

无线激光通信线性自抗扰控制研究与实验

牟冉, 张燕革, 陈晶*, 王 整

(武汉大学 电子信息学院, 武汉 430072)

摘要: 针对无线激光通信系统的粗跟踪控制技术难点, 设计了串级粗跟踪控制结构, 引入了线性自抗扰控制器, 采用线性扩张状态观测器观测系统的总扰动, 并进行了模拟动态跟踪实验, 对比在 0.5 Hz、1 Hz 和 2 Hz 扰动下, 线性自抗扰控制器和比例积分微分控制器的控制误差。实验结果表明线性自抗扰控制器具有更高的控制精度和更好的稳定性。

关键词: 无线激光通信; 粗跟踪; 线性自抗扰; 线性扩张状态观测器

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-5561(2020)01-0039-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.01.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research and experiment of linear auto disturbance rejection control for free space optical communication

MU Ran, ZHANG Yan'ge, CHEN Jing*, WANG Zheng

(Electronic Information School, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of the coarse tracking control technology of free space optical communication system, a cascade coarse tracking control structure is designed. A linear auto disturbance rejection controller is introduced, and the linear extended state observer is used to observe the total disturbance of the system. The simulated dynamic tracking experiment is carried out to compare the control errors of the linear auto disturbance rejection controller and the proportional integral differential controller under the disturbances of 0.5 Hz, 1 Hz and 2 Hz. The experimental results show that the linear auto disturbance rejection controller has higher control precision and better stability.

Key words: free space optical communication; coarse tracking; linear auto disturbance rejection; linear extended state observer

0 引言

无线激光通信是指以激光束为载体, 在大气或真空中传输数据、视频和音频等信息的通信方式^[1]。激光的直线传输特性要求激光束能够准确地通信终端之间传输, 因此激光束的瞄准、捕获和跟踪技术十分重要, 且是无线激光通信的难点之一^[2-4]。经典比例积分微分(PID)控制技术对于线性非时变的低阶控制系统有着非常强的跟踪和抗干扰能力, 但是当系统的参数是时变的或者系统用于跟踪某个轨迹而非固定点时, 其性能会大大降低^[5]。韩京清教授在 PID 控制技术

的基础上提出了“自抗扰控制技术”, 是一种不依赖于被控对象精确模型的、能够代替 PID 控制技术的新型实用数字控制技术, 其主要思想是把系统自身未建模误差和来自外部的扰动引起的误差都看作系统的总扰动, 使用扩张状态观测器观测系统的状态和综合扰动项得到广义上的误差来进行估计补偿, 但是这种自抗扰技术的难点在于对控制器参数的调试, 有太多的参数需要确定^[6,7]。在此基础上, 高志强教授将自抗扰控制器中的非线性组合改成了比例微分(PD)控制器即线性组合, 保留了自抗扰控制器的核心扩张状态观测器, 降低了非线性自抗扰控制器中的参数调试的难度^[8]。以上 2 种自抗扰技术都是针对广义的控制系统进行设计的, 没有针对无线激光通信系统中的控制技术进行具体设计。本文针对无线激光通信平台的运动特性, 设计了粗跟踪三闭环控制结构, 引入线性自抗扰控制策略, 分析线性自抗扰控制器的性能。

收稿日期: 2019-07-01。

作者简介: 牟冉(1996-), 男, 安徽滁州人, 硕士, 现在武汉大学电子信息学院物理电子学专业专攻激光通信方向, 主要从事无线激光通信方面的工作与研究, 包括光机电一体化通信系统的设计与测试, 以及大气信道中的激光传输特性分析。

* 通信作者: 陈晶(E-mail: whuchj@163.com)。



1 粗跟踪设计

本文采用潜望式转台实现粗跟踪的功能,其主要特点是采用了一组结构相同的轴系作用于水平轴和俯仰轴上,可以实现 2 个维度的圆周扫描,适合大范围的无线激光通信。转台的水平轴和俯仰轴均采用直流力矩电机驱动,分别带有测角编码器实现位置反馈,构成位置和速度双闭环控制系统。俯仰轴驱动反射镜 1 旋转,水平轴电机驱动反射镜 1、反射镜 2 和俯仰轴共同旋转,2 个轴共同作用实现转台的指向与跟踪,转台的结构图如图 1 所示。

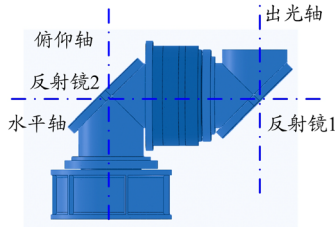


图 1 二维转台结构图

粗跟踪采用三闭环串级控制结构,由电流回路、速率稳定回路和位置跟踪回路组成,其结构如图 2 所示。其中,位置跟踪回路的主要作用是将信标光斑稳定在粗跟踪相机的视场中,位置跟踪回路输出速度矢量作为速率稳定回路的给定量;速率稳定回路主要用于快速响应位置跟踪回路的速度给定量,输出的是电流回路的给定量;电流回路的作用是快速响应速率稳定回路的电流给定指令然后输出电压,经过功率逆变器后控制力矩电机。图 2 等效的动态结构如图 3 所示。 N_r 、 N_r^* 为电机速度实际值与给定值, α 为速度反馈系数, β 为电流反馈系数, K_t 为电磁转矩与电流的比例系数, K_s 为逆变器电压放大倍数, T_s 为电力电子变换器滞后时间常数, T_{oi} 为电流回路低通滤波时间常数,

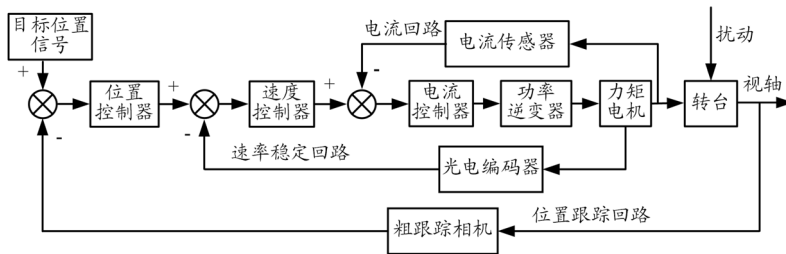


图 2 粗跟踪三闭环控制结构图

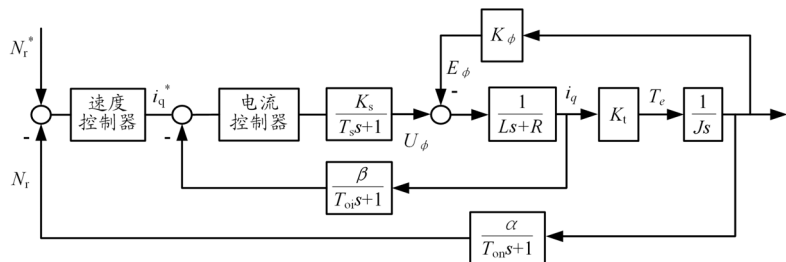


图 3 粗跟踪等效动态结构图

T_{oi} 为速率稳定回路低通滤波时间常数, U_ϕ 为电机端口的输入电压, E_ϕ 为电机的反电动势, i_q 、 i_q^* 为转矩电流的给定值与实际值, T_e 为负载转矩, K_ϕ 为电机反电动势常数, L 为电枢电感, R 为电枢电阻, J 为负载惯量, S 表示一阶惯性。

粗跟踪内环的截止频率远大于外环所期望的截止频率,满足近似条件,可将内环简化为一阶惯性环处理,简化后的粗跟踪控制结构等效图如图 4 所示。

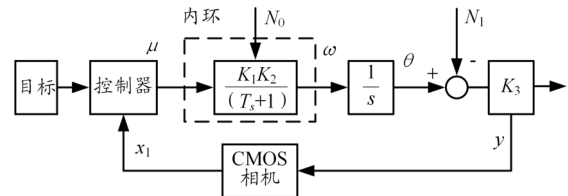


图 4 简化后粗跟踪控制结构等效图

图 4 中, μ 为控制器输出电压, N_0 为内部扰动, N_1 为外部扰动, ω 为转动速度, θ 为转动角度, T 为一阶惯性时间常数,对应的截止频率为 $1/T$ rad/s, $1/s$ 表示积分器, x_1 为相机计算出的误差, y 为系统实际输出, K_1 为内环速度与输入电压之间的比值, K_2 为与电机减速比相关的参数(对于直流电机可以设置为 1), K_3 为单位弧度对应的像元个数。粗跟踪采用的是华睿科技 A5131M 相机,像元大小为 $4.8 \mu\text{m}$,采用 100 mm 焦距镜头,故每个像元对应 $48 \mu\text{rad}$,单位弧度对应 20833 个像元。

2 线性自抗扰控制器设计

经典的 PID 控制技术利用输出量 $y(t)$ 和给定量 $r(t)$ 之间的误差的时间函数 $e(t) = r(t) - y(t)$ 的比例、积分和微分的线性组合构成最终的控制量 $u(t)$ 。PID 控制技术具有很大的适应性和灵活性,但是对信号的处理过于简单,并且没有针对系统中存在的扰动进行处理,对于存在外部扰动的系统来说精度不够,无法充分发挥出其优点。本文设计线性自抗扰控制器,采用线性扩张状态观测器,对系统的总扰动以及系统中未进行建模的误差进行观测,在最终的控制量中给予前馈补偿,相比于 PID 控制技术可以有效提高系统的控制精度;相比于非线性扩张状态观测器,不需要复杂的参数调试。

以典型的二阶系统为例分析线性自抗扰技术,对于更高阶的系统,在一定的条件下也

可以采用二阶系统模型的特性来表示。

线性自抗扰控制器的结构等效图如图 5 所示^[9]。

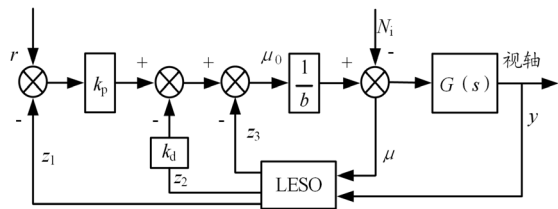


图 5 线性自抗扰控制器结构图

定义 z_1 、 z_2 、 z_3 为线性扩张状态观测器的输出; r 表示给定控制量; N_i 为外部扰动; k_p 、 k_d 为控制器可变参数; μ_0 和 μ 分别为控制电压及其反馈; b 为控制电压的增益; y 为系统实际输出; $G(s)$ 为系统传递函数。

粗跟踪被控对象的状态空间方程为^[10]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2, t) + bu = f_0(x_1, x_2, t) + d(t) + bu \\ y = x_1 \\ f_0(x_1, x_2, t) = -\frac{1}{T} x_2 \\ b = \frac{K_1 K_2 K_3}{T} \end{cases} \quad (1)$$

其中, x_1 为状态量, 表示当前光斑的位置; x_2 表示当前光斑的运动速度; u 表示给定的控制电压值; $f_0(x_1, x_2, t) + bu$ 为对象模型的标称部分, $d(t)$ 为系统的总扰动, T 为电机惯性时间常数。

跟踪微分器用于实现对输入信号的快速、无超调跟踪控制, 本文采用最速跟踪微分器^[11]:

$$\begin{cases} v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2 \\ v_2(k+1) = v_2(k) + h(fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h)) \end{cases} \quad (2)$$

其中, k 表示采用离散形式, v_1 为指令的跟踪值; v_2 为指令微分的跟踪值; $fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h)$ 为系统的最速控制综合函数, r 为速率因子, h 为积分步长。

线性扩张状态观测器(LESO)用于观测系统的各状态变量和总扰动, 对应于二阶系统可以采用以下离散形式^[12]:

$$\begin{cases} e(k) = y(k) - z_1(k-1) \\ de(k) = \frac{(e(k) - e(k-1))}{h} \\ z_1(k) = z_1(k-1) + h(z_2(k-1) + \beta_1 e(k)) \\ z_2(k) = z_2(k-1) + h(z_3(k-1) + \beta_2 e(k) + bu(k-1) + f_0(z_1(k-1), z_2(k-1), (k-1))) \\ z_3(k) = z_3(k-1) + h(PD(e(k), de(k))) \\ PD(e(k), de(k)) = \beta_3(e(k) + \beta_4 de(k)) \end{cases} \quad (3)$$

其中, z_1 是对状态变量 x_1 的估计, z_2 是对状态变量 x_2 的估计, z_3 是对总扰动的估计, β_1 、 β_2 、 β_3 和 β_4 为线性扩张状态观测器的增益参数。 k 表示采用离散形式, $e(k)$ 表示误差。

位置跟踪回路和速率稳定回路都采用比例、微分控制律, 即 PD 控制, 其离散形式为:

$$u_0(k) = k_p(r(k) - z_1(k)) - k_d z_2(k) \quad (4)$$

将 $u_0(k)$ 与总扰动的补偿量相减得到最终速度环的给定电压为:

$$u(k) = u_0(k) - \frac{z_3(k)}{b} \quad (5)$$

3 运动光斑跟踪实验分析

为了验证线性自抗扰控制器在实际应用中的效果, 实验设计二维转台跟踪运动状态下的光斑, 对比 2 种控制策略下的跟踪效果。激光器发出的准直激光由二维振镜反射后照射在光斑运动平面上, 由双通道信号源输出 2 个相同的电信号分别驱动二维振镜的水平轴和俯仰轴, 控制激光光斑在跟踪平面上进行倾斜角为 45° 、最大运动幅值为 5° 的直线运动。跟踪相机安装在二维转台上, 用于检测光斑质心位置, 上位机根据给定的目标坐标和跟踪相机反馈的质心坐标以及观测到的扰动, 控制电机驱动器驱动二维转台将激光光斑控制在目标位置处。实验原理图如图 6 所示, 可以看出二维转台的 2 轴电机需要共同作用才能将激光光斑稳定在跟踪相机视场中。

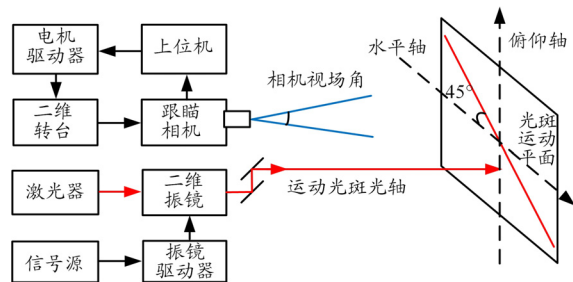


图 6 动态光束跟踪实验原理图

根据实际工程中对粗跟踪控制性能的要求, 模拟运动频率分别选择 0.5 Hz、1 Hz 和 2 Hz。本文分别给出水平轴和俯仰轴的控制误差数据图, 对比分析线性自抗扰控制器和 PID 控制器的控制误差值。实验中采用灰度质心算法求出 A5131M 相机像面上光斑的位置, 影响质心算法的误差主要有像元尺寸、像元读出噪声、暗电流噪声和探测器的灰度均化效应^[13]。研究表明: 当探测器上光斑的束腰 $\omega > 0.5$ 个像元大小时, 像元尺寸对灰度质心算法的影响作用可以忽略, 质心计算

牟冉,张燕革,陈晶,等:无线激光通信线性自抗扰控制研究与实验

误差主要来自于相机的随机噪声误差;同时,在满足束腰 $\omega>0.5$ 个像元大小的要求下,光斑的尺寸越小,最终计算出的质心精度越高。经计算,本系统中光斑大小为 20 个像元,质心坐标计算均方根误差为 0.1 个像元,对应 $4.8\ \mu\text{rad}$ 。实验记录在不同频率扰动下信标光斑的质心坐标,将质心坐标与给定目标值求差作为控制误差,每一组记录 5000 个光斑坐标位置。将控制误差量转换成对应的弧度单位,得到的 LADRC 控制误差曲线如图 7 所示。

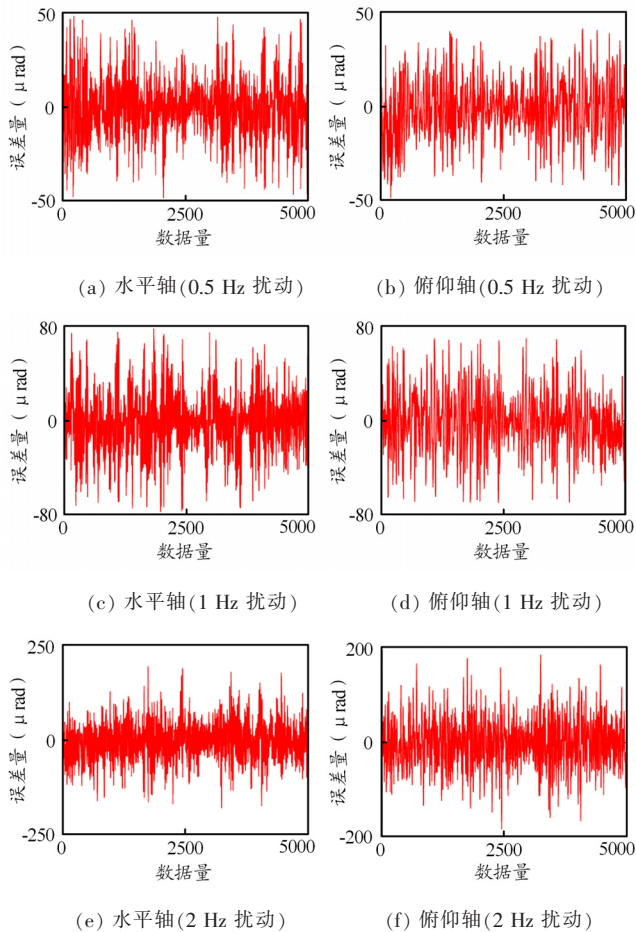


图 7 线性自抗扰控制器控制误差曲线

对比 PID 控制器在 3 组不同频率扰动下的控制误差曲线如图 8 所示。可以看出,在相同扰动下的线性自抗扰控制器两轴控制误差明显小于 PID 控制器的控制误差。在 0.5 Hz 时,线性自抗扰控制器的最大控制误差小于 $50\ \mu\text{rad}$,而 PID 控制器的最大控制误差超过 $150\ \mu\text{rad}$ 。当扰动频率增加到 2 Hz 时,线性自抗扰控制器的控制误差随之增加,但保持在 $250\ \mu\text{rad}$ 以内,而 PID 控制器的控制误差已经接近 $500\ \mu\text{rad}$ 。统计每一组的控制误差量,考虑质心计算的误差,对控制误差进行修正后得出跟踪误差均方根值如表 1

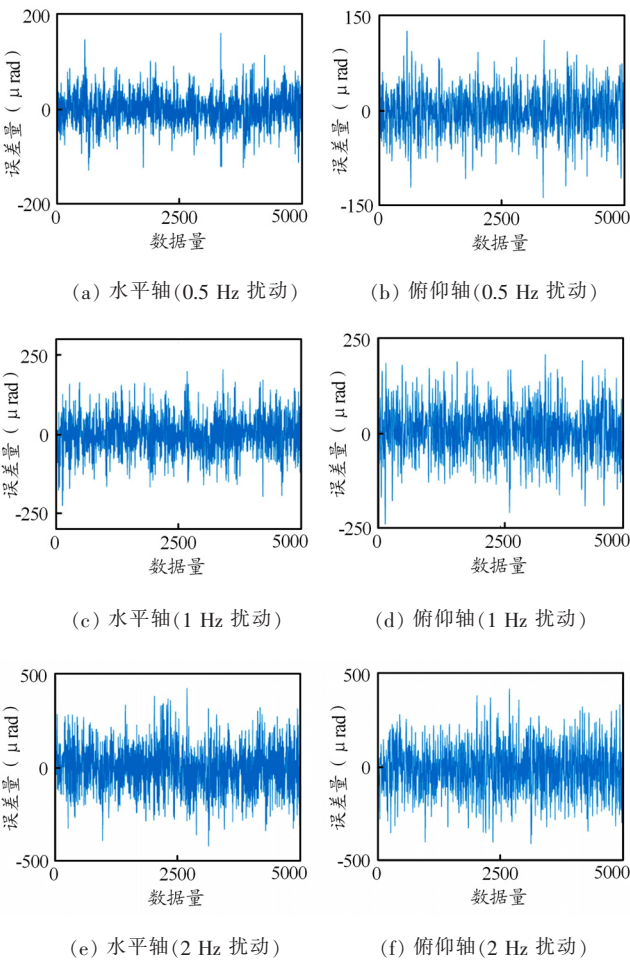


图 8 PID 控制误差曲线

表 1 不同扰动频率下 2 种控制策略的跟踪误差均方根值

扰动频率 (Hz)	线性自抗扰控制器 跟踪误差均方根(μrad)		PID 跟踪误差 均方根(μrad)	
	水平轴	俯仰轴	水平轴	俯仰轴
0.5	15.39±4.8	14.65±4.8	33.27±4.8	31.76±4.8
1	25.26±4.8	24.09±4.8	57.87±4.8	55.11±4.8
2	49.38±4.8	46.91±4.8	116.51±4.8	111.22±4.8

所示。

对比 3 组不同扰动频率下的均方根误差可以看出,随着频率的增加,2 种控制器的控制效果均有一定的下降,但是线性自抗扰控制器的下降幅度更小,结果相对更加稳定,表明在相同的条件下线性自抗扰控制器对扰动具有相对更好的抑制作用。同时对比自抗扰控制器的两轴数据发现,在相同情况下水平轴的跟踪误差均略大于俯仰轴跟踪误差,分析原因是水平轴的负载大于俯仰轴,导致水平轴的控制性能略有降低。

4 结束语

本文针对无线激光通信系统中的粗跟踪结构进行了设计分析,研究了线性自抗扰控制技术,将非线性扩张状态观测器改为线性扩张状态观测器,进行了不同扰动频率下的控制实验对比。对比经典 PID 控制技术可以看出,在低频、小幅度扰动下线性自抗扰控制器具有更高的控制精度和稳定性,能够更好地抑制系统扰动;而对于高频和大幅度的扰动需要进一步验证。实验结果对运动平台无线激光通信系统的研究具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 柯熙政,席晓莉. 无线激光通信概论[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2004.
- [2] BOROSON D M, ROBINSON B S, MURPHY D V, et al. Overview and results of the Lunar Laser Communication Demonstration [C]//Free-Space Laser Communication and Atmospheric Propagation XXVI, March 6, 2014, San Francisco, United States. Washington: SPIE, 2014.
- [3] EDWARDS B L, ISRAEL D, WILSON K, et al. Overview of the Laser Communications Relay Demonstration Project [C]//SpaceOps 2012 Conference, June 11–15, 2012, Stockholm, Sweden. New York: AIAA, 2012: 283–293.
- [4] 于思源. 卫星光通信瞄准捕获跟踪技术[M]. 北京:科学出版社, 2016.
- [5] 张宇河, 金钰. 计算机控制系统 [M]. 北京:北京理工大学出版社, 1996.
- [6] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前言科学, 2007(1): 24–31.
- [7] HAN J. From PID to Active Disturbance Rejection Control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900–906.
- [8] CHEN Z, ZHENG Q, GAO Z. Active Disturbance Rejection Control of Chemical Processes [C]//IEEE International Conference on Control Applications. October 1–3, 2007, Singapore City, Singapore. Piscataway: IEEE, 2007: 862–867.
- [9] 蔡华祥. 望远镜中跟踪架的扰动补偿及精密控制技术研究[D]. 成都:中国科学院研究生院(光电技术研究所), 2016.
- [10] 王整,赵江南,艾勇,等. 自抗扰控制器在空间光通信 PAT 中的应用[J]. 光通信技术, 2017, 41(10): 30–32.
- [11] 朱启轩,张红刚,高军科. 光电稳定平台神经网络自抗扰控制方法[J]. 光电与控制, 2018, 25(3): 10–14.
- [12] 顾健,艾勇,单欣,等. 线性扩张状态观测器的改进及在空间光通信粗跟踪的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(3): 253–260.
- [13] 金占雷. CCD 光斑质心算法的误差分析[J]. 航天返回与遥感, 2011, 32(1): 38–44.

首届《光通信技术》优秀论文评选结果公示公告

为了活跃光通信学术氛围,提高光通信科技水平,提升《光通信技术》杂志所刊登光通信技术文章的科技含量和实用性,《光通信技术》编辑部决定从 2019 年起,每年举办一次年度优秀论文评选活动,评选出本年度 6~10 篇已正式刊登(纸质版)的优秀论文,对获优秀论文奖的第一署名作者颁发荣誉证书和现金奖励(500 元/篇)。经专家评审,共评出 2019 年《光通信技术》优秀论文 10 篇,现予以公布表彰。评选结果如下:

首届《光通信技术》优秀论文名单

序号	第一作者	作者单位	论文题目	发表刊期
1	鲍克勤	上海电力学院	基于 VMD 算法的光栅莫尔条纹去噪方法	2019-1 期
2	付浩	长春理工大学	基于 ARMA-LSTM 的光功率预测方法	2019-1 期
3	夏中金	安徽理工大学	可见光通信 LED 高速驱动电路研究与设计	2019-2 期
4	成湘	西安邮电大学	基于改进粒子群优化算法的可见光室内定位技术	2019-4 期
5	魏昊文	南京邮电大学	高灵敏度布喇格光纤光栅温度传感器	2019-5 期
6	彭怀敏	桂林聚联科技有限公司	基于小波变换的 OTDR 降噪算法研究	2019-7 期
7	徐学武	桂林电子科技大学	一种新型的基片式高灵敏度 FBG 温度传感器	2019-7 期
8	肖磊	上海大学	基于氧化锆陶瓷的光纤 F-P 腔压力传感器研究	2019-8 期
9	赵星	中国信息通信研究院	面向 5G 的 SDOTN 南北向接口标准化进展及趋势分析	2019-9 期
10	蒋雯丽	西安邮电大学	基于贝叶斯网络的 SDON 控制器自学习负载均衡算法	2019-12 期

《光通信技术》编辑部