

徐贤胜,黄思训,郭 鹏等. GPS 无线电掩星后向传播方法. 地球物理学报, 2011, **54**(9): 2193~2200, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 09. 001

Xu X S, Huang S X, Guo P, et al. Back propagation method for GPS radio occultation data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, **54**(9): 2193~2200, DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 09. 001

GPS 无线电掩星后向传播方法

徐贤胜^{1,4}, 黄思训², 郭 鹏³, 洪振杰^{4*}

1 上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072

2 中国人民解放军理工大学气象学院, 南京 211101

3 中国科学院上海天文台, 上海 200030

4 温州大学数学与信息科学学院, 温州 325027

摘 要 在大气多路径传播条件下, 讨论了两种无线电信号的反演方法: 几何光学方法和后向传播方法. 当大气存在多路径效应时, 采用几何光学方法反演大气参数会引入较大误差. 后向传播方法将无线电信号从多路径区域反推至单路径区域, 减少了大气多路径效应的影响. 为了比较不同的反演方法, 利用多相位屏模型, 数值模拟了大气多路径条件下无线电信号在大气中的传播过程. 假设信号处于理想条件下(仅受大气多路径效应的影响), 分别用几何光学方法和后向传播方法对模拟信号进行反演, 结果表明: 后向传播方法能削弱大气多路径效应的影响, 后向传播方法优于几何光学方法. 对 2007 年第 60 天至 180 天 4 个月共约 15000 个 CHAMP 掩星观测数据进行反演, 将其折射率反演结果与 ECMWF 分析场资料进行统计比较, 结果说明: 在南半球(30°S~90°S)、热带(30°S~30°N)以及北半球(30°N~90°N)的低对流层, 后向传播方法反演的折射率的相对误差的平均偏差和均方差普遍小于几何光学方法. 从而证实: 后向传播方法确实能削弱大气多路径效应的影响, 获得较好的反演结果.

关键词 GPS/LEO 掩星, 大气多路径, 后向传播方法, 几何光学方法, 多相位屏模型

DOI: 10. 3969/j. issn. 0001-5733. 2011. 09. 001

中图分类号 P228

收稿日期 2010-06-24, 2011-04-03 收修定稿

Back propagation method for GPS radio occultation data

XU Xian-Sheng^{1,4}, HUANG Si-Xun², GUO Peng³, HONG Zhen-Jie^{4*}

1 Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China

3 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

4 School of Mathematics & Information Science, Wenzhou University, Zhejiang Wenzhou 325027, China

Abstract For determination of bending angle profiles from radio occultation in multipath areas, two methods, i. e., the geometric optics (GO) method and back propagation (BP) method, are compared and discussed. The GO method does not work well in multipath areas while in the BP method electromagnetic field can be back-propagated from multipath area to a single-ray area for reducing multipath effects. The atmospheric propagation of GPS signals under multipath conditions and their detection are simulated by using multiple-phase-screen model. Under the assumption of ideal signal, bending angles computed by the GO method and BP method are

基金项目 地震行业科研专项(201108004), 国家科技部 863(2009AA12Z319), 国家自然科学基金项目(41075081)和长三角科技联合攻关项目(10595812400)资助.

作者简介 徐贤胜, 男, 1983 年生, 上海市应用数学和力学研究所博士研究生, 从事无线电掩星反演研究. E-mail: xuxiansheng666@126.com

* **通讯作者** 洪振杰, E-mail: hong@wzu.edu.cn

compared with corresponding solutions to Abel integral (true), the results reflect that the BP method is much closer to Abel integral in multipath area. About 15000 CHAMP radio occultations from March to July in 2007 are retrieved by the GO method and BP method, statistical comparisons of the retrieval refractivity profiles with that of ECMWF show that the average deviation and variance of fractional difference in refractivity retrieved by the BP method are generally smaller than that by the GO method in the lower troposphere of the southern hemisphere ($30^{\circ}\text{S} \sim 90^{\circ}\text{S}$), the tropics ($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$), as well as the northern hemisphere ($30^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$). The results confirm that the BP method can solve the problem of calculating bending angle profiles within multipath regions better than the GO method.

Keywords GPS/LEO radio occultation, Atmospheric multipath, Back propagation method, Geometric optics method, Multiple-phase-screen model

1 引言

1993年,美国的UCAR(University Corporation for Atmosphere Research)、Arizona大学和JPL(Jet Propulsion Laboratory)联合制定了首次GPS/LEO(Global Positioning System/Low Earth Orbit)掩星实验——GPS/MET(Meteorology)计划.继GPS/MET之后,CHAMP、SAC-C、GRACE、COSMIC等计划的成功发射,每天可提供几千个中性大气层和电离层的掩星廓线^[1].此外,GPS/LEO掩星还具有高精度、高垂直分辨率、全球覆盖、全天候、长期稳定等特点,这是其他卫星探测手段难以比拟的.

GPS/LEO掩星指GPS信号穿过地球大气层后,被安装在LEO卫星上的GPS接收机接收.接收的信号中包含了大气层和电离层的信息,通过相关的反演方法,可得到高精度的大气层和电离层的参量廓线,包括大气层的折射率、密度、温度、水汽压廓线和电离层的电子密度廓线^[2,3].

在低对流层(尤其是热带区域),水汽含量较为丰富,折射率结构复杂.这不仅会导致GPS信号急剧衰减,还会发生大气多路径传播,即发射机发出的多个信号通过地球大气后同时到达接收机^[4].在大气多路径传播条件下,通过几何光学方法反演多普勒频移(局部测量信息),会出现同一碰撞参数对应多个弯曲角的值.因此必须采用全息反演技术,即利用所有或者某一段的测量信息进行反演.目前比较成熟的全息反演技术包括:后向传播方法^[5]、滑动频谱方法^[6]、正则变换方法^[7]以及全谱反演方法^[8].

后向传播方法的思想首先由美国Stanford大学的Marouf提出,用于旅行者号掩星观测土星和天王星环,结果发现衍射效应明显减弱且径向分辨

率得到提高^[9].而地球大气,特别是大气边界层中的衍射效应更为复杂,Karayel, Gorbunov, Kursinski等人在后向传播反演地球大气方面做了大量的工作: Karayel指出几何光学方法的垂直分辨率受到第一菲涅耳带直径的限制,后向传播方法能有效地克服这种限制,其所得到的折射率具有更高的垂直分辨率,从而使得掩星探测大气边界层成为可能^[10]; Gorbunov通过比较几何光学方法和后向传播方法后发现,后向传播方法能极大地改进数据反演的质量^[5]; Kursinski对后向传播方法做了进一步的改进,并说明后向传播方法能降低大气多路径效应的影响^[4].

本文采用多相位屏模型,数值模拟了大气多路径传播条件下无线电信号在大气中的传播过程.分别用几何光学方法和后向传播方法对模拟信号进行反演,结果验证了后向传播方法的准确性.用上述两种方法对CHAMP掩星数据进行反演,将其折射率与相应的ECMWF(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts)分析场进行统计比较.结果表明:后向传播方法降低了大气多路径效应的影响,提高了反演结果的准确性.

本文第2节简单介绍单路径假设下的几何光学方法;第3节阐述后向传播方法;第4节利用多相位屏模型对大气多路径条件下无线电信号的传播过程进行了模拟仿真;第5节分别用几何光学方法和后向传播方法反演CHAMP掩星观测数据,并将其折射率反演结果与ECMWF分析场资料进行了统计比较;第6节给出结论和讨论.

2 几何光学方法

GPS的观测量主要是频率 $f_1 = 1575.42$ MHz和 $f_2 = 1227.60$ MHz的相位和振幅,在消除周跳和

钟差之后,将测量相位减去 GPS 与 LEO 间直线距离可得到附加相位,对附加相位进行 Fourier 滤波后计算大气多普勒. 几何光学方法是在 GPS 与 LEO 间单路径传播的假设下,利用多普勒公式、Snell 定律和掩星的几何关系,通过迭代方法计算弯曲角和碰撞参数(已知卫星的速度和位置)^[11].

在局部球对称大气假设下,可通过 Abel 积分变换公式将弯曲角转化为折射指数,也可通过 Abel 积分将折射指数转化为弯曲角:

$$n(a) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(x)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx\right), \quad (1a)$$

$$\alpha(a) = 2a \int_a^\infty \frac{1}{\sqrt{x^2 - a^2}} \frac{d \ln n}{dx} dx, \quad (1b)$$

式中 n 为折射指数, α 为弯曲角, a 为碰撞参数. 在大气多路径条件下,同一碰撞参数会对应多个弯曲角,需对碰撞参数做单调化处理,才能做 Abel 积分变换.

通过弯曲角或折射率一维变分同化可以获得中性大气层的温度、压强以及湿度等大气参数^[12];也可利用 Smith-Weintraub 方程、理想气体方程和流体静力学方程直接从折射率得到大气参数(这时需要辅助的大气信息).

3 后向传播算法

3.1 掩星坐标系

GPS 和 LEO 卫星历表的计算是在地心惯性坐标系中进行的,掩星点的位置一般在地固直角坐标系中表示,而弯曲角是在掩星坐标系中计算的. 掩星坐标系如图 1 所示,图中 O 为曲率中心, L 代表 LEO 卫星轨迹, G 代表 GPS 卫星. 以 GO 所在直线为 x 轴,正方向由 G 点指向 O 点. 坐标原点定义为曲率中心, y 轴与 x 轴垂直,正方向与 LEO 卫星在

x 轴的同侧,且经过坐标原点. x 轴、 y 轴以及曲率中心构成掩星坐标系.

在用后向传播方法进行反演之前,需对观测相位进行修正处理,使得 GPS 卫星在掩星坐标系中的位置固定^[4]. 过 G 作地球表面的切线,记切点为 T ,且要求切点与 LEO 卫星在 x 轴的同侧. 连接 O 点与 T 点,并延长至 P 点,则 OP 与 GT 垂直. 作一经过原点的线段 OQ , OQ 所在直线即为辅助屏的位置, Q 和 M 分别为辅助屏的上下端. 记线段 MQ 到 PT 的距离为 d (点 M 到直线 OP 的距离约等于点 Q 到 OP 的距离),由于 OP 的位置固定不动, d 的值即决定了辅助屏 MQ 的位置,本文取 113 km 左右.

3.2 信号的后向传播

后向传播方法的理论根据是真空中二维 Helmholtz 方程的边值问题,边值条件是从沿 LEO 卫星轨道接收的复信号(即振幅与相位)得到. 将二维 Helmholtz 方程通过 Green 函数展开,可以得到从辅助屏 S_y 到 LEO 观测轨迹 S_L 上观测场的正向传播的电场解:

$$E(x) = \left(\frac{k}{2\pi}\right)^{1/2} \int_{S_y} E_0(y) \cos\varphi_{xy} \times \frac{\exp(ik|\mathbf{x} - \mathbf{y}| - i\pi/4)}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^{1/2}} dS_y. \quad (2a)$$

如果将观测得到的复信号 $E(x)$ 从 S_L 向后传播到辅助屏 S_y 上,则得到辅助屏上的后向传播的电场解:

$$E_0(y) = \left(\frac{k}{2\pi}\right)^{1/2} \int_{S_L} E(x) \cos\varphi_{xy} \times \frac{\exp(-ik|\mathbf{x} - \mathbf{y}| + i\pi/4)}{|\mathbf{x} - \mathbf{y}|^{1/2}} dS_x, \quad (2b)$$

其中 S_L 是掩星过程中 LEO 卫星运动的轨迹曲线(由于掩星时间很短, S_L 可以近似为直线). 辅助屏 S_y 取通过曲率中心的直线, k 为波数,夹角 φ_{xy} 是矢量 $\mathbf{x} - \mathbf{y}$ 与 S_L 的法向量 \mathbf{n}_x 的夹角(见图 2). 通过公式(2b),可以将沿 LEO 卫星轨迹的测量信号向后传播至辅助屏 S_y .

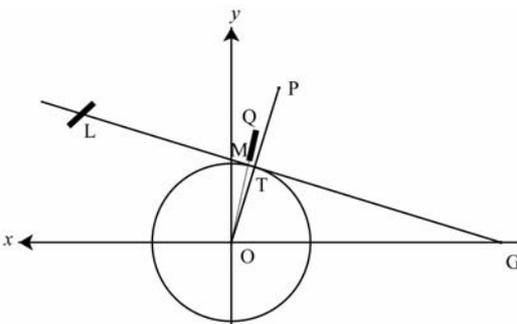


图 1 掩星坐标系

Fig. 1 Occultation-plane coordinate

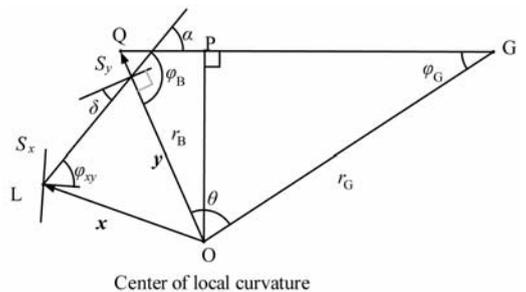


图 2 后向传播示意图^[4]

Fig. 2 Scheme of back-propagation^[4]

公式(2a)~(2b)构成一组辅助屏与 LEO 观测轨迹的信号场之间的变换. 公式(2b)中指数部分与公式(2a)的互为相反数,代表不同的传播方向. 公式(2b)中指数部分含有高速振荡性态,积分的主要贡献来自于驻相点附近的积分,可用驻相法求解.

3.3 计算弯曲角

辅助屏 S_y 上的复信号 $E_0(\mathbf{y})$ 包含振幅和相位 ϕ_E , 需对其相位进行整周模糊度调整:

$$\phi(\mathbf{y}) = \phi_E(\mathbf{y}) + N(\mathbf{y}) \cdot 2\pi, \quad (3)$$

其中 $N(\mathbf{y})$ 为整周模糊度. 得到后向传播场 $E_0(\mathbf{y})$ 的振幅和相位后,通过几何光学反演求解弯曲角和碰撞参数. 矢量 $\mathbf{x} - \mathbf{y}$ 与辅助屏法向量的夹角为^[4]

$$\delta = \arcsin\left(\frac{-\lambda}{2\pi} \frac{d\phi}{d\xi}\right), \quad (4)$$

其中 ξ 为辅助屏上一点到曲率中心的距离. 传播方向与矢量 \mathbf{y} 之间的夹角为

$$\varphi_B = \frac{\pi}{2} + \delta, \quad (5)$$

通过 Bouguer 定律可得碰撞参数 a 与 φ_G :

$$a = r_B \sin\varphi_B = r_G \sin\varphi_G, \quad (6)$$

其中 $r_B = |\mathbf{y}|$ 为辅助屏上的点到曲率中心的距离, r_G 为 GPS 到曲率中心的距离. 弯曲角可通过几何关系得到:

$$\alpha = \varphi_B + \varphi_G + \theta - \pi, \quad (7)$$

其中 θ 为矢量 \mathbf{y} 与直线 OG 之间的夹角.

在 GPS/LEO 掩星数据处理中,将 10 km 以上利用几何光学方法计算的弯曲角,与 10 km 以下利用后向传播方法计算得到的弯曲角结合,组成一个新的弯曲角廓线,再由 Abel 积分变换反演得到大气折射指数廓线.

4 多相位屏模拟

在几何光学近似下,可以采用射线追踪方法模拟掩星接收机获得的信号. 但是在大气多路径条件下,射线追踪方法失效,利用多相位屏模型可以精确地模拟无线电复信号的传播过程^[7].

4.1 多相位屏基本原理

图 3 显示的是 GPS 卫星上的发射机发送信号,穿过地球大气,最后到达 LEO 卫星的过程. 信号从 GPS 卫星到第一个相位屏的传播可用球面波的形式描述;在地球大气中的传播可用多相位屏近似;通过公式(2a),将最后一个相位屏上的复信号传播到 LEO 轨迹上. 复信号穿过地球大气时,大气折射率的分布用一系列垂直于入射方向的相位屏替代,屏

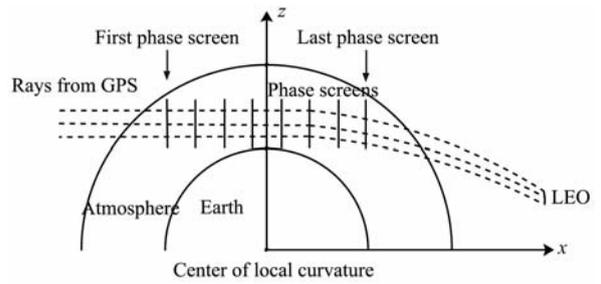


图 3 无线电波在大气中的传播^[5]

Fig. 3 The geometry of wave propagation through the atmosphere^[5]

与屏之间假设为真空,大气的折射介质分布在相位屏内. 当信号路径在折射介质内与直线的偏离小于大气折射率不规则性的最小尺度时,相位屏近似是合理的.

图 3 中 x 轴代表无线电复信号的传播方向, z 轴沿着相位屏的方向,原点为地球曲率中心. δx 为屏与屏之间的距离, $(\sqrt{k^2 - k_z^2}, k_z)$ 为波矢量, k_z 为垂直分量, $\sqrt{k^2 - k_z^2}$ 为水平分量, k 为波数. 则 z 点的相位延迟为

$$\phi(z) = \int_x^{x+\delta x} [n(x, z) - 1] dx, \quad (8)$$

其中 $n(x, z)$ 为折射指数.

记未通过相位屏前的复信号是 $u(x, z)$, 则通过相位屏后的复信号为

$$u'(x, z) = u(x, z) \exp[ik\phi(z)], \quad (9a)$$

对 $u'(x, z)$ 做 Fourier 变换,有:

$$\bar{u}(x, k_z) = \hat{F}_z[u'(x, z)], \quad (9b)$$

利用下面公式将 $\bar{u}(x, k_z)$ 传播至下一个相位屏:

$$\bar{u}(x + \delta x, k_z) = \bar{u}(x, k_z) \exp(i\sqrt{k^2 - k_z^2} \delta x), \quad (9c)$$

则 $x + \delta x$ 处的复信号可通过 Fourier 逆变换得到:

$$u(x + \delta x, z) = \hat{F}_z^{-1}[\bar{u}(x + \delta x, k_z)], \quad (9d)$$

其中, \hat{F}_z 是关于 z 变量的 Fourier 变换, \hat{F}_z^{-1} 是 Fourier 逆变换. 为加快计算速度,可用快速 Fourier 变换(FFT)进行计算. 公式(9a)~(9d)实现了无线电复信号从一个相位屏传递到下一个相位屏的过程. 重复过程(9a)~(9d),可得到每个相位屏上的信号.

在本文的模拟中,取地球半径 $R_e = 6371$ km, 大气层高度 $h_{\text{atm}} = 130$ km. 无线电波在大气中的传播总距离为

$$L_{\text{atm}} = 2 \sqrt{(R_e + h_{\text{atm}})^2 - R_e^2} \approx 2587 \text{ km},$$

屏与屏之间的距离 δx 统一取为 2 km, 共约 1300 个相位屏.

4.2 利用多相位屏模拟大气多路径

为了探讨低对流层的大气多路径效应对掩星资料反演的影响,利用 EGOPS (End-to-End Generic Occultation Performance Simulation and Processing System) 软件模拟信号. 采用的大气折射率模型为^[13,14]

$$N(h) = 315e^{-0.136 \text{ km}^{-1}h} + Be^{-(h-BH)^2/0.05\text{km}^2}, \quad (10)$$

其中 h 为距离地面的高度,公式(10)右边第二项决定大气多路径效应的强度和位置,常量 B 决定多路径的强度, BH 决定多路径的位置. 当 $B = 0$ 时,大气中不存在多路径效应;当 $B > 0$ 时,存在多路径效应,且随 B 的增大,多路径强度不断增加.

4.3 模拟结果

采用多相位屏模型,数值模拟了强大气多路径条件下(强度 $B=10$, $BH=5 \text{ km}$, 折射指数梯度的最大值为 $0.596 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$) 无线电信号在大气中的传播过程,采样频率为 50 Hz . 图 4 显示的是模拟的相位和振幅,横坐标为掩星时间,图 4a 纵坐标为相位,图 4b 纵坐标为振幅. 振幅在 42 s 至 56 s 有剧烈

的振荡现象,为多路径发生区域.

假设信号在接收过程中没有受到卫星的位置误差、接收机噪声与局部多路径等其他因素的影响,分别用几何光学方法和后向传播方法对模拟信号进行反演.

图 5a 显示的是弯曲角反演结果,GO(下三角形)代表几何光学方法,BP(圆形)代表后向传播方法,True(星形)代表真值(由折射率廓线通过 Abel 积分得到),图 5b 为相应的折射率廓线. 在单路径区域,几何光学方法和后向传播方法都能准确地反演出大气参量廓线. 在大气多路径区域,尤其在折射率梯度变化强烈的区域(如在大气边界层附近^[15]),几何光学方法计算的弯曲角和折射率与真值有较大偏差,弯曲角出现多值情况. 而后向传播方法计算的弯曲角和折射率与真值较为接近,且弯曲角不会出现多值情况.

辅助屏的选择是后向传播方法的一个关键问题. 辅助屏比 LEO 观测轨迹更接近于地球大气,利用后向传播方法所得到的折射率具有更高的垂直分

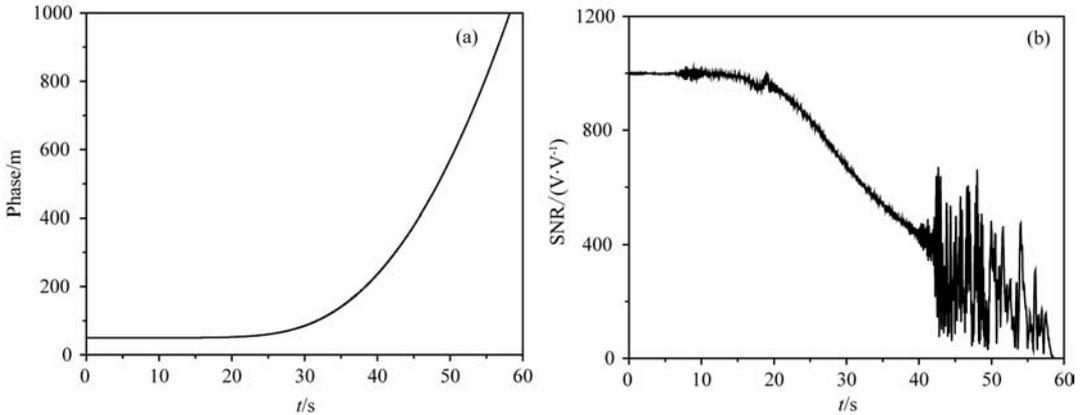


图 4 相位和振幅($B=10$)
Fig. 4 Phase and amplitude ($B=10$)

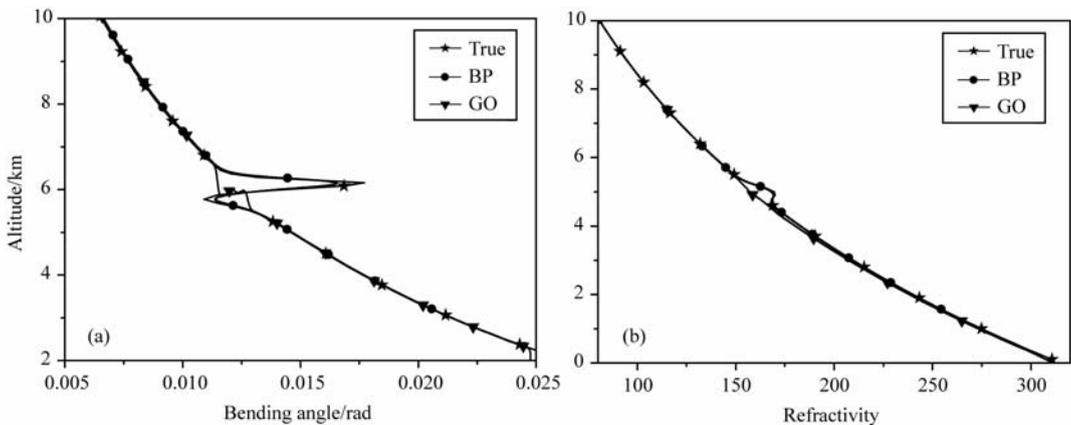


图 5 弯曲角和折射率($B=10$)
Fig. 5 Bending angle and refractivity ($B=10$)

辨率. 辅助屏的位置事先并不知道, 不同多路径强度具有不同的最佳辅助屏位置. 在多路径强度 $B \leq 10$ 的情况下, d 取 77 km~116 km 都能取得较好的结果, 且反演结果相差不大, 取最佳位置为 113 km. 当大气多路径强度进一步增大 ($B=15$, 折射指数梯度的最大值为 $0.788 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1}$), 后向传播方法会偏离真值 (见图 6).

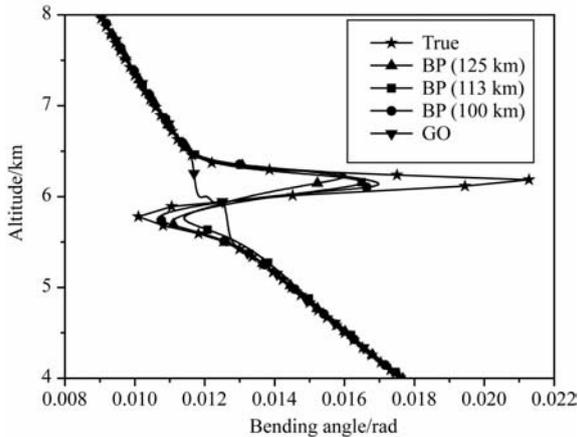


图 6 弯曲角 ($B=15$)

Fig. 6 Bending angle ($B=15$)

在图 6 中, 圆形、正方形和上三角形分别代表取 d 为 100 km、113 km 和 125 km 时的后向传播方法. 当 d 取 113 km 时, 反演结果并不是最佳, 辅助屏的最佳位置取为 $d=100$ km. 一般地, 多路径强度越大, 辅助屏离直线 OP 越近, 即 d 的值越小. 当多路径强度 $B=20$ 时, 最佳位置难以找到, 反演结果不理想, 这时需要更好的全息反演方法.

5 CHAMP 掩星观测数据反演及误差统计

由德国和美国联合研制的 CHAMP 计划的主要任务包括重力、磁场、大气层和电离层等方面的研究, 于 2007 年 7 月发射升空, 每天能提供大约 200 个 CHAMP 掩星廓线^[16]. 本文采用的 CHAMP 掩星数据是从 COSMIC 网站 (<http://www.cosmic.ucar.edu/>) 下载的 atmPhs 资料. 数据采集的时间为 2007 年第 60 天至第 180 天.

为了检验不同方法对实测资料的反演效果, 分别用几何光学方法和后向传播方法对 CHAMP 掩星数据进行反演. 将其折射率反演结果与相应的 ECMWF 分析场资料进行统计比较. 比较区域按纬度分为: 南半球 ($30^{\circ}\text{S} \sim 90^{\circ}\text{S}$)、热带 ($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$) 及

北半球 ($30^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$). 数据插值所选取的步长为 1 km.

统计过程中, 相对误差定义为

$$\Delta_r N = \frac{N_c - N_e}{N} \times 100\%, \quad (11)$$

其中, N_e 表示对 CHAMP 掩星观测数据进行反演后得到的折射率; N_c 表示利用 ECMWF 分析场资料计算的折射率; \bar{N} 为 N_c 与 N_e 的平均值.

平均偏差计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (12)$$

均方差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}, \quad (13)$$

其中, x_i 为第 i 个数据, n 为数据维数.

图 7 表示几何光学方法和后向传播方法反演 CHAMP 掩星观测数据得到的折射率与相应的 ECMWF 分析场资料之间的相对误差的平均偏差和均方差, 从上往下依次为北半球 ($30^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$)、热带 ($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$) 和南半球 ($30^{\circ}\text{S} \sim 90^{\circ}\text{S}$).

从图 7 可以看出:

(1) 在低对流层, 后向传播方法反演折射率的相对误差的平均偏差和均方差普遍小于几何光学方法, 说明后向传播方法反演精度高于几何光学方法.

(2) 从区域看, 北半球 ($30^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{N}$) 反演的精度是最好的, 南半球 ($30^{\circ}\text{S} \sim 90^{\circ}\text{S}$) 次之, 热带 ($30^{\circ}\text{S} \sim 30^{\circ}\text{N}$) 最差. 这与低对流层中含有大量水汽有关^[17~19].

(3) CHAMP 掩星观测数据反演得到的折射率与 ECMWF 分析场资料相比, 存在系统负偏差, 而后向传播方法在一定程度上能减少这种负偏差.

6 结论

在低对流层, 尤其是在热带区域, 经常发生大气多路径传播. 例如在大气边界层, 大气结构尺度小于菲涅耳直径, 电磁波传播介质的梯度变化复杂, 几何光学方法无法描述大气边界层的内部结构^[20]. 基于真空中 Helmholtz 方程的后向传播方法将复原后的掩星复信号从接收机位置反推至更接近于地球大气的辅助屏. 通过减小地球大气与辅助屏的距离, 使得大气多路径效应的影响减少.

采用多相位屏的数学模型对大气多路径条件下

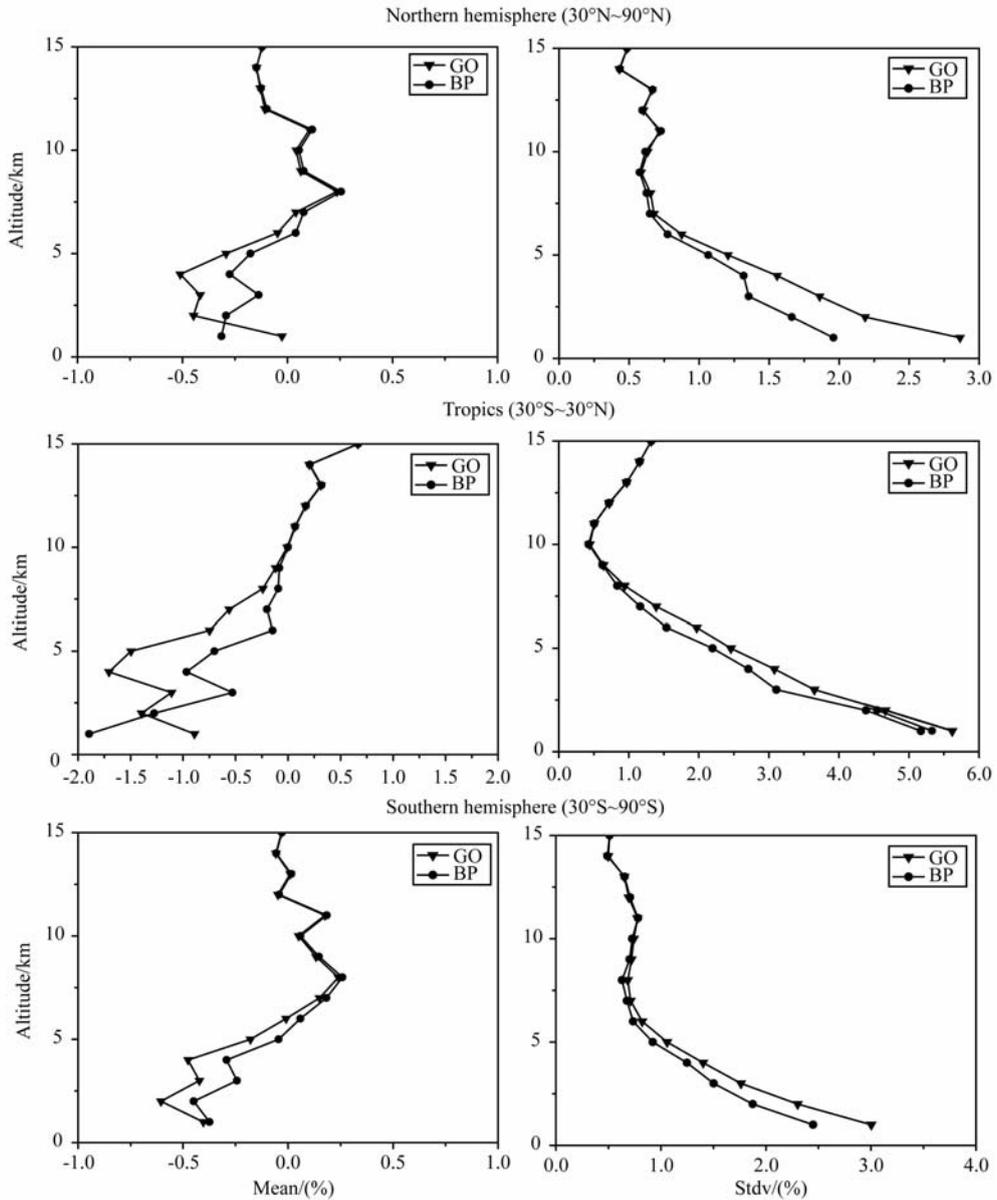


图 7 折射率相对误差的平均偏差和均方差
 Fig. 7 The average deviation and variance of fractional difference in refractivity

的无线电信号的传播过程进行了数值模拟,分别用几何光学方法和后向传播方法反演弯曲角,并与真值进行比较,结果验证了后向传播方法的可行性与准确性. 模拟结果同时表明:(1)在大气单路径条件下,几何光学方法和后向传播方法都能反演得到准确的大气参数;(2)在大气多路径条件下,后向传播方法削弱了多路径效应的影响,其反演结果比几何光学方法更精确. 但后向传播方法依然无法完全消除多路径效应的影响,当低对流层中含较大的折射率梯度或超折射时,后向传播方法将可能失效. 且后向传播方法反演的精度依赖于辅助屏的选择.

分别用几何光学方法和后向传播方法对 2007 年第 60 天至 180 天约 15000 个 CHAMP 掩星观测

数据进行反演,将其折射率反演结果与 ECMWF 分析场资料进行统计比较,结果表明:在低对流层,后向传播方法反演折射率的相对误差的平均偏差和均方差普遍小于几何光学方法. 后向传播方法具有更高的垂直分辨率,能提供对流层(尤其是低对流层)更详细的信息,从而为数值天气预报提供便利.

致谢 对奥地利 Graz 大学的地球物理、天体物理和气象研究所提供 EGOPS 软件和 COSMIC Data Analysis and Archive Center(CDAAC)提供 CHAMP 掩星观测资料表示感谢.

参考文献(References)

[1] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, et al. The COSMIC/

- FORMOSAT-3 mission; Early results. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 2008, **89**(3): 313~333
- [2] 胡 雄, 曾 桢, 张训械等. 大气 GPS 掩星观测反演方法. *地球物理学报*, 2005, **48**(4): 768~774
Hu X, Zeng Z, Zhang X X, et al. Atmospheric inversion methods of GPS radio occultation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2005, **48**(4): 768~774
- [3] 徐贤胜, 洪振杰, 郭 鹏等. COSMIC 掩星电离层资料反演以及结果验证. *物理学报*, 2010, **59**(3): 2163~2168
Xu X S, Hong Z J, Guo P, et al. Retrieval and validation of ionospheric measurements from COSMIC radio occultation. *Acta Phys. Sin.* (in Chinese), 2010, **59**(3): 2163~2168
- [4] Kursinski E R, Hajj G A, Leroy S S, et al. The GPS radio occultation technique. *Terr. Atmos. Ocean. Sci.*, 2000, **11**(1): 53~114
- [5] Gorbunov M E, Gurvich A S. Microlab-1 experiment; Multipath effects in the lower troposphere. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D12): 13819~13826
- [6] Sokolovskiy S V. Modeling and inverting radio occultation signals in the moist troposphere. *Radio Sci.*, 2001, **36**(3): 441~458
- [7] Gorbunov M E. Canonical transform method for processing radio occultation data in the lower troposphere. *Radio Sci.*, 2002, **37**(5): 1076, doi: 10.1029/2000RS002592
- [8] Jensen A S, Lohmann M S, Benzon H H, et al. Full spectrum inversion of radio occultation signals. *Radio Sci.*, 2003, **38**(3): 1040, doi:10.1029/2002RS002763
- [9] Marouf E A, Tyler G L, Rosen P A. Profiling Saturn's rings by radio occultation. *Icarus*, 1986, **68**(1): 120~166
- [10] Karayel E T, Hinson D P. Sub-Fresnal-scale vertical resolution in atmospheric profiles from radio occultation. *Radio Sci.*, 1997, **32**(2): 411~423
- [11] 郭 鹏, 严豪健, 洪振杰等. 中性大气掩星标准反演技术. *天文学报*, 2005, **46**(1): 96~107
Guo P, Yan H J, Hong Z J, et al. The standard retrieval algorithm of neutral atmosphere by GPS occultation. *Acta Astron. Sin.* (in Chinese), 2005, **46**(1): 96~107
- [12] 洪振杰, 郭 鹏, 刘 敏等. GPS 掩星折射率剖面一维变分同化. *天文学报*, 2006, **47**(1): 100~110
Hong Z J, Guo P, Liu M, et al. 1DVAR retrieval of refractivity profiles by GPS occultation. *Acta Astron. Sin.* (in Chinese), 2006, **47**(1): 100~110
- [13] Benzon H H, Nielsen A S, Olsen L. An atmospheric wave optics propagator-Theory and application. Scientific Report 03-01. Copenhagen, Denmark; Danish Meteorological Institute, 2003
- [14] Kirchengast G, Schweitzer S, Ramsauer J, et al. End-to-end GNSS occultation performance simulator version 5 (EGOPsv52) software user manual. Report ESA/ESTEC No. 4/2007. Graz, Austria; University of Graz, 2007
- [15] Sokolovskiy S, Kuo Y H, Rocken C, et al. Monitoring the atmospheric boundary layer by GPS radio occultation signals recorded in open-loop mode. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, **33**: L12813, doi: 10.1029/2006GL025955
- [16] Wickert J, Reigber C, Beyerle G, et al. Atmosphere sounding by GPS radio occultation; First results from CHAMP. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(17): 3263~3266
- [17] Ao C O, Meehan T K, Hajj G A, et al. Lower troposphere refractivity bias in GPS occultation retrievals. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**: 4577, doi: 10.1029/2002JD003216
- [18] Beyerle G, Gorbunov M E, Ao C O. Simulation studies of GPS radio occultation measurements. *Radio Sci.*, 2003, **38**(5): 1084, doi:10.1029/2002RS002800
- [19] 王 鑫, 吕达仁. GPS 无线电掩星技术反演大气参数方法对比. *地球物理学报*, 2007, **50**(2): 346~353
Wang X, Lü D R. Comparative analysis of inversion methods of retrieving atmospheric profiles with GPS occultation measurements. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(2): 346~353
- [20] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S V, et al. Estimating atmospheric boundary layer depth using COSMIC radio occultation data. *J. Atmos. Sci.*, 2011, **68**: 1703~1713, doi: 10.1175/2011JAS3612.1

(本文编辑 何 燕)