

〈系统与设计〉

一种温度补偿调焦红外系统丢包检测方法

花文波¹, 赵城慷¹, 高大友¹, 花文涛²

(1. 航空工业西安航空计算技术研究所, 陕西 西安 710000; 2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘要: 在红外技术广泛应用于当前军事、安防、医疗等领域背景下, 如何提高红外系统信号的传输质量和传输可靠性, 成为了一个亟待解决的问题。本文通过研究温补技术在红外系统中的丢包应用问题, 提出了一种失同步触发判断丢包检测方法, 并对其性能进行了系统分析、测量和验证。本研究为提高红外系统信号传输质量和信号完整性、可靠性提供了一种新的解决思路和技术方法。

关键词: 温补调焦; 红外; 检测方法; 失同步

中图分类号: TP391.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2024)09-1081-06

Packet Loss Detection Method for Temperature Compensation Focusing Infrared System

HUA Wenbo¹, ZHAO Chengkang¹, GAO Dayou¹, HUA Wentao²

(1. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710000, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Considering the widespread application of infrared technology in military, security, medical, and other fields, improving the transmission quality and reliability of infrared system signals has become an urgent problem that should be solved. In this study, the application of temperature compensation technology in infrared systems for packet loss is investigated. A method is proposed for detecting packet loss via asynchronous triggering judgment, and systematic analyses, measurement, and verification are performed. This study provides a new solution and technical method for improving the signal transmission quality, signal integrity, and reliability of infrared systems.

Key words: temperature compensation focusing, infrared, detection method, out of sync

0 引言

红外技术在军事、安防、医疗等领域的应用越来越广泛, 尤其在夜视、监控、热成像等方面^[1-2]。在红外航空电子系统中, 为了实现对红外目标的探测、搜索、识别和跟踪, 需要将景物温度分布转变为可见光图像, 这部分功能, 主要是由光电雷达来实现, 它一般由整机部件、电源部件和校准部件组成^[3-4]。在复杂电磁环境干扰下, 为了确保信号传输质量和可靠性, 一般处理方法有光纤延迟传输技术、光波导延迟线技术、短波超视距传播衰减计算、连续雷达波技术、光纤传输技术、光电混频技术、光电数字信号处理技术等, 主要解决低损耗、宽带宽、高延时精度, 提高系

统的抗电磁干扰能力, 随着新兴技术的发展, 压缩感知作为新的数据处理技术, 可通过非自适应线性投影来保持信号的原始结构, 它使得高分辨率信号的采集成为可能^[5-6]。

FC (fibre channel, 光纤通道) 接口模块, 作为光电雷达校准控制部件的核心部件之一, 在机载通信环境中, 用以实现前端红外搜索跟踪系统探测部件到综合核心处理机之间数据传输交互功能, 作为前端红外搜索跟踪系统的对外接口模块, 通过 FC 接口, 实现与综合核心处理机的点到点交联。

在红外通信过程中, 信号的传输质量对系统的性能具有至关重要的影响, 而信号传输过程中的丢包现象, 则会导致系统性能的降低。针对这一问题, 本文

收稿日期: 2023-11-05; 修订日期: 2023-11-22.

作者简介: 花文波 (1986-), 男, 陕西西安人, 高级工程师, 研究方向是导航、制导与控制。E-mail: 315058939@qq.com。

基金项目: 航空科学基金 (20200025031001)。

通过研究温补调焦技术在红外系统中的通信丢包检测方法,提出了一种有效的丢包检测解决方案。

1 系统组成及工作原理

1.1 系统组成

温补调焦技术是一种利用光学元件对图像进行自动调焦的技术,通过对图像进行温补调焦,用以提

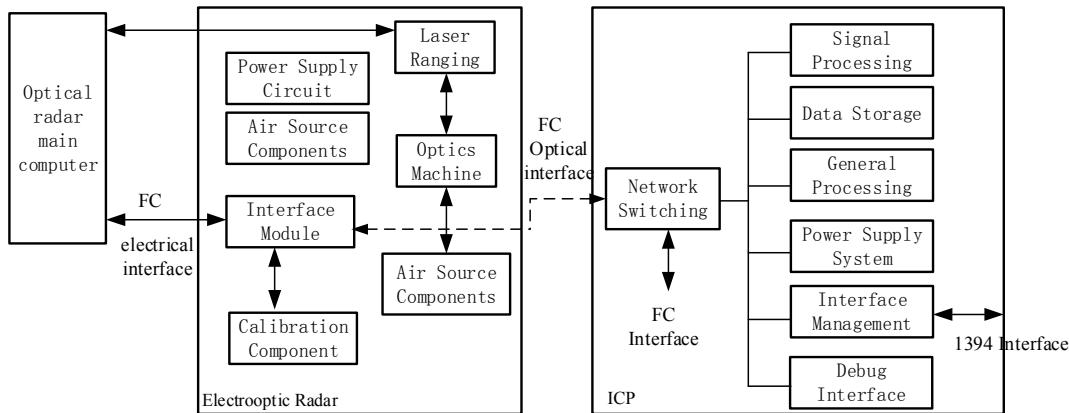


图1 系统结构工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of system structure and working principle

1.2 工作原理

光电雷达仿真计算机主要用来实现对光电雷达控制指令的发送、接收、图像比对、数据处理等操作,可以用来控制外部光学校准部件、激光测距部件,使系统进入相应的工作状态。

光电雷达系统主要由供电电路、激光测距电路、光学机械部件、气源部件、FC 接口模块、校准部件组成,供电电路是为光电雷达系统提供所需的稳定电源电压;激光测距电路用以计算发射的激光与目标距离的大小;光学机械部件是将接受到的电信号转换为视频信号;气源部件用以实现对光接收状态元件的冷却、制冷,保证设备工作在相对稳定可靠的温度环境中;FC 接口模块是光电雷达的核心电子部件,主要是将光电雷达主计算机发送的控制指令,以控制器局域网(controller area network, CAN)报文的形式转换成满足光纤通道航空电子系统匿名用户消息协议(Fiber Channel-Avionics Environment-Anonymous Subscriber Messaging, FC-AE-ASM)协议的 FC 光信号^[8],实现前端红外搜索跟踪系统探测部件到综合核心处理机的数据传输交互功能,对内提供 CAN 互连以及 CamLink 图像采集接口;校准部件主要是光电雷达的校准^[9]。

综合核心处理机(ICP)是航空电子系统任务系统的管理中心和处理中心,用以完成任务系统的综合控制和管理,包括战术计算、接口控制、健康管理、信号综合处理等功能^[10]。在光电雷达测试系统中,FC 接

高图像的清晰度和对比度,从而有效地提高图像的质量^[7]。在光电雷达红外系统中,温补调焦技术主要应用于接收机的热成像特性,提高信号传输的可靠性。它的整个测量系统,主要是由光电雷达仿真计算机、光电雷达系统、综合核心处理机(integrated core processor, ICP)组成,它的系统结构见图1所示。

口模块在将前端 CAN 控制指令和视频数据转换成 FC 光信号后,发送给综合核心处理机的网络交换模块,通过内部星型拓扑连接结构,与交换机高速无阻数据交换,对光电功能任务进行大量的信号处理和数据处理,包括红外信号和数据的处理、目标数据监测、多目标数据探测和跟踪、前端红外搜索跟踪系统的模式控制和状态监测等,并提供分区数据配置和资源共享,实现雷达模式控制、状态监测、目标数据处理。

2 故障测量方法

在红外探测地面调试过程中,通过对光电雷达发送调试指令、摩擦力矩测试、随动速度/加速度测试、温补调焦等命令时,发现上位机软件偶尔才能收到1次温补调焦消息,正常指令收发间隔应为200ms,系统性能测试不合格。温补调焦收发异常对应短消息故障,这些消息指令均是通过 CAN 总线进行收发测试,因故障在系统联试时才能偶发复现,故障定位难度大,迫切需要查明系统故障原因。

2.1 系统分析及测量

FC 分析仪,是 JDSU 公司提供的 Finisar 产品,它的工作原理是利用半导体材料的特性,实现光信号的收发和放大,在发送光信号的过程中,通过使用一系列的模拟和数字电路对输入的光信号进行处理,生成精确的多路复用信号,这些信号被发送到目标设备,从而实现高速、远距离的光通信。

系统分析过程中,主要是利用 FC 分析仪,通过

对上位机仿真卡、光电雷达接收数据、后端综合核心处理机的输入、输出数据进行监测,找出故障的功能部件或模块产品。分别将光电雷达输出端 FC2 光纤和 FC5 光纤串入 FC 分析仪,见图 2 所示,根据上位机软件发送的温补调焦指令,可以测量光电雷达 CAN 总线输入端数据是否与发送指令一致,若数据一致,说明上位机与光电雷达之间的 CAN 总线通信正常,分别通过分析仪测量 FC2、FC5 位置捕获的 FC 消息内容,能够确定故障原因是 FC2 位置没有收到前端发送的 CAN 指令,通过对光电雷达内接口模块测量验证,确定故障与接口模块相关电路有关。

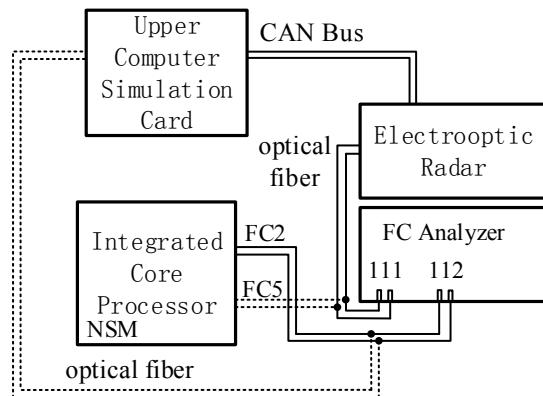


图 2 分析仪监控测试示意图

Fig.2 Schematic diagram of analyzer monitoring and testing

2.2 地面测试系统架构

接口模块的性能验证是在地面测试系统中进行的,它通过模拟用户的使用环境,实现接口模块的测试、调试和环境试验,主要由外部数据激励平台和测试机箱组成。

外部数据激励平台主要用于实现接口模块测试时外部激励信号的输入,内部包含一个通用处理器模块母板,一个通用处理器模块,一个 CAN 激励源模块,一个 Camlink 视频数据激励模块,通用处理器模块的供电和 CAN 激励源模块的供电由外部数据激励平台内部提供,测试时,接口模块插入测试机箱,通过测试工装的线缆连接到外部数据激励平台,通过给外部数据激励平台和测试机箱供电后,打开外部激励台上模块测试开关,接口模块的 CAN 激励源模块就会周期性地输出接口模块所需 CAN 短消息激励信号,由模块 CAN 总线经内部数据光电转换后,输出 FC 光信号,再将处理后的数据交给通用处理器模块进行比较,由通用处理器模块上 RS232 串口打印收发消息流结果。根据系统测试时 CAN 短消息故障现象,可以确定故障与以上通信过程有关,实验室环境下,常温反复加电测试,故障不复现。

2.3 接口模块故障分析

接口模块是以 FPGA 为核心,外围搭载配置电路、CAN 接口电路、RS232 接口电路、复位电路、电源电路、时钟电路、FC 光电转换电路等。

1) 电源电路

接口模块采用 +5 V 直流供电,经电压转换后生成模块隔离电压 5V_H、3.3V、2.5V、1.8V、1.2V、1V 等各种电压,其中 1.2V、1V 是 FPGA 的核电压,2.5V 是 FPGA 芯片的辅助电压,1.8V 是 PROM 芯片的供电电压,3.3V 是模块各功能器件的基础工作电压,通过对接口模块各供电电压进行测量,实测值均在预期设计电压值范围内。

2) 时钟电路

接口模块有 3 种时钟,分别为模块提供系统时钟、FC 工作时钟、CAN 接口工作时钟,其中系统时钟,连接 FPGA 的时钟 IO,通信时钟,连接 FPGA GTX 高速接口时钟管脚,CAN 接口时钟连接 CAN 协议芯片,示波器测量各时钟频率,时钟频率、占空比、幅值均满足要求。

3) FC 光电转换电路

通过 FPGA 的高速串行接口,使用交流耦合方式,连接到光电转换器件,转换为光信号之后,通过 MT 接口形式引出到模块外。通过对光电转换器件外部控制信号、输入输出信号、发送端光功率进行测量判断电路功能是否正常,也可通过自环的方式,直接测量环路工作状态及链路误码率,判断是否可靠工作。

4) 逻辑电路

逻辑电路工作时,FC 接口接收到的数据通过光电收发器将光信号转为电信号后,进入可编辑阵列逻辑(Field Programmable Gate Array, FPGA),然后将进入 FPGA 的电信号通过内部 GTX 接口转为并行数据,发送给内部 MAC(数据链路)模块,MAC 模块接收到数据帧后,将数据帧发送给 MAC 接收控制模块,并向外部的 FC 数据发送端回复 R_RDY 原语,将 R_RDY 原语通过 GTX 发送出去,MAC 接收控制模块在接收到数据帧后,再将数据发送给 MAC 接收缓冲模块,协处理器从 MAC 接收缓冲模块读取 FC 数据,转换成 CAN 数据通过 CAN 总线发送给外部 CAN 设备,其工作逻辑见图 3 所示。

通过 FPGA 内嵌逻辑分析仪 chipscope 抓取逻辑内部信号,发现故障时,MAC 接收到 GTX 传过来的 FC 数据帧,但并未将 FC 数据传递给 MAC 接收控制模块,并且未回复 R_RDY 原语。

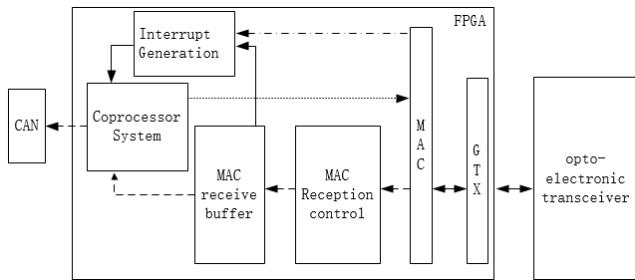


图3 模块工作逻辑架构

Fig.3 Module work logic architecture

5) CAN 接口电路

CAN 接口电路用于和传感器控制模块之间进行数据交互，主要通过 CAN 协议芯片和收发器来实现，接口电路使用专用的光电耦合电路进行隔离保护，在实现可靠数据通信的前提下，对电路进行有效保护。故障发生时，通过软件获取 CAN 接口状态标志，CAN 接口状态标志正常。通过 CAN 接口测试设备模拟 CAN 总线数据收发，数据收发测试正常。

6) FPGA 电路

FPGA 电路采用 Xilinx 公司的 XC5VFX30T 实现，用以满足 FC-ASM 协议处理和 CAN 通信管理，通过内嵌的硬核处理器完成维护软件及应用软件的执行，CAN 总线将前端系统中各功能单元接收到的数据信息，通过数据格式转换，经 FC 接口电路发送至 FC 网络，同时将 FC 网络中的相关数据信息完成数据解析及数据格式转换后，经 CAN 总线发送至前端系统各功能单元，FC 消息流的发送和 CAN 总线信息的收发均是由 FPGA 内部的 Power PC440 来控制和实现。

通过以上分析可以看出，短消息通信故障是由接口模块逻辑中的 MAC 引起。故障发生时，MAC 接收到短消息后，未将接收到的短消息传递给后端的 MAC 接收控制模块，导致协处理器无法接收短消息，无法转换成 CAN 消息进行发送，MAC 接收到短消息后，未回复 R_RDY 原语，连续 8 次未回复 R_RDY 原语并且达到超时时间后，FC 链路会出现链路复位。

3 测量结果分析及验证

接口模块与外部 FC 设备在光纤线断开情况下，接口模块 FC 接口会存在偶发上线情况（FC 端口状态机处于 AC 状态）并且一直处于上线状态，此时外部 FC 设备通过光纤连接后，外部 FC 设备发送短消息，会触发故障。

3.1 FC 端口无连接上线

FC 端口状态跳转应符合 FC 协议规定的 FC 端口状态机，FC 端口状态机一共有 AC (active state)、LR1

(link recovery1)、LR2 (link recovery2)、LR3 (link recovery3)、LF1 (link failure1)、LF2 (link failure2)、OL1 (offline1)、OL2 (offline2) 和 OL3 (offline3) 一共 9 个状态，在任一状态下，如果接收到的信号失同步超时，状态机都会跳转到 LF2 或者 OL3 状态；在 AC 状态下，如果失同步超时，状态机会跳转到 LF1 状态。在无连接状态下，应该存在失同步超时；但故障时 FC 端口仍处于 AC 状态，可以初步判断 MAC 逻辑中失同步超时判断存在问题。

通过 Chipscope 软件抓取 FC 原语，可以看出，MAC 逻辑会收到 OLS (offline loss synchronization) 原语、LR 原语、LRR 原语、IDLE 原语等原语，并且端口状态机 psm_status 状态从 OL1 状态（编码为 4'hD）依次跳转到 OL2 状态（编码为 4'hE）、LR3 状态（编码为 4'h6）和 AC 状态（编码为 4'h0），最终达到上线状态。失同步超时信号一直为 0，但实际上在无连接状态下，肯定处于失同步超时状态，失同步超时信号应该变为 1。因此，FC 端口无连接上线是由于失同步超时逻辑存在故障，导致失同步超时信号一直为 0，当接收到原语后，端口状态机进行跳转，最终达到上线状态。

3.2 FC 端口无连接上线后无法下线

端口状态机 psm_status 处于 AC 状态（4'h0），虽然接收到的大部分数据为乱码（错误类型包括：失同步错误 rxlossosync、极性错误 rxdisplerr、8B10B 错误 rxnotintable）但由于失同步超时信号一直为 0，导致端口状态机 psm_status 一直处于 AC 状态。因此，FC 端口无连接上线后无法下线同样是由于失同步超时逻辑存在故障，失同步超时信号一直为 0，导致一直处于 AC 状态。

3.3 FC 端口接收短消息通信故障分析

在 FC 端口达到 AC 状态后，通过 Chipscope 抓取逻辑内部信号，发现 MAC 逻辑会接收到 SOF(Start-of-Frame) 原语，见图 4 所示。



图4 接收到 SOF 源语

Fig.4 Received SOF source language

当 MAC 逻辑在 AC 状态接收到 SOF 原语后，判断为接收到一个 FC 数据帧，并存储在 MAC 接收缓

存中; 当 MAC 逻辑在 AC 状态接收到的 SOF 原语达到 8 个后, MAC 接收缓存会被占满(一共有 8 个 MAC 接收缓存)。从图 4 可以看出, 接收到的 SOF 原语计数已经达到 8'h51, 导致 MAC 接收缓存会被占满。当外部 FC 设备向 DAS 系统 FC 接口模块发送 FC 短消息时, MAC 逻辑无法向 MAC 接收控制模块转发 FC 短消息, 并且无法回复 R_RDY 原语, 导致故障发生。FC 端口接收短消息通信故障是由于 FC 端口在无连接上线并且上线后无法下线, 并且接收到 SOF 原语, 导致 MAC 接收缓存被占满, 从而导致 FC 端口接收短消息通信故障的发生。因此, FC 端口接收短消息通信故障本质上是由于失同步超时判断逻辑存在故障导致。

3.4 原测试系统故障不复现原因

FC 接口模块随用户测试过程中偶发出现“短消息通信故障”问题, 而 FC 接口模块在生产、测试及试验交付过程中未出现“短消息通信故障”问题。分析用户系统测试设备的差异性发现, 用户测试系统测试设备光电收发器默认处于关闭状态, 只有在控制软件点击连接后才将光电收发器打开, 测试过程中如先打开红外系统, 此时 FC 接口模块上电后 FC 接口进行链路初始化, 而通信端光电收发器处于关闭状态, 光链路产生随机乱码, FC 接口模块链路初始化状态机不健壮导致 FC 接口模块异常上线, 失同步后无法下线。而地面模拟专用测试设备, 设备上电后默认光电收发器处于打开状态, 该状态与机上综合核心处理机中业务处理模块状态一致。测试过程中测试设备首先上电, 光电收发器默认处于打开状态, FC 接口模块上电开始初始化时设备中光电收发器已稳定工作, 稳定输出链路握手信号, FC 接口模块链路初始化状态机问题未能暴露。

3.5 验证结果分析

FC 端口无连接上线、FC 端口无连接上线后无法下线、FC 端口接收短消息通信故障本质上都是由于失同步超时判断逻辑存在故障导致。原地面测试系统中, PSMSyncCnt 为 17 位计数器, PSMSyncTimeout 为 1 位的失同步超时信号; 当 PSMSyncCnt 最高位(即第 16 位)为 1 时, 失同步超时信号为 1; 否则, 失同步超时信号为 0。PSMSyncCnt 产生条件如下:

- 1) 当 PSMEnable_int 为 1(PSM 使能), LossOfSync 为 0(接收未失同步)时, 将计数器 PSMSyncCnt 置初值为{1'b0, RT_TOV}; 其中 RT_TOV 为软件配置的超时值, 具体为 16'h2710(10ms);
- 2) 当 PSMEnable_int 为 1(PSM 使能), LossOfSync 为 1(接收失同步), PSMSyncCnt 最高位(即第 16 位

为 0), TOVCntrEn 为 1 时, PSMSyncCnt 递减 1; 其中, TOVCntrEn 为 1 μ s 脉冲信号; 否则, PSMSyncCnt 保持不变。

从上面可以看出, 当 LossOfSync 为 0 时 PSMSyncCnt 置初始值为 17'h02710; 否则, 当 LossOfSync 为 1 时, PSMSyncCnt 每 1 μ s 递减 1; 而由于信号 LossOfSync 一直在 0 与 1 之间跳变, 这样 PSMSyncCnt 一直在 17'h00000 与 17'h02710 之间变化, 最高位(即第 16 位)始终为 0, 这样始终不能触发失同步超时信号 PSMSyncTimeout。

针对以上分析结论, 对逻辑中的失同步超时判断逻辑条件进行改进, 改进后, PSMSyncCnt 为 17 位计数器, PSMSyncTimeout 为 1 位的失同步超时信号; 当 PSMSyncCnt 等于软件设置的超时值{1'b0, RT_TOV}时, 失同步超时信号为 1; 否则, 失同步超时信号为 0。PSMSyncCnt 产生条件如下:

- 1) 当 PSMEnable_int 为 1(PSM 使能), PSMSyncCnt 小于{1'b0, RT_TOV}, LossOfSync 为 1(接收失同步)时, TOVCntrEn 为 1, 将计数器 PSMSyncCnt 递增 1;
- 2) 当 PSMEnable_int 为 1(PSM 使能), PSMSyncCnt 不等于 0, LossOfSync 为 0(接收未失同步)时, TOVCntrEn 为 1, 将计数器 PSMSyncCnt 递减 1; 否则, PSMSyncCnt 保持不变。

即当 LossOfSync 为 1 并且 PSMSyncCnt 小于{1'b0, RT_TOV}时, 计数器 PSMSyncCnt 每 1 μ s 递增 1; 当 LossOfSync 为 0 并且 PSMSyncCnt 不等于 0 时, 计数器 PSMSyncCnt 每 1 μ s 递减 1; 当计数器 PSMSyncCnt 增加到软件设置的超时值{1'b0, RT_TOV}时, 产生失同步超时信号。

改进后, 通过系统联试, 用 Finisar 捕获接口模块发送端数据, 能够正常收到数据, 见图 5 所示, 说明改进方法有效。

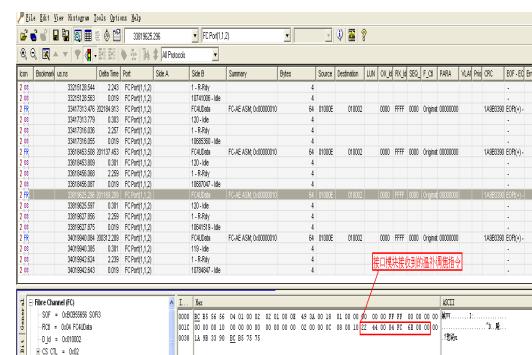


Fig.5 Received data captured by Finisar after improvement

4 结论

温度补偿调焦在红外系统中的丢包问题，主要原因是接口模块逻辑中的 MAC 引起，MAC 接收到短消息后，连续 8 次未回复 R_RDY 原语并且达到超时时间后，FC 链路会出现链路复位。通过对 FC 端口无连接上线、无连接上线后无法下线、原测试系统故障不复现情况进行分析，确定故障本质上是由于失同步超时判断逻辑存在故障导致，对失同步超时判断逻辑条件进行重新设计后，可有效解决系统丢包问题，适用于所有 CAN 转 FC 电路测试方法，解决了实际工程应用中的现实问题，提高了产品质量。

参考文献：

- [1] 黄思源, 刘利民, 董健, 等. 车载激光雷达点云数据地面滤波算法综述[J]. 光电工程, 2020, 47(12): 190688.
HUANG Siyuan, LIU Limin, DONG Jian, et al. Review of ground filtering algorithms for vehicle radar scans point cloud data[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2020, 47(12): 190688.
- [2] 黄子亮, 张昊春, 王琦. 舰船尾迹和海面红外仿真成像[J]. 应用光学, 2023, 44(2): 286-294.
HUANG Ziliang, ZHANG Haochun, WANG Qi. Infrared simulation imaging of ship wakes and sea surface[J]. *Journal of Applied Optics*, 2023, 44(2): 286-294.
- [3] 李超林, 刘俊辰, 张福民, 等. 频率调制连续波激光雷达测量技术的非线性校正综述[J]. 光电工程, 2022, 49(7): 210438.
LI Chaolin, LIU Junchen, ZHANG Fumin, et al. Review of nonlinearity correction of frequency modulated continuous wave LiDAR measurement technology[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2022, 49(7): 210438.
- [4] 张奕康, 眭晓林, 刘波, 等. 激光相干雷达中光电双下变频技术[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(11): 20230172.
ZHANG Yikang, SUI Xiaolin, LIU Bo, et al. Optoelectronic dual down-conversion technology in laser coherent radar[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2023, 52(11): 20230172.
- [5] 谢飞, 周德召, 胡磊力, 等. 红外搜索跟踪系统探测距离缩比测试方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(4): 86-90.
XIE Fei, ZHOU Dezhao, HU Leili, et al. Test method for detection range scaling of infrared search and tracking systems[J]. *Electrooptic and Control*, 2019, 26(4): 86-90.
- [6] 王钢, 周若飞, 邹昳琨. 基于压缩感知理论的图像优化技术[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(1): 222-233.
WANG Gang, ZHOU Ruofei, ZOU Yikun. Research on image optimization technology based on compressed sensing[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(1): 222-233.
- [7] 宋治杭, 张晋, 朱亮, 等. 红外搜索跟踪系统的虚警率降低方法[J]. 红外技术, 2022, 44(4): 371-376.
SONG Zhihang, ZHANG Jin, ZHU Liang, et al. False alarm rate reduction in infrared search and track systems[J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(4): 371-376.
- [8] 孟博, 王晨博, 徐玉杰. 一种统型机载 FC 接口单元的设计与实现[J]. 航空计算技术, 2021(1): 104-106.
MENG Bo, WANG Chenbo, XU Yujie. Design and implement of unified FC interface module in avionics environment[J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2021(1): 104-106.
- [9] 管昊, 陈永冰, 周岗, 等. CAN 通信终端电阻匹配试验研究[J]. 舰船电子工程, 2019(6): 71-75.
GUAN Hao, CHEN Yongbing, ZHOU Gang, et al. Experimental study on resistance matching of CAN communication terminals[J]. *Ship Electronics Engineering*, 2019(6): 71-75.
- [10] 汪健, 张磊, 曾鑫, 等. 红外探测器集成图像信号处理芯片设计[J]. 红外技术, 2021, 43(11): 1044-1048.
WANG Jian, ZHAN Lei, ZENG Xin, et al. Design of integrated image signal processing chip for infrared detector[J]. *Infrared Technology*, 2021, 43(11): 1044-1048.