

利用低轨道卫星间微波信号探测反演温湿廓线*

张志华^{1,2}, 王鑫^{✉1}, 吕达仁^{1,2}
(1 中国科学院大气物理研究所 北京 100029
2 中国科学院大学 北京 100049)

摘要: 通过同时测量微波信号的折射和吸收信息, 低地球轨道卫星间 (LEO-LEO) 微波掩星探测技术能够独立反演温度和水汽廓线。通过仿真手段, 首先, 正演模拟了微波信号穿过大气层后由折射和吸收效应分别导致的相位延迟和振幅衰减, 在此基础上, 对温度、水汽和云中液态水反演廓线进行了个例分析, 然后, 统计分析了温度和水汽在不同纬度带的反演性能, 以及云对反演精度的影响。结果表明: 温度在约 35 km 以上存在明显正偏差, 高纬度的最大, 中纬度次之, 低纬度最小。水汽反演误差在约 4 km 以下明显增大, 低纬度的最大, 中纬度次之, 高纬度最小。有云存在时, 需要去除云的吸收作用, 否则温度和水汽会出现明显的正偏差。上述研究为进一步发展 LEO-LEO 掩星探测计划提供了理论参考依据。

关键词: LEO-LEO; 微波掩星探测; 反演; 温度廓线; 水汽廓线

中图分类号: P412.27 文献标识码: A 文章编号: CN11-1780(2022)06-0096-12

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220419001

引用格式: 张志华, 王鑫, 吕达仁. 利用低轨道卫星间微波信号探测反演温湿廓线[J]. 遥测遥控, 2022, 43(6): 96–107.

Retrieval of temperature and water vapor profiles by measuring microwave signals between LEO satellites

ZHANG Zhihua^{1,2}, WANG Xin¹, LYU Daren^{1,2}

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: LEO-LEO microwave occultation measurement technique can independently retrieve the temperature and water vapor profiles using both refraction and absorption measurements of microwave signals between LEO satellites. In this paper, the excess phase and atmospheric loss caused by refraction and absorption were simulated firstly. On this basis, the individual retrieval profile of temperature, water vapor and cloud liquid water content were analyzed. Then, the retrieval performance of temperature and water vapor profiles at different latitudes and the influence of cloud on the retrieval accuracy were statistically analyzed. The results show that the retrieved temperature profiles has significant positive bias above 35 km, with the largest in high latitude, the second in middle latitude, and the smallest in low latitude. The retrieval error of water vapor profiles increases significantly below 4 km, with the largest in low latitude, the second in middle latitude and the smallest in high latitude. In the cloudy atmospheric conditions, it is necessary to remove the absorption of clouds, otherwise the retrieved temperature and water vapor profiles will have positive bias. This study can provide theoretical reference for the further development of LEO-LEO occultation space exploration missions.

Key words: LEO-LEO; Microwave occultation measurement; Retrieval; Temperature profiles; Water vapor profiles

DOI: 10.12347/j.ycyk.20220419001

Citation: ZHANG Zhihua, WANG Xin, LYU Daren. Retrieval of temperature and water vapor profiles by measuring microwave signals between LEO satellites[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(6): 96–107.

*基金项目: 中科院战略性先导科技专项空间科学背景型号项目 (XDA15021000)

✉通信作者: 王鑫 (wangx2003@mail.iap.ac.cn)

收稿日期: 2022-04-19 收修改稿日期: 2022-05-06

引 言

利用低地球轨道 LEO (Low Earth Orbit) 卫星间微波信号对大气进行掩星探测, 是在全球导航定位系统 GNSS (Global Navigation and Positioning System) 无线电掩星基础上提出的一种新的掩星探测方法^[1-3]。GNSS-LEO 无线电掩星 GRO (GNSS-LEO Radio Occultation) 在对流层较暖区域存在“温度-水汽模糊”问题, 仅利用折射作用无法分离温度和水汽对折射率的贡献^[4-7], 针对此问题, 在 20 世纪 90 年代末期, 研究人员开始考虑采用高于全球定位系统 GPS 导航信号的水汽吸收线附近的微波信号, 基于电磁波在大气中传播时的折射和吸收效应, 获取电磁波信号的相位延迟和振幅衰减信息, 从而在没有辅助背景信息的情况下同时反演获得温度和水汽廓线^[8-10]。LEO-LEO 微波掩星 LMO (LEO-LEO Microwave Occultation) 信号可以穿透云层, 弥补卫星可见光、红外遥感在这方面的缺陷^[11], 具有高垂直分辨率、高精度、全天候、自校准、无需定标、长期稳定等优点^[12], 可为现有的探测方法提供相互比对和补充, 其探测资料将对提高数值天气预报精度、气候与全球变化研究、大气模式研究和数据同化等方面都具有重要的科学价值和研究意义^[13]。

LEO-LEO 微波掩星探测概念自提出以来, 相关研究人员开展了一系列有意义的研究。在探测技术方面, 主要包括 LEO-LEO 掩星轨道设计研究、相关载荷研制和原理样机地面试验验证等^[14-18]。在反演技术方面, Feng 等和 Kursinski 等利用相邻频率的信号强度比消除散焦、闪烁和衍射等非吸收效应, 得到仅由吸收引起的大气吸收系数, 建立了 LEO-LEO 微波掩星的虚部折射率反演算法, 结合已有的 GNSS-LEO 无线电掩星的实部折射率反演算法, 同时反演得到了温度和水汽廓线^[2,19]。在此基础上, Kirchengast 和 Gorbunov 等开发了端到端的仿真反演计算模型, 并进行了系列端到端的仿真反演实验^[20-22], 初步证明了 LEO-LEO 掩星探测地球大气的可行性和探测能力。

由于技术条件、风险控制和预算调整等多种原因, 目前国内外仍没有有轨实现的 LEO-LEO 掩星探测计划^[23]。对 LEO-LEO 微波掩星的反演技术研究也非常缓慢, 特别是国内, 关于反演技术方面的研究几乎不见报道。为了发展 LEO-LEO 掩星探测技术, 使我国相关研究能力达到国际水平, 进而探测得到精度尽可能高、高度范围尽可能大的温度和水汽廓线, 仍需要对 LEO-LEO 微波掩星的反演技术开展大量且深入的研究。

本文通过仿真模拟手段, 对 LEO-LEO 微波掩星反演温度和水汽廓线进行了分析研究。首先介绍了 LEO-LEO 微波掩星的基本探测原理和反演方法, 分析了微波信号的基本吸收特征, 通过仿真模拟手段, 正演模拟了微波掩星信号穿过大气层后引起的相位延迟和振幅衰减, 在此基础上进行了反演实验, 对温度、水汽和云中液态水的反演个例进行了分析, 然后统计分析了温度和水汽在低、中、高纬度带的反演性能, 并研究了云层对温度和水汽反演精度的影响。

1 原理和方法

LEO-LEO 微波掩星探测是指两颗低轨道卫星 (LEO) 分别运动到地球的两侧时, 其中一颗作为发射卫星, 另一颗作为接收卫星, 由发射卫星发出微波信号, 穿过地球大气到达接收卫星。由于两颗 LEO 卫星之间的相对运动, 发射信号从大气层顶逐渐切过整层地球大气直到地球表面, 或者由地球表面逐渐切到大气层顶的过程, 称为发生了一次下降 (或上升) LEO-LEO 掩星事件^[12]。

图 1 是 LEO-LEO 掩星观测几何关系示意图。图中, LEO_{Tx} 是发射卫星, LEO_{Rx} 是接收卫星; r_{Tx} 是发射卫星到局部曲率中心的距离, r_{Rx} 是接收卫星到局部曲率中心的距离, r_{TxRx} 是发射卫星和接收卫星

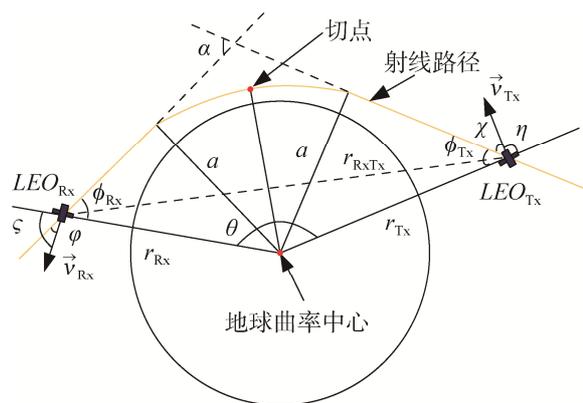


图 1 LEO-LEO 掩星观测几何关系示意图
Fig. 1 Schematic view of LEO-LEO occultation observation geometry

之间的距离; v_{Tx} 是发射卫星的速度, v_{Rx} 是接收卫星的速度; χ 是信号入射方向与 v_{Tx} 的夹角, φ 是信号出射方向与 v_{Rx} 的夹角; ϕ_{Tx} 是信号入射方向与 r_{Tx} 之间的夹角, ϕ_{Rx} 是信号出射方向与 r_{Rx} 之间的夹角; η 是发射机速度与位置矢量之间的夹角, ζ 是接收机速度与位置矢量之间的夹角; θ 是发射机和接收机位置矢量之间的夹角; a 是碰撞高度, α 是弯曲角。

在 LEO-LEO 微波掩星观测中, 采用 22.23 GHz 和 183.31 GHz 水汽吸收中心线附近的频率作为发射频率探测地球大气, 地球大气介质不仅通过折射影响信号的传播路径, 还通过吸收影响信号振幅, 在这种情况下, 大气折射指数被认为是复数, 表示为 n_c , 则复大气折射率为 $N_c = (n_c - 1) \times 10^6$, $N_c = N' + iN''$, N' 表示实部折射率, N'' 表示虚部折射率, i 表示虚数单位。根据 Snell 定律, 折射作用导致信号传播路径发生弯曲, 如果已知卫星的精确位置和速度, 可以通过相位的测量计算出弯曲角 α , 相位是第一个可观测到的变量^[24,25]。根据 Bouguer-Lambert-Beer 定律, 由于吸收作用, 第二个可观测到的变量是振幅衰减, 通过测量的振幅, 可以导出大气透过率 T_i 。在球对称大气假设下, 弯曲角 α 和每个频率通道 i 的大气透过率 T_i 可以表示为:

$$\begin{cases} \alpha(a_j) = 2a_j \int_{r_j}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{r^2 \cdot (n')^2 - a_j^2}} \frac{d \ln(n')}{dr} dr \\ T_i(a_j) = \exp \left(-2 \int_{r_j}^{\infty} k_i \frac{n'r}{\sqrt{(n'r)^2 - (n'_j r_j)^2}} dr \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中, a_j 是垂直高度层 j 处的碰撞高度, $r \cdot n'(a) \sin \theta = a$, r 是射线到地心的距离, θ 是射线路径与径向的夹角, r_j 是从地心到掩星切点的径向距离, 此时 θ 等于 $\pi/2$, 则 $r_j \cdot n'(a_j) = a_j$ 。

分别对式 (1) 中弯曲角 α 和大气透过率 T_i 的表达式进行 Abel 积分变换, 可以得到实部折射指数 n' 和每个频率通道 i 的大气吸收系数 k_i , 其表达式为:

$$\begin{cases} n'(a_j) = \exp \left(\frac{1}{\pi} \int_{a_j}^{\infty} \frac{\alpha(a)}{\sqrt{a^2 - a_j^2}} da \right) \\ k_i(z_j) = \frac{1}{\pi} \left| \frac{da}{dr} \right|_{a=a_j} \int_{a_j}^{\infty} \frac{d \ln T_i(a)}{da} \frac{1}{\sqrt{a^2 - a_j^2}} da \end{cases} \quad (2)$$

则实部折射率 N' 和每个频率通道 i 的虚部折射率 N_i'' 可表示为:

$$\begin{cases} N'(z_j) = 10^6 (n'(a_j) - 1) \\ N_i''(z_j) = 10^6 \cdot \frac{c}{4\pi f_i} k_i(z_j) \end{cases} \quad (3)$$

式 (3) 中, $z_j = r_j - R_c$, z_j 是对应 a_j 的大地高度层, R_c 地球局部曲率半径, f_i 是信号频率。

最后, 联立实部折射率方程、虚部折射率方程 (每个频率对应一个方程)、大气静力平衡方程以及理想气体状态方程, 建立非线性方程组^[20], 表达式如下:

$$\begin{cases} N' = 77.6 \frac{p}{T} + 3.73 \times 10^5 \frac{e}{T^2} + 1.4 h w c \\ N_i'' = F(f_i, p, e, T, h w c) \\ \frac{dp}{dz} = -g\rho \\ \rho = \frac{pm_d}{T_v R} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, p 是总气压, e 是水汽压, T 是温度, lwc 是云中液态水含量, ρ 是密度; m_d 是干燥空气的平均分子质量, R 是通用气体常数, T_v 是虚温。在每一高度层求解非线性方程组, 至少有四个方程可用于约束密度、气压、温度和水汽四个未知变量, 非线性方程组是超定的, 不需要引入任何辅助背景场, 即可独立求解得到温度和水汽廓线, 从而克服 GRO 探测存在的“温度-水汽模糊”问题^[26]。此外, 当采用的频率通道足够时, 可以同时将云中液态水含量作为副产品反演出来^[12,27,28]。

2 信号正演仿真模拟

LEO-LEO 微波掩星探测的原始观测量是电波信号的相位和振幅, 目前国内外还没有在轨实现的 LEO-LEO 掩星探测计划, 在没有实测数据的情况下, 可以通过理论计算正向模拟出掩星观测的信号相位和振幅。

首先, 模拟发射卫星和接收卫星的轨道位置和速度信息。有关仿真轨道参数设置见表 1。星座采用太阳同步轨道, 由 4 颗 LEO 卫星组成, 分为发射卫星和接收卫星两组, 每组各 2 颗卫星, 分布在同一轨道面内, 两组卫星分别运行在 600 km 和 550 km 高度轨道上, 反向运行。利用表中参数, 分别进行了 1 天、3 天、7 天和 1 个月的 LEO-LEO 掩星事件仿真模拟实验。

表 1 LEO-LEO 掩星事件仿真卫星轨道参数设置
Table 1 LEO-LEO occultation event simulation satellite orbit parameter setting

轨道参数	接收卫星 (两颗)	发射卫星 (两颗)
轨道高度	550 km	600 km
偏心率	0	0
轨道倾角	97.41°	97.60°
降交点地方时	12 点	0 点
轨道周期	5 676.98 s	5 738.99 s

图 2 给出了 LEO-LEO 掩星事件的位置分布, 1 天共有 240 个掩星事件, 上升和下降掩星事件各 120 个, 各纬度均有掩星事件分布, 但数量分布不均匀; 3 天共有 718 个掩星事件, 上升和下降掩星事件各 359 个, 各纬度数量均匀分布, 基本覆盖全球; 7 天共有 1 678 个掩星事件, 上升和下降掩星事件各 839 个, 各纬度数量密集分布; 1 个月共有 7 194 个掩星事件, 上升和下降掩星事件各 3 597 个, 各纬度数量均匀密集分布。LEO-LEO 掩星探测可为极区、海洋、沙漠等地区提供更多的大气参数信息。

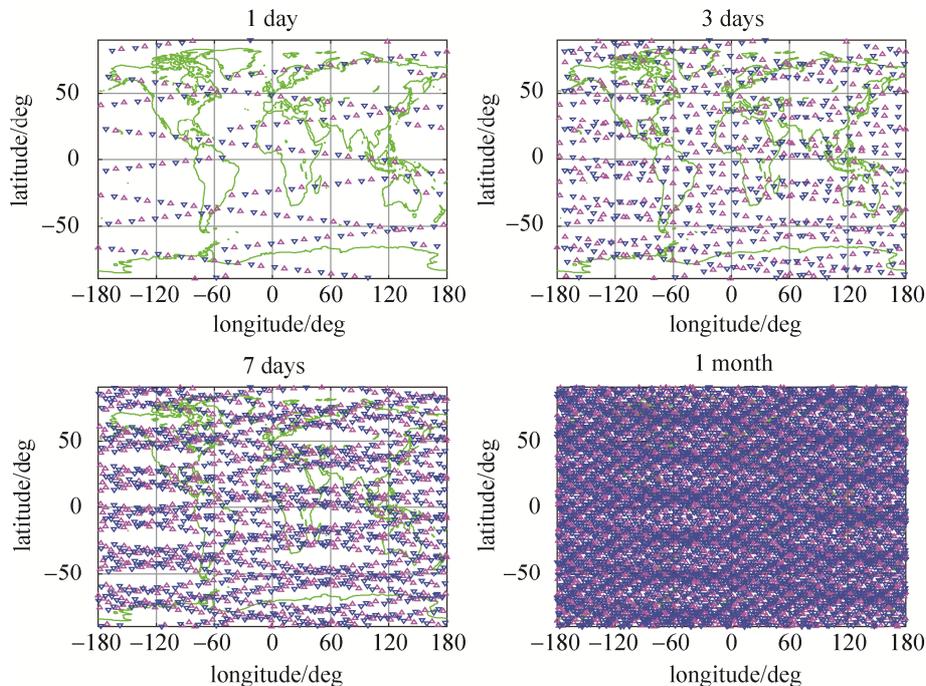


图 2 LEO-LEO 掩星事件位置分布: “△”代表上升掩星事件, “▽”代表下降掩星事件

Fig. 2 Location distribution of LEO-LEO occultation events: "△" represents a rising occultation event, and "▽" represents a setting occultation event

将图 2 模拟的卫星轨道数据作为输入, 给定信号初始方向和大气背景场等参数, 利用三维射线追踪方法可以模拟发射信号经过地球大气到达接收机的射线传播轨迹, 得到指定采样率下每个信号频率的模拟附加相位和大气损耗(散焦)^[12]。在 LEO-LEO 微波掩星探测中, 除了由散焦引起的大气损耗, 还要考虑吸收引起的大气损耗, 两者组成总的大气损耗, 利用毫米波传播模型(MPM93), 可以沿每条射线路径逐点计算得到大气吸收衰减^[29-31]。图 3 给出了 1 GHz~200 GHz 频率范围内不同湿度条件下水汽吸收系数与频率的关系, 吸收系数以对数形式表示。

由图 3 可知, 在 1 000 hPa 气压层, 水汽在 22.23 GHz 和 183.3 GHz 附近均吸收强烈, 对不同湿度条件非常敏感, 22.23 GHz 附近的水汽吸收系数在 0.01 dB/km~1 dB/km 之间, 183.31 GHz 附近的水汽吸收系数在 1 dB/km~100 dB/km 之间, 其量纲是 22.23 GHz 的 2 倍以上; 在 100 hPa 气压层, 水汽的吸收强度变弱, 特别是 22.23 GHz 附近的信号频率, 不能灵敏区分不同湿度的水汽吸收强度, 而 183.31 GHz 附近的信号频率仍有较灵敏的特征, 能够区分不同湿度的水汽吸收强度; 在 10 hPa 气压层, 22.23 GHz 和 183.31 GHz 附近的水汽吸收强度均变弱, 均很难区分不同湿度的水汽吸收强度, 无法探测到水汽信息。因此, 为了探测获得尽可能高范围的水汽信息, 需要在不同高度范围内使用不同的探测频率, 一般利用 22.23 GHz 探测对流层中低层的水汽信息, 利用 183.31 GHz 探测对流层上层至平流层下层的水汽信息。

下面采用 FASCODE 中性大气模式和 3D_NeUoG 电离层模式(F10.7=80)作为大气环境背景场进行 LEO-LEO 微波掩星信号的仿真模拟实验。为了能够独立测量从近地面到平流层下层的水汽信息, 选用了位于 22.23 GHz 和 183.31 GHz 附近的 5 个频点, 分别在 X 波段、K 波段和 M 波段, 即 9.7 GHz、17.25 GHz、22.6 GHz、179.0 GHz 和 182.2 GHz, 探测采样率均为 10 Hz。图 4 分别给出了

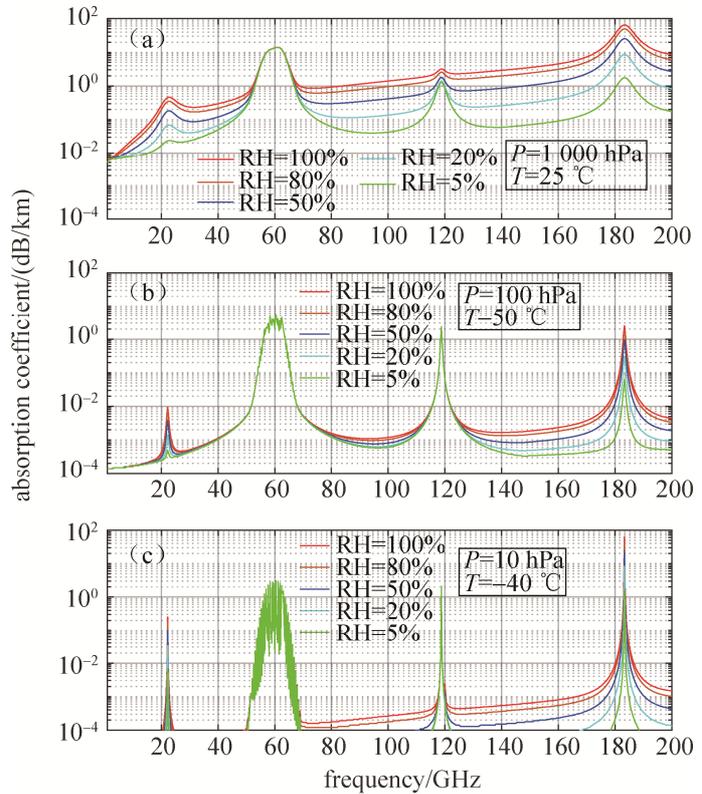


图 3 不同湿度条件下 1 000 hPa、100 hPa、10 hPa 气压层的水汽吸收系数谱线

Fig. 3 The water vapor absorption spectra at 1 000 hPa, 100 hPa and 10 hPa pressure layers under different humidity conditions

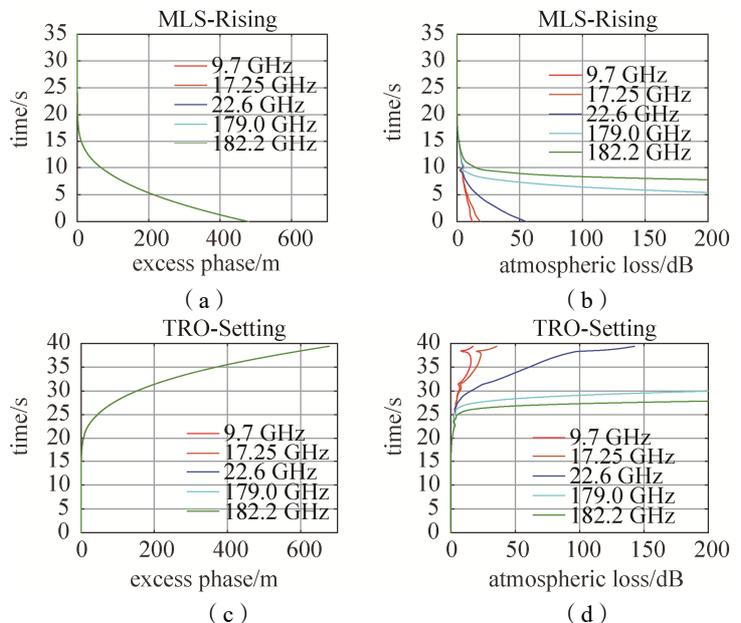


图 4 中纬度上升掩星事件和热带下降掩星事件的模拟相位延迟和大气损耗

Fig. 4 Simulation excess phase and atmospheric loss of the rising occultation event in the middle latitude and the setting occultation event in the tropic

一个上升和一个下降掩星事件的相位延迟和传播损耗。上升掩星事件位于北半球中纬度 (37.97°N, 71.16°W), MLS (Mid-Latitude Summer) 代表中纬度夏季大气, 下降掩星事件位于热带赤道附近 (1.5°N, 92.25°E), TRO (Tropic) 代表热带大气。

由图 4 (a) 可知: 中纬度上升掩星事件的持续时间为 35.0 s, 由近地面 (0 s) 上升到 80 km (35.0 s), 相位延迟在近地面最大, 为 481.1 m, 然后随时间增加呈指数递减。由图 4 (b) 可知: 不同信号频率呈现不同程度的衰减, 在 0 s~12 s 内, 信号在 9.7 GHz 衰减最弱, 衰减最大值为 12.3 dB, 在 17.25 GHz 和 22.6 GHz 衰减逐渐增强, 最大值为 18.8 dB 和 55.4 dB, 信号在 179.0 GHz 和 182.2 GHz 衰减严重, 在 0 s~6 s 内, 大气损耗均大于 200 dB。由图 4 (c) 可知: 热带下降掩星事件的持续时间为 39.4 s, 由 78.7 km (0 s) 下降到近地面 (39.4 s), 相位延迟随时间增加呈指数递增, 在近地面达到最大值 678.2 m。由图 4 (d) 可知, 随着时间增加, 掩星切点高度逐渐下降, 信号频率的衰减逐渐增强, 在 26 s~39.4 s 内, 信号在 9.7 GHz 衰减最大值为 17.2 dB, 在 17.25 GHz 和 22.6 GHz 分别为 35.8 dB 和 142.8 dB, 在 179.0 GHz 和 182.2 GHz 衰减最严重, 损耗均大于 200 dB。可以发现: 热带掩星事件的相位延迟比中纬度掩星事件的大, 信号的损耗更强烈, 这是由于热带对流层的温度更高、水汽信息更丰富, 信号的传播路径延迟更明显、衰减强度更大。

3 反演结果

3.1 反演个例分析

下面利用模拟得到的相位延迟和振幅衰减进行反演实验, 首先进行反演个例分析。图 5 是由图 4 中中纬度掩星事件和热带掩星事件的相位延迟和大气损耗, 分别反演得到的实部折射率和虚部折射率廓线及其反演误差。

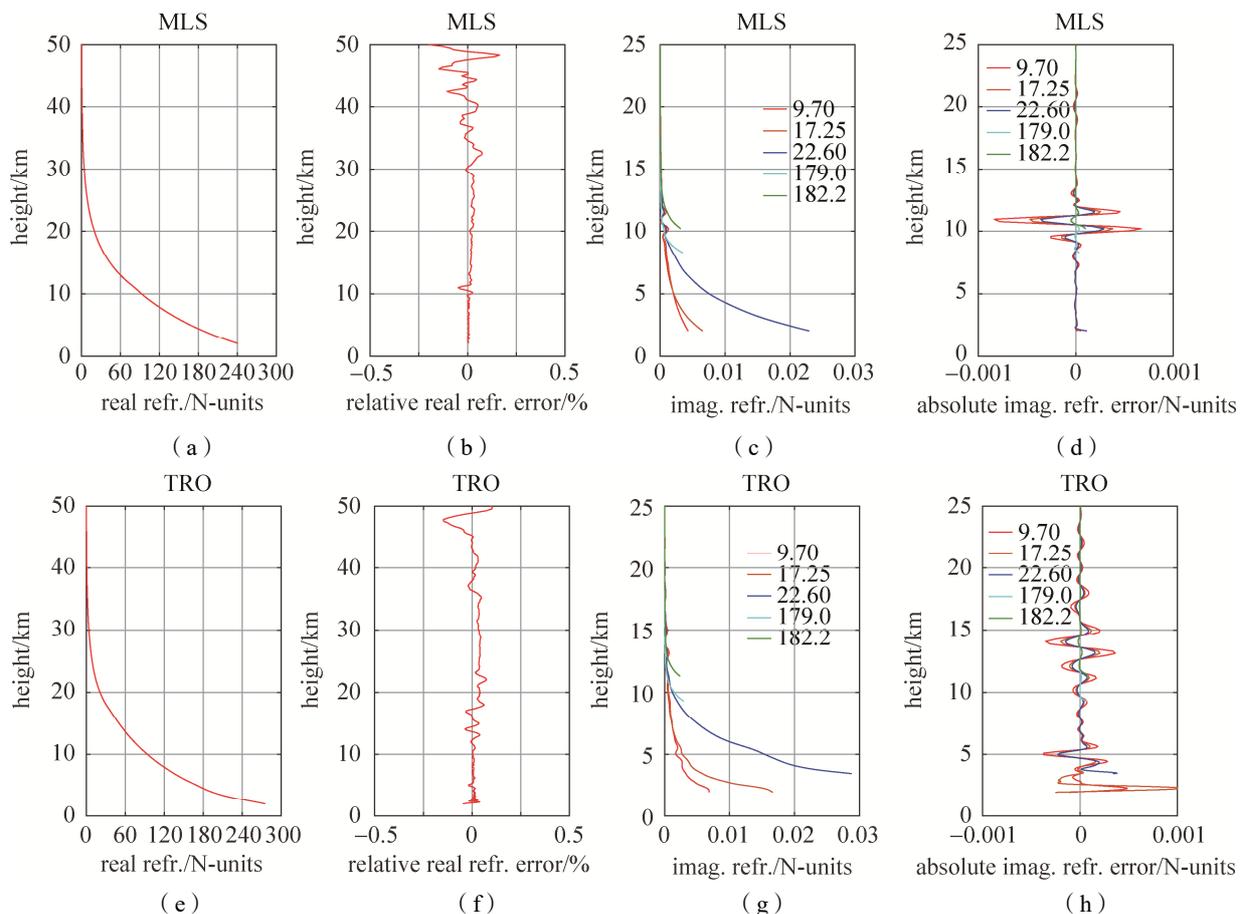


图 5 实部折射率和虚部折射率反演廓线及其误差

Fig. 5 The retrieved real refractivity and imaginary refractivity profiles and the errors

图 5 (a) 和 5 (e) 给出了从近地面到平流层顶 (0 km~50 km) 的实部折射率廓线, 实部折射率与频率无关, 五个信号频率对应一条反演廓线。实部折射率随高度降低呈指数增大, 中纬度和热带掩星事件的实部折射率在对流层底层达到最大值, 分别为 240.24 N-units 和 275.47 N-units, 反演相对误差均在 $\pm 0.2\%$ 之内。图 5 (c) 和 5 (g) 给出了从近地面到平流层下层 (0 km~25 km) 的虚部折射率廓线, 五个频率通道对应五条反演廓线。五个信号频率在通过不同高度大气时遭受到不同量的吸收, 在约 12 km 以上, 水汽稀少, 22.23 GHz 弱吸收线接近完全透射, 183.3 GHz 强吸收线具有较高的敏感性, 可有效探测对流层上层水汽信息; 在约 10 km~12 km 以下, 大气层对于 179.0 GHz 和 182.2 GHz 几乎完全不透明, 信号基本被大气吸收, 无法被接收机探测到, 两个信号频率不可用, 而 9.7 GHz、17.25 GHz 和 22.6 GHz 被大气部分吸收, 信号可以穿过大气到达接收机, 探测对流层中低层水汽信息。此外可以发现: 中纬度掩星事件的虚部折射率误差在约 10 km~12 km 明显增大 (图 5 (d)), 热带掩星事件在约 14 km~16 km 明显增大 (图 5 (h)), 这是对流层顶结构存在引起的。由于对流层低层的水汽更丰富, 热带掩星事件的虚部折射率误差显著增大。

图 6 是反演得到的温度和水汽廓线及其误差。由图 6 (a) 和 6 (b) 可知: 中纬度和热带掩星事件的温度反演廓线与真值廓线均非常接近, 绝对误差基本在 ± 1 K 以内; 在 40 km 以下反演误差减小, 在 ± 0.5 K 以内, 热带掩星事件的误差在约 3.5 km 以下显著增大。由图 6 (c) 和 6 (d) 可知: 中纬度和热带掩星事件在近地面的最大比湿分别为 2.86 g/kg 和 9.59 g/kg, 相对误差基本在 $\pm 5\%$ 以内, 在约 20 km 以上, 误差随高度明显增加, 在这个高度以上的水汽非常稀少, 导致即使在 182.2 GHz, 水汽吸收也很少。在约 3.5 km 以下, 热带掩星事件的水汽误差再次变大, 基本在 $\pm 10\%$ 以内。

图 7 给出了有云存在时反演得到的云中液态水含量廓线及其误差。中纬度掩星事件的云参数设置为: 云层中心高度为 4.5 km, 云厚度为 0.5 km, 液态水含量为 0.4 g/m^3 ; 热带掩星事件的云参数设置为: 云层中心高度为 3.5 km, 云厚度为 0.8 km, 液态水含量为 0.6 g/m^3 。反演结果表明: 液态水含量反演廓线和真值廓线比较接近, 较好地呈现出中纬度在 4.5 km 附近厚度为 0.6 km 的云层和热带 3.5 km 附近厚度 0.8 km 的云层, 绝对误差基本在 $\pm 0.2 \text{ g/m}^3$ 以内。

3.2 反演统计分析

下面进一步采用近实际大气的 ECMWF 模式数据作为中性大气背景场, 统计分析了温度和水汽廓线在不同纬度带的反演性能。全球被划分为低纬度带 (Low-latitude, $30^\circ\text{S}\sim 30^\circ\text{N}$)、中纬度带 (Mid-latitude,

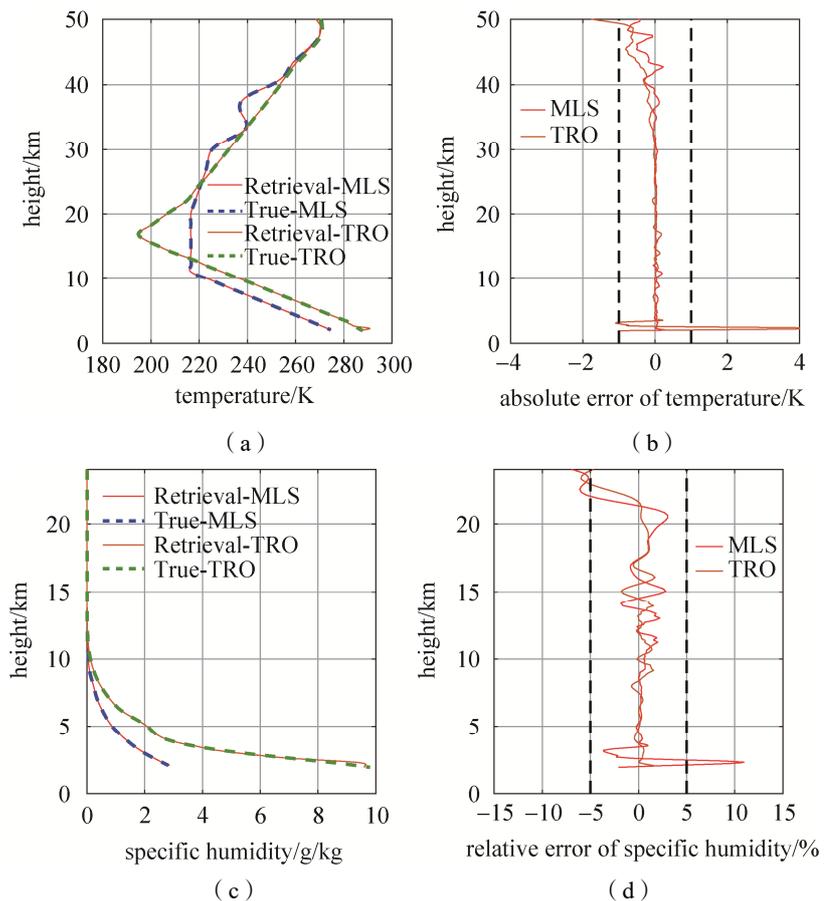


图 6 温度和水汽反演廓线及其误差

Fig. 6 The retrieved temperature and water vapor profiles and the errors

30°N~60°N 和 30°S~60°S) 和高纬度带 (High-latitude, 60°N~90°N; 60°S~90°S)。采用的 ECMWF 数据是 2019 年 7 月 15 日的 ERA-Interim 模式层数据, 包括: 温度、水汽、云中液态水等变量信息。在各纬度带分别选取 60 个 LMO 掩星事件的反演结果进行统计分析。

图 8 是温度在不同纬度带的反演统计误差。在约 35 km 以上, 平均绝对偏差在各纬度带随高度升高均明显增大, 高纬度的误差最大, 中纬度的次之, 低纬度的最小, 并出现了明显的正偏差, 除了高纬度带, RMS 误差在 40 km 以上基本在 2 K 以内。这一方面是因为静力学方程向下积分时初始值误差向下传导引起的, 另一方面是因为随着高度升高, 大气变得越来越稀薄, 信号的信噪比越来越低, 误差越来越大, 高纬度带相比中低纬度, 大气更稀薄, 反演误差更大。在约 10 km~35 km, 各纬度带的反演精度较高, 偏差均在±0.2 K, RMS 误差均小于 0.4 K。值得注意的是, 低、中、高纬度带在约 16.5 km、11 km 和 10 km (图 8 (d)、8 (f) 和 8 (h)) 均有一个明显的误差凸起, 这是对流层顶引起的。在约 4 km 以下, 各纬度带的反演误差随高度降低均明显增大。

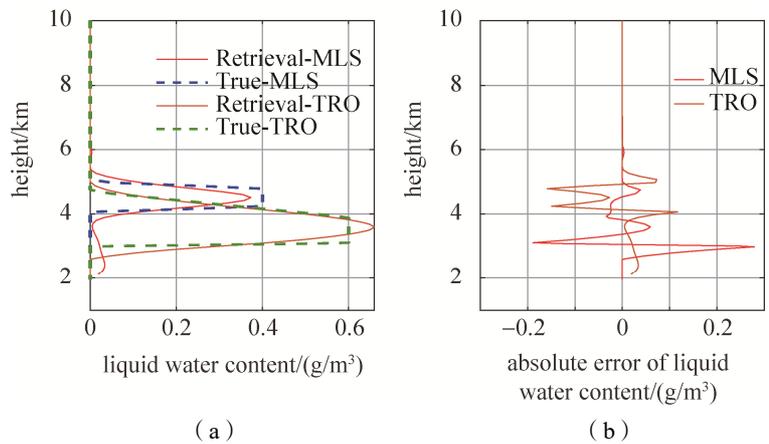


图 7 云中液态水含量反演廓线及其误差

Fig. 7 The retrieved liquid water content profiles and the errors

Fig. 7 The retrieved liquid water content profiles and the errors

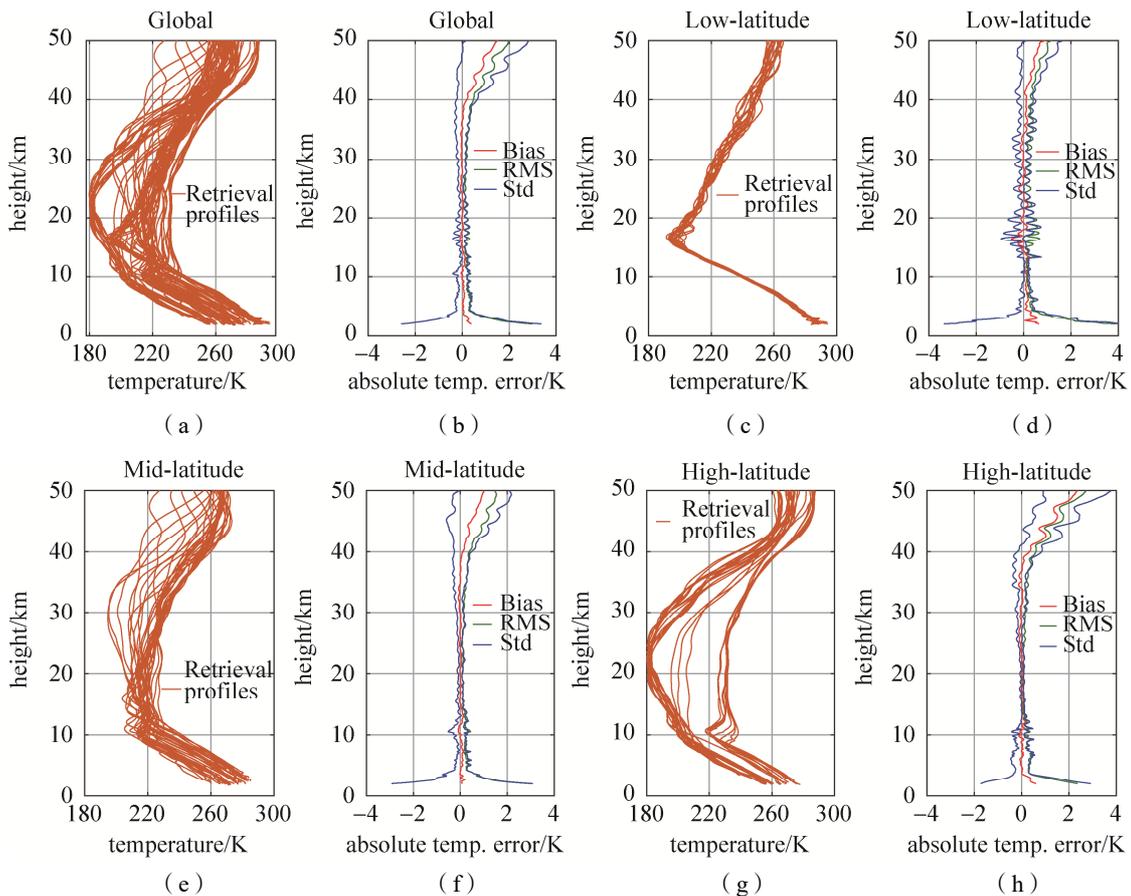


图 8 温度反演廓线及其统计误差

Fig. 8 The retrieved temperature profiles and statistical errors

图 9 是水汽在不同纬度带的反演统计误差。各纬度带的 RMS 误差基本在 10% 以内, 满足探测精度需求。在约 18 km 以上, 各纬度带的反演误差均随高度升高而逐渐增大, 这是因为大气湿度随高度升高而越来越小, 在同样观测噪声的情况下, 信噪比越来越低, 误差越来越大。在 4 km 以下, 平均相对偏差在各纬度带随高度降低均明显增大, 低纬度的误差最大, 中纬度的次之, 高纬度的最小。这是因为相比中、高纬度带, 低纬度带在对流层底层的水汽信息更丰富, 电波信号衰减更强烈, 信号信噪比更低, 信号有可能弱到无法到达接收机, 因此反演误差最大。

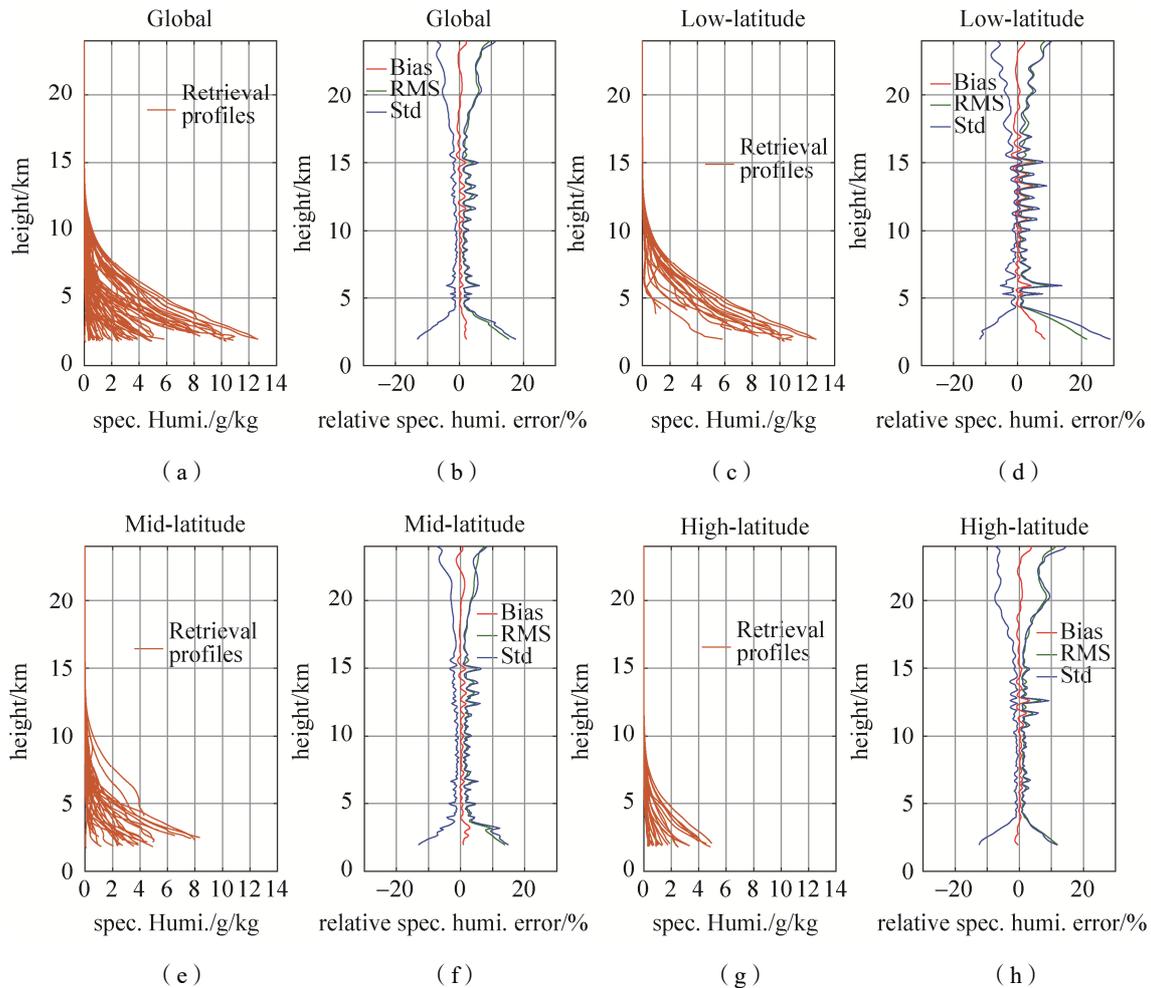


图 9 不同纬度带的水汽反演廓线及其统计误差

Fig. 9 The retrieved water vapor profiles and statistical errors

LEO-LEO 微波掩星信号在穿过云层时会被不同程度地吸收衰减。下面分析了云中液态水对温度和 水汽反演性能的影响。图 10 给出了温度和水汽在晴空、有云及忽略云层情况下的统计反演误差。云中 液态水一般分布在 8 km 以下, 温度和水汽的反演精度在 8 km 以上基本不受其影响。在约 4 km~8 km 的 高度, 在有云时与晴空情况下, 温度的 RMS 误差均在 0.5 K 以内, 水汽的 RMS 误差均在 4% 以内。在 约 4 km 以下, 温度和水汽的反演误差随高度降低均明显增大, 在晴空时存在正偏差, 在有云时存在负 偏差。如果有云时忽略云层对吸收的贡献, 将其作为晴空条件进行反演处理, 在约 8 km 以下, 温度 和水汽的偏差、标准差和 RMS 误差随高度降低均显著增大(图 10 (c) 和 10 (g)), 出现了明显正偏差, 在约 6 km 以下, 温度和水汽的 RMS 误差分别大于 1 K 和 10% (图 10 (d) 和 10 (h))。因此, 在反 演温度和水汽廓线时, 如果有云层存在, 需要将云对吸收的贡献从总吸收中去掉。

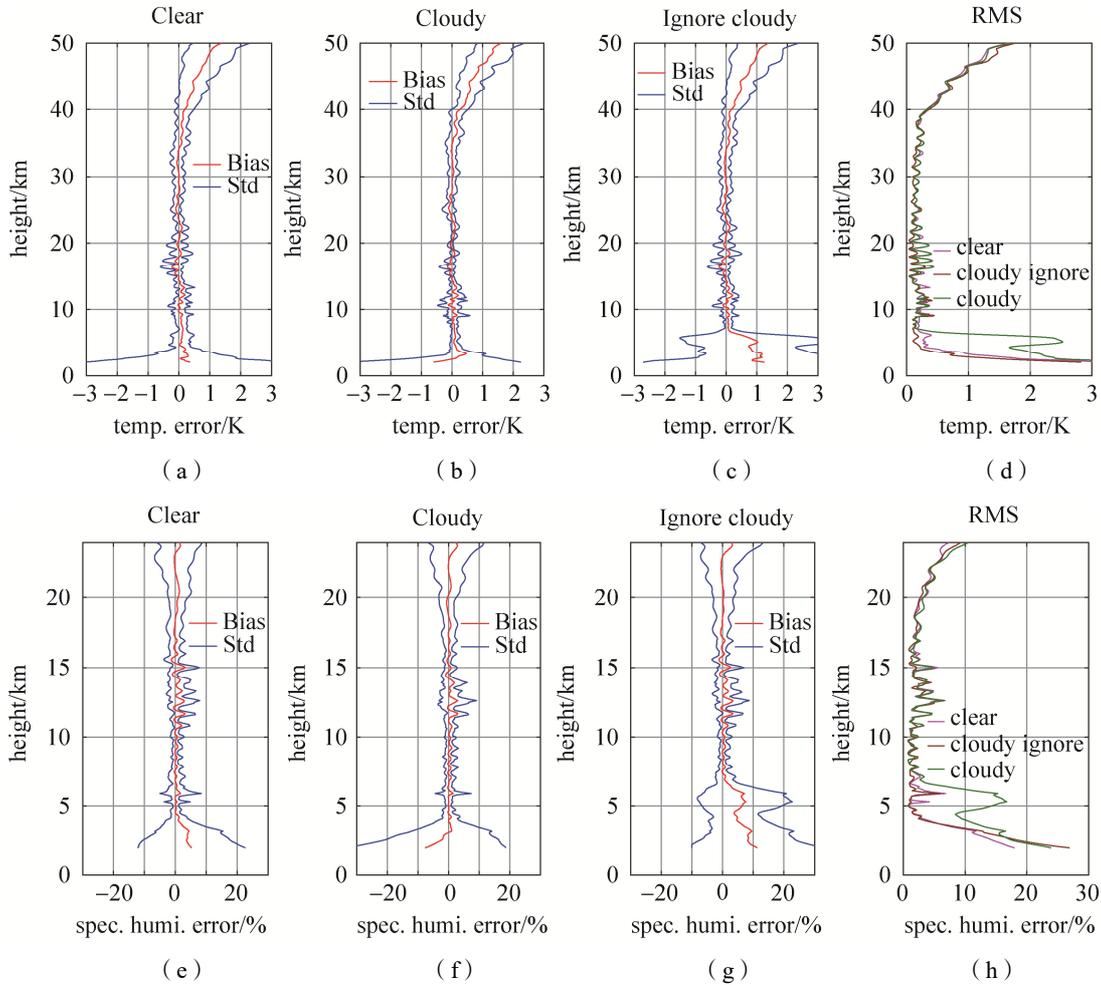


图 10 在晴空、有云及忽略云层情况下温度和水汽的反演误差

Fig. 10 The retrieval errors of temperature and water vapor profiles in clear, cloudy and ignore cloudy conditions

4 结束语

本文从 LEO-LEO 微波掩星信号在大气中传播的正向模拟出发，首先分析了微波信号的基本吸收特征，采用 22.23 GHz 和 183.3 GHz 附近的五个频率通道进行了信号仿真模拟，分析了一个中纬度上升和一个热带下降掩星事件的相位延迟和传播损耗特征。在此基础上进行了反演实验，对五个信号频率的实部折射率和虚部折射率廓线及其反演误差特性进行了分析，在不引入辅助大气背景情况下，同时反演得到了温度和水汽廓线，以及副产品云中液态水廓线。最后，统计分析了温度和水汽在低、中、高纬度带的反演性能，并研究了云中液态水对温度和水汽反演精度的影响，得到的主要结论如下：

LEO-LEO 微波掩星信号在通过不同高度大气时受到不同量的吸收，采用位于弱吸收线 22.23 GHz 附近的 3 个频点及强吸收线 183.31 GHz 附近的 2 个频点，能够测量从近地面到平流层下层的大气湿度信息。温度的平均绝对偏差在约 35 km 以上随高度升高均明显增大，高纬度的误差最大，中纬度的次之，低纬度的最小，并出现了明显的正偏差。在约 10 km~35 km 的高度，温度的反演精度在各纬度带均很高，RMS 误差均小于 0.4 K。在约 4 km 以下的高度，由于大气折射和吸收效应更强，温度反演误差随高度降低而明显增大。水汽的平均相对偏差在约 4 km 以下随高度降低也均明显增大，低纬度的误差最大，中纬度的次之，高纬度的最小。在约 18 km 以上的高度，各纬度带的反演误差均随高度升高而逐渐增大，但 RMS 误差基本在 10% 以内，满足探测精度需求。在反演温度和水汽廓线时，如果有云存在，需要将云的吸收从总吸收中去掉，否则温度和水汽的反演误差在约 8 km 以下会显著变大，出现明显的正偏差。

LEO-LEO 掩星探测技术是未来无线电掩星探测发展的重要方向, 为了进一步发展 LEO-LEO 微波掩星探测技术, 得到探测精度尽可能高的温度和水汽廓线, 仍需要提高 35 km 以上温度反演精度, 以及约 4 km 以下温度和水汽反演精度。未来可以从探测技术和反演技术两个角度开展研究, 一方面尽可能提高载荷的探测信噪比, 另一方面通过大量仿真反演实验, 评估影响温度和水汽反演性能的各种因素, 不断改进优化反演算法, 从而提高反演精度。

参考文献

- [1] YUNCK T P, HAJJ G A, KURSINSKI E R, et al. AMORE: An autonomous constellation concept for atmospheric and ocean observation[J]. *Acta Astronautica*, 2000, 46: 355–364.
- [2] FENG D D, SYNDERGAARD S, HERMAN B M, et al. Deriving atmospheric water vapor and ozone profiles from active microwave occultation measurements[J]. *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4169: 299–308.
- [3] KURSINSKI E R, SYNDERGAARD S, FLITTNER D, et al. A microwave occultation observing system optimized to characterize atmospheric water, temperature, and geopotential via absorption[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2002, 19(12): 1897–1914.
- [4] KURSINSKI E R, HAJJ G A, SCHOFIELD J T, et al. Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102: 23429–23465.
- [5] HAJJ G A, KURSINSKI E R, ROMANS L J, et al. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, 64(4): 451–469.
- [6] 王鑫, 吕达仁, 薛震刚. GNSS 掩星中大气水汽的非线性反演[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 32–38.
WANG Xin, LYU Daren, XUE Zhengang. A non-linear inversion method for retrieval of water vapour from radio occultation measurements[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 32–38.
- [7] POLI P, JOINER J, KURSINSKI E R. 1DVAR analysis of temperature and humidity using GPS radio occultation refractivity data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D20): 4448.
- [8] HERMAN B M, KURSINSKI E R, FENG D, et al. Active tropospheric ozone and moisture sounder (ATOMS)[R]. Tucson: Institute of Atmospheric Physics, University of Arizona, 2003.
- [9] LIU C L, KIRCHENGAST G, SYNDERGAARD S, et al. A review of LEO-LEO occultation techniques using microwave and infrared-laser signals[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 60: 2776–2811.
- [10] ERIKSSON P, JIMENEZ C, MURTAGH D, et al. Measurement of tropospheric/stratospheric transmission at 10-35 GHz for H₂O retrieval in low Earth orbiting satellite links[J]. *Radio Science*, 2003, 38: 8069.
- [11] WONG S, FETZER E J, SCHREIER M, et al. Cloud induced uncertainties in AIRS and ECMWF temperature and specific humidity[J]. *Journal of Geophysical Research-Atmosphere*, 2015, 120: 1880–1901.
- [12] SCHWEITZER S. Atmosphere and climate explorer mission ACE+: Humidity and temperature retrieval performance analysis[D]. Austria: Institute for Geophysics, Astrophysics, Meteorology, University of Graz, 2004.
- [13] KIRCHENGAST G, BERNATH P, BUEHLER S, et al. ACCURATE-climate benchmark profiling of greenhouse gases and thermodynamic variables and wind from space[R]. Austria: Wegener Center, University of Graz, 2010.
- [14] KURSINSKI E R, WARD D, OTAROLA A, et al. The active temperature, ozone and moisture microwave spectrometer (ATOMMS)[M]// Steiner A K, et al. *New Horizons in Occultation Research*. Berlin: Springer, 2009: 295–313.
- [15] KURSINSKI E R, WARD D, STOVERN M, et al. Development and testing of the active temperature, ozone and moisture microwave spectrometer (ATOMMS) cm and mm wavelength occultation instrument[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, 5(2): 439–456.
- [16] PROSCHEK V, KIRCHENGAST G, SCHWEITZER S, et al. Retrieval and validation of carbon dioxide, methane and water vapor for the Canary Islands IR-laser occultation experiment[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, 8: 3315–3336.
- [17] 杜晓勇, 符养, 薛震刚, 等. 卫星轨道参数对 LEO-LEO 掩星事件数量及分布影响的模拟研究[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(5): 1289–1297.
DU Xiaoyong, FU Yang, XUE Zhengang, et al. Simulation of the impacts of satellite orbit parameters on the number and distribution of LEO-LEO occultation events[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2007, 50(5): 1289–1297.

- [18] 吕华平, 严卫, 柳聪亮, 等. LEO-LEO 掩星探测频点选择分析与仿真研究[J]. 气象科学, 2016, (36): 212–217.
LYU Huaping, YAN Wei, LIU Congliang, et al. Analysis and simulation of frequency selection of LEO-LEO occultation atmosphere detection[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2016, 36(2): 212–217.
- [19] KURSINSKI E R, FENG D, FLITTNER D, et al. An active microwave limb sounder for profiling water vapor, ozone, temperature, geopotential, clouds, isotopes and stratospheric winds[M]// KIRCHENGAST G, FOELSCHE U, STEINER A K. Occultations for Probing Atmosphere and Climate. Berlin: Springer, 2004: 173–187.
- [20] KIRCHENGAST G, SCHWEITZER S, SCHWAERZ M, et al. Advanced retrieval processing chain for derivation of atmospheric profiles from LEO-LEO radio occultation data[R]. Austria: Wegener Center, University of Graz, 2006.
- [21] GORBUNOV M E, KIRCHENGAST G. Fluctuations of radio occultation signals in X/K band in the presence of anisotropic turbulence and differential transmission retrieval performance[J]. Radio Science, 2007, 42: RS4025.
- [22] SCHWEITZER S, KIRCHENGAST G, SCHWAERZ M, et al. Thermodynamic state retrieval from microwave occultation data and performance analysis based on end-to-end simulations[J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116: D10301.
- [23] 张志华, 王鑫, 吕达仁. LEO-LEO 微波掩星探测温度和水汽廓线研究进展[J]. 遥测遥控, 2022, 43(1): 1–12.
ZHANG Zhihua, WANG Xin, LYU Daren. Progress of temperature and water vapor profiles detected by LEO-LEO microwave occultation[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2022, 43(1): 1–12.
- [24] FJELDBO G, ESHLEMAN V R. The bistatic radar-occultation method for the study of planetary atmospheres[J]. Journal of Geophysical Research, 1965, 70: 3217–3225.
- [25] FJELDBO G, KLIORÉ A J, ESHLEMAN V R. The neutral atmosphere of Venus as studied with the Mariner V radio occultation experiments[J]. The Astronomical Journal, 1971, 76: 123.
- [26] LI Y, YUAN Y, WANG X. Assessments of the retrieval of atmospheric profiles from GNSS radio occultation data in moist tropospheric conditions using radiosonde data[J]. Remote Sensing, 2020, 12: 2717.
- [27] KURSINSKI E R, YOUNG A, OTAROLA A, et al. Laboratory and ground testing results from ATOMMS: The active temperature, ozone and moisture microwave spectrometer[C]// In 21st International Symposium on Space Terahertz Technology (ISSTT 2010), Oxford, UK, 2010: 155–163.
- [28] WARD D M, KURSINSKI E R, OTAROLA A C, et al. Retrieval of water vapor using ground-based observations from a prototype ATOMMS active centimeter- and millimeter-wavelength occultation instrument[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2019, 12: 1955–1977.
- [29] KOLBE W F, BUSCHER H, LESKOVAR B. Microwave absorption coefficients of atmospheric pollutants and constituents[J]. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 1977, 18: 47–64.
- [30] LIEBE H J. MPM-An atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. International Journal of Infrared and Millimeter Waves, 1989, 10: 631–650.
- [31] LIEBE H J, HUFFORD G A, COTTON M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1 000 GHz[C]//In AGARD, Atmospheric Propagation Effects Through Natural and Man-Made Obscurants for Visible to MM-Wave Radiation 11 p (SEE N94-30495 08-32), 1993, 1.

[作者简介]

张志华 1990年生, 博士研究生, 主要研究方向为 LEO-LEO 微波掩星探测技术。

王鑫 1977年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为大气物理、大气与海洋遥感。

吕达仁 1940年生, 院士, 研究员, 大气物理学家。

(本文编辑: 傅 杰)