

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2519751

基于星闪技术的无线化机载试飞测试系统研究

赵笙岚 郑涵予 刘海宁 刘畅

(中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所 沈阳 110035)

摘要: 本研究主要针对机载试飞测试系统的无线化工作,以解决试飞测试发展过程中所面临的线缆繁杂、布置紧张、装卸耗时、维护困难等问题。试飞测试系统设备包括各类传感器以及存储器,依托星闪短距无线通信技术低功耗、低时延、高吞吐、高可靠的优势特征,设计定制化轻小型短距无线通信模组,将传感器、存储器与定制化无线模组集成,传感器采集的数据经模数转换后通过无线空口传输至存储器,实现试飞测试数据的无线化记录以及试飞测试系统的无线化。测试结果表明,在实验室条件下,定制化无线模组的速率可达4 Mbps以上,传输时延在3.5 ms以内,相关指标能够满足机载试飞测试数据记录的性能需求。

关键词: 机载试飞测试;无线通信;星闪;传输速率;时延

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5015

Wireless onboard flight testing system based on SparkLink

Zhao Shenglan Zheng Hanyu Liu Haining Liu Chang

(Shenyang Aircraft Design Institute, Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110035, China)

Abstract: This paper focuses on the wireless transformation of airborne flight test systems, which can solve the problem such as complex cabling, difficult installation and removal, time-consuming setup, and maintenance difficulties encountered during the development of flight testing. The flight test system equipment includes various sensors and storage devices. Leveraging the advantages of SparkLink wireless communication technology—such as low energy, low latency, high throughput, and high reliability—customized compact short-range wireless communication modules were designed. These modules were integrated with sensors, storage devices and customized wireless module, enabling analog-to-digital converted sensor data to be transmitted over the air to the storage units. This achieves wireless recording of flight test data and a wireless flight test system. Test results under laboratory conditions demonstrate that the customized wireless modules can achieve data transmission rates up to 4 Mbps with a transmission delay below 3.5 ms, meeting the performance requirements for airborne flight test data recording.

Keywords: onboard flight testing; wireless communication; SparkLink; data transmission rate; transmission delay

0 引言

随着信息技术及其配套软硬件水平的不断进步,第五代移动通信技术(5th generation mobile communication technology, 5G)已步入大规模商用阶段,而第六代通信技术(6th generation mobile communication technology, 6G)的愿景探索与关键技术攻关也已在多个领域范围内展开。这一代际演进并非仅是通信速率的线性提升,其核心范式转变在于,无线网络正从一个传统的、相对封闭的通信介质,蜕变成为一个灵活、开放的综合性系统设备^[1-2]。星闪技术是短距通信全国产化的重要突破,融合了传统蓝牙和Wi-Fi的优势,其设计目标是针对低时延、高可靠、高同步

精度以及安全传输的要求进行自主可控系统设计,满足航空领域典型无线场景的应用需求,包括毫秒级别的同步性能以及上百Mbps的传输速性能。星闪技术以其独特的优势特性,赋能航空领域应用,能够革新机载系统设备的信息交互模式,使航空平台机载设备向轻小型化、高集成化、便捷化形态发展。

本研究旨在深入探讨以星闪为代表的短距无线技术如何以其灵活开放的架构体系,以及低时延、高同步的优势特征,破解传统机载试飞测试设备所面临的灵活性差、空间布置紧张、重量控制困难等痛点,分析星闪赋能试飞测试系统的机理、典型应用范式、潜在收益以及所面临的挑战。

1 应用场景

飞机的试飞测试需要在特定飞行环境中的规定试飞科目下,获取相应的试飞试验数据,用于分析、评估飞机的实际情况能够满足设计标准。飞机的试飞测试系统即在试飞测试过程中测量各类飞行参数并存储、处理以及回传地面指挥中心的一系列设备,能够让工程设计人员及时监控并分析试飞测试数据。随着飞机平台复杂度的提升以及测试技术的发展,试飞测试数据种类以及数据量不断提升,这对试飞测试系统的灵活性和适用性提出可更高的要求^[3-5]。

传统试飞测试系统包括振动、速度、温度等各类传感器、存储器以及大量数据总线线缆,具有线缆繁杂、布置困难、装卸耗时、维护困难的问题。试飞测试系统并非独立系统,其与飞机平台之间存在密切交联,传感器和存储器的加装需要对飞机平台本身进行改装,严重制约了飞机的空间优化设计^[6-9]。

当前,机载试飞测试传感器正逐步向无线化方向升级,其主要推动力源于4个方面的实际工程需求。首先,飞机机舱内部空间极为有限,传统有线传感器需要依附机内现有框梁和结构件,其数据传输的线缆布局往往面临严峻挑战,密集的线束不仅增加了安装与维护的复杂度,还容易干扰其他机载设备的正常运行,甚至影响飞行安全。其次,有线传感器的部署灵活性较差,难以适应多科目、多测点的快速切换测试任务,而无线传感方式可显著提升系统重构能力,更适应现代试飞中对传感器临时布设与机动测量的高要求。再者,飞机中存在大量活动部件,如操纵面、舵机、起落架等,这些动结构在试飞过程中需要传感器实时监测其工作状态,但是在动结构作动过程中,传感器处的数据传输线缆极易与动结构发生摩擦或自身扭曲,长期使用可能导致线缆磨损、断裂,进而导致传感器信号传输异常,直接影响测试数据的完整性与可靠性。最后,在发动机附近、热防护区域或其他高温部件周围,传统线束需额外加装复杂且昂贵的热防护装置,这不仅显著增加了系统的重量与成本,还引入了额外的故障风险。传感器无线化则可以从根本上避免线缆在高温环境中的暴露,从而大幅降低热防护难度与综合保障成本。综上所述,传感器无线化是提升机载试飞测试能力、增强系统适应性及可靠性的必然发展趋势。

2 无线解决方案

无线通信技术代表着当前通信技术发展的最新趋势,目前IEEE、ITU和3GPP等相关组织已经逐步开展无线通信、移动通信技术的标准化工作。由于机载无线测试系统的单项组网通信技术应用和机载测试系统具体需求的耦合度较大,因此需要进一步结合系统进行设计,针对性开展技术聚焦和整合。

2.1 无线体制基线分析

目前,无线局域网(wireless local area network,

WLAN)体系结构和蜂窝体系结构的标准制定和技术研究均已较为成熟。下面对比几项常用无线通信体制。

Zigbee是具备低功耗、低成本、短时延、高容量、高可靠及高安全特征的双向无线通信体制,支持点对点、星状、Mesh多种网络拓扑结构^[10]。ZigBee协议下通信速率为20~250 kbps,主要用于家用/商用小型传感器无线控制^[11]。

Wi-Fi日常应用广泛,优势主要在于其技术成熟度较高,信号穿透性较强,信号覆盖范围较大。近期发布的802.11be协议(Wi-Fi 7)传输速率可达30 Gbps^[12-13]。

第五代移动通信技术,国际电信联盟在2015年启动了5G移动通信系统国际标准制定准备工作,开展5G技术的性能、需求、方法方面的研究,明确5G候选技术的评估指标。完成5G网络覆盖需要的组成设备较多,一套网络设备至少需要核心网、基带处理设备、射频设备、基站设备等^[14-15]。

星闪技术作为中国原生的一种新型短距离无线通信技术,集结了现有主流短距通信技术蓝牙、Wi-Fi等传统技术的优势,具备低延时、精定位、高吞吐、抗干扰、高并发和高可靠的六大技术特点^[16-17]。星闪技术有两种模式:星闪基础接入模式(SparkLink basic,SLB)和星闪低功耗接入模式(SparkLink low energy,SLE)。SLB模式支持高速率、高质量连接,适用于航天航空数据采集、智慧工厂等场景;而SLE模式则更适合低功耗轻量级连接,如智能穿戴产品等。星闪通信可以通过一对多或者无线网格网络解决多个节点数据采集的问题,通过极化码加持纠错技术解决数据传输的丢包问题。使用星闪模组,内置微控制单元,IO资源丰富,功耗低,既能采集数据,又能通过星闪传输数据。可以广泛应用于数据采集系统,也支持星闪模组节点可以直接将数据接入Wi-Fi网络。

通过对于以上多种协议的研究和对比分析,可以看出多种体制协议之间并非取代关系,而是协同共建“无死角数字连接网络”。以“场景定义协议”为基线,在综合比较以上技术标准以及相关产业和生态的发展,结合机载测试网络无线通信系统的通信性能、对低功耗轻量化小型化的需求以及后续系统的能力扩展,最终考虑以星闪SLE技术作为无线体制基线。在此基础上进行无线通信系统的参数设计以及机载无线技术协议定制化的设计。

2.2 面向机载无线测试网络的通信系统设计

系统设计的核心在于发挥星闪技术低时延、高可靠、高并发和高安全的技术特性。通过对星闪SLE模式的灵活运用满足机载无线测试网络的需求。该通信系统选用基于星闪体制的无线通信模组,无线通信模组的主要器件包含天线模块、射频模块、基带模块,并通过接口与机载测试设备集成,实现低功耗、小型化的无线通信节点,如图1所示。

其中基带模块采用一款高度集成的2.4 GHz系统级芯片(system on chip,SoC),支持1 M/2 M/4 M带宽,最大

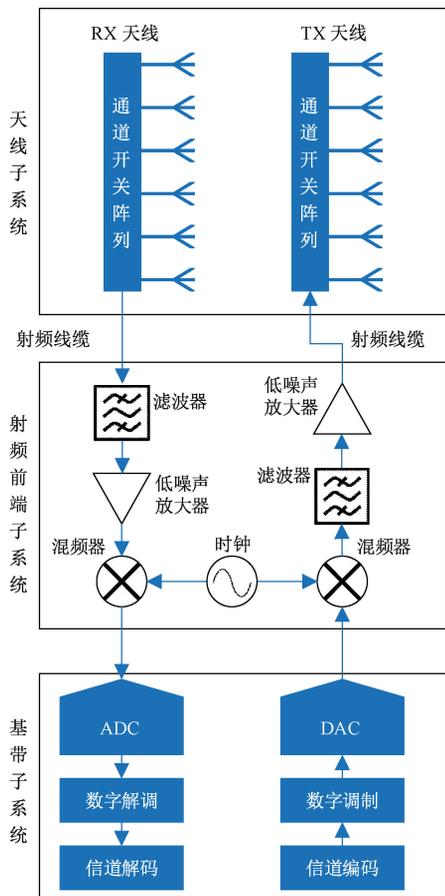


图 1 无线通信模组的功能架构

Fig. 1 Functional architecture of wireless communication module

支持 12 Mbits 的传输速率,通过极化码信道编码方式保障测试信息的高可靠传输;射频电路包含功率放大器 PA、低噪声放大器、TX/RX 转换、集成电源管理等模块,如图 2 所示;配置 2×2 MIMO 天线阵列,提升覆盖方位与抗阻挡能力,且天线采用环形 PCB 布局来减少共模干扰。在外设接口方面,集成排针接口,支持 SPI、UART 等,兼容主流开发板。

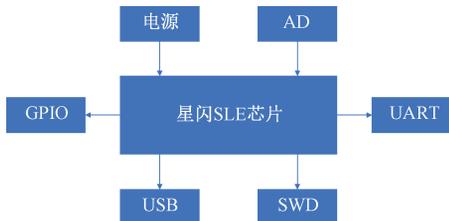


图 2 无线通信模组物理架构

Fig. 2 Physical architecture of wireless communication module

系统内节点区分为管理节点(G节点)和被管理节点(T节点)。在具体的应用场景中,单个G节点管理一定数量的T节点,G节点与这些T节点连接共同完成特定的通信功能。单个G节点以及与其连接的T节点共同组成一

个通信域。在系统中,通过设定G节点与T节点,实现机载无线测试网络的数据传输和汇聚。

2.3 面向机载无线测试网络的协议定制化设计

基于机载无线测试的应用场景,在满足指标要求的前提下设计轻量级的协议栈,以在更低的时延下完成高可靠性的数据传输。按照各层协议在整个软件协议栈中所处的位置,无线网络协议可分为底层协议、组网协议和高层应用协议三大类,其中底层协议是实现星闪信息数据流的传输链路,是星闪组网协议的体系基础,包括射频协议、基带协议和链路管理协议,该部分由星闪SLE模组实现。具体架构如图3所示。



图 3 无线通信系统协议架构

Fig. 3 Protocol architecture of wireless communication system

由于星闪模组已完成成熟的底层协议封装,本系统主要针对服务层组网协议进行定制化设计,组网协议是软件协议栈的核心,完成数据的分解与重组、服务质量控制、选择性重传功能等,为上层应用提供服务并提供。同时,也可以与底层进行跨层交互并且根据业务需求以及传输情况提供底层传输路径的选择及切换。

其中,面向应用场景对数据传输实时性的需求,采用超短灵活调度周期方案进行传输时延优化,核心在于通过压缩调度时间间隔(transmission time interval, TTI)并动态适配业务需求,实现资源分配与数据传输的精细化控制。该方案将传统 1 ms 级调度周期缩短至 100 μs 甚至更低,结合动态时隙结构(如上行/下行时隙比例可按子帧级实时调整),使系统能够以更短周期响应传输需求,避免固定周期下的资源等待损耗。

其关键技术路径包括:

1) 部分时隙固定保留给关键业务,确保关键指令能够在最短时间内得到传输,其余时隙则根据业务类型分配给普通数据。通过优先级调度,高优先级任务在调度过程中始终拥有优先权。即使在网络繁忙的情况下,也能保持端到端的低时延。采用短码字信道编码,包括低密度奇偶校验码(low-density parity-check, LDPC)或极化码,把单帧

编解码计算量与缓存占用降至可在 $200\ \mu\text{s}$ 内完成的范围。

2) 引入无确认传输机制。发送端不等待确认,直接通过前向纠错保证可靠性。如果出现错误,接收端会通过轻量的否认反馈出发一次快速重传。这种机载避免了繁杂的确认交互,确保关键业务的传输时延仅受限于单次时隙长度。

3) 利用物理层实时上报的信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)、误块率(block error rate, BLER)等参数,构建重传次数与信道状态的映射模型。将物理层 SNR 估计和链路层的队列状态结合,在信道质量良好时,放宽重传限制以提高可靠性,在信道条件较差或拥塞时,收紧重传次数以保障时延。

4) 设置连续成功/失败重传计数器。若连续两次重传均成功解码,立即终止后续重传;若单次重传失败且 BLER 超过目标阈值,则提前触发上层协议介入,如自动重发请求协议(automatic repeat request, ARQ),避免无效重传循环,该机制可减少约 30% 的冗余重传次数,平均重传时延可降低 $1\sim 2\ \text{s}$ 。

5) 进行差异化业务 QoS 适配。为语音、控制指令等实时业务配置严格时延约束,允许一定误码率换取低时延;为大数据量传输等非实时业务保留较高的重传次数,通过多次重传提升成功率。

3 加装与集成方式

3.1 模数转换

在试飞测试中,传感器(如加速度计、压力传感器)捕捉到的物理信号首先被转换为连续的模拟电压信号。该信号若要通过无线方式传输至地面的数字存储设备,模-数转换(analog-to-digital converter, ADC)是必要环节。此过程始于信号调理,即对原始模拟信号进行放大、滤波,将其调整至 ADC 的最佳输入范围内,并消除高频噪声以避免后续采样失真^[18-19]。随后,采样环节由 ADC 芯片按预设的采样频率对调理后的模拟信号进行离散化抓取,获取一系列时间点上的瞬时电压值,根据奈奎斯特定理,至少为信号最高频率的两倍。紧接着是量化,ADC 将每个采样点的模拟电压值映射到一个最接近的离散数字电平上,其精度取决于 ADC 的位数。量化后的电平值被编码为对应的二进制数字码,完成从模拟量到数字量的转变。最终,这些规整的数字数据流被送入无线传输模块,通过调制将其加载到高频载波上,以无线电波形式发射。存储端的无线接收模组解调还原出数字信号,最终由存储器记录,从而实现了从物理参量到可靠存储的数字信息的无线化传递。

本文的无线化方案中的模数转换以星闪 SLE SOC 芯片的 ADC 通道为核心,其原理如图 4 所示,具备 $4\ \text{Msps}$ 逐次逼近寄存器型模数转换性能,通过二分法以“猜测-比较-调整-循环往复”的方式逐次逼近 ADC 的精度极限,在转换速度、精度和功耗之间取得较好的平衡,能够满足航空平台

所涉及试飞测试传感器的 Ksps 级别采样需求。

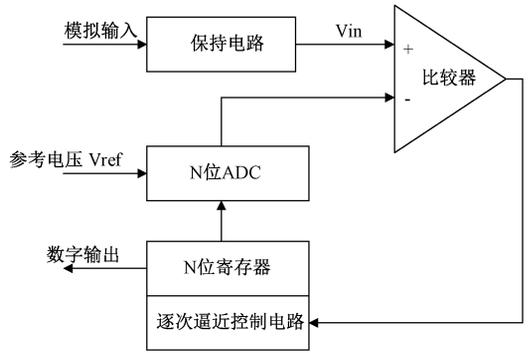


图 4 逐次逼近寄存器型模数转换原理

Fig. 4 Principle of successive approximation register analog-to-digital converter

3.2 无线化集成

无线模组包括 AD 转换模块与无线通信模块,本研究将根据机载试飞测试系统的体积不同,设计不同的无线模组与设备的集成方案。

对于体积较小的机载试飞测试设备,例如大部分传感器,将采用外置式方式与无线模组集成,双方使用尽可能短小的数据线缆相连,实现传感器采集数据的无线发送,以取消原有传感器与存储器之间的大量线缆。本方案的改装复杂度较低,但集成度较差,需要增加设备数量。

对于体积较大的机载试飞测试设备,例如部分传感器以及存储器等,将采用集成式的设备改进方案,在原有试飞测试设备的基础上,新研接口板,在试飞测试设备上新增用于与无线模组集成的接口,定制无线模组的天线朝向,集成无线模组后重新封装,形成无线化试飞测试设备。本方案的改装复杂度较高,但集成度较高,可不改变原有机载设备布局。

4 无线功能性能测试

4.1 无线点对点传输速率静态测试

在实验室环境下,以点对点直连的拓扑形式连接被测设备,具体关系图如图 5 所示。



图 5 点对点静态测试设备示意

Fig. 5 Schematic diagram of point-to-point static testing equipment

被测设备在通视、相距 $5\ \text{m}$ 、静态放置的条件下共开展 7 轮次传输速率测试,测试结果如图 6 所示。

测试结果表明,在上述实验条件下,通过无线传输传感数据,最大速率可达约 $4\ \text{Mbps}$,平均速率在 $3.5\ \text{Mbps}$ 以上,匹配机内点对点传感器至存储器的无线化传输路径,无线化试飞测试设备的传输速率能够满足数据传输需求。

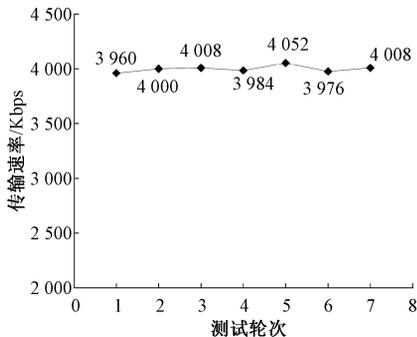


图 6 点对点静态传输速率测试结果

Fig. 6 Point-to-point static transmission rate test results

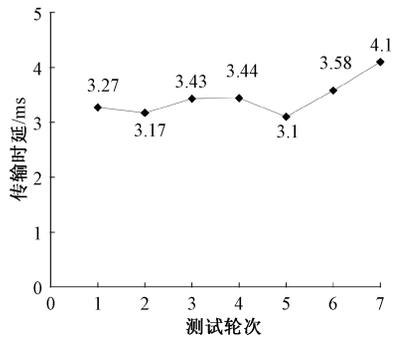


图 9 传输时延测试结果

Fig. 9 Transmission delay test results

4.2 无线点对点传输速率拉远测试

考虑航空平台试飞测试的工作环境,多为对电磁波具备反射能力的壁板、框梁等材料,为模拟航空平台试飞测试传感器、记录器的无线通信信道环境,在实验室环境下,以点对点直连的拓扑形式连接被测设备,测量被测设备在多径、快衰落条件下的长距离联通能力,具体关系图如图 7 所示。



图 7 点对点拉远测试设备示意

Fig. 7 Schematic diagram of point-to-point long-range testing equipment

被测设备在通视、相距 100 m、静态放置的条件下共开展 7 轮次传输速率测试,测试结果如图 8 所示。

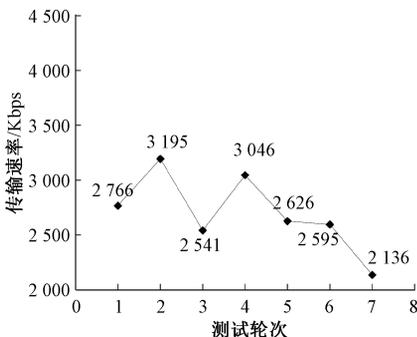


图 8 远距离传输速率测试结果

Fig. 8 Point-to-point long-range transmission rate test results

测试结果表明,在上述实验条件下,通过无线传输传感数据,最大速率可达约 3 Mbps,平均速率在 2 Mbps 以上,匹配机内点对点传感器至存储器的无线化传输路径,无线化试飞测试设备的传输速率能够满足数据传输需求。

4.3 无线传输时延测试

在实验室环境下,以点对点直连的拓扑形式连接被测设备,被测设备在通视、相距 5 m、静态放置的条件下共开展 7 轮次传输时延测试,测试结果如图 9 所示。

测试结果表明,在上述实验条件下,通过无线传输传感

数据,最大传输时延仅为 4.1 ms,平均时延在 3.5 ms 以内,匹配机内点对点传感器至存储器的无线化传输路径,无线化试飞测试设备的传输时延能够满足数据传输需求。

综上,通过对不同场景下星闪无线传输速率、时延的测试,可以得出基于星闪技术的无线传输模组,能够满足机载试飞测试的性能需求。

5 结 论

本文针对机载试飞测试系统所面临的线缆繁杂、布置紧张、装卸耗时、维护困难等问题,设计了无线化机载试飞测试系统解决方案。在无线解决方案方面,采用定制化星闪短距无线通信技术,从通信系统硬件与通信协议两方面针对性匹配机载试飞测试数据无线化传输中的传输带宽与时延需求;在加装与集成方式方面,通过星闪 Soc 芯片的逐次逼近模数转换通道将传感器采集的模拟量数字化,并通过定制化集成方式传递给无线模块实现数据的无线化传输。实验模拟机载试飞测试的应用场景,经测试,本文所研究的机载试飞测试无线化方案在传输速率与时延方面均能满足实际应用需求。但本文所研究的方案,仍采用分离式集成方式,集成度较差,未来仍需针对机载试飞测试系统中的传感器、存储器等作原生无线化升级,以匹配机载系统高集成度的机载适应性要求。

参考文献

[1] 张平, 陶运铮, 张治. 5G 若干关键技术评述[J]. 通信学报, 2016, 37(7): 15-29.
ZHANG P, TAO Y ZH, ZHANG ZH. Survey of several key technologies for 5G [J]. Journal of Communications, 2016, 37(7): 15-29.

[2] 冯友林, 何锋, 李铮, 等. 民机机内 5G 无线混合组网架构性能评估[J]. 航空学报, 2023, 44(12): 327681.
FENG Y L, HE F, LI ZH, et al. Performance evaluation of 5G wireless hybrid airborne network architecture for airliner [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(12): 327681.

[3] 黄勇. 基于光纤传感的襟翼操纵载荷试飞技术[J]. 航空学报, 2020, 41(4): 223213.
HUANG Y. Flight test technic for flap operation load

- with optical fiber sensing [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(4): 223213.
- [4] 孙见忠, 王卓健, 闫洪胜, 等. 航空预测性维修研究进展[J]. *航空学报*, 2025, 46(7): 30852.
SUN J ZH, WANG ZH J, YAN H SH, et al. Research advances in aircraft predictive maintenance [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(7): 30852.
- [5] 易芳, 姜宏伟, 李卢丹. 飞机操纵参数联合在线校准技术研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2021, 35(5): 146-153.
YI F, JIANG H W, LI L D. Research on joint online calibration technology for aircraft control parameters [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2021, 35(5): 146-153.
- [6] 韩国庆, 刘显明, 雷小华, 等. 光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用 [J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1): 145-164.
HAN G Q, LIU X M, LEI X H, et al. Application of optical fiber sensing in aero-engine temperature test [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 145-164.
- [7] 李铁林. 基于 AUTBUS 总线的机载无线柔性分布式测试系统数据同步采集技术 [J]. *电子测量技术*, 2024, 47(11): 176-181.
LI T L. Synchronization data collection technique for airborne wireless flexible distributed testing system based on AUTBUS [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2024, 47(11): 176-181.
- [8] 陈燎, 孙文慧, 李仲兴. 机载无线传感器网络的传输可靠性研究 [J]. *电子设计工程*, 2023, 31(24): 90-94, 99.
CHEN L, SUN W H, LI ZH X. Research on transmission reliability of tractor wireless sensor network [J]. *Electronic Design Engineering*, 2023, 31(24): 90-94, 99.
- [9] 马游春, 李晋芳, 李超杰, 等. 舱内低功耗无线传感网络系统设计 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45(11): 109-113.
MA Y CH, LI J F, LI CH J, et al. Design of low-power wireless sensor network system in cabin [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(11): 109-113.
- [10] 贾登, 骆学理, 刘成, 等. 基于 ZigBee 的无线压力采集系统设计 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45(11): 114-119.
JIA D, LUO X L, LIU CH, et al. Design of wireless pressure acquisition system based on ZigBee [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45(11): 114-119.
- [11] 黄俊杰, 赵勤佳, 李振刚, 等. 基于 ZigBee 的角度扭矩传感器在线校准方法 [J]. *计量与测试技术*, 2025, 51(4): 121-125.
HUANG J J, ZHAO Q J, LI ZH G, et al. On-line calibration method of angular torque sensor based on Zigbee [J]. *Metrology & Measurement Technique*, 2025, 51(4): 121-125.
- [12] 刘盛. 低功耗 WIFI 传感网数据传输关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
LIU SH. The key technology research of Wi-Fi sensor network data transmission with low power [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016.
- [13] 冯笑晨, 邵壮, 文玉梅, 等. 利用 Wi-Fi 信道的超低功耗无线传感系统 [J]. *仪器仪表学报*, 2021(9): 131-140.
FENG X CH, SHAO ZH, WEN Y M, et al. An ultra-low-power wireless sensor system using Wi-Fi channels [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2021(9): 131-140.
- [14] 刘海宁, 张少卿, 鄂思宇. 基于 5G 技术的航空机载平台无线通信应用 [J]. *航空学报*, 2022, 43(12): 326233.
LIU H N, ZHANG SH Q, E S Y. Application of wireless communication of aviation airborne platform based on 5G technology [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2022, 43(12): 326233.
- [15] 范敏, 邵思源, 贺超, 等. 下一代毫米波无线局域网: 愿景与关键使能技术 [J]. *物联网学报*, 2023, 7(3): 1-14.
FAN M, SHAO S Y, HE CH, et al. Next-generation mmWave WLAN: Vision and key enabling technologies. [J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2023, 7(3): 1-14.
- [16] 龚乐中, 庄跃迁, 唐霄汉, 等. 星闪在特种行业中的应用研究 [J]. *现代传输*, 2025(4): 75-79.
GONG L ZH, ZHUANG Y Q, TANG X H, et al. Application research of SparkLink in special industries [J]. *Modern Transmission*, 2025(4): 75-79.
- [17] 赵学磊. 星闪技术在消防救援业务中的应用初探 [J]. *网络安全技术与应用*, 2025(2): 113-115.
ZHAO X L. A preliminary study on the application of SparkLink technology in fire and rescue operations [J]. *Network Security*, 2025(2): 113-115.
- [18] 朱孝林. 国产 ADC 在 5G 智能节点仪中的应用及其自检功能设计与实现 [J]. *工业控制计算机*, 2025, 38(8): 25-26.
ZHU X L. Application of domestic ADC in 5G intelligent node instrument and design and implementation of its self-checking function [J]. *Industrial Control Computer*, 2025, 38(8): 25-26.
- [19] 李政凯. 光采样电量化模数转换技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2024.
LI ZH K. Research on photonic sampling and electronic quantized analog-to-digital conversion technology [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2024.

作者简介

赵笔岚(通信作者), 硕士, 工程师, 主要研究方向为机载系统设计及无线通信。

E-mail: mountwind@163.com

郑涵予, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线通信系统设计。

刘海宁, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载系统架构设计及无线通信系统设计。

刘畅, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为机载测试系统设计。