

Retrieval Processing Technique For LEO-LEO Radio Occultation Atmospheric Data and Error Sources Analysis

Naifeng Fu^{1,2}, Peng Guo¹, MengJie Wu^{1,2}, Xiaogong Hu¹

1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China

2. University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049, China

#Email: nffu@shao.ac.cn

Abstract

This paper describes the physical mechanisms, processes and basic calculation principle of the atmospheric inversion algorithm on the LEO-LEO radio occultation data, and analyses the impact of varieties of error sources (such as clock errors, multipath and LEO satellite orbit errors, etc.) on the inversion results through simulation. According to statistics of the retrieval temperature and humidity, we found that the stability of the existing satellite clock and the accuracy of LEO satellite orbit determination can meet the needs of the occultation inversion and that it is necessary to suppress high-amplitude, low-frequency noise in terms of multipath effects. The research results in this paper can provide important ideas of solution and support of technology for LEO-LEO radio occultation, the data preprocessing and data inversion process optimization.

Keywords: LEO-LEO Radio Occultation; Neutral Atmosphere; Platform and Measurement Error; EGOPS

LEO-LEO 掩星大气反演技术及误差分析

付乃锋^{1,2}, 郭鹏¹, 许梦捷^{1,2}, 胡小工¹

1. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 本文介绍了 LEO-LEO 掩星大气反演算法的物理机制, 基本流程及计算原理, 同时模拟仿真分析了多种误差源 (例如钟误差、多路径效应以及 LEO 卫星轨道误差等) 对反演结果的影响。通过统计反演温度及湿度发现: 现有的卫星钟的稳定度及 LEO 卫星定轨精度满足反演需求; 对于多路径效应, 需要抑制强振幅、低频噪音。为 LEO-LEO 掩星观测、数据预处理以及数据反演流程优化提供了重要的解决思路与技术。

关键词: LEO-LEO 无线电掩星; 中性大气层; 平台和测量误差; EGOPS

引言

20 世纪 80 年代末, 随着观测精度的提高和相应的通讯、计算机技术的发展, 从两个不同的方面提出开展 GPS 气象学研究的设想。第一方面, 利用地面 GPS (Global Positioning System) 观测网监测测站上空大气水汽垂直积分, 它把天顶方向的观测噪声转换成有用的大气信息; 第二方面, 用低轨道卫星上所载 GPS 接收机或是 LEO (Low Earth Orbit) 接收机探测地球大气的分层结构, 前者是 GNSS (Global Navigation Satellite System) 掩星, 后者是 GNSS-LEO 或 LEO-LEO 掩星。关于 LEO-LEO 掩星项目比较著名的有欧洲空间局的 ACE (Atmosphere and Climate Explorer) 计划及以后的 ACE+ (2005) 与其升级版 ACCURATE (Atmospheric Climate and Chemistry in the UTLS Region And Climate Trends Explorer)。低轨无线电掩星技术探测地球大气的基本原理是: 装载在 LEO 上的信号接收机接收 LEO 卫星发射的电磁波信号, 当信号传播路径经过大气层

时，由于中性大气层对电磁波的折射与吸收作用，信号路径发生延迟、弯曲和衰减，如图 1 所示，形成掩星事件；通过测量相位及振幅序列反演获得切点上的温湿压等参数剖面。

本文介绍了 LEO-LEO 掩星大气反演算法的物理机制，基本流程及计算原理，并描述了每个流程的数据流以及每个流程在各步骤需要注意的细节，包括数据预处理的方法，不同的计算方法比较和计算数据优化等，特别在大气模型反演模块中 BLUE 算法的步长，积分方式，迭代初始值等方面做了特别说明。同时，从掩星探测反演大气参数过程出发，利用 EGOPS（End-to-end Generic Occultation Performance Simulator, Version 5）软件模拟仿真，研究了钟误差、多路径效应以及 LEO 卫星间的轨道误差等对反演结果造成的影响。

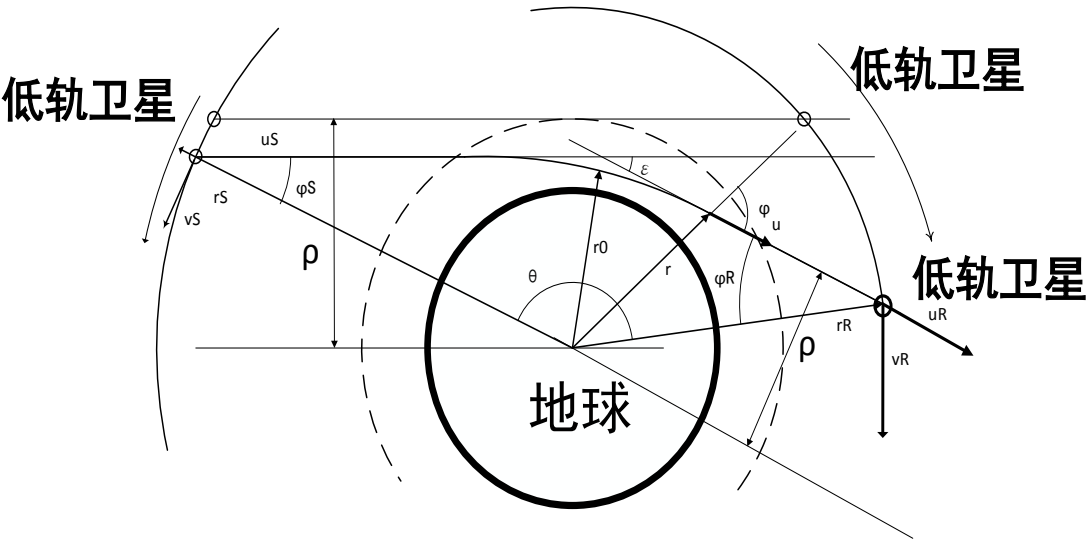


图 1. LEO-LEO 掩星几何关系示意图

1 基本原理

如图 2 所示，低轨卫星间的气象反演包括五个步骤，具体流程如下：

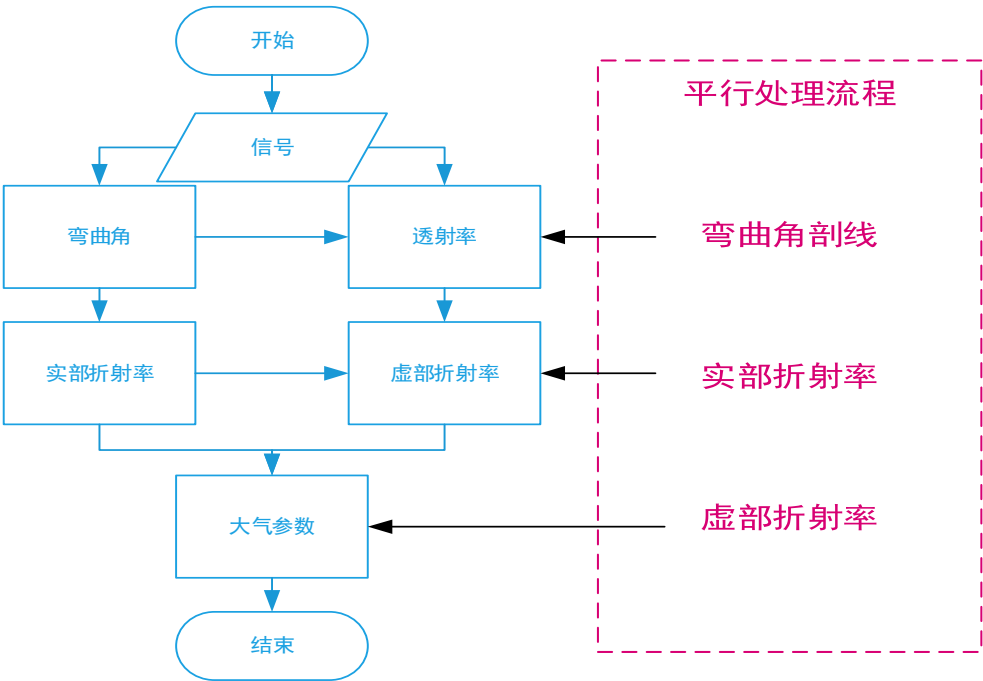


图 2. 低轨卫星间的气象反演

第一步，如同 GNSS-LEO 掩星数据处理^[1]，通过相位及振幅反演(信号)与 LEO 信号发射机及接收机的

精密星历，可以确定碰撞因子及与碰撞因子相关的大气弯曲角函数。

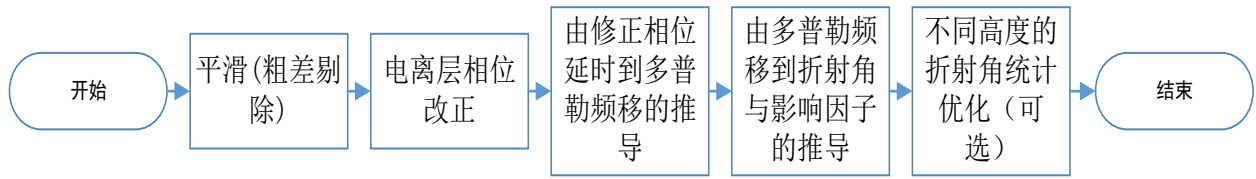


图 3. 折射角反演流程

第二步，大气对不同频率信号吸收情况不同,低轨卫星间的不同信号频率(例如 ACE+项目的 LRO 信号频率有 9.7GHz、17.25GHz、22.6G)对应振幅数据、碰撞因子及 POD 发射机与接收机的坐标速度数据可用来计算大气信号透射率，具体反演包含如下步骤：

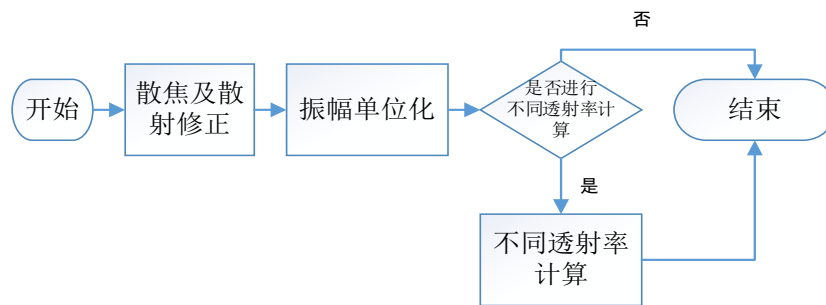


图 4. 透射率反演流程

第三步，类似 GNSS-LEO 数据处理，实部折射率可通过对折射角关于影响因子的函数进行经典 Abel 变换得到其关于高度的函数，具体函数如下^[3,4,5]：

$$n^R(a_i) = \exp\left(\frac{1}{\pi} \int_{a_i}^{a_{\text{Top}}} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_i^2}} da\right) \quad (1)$$

$$N^R(z_i) = 10^6 (n^R(a_i) - 1), \quad z_i = r_i - R_c, \quad r_i = \frac{a_i}{n^R(a_i)} \quad (2)$$

其中代表实部折射率指数，代表从当地曲率中心到的矢径，代表对应的高度，而表示真实的折射率。

第四步，虚部折射率的随高度变化函数可以通过类似经典 Abel 变换的另一种 Abel 变换推导出得到。这种变换与经典 Abel 变换相比，有一致的 Abel 积分核函数，区别在于积分过程。由于虚部折射率正比于吸收系数，所以后者可以通过前者替换或是附加修正获得。用另一种 Abel 变换(类似于 1 式)，虚部折射率可作为高程函数通过实部折射率数据和影响因子以及频率信号的透射率推导得到，具体如下：

$$k_j(z_i) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{da}{dr} \right|_{a=a_i} \int_{a_i}^{a_{\text{Top}}} \frac{d \ln T_j(a)}{da} \frac{1}{\sqrt{a^2 - a_i^2}} da \quad (3)$$

$$N_j^I(z_i) = 10^6 \cdot \frac{c}{4\pi f_j} k_j(z_i) \quad (4)$$

其中表示频率 j 对应的透射率表示频率 j 在高度处的吸收系数（与对应），表示 j 对应的频率，c 表示光速(c=299792458m/s)，以及表示频率 j 在高度处的虚部折射率。

第五步，实部折射率随高度变化函数与 LEO-LEO 卫星频率对应的虚部折射率随高度变化函数，通过与温度，湿度，压强及云内液态水(地球物理参数)联立的方程,可获得关于高度的大气地球物理参数函数。此外，大气压位势可从与地理高程相关的气压信息获得。由于给定任何状态 x(p, T, e, lw, iw, rr) 的大气状态参数的(雅可比矩阵)，以及它的伴随模型都是具敏感性的信息，使用如下的最优线性无偏估计（BLUE, Best Linear Unbiased Estimator）算法进行自上而下的高度积分获得大气地球物理参数剖面：

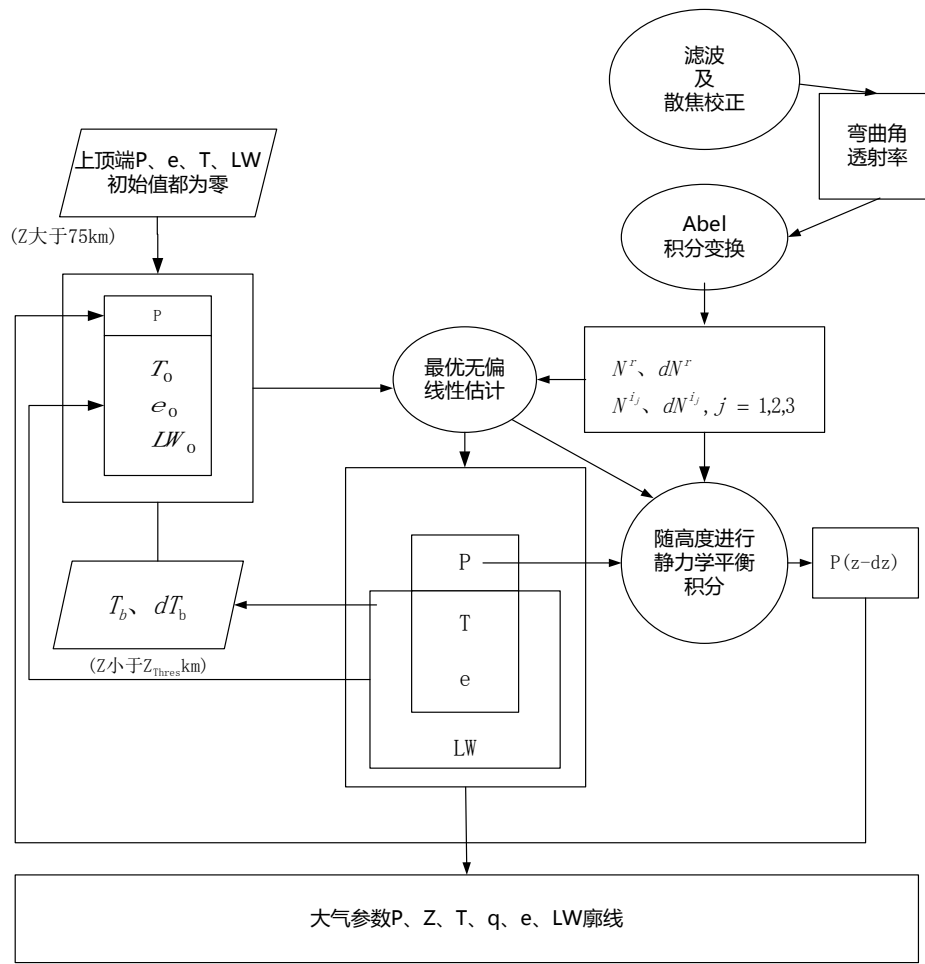


图 5. 低轨卫星大气 BLUE 反演算法框架图

BLUE 算法描述如下：

对于极限是的情况，

$$x_{n+1} = x_n + (K_n^T \cdot C_y^{-1} \cdot K_n)^{-1} [K_n^T C_y^{-1} (y - y_n^{\text{mod}}(x_n))] \quad (5)$$

为防止数据剧烈震荡(当)算法描述如下：

$$x_{n+1} = x_n + (K_n^T \cdot C_y^{-1} \cdot K_n + C_b^{-1})^{-1} [K_n^T C_y^{-1} (y - y_n^{\text{mod}}(x^n)) - C_b^{-1} (x_n - x^b)] \quad (6)$$

其中代表状态向量，可以通过迭代的方式估计，与分别代表测量向量和模型前向预测测量向量，特别的(及前向预测)是测量误差的协方差矩阵，为雅可比权重矩阵，是背景(上次)状态向量，同时是背景(上次)误差协方差矩阵。表示背景温度开始作用状态向量的高度阈值。

2 仿真设置及误差统计

2.1 仿真设置

为研究单一误差对系统造成的反演误差，利用 EGOPS 软件，先仿真得到理想的观测数据，认为其不含任何测量和平台引起的误差，反演得到中性大气层产品，视其为标准情况。再逐一向系统中加入接收机钟误差、局部多路径效应、轨道误差。将各种情况下的反演结果同标准情况进行统计比较，确定可能出现的误差对仿真反演系统的影响机制。

数据仿真选择在 2006 年 1 月 1 日全天，大气层的掩星事件共 438 次，在全球范围内基本均匀分布，我们选取其中 100 次掩星事件作为统计结果，具体设置及选择结果如下：

表 1 仿真设置

参数	取值
时间段	2006.1.1 00:00:00~12:00:00
导航星座 Tx	ACE
低轨卫星 Rx	ACE,轨道高度722.4km, 倾角98°,升交点 赤经0°, 偏心率0.0001695, 近升角距90°, 平 近点角0°
采样频率	10hz
中性大气层模型	CIRA86aQ_UoG 模型
电离层模型	无
轨道误差	无
接收机误差	无
多路径	无
钟	理想钟, 无差分

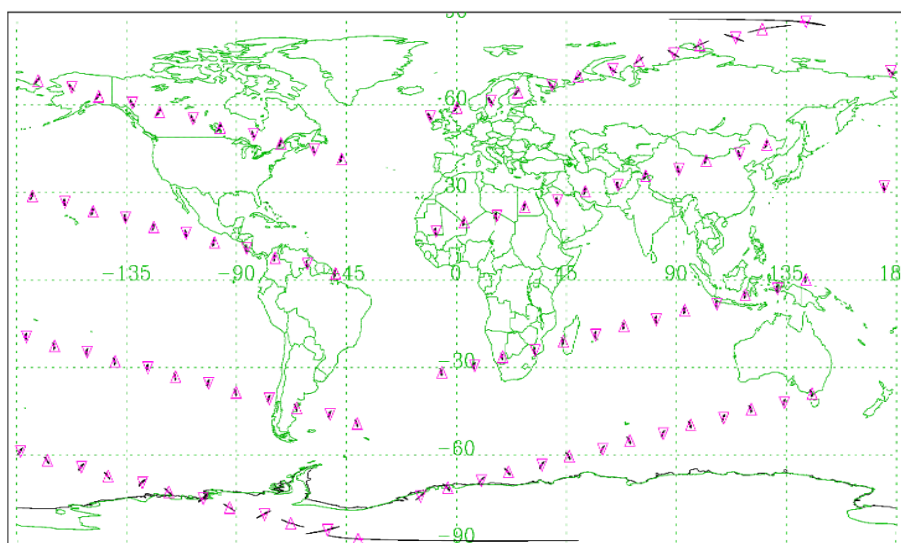


图6. 掩星事件分布图

2.2 接收机钟误差

掩星观测量都是以精密测时为依据的, 测量要求接收机钟和发射机保持严格同步, 且保持频标稳定。但实际上, 这是难以做到的。

在任何时刻, 接收机钟和发射机与 GPS 标准时之间都存在着钟差和漂移, 并且随着时间的推移, 这些量还会发生变化, 给伪距和载波相位测量带来误差^[9]。低轨卫星上装载的时钟往往具有更不稳定的性质。

时钟的漂移最基本也是最常用的模型是线性漂移(时钟偏移量与时间项)。

通常我们无法知道卫星钟具体的误差, 需要采用随机性时间模型来描述卫星钟的频率特性。目前, 钟的稳定度通常用双取样方差(Allan 方差)来衡量^[10]。给定了 Allan 方差时, 相位观测值的误差 ΔL 的计算方法为:

$$y_n = \sqrt{6}\tau_s^{-0.5}A_{1sec}rand_n, \Delta L_n = c\tau_s y_n + \Delta L_{n-1} \quad (7)$$

其中, τ_s 为采样间隔; A_{1sec} 为用户给定的 1 秒 Allan 方差; $rand_n$ 为 $[-1,1]$ 区间内的随机数; c 为真空中光速; y_n 为采样间隔内的相对频率误差。

为了探测钟误差对反演结果的影响, 及影响量级, 我们做了两组实验。由于现在的高精度原子钟的稳定度可以达到量级, 我们设定了小量级钟稳定性影响设定及结果:

表 2. 小量级钟稳定性影响分析参数设定表

算例名称	钟稳定性 ($e^{-13}\text{secAllan}$)	温度均值(K)	温度均方 根(K)	湿度均值 (g/kg)	湿度均方 根(g/kg)
InRet10H	无	0.01950	0.42398	-0.03240	0.28411
InRet10H-RCN2	2.0000	0.02981	0.44135	-0.03241	0.28410
InRet10H-RCN4	4.0000	0.04721	0.47301	-0.03230	0.28401
InRet10H-RCN6	6.0000	0.05704	0.50207	-0.03230	0.28401
InRet10H-RCN8	8.0000	0.06186	0.54050	-0.03232	0.28403

上表可知, 钟稳定性在 $0\sim 10[e^{-13}\text{secAllan}]$ 之间时, 对反演温度值的影响系数= 98.3131%, = 24.4701%, 对反演湿度值的影响系数= 0.3319%, = 0.0357%。我们发现钟稳定性对于温度反演具有很大的影响, 而对于反演湿度的影响几乎可以忽略, 为此我们需要对大气结构上的误差分布进行分析。具体各廓线图像如下

:

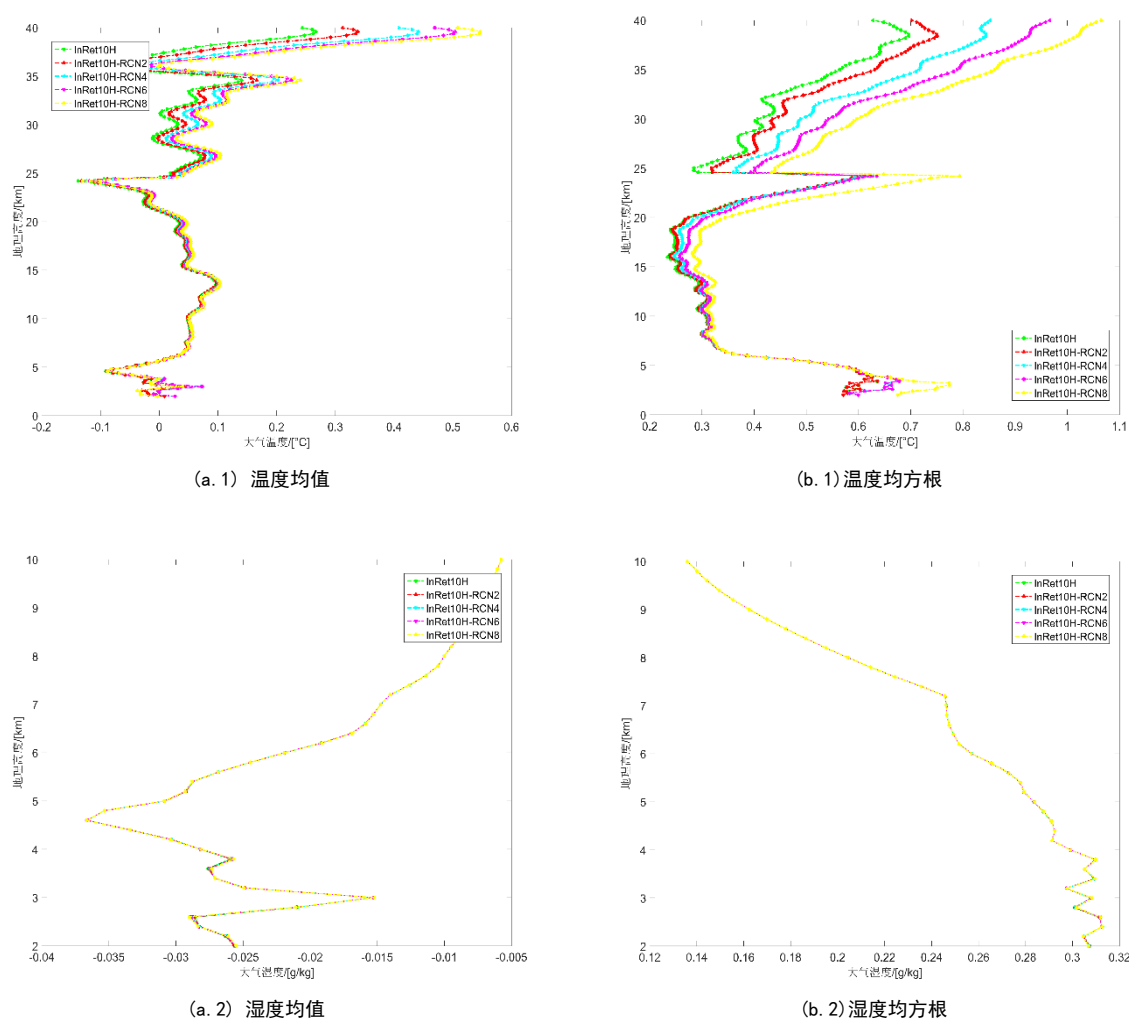


图 7. 小量级钟稳定性影响分析图

图 7 展示了小量级钟稳定性对于掩星反演结果的影响。图(a.1)、(b.1)说明钟稳定性主要作用于顶层大气, 且两者反演温度误差都与钟稳定度成正相关关系, 对于均值影响表现在在 20km 以上误差逐渐放大, 对于均方根影响, 形成明显的两段误差分布(5~22km 及 25km 以上); 图(a.1)、(b.1)说明钟稳定度对湿度影响很小几乎可以忽略不计, 更进步一步说明钟稳定性主要作用于顶层大气。

为了探讨钟稳定性的最低要求, 我们又做了一组钟稳定度较差 (Allan 方差较大) 的一组实验, 具体参

数设置及总体反演结果如下表所示：

表 3. 较大量级钟稳定性影响分析参数设定表

算例名称	钟稳定性 ($e^{-13}\text{secAllan}$)	温度均值 (K)	温度均方 根(K)	湿度均值 (g/kg)	湿度均方 根(g/kg)
InRet10H	无	0.01950	0.42398	-0.03240	0.28411
InRet10H-RCN20	10.0000	0.07205	0.56911	-0.03233	0.28402
InRet10H-RCN40	20.0000	0.08749	0.70337	-0.03238	0.28407
InRet10H-RCN60	30.0000	0.10046	0.85145	-0.03226	0.28375
InRet10H-RCN80	40.0000	0.10300	0.94664	-0.03243	0.28418

上表可知，钟稳定性在 $0\sim50[e^{-13}\text{secAllan}]$ 之间时，对反演温度值的影响系数= 109.1463%， = 74.7820%，对反演湿度值的影响系数= 0.5333%， = 0.1504%。结果与表 2 的结论一致；同时可以发现随着钟稳定性的方差变大，底层大气反演也有所影响，与钟稳定性的 Allan 方差成正相关关系。我们也分析了大气结构上的误差分布。

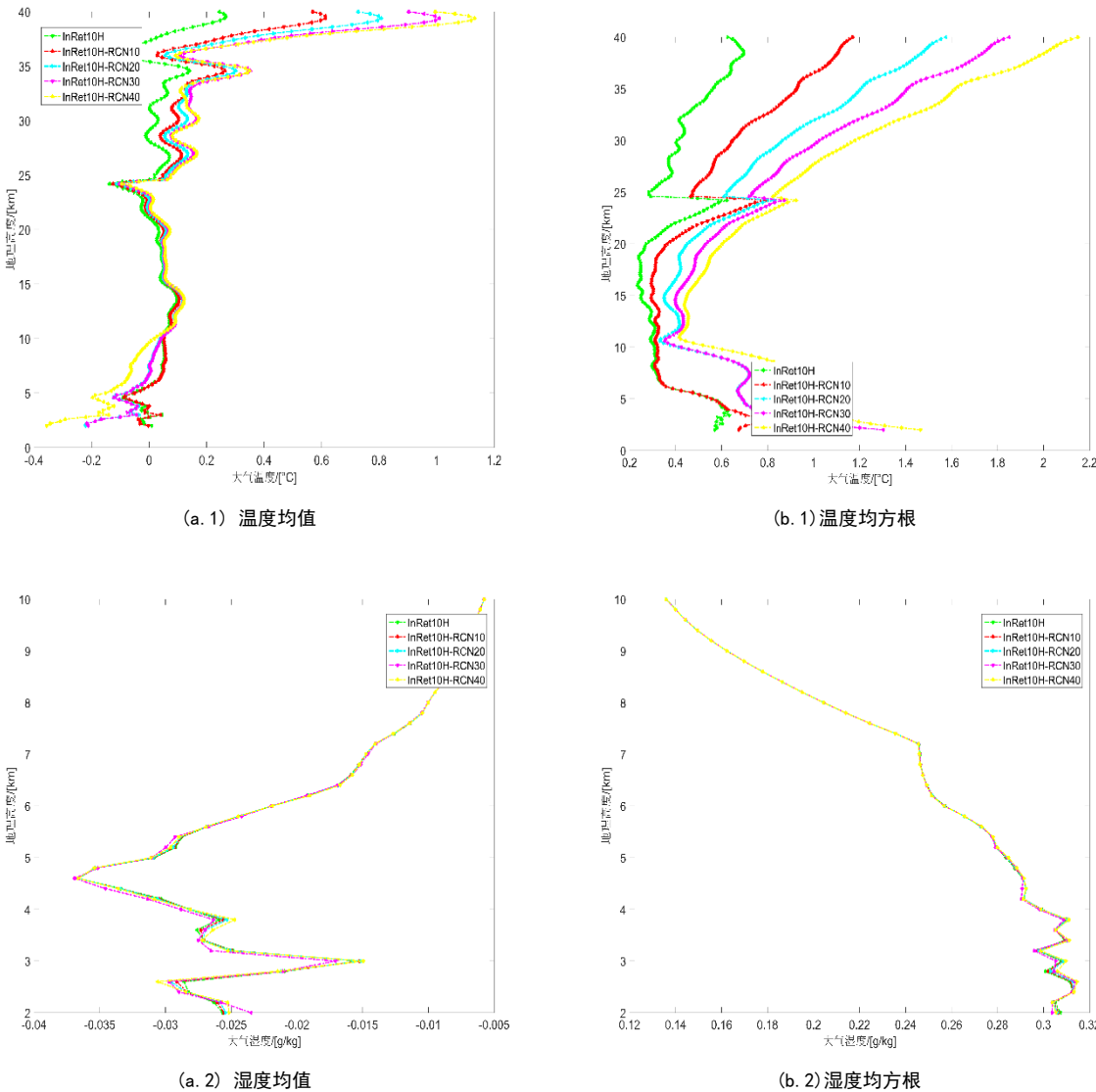


图 8. 较大量级钟稳定性影响分析图

图 8 展示了较大量级钟稳定性对于掩星反演结果的影响。图(a.1)、(b.1)说明钟稳定性主要作用于顶层大

气，但是在其稳定性变差的时候，也会对低层大气反演产生误差甚至错误，当钟稳定性 Allan 方差有 $40[e^{-13} \text{secAllan}]$ ，温度均值最大偏差 1K，温度均方根最大偏差 2.5K；图(a.2)、(b.2)说明钟误差会对湿度反演产生些许扰动，图(b.2)可以发现误差呈正相关。在应用中，GPS 钟稳定性可以达到反演需求精度。

2.3 局部多路径效应

掩星技术中的局部多路径是指从发射机发出的信号到达接收机时，受其周围散射结构的影响产生多值信号，而接收机只能进行单一的相位记录，不能区分这些信号，从而给掩星测量带来误差^[11]。

通常我们将周围环境的多路径信号模拟为正弦波，其误差的数学模型为：

$$t_{sinus}^i = t_{begin} - \frac{P^i}{2\pi} \arcsin(\frac{A_{start}^i}{A^i}) \tag{8}$$

$$\Delta L^i = A^i \sin[\frac{2\pi}{P^i}(t_{ray} - t_{sinus}^i)] \tag{9}$$

其中，i 是加载的不同相位；A 是多路径相位误差的幅度； A_{start} 是顶部射线的多路径误差幅度(默认为 0)；P 是多路径相位误差的周期； t_{begin} 是掩星第一条射线的接收时刻； t_{sinus} 是正弦波误差的起始时刻，默认在 25km 以下的观测中叠加误差； t_{ray} 为该条掩星射线的接收时刻； ΔL 是局部多路径的相位误差。当有多个正弦波叠加时，也可以把第一个正弦波设为随机数，则其它的正弦波的误差值就是相对于这个波计算的。

将公式（7）代入（8），可以得到

$$L^i = A^i \sin[\frac{2\pi}{P^i}(t_{ray} - t_{begin})], \Delta L = \sum_{i=1}^n \Delta L^i \tag{10}$$

可以看出，对相位误差起决定作用的参数变量是正弦波的幅度 A 和周期 P（对同一掩星事件来说）：相位误差和振幅 A 成正相关，振幅越大则相位误差越大；若 A 一定，则周期 P 占主导地位，相位误差的变化取决于正弦函数的性质。

类似接收机正弦振幅扰动噪音，我们也做了两组实验。分别探究幅度 A 和周期 P 分别对反演结果的影响。如下为探讨多路径效应中振幅 A 对反演结果影响设定的一组算例：

表4. 多路径效应振幅 A 分析参数设定表

算例名称	周期 P [sec]	振幅 A[mm]	温度均值(K)	温度均 方根(K)	湿度均值 (g/kg)	湿度均 方根 (g/kg)
InRet10H	无	无	0.01950	0.42398	-0.03240	0.28411
InRet10H- Sinu11	100.0 200.0 300.0 400.0	4.0 3.0 2.0 1.0	0.02109	0.80320	-0.03242	0.28411
InRet10H- Sinu12	100.0 200.0 300.0 400.0	8.0 6.0 4.0 2.0	0.02721	0.99695	-0.03243	0.28413
InRet10H- Sinu13	100.0 200.0 300.0 400.0	12.0 9.0 6.0 3.0	0.05565	1.14292	-0.03244	0.28414
InRet10H- Sinu14	100.0 200.0 300.0 400.0	16.0 12.0 8.0 4.0	0.01894	1.35088	-0.03245	0.28415

上表可知，振幅 A 在 0~20[mm]之间时，对反演温度值的影响系数= 128.885%，= 98.232%，对反演湿度值的影响系数= 0.135%，=0.0168%。可知温度均方根与振幅 A 变化成正相关关系，但是其他三个衡量量关系不明显，我们需分析了大气结构上的误差分布。

图 9 展示了多路径效应振幅 A 对于掩星反演结果的影响。图(a.1)、(b.1)说明多路径效应对中高层大气反演影响比较大，同时也会对低层大气反演产生影响，温度均值最大 0.5[K]，温度均方根与振幅 A 成正相关关系，且最大偏差可达到 3[K]；而图(a.2)、(b.2)的结果说明振幅 A 的变化对湿度反演不会有很大影响。所

以在进行掩星反演中，需通过软件或是硬件方式抑制多路径效应来获得理想的结果。

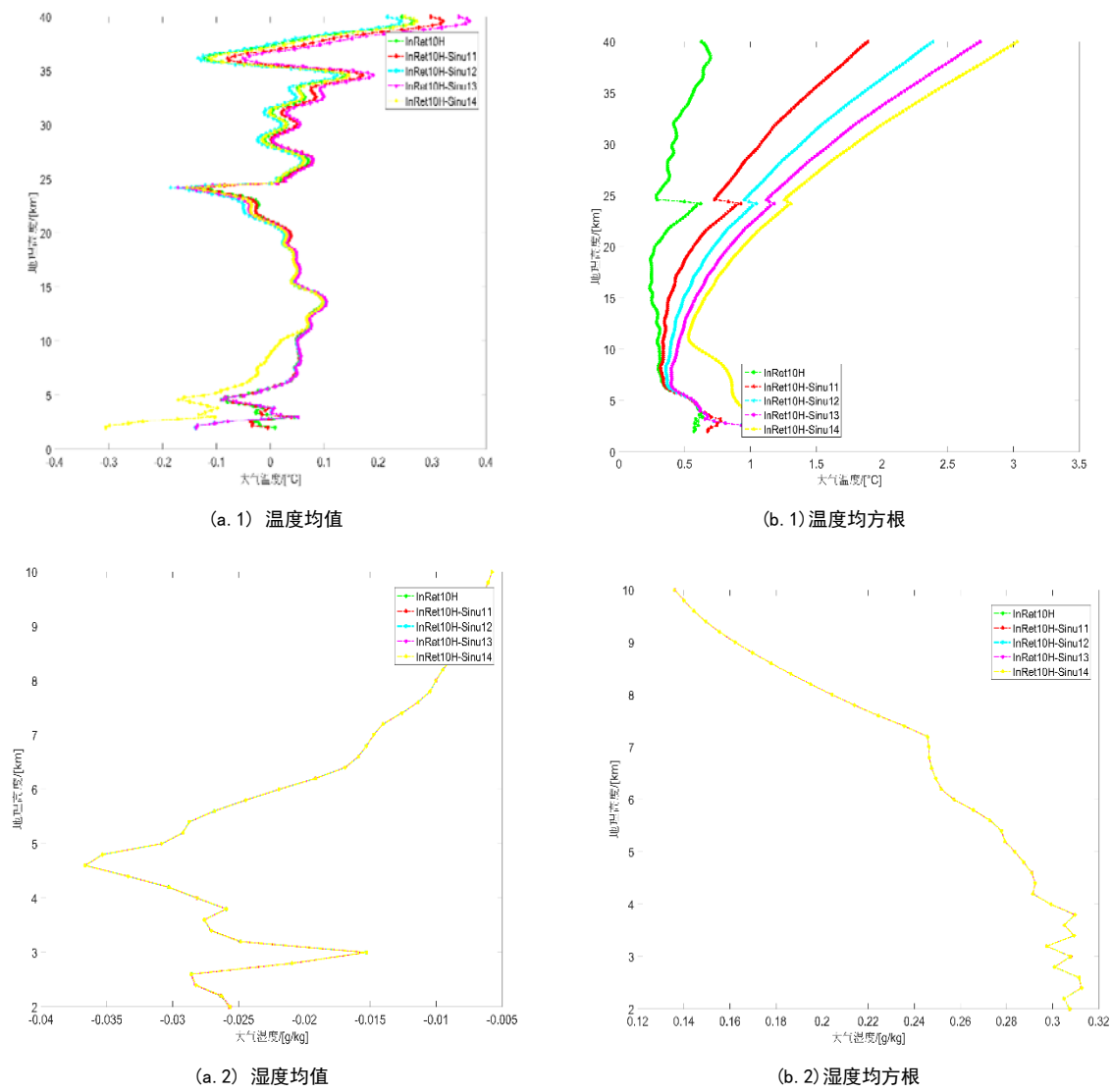


图 9. 多路径效应振幅 A 影响分析图

为探讨多路径效应中周期 P 对反演结果影响设定的一组算例及结果如下：

表5. 多路径效应周期 P 分析参数设定表

算例名称	周期 P [sec]				振幅 A[mm]		温度均值 (K)	温度均方 根(K)	湿度均 值(g/kg)	湿度均 方根 (g/kg)
InRet10H	无				无		0.01950	0.42398	-	0.03240
InRet10H-Sinu11	100.0	200.0	300.0	400.0	4.0	3.0 2.0 1.0	0.02109	0.80320	-	0.03242
InRet10H-Sinu21	200.0	400.0	600.0	800.0	4.0	3.0 2.0 1.0	0.01539	0.67510	-	0.03241
InRet10H-Sinu31	300.0	600.0	900.0	1200.0	4.0	3.0 2.0 1.0	0.02138	0.60659	-	0.03234
InRet10H-Sinu41	400.0	800.0	1200.0 1600.0		4.0	3.0 2.0 1.0	0.02348	0.54700	-	0.03242

上表可知，周期 P 在 100~2000[sec]之间时，对反演温度值的影响系数= 40.091%，= 62.048%，对反演

湿度值的影响系数= 0.2394% , = 0.0324%。可知温度均方根与周期 P 变化成反相关关系, 但是与温度均值关系不明显, 同时对湿度影响十分小, 我们需分析了大气结构上的误差分布。

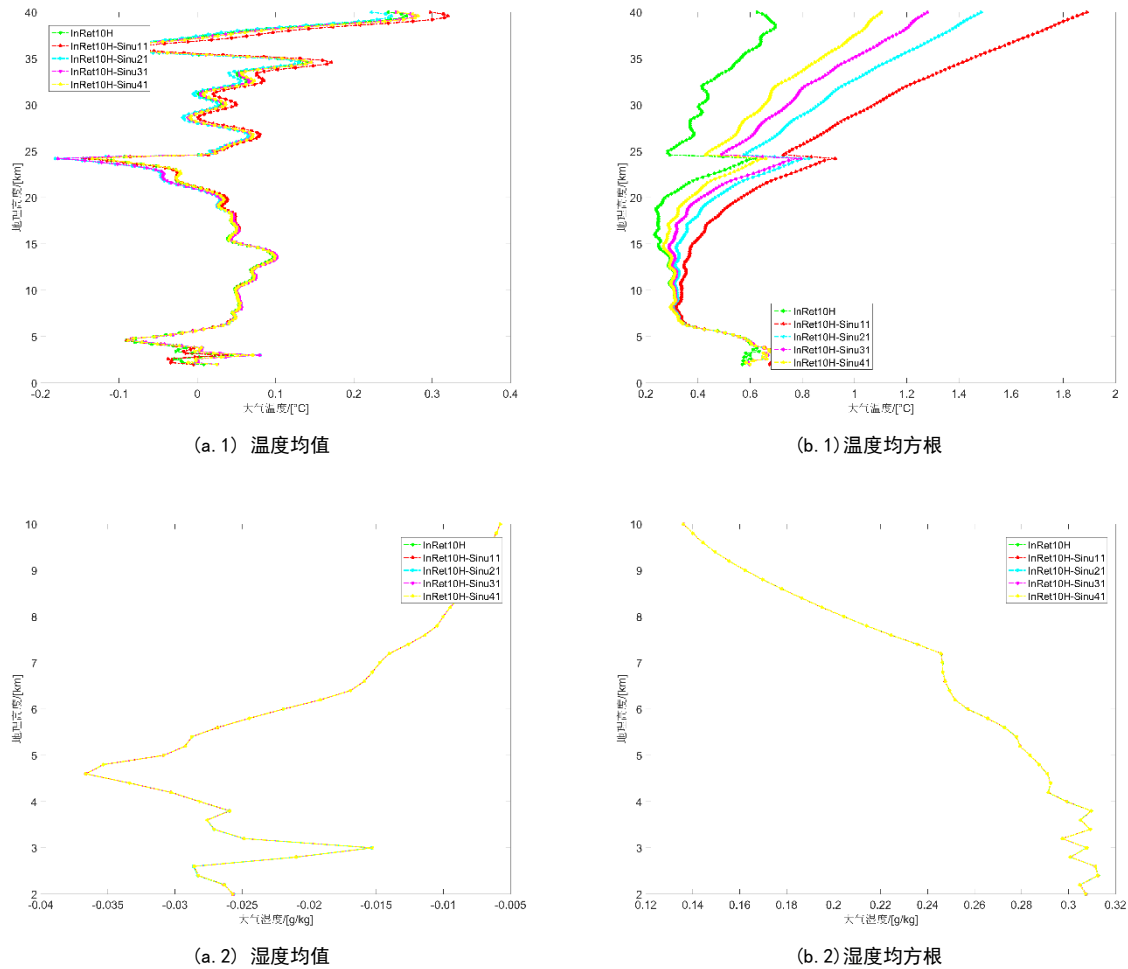


图 10. 多路径效应周期 P 影响分析图

图 10 展示了多路径效应周期 P 对于掩星反演结果的影响。图(a.1)、(b.1)说明多路径效应周期 P 对中层大气反演影响比较大, 特别是温度均方根的影响即温度反演的稳定性, 温度均值最大 0.27[K], 温度均方根与振幅周期 P 成反相关关系, 且最大偏差可达到 2[K]; 而图(a.2)、(b.2)的结果说明振幅 A 的变化对湿度反演不会有很大影响。所以在进行掩星反演中, 需通过软件或是硬件方式抑制低频多路径效应来获得理想的结果。

2.4 卫星轨道误差影响

卫星轨道的位置、速度的误差都会对反演造成影响。考虑径向方向, 轨道的位置误差影响有两方面, 一方面表现在位置误差引发星间距离偏差, 从而造成附加相位值的误差, 另一方面, 卫星位置误差使掩星的几何关系变化, 在弯曲角的计算中引入误差。卫星切线方向的速度误差也有着不可忽视的影响。假设未加入误差时, 双频载波的附加相位为 L_{k1} , k 表示载波 L_1, L_2 , LEO 卫星之间的几何距离为 ρ_1 ; 加入误差后, 双频载波的附加相位为 L_{k2} , 卫星间距为 ρ_2 。设发射机所在卫星加入轨道误差前后的径向矢量分别为 $r_{T1}(X_{T1}, Y_{T1}, Z_{T1})$, $r_{T2}(X_{T2}, Y_{T2}, Z_{T2})$, 接收机所在卫星的径向矢量为 $r_R(X_R, Y_R, Z_R)$ 。我们有:

$$\rho_1 = \sqrt{(X_{T1} - X_R)^2 + (Y_{T1} - Y_R)^2 + (Z_{T1} - Z_R)^2} \quad (11)$$

$$\rho_2 = \sqrt{(X_{T2} - X_R)^2 + (Y_{T2} - Y_R)^2 + (Z_{T2} - Z_R)^2} \quad (12)$$

$$\Delta L_k = L_{k1} - L_{k2} = \rho_1 - \rho_2 \quad (13)$$

其中 ΔL_k 为相位误差。发射机卫星坐标使用 X_{T2} , Y_{T2} , Z_{T2} 计算。接收机卫星坐标计算方法类似, 可参考上述数学模型^[12]。为研究轨道相关误差对反演精度的影响机制, 我们设定了两组算例, 一组是较高轨道精度下的反演误差, 另一组是我们通常定轨误差范围的反演结果(20cm 以内)。

表 6. 较高轨道精度下卫星轨道误差分析参数设定表

算例名称	发射机 径向位置 误差[m]	接收机 径向位置 误差[m]	横向 速度 [mm/s]	横向 加速度 [μm/s ²]	温度 均值(K)	温度 均方根 (K)	湿度 均值 (g/kg)	湿度 均方根 (g/kg)
InRet10H:	无	无	无	无	0.0195	0.42398	-0.03240	0.28411
InRet10H-K2	0.0200	0.0200	0.0200	0.0200	0.0355	0.44127	-0.03239	0.28411
InRet10H-K4	0.0400	0.0400	0.0400	0.0400	0.0210	0.45880	-0.03234	0.28404
InRet10H-K6	0.0600	0.0600	0.0600	0.0600	0.0335	0.49394	-0.03238	0.28412
InRet10H-K8	0.0800	0.0800	0.0800	0.0800	0.0085	0.51550	-0.03236	0.28412

上表可知, 卫星轨道误差在厘米级时, 对反演温度值的影响系数=114.066%, =19.6108%, 对反演湿度值的影响系数= 0.1859% , = 0.0270%。可知卫星轨道误差对温度反演稳定性有较大影响, 同时对湿度影响十分小, 我们需分析了大气结构上的误差分布。

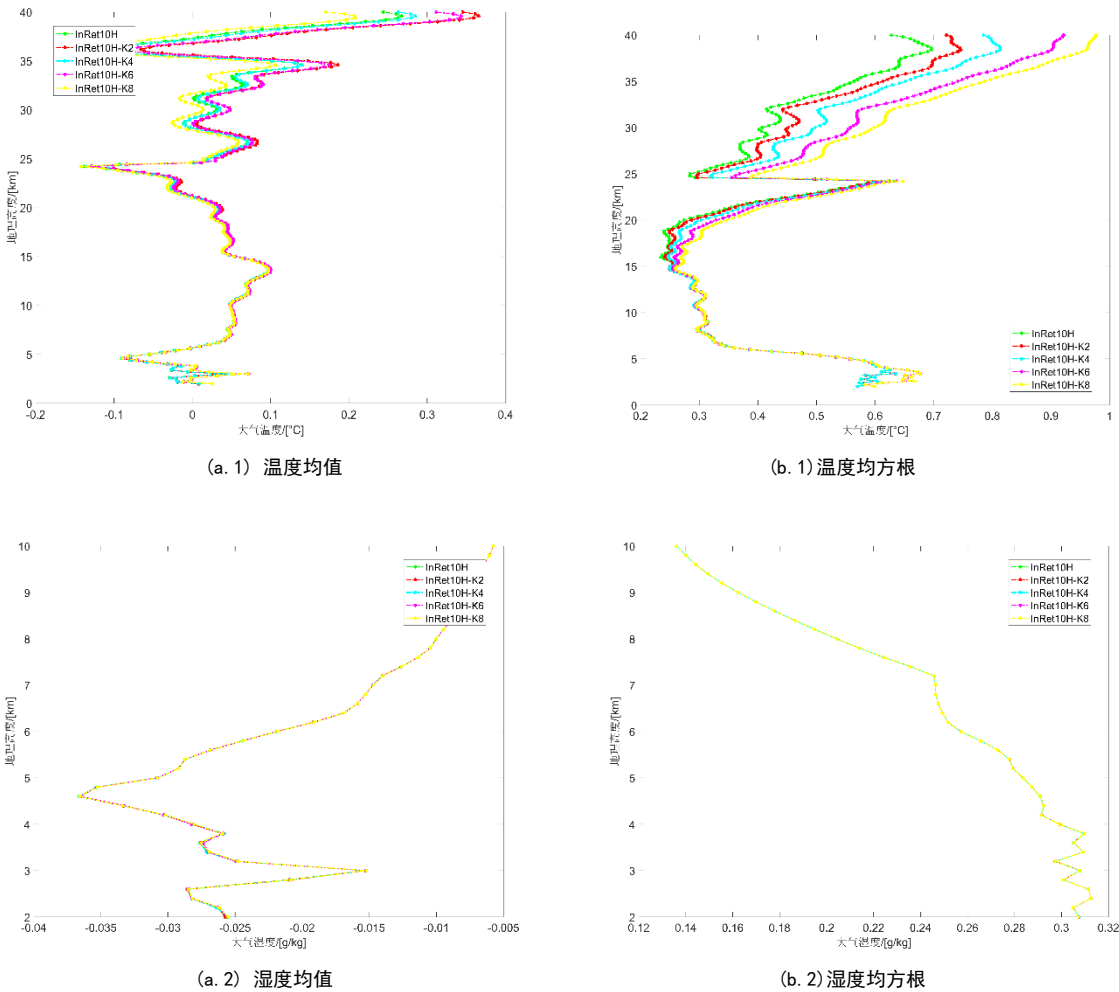


图 11. 较高轨道精度下卫星轨道误差影响分析图

图 11 展示了较高轨道精度下卫星轨道误差对于掩星反演结果的影响。图(a.1)、(b.1)说明卫星轨道误差对中层大气反演影响较大，特别是温度反演的稳定性，温度均值最大 0.34[K]，温度均方根与卫星轨道误差成正相关关系，且最大偏差可达到 1.5[K]；同时可以发现在 20~25km 处都有所增大，形成明显的两段误差变化关系。而图(a.2)、(b.2)表示较高轨道精度下卫星轨道误差对于湿度反演的影响十分微弱。

表7. 通常定轨误差范围内卫星轨道误差分析参数设定表

算例名称	发射机 径向位置 误差[m]	接收机 径向位置 误差[m]	横向 速度 [mm/s]	横向 加速度 [μm/s²]	温度 均值(K)	温度 均方根 (K)	湿度 均值 (g/kg)	湿度 均方根 (g/kg)
InRet10H	无	无	无	无	0.0195	0.4240	-0.0324	0.2841
InRet10H-K20	0.2000	0.2000	0.2000	0.2000	0.0118	0.6883	-0.0323	0.2841
InRet10H-K40	0.4000	0.4000	0.4000	0.4000	0.0175	0.8700	-0.0321	0.2841
InRet10H-K60	0.6000	0.6000	0.6000	0.6000	0.0215	0.9983	-0.0320	0.2840
InRet10H-K80	0.8000	0.8000	0.8000	0.8000	0.0296	1.1028	-0.0318	0.2840

上表可知，卫星轨道误差在分米级时，对反演温度值的影响系数= 89.092%，= 83.120%，对反演湿度值的影响系数= 1.771% ，= 0.0288%。与表 6 得到结论一致，同时我们发现，当卫星轨道误差增大到分米级别时，湿度反演结果几乎没有变化。

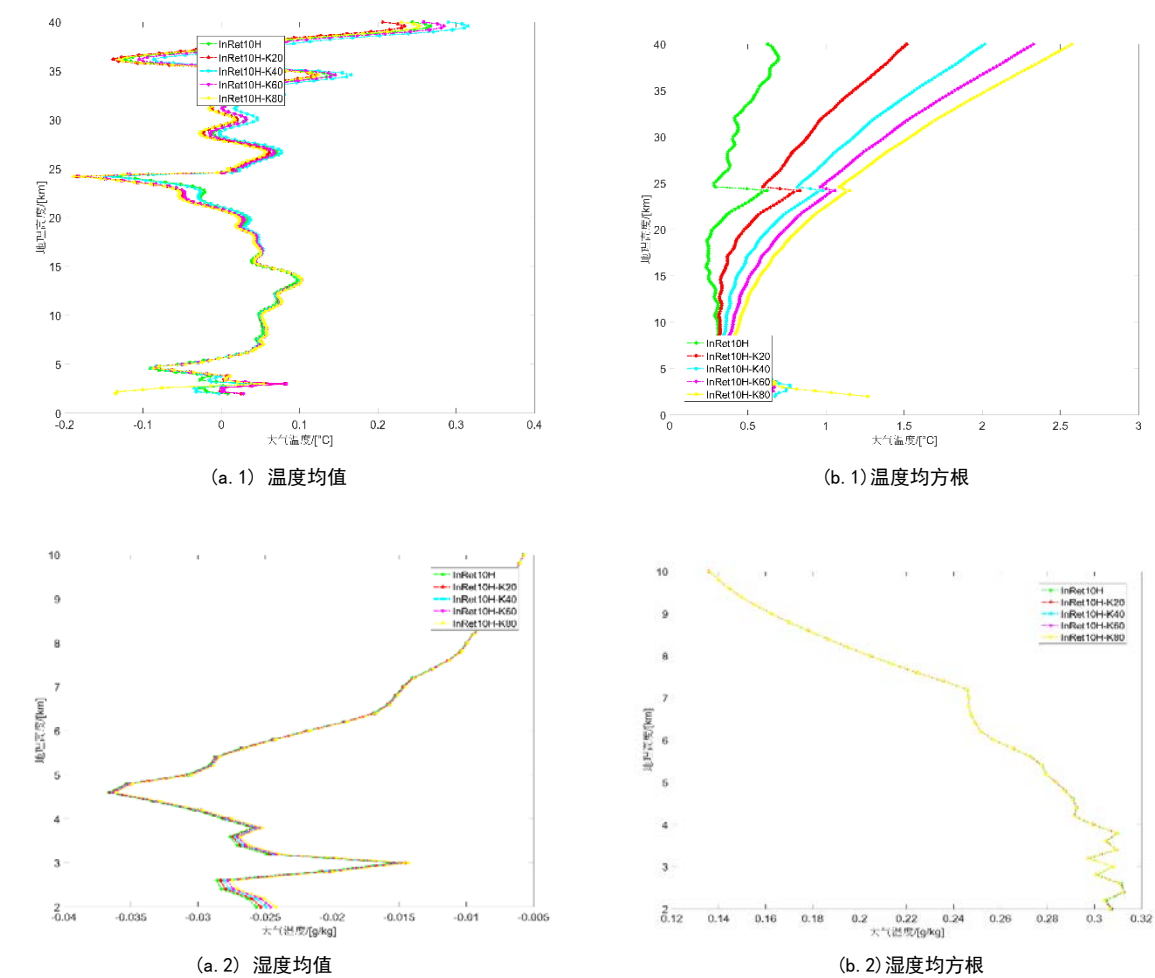


图 12. 通常定轨误差范围内卫星轨道误差影响分析图

图 12 展示了通常定轨误差范围内卫星轨道误差对于掩星反演结果的影响。

图(a.1)、(b.1)说明卫星轨道误差对中高层大气反演影响比较大,特别是温度反演的稳定性,温度均值最大偏差 0.34[K],温度均方根与振幅 A 成正相关关系,且最大偏差可达到 2.6[K];同时我们温度均值偏移与卫星轨道误差有一定的正相关关系。而图(a.2)、(b.2)表示通常定轨误差范围下卫星轨道误差对于湿度反演的影响依然十分微弱。为了获得较理想的温度反演值,我们需要定轨误差达到 20cm 以内,现在的技术是可以实现的。

3 结论

本文总结了 LEO-LEO 掩星大气反演技术,基于优化估算方法反演出大气参数,获得中性大气层的压强、温度、以及水汽的剖面。在 GNSS-LEO 数据处理的算法流程之上,介绍了 LEO-LEO 卫星间测量反演基本算法流程,同时对低轨掩星的误差来源(钟误差、多路径效应以及 LEO 卫星间的轨道误差)进行模拟与分析,得到以下结论:

(1) 钟的稳定度越高,反演结果会相对精确。为保证反演结果的可靠性,需将卫星钟的稳定度控制在 10^{-12} 以上。现在星载 GPS 钟稳定性可以达到这个标准。

(2) 卫星轨道越精确,反演误差也越小。即使 0.2m 的位置误差和 0.2mm/s 的速度误差引起的温度均方根也最大只有 1.5K,现今厘米级的定轨精度可基本保证反演不受轨道误差的影响。

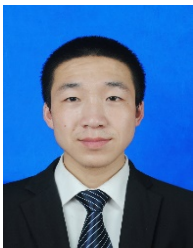
(3) 多路径误差中,振幅 A 对中高层大气反演影响比较大,同时也会对低层大气反演产生影响,温度均值最大 0.5K,温度均方根与振幅 A 成正相关关系,且最大偏差可达到 3K;周期 P 对中高层大气反演影响比较大,特别是温度均方根的影响即温度反演的稳定性,温度均值最大 0.27K,温度均方根与振幅周期 P 成反相关关系,且最大偏差可达到 2K。

REFERENCES

- [1] Nielsen, A.S., M.S. Lohmann, P. Høeg, H.-H. Benzon, A.S. Jensen, T. Kuhn, C. Melsheimer, S.A. Buehler, P. Eriksson, L. Gradinarsky, C. Jiménez, and G. Elgered, Characterization of ACE+ LEO-LEO Radio Occultation Measurements, DMI-IEP-CUT Tech. Rep. ESTEC contract no. 16743/02/NL/FF, DMI, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [2] Kirchengast, G., J. M. Fritzer, M. Schwärz, S. Schweitzer, and L. Kornblüeh, The Atmosphere and Climate Explorer Mission ACE+: Scientific Algorithms and Performance Overview. Techn. Rpt. for ESA/ESTEC No. 2/2004, IGAM, Univ. of Graz, Austria, 2004a.
- [3] Fjeldbo, G., A. Kliore, and V.R. Eshleman, The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments, *Astron. J.*, 76, 123-140, 1971.
- [4] Kursinski, E.R., G.A. Hajj, J.T. Schofield, R.P. Linfield, and K.R. Hardy, Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System, *J. Geophys. Res.*, 102, D19, 23429 - 23465, 1997.
- [5] Rieder, M.J., and G. Kirchengast, Error analysis and characterization of atmospheric profiles retrieved from GNSS occultation data, *J. Geophys. Res.*, 106, 31, 755-31,770, 2001b.
- [6] Budden, K.G., The propagation of radio waves - The theory of radio waves of low power in the ionosphere and magnetosphere, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K., 1985.
- [7] Foelsche, U., Tropospheric water vapor imaging by combination of ground-based and space-borne GNSS sounding data (Ph.D. thesis), Wissenschaftl. Ber. No. 10, 164 p., Inst. Meteorol. Geophys., Univ. of Graz, Austria, 1999.
- [8] Gobiet, A., and G. Kirchengast, Sensitivity of atmospheric profiles retrieved from GNSS occultation data to ionospheric residual and high-altitude initialization errors, Techn. Report for ESA/ESTEC No. 1/2002, Inst. for Geophys., Astrophys., and Meteorol., Univ. of Graz, Austria, 2002.
- [9] Gobiet, A., and G. Kirchengast, Advancements of GNSS radio occultation retrieval in the upper stratosphere for optimal climate monitoring utility, *J. Geophys. Res.*, 109, D24110, doi: 10.1029/2004JD005117, 2004.

- [10] Gorbunov, M.E., Canonical transform method for processing GPS radio occultation data in the lower troposphere, *Radio Sci.*, 37, 9-1-9-10, doi: 10.1029/2000RS002592, 2002a.
- [11] Gorbunov, M.E., G. Kirchengast, and K.B. Lauritsen, Advanced wave-optics forward modeling and bending angle and transmission retrieval including turbulent random refractivity field modeling, Tech. Rep. ESA/ESTEC-1/2006, Wegener Center, Univ. of Graz, Austria, 2006.
- [12] Jensen, A.S., M. Lohmann, H.-H. Benzon, and A. Nielsen, Full spectrum inversion of radio occultation signals, *Radio Sci.*, 38, 763, doi: 10.1029/2002RS002, 2003.
- [13] Kirchengast, G., J. Hafner, and W. Poetzi, The CIRA86aQ_UoG model: An extension of the CIRA-86 monthly tables including humidity tables and a Fortran95 global moist air climatology model, Techn. Report for ESA/ESTEC No. 8/1999, Inst. Meteorol. Geophys., Univ. of Graz, Austria, 1999.

【作者简介】



¹ 付乃锋 (1991-), 男, 汉族, 博士研究生, 无, 无线电掩星技术, 2010 年 09 月~2014 年 06 月毕业于中南大学测绘工程专业, 2014 年 09 月至今在读于中国科学院上海天文台天体测量与地球动力学专业。Email: nffu@shao.ac.cn。

² 郭鹏 (1976-), 男, 汉族, 博士, 副研究员, 目前从事的研究方向是 GPS/LEO 掩星技术以及应用研究, 以及卫星三频信标技术以及应用研究。Email: gp@shao.ac.cn。

³ 仵梦捷 (1992-), 女, 汉族, 博士研究生, 无, 无线电掩星技术。Email: mjwu@shao.ac.cn。

⁴ 胡小工 (1969-), 男, 汉族, 博士, 研究员, 目前从事的研究方向是卫星导航、精密定轨以及应用研究。Email: hxg@shao.ac.cn。