

引用本文:王琛,马拥华,王茗,等.一种近场无线激光通信系统[J].光通信技术,2022,46(4):51-55.

一种近场无线激光通信系统

王琛¹,马拥华¹,王茗²,孙晖¹,徐林¹,何晓垒¹,蒋蔚¹,钱阳¹

(1.中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004;2.中国人民解放军 63760 部队,南宁 530001)

摘要:针对近距离大容量数据转存的需求,设计了一种近场无线激光通信系统,采用全景凝视成像捕获方式代替传统的扫描捕获方式,使用亚像素定位算法提高系统的跟踪精度,并在 10~100 m 的通信距离内进行了试验。试验结果表明:该系统的对准时间在 5 s 以内,捕获概率达到 100%,跟踪精度达到 0.025 mrad,通信速率达到 9 Gb/s 以上,能保证系统快速建立通信链路并实现数据的稳定传输。

关键词:近场光通信;全景系统;目标跟踪;亚像素定位

中图分类号:TN929.12 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2022)04-0051-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2022.04.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Near-field wireless laser communication system

WANG Chen¹, MA Yonghua¹, WANG Ming², SUN Hui¹, XU Lin¹, HE Xiaolei¹, JIANG Wei¹, QIAN Yang¹

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China; 2. Troops 63760 of the PLA, Nanning 530001, China)

Abstract: Aiming at the requirement of high-capacity data dumping at close range, a near-field wireless laser communication system is designed. The panoramic gaze imaging capture method is used instead of the traditional scanning capture method, and the sub-pixel positioning algorithm is used to improve the tracking accuracy of the system. The experiment is carried out in the communication distance of 10~100 m. The experimental results show that the alignment time of the system is within 5 s, the acquisition probability reaches 100%, the tracking accuracy reaches 0.025 mrad, and the communication rate is above 9 Gb/s, which can ensure that the system can quickly establish a communication link and achieve stable data transmission.

Key words: light near field communication, panoramic system, target tracking, sub-pixel positioning

0 引言

随着信息化社会的发展,信息数据呈现出爆炸式增长。据统计,一辆自动驾驶汽车每运行 8 h,数百个车载传感器就能产生 4 TB 数据;我国高铁列车上有 40 个以上的高清摄像头,每 10 h 可采集 300 GB 以上的数据;还有一些其它传感器数据,即使采用了 5G 网络技术,转存这些数据的时间也要花近 1 h 左右,严重影响列车的运维效率;此外,客机、战斗机上有成千上万的传感器,采集的数据更加庞大。

2002 年,日本新干线 N700 采用了同轴电缆进行

车地通信^[1]。2013 年,马捷等人^[2]实现了一种近场通信的 WiFi 传输连接方案,提高了传输的安全性,但在传输大数据量文件时存在时延。2015 年,欧洲列车控制系统(ETCS)的车地传输基于无线通信^[3-4]实现了列车占用监测功能。2018 年,郑海源等人^[5]提出了大型场馆中 TD-LTE 系统方案,该系统的上行通信速率达到了 1.4 Gb/s、下行通信速率达到了 1.7 Gb/s。2019 年,Oledcomm 与其合作伙伴 Magneti Marelli 推出基于产品 LiFiMax R 的智能解决方案,成功为法航飞机 A321 提供 1 Gb/s 的 LiFi 高速互联服务^[6],该产品适用于室内灯泡传输数据。上述国内外的研究及应用存在通信距离近且通信速率低的问题,并不能完全满足即时大数据传输的要求。2021 年,柴金川^[7]和梁健堂^[8]分别提出了基于 5G 的车地通信方案,点对点上行传输速率达到 1.5 Gb/s、峰值速率达到 223 Mb/s,但在进行大量数据的实时传输时,相比于 10 Gb/s 以上速率的无线激光通信方式,这种方案则需要花费 6~7 倍的时间。

收稿日期:2021-12-29。

作者简介:王琛(1986—),男,广西全州人,硕士,工程师。主要研究方向是无线光通信技术,参与完成多项“十三五”预研项目和多款激光通信设备样机的研制工作,申请了多项发明专利。



王琛,马拥华,王茗,等:一种近场无线激光通信系统

目前,采用的 4G、5G 或人工拷贝来转存数据的方式费时、费力;因此,急需一种能够自动无缆化高速安全传输数据的技术,便于即时以无线方式高速传输大容量数据。由于无线激光通信系统具有通信速率高、抗电磁干扰和抗截获能力强等特点,被广泛应用于航空航天、军事、工业和商业等领域,成为了一种日趋重要的通信方式。为此,本文设计一种近场无线激光通信系统,可以快速建立激光通信链路实现数据的高速、稳定传输,为近场大容量数据通信提供一种可行性方案。

1 系统设计

1.1 系统组成原理

近场无线激光通信系统实现原理框图如图 1 所示,主要参数设置如表 1 所示。该系统包括 2 个通信终端 A 和 B,其组成和功能相同^[9-10],各端由通信分系统和瞄准、捕获和跟踪(PAT)分系统组成。

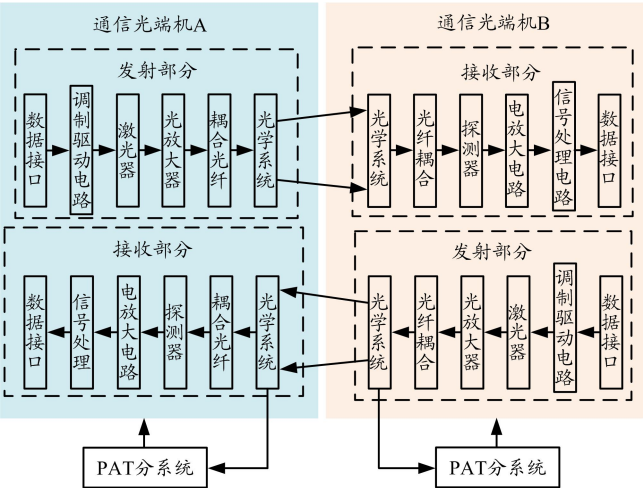


图 1 近场无线激光通信系统实现原理图

表 1 系统主要参数

名称	参数
信号波长/nm	1550
信标波长/nm	980
处理器	STM32H743VI
感光靶面	MT9V034 ^[11]
最大分辨率	640×480
像素尺寸/ μm	5×5
帧率	60 帧/s@640×480
信标镜头	全景镜头
焦距/mm	20
电源/V	5
探测器	InGaAs-APD
伺服系统	步进电机 ^[12]

各通信终端分为发射部分和接收部分。发射部分由数据接口电路、调制驱动电路、激光器、光信号放大器、耦合光纤和发射光学系统组成。用户光信号进入数据接口后转换成适合系统传输的信号,由于采用的 InGaAs-APD 探测器接收,其波长响应范围为 1100~1700 nm,对 1550 nm 光信号的接收灵敏度为 -30 dBm,从而选用 1550 nm 波段作为信号光。为了减小空间传输损耗,对束散角进行压缩,使激光器光发散角为 1 mrad,在调制驱动器驱动下,可实现 10 Gb/s 的调制速率;调制后,为保证接收端能收到足够的光功率,通过掺铒光纤放大器进行光信号放大,最后耦合到光纤中,传输至发射光学系统。接收部分由数据接口、信号处理电路、电信号放大电路、雪崩光电探测器(APD)、耦合光纤和接收光学系统组成,光学系统将接收到的光信号耦合进光纤后,传输至探测器转换为电信号并对其进行放大,然后进入信号处理模块进行解码,解码后输出到数据接口,最后恢复出原始信号输出给用户。

无线光通信系统两端的 PAT 分系统框图如图 2 所示。系统分别由处理器、感光靶面、全景镜头、伺服系统及信标激光器组成。考虑到大气信道影响,成像焦平面对波长为 980 nm 的激光器产生的红爆现象要小于波长为 1550 nm 和 880 nm 的激光器,有利于光斑成像,减少噪声干扰,因此本文采用 980 nm 波段的信标光。信标发射光学系统设置水平 360°、垂直 120°发射信标光,信标接收光学系统由全景系统构成,同样具有水平 360°、垂直 120°的接收视场角,用于捕获对端信标,对端的全景镜头捕获到目标经感光靶面成像后,处理器控制伺服系统;在伺服机构的引导下,信号光进入感光靶面进行精跟踪,从而建立稳定的通信链路。与传统使用信标进行精跟踪对准的 PAT 系统相比,采用信号光进行精跟踪对准的方法则不必考虑信号光与信标光的平行度问题,解决了因光线折射后(如穿透弧面玻璃发生的折射)带来的信号光与信标光不再平行的问题。

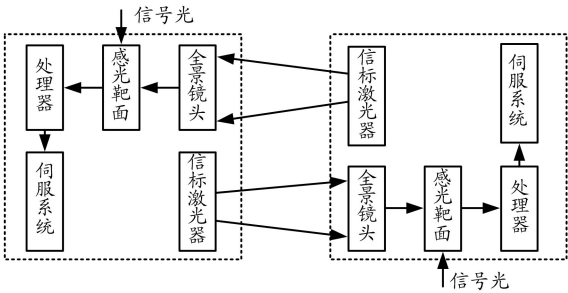


图 2 PAT 分系统框图

1.2 系统功能模块设计

1.2.1 信标捕获

全景成像^[13]系统原理图如图3所示。全景成像系统采用折反射原理进行成像,由1个摄像头和1个反射抛物镜面构成,摄像头对准抛物镜面凸起一侧的镜面,形成水平360°、垂直120°的折反成像。该成像方案的视场范围超过了传统的折射式光学成像设计,易于接收到信标,且结构简单。

全景成像镜头在传感器焦平面上形成的环状图像如图4所示。图中,蓝色环状区域是全景成像系统的视场范围,中间白色区域为视场盲区(可以改进设计扩大视场区域,消除盲区),蓝色环状区域中的白色点为光斑在视场中的成像位置,可根据传统的光斑质心算法或传统质心算法计算其中心坐标。设光斑在宽为 W 、高为 H 的图像上成像,通过传统算法得到光斑质心坐标为 (x, y) 。假如光斑位置位于图4中蓝色环中的白点位置,则光斑质心在反射面镜头上的角度可通过以下公式计算得出。

$$\theta = 180^\circ + \arctan[(x - W/2)/(y - H/2)] \quad (1)$$

将上述的角度信息换算出电机执行的步数后传输至电机驱动,控制电机水平角和俯仰角实现初始对准。

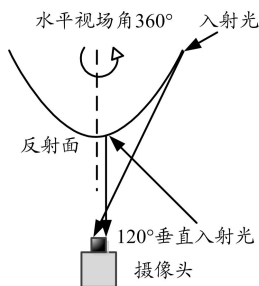


图3 全景成像系统原理图

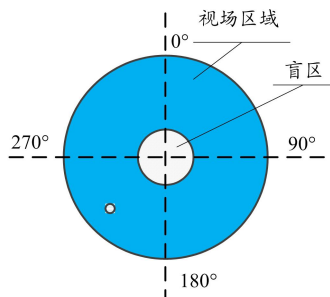


图4 全景成像环状图像

本文所提系统采用的全景凝视捕获方式和传统PAT系统采用的扫描捕获方式的流程图分别如图5和图6所示。2种方式的捕获对准过程类似,具体步骤如下:

- ①设备上电;
- ②进行信标光捕获;
- ③判断是否捕获到对端信标光,如果未捕获到对端信标光,则,循环执行步骤②;
- ④捕获到信标光则控制伺服系统进行对准;
- ⑤对准过程中判断是否精确对准,如果未精确对准则循环执行步骤④;
- ⑥如果已精确对准,则执行跟踪;

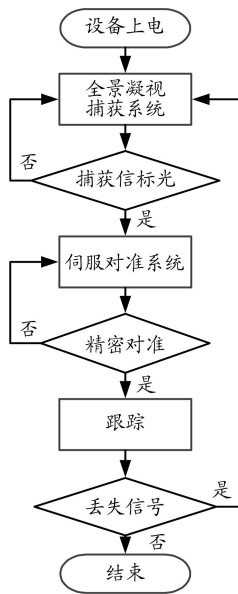


图5 全景凝视捕获方式流程

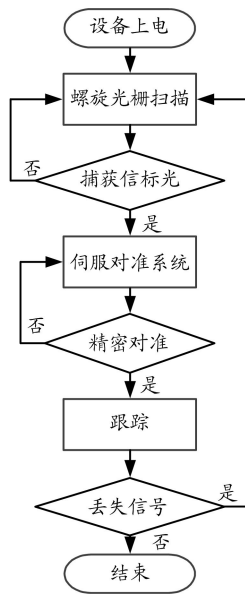


图6 扫描捕获方式流程

⑦跟踪过程中判断目标是否丢失,如果丢失目标则返回到步骤②,否则表示设备已经对准,成功建立通信链路。

在捕获对准过程中,这2种方式的主要区别在步骤②。传统PAT系统采用扫描捕获方式,即螺旋光栅伺服扫描。虽然螺旋光栅扫描可以从高概率目标区域的中心向低概率目标区域周围进行扫描,执行效率也比较高,但在两端同时扫描则会进一步降低捕获概率,在捕获对准过程中容易丢失目标,导致不停重复搜索目标,从而需要更多的捕获和对准时间。而本文系统采用全景凝视捕获方式,由于是全景成像,不仅使捕获概率达到了100%,大大减少了捕获时间,而且在捕获阶段无需伺服系统执行扫描操作,也无需设计复杂的扫描算法,降低了系统的复杂度。此外,相对于一些目标形态识别捕获方法,该系统可在白天或晚上工作,也可以在雨雪天、雾天工作,具有全天候工作的优势。

1.2.2 跟踪对准

本文采用一种针对光斑图像的亚像素定位算法计算光斑亚像素中心。首先用传统质心算法计算出光斑中心,然后以中心像素点分别进行水平曲线拟合和垂直曲线拟合,得到二次曲线的顶点坐标。

传统质心算法^[14]是对中心对称目标进行高精度定位的常用算法,通过计算目标的图像灰度中心来判别物体中心位置。该算法将像素点灰度等级作为权重,提高了测量精度,常用于定位图像中的光斑中心,其计算公式为

王琛,马拥华,王茗,等:一种近场无线激光通信系统

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \times g(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n g(x_i, y_i)} \quad (2)$$

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \times g(x_i, y_i)}{\sum_{i=1}^n g(x_i, y_i)} \quad (3)$$

其中, x_c, y_c 为光斑质心坐标; x_i, y_i 为像素点 (x_i, y_i) 的坐标; $g(x_i, y_i)$ 为对应像素点 (x_i, y_i) 的灰度值, n 为光斑覆盖光敏面像元个数, i 为第 i 个像元。

传统的跟踪对准算法采用传统质心算法, 该算法不需要对图像进行二值化处理, 虽然计算简单, 但精度有限。传统质心算法定位的精度为 0.4~0.5 个像素, 其标准差为 0.46 个像素^[15]。

激光光斑成像像素灰度分布近似于高斯分布, 高斯曲线如式(4)所示。

$$y = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (4)$$

其中, σ 是激光光斑光强分布高斯函数的方差, 数值为光斑弥散半径, μ 是激光光斑的中心位置。式(4)的积分计算复杂, 可对其两端取对数化简得到关于 x 的二次曲线为

$$\ln y = \ln \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} + \frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2} \quad (5)$$

由式(5)可看出, 只需要对目标进行曲线拟合, 可以大大减少计算量。以水平方向举例, 可将式(5)表示成如下二次曲线形式:

$$y = Ax^2 + Bx + C \quad (6)$$

其中, A, B, C 为二次曲线方程设定的的常量系数, 通过式(7)计算出每个像素的灰度值。

$$y_m = \int_{n-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx \quad (7)$$

上文形心法得出的坐标为 (x_c, y_c) , 令其灰度值为 g_{0x} , 由式(7)可得

$$g_{0x} = \int_{-\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{1}{12} A + C \quad (8)$$

以该点为中心点, 左右各取一个像素点分别为 g_{-1x} 和 g_{1x} , 由式(8)可得

$$g_{1x} = \int_{\frac{1}{2}}^{\frac{3}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{26}{24} A + B + C \quad (9)$$

$$g_{-1x} = \int_{-\frac{3}{2}}^{-\frac{1}{2}} (Ax^2 + Bx + C) dx = \frac{26}{24} A - B + C \quad (10)$$

根据式(8)~式(10)可知, $A = \frac{1}{2} (g_{1x} + g_{-1x} - 2g_{0x})$, $B =$

$$\frac{1}{2} (g_{1x} - g_{-1x}), C = \frac{13}{12} g_{0x} - \frac{1}{24} g_{-1x} - \frac{1}{24} g_{1x}$$

计算出曲线顶点横坐标值为

$$x = \frac{g_{1x} - g_{-1x}}{2(2g_{0x} - g_{1x} - g_{-1x})} \quad (11)$$

用对数替代式(11)中的灰度值, 便得到横坐标的亚像素中心为

$$x_s = x_c + \frac{\ln g_{1x} - \ln g_{-1x}}{2(\ln g_{0x} - \ln g_{1x} - \ln g_{-1x})} \quad (12)$$

同理, 可在垂直方向上进行曲线拟合, 得到纵坐标上的亚像素中心值为

$$y_s = y_c + \frac{\ln g_{1y} - \ln g_{-1y}}{2(\ln g_{0y} - \ln g_{1y} - \ln g_{-1y})} \quad (13)$$

上述计算是根据目标灰度特性和形状特性对图像目标进行处理, 并采用浮点运算确定与目标特征最稳定的位置, 可实现优于整个像素精度的定位。

2 实验与结果

本文实验地点在桂林激光通信研究所工作区路面进行, 分别将 2 台通信样机设置在通信距离为 10~100 m 的路面上进行实验^[16], 设备的互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器的像素边长为 5 μm , 光学系统的焦距为 20 mm, 根据光学成像三角法计算出系统的像素空间分辨率为 0.25 mrad。每次实验时, 一端先上电, 另一端后上电, 后一端上电的同时使用秒表开始计时, 当光功率计接收到的信号功率值稳定不变时停止计时, 测试系统从上电到对准所需要的时间; 对准后进行 1 h 的通信实验, 分别记录接收光功率、通信速率和 1 h 通信时间内的误码率; 上位机软件计算出 100 帧图像光斑中心采样点的平均值标准差, 即系统实际的跟踪精度。测试数据记录情况如表 2 所示。其中, σ_x 和 σ_y 分别代表光斑质心坐标 x_c, y_c 的平均值标准差。

从表 2 的测试结果可以看出, 当通信距离从 10~100 m 时, 系统对准时间都在 5 s 以内, 基本保持不变, 这是由于采用全景凝视捕获方式代替了传统扫描捕获方式, 大大降低了对准过程中扫描捕获所用的时间; 随着通信距离越远, 接收光功率变小, 通信速率也有所下降, 但仍能达到 9 Gb/s 以上, 且通信 1 h 无误码

产生;而光斑定位精度经过亚像素定位算法处理后的平均值标准差均为 0.1 个像素左右,表明系统的跟踪精度达到了 0.025 mrad。此外,由于采用固定焦距,离焦时造成跟踪精度降低。实际应用中可根据通信距离调整焦距或者改进为变焦镜头,可改善系统性能。

表 2 不同距离下的测试数据记录

距离/m	对准 时间/s	通信 时间/h	接收 光功率/dBm	通信速率 /(Gb·s ⁻¹)	误码率	σ/σ_y
10	4.5	1	4.65~4.66	9.96	无误码	0.122/1.217
20	4.3	1	3.28~3.26	9.77	无误码	0.118/0.109
40	4.5	1	-1.61~-1.59	9.42	无误码	0.117/0.100
60	4.7	1	-0.18~-0.17	9.35	无误码	0.101/0.099
80	4.4	1	-1.80~-1.77	9.26	无误码	0.103/0.102
100	4.5	1	-3.93~-3.91	9.05	无误码	0.101/0.103

3 结束语

本文设计了一种近场无线光通信系统,在 10~100 m 的距离内进行通信实验,通过采用全景凝视捕获方式代替传统的扫描捕获,大大减少了系统的对准时间,对准时间在 5 s 以内,捕获概率达到 100%;同时,在光学成像系统原有的跟踪精度基础上,采用亚像素定位算法将系统的跟踪精度提高了 10 倍,跟踪精度达到 0.025 mrad,通信速率达到 9 Gb/s 以上,保证了通信链路建立后数据的稳定、可靠传输,解决了大容量数据传输的需求,为更高速率的无线光通信系统的开发提供了重要参考。

参考文献:

- [1] 俞展猷.日本新干线新一代高速列车——N700[J]. 电力机车与城轨车辆,2004,5(27):59-60
- [2] 马捷,鄂金龙.基于近场通信的 WiFi 传输连接方案[J]. 计算机工程,2013,39(6):1-6.
- [3] GLICKENSTEIN H. The new 4G pilot for CBTC. IEEE Vehicular Technology Magazine[J], 2015, 10(3): 19-22.
- [4] AZIMINEJAD A, LEE A W, EPELBAUM G. Underground communication: radio propagation prediction for CBTC data communication subsystem design[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(3): 71-79.
- [5] 郑海源,裴学.大型场馆中 TD-LTE 系统的覆盖研究 [J]. 科技与创新,2018(14):28-30.
- [6] 陈晶晶,王欣涓,苏棋皓,等.浅谈 LIFI 与 WiFi 的关系[J]. 科技与信息,2020(2):127-127.
- [7] 柴金川.基于 5G 通信的铁路车载大数据车地传输方案研究[J]. 铁道通信信号,2021,57(6):10-15.
- [8] 梁健堂.基于 5G 技术的车地通信系统方案 [J]. 电子技术,2021,50(2):86-87.
- [9] 安建欣,何晓全,杨乾远,等.小型无人机空地无线激光通信的应用研究[J]. 光通信技术,2017,41(6):6-8.
- [10] 杨乾远,徐林,孙晖,等.船舶无线光通信技术[J]. 光通信技术,2019,43(8):25-27.
- [11] 柴思博,刘季秋.基于 OpenMV 的运动目标预测跟踪云台[J]. 中国科技信息,2021,14(1):41-42.
- [12] 吴永德.基于 LV8729V 的二相步进电机驱动电路设计 [J]. 机电一体化,2016(5):68-72.
- [13] 庄雯.单芯片 360°全景成像光学系统关键技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2019.
- [14] 李高,何元烈,曾碧.三角测距激光雷达的光斑定位算法研究[J]. 传感技术学报,2016,29(11):1692-1697.
- [15] 贺碎婷.激光照明信标的质心提取方法研究[D]. 成都:中国科学院光电技术研究所,2018.
- [16] 董冉,肖永军,单欣.自由空间光通信跟踪系统的设计及其通信实验[J]. 红外与激光工程,2016,41(10):2719-2722.