

## 气象雷达检测技术研究

王晓东 高源 徐波 问钰强 李鹏飞  
陕西飞机工业有限责任公司, 陕西 汉中 723213

[摘要] 气象雷达, 属于主动式微波大气遥感设备, 是专门用于大气探测的雷达。气象雷达是用于警戒和预报中、小尺度天气的主要探测工具之一”是用于探测气象要素和各种天气现象的雷达, 常称为“千里眼、顺风耳”。

[关键词] 雷达; 测试仪; 技术

DOI: 10.33142/ec.v5i12.7297

中图分类号: TN959.4

文献标识码: A

### Research on Meteorological Radar Detection Technology

WANG Xiaodong, GAO Yuan, XU Bo, WEN Yuqiang, LI Pengfei  
Shaanxi Aircraft Industry Co., Ltd., Hanzhong, Shaanxi, 723213, China

**Abstract:** The meteorological radar belongs to the active microwave atmospheric remote sensing equipment, which is specially used for atmospheric detection. Weather radar is one of the main detection tools used for warning and forecasting medium and small-scale weather. It is a radar used to detect meteorological elements and various weather phenomena, often called "Qianliyan, Shunfenger".

**Keywords:** radar; tester; technology

#### 1 产品组成

气象雷达综合测试仪主要由收发前端、变频模块、频综模块、信号处理单元、显示控制单元及电源六部分组成。

#### 2 产品技术特性

##### 2.1 功能指标

检测气象雷达发射信号载波频率, 并根据检测结果可输出同频回波, 回波要求延迟、频率、脉冲宽度及强度可调; 检测气象雷达发射脉冲信号重复频率; 检测气象雷达发射脉冲信号峰值功率; 对脉冲包络信息进行检波并通过 BNC 接口输出给外部测试设备; 手动模式下具有六个目标模拟回波输出功能, 其中单目标模式下回波延时、回波频率、回波脉冲宽度及回波强度等参数分别可设置, 其余目标模式下(2 目标~6 目标)回波延时及脉冲宽度分别可调, 回波频率及回波强度可调但为统一值; 将被测件输入的射频信号进行功分输出, 用于外部频谱测量。

##### 2.2 性能指标

(a) 输入信号频率: 9295MHz~9500MHz; (b) 输入信号功率: 0.1kW~12kW; (c) 输入信号脉冲宽度: 200ns~30us (周期不大于 5ms); (d) 载波频率输出分辨率为 10kHz, 精度为 ±250kHz; (e) 信号峰值功率测量精度: ±0.6dB (1kW~12kW); (f) 信号脉冲重复频率: 分辨率 1Hz, 测量误差不大于 ±1Hz; (g) 载波频率测量精度详见表 1; (h) 模拟回波输出参数详见表 2; (i) 附件: 标称 50W 功率负载及 20dB±1dB 定向耦合器; (与主机频率匹配)。

表 1 频率测量精度

序号	输入脉宽	允许最大误差
1	30 μs~2 μs	10kHz
2	2 μs~0.5 μs	50kHz
3	0.5 μs~0.1 μs	500kHz

表 2 回波输出参数

1	频率输出范围	9250MHz~9500MHz
2	频率输出分辨率	10kHz
3	输出脉冲宽度	0.2us~500us
4	频率输出精度	±250kHz
5	输出功率范围(含附件)	-50dBm~-127dBm
6	输出功率精度	-50dBm~-80dBm 范围内, ±1dB -81dBm~-127dBm 范围内, ±2dB
7	延时时间调整范围	0.1~999.9 (μs 或 nm)
8	延时时间调整精度	100ns

#### 3 技术方案

##### 3.1 总体思路

气象雷达综合测试仪可用于大功率脉冲体制气象雷达的测试, 仪器操作界面在 windows 系统下运行, 设计开发采用虚拟仪器软件 LABVIEW 对原仪器面板进行可视化设计, 其使用面板及操作方法基本与原进口仪器相同。

仪器内部采用了模块化设计, 收发前端主要完成信号收发隔离、信号功分、脉冲包络检波及峰值功率检波等功能; 变频模块将输入信号进行下变频供给后端信号处理单元进行数据采集及处理完成输入射频频率及重频的测量功能; 频综模块主要承担 X 波段调频信号的产生、放大、

幅频调整和脉冲调制输出等功能；电源模块负责各个单元模块的电源供给。

### 3.2 收发前端设计

收发前端完成信号衰减及收发隔离，信号功分，脉冲包络信号检波，信号峰值功率检波以及时序同步等功能。

收发前端前级为大功率射频信号（X波段），输入后经30dB衰减经环形器、功分器功分为三路信号，其中一路经脉冲包络检波器检波为脉冲包络信号输出至固定在面板上的BNC端口；一路信号经衰减输出至变频模块进行下变频为30MHz左右的中频信号后输出至信号处理单元进行频率及重复频率测量；一路进行峰值功率测量。收发前端后级为频综模块，频综模块产生的延时、脉冲宽度及强度可调的回波信号经组合隔离器作为模拟雷达信号输出至外部雷达设备。

### 3.3 变频模块设计

变频模块主要完成射频信号下变频以提供给后端AD采集处理进行频率测量的功能。可以实现将气象雷达综合测试仪收发前端功分输出的射频信号下变频至中频信号（30MHz±2.5MHz），并完成信号的放大及输出功能，具有可变射频信号脉冲宽度小等技术优势。

### 3.4 频综模块设计

频综模块能实现两种工作模式下的不同功能，当工作在自动模式下时能为根据输入信号频率输出同频且延时、脉冲宽度及强度可调的回波信号；当工作在手动模式时其主要功能为输出频率范围、延时、脉冲宽度及强度可调的回波信号。同时可输出六路参数可调的回波信号功能，输出频率、幅度分别可调的连续波信号。

### 3.5 信号处理单元设计

#### 3.5.1 主要功能

中频数字信号处理单元是气象雷达综合测试仪的核心部件，该单元通过RS422通讯接口控制变频模块以10Hz的速率2MHz间隔步进进行射频频率扫描。当变频模块根据控制指令产生射频信号与被测雷达的射频脉冲信号混频后，变频模块对混频后信号进行滤波、放大处理，保留中频信号送入中信号处理单元的AD模块，AD模块对输入信号进行二次放大、滤波处理后送入信号处理模块进行处理，当信号处理模块测量出采集的中频信号为30MHz±2.5MHz时，信号处理单元通过控制算法调节变频模块频率，锁定变频模块频点至中频输出频率为30MHz±1M的频率点。然后通过信号处理模块对AD模块采集的中频数字信号的频率、脉冲重复频率、峰值功率进行测量。将计算结果与通过RS422通讯接口得到变频模块返回的射频信号频率相加得到被测雷达的实际工作频率、脉冲重复频率及峰值功率。信号处理单元对被测雷达的工作频率、脉冲重复频率及峰值功率通过平滑处理后，用RS422通讯接口将测量到雷达的实际工作频率、脉冲重复频率及峰值功率发

送至显示控制单元。同时信号处理单元同步产生模拟测雷达发射的脉冲包络信号，通过滤波处理后，由I/O端口输出至频综模块，做为频综模块模拟回波的时序基准。

#### 3.5.2 硬件设计

信号处理单元采用Zynq-7000全可编程SoC系列处理核心方案，该方案将双核ARM Cortex-A9和FPGA逻辑资源集成在一颗芯片上，通过内部总线连接，集成度和性能显著提升，系统的整体功耗显著降低。由于将整个系统的核心CPU集成在一个芯片内，因此大大降低了整个系统的体积和重量，使得与外设连接所需要的接口也减小，极大提高了系统的可靠性。基于全可编程SoC功能的多样性，使得以前需要很多外部专用ASIC器件才能实现的系统，现在可以只使用一个全可编程SoC器件实现。通过该种方式，有效减少了嵌入式系统设计中所使用的电子元器件数量，显著缩小了电路板的尺寸。

#### 3.5.3 软件设计

软件平台采用xilinx公司的Vivado开发工具进行FPGA设计与开发，硬件描述语言为verilog HDL。xilinx SDK设计工具对ARM核心进行开发，软件描述语言为C++语言。

设计内容包括FPGA逻辑设计和软件设计两部分。其中逻辑设计采用AMBA AXI4-Stream协议进行设计，该协议将不同接口整合到一个接口中，简化了不同领域IP的集成，并使自身或第三方IP的开发工作更简单易行。由于AXI4 IP已为实现最高性能、最大吞吐量及最低延时进行了优化，从而简化了设计工作。

FPGA逻辑设计包括变频时钟子模块、正交分解子模块、第一FIR滤波器子模块、第二FIR滤波器子模块、脉冲信号处理子模块和傅里叶变换子模块等；其中除傅里叶变换子模块外，其余模块均为定制模块。

变频时钟子模块为整个FPGA逻辑部分提供时钟，该时钟是整个系统的时钟基准。

正交分解子模块将AD采集的信号通过正交分解后下变频至零中频后通过AXI4-Stream协议输出。该模块设计有AD超限报警功能和自检功能。当仪器开始AD采样前，对该模块进行自检，自检通过后开始对AD进行采样。

第一FIR滤波器子模块设计采用数字低通滤波器技术，为保证滤波效果该模块设计了5M低通滤波器，带外抑制达90dB，有效抑制了杂波干扰，并把滤波后的信号通过AXI4-Stream输出至脉冲信号处理子模块。第二FIR滤波自模块设计采用滤波器技术，检测出脉冲信号包络，通过AXI4-Stream输出至脉冲信号处理子模块。

脉冲信号处理子模块将第一FIR滤波器子模块输入的数据进行分析处理，当判别到有脉冲调制信号输入时，将该脉冲信号相关数据打包后通过AXI4-Stream发送至傅里叶变换子模块。脉冲信号处理子模块将第二FIR滤波器

子模块输入的数据进行自适应门限计算,并将输入信号的脉冲包络进行整形、滤波处理输出给频综模块作为模拟回波发射时间基准。同时通过脉冲技术的方式计算出输入脉冲信号的脉冲重复频率。

傅里叶变换子模块直接调用开发环境提供的 IP 核,使用 pipelined 模式,进行 4096 点 FFT 运算,以保证输入信号频谱分析的实时性和测量精度。其他相关 FPGA 逻辑功能模块的整体设计主要保证数据处理的实时性和精度要求,充分利用该芯片逻辑资源充分的特点,保证了测量的精度要求。ARM 核心软件主要完成对测量数据的读取、变频模块跟踪算法实现,信号处理模块与变频模块通讯、信号处理模块与显示单元通讯。ARM 程序设计采用巡检的方式每 10ms 对测量的频率、脉冲重复频率进行读取后,对 100ms 周期内所读取的数据进行平均计算后通过 RS422 通讯发送至显示单元。同时,在锁定雷达发射频率前,每 100ms 对变频模块进行调频控制指导锁定被测雷达发射频率。ARM 核心的设计采用状态机的设计方式,架构清晰,可扩展性强。

### 3.6 显示控制单元设计

软件设计包括主控界面设计、六脉冲子面板设计以及故障监测子面板设计。

主控界面面板包括开关、旋钮、自定义类的控制控件以及仪表、数值类的显示控件,模拟测试相关的功能按键、开关及旋钮,布局则遵循原原有使用习惯。主控界面的人机交互方式为鼠标按键及滚轮控制(部分输入也可由键盘直接输入)。主控界面主要完成自动/连续波选择、自动模式/手动模式选择、延时距离 us/NM 切换、PRF/RF 切换、手动模式下频率调节、峰值功率显示、频率显示功能;同时完成单脉冲、双脉冲或六脉冲模拟回波信号设置,包括:回波信号延时、回波强度以及回波信号开关。峰值功率测量通过调用功率探头实现;脉冲重复频率以及雷达工作频率显示通过串口接收信处模块的测量结果;六脉冲回波信号设置时弹出单独窗口完成六脉冲信号的产生。主控界面软件通过 RS422 串口 1 将控制信号传给频综模块,完成对频综模块的控制,通过 RS422 串口 2 与信处模块交联,完成频率及故障数据接收处理,并发送雷达信号及控制信号给信处模块。

主控界面根据 range on 开关选择确定是否调用六脉冲子面板,并在串口 1 或串口 2 发来故障信号时调用故障监测子面板显示。

故障监测子面板完成根据串口发来的各模块故障信息进行故障报警指示

### 3.7 电源设计

为满足整机正常工作的全部电源需求,选取成熟多路输出电源模块,分别输出为 +12V $\pm$ 10% ( $\geq$ 4A)、-12V $\pm$ 10% ( $\geq$ 1A) 及 +5V $\pm$ 0.5V ( $\geq$ 1A) 共三路电源。

同时设计内部接口板将上述三路电源转化为输出至变频模块的 $\pm$ 12V 两路电源;输出至跟踪模块的 $\pm$ 12V、+5V 三路电源;输出至显示控制单元的+5V 电源;输出至信号处理单元的+5V 电源。其中输出至信号处理单元的+5V 电源在接口板中通过四路 DC/DC 电源芯片转化成信号处理单元工作所需的全部电源(+3.3V、+1.5V、+1.8V、+1.0V)。

## 3.8 外形及内部结构设计

气象雷达综合测试仪外形采取简单、实用、方便运输、低成本的设计理念,采用标准货架机箱,高度为标准 5U,气象雷达综合测试仪内部模块分布充分考虑各功能单元及模块的分布连接关系,兼顾仪器内部电磁兼容性考虑进行设计,对外射频连接采用标准 N 型阴口,脉冲宽度测量接口采用标准 BNC 接口。

## 4 关键技术及创新点

### 4.1 关键技术

#### 4.1.1 变频模块谐波杂散抑制设计

变频模块谐波抑制主要是二次谐波,三次以上基本上不用考虑,二次谐波的抑制主要由末级放大器和末级滤波器技术指标保证。末级放大器的谐波抑制大概在 20dBc 左右。加上末级带通滤波器,此滤波器是定制滤波器,要满足指标要求的 3dB 带宽为 5MHz,所以在带外抑制的指标上,在 50MHz 时所提抑制指标大于 40dBc。

杂散主要是 DC/DC 开关电源的开关频率及数字电路的干扰尤其是数字电路的时钟频率引起的。对于开关电源的设计采用分腔设计,也就是电源和数字电路在两个不同的腔体中,以防止空间辐射到数字及其他电路部分,对于线上的串扰则通过输入输出端加  $\pi$  型滤波电路滤除。对于晶振所产生的时钟频率杂散,主要由泄露到射频面参与变频而产生,主要由高次谐波变频而来,所以只需要把时钟频率降低,那么时钟频率的谐波将极大的减小,从而排除时钟频率产生的杂散。

#### 4.1.2 软件设计

气象雷达综合测试仪频率测量频段为 9250MHz-9500MHz,最小测频脉宽达 0.2us,脉宽相对较窄,频谱范围大,实时性要求较高。在前期设计过程中,软件研发面对该问题,需解决三处技术难点。第一、雷达在工作状态时高频脉冲串对测量有较大电磁干扰,干扰通过 AD 采样后被放大,影响真实信号的采集。第二、脉宽过窄,信号采集到的有效数据数量少;第三、实时性和精度的高要求使得软件在短时间内处理大量的数据,对处理速度是极大的考验。

软件针对上述难点通过反复仿真、试验、改进及后,进行如下处理架构设计:1 采用两次 FIR 滤波器软件滤波,针对性地滤除两个特殊频段的干扰;提高采样频率至 40M,同时增加采集脉冲串的数量,保证后端 FFT 测频所需的数



据量；采用实时 FFT 测频技术，在确保测频精度的同时，保证测频的速度。

#### 4.1.3 抗干扰设计

气象雷达综合测试仪既有来波接受测量功能，又有回波产生输出功能，其中来波信号功率较大易产生串扰影响回波产生信号的精确度，避免相互之间的串扰工作十分必要，在方案实行时应进行充分隔离。为保证相互之间不发生串扰及电磁干扰问题的产生，连接电缆前期试验阶段全部采用半刚性电缆，后期状态固化之后全部改用刚性电缆以保证信号的抗干扰性能。各个功能模块密封设计并合理布局杜绝电磁干扰的可能。

### 4.2 创新点

#### 4.2.1 六脉冲回波模拟功能

该仪器国内针对该类型气象雷达专用测试仪器，该仪器的研制成功填补了国内该项测试仪器的空白；同时同类型仪器中首次实现了六脉冲回波模拟输出功能，可实现 DO-172 标准的编码输出模拟功能，拓展了仪器的应用范围。

#### 4.2.2 新型脉冲频率测量技术

采用新型脉冲频率测量技术：对脉冲信号进行软件滤波、整形、通过算法提取脉冲包络后，计算脉冲重复频率、脉冲宽度；通过运算处理模块，完成对脉冲信号的解调运算，得出频率值序列和脉冲重复频率值序列及脉冲宽度序列，即用的第一 FIR 滤波器子模块有针对性地滤除了采样信号中的随机干扰，保证了采样数据的稳定性，提高了测量脉冲频率的准确度；用第二 FIR 滤波器子模块提取脉冲包络信号，不需要额外增加硬件脉冲检波电路，降低了硬件设计难度；利用傅里叶变换子模块的运算速度快、运算数据量大的特性，提高了脉冲频率测量分辨率、准确度和测量速度；通过脉冲信号处理子模块采用的脉冲判别机制，提高了弱脉冲信号数据、窄脉冲信号的辨识度，提高了脉冲宽度和脉冲重复频率的测量范围；

此外通过监测模块实时监控脉冲信号频率测量器工作状态，提高了该脉冲信号频率测量器的可靠性和可测试性。

#### 4.2.3 LABVIEW 软件应用模拟操作界面

仪器界面采用 LABVIEW 虚拟仪器面板设计，旋钮、按

键、开关、指针表等实体仪器控件均可省去，由虚拟控件代替，颜色、大小、样式可实现自定义，给用户更好的使用体验。虚拟仪器面板使仪器布局更加简洁、紧凑，可以解决实体器件布局紧张的问题，同时仪器内部连线通过集成的接插件，方便寻找，便于仪器排除故障。

软件通过六脉冲窗口子界面及故障显示子界面的设计，用户可根据监控或测试的重点随时切换主视角窗口，同时软件具有的数据记录功能可保存产品测试数据用于排故及同类雷达产品设计时的数据采集源。并且通过 RS 软件的内校准和宽、窄脉冲的自适应设计，软件峰值功率测量具有较高的精度。

软件可扩展性良好，可模拟示波器和频谱仪进行信号和频谱测量，同时可轻松扩展为触摸屏，完全去除鼠标操作，为用户提供更好的交互体验。

#### [参考文献]

- [1]田云峰.综合测试设备校准技术研究[J].宇航计测技术,2011(3):65.
- [2]曹俊武,胡志群,陈晓辉,等.影响双线偏振雷达相位探测精度的分析[J].高原气象,2011(3):76.
- [3]游华标,游祖鏊,郑东齐.L波段雷达探测系统存在问题的研究和解决方法[J].民营科技,2016(6):65.
- [4]祁湘文.推荐三部气象新书[J].全国新书目,2001(4):65.
- [5]王向华,高艳秋,温彦春.L波段雷达维护与故障维修[J].黑龙江气象,2008(3):65.
- [6]张磊.河南省GPS-MET综合应用系统网站正式上线[J].全球定位系统,2010(6):76.
- [7]高太长,陈新甫,翟东力.异源多普勒频移应用于空中风探测[J].解放军理工大学学报(自然科学版),2007(4):65.
- [8]盖晓东,高军,兰朝生.L波段高空气象探测雷达丢球现象的探讨及应对措施[J].黑龙江科技信息,2010(22):56.

作者简介：王晓东（1985-），男，陕西汉中人，高级工程师，学士本科生。主要研究方向为：通信技术，光电子技术，投放技术，测控技术等。