

引用本文:王星杰,李谦,樊磊,等. 旋转环境下无线激光通信系统的设计与验证[J]. 光通信技术,2025,49(4):60–63.

旋转环境下无线激光通信系统的设计与验证

王星杰^{1,2}, 李谦³, 樊磊^{1,2}, 张磊^{1,2}, 谭秋林^{1,2*}

(1.中北大学 微纳器件与系统教育部重点实验室,太原 030051;

2.中北大学 省部共建动态测试技术国家重点实验室,太原 030051;3.汇川技术有限公司,江苏 苏州 215100)

摘要:为解决航空发动机转子部件在高速旋转工况下的非接触信号传输难题,设计了一种旋转环境下的无线激光通信系统。该系统采用垂直腔面发射激光器(VCSEL)与PIN光电二极管构建光通信链路,通过现场可编程门阵列(FPGA)主控模块协调MAX3656驱动芯片和MAX3760/MAX3762放大电路,实现电/光/电信号的高效转换与处理;结合自主开发的上位机软件,完成数据的实时解析与显示。实验结果表明:系统在20 cm传输距离下可实现100 Mb/s的稳定数据传输,功耗仅为3.45 W,且输入信号频率小于等于100 MHz时无波形失真,上位机数据解析零误差。

关键词:无线激光通信;跨阻放大器电路;旋转环境

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2025)04-0060-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2025.04.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design and verification of a wireless laser communication system in rotating environment

WANG Xingjie^{1,2}, LI Qian³, FAN Lei^{1,2}, ZHANG Lei^{1,2}, TAN Qiulin^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Micro/nano Devices and Systems, Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Key Laboratory of Dynamic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China;

3. Inovance Technology Co., Ltd., Suzhou Jiangsu 215100, China)

Abstract: To address the challenge of non-contact signal transmission for high-speed rotating components in aero-engines, a wireless laser communication system for rotating environments was designed. The system employs a vertical-cavity surface-emitting laser (VCSEL) and a PIN photodiode to establish an optical communication link. A field-programmable gate array (FPGA) master control module coordinates the MAX3656 driver chip and MAX3760/MAX3762 amplifier circuits to achieve efficient electrical/optical/electrical signal conversion and processing. Combined with self-developed host computer software, real-time data parsing and display are accomplished. Experimental results demonstrate that the system achieves stable data transmission at 100 Mb/s over a 20 cm distance, with a power consumption of only 3.45 W. No waveform distortion occurs when the input signal frequency is ≤ 100 MHz, and zero bit errors are observed in host computer data parsing.

Key words: wireless laser communication, transimpedance amplifier circuit, rotating environment

0 引言

在航空航天发动机转子部件的性能测试中,转子

叶片长期处于高转速、高负荷的极端工况,需实时监测温度、热流、应变等关键参数以确保设备正常运行。因此,实现这些参数的精确实时采集对发动机转子性能研究至关重要^[1]。

旋转部件参数检测的核心挑战在于信号传输的可靠性与实时性。早期的实时数据采集系统主要采用接触式与感应式2种方法。接触式方法通过集流器实现有线传输,但存在发热和噪声干扰问题,严重影响测量精度。感应式方法基于电磁耦合原理传输信号,但其磁芯的高截止频率特性严重限制了数据传输速率^[2]。

目前,非接触式传输技术已成为该领域的主流解

收稿日期:2024-09-24。

基金项目:国家科技重大专项(J2022-V-0005-0031)资助。

作者简介:王星杰(1999—),男,山西长治人,硕士研究生,就读于中北大学仪器与电子学院仪器科学与技术专业,主要研究方向为电路与系统、无线光通信。在校期间获学业三等奖学金2次、“挑战杯”全国大学生课外学术科技作品竞赛三等奖1次。

*通信作者:谭秋林(1979—),教授,博士生导师,主要研究方向为超常规传感技术。



决方案^[3],主要包括无线电传输^[4]和无线光传输。无线电传输技术虽然应用广泛,但其功耗较高、易受电磁干扰,且需配置额外天线,在高速、强电磁干扰环境下性能受限。相比之下,无线光传输技术通过光束调制实现信息传递,其可用带宽约为无线电的 105 倍,同时具有体积小、重量轻、传输速率快、保密性强以及安装便捷等优势,在无线通信领域展现出巨大潜力。

近年来,国内已在无线光通信领域取得重大进展^[5-7],为满足航空发动机参数的非接触测量与实时显示需求,本文设计一种旋转环境下的无线激光通信系统,以解决高速旋转状态下的信号传输问题。

1 系统组成

无线激光通信系统由发射端、接收端及上位机构成,其整体架构如图 1 所示。

1.1 发射端设计

发射端采用模块化设计实现电/光信号转换。传感器采集的模拟信号通过调理放大、现场可编程门阵列(FPGA)转换处理,转换为数字信号。该数字信号输入激光驱动电路,通过驱动芯片生成调制电流与偏置电流,精确控制 850 nm 激光器的工作状态,最终将电信号调制为光信号并通过光学信道发射。

1.2 接收端设计

接收端通过光/电转换实现信号逆向处理。光电探测器(PD)基于光电效应将入射光信号转换为微安级电流信号,经前置放大、限幅放大 2 级增益调节,将微弱电流转换为标准电压信号。FPGA 对放大后的信号进行数字解析,通过千兆以太网接口采用用户数据报协议(UDP)将数据上传至上位机,上位机搭载自主开发的信号处理软件,具备数据可视化与分析功能。软件通过解析 UDP 数据包还原被测物理量,并生成动态曲线实现旋转部件工作状态的实时监测^[8]。

2 硬件电路设计

2.1 供电模块设计

电源为系统各模块提供工作能量,其电压质量与稳定性直接影响设备性能。系统采用 5 V 稳定电压供电,其中驱动电路需 3.3 V 工作电压,故选用 TPS63001 降压芯片实现电压转换,接收电路则直接采用 5 V 供电。该方案可提供纹波低于 50 mV 的稳定电压,确保激光器在恒定功率下稳定工作,从而优化激光通信系统的整体性能。

2.2 发射端设计

2.2.1 激光器选择

激光光源作为通信系统的核心部件,其性能直接决定系统的传输距离与通信质量。为实现高速、高可靠性的无线通信,本系统采用激光二极管(LD)作为信号载体。

在高速通信系统中,当 LD 器件的工作波长为 850、1 300、1 550 nm 时,光信号的传输损耗较低。其中,1 310 nm 和 1 550 nm 波长器件适用于中远距离传输,850 nm 波长器件更适用于短距离传输。由于 1 310 nm 和 1 550 nm 光模块所需的光源发射器及信号转换器价格显著高于 850 nm 器件,因此,从成本角度考量,本文选用中心波长为 850 nm 的垂直腔面发射激光器(VCSEL)。该器件同时具备传输速率高、体积紧凑等特点,完全满足系统设计要求^[9]。

2.2.2 激光驱动电路设计

激光驱动电路的主要功能是将 FPGA 输出的高速信号转换为符合通信协议的驱动信号,并为激光器提供所需的调制电流和偏置电流,其电路原理图如图 2 所示。本文采用 MAX3656 驱动芯片,该芯片不仅能够提供精确的偏置电流和调制电流,还集成了自动光功率控制(APC)环路,确保激光器在整个工作温度范围和寿命周期内保持恒定的平均光功率输出。

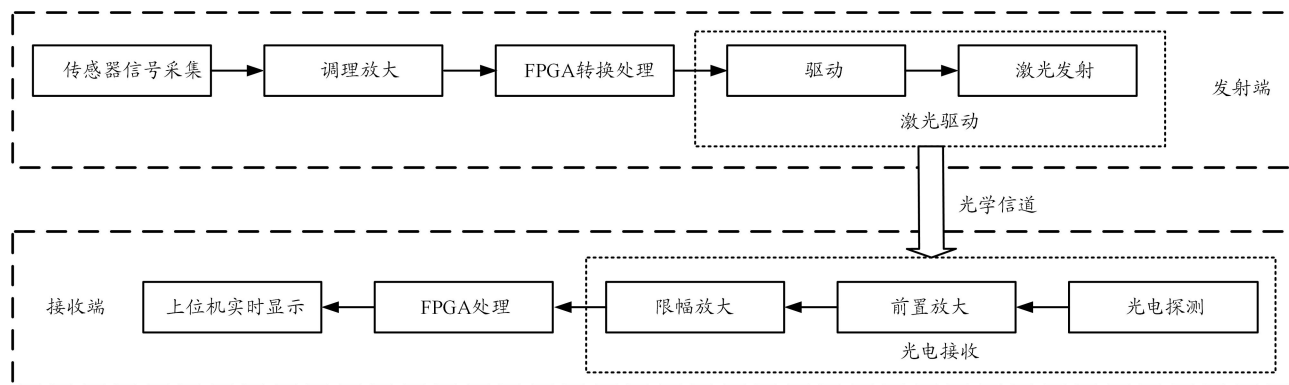


图 1 无线激光通信系统整体框图

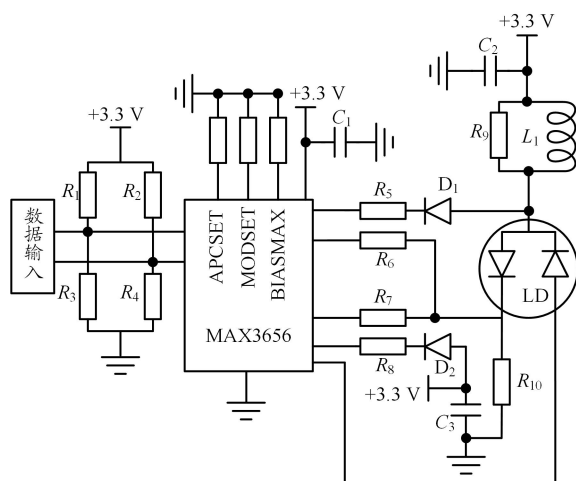


图2 驱动电路原理图

在APC闭环工作模式下,需在MAX3656芯片的GND、BIASMAX、MODSET和APCSET引脚之间配置外部电阻网络,分别用于设定最大偏置电流、最大调制电流和监控二极管电流。根据芯片特性参数,本文设定最大偏置电流为50 mA,相应电阻取值为: $R_{APCSET}=8\text{ k}\Omega$ 、 $R_{MODSET}=9\text{ k}\Omega$ 、 $R_{BIASMAX}=12\text{ k}\Omega$ 。完成电阻参数计算后,即可实现完整的驱动电路设计。

信号处理流程如下:FPGA输出的晶体管-晶体管逻辑(TTL)电平信号首先通过MAX9371电平转换芯片转换为低电压正射极耦合逻辑(LVPECL)信号,再经电阻网络耦合至MAX3656的输入端。芯片输出的调制电流经过优化设计,可直接驱动 $15\text{ }\Omega$ 负载,且必须采用直流耦合方式。为实现阻抗匹配,串联电阻 R_5 与LD等效串联电阻的总值设计为 $15\text{ }\Omega$ 。

为提高信号质量,在LD阴极与地之间设置了电阻电容(RC)补偿网络,有效抑制由器件寄生电感引起的光输出畸变和占空比失真。补偿网络的参数可根据具体LD特性和印制电路板(PCB)布局进行调整以获得最佳性能。驱动电路的负输出端通过 $15\text{ }\Omega$ 电阻 R_5 和开关二极管 D_1 连接至激光二极管阳极。

2.3 接收端设计

光电接收方案是无线激光通信系统的关键环节,其性能直接决定系统的带宽、灵敏度和响应速度。接收电路原理图如图3所示。

2.3.1 放大电路设计

放大电路采用2级结构,由前置放大电路和限幅放大电路组成。前置放大电路的核心是跨阻放大器(TIA),选用MAX3760芯片实现低噪声、高增益的电流-电压转换,该芯片支持622 Mb/s传输速率且具有低功耗特性。PD采用LSSPD-0.5硅光电二极管(北京

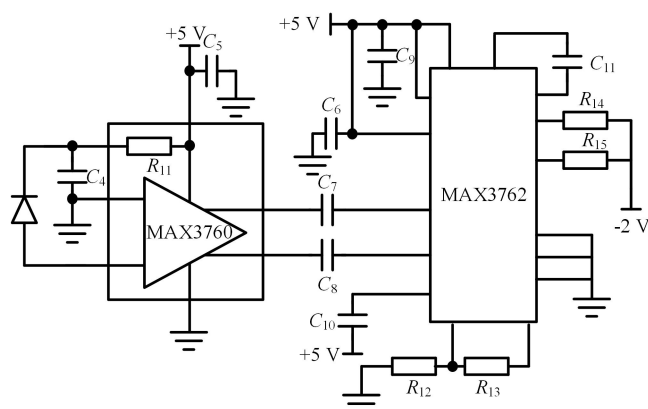


图3 接收电路原理图

敏光科技),该器件基于PIN结构,在目标波长具有高响应度,能有效区分信号与噪声,相比APD二极管具有工作电压低、噪声小的优势。PD输出电流通过正负极分别连接MAX3760的输入引脚,经内部TIA转换为电压信号后,再通过电压放大器实现差分输出。

限幅放大器选用与MAX3760配套的MAX3762芯片(ADI公司),两者协同工作可优化系统性能。前置放大器的差分输出通过电容耦合至限幅放大器,经信号整形后输出固定摆幅的电压信号,系统采用标准正射极耦合逻辑(PECL)终端连接方式。

在跨阻放大电路设计中,需重点考虑以下参数:增益与带宽的平衡、噪声抑制特性和频率响应特性。为实现最优的二阶巴特沃斯频率响应特性,电路设计中引入了反馈极点补偿技术^[10]。该技术可有效改善频率响应平坦度,同时抑制由跨阻放大过程引入的噪声。

2.3.2 主控电路设计

系统采用ZYNQ7020作为核心控制模块,负责数据处理与逻辑控制。FPGA完成数据处理后,将信号传输至发射端的激光驱动电路,通过控制MAX3656驱动芯片来调节激光器的工作模式。激光器产生的光信号经光学信道传输至接收端。在接收端,PD将光信号转换为电信号,该信号经过运算放大电路进行放大和滤波处理,以提高信号质量。处理后的信号最终传输至上位机,进行信号质量分析和性能评估,实现对整个通信系统的实时监控。

3 实验测试结果与分析

为验证系统可靠性,本文搭建了测试系统如图4所示。该系统由示波器、电源、主控电路、发射电路、接收电路、信号发生器和上位机组成。主控电路集成于方盒结构中,外部设有电源开关、状态指示灯和发光二极管(LED)显示屏,可实时监测工作电流和电压。

王星杰,李谦,樊磊,等:旋转环境下无线激光通信系统的设计与验证

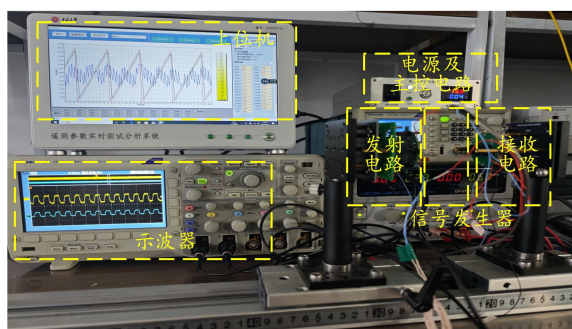


图4 无线光通信系统测试图

测试过程中,信号发生器产生的信号经发射电路发送,传输距离为 20 cm,接收电路将信号处理后采用 UDP 传输至上位机。实验测试结果如图 5 所示,示波器显示的绿色波形为发射信号,黄色波形为接收信号。可以看出,输入方波频率 f 从 25 MHz 增至 100 MHz 时,信号时延相应增加,输出峰值电压从 3.0 V 降至 2.5 V;当输入频率小于等于 100 MHz 时,输出波形与

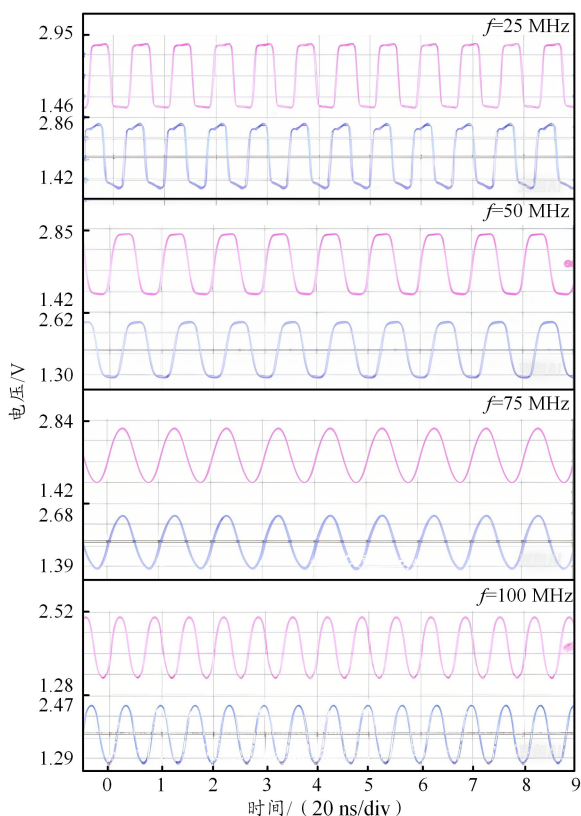


图5 实验测试结果

输入保持良好一致,未出现频率失真现象。测试结果表明了该系统可实现 100 Mb/s 的有效数据传输,功耗仅为 3.45 W。

上位机实时解析出的数据及绘制的帧计数显示,帧数据的帧头帧尾对齐,没有出现丢帧;帧计数准确无误,接收的数据没有误码出现,总体稳定性良好。

4 结束语

本文设计了一种基于 850 nm 激光通信的无线激光通信系统,用于解决旋转环境下的非接触信号传输问题。该系统采用 VCSEL 与 PIN 光电二极管构建光通信链路,配合 FPGA 主控及专用驱动芯片实现硬件控制。经测试验证,系统在 20 cm 传输距离下可实现 100 Mb/s 的稳定数据传输,整体功耗为 3.45 W。因此,本文所提出的无线激光通信系统能够有效满足旋转机械状态监测中的非接触数据传输要求,为相关工程应用提供了可靠的技术解决方案。

参考文献:

- [1] 赖小皇,郭道勇,钟明,等.航空发动机旋转件遥测天线研究与实现[J].电子器件,2023,46(1):1-9.
- [2] 刘冬冬,张天宏,马坚刚.基于无线激光通信的转子参数遥测方法研究[J].2010,25(3):675-680.
- [3] 谢棋军,底青云,杨永友,等.旋转导向系统中非接触电能与信号一体化传输技术[J].地球物理学报,2023,66(1):101-110.
- [4] 于清萍,史治平.5G 信道编码技术研究综述[J].无线电通信技术,2018,44(1):1-8.
- [5] 徐明.无线激光通信数据收发器技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [6] 李文博.基于半导体激光器的水下高速无线光通信系统设计[D].青岛:中国海洋大学,2014.
- [7] 王惠琴,马玉昆,蔡红亮,等.无线激光数据通信系统收发电路的设计与实现[J].兰州理工大学学报,2021,47(3):91-96.
- [8] 张鹏.基于数字微镜的无线激光通信系统研究[D].太原:中北大学,2017.
- [9] CUI N, GUAN B L, LI J J, et al. 850 nm VCSEL with sub quantum well and p-type [formula omitted]-doping in the active layers for improved high-speed and high-temperature performance [J]. Optics Communications, 2023, 530: 129128-1-129128-7.
- [10] 罗兵,刘建圻.2.4 GHz 高阶微带滤波器的设计与仿真[J].电子器件,2020,43(5):963-967.