

毫米波大气臭氧探测辐射计系统设计*

班磊^{1,2} 何杰颖¹ 张升伟¹

1(中国科学院国家空间科学中心 微波遥感技术重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

摘要 平流层臭氧浓度对于地球气候变化和生态环境有着重要影响. 具有谱分析能力的高光谱毫米波辐射计是一种用来探测大气痕量气体的被动式微波遥感器, 能够有效探测大气臭氧垂直廓线, 在空间地球科学领域中具有十分重要的应用价值. 本文研制了一种探测平流层大气臭氧吸收谱线的新型高光谱毫米波臭氧辐射计系统, 该系统结构包括射频接收机和数字后端谱分析仪. 射频接收机部分采用超外差结构获取 $142.175\text{ GHz} \pm 100\text{ MHz}$ 带宽信号, 数字后端谱分析部分采用高性能模数转换器对输入模拟信号进行 $5 \times 10^8\text{ sample}\cdot\text{s}^{-1}$ 采样, 14 bit 量化, 输入信号 3 dB 带宽 200 MHz, 通过高性能现场可编程门阵列 (FPGA) 获取信号功率谱, 实现了探测通道数 16384, 谱分辨率 12.2 kHz. 根据辐射计系统关键模块的设计方案、器件选型和测试方法, 开展大气探测实验, 并将实验结果与大气辐射传输模拟软件 (ARTS) 仿真结果进行对比, 得出系统灵敏度及各项指标可以满足大气臭氧反演需求, 验证了系统设计的正确性, 满足平流层臭氧浓度监测、预警及其导致的气候变化研究的应用需求.

关键词 臭氧, 毫米波辐射计, 射频接收机, FPGA

中图分类号 TP73

System Design of Millimeter Wave Atmospheric Ozone Radiometer

BAN Lei^{1,2} HE Jieying¹ ZHANG Shengwei¹

1(Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract Stratospheric ozone concentration has an important impact on global climate change and ecological environment. Hyperspectral millimeter wave radiometer with spectral analysis capability is a passive microwave remote sensor used to detect atmospheric trace gases. It can effectively detect the vertical profile of atmospheric ozone and has very important application value in the field of space earth science. In this paper, a new hyperspectral millimeter wave ozone radiometer system for detecting stratospheric ozone absorption lines is developed. The system structure includes RF receiver and digital spectrum analyzer. The RF receiver part uses a superheterodyne structure to obtain a $142.175\text{ GHz} \pm 100\text{ MHz}$

* 中国科学院青年交叉团队项目资助 (JCTD-2021-10)

2023-05-06 收到原稿, 2023-05-16 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

bandwidth signal. The digital spectrum analysis part uses a high-performance analog-to-digital converter to sample the input analog signal at 5×10^8 sample·s⁻¹. The quantization bit is 14 bit and the 3 dB bandwidth of the input signal is 200 MHz. The signal power spectrum is obtained by high-performance Field Programmable Gate Array (FPGA), and the number of detection channels is 16384, and the spectral resolution reached 12.2 kHz. This paper introduces the design scheme, device selection and test method of the key modules of the radiometer system. It is concluded that the system sensitivity and various indicators can meet the requirements of atmospheric ozone inversion, and the correctness of the system design is verified by conducting atmospheric detection experiments and comparing the experimental results with the simulation results of Atmospheric Radiative Transfer Simulation Software (ARTS). The radiometer system meets the application requirements of stratospheric ozone concentration monitoring, early warning and climate change research.

Key words Ozone, Millimeter wave radiometer, Radio frequency receiver, FPGA

0 引言

臭氧 (O₃) 是大气中的一种痕量气体, 主要分布在离地面高度约 20~30 km 处的平流层, 能够吸收多余紫外辐射, 是平流层大气中最重要的一种化学组成^[1,2]. 发挥空间地球科学观测的优势, 利用空间探测技术探测包括臭氧在内的痕量气体来观察全球气候变化对人类生存环境和社会发展的影响具有重要意义. 目前中国进行臭氧廓线探测的方式主要有以下几种: 第一种是采用无线电探空仪、气球和飞机进行现场测量, 该方法虽然可以实现有效探测, 但由于飞行高度的限制, 其难以测量平流层上部臭氧情况; 第二种为激光雷达测量, 该方法具有较高的垂直分辨率, 但仅适用于夜间晴空条件下测量, 局限性较大; 第三种是利用红外高光谱技术光学遥感器测量. 国外的臭氧探测仪主要有欧空局卫星上的 GOME 和 Metop 卫星上的 GOME-II 探测仪, 美国 EOS-Aura 卫星上的 OMI 探测仪和 NPOESS 卫星上的 OMPS 探测仪等^[3], 其中大多采用的是星载光学临边探测方式, 不仅体积大, 功耗高, 成本高^[4], 且难以保持较高的时间分辨率.

地基微波、毫米波辐射计能够在 24 h 内和不同天气条件下以高时间分辨率测量平流层及中间层顶 (20~70 km) 的目标气体. 但由于中国微波、毫米波辐射计后端一般采用直接检波形式, 系统频谱分辨率有限, 不能有效探测到臭氧吸收峰. 本文的设计目标是将毫米波辐射计与高频谱分辨率的数字谱分析技术结合, 实现臭氧气体微弱吸收谱线的探测.

高光谱毫米波辐射计是微波、毫米波遥感领域中

一种被动式的毫米波遥感器. 探测目标分子内部转动能级的跃迁会导致发射或吸收辐射, 在微波、毫米波区域会产生旋转吸收谱线. 毫米波辐射计通过测量目标吸收峰附近的吸收谱线确定目标气体成分及含量^[5]. 将利用大规模集成电路实现宽频带信号处理的数字谱仪代替传统辐射计的检波后端, 可以极大提升辐射计系统的频谱分辨率, 扩展辐射计探测带宽. 数字后端的可编程性确保可依据探测需求更改系统参数, 满足不同场景不同目标的探测任务^[6]. 高光谱毫米波辐射计在探测吸收谱线微弱的痕量气体成分方面具有独特优势, 在深空探测和射电天文领域有着重要的应用价值.

2012 年 NASA 戈达德航天飞行中心研制的高光谱微波辐射计 HyMAS 包含工作在 118 GHz 与 183 GHz 的 52 个探测通道^[7], 实现了滤波器组结构辐射计的小型化设计, 缺点是探测通道的数量限制了系统的谱分辨率; 2013 年北京航空航天大学设计的 K 波段高光谱微波辐射计改善了水气廓线的廓线误差, 提高了垂直分辨率, 具有高灵敏度和高精度亮温的优点^[8], 但是该系统结构不利于提高系统谱分辨率, 无法满足痕量气体谱线探测要求. 由于大气痕量气体相对密集度较小, 其在吸收谱线上的贡献相比氧气和水气要微弱很多, 这对微波、毫米波辐射计的频谱分辨率提出了较高要求. 本文设计的地基高光谱毫米波辐射计系统, 提出了毫米波辐射计射频接收机和具有谱分析功能的数字谱仪后端设计方案. 数字谱仪基于快速傅里叶变换算法可实现探测带宽 200 MHz, 通道数达到 16384. 此辐射计系统相比传统微波辐射计, 能够在宽频带下实现高频谱分辨率, 提高毫米波

辐射计探测大气痕量气体的垂直分辨率, 并且频谱分辨率可随探测需求调整, 实现不同应用场景下的大气痕量气体探测^[9], 在地球大气与环境预报、空间天气监测等领域具有重要应用价值。

1 系统原理与设计实现

1.1 毫米波辐射计系统原理

高光谱毫米波辐射计是一种被动微波遥感系统, 其工作原理为, 通过辐射计射频接收机探测目标频段信号, 经过放大、混频处理将其转化为中频信号, 再通过专用数字硬件模数转换芯片对接收机产生的中频模拟信号进行数字化处理, 利用专用数字处理芯片和数字信号处理算法实现对信号的频谱分析, 并由计算机显示出特定频率下目标的吸收通道谱线。本实验探测目标为大气中的臭氧分子, 在利用大气辐射传输仿真软件 ARTS 模拟的大气吸收谱线中, 臭氧分子在 142.175 GHz 频率处有较强吸收峰, 因此选取该频点及其附近频段作为探测频段。辐射计系统工作原理如图 1 所示。

设计的毫米波辐射计系统主要由射频接收机和接收机后端数字谱仪两部分组成。射频接收机结构包括天线、低噪声放大器、混频器、滤波器等, 通过对以臭氧 142.175 GHz 吸收峰频率作为中心频率且覆盖一定带宽的电磁波信号进行放大、混频以及带外抑制, 输出中频信号给高速 ADC 进行采样量化。接收机后端数字谱仪包括模数转换器 (Analog to Digital Converter, ADC) 以及现场可编程门阵列 (Field Programable Gate Array, FPGA) 功率谱分析模块, 通过对来自射频接收机的中频信号进行采样量化以及快速傅里叶变换处理, 得到功率谱密度结果。对从辐射计数字谱仪中获取的功率谱定标分析, 可以得到

在臭氧吸收峰附近的大气吸收谱线, 进而反演臭氧在平流层中的垂直分布^[10,11]。

1.2 射频接收机设计

射频接收机模块采用单边带接收形式的超外差接收机, 通过放大、混频滤波, 并再次放大形成低中频信号。

天线采用高增益、低驻波比的喇叭天线。第一级放大器采用裸片低噪声放大器, 工作频率在 120~200 GHz, 增益为 20 dB, 系统设计两级放大器起到累加增益的效果, 尽可能降低后级较大噪声电路对系统总噪声的影响。前端镜像抑制滤波器采用波导腔体结构, 可有效提高滤波器 Q 值, 减小镜像频率能量对下变频信号的干扰。混频器方面, 基于电路小型化考虑, 使用单片混频器芯片实现混频功能, 同时为提高本振链路集成度, 确定采用分谐波混频形式。本振采用标贴温补晶振, 兼顾了相位噪声、体积、成本等方面。射频接收机实物如图 2 所示, 输出为中心频率 375 MHz, 200 MHz 带宽信号, 其频谱特性曲线如图 3 所示。采用频谱分析仪对接收机分别进行常温 (20℃)、40℃ 和 -15℃ 环境下的性能测试以及常温复测, 通过观测其频谱、噪声系数等指标, 验证了该设计基本满足指标要求。

1.3 数字采集与谱分析系统设计与实现

ADC 核心芯片选取 ADI 公司的 AD9694 芯片, 支持 4 通道输入, 14 bit 量化, 单通道最高采样率达到 $5 \times 10^8 \text{ sample} \cdot \text{s}^{-1}$ 。该芯片的模拟输入和时钟信号是差分输入, 输出采用 JESD204 B (子类 1) 编码串行数字输出通道, 最高通道速率达到 $15 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ 。每个通道集成一个由 1 个 48 bit 数字振荡器与 4 个级联半带滤波器组成的宽带数字处理器, 用以实现数字下变频功能。输出采用 JESD204 B 协议接口, 减少了

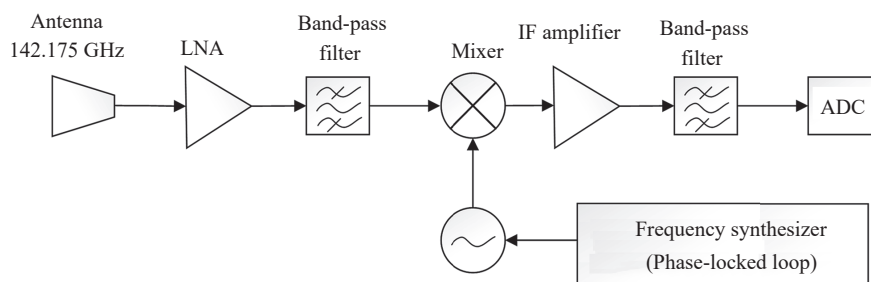


图 1 大气臭氧毫米波辐射计系统原理

Fig. 1 Block diagram of atmospheric ozone millimeter wave radiometer system

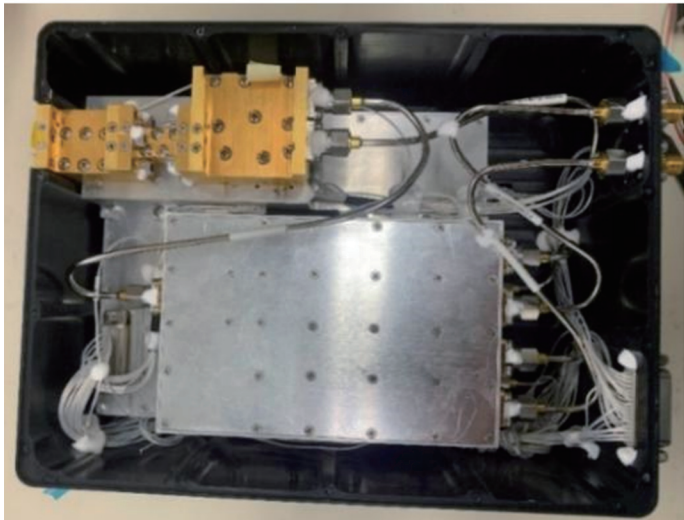


图 2 射频接收机实物
Fig. 2 RF receiver physical map

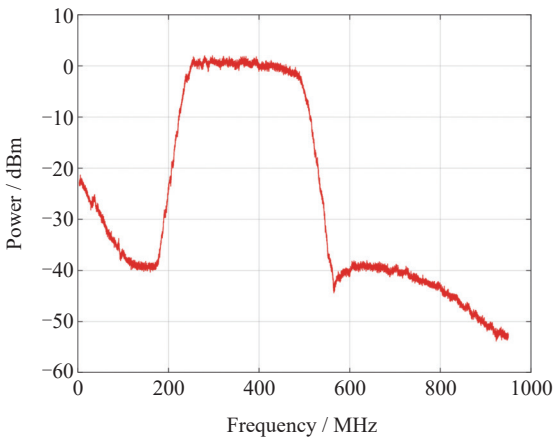


图 3 射频接收机频谱特性曲线
Fig. 3 Spectrum characteristic curve of RF receiver

ADC 和 FPGA 以及其他器件之间的数字输入和输出通道数. 其主要性能参数列于表 1.

本设计在 FPGA 核心芯片选型中通过对逻辑资源、I/O 资源、时钟资源及成本等方面进行综合评估, 选取 Xilinx 公司 Kintex-7 系列 XC7 K420 T 芯片. 该系列芯片在满足辐射计系统正常工作性能的前提下, 有效控制了芯片功耗. FPGA 可由外部 Flash 芯片和控制器加载配置文件进行芯片配置^[12], 也可通过上位机直接配置, 满足辐射计系统不同的工作模式. FPGA 与 ADC 由时钟芯片 AD9516 提供同源时钟, 具体时钟分配及数字系统间驱动信号情况如图 4 所示.

表 1 ADC 芯片主要参数
Table 1 Main parameters of ADC chip

主要参数	数值
通道数	4
量化位宽	14 bit
输入电压(峰值)	1.8 V
输入饱和功率	>0 dBm
输入阻抗	50 Ω
输入带宽	375 $\pm$ 100 MHz
有效量化位数	$\geq$ 10 bit
采样率	5 $\times$ 10 ⁸ sample $\cdot$ s ⁻¹

AD9694 芯片经过采样器与 DDC 下变频处理后, 将中心频率 375 MHz 的中频数字信号降至基带输出至 FPGA. 数字输出设计为 JEDEC 标准 JESD204 B 串行接口. JESD204 B 数据传输块 JTX 将 AD9694 芯片中 DDC 模块输出的数据组帧, 并使用 8 位/10 位编码形成串行输出数据. 通过连接 FPGA 完成串行链路通路^[13].

将输入样本处理并通过物理接口输出的过程为: 传输层先将样本数据处理组帧, 并将其映射到 8 位字, 统一输出至数据链路层. 数据链路层的主要功能是传递通道对齐或监视的控制字符, 以及 8 位字节编码成的 10 位符号等数据. 除此之外链路层还负责发送初始通道对准序列 (ILAS), 该序列包含接收器用

于验证传输层中设置的链路配置数据. 物理层由基于串行时钟速率计时的高速电路组成, 将并行数据转换为数条高速差分串行数据通道.

以 JESD204 B 协议各个模块与核心功能原理为基础, 依据 Verilog HDL 设计实现了针对 AD9694 的 JESD204 B 串行数据传输接口电路. 在实现时使用 Xilinx 公司 Vivado 软件中集成的物理层 IP 核, 实现了 JESD204 B 接口的数据传输. 通过利用 Vivado 中设计的发送端 (TX) 向接收端 (RX) 传输特定的数据流验证了链路的正确性, 数据传输接口结构如图 5 所示. 仿真结果如图 6 所示. 该协议接口完成了在 FPGA 端对 ADC 数据采集的工作.

随着数字谱仪技术的发展, 越来越多种类的谱仪系统被应用于辐射计系统进行探测, 其中包括傅里叶变换光谱仪、自相关光谱仪、滤波器组光谱仪、线性调频变换光谱仪等. 本设计的 FPGA 端谱分析模块采用傅里叶变换光谱仪 (FFTS) 系统, 通过对时序数字信号进行离散傅里叶变换可以得到该时序信号的

频域表示, 进而获取信号的功率谱. 其中, 对中频数字信号的 FFT 操作通过 Xilinx 公司 Vivado 软件中的 FFT IP 核实现, 配置数据流的方式为定点数不截位模式, 数据输出方式为自然序输出, 变换长度为 16384, 输入数据位宽为 16 位, 输出数据为 32 位. 通过双口 RAM 将功率谱进行累加平均以减小噪声干扰. 测试过程中将数字系统连接并通过信号发生器向 ADC 输入特定频率中频信号, 通过 Vivado 内部逻辑分析仪 (ILA) 抓取输出结果, 如图 7~9 所示, 可验证数字后端系统 ADC 采样功能以及 DDC 下变频功能的正确性. 其中图 7 表示输入 375 MHz 模拟正弦波信号, 经 ADC 数字采样及下变频处理后输出的基带信号, 图 8 为输出信号 I 路的时域表示, 图 9 为输出信号 Q 路的时域表示.

2 实验设计与结果分析

连接毫米波辐射计系统, 在环境温度 15℃、大气

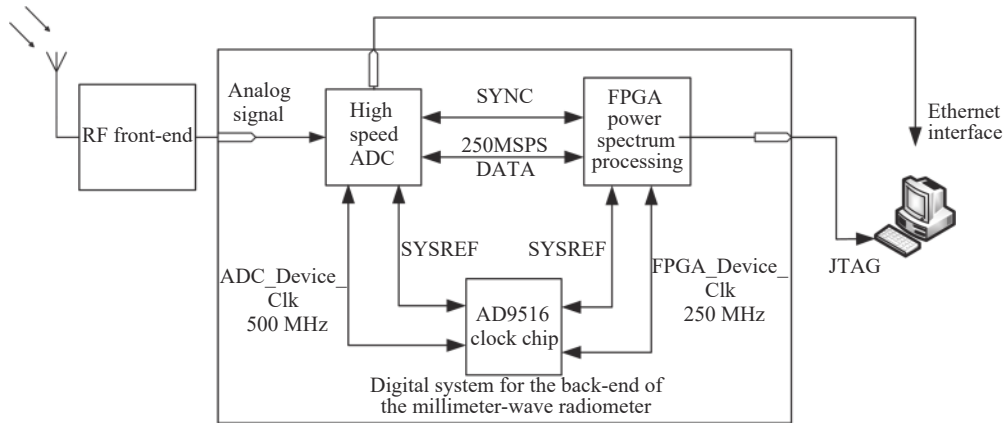


图 4 辐射计数字后端系统结构

Fig. 4 Diagram of the radiometer digital back-end system structure

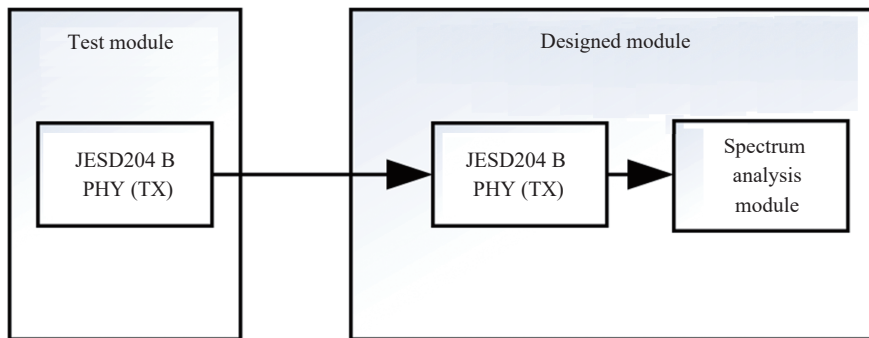


图 5 JESD204 B 接口结构

Fig. 5 JESD204 B interface structure

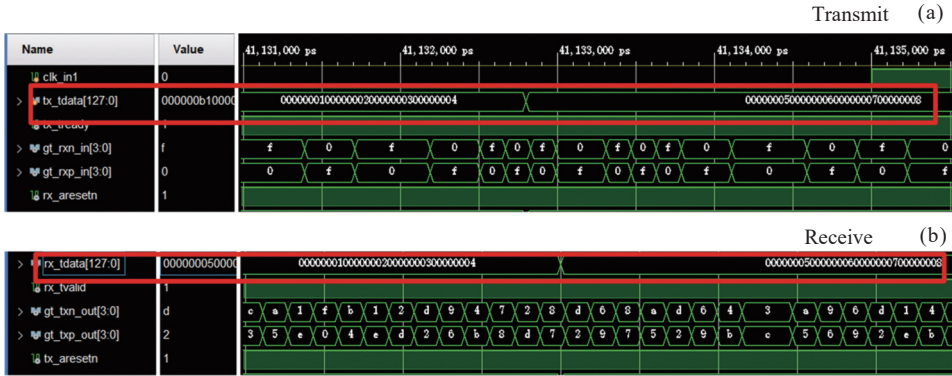


图 6 JESD204 B 接口传输仿真结果

Fig. 6 JESD204 B interface transmission simulation results

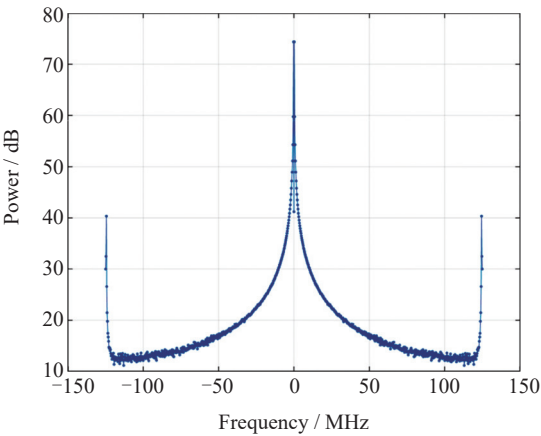


图 7 输入 375 MHz 正弦波信号时输出的信号功率谱
Fig. 7 Output power spectrum of the 375 MHz sin wave input signal

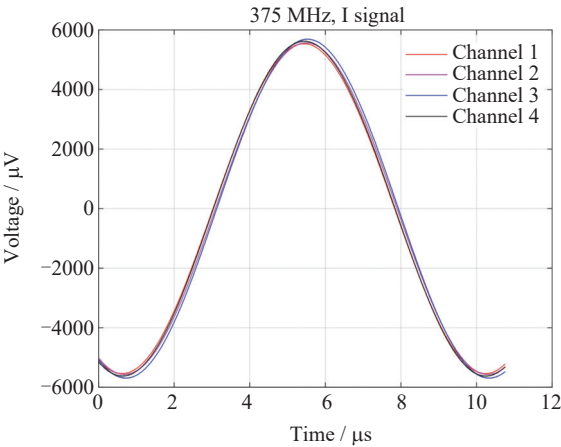


图 8 I 路信号时域
Fig. 8 I signal time domain diagram

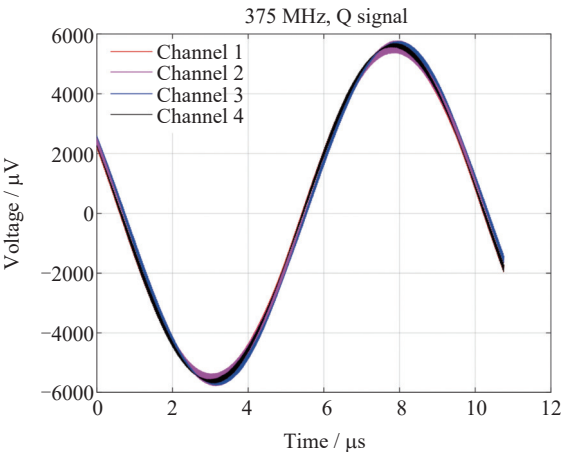


图 9 Q 路信号时域
Fig. 9 Q signal time domain diagram

湿度 51% 条件下, 在室外空旷处进行大气臭氧探测初步实验. 以环境温度与液氮制冷下的微波吸收黑体分别作为定标实验的定标热源与定标冷源, 通过对探测到的吸收谱线进行两点定标方法求出大气对应频段的亮度温度值^[13]. 探测结果如图 10 所示. 横坐标表示探测信号频率, 纵坐标表示信号功率谱密度. 红色与蓝色曲线分别代表定标热源与定标冷源的测量值, 绿色曲线代表测得的大气吸收谱线.

本文对毫米波辐射计的谱分辨率提出了较高要求, 而谱分辨率过高会导致灵敏度变差, 因此平衡频谱分辨率与灵敏度也是设计重点之一. 谱分辨率是辐射计能够分辨的最小频率间隔, 即子带带宽, 由谱分析模块处理的信号带宽与通道数目决定. 本设计输入信号 3 dB 带宽 200 MHz, 通道数目 16384, 谱分辨率 $\Delta B = 12.2$ kHz. 灵敏度表示了辐射计可分辨的最小

亮温, 是接收机噪声温度、子带带宽以及积分时间的函数, 可以表示为^[14]

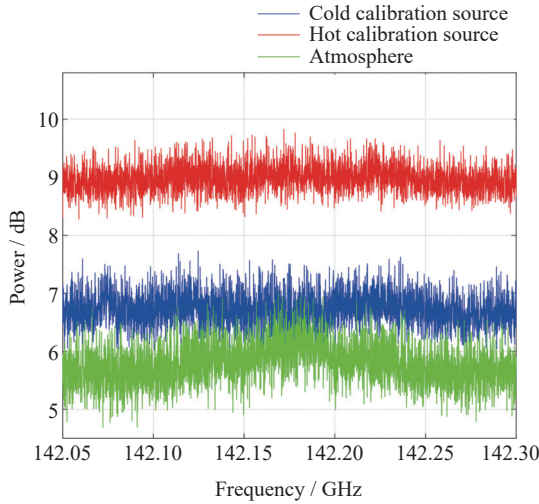


图 10 大气、冷源、热源吸收谱线

Fig. 10 Atmosphere, cold source, heat source absorption lines

$$\Delta T_{\text{IDEAL}} = \frac{T_{\text{SYS}}}{\sqrt{\Delta B \tau}},$$

$$T_{\text{SYS}} = T_{\text{A}} + T_{\text{rec}},$$

$$T_{\text{rec}} = (F - 1)T_{\text{o}}.$$

其中, T_{A} 表示天线辐射测量温度, T_{rec} 表示接收机输入噪声温度, T_{o} 表示接收机环境温度. 本实验中天线温度 T_{A} 可视为环境温度 288 K. 接收机噪声系数 $F = 5$ dB, 得到接收机输入噪声温度 T_{rec} 为 622 K, 通道带宽 $\Delta B = 12.2$ kHz, 积分时间 $\tau = 20$ s, 代入辐射计灵敏度公式可计算得出辐射计理论灵敏度 $\Delta T_{\text{IDEAL}} = 1.9$ K. 图 11 为通过 ARTS 软件模拟的实验当日北京地区的大气亮温仿真结果, 图 12 为经过两点定标后获得的大气臭氧吸收谱线对应亮温与仿真结果对比. 将实验结果与仿真结果进行对比可以看出, 二者亮温曲线趋势基本一致, 亮温绝对值有微小偏差, 该差异可能由实验环境中水气、实验条件限制等因素的干扰造成, 由此验证了实验的正确性. 通过对亮温曲线的标准差分析计算出其实际灵敏度约为 2.1 K, 接近理论值, 能够满足大气臭氧的反演需求. 实测灵敏度略大于理论灵敏度的原因可能是由于实际情况下的系统接收机增益会有波动, 使得接收机测量电压均方根值偏大, 造成实际灵敏度略大于理论灵敏度.

3 结论

以被动微波遥感为技术方向, 提出了利用高光谱

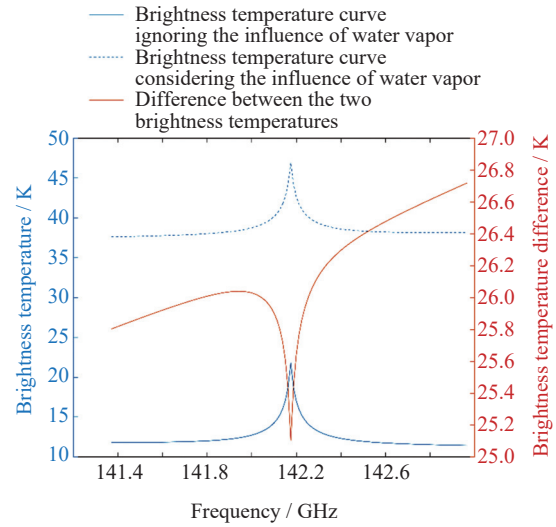


图 11 大气吸收谱线仿真结果

Fig. 11 Simulation results of atmospheric absorption lines

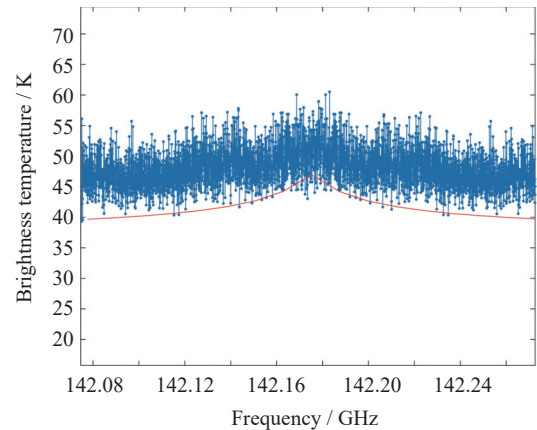


图 12 测量大气臭氧谱线对应亮温与仿真结果的对比 (蓝色曲线为经过两点定标后获得的大气臭氧吸收谱线对应亮温, 红色曲线为相应频段仿真结果)

Fig. 12 Brightness temperature corresponding to the measured atmospheric ozone spectral line and the simulation results (The blue curve represents the ozone absorption spectral line corresponding to the brightness temperature obtained after two-point calibration, while the red curve depicts the simulation result of the corresponding frequency band)

毫米波辐射计探测平流层臭氧吸收谱线的实验方案, 完成了系统设计与研制, 得到臭氧在其吸收峰附近的吸收谱线. 通过将毫米波辐射计与高速数字谱分析技术结合, 在保证灵敏度的前提下提高了辐射计系统频谱分辨率, 填补了中国地基微波、毫米波辐射计探测

痕量气体的技术空白, 实现长期、稳定、实时观测。

系统主要包括辐射计射频接收机和数字后端谱分析仪两部分, 通过实验验证了各模块设计的正确性。通过搭建毫米波辐射计系统进行了初步的大气臭氧探测实验, 得到臭氧在探测频带内的功率谱线, 并进行两点定标实验获得了臭氧对应亮温曲线。同时在 ARTS 软件上仿真当日大气亮温曲线。测试结果与仿真结果基本一致, 实验结果基本符合目标预期。上述研究为反演平流层臭氧廓线提供了数据, 并且为被动遥感领域探测其他痕量气体提供了技术参考, 通过系统获得的实时探测数据对预测由平流层臭氧浓度变化引起的恶劣天气情况具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] LACIS A A, WUEBBLES D J, LOGAN J A. Radiative forcing of climate by changes in the vertical distribution of ozone[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1990, **95**(D7): 9971-9981
- [2] BAI Kaixu. Investigations of the Long-Term Variability of Global Total Column Ozone and its Impacts on Regional Climate Change[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015 (白开旭. 全球大气臭氧总量变化趋势及其区域气候影响机制研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2015)
- [3] DEL FRATE F, CASADIO S, ZEHNER C. Retrieval of ozone profiles by using GOME measurements and a neural network algorithm[C]//Proceedings of the IEEE 2000 International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Taking the Pulse of the Planet: the Role of Remote Sensing in Managing the Environment. Honolulu: IEEE, 2000: 205-207
- [4] ZHOU Ying, HUANG Yunbiao, LI Dongling, *et al.* Design of the improved micro near spectrometer based on non-cross asymmetric C-T structure[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021, **42**(5): 25-33 (周颖, 黄云彪, 李东玲, 等. 一种改进型非交叉非对称 C-T 结构近红外微型光谱仪设计 [J]. *仪器仪表学报*, 2021, **42**(5): 25-33)
- [5] ULABY F T, MOORE R K, FUNG A K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Volume I-Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry[M]. Norwood, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1981
- [6] FERNANDEZ S, MURK A, KÄMPFER N. GROMOS-C, a novel ground-based microwave radiometer for ozone measurement campaigns[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2015, **8**(7): 2649-2662
- [7] HILLIARD L, RACETTE P, BLACKWELL W, *et al.* Hyperspectral Microwave Atmospheric Sounder (HyMAS) architecture and design accommodations[C]//Proceedings of 2013 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2013: 1-11
- [8] XIE Y, CHEN J X, LIU D W, *et al.* Development and calibration of a K-band ground-based hyperspectral microwave radiometer for water vapor measurements[J]. *Progress in Electromagnetics Research*, 2013, **140**: 415-438
- [9] MULLER S C, MURK A, MONSTEIN C, *et al.* Intercomparison of digital fast Fourier transform and acoustooptical spectrometers for microwave radiometry of the atmosphere[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, **47**(7): 2233-2239
- [10] JIN J D, YAO Q J, LI S, *et al.* The terahertz radiometer for APSOS project at Yangbajing observing station[C]//Proceedings of 2018 IEEE MTT-S International Wireless Symposium. Chengdu: IEEE, 2018: 1-4
- [11] HAGEN J, MURK A, RÜFENACHT R, *et al.* WIRA-C: a compact 142-GHz-radiometer for continuous middle-atmospheric wind measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2018, **11**(9): 5007-5024
- [12] WANG Ziyi, SHEN Sammin, YANG Feng, *et al.* High speed and large capacity storage and transmission system based on FPGA[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, **44**(13): 150-155 (王子懿, 沈三民, 杨峰, 等. 基于 FPGA 的高速大容量存储与传输系统 [J]. *电子测量技术*, 2021, **44**(13): 150-155)
- [13] LUAN Hui, ZHAO Kai. Error analysis and accuracy validation of two-point calibration for microwave radiometer receiver[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2007, **26**(4): 289-292 (栾卉, 赵凯. 微波辐射计接收机两点定标法误差分析及准确性验证 [J]. *红外与毫米波学报*, 2007, **26**(4): 289-292)
- [14] XU Haowen, LU Hao, WANG Zhenzhan. Design of 2 GHz bandwidth digital spectrometer in hyperspectral microwave radiometer system[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2022, **50**(6): 1472-1479 (许皓文, 陆浩, 王振占. 高光谱微波辐射计系统中 2GHz 带宽数字谱仪设计 [J]. *电子学报*, 2022, **50**(6): 1472-1479)

作者简介



班 磊 男, 1998 年 3 月出生于内蒙古自治区锡林郭勒盟, 中国科学院国家空间科学中心硕士, 主要研究方向为微波、毫米波辐射计系统设计。

E-mail: leiban915@163.com