

基于并行处理的臭氧辐射计数字谱分析系统

许季童^{1,2} 何杰颖¹ 王新彪¹

(1. 中国科学院国家空间科学中心 北京 100190; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 针对地基微波探测系统中,臭氧吸收峰微弱,易淹没在噪声中;后端数字谱仪中数据输入速率与数据处理速度的限制等问题,提出了一种基于多相抽取滤波和并行 FFT 结构的数字信号谱分析系统设计方案。该方法通过多相分解对输入数据进行抽取滤波,对多路数据进行并行 FFT,得到信号功率谱。经过仿真实验与搭建实验平台开展大气探测实验进行数据分析验证。实验结果表明,在保证合理的观测时间内,该方法能够显著减少噪声,通道灵敏度均值达 2.77 K,子通道间灵敏度标准差为 0.2 K,体现了系统响应函数的平稳。在保证分辨率的前提下,确保谱仪优异的灵敏度,满足实际探测系统需求。

关键词: 臭氧;微波臭氧探测系统;数字谱分析;多相抽取滤波;并行 FFT

中图分类号: TN957.52 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Parallel processing-based digital spectrum analysis system for ozone radiometers

Xu Jitong^{1,2} He Jieying¹ Wang Xinbiao¹

(1. Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: A digital signal spectrum analysis system design based on polyphase decimation filtering and parallel FFT architecture is proposed to address challenges in ground-based microwave detection systems, such as weak ozone absorption peaks easily masked by noise and limitations in data input rates versus processing speeds in backend digital spectrometers. The method employs polyphase decomposition for input data decimation filtering, followed by parallel FFT processing on multi-channel data to derive the signal power spectrum. Its performance was validated through simulations and experimental atmospheric detection on a dedicated testbed. Results demonstrate that, within a reasonable observation period, this approach significantly suppresses noise, achieving a mean channel sensitivity of 2.77 K with an inter-channel sensitivity standard deviation of 0.2 K, reflecting the system response function's stability. By maintaining spectral resolution while ensuring exceptional sensitivity, the proposed spectrometer meets practical detection system requirements.

Keywords: ozone; microwave ozone detection system; digital spectrum analyze; polyphase filtering; parallel FFT

0 引 言

臭氧(O₃)作为大气中关键的痕量气体,深刻影响着地球生态与人类生存。其浓度分布与动态监测成为了大气科学研究的焦点之一。然而,臭氧气体的高灵敏度探测面临巨大挑战:臭氧浓度的时空分布具有高度异质性,尤其在近地表边界层内受人排放与气象条件的双重调制^[1],其光谱特征易受环境背景噪声干扰。

地基观测作为捕捉臭氧近地表行为最直接的手段,对揭示污染机制、评估生态风险及制定调控策略具有不可替

代的作用^[2]。地基微波辐射计能全天对平流层与中间层顶的臭氧进行高时间分辨率的探测。近些年来,高光谱辐射计越来越多地被应用于臭氧等痕量气体的观测。高光谱辐射计的后端为谱仪,可实现较宽频带信号的处理,大幅提升辐射计系统的频谱分辨率。随集成电路与数字芯片发展,基于现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)的数字谱仪满足了高分辨率宽带信号的处理,在识别微弱目标信号的吸收谱线方面具有独特优势。

2015 年伯尔尼大学应用物理研究所的 Fernandez 等^[3]设计了活动地基臭氧观测系统(ground based ozone

monitoring system for campaigns, GROMOS-C), 观测 110.836 GHz 频段中层大气中臭氧发射光谱并使用快速傅里叶变换谱仪 (fast Fourier transform spectrometer, FFTS) 进行谱分析, 观测总带宽为 1 GHz, 谱分辨率 30.5 kHz。FFTS 对两个 500 MHz 带宽信号进行处理, 后续为提高处理速率与精度, 又增设了另一台 FFTS。2018 年 Hagen 等^[4]提出了风活动辐射计 (wind radiometer for campaigns, WIRA-C) 可提供臭氧观测数据, 其 FFTS 为通用软件无线电外设 (universal software radio peripheral, USRP), 由于硬件设计与性能限制, 仅提供 120 MHz 带宽的观测结果, 但同时谱分辨率提高至 12.2 kHz。2021 年韩国首尔淑明女子大学的 Ka 等^[5]研制的首尔平流层臭氧辐射计 (stratospheric ozone radiometer in Seoul, SORAS) 设备投入使用, 总带宽可达 1 GHz, 通道数为 16 384, 谱分辨率有所下降, 约为 61 kHz。其 FFTS 中大带宽高速数据的处理致使其对通道边缘区数据进行了一定的舍弃。目前地基臭氧微波辐射观测系统中, 其 FFTS 的软硬件设计中对带宽、谱分辨率以及信号噪声指标的平衡仍具有不小的挑战。由式(1)所示的微波辐射计的灵敏度计算公式, 在系统实际噪声温度 T_{sys} 不变的情况下, 增加系统带宽 ΔB 与积分时间 τ 有助于提高系统的灵敏度。

$$\Delta T = \frac{T_{sys}}{\sqrt{\Delta B \tau}} \quad (1)$$

系统带宽的增加对模数转换器 (analog to digital converter, ADC) 的性能提出了更高的要求。同时, 高速数据信号的处理与高谱分辨率的要求, 对 FPGA 内部软件的数据处理能力提出了更高的要求, 给其实现带来了挑战。传统的串行信号处理仅适用于低速率传输系统, 而 FPGA 的工作时钟频率存在瓶颈 (低于 400 MHz)。而利用 FPGA 的并行计算能力, 使用面积换取速率, 将高速数据流分解到各并行支路, 使 FPGA 在较低工作频率下完成对所采集高速信号的处理。

针对数字谱仪内高速信号实时处理问题, 本文提出一种基于多相滤波和并行 FFT (fast Fourier transform) 的 FPGA 数字谱分析系统设计。首先, 系统对输入的噪声信号进行多相分解, 对各相信号完成滤波, 降低噪声。之后将多路滤波后信号进行并行 FFT, 将信号转换至频域并最终得到幅度谱, 以便于后续两点定标得到探测频段亮度温度结果。通过模拟目标频段功率谱进行谱分析仿真实验与结果对比验证不同系统下的差异。最后搭建实验平台进行大气探测实验, 对系统做进一步的验证, 结果显示, 该系统在保证分辨率的前提下, 确保谱仪优异的灵敏度, 满足实际探测系统需求。

1 系统设计

本文中所使用的大气臭氧微波辐射计系统原型机硬件系统整体如图 1 所示。射频接收机接收以臭氧吸收峰

142.175 GHz 为中心频率, 覆盖一定带宽的电磁波信号, 通过放大、混频处理后输出中心频率 375 MHz 的中频信号。后端数字谱仪中的 ADC 将接受到的中频信号进行量化采样, 将转换得到的数字信号输入 FPGA 中进行功率谱分析。对所得功率谱进行定标分析可得到目标频率附近的大气吸收谱线, 进一步定标处理可得到臭氧的吸收谱线。

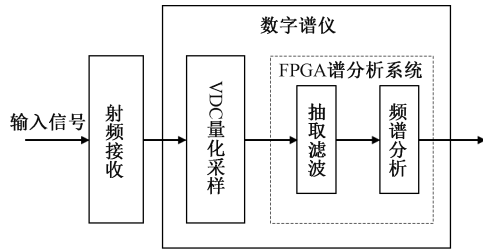


图 1 大气臭氧辐射计整体系统结构

Fig. 1 Block diagram of the atmospheric ozone detection radiometer system

本方案设计基于 FPGA 开发的谱分析系统, 对数字信号进行多相抽取滤波处理, 利用并行 FFT 将信号变换至频域, 进而进行功率谱计算并输出结果, 获得降噪后信号功率谱, 用于后续臭氧垂直廓线反演运算。系统降低了工作频率, 减少数据处理延迟, 保证实时性。

2 系统算法设计与仿真实验

2.1 多相抽取滤波

多相分解技术最初于 20 世纪 70 年代提出, 具有重要的工程价值, 在通信、射电天文等领域^[6]有广泛的应用。其应用在抽取滤波器中, 工作原理如下: 一有限冲激响应为 $h(z)$ 的滤波器, 其 z 变换 $H(z)$ 为:

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n)z^{-n} \quad (2)$$

其中, N 为滤波器长度, 此时对每 Q 点进行抽取作为输出。此时可以跳过其他的中间值, 只在 n 为 Q 的整数倍时计算, 令运算的复杂度降低至 $1/Q$ 。

在基于 FPGA 的数字抽取滤波器设计中, 利用多相分解可以达成抽取后滤波的效果并更加充分利用 FPGA 的并行运算特性^[7], 节省资源消耗。将数字滤波器的多相分解即将传递函数均匀分解为若干个不同相位的组。对序列长度 N 进行补零, 将冲激响应分为 Q 组, 使得 $N/Q = L$, L 为整数。

此时定义 $E_k(z^Q)$ 有:

$$E_k(z^Q) = \sum_{n=0}^{L-1} h(nQ+k)(z^Q)^{-n} \quad (3)$$

式中: $k = 0, 1, \dots, Q-1$ 。

则 $H(z)$ 的多相分解结果为:

$$H(z) = \sum_{k=0}^{Q-1} z^{-k} E_k(z^Q) \quad (4)$$

式中: $E_k(z^Q)$ 为 $H(z)$ 的多项分量。

经由诺贝尔恒等变换可得到多相抽取滤波的高效结构^[8-9],如图 2 所示。此时抽取过程在滤波过程前执行,抽取器的速率比滤波器快 Q 倍,同时子滤波器的系数也减少为原来的 N/Q ,避免了许多不必要的运算,降低误差,提高运算精度,且运算单元在抽取周期内一直在工作,计算更加有效。

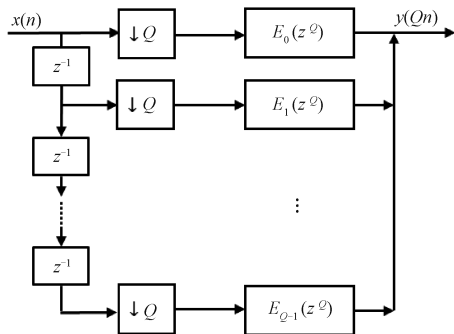


图 2 多相抽取滤波器高效结构

Fig. 2 Efficient structure of polyphase decimation filter

2.2 并行 FFT

滤波后时域数据送入并行 FFT 模块处理得到频域功率谱。采样后的离散时序信号可视为有限长时序序列,可通过离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)得到其频域表示。FFT 是 DFT 的一种高效算法,可以有效地缩短 DFT 的运算时间。而并行 FFT 算法是一种在 DFT 分组后,进一步分解进行 FFT 的快速变换,其分组可配合多相滤波结构的输出,提升处理效率。

计算过程推导^[10]如下:设长度为 N 的一组数据序列 $x(n)$ 的 DFT 为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad (5)$$

式中: $W_N^{kn} = e^{-j2\pi/N}$, $0 \leq k \leq N-1$ 。

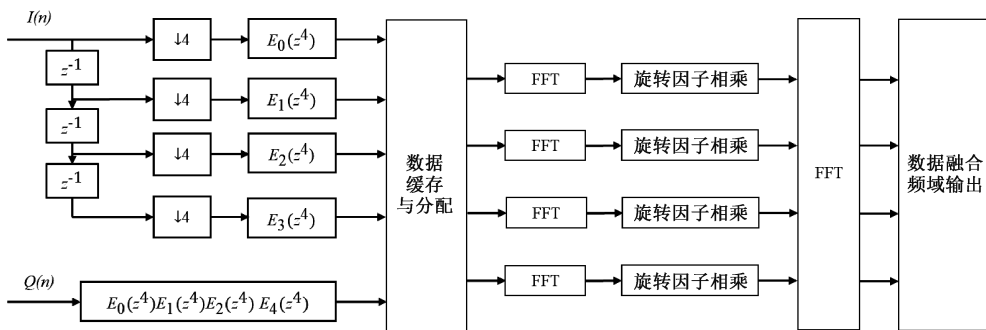


图 3 谱分析系统结构

Fig. 3 Structure of spectral analysis system

本实验中将滤波器截止频率设置为 12.2 kHz,截止频率设置为 18.3 kHz,并选择采用等波纹逼近法进行设计。比起窗函数法、频率采样法等设计方法,等波纹法可更精确地设置边缘频率,并允许分别控制通带与阻带的波纹幅

度,使得加权误差波纹最小化并均匀分布在整个频段上。微波辐射计观测目标为完整带宽,采用如窗函数法等滤波器则会使得越靠近频带边缘误差更大,同时远离频带边缘误差更小,所得功率谱过窄。当阶数相同时,等波纹逼

接下来进行分组处理。令 $N = LM$, 式中: L 和 M 为

整数。令 $n = r + cL, k = Mp + q$, 有 $0 \leq r, p \leq L-1, 0 \leq$

$c, q \leq M-1$ 。

对式(5)进行变量替换和化简后,并行 DFT 步骤如下:

1) 计算 M 点 DFT:

$$F(r, q) = \sum_{c=0}^{M-1} x(r, c) W_M^{cq} \quad (6)$$

式中: $0 \leq q \leq M-1, r = 0, 1, \dots, L-1$ 。

2) 与对应旋转因子相乘:

$$G(r, q) = W_N^r F(r, q) \quad (7)$$

式中: $0 \leq q \leq M-1, 0 \leq r \leq L-1$ 。

3) 计算 L 点 DFT

$$X(p, q) = \sum_{r=0}^{L-1} G(r, q) W_N^{rp} \quad (8)$$

式中: $0 \leq p \leq L-1, q = 0, 1, \dots, M-1$ 。

当 L 与 M 均为 2 的整数次幂时,则可使用 FFT 算法在步骤 1)、3)中代替 DFT 进行快速运算,即实现了对原始序列 N 的并行 FFT 运算^[11-12]。

2.3 算法设计仿真与分析

本方案所设计谱分析系统结构如图 3, ADC 对输入信号完成量化采样后,进行正交下变频后输出 I/Q 正交信号。在采样率 f_s 下,输入信号由中心频率的两侧搬移至 $f_s/2 \sim f_s/2^{12}$, 对得到的单侧 I/Q 正交信号分别进行低通滤波。滤波后信号送入并行 FFT 模块完成频域变换处理后输出。并行 FFT 即要求其拆分必须为 2 的整数次幂,而滤波器的多相分解本身无限制。在 2.2 节并行 FFT 实现的步骤 3)中,对 L 路全并行数据可进行基 L FFT,进一步减少乘法器的使用,系统设计通道数即 FFT 点数 N 为 16 384,满足基 4 FFT 的条件^[13],故选择 4 路并行 FFT,并设计滤波模块中子相为 4 相,与 FFT 模块进行对应,利于数据的分配与传递。

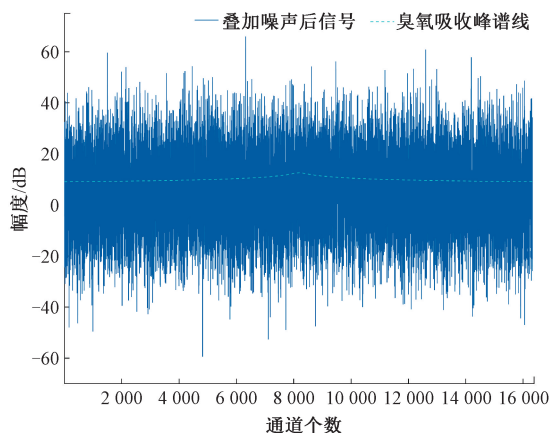
近法使滤波器的通带最大衰减最小,阻带最小衰减最大;而指标相同时,等波纹逼近法又使得滤波器阶数最低,可以减少FPGA资源占用。

在Matlab中使用Filter Designer工具生成滤波器抽头系数,将参数值输入配置项中进行滤波器生成,并将抽头系数导出文本文件并存入指定的只读存储器(read-only memory,ROM)。

滤波后信号按通道对应分配组合成复数进行并行FFT变换至频域,最后进行功率谱运算并输出结果,实现对信号的实时快速频谱分析。并行FFT模块为4路并行,系统通道数目为16384,并预先将4行4096列的旋转因子在Matlab中提前进行计算并转化为定点数后存入指定ROM中。对各路信号首先进行4096点的第一次FFT,中间结果乘以对应旋转因子后,进行4点的第二次FFT,完成整个并行FFT。

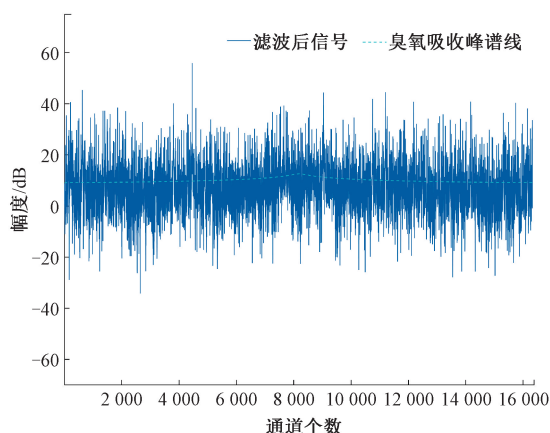
根据上述提出的谱分析方法,开展仿真实验。实验平台为Windows 10操作系统,CPU为Intel(R) Core(TM) i9-9980HK CPU @ 2.40 GHz,内存为32 GB。首先使用欧洲中期天气预报中心的第五代欧洲中期天气预报中心气候再分析数据(Fifth-generation ECMWF atmospheric reanalysis of the global climate,ERA5)提供的大气廓线数据^[14],作为大气辐射传输模拟器(atmospheric radiative transfer simulator,ARTS)仿真大气辐射传输过程的输入,得到臭氧微弱吸收谱线的理想辐射亮度温度。随后,通过Matlab叠加高斯白噪声,模拟实际测量中的臭氧吸收谱线。设有采样率为250 MHz,积分时间约200 ms,设备灵敏度约2.1 K,根据灵敏度公式,可推导所叠加噪声的标准差为15 K^[15],如图4(a)所示。在Matlab中对输入信号进行仿真处理,进行4相抽取滤波并计算FFT后求得功率谱,如图4(b)所示。

在Vivado中将方案进行综合实现,并在Modelsim中进行联合仿真并保存实验数据,信号频谱结果如图5所示。将结果与Matlab中仿真结果进行对比,二者谱线基



(a) 模拟臭氧吸收峰谱线与叠加噪声后信号频谱

(a) Simulation of the ozone absorption peak spectrum and the signal spectrum with noise superimposed



(b) 4相抽取滤波仿真结果图

(b) Simulation results of four-times decimation filtering

图4 仿真实验频谱

Fig. 4 Spectrum of simulation experiment

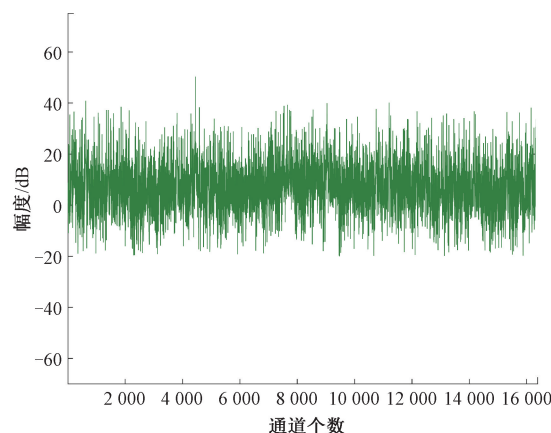


图5 FPGA 仿真实验结果

Fig. 5 Simulation result on FPGA

本重合,但由于Matlab中处理数据为双精度浮点数,而硬件中处理为定点数,且在每一级的运算过程中,数据的截位会产生误差,图5中谱线幅值略低于图4(b),两图中各通道结果的平均相对误差为4.61%。实验证明谱分析系统成功去除了一定的噪声,凸显了臭氧的吸收峰谱线。

3 大气探测实验验证

实验平台由大气臭氧探测微波辐射计原型系统、供电直流电源、定标温度源组成,如图6所示。数字谱仪内ADC采用ADI公司AD9694芯片,FPGA为Xilinx公司的XC7K420T。辐射计系统接收机使用直流电源供电,将接收信号输出至后端数字谱仪内,使用本文设计实现的谱分析系统进行处理,得到的结果输出至上位机。

实验选择在室外晴空下进行,按照冷源、大气、热源的顺序进行观测,将结果存入上位机中进行分析。

使用对冷热源观测得到的结果对大气观测结果进行两点定标,得到由谱分析系统所获取的目标带宽内的亮度

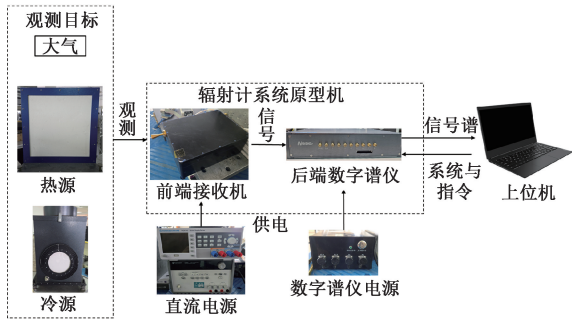
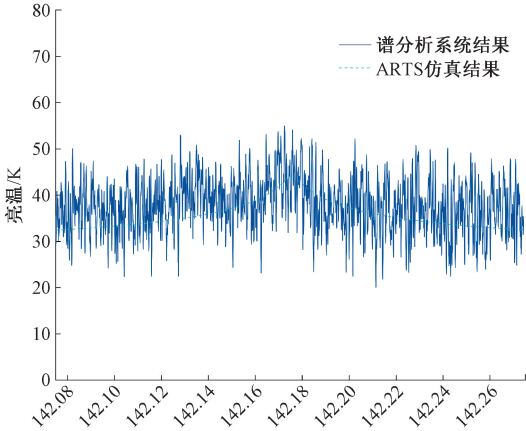


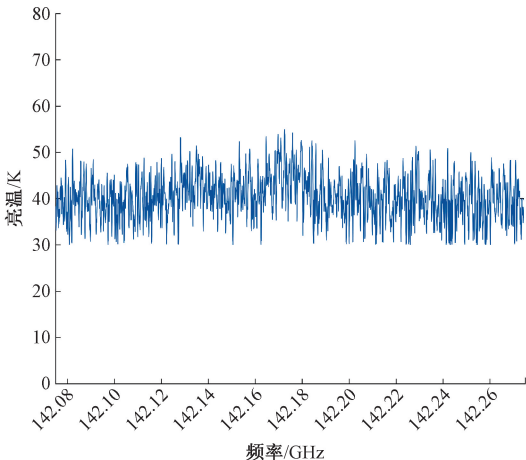
图 6 大气臭氧探测实验平台

Fig. 6 Experimental platform for atmospheric ozone sounding experiments

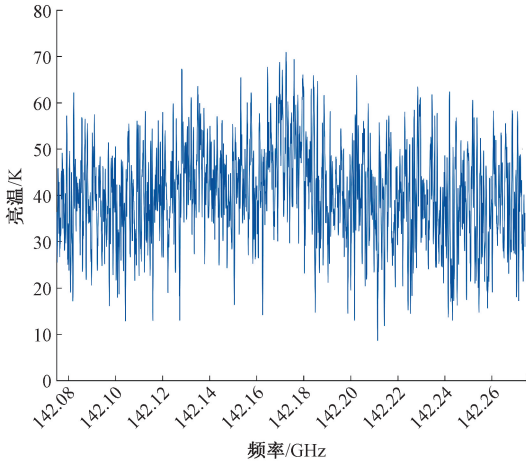
温度谱线,并在 ARTS 中通过欧洲中期预报系统的 ERA5 数据仿真当日观测定标后的目标谱线亮温曲线作为对比参考,结果如图 7(a)所示。系统设计观测通道数为 16 384,设置两组对比组分别为:谱仪中 ADC 直采信号进行 16 384 点 FFT 的结果定标后得到亮温结果,如图 7(b)所示;对直采信号进行四倍抽取但不进行滤波并进行 16 384 点 FFT 得到的亮温结果如图 7(c)所示。



(a) 谱分析系统结果
(a) Result of spectrum analysis system



(b) 直接进行 16 384 点 FFT 结果
(b) Results of raw data



(c) 4 倍抽取后进行 16 384 点 FFT 结果
(c) Results of four-times decimated data

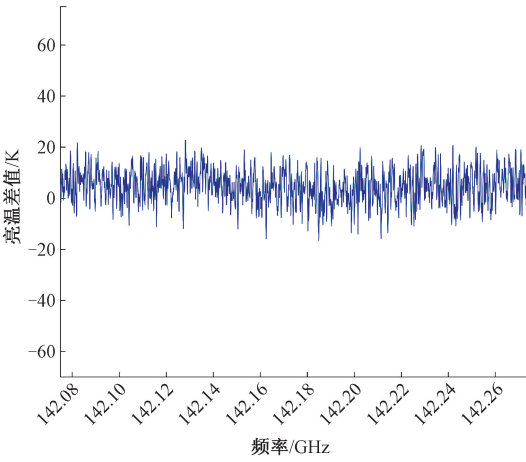
图 7 定标后的亮温结果

Fig. 7 Brightness temperature results of calibrated data

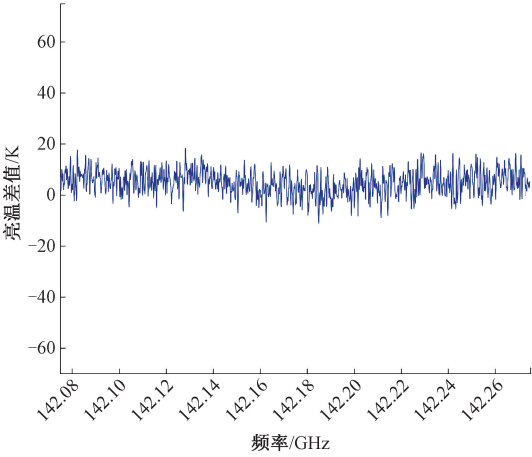
在图 7(a)亮温曲线中可观测到微弱的吸收峰,其中蓝色实线为经过两点定标后获得的大气臭氧吸收谱线对应亮温,虚线为相应频段 ARTS 仿真结果;图 7(b)中结果的积分时间是 7(a)的 4 倍,其谱线更细,趋势与仿真数据更加拟合;图 7(c)中进行抽取,积分时间与图 7(a)相同,仍能勉强观测到吸收峰,但亮温曲线波动更大,噪声更加明显。

图 8 中给出了各组定标亮温与仿真值作差的结果,其平均值与方差如表 1 所示。均值上各组间相差不大,考虑实验时环境温度较低,臭氧吸收峰不突出,使得目标频点与附近带宽内亮温未有太大差距,进而使得与仿真值作差结果平均值也相近。标准差上,与直接运算组相比,谱分析系统组与抽取组与之相差约 1.66 K 和 5.03 K,谱分析系统可有效降低噪声。

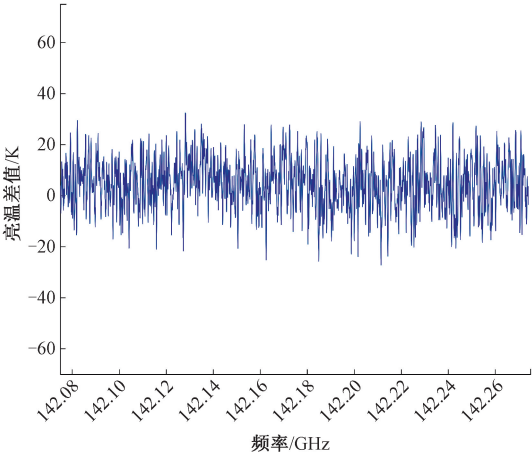
由系统的噪声温度、带宽与积分时间可根据如式(1)所示灵敏度公式得到的系统的理想灵敏度为 2.32 K。对各通道分别进行灵敏度计算可得到如图 9 的结果。



(a) 谱分析系统结果
(a) Result of spectrum analysis system



(b) 直接进行16 384点FFT结果
(b) Results of raw data



(c) 4倍抽取后进行16 384点FFT结果
(c) Results of four-times decimated data

图 8 与仿真结果的亮温差值

Fig. 8 Brightness temperature difference between measurement and simulation results

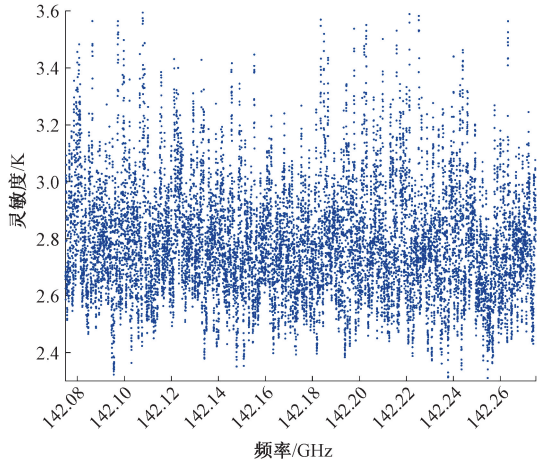
表 1 不同条件下亮温差值的平均值与标准差

Table 1 The mean and standard deviation of brightness temperature difference under different conditions

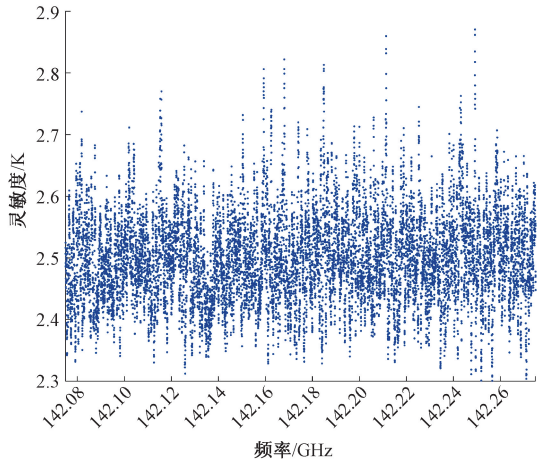
数据	亮温差值 均值/K	亮温差值 标准差/K
谱分析系统数据	4.77	6.27
原始数据	4.75	4.61
抽取后	4.89	9.64

由于通道响应不同,各个子通道之间灵敏度存在差异与波动,对子通道灵敏度计算均值和标准差^[16],结果如表 2 所示。由结果可见,对数据直接抽取后,积分时间改变,灵敏度也会改变对应倍率;使用谱分析系统对数据进行处理,可保证系灵敏度的稳定,同时子通道间灵敏度波动基本小于 0.2 K。

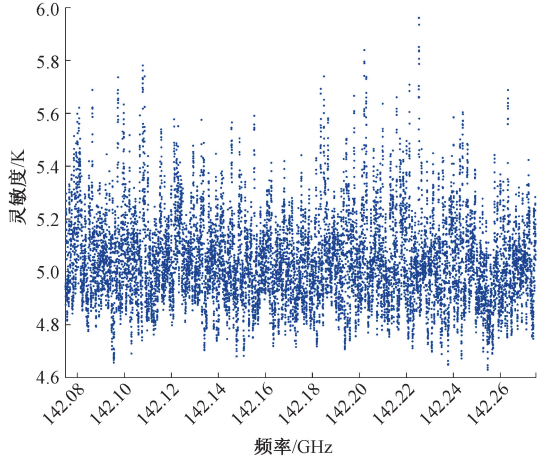
使用谱分析系统可有效滤除噪声干扰成分,在减少一



(a) 谱分析系统数据通道灵敏度
(a) Channel sensitivity calculated from data of spectrum analysis system



(b) 直接进行16 384点FFT数据灵敏度
(b) Channel sensitivity calculated from raw data



(c) 抽取后进行16 384点FFT结果
(c) Channel sensitivity calculated from four-times decimated data

图 9 通道灵敏度结果

Fig. 9 Results of channel sensitivity

定比例的积分时间的情况下获得相近的灵敏度。系统可充分应用数字谱仪内 FPGA 并行运算能力,调整信号速

表 2 不同条件下通道灵敏度均值和标准差
Table 2 The mean and standard deviation of channel sensitivity under different conditions

数据	通道灵敏度	通道灵敏度
	均值/K	标准差/K
谱分析系统数据	2.77	0.20
原始数据	2.44	0.09
抽取后	5.06	0.23

率,减少运算延迟带来的数据延迟,为谱仪内数字信号处理提供了可行方向。

4 结 论

本文针对臭氧吸收峰较弱,易淹没于噪声等影响地基臭氧微波探测辐射计系统的问题,提出了一种基于FPGA的微波辐射计后端数字谱分析系统。在进行系统设计并在FPGA实现后,使用计算机仿真与大气探测实验进行验证。实验结果表明,谱分析系统对天线接收到的信号进行抽取滤波,利用并行FFT将信号变换至频域并完成功率谱运算,可以实现噪声与时间上的权衡,保证系统的灵敏度,突出臭氧吸收峰,为后续更高速率更多通道数的谱分析系统提供了设计参考。

在未来工作中,将结合原型机FPGA资源占用、功耗等进一步优化系统实现,开展大气臭氧探测实验并使用探测亮度温度曲线反演并分析平流层臭氧廓线分布。

参考文献

[1] 迟雨蕾, 赵传峰. 臭氧卫星遥感反演进展及挑战[J]. 光学学报, 2023, 43: 72-89.
CHI Y L, ZHAO CH F. Progress and challenges of ozone satellite remote sensing inversion [J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43: 72-89.

[2] 张金强, 王振会, 陈洪滨, 等. 地基与星载仪器观测大气臭氧总量分析[J]. 气候与环境研究, 2017, 22: 177-190.
ZHANG J Q, WANG ZH H, CHEN H B, et al. Total ozone column derived from the ground-based and space-borne instruments [J]. Climatic and Environmental Research, 2017, 22: 177-190.

[3] FERNANDEZ S, MURK A, KÄMPFER N. GROMOS-C, a novel ground based microwave radiometer for ozone measurement campaigns [J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2015, 8:3001-3048.

[4] 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.

[5] KA S, OH J J. SORAS, A ground-based 110 GHz microwave radiometer for measuring the stratospheric ozone vertical profile in Seoul [J]. Atmospheric Measurement Techniques Discussions, 2024, 2024: 1-29.

[6] 唐尧, 李波, 左晓亚, 等. 变采样多相滤波器组信道化接收机的实现[J]. 雷达科学与技术, 2018, 16: 226-232.
TANG Y, LI B, ZUO X Y, et al. Implementation of a channelized receiver using polyphase filter bank based on embedded resampling[J]. Radar Science and Technology, 2018, 16: 226-232.

[7] 安宇宇, 刘祖深, 江丹. 5G毫米波大带宽信号内插器设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022, 45: 29-35.
AN Y N, LIU Z SH, JIANG D. Design and implementation of 5G millimeter wave large bandwidth signal interpolator [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45: 29-35.

[8] 孙健, 韩文俊, 凌元. 基于多相滤波的高速滤波器FPGA设计[J]. 遥测遥控, 2018, 39: 27-32.
SUN J, HAN W J, LING Y. FPGA design of high-speed filter based on polyphase filtering[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2018, 39: 27-32.

[9] 刘广康, 刘鹏, 许可. 一种雷达高度计回波模拟器射频带宽自动检测与识别方法[J]. 电讯技术, 2024, 64: 2051-2059.
LIU G K, LIU P, XU K. An automatic detection and identification method of RF bandwidth in radar altimeter echo simulator [J]. Telecommunication Engineering, 2024, 64: 2051-2059.

[10] 李世平, 陈铠, 陈晓东, 等. 基于ADRES处理器的并行FFT设计及实现[J]. 现代雷达, 2022, 44: 59-64.
LI S P, CHEN K, CHEN X D, et al. A design and implementation of parallel FFT based on ADRES[J]. Modern Radar, 2022, 44: 59-64.

[11] 张亚洲, 张超, 王保锐, 等. 实时频谱分析仪中并行FFT算法的FPGA设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2016, 16: 23-26.
ZHANG Y ZH, ZHANG CH, WANG B R, et al. FPGA design of parallel FFT algorithm in real-time spectrum analyzer[J]. Microcontrollers & Embedded Systems, 2016, 16: 23-26.

[12] 辛孟泽. 太赫兹通信系统中的IQ不平衡分析与校正[D]. 成都:电子科技大学, 2024.
XIN M Z. Analysis and correction of IQ imbalance in terahertzcommunication systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.

- [13] 李浩,王厚军,肖磊,等. 高速并行数字调制信号的产生与实现[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44: 110-118.
LI H, WANG H J, XIAO L, et al. Generation and implementation of high-speed parallel digital modulation signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44: 110-118.
- [14] HERSBACH H, BELL B, BERRISFORD P, et al. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2020, 146(730): 1999-2049.
- [15] HE W, WANG Z, WANG W, et al. Sensitivity analysis of microwave spectrometer for atmospheric temperature and humidity sounding on the new generation fengyun satellite [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2023, 16:853-865.
- [16] 许皓文,陆浩,王振占. 高光谱微波辐射计系统中

2 GHz 带宽数字谱仪设计[J]. 电子学报, 2022, 50(6):1472-1479.

XU H W, LU H, WANG ZH ZH. Design of 2 GHz Bandwidth Digital Spectrometer in High-Spectral Mic Radiometer System [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(6):1472-147.

作者简介

许季童,硕士研究生,主要研究方向为被动微波遥感探测技术与应用。

E-mail:xujitong22@mails.ucas.ac.cn

何杰颖(通信作者),博士,研究员,主要研究方向为星载微波辐射计的设计与开发、定标技术以及地球和行星探测中的定量反演。

E-mail:hejieying@mirslab.cn

王新彪,博士,高级工程师,主要研究方向为微波辐射测量研究及辐射计系统研究。

E-mail:wangxinbiao@mirslab.cn