海洋所覆盖, 观测资料相对较少, 误差相对较大, 同时针对海洋的背景场资料更难处理, 导致其正影响相对较少. 中低纬度的改善效果明显优于高纬度地区的效果. 在高度 10 km 以上的高对流层

和平流层的正影响效果十分明显. 可见, GPS 无线电掩星观测资料的加入, 使全球背景场资料的观测误差均有所减小, 尤其是对南北半球的中低纬度的作用明显. 从高度上来看, 其在 10 km 以上高对流层和平流层的改善效果最佳.

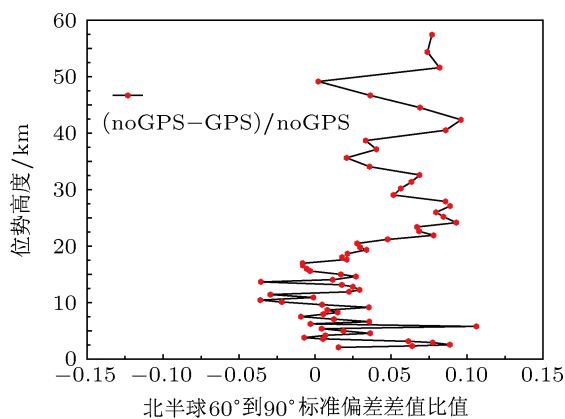


图 10 2012 年 8 月北半球 60° 到 90° 以内标准偏差差值比值

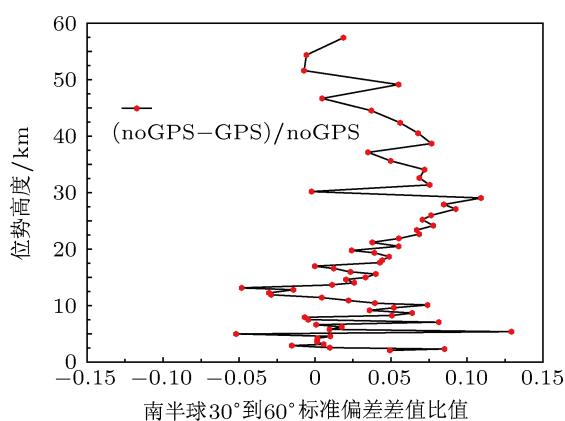


图 11 2012 年 8 月南半球 30° 到 60° 以内标准偏差差值比值

演算子的同时, 需要针对切线性算子和伴随算子进行相应的实现和开发, 这增加了算子实际开发应用的难度. 由于 GPS 无线电掩星资料对于时间和空间的精度较高, 在一维弯曲角算子的实现过程中, 采用 Rüeger 的三项表达式及其最佳平均折射率因子计算折射率的值, 以求得到更加精确的模式模拟结果. 根据 GPS 无线电掩星观测资料的一维弯曲角算子的观测误差统计结果, 引入了适合 YH4DVAR 系统的弯曲角观测误差模型, 并应用到实际系统当中. 同时, 根据弯曲角观测的本身特性及观测误差统计结果, 将弯曲角的截断高度从折射率时的 30 km 提高到了 50 km, 使得更多的观测资料进入到同化系统当中进行同化. 针对 2012 年 8 月份进行了一维弯曲角同化, 利用同化得出的分析场重新进行观测误差统计, 结果显示观测误差在全球范围内都有所减小, 尤其在南北半球的中低纬度地区改善明显, 并且在 10 km 以上高对流层和平流层的效果非常好.

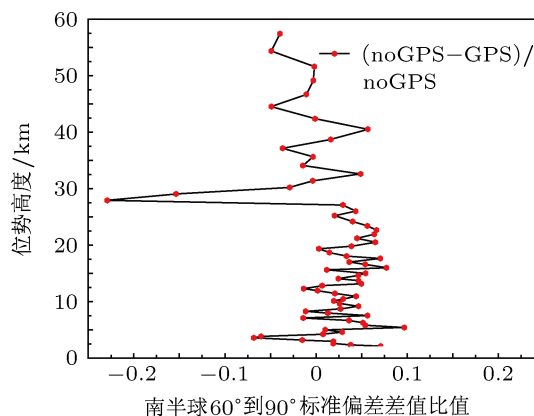


图 12 2012 年 8 月南半球 60° 到 90° 以内标准偏差差值比值

## 6 结论

本文在全球四维变分同化系统 YH4DVAR 中设计实现了一维弯曲角算子及其质量控制过程. 四维变分同化方法决定了在设计实现一维弯曲角正

接下来的工作将针对 YH4DVAR 中实现的一维弯曲角算子进行一系列相关的验证试验以分析 GPS 无线电掩星资料针对全球数值天气预报的贡献及实际效果.

- [1] Cardinali C, Daescu D, Healy S, Dahoui M, Radnoti G, Fouilloux A 2011 *ECMWF Seminar*
- [2] Marbouty D, Healy S 2011 *ICGPSRO*
- [3] Healy S B, Thepaut J N 2006 *Q. J. R. Meteor. Soc.* **132** 605
- [4] Cucurull L 2012 *J. Geophys. Res.* (Submitted)
- [5] Zhang W M, Cao X Q, Song J Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 249202 (in Chinese) [张卫民, 曹小群, 宋君强 2012 物理学报 **61** 249202]

- [6] Cao X Q, Zhang W M, Song J Q 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 020507 (in Chinese) [曹小群, 张卫民, 宋君强 2012 物理学报 **61** 020507]
- [7] Zhang W M 2006 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [张卫民 2006 博士学位论文 (长沙: 国防科学技术大学)]
- [8] Healy S 2009 *GRAS SAF Report 09*
- [9] Smith E K, Weintraub S 1953 *Proc. IRE* **41** 1035

[10] Rüeger J M 2002 Unisurv Rep. S-68 (Sydney: University of New South Wales)

[12] Desroziers G, Berre L, Chapnik B, Poli P 2005 *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **131** 3385

[11] Fjeldbo G, Eshleman V R 1968 *Planet Space Sci.* **16** 1035

# Research on the implementation of GPS radio occultation one-dimensional bending angle operator in four-dimensional variational data assimilation system\*

Zhu Meng-Bin<sup>†</sup> Zhang Wei-Min Cao Xiao-Qun

(School of Computer Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

(Received 1 May 2013; revised manuscript received 4 June 2013)

## Abstract

GPS radio occultation data are implemented in the numerical weather prediction as a kind of very important observation data because of its excellent characteristics, which makes a remarkable positive effect in the system. In this article, we design an implement method and a quality control strategy of one-dimensional bending angle operator in four-dimensional variational data assimilation system, and we also describe the steps of implementing one-dimensional bending angle forward operator and its linear and adjoint operators in four-dimensional variational data assimilation system. The author chose Rüeger's three term expression and its best average coefficients are chosen to calculate refractivity values. In this article, we introduce an observation error model of one-dimensional bending angle operator through the statistics of GPS radio occultation observation data of August, 2012. A comparison of experiment of the analysis field between in the cases with and without GPS radio occultation data is made. It is concluded that GPS radio occultation data plays a positive role in the global areas, especially in the low and middle latitude areas higher than 10 km. This conclusion is the foundation of the following-up GPS radio occultation data assimilation verification experiments.

**Keywords:** GPS radio occultation, one-dimensional bending angle operator, four-dimensional variational data assimilation system, quality control

**PACS:** 92.60.Wc, 95.10.Gi, 04.20.Fy, 92.60.lv

**DOI:** 10.7498/aps.62.189203

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 40775064, 41105063), and the Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of China (Grant Nos. GYHY201006015, GYHY201206007).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: zhumengbin@nudt.edu.cn