

卫星导航抗干扰射频单板自动化测试系统设计及实现

吴海龙[†], 宋合, 杨坤

(上海华测导航技术股份有限公司, 上海 201703)

摘 要: 针对卫星导航抗干扰射频单板人工测试过程较复杂且难以快速批量测试的问题, 提出了基于 C# 与 STM32 的卫星导航抗干扰射频单板自动化测试系统。首先, 通过自动化测试软件与 STM32 主控制器数据通信控制射频开关电路进行数据采集, 然后将采集数据与多次人工测试结果对比分析, 形成多项校准参数并应用于测试系统, 最后通过批量测试验证系统测试结果准确性。通过批量试验数据证明各项测量指标误差均小于 2.5%, 测试效率较人工测试提升至少 3.3 倍, 具有较高测量精度和效率。同时, 该自动化测试系统对测试单板有过压过流保护功能, 能有效保护被测单板不被损坏, 综合整体性能具有良好的应用前景。

关键词: 过流保护; 射频开关; 数据采集; 数据通信; 自动化测试

中图分类号: TP29, TN710

文献标识码: A

Design and Implementation of Automatic Test System for Satellite Navigation Anti-Interference RF Board

WU Hailong, SONG He, YANG Kun

(Shanghai Huace Navigation Technology Co., Ltd., Shanghai 201703, China)

Abstract: Aiming at the problem that the manual test process of satellite navigation anti-interference RF Board is complex and difficult to test in batches efficiently, an automatic test system for satellite navigation anti-interference RF Board based on C# and STM32 is proposed. Firstly, through the automatic test software, the equipment communicates with the STM32 main controller to control the RF switch circuit for data acquisition. Then, the collected data is compared and analyzed with multiple manual test results to form a number of calibration parameters and is applied to the test system. Finally, the accuracy of the system test results is verified by batch test. Through batch test data, it is proved that the error of each measurement index is less than 2.5%, and the test efficiency is at least 3.3 times higher than that of manual test, with high measurement accuracy and efficiency. At the same time, the automatic test system has overvoltage and overcurrent protection for the test board. It can effectively protect the tested board from damage, and has a good application prospect in terms of its overall performance.

Key words: overcurrent protection; RF switch; data acquisition; data communication; automatic test

早在 2000 年, 中国投入建设第一代北斗导航系统, 时至 2020 年 6 月, 北斗三代卫星导航系统组

网完成, 北斗卫星导航定位系统并非只是用于导航和军事, 而在人们的日常生活中也变得不可或缺,

为用户提供实时导航服务、定位服务、授时服务，以及短报文通信等。

卫星导航系统起初的设计目的是为人类提供全天候精准位置信息服务，未能充分考虑复杂电磁环境下的接收机工作的问题，并且卫星所发射信号的载波频率以及调制方式等信息是公开的，容易受到人为设计的干扰影响^[1]。特别是对于军事领域来说，卫星导航系统与武器系统直接关联，拥有信息化战争中导航资源的掌控权是信息作战取胜的关键点^[2-4]。

为提高复杂环境下卫星导航系统的抗干扰性能，天线阵一般采用多阵元方式^[5-6]。多阵元的设计意味着存在多路下变频和中频采样电路，这对具有多路通道产品的批量测试提出了更高的要求。对于硬件电路设计而言，涉及多通道的信号测量，尤其涉及射频板的信号测量，其中包括下变频信号、上变频信号、时钟信号、本振信号、馈电电压测量等。人工测试的效率较低，并且对测试人员对仪

器的操作水平也有一定的要求^[7]，加之目前市场存在的单板测试系统不能兼容本文所涉及的射频单板测试^[8]。为提升产品批量测试效率和测量准确度，本文设计了一种具有过压过流保护功能^[9]的射频单板自动化测试系统，它能够在提升工作效率的同时保证信号采集的准确度，为抗干扰相关产品的批量生产奠定基础。

1 总体方案设计

卫星导航抗干扰射频单板自动化测试系统总体设计框图如图 1 所示，系统主要由仪器设备与信号采集两部分构成。仪器设备部分包括运行自动化测试软件的电脑、三层交换机、信号源、频谱仪、程控稳压源、串口服务器，信号采集部分包括信号转接板、电源电路模块、MCU 主控制器核心板、多路选择器板以及待测射频单板。

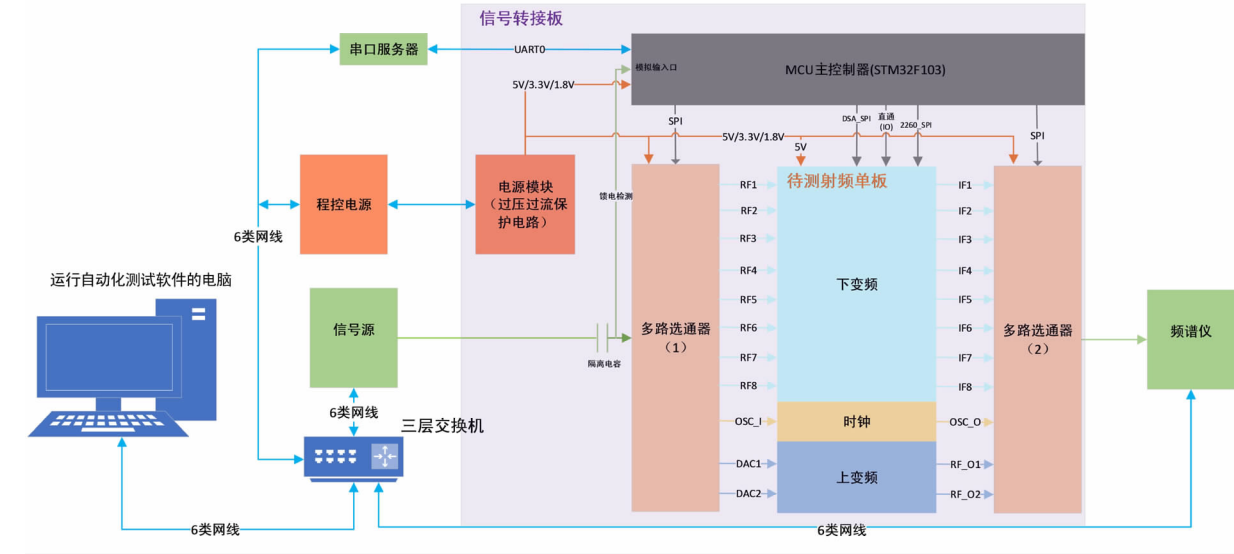


图 1 系统总体设计框图

1.1 仪器设备部分控制流程

仪器设备部分采用三层交换机连接信号源、频谱仪、串口服务器和 PC。其自动化测试基本控制流程为 PC 运行自动化测试软件，通过各仪器设备的 IP 地址，软件向各个设备发送控制指令，实现对各种仪器的控制和数据采集^[10]。

PC 自动化测试软件的主要功能是根据用户制定相应的测试流程，根据测试流程控制信号源产生所需频率输出，然后通过指定通信协议采集频谱仪观测数据，最后通过串口服务器与 MCU 主控制器进行数据通信，进而控制多路选择器板进行通道切

换和读取 MCU 主控制器采集的各项参数，并最终形成测试报表。

信号源在自动化测试系统中是不可缺少的组成部分，其主要功能是根据测试软件上流程所制定的参数进行相应的配置，并输出射频信号至多路选择器板，为待测射频单板提供信号输入。

频谱仪在自动化测试系统中的作用十分重要，其主要功能是采集多路选择器的输出端信号，该信号根据选通路的不同，需要先设置为对应的参数，然后 PC 主动发送采集指令获取频谱仪采集的数据并存储分析。

1.2 数据采集部分基本原理

数据采集部分的核心控制与通信功能由 MCU 主控制器实现,核心控制由 STM32F103 核心板、过压过流保护电路以及电流检测电路组成。MCU 核心控制器通过串口与 PC 进行数据交互,接收来自 PC 的控制指令并执行相应的操作,包括馈电电压采集、多路选择器板通道控制、各模块工作电流采集、待测射频单板的芯片参数配置和通道增益控制、采集数据液晶显示屏实时更新等功能。

信号转接板除了转接信号之外,还为整个系统提供稳定的电压和电流,并且在电压和电流异常时保护电路能够生效从而使待测射频单板避免过压损坏。此外,转接板电路设计添加了功耗检测电路,能够准确检测各个模块的工作电压和电流,检测到异常时会经 MCU 主控制器控制断电保护被测单板。

2 自动化测试系统硬件设计

2.1 多路选通器模块设计

待测射频单板的通道数量通常比较多,传统的单路测试方式难以满足要求^[11-12]。这就需要单输入多输出的电路来实现多个通道的选通,简化测试流程,减少人工干预。本文设计的多路选通器模块采用游隼半导体的 PE42412 射频开关芯片,PE42412 具有隔离度高、通道切换迅速、插损低的特点。多路选通器设计最大支持 20 通路信号的切换选择,电路设计框图如图 2 所示。

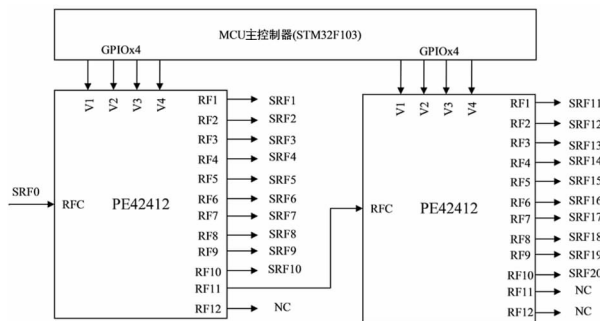


图 2 多路选通器电路设计框图

图 2 所示的左侧芯片的第 11 路连接右侧芯片的 RFC 引脚,遂左侧芯片支持 10 路对外输出和 1 路内部信号传输,第 12 路未对外连接。右侧芯片支持 10 路信号对外输出,其中第 11 和 12 路未对外连接。两片 PE42412 芯片控制引脚连接至 MCU 控制器的 GPIO,MCU 控制器采用意法半导体的 STM32F103 作为主控芯片,通过 GPIO 输出

的不同逻辑值控制 PE42412 的通路选择,最终实现 20 通路的射频开关功能。

2.2 过压过流二次保护电路设计

过压过流保护电路设计采用多次保护的措施实现对负载器件的保护功能,系统设计框图如图 3 所示,系统主要包括三部分:DC-DC 降压模块、MCU 主控制器和过压过流保护电路,MCU 主控制器和过压过流保护电路的供电采用 DC-DC 降压模块产生的 3.3 V 电压,MCU 主控制器与过压过流保护电路连接方式采用 GPIO 连接 PW1555 的使能信号,进而控制负载电压的输出,采用 IIC 总线连接 INA3221,获取相关寄存器参数,进而转化为负载电流数据^[13],INA3221 具有三路负载功率检测功能。

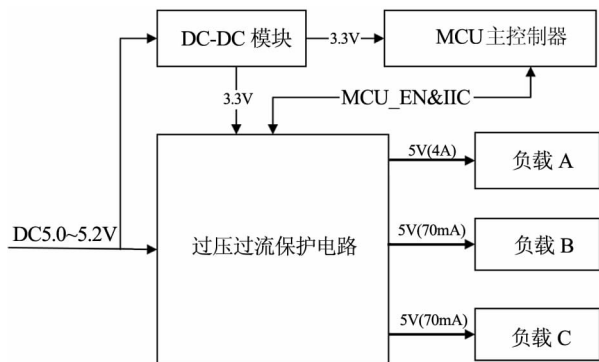


图 3 过压过流保护电路系统设计框图

过压过流保护电路设计主要采用 PW1555 芯片和 INA3221 芯片,实现过压过流双重保护设计的工作模式,其中 PW1555 芯片实现过压和过流保护功能,其可以通过配置电阻设置限制电压电流值。INA3221 芯片实现检测负载电流功能,MCU 主控制器读取其相关寄存器的参数,根据电路设计将参数转换为其负载电流数据。根据负载电流的情况,MCU 主控制器控制 PW1555 的使能信号,进而根据负载情况保护后级负载电路安全。

DC-DC 降压模块设计采用 TI 公司的 TPS62111 芯片,该芯片采用宽幅电压输入,支持 3.1 V 至 17 V 的输入电压,同时具有较高转换效率,转换效率高达 95%,本文设计的电路采用固定 3.3 V 的输出电路,电路原理图如图 4 所示。

可编程限流开关 PW1555 作为过压过流保护电路的第一级保护,具有输入电压范围选择和输出电压钳位设计,集成了保护 N 沟道 FET 极低 RDS 有助于提升电源转换效率,同时该芯片提供过热保护和过压过流保护功能,其原理图如图 5 所示。

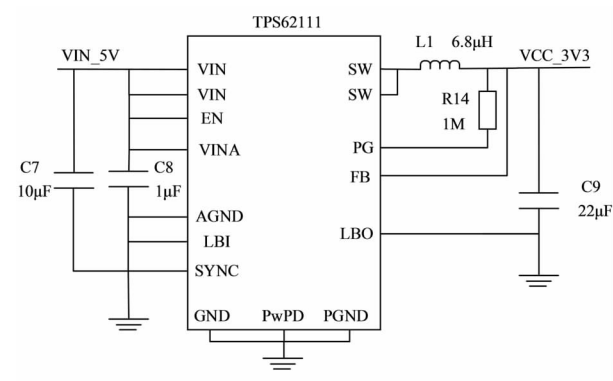


图 4 DC-DC 降压电路原理图

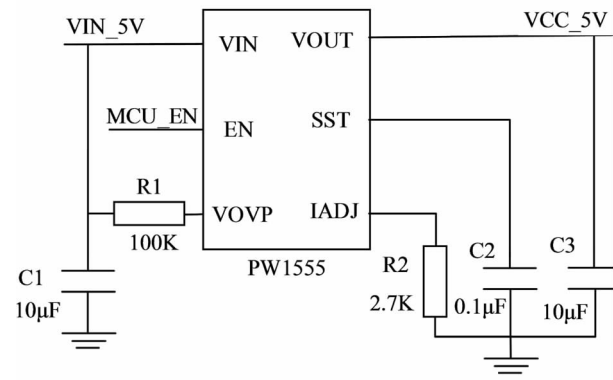


图 5 可编程限流开关原理图

PW1555 的过压过流保护功能,通过采用电阻配置的方式实现,其中过压保护需要通过改变 VOVP 引脚的输入状态来控制过压保护阈值,在图 5 中通过电阻 R1 进行控制。如表 1 所示,根据设计需求采用输出 5 V 设置,过压阈值设置为 6 V,所以图 5 中需要将 VOVP 引脚接入电源输入端。对过流保护功能,调节电阻值即可实现限流保护功能,具体调节值由图 5 中的 R2 进行控制,R2 为公式 1 中的 R_{ADJ} ,根据公式(1),计算可得 $I_{lim} \approx 4.07$ 。

$$I_{lim} = \frac{11}{R_{ADJ}} \quad (1)$$

表 1 过压阈值配置表

序号	VOVP 模式	输出电压/V	过压阈值/V
1	LOW	3.6	4
2	HIGH	5.0	6
3	OPEN	12	14

根据图 5,PW1555 芯片过压过流控制能力为负载输出电压 5 V,最大支持输出电流 4.07 A,即负载功耗最大值为 20.35 W。

过压过流第二级保护电路由 INA3221 功耗检测芯片、MCU 主控制器及第一级保护电路共同构

成,具体过程为 MCU 主控制器与 INA3221 芯片进行 IIC 通信,获取三路通道的功耗值,当其通道功耗值超过设置阈值时,通过 MCU 主控制器控制 MCU_EN 引脚的电平控制 PW1555 关闭电压输出,以起到保护后级负载期间的作用。

图 6 所示为功耗检测电路原理图,采用 INA3221 芯片,支持三路功耗检测,同时 IIC 通信总线连接到 MCU 主控制器,由 MCU 主控制器获取相关寄存器参数,进而计算出每一路的功耗值。电阻 R11、R12、R13 为功率电阻,通过测量电阻两端的电压差即可计算得到负载当前的电流值。

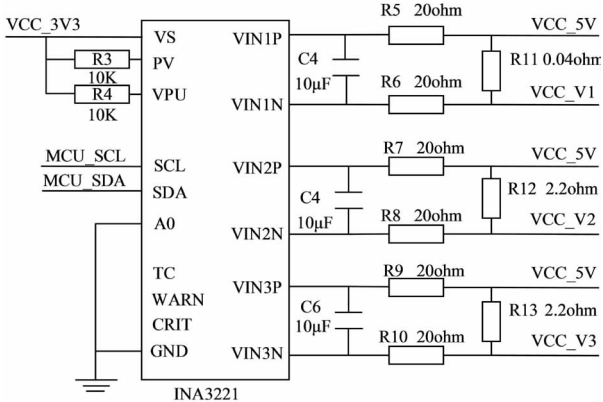


图 6 功耗检测电路原理图

功耗检测电路作为第二级保护电路,其对应的公式(2)可以计算出每条通道的电流,功耗检测电阻串联在负载电路之中,根据串联电路电流相等的原理可得负载电流,公式(2)中的 U_{rsamp} 值数据来自 MCU 主控制器读取的 INA3221 寄存器参数值, R_{samp} 为功耗采样电阻的阻值,公式(3)中的 U_{load} 为图 6 中的 VCC_5 V 即 5 V 电压,每条通道的功耗采样电阻根据负载功耗检测需求,采用不同的参数设计。

$$I_{load} = \frac{U_{rsamp}}{R_{samp}} \quad (2)$$

$$P_{load} = U_{load} \times I_{load} \quad (3)$$

第二级保护电路的作用是辅助第一级保护电路并且能够通过程序控制其负载功耗的限制。针对不同的射频单板进行测试时,由于射频板的功耗差异,采用统一的功耗参数不能满足所有单板采用测试需求,因此不同单板需要采用不同的功耗限制条件。

2.3 馈电电压采集电路设计

MCU 主控制器设计采用 STM32F103 核心板,其核心最高运行频率为 72 MHz,闪存 512 KB,SRAM 为 64 KB,提供三个 12 位模数转换器

(ADC), 馈电电压的采集采用电阻分压方式, 电压采集使用 MCU 核心板内部 ADC, 电路设计如图 7 所示。

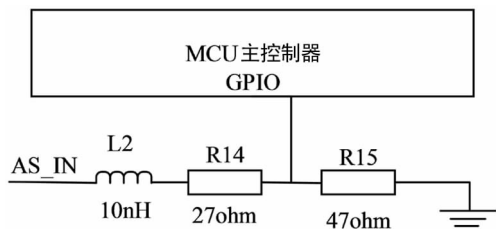


图 7 馈电电压采样原理图

图 7 所示 AS_IN 信号表示馈电电压信号输入点, 按照正常设计值该处的输入信号为 4.5 V~5.2 V 间, 由于 MCU 主控制器的工作电压为 3.3 V, 所以分压后电压必须小于或等于 3.3 V, 电流必须大于或等于 70 mA, 电路参数设计如公式(4)所示。

$$U_{ref} = \frac{R_H}{R_H + R_L} \times U_{AS_IN} \quad (4)$$

$$I_{ref} = \frac{U_{AS_IN}}{R_H + R_L} \quad (5)$$

其中: U_{ref} 表示 MCU 采集电压数据, $U_{ref} \leq 3.3$ V, R_L 为电路设计中的 R14, R_H 为电路设计中的 R15, U_{AS_IN} 为馈电电压输入值, I_{ref} 表示采样电路电流。

根据公式(4), 当馈电电压采用最大值 5.2 V 计算时, 则 $U_{ref} \approx 3.3$ V, 根据公式(5)计算其采样电路电流为 $I_{ref} \approx 70.3$ mA。卫星导航抗干扰射频单板的射频输入端馈电电流能力要求至少为 60 mA, 电路设计中 I_{ref} 的设计值满足系统要求。

3 自动化测试系统软件设计

卫星导航抗干扰射频单板自动化测试系统中的软件部分分为两大部分, 即运行于电脑端的基于 C# 环境开发的自动化测试监控软件^[14]和运行于 MCU 主控制器的基于 KEIL 环境开发的下位机软件, 其中 MCU 主控制器软件采用 Free-RTOS 实时操作系统^[15]。

3.1 自动化测试监控软件设计

自动化测试监控软件主要功能分为三部分。第一部分是控制外部仪器设备, 包括程控电压源、信号源、频谱仪等, 控制程控电压源输出单板测试所需的电压和电流, 控制信号源产生单载波信号用于测试变频电路工作是否正常, 控制频谱仪按照指定的模式工作并采集通道测试时频谱通道功率数

据; 第二部分是与 MCU 主控制器进行数据通信, 发送控制指令配置射频链路通道切换、配置射频板下变频工作模式、采集馈电电压数据功能; 第三部分是软件测试流程, 包含各种测试参数采集分析, 并将采集的数据形成测试报表, 结合理论标准值生成报告。

自动化测试监控软件运行流程图如图 8 所示。首先向频谱仪、信号源、程控电源依次发送连接指令, 然后发送控制指令, 按照既定的测试模板所指定的测试模式进行设置, 最后控制程控电源上电, 与 MCU 主控制器建立连接, 并向 MCU 主控制器发送测试指令, 进行通信实现通道切换以及数据采集工作。接下来按照流程进行各项数据的采集与存储分析, 最后以理论测试合格区间为判据, 测试数据结果位于理论值区间为合格, 否则为不合格, 以此为据形成测试报表。

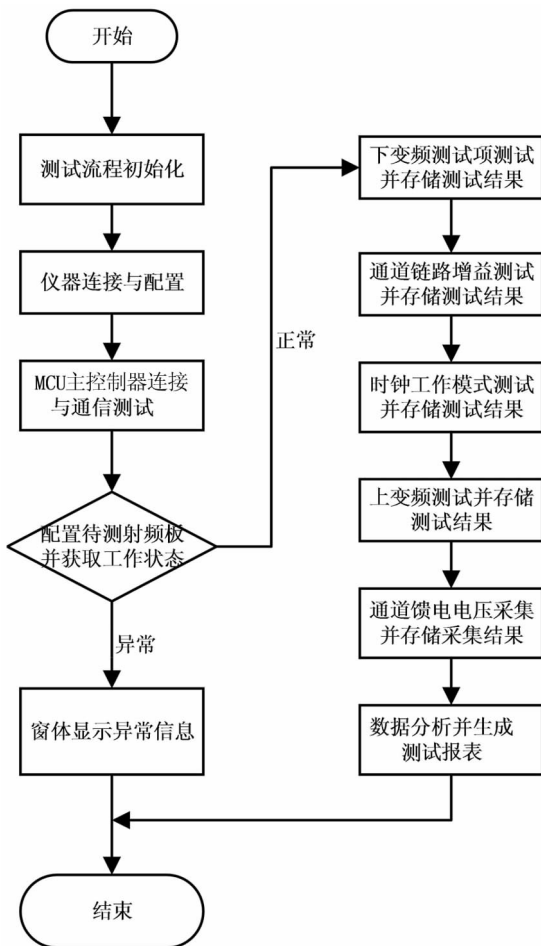


图 8 自动化测试监控软件运行流程图

卫星导航射频单板自动化测试软件界面如图 9 所示, 采用 C# 进行开发, 测试流程根据设定的序号运行, 每个测试项都采用程序控制, 并在所有的测试项测试完成后对采集的数据进行分析, 形

成测试报表。测试报表采用 EXECL 文件,测试报表体现了射频单板的各项测试数据,对测试不合格

的项目进行标注。



图 9 卫星导航射频单板自动化测试软件界面

3.2 MCU 主控器软件设计

MCU 主控制器软件设计采用 FreeRTOS 实时操作系统内核,轻量级的操作系统,包括任务调度、时间管理、消息式队列等多项功能,并能在 RAM 较小的单片机上运行,且具有相关代码开源和可移植性的特点。MCU 主控制器的主要功能包含 3 部分。第一部分是串口数据通信,解析自动化测试系统发送的指令,根据指令内容控制多路选通器以及馈电电压和射频单板功耗数据采集功能;第二部分是 UI 界面显示部分,通过 4.2 寸 LCD 液晶显示屏显示射频通道切换状态、三路负载的功耗监测显示、各通道馈电电压监测显示等功能;第三部分是数据采集,包括馈电电压采集与计算和各主要模块功耗采集,通过定时中断的方式定时更新采集数据。

MCU 主控制器设计采用意法半导体的 STM32F103ZET6 核心板,作为自动化测试系统的核心主控制器采用了 FreeRTOS 操作系统。创建任务流程如图 10 所示,在主函数中实现任务的创建,其中主要包括 INPUT 任务、MONITOR 任务和 UART 任务。INPUT 任务主要是 UI 显示控制,

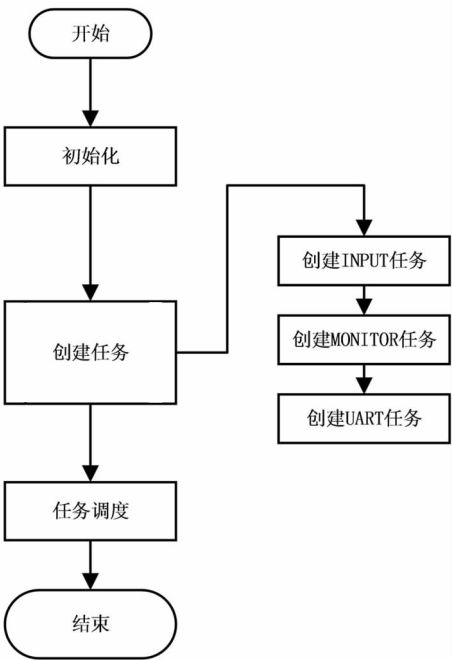


图 10 MCU 主控制器软件任务流程图

在有外部触摸的情况下,按照触摸点实现具体功能并且驱动液晶显示屏进行信息的实时更新、响应及时;MONITOER 任务主要是通过 IIC 总线采集

INA3221 芯片三端负载电路的功耗信息,并根据功耗判断三路负载是否工作异常,在异常的情况下能够控制相关电路实现断电保护功能;UART 任务主要是对串口接收的数据进行解析,对指令信息进行解析和执行对应的操作,包括控制多路选通器的通道切换、配置待测射频单板的通道增益以及采集的各项数据。

4 实验测试与结果分析

4.1 射频通道馈电电压实验与分析

对卫星导航射频单板的射频通道馈电电压的自动化采集采用了电阻分压方式,按照实际的电流负载能力进行了分压电路设计,公式(5)所示的计

算结果体现了在负载电流为 70 mA 的条件下采集的电压值,并将采集的电压值按照公式(4)反向计算出 U_{AS_IN} 即可。

由于硬件电路设计上器件的误差会导致测量的结果存在一定的误差,射频单板固定测试夹具后第一次使用需要根据人工测试的数据进行校准^[16],校准后的自动化测试系统才具有高精度的测量结果。

加入校准参数的修正后,经过射频单板 50 套批量测试,测试数据为表 2,其中的数据电压值采用 50 组数据的平均值计算,利用万用表实际测量的各通道馈电电压值均值为 4.8 V,整体的各通道误差值最大为 0.31%,具有较高的测量精度。

表 2 馈电电压采集数据表

射频通道	1	2	3	4	5
U_{ref}	2.942	2.942	2.94	2.941	2.9
U_{AS_IN}	4.7886	4.7886	4.7869	4.7869	4.7853
实测值	4.80	4.80	4.80	4.80	4.80
误差/%	-0.24	-0.24	-0.31	-0.27	-0.31

4.2 负载电路功耗监测与过压过流保护实验与分析

为验证功耗监测电路采集数据的精度,采用电子负载仪作为负载进行测试验证,在测试过程中 MCU 主控制器软件设计中对负载进行监控但不做阈值设置。首先是验证 PW1555 芯片过压过流保护功能,将电子负载仪设置为定流模式,以电流递增的设置方式经过多次测量得到图 11 实验结果,其中电子负载仪的电流设置采用 0.1 A 步进采集数据,当设置电流值为 4.2 A 时,自动化测试上电后立刻自动断电保护,此时负载仪功耗值显示为 0 W,由于 PW1555 芯片的限流功能采用电阻设计实现,故器件的误差最终体现为过流保护的阈值必然也有误差,实际测量数据与理论值 4.07 A 仅仅存在 0.13 A 误差,满足系统设计规划。

为验证负载电路功耗采集精度,检流电阻的阻值精度较高,在功耗测量过程中不需要校准即能准确采集电压电流数据。现采用电子负载仪配置定流模式,电流范围从 1 A 至 3 A,采用 0.5 A 步进方式进行测试,测试结果如表 5 所示,电子负载仪测量的功耗值与 INA3221 芯片检测的测量功耗误差较小,其中最大误差为 0.79%,此处电路设计的检流电阻设计为 0.04 Ω,检流电阻的阻值越小测量

精度越高。

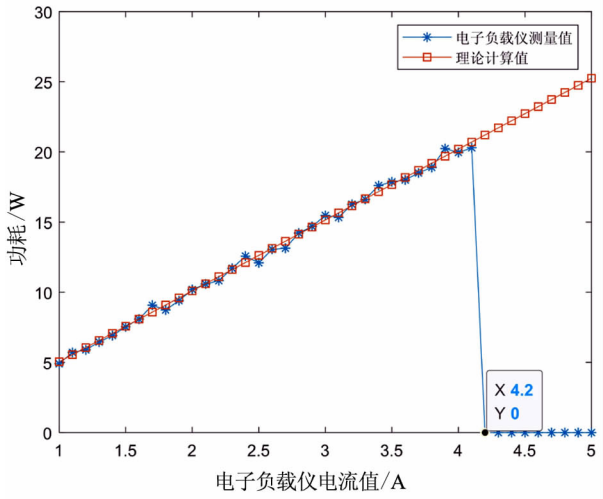


图 11 电子负载仪功耗测量数据图

经过电子负载仪的验证测试后,采用 5 套射频单板进行实际功耗测试实验验证,得到了表 3 的数据。其中的检测功耗为 MCU 通过 INA3221 芯片采集的功耗值,实测功耗值为直流稳压源界面显示的输出功耗值,通过分析可得自动化测试系统采集的功耗数据与实际功耗误差最大为 1.02%,满足系统设计要求指标。

表 3 射频单板功耗测试记录表

编号	1 #	2 #	3 #	4 #	5 #
检测功耗/W	7.3245	7.4375	7.2689	7.4667	7.2468
实测功耗/W	7.4	7.5	7.3	7.5	7.3
误差	1.02%	0.83%	0.42%	0.44%	0.73%

4.3 射频通道链路增益测试与分析

卫星导航抗干扰射频单板的射频通道作为电路设计的关键部分,其中的链路增益性能决定射频单板功能的重要指标^[17]。作为射频单板自动化测试系统测试的关键性指标项,测试系统需要能够准确地测量其通道增益值和对通道链路增益进行控制^[18]。

在自动化测试之前,需要对多路选通器板的通道链路损耗进行测量和标定,标定数据将会在自动

化测试监控软件中采集的通道增益进行补偿计算并获得最终的测量结果,在批量待测试的射频单板选取其中一块进行测试验证,得到表 4 数据。以射频单板的前 5 通道进行测试,首先利用信号源和频谱仪人工测试通道增益,并记录测试结果,然后利用测试系统测试,并记录测试结果,测试系统采集的增益值与标定链路损耗值相加为测量值,比较测量值与人工测试值分析可得,其测量误差最大为 2.41%,满足系统设计要求标准。

表 4 射频通道增益测试记录表

射频通道	1 #	2 #	3 #	4 #	5 #
人工测试数据	11.2	11.8	11.6	12.1	11.7
自动化测试数据	7.13	6.99	7.18	7.96	7.09
标定误差值/dB	4.2	4.6	4.7	4.3	4.8
误差/%	1.16	1.78	2.41	1.32	1.62

4.4 上变频功能测试、时钟切换功能测试与分析

在射频单板的自动化测试过程中,上变频的功能测试是通过输入中频信号、频谱仪采集射频信号的频点和功率数据的方式验证。其工作原理是信号源输出中频的单音信号,自动化测试监控软件通过读取频谱仪的上变频射频输出结果,根据输出结果的中心频率和信号功率值判定功能完备与否。时钟切换的功能是当外部有时钟信号输入时,采用外部时钟工作,没有外部时钟时,采用内部时钟工作。

通过实验验证,上变频功能与时钟切换功能测试,自动化测试系统功能完备。

4.5 自动化测试系统整机测试验证与分析

对自动化测试系统进行整机测试验证,实验采

用多批射频单板进行批量测试,每一块射频单板都完整测试射频单板所有测试项,通过与人工测试的方式对比验证,测试结果如表 5 所示。采用 5 批射频单板进行测试,其中射频单板的射频通道数为 10 通道,每批次 20 块单板,每个批次采用不同的人员测试。由于测试人员的差异对于同样型号、同样数量的射频单板最终的测试时间有很大差异,每个测试人员的用时并不完全一致,而自动化测试系统的用时基本一致,自动化测试系统的单板的测试效率至少为人工测试效率的 3.3 倍,并且自动化测试系统不会随着测试单板数量的增加而用时变长,随着射频单板数量的增加,自动化测试系统的效率会比人工测试效率进一步提升。

表 5 多批量射频单板测试记录表

批次	Q1—20	Q2—20	Q3—20	Q4—20	Q5—20
人工用时/min	172	175	170	180	168
自动化用时/min	52	51	51	53	50
自动化提升效率	3.3	3.43	3.33	3.40	3.36

5 结 论

卫星导航抗干扰射频单板自动化测试系统设计上支持多通道信号测量,包括下变频、上变频、外部时钟切换、馈电电压测量等,同时自动化测试系统采用 C# 语言开发,能够支持多型号、多类型的射频单板测试流程建设。射频单板自动化测试的馈电电压测量误差小于或等于 0.31%,射频单板功耗测量误差小于或等于 1.02%,射频通道增益测量误差小于或等于 2.41%,自动化测试系统的单板的测试效率至少为人工测试效率的 3.3 倍,在提升测试效率的同时保障了测试单板的安全,同时自动化测试系统支持多通道的扩展,综合来说具有良好的测量精度和测试效率,具有很好的实用性和扩展性。

参考文献

[1] 朱明峰,秦昕,游敬云. 卫星导航抗干扰技术及其发展趋势[J]. 航天电子对抗,2021,37(6):61—64.

[2] 武智佳,于合理,焦海松,等. 卫星导航用户终端多阵元抗干扰天线空间特性分析与研究[J]. 无线电工程,2023,53(4):853—859.

[3] 熊超,刘宗毅,卢传芳,等. 国外卫星导航系统发展现状与趋势[J]. 导航定位学报,2021,9(3):13—19.

[4] WANG Y, SUN F, WANG X, et al. Construction of the performance index system of navigation confrontation and research on its related evaluation methods [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:

1—10.

[5] 梁康贵,肖玉林,李鹏程. 基于空时自适应调零的导航抗干扰技术研究[J]. 航天电子对抗,2022,38(4):54—58+64.

[6] 白景坡,高平,蒋伟,等. 基于阵列信号处理的北斗抗干扰终端设计[J]. 无线电工程,2021,51(4):271—276.

[7] 阎俊,费月玲,张敏芳. 基于 LabVIEW 的某探测组件自动化测试平台设计[J]. 火控雷达技术,2021,50(1):102—107

[8] 张文涛,王健,张涛,等. 基于 MSP430 自动化单板测试系统的研究[J]. 无线互联科技,2014(12):1—2.

[9] 赵川粤,冯全源,刘恒毓. 低压系统中的过压欠压保护电路设计[J]. 电子测量技术,2022,45(7):88—92.

[10] 李雷,严玉国,曹海霞,等. MLS 信号源状态参数的自动测试系统设计[J]. 弹箭与制导学报,2017,37(3):88—92.

[11] 赵润年,汤瑞. 一种矢量信号解调和频谱分析的射频接收通道设计[J]. 国外电子测量技术,2018,37(4):50—53.

[12] 全智,顾一帆. 基于深度学习的射频电路空间辐射测试系统[J]. 仪器仪表学报,2022,43(12):248—257.

[13] 杨朝龙,刘斌,张志浩,等. 一种新型高精度电流检测电路的设计[J]. 电子技术应用,2021,47(11):39—43+46.

[14] 鲁严,陆云龙,杨洋,等. 基于 VICTS 相控阵天线的自动化测试系统[J]. 无线通信技术,2020,29(3):31—35.

[15] 李佳翔,范文兵,张真真. 基于 FreeRTOS 的嵌入式视频矩阵系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件,2023,40(2):164—169+235.

[16] 王耀利,张凯旗,张翀,等. 一种低损耗射频 MEMS 器件测试夹具设计研究[J]. 国外电子测量技术,2021,40(9):106—110.

[17] 侯林源,黄新明,张鹏程,等. 卫星转发信道饱和条件最优功率增益设计与分析[J]. 全球定位系统,2022,47(6):96—101.

[18] 李林,刘永芳. 基于 mTCA 平台的射频前端板性能测试与研究[J]. 电子测量技术,2022,45(5):163—168.