

基于艇载太赫兹辐射计的大气温度廓线反演*

朱家玮 周 晨 赵正予 刘 伟

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘 要 基于武汉大学研制的艇载式太赫兹探测仪 ATMI (Airborne THz Measure Instrument), 分析 ATMI 在地基与空基探测模式下对大气温度廓线的反演能力. 针对 ATMI 样机的硬件参数, 在空基和地基测量模式下, 建立不同纬度下大气辐射传输模型, 讨论在不同纬度下 ATMI 使用 BP 神经网络算法对于大气温度廓线的反演能力. 样机出厂后在中纬度地区进行了一个月的地基实测, 通过实测数据验证 ATMI 样机对于大气温度廓线反演的能力. 实测结果表明, 所研发的 ATMI 样机在地基反演中在 0~36 km 高度范围内精度优于 1 K, 在一定高度范围内最高精度可优于 0.3 K, 证明了所研制的艇载式太赫兹探测仪对大气温度廓线反演的有效性与准确性, 稳定度与精度达到设计指标, 显示其在太赫兹科学和临近空间环境监测中的广泛应用潜力.

关键词 大气温度廓线反演, 艇载式太赫兹探测仪, BP 神经网络, 大气辐射传输

中图分类号 P414

Inversion of Atmospheric Temperature Based on THz Radiometer

ZHU Jiawei ZHOU Chen ZHAO Zhengyu LIU Yi

(School of Electronic Information, WuHan University, WuHan 430072)

Abstract Based on the airborne terahertz detector ATMI (Airborne THz Measure Instrument) developed by Wuhan University, this paper analyzes the inversion ability of ATMI for atmospheric temperature profiles in ground-based and air-based detection modes. In view of the hardware parameters of the ATMI prototype, under air-based and ground-based measurement modes, atmospheric radiation transfer models at different latitudes are established. The inversion ability of ATMI using the BP neural network algorithm for atmospheric temperature profiles at different latitudes is discussed. After the prototype leaves the factory, one-month ground-based field measurements are carried out in mid-latitude regions. The field measurement data are used to verify the inversion ability of the ATMI prototype for atmospheric temperature profiles. The field measurement results show that for the developed ATMI prototype, in the ground-based inversion, the accuracy is better than 1 K in the altitude range of 0~36 km, and within a certain altitude range, the highest accuracy can be better than 0.3 K. This proves the effectiveness and accuracy of the developed airborne terahertz detector for the inversion of atmo-

* 国家自然科学基金青年项目资助 (42204161)

2024-05-17 收到原稿, 2024-07-15 收到修定稿

spheric temperature profiles. Its stability and accuracy have reached the design specifications, indicating its wide application potential in terahertz science and near-space environment monitoring.

Key words Atmospheric temperature profile inversion, ATMI, BPNN, Atmospheric radiative transfer

0 引言

大气温度廓线是描述大气温度随高度变化规律的指标. 太赫兹波具有不依赖太阳作为辐射源、全天时全天候以及高灵敏度的特点, 并具备一定的穿透能力, 在临近空间的大气要素成分探测方面具有独特优势^[1].

根据太赫兹遥感探测时辐射计的布置位置可以将此技术分为天基、地基和空基.

在天基观测中, 天底观测的垂直分辨率差, 信噪比低, 掩星观测的方式有很多, 如 GPS 掩星观测和 GNSS 掩星观测等, 掩星观测可以提供极高的垂直分辨率, 通常在几米到几十米的范围内, 但其空间分辨率通常受到被遮挡天体大小以及观测设备的性能^[2]的限制.

空基、地基和临边观测各有优劣. 地基观测虽然在获取高时间分辨率数据和覆盖广泛区域方面有优势, 但受限于地表背景噪声和局部天气条件. 相比地基观测, 空基平台上的太赫兹辐射计接收辐射信号受地表背景噪声影响较小, 因此可以达到较高的信噪比. 这在某些情况下赋予了空基观测更高的垂直分辨率. 临边观测是获取中高层大气温度垂直分布最有效的方式之一, 其通过扫描大气的临边切点, 可以提供高垂直分辨率、大垂直范围的大气成分、温度、压强等廓线^[3]. 相比临边观测, 基于空基平台的毫米波辐射计探测具有更短的积分路径. 这意味着空基观测能够提供更高的观测精度, 因为其探测的信号在大气中传播的距离较短, 受大气散射和吸收的影响较小, 从而能够更准确地测量大气参数.

关于大气温度廓线反演的技术方法有很多, 总体上反演方法主要包括了神经网络法、统计回归法、迭代法和物理反演法. 这些方法各有其特点^[4]. 物理反演算法从物理规律着手, 依赖大气传输方程, 但由于计算周期长, 实时性较差^[5]. 目前反演技术中使用较广泛的是神经网络法和回归算法.

第一台星载微波临边探测仪是 1991 年美国发射

的对地观测系统 UARS(上层大气研究卫星) 上的微波临边探测仪 MLS^[6]. UARS 专门用于研究地球上层大气的化学成分、动态和能量输入. 其携带的十种不同科学仪器提供了大气成分、温度和动态变化的重要数据, 有助于理解气候变化以及大气物理过程等. Odin/SMR 是全球首个太赫兹波段的星载临边探测器^[7]. Odin 卫星是由瑞典主导, 瑞典、加拿大、法国和芬兰共同出资研究的极轨卫星, Odin 卫星轨道高度位于距地表约 600 km 处^[8]. 2020 年日本利用超导亚毫米波临边发射器 2 测量了中间层和低热层温度^[9].

相对于星载微波辐射计, 地基辐射计基于其优势得到了更广泛的应用. 1976 年 Smith 和 Woolf 提出特征向量法, 并使用此方法对 Nimbus-6/SCAMS 的观测辐射进行了大气温度廓线的反演. Liebe^[10] 通过大量的实验总结发展了大气微波传输模型. 1978 年 Decker 等^[11] 利用地基微波辐射计反演了大气温度廓线. 2012 年 Löhnert 等^[12] 的研究验证了地面微波辐射计技术的理论预期, 并确认了其支持国家气象服务的各项指标.

中国的大气温度反演技术研究发展于 21 世纪初. 虽然相对于国外起步时间较晚, 但是起点高, 发展快, 充分体现了后发优势. Wang 等^[13] 对微波辐射计遥感温度廓线的一维变分算法进行了试验研究, 得到的温度的均方根误差在 2.9 K 以下. 2003 年 Chen 等^[14] 对 118.75 GHz 附近的 5 个通道和 90 GHz 的 1 个通道进行了亮温仿真和温度反演. 2013 年 9 月发射升空的风云三号 C 星装载了 MWHTS, MWRI 和 MWTS-II. 其中 MWHTS 作为跨轨扫描式微波辐射计, 首次采用 50~60 GHz 和 118 GHz 附近大气探测通道从卫星获得大气温度廓线. 2015 年 Tan 等^[15] 依据已有的大气参数数据库和 RTTOV 得到了模拟亮温, 然后运用神经网络法进行反演, 得到了大气温度湿度廓线.

中国在大气温度廓线研究方面进行了多种探测技术的尝试并进行了多次实验, 取得了一定的成

果^[16,17]. 目前对基于毫米波艇载探测的相关研究较少, 还处于起步阶段. 同时由于飞艇平台的技术也处于起步阶段, 对于艇载设备而言存在稳定运行和数据收集等工作的困难. 加快对艇载探测技术, 特别是太赫兹手段的研究, 提高数据收集水平和载荷稳定运行的能力, 才能更好地支撑气象预报、环境管理和气候变化研究等更多方面的需求.

ATMI (Airborne THz Measure Instrument) 是中国第一台正在预研的艇载式太赫兹大气探测仪, 其主要科学目标在于对大气风场和温度的探测. 本文主要根据艇载太赫兹辐射计 ATMI 的样机参数, 利用 ATMI 的 0.118 THz 频段对大气温度廓线进行了系统反演研究, 分析了其在空基以及地基探测大气温度廓线的能力.

1 太赫兹辐射计探测原理

1.1 大气辐射传输模型

在开展相对应的反演前, 需对艇载太赫兹大气辐射传输模型进行精确的建模, 以把握传输原理与过程. 在基于太赫兹辐射计的大气温度廓线反演过程中, 采用大气辐射传输方程定量描述这种电磁波辐射能量在介质中传播的过程. 电磁波辐射在传输过程中, 沿某一 s 方向上的亮度衰减如下:

$$dI_f(s) = -I_f(s) k_l(s) ds. \quad (1)$$

其中, $I_f(s)$ 为入射辐射亮度, $k_l(s)$ 为介质消光系数. 由于亮度衰减包含吸收和散射两方面的共同作用, 且两者都是线性过程, 因此介质消光系数 $k_l(s)$ 可以记为吸收系数 $k_a(s)$ 和散射系数 $k_b(s)$ 之和, 即

$$k_l(s) = k_a(s) + k_b(s). \quad (2)$$

在地球大气中, 完整的辐射传输过程包括传播路径上介质的吸收、发射和散射作用. 因此有完整表达式

$$\frac{dI_f(s)}{ds} = -I_f(s) k_l(s) + J_f(s). \quad (3)$$

定义 $J_f(s)$ 为吸收源函数, 表示某一方向上能量的获得, 即

$$J_f(s) = (1 - \omega_f) k_l(s) B_f(T) + \frac{k_l(s)}{4\pi} \int_{4\pi} p(\theta, \phi, \theta', \phi') I_f(s, \theta', \phi') d\Omega'. \quad (4)$$

$J_f(s)$ 表达式中第一项为热辐射与介质的相互作用, 第二项表示散射带来的影响. 第一项中, $B_f(s)$ 为

Planck 黑体辐射定律计算的大气辐射, ω_f 为单次散射反照率, 在同时存在吸收和散射介质的情况下, 记为

$$\omega_f = \frac{k_b(s)}{k_l(s)} = \frac{k_b(s)}{k_a(s) + k_b(s)}. \quad (5)$$

亮度温度定义为在某频率上, 与对应物体的辐射能量相等的黑体的绝对温度. 亮温是由于研究需要, 与辐射能量通过定律合理等效得到的物理量, 通过表达式可得到其具有热力学温度的单位, 但实际上此物理量并不具有温度的物理意义. 由 Planck 黑体辐射定律的 Rayleigh-Reans 近似, 在低频状态下等效亮温表达式为

$$T_b(s) = \frac{\lambda^2}{2k} I_f(s). \quad (6)$$

其中, $\lambda = c/f$ 为频率 f 对应的波长, 上述过程得到的方程解可以改写为如下亮温表达式:

$$T_b(S_2) = T_b(S_1) e^{-\tau_v(S_1, S_2)} + \int_{S_1}^{S_2} k_a(s) T(s) e^{-\tau_v(s, S_2)} ds. \quad (7)$$

式 (7) 右边第一项表示宇宙背景辐射, 背景温度 $T_b(S_1)$ 来源于边界条件

$$T_b(S_1) = \frac{\lambda^2}{2k} I_f(S_1). \quad (8)$$

取与温度有关的量 θ 定义如下:

$$\theta = \frac{300}{273.15 + T}. \quad (9)$$

亮温表达式重新写为

$$T_b(0) = T_b(0) e^{-\tau_f(0, s) \sec\theta} + \sec\theta \left(\int_0^\infty k_a(s) T(s) e^{-\tau_f(0, s) \sec\theta} ds \right). \quad (10)$$

1.2 BP 神经网络反演法

使用目前在人工神经网络算法中广泛应用的 BP 神经网络模型. 神经网络是基于生物神经系统理论而设计得到的. BP 神经网络是前馈神经网络的一种, 属于有监督的神经网络. 采用三层结构, 包括输入层、隐藏层和输出层. 将输入与输出层固定, 输入层为 ATMI 所获取的不同角度下的通道亮温, 输出层为大气温度廓线, 故隐藏层的层数会在一定程度上决定神经网络的复杂程度, 反演性能的好坏也受隐藏层的节点数影响. 如果隐藏层的节点数量过多可能会导致训练花费更多时间, 而过少的节点数可能会影响反演效果. 目前主流隐藏层选择方式主要有以下 3 种:

$$\begin{aligned}
h &= \text{lb}T, \\
h &= \sqrt{mn}, \\
h &= \sqrt{(0.43mn + 0.12m^2 + 2.54n + 0.77m + 0.35) + 0.51}.
\end{aligned}
\quad (11)$$

其中, T 为训练样本的个数, h 为隐含层的节点数, m 为输出层的节点数, n 为输入层的节点数. 本文选择第三种方式, 通过计算可以得到隐藏层的节点数量为 71 个, 其他关于 BP 神经网络的详细训练参数列于表 1.

在艇载 ATMI 探测亮温仿真部分, 使用大气辐射传输模型 ARTSv2.4.0 对中国不同纬度地区不同大气背景环境下进行 118.75 GHz 频点的辐射亮温变化仿真, 建立 BP 神经网络的训练数据集. ARTS 是一个基于矩阵算法的大气辐射传输模拟软件包, 主要应用于大气遥感、气象、气候和天体物理等领域, 在深入理解大气和地球物理现象、提高气象预测和遥感数据分析等方面具有极大的价值和意义. ARTS 由瑞典国立大气研究院开发, 其基于广泛的物理模型和相关算法, 提供了全球范围内的精细模拟^[18]. ARTS 辐射传输模式覆盖了由微波至热红外广泛的波段范围, 主要功能包括大气辐射传输模拟、大气微波辐射反演、卫星遥感应用等, 可以应用于模拟计算临边探测、垂直探测、地基探测以及掩星探测等观测方式的辐射传输过程^[19].

2 艇载式太赫兹探测仪 ATMI

艇载式太赫兹探测仪 ATMI 是中国武汉大学正在研制的首款基于空基平台的太赫兹辐射计, 具有低功耗、高精度、全天候全天时的优点, 能对临近空间的大气温度和风场进行探测. ATMI 由天馈线分系

统、太赫兹接收机分系统、非相干辐射测量分系统、宽带高分辨频谱处理分系统、信息综合处理分系统、标定和温控分系统和伺服转台分系统组成. 大气辐射信号被天馈线分系统天线接收并极化分离出 118 GHz 和 183 GHz 辐射信息, 太赫兹接收机分系统将辐射信息进行放大、混频、滤波处理后, 输出两路中频信号, 两路中频信号中的辐射信息经过非相干辐射测量分系统的检波和放大处理, 转换为模拟电压信号. 其中, 183 GHz 辐射信息经过高分辨频谱处理分系统的采样和 FFT 处理, 输出功率谱密度信号以便进行风场反演, 两路信号统一传输至信息综合处理分系统完成试验数据处理、保存及结果显示输出等. 图 1 所示为 ATMI 样机.

ATMI 有两个频段的观测数据, 其中 183.31 GHz 结合频谱分析模块可以在空基平台上用于测风和湿度反演, 而对于温度反演主要依靠中心频点 118.75 GHz 的四通道亮温信息. 本文主要对 118 GHz 的频段展开研究, 其中心频点和带宽如表 2 所示. AWTI 的 118 GHz 单元采用多通道并行探测, 混频双边带方式, 校准后的亮温测量误差 < 0.2 K, ATMI 整机在二级保温措施运行时, 整机功耗不会超过 70 W, 同时能在低温低压环境下进行高精度的太赫兹辐射测量.

3 太赫兹大气温度反演

3.1 试验步骤

ATMI 作为艇载辐射计在飞艇上装载并进行实际测量前, 需对其进行相关仿真试验与地面实测来评

表 1 BP 神经网络训练参数
Table 1 Training parameters of BP neural network

Parameter	Set value
Net.trainparam.epochs	10000
Net.trainparam.goal	0.01
Net.trainparam.show	1
Net.trainparam.min_grad	1×10^{-6}
Net.trainparam.Network_type	Elman Network
Net.trainparam.Training_function	traingdx



图 1 ATMI 样机

Fig. 1 ATMI whole machine prototype

估其效能. 仿真中大气要素信息来自 FASCOD 模型, 光谱数据来自 HITRAN 数据库, 基于表 2 提供的频点数据信息以及 ATMI 设备的硬件配置, 针对高中低纬不同大气背景环境进行尽可能真实情况下的测量仿真. 在仿真测量中的整体高斯白噪声设为 0.2 K, 这也和 ATMI 设备的所获取的亮温数据的噪声大小一致, 而温度数据主要来源于 MSISE-00 模型, 该模型是由 NRL 利用卫星加速计等数据反演得到的非相干散射雷达的温度数据.

ATMI 采用 BP 神经网络对观测数据进行大气温度廓线反演, 其反演过程如图 2 所示, 本文实验步骤如下.

步骤 1 构建艇载大气辐射传输模型. 选取中国低纬、中纬、高纬三处不同地方近 5 年内, 每 1 h 间隔的大气背景环境数据, 结合 ATMI 仪器相关参数和一些计算所必须的参数作为 ARTS 的输入, 模拟飞艇飞行过程中可能遇到的不同大气背景环境参数.

步骤 2 构建 BP 神经网络. 通过计算出合适的

表 2 ATMI 118 GHz 通道中心频点及带宽
Table 2 ATMI 118 GHz channel center frequency and bandwidth

Channel	Frequency range
1	118.75±0.08 GHz/60 MHz
2	118.75±0.2 GHz/100 MHz
3	118.75±0.4 GHz/200 MHz
4	118.75±0.8 GHz/200 MHz

隐藏层层数, 设置好相关参数, 方便后续进行 BP 神经网络的反演.

步骤 3 探究最优天顶角, 并生成不同观测几何下的亮温. 先通过 ATMI 采用不同天顶角对飞艇平台上方大气进行观测, 测试出最优的天顶探测角度, 对于飞艇下方大气采用类临边观测模式进行固定角观测, 利用 ARTS 生成不同观测几何条件下的亮温, 并进行相关的数据处理.

步骤 4 使用 BP 神经网络进行反演. 利用设置好的 BP 神经网络进行大气温度廓线反演, 进而对仿真结果进行初步的误差分析, 研究其对大气温度廓线的反演能力.

步骤 5 采用地基实测数据验证 ATMI. 利用样机的实测温度数据与对应位置的 MSISE-00 温度数据进行比较验证, 研究 ATMI 进行温度探测的可行性.

3.2 最优天顶角度的确定

由于艇载式太赫兹辐射计 ATMI 需对不同角度进行扫描, 以获取不同角度下的大气辐射亮温信息, 在其他条件不变的情况下, ATMI 所获取的 118 GHz 四通道亮温值会因角度的不同而有变化, 相应地 183 GHz 的亮温谱线形状也会发生变化. 故需先通过仿真确认最合适的观测角度, 每一个天顶角都会结合一个向下探测的固定角度, 该固定角度对于 ATMI 而言是刚好能探测到 20 km 向下的大气辐射信息同时不会被地表辐射信息过分干扰的角度. 通过这样的方式, 来探究精度最高的天顶角, 再使用前文中的

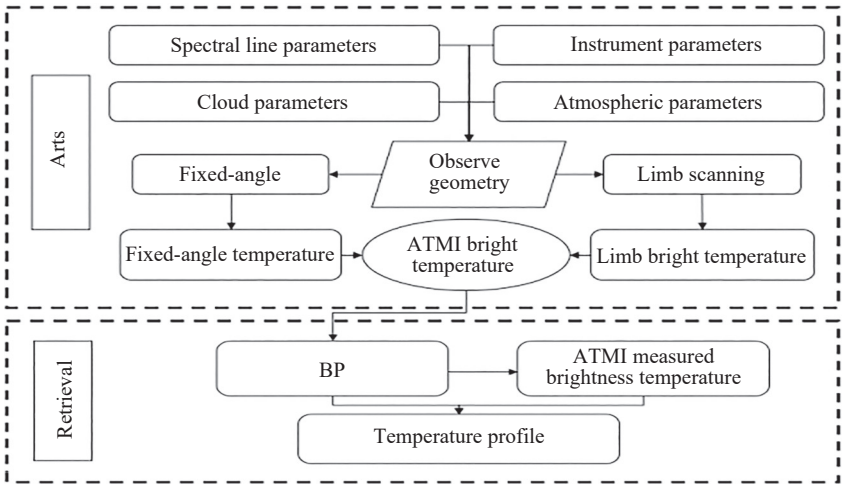


图 2 ATMI 反演流程

Fig. 2 Flow chart of the ATMI retrieval

BP 神经网络配置. 为了方便计算不同天顶角的性能, 以每个天顶角仅使用 2022 年一年、每 1 h 间隔的数据来进行分析.

过少的样本集并不能反映真实情况下 ATMI 的不同天顶角的大气温度廓线反演能力, 但是对于寻找角度与反演能力之间的关系效率将得到很大提升. 为了进一步探究 ATMI 在不同高度下的反演能力, 可以通过不同高度层下的均方根误差 E_{rms} 来衡量, E_{rms} 的定义为

$$E_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} (x_i - y_i)^2}. \quad (12)$$

从图 3 可以看出在 0~25 km 的高度层, ATMI 具有较好的大气温度反演能力且 ATMI 的不同天顶角对于大气温度廓线的反演并无太大影响, 故选取最低 RMSE 的角度 0° (即垂直向上) 和固定角度向下观测 (固定角度 92.9°) 进行后续的反演探测.

3.3 不同纬度下的反演分析

对于大气温度廓线反演, 需对模型进行不同纬度的考察, 以评估不同纬度地形是否对其有影响. 主要建立三种网络模型, 将样本分为高、中、低纬地区, 分

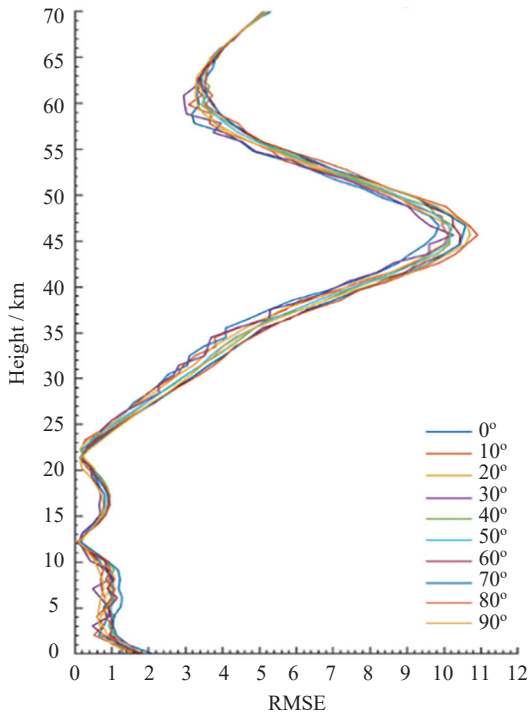


图 3 不同天顶角下不同高度层的 RMSE

Fig. 3 RMSE at different altitude layers for various zenith angles

别进行建模和反演误差分析. 其中高纬地区选取北京, 具体经纬度为东经 $116^\circ 25'$, 北纬 $39^\circ 54'$; 中纬地区选取武汉, 具体经纬度为东经 $114^\circ 13'$, 北纬 $30^\circ 61'$; 低纬地区选取三亚, 具体经纬度为东经 $109^\circ 30'$, 北纬 $18^\circ 15'$. 每个地区相比天顶角的训练样本将扩大, 每个地区都选取 5 年的数据、每 1 h 的间隔作为训练集, 合理的样本数量可以探求在真实应用中 ATMI 的空基大气温度廓线反演能力.

反演误差均基于不同纬度地区 2023 年一整年的数据, 通过分析在这一年中不同高度下的误差、一年中每天某时刻的误差和总体的误差数据来分析评估基于艇载太赫兹的大气温度廓线反演能力.

结合表 3 和图 4 的反演误差来看, 不同纬度地区

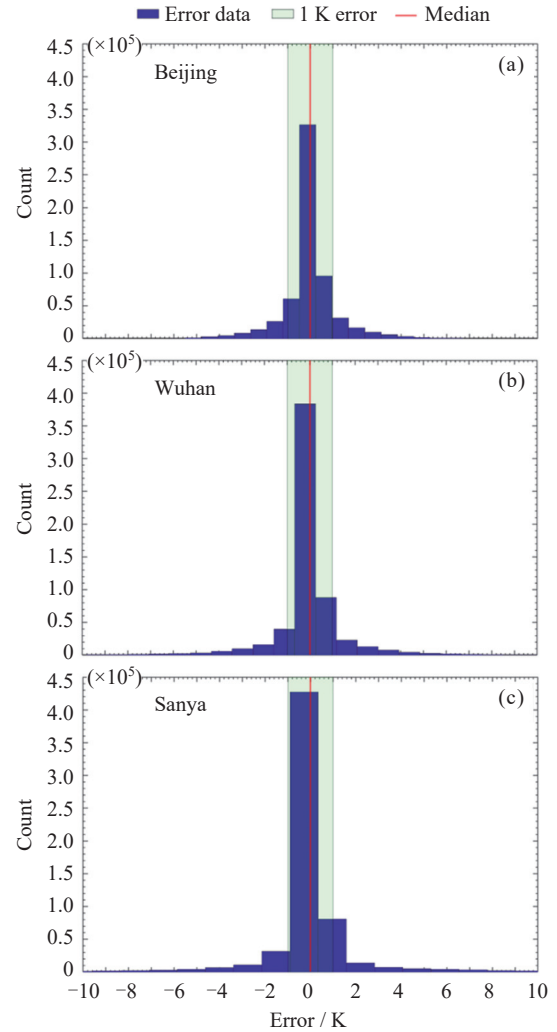


图 4 高中低纬地区的反演误差分布

Fig. 4 Distribution of inversion errors in high, medium, and low latitude regions

的反演效果较好, 北京、武汉和三亚地区中 1 K 误差以内占比分别为 87.32%, 86.49% 与 85.76%, 呈现出纬度减小误差增大的趋势. 从误差的极大值与极小值、均值、标准差等也可以看出, 误差呈现出随纬度减小而逐渐增大的趋势, 这表明 ATMI 可能在高纬度地区执行探测任务中的温度反演能力强于其中低纬度地区的能力.

进一步结合图 5 从不同纬度地区的高度反演误差进行分析, 总体来说, ATMI 在北京、武汉与三亚三个不同纬度地区的总体反演能力较好, 达到甚至优于常规探测手段. 由于没有取绝对误差, 所以误差在不同高度下呈现中心对称, 由高到低呈现误差先减少后增多的趋势, 特别是在 55~70 km 之间的高度, 误差急剧增大; 在 20 km 上下, 也就是模拟飞艇所在的高度区间, 反演误差最小, ATMI 反演效果也最好. 在不同纬度上可以看出, 从高纬度到低纬度的过程中, 55~70 km 之间的高度误差呈现出由小到大的变化. 在 0~40 km 的高度, 不同纬度地区 (北京、武汉和三

亚) 的误差都在 1 K 以内, 特别是在 12~24 km 的高度区间, 三个地区的大气温度反演误差均在 0.2 K 以内. 最后在图 6 中可查看每天不同时刻的反演能力, 北京地区不同时刻的误差 <1 K, 但不同地区不同时刻的整体误差随着纬度的增加而增大, 这是因为随着纬度的增加, 在 55~70 km 处的误差逐渐增大, 进而影响了每天不同时刻的总体误差大小.

3.4 实测数据验证

AWTI 研发样机于 2023 年 3 月开始在武汉大学珞珈山观测站 (114.36°E, 30.54°N) 进行了为期一个月的地面实测, 为后续正式开展艇载探测测试其稳定性与大气温度反演能力. ATMI 在地面站进行观测时, 采取类似地面辐射计的观测模式, 垂直观测大气. 在实测数据中, ATMI 在 118 GHz 频段数据的时间分辨率在分钟级, 而在先前的空基模拟探测中, 准备的数据都是 1 h 间隔. 为了方便比较, 对 ATMI 实测数据进行相关的数据处理, 同样按照每 1 h 间隔来取数据. 而在 BP 神经网络中, 通过与前文一样的设置

表 3 高中低纬度地区反演误差数据指标
Table 3 Inversion error data metrics for high, medium, and low latitude regions

Area	Mean	Median	Standard deviation	Min	Max
Beijing	-1.01×10^{-4}	-3.62×10^{-4}	1.22	-10.53	11.01
Wuhan	1.93×10^{-4}	7.39×10^{-4}	1.66	-14.42	13.09
Sanya	-3.18×10^{-4}	-2.10×10^{-3}	2.11	-19.50	17.69

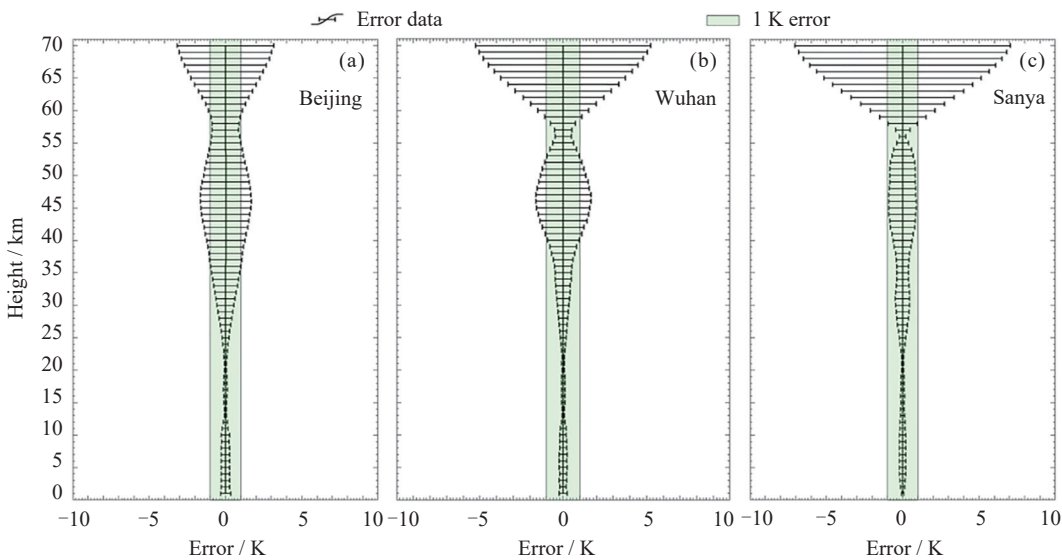


图 5 高中纬地区随高度的误差变化
Fig. 5 Error variation with altitude in high, medium, and low latitude regions

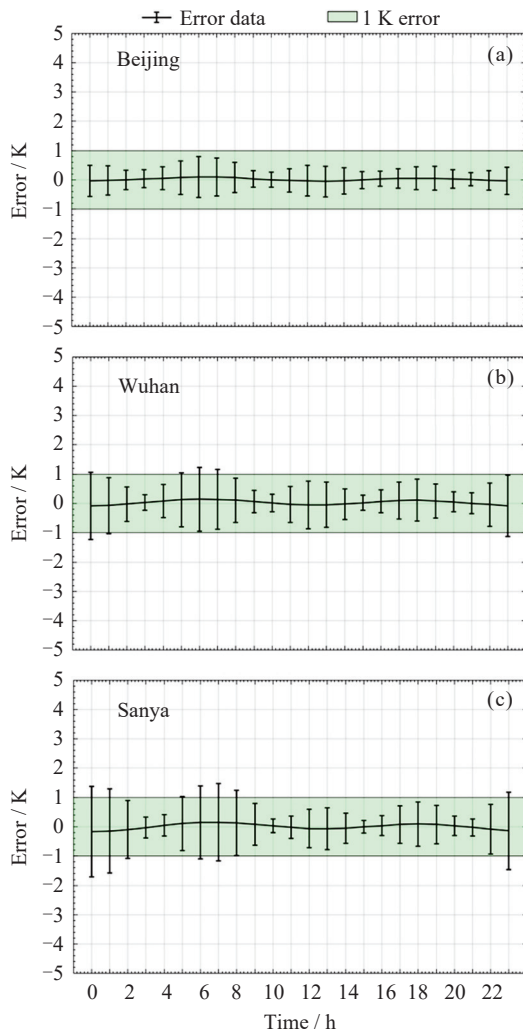


图6 高中低纬地区一年反演数据中一天误差变化

Fig. 6 Daily error variation in inversion data over one year in high, medium, and low latitude regions

进行训练,温度数据来源于 MSISE00,同样使用5年数据作为训练集,经纬度选取与地面观测站一致,在模型中将天顶角设置为与 ATMI 在地面测量的角度一致,其余配置与前文一致.最后将这一个月实测数据反演得到的大气温度廓线与模型结果进行比较,其不同高度下的误差分析如图7(a)所示,总体误差分布如图7(b)所示,一天中不同时刻的误差分析如图7(c)所示.

从图7(a)所示不同高度下的误差分析可以看到,在0~36 km的高度范围内,其大气温度廓线反演误差均在1 K以内,在部分高度范围可优于0.3 K.从图7(b)所示的总体误差分布可以看出,实测数据中1 K的误差占比67.59%,相比仿真中1 K误差占比

下降18.9%.虽然误差的极大值与极小值与仿真相比较小,但这也与实测数据量较少有关.在图7(c)所示的一天不同时刻的误差中,可以看到整体误差趋势与图7(a)(b)相同,但一天中不同时刻的误差更大,这主要是由于在36~70 km的误差较大,进而影响了一天中不同时刻的整体误差.

总体来说,ATMI在开展地基大气温度廓线探测时,对于0~36 km高度范围具有较好的反演能力,证明了所研制的ATMI样机反演大气温度廓线精度和稳定性达标,可以作为观测大气温度的可靠手段.

4 结语

根据艇载太赫兹辐射计 ATMI (Airborne THz Measure Instrument) 的样机参数,主要利用 ATMI 的0.118 THz频段对大气温度廓线进行了系统反演研究,分析了其在空基以及地基探测大气温度廓线的能力.

在基于空基的太赫兹大气温度廓线探测中,分析了 ATMI 对不同纬度地区的大气温度廓线反演能力,具体表现为在0~40 km的高度,不同纬度地区—北京、武汉和三亚的误差都在1 K以内,特别是在12~24 km的高度区间,三个地区的大气温度反演误差均在0.2 K以内.在 ATMI 样机出厂后,在武汉大学珞珈山观测中心开展了为期一个月的地基实测验证,实验结果表明,ATMI 表现出了很强的反演精度.在0~36 km的高度范围内,反演误差均低于1 K,在部分高度区域精度优于0.3 K.地基实测的良好反演精度为 ATMI 正式作为艇载太赫兹辐射计执行临近空间环境探测任务打下了坚实的基础.

除大气温度廓线反演外,未来也将通过测量0.183 THz的多普勒频移信息进行反演,对于辐射计来说需要高精度的频谱分析模块.未来将提高反演精度和稳定性,可以通过增加数据量、处理异常值等方式,优化数据预处理过程,提高反演的准确性,也可以通过选取不同的频点进行组合来实现更高精度的大气温度廓线和大气风场探测.

总体而言,通过揭示 ATMI 在太赫兹科学和临近空间环境监测中的广泛应用潜力,不仅给出了其在大气温度探测中的有效性与准确性,也为未来的临近空间环境探测和气象监测等提供了全新的技术手段.

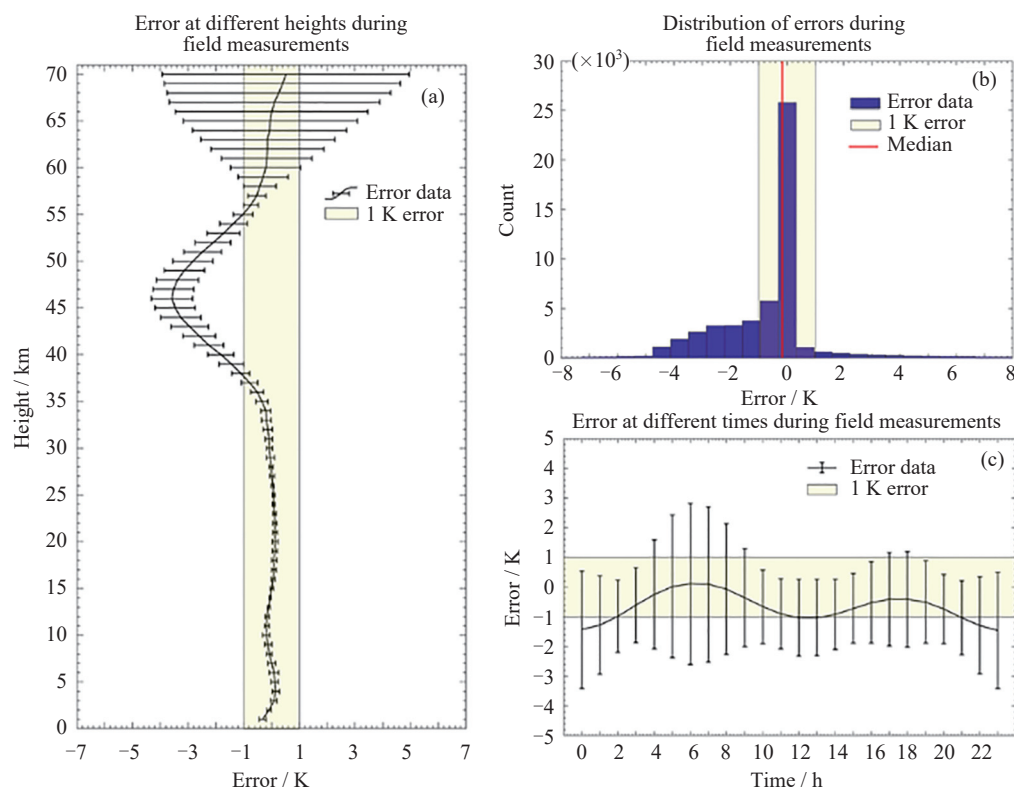


图7 ATMI地基外场试验反演数据误差分析

Fig. 7 Error analysis chart of ATMI ground-based field test inversion data

参考文献

- [1] SHI Ying. Research on Radiation Characteristics and Inversion Algorithms of Trace Gas Terahertz Limb Soundings[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.005000 (石颖. 痕量气体太赫兹临边探测辐射特性和反演算法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020. DOI: 10.27157/d.cnki.ghzku.2020.005000)
- [2] WANG W Y, WANG Z Z, DUAN Y Q. Preliminary evaluation of the error budgets in the TALIS measurements and their impact on the retrievals[J]. *Remote Sensing*, 2020, **12**(3): 468
- [3] WANG Wenyu. Simulation Study on Application for THz Atmospheric Limb Sounder[D]. Beijing: National Space Science Center Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2020. DOI: 10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000065 (王文煜. 太赫兹大气临边探测辐射计应用仿真研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020. DOI: 10.27562/d.cnki.gkyyz.2020.000065)
- [4] WU Peng, LI Honghui, YU Lei, *et al.* Hierarchical inversion of atmospheric temperature profile based on BP neural network[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2021(27): 58-59 (吴鹏, 李洪辉, 于雷, 等. 基于BP神经网络的大气温度廓线分层反演[J]. *科学技术创新*, 2021(27): 58-59)
- [5] YAO Zhigang, CHEN Hongbin. Retrieval of atmospheric temperature profiles with neural network inversion of microwave radiometer data in 6 channels near 118.75 GHz[J]. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2006, **26**(3): 252-259 (姚志刚, 陈洪滨. 利用神经网络从118.75GHz附近通道亮温反演大气温度[J]. *气象科学*, 2006, **26**(3): 252-259)
- [6] SCHOEBERL M R, DOUGLASS A R, JACKMAN C H. Overview and highlights of the Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission[C]//SPIE's 1994 International Symposium on Optics, Imaging, and Instrumentation. San Diego: SPIE, 1994
- [7] MERINO F, MURTAGH D P, RIDAL M, *et al.* Studies for the Odin sub-millimetre radiometer: III. Performance simulations[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2002, **80**(4): 357-373
- [8] RICAUD P, DE LA NOË J, ERIKSSON J E, *et al.* Studies for the Odin sub-millimetre radiometer. II. Retrieval methodology[J]. *Canadian Journal of Physics*, 2002, **80**(4): 341-356
- [9] BARON P, OCHIAI S, DUPUY E, *et al.* Potential for the measurement of mesosphere and lower thermosphere (MLT) wind, temperature, density and geomagnetic field with Superconducting Submillimeter-Wave Limb-Emission Sounder 2 (SMILES-2)[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2020, **13**(1): 219-237

- [10] LIEBE H J. MPM—an atmospheric millimeter-wave propagation model[J]. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 1989, **10**(6): 631-650
- [11] DECKER M T, WESTWATER E R, GUIRAUD F O. Experimental evaluation of ground-based microwave radiometric sensing of atmospheric temperature and water vapor profiles[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1978, **17**(12): 1788-1795
- [12] LÖHNERT U, MAIER O. Operational profiling of temperature using ground-based microwave radiometry at Payenne: prospects and challenges[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2012, **5**(5): 1121-1134
- [13] WANG Yun, WANG Zhenhui, LI Qing, *et al.* Research of the one-dimensional variational algorithm for retrieving temperature and humidity profiles from the ground-based microwave radiometer[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, **72**(3): 570-582 (王云, 王振会, 李青, 等. 基于一维变分算法的地基微波辐射计遥感大气温度湿度廓线研究 [J]. *气象学报*, 2014, **72**(3): 570-582)
- [14] CHEN Hongbin, LIN Longfu. Numerical simulation of temperature profile retrievals from the brightness temperatures in 6 Channels near 118.75 GHz[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, **27**(5): 894-900 (陈洪滨, 林龙福. 从 118.75 GHz 附近六通道亮温反演大气温度廓线的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 2003, **27**(5): 894-900)
- [15] TAN Quan, YAO Zhigang, ZHAO Zengliang, *et al.* Analysis of atmospheric parameter retrievals from airborne microwave sounding instruments[J]. *Meteorological, Hydrological and Marine Instruments*, 2014, **31**(3): 5-11 (谭泉, 姚志刚, 赵增亮, 等. 机载微波辐射计大气温度湿度廓线反演性能分析 [J]. *气象水文海洋仪器*, 2014, **31**(3): 5-11)
- [16] ZHANG Rongrong. Retrieval Method of Multichannel Ground-Based Microwave Radiometer for Atmospheric Parameters Based on BP Neural Network[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2017 (张容容. 基于 BP 神经网络的多通道微波辐射计大气参数反演算法 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017)
- [17] GUAN Xin. Research on Hyperspectral Microwave Detection Technology of Atmospheric Temperature Profile[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2021.002507 (关鑫. 大气温度廓线高光谱微波探测技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2021. DOI: 10.27005/d.cnki.gdzku.2021.002507)
- [18] LI Shulei, LIU Lei, GAO Taichang. Introduction of atmospheric radiative transfer simulator software[J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, **11**(4): 241-248 (李书磊, 刘磊, 高太长. 大气辐射传输模拟器 (ARTS) 软件的介绍 [J]. *大气与环境光学学报*, 2016, **11**(4): 241-248)
- [19] ZOU Rongshi, HE Wenying, WANG Pucui, *et al.* Assessment of radiative transfer models based on observed brightness temperature from ground-based microwave radiometer[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, **45**(3): 605-616 (邹荣士, 何文英, 王普才, 等. 辐射传输模式对地基微波辐射计观测亮温的模拟能力分析 [J]. *大气科学*, 2021, **45**(3): 605-616.)

作者简介



朱家玮 2000 年 5 月出生, 武汉大学电子信息学院硕士研究生, 主要从事临近空间环境探测方面的研究.

E-mail: zzzjjw@whu.edu.cn



周 晨 1983 年 6 月出生, 武汉大学电子信息学院教授, 空间物理系副主任, 博士生导师, 长期从事空间电磁电波环境和雷达智能信号处理方面的研究.

E-mail: chenzhou@whu.edu.cn