

引用格式: 宫珣, 童玲, 高博, 等. 星载高光谱微波辐射计大气温度廓线反演的仿真与分析 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(2): 280-287.
GONG X, TONG L, GAO B, et al. Simulation and analysis of atmospheric temperature profiles retrieval using spaceborne hyperspectral microwave radiometer[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(2): 280-287.

星载高光谱微波辐射计大气温度廓线反演的 仿真与分析



宫珣*, 童玲, 高博, 王培丞, 高鑫宜

(电子科技大学 自动化工程学院, 成都 611731)

摘要: 高光谱微波辐射计相比于传统辐射计通道数量大幅度提升, 可获得连续、高频率分辨率的亮温探测结果, 但由于通道间相关性以及通道细分后灵敏度下降等问题, 其对于高光谱微波遥感能力的提升需要进一步的理论研究支撑。针对上述问题及当前未有对地观测高光谱微波辐射计在轨运行载荷的情况, 构建星载高光谱微波辐射计亮温仿真与大气温度廓线反演分析平台, 该平台基于辐射传输理论和大气微波气体吸收系数模型对星载高光谱微波辐射计探测亮温进行仿真, 同时利用仿真数据建立并训练基于神经网络算法的反演模型。基于该平台对 50~70 GHz 氧气吸收带观测亮温和大气温度廓线反演结果进行分析, 对比不同通道数情况下观测亮温、权重函数和反演统计误差结果。实验结果表明, 高光谱微波辐射计对各气压层大气温度廓线遥感探测精度均有提升, 尤其是对于高层大气温度廓线提升显著。

关键词: 高光谱; 微波辐射计; 大气温度廓线; 神经网络; 对地观测

中图分类号: TP75

文献标志码: A

DOI: 10.12178/1001-0548.2024005

Simulation and analysis of atmospheric temperature profiles retrieval using spaceborne hyperspectral microwave radiometer

GONG Xun*, TONG Ling, GAO Bo, WANG Peicheng, and GAO Xinyi

(School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: Compared with traditional radiometers, hyperspectral microwave radiometers have significantly increased the number of channels and can obtain continuous and high-frequency resolution brightness temperature detection results. However, due to issues such as channel correlation and reduced sensitivity after channel subdivision, further theoretical research is needed to support the improvement of hyperspectral microwave remote sensing capabilities. In view of issues above and the fact that there is no on-orbit hyperspectral microwave radiometer for Earth observation at present, a platform for brightness temperature simulation and atmospheric temperature profile retrieval analysis of spaceborne hyperspectral microwave radiometer is built. This platform simulates the brightness temperature detected by spaceborne hyperspectral microwave radiometer based on radiation transfer theory and atmospheric microwave gas absorption coefficient model, and constructs and trains an inversion model based on neural network algorithm using the simulated data. The brightness temperature observed in the oxygen absorption band of 50 GHz to 70 GHz and the retrieval results of atmospheric temperature profile are analyzed based on this platform, and the observation brightness temperature, weighting function and statistical errors of retrieval results under different channel numbers are compared. The experimental results show that the hyperspectral microwave radiometer can improve the remote sensing detection accuracy of atmospheric temperature profiles in various pressure layers, especially for the high-altitude atmospheric temperature profile.

Key words: hyperspectral; microwave radiometer; atmospheric temperature profiles; neural network; Earth observation

收稿日期: 2024-01-04

作者简介: 宫珣, 主要从事微波测试与微波被动遥感方面的研究。

*通信作者 E-mail: gongxunhj@uestc.edu.cn

微波遥感因其全天时、全天候的大范围探测能力, 在行星大气、地面和海洋的探测中得到了广泛的应用。1968年, 苏联成功发射了装载了4个通道微波辐射计的Cosmos-243卫星, 可以测量大气中的水蒸气和液态水含量、地表温度以及地表的水分布^[1]。此后, 世界各国先后发射了大量具有微波辐射计载荷的遥感观测卫星, 如美国发射的极轨系列气象卫星NOAA18和NOAA19以及欧洲航天局发射的气象卫星METOP, 其上搭载了20通道AMSU (advanced microwave sounding unit) 辐射计用于大气垂直温湿度探测^[2], 我国风云三系列极轨气象卫星搭载的17通道微波温度计-III型^[3]和15通道微波湿度计-II型^[4]用于反演大气温湿度垂直分布廓线、大气水汽总量、云水含量、降水强度等参数。随着科技的不断进步, 星载微波辐射计向着高频段、一体化、高光谱探测方向发展^[5]。典型代表有: 欧洲航天局Rosetta Orbiter 搭载由德国马克斯普朗克研究所研制的微波探测仪MIRO (microwave instrument for Rosetta orbiter), 探测通道数达4 096通道, 用于探测67P/Churyumov-Gerasimenko彗星几种挥发性物质以及水的同位素^[6]; 美国国家航空航天局发射的亚毫米波天文卫星(SWAS)使用了基于声光测频技术的高光谱辐射计, 探测带宽为1.4 GHz, 通道数目达1 400^[7]; 我国也有适用于星载辐射计的相应中频处理模块设计, 实时处理带宽达6.4 GHz, 通道数为1 024^[8]。高光谱微波探测技术已成为未来微波遥感领域的重要发展趋势。通过不断提高微波辐射计的性能和功能, 地球大气、地表和海洋的状况可被更准确地探测, 为气候预测、数值预报和资源管理等领域提供更有价值的技术支持。

星载微波辐射计的观测结果是以辐射亮度温度表示的辐射功率, 需要通过反演方法将辐射亮温转换为实际的大气参数^[9]。目前, 遥感反演技术主要有两种: 1) 统计反演; 2) 物理反演。统计反演法以各种实测亮温和大气观测历史数据为基础, 结合观测值的统计特征及概率分布, 构建气象参量与观测亮温的回归关系。文献[10]对微波辐射计实测亮温的数值模拟, 并基于仿真亮度温度进行了统计反演, 获得了晴空环境条件下大气湿垂直廓线的参数。文献[11]利用统计D矩阵方法对风云三号A星(FY-3A卫星)卫星上搭载的微波温度计和微波湿度计两个载荷的观测亮温进行反演分析, 得到了西太平洋海域区域的大气温度和湿度的三维空间分布情况。然而, 统计反演方法一般采用线性或准

线性等形式对反演问题中的非线性问题进行简化, 因此统计反演精度有限, 且对于特殊的低概率事件个例可能误差较大。物理反演方法基于可精确快速进行亮温模拟仿真的正演模型和尽可能接近实际情况的大气廓线初值, 不断通过廓线数据计算观测亮温逼近实际测量值, 迭代更新廓线数据寻找最优解。物理反演法构建辐射传输过程的物理模型, 其反演精度一般更高且反演过程物理意义明确。文献[12]在牛顿非线性迭代法的基础上提出了一种基于最大似然估计逼近大气参数真值的物理反演方法。文献[13]基于一维变分法分析AMSU辐射计的探测亮温数据, 分别对陆地和海洋背景环境下的大气湿度廓线进行了反演。文献[14]基于Smith迭代法的基本原理, 针对微波波段大气参数遥感的特点和需求, 建立一种新型物理迭代反演算法, 对风云三号A星(FY-3A卫星)卫星微波湿度计的观测亮温数据进行分析, 得到了晴空环境下西北太平洋海域上空的水汽垂直分布。文献[15]以极轨气象卫星风云三号C星(FY-3C卫星)上搭载的微波温湿度计的历史观测亮温数据为对象, 通过一维变分法和牛顿非线性迭代法, 对晴空条件下海洋上空的大气温度和湿度廓线分布反演。物理反演法具有较高的精度和可靠性、物理理论明确等优点, 但其反演过程需要不断反复计算辐射传输方程, 计算复杂且计算量大, 难以用来实时处理海量卫星观测数据。近年来, 随着机器学习算法的不断发展和广泛应用, 神经网络算法在微波遥感领域的应用日益受到关注。文献[16]使用基于神经网络的反演方法分析AMSU探测器的探测亮温数据, 对海洋和陆地背景条件下的大气温度垂直廓线反演并分析; 文献[17]研究实现了HRA002型国产地基微波辐射计观测亮温直接样本和预处理后间接样本的神经网络反演法。相比于传统统计反演方法和物理反演方法, 神经网络算法可以自动从训练数据中学习输入数据与输出结果之间的关系, 网络模型易于并行计算, 对复杂非线性映射关系也可良好拟合并寻找最优解, 受到了越来越多的关注。

大气温湿度廓线是研究大气运动规律与热力状况变化的一个重要参量, 准确、及时地测量这些参数能够为数值天气预报模型提供良好的初始场参数, 有效提升天气预报的性能^[18]。高光谱探测技术在红外遥感领域取得了巨大成功, 这种技术在微波遥感应用中也可以带来诸多优势^[19]。高光谱微波辐射计相比于传统辐射计通道数量大幅度提升, 可获

得连续、高频率分辨率的亮温探测结果,但由于微波辐射计各通道探测的信号是来自整个大气不同高度层辐射的叠加,其自身具有相关性^[19],并且由于仪器器件与算法的频响均为非理想状态,会使通道间的探测结果相互影响产生一定的相关性^[20],因此,通道间相关性以及通道细分后灵敏度下降等问题导致高光谱微波遥感探测能力能否有效提升需进一步的理论研究;同时由于高光谱探测数据量大、数据间相关性导致存在冗余数据等问题,如何有效利用高光谱探测数据也需要深入研究。本文面向星载高光谱微波遥感探测发展趋势,针对 50~70 GHz 氧气吸收带大气温度廓线探测需求与上述问题,搭建了星载高光谱微波辐射计亮温仿真与大气温度廓线反演分析平台,该平台根据辐射传输理论和大气微波气体吸收模型对星载高光谱微波辐射计探测亮温进行仿真,并利用仿真数据研究数据信息提取方法并训练基于神经网络算法的反演模型;通过对平台仿真亮温和反演结果的分析,评估高光谱微波辐射计在大气温度廓线反演方面的表现,这将有助于了解高光谱微波遥感技术在大气探测领域的潜力和应用前景。

1 仿真分析平台整体设计

由于目前尚无对地观测高光谱微波辐射计在轨运行载荷数据,因此需要搭建一个星载高光谱微波辐射计亮温仿真与大气温度廓线反演分析平台。该平台主要由正演模块和反演模块两部分组成,仿真分析平台框图如图 1 所示。正演模块中,根据大气参数数据集,通过大气气体吸收系数模型计算出分层大气中 O_2 、 H_2O 、 N_2 等大气组分在微波频段的吸收系数,再利用辐射传输模型得到星载高光谱微波辐射计对地观测的仿真亮温,由于微波辐射计观测结果为大气热辐射微弱噪声信号叠加辐射计自身产生噪声的功率谱,将上述理论仿真结果根据仪器灵敏度指标添加适当噪声可以更好的实现对仪器探测亮温的模拟,正演模块输出的亮温模拟数据和大气温度廓线数据分为两部分,用来对反演模块进行训练、测试和分析;反演模块中,主要是实现基于神经网络的反演模型,高光谱探测数据通道数多且会携带很多冗余信息,直接输入反演模型会导致神经网络训练难以完成,所以会对其进行数据的预处理。预处理主要是对输入的数据进行归一化和数据降维,有效地提取亮温数据中的有效信息后再输入神经网络训练,最终实现将模拟仿真亮温反演为大气温度廓线参数。

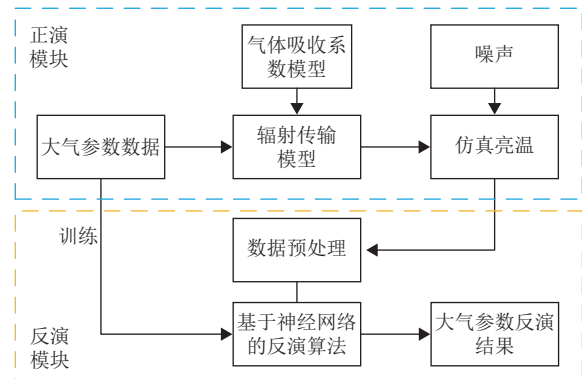


图 1 仿真分析平台

2 正演模块

正演模块主要实现对星载高光谱微波辐射计观测亮温的仿真,主要包括大气参数数据集、气体吸收系数模型以及辐射传输模型 3 部分。

2.1 大气参数数据集

本文采用的大气参数数据集为 Seebor V5.1 全球廓线训练数据库^[21],包含 15 704 条晴空环境条件下地球大气从地表到高空 101 个压力层(0.005~1100 hPa)的温度廓线、湿度廓线、臭氧廓线等大气及时空参数组成的样本数据。Seebor V5.1 大气状态参数廓线的来源包括多种途径,包括了来自美国极轨气象卫星 NOAA-88、NOAA 气候监测诊断实验室站点探空仪,2004 年撒哈拉沙漠的无线电探空仪,欧洲中期天气预报中心 ECMWF 的训练数据集和 TIGR-3 等仪器的探测结果。该数据集具有全球分布的特点,时间覆盖全年四季,广泛应用于各类遥感分析领域。

2.2 气体吸收系数模型

气体吸收系数的计算是辐射传输理论分析的重要基础。大气组分微波段的吸收系数计算方法主要有两种方法:1) 基于气体分子的光谱学模型及其模型参数分析计算的逐线积分法;2) 针对大气环境和特征建立的大气吸收系数快速计算模型。本文采用针对大气环境的气体吸收系数模型来实现快速计算大气吸收系数,综合对比分析各种模型后选择了 MPM93 (millimeter-wave propagation model 93) 模型^[22]。

MPM93 模型在分析大气吸收系数时,最主要的是对氧气和水汽的谱线吸收系数及其展宽的计算,此外还包括部分气体的连续吸收计算,根据分子光谱学原理和实验测试数据拟合了微波段吸收系数计算方程,根据大气组分丰度和辐射强度进行了

一定的简化。MPM93 中省略了辐射强度较低的吸收谱线和大气中含量极少的部分同位素, 提供了氧气吸收谱线 44 条和水汽吸收谱线 34 条及其展宽快速计算方程。MPM93 考虑了来自水汽宽频带吸收并将其拟合等效为 1.78 THz 处的伪线来实现快速计算, 此外, 该模型还包括 O₂、N₂、CO₂ 的非共振吸收、碰撞诱导吸收等影响。这些大气组分吸收系数在 MPM93 模型中以气压、温度、水汽分压等参量为输入可以实现快速计算。

2.3 辐射传输模型

辐射传输模型^[23]是用于计算观测方向上背景辐射场以及传输路径上每一点的辐射吸收、发射能量在大气中的传输的过程, 最终得到辐射能量在观测位置累加的结果。对大气辐射传输仿真分析时一般认为大气处于热力平衡状态, 此时大气组分的辐射发射率和吸收率相同, 气体辐射强度可以由发射率和普朗克辐射定律计算, 而在微波段低端可利用 Rayleigh-Jeans 定律将普朗克辐射定律计算的物体辐射强度表示为物体实际物理温度的线性函数实现高精度快速计算。此时, 大气辐射传输方程可简化为基于亮度温度和物理温度表示的形式:

$$T_B(s) = T_B(0)e^{-\tau_v(0,s)} + \int_0^s \kappa_v(s')T(s')e^{-\tau_v(s',s)}ds' \quad (1)$$

式中, $T_B(s)$ 表示观测位置 s 处的亮度温度; $T_B(0)$ 表示背景亮度温度; $T(s')$ 表示位置 s' 处的大气物理温度; $\kappa_v(s')$ 表示 s' 处的吸收系数; $\tau_v(s',s)$ 表示从位置 s' 到观测位置 s 处的光学厚度, 定义为:

$$\tau_v(s',s) = \int_{s'}^s \kappa_v(s'')ds'' \quad (2)$$

辐射传输方程计算需要对电磁辐射传输路径积分, 在计算时离散化, 将大气按气压或者高度分层, 将分层后每层大气的参数近似为均匀分布, 即将吸收系数、温度、压强等参数视为具有一致性, 辐射传输方程可离散化为:

$$T_B(s) = T_B(0)e^{-\tau_v(0,s)} + \sum_i \kappa_v(s_i)T(s_i)e^{-\tau_v(s_i,s)}ds_i \quad (3)$$

式中, s_i 表示第 i 层大气的位置; $\kappa_v(s_i)$ 表示第 i 层大气的吸收系数; $T(s_i)$ 为第 i 层大气的物理温度; ds_i 为第 i 层大气的厚度。

式 (1) 和式 (3) 中, 定义权重函数 K 为:

$$K = -de^{-\tau_v(s',s)} = \kappa_v(s')e^{-\tau_v(s',s)}ds' \quad (4)$$

在对大气分层以及频率通道离散化后可以得到

权重函数矩阵, 权重函数矩阵表示大气各层辐射传输到星载传感器时对辐射亮度温度的贡献, 可分析温度廓线变化对观测亮温影响的敏感性。

式 (3) 的辐射传输方程可对星载高光谱微波辐射计探测亮度温度进行仿真计算, 即为大气辐射传输的正演模型。

3 反演模块

反演模块主要实现将仿真亮温反演为大气温度廓线参数, 主要包括数据预处理和基于神经网络的反演算法两部分。

3.1 数据预处理

高光谱微波辐射计可获得连续、高频率分辨率的亮温探测结果, 通道数量多, 但各通道亮温变化区间不同、通道间具有相关性、数据冗余以及通道细分后灵敏度下降等问题。为保证反演模型的收敛性、精度以及减小运算量, 仿真亮温在用于神经网络训练和反演之前, 进行了标准化和数据降维预处理, 将输入神经网络反演模型的数据归一化到统一区间, 并尽可能提取其中有效信息。

数据的标准化是将数据进行平移和比例缩放, 使之落入特定区间内。在本文中, 仿真亮温数据和大气温度廓线数据被统一线性映射到 $[0,1]$ 区间, 神经网络的输出数据反归一化后得到最终的反演结果。探测亮温数据的标准化可以提升神经网络反演模型的收敛速度和精度。

高光谱微波辐射计的通道数可大幅度增长到数百或数千个, 观测亮度温度数据量相比于传统辐射计有 1~2 个数量级的增加, 会导致反演模型计算量规模急剧增加以及通道噪声恶化、相关性增强等问题, 为了保证反演模型的有效性和可收敛, 需要有效的数据降维处理, 减小输入数据规模并尽可能的提取其中的有效信息。PCA (principal component analysis), 即主成分分析方法, 是一种基于统计学的数据降维算法, 通过正交变换提取数据的主要特征分量^[24]。高光谱微波辐射计探测的大量数据间存在相关性以及噪声误差, 使用 PCA 对数据进行降维可提取数据中不相关因素、移除不重要数据并减小噪声影响, 保证反演模型的收敛性, 降低运算量。其主要步骤为:

1) 对探测亮度温度进行去均值操作, 使其整体统计均值为 0, 得到去均值后的亮度温度矩阵 A ;

2) 计算矩阵 A 的通道间协方差矩阵 C 并对其特征值分解, 得到特征值和特征向量;

3) 从大到小排列矩阵 C 的特征值, 并对相应的特征向量排序, 取最大的前 n 个特征向量构成矩阵 T ;

4) 将特征向量矩阵 T 与亮温矩阵 A 相乘, 再加上均值, 即可得到降维后的 n 个数据主要成分特征。

根据最大方差理论, 数据变量的方差越大, 说明其变化越明显, 其包含的信息量越大。在主成分分析中相关矩阵的特征值表示了各个主成分对总方差的贡献程度。主成分分析法按照相关矩阵的特征值从大到小挑选主成分特征, 尽可能地获取更多的信息量同时实现数据的降维, 还可减少冗余信息以及噪声的影响。本研究中为尽可能提取仿真亮温数据中的有效信息, 充分获得高光谱探测带来的效果, 提取前 50 个主成分分量作为神经网络反演模型的输入信息。

3.2 基于神经网络的反演算法

神经网络反演是利用大气温度廓线历史数据与对应的辐射计探测亮温数据训练神经网络模型, 最终得到亮温与温度廓线非线性映射关系进行反演的的方法, 近些年来受到微波遥感领域的广泛关注。本文大气温度廓线反演采用基于 BP 神经网络的算法^[25], 将星载高光谱微波辐射计探测亮温反演为大气温度垂直廓线。理论研究表明, 在闭区间里一个具有单隐层的前馈神经网络就可以逼近任何连续函数。根据辐射传输理论, 探测辐射亮温是大气温度廓线与气压的连续非线性函数, 可通过单隐层的前馈神经网络拟合。本文采用的 BP 神经网络的结构如图 2 所示, 包含输入层、隐含层和输出层各一层。在 BP 神经网络中任意一层网络层的输出是输入、权值、偏置的映射函数, 该映射函数称为激活函数, 如隐含层到输出层的关系为:

$$O_k = f\left(\sum_{i=1}^m W_{ik} Y_i + b_k\right) \quad (5)$$

式中, $f(\cdot)$ 是该层网络的激活函数; W_{ik} 为层间的连接权值; b_k 为神经元偏置, 本文选取 Tanh 函数作为激活函数。

本文中神经网络输入层为预处理阶段中提取的 50 个亮温数据主成分特征, 输出层为 101 个气压节点大气温度廓线, 中间隐含层节点数经过不断调试后确定为 70。在网络训练中, 使用均方误差作为误差函数, 并采用 Adam 优化算法, 以获得更快的收敛速度和更好的训练效果。

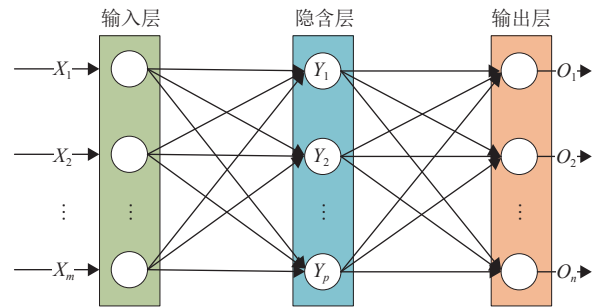


图 2 神经网络结构图

4 结果与分析

基于上述星载高光谱微波辐射计亮温仿真与大气温度廓线反演分析平台, 可实现星载载荷探测亮温的仿真以及反演计算, 用来分析高光谱微波辐射计对大气温度廓线反演的性能影响。

仿真平台计算的亮度温度结果是后续分析的基础, 为验证亮温结果的有效性, 将本文平台的计算亮温结果与 NASA PSG (national aeronautics and space administration planetary spectrum generator)^[26] 输出结果进行对比, 大气廓线采用 PSG 中导出的美国标准大气数据, 以 1 MHz 分辨进行仿真计算, 对比结果如图 3 所示。从对比结果上可以看出仿真结果与 PSG 输出数据吻合较好, 尤其是在氧气吸收峰区域, 而两侧的结果偏离可能是由于平台间吸收系数模型的差异以及对地表背景辐射处理的不同导致。

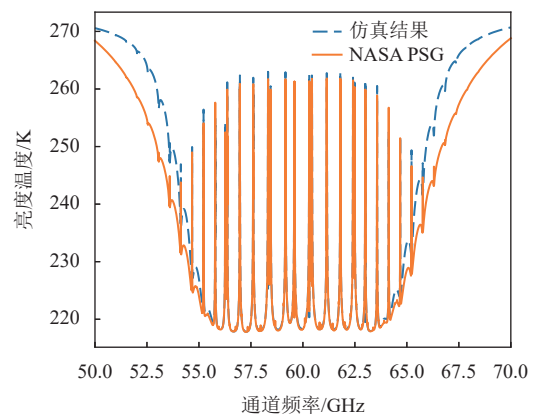


图 3 亮度温度仿真结果与 NASA PSG 对比

根据 SeeborV5 全球廓线训练数据库中大气廓线数据, 对 50~70 GHz 氧气吸收带星载辐射计探测亮温进行仿真, 当辐射计通道数为 20、200 和 2 000 通道时, 星载微波辐射计亮温 50~70 GHz 及 62~64 GHz 局部仿真结果如图 4 所示。从图中可以发现通道数目的提升, 使得通道带宽越小、频率分辨率增加, 观测亮温曲线细节信息更多, 其对应可提取的探测反演信息越多。吸收峰附近大气衰减

和辐射率较大, 底层大气辐射难以传输到卫星传感器, 观测到的辐射强度主要来自顶层大气; 而远离吸收峰位置处, 大气衰减和辐射率较小, 低层大气分子密度大辐射量大, 但高层大气分子密度低辐射量小, 因此观测到的辐射强度主要来自低层大气。这种大气辐射率、衰减率和大气分子密度的均衡导致不同通道对应辐射强度主要来自不同高度的气压层, 是大气温度廓线遥感的基础。当探测通道数为 20 时, 亮温曲线变化较快速的区域无法得到详细的信息, 仅能得到其附近大带宽内的亮温平均值; 当通道数提升至 200 时, 亮温曲线吸收峰位置的探测有了一定改善; 而当通道数提升至 2 000 时, 已经基本可以完全得到亮温曲线的所有细节信息。由此可见, 通道数量的变化对观测亮温结果影响较大, 尤其是吸收峰附近亮温变化较快部分更为明显, 而观测亮温作为大气温度廓线

确的探测结果和更高分辨能力, 为反演能力的提升奠定了基础。

在正演模块的基础上, 对 50~70 GHz 大气温度廓线的权重函数进行分析, 结果如图 5 所示。权重函数反应了温度廓线变化对观测亮温影响的敏感程度, 是大气温度廓线反演的基础。当探测通道数为 20 时, 探测亮温稀疏的分布于大气各层高度; 当探测通道数增加至 200 和 2 000 时, 随着通道带宽的变小和亮温探测能力的提升, 权重函数的分布更加密集和紧凑, 同时在吸收峰附近对大气高层温度变化更加敏感。高光谱微波辐射计探测数据将带来更多的大气分层信息。同时, 由图 5 可以发现各探测通道间存在一定的交叠, 这是由于各通道的探测结果是来自整个大气各气压层辐射的叠加, 虽然各通道的探测敏感区域有别, 但也会导致各通道探测结果存在一定的相关性, 且随着通道数的增加, 相邻通道的相关性有增强的趋势。

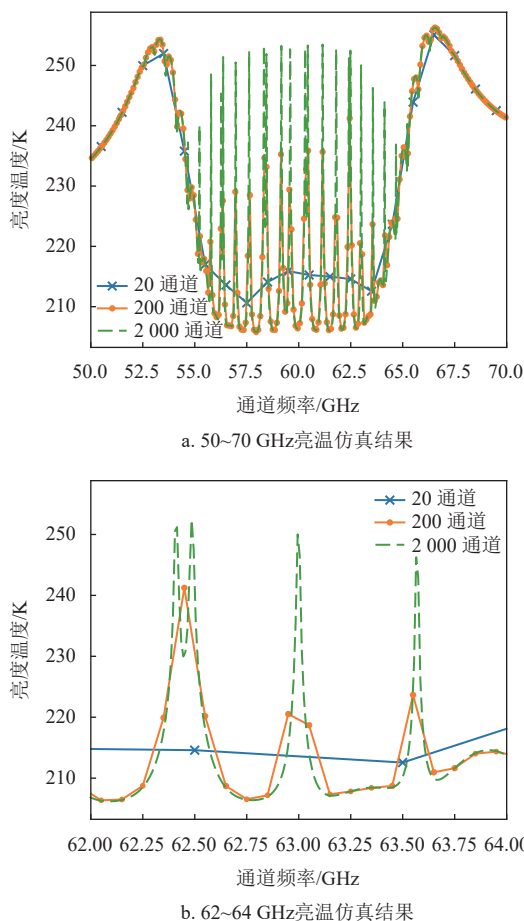


图 4 星载微波辐射计探测亮温仿真

反演模型的输入参数, 其分辨率必将影响反演的精度。高光谱微波辐射计相比于传统辐射计通道数的大幅度提升, 使得亮温曲线探测结果尽可能保留更多的细节, 尤其是吸收峰附近可以得到更为准

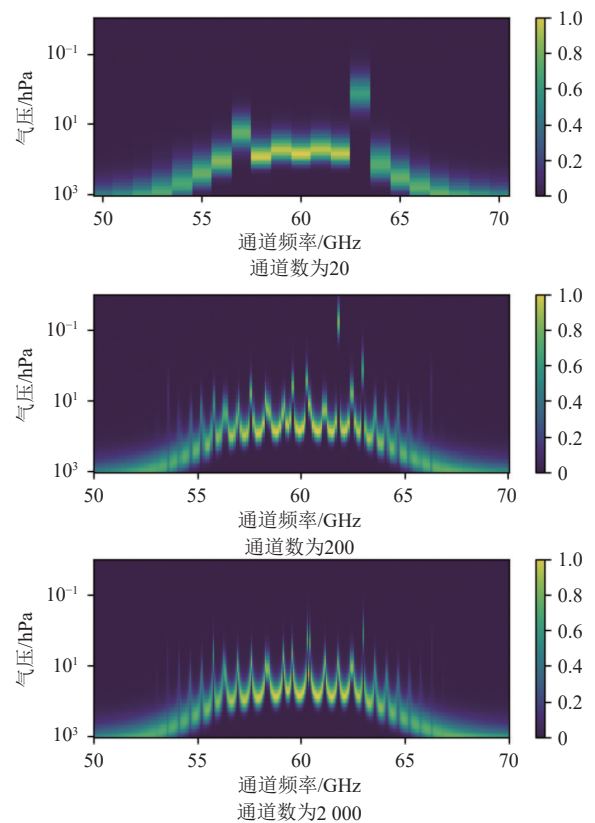


图 5 权重函数分析结果

图 6 所示为中心频率 57.64 GHz 处权重函数随通道带宽的变化, 随着通道带宽的变小, 权重函数的宽度也随之变小, 说明该通道探测亮温的敏感来源于高度的减小, 该结果表明高光谱微波辐射计对大气温度廓线的垂直分辨能力较传统辐射计更高。

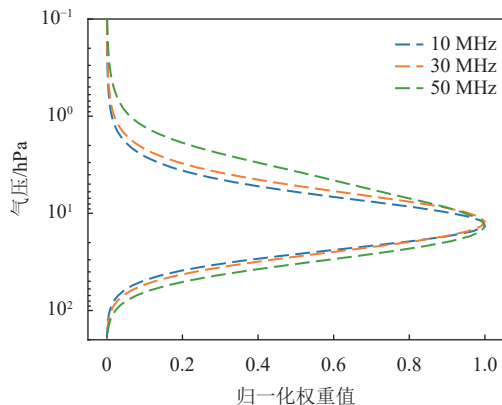


图 6 权重函数随通道带宽变化

仿真的高光谱辐射计探测亮温和大气温度廓线样本数据经过预处理后对基于神经网络的反演模型进行训练和验证。图 7 给出了对不同探测通道数辐射计探测亮温进行反演的结果个例，随着通道数的提升，反演得到的大气温度廓线越逼近作为真实参考值的大气温度廓线样本值，在温度廓线变化复杂的区域 2 000 通道高光谱探测结果能够更好的反演大气温度的细微变化，在不同的大气压力层中均有一定的改善，对于高层大气改善尤为明显。

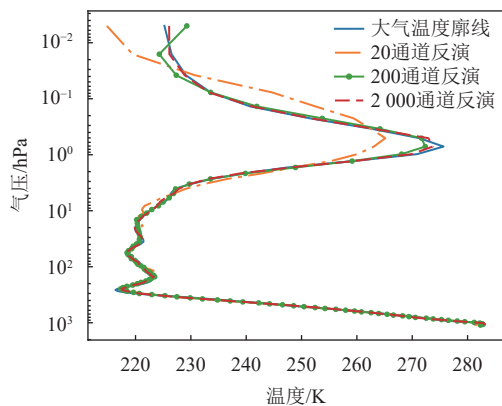


图 7 大气温度廓线反演个例

在无系统噪声情况下，对仿真平台的大气温度廓线反演结果进行统计分析，反演的均方根误差结果如图 8 所示。随着通道数的增加，对各层大气的温度廓线反演精度均有明显的改进，对于越高处的大气温度廓线反演精度的改善越明显。这表明高光谱微波辐射计可以有效改善大气温度廓线的探测能力。同时观察图 8 还可以发现通道数的增加不能无限制的增强探测能力，随着通道数的增加单位数目的通道数所能带来的性能增益逐渐变小，因此高光谱辐射计的设计需要综合考虑系统的探测需求、功耗等因素来确定通道的数量。

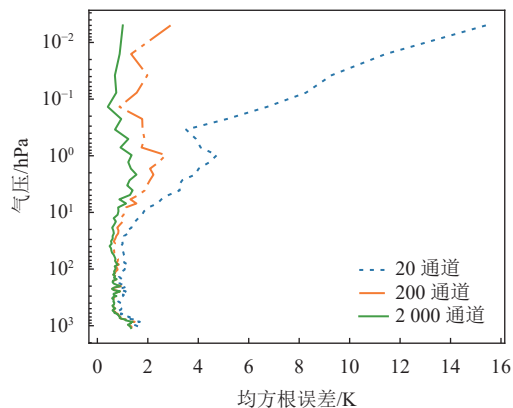


图 8 无系统噪声情况下大气温度廓线反演均方根误差

为更真实地反映微波高光谱辐射计的探测能力，对亮温仿真结果添加噪声，模拟在轨载荷探测结果并分析噪声对反演结果的影响。由于微波辐射计的灵敏度 ΔT 和通道带宽 B 具有如下关系：

$$\Delta T \propto \frac{1}{\sqrt{B}} \quad (6)$$

按照 2 000 个通道时带宽为 10 MHz 的情况下添加标准差为 2 K 的正态分布亮温噪声，其他通道数时添加的噪声标准差由式 (16) 进行等效计算。在有系统噪声情况下，对仿真平台的大气温度廓线反演结果进行统计分析的均方根误差结果如图 9 所示。受到系统噪声的影响高光谱微波辐射计通道灵敏度降低，导致大气温度廓线反演精度有所下降，但相比于传统辐射计探测结果，高光谱微波辐射计通道数的增加依然对大气温度廓线的反演精度有明显的提升。

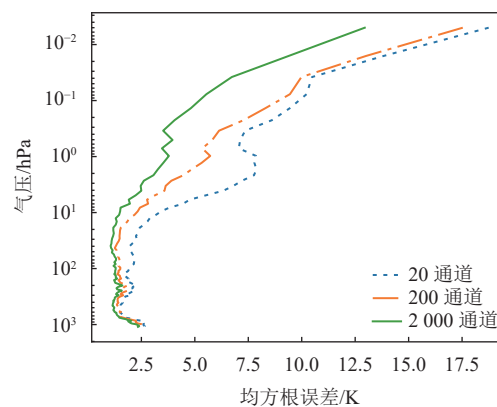


图 9 有系统噪声情况下大气温度廓线反演均方根误差

5 结束语

本文面向微波辐射计高光谱探测的发展趋势与高光谱微波遥感中通道关联性和信息有效提取等问题，搭建星载高光谱微波辐射计亮温仿真与大气温

度廓线反演分析平台, 该平台对星载高光谱微波辐射计探测亮温进行仿真且利用仿真数据训练并验证基于神经网络算法的反演模型。基于该平台对50~70 GHz 氧气吸收带观测亮温和大气温度廓线反演结果进行分析, 对比不同通道数情况下观测亮温、权重函数和反演结果。实验结果表明, 高光谱微波辐射计对各气压层大气温度廓线遥感探测精度均有提升, 尤其是对于高层大气温度廓线提升显著。但随着通道数量增多, 探测提升的增益逐渐降低。本文的研究内容为高光谱辐射计的设计和研发提供了重要的参考, 未来通过进一步优化和改进算法, 可提高高光谱微波辐射计的探测性能和扩展其应用范围。

参考文献

- [1] GORBUNOV M E, KUTUZA B G. Cosmos-243 as the starting point for the development of microwave radiometry methods of the earth's atmosphere and surface[J]. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2018, 54(3): 275-281.
- [2] AUMANN H H, CHAHINE M T, GAUTIER C, et al. AIRS/AMSU/HSB on the Aqua mission: Design, science objectives, data products, and processing systems[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 253-264.
- [3] HU J Y, CHEN W X, CHI J D, et al. Prelaunch performance evaluation of MWTS-III onboard FengYun-3F using thermal vacuum test data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2023, 61: 5302710.
- [4] LI N, HE J Y, ZHANG S W, et al. Rainfall retrievals using 118GHz and 183GHz channels of MWHS-II on FY-3C Meteorological satellite[C]//Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2017: 4505-4508.
- [5] 陆登柏, 邱家稳, 蒋炳军. 星载微波辐射计的应用与发展[J]. *真空与低温*, 2009, 15(2): 70-75.
LU D B, QIU J W, JIANG B J. Development of spaceborne microwave radiometer[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2009, 15(2): 70-75.
- [6] GULKIS S, FRERKING M, CROVISIER J, et al. MIRO: Microwave instrument for Rosetta orbiter[J]. *Space Science Reviews*, 2007, 128(1): 561-597.
- [7] TOLLS V, MELNICK G J, ASHBY M L N, et al. Submillimeter Wave Astronomy Satellite Performance on the ground and in orbit[J]. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 2004, 152(1): 137-162.
- [8] GONG X, TONG L, GAO B, et al. Test of an intermediate frequency module for hyperspectral microwave radiometers[C]//Proceedings of the IGARSS 2022 - 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. New York: IEEE, 2022: 7595-7598.
- [9] WOODHOUSE I H. Introduction to microwave remote sensing[M]. [S.l.]: CRC Press, 2017.
- [10] ROSENKRANZ P W, KOMICHAK M J, STAELIN D H. A method for estimation of atmospheric water vapor profiles by microwave radiometry[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 1982, 21(9): 1364-1370.
- [11] 陈昊, 金亚秋. 风云三号 MWTS/MWHS 大气温度与水汽廓线反演——2008 年凤凰台风个例试验[J]. *遥感学报*, 2011, 15(1): 137-147.
CHEN H, JIN Y Q. Retrievals of atmospheric temperature and humidity profiles from Chinese microwave FY-3A measurements and the example of Phoenix Typhoon, 2008[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2011, 15(1): 137-147.
- [12] RODGERS C D. Retrieval of atmospheric temperature and composition from remote measurements of thermal radiation[J]. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, 1976, 14: 609.
- [13] FORSYTHE J M, KIDDER S Q, JONES A S, et al. Moisture profiles retrievals from satellite microwave sounders for water analysis over land and ocean[EB/OL]. [2023-05-15]. https://www-cdn.eumetsat.int/files/2020-04/pdf_conf_p50_s10_03_kidder_v.pdf.
- [14] 王曦, 李万彪. 应用 FY-3A/MWHS 资料反演太平洋海域晴空大气温度廓线[J]. *热带气象学报*, 2013(1): 8.
WANG X, LI W B. Retrieval of clear sky moisture profiles in the pacific using measurements of MWHS from FY-3A satellite[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2013(1): 8.
- [15] 贺秋瑞. FY-3C 卫星微波湿温探测仪反演大气湿温廓线研究[D]. 北京: 中国科学院国家空间科学中心, 2017.
HE Q R. Study on retrieving the atmospheric temperature and humidity profiles from measurements of microwave humidity and temperature sounder on FY-3C satellite[D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2017.
- [16] GANGWAR R K, MATHUR A K, GOHIL B S, et al. Neural network based retrieval of atmospheric temperature profile using AMSU-A observations[J]. *International Journal of Atmospheric Sciences*, 2014, 2014: 1-8.
- [17] 杨杰波, 陈柯, 徐桂荣, 等. 基于微波辐射计观测亮温数据集的神经网络训练反演研究[J]. *暴雨灾害*, 2022, 41(4): 477-487.
YANG J B, CHEN K, XU G R, et al. Research on neural network training retrieval based on microwave radiometer observed brightness temperature data set[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2022, 41(4): 477-487.
- [18] 马舒庆, 高玉春, 张雪芬, 等. 发展中的地基大气廓线探测[J]. *气象科技进展*, 2016(3): 6.
MA S Q, GAO Y C, ZHANG X F, et al. Developing ground-based remote sensing of atmospheric profile[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology*, 2016(3): 6.
- [19] BLACKWELL W J, BICKMEIER L J, LESLIE R V, et al. Hyperspectral microwave atmospheric sounding[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 49(1): 128-142.
- [20] PRICE D C. Spectrometers and polyphase filterbanks in radio astronomy[EB/OL]. [2023-05-25]. <https://arxiv.org/pdf/1607.03579>.
- [21] BORBAS E, SEEMANN S W, HUANG H L, et al. Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity[EB/OL]. [2023-06-10]. https://cimss.ssec.wisc.edu/training_data/data/b32_borbass.pdf.
- [22] LIEBE H J, HUFFORD G A, COTTON M G. Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz[EB/OL]. [2023-06-28]. <https://its.ntia.gov/publications/details?pub=2670>.
- [23] ULABY F T, LONG D G, BLACKWELL W, et al. Microwave radar and radiometric remote sensing[M]. [S.l.]: The University of Michigan Press, 2015.
- [24] WARK D O, FLEMING H E. Indirect measurements of atmospheric temperature profiles from satellites: I. Introduction[J]. *Monthly Weather Review*, 2009, 94(6): 351.
- [25] GOODFELLOW I, BENGIO Y, COURVILLE A. Deep learning[M]. [S.l.]: MIT Press, 2016.
- [26] VILLANUEVA G L, SMITH M D, PROTOPAPA S, et al. Planetary spectrum generator: An accurate online radiative transfer suite for atmospheres, comets, small bodies and exoplanets[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2018, 217: 86-104.