0254-6124/2016/36(3)-312–11 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

SONG Yaxiong, FU Yang, HU Xiong, GONG Xiaoyan, YAN Wei, ZHAO Zengliang, DU Xiaoyong. Study of refractivity retrievals based on GPS radio occultation mean bending angles (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(3): 312-322. DOI:10.11728/cjss2016.03.312

基于 GPS 掩星平均弯曲角的折射率反演研究 *

宋亚雄[1] 符 养[2] 胡 雄[3] 宫晓艳[3]
严 卫[4] 赵增亮[2] 杜晓勇[2]

1(91576 部队 宁波 315000)

2(北京应用气象研究所 北京 100029)

3(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

4(解放军理工大学气象海洋学院 南京 211101)

摘 要 利用 Abel 积分变换通过掩星弯曲角计算折射率需要对高层弯曲角进行统计优化. 目前由于所使用的背景场资料和具体反演方法不同, 导致所发布的掩星大气数据气候统计值存在一定差异. 本文使用 2008 年 1, 4, 7, 10 月共 4 个月的 COSMIC 大气掩星附加相位数据, 从纬圈平均弯曲角廓线反演相应月平均折射率, 并对反演结果进行比较分析. 研究表明, 利用掩星折射数据进行气候研究时无需逐一对掩星探测廓线进行统计优化, 在 40 km 以下高度基于平均弯曲角的反演方法与传统统计相比能够获得几乎一致的月平均折射率, 在 50 km 以上高度基于平均弯曲角的反演结果更加接近 ECMWF 资料统计.

关键词 掩星, 平均弯曲角, 统计优化, 背景场, 月平均折射率

中图分类号 P 352

Study of Refractivity Retrievals Based on GPS Radio Occultation Mean Bending Angles

SONG Yaxiong[1] FU Yang[2] HU Xiong[3] GONG Xiaoyan[3]
YAN Wei[4] ZHAO Zengliang[2] DU Xiaoyong[2]

1(*Unit 91576 of PLA, Ningbo* 315000)

2(*Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing* 100029)

3(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

4(*Institute of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing* 211101)

Abstract The retrieval step from bending angle to refractivity requires background information.

* 国家自然科学基金项目资助 (41104099, 41204137)
2015-04-02 收到原稿, 2016-01-23 收到修定稿
E-mail: songyaxiong1990@163.com

Retrieval schemes in different GNSS-RO processing centers use different types of background data, which is the source of inconsistency of the generated radio occultation climatologies. In this paper, the COSMIC excess-phase data during Jan., Apr., Jul. and Oct. of 2008 was used to study the retrieving of monthly mean refractivity from monthly zonal mean bending angles. The comparison results show that: it is not necessary to apply statistical optimization to individual bending angles, since the approach based on mean bending angles and the standard method produce nearly identical mean refractivity below 40 km; and above 50 km. The approach based on mean bending angles is better than the standard method when compared with mean refractivity generated from ECMWF data.

Key words Radio occultation, Average bending angle, Statistical optimization, Background, Monthly mean refractivity

0 引言

随着掩星探测数据的不断增加, 利用掩星数据进行气候研究逐渐受到重视 [1−2]. 利用 Abel 积分变换可从信号射线弯曲角反演大气折射率. 但 Abel 积分是对弯曲角的无穷积分 [3], 实际数据无法满足此要求. 对于单条掩星探测廓线, 其弯曲角量级随高度呈指数下降, 但噪声量级保持不变. 在约 40 km 以上高度噪声的影响比信号更大, 若直接对弯曲角积分会使结果产生较大误差. 因此, 由掩星弯曲角反演折射率时, 需要附加背景场数据对约 40 km 高度以上弯曲角进行优化.

目前所发布的不同掩星数据在反演方法上使用的是不同背景场信息. 其中丹麦气象研究所 (Danish Meteorological Institute, DMI) 和德国地学研究中心 (German Research Center for Geosciences, GFZ) 使用的是 MSISE-90 大气模型; 美国喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 使用的是基于指数外推的高层大气弯曲角数据; 美国大学大气研究联合组织 (University Corporation for Atmospheric Research, UCAR) 使用的是 NCAR 的气候模型; 维格纳中心 (Wegener Center, WEGC) 从 30 km 以上开始统计优化, 采用 ECMWF 24 h 或 30 h 预报场结合 MSISE-90 气候模型作为背景场.

利用掩星数据进行气候研究通常需要大气参数不同时间尺度及不同空间范围的统计值. 利用模式资料作为背景场对弯曲角进行优化, 会使其自身特征通过积分函数传递到反演得到的大气参数中, 从而造成掩星大气数据气候统计值出现系统性偏差. Foelsche 等 [4] 使用同一反演方案对不同掩星星座的探测资料进行处理, 发现温度、折射率等参数的气候变化趋势具有较高一致性. Ho 等 [5−6] 对发布的不同掩星 CHAMP 数据统计序列进行了比较, 研究其结构性不确定度, 即重点分析观测数据主观选择的处理方法不同所造成的误差 [7], 发现 25 km 高度以上 CHAMP 数据结构性不确定度较大. Steiner 等 [8] 使用不同掩星数据处理机构以及不同掩星星座数据, 进一步量化分析了利用掩星数据进行气候研究的结构性不确定度, 其研究结果表明, 由于高层弯曲角优化所使用的背景场数据及具体优化方法不同, 导致 25 km 以上以及高纬地区的掩星数据不适宜用来进行气候研究. Ao 等 [9] 指出单条掩星廓线平流层中上部实测弯曲角噪声较大, 将大量廓线统计平均后能减小随机噪声量级, 利用平均弯曲角廓线反演相应平均折射率可提高观测资料使用的高度, 从而减小背景场对反演结果的影响. Gleisner 和 Healy[10] 利用全球 5° 间隔纬圈的弯曲角平均值结合相应纬圈弯曲角的中值廓线反演折射率, 得到的折射率廓线在对流层至 35∼40 km 高度差异很小, 并且在 40∼50 km 高度的反演结果更接近 ECMWF 数据.

本文利用 2008 年 1, 4, 7, 10 月共 4 个月的 COSMIC 附加相位数据, 使用欧洲气象卫星开发组织开发的 ROPP (Radio Occultation Processing Package) 掩星数据处理软件, 将附加相位数据处理为经电离层修正但未进行统计优化的弯曲角廓线; 从 90°S—90°N 按 10° 间隔划分 18 个纬度带对弯曲角廓线进行质量控制, 对各纬度区间统计其月平均弯曲角廓线, 保证每一个纬度区间有足够的弯曲角廓线以排

除异常廓线对结果的影响; 对平均弯曲角的高层优化采用搜索–拟合算法, 利用优化后的平均弯曲角反演折射率, 进而将反演结果与传统统计方法的计算结果及 ECMWF 再分析数据统计结果进行对比分析.

1 Abel 积分变换

根据 Abel 积分变换, 有

$$\ln[n(a)] = \frac{1}{\pi}\int_a^{\infty} \frac{\alpha(y)}{\sqrt{y^2-a^2}}\mathrm{d}y, \tag{1}$$

式 (1) 建立了由掩星弯曲角到大气折射系数之间的转换关系, $n(a)$ 表示碰撞参数为 a 的信号射线路径近地点处的大气折射系数. 大气折射率 N 定义为

$$N = (n-1)\times 10^6. \tag{2}$$

对于中性地球大气, N 在潮湿的地表处值较大, 最大值约为 400, 且随高度增加呈指数下降, 在 20 km 处 N 值约为 20. 因此 $10^6 N$ 远小于 1.

利用泰勒级数展开式可得

$$\ln(n) = \ln[1+(n-1)] = (n-1) - \frac{1}{2(n-1)^2} + \cdots. \tag{3}$$

因此,

$$N(a) \approx \frac{10^6}{\pi}\int_a^{\infty} \frac{\alpha(y)}{\sqrt{y^2-a^2}}\mathrm{d}y. \tag{4}$$

忽略高阶项带来的相对偏差为 $10^6 N(a)/2$, 即最大约为 0.02%, 20 km 高度处仅为 0.001%. 公式 (4) 从弯曲角到折射率为线性变化, 因此可以认为由平均弯曲角反演的折射率即等效于平均折射率.

2 数据处理方法

2.1 数据预处理与质量控制

使用的数据取自 COSMIC 数据分析和存储中心. 该中心可提供两种数据: 一种是可用于天气与空间天气监测和预报的 COSMIC 近实时数据; 另一种是更加精确有效的 COSMIC 后处理数据. 数据主要分为 Level0 级、Level1 级和 Level2 级 [13]. 本文使用的数据为 Level1 级大气附加相位数据廓线以及 Level2 级 ECMWF 格点分析数据廓线, 分别称为 atmPhs 廓线和 echPrf 廓线.

目前所发布的掩星数据格式各不相同, ROPP 反演程序只能识别 netCDF (network Common Data Form) 格式的文件. 因此, 首先需要利用 ROPP 软件 IO (Input/Output) 模块将 atmPhs 廓线文件转换为 netCDF 格式文件, 然后利用 PP (Preprocessing) 模块中的反演工具根据转换的相位数据计算电离层修正非优化掩星弯曲角.

利用 ROPP 软件反演得到的弯曲角廓线并不是都可以直接使用, 在进一步使用前必须通过质量控制剔除异常廓线. 本文将整条廓线中缺测值太多, 从而导致有效数据个数小于 100 或在 50~90 km 高度范围弯曲角绝对值大于 40 μrad 的廓线视为无效并予以剔除. 进行第一步质量控制后, 在剩余廓线中仍然存在较多离群值, 可能对后续实验结果产生影响. 因此需要采取进一步的质量控制, 即在整个高度范围内检测、剔除偏离平均值超过 3 倍标准差的廓线. 通过进一步的质量控制, 将 90°S—90°N 按 10° 间隔划分 18 个纬度带, 计算弯曲角纬圈月平均值. 在统计平均前, 统一将弯曲角廓线转换为碰撞高度的函数, 即碰撞参数减去相应的局地圆弧半径.

2.2 平均弯曲角优化

图 1(a) 给出的是 2008 年 7 月 1 日 40°—50°N 区间通过质量控制后的弯曲角随高度的变化. 大气掩星弯曲角信号随高度大致呈指数变化, 横坐标取对数后, 其随高度变化趋势近似为线性. 图 1(a) 中 40 km 以下弯曲角满足指数变化条件, 40~60 km 弯曲角噪声逐渐增加, 60 km 以上弯曲角噪声完全掩盖信号. 因此, 单廓线反演必须对约 40 km 以上弯曲角进行统计优化. 图 1(b) 给出了 2008 年 7 月 18 个纬度区间平均弯曲角随高度的变化. 平均弯曲角廓线在 60 km 以下比较平滑即质量较好, 60~80 km 噪声开始增加, 80 km 以上噪声量级过大且存在负值以致平均弯曲角不能使用. 因此, 平均弯曲角廓线不能直接用来反演折射率, 必须使用附加背景场信息修正 80 km 以上区域. 对比图 1(a) 与 (b) 可知, 通过对弯曲角的统计平均, 能减少噪声量级, 尤其体现在 50~80 km 之间. 利用平均弯曲角廓线反演折射率, 因其在 60 km 以下噪声很小不需要进行统计优化, 因此该反演方法

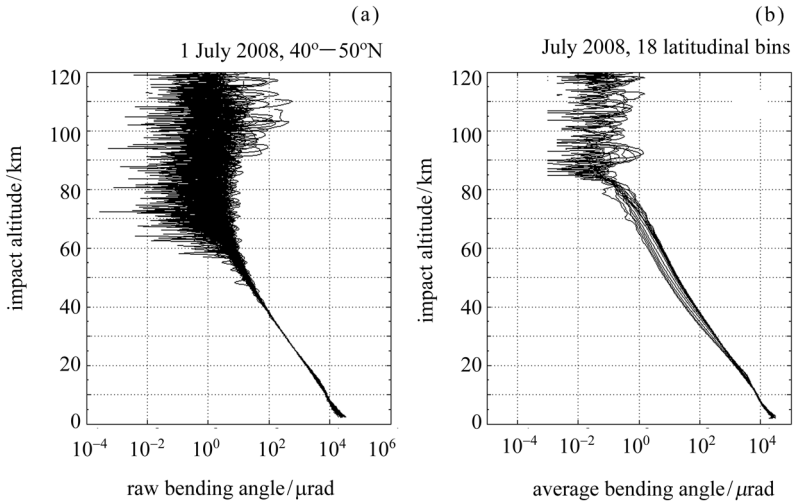


图 1 40°—50°N 区间内通过两步质量控制得到的弯曲角廓线 (a) 及 18 个纬度区间的平均弯曲角廓线 (b)

Fig. 1 Raw bending angle profiles from 40°N to 50°N after two steps quality control (a), and monthly mean bending angle profiles for 18 latitudinal zones (b)

能将统计优化高度提升 20 km, 减小了附加背景场信息对 60 km 以下大气参数统计量的潜在影响.

MSISE-90 (Mass Spectrometer and Incoherent Scatter radar Extended-90) 大气模型是目前较为常用的参考大气模型. 该模型描述了从地面到热层高度范围内 (0~1000 km) 的中性大气密度、温度等大气物理性质. 本文按 12 个月, 纬度从 85°S 到 85° N 取 5° 间隔, 经度从 0° 自西向东到 170°W 取 10° 间隔, 高度范围设置为地面至 150 km, 利用 MSISE-90 大气模型输出弯曲角廓线, 并将这些廓线作为平均弯曲角高层的背景场廓线库.

对平均弯曲角的高层优化, 与 Gleisner 等 [10] 采用简单指数外推不同, 本文参照 Foelsche[11] 使用的搜索–拟合算法, 即从建立的 MSIS 背景场廓线库中搜索对一定高度范围内平均弯曲角拟合最好的廓线. 由于平均弯曲角廓线是一定纬度区间内一段时间的平均值, 没有确定的时空点, 因此从 MSIS 背景场廓线库搜索的最优拟合廓线能够很好地依照平均弯曲角廓线本身变化特征外推到 150 km 高度.

60~80 km 是平均弯曲角廓线质量由好到差的过渡区间. 这里从 60 km 开始对平均弯曲角优化, 搜索范围取

$$h_{\rm top} = 80\,{\rm km}, \quad h_{\rm bot} = 60\,{\rm km},$$

当 $\alpha^i_{\rm MSIS}$ 满足

$$\Delta\alpha^2 = \sum_{i=h_{\rm bot}}^{h_{\rm top}} (\bar{\alpha}^i_{\rm RO} - \alpha^i_{\rm MSIS})^2 = \min \tag{5}$$

时, $\alpha^i_{\rm MSIS}$ 即为最优搜索背景场廓线, 用 $\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS}$ 表示. 式中 $\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS}$ 和 $\alpha^i_{\rm MSIS}$ 分别表示平均弯曲角廓线和背景场廓线库中的廓线, 上标 i 表示弯曲角高度层. 拟合系数定义为

$$f_{\rm fit} = \frac{{\rm cov}(\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS} - \bar{\alpha}^i_{\rm RO})}{{\rm var}(\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS})}. \tag{6}$$

此系数表示 $\alpha^i_{\rm MSIS}$ 与 $\bar{\alpha}^i_{\rm RO}$ 的拟合程度, ${\rm cov}(\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS} - \bar{\alpha}^i_{\rm RO})$ 表示 $\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS}$ 与 $\bar{\alpha}^i_{\rm RO}$ 的协方差, ${\rm var}(\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS})$ 表示 $\alpha^{\rm best}_{\rm MSIS}$ 的方差. 最终最优拟合廓线优化的平均弯曲角廓线为

$$\alpha_{\rm MSIS}(a) = f_{\rm fit}\ \alpha^{\rm best}_{\rm MSIS}. \tag{7}$$

平均弯曲角的统计优化方法如下:

$$\bar{\alpha}_{\rm OPT}(a) = \omega_{\rm RO}(a)\bar{\alpha}_{\rm RO}(a) + [1 - \omega_{\rm RO}(a)]\alpha_{\rm MSIS}(a). \tag{8}$$

其中, $\bar{\alpha}_{\rm Ro}(a)$ 表示平均弯曲角廓线, $\alpha_{\rm MSIS}(a)$ 表示最

优拟合廓线, $\bar{\alpha}_{\mathrm{OPT}}(a)$ 表示优化后的弯曲角廓线. 这里权重函数

$$\omega_{\mathrm{RO}}(a) = \boldsymbol{B}(\boldsymbol{B}+\boldsymbol{O})^{-1}. \tag{9}$$

其中, $\boldsymbol{B}$ 和 $\boldsymbol{O}$ 分别表示背景场和观测场 (平均弯曲角廓线) 误差的协方差矩阵, 有

$$\boldsymbol{B}_{ij} = \sigma_i^{\mathrm{MSIS}}\sigma_j^{\mathrm{MSIS}} \exp\Big(-\frac{|a_i - a_j|}{L_{\mathrm{MSIS}}}\Big), \tag{10}$$

$$\boldsymbol{O}_{ij} = \sigma_i^{\mathrm{RO}}\sigma_j^{\mathrm{RO}} \exp\Big(-\frac{|a_i - a_j|}{L_{\mathrm{RO}}}\Big). \tag{11}$$

其中, a_i 和 a_j 分别表示第 i 和第 j 层高度; σ_i^{MSIS}, σ_j^{MSIS} 和 σ_i^{RO}, σ_j^{RO} 分别为对应层面背景场和观测场误差; $L_{\mathrm{MSIS}} = 15\,\mathrm{km}$ 和 $L_{\mathrm{RO}} = 12\,\mathrm{km}$ 分别为最优拟合廓线和平均弯曲角廓线的误差相关长度. 为避免尖锐突变, 假设 60~62 km 高度的背景场误差由 100% 线性变化到 15%, 62~78 km 高度的背景场误差保持 15% 不变, 78~80 km 的背景场误差由 15% 线性变化至 0. 假设观测场误差保持不变, 取 62~78 km 间背景场误差平均值.

2.3 高度参数变换

对平均弯曲角廓线进行 Abel 积分前, 通过公式

$$a = H_a + R_{\mathrm{c}} + u \tag{12}$$

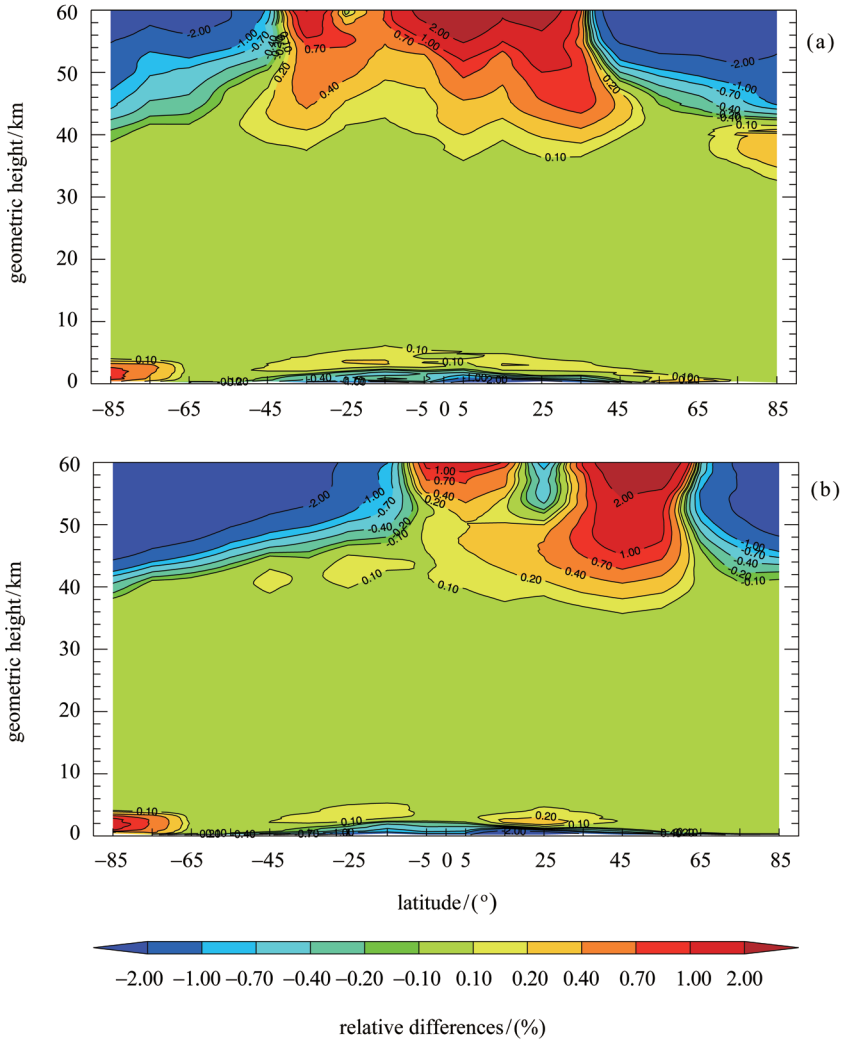


图 2 2008 年 1 月 (a) 和 4 月 (b) 简化方法与标准方法反演结果的相对偏差分布

Fig. 2 Relative differences between monthly mean refractivity obtained by simplified approach and standard approach in January (a) and April (b) 2008

将高度变量由碰撞高度转换为碰撞参数. 对于单条掩星廓线, 均有对应的 $R_{\rm c}$ 和 u, 但平均弯曲角廓线是某一纬度区间所有廓线的平均值. 因此将

$$\bar{R}_{\rm c} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(R_{c,i} + u_i) \tag{13}$$

作为平均弯曲角廓线的局地圆弧半径. $\bar{R}_{\rm c}$ 即平均局地圆弧半径, 下标 i 表示第 i 条掩星廓线, m 表示该纬度区间总掩星廓线数量.

3 结果对比

3.1 简化方法与标准方法对比

为了方便起见, 这里将基于平均弯曲角的折射率反演方法称为简化方法, 将传统的通过统计方法计算平均折射率的方法称为标准方法. 基于平均弯曲角反演得到的折射率是碰撞参数的函数, 利用下式将碰撞参数转换为几何高度:

$$h_{\rm g} = \frac{a}{n} - \bar{R}_{\rm c} = \frac{a}{10^{-6}N + 1} - \bar{R}_{\rm c}. \tag{14}$$

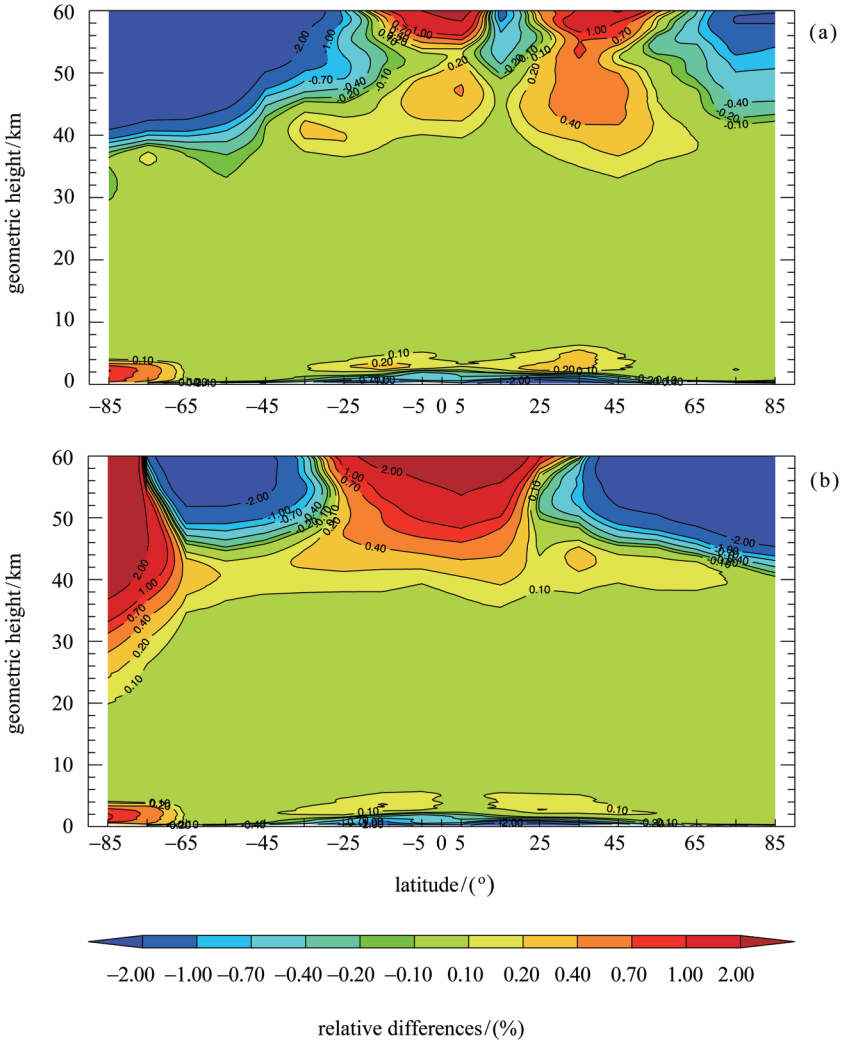


图 3 2008 年 7 月 (a) 和 10 月 (b) 简化方法与标准方法反演结果的相对偏差分布

Fig. 3 Relative differences between monthly mean refractivity obtained by simplified approach and standard approach in July (a) and October (b) 2008

简化方法与标准方法的对比采用求取相对偏差的方法. 相对偏差定义为

$$d = \frac{N^{\mathrm{f}} - N^{\mathrm{l}}}{N^{\mathrm{l}}} \times 100\%. \tag{15}$$

上标 f 和 l 分别表示对比的前者和后者.

图 2 和图 3 给出了 1, 4, 7, 10 月简化方法与标准方法的反演结果对比. 在 60 km 高度以上折射率参数中, 无论是简化方法还是标准方法, 背景场所占权重偏大, 不具有对比意义, 因此对比高度设为从地面到 60 km 高度. 低层约 5 km 以下相对偏差量级约达 1%, 其产生的主要原因是, 对于一个纬度区间的平均弯曲角, 使用平均局地圆弧半径进行高度参数转换, 在反演折射率时, 其高度转换的非线性对低层影响较大. 另外一种可能是近地面几公里大气中水气含量较多, 对掩星探测精度也会造成影响, 图 2~3 中: 5 km 以上到 35~40 km 高度范围内, 相对偏差量级约 0.1%; 40 以上到 50 km 高度范围内, 相对偏差逐渐增大到 1%; 50 以上到 60 km 高度范围内, 相对偏差增大到 2% 左右. 40 km 高以上的相对偏差具有随纬度及季节变化的特征, 北半球表现为从低纬到高纬, 相对偏差由正逐渐变为负. 南半球变化特征较北半球复杂, 4 月和 7 月主要为负相对偏差, 1 月低纬

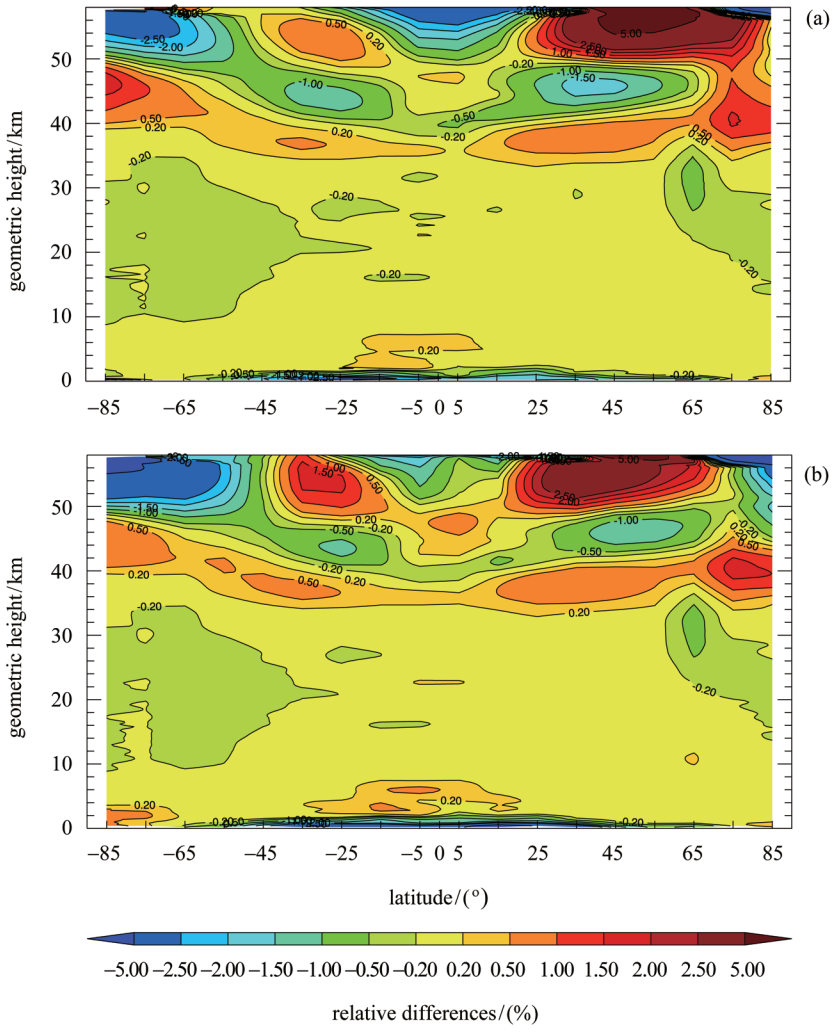


图 4 2008 年 1 月标准方法 (a) 和简化方法 (b) 反演结果与 ECMWF 数据结果的相对偏差分布

Fig. 4 Relative differences of monthly mean refractivity between the results obtained from COSMIC data using simplified approach (a) and standard approach (b) and those obtained from ECMWF data in January 2008

的相对偏差为正, 高纬的相对偏差为负, 10 月的相对偏差表现为正—负—正结构. 相对偏差分布特征在不同季节是否具有规律性还有待使用更多年份的数据加以验证. 简化方法与标准方法的主要差异在于统计优化采用的高度, 简化方法从 60 km 开始统计优化, 而标准方法从 40 km 开始统计优化. 因此, 统计优化方案的不同是造成 40~50 km 高度内差异的主要原因. 由于通过 Abel 积分, 80 km 以上弯曲角对 40 km 以下折射率的贡献仅为 0.1%, 因此两种方法虽然对弯曲角高层优化方法不同, 但反演结果在 40 km 以下差异很小.

3.2 反演结果与 ECMWF 再分析数据对比

图 4~7 分别给出的是 1, 4, 7, 10 月两种不同方法反演结果与 ECMWF 数据的对比. 这里 ECMWF 数据指的是 CDAAC 发布的与掩星事件相耦合的再分析数据廓线, 即 echPrf 廓线. ECMWF 再分析数据融合了多种大气探测参数, 是目前公认的比较接近大气真实状态的数据, 因此常被用来作为对比基准. 本文使用的 echPrf 廓线垂直高度范围为从地面到约 58 km 高度. 为了避免数据资料外推带来的较大误差, 对比高度设置为从地面到约 58 km 高度.

对于所给出的 4 个月的数据, 从低层几千米到 35~40 km 之间, 简化方法和标准方法的反演结果与 ECMWF 资料的相对偏差分布几乎一致, 量级均在 0.2% 左右. 此现象表明, 利用先验背景场对单条掩星弯曲角廓线进行统计优化对于大约 40 km 高度

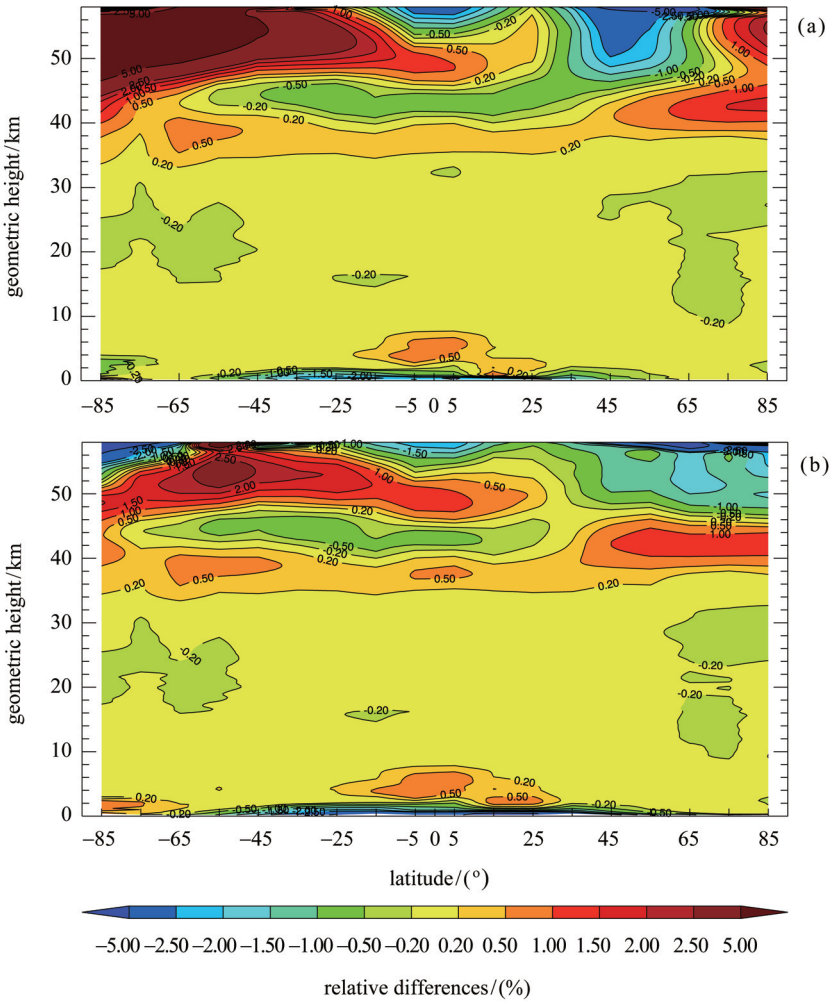


图 5 2008 年 4 月标准方法 (a) 和简化方法 (b) 反演结果与 ECMWF 数据结果的相对偏差分布

Fig. 5 Relative differences of monthly mean refractivity between the results obtained from COSMIC data using simplified approach (a) and standard approach (b) and those obtained from ECMWF data in April 2008

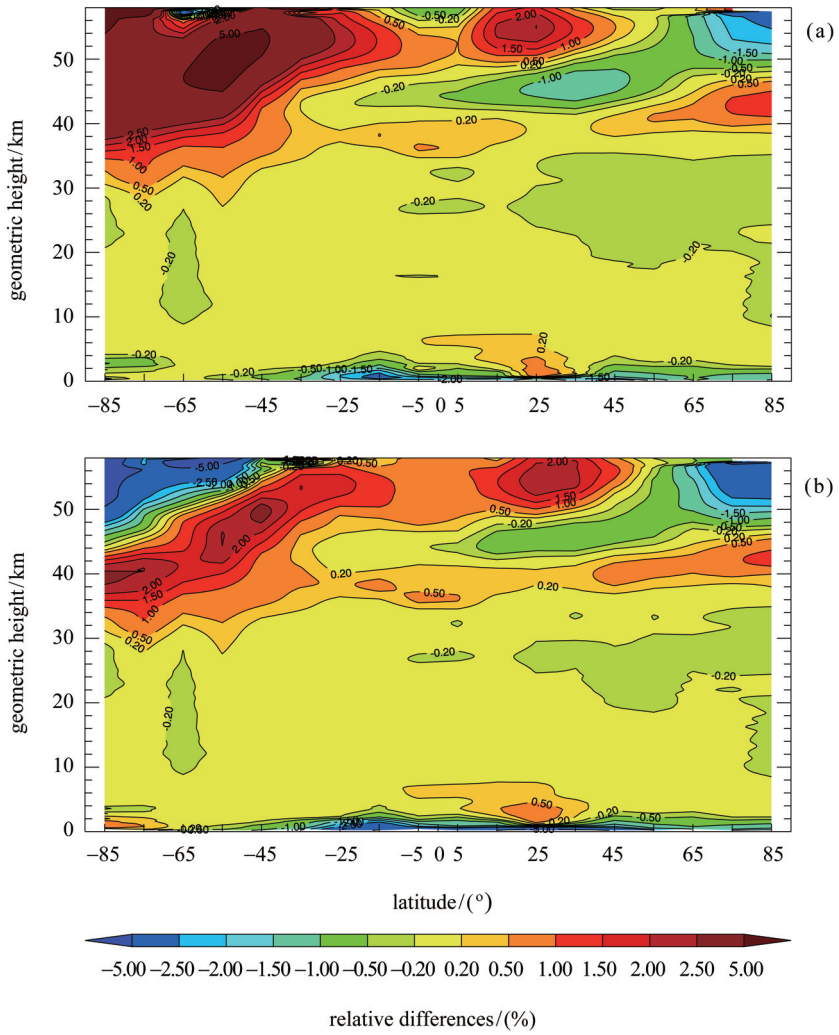


图 6 2008 年 7 月标准方法 (a) 和简化方法 (b) 反演结果与 ECMWF 数据结果的相对偏差分布

Fig. 6 Relative differences of monthly mean refractivity between the results obtained from COSMIC data using simplified approach (a) and standard approach (b) and those obtained from ECMWF data in July 2008

以下的反演结果未造成显著影响. 从另一角度分析, 为获得折射率平均值, 相对于基于平均弯曲角的方法, 标准方法在对每一条观测的弯曲角廓线进行统计优化时并无任何优势. 对于 40 km 以上高度范围, 相对偏差总体为 ±2% 左右, 部分区域量级达 2% 以上, 存在分布不均匀的正负相对偏差中心, 且在大约 40 km 高度位置处有一个正相对偏差条带, 约 45 km 高度位置为正负相对偏差交替的波状结构.

对比图 4~7 所示的 (a) 与 (b) 可以看出, 在大约 40 km 高度以上, 简化方法比标准方法的反演结果更接近 ECMWF 数据. 在原本相对偏差就很小的情况下, 简化方法仍能对反演结果精度有一定的提升, 这是很难得的. 此外, 本文对弯曲角高层优化使用搜索–拟合算法比 Gleisner 和 Healy[10] 采用简单指数外推方法的改进效果更加明显.

4 结论与讨论

利用 Abel 积分变换由信号射线弯曲角计算大气折射率, 需要附加背景场信息对高层弯曲角进行优化. 背景场自身系统性偏差会通过积分函数传递到反演得到的大气参数中, 这是导致目前所发布的一定高度以上掩星大气数据存在差异的原因. 本文根据将大量弯曲角廓线进行统计平均能够显著降低

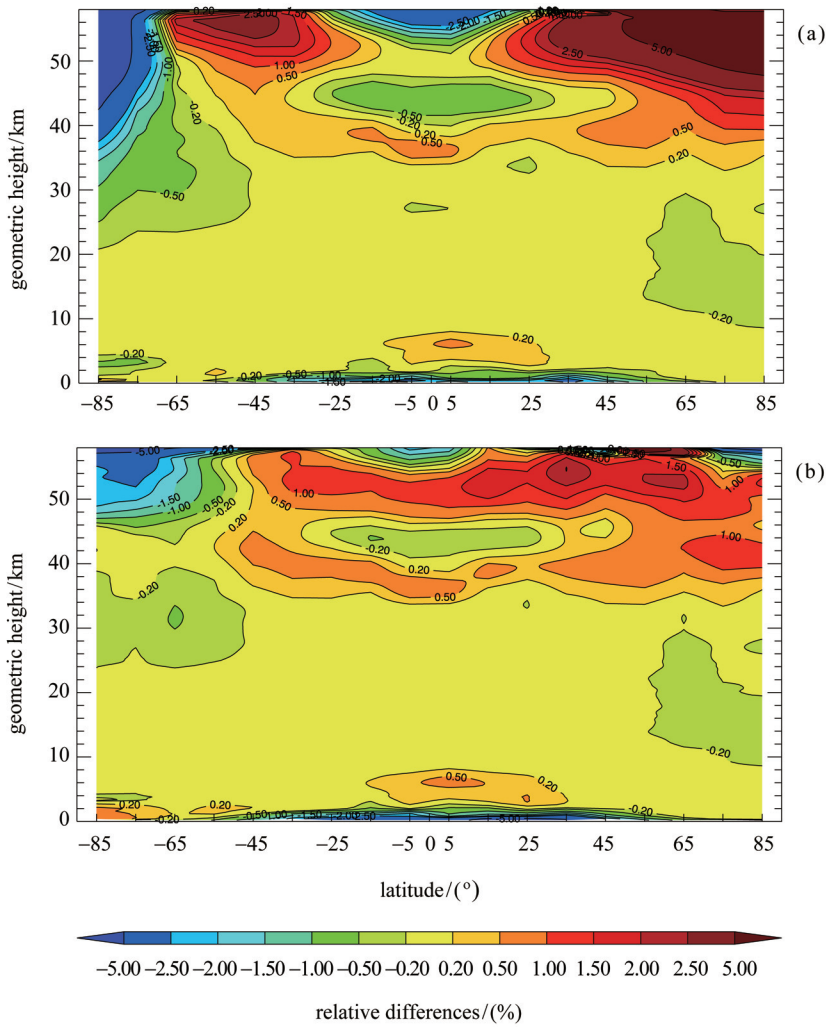


图 7　2008 年 10 月标准方法 (a) 和简化方法 (b) 反演结果与 ECMWF 数据结果的相对偏差分布

Fig. 7　Relative differences of monthly mean refractivity between the results obtained from COSMIC data using simplified approach (a) and standard approach (b) and those obtained from ECMWF data in October 2008

80 km 以下随机噪声量级这一原理, 通过平均弯曲角廓线来反演折射率, 从而将观测资料使用高度提升至 60 km 以上, 进而减小背景场信息对低层大气参数的影响.

简化方法与传统方法的反演结果相比, 从低层几千米以上至 35~40 km 高度范围内, 相对偏差量级约 0.1%, 而 50 km 以上高度范围的相对偏差逐渐增大到 2% 左右. 两种方法分别与 ECMWF 再分析数据的对比发现, 从 5 km 到 30~35 km 高度范围内, 两种方法具有几乎一致的相对偏差分布, 量级均在 0.2 % 左右, 30 km 以上高度范围内, 相对偏差总体为 ±2% 左右, 且平均弯曲角的反演结果优于传统统计方法的结果. 根据以上分析可以得出如下结论.

利用掩星折射数据进行气候研究, 无需逐一对掩星探测廓线进行统计优化. 在 40 km 以下高度范围内, 基于平均弯曲角的反演方法能够获得与传统统计平均几乎一致的平均折射率, 在 50 km 以上高度范围, 基于平均弯曲角的反演结果更加接近 ECMWF 数据结果. 基于平均弯曲角的方法相对于需对观测廓线逐一统计优化和反演的传统统计方法, 具有处理过程简单及耗时更少的优点, 能够为掩星数据处理软件的开发提供借鉴.

减小背景信息场在掩星参数反演中的影响, 对于利用掩星数据更好地进行气候研究具有重要意义.

利用平均弯曲角直接反演平均折射率的研究尚处于初步阶段, 基于平均弯曲角的反演方法尚未考虑电离层修正残差以及利用平均局地圆弧半径进行高度转换对反演结果的影响, 该方法可应用于多大纬度范围以及是否能够进行区域性气候分析等问题有待深入研究.

致谢 无线电掩星数据处理软件 ROPP 由 ROM SAF 提供, 相关 COSMIC 掩星数据由美国大气研究大学协会数据分析和存储中心提供. 北京应用气象研究所高级工程师韩志刚和工程师姚志刚为本研究提供了很好的建议.

参考文献

[1] FOELSCHE U, KIRCHENGAST G, STEINER A K, *et al*. An observing system simulation experiment for climate monitoring with GNSS radio occultation data: setup and test bed study [J]. *J. Geophys. Res.*, 2008, DOI:10.1029/200JD009231

[2] ANTHES R A. Exploring Earth's atmosphere with radio occultation: contributions to weather, climate and space weather [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2011, **4**: 1077-1103

[3] FJELDBO G F, KLIORE A J, ESHLEMAN V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments [J]. *Astron. J.*, 1971, **76**: 123-140

[4] FOELSCHE U, SCHERLLIN-PIRSCHER B, LADSTÄDTER F, *et al*. Refractivity and temperature climate records from multiple radio occultation satellites consistent within 0.05% [J]. *Atmos. Meas. Tech. Disc.*, 2011, **4**(2): 1593-1615

[5] HO S, KIRCHENGAST G, LEROY S, *et al*. Estimating the uncertainty of using GPS radio occultation data for climate monitoring: inter-comparison of CHAMP refractivity climate records from 2002 to 2006 from different data centers [J]. *J. Geophys. Res.*, 2009, DOI:10: 11029/2009JD011969

[6] HO S, HUNT D, STEINER A K, *et al*. Reproducibility of GPS radio occultation data for climate monitoring: profile-to-profile inter-comparison of CHAMP climate records 2002 to 2008 from six data centers [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, DOI:10.1029/2012JD01766

[7] THORNE P W, PARKER D E, CHRISTY J R, *et al*. Uncertainties in climate trends: lessons from upper-air temperature records [J]. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, 2005, **86**(10): 1437-1442

[8] STEINER A K, HUNT D, HO S P, *et al*. Quantification of structural uncertainty in climate data records from GPS Radio occultation [J]. *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, **13**(3): 1469-1484

[9] AO C O, MANNUCCI A J, KURSINSKI E R. Improving GPS radio occultation stratospheric refractivity retrievals for climate benchmarking [J]. *J. Geophys. Res.*, 2012, DOI:10.1029/2012GL051720

[10] GLEISNER H, HEALY S B. A simplified approach for generating GNSS radio occultation refractivity climatologies [J]. *Atmos. Meas. Tech.*, 2013, **6**: 121-129

[11] FOELSCHE U, PIRSCHER B. Development of bending angle climatology from RO data [R]//CDOP Visiting Scientist Report 14. Ref: SAF/GRAS/DMI/REP/VS14/001, 2012. GRAS-SAF