

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.024

基于 ZYNQ 的远程管理系统设计

林世豪^{1,2}, 李亚柯^{2,3}, 吴燕丰³, 陈镇山³

(1. 福州大学 先进制造学院, 福建 泉州 362216;

2. 中国科学院大学 福建学院, 福建 福州 350025;

3. 中国科学院海西研究院 泉州装备制造研究中心, 福建 泉州 362216)

摘要: 为了提高广播式自动相关监视技术地面接收机的可开发性和可维护性, 提出一种基于 ZYNQ 的远程管理系统设计, 利用 LwIP 轻量级协议栈通过以太网通信, ZYNQ 和计算机实现对分布在不同区域的机器进行远程更新并监视机器的异常状态。此系统可以大幅提高开发人员的效率, 节省人力成本, 具有很高的实用意义。

关键词: ZYNQ; LwIP; 远程管理

中图分类号: TP393.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0131-05

Remote Management System Design Based On ZYNQ

LIN Shihao^{1,2}, LI Yake^{2,3}, WU Yanfeng³, CHEN Zhenshan³

(1. School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362216, China;

2. Fujian College, University of Chinese Academy of Sciences, Fuzhou 350025, China;

3. Quanzhou Institute of Equipment Manufacturing, Chinese Academy of Sciences, Quanzhou 362216, China)

Abstract: To enhance the developability and maintainability of ground-based receivers for automatic dependent surveillance-broadcast, this paper proposes a remote management system design based on ZYNQ, which utilizes the Lightweight IP protocol stack and employs Ethernet communication, ZYNQ and computers to remotely update and monitor the abnormal status of machines distributed in various areas. The proposed system significantly improves the efficiency of developers and reduces manpower costs, which is highly practical.

Keywords: ZYNQ; LwIP; remote management

0 引言

广播式自动相关监视技术 (automatic dependent surveillance broadcast, ADS-B)^[1] 是一种近年来兴起的航空器运行监视技术, 国际范围内已广泛将其视为下一代航空监视的核心技术^[2], 它是民用航空器普遍安装的空中交通监视系统之一^[3]。从当前应用场景来讲, ADS-B 技术能同时为机组、地面监测站点和临近飞机提供丰富的动态飞行数据, 包括呼号、航班号、位置、速度等重要飞行数据^[4-6]。地面站接收空中广播的 ADS-B 信息, 管制中心对接收到的数据进行分析 and 显示, 并利用这些信息进行空中交通管理, 这能够及时地对飞机飞行活动进行指挥, 避免飞行冲突和碰撞事件的发生^[7]。

伴随着航空监视技术的发展与国内对航空安全的日益重视^[8], ADS-B 算法也随之不断更新,

因此需要及时地对地面接收机的部署进行更新维护。然而, 接收机分布广泛且多位于偏远地区, 这给开发和维护人员带来了实时维护管理的挑战。

现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 具有开发周期短、升级空间大、可并发执行和灵活可重构等优势^[9]。地面接收机内部 FPGA 的传统更新方式依赖于串行配置边界扫描 (JTAG)^[10], 这种方式必须外挂仿真器, 其加载距离及稳定性受设备环境限制, 且加载时间长, 难以满足日益增长的需求^[11]。为应对这些挑战, 国内已有多项针对 FPGA 远程更新的研究。其中一种依赖于外置的 ARM 处理器来进行 FPGA 远程更新^[12], 但这一方法存在硬件构成复杂的缺点。同时, 国内研究人员还探索了在 ZYNQ 的 PL 端模拟 JTAG 的接口时序并封装成 IP 核的方案^[13]。ZYNQ 是一种集成了 ARM 处理器和 FPGA 的系统级芯片 (SoC), 具有处理器和 FPGA 的双重特

基金项目: 福州市 STS 计划配套资助项目 (2021T3008)

第一作者简介: 林世豪 (2000—) 男, 福建南平人, 硕士研究生, 研究方向为嵌入式系统, 907812842@qq.com。

性^[14],但此方案较为复杂,实施难度较大且并没有充分利用 ZYNQ 的特性。再有,利用 UDP 以太网通信协议实现远程更新的方案^[15],虽传输效率高,协议简单,但 UDP 是一种无连接的协议,在需要保持连接状态的应用场景下其并不是理想的选择。

综合考虑传统 JTAG 更新方法的局限性以及近年来出现的远程更新方法的不足,为提升地面接收机开发的可持续性,本文提出一种基于 ZYNQ 的远程管理系统设计。该设计旨在实现通过 TCP 对分布于不同位置的多个接收机进行远程升级和实时监控,保障远程操作的实时性以及网络容错,以应对现代民航领域中日益增长的技术需求。

1 系统总体设计

1.1 硬件部分设计

远程管理系统整体结构如图 1 所示,包括上位机端和接收机端,接收机可以通过网络接口或者 4G/5G 模块与服务器所在的上位机相连,一旦连接成功,上位机便能对若干设备执行升级、查看设备信息等操作。

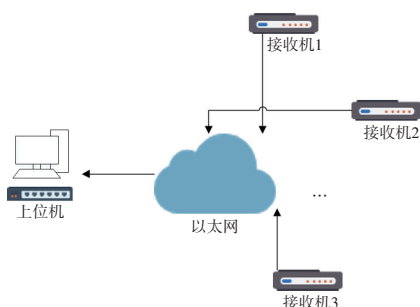


图 1 远程管理系统框图

地面接收机的硬件部分由 ZYNQ 处理器、SD 卡储存、4G 模块和网口组成,如图 2 所示。

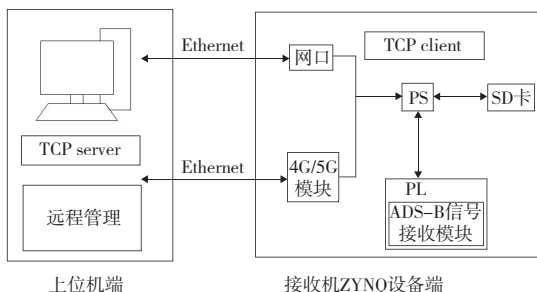


图 2 地面接收机硬件框图

本文选用某公司 ZYNQ7000 系列的 XC7Z020 芯片^[16-17],PHY 芯片则选择某公司的 88E1512 以太网 PHY 芯片^[18]。在 ZYNQ 的 PL 端用可编程

逻辑实现 ADS-B 信号的接收,在 PS 端进行信号处理并通过直接内存访问(DMA)^[19]往 PL 端传输数据以及构建远程管理系统客户端,在执行远程升级的操作后往 SD 卡固化新程序。网口和 4G/5G 模块负责将设备端和上位机端通过以太网相连。

1.2 软件部分设计

远程管理系统的软件控制流程主要包括建立通信连接、远程监控、远程升级 3 个部分^[20],软件工作流程如图 3 所示。

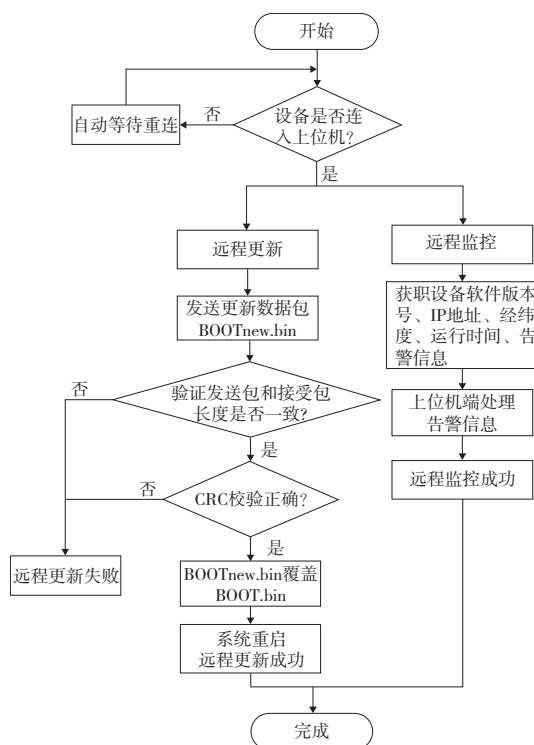


图 3 软件流程图

在通信建立和通信连接过程中:1)上位机建立 tcp server 并等待设备连接;2)设备向上位机发起连接并进行身份验证,从而建立通信。

在远程监控过程中:1)上位机向设备发起监控信息请求;2)设备收集自身的运行状态信息,并发送给上位机;3)若有告警信息,上位机端对告警进行处理;4)远程监控成功。

在远程升级过程中:1)上位机向设备发送升级请求,设备进入升级状态,并按照要升级的文件大小申请系统缓存,回复确认信息给上位机;2)上位机将升级数据包 BOOTnew.bin 分批传输给设备,随后设备将数据放入缓存区,并验证数据的正确性,最后回复确认信息给上位机;3)上位机向设备发送传输文件完成标志,设备检查所接收数

据是否与发送包的大小匹配且 CRC 校验正确,若正确,则覆盖 SD 卡中的 BOOT.bin,回复确认信息给上位机;4)上位机向设备发送重启命令,设备重启后,进入新的软件系统;5)远程更新成功。

考虑到在远程的情况下,地面接收机的网络可能不稳定,因此系统应具备一定的容错能力,能在网络条件较差或断开的情况下尝试重新连接。本文在系统中使用 TCP 协议层的 KeepAlive 功能来实现心跳机制。LwIP 的 TCP 协议支持 KeepAlive 功能,在设备端开启此功能,将心跳包时间间隔设为 3 s,当设备发送心跳包给上位机后,上位机就返回一个应答,表明通信仍正常连接。在多设备的远程环境中,保证每个设备的正常连接对于整个系统的运行至关重要。这个功能通过持续的少量数据交换,确保了所有设备均处于同步状态,对系统的远程实时监视有着重要意义。

1.3 通信协议设计

上位机与设备之间的通信帧结构定义如图 4 所示。

帧头标志位 1B	协议号 1B	索引 1B	数据长度 2B	命令字 2B	数据包 不定长	CRC 2B
-------------	-----------	----------	------------	-----------	------------	-----------

图 4 通信帧结构

图 4 中,第 1 个 1 字节为标志位;第 2 个 1 字节为通信协议的版本号;第 3 个 1 字节为帧数索引,1~255 循环递增;第 4 个 2 字节表示有效数据长度,为命令字长度和数据长度总和;第 5 个 2 字节表示传输的命令字;第 6 个为传输的数据,长度可变;第 7 个 2 字节为数据帧的校验和,计算从命令字起始,数据包结尾。

2 上位机图形界面设计

上位机图形界面以 Java 开发语言为基础进行设计。上位机为管理系统设计了不同的界面,首界面显示设备 1 的名称、软件版本信息、在线状态、响应时间、刷新和管理操作,如图 5 所示。

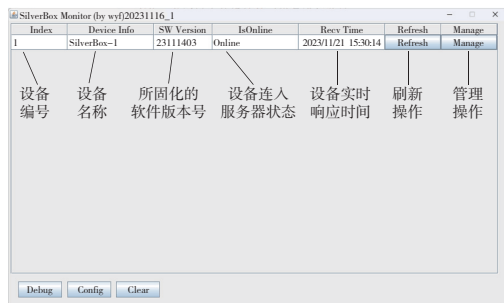


图 5 上位机首界面

点击“Manage”按钮后,可查看设备详细信息,包括软件版本、运行时间、网络信息等,并执行远程升级和重启操作。设备 1 管理界面如图 6 所示。

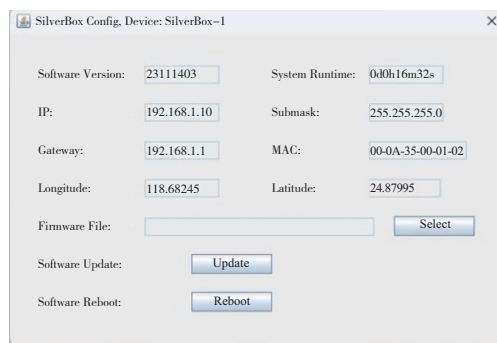


图 6 设备 1 管理界面

3 实验测试与分析

通过上位机将 BOOTnew.bin 文件传输给单个设备进行远程更新,更新完成后查看设备的软件版本号是否变更,并使用上位机软件对设备进行监控。为了验证在正常连接和异常情况(如上位机断开、网络断开)下管理系统的稳定性,分别正常连接测试和异常连接测试。在接收机更新 ADS-B 算法后,对同一组数据解析得到的 ADS-B 信息进行对比,并将飞行器轨迹在谷歌地图上显示,观察前后结果的不同。

3.1 正常连接测试

在设备与上位机建立稳定 TCP 连接后,用上位机软件对设备进行监控以及软件版本更新,管理系统运行流程如图 7 所示。

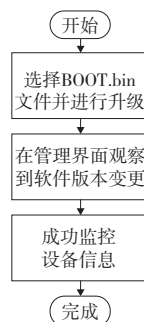


图 7 正常连接时管理系统运行流程图

具体流程如下:首界面显示设备在线状态和软件版本号 03,选定 BOOTnew.bin 文件进行更新。更新后,设备自动重启运行新程序,设备管理界面显示版本号更新为 04,证实更新成功。此外,为展示管理系统的优势,本研究与传统 JTAG 升级方案进行了对比实验,实验结果如表 1 所示。

表 1 远程升级部分与传统 JTAG 升级对比

升级方式	电缆/传输介质	距离/m	时间/s	同时升级
JTAG	USB-JTAG 电缆	3	20	1 台
本文方式	网线、4G/5G 模块	无限制	10	多台同时升级

3.2 异常连接测试

在异常测试中,若设备 1 未通过 4G/5G 或以
 太网连接上位机时,管理系统会显示其为“离
 线”,同时其串口输出错误信息并等待重连,如
 图 8所示。

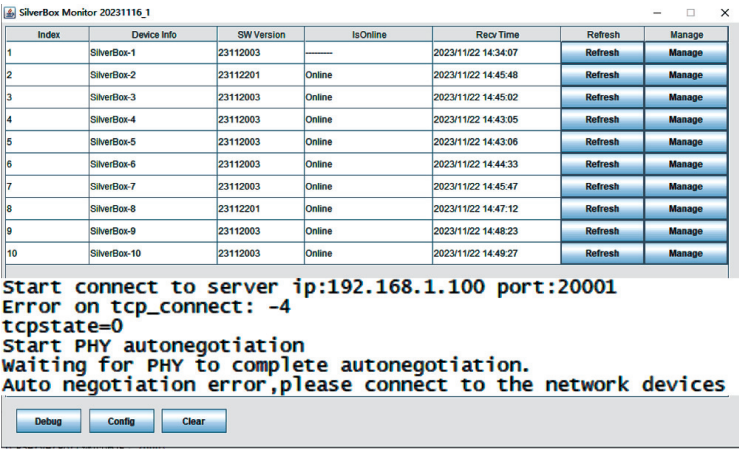


图 8 掉线情况下的管理界面和串口信息

重连后,设备 1 可再次通过上位机进行管理, 此过程如图 9 所示。

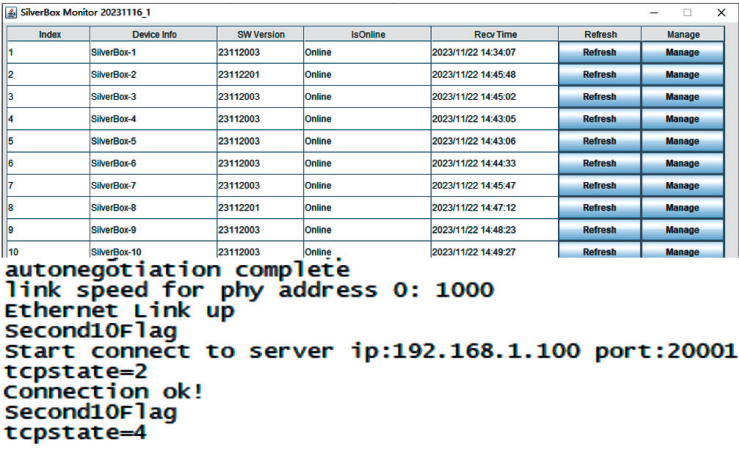


图 9 设备重连后的管理界面和串口信息

3.3 接收机前后结果对比

实施远程更新前,地面接收机搭载的 ADS-B
 算法功能尚未充分发挥,其解析能力局限于有限
 数量的飞行器。因此,由原始算法解析得到的飞
 行轨迹图(图 10)较为稀疏,仅能显现部分飞行
 轨迹。
 经过改进的 ADS-B 算法远程烧录至接收机
 后,其性能得到显著增强。对相同数据集的解析
 揭示了更完整的飞行器轨迹(图 11),与更新前的
 轨迹图相比,明显增多的轨迹数量和改善的轨迹
 细节,充分证明了更新操作的成功以及新算法在

增强飞行器识别方面的有效性。



图 10 设备更新前解析 ADS-B 信息得到的轨迹图

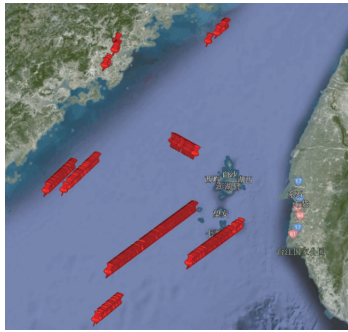


图 11 设备更新后解析 ADS-B 信息得到的轨迹图

3.4 实验分析

在 ADS-B 接收机的实际应用场景下,实验结果表明,在进行远程升级时,传统 JTAG 升级方式在 3 m 的距离内需要花费 20 s 时间来升级单一设备。相比之下,本文提出的方法能在 10 s 内在任意距离同时升级多个设备,从升级效率和距离限制上都有了很大的提升。在远程监控方面,本系统能够实时监控设备的连接状态以及获取设备信息,当设备掉线重连后,系统能够对设备重新进行管理,体现了系统的稳定性及容错能力。

4 结语

本文设计的基于 ZYNQ 的远程管理系统全面涵盖了从上位机到设备的完整系统架构,实现了从底层硬件到应用层的无缝集成。特别是在用户界面(UI)方面,本文注重了交互的直观性和易用性,使用户能够轻松地进行设备管理和操作。在通信安全方面,本系统在上位机和设备两端均实施了严格的通信协议校验机制,这有效防止了外部恶意攻击,确保了系统性能和安全性的双重提升。系统的容错设计包含了网络异常时接收机的自动重连功能,以确保持续稳定的运行。创新方面,与近年出现的其他远程系统相比,本文利用 ZYNQ 处理器的先进特性,提出了一种新颖的、无距离限制的并行设备升级方案。此外,本文还在远程更新的基础上,增加了远程监听功能,通过用户交互界面同时实现设备软件的更新和状态监控,满足了日益增长的维护需求,并为类似技术的发展开拓了新思路。本系统的高度通用性使其不限于 ADS-B 地面接收机的管理,还能被广泛应用于其他设备的远程监控与管理,并展现了广泛的应用前景。

参考文献:

[1] 杨曦. ADS-B 系统干扰检测技术研究[J]. 科学与信

息化,2024(19):178-180.

- [2] 邹寒沁. 广播式自动相关监视(ADS-B)接收系统的研究与实现[D]. 南京:南京理工大学,2020.
- [3] PANY,LI S N,LI B Q,et al. When UAVs coexist with manned airplanes: large - scale aerial network management using ADS - B [J]. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 2019, 30(10):e3714.
- [4] 张晓云. 一种基于 ADS-B 的民用航空无线电监测方法研究及其分布式系统实现[D]. 昆明:云南大学,2019.
- [5] 张丹妍,史达亮,熊伟. 基于航迹质量评估的雷达和 ADS-B 数据融合方法[J]. 航空工程进展,2024, 15(2):173-178.
- [6] 颜丽蓉,赵泽荣. 基于改进 BiLSTM 的 ADS-B 信号欺骗检测方法研究[J]. 计算机测量与控制,2025, 33(3):54-62.
- [7] 张天平,郝建华,许斌,等. ADS-B 技术及其在空管中的发展与应用[J]. 电子产品世界,2009, 16(6): 34-37,43.
- [8] 王文益,张菡钰. 基于聚类加权协方差矩阵的 ADS-B 信号分离算法[J]. 中国民航大学学报,2025,43(1): 47-52,59.
- [9] 夏港东,秦浩杰,王庆东,等. 基于 FPGA 的非接触式张力监测系统的设计[J]. 机械制造与自动化,2022, 51(2):195-198,222.
- [10] 周云松,黄维雄,刘晓知,等. FPGA 分布式系统的固件升级设计[J]. 电子与封装,2022,22(10):30-34.
- [11] 舒鹏飞,苏敏,李岚. 利用以太网实现 FPGA 的远程快速升级[J]. 电子信息对抗技术,2020,35(5):89-92.
- [12] 吴梦龙,蔡爱华,阳韬. 基于 ARM 远程升级 FPGA 配置方法[J]. 电子世界,2019(12):42-43.
- [13] 覃文键. FPGA 远程配置系统的设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [14] 闫成亮,曹凤才,岳凤英. 基于 ZYNQ 的远程程序并行固化设计[J]. 现代电子技术,2020, 43(10): 38-42.
- [15] 徐晓康,邵俊波,赵晓宇,等. 基于 Cyclone IV 的单核 FPGA 远程更新系统设计[J]. 船电技术,2020, 40(2):59-61.
- [16] 王飘,李亚柯,陈镇山,等. 基于链式存储结构的 ADS-B 信号解码系统设计与实现[J]. 集成电路与嵌入式系统,2024,24(3):77-81.
- [17] 邹佳运,孙嘉瑞,师英杰,等. 基于异构平台的声呐数据采集系统设计[J]. 声学技术,2025, 44(3): 376-385.
- [18] 赵永成,陈健,张俊杰,等. 基于 IEEE1588 的多路可调同步时钟板设计与实现[J]. 工业控制计算机, 2024,37(2):4-7.
- [19] 陈博文. 具有多模式 DMA 功能的 SOC 设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2024.
- [20] 郝国锋,邵春伟,沈小波. 4G 通信技术的 FPGA 远程更新系统设计[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2021,21(2):5-7.

收稿日期:2024-01-04