

基于频谱分析模块的机载雷达信号参数流程化自动测量方法

刘勇¹ 郭凯¹ 刘雪莹² 贺彬³

(1. 海军航空大学 烟台 264001; 2. 92742 部队 秦皇岛 066000; 3. 91498 部队 秦皇岛 066000)

摘要: 针对部队外场飞机雷达维护工作需求,本文提出了一种基于频谱分析模块的机载雷达信号参数流程化自动测量方法。文中分析了典型雷达信号时域和频域的特征,研究了多项参数自动测量的原理和步骤,并开发了相应的测试软件用以执行相关算法和实现流程化测量。此外,还设计了4种信号仿真实验来验证本文所提方法的有效性,实验结果表明,该方法无需借助传统通用仪器,仅基于频谱分析模块在不同工作模式下提供的数据序列,即可实现典型雷达信号多项参数一键式流程化测量,且测量结果精确有效,符合部队外场维护保障条件,因此具有较强的工程应用价值。

关键词: 频谱分析模块; 雷达参数; 自动测量

中图分类号: TN98 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.70

Automatic measurement of onboard radar signal based on spectrum analysis module

Liu Yong¹ Guo Kai¹ Liu Xueying² He Bin³

(1. Naval Aviation University, Yantai 264001, China; 2. Unit 92742, Qinhuangdao 066000, China;
3. Unit 91498, Qinhuangdao 066000, China)

Abstract: In response to the maintenance requirements of airborne radar in field operations, this paper proposes a process-oriented automatic measurement method for the parameters of airborne radar signals based on the spectrum analysis module. The principles and steps of automatic parameter measurement for multi-system radar signals are analyzed in detail in the paper. Corresponding testing software is also developed to execute the relevant algorithms and enable streamlined measurements. Additionally, four signal simulation experiments are designed to validate the effectiveness of the proposed method. The experimental results demonstrate that this method can achieve a comprehensive measurement of multiple parameters of typical radar signals in a streamlined manner, without relying on traditional general instruments. It solely utilizes the sampling data provided by the spectrum analysis module in different working modes. The measurement results are accurate and effective, meeting the requirements of field maintenance support. Therefore, it possesses strong engineering application value.

Keywords: spectrum analysis module; radar parameters; automatic measurement

0 引言

机载雷达性能检测工作贯穿雷达全寿命周期各阶段,虽然在出厂前开展军检验收时,已对雷达整机、分系统、分机的性能指标进行了详细测试,但在雷达使用阶段,各项性能指标均可能发生变化,指标下降会影响雷达的工作状态和作战效能,甚至导致雷达故障。参考多型机载雷达维护规程,通常需要检测的雷达信号参数包括峰值功率、脉冲波

形、频谱纯度等,其状态将影响到雷达最大探测距离、抗干扰能力、距离分辨力、动目标检测能力等重要指标^[1-3]。因此,定期对上述参数进行测量并在一定时间内进行统计分析,对及时掌握雷达的技术状态、视情采取针对性维护措施十分必要。

传统的机载雷达信号参数原位测量过程可借助多种通用仪器组合完成^[4]。例如,对于信号峰值功率测量可利用辐射法通过功率计读取测量结果;对于脉冲信号波形参数

可以将信号接入检波器后连接示波器,操作光标获取数据;对于频谱纯度的计算则需要结合频谱分析仪“标记”、“差值”等功能再经由公式换算得到结果。上述测量方法虽较为经典并具通用性,可以满足一般条件下(如院校教学实操、厂所分机维修)的测试需求,但对于部队外场飞机维护工作,却存在携行使用不便、操作步骤繁琐等问题。

近年来随着仪器科学技术的不断发展,越来越多的研究倾向于利用计算机软件控制测量仪器完成雷达系统相关测试工作,在一定程度上解决了人工操作效率低、精度差的困难。例如,彭炜杰^[4]利用微软基础类库开发环境结合AV4051型频谱仪实现了多种复杂体制雷达信号参数的自动测试;刘艺^[5]对复杂调制雷达信号从时域、频域和时频二维联合域三方面进行全面的提取信号参数信息;宋吟龄^[6]在Visual Basic环境下利用可编程仪器标准命令对频谱仪控制,实现了雷达频率源功率的自动测量;范斐^[7]设计软件在调制域对多种调频脉冲和相位编码脉冲信号参数测量开展了探索。然而,以上研究进展虽解决了雷达测试由“手动”向“自动”的转变,却存在以下不足之处:1)仍然多采用传统通用仪器完成自动测试,其依赖外部供电且便携性较差,不利于部队外场条件下高效开展工作;2)虽采用软件程控取代了手工操作,但针对每一测试项仍需在软件界面调整仪器相关配置后方可进行,因此测试过程连贯性不高,不具备连续、快速、流程化测试多项参数的能力;3)多针对调频参数的测量算法进行论述,而对常见的捷变频率、重频参差、相位噪声等部队关心的典型信号形式及关键指标的探索较为欠缺;4)控制软件多基于Windows开发,与目前我国主流国产化操作系统(如银河麒麟)兼容性较差,不利于后续移植。由此可见,当前亟需提出一套适用于部队外场原位测试条件下的机载雷达性能参数自动检测方法,应具备便携性高、自动测量连贯性好、适宜多种典型雷达信号、逐步适配国产化操作系统等特点,从而在现代战场环境中使机载雷达维护保障水平跟上技术创新和体制革新的脚步。

基于上述分析,本文提出了一种基于频谱分析模块的机载雷达信号参数流程化自动测量方法,并进行了实验验证。

1 频谱分析模块

频谱分析模块是实现雷达信号参数自动测量的关键设备。它体积、重量较小,仅依靠USB供电,便携性好;内置了一个高集成度、高性能的超外差式接收机射频前端,以及一个基于现场可编程逻辑门阵列(field programmable gate array,FPGA)的数字处理系统后端。该模块能够实现频谱、数字IQ流、功率检波波形(零扫宽)以及实时频谱等4种工作模式下数据的输出,模块组成框图如图1所示。

模块前端处理的模拟中频信号经高频采样后数字化,经FPGA处理后,可将二维离散序列通过USB3.0接口输

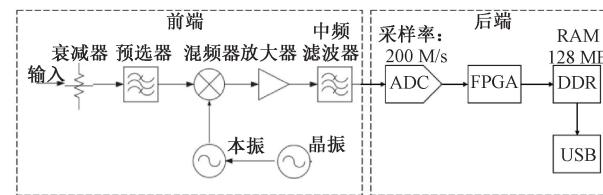


图1 频谱分析模块组成

出到外部计算机内存中,以作为绘制谱线及执行自动测量算法的数据来源。

2 典型雷达信号参数测量原理

本节将对4种常见的机载雷达信号的时域和频域特征进行分析,并阐述利用频谱分析模块提供的采样序列完成参数自动测量的原理和步骤,值得注意的是,前一项参数的测量结果将在后一项的测量中发挥重要作用,这也是实现流程化测量的关键。

2.1 常规脉冲信号

常规脉冲信号是最简单的雷达信号形式之一,对于常规脉冲信号参数的测量,主要包括载波频率(carrier frequency, CF)、相位噪声(phase noise, PN)、脉冲宽度(pulse width, PW)、脉冲重复周期(pulse repetition interval, PRI)、峰值功率(peak power, POW)等。下面依次进行阐述:

1) CF、PN

信号CF测量准确与否将直接影响PN、脉冲波形等其他参数的测量。CF测量的精确程度与分辨率带宽(resolution bandwidth, RBW)的设定息息相关,扫描宽度(scan width, SPAN)不变的前提下,RBW设定越小,测量频率准确度越高,但扫描时间也越长,过长的扫描时间不利于捕捉瞬态信号^[8]。通常采用以下关系来约束^[9]RBW与扫描时间st:

$$st = \frac{2.5 \times span}{rbw^2} \quad (1)$$

式中:span、rbw分别为代表SPAN和RBW的变量。由式(1)可知,同步配合减小RBW、SPAN以维持较低的扫描时间是快速、准确测量信号CF的重要条件,为此本文设计了“逐渐逼近法”实现CF的测量。首先,设置频谱分析模块SPAN为较宽的范围,如对于X波段雷达设定SPAN为8~12 GHz,此时需将RBW设置为自动,否则会导致扫描时间较长。根据模块回传的频谱序列,找到功率最大值所对应的频点,记为f,则该频点可认为是载波频点的粗略值,误差为±rbw/2。然后,再将模块中心频率设置为f,span≥4×rbw以确保覆盖准确谱线位置即可,在这里本文设置为1 MHz;同步减小RBW为2 kHz,再次读取功率最大值对应的频率f',这样测频最大误差降为1 kHz,低于0.125×10⁻⁶。

基于载波频率的测量结果,可在频谱序列中选取距载

波频率 Δf 处附近的频点功率值, 根据式(2)完成 PN 计算。式中, $L(\Delta f)$ 表示相位噪声值, RBW 应满足 $rbw \leqslant 0.3 \times \Delta f^{[10]}$, 以确保 Δf 范围内有效分辨出载波谱线和噪声谱线。

$$L(\Delta f) = 10 \times \lg \frac{\Delta f \text{ 处功率}}{\text{载波功率}} - 10 \times \lg(rbw) \quad (2)$$

2) PW、PRI

脉冲参数主要包括 PW、PRI、脉冲幅度等。依托频谱分析模块进行时域参数测量的前提是, 将模块置于“零扫宽”工作模式且 CF 设置为 f' , 此时输出数据为峰值检波后的时间—电平序列, 为便于计算, 先将电平值(单位为 V)换算为功率值(单位为 dBm): 设某点电平为 U , 模块阻抗匹配为 50Ω , 则功率 P 换算公式为:

$$P = 10 \times \lg(20 \times U^2) \quad (3)$$

对于常规脉冲信号, 在“零扫宽”模式下可得图 2 中一个分析周期(长度为 L , 下称一帧)内的检波波形, 其中频谱模块输出的时域采样间隔 Δt 应接近雷达脉冲上升沿($\sim 10 \text{ ns}$), 以有效感知脉冲到达。可按照以下算法判断各脉冲起始时刻 t_0 和结束时刻 t_1 :

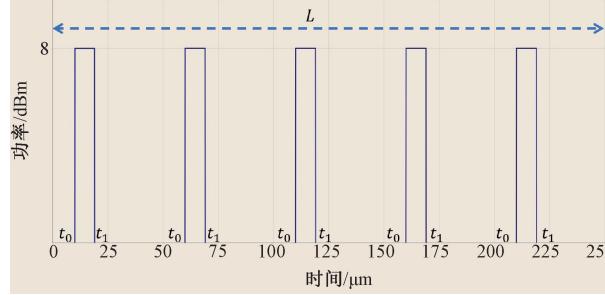


图 2 常规脉冲信号“零扫宽”波形

在初始状态下, 设定 $t_0 = -1$, $t_1 = -1$ 。设定 tt 为时间序列变量, 若在某时刻两相邻采样点功率差 $|\Delta P| < 0.5 \text{ dB}$ (0.5 dB 为经验值, 根据 Δt 量级及雷达型号可调整), 则判定脉冲到达, 将此时刻记录为脉冲到达时刻 t_0 , 即 $t_0 = tt$ 。在下一时刻($tt + \Delta t$), 由于仍有 $|\Delta P| < 0.5 \text{ dB}$, 所以记 $t_1 = tt + \Delta t$; 依次类推, 直至 $n\Delta t$ 后不满足 $|\Delta P| < 0.5 \text{ dB}$ 这一条件时, 表示脉冲已结束, 而此时 $t_1 = tt + n\Delta t$ 即为脉冲结束时刻。在上述过程中, 还需考虑一种情况, 若相邻两白噪声功率差也刚好满足 $|\Delta P| < 0.5 \text{ dB}$ 的条件, 此时算法也会将其误判为脉冲, 但对于噪声来说, $n\Delta t$ 内连续满足条件的概率微乎其微, 因此这类误判的“噪声脉冲”其持续时间必定在 Δt 量级。而对于一般机载脉冲多普勒雷达而言, 设其最小的脉冲持续时间为 $1 \mu\text{s}$, 因此只需加上条件 $t_1 - t_0 \geqslant 1 \mu\text{s}$ 即可完全滤除该种情况。由此可总结, 判断脉冲是否存在的依据为:

$$|\Delta P| < 0.5 \cap t_1 - t_0 \geqslant 1 \quad (4)$$

将 t_0 、 t_1 及时存入当前帧脉冲波形参数测量列表 $tlist$ 中, 从而完成图中最左侧脉冲起始和结束时刻的测量。在

第一个脉冲完成测量后, 将 t_0 、 t_1 重置为 -1 , 重复上述过程, t_0 、 t_1 随时间轴向前移动, 便可完成当前帧中全部脉冲到达、结束时刻的记录。由此, 在测量列表 $tlist$ 中, 如图 2 所示本文可以获得 5 组脉冲的起止时刻, $tlist$ 中元素个数为 10。将 $tlist$ 中各元素以索引号 $i(0 \sim 9)$ 标注, 若索引号 i 为奇数, 则当前帧中脉冲重复周期平均值 \bar{T}_r 为:

$$\bar{T}_r = \frac{\sum tlist[i+2] - tlist[i]}{4}, i = 1, 3, 5, 7 \quad (5)$$

若 i 为偶数, 则将相邻元素相减再求和, 即可求得帧内脉冲宽度平均值 $\bar{\tau}$ 为:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum tlist[i+1] - tlist[i]}{5}, i = 0, 2, 4, 6, 8 \quad (6)$$

对当前帧展开分析时, 若恰好适逢脉冲不完整地出现在帧头, 则该脉冲应舍去, 判断该情况出现的条件为: $tlist[0] = 0$ 。若不完整地出现在帧尾, 则按照式(4)可自动滤除, 由此式(4)应修正为:

$$|\Delta P| < 0.5 \cap t_1 - t_0 \geqslant 1 \cap tlist[0] > 0 \quad (7)$$

3) POW

基于式(7)的判定条件, 按照式(3)计算脉冲存续期间的功率值, 可作为信号 POW。依据式(5)、(6)结果计算占空比 $\bar{\tau}/\bar{T}_r$, 可计算平均功率。

2.2 重频参差信号

重频参差是指雷达脉冲信号具有多项 PRI, 假设每经过 N 个脉冲周期, PRI 会切换一次, 则当前周期的存续时间称为相参处理间隔^[1], 以常量 cpi 表示。对于重频参差信号的时域测量, 关键在于能否不重不漏地测量出多组重频值, 测量过程与常规脉冲信号类似, 但会测得多组 \bar{T}_r , 对于机载雷达而言, 多组 \bar{T}_r 间应有一定的差距以更好地实现解模糊算法^[1]。具体测量的方法为: 建立重频参差数组 $prilist$ 用于存放多个重复周期值, 每基于式(5)测量得到一項 \bar{T}_r , 应与 $prilist$ 中各元素 $pri[i]$ 进行作差比较, 即令 $\Delta p = |\bar{T}_r - pri[i]|$, 若对全部元素均满足 $\Delta p > 1 \mu\text{s}$, 则将 \bar{T}_r 加入 $prilist$ 中; 若存在 $\Delta p \leqslant 1 \mu\text{s}$, 则视为现有元素的测量误差, 可将 $pri[i]$ 更新至 $(pri[i] + \bar{T}_r)/2$; 最终 $prilist$ 中各元素即为多组 PRI 测量结果。

需说明的是: 当脉冲重频切换恰好出现当前帧中, 即当前帧存在两组重复频率, 在这种情况下, 若仍基于式(7)计算重复周期, 显然会计算两组周期的平均值, 该结果是无意义的, 算法也应自动予以滤除。判断方法为: 依次计算本帧内各重复周期值, 若相邻两个重复周期差值 $|\Delta T_r|$ 超过 $1 \mu\text{s}$, 则认为脉冲重频恰好在测量期间完成切换, 将该帧数据舍去。

若遇到时域分析周期长度 $L > cpi$ 情况, 使得每帧中都存在重频切换的现象, 若按照上述 $|\Delta T_r|$ 进行约束, 将无法测量到任何结果。因此, 只需在维持 Δt 不变的条件下逐渐降低分析点数, 最终使 $L < cpi$, 便可正常计算。

由此,对于重频参差信号,判定脉冲出现的条件应进一步限制为:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\Delta P| < 0.5 \cap t_1 - t_0 \geq 1 \cap tlist[0] > 0 \\ |\Delta T_r| < 1 \cap L < cpi \end{array} \right. \quad (8)$$

而对于该型信号的 CF、PN、POW 的测量过程,依然可以按照常规脉冲测量步骤完成计算。

2.3 频率捷变信号

机载雷达采用频率捷变信号有利于在电子对抗中实现抗干扰,降低雷达发射信号被截获的概率^[11],因此该信号也是十分常见的,下面对该信号主要参数自动测量原理进行论述:

1) 捷变 CF、PN

对于频率捷变雷达的各捷变频点的精确测量,可按照以下步骤完成:

(1)将频谱分析模块置于最大保持状态下,将 SPAN 设置为可完全覆盖各捷变频率,RBW 设为自动,将当前状态下频谱迹线的各点 $P(x, y)$ 记入数组 $dlist$,其中 x 为频率, y 表示功率;对 $dlist$ 遍历,对于索引号为 i 的元素 $dlist[i]$,按照式(9)查找全部拐点,并存入拐点数组 $turlist$:

$$dlist[i-1].y < dlist[i].y > dlist[i+1].y \quad (9)$$

(2)对 $turlist$ 各元素按照 y 值由大到小排序,由于频率捷变雷达信号在各捷变频点处功率值一致,从 $turlist$ 第一个元素开始,依次将相邻两元素功率值作差,即 $\Delta u = |turlist[i+1].y - turlist[i].y|$,若 Δu 小于设定的阈值 0.5 dB,则认为 $turlist[i].x$ 为捷变频点, $turlist[i].x$ 将存入捷变频数组 $peaklist$;直至第一次出现 $\Delta u > 0.5$ dB 时,查找结束,得到各捷变频点粗略值数组 $peaklist$;

(3)频谱分析模块置于实时模式,参照 2.1 节常规脉冲频率测量逼近的方法,对于 $peaklist$ 中索引为 i 的元素,设定频谱分析模块中心频率为 $peaklist[i]$, $span = 1$ MHz, $rbw = 2$ kHz。由于此时模块处于实时分析模式,不会遗漏任何瞬态信号^[12],则当捷变信号出现在 $peaklist[i]$ 附近的频点时,模块会及时捕获并获取频谱迹线,再次找到迹线峰值所对应的频率,即可视为该捷变频点的精确测量结果。依次类推,可将 $peaklist$ 中各元素更新至精确值,得到修正后的捷变频率数组 $peaklist'$ 。

对于 PN 的测量,可将令频谱模块中心频率为 $peaklist'[i]$,待捷变信号出现于该频点时,按照式(2)完成测量。

2) PW、PRI

设定频谱分析模块的中心频率为 $peaklist'$ 中任一元素值,将模块置于“零扫宽”模式下,则当该捷变频点信号出现时会出现脉冲波形,按照 2.1 节所述方法,即可获得频率捷变信号的时域波形参数 T_r 和 $\bar{\tau}$ 。

3) POW

对于频率捷变信号 POW 的测量,可采用 RBW 覆盖信

号带宽的方法,只不过这里的带宽并不是捷变频总带宽 ΔB_F ,而是其在各单一捷变频点处的带宽 ΔB_s 。由于在各频点 f_i 处的频谱包络为辛克函数形式,其主瓣 $[f_i - \frac{1}{\tau}, f_i + \frac{1}{\tau}]$ 内的信号能量占全部能量约 94%^[10],因此可采用

宽带测量法完成功率测量:设置 $rbw \geq 2/\bar{\tau}$,并维持“最大保持”模式, $span = \Delta B_F$ 。由于各捷变频点处信号能量几乎不变,则读取频谱序列中功率最大值,即为该信号类型 POW。

2.4 线性调频信号

采用宽带线性调频信号加可有效解决距离分辨率与最大探测距离两项指标间的矛盾^[13]。对于该型雷达信号,其频谱在一定宽度(机载雷达单频点一般低于 10 MHz^[14])内连续分布,因此与 CF 相关的参数如 PN、脉冲波形均无法直接用频谱分析模块测量。参照机载军用雷达日常维护规程,线性调频信号主要指标包括带宽(bandwidth, BW)和 POW 两项。

1) BW

线性调频信号的带宽直接决定脉冲压缩后的时域波形宽度,即距离分辨率。对于该信号带宽的测量,可将模块置于“最大保持”工作模式,设置 SPAN 足以覆盖信号带宽, RBW 设置为自动,获取迹线最高点功率值 P_p ,将其降低 3 dB,寻找离散频谱序列中功率值接近 $P_p - 3$ 的频率采样点。换句话说,设频谱序列元素索引为 i ,本文要寻找功率 P_i 满足下式的点:

$$|P_i - (P_p - 3)| < u \quad (10)$$

由于频谱序列未必恰好在 $P_p - 3$ 处存在采样点,因此需设定 u 为阈值进行小范围检索,例如可设定为 $u = 0.1$ dB。随后,将全部符合条件的点的频率值集合到数组中,对数组进行由小到大排序,计算数组首尾元素之差,即为 BW,用变量 ΔB 表示。

2) POW

设定 $rbw \geq \Delta B$,模块置于“最大保持”工作模式,则频谱序列中功率最大值即为该线性调频信号功率。这种宽带功率测量方法成立的关键因素在于 ΔB 宽度内信号功率占总功率的比值^[14],可以证明,对于线性调频信号而言,其幅频特性曲线在调频带宽外两侧陡峭程度与压缩比 D 有关, D 值越大,频谱曲线越接近矩形,功率测量误差也越小。研究表明,当 $D = 10$ 时,已有 95% 信号能量落入 3 dB 带宽内^[15],而现代一般雷达 D 可达 10^6 量级^[16],因此通过上述方法可以较准确完成脉冲压缩信号功率测量。

以上本文分析了利用频谱分析模块对几种常见机载雷达信号参数流程化测量原理,表 1 就各类型信号可测量的参数进行了总结。其中可测量标记为√,不可测标记为×,非测量项目标记为/。

表 1 频谱分析模块可测量的雷达信号参数汇总表

参数	载波频率	相位噪声	峰值功率	脉冲参数	带宽
常规脉冲	√	√	√	√	/
重频参差	√	√	√	√	/
频率捷变	√	√	√	√	/
线性调频	×	×	√	/	√

3 实验验证

3.1 测试软件设计

本文基于 Ubuntu 18.04 操作系统利用 Qt 5.9 开发了测试软件。其中 Ubuntu 系统与国产操作系统拥有共同的 Linux 内核,兼容性较好;Qt 的图形化界面和丰富的类库已用于软件化雷达信号分析及处理过程^[17]。软件功能模块及架构设计如图 3 所示。

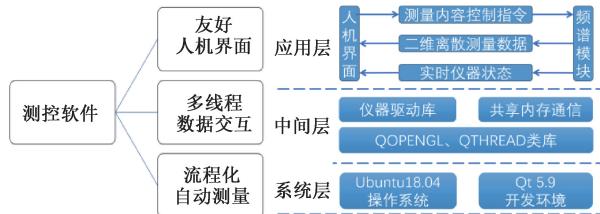


图 3 测控软件功能模块及架构设计

软件主界面如图 4 所示。界面中央的蓝色区域为数据显示区,用于实时显示频谱分析仪在不同工作模式下的输出波形。界面上方为功能区,绿色按钮为“自动测量”按钮,可触发自动测量功能;“信号形式”下拉框目前包含“常规脉冲”、“线性调频”、“重频参差”、“频率捷变”4 种形式。选择一种信号类型后,软件将按照表 1 中对应支持的测试项目,实现一键流程化自动测量,测量结果可在下方展示,具体过程本文将在实验仿真环节演示。

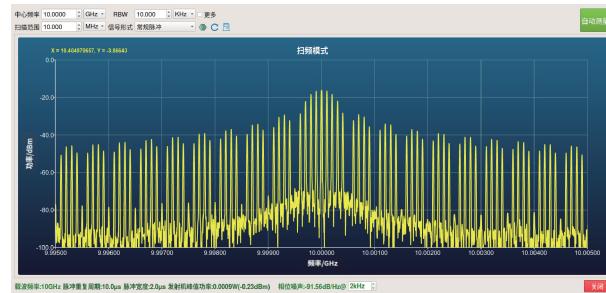


图 4 软件主界面

3.2 测试验证

本实验将使用 SMA100B 型微波信号源仿真常规脉冲、重频参差、频率捷变、线性调频 4 种典型雷达信号,经由射频电缆将信号注入 SAE-200 型频谱分析模块中,同时计算机中运行测试软件,完成信号参数自动化测量,如图 5 所

示。所用电缆的损耗已事先测定为 1.6 dB@10 GHz,计算机运行 UBuntu18.04 操作系统,处理器为 Intel Core i7 系列配有 8 核心。各信号参数设定如表 2 所示,表中各数值为仿真数据,与真实装备数值无关;对于频率捷变、重频参差信号的产生,可通过计算机程控信号源来实现参数的快速切换。下面将展示实验过程及结果分析。



图 5 实验场景布设

表 2 信号源仿真 4 种类型雷达信号参数设置

参数	CF/GHz	PW/ μs	PRI/ μs	POW/ dBm
常规脉冲	10	2	10	0
重频参差	10	4	20/30/40/ 50/60/70/80	0
频率捷变	9.111/9.2/9.345/ 9.6/10.001/10.444	5	15	0
线性调频	9.995~10.005	10	40	0

常规脉冲、重频参差信号的流程化的自动测量方框图如图 6 所示,对应的软件仿真测量过程如图 7、8 所示,依次完成各参数自动测量,全程耗时不超过 20 s,相对于人工手动测量,测量速度出现了质的提升。频率捷变、线性调频信号测量流程可参考 2.3、2.4 节,仿真过程如图 9、10 所示,篇幅有限,本文仅展示关键步骤。

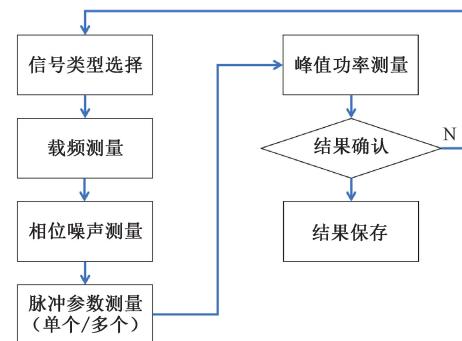
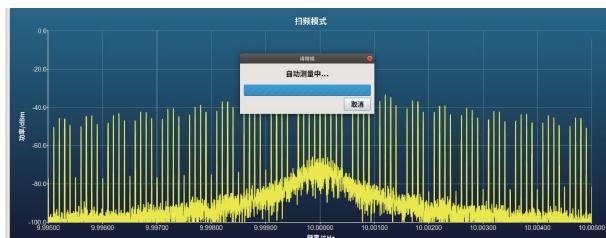
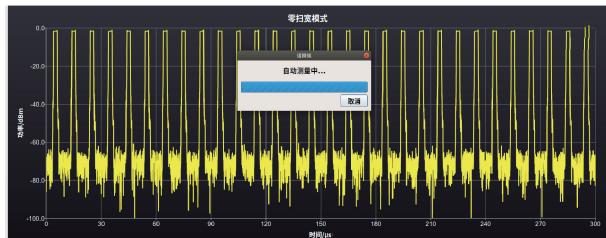


图 6 常规脉冲、重频参差信号流程化自动测量示意图

测量结果如表 3 所示。可知,对于 CF、PW、PRI 的测量结果较为准确,对于 POW 误差为 0.2 dB 左右,可能的原因是未考虑信号源输出接口、频谱分析模块接口处的插



(a) 频率扫描模式下CF、PN测量



(b) 零扫宽模式下的PW、PRI、POW测量

图 7 常规脉冲信号流程化自动参数测量过程演示

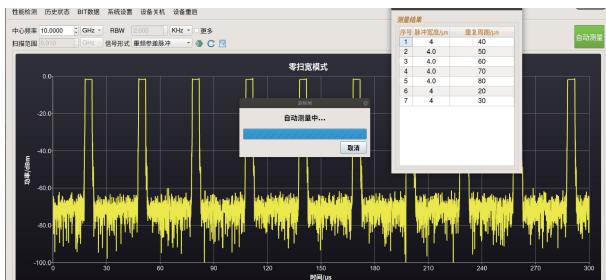


图 8 重频参差信号多项 PRI 测量

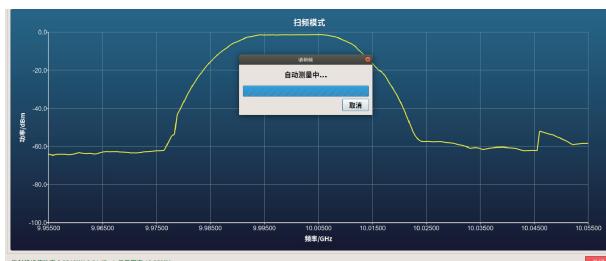
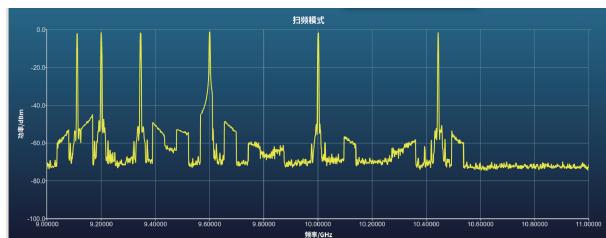
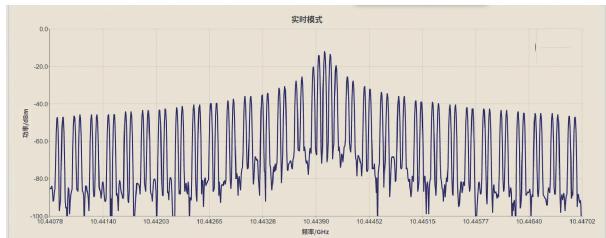


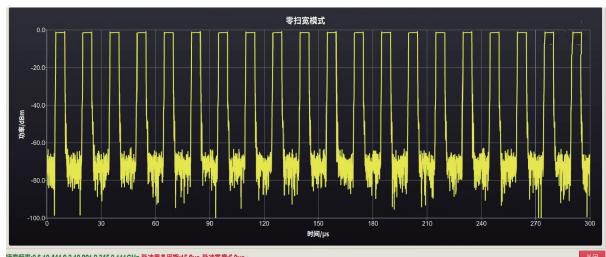
图 9 线性调频信号测量



(a) 最大保持状态CF粗测



(b) 实时模式下的CF精测



(c) 零扫宽模式下的PW、PRI测量

图 10 频率捷变信号测量过程

入损耗,但该误差低于机载雷达检测时所要求的 2 dB 误差限额,结果有效。对于带宽测量,误差低于 1%,符合一般机载雷达维护规程要求。由此可知,本文研究的方法,可以实现在时域和频域对多种常见雷达信号参数实现快速、精确测量。

表 3 测量结果汇总

参数	CF/ GHz	PW/ μs	PRI/ μs	PN/ dBc/Hz	POW/ dBm	BW/ MHz
常规脉冲	10	2	10	-91.5	-0.2	/
重频参差	10	4	20/30/40/50/60/70/80	-96.1	-0.2	/
频率捷变	9.111/9.2/9.6 9.345/10.001/10.444	5	15	-92.8	-0.1	/
线性调频	/	×	×	/	-0.1	10.08

4 结 论

本文提出了一种基于频谱分析模块的雷达参数流程化自动测量方法，并开发了相应测试软件以流程化执行算法完成测量。理论分析和实验验证表明，针对 4 种常见机载雷达信号，该方法可代替传统的多种通用仪器组合测量方法，通过与频谱分析模块数据交互，完成对信号参数的一键式自动测量，大幅简化操作步骤，减少人工干预，提高了测量效率。其他形式的雷达信号可参照本文提出的方法及步骤进行组合及拓展。该方法已于 2024 年 3 月在某飞行训练基地的实装机载雷达原位测试中得到了实践及验证，部队试用反馈效果良好，提升了外场检测的便捷性。下步将在此基础上继续探索更多复杂体制雷达信号参数的自动测量方法，并尽快应用到部队外场维修保障工作中。

参考文献

- [1] 丁鹭飞,耿富录,陈建春.雷达原理(第 5 版)[M].北京:电子工业出版社,2020.
- [2] 任黎丽,徐海燕,张颖.一种间断照射雷达信号的调制参数测试方法研究[J].计量技术,2018(6):17-19,30.
- [3] 芦永强,韩壮志,张宏伟.伪码调相连续波雷达信号多普勒频谱分析[J].装甲兵工程学院学报,2017(5):35-39.
- [4] 彭炜杰.雷达信号自动测试软件的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2018.
- [5] 刘艺.复杂调制雷达信号自动测试软件的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2015.
- [6] 宋吟龄.雷达频率源自动测试系统软件设计[J].国外电子测量技术,2015(2):47-49.
- [7] 范斐.基于频谱仪的雷达信号测试与分析软件设计与

实现[D].西安:西安电子科技大学,2017.

- [8] 孔维东,胡凯茂,汪蕊花.扫频式频谱分析仪的信号测量方法[J].中国无线电,2022(1):52-55.
- [9] 夏雁冰.频谱分析仪中扫描时间和相关参数的解析[J].国外电子测量技术,2008,27(3):73-75.
- [10] 詹志强.频谱分析仪技术及测试应用指南[M].北京:中国质检出版社,2016.
- [11] 全英汇,方文,沙明辉,等.频率捷变雷达波形对抗技术现状与展望[J].系统工程与电子技术,2021,43(11):3126-3136.
- [12] 易波,毕术龙,耿西伟.基于实时频谱分析的电磁频谱监测技术研究[J].舰船电子对抗,2021,44(3):96-99,119.
- [13] 胡泰洋,邵晓浪,肖孟煊,等.一种线性调频连续波探测抗雷达辐射源干扰方法[J].仪器仪表学报,2022(8):253-260.
- [14] 孙金泉,杨江平,毕红葵.扫频式频谱分析仪测量雷达发射功率误差分析[J].雷达与对抗,2013(1):51-55.
- [15] 常硕.航空信息设备原理[M].北京:航空工业出版社,2020.
- [16] 严利华,姬宪法,梅金国.机载雷达原理与系统[M].北京:航空工业出版社,2010.
- [17] 周志增,宋林涛,顾荣军,等.基于 Qt 的雷达数据处理软件开发与应用[J].火控雷达技术,2024,53(1):87-91.

作者简介

- 刘勇,博士,副教授,主要研究方向为航空电子设备测试。
E-mail:ythjhy115@163.com
- 郭凯(通信作者),讲师,主要研究方向为机载雷达原位自动测试。
E-mail:407717459@qq.com