

相控阵雷达 T/R 组件多总线自动测试系统设计

吕贵洲, 朱 赛, 梁冠辉, 安 婷

(陆军工程大学石家庄校区, 石家庄 050003)

摘要: 针对有源相控阵雷达数量巨大 T/R 组件参数自动测试与数据分析需求, 开展混合多总线自动测试系统研究; 进行了典型 T/R 组件性能参数与测试仪器设备需求分析、T/R 组件多总线自动测试系统硬件和软件系统设计、系统误差及修正策略分析; 该系统采用通用测试仪器结合专用测试控制单元的模式, 将 GPIB、LXI、USB 总线脉冲功率计、噪声系数分析仪、矢量网络分析仪等测试仪器集成到控制台上, 利用计算机进行测试过程控制, 完成 T/R 组件的自动测试硬件系统构建; 系统软件设置资源管理、自动校准、自动测试、手动测试和数据管理功能, 有效提高了系统配置与数据分析处理能力; 测试实验结果表明, 采用自动测试大大降低了工作量, 基于损耗数据修正的误差处理方法能有效保证测试精度。

关键词: 相控阵雷达; T/R 组件; 性能测试; 测试仪器; 系统集成

Design of Multi-Bus Automatic Test System for T/R Components of Phased Array Radar

LÜ Guizhou, ZHU Sai, LIANG Guanhui, AN Ting

(Shijiazhuang Campus of Army Engineering University, Shijiazhuang 050003, China)

Abstract: Aiming at the requirements of automatic test and data analysis of T/R components of active phased array radar, the hybrid multi-bus automatic system is studied. The performance parameters of typical T/R components and the requirements of test instrument and equipment are analyzed, the hardware and software system of multi-bus T/R components automatic test system are designed, and the system errors and correction strategies are analyzed. The system adopts the mode of general test instrument combined with special test control unit to test the GPIB, LXI, USB bus pulse power meter and noise figure analyzer, and the test instruments such as pulse power meter and vector network analyzer are integrated into the console, and the computer is used to control the test process, and the hardware design of automatic test of T/R components is completed. The system software is equipped with the functions of resource management, automatic calibration, automatic testing, manual testing and data management, which effectively improves the system configuration, data analysis and processing capabilities. The test results show that the automatic test greatly reduces the workload, and the error processing method based on the loss data correction can effectively ensure the test accuracy.

Keywords: phased array radar; T/R components; performance test; test instrument; system integration

0 引言

雷达装备 T/R (Transmitter and Receiver Module) 组件也称为雷达收发组件, 其通过控制组件输出信号的幅度、相位、时延信息, 可为波束快速扫描与实时单、多目标跟踪的有源相控阵雷达天线阵元提供多样化的激励信号, 在功能实现日趋前移的雷达装备研制中扮演的角色越来越重要^[1]。T/R 组件作为有源相控阵的核心部件, 每个天线阵元均由其进行馈电, 使得一部雷达系统中的组件集成量数以万计^[2]。如何对组件进行自动化测试是有源相控阵雷达研究所、使用单位有效研发雷达, 运用雷达必须认真考虑的因素。

T/R 组件通常具有同时多路收发通道、多种工作状态, 被测指标数目众多的特点, 如果完全依赖人工手动测试、记录、分析, 工作量将十分巨大。T/R 组件自动测试系统硬件构建方面基于不同总线进行系统设计, 文献 [3-4] 讨论了基于 GPIB 总线仪器的 T/R 组件测试系统设计与检定问题, 描述了系统的功能和总体结构, 检定主要包括检定参数、检定标准的选择、检定标准的不确定度、检定判据以及检定标准的溯源等内容。文献 [5] 结合仪器控制总线的发展, 论述了一种基于 LXI 总线的 T/R 组件 S 参数自动测试系统, 阐述了单次校准多次测量技术、开关矩阵设计、LXI 总线仪表通讯等关键技术。文献 [4] 介绍了 T/R 组件自动测试系统组成和测试原理, 测量精度的计算。文献

收稿日期: 2022-04-24; 修回日期: 2022-05-30。

作者简介: 吕贵洲(1977-), 男, 江苏睢宁人, 博士, 副教授, 主要从事电子装备测试与故障诊断方向的研究。

通讯作者: 朱 赛(1987-), 男, 河南郸城人, 博士, 副教授, 主要从事雷达工程、雷达性能检测与故障定位方向的研究。

引用格式: 吕贵洲, 朱 赛, 梁冠辉, 等. 相控阵雷达 T/R 组件多总线自动测试系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(9): 22-27, 39.

[7] 从硬件组成、软件设计方面介绍了一种 T/R 组件自动测试维修系统, 重点阐述了信号矩阵转换单元、可编程雷达状态控制器和辅助故障诊断技术, 概要进行了 T/R 组件测试系统的软件研究。软件设计方面侧重于 S 参数的测试分析, 文献 [8] 围绕 T/R 组件 S 参数测试系统的软件设计, 阐述了 T/R 组件移相和衰减全自动化测试的方法, 并介绍了 T/R 组件移相数据处理软件的设计。在测试校准方面注重仪器选择和校准方法设计, 文献 [9] 选择合适的仪器设备, 建立了 T/R 组件多项参数的校准标准。文献 [10] 采用基于 Database 的 SOLT 校准方法完成对 S 参数测试系统的校准, 在保证校准精度的同时, 有效提高了操作便捷性。测试系统结构设计方面注重批量 T/R 组件连接的自动处理, 文献 [11] 采用直角坐标机器人以及自动对插工作台实现 T/R 组件自动对插和测试, 进一步提高了自动测试系统的智能化程度。

以上成果主要论述了单一总线测试仪器构成 T/R 组件自动测试系统的系统构建、硬件组成、软件设计、校准实现等问题, 随着仪器仪表技术的迅速发展, 采用 GPIB、LXI、CAN、USB 等总线技术的仪器迅猛发展, 不同生产厂商支持的总线类型差异较大, 采用单一总线仪器构成自动测试系统存在效率不高、响应不快、优势发挥不明显的问题。为有效提升 T/R 组件测试系统效能, 集成多种总线仪器构成自动测试系统是未来的必然发展趋势。本 T/R 组件自动测试系统集成了 GPIB、LXI 和 USB 总线仪器, 基于 Labwindows CVI 开发应用程序, 对增强 T/R 组件自动测试系统适应性, 提高有源相控阵雷达保障能力具有较好的参考意义。

1 典型 T/R 组件性能参数及测试仪器设备

一般情况下, T/R 组件的测试分为电性能测试, 力学性能测试和环境适应性测试三部分。其中电性能测试在 T/R 组件的研发阶段以及实验应用阶段都需要进行性能参数测试, 而力学性能测试和环境适应性测试主要在 T/R 组件的研发定型阶段进行测试。在 T/R 组件的测试中, 一般将被测件 (T/R 组件) 等效成一个微波二端口网络, 利用微波矢量网络分析仪测量其微波二端口网络的散射参数 (S 参数), 再通过运算, 将 S 参数换算成被测网络所需要测量的参数。在实验室条件下完成 T/R 组件主要性能指标的测试所需仪器主要有微波信号源、矢量网络分析仪、功率计、示波器、噪声系数分析仪、频谱分析仪等。

通常 T/R 组件主要电性能参数及主要测试仪器设备见表 1^[13]。

矢量网络分析仪主要测试 T/R 组件 S 参数、接收增益和相位、接收输入输出驻波、接收幅相一致性、接收移相精度、收发隔离度等指标。频谱分析仪主要测试 T/R 组件的谐波失真、频谱特性和信号波形参数。噪声系数分析仪主要测量接收信道的噪声系数、放大器的噪声系数。以上测

表 1 T/R 组件主要电性能参数

序号	类别	指标名称	仪器
1	总体指标	工作频率范围	频谱仪
2		输入驻波系数	矢网
3		收发转换时间	示波器
4		组件效率	万用表
5	发射通道	输入输出功率	功率计
6		带内起伏	示波器
7		带内非线性	示波器
8		杂波抑制	频谱仪
9		发射波形顶降	示波器
10		脉冲上升/下降时间	示波器
11	接收通道	接收增益	矢网
12		带内起伏	示波器
13		带内非线性相位	矢网
14		接收噪声系数	NF 分析仪
15		接收相位不一致性	矢网
16		烧毁峰值功率	功率计

试均为某一仪器设备的自动测试控制, 相对比较单一, 这里重点关注一下功率波形参数和转换时间测试子系统的构成原理。

1.1 输出信号功率、波形参数测试

T/R 组件功率、波形测量利用定向耦合器与脉冲功率计组成扩展量程间接测量 T/R 组件发射功率。将功率传感器的视频检波信号接到数字示波器上, 通过数字示波器的自动测试计算完成上升时间、下降时间和顶降的测试。亦可将脉冲功率计替换为频谱分析仪完成上述参数的测量。将频谱分析仪分辨率带宽 RBW 设置为大于脉冲信号的主瓣宽度即可, 在零扫宽模式下可以显示信号脉冲包络时域波形, 从而可以确定脉冲调制信号的时间参数。

其测试系统框图如图 1 所示。

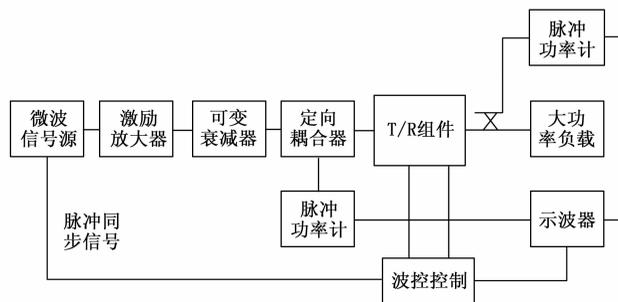


图 1 T/R 组件发射功率测试系统框图

1.2 收发转换时间测试

T/R 组件收发转换时间定义为在相控阵雷达工作期间, T/R 组件由发射状态转换为接收状态所需要的时间。在高重复频率工作方式下, 能精确测量并评估 T/R 组件收发转换时间具有重要的意义。

T/R 组件的收发转换时间的测试一般是在 T/R 组件接

收通道中完成, 测试系统框图如图 2 所示。

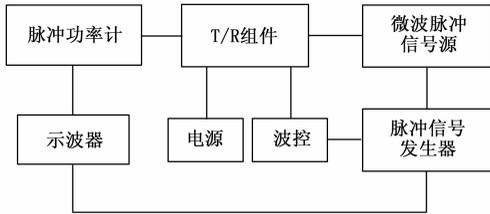


图 2 T/R 组件收发转换时间测试框图

首先将被测组件置于接收状态, 将功率计功率检波后的视频输出信号送至示波器, 利用示波器观察经检波后的视频输出信号, 然后将组件改为发射状态, 此时仍测试接收通道, 脉冲调制信号作为波控收发转换开关转换控制信号, 输出信号波形的上升沿或下降沿就分别为 T/R 组件的收、发状态转换时间。

2 T/R 组件多总线自动测试系统硬件设计

2.1 组成及原理

T/R 组件测试系统由硬件资源和测试应用程序组成, 其原理框图如图 3 所示。硬件资源能最大限度地实现平台的开放性、灵活性和可扩展性, 允许用户根据不同的测试对象灵活地剪裁和增加硬件资源。系统主要由中心计算机、测试仪器单元、发射电源系统、射频矩阵控制信号产生单元、T/R 组件工作状态控制与收集单元、输出射频矩阵控制信号分配单元、输出射频矩阵单元、接收电源、功率计、矢量网络分析仪、噪声仪、脉冲发生器组成。系统信号采用集中互连模式, 集中管理全系统测试信号。系统中的各种激励源连接到信号中枢, 被测件的输入

端口与信号中枢的激励源端口相连, 输出端口与信号中枢的测试端口相连。对于发射通道及接收通道测试状态, 小信号直接进行测试, 大信号则在信号中枢中衰减后再到各测试仪器进行测试; 将采集到的数据由测试软件按照相应的算法计算分析, 得出相应的测试数据。

表 2 系统主要硬件组成表

序号	名称	数量	主要测试功能
1	机柜	2	仪器、仪表安装
2	矩阵单元	1	激励通道、测试通道建立及信号互通
3	功率放大器	1	激励信号形成
4	状态控制与收集	1	被测件状态控制
5	工控机、控制电缆、接口卡	1	用于系统控制和数据采集及处理
6	矢量网络分析仪	1	发射通道幅相一致性及接收幅相、驻波比、移相、衰减
7	噪声仪	1	测量噪声系数
8	功率计(含功率探头)	1	发射通道输出功率
9	脉冲发生器	1	二次谐波及杂波抑制制度等频谱参数
10	电源	2	提供被测件工作电压

2.2 主控计算机

主控计算机为系统控制与状态收集的核心, 选用工业控制计算机, 支持 LAN、USB、串口总线通信模式, 其通过 USB/GPIB 转换卡、USB、LXI 总线发送控制指令, 接收 T/R 组件状态数据并进行数据处理。运行人机交互应用

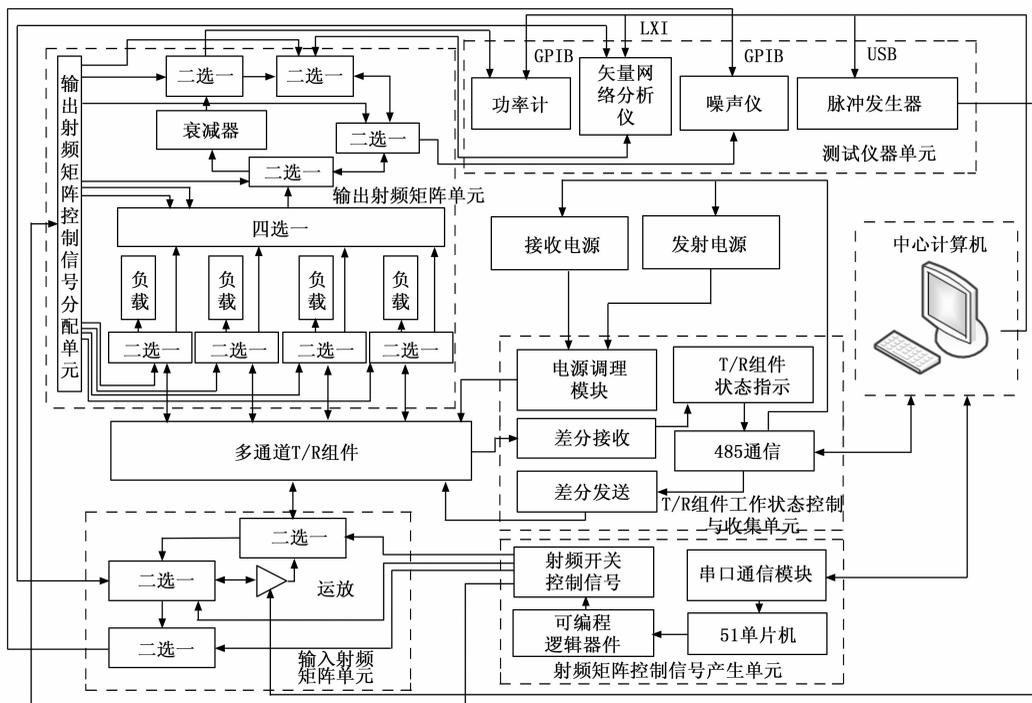


图 3 T/R 组件多总线测试系统框图

软件, 测试人员根据测试的需要组合测试通道和测试项目、仪器状态、被测件的状态的控制等。

2.3 T/R 组件工作状态控制与收集单元

T/R 组件工作状态控制由控制板实现, 其接收来自主控计算机的控制指令, 并根据控制指令转换成相应的开关控制信号, 完成发射电源、接收电源和 T/R 组件工作通道切换; 同时该装置还可以向计算机提供开关状态, 确保系统的安全, 防止误操作损坏系统或被测件。开关控制采用 CPLD 扩展控制端口数, 装置采用串口方式实现与主控计算机的通讯。控制板原理框图如图 4 所示。

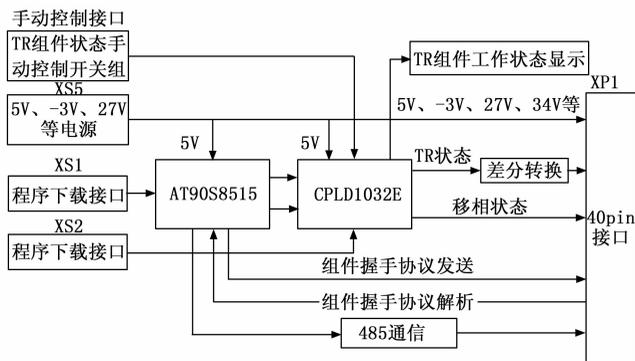


图 4 控制板原理框图

控制板通过 AT90S8515 单片机片内 UART 实现控制板与计算机主机之间的串行 485 通信, 完成计算机控制指令的接收和 T/R 组件、仪器设备状态的收集。

AT90S8515 采用 RISC 结构、内载 Flash 精简指令集, 采用低功耗 CMOS 技术设计, 支持 C 高级语言及汇编语言^[16]。

AT90S8515 采用 RS485 协议与控制计算机通信, 通过 CPLD 1032E 传输控制命令和状态收集, 速率控制在 115 Kbps 以下, 采用差分平衡发送与接收, 从而抑制共模干扰, 同时实现故障保护, 防止 T/R 组件发射、接收状态控制误操作。

2.4 输入及输出射频矩阵控制单元

输入及输出射频矩阵单元由多路可编程微波开关组成, 分为输入开关网络和输出开关网络。测试端开关网络根据 T/R 组件特点和测试要求, 设计了 4 个通道, 根据信号大小可以选择衰减通路和直通通路, 既防止大功率信号损坏测试仪器, 又满足各种测试仪器的动态范围, 并可以根据不同测试项将信号转接到不同的测试设备 (包括: 矢量网络分析仪、噪声分析仪、功率计等) 进行测试。

电子开关和机械开关是实现微波信号通路切换的两种方式, 电子开关寿命长、重复性好, 但由于采用电子控制其频率范围有限, 可承受的微波功率不高。机械开关无源切换方式可实现更好的重复性, 频率适应范围更广。系统射频通道动态构建采用 Dowkey 机械开关, 其具有良好的重复性、较小的驻波系数和理想的插入损耗, 可靠性、可信度均较高。微波开关选型指标见表 3。

表 3 微波开关选型指标

序号	型号	技术指标	
		驻波	插损
1	DowKey401-220802A	2 选 1 开关	0.2 dB
2	DowKey545-520803A	4 选 1 开关	0.2 dB

2.5 测试仪器单元

测试仪器单元主要包括 N1911A 功率计、E5071C 矢量网络分析仪、N8975A 噪声系数分析仪和 N33250A 任意波形发生器, 各测试仪器通过射频矩阵单元对多通道 T/R 组件指标测试采用多模式复用的方式进行控制与应用。

2.5.1 N1911A 脉冲功率计^[17]

Keysight N1911A 为单通道宽带脉冲功率计, 频率范围为 50 MHz~18 GHz (N1921A 功率传感器)、50 MHz~40 GHz (N1922A 功率传感器), 可测量平均功率、峰值功率和峰值平均功率比。可测量脉冲上升时间、下降时间、脉冲宽度、正脉冲转换时间和负脉冲转换时间等脉冲调制参数。可进行功率参数统计分析, 支持 30 MHz 的分析带宽和 100 MHz 的实时采样, 能提高脉冲调制信号完整的功率和时域参数。

N1911A 功率计最大采样率 100 MHz, 最小脉冲宽度 50 ns, 平均功率测量精度可达 ±0.2 dB, 最大脉冲重复频率 10 MHz, 能够满足 T/R 组件发射和接收功率测量需求。

2.5.2 E5071C 网络分析仪^[18]

Agilent E5071C ENA 网络分析仪具有远超同类产品的卓越性能和速度。E5071C 具有高达 20 GHz 的宽频率范围, <0.004 的轨迹噪声, >123 dB 的动态范围, 65 dB 全频段功率扫描 (在 9 kHz 到 5 GHz 之间), IF 带宽扩展到最大 500 kHz, 9 毫秒 401 点的快速测量速度和 0.005 dB/°C 的温度稳定性, 能够满足精确测量 T/R 组件 S 参量需求。

2.5.3 N8975A 噪声系数分析仪^[19]

安捷伦 N8975A 噪声系数测试仪为安捷伦 NFS 系列典型噪声测量仪表, 频率范围 10 MHz~26.5 GHz, 测量带宽 100 kHz~4 MHz, 不确定度 ±<0.15 dB, 可实现 T/R 组件各通道噪声系数的测量。

N33250A 任意波形发生器用于 T/R 组件脉冲工作模式调制脉冲的产生, 这里不再赘述。

3 T/R 组件多总线测试系统软件设计

3.1 测试系统应用软件

系统软件设计包括功能设计、模块设计和代码设计, 从体系上采用基于任务的系统规划方式, 针对 T/R 组件数量多、通道多、参数多的特点, 将自动校准、自动测试、自动设置的思想运用到系统软件设计中, 基于结构化数据库查询方式对数量巨大的测试数据进行分析, 从而保证 T/R 组件测试与分析的效率和质量。

软件系统组成如图 5 所示, 主要包括资源管理、自动校准、自动测试、手动测试和数据管理五大模块。

资源管理主要完成仪器端口地址、协议、初始化状态

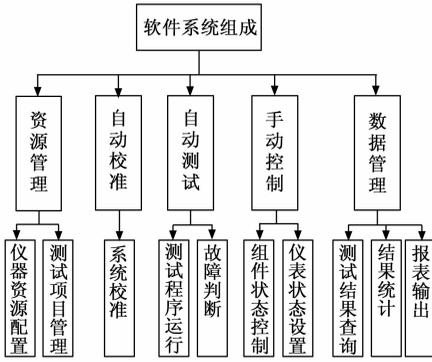


图 5 测试系统通用软件组成

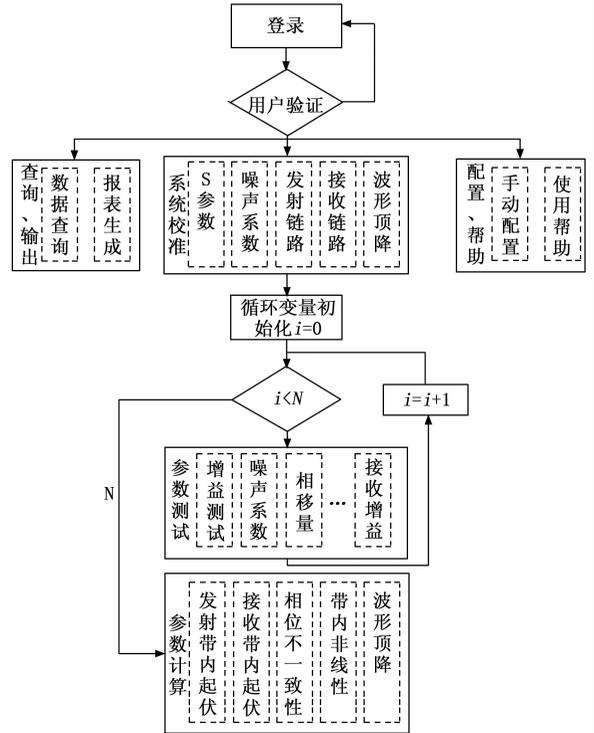


图 6 测试系统软件流程图

等资源配置，增益、功率、反射系数、通道选择等测试项目管理，实现硬件资源与软件资源的映射。

自动校准用于射频矩阵单元、测试仪器单元、电源管理等全系统的数据校准，引导用户进行系统信号通路损耗等补偿数据的获取，允许用户对修正数据进行管理，校准数据直接存储在特定的数据库表单中，为后续测试数据修正提供支撑。

自动测试模块完成基于设定测试任务的矩阵切换、仪器设置与测量、数据记录与分析、T/R 组件故障状态的自动控制与数据记录，在执行过程中提供连续运行、监控测试、停止运行等常用功能。通过变量监控功能，方便用户检查测试流程。自动测试可大大提高测试效率，对批量 T/R 组件的自动测试具有重要作用。

手动测试主要用于故障 T/R 组件或状态异常 T/R 组件分步测试，组件状态控制用于 T/R 组件通道选择、衰减量、发射/接收模式的控制，仪表状态设置用于测试仪器单元中功率计、矢量网络分析仪、噪声系数测试仪、脉冲发生器的输出模式、测量模式、测量参数、分析参数的手动设置，为准确定位 T/R 组件故障部位提供支撑。

数据管理模块主要包括测试结果、结果统计和报表生成功能。

系统采用 ODBC（开放数据库互连）技术访问数据库，数据库基于 Access+Sql Server 进行数据处理。

系统软件处理主要流程如图 6 所示。软件系统首先基于数据库查询功能实现用户账户的登录验证，验证成功后根据用户需求可选择查询、输出、系统校准或配置、帮助功能。测试控制的主流程包括系统校准、参数测试、参数计算模块。

为保证测试精度及测试结果可信度，在系统校准的基础上，系统采用循环结构实现某一参数测量的多次测量平均，将 T/R 组件增益测试、接收通道噪声系数测试、接收增益测试等归结为参数测试，利用总线仪器实现参数的多次自动测量，并利用软件程序实现结果平均，最后将最终结果存入数据库，以备后续查询和处理。

以多组参数测试结果为依据一定的数据处理规则，获取参数计算中的发射带内起伏、接收带内起伏等指标参数，在

软件设计过程中注重数据处理过程的图像化、形象化处理。

相控阵雷达 T/R 组件参数测试中进行自动测试具体包括以下步骤。

步骤 1：仪器校准。

该步骤主要用于测试装置中测试仪器单元、连接电缆和微波控制组件等方面信号传输路径上信号的功率衰减、相位延迟修正，保证测试 T/R 组件测试结果的准确性。

步骤 2：输入射频信号构建。

判断测试源功率是否满足 T/R 组件输入激励要求，如满足则将源激励通过开关切换，否则回到测试源功率设定模块，将符合 T/R 组件测试要求的射频信号输出到射频矩阵单元并连接到 T/R 组件的发射激励端口。

步骤 3：输出通道与仪器控制。

T/R 组件多路输出信号接入输出到射频矩阵控制信号分配单元，通过开关组合切换将多路转接为 1 路，根据不同测试项选择测试仪器，如功率计、矢量网络分析仪等，程序自动生成测试控制指令和测试控制参数，完成相应的测试项目，输出测试数据。

步骤 4：测试数据分析。

应用程序根据测试仪器的测试数据生成测试数据库，首先根据测试数据完成 T/R 组件状态判断，针对数据库提供结果查询和报表生成功能，为 T/R 组件的管理提供数据和手段支撑。

3.2 测试仪器单元远程控制

3.2.1 N1911A 功率计远程控制

N1911A 在测试系统中实现 T/R 组件输入或输出微波

功率测量, 在具体的控制过程中主要涉及控制命令写入和功率测试数据的读取。N1911A 支持 GPIB、LAN 和 USB 远程接口模式。

通过远程接口设置 GPIB 地址的指令为: SYSTem: COMMunicate: GPIB: ADDRess, 查询 GPIB 地址的指令为 SYSTem: COMMunicate: GPIB: ADDRess? query. 自动配置 LAN 的命令为 SYSTem: COMMunicate: LAN: DHCP [: STATe], 也可独立配置 IP 地址, 子网掩码, 缺省网关和主从设置^[17]。当选择 USB 接口进行远程控制时, 不需要进行前面板配置或远程配置。

系统 N1911A 远程控制采用 GPIB 模式, 采用 VISA 读和 VISA 写指令实现功率计状态及数据的读取和写入操作。基本操作包括参数初始化 (* CLS)、波形显示纵轴范围设置、功率偏移设置、频带宽度设置和触发设置等。具体指令可查阅官网编程手册。

3.2.2 安捷伦 E5071C 矢量网络分析仪远程控制

E5071C 支持 GPIB、LAN、USB 远程控制, GPIB 接口允许由外部计算机对 Agilent E5071C 进行控制。计算机向 E5071C 发送命令和指令, 并接收 E5071C 经 GPIB 发送的数据。LAN (局域网) 远程控制系统提供两种方法, 即利用 SICTL-LAN 服务器 E5071C 进行控制和利用远程登录服务器对 E5071C 进行控制。USB (通用串行总线) 远程控制模式通过 USB 控制设备, 这相当于通过 GPIB 控制设备。通过符合 USBTMC-USB488 和 USB 2.0 标准的接口建立连接。

E5071C 远程控制过程主要包括: 选择工作通道/迹线、配置测量条件、配置显示设置, 执行功率校准、接收机校准, 触发系统、启动一个测量过程、等待测量结束, 设置数据传送格式、内部数据处理、检索测量结果、标注测量迹线等。

3.2.3 N8975A 噪声系数测试仪远程控制

N8975A 在后面板上有两个 GPIB 连接器。一个连接器用作与使用远程指令集的计算机通讯, 另一个连接器-LO GPIB 由 NFA 用于控制外接本振。NFA 的作用相当于 LO GPIB 上的控制器。本设计采用主 GPIB 模式, 其支持 SCPI 编程语言。控制过程主要包括: GPIB 地址设置、预设噪声系数分析仪、校准命令 CALibration: AUTO [: STATe] OFF | ON | 0 | 1 实现自对齐和自诊断、显示 (DISPlay) 子系统控制测量结果的选择和展现方式等。

4 系统误差分析与修正

4.1 测试结果分析

基于设计的“相控阵雷达 T/R 组件多总线自动测试系统”对某型炮位侦察校射雷达 4 通道 S 波段 T/R 组件的发射通道脉冲输出功率、接收幅度、接收相位、发射相位等指标进行了测试, 测试结果与产品规范数值对比见表 4。从测量结果看, 系统各测试功能对 T/R 组件性能指标测试具有较好的适应性。

表 4 部分指标测试精度对比表

序号	指标名称	标称值	测量值	误差
1	输出功率	23 dBm	22.6	0.4
2	输入驻波	1.3	1.18	0.12
3	输出驻波	1.3	1.26	0.04
4	发射增益	20 dB	19.7	0.3
5	接收噪声系数	2.0 dB	1.85	0.15
6	相位不一致性	5°	4.9°	0.1°
7	接收增益	18 dB	18.36	0.36

4.2 发射功率测试不确定度

功率测试不确定度受到环境温度、匹配状态等因素的影响。从发射功率通道测试流程看, 主要不确定度包括输入信号功率的不稳定、校准器引入的不稳定度、功率探头特定频率上功率曲线不稳定度等。

为最大限度的降低功率测试不稳定度, 基于构建初始损耗数据库的方式提前记录偏差用于后期测量的数据修正, 从而得到待测参数的真实值。表 4 功率测量误差结果表明, 系统功率测量精度能够满足 T/R 组件测试需要。

4.3 接收相位测试的不确定度

相位作为 T/R 组件关重参数, 其不确定度主要来源于测量仪器的不确定度、系统通道时延引起的相位不确定和随着系统工作温度升高通道相移量不确定偏移。

系统在降低接收相位测试不确定度方面, 主要采用基于不同温度的参数误差补偿策略, 将不同温度不同频点的通道固有相移存储于特定数据表格中, 在实际测试时根据环境选择特定修正量, 从而最大限度地保证相位测量稳定度。表 4 相位不一致性测量误差结果表明, 系统相位不一致性测量精度能够满足 T/R 组件测试需要。

5 结束语

T/R 组件测试系统设计是有源相控阵雷达设计与应用中需考虑的重要问题之一。通用测试仪器结合专用测试控制单元的模式是构建自动测试系统的有效手段, 射频矩阵控制单元设计提高了系统的兼容性和可扩展性, 为今后构建 T/R 组件全指标的测试系统预留了足够的硬件接口。实践表明, 该测试系统精度高、稳定性好、可靠性高, 能够满足多通道 T/R 组件多参数自动测试要求。该测试系统的设计方案方法对其他电子装备自动测试系统构建具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] 田川. T/R 组件小型化关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2015.
- [2] 张皓. 多通道 T/R 组件关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
- [3] 刘芳瑾, 卢晨, 曹雷. T/R 组件测试系统的检定新方法 [C] //江苏省计量测试学术论文集, 2005: 104-107.

(下转第 39 页)