

无线电掩星滑动频谱方法和后传播方法的分析比较*

徐贤胜^{1)†} 郭鹏²⁾ 黄思训³⁾ 项杰³⁾

1) (上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

2) (中国科学院上海天文台, 上海 200030)

3) (解放军理工大学气象学院, 南京 211101)

(2010年11月17日收到; 2011年1月6日收到修改稿)

本文详细介绍了滑动频谱方法, 并通过模拟仿真和实测资料处理后传播方法进行比较. 通过对模拟仿真信号反演发现, 后传播方法和滑动频谱方法均能削弱大气多路径的影响, 后传播方法在一定程度上优于滑动频谱方法; 在模拟信号的相位中加入高斯噪声对后传播方法影响不大, 但对滑动频谱方法影响较大, 尤其在边界层以下. 分别用后传播方法和滑动频谱方法对 2007 年第 71 天至 73 天共约 4500 个 COSMIC 掩星数据进行处理. 将折射率反演结果与 ECMWF 分析场资料进行统计比较, 结果显示: 滑动频谱方法反演的掩星廓线深度大于后传播方法; 后传播方法求得的折射率相对误差的均值普遍小于滑动频谱方法.

关键词: GPS/LEO 掩星, 多相位屏模型, 后传播方法, 滑动频谱方法

PACS: 92. 60. Fm, 92. 60. hv

1. 引言

GPS/LEO 无线电掩星技术具有低成本、高精度、全球覆盖、全天候等特点, 是进行天气预报和大气探测的重要手段. 首次 GPS/LEO 掩星实验——GPS/MET 计划的成功实施证实了 GPS 无线电掩星技术的可行性. GPS/LEO 掩星实验也发现了新问题: 在低对流层, GPS/MET 反演的折射率与探空资料相比, 存在一定的负偏差^[1]. 其原因可归结如下: 1) 在低湿对流层, 大气折射率梯度的剧烈变化经常引起大气多路径传播, 即发射机发出的多个信号穿过地球大气后同时到达接收机. 从而造成相位和振幅的剧烈振荡, 并最终导致信号失锁. 2) LEO 卫星接收到的相位和振幅数据是来自多个路径的 GPS 信号及噪声的叠加, 目前还无法找到一种方法能完全分离这种叠加后的信号^[2].

GPS 的观测量主要是载波 L1 和 L2 的相位和振幅, 载波频率分别为 $f_{L1} = 1575.42$ MHz 和 $f_{L2} = 1227.60$ MHz. 在消除周跳、接收机和卫星钟差之后, 用相位减去 GPS 与 LEO 卫星间直线距离可得到大气附加相位延迟. 几何光学方法 (geometric optics

method, GO) 是在 GPS 与 LEO 卫星间单路径传播条件下, 对大气附加相位延迟进行傅里叶滤波后计算得到大气多普勒; 利用多普勒方程和 Snell 定律, 从大气多普勒中得到大气弯曲角和碰撞参数; 再对弯曲角进行 Abel 积分变换, 获得大气折射指数; 通过 Smith-Weintraub 方程、理想气体方程和流体静力学方程可以计算出温度、压强等大气参数廓线^[3,4].

在大气多路径条件下, 多普勒方程不再成立, 几何光学方法失效; 而无线电掩星全息方法使用全部或局部的复信号信息 (相位和振幅) 反演大气弯曲角, 可以有效地减少大气多路径影响. 目前比较成熟的全息方法有: 后传播方法 (back propagation method, BP)、滑动频谱方法 (sliding spectral method, SS)、正则变换方法以及全谱反演方法^[5]. 本文主要分析比较后传播方法和滑动频谱方法的特点.

基于真空中 Helmholtz 方程的后传播方法将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, 使得大气多路径的影响减少. 由于辅助屏与临边的距离变小, 菲涅耳直径变小, 从而能提高垂直分辨率.

滑动频谱方法也称无线电光学方法, 它在有限大小的孔径 (时间) 内对 LEO 卫星接收的复信号进

* 地震行业科研专项 (批准号: 201108004), 国家科技部 863 (批准号: 2009AA12Z319) 和国家自然科学基金 (批准号: 41075081) 资助的课题.

† E-mail: xuxiansheng666@126.com

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. 不进行局部极大频谱的识别和选择^[6]. Hocke 等使用多重信号分类(multiple signal classification, MUSIC)技术对4个掩星事件进行频谱分析,检验了滑动频谱方法^[7]. Beyerle 等用 MUSIC 技术对一个月的 CHAMP 数据进行处理,对信号进行频谱分析后选取5个主谱线进行计算,发现20%—30%的信号包含地面反射^[8]. Gorbunov 等对滑动频谱方法求得的弯曲角和碰撞参数的精度进行了分析,并指出若能将信号中错误的局部极大频谱进行辨别和剔除会改进反演精度^[9]. 本文通过对模拟仿真信号的反演,分别讨论了多路径强度和自噪声对后传播方法与滑动频谱方法的影响. 同时利用后传播方法和滑动频谱方法对 COSMIC 掩星资料进行处理,通过与 ECMWF 分析场的统计比较,讨论了这两种方法的特点.

2. 滑动频谱方法

滑动频谱方法在有限大小的孔径(时间)内对 LEO 卫星接收的复信号进行谐波分解,不同谐波的弯曲角和碰撞参数可通过局部极大频谱对应的频率和孔径中心的位置计算得到. 由于大气多路径效应,低湿对流层的信号中会出现两个以上的局部极大频谱, Sokolovskiy 提出一种利用孔径内所有谱分量进行滑动平均计算弯曲角的方法^[6].

2.1. 谐波分解

假设 LEO 卫星测量得到的复信号为

$$u(t) = E(t)\exp[iks(t)], \quad (1)$$

其中, $E(t)$ 为信号的振幅, i 为虚数单位, t 为掩星时间, k 为波数, $s(t)$ 为相位. 对掩星(一次掩星时间约 60 s)的相位廓线进行三次样条回归,并将其作为 $s(t)$ 的模式值,记为 $s_{\text{mod}}(t)$. 消除(1)式中相位的主项,

$$u(t) = E(t)\exp\{ik[s(t) - s_{\text{mod}}(t)]\}. \quad (2)$$

对 $v(t)$ 进行傅里叶变换,

$$c_m = \frac{1}{2\pi} \int_{t_c - T/2}^{t_c + T/2} v(t) \exp\left(-\frac{2\pi imt}{T}\right) dt, \quad (3)$$

$$-\frac{M_1}{2} \leq m \leq \frac{M_1}{2},$$

其中 T 为孔径大小, M_1 为孔径内数据的个数, t_c 为孔径中心位置. 为加快计算速度,可用快速傅里叶变

换进行计算. 通过(3)式,信号 $u(t)$ 可被分解为不同频率的谐波. 每个谐波的频率为 $\mu_m = (ds_{\text{mod}}/dt|_{t=t_c})/\lambda + m/T$, 其中 λ 为波长,谱能量为 $|c_m|^2$.

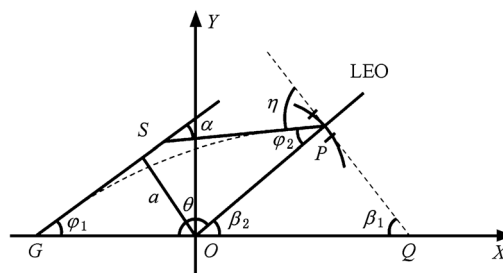


图1 弯曲角和碰撞参数

2.2. 计算谐波弯曲角

通过局部极大频谱对应的频率和孔径中心的位置计算每个谐波的弯曲角和碰撞参数. 如图1所示, G 代表 GPS, O 为掩星面(地心、GPS 和 LEO 卫星构成的平面)上的地球曲率中心. 实弧线代表 LEO 轨迹,弧线上一点 P 为孔径中心位置,虚弧线代表 G 点到 P 点的信号传播轨迹. 图中的坐标系为掩星坐标系,其定义如下:以 O 为原点,以 G 点到 O 点所在直线为 X 轴,正方向由 G 点指向 O 点, Y 轴垂直 X 轴且正方向与 LEO 卫星在同侧.

LEO 轨迹在 P 点的切线(虚线)与 X 轴交于 Q 点,虚弧线在 G 点和 P 点的切线交于 S ,记 SP 与 QP 形成的夹角为

$$\eta = \arccos\left(\frac{c \mu_m}{v_c f_{L1}}\right), \quad (4)$$

其中, c 为光速, v_c 为 P 点的速度(通过坐标变换将 LEO 速度投影到掩星坐标系得到). 则 SP 与 OP 的夹角

$$\varphi_2 = \beta_1 + \beta_2 - \eta, \quad (5)$$

β_1 和 β_2 可通过 O 点、 P 点和 LEO 轨迹的坐标得到.

通过 Bouguer 定律可得碰撞参数 a 与 φ_1 ,

$$a = |GO| \sin\varphi_1 = |PO| \sin\varphi_2, \quad (6)$$

$|GO|$ 和 $|PO|$ 分别为 G 点和 P 点到 O 点的距离. 在利用 O 点、 G 点和 P 点的坐标得到 θ (即 $\angle GOP$)后,通过几何关系计算谐波弯曲角

$$\alpha = \varphi_1 + \varphi_2 + \theta - \pi. \quad (7)$$

2.3. 滑动平均

利用前面的公式,滑动 LEO 卫星轨迹上的孔径,得到一系列数组 $\{a_j, \alpha_j, |c_j|^2\}$, $1 \leq j \leq M_1$ ($M -$

M_1), M 为一次掩星事件的数据个数. 此处碰撞参数并不单调, 需要按递增的碰撞参数, 对弯曲角和谱能量廓线进行同步排序, 记排序后的数组为 $\{a_i, \alpha_i, |c_i|^2\}$.

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

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \frac{1}{\omega_k} \sum_{i=k-K/2}^{k+K/2} \alpha_i |c_i|^2, \\ a_k &= \frac{1}{\omega_k} \sum_{i=k-K/2}^{k+K/2} a_i |c_i|^2, \\ \omega_k &= \sum_{i=k-K/2}^{k+K/2} |c_i|^2, \end{aligned} \quad (8)$$

其中, K 为滑动窗大小.

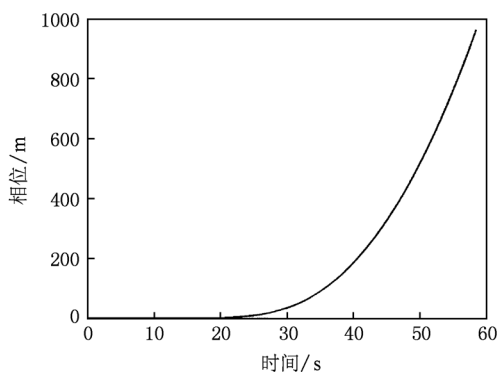
在局部球对称大气假设下, 通过 Abel 积分变换公式

$$n(a) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_a^\infty \frac{\alpha(x)}{\sqrt{x^2 - a^2}} dx\right). \quad (9)$$

将弯曲角转化为折射指数, 而折射率通过以下公式得到:

$$N(a) = (n(a) - 1) \times 10^6. \quad (10)$$

为了选择合适的孔径 T 和滑动窗大小 K , 分别取 T 为 0.32 s, 0.64 s 和 1.28 s 进行实验. 结果表明当取 0.64 s 时能取得较好结果, 若采样频率为 50 Hz, 即为 32 个采样; 滑动窗的大小不宜过小, 一般取 $K \geq 250$ 能满足掩星要求.



3. 模拟仿真

在大气多路径条件下, 利用多相位屏模型可以精确地模拟无线电信号的传播过程. 当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来代替. 屏与屏之间假设为真空, 大气折射介质分布在相位屏内. 信号从一个相位屏传递到下一个相位屏, 当信号通过最后一个相位屏后, 即可得到观测点处的相位和振幅^[6]. 利用已知的 GPS 和 LEO 卫星轨道, 以及大气折射率模型, 通过多相位屏模型(本文采用的是 EGOPS(End-to-End Generic Occultation Performance Simulation and Processing System) 软件)可以模拟得到 GPS 信号的相位和振幅^[10]. 采用的大气折射率模型

$$\begin{aligned} N(h) &= 315 \exp\left[\frac{-h}{7.35 \text{ km}}\right] \\ &+ B \exp\left[\frac{-(h-H)^2}{0.05 \text{ km}^2}\right], \end{aligned} \quad (11)$$

其中 h 为距离地面的高度, 常量 B 决定多路径的强度, H 决定多路径的位置(本文设为 5 km). 图 2 显示的是 $B = 10$ 时, 模拟得到的相位和振幅, 振幅在 42 s—58 s 发生剧烈振荡, 为多路径发生区域. 下面通过模拟仿真分析了大气多路径强度和噪声对反演方法的影响.

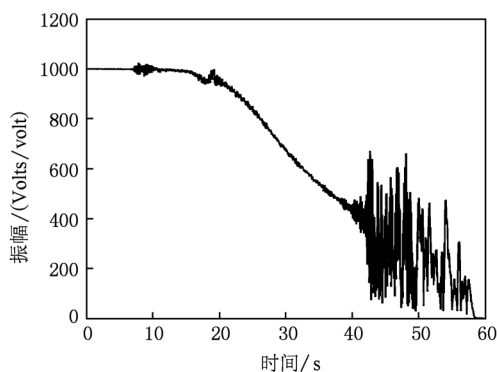


图2 相位和振幅 ($B = 10$)

3.1. 多路径强度的影响

为了比较不同多路径条件下后传播方法和滑动频谱方法的反演效果, 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 km^{-1} 和 98.0 km^{-1}). 分别采用几何光学方法、后传播方法和滑动频谱方法

对模拟信号进行反演得到大气弯曲角廓线, 并与真值(由折射率廓线通过 Abel 积分得到, 以 True 表示)进行比较. 如图 3 所示, 图中实线代表真值, 划线代表后传播方法, 虚线代表滑动频谱方法, 点划线代表几何光学方法. 从图中可以看出, 几何光学方法计算的弯曲角出现多值情况. 在多路径强度不大的情况下, 后传播方法和滑动

频谱方法均能削弱大气多路径的影响,后传播方法优于滑动频谱方法. 当多路径强度不断增加,

折射率梯度相应增大,后传播方法和滑动频谱方法均在一定程度上失效.

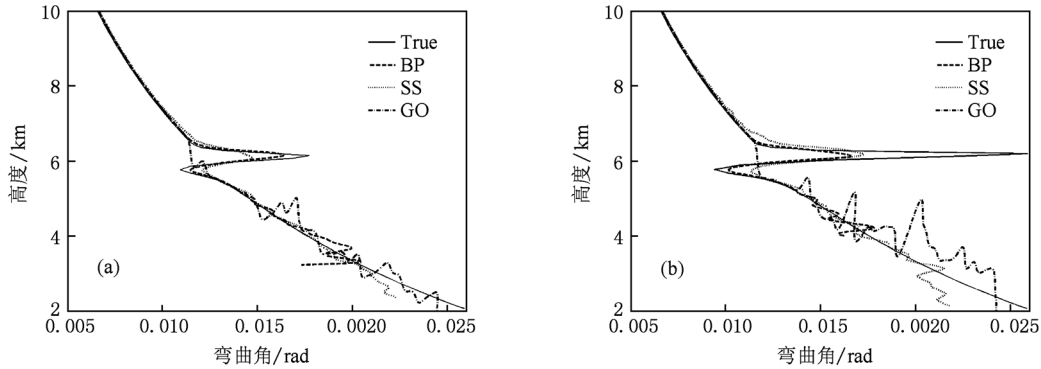


图3 弯曲角 (a) $B = 10$; (b) $B = 20$

3.2. 噪声的影响

为了分析噪声对弯曲角计算的影响,在大气多路径强度 $B = 10$ 的模拟信号的相位中加入 30 mm 的高斯白噪声,分别用后传播方法和滑动频谱方法对含噪声的模拟信号进行求解. 如图 4 所示,信号中的噪声几乎不会影响到后传播方法,但对滑动频谱方法影响较大. 其原因可能为:后传播方法是通过衍射积分方程将观测得到的复信号传播至辅助屏,相当于对噪声进行平滑处理;在谐波分解时,噪声会产生错误的频谱,滑动频谱方法利用了孔径内所有的谱分量,从而产生较大的反演误差.

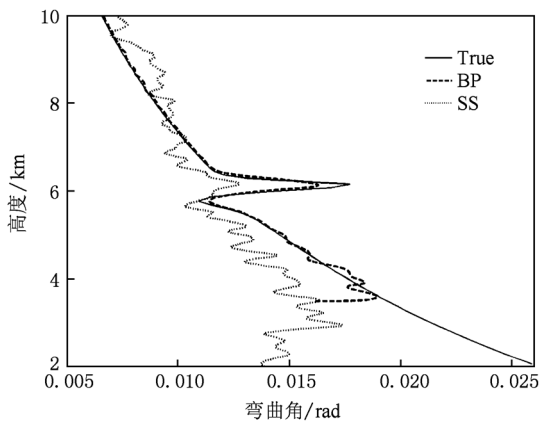


图4 噪声的影响 ($B = 10$)

4. COSMIC 反演结果的比较

由中国台湾和美国联合研制的 COSMIC 计划,由 6 颗 LEO 卫星组成,于 2006 年 4 月 14 日成功实施,每天能提供约 2500 个中性大气层和电离层的掩星廓

线^[11-13]. COSMIC 掩星接收机采用结合锁相环模式和开环模式的方式跟踪 GPS 信号;在约 10 km 以上,采用锁相环模式跟踪 L1 和 L2 频段的信号;在约 10 km 以下,采用开环模式且仅跟踪 L1 频段的信号^[14]. 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,从而提高了低层掩星观测的质量,大大增加了 1 km 以下的掩星数目.

分别用后传播方法和滑动频谱方法处理 2007 年第 71 天到 73 天共约 4500 个 COSMIC 掩星数据,将其折射率计算结果与相应的 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.

低湿对流层尤其在热带,水汽含量丰富. 通常在大气边界层顶附近,大气折射率梯度变化较为剧烈,常常会出现大气多路径传播,其信息对数值天气预报非常重要^[15]. 反演结果的深度和精度,是评价反演方法的关键.

图 5 表示的是 10 km 以下后传播方法和滑动频谱方法反演的掩星个数. 图中点划线代表滑动频谱方法,实线代表后传播方法. 在 5 km 以上,掩星个数不发生减少. 当高度低于 5 km,掩星个数随高度的降低而减少. 在同一高度,滑动频谱方法反演的掩星个数多于后传播方法;后传播方法反演的掩星个数随高度的降低减少得较快,尤其在低对流层的 1 km 以下,其掩星个数不足 100 个. 其原因可能为:后传播方法通过衍射积分方程将掩星复信号传播至辅助屏,在积分过程中需在辅助屏上从低到高寻找驻相点;若高度较低,驻相点不存在,后传播方法便无法求解^[16].

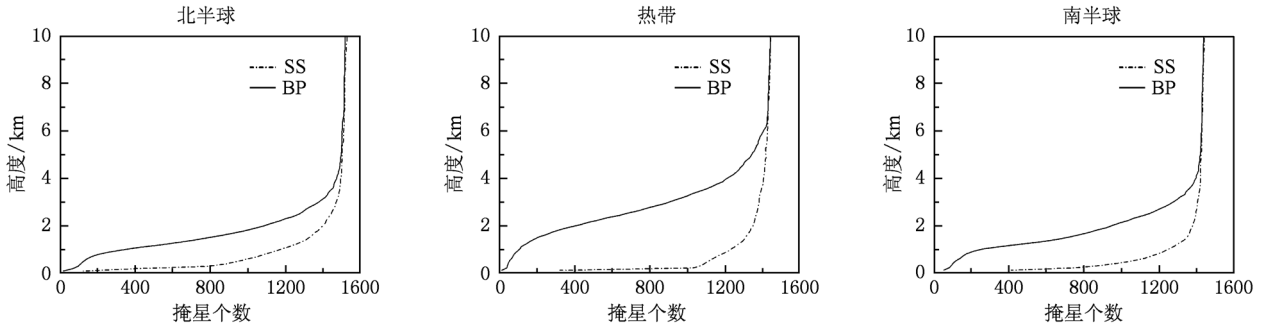


图5 掩星个数

在统计过程中,相对误差定义为

$$\Delta_f N = \frac{N_c - N_e}{\bar{N}} \times 100\%, \quad (12)$$

其中, N_c 表示对 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.

均值计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}. \quad (13)$$

标准差为

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (14)$$

其中, x_i 为第 i 个数据, n 为数据维数.

在同一高度,对两种方法都能成功反演的数据进行统计,如图6所示.从左至右依次为北半球、热带和南半球.第一行是折射率相对误差的均值,第二行是标准差.

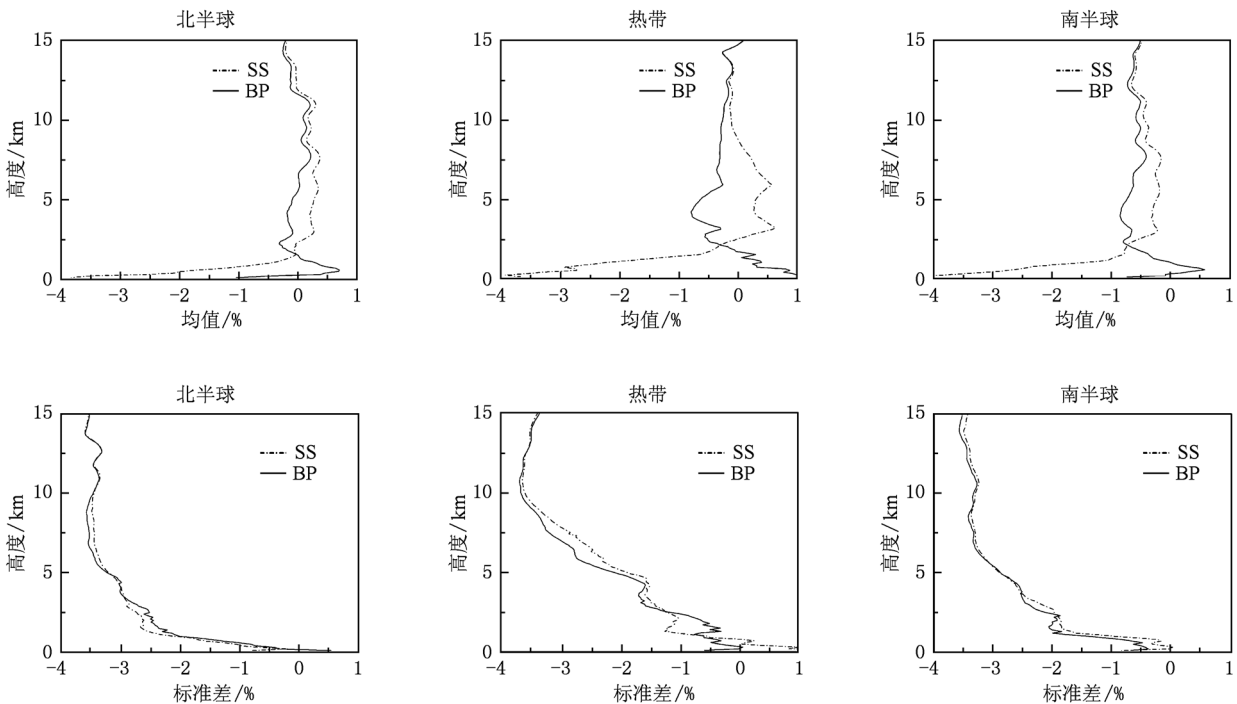


图6 COSMIC 掩星数据与 ECMWF 资料的比较

从图6中看出:

1) 北半球、南半球和热带三区域的反演精度依

次降低,这与低对流层的水汽含量有关.

2) 在 2 km—7 km,后传播方法获得的折射率相

对误差的均值存在负偏差,滑动频谱方法存在正偏差;在 2 km 以下,后传播方法获得的折射率的负偏差变正,滑动频谱则存在较大的负偏差,尤其在热带,最大超过 -4%.

3) 后传播方法和滑动频谱方法的标准差相差不大.

5. 结论与讨论

本文采用多相位屏的数学模型对大气多路径条件下的无线电信号的传播过程进行了数值模拟,分别用后传播方法和滑动频谱方法反演大气参数,并与真值进行比较. 结果表明:1) 在多路径强度较低时,后传播方法优于滑动频谱方法,当多路径强度增加,两种方法均在一定程度上失效;2) 信号中的噪声几乎不会影响到后传播方法,却会造成滑动

频谱方法获得的弯曲角与真值之间的偏差.

分别用上述两种方法对 2007 年第 71 至 73 天共约 4500 个 COSMIC 掩星数据进行处理,将其折射率反演结果与 ECMWF 分析场资料进行比较. 结果显示后传播方法反演的掩星个数在 5 km 以下急剧减少,滑动频谱方法反演的廓线深度大大低于后传播方法;滑动频谱方法获得的折射率相对误差的均值存在较大的负偏差,这可能是由低对流层中的噪声和错误的局部极大频谱造成的,若能将噪声和错误的频谱进行剔除将会提高滑动频谱方法的反演精度.

对奥地利 Graz 大学的地球物理、天体物理和气象研究所(IGAM/UG)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] Rocken C, Anthes R, Exner M, Hunt D, Sokolovskiy S, Ware R, Gorbunov M, Schreiner W, Feng D, Herman B, Kuo Y H, Zou X 1997 *J. Geophys. Res.* **102** 29849
- [2] Gorbunov M E 2002 *Radio Sci.* **37** 1
- [3] Hajj G A, Kursinski E R, Romans L J, Bertiger W I, Leroy S S 2002 *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **64** 451
- [4] Guo P, Yan H J, Hong Z J, Liu M, Huang C 2005 *Acta Astron. Sin.* **46** 96 (in Chinese) [郭鹏、严豪健、洪振杰、刘敏、黄斌 2005 天文学报 **46** 96]
- [5] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Anthes R A 2004 *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **82** 507
- [6] Sokolovskiy S V 2001 *Radio Sci.* **36** 441
- [7] Hocke K, Pavelyev A G, Yakovlev O I, Barthes L, Jakwski N 1999 *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* **61** 1169
- [8] Beyerle G, Hocke K, Wickert J, Schmidt T, Marquardt C, Reigber C 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 4802
- [9] Gorbunov M E, Gurvich A S, Kornbluh L 2000 *Radio Sci.* **35** 1025
- [10] Fritzer J, Kirchengast G, Pock M 2009 End-to-end generic occultation performance simulation and processing system version 5.5 (EGOPsv5.5) *Software User Manual* No. 01/2009 Wegener Centre & IGAM University of Graz Austria
- [11] Schreiner W, Rocken C, Sokolovskiy S, Syndergaard S, Hunt D 2007 *Geophys. Res. Lett.* **34** L04808
- [12] Anthes R A, Bernhardt P A, Chen Y, Cucurull L, Dymond K F, Ector D, Healy S B, Ho S P, Hunt D C, Kuo Y H, Liu H, Manning K, McCormick C, Meehan T K, Randel W J, Rocken C, Schreiner W S, Sokolovskiy S V, Syndergaard S, Thompson D C, Trenberth K E, Wee T K, Yen N L, Zeng Z 2008 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **89** 313
- [13] Xu X S, Hong Z J, Guo P, Liu R J 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2157 (in Chinese) [徐贤胜、洪振杰、郭鹏、刘荣建 2010 物理学报 **59** 2157]
- [14] Sokolovskiy S, Kuo Y H, Rocken C, Schreiner W S, Hunt D, Anthes R A 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L12813
- [15] Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Johnson J 2009 *Radio Sci.* **44** RS2002
- [16] Kursinski E R, Hajj G A, Leroy S S, Herman B 2000 *Terr. Atmos. Ocean. Sci.* **11** 53

Comparison between sliding spectral method and back propagation method for radio occultation data *

Xu Xian-Sheng^{1)†} Guo Peng²⁾ Huang Si-Xun³⁾ Xiang Jie³⁾

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

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

3) (*Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China*)

(Received 17 November 2010; revised manuscript received 6 January 2011)

Abstract

The sliding spectral (SS) method of processing radio occultation data in multipath zone is introduced in detail and compared with back propagation (BP) method through processing simulated data and COSMIC soundings. The modeled signals are inverted with the use of two methods: BP method and SS method. Both methods can solve the problem of calculating bending angle profiles in multipath regions. Better agreement with Abel integral is indicated by the BP method. The BP method is almost free from noise, while the SS method will be affected severely by noise. About 4500 COSMIC radio occultation soundings are retrieved by the BP method and the SS method, and the statistical comparison of retrieved refractivity with that from ECMWF analyses shows that the SS method has better penetration ability than the BP method in the lower moist troposphere. The mean of fractional difference in refractivity retrieved by the BP method is generally smaller than that by the SS method.

Keywords: GPS/LEO radio occultation, multiple-phase-screen model, back propagation method, sliding spectral method

PACS: 92.60.Fm, 92.60.hv

* Project supported by the Seism Public Welfare Scientific Research Project (Grant No. 201108004), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2009AA12Z319), and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41075081).

† E-mail: xuxiansheng666@126.com