

空中飞行平台内微波信号监测设备设计与实现

刘宗杰, 杜江, 陈涛

(中国人民解放军 91851 部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要: 空中飞行平台内雷达模拟辐射源是构建空中目标复杂攻击态势的重要组成部分, 具备模拟飞机、导弹飞行过程中雷达真实搜索、跟踪、电磁辐射的工作过程; 为实现实时有效地监测雷达模拟辐射源的辐射状态, 设计了一型可以安装于空中飞行平台内部的微波信号监测设备; 针对雷达模拟辐射源的信号特点开展了硬件、软件设计与实现, 硬件部分主要包括监测天线、微波部分和数字部分, 设计并开发了能够适配于监测设备硬件的嵌入式软件, 以及能够开展监测设备单机测试验证和遥测信道实时挑路解析的数据显示监测软件; 经过微波信号监测设备的单机测试验证以及空中飞行平台的联合调试验证, 该设备完全适用于平台内部狭小紧凑的安装空间, 实现了在空中飞行平台内部对雷达模拟辐射源在低压和高压两种工作状态下输出信号的实时监测和解析。

关键词: 空中平台; 微波监测; 雷达模拟; 辐射源

Design and Implementation of Microwave Signal Monitoring Equipment in Aerial Flight Platforms

LIU Zongjie, DU Jiang, CHEN Tao

(Unit 91851, PLA, Huludao 125001, China)

Abstract: In airborne flight platforms, simulating the radiation source of radars is an important component of building the complex attack situation of airborne targets, which can simulate the actual search, tracking, and electromagnetic radiation process of radars during the flight of aircraft and missiles. In order to achieve real-time and effective monitoring of the radiation state of radar simulated radiation sources, a microwave signal monitoring device that can be installed inside the airborne platform is designed, which achieves the hardware and software of the device for the signal characteristics of radar simulated radiation sources. The hardware part mainly includes monitoring antennas, microwave components, and digital components. the software includes embedded software for the hardware of monitoring equipment, digital display monitoring software for single machine verification testing and telemetry channel routing analysis of monitoring equipment. After single machine testing and verification of microwave signal monitoring equipment, as well as joint debugging and verification on the airborne platform, this equipment is fully suitable for small and compact installation spaces inside the platform, thus achieving the real-time monitoring and analysis of output signals for radar simulated radiation sources under low and high voltage working conditions.

Keywords: airborne platform; microwave monitoring; radar simulation; radiation source

0 引言

在空中目标复杂攻击态势构建过程中, 通常以空中飞行器前段加装雷达模拟辐射源来模仿敌方来袭导弹, 这类空中飞行器包括可回收的无人机和不可回收的模拟导弹类目标。此类目标需要空中飞行器需具备保持一定速度持续飞行的能力^[1]。在整个态势构建过程中空中飞

行器按照预定航线飞行到指定位置后, 雷达模拟辐射源开机工作, 模拟导弹末端雷达导引头的工作过程, 其中雷达模拟辐射源工作的稳定程度直接关系着态势构建过程的成败, 雷达模拟辐射源须具备与雷达导引头类似的工作流程^[2-7]。雷达模拟辐射源是否能够实时辐射可靠的微波信号通常是整个态势构建过程中关键因素。以往通常在地面架设远距离的微波信号监测设备来对辐射信

收稿日期:2025-04-09; 修回日期:2025-05-19。

作者简介:刘宗杰(1988-),男,硕士,工程师。

引用格式:刘宗杰,杜江,陈涛.空中飞行平台内微波信号监测设备设计与实现[J].计算机测量与控制,2025,33(8):29-36.

号进行监测接收,但受地域及工作环境的影响,监测到的信号质量不高,影响结果的的评定。为了有效检验雷达模拟辐射源的工作状态,设计了一型安装于空中飞行器舱体内部微波信号监测设备,用于雷达模拟辐射源辐射微波信号的实时监测,并将监测数据通过遥测链路下传至地面设备^[8-13]。

在空中飞行器内部加装微波信号监测设备,需要解决的问题有:

1) 空中飞行器内空间狭小,需要适应平台内部狭小的安装空间;

2) 雷达模拟辐射源的辐射天线方向通常朝向空中飞行平台前向且输出功率较大,微波信号监测设备的天线需要接收到雷达模拟辐射源的信号,并且不影响雷达模拟辐射源输出信号的质量;

3) 微波信号监测设备不能独立供电,需由平台内部的电源供电;

4) 微波信号监测设备监测数据的传输接口及数据格式需与平台上成熟的遥测系统相适配。

针对上述问题,专门设计一型安装于空中飞行平台内的微波信号监测设备,进行雷达模拟辐射源信号特征(频率、脉宽、功率等)的监测^[14-17]。空中飞行器内用频设备相对单一,不易受到其他用频设备的干扰,微波信号监测设备是针对空中平台特定信号的侦收,可以对其结构进行优化设计,体积可以做到满足平台内部狭小的空间要求。雷达模拟辐射源输出信号功率较大,监测设备的天线可以安装于辐射源天线的后侧就可以监测到辐射信号,即使偶尔出现多倍重周等信号质量降低的情况,也不影响实际的监测效果。

1 系统结构及原理

1.1 系统工作过程

空中平台飞行前,需要进行系统性的检测,各分系统上电工作后及时将工作状态上报至发控系统,直至飞行结束,各系统一直处于上电工作状态。平台飞行前位于地面时,雷达模拟辐射源处于低压工作状态,此时雷达模拟辐射源输出的信号功率较低。微波信号监测设备一旦上电便立即转入到信号监测状态,实时将监测数据上传至遥测设备。在平台飞行前各设备上电的状态下,微波信号监测设备能将雷达模拟辐射源低压工作时输出的信号监测数据上传至遥测设备。当空中平台起飞后在不满足雷达模拟辐射源开机工作的条件前,雷达模拟辐射源一直处于静默状态,微波信号监测设备此时不能监测到信号。当雷达模拟辐射源满足开机工作条件时会立即开机进行满功率辐射,通常以空中平台起飞后的一段时间为雷达模拟辐射源开机点,微波信号监测设备实时监测雷达模拟辐射源输出的高功率微波信号并将监测数

据上报。

微波信号监测设备的技术状态是以现有的空中飞行平台的技术状态为基础,在平台内部加装微波信号监测设备,实现对雷达模拟辐射源信号的实时监测处理,并在平台内有限空间内,完成监测设备主机和侦收天线的加装。微波信号监测设备的供电线缆最终连接至空中飞行平台供电电源。如图 1 所示,利用空中飞行平台内部成熟的遥测系统,监测设备通过 RS422 串口将监测数据上传至平台内遥测设备,遥测设备将空中飞行平台内所有需要下传的遥测数据经遥测链路传输至遥测地面站,遥测地面站将微波信号监测设备的数据挑路输出给监测终端,监测终端最终实现对监测数据的解析、处理和显示。

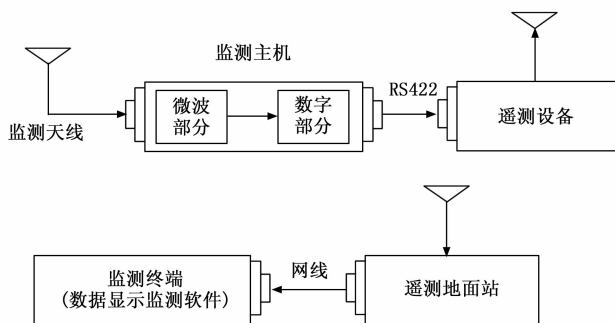


图 1 系统工作流程示意图

1.2 系统结构

微波信号监测设备由监测天线、监测主机及连接线缆组成,设备安装于空中飞行平台内部,监测主机由微波部分和数字部分组成。监测主机位平台内部工作时的状态如图 2 所示,雷达模拟辐射源位于空中飞行平台头舱,为了实现对雷达模拟辐射源飞行过程中辐射信号的实时监测,微波信号监测设备的天线需要尽量贴近雷达模拟辐射源天线端,雷达模拟辐射源高压工作时输出的功率较高,瞬时功率可以达到几十千瓦,监测设备天线安装于辐射源天线后侧,即能监测到辐射的信号,又能使接收到的信号功率尽量小。监测天线接收到信号后传送至微波信号监测设备主机端,监测主机对信号进行实时处理,处理结果包括频谱数据、设备状态、全脉冲数据和分选数据,将处理的结果通过 RS422 串口传送给空中飞行平台内遥测设备。微波信号监测设备供电由空中飞行平台内部电源供电。

1.3 工作原理

微波信号监测设备上电后自动启动信号监测工作,对已装订的任务进行调度处理,之后开始监测雷达模拟辐射源输出信号,并生成全脉冲、辐射源和频谱数据,并将这些监测数据和设备工作状态统一打包上传给空中飞行平台遥测设备,微波信号监测设备如果不断电就一

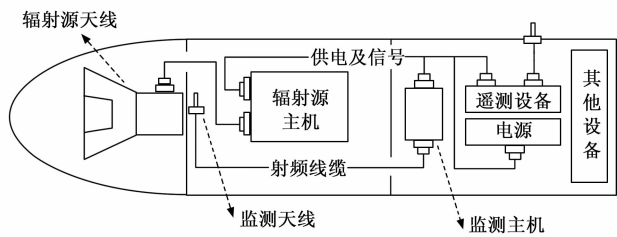


图 2 空中平台内微波监测设备工作状态图

直处于信号监测过程中。微波监测设备的工作流程如图 3 所示。



图 3 微波监测设备工作流程

1.4 系统主要指标论证

雷达模拟辐射源工作频率为 X 波段内几个固定频率, 频率点之间的差值不超过 1 GHz, 微波信号监测设备瞬时工作带宽为 1 GHz 时就可以满足其工作范围; 辐射源的工作脉冲宽度和脉冲重复间隔均固定值, 考虑到工作时的误差范围, 对监测信号的工作指标均进行扩大处理以适应信号的工作范围; 电源考虑采用空中飞行器的固有电源进行供电, 通过功率核算, 能够满足工作要求, 并进行适当的拉偏以适用于平台供电电源电压的波动^[18-21]。

考虑微波信号监测设备需要适应雷达模拟辐射源在低压和高压工作时的辐射功率, 使微波信号监测设备的工作灵敏度和动态范围满足使用要求, 在监测天线架设位置开展了辐射功率测试验证工作, 结果如表 1 所示。

表 1 功率测试结果

序号	辐射源状态	侦收功率	线缆衰减	天线增益	实测功率
1	高功率	$X_1 = 26.86 \text{ dBm}$	$A = 6 \text{ dB}$	$B = 0 \text{ dB}$	$Y_1 \text{ dBm}$
2	低功率	$X_2 = -3.82 \text{ dBm}$	$A = 6 \text{ dB}$	$B = 0 \text{ dB}$	$Y_2 \text{ dBm}$
备注	其中: $Y_1 = X_1 - A - B = -9.82 \text{ dBm}$; $Y_2 = X_2 - A - B = 20.86 \text{ dBm}$				

根据表 1 所示结果, 测量的最低功率为 $Y_2 \text{ dBm}$, 最

高功率为 $Y_1 \text{ dBm}$, 为了满足实际使用需求, 将灵敏度 L 定为低功率工作状态下的实测结果减少约 5 dB, 动态范围 D 在辐射源实际工作范围上增加约 10 dB。通过计算确定设备的灵敏度为 -15 dBm , 动态范围为 40 dB。

2 硬件设计

微波信号监测设备天线安装于雷达模拟辐射源后侧。接收天线采用的是微带天线中的一个振子, 微带天线由导体薄片粘贴在背面有导体接地板的介质上形成, 前端为平面, 需要较小的安装空间。雷达模拟辐射源输出的信号功率较大且信号纯度较高, 采用一个天线振子就能够满足信号功率和质量需求。连接接收天线与微波信号监测设备主机的高频线缆在舱内穿过, 为了防止接收的信号功率过高造成设备损坏, 在线缆的监测主机端串接 30 dB 的衰减器。

微波信号监测设备主机由微波部分和数字部分组成。微波部分用于完成天线接收到的雷达信号变频到中频输出给数字部分进行处理。数字部分自动对微波部分输出的中频信号、检波 VP 信号 (脉冲检波输出) 和 DLVA 信号 (幅度检波输出) 进行采样、处理, 并将处理结果 (包括全脉冲数据、辐射源数据、频谱数据) 及设备工作状态上报。

2.1 关键元器件选型

1) 频率综合器用于微波部分系统集成, 产生中频信号, 选用集成 VCO 的单片 PLL, 用于产生本振信号。这里选用 ST 半导体公司的 STuW81300TR, 该频综芯片具有集成度高、功耗低的特点, 内置的 LDO 芯片能够降低频综芯片对电源杂散的要求, 设计简便, 满足监测设备小型化设计需求。

2) 混频器用于微波部分系统集成, 选用 mini-circuits 公司的 MCA1-12GL+, 该混频器采用双平衡结构形式实现, 具备频带宽、插入损耗小、带内平坦度小的特点。频率工作范围满足监测设备 X 波段工作需求。

3) 高速 A/D 转换器用于数据采集、处理和频率测量, 这里选用 AD9689 芯片, AD9689 是一款双通道、14 位、2.0 GSPS/2.6 GSPS 模数转换器 (ADC)。该器件具有片内缓冲器和采样保持电路, 功耗低, 体积小, 易于使用。能够对高达 5 GHz 的宽带模拟信号进行直接采样。能够满足监测设备对经微波部分处理后中频信号的采样处理需求。

4) FPGA 处理器作为数字部分主控芯片, 选用 XC7Z100-2FFG900I, XC7Z100-2FFG900I 是 Xilinx 公司的一款 Zynq-7000 系列系统级芯片, 主要架构为 ARM Cortex-A9 双核处理器, 工业级工作温度范围为 $-40 \sim 100 \text{ }^\circ\text{C}$; 提供高性能的 ARM 处理器与 FPGA 的结合, 适合复杂的计算和实时处理任务; 可编程逻辑允

许用户根据特定需求自定义硬件电路,既能够适应微波信号监测设备数据处理需求,也满足设备紧凑的空间需求。

2.2 微波部分

微波部分负责将接收到的辐射源信号变频到中频,然后输出给数字部分进行处理。微波部分由变频通道和电源转换模块两部分组成,微波部分的变频通道原理如图 4 所示。

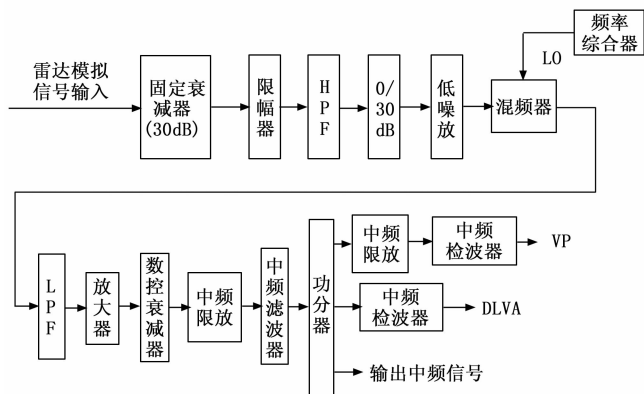


图 4 微波变频通道原理框图

微波部分将从监测设备天线接收到的雷达模拟辐射源信号经固定衰减器、限幅器、高通滤波器、选择衰减器、低噪声放大器,然后与频率综合器输出的综频信号进行混频进入低频信号处理部分,混频之后的信号经低通滤波器、放大器、数控衰减器、中频限幅放大器、中频滤波器,进入功分器后分三路输出。第一路信号输出给中频限幅放大器、中频检波器,输出 VP 信号给数字部分;第二路直接经中频检波器,输出 DLVA 信号给数字部分;第三路直接输出中频信号给数字部分。

2.3 数字部分

数字部分完成雷达模拟辐射源信号频率、脉宽、重周、幅度等测量结果的分析处理,产生信号侦察结果,进行信号分选和判断。具体的信号处理包括数字测频模块、信号分选模块和频谱分析模块等。

2.3.1 数字测频模块设计

数字频率测量采用成熟的数字信道化测频处理技术,通过使用高速 A/D 器件将输入信号进行离散采样和量化处理。数字化脉冲频率测量的频带宽度由 A/D 器件的采样率决定,使用单个 A/D 器件进行脉冲测频能够覆盖的频带范围接近 1 GHz。通过在数字域中设置多个滤波器对输入信号进行滤波处理,单个输入信号只能在有限的几个滤波器引起响应。通过滤波器的响应判断,可以很大程度上降低数字处理的工作量和难度。数字信道化的通常方法是利用短时傅立叶变换(STFT)的形式实现,公式如下:

$$STFT[n, k] = \sum_{m=n}^{N+n-1} s[m] h^*[m-n] e^{-j2\pi \frac{km}{N}}$$

其中: k 为信道数, N 为傅立叶变换点数。短时傅立叶变换的频域解释即为在 A/D 器件采样率所覆盖带宽内设置 N 个等间距分布且性能相同的带通滤波器。

2.3.2 信号分选模块设计

信号分选原理如图 5 所示。它主要由脉冲参数量化器、脉冲参数预处理器、双端口存储器、辐射源信号处理器、时钟产生器、时序信号控制器等所组成。

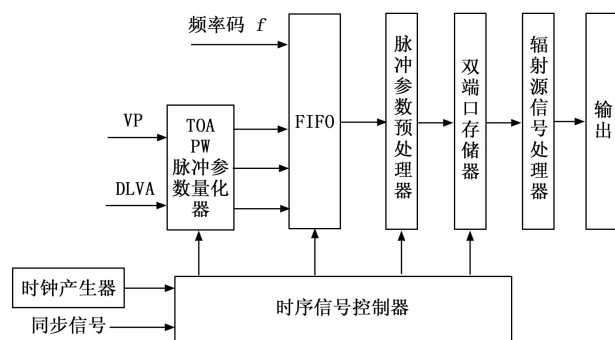


图 5 信号分选原理图

对微波部分提供 VP 信号进行脉冲到达时间(TOA)量化和脉冲宽度(PW)量化,形成的脉冲描述字(PDW)存入 FIFO 中进行平滑, FIFO 输出的数据进行脉冲参数预处理,删除重复多余 PDW 数据,达到降低数据速率的效果。处理之后的数据存入到双端口 RAM 中,用于高速处理器对信号进行分选识别。

雷达模拟辐射源的脉冲到达时需要脉冲进行测量以形成脉冲描述字,包括脉冲载频、脉冲到达时间和脉冲宽度等。而信号分选是基于脉冲到达时间进行重复频率查找和分析的过程,将固定、参差、抖动等重复频率特征的雷达模拟辐射源数据从接收到的脉冲序列中分离出来,这里雷达模拟辐射源为简单的固定脉宽和重频的信号。分离成功的脉冲序列会以脉冲载频、脉冲宽度、重复频率(PRI)等参数记录描述得到辐射源的基本信息。具体分选流程如图 6 所示。

1) 对接收的全脉冲序列数量进行判断,是否满足辐射源正常分选的最小脉冲个数,如果满足数量需求进入分选流程,如果不满足等待脉冲数据的累计;

2) 对脉冲序列依据每个脉冲数据的 TOA 时间,进行差分矩阵计算,得到 PRI 差分矩阵;

3) 选取矩阵中第 1 个 PRI 数据,在矩阵中进行带容差的遍历查找相同的 PRI 数据,将查找的数值和位置记录行程第 k 序列,这里 k 的初值为 1,并将满足该 PRI 的数值在差分矩阵中删除;

4) 判断 k 序列是否可直接用于辐射源参数统计,如果满足就完成统计得到辐射源 k ,如果不满足就判断

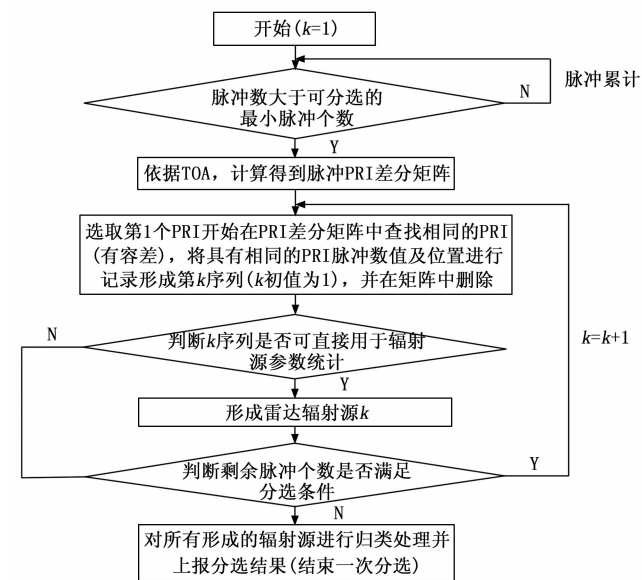


图 6 雷达模拟辐射源分选流程图

差分矩阵中剩余脉冲个数是否满足分选条件；

5) 差分矩阵中剩余脉冲数量如果能够满足辐射源的分选需求, k 自加 1 后执行 3) 开始新的辐射源统计匹配工作；

6) 差分矩阵中剩余脉冲数量如果不能满足辐射源的分选需求, 就对所有形成的辐射源进行归类统计, 上报一次分选结果。

2.3.3 频谱分析模块设计

频谱分析的主要功能是将 A/D 转换器采集到的信号进行多次多点 FFT 变换, 并取极值谱上报。AD 完成微波组件下变频的中频信号采集, 将采集的数字中频信号送至多点流水线频谱分析进行多点 FFT, 输出的流水频谱在频谱数据管理模块中完成叠加累计, 对累计的结果进行多次极大值计算, 最终产生工作周期内的极大值频谱数据。

3 软件设计

3.1 嵌入式软件功能设计

在嵌入式软件设计中, 实现的功能模块主要由通信控制模块、设备自检模块、微波控制模块、频谱信息模块、测频控制模块、DLVA 模块、全脉冲生成模块、信号分选控制模块等组成。主要完成对微波部分和数字部分的控制, 并与外部接口进行通讯, 实时将信号监测处理结果和设备工作状态的上传。

通信控制模块用于将数字组件产生的全脉冲、辐射源、频谱数据和设备工作状态统一打包, 通过串口发送给空中飞行平台的遥测设备。

设备自检模块对监测设备主机的数字部分和微波部分进行状态监测, 同时具备故障诊断和自动检测的功能。

微波控制模块用于监测微波部分工作状态 (表明微

波部分是否正常) 并上传, 以及工作时微波部分的实时温度变化情况。

频谱信息模块用于将中频数据通过 FFT 变换进行分析, 生成的频谱信息送入 FIFO 中进行缓存, 经由通信控制模块通过串口上传频谱信息。

测频控制模块用于数字测频的控制, 将中频信号, 进行实时测频, 得到表征当前频率值的测频码, 并将其换算得到频率值发给全脉冲模块。

DLVA 模块用于将微波部分检波生成的 DLVA 信号通过 ADC 进行采集量化得到的 DLVA 值, 最后发给全脉冲模块。

全脉冲生成模块根据微波部分提供的 VP 信号、测频控制模块提供的频率值和 DLVA 模块提供的 DLVA 值, 最后生成全脉冲描述字。将全脉冲描述字存储在 FIFO 中, 分别给信号分选模块进行分选识别和通信控制模块进行上传。

信号分选控制模块实现对数字部分信号分选模块内各个子模块的控制, 实现对全脉冲数据的测量计算分辨出辐射源的特征信号, 经由通信控制模块上报。

3.2 数据显示监测软件设计

数据显示监测软件具备对监测设备进行单机测试验证的功能和对微波监测设备上传到遥测的数据进行处理显示及记录的功能。实现对雷达模拟辐射源输出信号的全脉冲、频谱、辐射源以及设备工作状态等信息的接收、处理、显示, 并且具有对数据进行分析统计、存储记录和数据回放的功能。

用户使用图形化人机交互界面进行操作处理, 使用了菜单、按钮、复选框、单选框等图形化组件, 用户无需记忆具体的操作命令, 使用起来即简单明了又方便直观。在详细的用户界面设计过程中, 充分考虑用户的操作习惯, 科学、合理地进行功能界面布局, 选用适用于信号监测结果信息全面快速展示的程序图形化组件, 各个组件之间排列整齐、大小协调, 尽量美观, 具体如图 7 所示。软件中提供必要的工作提示信息, 帮助用户理解软件的相关功能, 在进行有影响数据安全的操作前 (如删除命令), 有必要的提示窗口, 使用户可以终止该命令的操作。

按照软件操作界面的功能区域进行划分, 具体包括监测设备状态信息显示界面、全脉冲数显界面、辐射源数显界面、频谱数显界面等内容。

3.2.1 监测设备状态信息显示界面

监测设备状态区对设备通信状态、微波部分工作状态、数字部分工作状态、设备工作温度、数据包序号、脉冲检测的个数、辐射源的个数、时间标志码等状态信息进行实时显示。界面中还可设置微波信号开始监测时间, 根据实际的工作情况, 在状态区中可设置是否选择

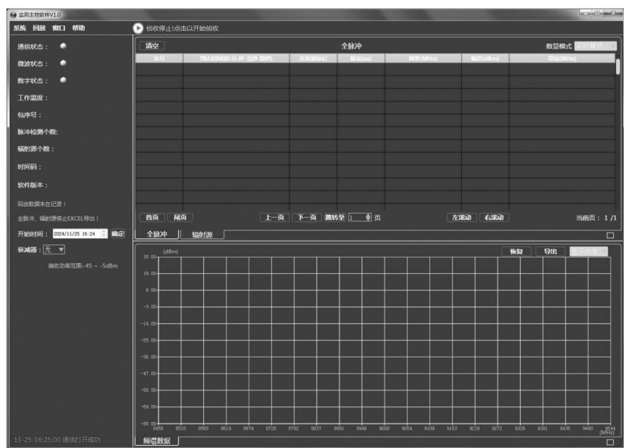


图 7 监测软件界面

连接固定衰减器（与第 2 节叙述的 30 dB 固定衰减器相一致），该衰减器通常在微波监测设备单机功能指标检测时不使用。

3.2.2 回放功能实现

在回放界面设计中，在监测设备开始记录数据解析后自动对所有原始数据进行记录，原始数据包括全脉冲、辐射源、频谱信息等，原始数据保存至监测终端的本地文件中。如图 8 所示，点击“打开文件”按钮可选择保存的文件并点击“开始”按钮进行回放演示。点击“暂停”按钮，回放演示暂停，进度条停止在当前位置。点击“停止”按钮，回放演示停止，进度条归零。点击“x1”复选框，可以选择 1 倍速回放，同时也可以选择 2、5、10、25 倍速进行回放演示。

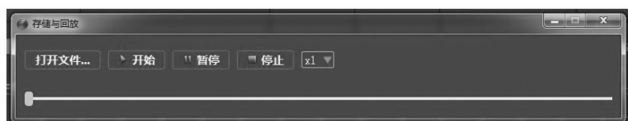


图 8 回放界面

3.2.3 全脉冲数字显示

全脉冲数显界面位于图 7 界面示意图的右上区域。全脉冲显示包含每包全脉冲数据的到达时间、连续波标记、脉宽、频率、幅度等信息。

3.2.4 雷达模拟辐射源数字显示

辐射源显示包含每包辐射源数据的截获时间、辐射源类型、功率、载频、重周、脉宽等信息。辐射源的显示可在滚动刷新模式与合批数显模式之间切换。滚动刷新模式下会对每包辐射源数据单独显示，如图 9 所示；合批数显模式下，软件会根据一定的误差范围对相近的辐射源数据合批显示，出现相同的辐射源时，接收到的次数会逐步递增，如图 10 所示。

3.2.5 频谱数字显示

频谱数字显示区如图 11 所示，用于显示设备监测

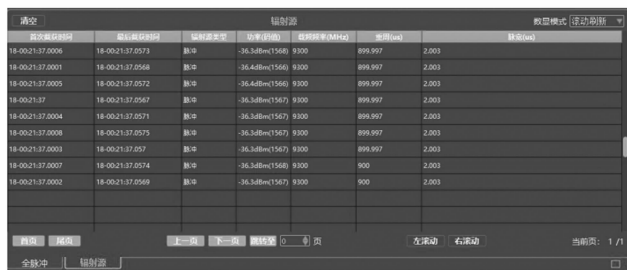


图 9 雷达模拟辐射源数字显示（刷新）

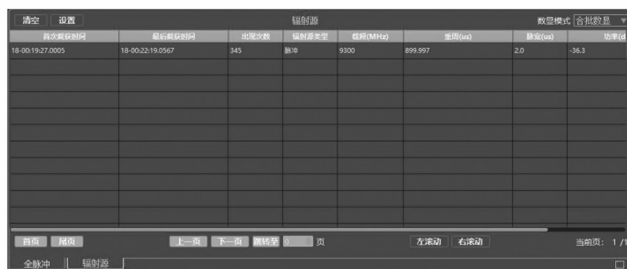


图 10 雷达模拟辐射源数字显示（合批）

到的频谱数据，软件会自动显示当前频谱中最大峰值的频率和功率值。使用鼠标左键框选部分频谱图形可以对频谱进行局部放大显示，点击“恢复”按钮可以恢复到全带宽显示状态。

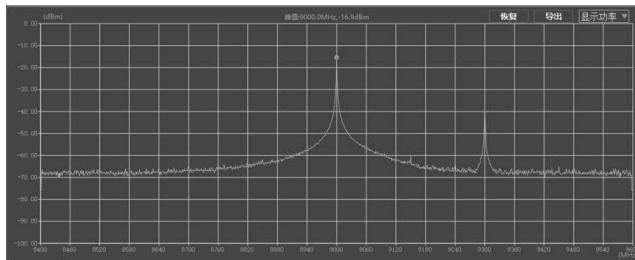


图 11 频谱数字显示

4 信号监测设备测试设计

根据上述方案，完成微波信号监测系统集成，在与空中飞行平台对接的过程中，机械电气接口对接良好，能够适应平台结构要求。在此基础上开展了微波监测设备单机验证和与空中飞行平台之间联合调试验证工作。

4.1 监测设备单机监测

单机测试主要检验设备的基本功能指标是否满足要求。单机测试状态下，微波信号监测设备与监测终端通过 RS422 串口进行链接，由 AV1464 信号发生器采用微波信号注入法向微波信号监测设备产生射频信号来模拟雷达模拟辐射源的输出信号，微波信号监测设备由地面直流电源供电，采用安装有数据显示监测软件的监测终端对微波信号上报的数据进行接收处理并进行结果显示，连接方式如图 12 所示。

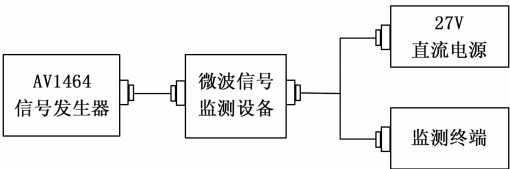


图 12 微波信号监测设备单机测试示意图

4.2 监测设备联合验证

完成微波信号监测设备的功能和技术指标验证后，开展设备监测设备在空中飞行平台的联调联试阶段，将监测设备及天线和电缆与空中飞行平台相连，具体工作原理见图 1。对空中飞行平台加电，启动平台内部设备，根据任务需要开启雷达模拟辐射源的低功率工作模式和高功率工作模式。为了防止雷达模拟辐射源在高功率工作时对人体造成伤害，用微波暗箱套住空中飞行平台头舱的前端，微波暗箱可以完全包裹辐射源的天线，吸收微波辐射源大部分的电磁辐射能量。

系统联调测试过程中，地面接收设备连接状态如图 1 所示，地面设备采用该空中飞行平台成熟的遥测地面站，完成平台遥测数据的接收，同时遥测地面站能够将监测设备上传给遥测设备的数据通过网口挑路传输给监测终端（内含数据显示监测软件），监测终端对数据实时解析显示。

5 实验结果与分析

根据第 4 节测试设计方案，完成微波信号监测系统单机监测验证以及与空中飞行平台联合调试验证工作。

监测设备单机测试实验结果如表 2 所示，结果表明，按照研制需求完成了微波信号监测设备单机测试，其中主要技术指标频率范围与指标要求相一致，灵敏度和动态范围检测结果优于指标要求。其余功能、技术指标测试结果均满足或优于指标要求，测试结论均为合格，监测设备单机测试完成后能够与空中飞行平台进行对接联调测试工作。

在联合测试状态下，对雷达模拟辐射源分选的结果进行部分展示，具体结果如表 3 所示，从表中可以看出，微波信号监测设备能够将接收到的雷达模拟辐射源数据通过平台遥测设备和遥测地面站正确地下传至监测终端，数据显示监测软件实现了对遥测地面站挑路传输的数据实现了正确的解析，频率值与雷达模拟信号源一致，接收信号的功率幅度稳定，但在实际接收到的辐射源数据与实际工作的数据存在不一致的情况，分选结果存在增批和多倍重周的情况，分析原因可能是由于微波信号监测设备的接收天线位于辐射源天线的后端，部分信号经过多次反射被侦测设备所接受，影响了接收信号的质量。

表 2 单机测试结果

序号	检测项目	指标要求	检查结果	结论	备注
1	频率范围/GHz	8~9	8~9	合格	
2	灵敏度/dBm	优于-15	-16.25	合格	
3	瞬时动态范围/dB	优于 40	最小值为 41	合格	
4	瞬时工作带宽/MHz	1 000	1 000	合格	
5	测频精度 /MHz	优于 1.5(r. m. s)	0.7095 MHz (r. m. s)	合格	
7	脉冲宽度测量范围/ μ s	0.5~1	0.5~1	合格	
8	脉宽测量精度	优于 150 ns +2%脉宽	最大误差为 36 ns, 优于 150 ns +2%脉宽	合格	
9	脉冲重复间隔测量	500 μ s~2 ms	500 μ s~2 ms	合格	
10	重频周期测量精度	优于 1.1 μ s	最大误差为 0.4 μ s	合格	
11	电源要求	DC18~36 V	在 18、24、30、36 V 电源电压下工作正常	合格	

表 3 接收数据分选结果

序号	输出状态	接收次数	频率/MHz	脉宽/ μ s	重周/ μ s	功率	是否与源一致
1	高功率	10	8 523.7	0.591	1 001.787	23.5	是
2	高功率	1	8 524.0	0.592	2 001.315	23.5	是
3	高功率	2	8 525.1	0.594	1 001.615	23.5	是
4	低功率	11	8 523.5	0.545	1 000.567	-10.3	是
5	低功率	1	8 523.1	0.563	1 000.521	-10.3	是
6	低功率	1	8 525.6	0.553	2 000.333	-10.3	是

6 结束语

为满足空中飞行平台内雷达模拟辐射源输出信号的实时监测需求，针对空中飞行平台内部狭小的安装空间的特点，设计了一型微波信号监测设备，该设备的功能和技术指标能够满足在空中飞行平台内部对雷达模拟辐射源信号的监测。该设备加装到空中飞行平台后能够将接收的信号通过遥测设备下传至地面接收设备，安装有监测软件的监测终端完成对监测信号的实时解析，监测终端可以通过数字图形化查看到全脉冲数据、辐射源数据、频谱数据以及设备的工作状态。虽然偶尔出现同频信号多倍重周问题，但是监测设备依然能够满足使用要求。微波信号监测设备工作稳定可靠，达到了对空中飞行平台内雷达模拟辐射源辐射信号的实时监测目的。

参考文献：

[1] 张伟军，洪 闯，关宝财，等. 靶弹攻防有源干扰机应用

- 及其 STK 仿真研究 [J]. 计算机测量与控制, 2022, 30 (3): 133-138.
- [2] 顾振杰, 刘宇. 注入式雷达测试系统构建方法研究 [J]. 现代防御技术, 2016, 44 (5): 155-160.
- [3] 肖开健, 李万玉, 游俊, 等. 某雷达检测维修设备开发与技术看究 [J]. 火控雷达技术, 2023, 1: 146-150.
- [4] 张晓曦, 吴翼虎, 刘永强. 雷达信号处理机并行自动测试系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (1): 126-128.
- [5] 王锐, 朱润, 饶卿, 等. 雷达内嵌式侦测信号高速数据存储系统设计实现 [J]. 雷达与对抗, 2016, 36 (4): 25-28.
- [6] 张娅岚. 宽带雷达侦测的两级数字信道化技术 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (19): 87-90.
- [7] 董志, 巴俊皓, 黄芝平, 等. 高性能宽带中频信号处理方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 24 (12): 31-36.
- [8] 张伟军, 郭怡惠, 李涛, 等. 基于 E3238S 的电磁环境监测系统设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2021, 29 (4): 10-13.
- [9] 袁同力, 束永江, 伍小保. 一体化 X 波段机载雷达接收系统 [J]. 舰船电子对抗, 2016, 39 (1): 50-53.
- [10] 金骥. 一种基于 Web 技术的雷达监控系统软件设计 [J]. 信息通信, 2016, 17 (2): 59-63.
- [11] 郭仕剑, 李坡, 胡昆明, 等. 实时频谱分析技术在雷达信号侦查中的应用 [J]. 信号处理, 2011, 27 (8): 1229-1234.
- [12] 王佩, 仇兆扬, 祝俊, 等. 雷达侦收自适应信号处理架构研究 [J]. 现代雷达, 2017, 39 (11): 39-44.
- [13] 张秋艳, 王超, 陈严君. 具有射频监测能力的雷达接收前段技术 [J]. 信息技术与网络安全, 2018, 37 (8): 58-61.
- [14] 何锡君, 郭岩. 一种机载雷达无源探测方式的设计 [J]. 现代雷达, 2015, 37 (8): 6-10.
- [15] 孙鹏, 潘谊春, 郁春来, 等. 基于频谱分析的雷达信号分选新方法 [J]. 指挥控制与仿真, 2012, 34 (2): 109-113.
- [16] 窦玉江, 邵凡麒, 余锋. 数字阵雷达接收通道简化设计的研究 [J]. 现代雷达, 2013, 35 (1): 72-76.
- [17] 王荣勇. 雷达数字化接收技术的应用与分析 [J]. 信息通信, 2018 (11): 266-267.
- [18] 彭玲玉, 吴其华, 刘晓斌, 等. 雷达信号处理模块组件设计与仿真 [J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022, 20 (2): 127-132.
- [19] 王建涛, 岳玉芳, 沈卫超, 等. 雷达电子情报信号处理软件 [J]. 兵工自动化, 2020, 39 (2): 33-36.
- [20] 陈强, 闫秋飞, 赵玉. 雷达侦察数字接收机信号处理技术探析 [J]. 现代信息科技, 2017, 1 (3): 52-54.
- [21] 赵颖, 钱万云, 李影, 等. 雷达信号交互式分选方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2019, 31 (10): 1653-1664.
- ~~~~~
- (上接第 7 页)
- [8] 曾飞, 周健, 章生, 等. 基于 RW-YOLOv3 的输送带表面损伤实时检测 [J]. 现代制造工程, 2023 (2): 92-98.
- [9] 楚春雨, 张伟, 刘文皓, 等. 基于温度和发射率率的涂层损伤检测方法 [J]. 激光与红外, 2023, 53 (5): 723-729.
- [10] 杨晨, 徐志鹏, 曹松晓, 等. 基于机器视觉的微通道换热器表面缺陷检测方法 [J]. 仪表技术与传感器, 2022 (12): 102-107.
- [11] 高伟, 郭美青, 张兴忠, 等. 基于改进 PP-YOLOv2 的红外图像电力设备检测 [J]. 计算机仿真, 2023, 40 (9): 81-87.
- [12] 蔡舒舒, 闫子砚, 师利中. 基于改进 YOLOv4 的航空发动机损伤检测方法 [J]. 现代制造工程, 2023 (2): 99-108.
- [13] 宁景苑, 叶海芬, 孙雨玘, 等. 一种基于弛豫动态光谱技术的苹果损伤检测方法研究 [J]. 传感技术学报, 2022, 35 (8): 1150-1156.
- [14] 李媛, 苏俊宏, 徐均琪, 等. 周期性表面光学元件激
- 光损伤阈值的拟合 [J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59 (23): 225-230.
- [15] 王斌华, 康思思. CFRP-钢层状复合结构的表面划痕损伤容限 [J]. 复合材料学报, 2022, 39 (7): 3530-3541.
- [16] 赵乐天, 黄祺, 杨天智, 等. CFRP 构件带衬套抽芯铆接损伤及剪切性能 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (9): 71-77.
- [17] 罗忠兵, 李飞龙, 苏慧敏, 等. CFRP 复杂几何结构超声表面契合法缺陷检测 [J]. 机械工程学报, 2022, 58 (20): 312-318.
- [18] 逯鹏, 赵天淞, 王剑, 等. 基于计算机视觉的钢结构表面损伤识别与健康监测综述 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (10): 22-27.
- [19] 李胤, 宋远佳, 刘春华. 基于热成像的 CFRP 损伤检测与演化规律研究综述 [J]. 材料导报, 2022, 36 (s1): 184-192.
- [20] 汪权, 张志杰, 陈昊泽, 等. 线激光扫描的碳纤维复合材料表面损伤研究 [J]. 激光与红外, 2022, 52 (3): 458-464.