

## GPS/LEO 掩星正则变换反演方法\*

徐贤胜<sup>1)†</sup> 郭鹏<sup>2)</sup> 洪振杰<sup>3)</sup> 吴江飞<sup>4)</sup>

1) (浙江大学宁波理工学院, 宁波 315100)

2) (中国科学院上海天文台, 上海 200030)

3) (温州大学, 数学与信息科学学院, 温州 325027)

4) (信息工程大学, 地理空间信息学院, 郑州 450052)

(2012年9月13日收到; 2012年11月19日收到修改稿)

利用无线电全息方法, 如正则变换方法或全谱反演方法, 可以有效地解决大气多路径条件下 GPS 掩星信号的反演问题. 本文采用正则变换方法反演掩星资料, 模拟仿真反演结果显示正则变换方法可以准确地反演包含大气多路径效应的信号. 在模拟信号的相位中加入不同程度的高斯相位噪声后, 正则变换方法的反演结果会受到不同程度的影响. 用正则变换方法对 2007 年第 71 天至 73 天共约 4500 个 COSMIC 数据进行处理. 将其折射率反演结果和 atmPrf 资料 (利用全谱反演方法计算得到) 一起, 与对应的 ECMWF 分析场资料进行统计比较, 结果表明: 在 5 km 以下, 正则变换方法计算的折射率的相对误差的平均值普遍大于 atmPrf 资料. 其原因可能为: 正则变换方法将信号从 LEO 轨迹后传播至辅助屏, 造成孔径缩小, 精度下降. 同时也讨论了信号截断对低对流层中反演精度和掩星个数的影响.

**关键词:** 无线电掩星, 大气多路径, 多相位屏技术, 正则变换方法

**PACS:** 92.60.Fm, 92.60.hv

**DOI:** 10.7498/aps.62.079201

## 1 引言

利用 GPS 无线电掩星技术, 可以将 LEO 卫星接收的信号逐步转换为中性大气的弯曲角、折射率、温度等参数<sup>[1]</sup>. 在低对流层, 反演得到的折射率具有较大的负偏差, 这与传统的 GPS 信号跟踪模式即闭环模式有关. 闭环模式难以俘获低对流层的信号, 容易发生失锁现象, 而且不能跟踪上升掩星. 为了提高低对流层掩星观测的质量和数量, 中国台湾和美国于 2006 年联合研制的 COSMIC 计划采用开环模式跟踪 GPS 信号<sup>[2,3]</sup>. 与闭环模式相比, 开环模式有效地避免了失锁现象的发生, 使得 GPS 信号能够穿透大气边界层; 而且开环模式具备跟踪上升和下降两种掩星的能力, 大大增加了低对流层的数据<sup>[2]</sup>.

在低对流层, 水汽的存在和折射率的复杂结构

容易导致 GPS 信号发生大气多路径传播, 大气多路径效应会给大气参数反演带来困难. 利用无线电全息方法可以在一定程度上解决大气多路径区域信号的反演问题<sup>[4]</sup>. 后向传播方法将无线电信号从 LEO 位置后传播至辅助屏, 减少了大气多路径效应的影响<sup>[5,6]</sup>. 辅助屏的选取是后向传播方法的一个关键问题, 辅助屏的选择将直接影响反演精度. 后向传播方法难以获得低对流层 (如 2 km 以下) 的数据, 这是后向传播方法的不足之处. 滑动频谱方法也称无线电光学方法, 它在有限大小的时间孔径内对 LEO 卫星接收的信号进行频谱分析, 通过局部极大频谱对应的频率计算弯曲角, 最后以谱能量为权重进行滑动平均计算弯曲角和碰撞参数<sup>[3]</sup>. 与后向传播方法相比, 滑动频谱方法具有较低的探测深度, 但其反演精度容易受到噪声的影响<sup>[7]</sup>. Xu 等提出一种改进的滑动频谱方法, 即利用信号的振幅和

\* 地震行业科研专项 (批准号: 201108004), 国家自然科学基金 (批准号: 11103068, 11273047) 和上海市科委科研项目 (批准号: 12DZ1111100) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: xuxiansheng666@126.com

谱能量信息对滑动频谱方法进行修正,在一定程度上削弱了信号中噪声的影响,提高了低层大气的反演精度<sup>[8]</sup>.

在无线电全息方法中,基于 Fourier 积分算子发展而来的方法,如正则变换方法、第二类正则变换方法和全谱反演方法,是精度相对较高的反演方法,本文主要对正则变换方法进行详细阐述<sup>[8,9]</sup>.正则变换方法通过衍射积分将 LEO 位置接收的信号后传播至辅助屏,然后利用正则变换将辅助屏上的信号从坐标空间转换至碰撞参数空间,在碰撞参数空间,弯曲角不再是碰撞参数的多值函数,从而减少大气多路径效应的影响<sup>[10,11]</sup>.

本文通过多相位屏技术对大气多路径条件下的信号进行模拟,利用正则变换方法计算弯曲角和碰撞参数,讨论了多路径强度和噪声对反演方法的影响.用正则变换方法处理 COSMIC 掩星数据,将其计算的折射率和 atmPrf 资料一起,与 ECMWF 分析场资料进行统计比较,分析了正则变换方法和 atmPrf 资料的误差特性.

## 2 正则变换方法

正则变换方法通过衍射积分将 LEO 位置接收的信号后传播至辅助屏,然后利用正则变换将辅助屏上的信号从坐标空间转换至碰撞参数空间.在碰撞参数空间中,弯曲角是碰撞参数的单值函数.因此,利用正则变换方法能解决大气多路径区域的弯曲角反演问题.正则变换方法的提出基于三个假设:1) GPS 入射光为平行光;2) 在掩星过程中, GPS 卫星的位置固定不动;3) 每个碰撞参数只对应一条射线<sup>[6]</sup>.

正则变换方法将信号从坐标变量  $y$  及其对应的正则动量同时变换到碰撞参数变量  $p$  及其对应的正则动量  $\xi$ .正则动量  $\eta$  和  $\xi$  都与弯曲角有关.在  $(y, \eta)$  空间中,当多条光线同时到达一个位置时,同一个  $y$  可能会对应多个  $\eta$ ;在  $(p, \xi)$  空间中,同一个  $p$  只能对应一个  $\xi$ ,因此正则变换方法能解决信号的大气多路径传播问题.对变量组进行同步变换也是正则变换优于后向传播方法和滑动频谱方法的地方<sup>[10]</sup>.

正则变换方法的计算是在掩星坐标系中进行的(见图 1),图 1 中  $O$  代表曲率中心,  $L$  代表 LEO 卫星,  $G$  代表 GPS 卫星,直线  $GT$  与曲率圆相切于  $T$  点.掩星坐标系的定义如下:以曲率中心  $O$  为原点;

$X$  轴经过原点且平行于直线  $GT$ ,方向与向量  $\overline{GT}$  一致;  $Y$  轴与  $X$  轴垂直,其正方向与 LEO 卫星在  $X$  轴的同侧.正则变换方法通过衍射积分将 LEO 卫星接收的信号后传播至辅助屏:

$$u_x(\mathbf{h}) = \left(\frac{k}{2\pi}\right)^{1/2} \int_{S_L} u(\mathbf{h}') \cos \varphi_{hh'} \frac{\exp(-ik|\mathbf{h}-\mathbf{h}'| + i\pi/4)}{|\mathbf{h}-\mathbf{h}'|^{1/2}} dS, \quad (1)$$

其中,  $i$  表示虚数单位,  $k$  表示波数.  $u(\mathbf{h}')$  代表掩星坐标系中 LEO 卫星接收的信号,  $\mathbf{h}'$  与  $\mathbf{h}$  分别代表曲率中心到 LEO 卫星和辅助屏上的点的向量.  $S_L$  是掩星过程中 LEO 卫星运动形成的轨迹曲线.辅助屏到  $Y$  轴的距离  $x = 1000$  km.  $\cos \varphi_{hh'}$  代表矢量  $\mathbf{h}-\mathbf{h}'$  与  $S_L$  的法向量  $\mathbf{n}_x$  的夹角.

假设已经得到辅助屏上的信号  $u_x(y)$ , 其中  $y$  是  $\mathbf{h}$  的虚部 ( $\mathbf{h} = x + iy$ ). 首先对信号进行 Fourier 变换,得到  $\tilde{u}_x(\eta)$ .

正逆 Fourier 变换定义如下:

$$\tilde{u}_x(\eta) = \int u_x(y) \exp[-iky\eta] dy, \quad (2)$$

$$u_x(y) = \frac{k}{2\pi} \int \tilde{u}_x(\eta) \exp[iky\eta] d\eta. \quad (3)$$

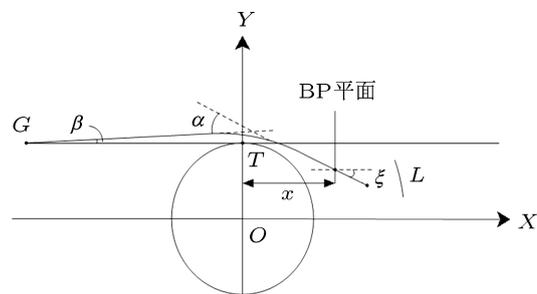


图 1 信号的后向传播

通过正则变换将信号从相空间  $(y, \eta)$  变换到  $(p, \xi)$

$$p = -x\eta + y\sqrt{1-\eta^2}, \quad (4)$$

$$\xi = \arcsin \eta.$$

正则变换所对应的母函数  $S_x$  和振幅  $a_x$  分别为

$$S_x(p, \eta) = p \arcsin \eta - x\sqrt{1-\eta^2}, \quad (5)$$

$$a_x(p, \eta) = (1-\eta^2)^{-1/4}.$$

通过 Egorov 定理, 可以将 (4) 式所表示的正则变换写成 Fourier 积分算子:

$$\Phi_x u_x(p) = \frac{k}{2\pi} \int a_x(p, \eta) \exp[ikS_x(p, \eta)]$$

$$\times \tilde{u}_x(\eta) d\eta. \quad (6)$$

为了减少谱信号  $\tilde{u}_x(\eta)$  的振荡, 将变量  $y$  和  $p$  减去地球曲率半径  $r_c$

$$\begin{aligned} \Delta p &= p - r_c, \\ \Delta y &= y - r_c, \end{aligned} \quad (7)$$

并定义

$$\begin{aligned} v_x(\Delta y) &= u_x(r_c + \Delta y), \\ \Phi_x v_x(\Delta p) &= \Phi_x u_x(r_c + \Delta p). \end{aligned} \quad (8)$$

由 Fourier 变换的定义, 即 (2), (3) 式得到

$$\tilde{v}_x(\eta) = \exp[ikr_c\eta] \tilde{u}_x(\eta). \quad (9)$$

将上式代入 (6) 式可得

$$\begin{aligned} \Phi_x v_x(\Delta p) &= \frac{k}{2\pi} \int (1 - \eta^2)^{-1/4} \\ &\times \exp \left\{ ik \left[ \left( \Delta p \arcsin \eta - x \sqrt{1 - \eta^2} \right) \right. \right. \\ &\left. \left. + r_c (\arcsin \eta - \eta) \right] \right\} \tilde{v}_x(\eta) d\eta. \end{aligned} \quad (10)$$

由  $\xi = \arcsin \eta$  及 (10) 式可推得<sup>[10]</sup>

$$\begin{aligned} \tilde{\Phi}_x v_x(\xi) &= \exp \left\{ ik \left[ -x \cos \xi + r_c (\xi - \sin \xi) \right] \right\} \\ &\times \tilde{v}_x(\sin \xi) \sqrt{\cos \xi}, \end{aligned} \quad (11)$$

得到  $\tilde{\Phi}_x v_x(\xi)$  后, 就可以通过 Fourier 逆变换得到信号  $\Phi_x v_x(\Delta p)$ . 对其相位  $\arg \Phi_x v_x(\Delta p)$  进行整周模糊度调整和求导后得到弯曲角

$$\xi(\Delta p) = -\frac{d[\arg \Phi_x v_x(\Delta p)]}{d\Delta p}. \quad (12)$$

由于在假设中, GPS 卫星的入射光为平行光, 即 GPS 卫星的位置假设在无穷远处. 但实际上 GPS 卫星的位置离开曲率中心的距离为有限值. 因此需要进行弯曲角修正

$$\alpha(p) = \alpha(r_c + \Delta p) = \xi(\Delta p) + \beta, \quad (13)$$

角度  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\xi$  的几何意义见图 1. (13) 式右边第二项  $\beta$  是关于假设 (1) 的修正项

$$\beta = \arcsin \left( \frac{p}{r_G} \right) - \arcsin \left( \frac{r_c}{r_G} \right), \quad (14)$$

其中,  $r_G$  表示 GPS 到曲率中心的距离.

在局部球对称大气假设下, 可通过 Abel 积分变换将弯曲角转化为折射指数  $n$  为

$$n(r) = \exp \left( \frac{1}{\pi} \int_p^\infty \frac{\alpha(x)}{\sqrt{x^2 - p^2}} dx \right), \quad (15)$$

其中  $r = p/n(r)$ , 而折射率  $N = (n - 1) \cdot 10^6$ .

### 3 模拟仿真

利用大气多相位屏技术可以准确地模拟大气多路径条件下的信号传播. 利用已知的 GPS 和 LEO 卫星轨道, 以及大气折射率模型, 可通过 EGOPS (End-to-End Generic Occultation Performance Simulation and Processing System) 软件模拟大气多路径条件下 GPS 信号的相位和振幅. 采用的大气折射率模型

$$\begin{aligned} N(h) &= 315 \exp \left[ \frac{-h}{7.35 \text{ km}} \right] \\ &+ B \exp \left[ \frac{-(h - 5 \text{ km})^2}{0.05 \text{ km}^2} \right], \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $h$  为距离地面的高度,  $B$  决定多路径的强度. 在模拟中, 通过相位屏将地球大气进行分割, 屏与屏之间假设为真空, 大气的折射介质分布在相位屏内. 第一个相位屏与最后一个相位屏之间的距离约为 2587 km, 屏与屏之间的间距统一取为 2 km, 总共约 1300 个相位屏.

#### 3.1 大气多路径强度的影响

为了验证正则变换方法的反演效果, 模拟了多路径强度  $B = 10$  和  $B = 20$  的掩星信号 (相应的折射率梯度的最大值分别为  $59.6 \text{ km}^{-1}$  和  $90.8 \text{ km}^{-1}$ ). 用正则变换方法对信号进行反演得到大气弯曲角, 并与真值 (由折射率廓线通过 Abel 积分得到) 进行比较:

图 2 中星标记代表真值, 圆标记代表正则变换方法. 横坐标表示弯曲角, 纵坐标表示碰撞参数与地球曲率半径的差  $p - r_c$ . 从图 2 中看出, 正则变换方法在单路径区域 (7 km 以上及 5 km 以下) 和多路径区域 (6 km 左右) 均与真值差别很小. 当多路径强度增大, 如图 2(b) 所示, 正则变换方法的精度也没有明显地下降. 这说明正则变换方法可以准确地反演包含大气多路径效应的信号.

#### 3.2 噪声的影响

在低对流层, 噪声也会造成反演精度的下降. 对包含噪声的信号的反演是评估大气反演方法一个重要方面<sup>[12,13]</sup>. 为了评估噪声对正则变换方法的影响, 在模拟信号的相位中加入 10 mm 和 20 mm 的高斯噪声. 对包含噪声的信号进行求解, 并将弯曲角反演结果与真值进行比较 (图 3(a), (b)). 在图 3(a), (b) 中, 圆标记和下三角形标记分别代表信号

的相位中加入了 10 mm 和 20 mm 高斯噪声后的弯曲角反演结果. 从图 3(a), (b) 看出, 在大气多路径条件下, 正则变换方法对噪声较为敏感. 正则变换方法反演的弯曲角在 6 km 左右与真值差别较大, 而且随着噪声的增加, 反演精度也随之变差 (图 3(b) 比图 3(a) 明显). 这说明, 在大气多路径的条件下, 噪声可能会使正则变换方法反演的弯曲角变小. 图 3(c), (d) 表示的是信号  $\Phi_{xv_x}(\Delta p)$  的振幅, 实线代表没有噪声时的振幅, 虚线表示在相位中加入 10 mm 高斯噪声后的结果. 从图 3(c), (d) 中看出, 当信号中没有噪声时, 经过正则变换转换后, 信号的振幅近似于常数 (约 740 V/V). 振幅在约 6 km 左右有一个突然变小又恢复的过程, 表明信号可能受到多路径效应的影响. 当在模拟信号中加入噪声后, 信号的振幅也会相应地受到影响.

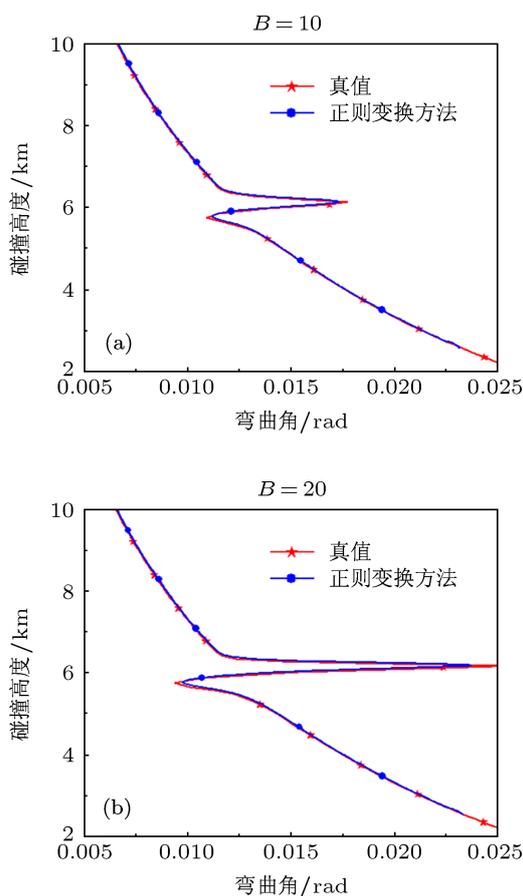


图 2 大气多路径条件下的弯曲角反演 (a)  $B = 10$ ; (b)  $B = 20$

## 4 统计结果

用正则变换方法处理 COSMIC 掩星的 atmPhs

资料, 将其折射率计算结果和 atmPrf 资料一起, 与相应的 ECMWF 分析场资料进行统计比较. 其中, atmPhs 和 atmPrf 资料均来源于 COSMIC 网站 (<http://www.cosmic.ucar.edu/>), atmPrf 资料是通过全谱反演方法反演 atmPhs 资料得到的 [8]. 比较区域按纬度分为北半球 ( $30^\circ\text{N}—90^\circ\text{N}$ )、热带 ( $30^\circ\text{S}—30^\circ\text{N}$ ) 和南半球 ( $30^\circ\text{S}—90^\circ\text{S}$ ). 比较高度为 15 km 以下, 数据插值所选取的步长为 100 m.

在统计过程中, 相对误差  $\Delta_f N$  定义为

$$\Delta_f N = \frac{N_c - N_e}{\bar{N}} \times 100\%, \quad (17)$$

其中,  $\bar{N}_c$  代表对 COSMIC 掩星观测数据进行反演后得到的折射率;  $N_e$  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.

平均值计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{k=1}^n x_k}{n}. \quad (18)$$

标准差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (19)$$

其中,  $x_k$  为第  $k$  个数据,  $n$  为数据维数.

### 4.1 信号的截断

在低对流层 (尤其是热带的 3 km 以下), 由于受到大气多路径效应和噪声等因素的影响, 信号的振幅容易发生衰减. 在严重的情况下, 还可能会导致信号的缺失或不可用. 这时信号中噪声的成分较大, 反演结果会有较大的误差. 一种简单可行的办法是将信号进行截断, 剔除某一高度以下的数据. 本文利用 (10) 式中信号  $\Phi_{xv_x}(\Delta p)$  的振幅  $|\Phi_{xv_x}(\Delta p)|$  进行信号截断处理. 具体过程为: 1) 首先计算  $|\Phi_{xv_x}(\Delta p)|$  在 20 km 以上的平均值  $\bar{\Phi}$ ; 2) 当振幅值在某一高度满足  $|\Phi_{xv_x}(\Delta p)| < \mu \cdot \bar{\Phi}$  时, 就将此高度以下的数据剔除, 其中截断变量  $\mu$  代表截断的百分比. 利用正则变换方法反演 2007 年第 73 天共 1047 个 COSMIC 掩星,  $\mu$  的值分别取为 10%, 30%, 50%, 70%. 并计算 COSMIC 和 ECMWF 资料之间折射率的相对误差, 见 (17) 式. 在本文统计过程中, 已剔除折射率相对误差的绝对值大于 20% 的数据. 计算结果如图 4 所示.

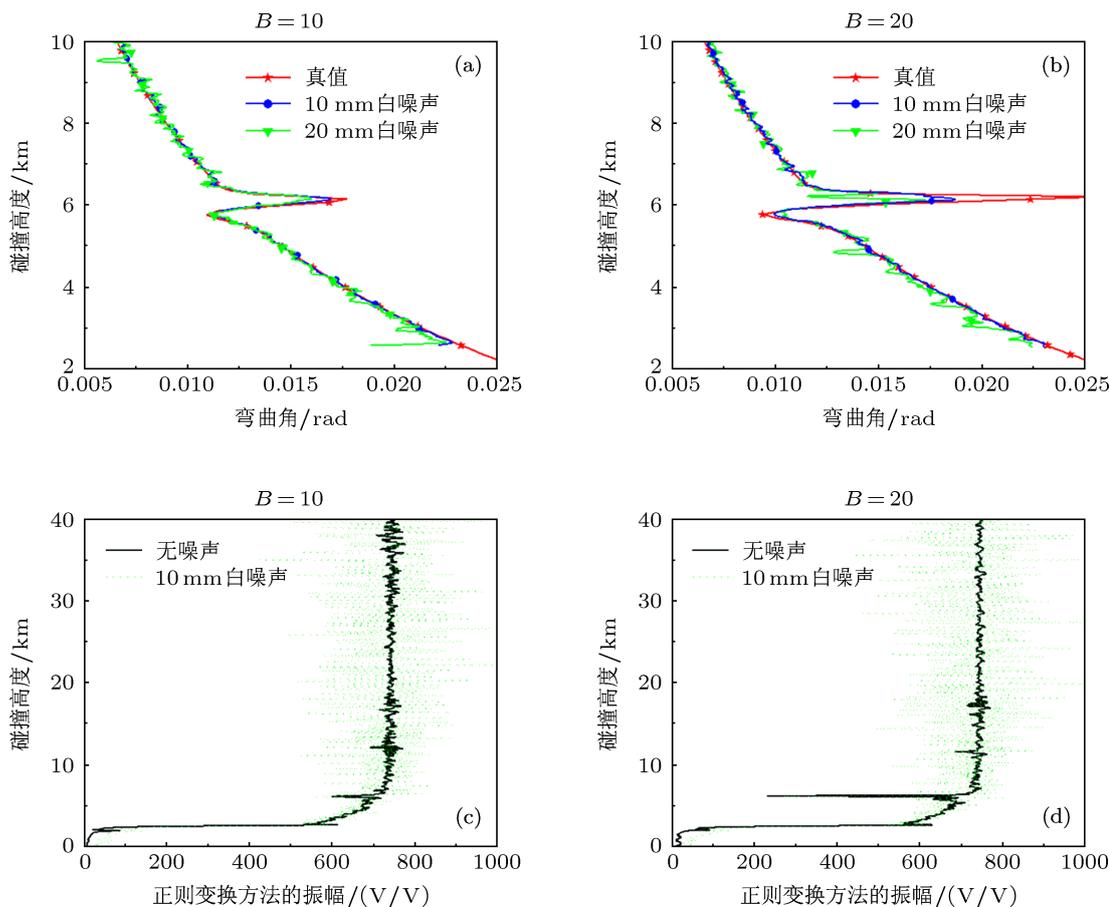


图3 高斯相位噪声对弯曲角反演的影响: (a), (b) 弯曲角; (c), (d) 振幅

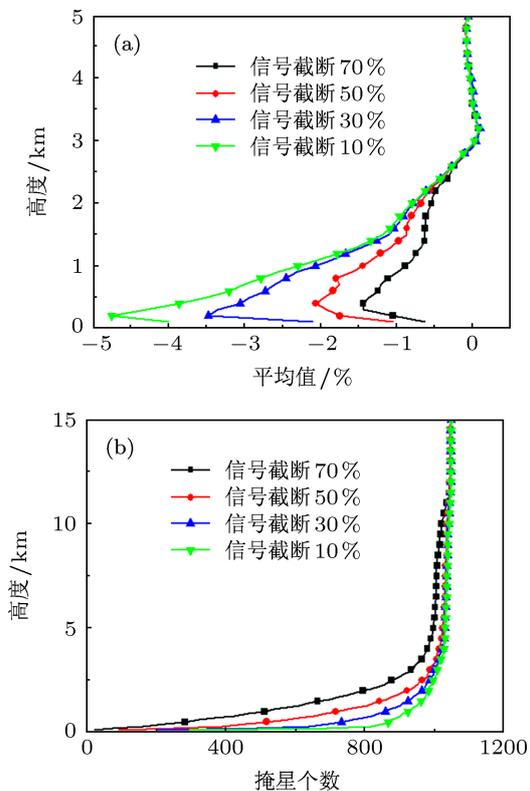


图4 利用2007年第73天的数据进行信号截断实验

图4(a)代表折射率相对误差的平均值,图4(b)代表掩星个数.下三角形、上三角形、圆形、正方形代表 $\mu$ 分别取10%,30%,50%,70%.从图4(a)看出,随着 $\mu$ 的不断增大,平均值不断变小.图4(b)表明,随着 $\mu$ 的不断增大,掩星个数逐渐减少,尤其是在10 km以下.截断变量 $\mu$ 的选取应该同时考虑掩星个数和反演精度两个因素.在本文中,选取 $\mu = 50\%$ .

### 4.2 COSMIC 掩星资料反演及其误差统计

用正则变换方法反演2007年第71天到73天共约4500个COSMIC掩星,并同时计算正则变换方法和atmPrf资料关于ECMWF资料的折射率的相对误差.统计结果见图5.

图5中星标记代表atmPrf资料,圆标记代表正则变换方法.从上往下依次为北半球(30°N—90°N)、热带(30°S—30°N)和南半球(30°S—90°S).纵坐标为高度,横坐标分别代表平均值、标准差和掩星个数.从图5看出:

1) 从折射率相对误差的平均值上看,北半球、

南半球和热带三区域的反演精度依次降低. 这可能是由于南半球观测资料较少, ECMWF 分析场在南半球的质量不如北半球, 而热带水汽含量较多, 大气边界层空间结构变化复杂, 影响了掩星数据的反演质量 [14].

2) 在低对流层, 尤其在热带的 5 km 以下, 正则变换方法和 atmPrf 资料的折射率相对误差的平均值都为负数. 这与低对流层中含有较多的水汽, 容易发生超折射有关 [15-17]. 另外, 在大气多路径条件下, 噪声也可能会造成正则变换方法反演的弯曲角变小. 用此弯曲角计算的折射率也会相应地变小. 因此, 噪声也可能会导致折射率相对误差的平均值变小.

3) 在单路径区域, 即约 5 km 以上, 正则变换方法计算的折射率相对误差的平均值与 atmPrf 资料很接近; 在多路径区域, 主要在 5 km 以下, 正则变换方法的平均值要大于 atmPrf 资料, 尤其是在热带. 其原因可能为: (a) 正则变换方法和 atmPrf 资料中采用的信号截断方式不一致; (b) 正则变换方法需将信号后传播至辅助屏. 若将 LEO 轨迹整体看成一个孔径, 则将信号进行后向传播后, 容易造成孔径缩小, 精度降低.

4) 从掩星个数上看, 两种方法较为接近. 且掩星个数在 10 km 开始就有不同程度的减少, 正则变换方法的掩星个数略多于 atmPrf 资料. 这是由于两种方法都采取了信号截断的结果.

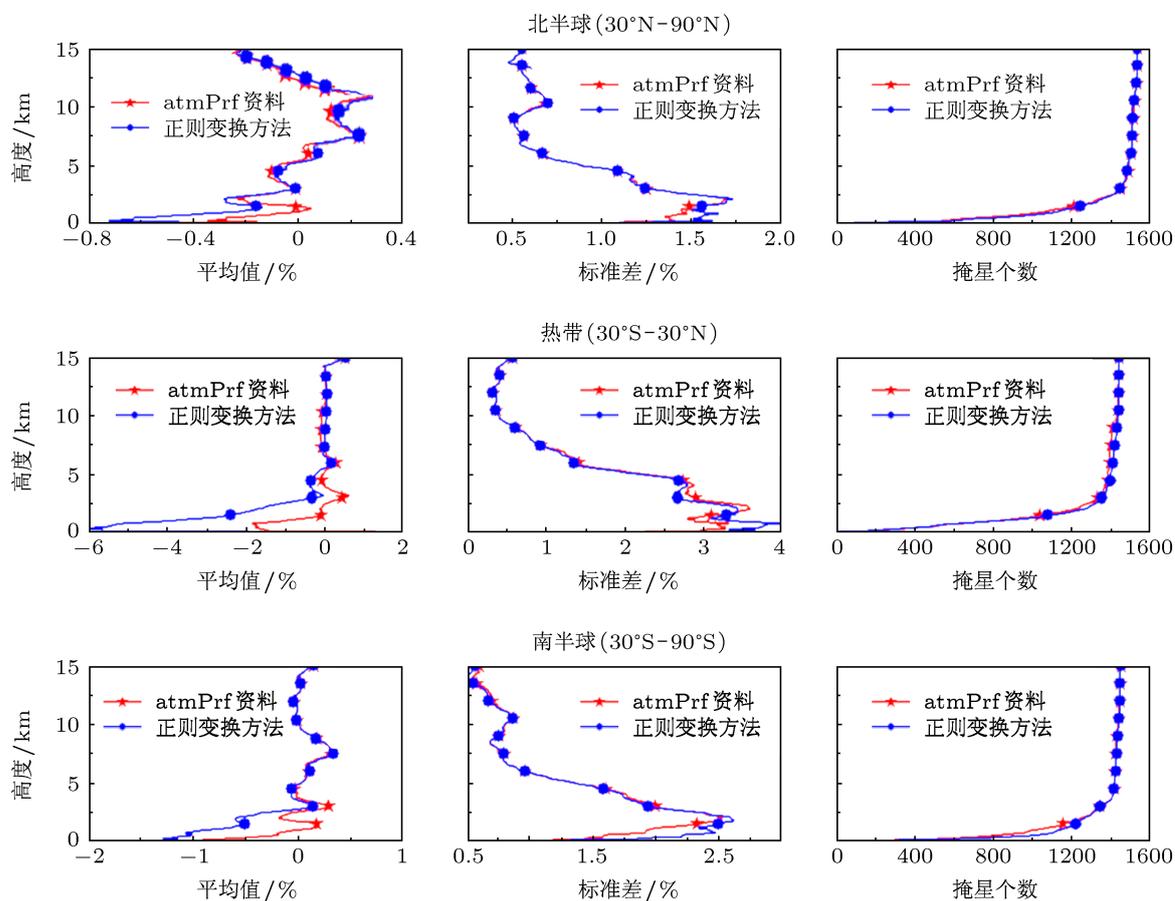


图5 COSMIC 掩星数据与 ECMWF 资料的比较

## 5 结论

正则变换方法利用衍射积分将 LEO 轨迹上的信号后传播至辅助屏, 然后通过正则变换将信号从

坐标空间变换至碰撞参数空间, 在碰撞参数空间, 弯曲角是碰撞参数的单值函数. 正则变换方法的特点为: 1) 正则变换方法与辅助屏位置的选择无关, 而后向传播方法依赖于辅助屏位置的选择; 2) 正则

变换方法包含后向传播和坐标变换两个步骤, 两个步骤都能减少衍射效应, 但后向传播可能比较耗时.

通过大气多相位屏技术对大气多路径条件下的信号进行模拟, 用正则变换方法对模拟信号进行反演, 发现正则变换方法计算的弯曲角与真值相差不大. 这说明正则变换方法可以解决大气多路径条件下的信号反演问题. 在模拟信号的相位中加入不同程度的高斯相位噪声, 反演结果表明正则变换方法会受到不同程度的影响.

通过统计比较的方式, 讨论了信号截断对对流层中反演精度和掩星个数的影响. 利用正则变换方法对 2007 年第 71 至 73 天的 COSMIC 数据进行处理, 将其计算的折射率和 atmPrf 资料一起, 与

ECMWF 资料进行统计比较. 从统计结果中看出, 在 5 km 以上, 正则变换方法和 atmPrf 资料的折射率的相对误差的平均值相当; 在 5 km 以下 (尤其是热带), atmPrf 资料的平均值普遍小于正则变换方法. 其可能原因为: 正则变换方法中包含的后向传播过程会导致孔径缩小, 精度下降. 第二类正则变换方法是一种更为有效的反演方法, 它避免了将信号进行后向传播的过程, 因此会有较高的反演精度<sup>[18]</sup>. 这将在后续的工作中加以研究和讨论.

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

- 
- [1] Hu X, Zeng Z, Zhang X X, Zhang D Y, Xiao C Y 2005 *Chinese J. Geophys.* **48** 768 (in Chinese) [胡雄, 曾桢, 张训械, 张冬娅, 肖存英 2005 地球物理学报 **48** 768]
- [2] Sokolovskiy S, Rocken C, Hunt D, Schreiner W, Johnson J, Masters D, Esterhuizen S 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L14816
- [3] Sokolovskiy S 2001 *Radio Sci.* **36** 441
- [4] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Anthes R A 2004 *J. Meteor. Soc. Jpn.* **82** 507
- [5] Gorbunov M E, Gurvich A S 1998 *J. Geophys. Res.* **103** 13819
- [6] Xu X S, Huang S X, Guo P, Hong Z J 2011 *Chinese J. Geophys.* **54** 2193 (in Chinese) [徐贤胜, 黄思训, 郭鹏, 洪振杰 2011 地球物理学报 **54** 2193]
- [7] Xu X S, Guo P, Huang S X, Xiang J 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 099202 (in Chinese) [徐贤胜, 郭鹏, 黄思训, 项杰 2011 物理学报 **60** 099202]
- [8] Xu X S, Guo P, Huang S X, Xiang J, Hong Z J 2011 *GPS Solut.* Submit
- [9] Jensen A S, Lohmann M S, Benzon H H, Nielsen A S 2003 *Radio Sci.* **38** 1040
- [10] Gorbunov M E 2002 *Radio Sci.* **37** 1076
- [11] Gorbunov M E 2002 *Radio Sci.* **37** 1014
- [12] Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D 2010 *J. Geophys. Res.* **115** D22111
- [13] Lohmann M S, Jensen A S, Benzon H H, Nielsen A S 2006 *Radio Sci.* **41** RS3001
- [14] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S, Lenschow D H 2011 *J. Atmos. Sci.* **68** 1703
- [15] Sokolovskiy S 2003 *Radio Sci.* **38** 1058
- [16] Xie F, Wu D L, Ao C O, Kursinski E R, Mannucci A J, Syndergaard S 2010 *Geophys. Res. Lett.* **37** L11805
- [17] Xu X S, Guo P, Xu T L, Hong Z J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 199202 (in Chinese) [徐贤胜, 郭鹏, 徐桃玲, 洪振杰 2012 物理学报 **61** 199202]
- [18] Gorbunov M E, Lauritsen K B 2004 *Radio Sci.* **39** RS4010

# Canonical transform method for GPS/LEO radio occultation\*

Xu Xian-Sheng<sup>1)†</sup> Guo Peng<sup>2)</sup> Hong Zhen-Jie<sup>3)</sup> Wu Jiang-Fei<sup>4)</sup>

1) (*Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China*)

2) (*Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China*)

3) (*School of Mathematics & Information Science, Wenzhou University, Zhejiang 325027, China*)

4) (*Institute of Geospatial Information, Information Engineering University, Zhengzhou 450052, China*)

(Received 13 September 2012; revised manuscript received 19 November 2012)

## Abstract

Under the atmospheric multipath conditions, both canonical transform (CT) and full spectrum inversion (FSI) method can solve the problem of calculating bending angle profiles within the multipath area. The atmospheric propagation of GPS signals under atmospheric multipath conditions is simulated using multiple phase screens (MPS) technique. Bending angle profiles computed by CT method are compared with corresponding solutions to Abel integral (taken as the true value). The results show that CT method is close to the true value in the multipath area. The retrieval accuracy of CT method is degraded to some extent when Gaussian noises are added to the phase of simulated signal. About 4500 COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) atmPhs profiles from DOY (day of year) 71 to DOY 73 in 2007 are retrieved by CT method. Statistical comparisons of the retrieved refractivity profiles, together with atmPrf data (retrieved by FSI method), with those from corresponding ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) analysis show that CT method contains greater systematic negative bias than atmPrf data below 5 km. A possible reason is that the signal aperture is decreased for back-propagating the signal from LEO position to the back-propagation plane in CT method. The small aperture means low accuracy in the refractivity. The influence of signal truncation on both retrieval accuracy and occultation number is also discussed.

**Keywords:** radio occultation, atmospheric multipath, MPS technique, CT method

**PACS:** 92.60.Fm, 92.60.hv

**DOI:** 10.7498/aps.62.079201

---

\* Project supported by the Seism Public Welfare Scientific Research Project (Grant No. 201108004), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11103068, 11273047), and the Shanghai Science and Technology Committee Research Project (Grant No. 12DZ1111100).

† Corresponding author. E-mail: xuxiansheng666@126.com