

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416691

宽带频谱自动监测系统设计^{*}

王晓飞 巩克现 王伟 孙鹏

(郑州大学电气与信息工程学院 郑州 450001)

摘要: 随着卫星通信技术的发展,传统的频谱监测模式难以满足监测需求。为契合现代卫星信号接收机对更大带宽、更高分辨率及更强实时性处理的迫切需求,研制了一种宽带频谱自动监测系统。该系统通过射频直接采样技术与信道化处理,实现了对卫星信号频谱的大带宽、高分辨率显示。实验结果表明,该系统能够对 L 频段信号进行实时监测,生成 L 频段信号的全景频谱,且频谱分辨率小于 1 kHz。上位机通过对频谱数据的深入剖析,该系统能够自动识别并存储信号参数,且其便携性与灵活性设计,使得该系统能够灵活部署多种应用场景,完美契合了现代卫星信号接收机技术发展方向。

关键词: 频谱监测;高分辨率;射频直采;信道化;频谱展示;参数识别

中图分类号: TN914 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.5015

Design of automatic broadband spectrum monitoring system

Wang Xiaofei Gong Kexian Wang Wei Sun Peng

(School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: With the development of satellite communication technology, the traditional spectrum monitoring mode is difficult to meet the monitoring needs. In order to meet the urgent needs of modern satellite signal receivers for larger bandwidth, higher resolution and stronger real-time processing, an automatic broadband spectrum monitoring system was developed. The system realizes the large-bandwidth and high-resolution display of the satellite signal spectrum through RF direct sampling technology and channelization processing. Experimental results show that the system can monitor the L-band signal in real time and generate the panoramic spectrum of the L-band signal with a spectral resolution of less than 1 kHz. Through the in-depth analysis of spectrum data, the system can automatically identify and store signal parameters, and its portability and flexible design make the system flexible to deploy a variety of application scenarios, which perfectly fits the development direction of modern satellite signal receiver technology.

Keywords: spectrum monitoring; high resolution; RF direct mining; channelization; spectrum display; parameter identification

0 引言

频谱监测技术,作为卫星通信领域内不可或缺的技术组成,占据着举足轻重的地位^[1]。传统上,频谱监测依赖于人工操作,借助频谱仪直接捕获并分析信号频谱,通过观察频谱特性来评估目标频段的工作状态^[2]。随着其应用领域的持续拓宽,频谱监测技术的发展呈现出智能化与便捷化的趋势。此外,伴随着高通量卫星技术的飞速发展,对卫星信号接收与监测设备提出了新的要求与挑战^[3]。这些设备正逐步向高瞬时带宽、广信号检测覆盖、高频谱分辨率以及便携化的方向优化升级,以更好地适应现代卫星通信系统

的多元化需求^[4-5]。

国外在频谱监测设备领域的研究已相对成熟,自动化监测方案的应用也较为广泛,如德国的 Rohde Schwarz,美国 Tektronix、Aeroflex,加拿大的 SED 和日本的 Anritsu 等全球顶尖测量设备制造商,均已掌握了相对完善的技术体系^[6-8]。近年来,国内在缩小卫星信号监测技术研究与国外先进技术差距方面取得了重大进展。为满足现代宽带接收机对瞬时大带宽需求,文献[9]提出了一种信道化接收方案,该方案对射频直采的宽带数据进行 1 024 通道划分,实现了 2G 带宽频谱的显示,但谱分辨率仅为 2 MHz。文献[10]采用多级信道化的方式,实现了 500 MHz 带宽信号

的频谱显示,但频谱分辨率也仅为 2.13 MHz,且若想要增加观测带宽,就需要增加信道划分数目,数字信号处理器(digital signal processing, DSP)的消耗也随之增加^[1]。国内通用的频谱监测设备 TFN RMT 系列频谱监测仪,虽然实现了信号频谱的高分辨率显示,但频谱监测仪的实时监测带宽仅为 100 MHz。针对传统监测设备在实时性方面的短板,西安电子科技大学任光亮教授团队和华中科技大学分别从算法结构和组网架构进行优化^[2],但这两种改进的方法均局限于上位机层面的考量,忽视了硬件因素的融入,所以系统无法封装成一体化的设备,进而大幅削弱了其灵活性、便携性以及多样化应用场景中的适应性。

针对以上不能同时兼顾监测带宽与频谱分辨率的问题,本文设计并实现了一套卫星频谱宽带自动监测系统。该系

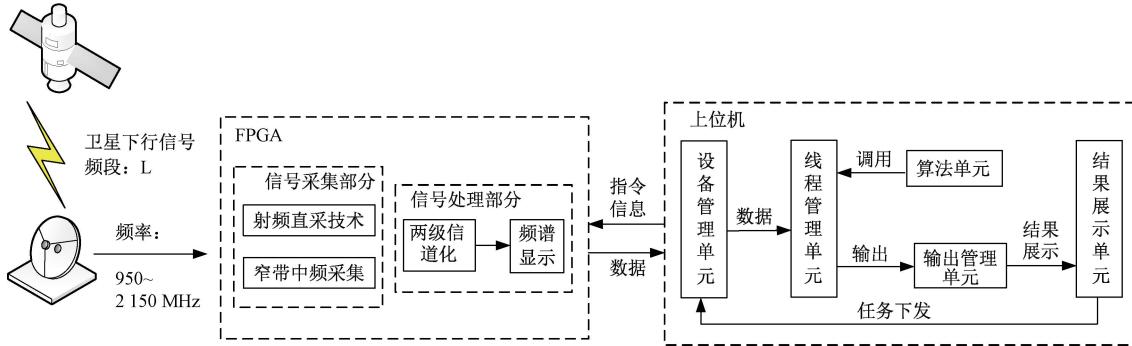


图 1 系统整体功能图

Fig. 1 Diagram of the overall function of the system

系统的频谱展示功能主要在现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现。由于系统要处理的信号的频段范围为 950~2 150 MHz,若采用带通采样对目标信号进行采集,采样率需设置为 6 300 MHz,但低通采样所需的奈奎斯特采样率仅为 4 300 MHz。所以系统首先通过 5 GHz 低通采样,获取 0~2 500 MHz 频带内的宽带数据;然后对低通采样所得到的信号进行两级信道化处理实现数据降速,再分别对各子信道的输出数据做 FFT 用于绘制全景频谱,全景频谱生成后,频谱数据将由万兆网传至上位机用于信号参数识别。

主机端在接收到上传的全景频谱后,就开始进行载波基础信息的扫描检测,识别出载波中心频点及符号速率等基础信息。扫描检测出的载波基础信息将触发线程管理单元下发指令,使系统对各频点信号进行窄带中频采集,并调用算法单元对各窄带频谱数据进行精确的参数识别。识别结果由输出管理单元传递到结果展示单元进行列表化呈现。

2 系统硬件设计

在构建硬件架构体系时,依据 FPGA、ZYNQ XC7Z010CLG400 以及模拟前端等组件的固有功能特性,紧密围绕系统核心需求展开设计思路。将硬件组件划分

统在兼顾资源消耗与系统性能的同时,通过设计合理的信道化方案及快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)点数,保证了系统监测的瞬时带宽大于 1 GHz,且频谱分辨率小于 1 kHz。同时,该系统以 FPGA 中间层板卡(fpga mezzanine card, FMC)接口和 1 U 设备为主题架构,综合考虑了系统的软硬件设计,通过 FPGA 与上位机之间的交互,能够实现对频谱数据进行解析,识别出信号的相应参数。

1 系统的整体结构

系统的功能整体上可分为频谱展示和数据解析两部分,能够实现 L 频段信号频谱的高分辨率显示及信号参数识别,并对识别出信号的参数进行存盘与列表化输出。系统整体功能图如图 1 所示。

为若干功能模块,以实现高效协同与资源优化。其中,宽带信号采集模块与宽带频谱信息处理模块是保证系统能够实现瞬时大带宽、高分辨率频谱显示的关键模块,也是本系统的设计重点。

2.1 系统硬件框图

图 2 为系统硬件的框架设计,图中模拟变频模块输入为 1 路 L 频段的信号,输出为 1 路滤波处理后的 L 频段信号、2 路变频滤波处理后的中心频率为 140 MHz 的中频信号。其中,经模拟前端处理后输出的 L 频段信号提供给模数转换(analog-to-digital conversion, ADC)高速采集子卡进行宽带信号的采集,2 路滤波变频后的中频信号提供给 2 路中频 ADC 子卡进行窄带信号采集。

为满足系统对瞬时大带宽的监测需求,在宽带采集模块采用射频直采技术,以高精度的采集芯片 ADC12DJ3200 搭载高频时钟芯片 LMK04828 为主体架构,以 FPGA 为驱动,实现了对 0~2 500 MHz 频段信号的直接采样。宽带频谱信息处理模块负责完成对宽带采集模块输出的 ADC 数据进行接收、信道化处理,以降低数据速率。

窄带频谱信息处理模块负责完成对窄带采集模块输出的 ADC 数据的载波进行接收、加头处理与输出,该模块的输出数据用于各频点载波的参数识别。时钟管理模块完成芯片工作所需全局时钟的输入输出管理,为系统提供

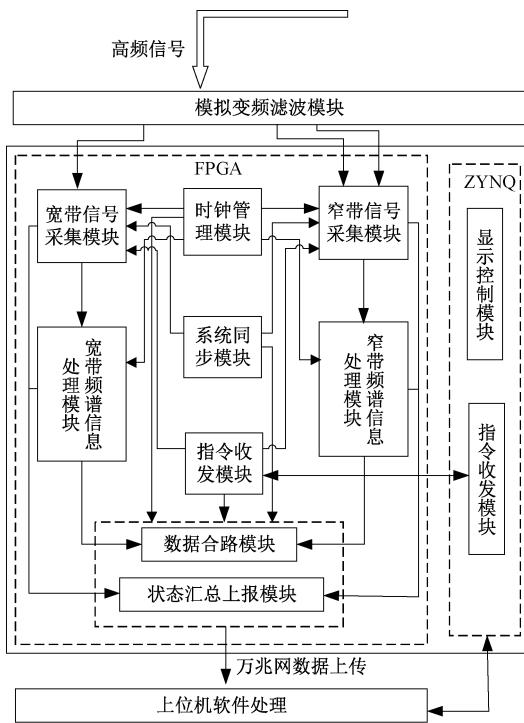


图 2 系统硬件框架设计图

Fig. 2 Schematic diagram of the system hardware framework

可靠的时钟源。系统同步模块负责芯片工作时间上的协调配合，确保各部分在同一时间下开展工作，为各类数据提供准确的时间信息。FPGA 的指令接收模块负责完成软件所下发(ZYNQ 转发)的各类控制指令、功能模块所需参数的接收、转换与输出。状态汇总上报模块负责完成软件所需呈报的系统各部分工作状态信息的接收、汇总与上报。

ZYNQ 的指令收发模块负责完成软件所下发的各类控制指令、功能模块所需参数的接收、转换、使用与转发。显示屏控制模块负责完成系统显示屏的显示控制、输出必要环节所需显示的字符。系统模块负责完成 ZYNQ 芯片系统的管理。

2.2 硬件实现逻辑

以下分别从控制流程和数据流程两个方面对系统的硬件实现逻辑进行描述。

数据流程: ADC12DJ3200 采样模数转换器的采样率能达到千兆级别,能够直接对 10 GHz 以下的输入频率进行采样。采用 ADC12DJ3200 高速采集子卡对模拟前端输出的 L 频段信号进行射频直采,并将采集到的 0~2 500 MHz 频带内的宽带数据通过 JESD204B 接口次传输到一级信道化模块、二级信道化模块、FFT 模块与加头模块进行处理后,通过万兆网进行上传。

窄带中频采样是在 140 MHz 进行,AD9652 最大采样率可达 310 MSPS。系统在全景频谱扫描过程中识别出的各频点信息由上位机传回后,采用 AD9652 采集子卡对各

频点信号进行窄带信号采集，并将各频点采集的窄带数据加同步头上传用于上位机对各频点的信号进行参数识别。

万兆网的数据输入端采用高级可扩展数据流接口(advanced extensible interface-stream, AXI-stream),该接口对接至内部的高级可扩展接口先入先出缓冲器(advanced extensible interface-first in, first out, AXI-FIFO)。在数据发送需求发生时,用户仅需遵循既定的时序规范,并按照用户数据报协议(user datagram protocol, UDP)的标准传输数据报文。硬件数据流程设计如图3所示。

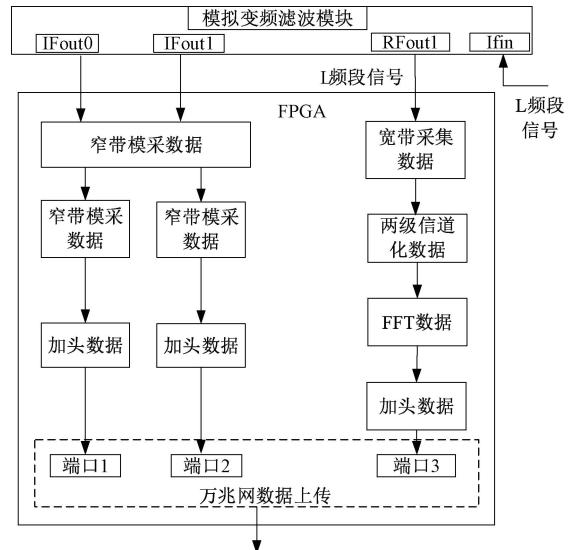


图 3 硬件数据流程设计

Fig. 3 Hardware data flow design

控制流程：系统硬件控制流程如图 4 所示，主机应用程序通过千兆网络与 ZYNQ 处理器相连，向 ZYNQ 中的指令处理模块发送控制指令。这些指令经过识别与转换后，根据需求被分别通过通用异步收发器（universal asynchronous receiver/transmitter，Uart）、串行外设接口（serial peripheral interface，SPI）等多种通信接口，精准地

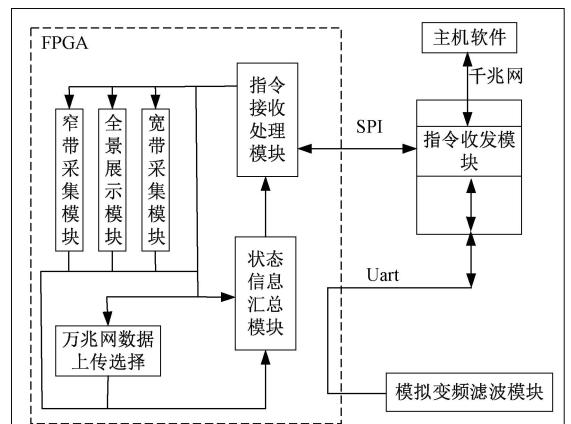


图 4 硬件控制流程设计

Fig. 4 Hardware control process design

分发至各个模块。一旦各模块接收到相应的指令并执行完毕后,它们将各自的状态信息回馈至 ZYNQ 的指令处理模块。随后,该模块将收集到的状态信息整合并传递给主机软件,实现对整个系统的有效监控与管理。

2.3 系统信道化设计方案

由于宽带射频直采输出的数据流的数据速率过高,需采用信道化的方式对其进行处理,以确保 FPGA 能够以相对较低的速率实现信号处理^[13-15]。

为提高频谱分辨率,可以选择增加通道划分以降低单通道的采样率,也可选择增加单通道的 FFT 点数,但二者都不可能无限增加。尤其是前者,通道划分越多,子信道带宽越窄,滤波器设计难度加大。若对信道化后的数据再一次进行通道划分,各通道的输出采样率将大大降低,进行相应的 FFT 运算后,频谱分辨率将大大提高。

本系统采用两级信道化处理实现数据降速,滤波器设计采用多相滤波结构。系统目标信号的频带范围为 950~2 150 MHz,信道化处理模块的输入是由 5 GHz 高采样率驱动的数据流。在两级信道化的原型滤波器设计中,低通 FIR 滤波器的处理带宽均为滤波器通带长度的 2 倍,各相邻通道的划分方式采用 50% 交叠,利用相邻子信道滤波器

过渡带互补的特性,在全景频谱拼接的过程中实现平滑过渡。基于原型滤波器设计及交叠结构,为防止信号发生混叠,信道划分数目至少为抽取倍数的两倍。为保证能够进行 FFT 快速变换,划分的通道数需要是 2 的幂次方。表 1 为一级信道化不同信道划分数目的对比。若选择 32 通道划分,则单通道的处理带宽高达 312.5 MHz,但目前主流的 FPGA 芯片的处理时钟都在 300 MHz 左右,32 通道划分则需要换用时钟更高的芯片,成本也随之增加;若采用 128 通道划分,单通道的处理带宽为 78.125 MHz,但过低的采样率会抑制处理速度,计算资源不能充分被利用。因此一级信道化选择 64 通道划分的方式,单通道的处理带宽为 156.25 MHz,既符合 FPGA 的处理速度要求,乘法器等资源消耗也适中,在此基础上对各信道进行二次划分。表 2 为二级信道化不同方案的对比。为保证两级信道化输出的频谱分辨率达到 1 kHz 以下,若在 FFT 模块做 65 536 点 FFT 的情况下,二级信道化的抽取的倍数至少应为 4 倍,此时单通道的采样率降为 39.0625 MHz,各子信道数据输出频谱的分辨率约为 596 Hz。因此,二级信道化结构选择 4 倍抽取的方式即可满足系统的分辨率小于 1 kHz 的要求。

表 1 一级信道化方案对比

Table 1 Comparison of first-level channelization schemes

信道数目	抽取倍数	单路采样率/ MHz	信道带宽/ MHz	处理带宽/ MHz	乘法个数/ DSP
128	64	78.125	39.0625	78.125	2 432
64	32	156.25	78.125	156.25	1 088
32	16	312.5	156.25	312.5	480

表 2 二级信道化方案对比

Table 2 Comparison of secondary channelization schemes

信道数目	抽取倍数	单路采样率/ MHz	信道带宽/ MHz	处理带宽/ MHz	乘法个数/ DSP
8	4	39.0625	19.53125	39.0625	60
4	2	78.125	39.0625	78.125	22

因此,本系统一级信道划分采用 64 通道划分的方式,二级信道化采用 8 通道划分,以实现对射频直采得到的数据进行降速。对二级信道化输出的数据流进行 65 536 点 FFT 处理,以满足系统能够实时监测 1.2 GHz 带宽信号且频谱分辨率小于 1 kHz 的需求。

3 系统软件设计

3.1 系统软件框架

为实现系统对频谱数据的实时解析功能,在构建系统化的软件框架时,将其逻辑性地划分为线程管理单元、设备管理单元、算法单元、输出管理单元以及展示单元。系

统软件框如图 5 所示。

设备管理单元是系统软硬件交互的桥梁,涵盖了指令调度、网络连接维护与状态监控 3 大模块。指令管理模块整合了所有与硬件交互的指令集,确保命令的准确传达;网络管理模块负责构建与设备的稳固连接,实现数据的高效传输;状态监视模块则持续监察硬件设备状态,及时将信息反馈给上位机。

线程管理单元作为业务处理的中枢,包括缓存调控、线程管理及数据结构优化的功能。缓存调控模块充当数据流动的临时存储站,动态调整内存分配,并有效回收空间资源;线程管理模块负责管理系统的线程生命周期,包

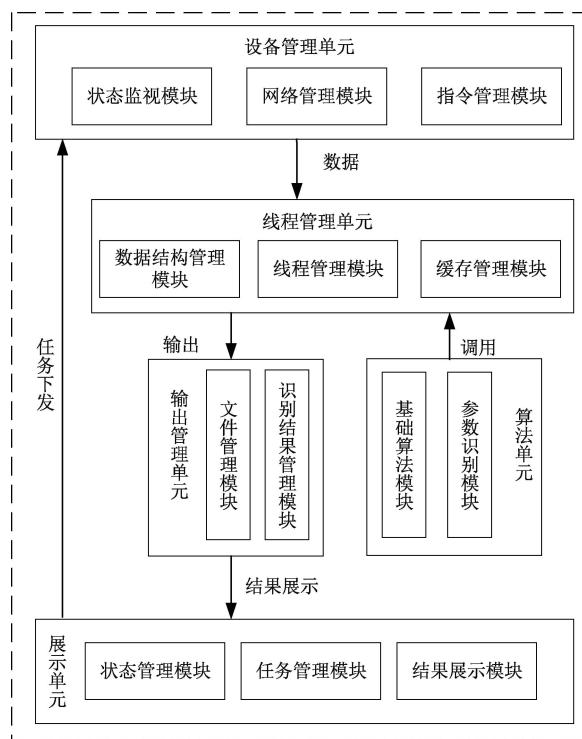


图 5 系统软件逻辑框架设计图

Fig. 5 Schematic diagram of the logical framework of the system software

括功能线程的创建、分配与回收；数据结构管理模块负责对数据的类型、接口、结构进行管理。

算法单元封装了一系列关键算法，是实现系统数据解析功能的关键模块。输出管理单元主要对采集与识别结果进行预处理与标准化，通过数据整合，为后续的数据展示与采集工作提供标准化的接口支持，确保数据的一致性与可用性。展示单元作为人机交互的直接窗口，负责对结果的直观展示，通过界面布局与交互逻辑，提升用户体验，促进信息的有效传达与反馈。

3.2 软件接口设计及任务处理流程

系统软件接口设计如图 6 所示，系统启动后随即执行自动化的硬件初始化流程，并即时构建与这些硬件设备的连接。紧接着，系统接收来自硬件设备的实时频谱数据及状态反馈信息。系统利用网络管理模块将状态信息转递

至状态监视模块进行状态健康度评估，以确认硬件是否维持正常运作状态。一旦发现任何状态变动，状态管理模块会立即触发响应机制，将状态变更通知传达给用户，以便及时采取相应措施。

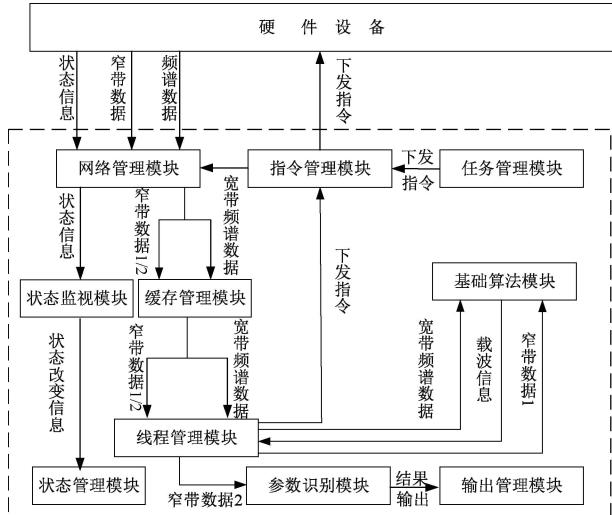


图 6 系统软件接口设计图

Fig. 6 Design diagram of the system software interface

系统正常工作时，首先通过线程管理模块调取存储在缓存管理模块中宽带频谱数据。这些数据在用于频谱直观展示的同时，还进一步触发基础算法模块，初步识别出载波信息后，线程管理模块将调用指令管理模块下发指令对识别出的各频点信号进行窄带数据采集，然后再次通过线程管理模块调取采集的窄带数据 1，使之与算法单元交互，进而精确识别出载波的中心频率与符号速率。

随后，基于精确识别的结果，系统自动触发新一轮的数据采集指令。对于新采集的窄带数据 2，再次利用线程管理模块进行调度，以提取并输出信号的详尽参数信息。这一过程不仅确保了数据处理的精确性，还通过模块化的调用方式提升了系统的灵活性与效率。

4 系统测试与结果分析

系统测试的数据来源可以是信号发生器产生的数据以及卫星天线数据，测试环境如图 7 所示，对系统的瞬时带宽、频谱分辨率及频谱数据的解析功能进行测试。

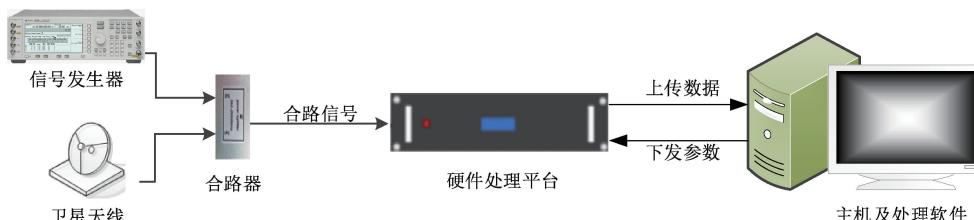


图 7 系统测试环境图

Fig. 7 Diagram of the system test environment

4.1 频谱分辨率测试

测试系统的频谱分辨率时,利用信号发生器 A、B 分别产生两个单频信号同时接入系统。其中,信号发生器 A 产生信号的频率设置为 1.25 GHz, 信号发生器 B 产生信号的频率设置为 1.250 000 596 GHz, 即两个信号发生器产生的两个单频信号的频率相差 596 Hz。信号发生器信号接

入系统后,系统界面显示如图 8 所示。界面的上半部分为频谱图,下半部分为语谱图。从语谱图中可以看出在所观测的界面存在两个信号,且从频谱图可以看出,频率为 1.25 GHz 附近存在两个明显的信号峰值。说明系统能够识别出频率相差 596 Hz 的两个信号,即本系统的频谱分辨率能够达到 1 kHz 以下,符合系统设计的分辨率指标。

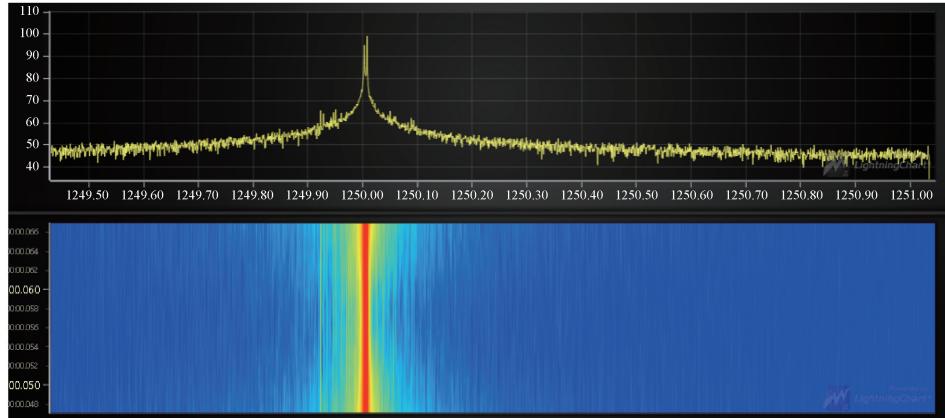


图 8 分辨率测试界面显示

Fig. 8 The resolution test interface is displayed

4.2 瞬时带宽及数据解析功能测试

测试系统宽带频谱显示与参数识别功能时,首先设置信号发生器 A 产生信号的中心频率为 1.6 GHz, 信号带宽为 3 MHz, 载波类型为 FDMA, 调制方式为 QPSK; 信号发

生器 B 产生信号的中心频率为 2 GHz, 带宽为 5 MHz, 载波类型 FDMA, 调制方式为 8 PSK。将两个信号发生器产生的特定参数的信号同时接入系统, 系统界面显示如图 9 所示。

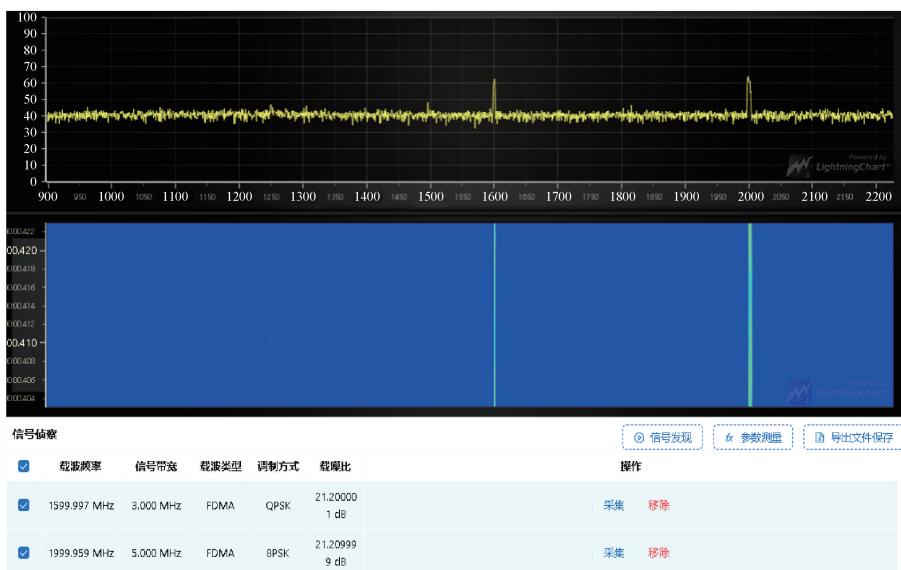


图 9 显示信号发生器产生的信号及参数识别

Fig. 9 Displays the signals generated by the signal generator and the identification of parameters

点击系统界面上的“信号发现”按钮, 系统将自动对 950~2 150 MHz 频带范围内的信号进行频谱感知, 再点击“参数测量”按钮, 系统将对“信号发现”过程中所识别出的信号进行参数识别, 识别出各个信号的中心频率、带宽

等参数, 识别的结果将被列表化地呈现在界面上, 点击“导出文件保存”按钮, 识别结果将被导出并保存到电脑。从图 9 中可以看出, 系统能够对 950~2 150 MHz 的频谱进行监测, 实时显示 1.2 GHz 带宽信号的频谱; 并且从系统

界面的显示结果可以看出,系统能够在两个信号发生器所设定的频率处出现峰值;且对于 A 信号发生器产生信号的参数识别结果,除中心频率与设定值相差 0.003 MHz 以外,其余参数识别均与信号发生器所设定的一致;对于 B 信号发生器产生信号的参数识别结果,除中心频率与设定值相差 0.041 MHz 以外,其余参数识别均与信号发生器所

设定的一致。且中心频率的估计误差,相较于信号发生器所设定的 1.6 GHz、2 GHz,相对误差分别为 0.001 875 %、0.002 05 %。

将系统测试的数据源换为 L 频段的卫星信号,使系统对 L 频段的卫星信号进行全景频谱的展示及信号参数识别,系统界面显示如图 10 所示。



图 10 显示卫星信号及参数识别

Fig. 10 Satellite signal display and parameter identification

从图 10 可以看出,L 频段的信号频点集中在 1 GHz 到 1.35 GHz,系统能够对瞬时带宽为 1.2 GHz 的卫星信号进行实时监测,生成全景频谱并识别出各信号的中心频率及带宽,进一步识别出各频点信号的调制方式、载波类型等信息。

4.3 与国内现有研究成果的对比

以上对系统测试的结果表明,该系统能够对 1.2 GHz 带宽的信号进行实时监测,生成全景频谱,且频谱分辨率能够达到 1 kHz 以下。表 3 为本系统的监测带宽和频谱分辨率与现有研究成果的对比。

从表 3 可以看出,本系统的频谱分辨率远远高于文献[9]与文献[10]中所设计的频谱分辨率;与国内现有的频谱监测设备 TFN RMT716A 相比,频谱分辨率也显著提升。并且,本系统能够对 L 频全频段进行实时监测,远高于现有监测设备的实时处理带宽。同时,该系统兼顾软件设计,能够对频谱数据进行解析,识别出各频点信号,对各

表 3 本系统性能与现有研究成果的对比

Table 3 Comparison of the performance of this system with the existing research results

模型	监测带宽	频谱分辨率
文献[9]	2 GHz	2 MHz
文献[10]	500 MHz	2.13 MHz
TFN RMT716A	100 MHz	5 kHz
本系统	1.2 GHz	596 Hz

频点的信号进行剖析,识别出相应参数,并将信号参数进行列表化呈现,能够清晰直观地将目标信号监测结果呈现给用户。

5 结论

本文设计并实现了宽带频谱自动监测系统,该系统通过硬件处理平台与上位机协同,实现了 L 频段信号全景频

谱的生成及数据采集与解析。且系统所生成的全景频谱的频率范围能覆盖 $950 \sim 2150$ MHz, 频谱分辨率小于 1 kHz, 能够对频谱数据进行准确的参数识别及识别结果进行列表化呈现。与国内现有的频谱监测设备相比, 大大提升了频谱监测的频段范围与频谱分辨率, 满足了现代卫星信号接收机大带宽、高分辨率、实时性强的发展趋势, 推动了国内频谱监测设备的研究进程。且该系统设计便携、灵活, 能够部署在不同的应用场景, 具有较强的应用价值。但本系统所设计的频谱分辨率为一个定值, 后续将进一步优化系统设计, 实现系统能够根据用户需求自适应地调节频谱分辨率, 进一步推动国内频谱监测领域的研究进程。

参考文献

- [1] 魏睿, 张令召. 分布式电磁频谱监测定位系统设计[J]. 电讯技术, 2023, 63(7): 987-992.
WEI R, ZHANG L ZH. Design of distributed electromagnetic spectrum monitoring and positioning system [J]. Telecommunication Technology, 2023, 63(7): 987-992.
- [2] 孙玉雪, 王兴瑜, 孙贵东, 等. 频谱监测设备协同部署优化方法[J]. 中国电子科学研究院学报, 2023, 18(3): 258-263, 288.
SUN Y X, WANG X Y, SUN G D, et al. The method of cooperatively optimized deployment for electromagnetic spectrum monitoring equipments[J]. Journal of China Academy of Electronic Sciences, 2023, 18(3): 258-263, 288.
- [3] XU R Y, DA X Y, HU H, et al. Self-interference cancellation scheme for secure AF satellite communication based on FH-MWFRFT [J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(11): 2050-2053.
- [4] YU B R, ZHANG SH Y, NI Z Y, et al. DRL-based underlay dynamic spectrum access for cognitive satellite networks under spectrum sensing errors[C]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC2022-Fall), 2022: 1-5.
- [5] ZHANG CH, JIANG CH X, JIN J, et al. Spectrum sensing and recognition in satellite systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2502-2516.
- [6] ZONG L, WANG H, LUO G F. Transmission control over satellite network for marine environmental monitoring system [C]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022: 19668-19675.
- [7] XIONG T Y, YAO Y D, REN Y J, et al. Multiband spectrum sensing in cognitive radio networks with secondary user hardware limitation: Random and adaptive spectrum sensing strategies [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(5): 3018-3029.
- [8] ZHANG L. Digital filter algorithm based on morphological lifting scheme and median filter [J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2016, 5(5): 1007-1011.
- [9] 赵鸿. 高分辨率数字信道化器的设计与实现[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2023.
- ZHAO H. Design and implementation of high-resolution digital channelizer [D]. Xi'an: Xidian University, 2023.
- [10] 袁梦云. 基于多级信道化的雷达信号侦察与识别技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2017.
- YUAN M Y. Research on radar signal reconnaissance and recognition technology based on multi-level channelization [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [11] ALMEIDA T B, PEDRINO E C, FERNANDES M M. Complex morphological filtering for serial, parallel, GPU, SoC, PetaLinux and FPGA execution[J]. IEEE Latin America Transactions, 2020, 18 (10): 1675-1682.
- [12] 张逸凡. 面向无线电频谱监测的组网技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- ZHANG Y F. Research on networking technology for radio spectrum monitoring [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [13] 胡杰, 刘凯. 基于 GPU 的卫星信号信道化并行设计与实现[J]. 电子测量技术, 2022, 45(13): 159-163.
HU J, LIU K. Parallel design and implementation of satellite signal channelization based on GPU [J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45 (13): 159-163.
- [14] LIU X, WANG Z K, DENG Q X. FPGA implementation of a reconfigurable channelization for simultaneous multichannel DRM30/FM receiver[J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2017, 63(1): 1-9.
- [15] TIAN Q, JIANG AN P, BI B. A digital channelized receiver with overlapped passband for accurate signal restoration[C]. International Conference on Computer and Communications (ICCC), 2021: 464-468.

作者简介

- 王晓飞, 硕士研究生, 主要研究方向为宽带无线通信、数字信号处理。
E-mail: 2392951637@qq.com
- 巩克现(通信作者), 教授, 主要研究方向为无线通信、信号分析与处理、无线接入、信道编码、电子对抗等。
E-mail: ggkx@163.com
- 王玮, 副教授, 主要研究方向为无线通信、信号处理等。
E-mail: iewwang@zzu.edu.cn
- 孙鹏, 副教授, 主要研究方向为无线通信、消息传递理论、毫米波通信。
E-mail: iepengsun@zzu.edu.cn