

引用本文:朱义君,王超,汪涛,等:水下单光子可见光通信技术研究[J].光通信技术,2020,44(6):1-5.

水下单光子可见光通信技术研究

朱义君¹,王超^{1,2*},汪涛¹,任嘉伟¹

(1.信息工程大学,河南省可见光通信重点实验室,郑州 450000;2.电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室,成都 611731)

摘要:针对水下可见光通信(VLC)存在传输距离短的问题,首先分析了水下 VLC 技术的发展现状,然后依据“收发单元阵列化、探测设备光子化、通信节点网络化和业务类型多元化”的基本思路,提出了未来需要进一步突破的理论瓶颈和关键技术。

关键词:水下通信;可见光通信;单光子探测器;水下网络体系架构

中图分类号:TN929.12 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2020)06-0001-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.06.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on underwater single photon visible light communication technology

ZHU Yijun¹, WANG Chao^{1,2*}, WANG Tao¹, REN Jiawei¹

(1. Henan Key Laboratory of VLC, Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China; 2. National Key Laboratory of Communication Anti-interference Technology, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China)

Abstract: In view of the problem of short transmission distance in underwater visible light communication (VLC), this paper firstly analyzes the current situation of the development of VLC technology. According to the research ideas of arrayed design of transceiver, photonic design of detector, network design of communications node and diversification design of business types, the theoretical bottlenecks and key technologies that need to be further broken through in the future are proposed.

Key words: underwater communication; visible light communication; single photon detector; underwater network architecture

0 引言

近年来,人类活动向海洋领域的逐渐深入,水下无线通信的需求不断增长,这一技术对于调查气候变化,研究生物学、地球学,监测海洋环境,了解海洋中的生物进化和生态变化状况,控制和维护海底石油开采设施和无人航行器,实现船舶、传感器和潜水

收稿日期:2020-05-12。

基金项目:国家自然科学基金(61901524,61671477)资助;国家重点研发计划(项目编号:2018YFB1801903)资助;中国博士后科学基金项目(2019M663477)资助。

作者简介:朱义君(1976—),男,信息工程大学教授,博士生导师,长期致力于可见光通信关键技术的研究与应用系统研制。具体负责设计并实现 50 Gb/s 超高速可见光通信系统,研制了全球首款可见光通信专用芯片组,为可见光通信的规模应用奠定了基础;新华社对相关研究成果播发通稿、100 余家国内外媒体广泛报道。申请可见光通信相关国家发明专利 120 余项,发表 SCI 检索论文 40 余篇。



* 通信作者:王超(E-mail: xxgcwangchao@163.com)。

员之间的水下通信具有重要意义^[1-6]。

随着半导体器件技术的不断发展,除了采用激光(LD)光源的水下激光通信方式之外^[7,8],基于发光二极管(LED)光源的可见光通信(VLC)也被认为是实现水下平台中继通信、未来水下综合信息网的优选技术之一^[9-12]。基于传统光电二极管(PD)、雪崩二极管(APD)探测器的水下 VLC 系统传输距离仅在数十米量级,无法满足水下长距离通信需求^[13-15]。因此,从光电检测器件的角度出发,一些学者提出采用高灵敏度光电检测器代替目前的 PD、APD 探测器。目前,基于单光子探测器的水下 VLC 受到了学术界的广泛关注。单光子检测被认为是光电检测的极限,可以探测到光子量级(10^{-19} J)水平的信号,已在卫星成像、量子通信和医用断层扫描等领域广泛应用^[16-23]。单光子探测器包括单光子雪崩二极管(SPAD)、阵列多像素光子计数器(MPPC)和光电倍增管(PMT)等。与传统基于 PD、APD 探测器的高斯(Gaussian)VLC 不同,理论上单光子探

朱义君,王超,汪涛,等:水下单光子可见光通信技术研究

测器的输出信号通常服从泊松(Poisson)模型^[16];而实际上,受输出波形后脉冲、死时间等效应的影响,输出信号特性极其复杂,通过理论分析可将其近似建模为准泊松(quasi-Poisson)分布^[24-26]。现有研究表明,受后脉冲、死时间效应等的影响,单光子探测器的光子脉冲输出波形和基于PD、APD的输出波形有着显著的差异和典型的特点,这些都为单光子探测器的理论研究带来丰富的内涵和机遇^[25]。因此,研究基于单光子探测器的水下长距离VLC传输具有重要的理论价值和现实应用需要。

1 水下VLC研究现状与发展动态分析

1.1 水下VLC系统

国际上,相关科研院所一直在深入开展水下VLC的研究^[9-15]。2005年,美国麻省理工学院开发了水下传感器网络节点,光模块的通信距离达到2~7 m,试验通信速率为56.7 kb/s^[9]。2018年,麻省理工学院林肯实验室将已投入使用的月球激光通信演示系统经过改造后应用于水下研究领域,实现2个潜水器之间高精度的定位、追踪和双向通信。随后美国海军展示了这套系统的潜力,并在水面舰船和水下目标之间展开连接测试,实现了兆比特每秒到千兆比特每秒的传输速率。在国内,中国海洋大学、浙江大学、清华大学、华中科技大学、电子科技大学、长春理工大学和暨南大学等高校也开展了大量的水下VLC研究工作,主要集中在海水光学特性测量、信道模型以及实验室水槽等环境下的通信系统设计^[9-27]。

1.2 长距离水下VLC信道模型

为了扩展通信距离,众多研究机构尝试在水下光通信系统中采用高灵敏度探测器,已有成果表明在水下采用单光子探测器SPAD接收弱光信号是可行的^[9-22]。爱丁堡大学SAFARI M等人教授通过仿真分析表明,采用SPAD作为接收机,灵敏度比PD接收机提升30~45 dB^[16]。信息工程大学团队经过大规模蒙特卡洛数值仿真、收发端光学系统和SPAD接收机设计,验证了在Pure seawater水质下通信距离可达500 m^[17]。上述研究初步表明:水下VLC将受益于单光子检测技术,为有效解决水下VLC长距离通信问题提供了可能。

由于水下信道极其复杂以及技术发展的限制,水下VLC的信道模型往往聚焦于近距离条件,因此,长距离水下VLC的首要难题是缺乏长距离信道模型。事实上,水下VLC信道主要受3个因素的制约:吸收、散

射和湍流因素,分别带来能量损失、符号间干扰和信道衰落效应。目前,大多数的理论和实验注重水下的吸收和散射效应,并通过蒙特卡洛方法对信道进行拟合匹配。例如,典型的比尔定律模型,主要通过实验或者仿真模拟获得信道的脉冲响应曲线,但是对于长距离条件下,比尔定律忽视了光子通过多次散射后再到达接收端的物理特性。为此,清华大学研究团队对Coastal和Harbor 2种水质进行了研究,建立了信道脉冲响应与时间的双Gamma函数关系,但是仿真研究的最长距离仅为40 m^[13]。伊朗Sharif大学团队研究了Pure seawater、Clear ocean和Coastal ocean 3种较优的水质,忽略了信道引起的符号间干扰问题,将信道脉冲响应与距离的函数关系建模为双指数函数模型,但是即使在理想条件和较优水质下,其最大仿真距离仍只有70 m^[15]。目前,由于水下湍流信道十分复杂,不同水质条件下存在很大的差异,大多数的信道模型是拟合特定水域、水质条件的特定模型,没有被广泛接受的湍流模型。于是,一些学者提出将自由光空间中经典信道湍流模型近似并借用建模到水下湍流信道中,包括Gamma-Gamma模型、负指数模型、log-normal模型和Weibull模型等,并且每种湍流模型都对应不同的应用条件^[29,30]。

1.3 水下单光子VLC理论研究

一般将单光子探测器输出特性建模为泊松模型,随着理论和实验研究的不断深入,一些学者提出受死时间、输出脉冲波形约束的准泊松模型^[24-26]。

2017年,清华大学团队采用模拟型SPAD带来的跨导放大和模/数转换引入了高斯热噪声,因此总的噪声包括热噪声、背景噪声和暗计数,其模型转变为泊松和高斯(P+G)混合噪声模型,于是,他们提出了P+G混合噪声模型的2种单符号检测方案^[19]和基于P+G混合噪声模型的多符号联合检测方案^[30]。然而,一些学者指出实际SPAD探测器输出并不是标准的泊松模型,作者通过具体实验证明SPAD输出的光子计数波形并不是理想的脉冲结构,其输出波形在时域上会持续10~30 ns。针对此问题,信息工程大学团队分析了死时间约束的准泊松实际概率分布,提出了死时间约束下的广义联合检测算法优于理想泊松信道模型下的检测方案^[25,26]。同时,在VLC系统中,文献[32]通过Anscombe Root变换将泊松输出模型转到高斯模型进行信号设计,并提出了星座设计的优化方案。

为解决单点SPAD在VLC系统中的探测动态范围、死时间效应及探测效率等约束问题,阵列单光子

探测器的研究逐步引起关注。中科院团队通过实验分析了多像素光子计数器(MPPC)在单光子探测应用中可近似建模为泊松输出分布^[21];随后浙江大学团队在水下 VLC 中提出了 MPPC 通信系统基于泊松模型和单符号检测方案,实现了 46 m、5 Mb/s 的传输能力^[22,23]。目前,阵列结构的 MPPC 开始得到了更多的关注,但是,实验中发现阵列 MPPC 的输出特性也并非理想的泊松模型,如果引入跨导放大器或者加载一个低通滤波器,构成的 P+G 混合噪声将带来新的信号设计和处理难题。此外,从通信信号处理的角度出发,阵列 MPPC 输出波形的后脉冲、串扰等效应可以通过引入预编码等方式处理。

2 水下 VLC 需解决的关键技术

基于上述对水下 VLC 技术研究现状的分析,本文将依据“收发单元阵列化、探测设备光子化、通信节点网络化和业务类型多元化”的基本思路,本着“体系化技术研究、网络化系统设计”的基本原则,提出未来需要重点解决以下多项关键技术。

2.1 水下阵列光通信的信道容量

采用阵列光子通信时,光信号为非负的单极性信号,不像传统无线通信系统的信号同时有正值与负值,且光子计数接收时噪声模型复杂,因此传统射频无线通信中的容量分析方法并不能直接应用,需要对原来的分析方法进行修正或采用新的分析方法,才能给出阵列光子通信系统的信道容量,研究系统的可达速率与极限传输距离。在阵列光通信中,信道容量还与信道的相关性直接相关,而信道的相关性又与收发阵列的结构、尺寸、相对位置和光学系统特性等诸多因素密切相关。

在水下 VLC 系统中,由于光信号为非负的单极性信号,因此传统无线通信中的容量分析方法不能直接应用。未来需要在实际海域测量水下阵列光通信的信道传输特性,系统地研究不同场景下水下阵列 VLC 的容量问题,重点推导信道容量上、下界的理论表达式,分析容量上、下界之间的误差,并通过理论分析和数值计算相结合的方式,全面评价所得理论表达式的准确性。

2.2 大动态低死时间阵列光子收发机设计

现有的单光子探测器 SPAD 虽然可以增加通信距离,但极小的探测面积使得长距离水下光链路对准困难,再加上死时间以及器件暗计数和后脉冲等二次效应的制约,使 SPAD 在实际系统中应用受限。若将多个

SPAD 构建成阵列光子接收机,则可以提升系统的动态范围,降低死时间效应和长距离通信对准难度。因此,未来面向水下 VLC 的新型阵列结构光子收发机需采取以下措施:采用阵列的形式增加接收机的探测面积和接收角度,提升系统的灵敏度和鲁棒性;采用多维门控淬灭技术,降低死时间效应,提升通信速率;通过多个光子探测器的联合接收,增大接收视场角和探测的动态范围。

在水下单光子通信系统中,通常采用脉冲门控驱动 SPAD 探测器。在门控波形设计中,矩形脉冲的边沿高频成分丰富,信号频谱较宽,调制难度远大于正弦波;而正弦门控信号边沿较缓,门宽较长,器件二次效应显著。鉴于矩形脉冲和正弦门控信号存在的不足,采用脉冲成型技术叠加可以生成最优门控信号,该信号既可满足高速门控电路需求,且波形不易畸变,通过阵列叠加符合设计要求。由于针对门控模式的 SPAD 会产生容性噪声淹没雪崩信号,需要分析探测器的波形特性,调制出相位和幅度基本一致的波形。这可以通过功率合成器叠加,实现衰减微分噪声,提取雪崩信号。

2.3 水下单光子 VLC 收发端信号设计

针对水下单光子通信发射通道的非线性、传输信道的随机性,本文从经典奈奎斯特 Nyquist 理论与低元有限幅度数字信号解析出发,研究匹配水下光子通信信道特征的高效通信波形设计;结合水下光子通信系统的特点,充分利用空时协作潜能,探索水下光子通信系统传输的新理论和新方法,设计合理的编码调制优化准则,以带边界约束的参数化表征方式构建优化问题并进行理论求解。

由于阵列单光子检测器件为泊松/准泊松输出特性,虽然通过阵列结构可以减少死时间效应,但是阵列单光子检测器件输出信号为多个 SPAD 输出信号的叠加,输出波形并非理想的脉冲结构或者 PD/APD 探测器输出的连续波形。因此,实际阵列单光子检测器件的信号处理仍是在解决串扰、后脉冲效应和准泊松输出特性等约束下的最大似然联合检测问题。

解决该问题的思路有 2 种:一种是首先在理想泊松域研究处理,然后通过实际阵列单光子检测器件输出信号进行分析,最后从准泊松的分布特性出发,研究其收发端同步、最大似然联合检测和快速检测等方案;另外一种是为了减少云算复杂度,通过 Anscombe root (AR) 变换和广义 AR 变换 (GAT),将信号转到高斯域处理,转换公式如式(1)所示。

$$y=f(z)=\begin{cases} 2\sqrt{z+\frac{3}{8}+\sigma^2}, & z\geq-\frac{3}{8}-\sigma^2 \\ 0, & z<-\frac{3}{8}-\sigma^2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, z 为探测器输出信号; σ^2 为混合的高斯噪声方差, $\sigma=0$ 时,GAT退化为基于标准泊松的AR变换^[19]。最后,从降低泊松、准泊松分布模型到采用AR变换、GAT方式的不同最大似然联合检测方案复杂度入手,基于每种模型的具体判别准则和联合信号的快速检测方案也是拟解决的关键技术问题。

2.4 水下 VLC 网络体系架构

水下 VLC 的节点类型和业务种类越来越多。以水下母艇通信为例,包括母艇与 ROV 小艇间的阵列光子通信、ROV 小艇与 ROV 小艇之间的组网光通信以及 ROV 小艇与海底光缆、卫星或岸上基站之间的信息交互等多种方式,业务类型由传统的低速指令扩展到高速数据、视频、位置感知和导航定位等。

目前水下 VLC 的研究集中在点到点的链路传输,通信距离基本限制在百米范围以内,不能满足远距离、多节点和多业务的应用需求。采用网络化的方式,组网通信和中继传输是扩展通信范围、丰富业务类型的一种有效途径。面向水下光子通信,综合考虑信道特性、业务服务质量和网络公平性约束,研究多业务混合网络信道资源分配问题和切换策略,构建网络体系结构,实现网络吞吐量的最大化,可进一步提升水下网络通信性能,丰富通信业务类型。水下光子信道方向性强、容易受到背景光干扰,且水下光子通信节点分布在水下不同区域,水下光子通信网络的切换判决策略与传统无线接入网有一定的差异性,其异构网络切换指标的转换尺度和切换控制策略需重新设计。

3 结束语

本文分析了水下 VLC 系统的研究现状和发展趋势,总结了未来需要突破的理论瓶颈和关键技术问题。2020 年,国家自然科学基金委信息科学部在重点项目上立项领域设置了“水下无线光传输理论与关键技术”课题,在优先资助领域设置了“水下机器人基础理论与共性关键技术”等涉及水下 VLC 的相关课题,这既表明了当前水下无线通信领域需求的迫切性和挑战性,也为后续水下 VLC 技术发展指明了方向。

参考文献:

[1] 王超. 水下 VLC 单光子检测关键技术研究 [D]. 郑州:战略支援部队

信息工程大学博士论文,2018.

[2] 贾宇. 关于海洋强国战略的思考[J]. 太平洋学报,2018(1):1-8.

[3] 刘笑阳. 中国海洋强国的战略评估与框架设计 [J]. 社会科学,2016(3):19-29.

[4] FASHAM S, DUNN S. Developments in subsea wireless communications [C]// IEEE Underwater Technology (UT), February 23-25, 2015, Chennai, India. New York: IEEE, 2015: 1-5.

[5] ZENG Z Q, FU S, ZHANG H H, et al. A survey of underwater optical wireless communications [J]. IEEE Commun. Surveys Tuts., 2016,19(1): 204-238.

[6] KULHANDJIAN H. Inside out: Underwater communications[J]. Journal Ocean Techno., 2014, 9(2): 104-105.

[7] WU T C, CHI Y C, WANG H Y, et al. Blue laser diode enables underwater communication at 12.4 Gb/s [J]. Sci. Rep. 2017, 7: 40480-1-40480-9.

[8] XU J, LIN A B, SONG Y, et al. Underwater Laser Communication Using an OFDM-modulated 520nm Laser Diode [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(20): 2133-2136.

[9] TIAN P, LIU X, YI S, et al. High-speed underwater optical wireless communication using a blue GaN-based micro-LED [J]. Opt. Express, 2017, 25(2):1193-1201.

[10] DINH D V, QUAN Z, ROYCROFT B, et al. GHz bandwidth semipolar (11-22)InGaN/GaN light-emitting diodes [J]. Opt. Lett., 2016, 41(24): 5752-5755.

[11] XU J, KONG M, LIN A, et al. OFDM-based broadband underwater wireless optical communication system using a compact blue LED [J]. Opt. Commun., 2016, 369: 100-105.

[12] LEE C, ZHANG C, CANTORE M, et al. 4 Gb/s direct modulation of 450 nm GaN laser for high-speed visible light communication [J]. Opt. Express, 2015, 23(12): 16232-16237.

[13] TANG S J, DONG Y H, ZHANG X D. Impulse response modeling for underwater wireless optical communication links [J]. IEEE Trans. Commun., 2014, 62(1): 882-891.

[14] YI X, LI Z, LIU Z. Underwater optical communication performance for laser beam propagation through weak oceanic turbulence [J]. Applied Optics, 2015, 54(6): 1273-1278.

[15] JAMALI M V, AKHOUNDI F, SALEHI J A. Performance Characterization of Relay-Assisted Wireless Optical CDMA Networks in Turbulent Underwater Channel [J]. IEEE Trans. Wireless Commun., 2016, 15(6): 4104-4116.

[16] LI Y C, SAFARI M, HENDERSON R, et al. Optical OFDM with single-photon avalanche diode [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2015, 27(9): 943-946.

[17] WANG C, YU H Y, ZHU Y J. A long distance underwater visible light communication system with single photon avalanche diode [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(5): 7906311-1-7906311-11.

[18] BWEUBE B L, RHEAUME V P, THERRIEN A C, et al. Development of a Single Photon Avalanche Diode (SPAD) Array in High Voltage CMOS 0.8 μm dedicated to a 3D Integrated Circuit (3DIC)[C]// IEEE NSS-MIC Conference Records, October 27-November 3, 2012, Anaheim, USA, New York: IEEE, 2012: 1835-1839.

[19] MAO T Q, WANG Z C, WANG Q. Receiver design for SPAD-based

VLC systems under Poisson-Gaussian mixed noise model [J]. Opt. Express, 2017, 25(2): 799–809.

[20] SHAFIQUE T, AMIN O, ABDALLAH M, et al. Performance Analysis of Single-Photon Avalanche Diode underwater VLC System Using ARQ [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9: 2743007-1–2743007-11.

[21] 赵帅,郭劲,刘洪波,等.多像素光子计数器在单光子探测中的应用[J].光学精密工程,2011,19(5):972–976.

[22] SHEN J, WANG J, CHEN X, et al. Towards power-efficient long-reach underwater wireless optical communication using a multi-pixel photon counter [J]. Opt. Express, 2018, 26(18): 23565–23571.

[23] SHEN J, WANG J L, YU C Y, et al. Single LED-based 46-m Underwater Wireless Optical Communication Enabled by a Multi-Pixel Photon Counter with Digital Output [J]. Opt. Commun., 2019, 438: 78–82.

[24] SARBAZI E, SAFARI A, HAAS H. On the Information Transfer Rate of SPAD Receivers for Optical Wireless Communications[C]// IEEE Global Communications Conference, December 4–8, 2016, Washington, USA. New York: IEEE, 2016: 16654904-1–16654904-6.

[25] WANG C, YU H Y, ZHU Y J, et al. Experimental study on SPAD-based VLC systems with an LED status indicator [J]. Opt. Express, 2017, 25(23): 28783–28793.

[26] WANG C, YU H Y, ZHU Y J, et al. Multiple-Symbol Detection for Practical SPAD-based VLC System with Experimental Proof [C]// IEEE

Global Communications Conference Workshops, December 4–8, 2017, Singapore, New York: IEEE, 2017: 17491531-1–17491531-6.

[27] KHALIGHI M A, GABRIEL C, HAMZA T, et al. Underwater wireless optical communication; recent advances and remaining challenges [C]//Transparent Optical Networks (ICTON), July 6–10, 2014, Graz, Austria. New York: IEEE, 2014: 1–4.

[28] polyhedronx. 水下无线光通信综述[Z/OL]. (2018-09-17)[2020-05-12]. <https://blog.csdn.net/polyhedronx/article/details/82729766>.

[29] JAMALI V, NABAVI P, SALEHI J A. MIMO underwater visible light communications: Comprehensive channel study, performance analysis, and multiple-symbol detection [J]. IEEE Trans. Veh. Technol., 2018, 67(9): 8223–8237.

[30] GERC H, EKICIO G. Bit error rate of focused Gaussian beams in weak oceanic turbulence [J]. Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision, 2014, 31(9): 1963–1968.

[31] WANG C, YU H Y, ZHU Y J, et al. Blind Detection for SPAD-based Underwater VLC System under Poisson-Gaussian Mixed Noise Model [J]. IEEE Commun. Lett., 2017, 21(12): 2602–2605.

[32] ZHANG J, SI-MA L H, WANGB Q, et al. Low-complexity receivers and energy-efficient constellations for SPAD VLC systems [J]. IEEE Photon. Technol. Lett., 2016, 28(17): 1799–1802.

2020 年第 20 届 IEEE 通信技术国际会议 (ICCT 2020)

2020 年 10 月 28~31 日 中国·南宁

本次会议由 IEEE, 广西大学, 北京邮电大学联合主办, 广西大学计算机与电子信息学院承办。

通信技术国际会议由中国通信学会与中国电子学会于 1986 年联合发起, 已经成功召开了 19 届, 会议关注通信技术的新技术及其应用, 为通信技术及相关研究领域的专家、学者交流最新研究成果、探讨学术发展方向提供一个广泛的交流平台。欢迎广大从事通信技术的新技术及其应用教学、科研人员和学生踊跃参加。大会网站: www.ieee-icct.org

征稿主题

★网络与无线通信★光通信★超大规模集成电路和系统设计★多媒体★网络信息安全★射频前端电路及系统★智能移动设备设计★微波/毫米波/太赫兹电路与系统★物联网和大数据★5G 通信与网络★绿色通信系统★电磁兼容天线设计★其他通讯相关课题。更多主题, 请访问: <http://www.ieee-icct.org/cfp.html>

投稿截止时间

2020 年 8 月 20 日

投稿方式

全文投稿(Easy Chair 投稿系统 – PDF 格式)

<https://easychair.org/conferences/?conf=icct2020>

摘要投稿: submission@ieee-icct.org

投稿说明

1. 投稿论文需满足会议格式要求, 格式请参照论文格式模板。
2. 投稿论文需为原创高水平学术论文, 并且无任何出版记录。
3. 英语为大会唯一官方语言, 大会仅接受英文投稿, 会议现场报告也需为英文。
4. 若文章有出版需求, 大会仅接受全文投稿。如果无需出版, 仅参会做报告, 可接受摘要投稿。

欢迎筹建 Special Sessions

Special session 提案提交: 2020 年 7 月 1 日

Special Session 投稿提交: 2020 年 8 月 20 日

详细信息请见: <http://www.ieee-icct.org/cfp-special.html>

联系方式

投稿

肖老师, 邮箱地址: submission@ieee-icct.org

注册、邀请信、问题以及建议

李老师, 邮箱地址: registration@ieee-icct.org

申请加入组委会

罗老师, 邮箱地址: committee@ieee-icct.org

查询文章录用状态请联系此邮箱

王老师, 邮箱地址: review@ieee-icct.org