

文章编号: 2095-4980(2013)05-747-06

## K 波段谱分析技术的微波辐射计方案设计

张江漫<sup>a,b,c</sup>, 张升伟<sup>a,b</sup>

(中国科学院 a.微波遥感技术重点实验室, 北京 100190; b.空间科学与应用研究中心, 北京 100190; c.研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 以探测大气中水汽吸收谱线为应用背景, 系统设计了一种基于快速傅里叶变换(FFT)的宽带的谱分析技术的微波辐射计。阐述了谱分析技术的微波辐射计的设计原理, 详细介绍了系统结构设计、接收机方案设计和谱仪的方案设计, 并分析了系统的主要技术指标、正交接收机指标及谱仪的设计。该系统可实现的辐射计探测频率为 22.235 GHz, 设计带宽达到 500 MHz, 谱分辨力为 60 kHz。

**关键词:** 辐射计; 谱分析技术; 快速傅里叶变换; 现场可编程门阵列

**中图分类号:** TN61

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11805/TKYDA201305.0747

## Scheme design of the K band spectrum analysis microwave radiometer

ZHANG Jiang-man<sup>a,b,c</sup>, ZHANG Sheng-wei<sup>a,b</sup>

(a.Key Laboratory of Microwave Remote Sensing, Beijing 100190, China; b.Center for Space Science and Applied Research, Beijing 100190, China; c.Graduate University, Beijing 100049, China, Chinese Academy of Sciences)

**Abstract:** A broadband Fast Fourier Transform(FFT) algorithm radiometer is designed in order to detect the absorption spectrum of the atmospheric water. The design principle of the radiometer, the system structural design, the project design of the receiver and the spectrometer are introduced in detail. The main technical indexes of the orthogonal receiver and spectrometer are analyzed. This system can be used to detect the frequency of 22.235 GHz, and its designed bandwidth can reach 500 MHz with the spectral resolution of 60 kHz.

**Key words:** radiometer; spectral analysis technology; Fast Fourier Transform; Field Programmable Gate Array

辐射计探测目标的亮温度是频率的函数, 传统的微波辐射计一般是全功率型的, 天线接收的信号经过放大、滤波、检波和再放大后, 以电压的形式输出。对微波辐射计的输出电压进行温度绝对定标, 即建立输出电压与天线视在温度的关系之后, 就可确定天线视在温度, 也就可以确定所观测目标的亮温度<sup>[1]</sup>。常规的微波辐射计通常为一个窄带系统, 观测物体在频率通道内的平均亮温。对于某些特定的应用来说, 需要在一个宽谱段范围内观测不同频率通道内的对应亮温, 微波谱辐射计便应运而生。与此同时, 由于大气中某些特定气体的谱线很窄, 例如临边探测设备中探测等温层中的水蒸气, 就需要事先进行高分辨率的谱分析, 从而产生对高分辨率的微波谱分析辐射计的需求<sup>[2]</sup>。

近年来, 随着数字电子技术的高速发展, 以及对太赫兹(THz)技术的深入研究, 利用太赫兹谱段丰富的分子吸收谱线, 在对地观测领域进行大气痕量气体探测, 以及在空间探测领域进行宇宙行星际分子云成分探测的需求越来越强烈。这些新的应用有力促进了微波谱分析辐射计的发展, 美国 NASA 的 EOS-Aura 卫星所搭载的临边辐射计(MLS)中, 采用谱分析技术的微波辐射计已经得到应用。

目前, 微波谱辐射计的后端谱仪已经发展为多种形式<sup>[2]</sup>, 主要有以下几种:

- 1) 线性调频变换光谱仪(Chirp Transform Spectrometer, CTS);
- 2) 声光光谱仪(Acousto-Optical Spectrometer, AOS);
- 3) 自相关光谱仪(Autocorrelation Spectrometer, ACS);
- 4) 滤波器组光谱仪(Filter bank Spectrometer);

### 5) 傅里叶变换频谱仪(FFT Spectrometer, FFTS)。

微波中的谱仪可以用来测量大气中的各种分子谱线, 频率越高, 谱线就越宽。早期的微波谱辐射计的后端采用滤波器组的形式代替简单的平方检波器, 实现若干个相邻频率通道的观测。而 CTS 基于线性调频滤波器, 利用卷积使得谱线从时域变换到频域。线性调频滤波器设置了光谱仪的带宽和分辨率, 200 MHz 带宽是最高限制。在过去的 30 年里实现的宽谱光谱仪是靠 AOS 通过相干光线的衍射完成的, AOS 因为可以使用更宽的带宽和大量的频谱通道而得到了广泛应用<sup>[3]</sup>。但是随着接收机的频率越来越高, 带宽越来越宽, AOS 在通道个数上受到了限制, 并且在系统稳定性、动态范围和花费上都遇到了问题。与此同时, 数字技术的运用使得数字相关谱仪受到了青睐, 它主要是通过硬件寄存器来得到连续的谱线, 并且对相关函数进行傅里叶变换得到信号的谱线。ACS 已经可以实现在单一设备中达到 500 MHz 的带宽和 1 000 个通道分辨率, 但仍然受限于带宽。

模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)采样速率的快速提高以及现场可编程门阵列(FPGA)能力的大幅提升, 使得从接收机接收到的中频信号直接数字化, 并在 FPGA 中使用傅里叶变换得到其频谱成为可能。这大大改善了基于傅里叶变换的谱仪只能实现 50 MHz 带宽和 1 024 个通道的分辨率的状况, 这也使得傅里叶变换谱仪开始显现出优势。如果使用 FFT 模块, 它会比自相关谱仪更高效, 在相同计算能力下, 它将比自相关谱仪得到更高的频谱分辨率。

目前, 国际上已经利用纯数字手段、FPGA 技术和 Acqiris 信号分析仪, 实现了具备连续谱线测量能力的光谱仪。短短几年, FFTS 就发展成为相关接收机后端处理的新标准, 特别是在毫米波和亚毫米波段, 它可以在一块小的电路板(100 mm×160 mm)上实现拥有上千个频谱通道的高瞬时带宽。2003 年, FFTS 只能实现 2×50 MHz 的带宽和 1 024(1 k bit)的频率通道; 2007 年实现了 1.5 GHz 带宽和 8 k bit 频率通道; 2009 年采用最新的 8/10 bit ADC 实时实现了 2.5 GHz 带宽和 32 k bit 的频率通道<sup>[4]</sup>。到现在 FFTS 可以满足天文无线电所有的观测需求, 它可以实现毫米波到亚毫米波观测中宽带的处理并且实现高分辨率(kHz 范围)。FFTS 中 ADC 的 8/10 bit 量化使得 FFTS 测量拥有大的动态范围, 因而可以应用于行星观测中。鉴于国内采用谱分析技术的微波辐射计领域仍属空白, 本项目以传统微波辐射计为理论基础, 实现了国内拥有自主知识产权的具有谱分析技术和功能的微波辐射计, 为水汽临边探测奠定了理论和实践基础。

## 1 谱分析辐射计的设计原理

### 1.1 传统辐射计的设计原理

传统的微波辐射计是高灵敏度的接收机, 它通过天线观察场景的电磁特性并经过天线送到接收机, 应用辐射传递理论建立两者的关系为  $P'_A = kT'_A B$ , 其中  $k$  是玻尔兹曼常数,  $B$  为噪声带宽。天线温度  $T'_A$  综合考虑了入射到天线的辐射强度和天线结构本身的自发射, 辐射计的功能就是测量  $T'_A$ 。辐射计的传输函数表示  $T'_A$  和输出电压  $V_{out}$  之间的关系。通过检波输出电压即可确定  $T'_A$ , 这就是辐射计的测量原理<sup>[1]</sup>。

传统全功率型微波辐射计的设计框图如图 1 所示。

传统辐射计包括天线、超外差接收机、检波器和低通滤波器 4 部分。天线提供的功率通常是宽带噪声, 其带宽覆盖大于接收机的带宽  $B$ 。射频放大器的功能是对输入信号进行滤波, 采用方法是对包含中心频率  $f_{RF}$  在内的带宽  $B$  内的射频频率分量进行放大。混频器和中频放大器将射频信号变成同样带宽的中频信号, 并提供进一步放大。超外差接收机的输出通过后端检波和低频放大后就可以得到输出的电压值  $V_{out}$ 。

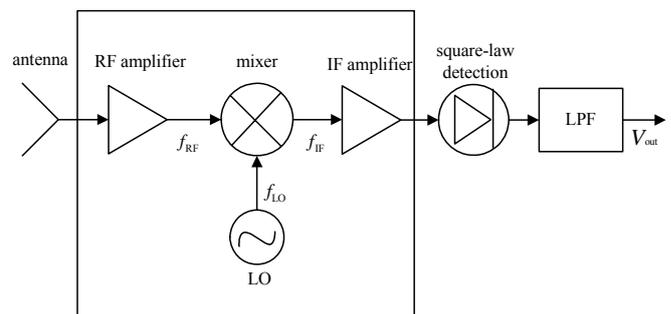


Fig.1 Block diagram of total power radiometer  
图 1 全功率辐射计框图

### 1.2 谱分析技术的辐射计设计原理

本文设计的基于谱分析技术的微波辐射计不同于传统的微波辐射计, 其目的不再是测量检波输出电压  $V_{out}$ , 而是直接计算其功率谱。其设计框图如图 2 所示。

其设计原理源自传统微波辐射计, 天线和超外差接收机部分与传统微波辐射计相同且可以共用。其区别是中频输出不再进行传统的检波和低频放大, 而是直接计算其功率谱。

1.3 功率谱计算实现原理

对确定性信号的傅里叶变换是其频率域分析研究的理论基础，但对于随机信号，其傅里叶变换是不存在的，所以研究的是其功率谱。根据维纳-钦定理，信号的功率谱和其自相关函数服从一对傅里叶变换的关系，公式如下<sup>[5]</sup>：

$$P_{xx}(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} r_{xx}(m)e^{-j\omega m} \quad (1)$$

$$r_{xx}(m) = E[x^*(n)x(n+m)] \quad (2)$$

式(1)为功率谱的定义，对于平稳随机信号，服从各态历经定理，集合平均可以用时间平均来代替，由式(1)还可推出功率谱的另一个定义，推导如下：

将式(2)中集合平均用时间平均代替，可得：

$$r_{xx}(m) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N-1} \sum_{n=-N}^N x^*(n)x(n+m) \quad (3)$$

将式(3)带入式(1)，可得：

$$P_{xx}(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{n=-N}^N x^*(n)x(n+m)e^{-j\omega m} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \left| \sum_{n=-N}^N x(n)e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (4)$$

考虑到观测数据  $x(n)$  是随机信号，需要对计算得到的  $P_{xx}(e^{j\omega})$  取统计平均，即：

$$P_{xx}(e^{j\omega}) = \lim_{N \rightarrow \infty} E \left[ \frac{1}{2N+1} \left| \sum_{n=-N}^N x(n)e^{-j\omega n} \right|^2 \right] \quad (5)$$

上式表明，信号的功率谱就是对信号傅里叶变换的模平方取平均。平稳随机信号的能量无限大，因此是不能进行傅里叶变换的，但实际测量时只能得到有限个观测数据，这相当于给随机信号加了一个矩形窗。一个有限长信号的能量是有限的，且满足傅里叶变换存在的条件，因此可以使用式(5)计算其傅里叶变换。

忽略式(5)中求统计平均的运算，观测数据为  $x(n)$ ， $0 \leq n \leq N-1$ ，得：

$$P_{xx}(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (6)$$

由式(6)可知，信号功率谱可通过取信号傅里叶变换的模平方得到。本文拟采用 FFT 变换实现信号的傅里叶变换。功率谱计算的实现框图如图 3 所示。

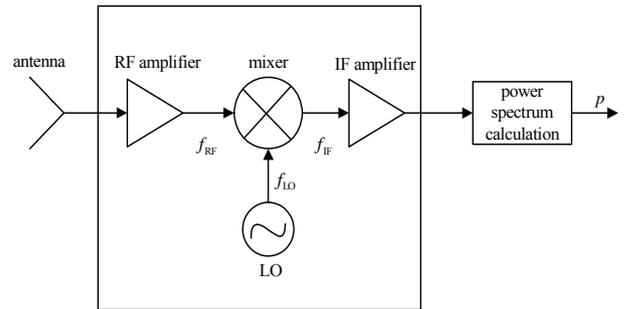


Fig.2 Block diagram of spectrum analysis microwave radiometer  
图 2 谱分析技术的微波辐射计

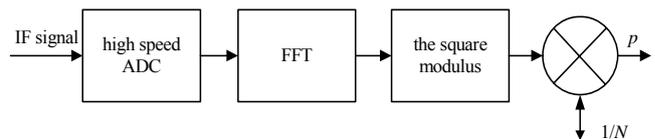


Fig.3 Power spectrum calculation  
图 3 功率谱计算

2 谱分析技术的微波辐射计整体设计方案

2.1 辐射计主要技术指标

本辐射计系统的主要技术指标如表 1 所示。针对上述指标要求，完成采用谱分析技术的 K 波段微波辐射计的方案设计，包括正交接收机方案设计以及后端谱分析仪方案设计。

2.2 辐射计整体设计框图

本设计中的辐射计包括传统的全功率微波辐射计和微波谱辐射计。系统设计主要包括天线、超外差接收机以及后端数据处理部分。2 种辐射计的区别主要在于后端的数据处理部分。超外差接收机输出分为 I 路、I 路

表 1 本辐射计系统主要技术指标

Table1 Main technical indexes of the radiometer system	
parameters	index
detection frequency	22.235 GHz
bandwidth	500 MHz
3 dB beam width	≤5°
bright temperature resolution	≤0.2k
calibration precision	≤1.0 k
spectral resolution	60 kHz
Leaf Water Potential (LWP)	accuracy: +/- 20 g/m <sup>2</sup> RMS noise: 5 g/m <sup>2</sup> RMS
Integrated Water Vapor (IWV)	accuracy: +/-0.05 kg/m <sup>2</sup> RMS noise: 0.01 kg/m <sup>2</sup> RMS

耦合、Q 路以及 Q 路耦合 4 路，其中 I、Q 两路主要用于传统的全功率型微波辐射计，I 路耦合和 Q 路耦合两路主要用于微波谱辐射计。

辐射计系统框图如图 4 所示。天线观测定标体一次，进行实时定标；相关接收机完成射频信号的下变频、放大及滤波处理；相关接收机输出 4 路信号，其中 I、Q 两路正交信号输出至谱分析仪进行 FFT 处理，用于水汽吸收谱线探测，另外两路信号输出至全功率接收通道，用于探测大气湿度计含水量；数据处理终端用于显示系统工作状态及实时探测结果。

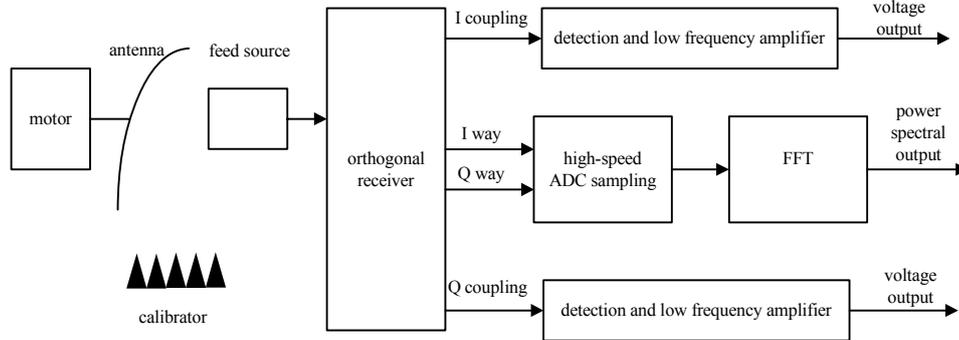


Fig.4 System chart of the K band spectrum analysis microwave radiometer  
图 4 K 波段谱分析技术微波辐射计系统框图

### 2.3 正交接收机方案设计

微波辐射计是高灵敏度接收机，与雷达不同之处在于雷达可以发射信号并接收回波信号，信号功率较大；而辐射计测量物质的热电磁发射，接收信号比较微弱，会淹没在噪声中，所以其对接收机的灵敏度和增益放大倍数的要求较高。本辐射计的应用背景是测量大气中水汽吸收谱强度分布，在微波波段(1 GHz~300 GHz)，水汽在 22.235 GHz 具有转动吸收谱线，通过在最大吸收处及其附近频率的辐射测量可以确定大气的水汽总量及其吸收谱线。

正交接收机的主要技术指标<sup>[6]</sup>如表 2 所示。

表 2 正交接收机的主要技术指标  
Table2 Main technical indexes of the orthogonal receiver

parameters	index
noise factor	$\leq 5$ dB
the system net gain	90±1 dB (the maximum, AGC without decay)
gain adjust range	$\geq 10$ dB (regulation voltage: from 0 to +5 V)
output p-1	$\geq 12$ dBm
output clutter suppression	$\geq 40$ dBc ( $\leq 20$ MHz, and $\geq 750$ MHz)
the output amplitude balance of two ways	$\leq 2$ dB
input port	waveguide WR34, flange UG-381/U
output port	SMA-K
power supply	+12 V, -12 V
power control form	feed through capacitor

本接收机采用超外差接收机，系统设计主要包括射频放大、混频、中频放大 3 个主要部分，设计框图<sup>[7]</sup>如图 5 所示。天线接收频率为 22.235 GHz，误差为±0.25 GHz。射频放大和中通滤波器的主要作用是放大信号和干扰，滤除不想要的频带外信号，削弱非常强的信号，起到带外抑制的作用。混频器与本振连接，将信号和干扰变到中频。在中频可使滤波器和放大器匹配得更精确以满足需求。中频放大器主要是放大中心信号和干扰，有增益控制的作用。自动增益控制(Automatic Gain Control, AGC)是稳定接收机系统增益的反馈技术。在连续的 AGC 中，接收机的输出电压连续同参考电压比较，并用两电压之差来调节接收机增益，使输出电压保持在恒定的电平上。本接收机的 AGC 控制电压为 0~5 V，可控增益  $\geq 10$  dB。90°电桥的作用是将信号分为正交的 I、Q 两路信号，使后端 ADC 采样时钟由 1 GHz 变为 500 MHz，降低设计成本和难度。由于本接收机接收的信号频率很高，一次变频不能实现，故采用二次变频。其中一本振频率为 17.548 GHz，二本振频率为 4.387 GHz。

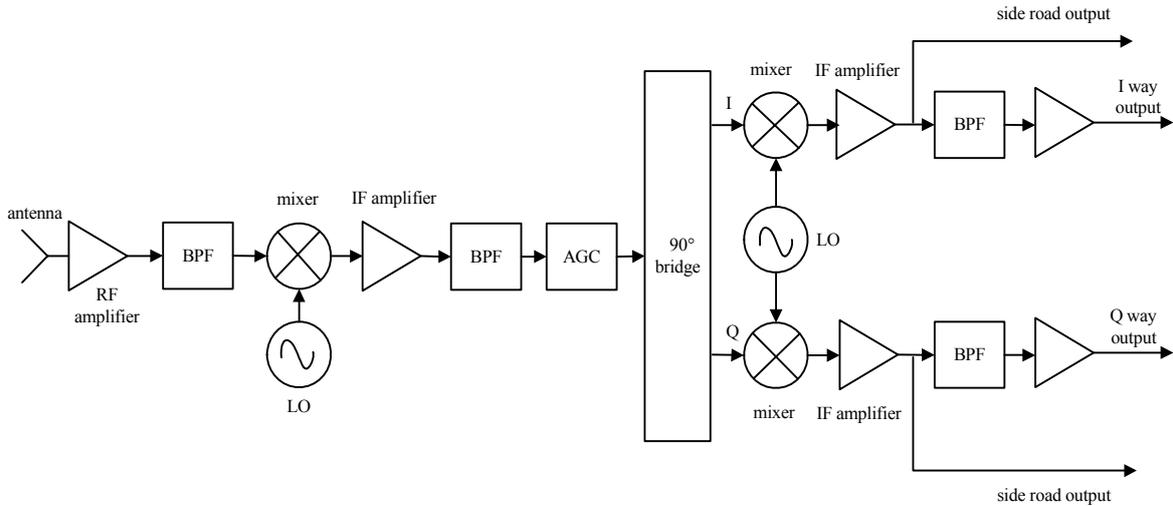


Fig.5 Orthogonal receiver  
图 5 正交接收机

2.4 谱仪方案设计

2.4.1 谱仪主要技术指标

谱仪主要技术指标如表 3 所示。在此谱仪中进行 FFT 变换时,需要处理的信号带宽为 500 MHz。根据奈奎斯特定理,采样频率为 1 GHz,那么采样时间为 1 ns。进行傅里叶变换之后的通道是有用信道的两倍,拟采用 32 768 点的 FFT 变换,所以实际通道数为 16 384,那么采样时间为  $32\ 768 \times 1\ \text{ns} = 32.768\ \mu\text{s}$ 。由于要实时显示,所以 FFT 处理信号的时间为  $32.768\ \mu\text{s}$ 。快速傅里叶变换对信号频谱的检测精确度由采样频率和采样点数决定。假设采样频率为  $f_s$ ,采样点数为  $N$ ,则频率分辨力

为  $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ,此频率分辨力为  $\frac{1\ \text{GHz}}{16\ 384} = 61.035\ \text{kHz}$ 。所以在设计谱仪时,为提高频率分辨力可以从采样频率  $f_s$  和 FFT

处理的点数  $N$  两个方面着手,减小  $f_s$  或者增大  $N$  均可以提高频率分辨力。但是根据奈奎斯特定律,采样频率是由信号带宽决定的,当信号频率越高,带宽越宽时,采样频率越大,若  $N$  不变,则频率分辨力降低。若增大  $N$ ,则进行 FFT 变换时所需的时间增加,根据测不准原理,FFT 的处理时间受到采样时间的限制。所以处理的信号带宽越宽,对谱仪的设计要求也就越高。

表 3 谱仪主要技术指标

Table3 Main technical indexes of the spectrometer	
parameters	index
the input signal bandwidth	500 MHz
the input signal sampling rate	1 Gsamples/s
bit rate of quantization of ADC	8 bit
each spectrum sampling time	32.768 $\mu\text{s}$
FFT processing time	32.768 $\mu\text{s}$
a single channel width FFT processing data	32 k bit
the channel number	16 k bit=16 384
spectrum resolution	61.035 kHz

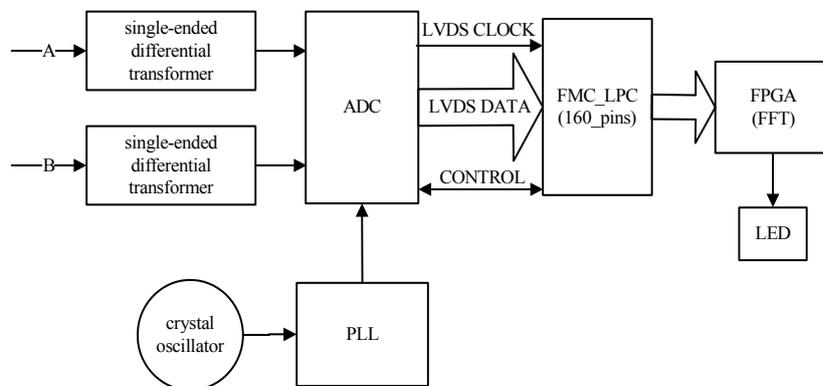


Fig.6 Block diagram of spectrometer implementation  
图 6 谱仪实现框图

### 2.4.2 谱仪的主要技术实现

谱仪的实现主要包括以下几个部分:时钟产生,ADC 采样,FPGA 处理以及串口输出,其实现框图如图 6 所示。变压器将输入信号变换为差分信号,采用低抖动锁相环产生采样时钟,ADC 完成两路信号采样,由 FPGA 完成数据接收和相关计算处理。图 6 为 500 MHz 带宽结构框图,高速采样完成两个通道的信号采样,包含前端信号输入电路和 ADC08D500 芯片<sup>[8]</sup>。FPGA 采用 Xilinx 公司的 K7 芯片,并使用其中具有较多 DSP 计算核的 VSX 系列。外围电路还包括复位电路、时钟产生锁相环电路、时钟分配等。

## 3 结论

本项目通过开展采用谱分析技术的 K 波段微波辐射计系统的研究,详细介绍了以 22.235 GHz 水汽吸收谱线测量为应用背景的新型谱分析技术的微波辐射计的设计与实现。采用高速 AD 转换芯片 ADC08D500 和 Xilinx 公司最新 K7 系列芯片实现 500 MHz 采样和 32 k 的 FFT 处理,完成了谱分析技术的关键技术攻关,并实现了全系统的技术与试验应用,为我国星载谱分析微波辐射计的研制和应用提供了技术先导,奠定了技术基础,具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] F T 乌拉比,R K 穆尔,冯健超. 微波遥感(第 1 卷):微波遥感基础和辐射测量学[M]. 侯世昌,马锡冠,译. 北京:科学出版社,1998. (F T ULABY,R K MOORE,A K FUNG. Microwave Remote Sensing(Vol.1):Microwave Remote Sensing Fundamentals and Radiometry[M]. Translated by HOU Shichang,MA Xiguan. Beijing:Science Press,1998.)
- [2] 刘浩. 干涉式全极化宽谱成像微波辐射计系统研究[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2011. (LIU Hao. System study on the Interferometer Synthetic Aperture Radiometers with polar metric and spectral observation capabilities[D]. Beijing:Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences,2011.)
- [3] BENZ A O,GRIGIS P C,HUNGERBHLER V,et al. A broadband FFT spectrometer for radio and millimeter astronomy[J]. Astronomy and Astrophysics,2005,442(2):767-773.
- [4] B Klein,I Krämer,S Hochgürtel,et al. Fast Fourier Transform Spectrometer[C]// Proceedings of the 20th International Symposium on Space Terahertz Technology. Charlottesville,US:[s.n.],2009:199-201.
- [5] 丁玉美,阔永红,高新波. 数字信号处理—时域离散随机信号处理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002. (DING Yumei,KUO Yonghong,GAO Xinbo. Digital signal processing—discrete random signal processing[M]. Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology Press,2002.)
- [6] STRAUB C,MURK A,KAMPFER N,et al. Development of a 22 GHz correlating radiometer for the observation of stratospheric water vapor[J]. Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment,2008:1-4.
- [7] STRAUB C,MURK A,KAMPFER N. A new ground based water vapor radiometer for measurement campaigns[J]. Atmospheric Measurement Techniques,2010,3:1271-1285.
- [8] 陆浩. 数字相关型全极化微波辐射计的研制、定标和误差分析[D]. 北京:中国科学院空间科学与应用研究中心,2012. (LU Hao. Design,calibration and error analysis for digital-correlation fully polarimetric microwave radiometer[D]. Beijing:Center for Space Science and Applied Research,Chinese Academy of Sciences,2012.)

### 作者简介:



张江漫(1987-),女,湖北省荆门市人,硕士,主要研究方向为微波遥感辐射计.email:zhangjiangman327@126.com.