

GPS/LEO 无线电掩星开环反演技术*

徐贤胜^{1)†} 郭鹏²⁾ 徐桃玲³⁾ 洪振杰⁴⁾

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) (中国地震局地震预测研究所, 北京 100036)

4) (温州大学数学与信息科学学院, 温州 325027)

(2011年12月23日收到; 2012年3月19日收到修改稿)

在低对流层, 传统的闭环模式容易造成较大的信号追踪误差. 开环模式通过内部或外部方式消除导航资料调制 (navigation data modulation, NDM) 对大气反演的影响, 能够准确地恢复信号的相位. 内部和外部方式的区别是, 前者通过信号相邻采样的内在联系移除 NDM, 后者利用卫星导航位元数据进行处理. 通过内部和外部两种方式处理 COSMIC (constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate) 掩星数据, 利用全谱反演方法获得弯曲角, 通过 Abel 积分变换计算折射率. COSMIC 掩星个案分析表明, 在低对流层, 内部方式可能会导致信号的半周跳现象, 从而造成反演的折射率出现误差. 分别用上述两种方式对 2007 年第 71 天至 73 天共约 3130 个 COSMIC 掩星开环数据进行处理. 将折射率反演结果与 ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) 分析场资料进行统计比较, 结果显示: 外部处理方式的探测深度比内部方式低 100—200 m. 在热带的 3 km 以下, 内部方式具有比外部方式稍大的折射率负偏差. 因此, 外部方式能够得到比内部方式略优的反演结果.

关键词: 无线电掩星, 开环模式, 内部方式, 外部方式

PACS: 92.60.Fm, 92.60.hv

1 引言

利用 GPS/LEO (global position system/low earth orbit) 无线电掩星技术可以准确地反演地球大气参数. GPS/MET (METeorology), CHAMP (challenging minisatellite payload), SAC-C (Satellite de Aplicaciones Cientificas-C, GRACE (gravity recovery and climate experiment) 和 COSMIC (constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate) 等掩星计划的成功实施验证了 GPS/LEO 掩星技术的可行性^[1]. 但是, 无线电掩星技术还存在着一些困难. GPS/LEO 掩星实验表明, 大气多路径效应、超折射效应和闭环追踪误差会导致

低湿对流层反演的折射率出现系统负偏差. 这种折射率负偏差现象在不同的卫星数据中都被发现, 如 GPS/MET^[1], CHAMP 和 SAC-C^[2,3], COSMIC^[4,5]. 利用各种无线电掩星全息方法可以在一定程度上消弱大气多路径效应的影响^[4]. 在 GPS 接收机中采用开环模式可以解决闭环追踪所造成的误差^[2].

传统的闭环模式是一个可以跟踪输入信号相位的自动控制系统. 闭环模式中用于降频转换的相位模型通过前一时刻的相位外插得到. 在低对流层, 大气情况变得复杂, 通过外插得到的相位模型容易包含误差, 且这种误差会随时间不断累加, 最终可能会导致信号不可用或失锁^[6]. 而且, 利用闭环模式难以跟踪上升掩星的低对流层部分 (约 10

* 地震行业科研专项 (批准号: 201108004)、国家自然科学基金 (批准号: 41075081)、浙江省自然科学基金 (批准号: Y6110751) 和宁波市自然科学基金 (批准号: 2010A610096) 资助的课题.

† E-mail: xuxiansheng666@126.com

km 以下). 使用开环模式可以有效地克服闭环模式的局限 [6].

2001 年, Sokolovskiy 提出在已知大气相位模型的前提下, 可通过开环模式解决大气追踪问题 [7]. 2005 年, 为了能在 COSMIC 卫星上使用开环模式, JPL (jet propulsion laboratory) 首次将开环模式在 SAC-C 卫星上进行测试 [8]. 随后, 开环模式在 COSMIC 卫星上进行业务化应用. 开环模式采用的相位模型通过固定的大气弯曲角模型以及轨道的位置和速度数据得到, 这与闭环模式中相位模型的获取方式不同. 在低湿对流层, 这一特点不会造成追踪误差的扩大. 开环模式中还必须移除导航资料调制 (navigation data modulation, NDM) 的过程. NDM 将 GPS 卫星导航信息加载在载波信号中, 从而影响信号的相位数据, 须加以移除后才能进入后续的反演流程. Sokolovskiy 提出可利用内部 (internal) 和外部 (external) 两种方式消除 NDM 的影响 [9]. 内部方式采用信号两相邻采样点间的内在联系消除 NDM 的影响, 外部方式通过 GPS 卫星导航位元, 即 gpsBit 数据消除 NDM 的影响. gpsBit 数据通过地面接收机对被掩卫星进行观测得到 [6]. 开环模式不仅能准确地恢复信号的相位, 而且能同时处理上升和下降掩星, 从而提高了低对流层掩星观测的质量和数量 [10].

Ao 等在闭环模式下处理 CHAMP 掩星数据, 在开环模式下处理 SAC-C 掩星数据, 并将两者的折射率反演结果进行比较. 发现开环模式具有更强的探测能力, 能够获得更多低对流层的数据. 在热带的 2 km 左右, 开环模式能探测到 80% 的掩星数据, 对应的闭环模式为 50%. 与 SAC-C 掩星数据反演的折射率相比, CHAMP 数据在 3 km 以下存在系统负偏差 [8]. Sokolovskiy 通过对 COSMIC 数据进行反演和统计后发现, 外部方式的折射率反演精度优于内部方式 [6].

另外, 利用开环模式下的掩星数据能够获得更详细的低对流层 (尤其是近地面处) 的大气参数信息, 这为研究大气边界层提供了方便. Sokolovskiy 利用 SAC-C 开环模式下的掩星资料对大气边界层的高度、厚度等参数进行了评估, 并与对应的 ECMWF (european centre for medium-range weather forecasts) 分析场资料进行比较, 发现两者符合得较好 [11]. Guo 等利用一年的 COSMIC 掩星

开环数据对大气边界层厚度在热带和亚热带的分布特性进行了分析 [12]. 因此, 开环模式增加了大气低对流层的信息, 加深了人们对近地面天气和气候变化过程的认识和理解.

2 开环模式

在 GPS 接收机中, 开环和闭环模式是交互进行的, 在 10 km 以上采用传统的闭环模式, 在 10 km 以下采用开环模式. 在本文中, 将闭环模式转换至开环模式的点称为开闭环转换点. 在开环模式下, 由于 GPS 接收机不能同时跟踪两个频段的信号, 因此只记录 L1 的信号 [13]. 在开环模式中, 利用已知的相位模型和 gpsBit 数据, 通过降频转换、移除 NDM 和连接相邻相位等步骤逐步还原信号的相位数据, 下面就对各个步骤进行说明.

2.1 相位模型及降频转换

为了移除 NDM 的影响, 首先需将信号进行降频转换. 假设 GPS 接收机获得的信号为 $u_{\text{out}}(t)$,

$$u_{\text{out}}(t) = A_{\text{out}}(t) \exp[i\Phi_{\text{out}}(t)], \quad (1)$$

其中 i 表示虚数单位, t 表示时间, Φ_{out} 表示相位, A_{out} 表示振幅. 然后进行向下转换 [7]:

$$\begin{aligned} u(t) &= A_{\text{out}}(t) \exp[i(\Phi_{\text{out}}(t) - \Phi_{\text{ppm}}(t))] \\ &= I(t) + iQ(t), \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 分别表示信号 $u(t)$ 的实部和虚部, Φ_{ppm} 表示大气相位模型, 它是通过已知的大气弯曲角模型以及卫星轨道和速度获得的. 大气相位模型还可以进行进一步的调整, 以提高反演精度. 通过降频转换得到的信号 $u(t)$ 中还包括 NDM, 需要加以移除.

2.2 NDM 的移除

利用信号 $u(t)$ 两相邻采样点的内在联系或 gpsBit 数据可以移除 NDM. 前者被称为内部方式, 后者被称为外部方式 [9]. 外部方式除了利用 $u(t)$ 的信息外, 还要利用 gpsBit 数据.

2.2.1 内部方式

内部方式通过信号 $I(t)$ 和 $Q(t)$ 相邻采样点之间的内在联系消除 NDM 的影响. 可以计算两相邻

采样 i 和 $i + 1$ 间的相位夹角:

$$\beta = \arccos \left[\frac{I_i I_{i+1} + Q_i Q_{i+1}}{\sqrt{(I_i^2 + Q_i^2)} \sqrt{(I_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2)}} \right]. \quad (3)$$

假设大气或噪声引起的相位角度变化小于 $\pi/2$, 当 β 的值超过 $\pi/2$ 时, 就说明信号受到了 NDM 的影响, 需要将其消除, 即将 u_{i+1} 乘以 -1 , 如图 1 所示. 但是, 当大气或噪声引起的角度变化大于 $\pi/2$ 时, 内部方式容易发生错误, 产生半周跳现象. 这时, 利用外部方式进行相位调整将更加准确.

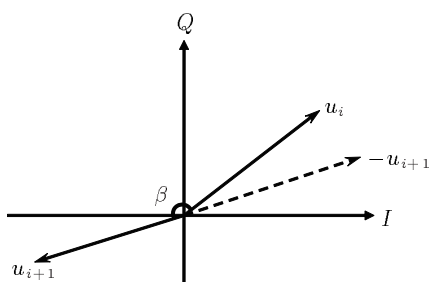


图 1 利用相邻采样间的内部联系消除 NDM

2.2.2 外部方式

外部方式借助 gpsBit 数据消除 NDM 的影响. COSMIC 在全球布置了一系列的 GPS 接收机. 当发生掩星时, 这些接收机同时跟踪被掩 GPS 卫星, 记录该卫星的 NDM 信息, 即 gpsBit 数据. gpsBit 数据可通过 COSMIC 网站 <http://www.cosmic.ucar.edu/> 下载. 外部方式通过 gpsBit 数据中 NDM 信息判断信号相位的跳变情况并加以修复 [6]. 外部方式的适用范围是大气或噪声引起的相位角度变化小于 π , 当大于 π 时, 外部方式得到的信号容易发生周跳现象.

在用内部或外部方式消除 NDM 的影响之后, 通过如下公式得到相位:

$$\tilde{\Phi}(t) = \arctan_2[Q(t), I(t)], \quad (4)$$

相位 $\tilde{\Phi}(t)$ 中还包含着周跳现象, 必须加以消除.

2.3 消除周跳

为了消除 $\tilde{\Phi}(t)$ 中的周跳, 将后一时刻的相位 $\tilde{\Phi}_i$ 与前一时刻的相位 $\tilde{\Phi}_{i-1}$ 进行作差, 并取 $\Phi'_i = \min \{ |\tilde{\Phi}_i - \tilde{\Phi}_{i-1} + 2\pi|, |\tilde{\Phi}_i - \tilde{\Phi}_{i-1} - 2\pi| \}$. 最后对相位 Φ'_i 进行累加, 即可得到最终的相位数据. 修复

后的相位数据可直接用于后续的大气参数反演.

3 COSMIC 个案处理

开环模式中内部和外部方式的最大区别是, 外部方式需要 gpsBit 数据. 但是由于地理位置的限制, 只有约 70% 的 COSMIC 掩星有对应的 gpsBit 数据. 为了比较内部和外部方式, 挑选有对应 gpsBit 数据的 COSMIC 掩星, 通过上述两种方式对信号进行处理, 用全谱反演方法计算大气弯曲角 [14], 利用双频弯曲角组合消除电离层的影响, 最后通过 Abel 积分变换求得折射率 [15].

3.1 振幅和多普勒频移

挑选 2007 年第 72 和 73 天的两个 COSMIC 掩星, 如图 2 所示. 图 2(a) 和 (c) 表示信号的振幅, 其中横坐标表示掩星时间, 纵坐标表示振幅. 图 2(b) 和 (d) 表示反演的多普勒频移, 图中有三条粗线, 从下往上依次为原始信号的多普勒频移、利用内部方式获得的多普勒频移和利用外部方式得到的多普勒频移. 为了比较的方便, 已经将三种数据分别平移 0 Hz, 100 Hz, 200 Hz. 图中竖实线表示开闭环转换点对应的的时间, 图 2(a) 中约为 79 s, 换成高度约为 9 km; 图 2(c) 中为 52 s, 转换为高度约为 14 km. 竖划线表示开始使用信号的时间, 两个掩星均为降掩星.

从图 2(a) 和 (c) 中看出, 在开闭环转换点之前, 信号的振幅值较大且较平稳, 用闭环模式处理不会发生误差. 在开闭环转换点之后, 大气情况复杂, 大气多路径、超折射、散射效应以及噪声的存在容易导致信号振幅逐渐变小, 用闭环模式进行跟踪会导致较大的误差, 甚至会失锁, 需要用开环模式进行处理. 从图 2(b) 和 (d) 中可以看出, 在开闭环转换点之前, 原始信号的多普勒频移近似散布在一条直线上, 在转换点之后, 多普勒频移分别散布在近似平行的四条直线上. 这说明原始信号的多普勒有频繁的半周跳和周跳现象, 从而无法通过后续的反演获得可靠的弯曲角参数. 利用外部方式不会出现半周跳和周跳现象, 而内部方式获得的多普勒频移还可能存在着半周跳现象, 这也可从后续的折射率反演结果看出.

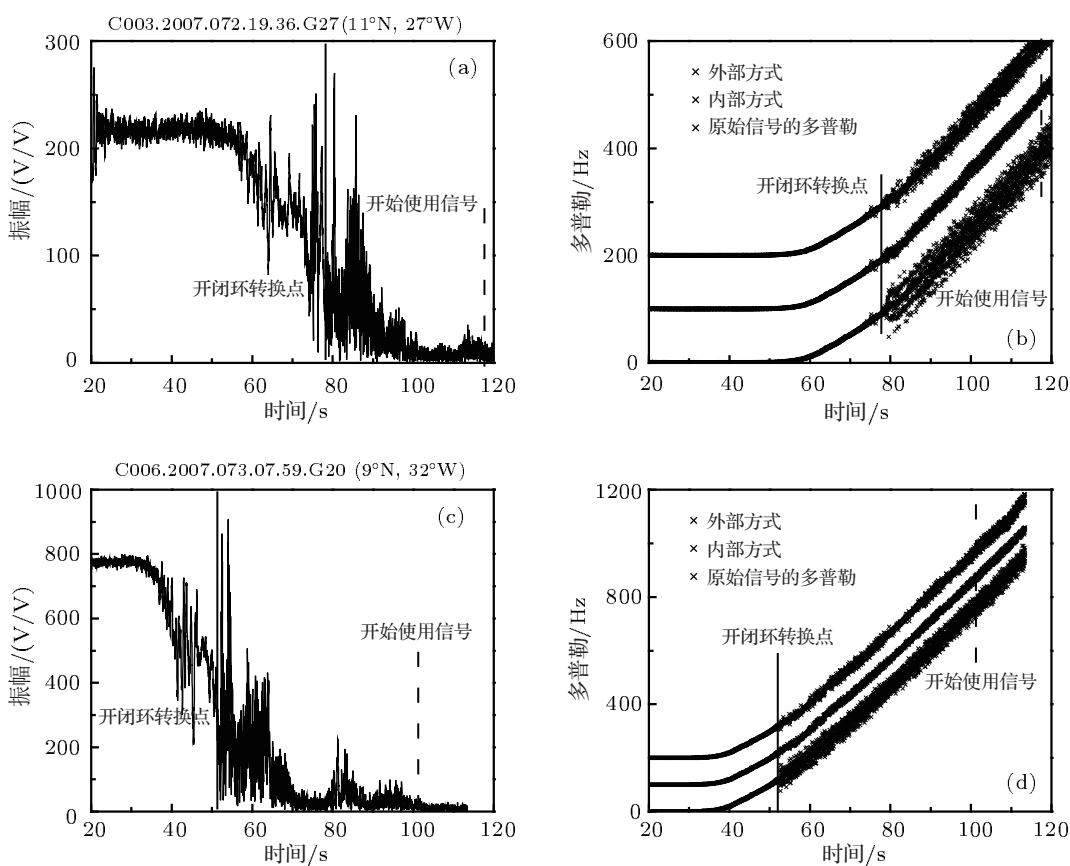


图2 COSMIC掩星的振幅和多普勒频移 (a), (c) 振幅; (b), (d) 多普勒频移

3.2 折射率反演

利用内部或外部方式处理过的相位数据, 通过无线电全息方法, 就可以反演得到大气弯曲角. 本

文中采用全谱反演方法计算弯曲角和碰撞参数, 通过 Abel 积分变换计算折射率, 并与对应的 ECMWF 分析场资料进行比较.

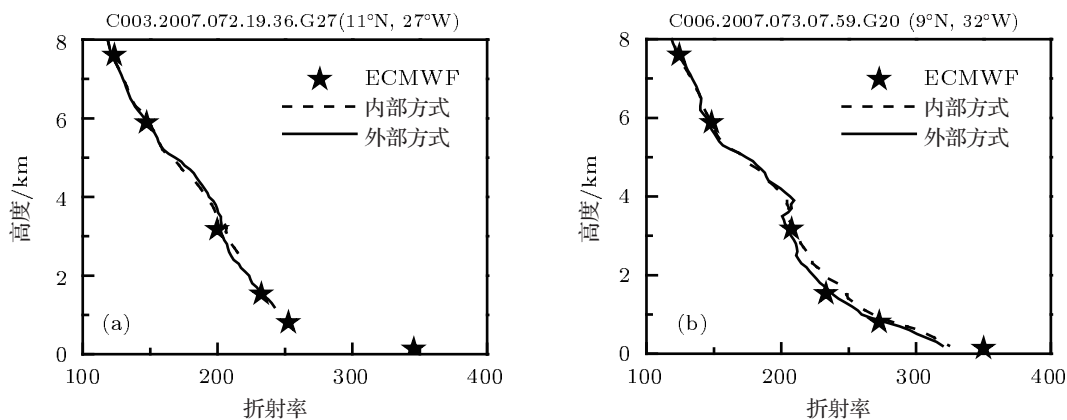


图3 利用内部或外部方式处理后计算的折射率

图3中星形离散点表示21层的ECMWF分析场资料的折射率, 划线和实线分别表示用内部和外部方式处理后计算的折射率. 图3(a)中, 内部

方式的最低高度为2.4 km, 而外部方式能达到1.2 km. 图3(b)说明内部和外部两种方式获得的折射率在4 km以上和ECMWF资料的折射率较为接近,

在 4 km 以下, 外部方式获得的折射率比内部更接近于 ECMWF 资料. 这是由于内部和外部两种方式的不同修复方式造成的. 从 2.2 节的讨论知道, 当两采样的相位夹角 (即图 1 中的 β) 大于 $\pi/2$ 时, 内部方式会自行进行修复. 但在大气的低对流层, 两信号采样的相位夹角可能会大于 $\pi/2$, 内部方式将其进行修复, 从而容易出现半周跳现象. 从图 2(b) 中看出, 在开闭环转换点之后, 内部方式得到的多普勒频移的曲线看起来要比外部方式的曲线细, 这是因为内部方式包含了半周跳误差造成的 [10].

4 统计比较

除了个案分析, 对 COSMIC 掩星资料进行统计分析也可以看出开环模式中内部和外部两种处理方式的特点. 为此, 下载 2007 年第 71 至 73 天

共 4434 个 COSMIC 掩星数据, 并将没有 gpsBit 数据的掩星剔除, 剩下 3130 组掩星数据. 通过内部和外部方式处理 COSMIC 掩星数据, 对两种方式的探测深度及折射率的相对误差进行统计, 分析比较了两种不同处理方式的特点.

4.1 探测深度

反演的最低高度, 即探测深度, 是评价内部和外部方式的有效途径. 用上述两种方式对信号进行处理, 并计算探测深度.

图 4(a) 表示内部方式处理得到的探测深度随纬度分布的情况, 图 4(b) 是外部方式处理的结果. 横坐标表示纬度, 纵坐标表示探测深度. 从图中看出, 内部和外部方式处理后的掩星探测深度大部分都能到达 2 km 以下. 从均值看出, 外部得到的探测深度比内部的低 100—200 m.

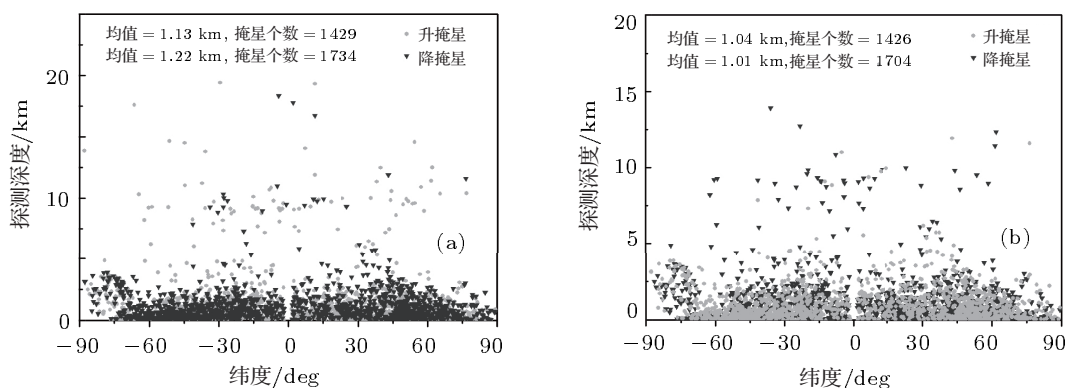


图 4 内部和外部处理方式的最低高度 (a) 内部方式; (b) 外部方式

4.2 折射率的相对误差

最后, 将内部和外部方式处理后得到的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°S—90°S)、热带 (30°S—30°N) 及北半球 (30°N—90°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

$$\Delta_f N = \frac{N_C - N_E}{\bar{N}} \times 100\%, \quad (5)$$

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 的平均值.

均值计算公式如下:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (6)$$

均方差计算公式如下:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}, \quad (7)$$

其中, x_i 为第 i 个数据, n 为数据维数.

图 5 表示 2007 年第 71 至 73 天 COSMIC 掩星资料反演的折射率与对应 ECMWF 分析场资料的统计比较结果. 图中从上往下依次为北半球、热带和南半球, 纵坐标表示高度, 这里只比较 15 km 以下的的数据, 横坐标从左至右分别为折射率相对误差

的均值、均方差和掩星个数. 实线代表外部方式与 ECMWF 分析场资料的比较结果, 划线代表内部方式.

从图 5 中看出:

1) 在开环模式下, 全谱反演方法的反演精度较高. 在北半球, 其反演的折射率的相对误差的均

值小于 -0.4% , 在南半球小于 -1% , 在热带最大可达到 -1.5% . 且折射率在 2 km 以下普遍存在负偏差现象. 其在热带反演精度的下降以及折射率负偏差现象与热带中水汽含量较大, 容易发生超折射有关^[1]. 当然, 折射率的负偏差也有可能是由于 ECMWF 分析场资料的垂直分辨率不高造成的.

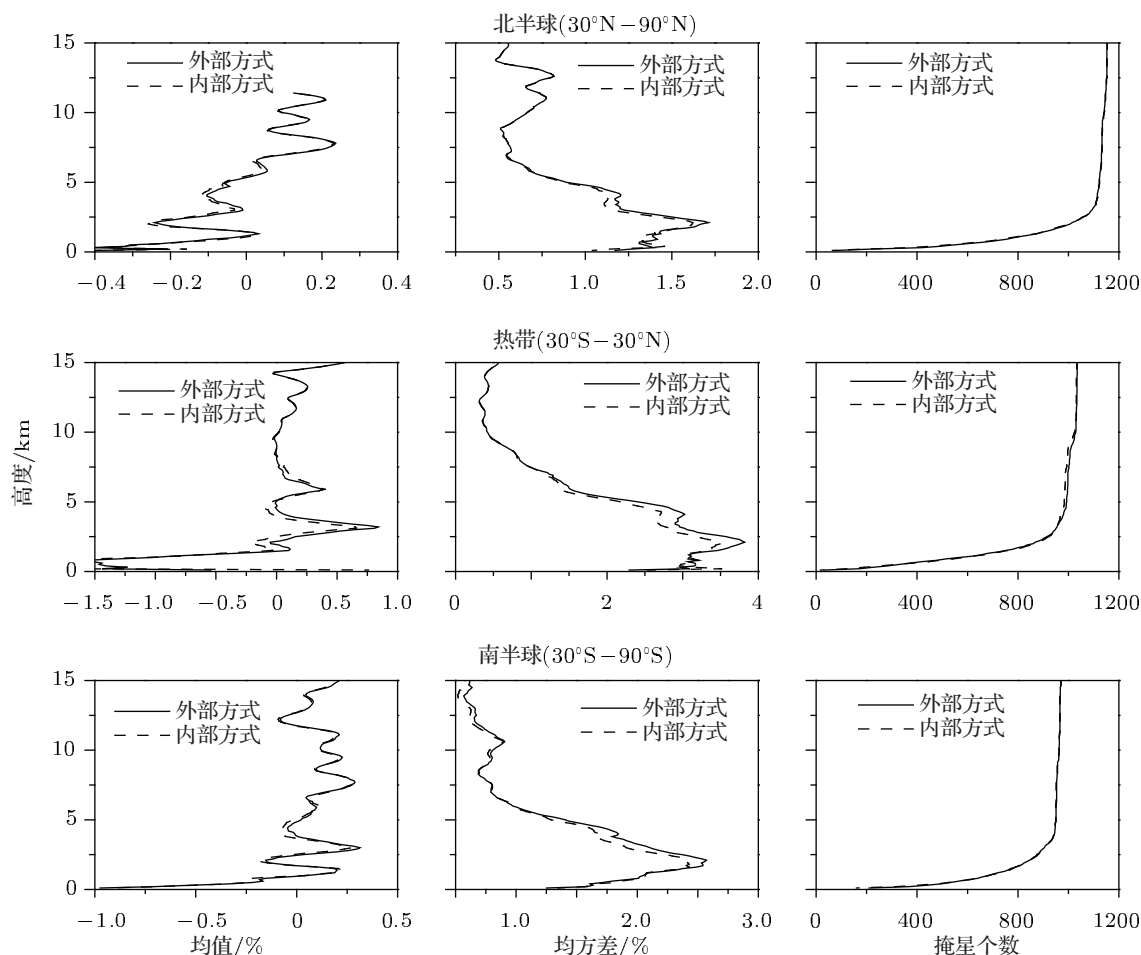


图 5 折射率相对误差的平均偏差和均方差

2) 从内部和外部两方式上看, 在北半球和南半球两者的结果差别不大. 在热带的 3 km 以下, 内部方式具有比外部方式更大的负偏差. 两者差别最大在 300 m 左右, 内部方式达到 -1.58% 左右, 而外部方式达到 -1.23% , 两者差 0.35% .

5 结论

在已知大气弯曲角模型的前提下, 开环模式通过降频转换、移除 NDM 和连接相邻相位等步骤逐步还原信号的相位数据. 移除 NDM 的方式有两

种: 内部方式通过信号相邻采样之间的内在联系消除 NDM, 而外部方式则需有 gpsBit 数据的前提下才能进行处理.

通过开环模式中的内部或外部两种方式处理 2 个 COSMIC 掩星, 对信号的多普勒频移进行比较分析, 发现内部方式获得的信号可能会发生半周跳现象, 从而导致低对流层中反演的折射率发生误差. 利用上述两种方式处理 2007 年第 71 至 73 天共 3130 个 COSMIC 掩星数据, 并用全谱反演方法计算弯曲角, 最后通过 Abel 积分变换获得折射率. 统计比较了内部和外部方式得到的探测深度及折

射率的相对误差, 结果表明: 外部处理方式获得的探测深度比内部方式低 100—200 m; 而折射率的统计误差表明, 两种处理方式在 3 km 以下普遍存在着折射率负偏差, 且两种处理方式的均值、均方差和掩星个数在南北半球较为接近; 在热带的 3

km 以下, 内部方式具有比外部方式稍大的折射率负偏差. 因此, 开环模式中的内部和外部两种处理方式均能获得可靠的反演结果, 外部方式略优于内部方式.

-
- [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] Ao C O, Meehan T K, Hajj G A, Mannucci A J, Beyerle G 2003 *J. Geophys. Res.* **108** 4577
- [3] Hajj G A, Ao C O, Iijima B A, Kuang D, Kursinski E R, Mannucci A J, Meehan T K, Romans L J, Juarez M D L T, Yunck T P 2004 *J. Geophys. Res.* **109** D06109
- [4] Kuo Y H, Wee T K, Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Anthes R A 2004 *J. Meteorol. Soc. Jpn.* **82** 507
- [5] 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]
- [6] Sokolovskiy S, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Johnson J 2009 *Radio Sci.* **44** RS2002
- [7] Sokolovskiy S 2001 *Radio Sci.* **36** 483
- [8] Ao C O, Hajj G A, Meehan T K, Dong D, Iijima B A, Mannucci A J, Kursinski E R 2009 *J. Geophys. Res.* **114** D04101
- [9] Sokolovskiy S, Rocken C, Hunt D, Schreiner W, Johnson J, Masters D, Esterhuizen S 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L14816
- [10] Hu X, Liou Y A, Gong X Y, Qiu Z J, Ye W H, Wang X, Wu X C, Xiao C Y, Xu L 2009 *Chines J. Geophys.* **52** 2195 (in Chinese) [胡雄, 刘说安, 宫晓艳, 丘增杰, 叶文豪, 王鑫, 吴小成, 肖存英, 徐丽 2009 地球物理学报 **52** 2195]
- [11] Sokolovskiy S, Kuo Y H, Rocken C, Schreiner W, Hunt D, Anthes R A 2006 *Geophys. Res. Lett.* **33** L12813
- [12] Guo P, Kuo Y H, Sokolovskiy S, Lenschow D H 2011 *J. Atmos. Sci.* **68** 1703
- [13] Lohmann M S 2007 *J. Geophys. Res.* **112** D09115
- [14] Jensen A S, Lohmann M S, Benzon H H, Nielsen A S 2003 *Radio Sci.* **38** 1040
- [15] 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]

Processing of GPS/LEO radio occultation recorded in open-loop mode*

Xu Xian-Sheng^{1)†} Guo Peng²⁾ Xu Tao-Ling³⁾ Hong Zhen-Jie⁴⁾

1) (*Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 31500, China*)

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

3) (*Institute of Earthquake Science, China Earthquake Administration, Beijing 100036, China*)

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

(Received 23 December 2011; revised manuscript received 19 March 2012)

Abstract

In the moist lower troposphere, traditional phase-locked loop tracking of GPS (Global Position System) signal will introduce errors in the retrieved results. Both internal and external method can be used to remove navigation data modulation (NDM) and accurately recover the phase of GPS signals recorded in open-loop mode. The internal method removes the NDM using relationship between adjacent samples, while the external method removes the NDM using the externally recorded NDM bit data. Both above-mentioned methods are used to process the constellation observing system for meteorology, ionosphere and climate (COSMIC) radio occultation data. COSMIC case study shows that internal method may include half-cycle slip in the recovered phase, which will lead to error in the retrieved refractivity. About 3130 COSMIC radio occultation soundings recorded in open-loop mode are processed by the internal and external method, and statistical comparison results of retrieved refractivity with that from the European Centre for medium-range weather forecasts (ECMWF) analyses show that the external method has a better penetration ability than the internal method in the lower moist troposphere. The mean of fractional difference in refractivity retrieved by external method is smaller than that by internal method below about 3 km.

Keywords: radio occultation, open-loop mode, internal method, external method

PACS: 92.60.Fm, 92.60.hv

* Project supported by the Seism Public Welfare Scientific Research Project (Grant No. 201108004), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41075081), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province (Grant No. Y6110751), and the Natural Science Foundation of Ningbo (Grant No. 2010A610096).

† E-mail: xuxiansheng666@126.com