

# 基于荧光天线的无线光通信研究进展

余星辰<sup>1</sup>, 夏聖喆<sup>2</sup>, 陈 谋<sup>3</sup>, 曾志宏<sup>1</sup>, 王登科<sup>1</sup>, 陈 晨<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 微电子与通信工程学院, 重庆 400030; 2. 西南民族大学 电子信息学院, 成都 610225;  
3. 中国人民解放军信息支援部队工程大学 军士学院, 重庆 400035)

**摘要:** 文章系统综述了基于荧光天线的无线光通信 (OWC) 技术的最新研究进展, 重点聚焦于荧光天线结构设计及其在典型场景中的应用。文章深入阐述了平板型、毛细管型和塑料型 3 类荧光天线的设计与优化, 分析了其通信带宽、耦合效率、视场角及光学增益等关键性能。进一步探讨了该技术在室内、室外、水下、车联网及星间等 OWC 场景中的具体应用与性能表现, 阐明了荧光天线在解决接收视场受限和对准要求苛刻等问题中的技术优势。最后, 展望了基于荧光天线的 OWC 技术在未来发展中面临的挑战与潜在研究方向, 旨在为推动高可靠、宽视场和低成本的 OWC 系统发展提供理论依据与技术参考。

**关键词:** 无线光通信; 荧光天线; 天线结构

**中图分类号:** TN929 **文献标志码:** A

## Research Progress on Optical Wireless Communication based on Fluorescent Optical Antennas

YU Xingchen<sup>1</sup>, XIA Shengzhe<sup>2</sup>, CHEN Mou<sup>3</sup>, ZENG Zhihong<sup>1</sup>, WANG Dengke<sup>1</sup>, CHEN Chen<sup>1</sup>

(1. School of Microelectronics and Communication Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. College of Electronics and Information, Southwest Minzu University, Chengdu 610225, China; 3. Sergeant College, Information Support Force Engineering University, Chongqing 400035, China)

**Abstract:** Based on the latest research progress of Optical Wireless Communication (OWC) technology utilizing fluorescent optical antennas, this paper systematically reviews the structural design of fluorescent optical antennas and their applications in typical scenarios. The design and optimization of three types of fluorescent optical antennas, namely planar, capillary, and plastic types, are elaborated in depth, and their key performances such as bandwidth, coupling efficiency, field of view, and optical gain are analyzed. Furthermore, the specific applications and performance of this technology in OWC scenarios such as indoor, outdoor, underwater, vehicular and inter-satellite environments are discussed, and the technical advantages of fluorescent optical antennas in solving problems such as limited receiving field of view and stringent alignment requirements are clarified. Finally, the challenges and potential research directions faced by the OWC technology based on fluorescent optical antennas in future development are prospected, aiming to provide theoretical basis and technical reference for promoting the development of high-reliability, wide-field-of-view, and low-cost OWC systems.

**Key words:** VLC; fluorescent optical antenna; antenna structure

收稿日期: 2026-02-04; 修回日期: 2026-03-05; 纸质出版日期: 2026-04-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62271091, 62501088); 重庆市自然科学基金资助项目 (cstc2021jcyj-msxmX0480); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2024CDJXY020)

作者简介: 余星辰 (2000-), 女, 重庆铜梁人。硕士, 主要研究方向为无线光通信。

通信作者: 陈谋, 讲师。E-mail: 651006434@qq.com

陈晨, 教授。E-mail: c.chen@cqu.edu.cn

©Editorial Office of *Study on Optical Communications*. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

## 0 引言

无线光通信 (Optical Wireless Communication, OWC) 具有信息容量大、传输速率高、无需频谱执照、抗电磁干扰能力强及安全性高等突出优势,是应对射频通信频谱瓶颈的关键方案,被视为对传统射频通信体系的重要补充与增强,也是构建未来空天地一体化信息网络的关键技术支柱之一<sup>[1-4]</sup>。除了高速通信以外,OWC 还可以为未来/第 6 代移动通信技术 (6th Generation Mobile Communication Technology, 6G) 网络提供高精度感知和高功率能量传输能力<sup>[5-9]</sup>。

OWC 以光波为载波,涵盖可见光、红外与紫外等波段,其系统信道容量主要取决于信道带宽与接收信噪比 (Signal-to-Noise Ratio, SNR)。目前,OWC 系统多采用照明发光二极管 (Light Emitting Diode, LED) 或激光二极管 (Laser Diode, LD) 作为发射光源。在采用 LED 的 OWC 系统中,由于 LED 光源发散角通常较大,在接收端能够获得的 SNR 较为有限;而在使用 LD 作为发射源的 OWC 系统中,虽然光束方向性好,但对链路的对准稳定性提出了极为苛刻的要求。为提高接收 SNR,传统方法往往在接收端采用大尺寸光电探测器,以增强信号接收能力,然而这类设计体积较大、成本较高,不利于集成到便携设备中,限制了实际部署的灵活性<sup>[10]</sup>。另一常见方案是使用透镜或复合抛物面聚光器来收集大面积的光并将其集中到接收器上,以提高接收增益,但这对收发设备的对准精度提出了苛刻要求,难以适应移动场景下的稳定通信需求<sup>[11]</sup>。除此之外,由于光学中的一个基本原理,即光学扩展量守恒,对于任何基于折射和反射的光学系统,光学增益和系统视场之间将存在一个折衷<sup>[12]</sup>,这意味着一个光学系统所能提供的增益越大,其视场就越有限。因此,虽然基于光学元件的 OWC 系统由于高光学增益可以实现高 SNR,但他们通常具有非常有限的视场。因此,开发兼具大探测面积、高带宽和紧凑结构的光接收机,对提升 OWC 的实用性具有重要意义。

为应对上述挑战,近年来基于荧光材料的光学天线技术逐渐受到关注。荧光天线在光子捕获与传导机制上与发光太阳能聚光器类似,但其工作模式更具针对性。传统发光聚光器需要吸收宽波长范围的光以实现能量收集,而长波长光子在发射过程会降低整体效率<sup>[13]</sup>。相比之下,荧光天线通过选择性吸收特定波长的发射光,并通过荧光转换实现光信号导引,从而显著减少光再吸收损失,提升天线效率。天线利用荧光团对目标波长光信号的吸收与再发射特性,无需依赖复杂的光学聚焦结构即可实现光的有效收集与引导。由于荧光转换过程不受传统光学扩展量守恒限制,这类天线能够在实现高光学增益的同时保持宽视场角,有效突破了传统接收方案在增益与视场之间的固有权衡<sup>[14]</sup>。此外,荧光材料本身具备光谱滤波功能,

可在接收过程中抑制环境光干扰，进一步提升系统 SNR，为构建紧凑、高效和适应性强的 OWC 接收机提供了新的技术方向<sup>[15]</sup>。

目前，荧光天线在 OWC 中的应用研究虽已取得进展，相关成果分散于材料、光电子及通信等领域<sup>[16]</sup>，但系统性地从材料体系、结构设计到系统性能层面进行梳理的综述仍较为鲜见。与既有研究相比，本文的创新之处在于：从材料层面对比了高性能有机荧光材料与商用荧光光纤的性能特点与适用场景；从系统层面建立了光学参数与通信指标的关联，阐明了荧光转换突破光学扩展量限制的物理机理；从结构层面总结了平板型、毛细管型和塑料型 3 类天线的特征与性能权衡。这一整合性视角有助于推动荧光天线技术走向实际应用。基于此，本文将从工作原理、结构设计及典型应用场景等方面阐述荧光天线 OWC 技术的最新研究进展，并展望其未来发展趋势。

## 1 荧光天线工作原理

荧光天线的工作原理源于其内部荧光材料对光信号独特的“选择性吸收-波长转换-波导传输”物理过程。初始阶段，部分入射光子会在天线端面或侧壁发生反射或直接透射逸出系统，这部分能量往往无法被有效利用。当特定波长的通信光进入天线时，天线内芯掺杂的荧光团会优先吸收这些光子，并在经历 ns 级的短暂激发态后，以更长波长向各个方向重新发射荧光。重新发射的光子中，由于天线内芯结构的折射率和天线包层材料的折射率不同，更长波长的光将沿着内芯传播到天线两端，波导至光电二极管（Photodiode, PD）边缘，完成光信号到电信号的转换。这一过程不仅实现了对信号光的有效收集与汇聚，还因荧光材料的光谱选择性而具备内在的环境光抑制能力，从而实现获得高光学增益与宽视场角。

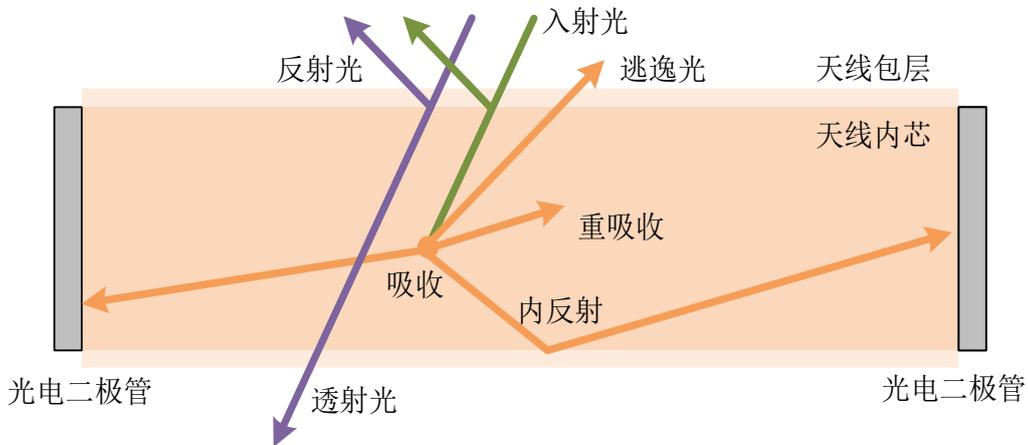


图 1 荧光天线内部发生的物理过程

Figure 1 The physical processes that occur within a fluorescent optical antenna

荧光天线的性能表现本质上由其材料的光学特性与结构设计共同决定,其中几个关键参数起着至关重要的作用。荧光团的吸收光谱直接决定了天线对发射端工作波长的匹配精度与选择能力,而其发射光谱则需要与接收端光电探测器的光谱响应范围形成高效耦合,这种光谱的对应关系不仅影响信号的传输效率,更使得不同荧光材料呈现独特的颜色特征,为波分复用(Wavelength-Division Multiplexing, WDM)系统中多波长信道的空间分离与解复用提供了天然的物理基础。荧光量子产率作为衡量被吸收光子转化为重新发射光子效率的核心指标,直接关系到天线的光收集能力和系统 SNR 水平,高量子产率材料能够显著提升能量转换效率,为高性能通信链路奠定了物质基础。需要指出的是,量子产率并非材料的固定属性,其数值高度依赖于材料所处的化学环境与物理状态,因此在材料对比中需结合具体应用条件综合考量。在动态响应特性方面,荧光寿命参数直接决定了天线本身的频率响应带宽。根据物理模型分析,荧光天线的-3 dB 光学带宽与荧光寿命之间存在反比关系,即荧光寿命越短,荧光天线带宽越大,这一特性使 ns 级荧光材料成为实现高速传输的关键<sup>[17]</sup>。

表 1 不同荧光天线材料参数对比

Table 1 Comparison of material parameters for different fluorescent optical antennas

类型		吸收波长峰值/nm	发射波长峰值/nm	荧光寿命/ns	参考文献
有机荧光材料	Cm504	440	500	3.8	[18]
	Cm6	460	560	3.2	[18]
	DCM	470	610	2.4	[18]
商用荧光光纤	YS-2	422	474	3.2	[19]
	BCF-10	377	430	1.74	[28]
	BCF-92	405	488	1.80	[28]
	R-3	577	610	6.53	[22]
	YS-4	420	470	1.39	[22]
	B-3	350	450	2.65	[39]
	O-2	535	550	1.59	[39]

高性能有机荧光材料与商用荧光天线是当前荧光天线研究中的两类核心材料体系。高性能有机荧光材料通常指通过分子工程设计的有机小分子、共轭聚合物或金属配合物等,其分子结构可精确调控,具有量子产率高、光谱可调性强和荧光寿命可设计等特点。然而,高性能有机荧光材料的量子产率对环境条件高度敏感<sup>[18]</sup>。相比之下,商用荧光天线主要指已标准化生产的荧光光纤产品。这类材料基于有机闪烁体原理,通常由基底材料掺杂特定荧光染料制成,具有工艺成熟、性能稳定和易于获取的特点。商用荧光光纤的荧光寿命通常更短,这使其在高速通信应用中具有带宽优势。然而,商用荧光光纤的光谱选择性相对固定,发射波长范围较窄,难以灵活匹配不同光源的光谱分布。当前研究中所采用的高性能有机荧光材料

及商用荧光天线的相关参数如表 1 所示。值得注意的是,在实际系统应用中,当采用传统白光 LED 作为发射光源时,由于 LED 自身调制带宽的限制,整个 OWC 系统的传输能力往往受限于光源而非天线;而当发射端为 LD 或微型 LED 时,荧光天线自身的带宽特性将成为决定系统整体传输能力的关键因素<sup>[19,20]</sup>。

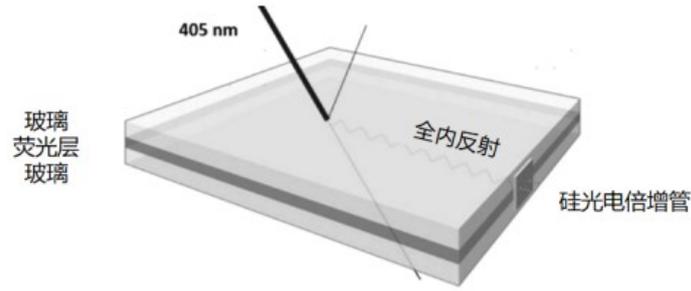
通过对这些关键参数的深入分析和优化调控,荧光天线成功地将传统接收机中分离实现的波导传输、信号汇聚和光学滤波 3 大功能,集成于单一紧凑器件结构中。这种集成化设计不仅突破了传统光学系统在增益与视场之间的固有矛盾,更为实现高速率、高可靠性和宽视角的 OWC 系统提供了创新的器件解决方案,展现了在下一代无线通信技术中的巨大应用潜力。

## 2 荧光天线结构设计

荧光天线作为 OWC 接收器的重要组成部分,其结构设计直接影响光收集效率、耦合特性、系统带宽及实际应用灵活性。根据材料与构型特点,现有荧光天线主要可分为平板型、毛细管型与塑料型 3 类。

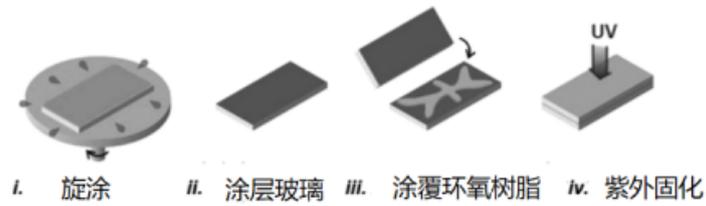
### 2.1 平板型(载玻片结构)

平板型天线通常以载玻片为基底,采用“三明治”结构将荧光材料封装其中,具有制备简便和结构稳定等特点。Collins 等人采用香豆素染料与光致聚合物一起溶于环氧树脂,涂覆于载玻片后覆盖另一载玻片进行紫外固化,形成可吸收蓝光并由边缘发射绿光的平板天线<sup>[21]</sup>; Manousiadis 等人将两种荧光染料分散于透明环氧树脂基质中,形成荧光层并夹于两片显微镜载玻片之间,通过堆叠多个单元实现了 WDM 天线结构<sup>[22]</sup>; Ali 等人提出了以掺杂有机溶液经旋涂工艺在载玻片上制备矩形荧光天线的方案,其-3 dB 带宽达到了 245 MHz,与此前商用荧光团掺杂光纤相比,带宽提升了 2.7 倍<sup>[15]</sup>,其示意图和制造过程如图 2 所示。然而,此类结构通常依赖边缘耦合机制,光电探测器仅能覆盖荧光逃逸边缘的局部区域,导致信号衰减显著,且天线与探测器之间的耦合效率较低,制约了其光功率利用效率。



(a) 示意图

(a) Schematic diagram



(b) 制造过程

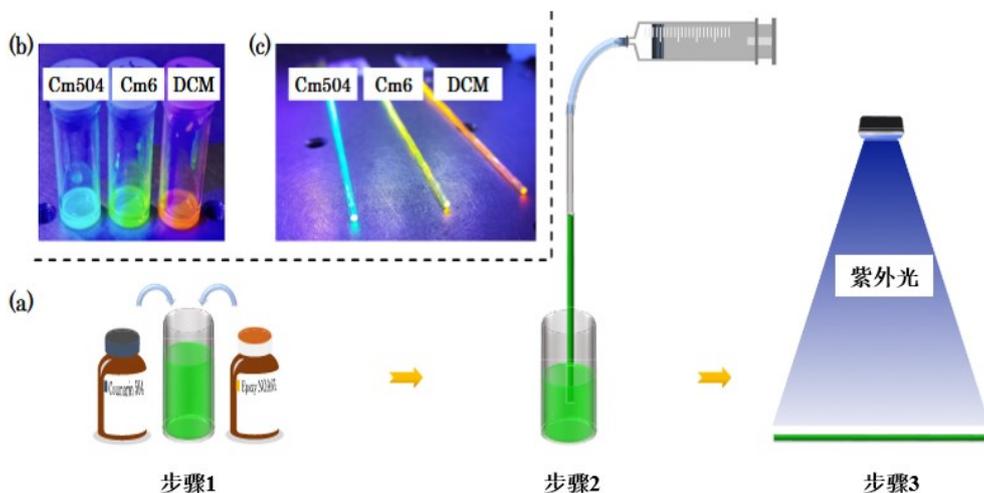
(b) Fabrication process

图 2 平板型荧光天线<sup>[15]</sup>

Figure 2 Planar fluorescent optical antenna

## 2.2 毛细管型

为改善平板型天线中边缘耦合引起的光功率损失，Cho 等人通过在结构中引入反射器，增强边缘及后向反射，从而提升了耦合效率<sup>[23]</sup>；从天线结构上，He 等人进一步提出将荧光团与环氧树脂混合后填充至玻璃毛细管中，构成圆柱形荧光天线，如图 3 所示，相较于平板结构，该设计更易与常见 PD 直接耦合，有效降低了荧光光子从边缘逃逸的比例。圆柱形几何结构有利于光电探测器的端面匹配，使得荧光辐射更集中于探测器接收区域，从而提升了末端光子通量，改善了系统接收灵敏度<sup>[24]</sup>。



注：（a）为制备关键步骤；（b）为紫外固化前样品在 400 nm 蓝光下的照片；（c）为紫外固化后 3 根毛细管天线在 400 nm 蓝光下的照片。

图 3 毛细管型荧光天线<sup>[24]</sup>

Figure 3 Capillary fluorescent optical antenna

### 2.3 塑料型

塑料型荧光天线采用柔性塑料光纤作为载体，具备可弯曲、可裁剪和成本低等优点，极大地增强了接收机设计的自由度与应用范围。Farenc 等人提出了一种基于荧光塑料光纤的低成本光电传感方案，配合简易放大器即可构建可靠检测系统，为荧光材料在光信号感知领域的应用提供了可行路径<sup>[25]</sup>；Peyronel 等人采用商用荧光光纤束构建平面阵列天线，如图 4 所示，在获得 12.3 倍光增益与 91 MHz 带宽的同时，实现了 2.36 Gbit/s 的数据传输。该研究还展示了全向接收天线的概念，能够在任意入射角度下有效捕获信号，为解决 OWC 在移动场景中因指向性要求带来的应用限制提供了新思路<sup>[26]</sup>；Dong 等人通过在柔性塑料基底上构造纳米图案化衍射光栅，并设计抛物面形荧光天线，实现了光传播方向的有效调控，将天线光学增益从 2.2 提高至 3.2<sup>[27]</sup>；Riaz 等人则利用塑料荧光天线作为光集中器，实现了 240°超宽视场角下的高速通信，传输速率达 1.1 Gbit/s<sup>[28]</sup>；Sait 等人研制了一种用于水-空光通信中继的荧光天线收发器，其球形透明外壳内环布两种闪烁光纤，构成大探测面积接收器，光纤两端直接耦合至光电探测器<sup>[29]</sup>；此外，He 等人设计了两级荧光天线阵列：第 1 级采用大面积荧光光纤阵列，显著扩大有效接收面积；第 2 级通过单根荧光光纤收集并转换阵列中的荧光，将其引导至光电探测器，实现了大接收面与高集中度的结合<sup>[30]</sup>。

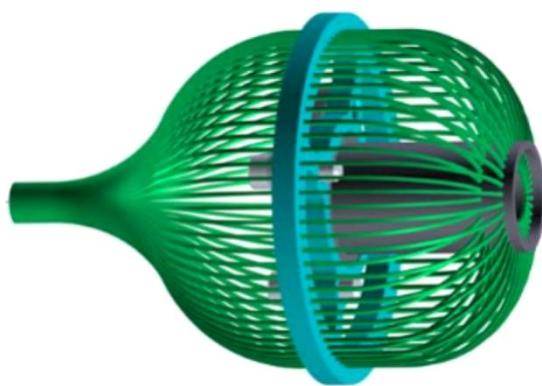


图 4 由多根弯曲塑料光纤构成的全向荧光天线<sup>[26]</sup>

Figure 4 An omnidirectional fluorescent optical antenna composed of bent plastic optical fibers<sup>[26]</sup>

平板型、毛细管型和塑料型 3 类荧光天线的主要优缺点如表 2 所示。平板型结构简单，适合基础研究；毛细管型耦合效率高，适用于高灵敏度系统；塑料型柔性好、成本低，便于

实现宽视场和大规模应用。实际设计中需根据具体场景在性能、灵活性与成本之间进行的权衡。

表 2 不同荧光天线结构的优缺点对比

Table 2 Comparison of the advantages and disadvantages of different fluorescent optical fiber structures

天线结构	优点	缺点	参考文献
平板型	①结构简单稳定，制备工艺简便； ②适合作为研究新荧光材料的基础平台。	①耦合效率低，通常为边缘耦合，光电探测器仅能覆盖局部，导致信号衰减显著； ②光功率利用效率低，制约实际系统性能。	[15][20][22]
毛细管型	①耦合效率显著改善，圆柱几何更易与 PD 直接端面耦合； ②光子逃逸减少，荧光辐射更集中于探测器接收区域，提升末端光子通量和接收灵敏度。	①结构刚性较强，灵活性不如塑料型； ②制备涉及填充与封装，工艺较平板型复杂。	[24]
塑料型	①柔性好，可弯曲裁剪，极大增强接收机设计自由度与应用范围； ②成本低，适合大规模应用； ③易于实现大面积、宽视场角和全向接收。	①材料光学性能（如衰减和耐候性等）可能不及玻璃基底； ②复杂结构（如阵列）的集成与对准需要精细设计。	[25]-[30]

### 3 荧光天线典型应用场景

#### 3.1 室内场景

室内 OWC 通常需要兼顾高速率、广覆盖与设备易集成性。由于室内环境存在多径反射、用户移动和设备布局多样等特点，接收机需在宽视场角、高光学增益与较低系统复杂度之间取得平衡<sup>[31]</sup>。传统光学方案往往难以同时满足这些需求，而荧光天线凭借其特有的光谱选择性、宽角度接收与紧凑结构，成为解决上述矛盾的潜在技术路径。

WDM 是实现高数据速率与大容量室内 OWC 的关键途径之一。传统方法多在单个光电探测器前使用吸收式或反射式滤光片进行分波，此类结构虽能保持光路共线性、设计紧凑，但通常仅支持有限视场角的点对点应用。荧光光学天线因其可选择性地吸收并转换特定波段的光信号，天然适用于 WDM，能够在实现波分的同时兼顾增益与视场角性能。

Manousiadis 等人提出了一种新型荧光接收器，通过堆叠两个针对不同波段的荧光光学天线，在实现 WDM 数据传输的同时，兼顾了宽视场与高增益，其综合性能突破了传统光学扩展量的限制。实验证明该接收器可有效解复用蓝光与绿光通道，具备结构紧凑、成本低廉的特点，易于集成于手机和平板电脑等便携设备<sup>[22]</sup>；He 等人在基于白光的可见光通信系统中，利用市售 LED 验证了荧光光纤天线用于 WDM 的可行性，针对荧光天线吸收谱重叠引起的信道串扰，研究提出了一种频域信道估计方法，并引入成对编码技术以平衡多路信号性能<sup>[32]</sup>。

在多输入多输出（Multiple-Input Multiple-Output, MIMO）系统中，接收机设计需在视场角、光学增益与系统复杂度之间取得平衡。非成像 MIMO 接收机虽可具备较宽视场角，但其输入孔径通常较小，光学增益有限。成像 MIMO 接收机借助透镜可提高光学增益，却以牺牲视场角为代价<sup>[33]</sup>。虽然可通过光电探测器阵列扩大视场，但此举会显著增加系统复杂性与成本。图 6 所示为基于平板型荧光天线的 MIMO 系统实验装置图<sup>[34]</sup>，该系统通过平板型荧光天线与成像透镜的协同设计，在保持 $\pm 22.5^\circ$ 宽视场的同时获得了较高的光学增益，从而以较为简洁的接收机结构实现了有效的空间复用。实验表明，该系统在双通道配置下可支持 32 Mbit/s 的数据传输速率。Tang 等人提出了一种正交偏振复用大视场荧光天线。该设计通过将荧光天线与偏振器相结合，在保持宽接收角度的同时，利用偏振复用实现了无串扰的 MIMO 传输，有效提升了系统性能与频谱效率。研究结果表明，在  $40^\circ \sim 80^\circ$  视角范围内，正交偏振复用大视场荧光天线相比传统无荧光天线结构，平均 SNR 提升了 191%，整体通信速率因偏振复用提升了 80%<sup>[35]</sup>。

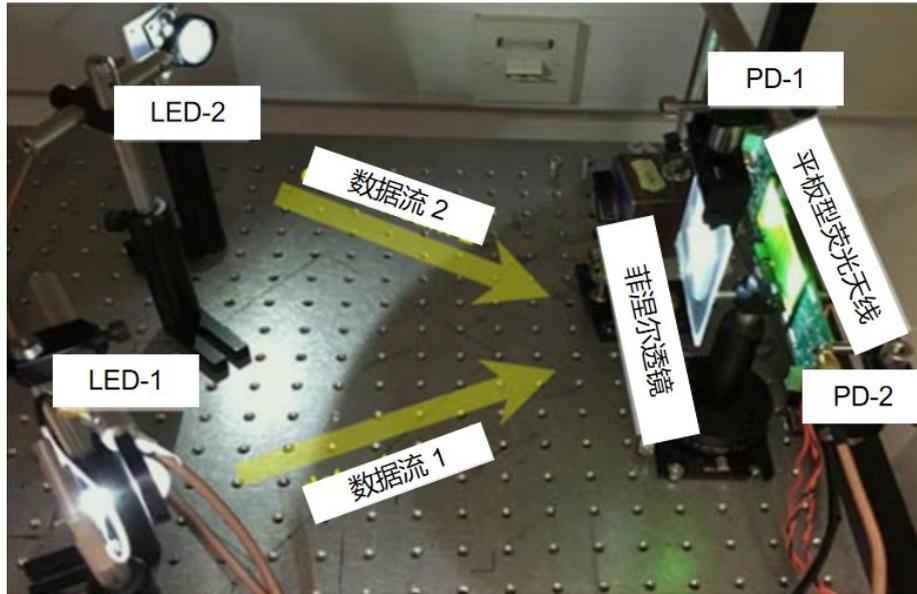


图 6 基于平板型荧光天线的 MIMO 系统实验装置图<sup>[34]</sup>

Figure 6 Experimental setup of MIMO system based on planar fluorescent optical antenna<sup>[34]</sup>

### 3.2 室外场景

室外长距离 OWC 常面临太阳光干扰、大气湍流及收发端对准保持等挑战。传统成像光学接收方案在扩展量守恒限制下，难以兼顾高增益与宽视场，且易受环境光影响。

Umair 等人提出了基于大面积 CuInS<sub>2</sub>量子点荧光天线的长距离 OWC 系统，系统发射和接收模块如图 7 所示。该研究采用光稳定性优异的量子点材料制备了面积为 38.4 cm × 6.8 cm 的大面积的荧光天线，其-3 dB 带宽超过 250 kHz，对准直光源的视场角宽于 80°。实验表明，在强烈太阳辐照下，系统以 1 Mbit/s 速率实现了 60 m 无误码传输，并在 100 m 链路上仍保持有效通信<sup>[36]</sup>。该研究首次在强日光条件下验证了大面积荧光天线用于长距离可靠链路的可行性，显著提升了系统对失准与指向抖动的容忍度，为室外及自由空间光通信提供了一种兼具高增益、宽视场与强环境光抑制的实用化接收方案。



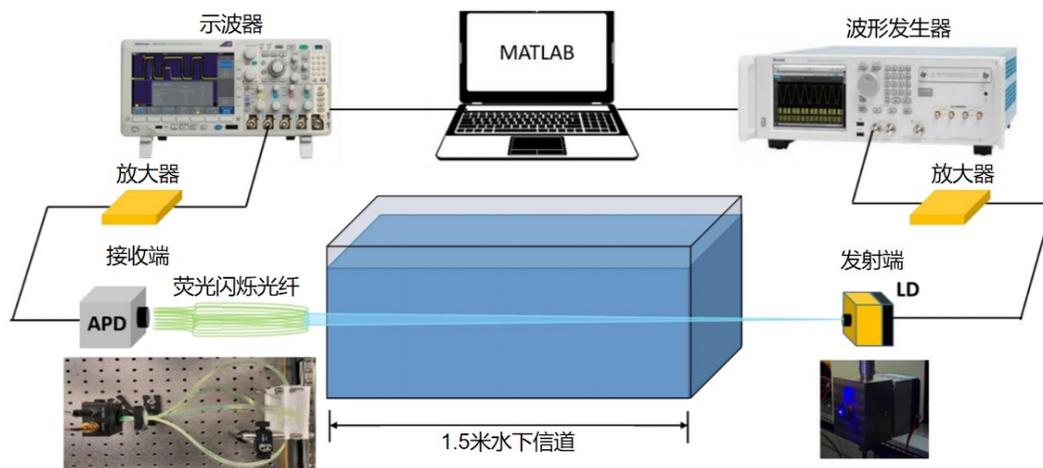
图 7 基于荧光天线的长距离 OWC 系统发射和接收模块<sup>[36]</sup>

Figure 7 Transmitter and receiver modules of a long-range OWC system based on fluorescent optical antennas<sup>[36]</sup>

### 3.3 水下场景

水下无线光通信（Underwater Optical Wireless Communication, UOWC）系统的实际部署面临显著挑战。一方面，满足精确的指向、捕获与跟踪需求较为困难。商用高带宽光电探测器受限于较小的感光面积（通常仅数十  $\text{mm}^2$ ），往往需要借助光学聚焦元件提升接收光功率。然而，这类聚焦元件通常视场角有限，且需维持严格的对准状态，在易受水流扰动和湍流影响等复杂动态水下环境中难以持续保证。另一方面，尽管透镜或复合抛物面聚光器可汇聚光线，但其受限于光学扩展量守恒定律，难以同时实现高增益与大视场。

为此，研究者提出了采用荧光天线以突破上述限制。Kang 等人提出了一种采用荧光光纤光电接收器的紫外 UOWC 实验装置。该器件具备数十  $\text{cm}^2$  的有效接收面积与 86.13 MHz 的 -3 dB 带宽。实验在 1.15 m 水下信道中，采用 375 nm 激光光源与非归零关键控调制，实现了 250 Mbit/s 的传输速率，对应误码率为  $2.2 \times 10^{-3}$ ，该工作为水下及非视距自由空间光通信的接收机设计提供了新思路<sup>[37]</sup>；Sait 等人提出了一种基于双波长闪烁荧光天线的接收方案，该方案采用分别响应 430 与 488 nm 波长的荧光光纤，用于同时探测紫外与可见激光信号。研究引入迫零方法有效抑制了通道间串扰，在双波长非归零关键控调制下，实现了 1 Gbit/s 的净聚合数据速率。结果表明，此类天线结构可显著扩展接收视场角，降低对复杂跟踪系统的依赖，提升了系统的实用性及部署灵活性<sup>[29]</sup>。图 8 所示为基于大面积闪烁光纤的全向 UOWC 系统，该系统采用活性面积达 120  $\text{cm}^2$  的闪烁光纤束作为光接收器，以宽视场接收机制有效克服了水下湍流导致的对准难题，显著提升了系统鲁棒性。实验表明，系统在 1.5 m 水下信道中可实现 66.62 MHz 的 -3 dB 带宽，并以非归零关键控（Non-Return-to-Zero On-Off Keying, NRZ-OOK）调制达到 250 Mbit/s 的数据速率。在模拟气泡、温度梯度、盐度变化及浊度等多种湍流条件下，系统均能保持零中断概率的无误码通信。结果证明，该大面积闪烁光纤接收器能有效抑制水下湍流引起的信号失准与起伏，为构建高鲁棒性和宽视场 UOWC 提供了一种实用化接收方案<sup>[38]</sup>。



注：APD 为雪崩光电二极管。

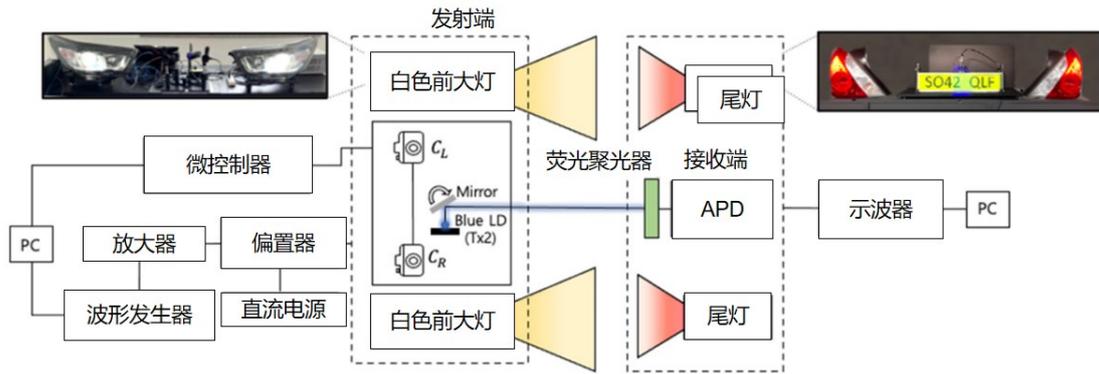
图 8 基于闪烁光纤的 UOWC 系统原理图<sup>[38]</sup>

Figure 8 Schematic diagram of a scintillating-fiber-based UOWC system<sup>[38]</sup>

### 3.4 车联网场景

在智能交通系统中，车对车 OWC 技术虽具备潜力，但其动态应用面临双重挑战。首先，在行车场景下，通信链路稳定性的核心难题在于如何克服车辆间持续的高速相对运动、车身振动及道路颠簸。商用高带宽光电探测器因感光面积有限，通常依赖光学透镜来提升接收灵敏度。然而，这类元件固有的窄视场角和对准敏感性，与车辆不断变化的位姿和间距形成了根本矛盾，使得精确的指向、捕获与跟踪难以维持。其次，从接收端设计看，性能存在固有瓶颈。为补偿链路损失而采用的透镜或反射式聚光器，虽能提升光学增益，却受光学扩展量守恒的严格限制，导致高增益与大视场无法兼得，难以满足动态车辆环境对接收机鲁棒性和灵敏度的双重需求。

基于荧光天线的新型接收方案能克服上述局限。图 9 所示为基于荧光聚光器的车对车 OWC 系统的系统框图与实验装置，该设计通过将半透明荧光集光器与智能车牌结构相结合，并引入反光层，在实现宽视场和高光学增益的同时，有效克服了车对车光通信中的对准与遮挡问题。实验表明，基于商用 LED 前照灯的通信链路在 100 lux 照度下可实现 54 Mbit/s 的数据速率；而采用图像处理与可控镜引导的蓝色激光波束转向信道，在转向范围内更达到 1 532 Mbit/s 的传输速率。系统在不同环境照度及强环境光干扰下均保持稳定通信，并通过实时黑匣子视频流演示验证了其在实际动态场景中的可靠性。该智能车牌接收方案为高鲁棒性和大视场车载光通信系统提供了一种结构与功能一体化的实用接收终端<sup>[39]</sup>。



注：PC 为个人电脑； $C_L$  和  $C_R$  为前视摄像头；Tx 为发射机。

图 9 基于荧光聚光器的车对车 OWC 系统的系统框图<sup>[39]</sup>

Figure 9 Block diagram of the fluorescent concentrator-based vehicle-to-vehicle OWC system<sup>[39]</sup>

### 3.5 星间场景

在低地球轨道部署卫星可构建对地观测与通信网络。立方体卫星因成本低、易部署，近年受到广泛关注。传统星间通信依赖射频或激光技术，但前者需大型天线，后者要求高精度跟踪系统，均难以满足立方星在尺寸和功耗等方面的严苛限制。

相比之下，OWC 因体积小、功耗低和成本效益高的优势，更适合立方体卫星间通信。为提升链路容量，WDM 技术被引入，但其传统接收方案受光学扩展量限制，难以兼顾增益与视场。荧光光纤天线因其波长选择与宽角度接收特性，成为实现紧凑高效 WDM 的潜在途径。图 10 所示为基于荧光光纤天线的低串扰和无滤波 WDM 星间 OWC 系统，该系统利用 B-3 与 O-2 型荧光光纤天线特有的光谱吸收特性，在接收端天然实现了紫光与绿光双波长的物理分离与解复用，从而有效避免了通道间串扰。为进一步解决波长域与频率域的 SNR 不平衡问题并提升传输安全性，研究提出了混沌二维配对编码方案。实验结果表明，所构建的系统在两个波长通道间的串扰可忽略，且应用混沌二维配对编码后，在  $3.8 \times 10^{-3}$  的误码率阈值下可获得 18 MHz 的可用带宽，较未编码方案实现了 28.6% 的带宽提升。研究证明，该荧光光纤天线方案为小型化和低功耗的立方体卫星间高速安全通信提供了一种极具潜力的紧凑型 WDM 接收终端解决方案<sup>[40]</sup>。

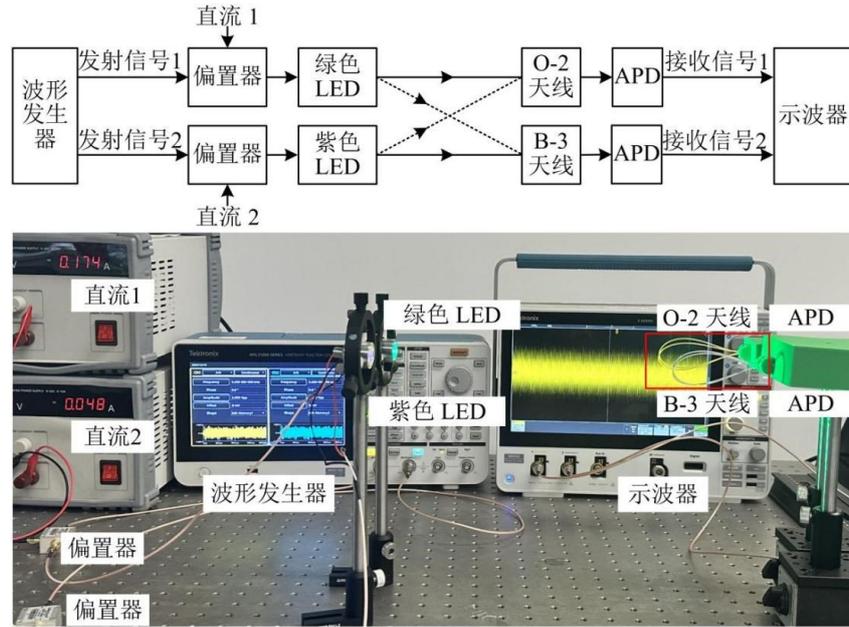


图 10 低串扰和免滤波器的保密 WDM-OVC 系统实验装置<sup>[40]</sup>

Figure 10 Experimental setup for a low-crosstalk, filter-free, secure WDM-OVC system<sup>[40]</sup>

## 4 结束语

基于荧光天线的 OVC 作为突破传统 OVC 性能瓶颈的创新方案，凭借光学滤波与光汇聚一体化、宽视场角与高增益协同、结构紧凑且成本低廉等核心优势，成为 OVC 领域的研究热点。该技术通过荧光团的选择性吸收与快速光致发光特性，有效解决了传统光学聚光器“增益与视场角互斥”的固有矛盾，同时借助灵活的结构设计与材料优化，实现了大容量数据传输与高可靠性信号接收的有机统一，为海洋勘探、便携式电子设备通信和强辐射环境数据传输等特殊场景的通信需求提供了全新技术路径。当前，基于荧光天线的 OVC 技术虽已取得诸多进展，但仍面临部分亟待攻克挑战，如 WDM 应用中荧光团宽吸收光谱导致的信道串扰问题、长距离传输下的信号衰减与噪声抑制难题、复杂海洋等环境下材料稳定性与系统适配性不足等，均限制了其实际应用。未来研究可聚焦 3 大方向：一是开发针对通信应用优化的定制化荧光材料，精准匹配通信场景需求，进一步提升信号传输的稳定性与效率；二是优化天线结构设计以获取更高光学增益，或通过荧光天线的组合设计实现多通道接收机，突破单通道性能局限；三是加强实验平台搭建与实际场景验证，重点突破水下湍流和温度湿度变化等复杂环境对系统性能的影响，推动技术与海洋环境监测、水下物联网和便携式智能设备等实际应用场景的深度融合。荧光天线在宽视场、抗失准、轻量化和抗干扰方面具备突出实用性，已从实验室验证走向工程化原型阶段，但仍面临材料效率、环境稳定性、速率瓶

颈和系统集成等关键挑战。未来通过材料创新、结构优化、抗扰算法和工程封装的协同突破，可显著提升其在不同场景 OWC 系统中的实际应用价值，为海洋开发和物联网建设等领域的高质量发展提供强有力的技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 王宜州, 翟政豪, 王元祥, 等. 空天地一体化光通信网络: 现状、挑战与未来发展趋势[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 1306017.  
Wang Y Z, Zhai Z H, Wang Y X, et al. Integrated Space-Air-Ground Optical Communication Networks: Status, Challenges, and Future Development Trends(Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(13): 1306017.
- [2] Chow C W. Optical Wireless Communication-Recent Progresses and Future Perspectives[J]. Journal of Lightwave Technology, 2026, 44(3): 806-820.
- [3] 郭磊, 周伟煜, 吴廷伟, 等. 无线光通信安全技术发展与应用综述[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 1306006.  
Guo L, Zhou W Y, Wu T W, et al. Review on Development and Application of Optical Wireless Communication Security Technology(Invited)[J]. Acta Optica Sinica, 2025, 45(13): 1306006.
- [4] Krishnamoorthy A, Safi H, Younus O, et al. Optical Wireless Communications: Enabling the Next-Generation Network of Networks[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2025, 20(2): 20-39.
- [5] 王熹, 邓磊, 陶坤宇, 等. 空间激光通信与测距一体化研究[J]. 光通信研究, 2024(3): 230016.  
Wang X, Deng L, Tao K Y, et al. Research on the Integration of Space Laser Communication and Ranging[J]. Study on Optical Communications, 2024(3): 230016.
- [6] Wen Y, Yang F, Song J, et al. Optical Integrated Sensing and Communication: Architectures, Potentials and Challenges[J]. IEEE Internet of Things Magazine, 2024, 7(4): 68-74.
- [7] 陈晨, 王伟任, 万欣, 等. 逆反射光通感一体化系统研究进展[J]. 光通信技术, 2025, 49(5): 15-20.  
Chen C, Wang W R, Wan X, et al. Research Progress on Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System[J]. Optical Communication Technology, 2025, 49(5): 15-20.
- [8] 万欣, 王浩川, 叶洋, 等. 水下逆反射光通感一体化系统性能研究[J]. 光通信研究, 2025(4): 250103.  
Wan X, Wang H C, Ye Y, et al. Performance Investigation of Underwater Retroreflective Optical Integrated Sensing and Communication System[J]. Study on Optical Communications, 2025(4): 250103.
- [9] Chu T, Ye J, Chen C, et al. Revolutionizing 6G: Experimental Validation of an Optical Integrated Communication, Sensing, and Power Transfer System[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2026, 44: 689-701.
- [10] Manousiadis P P, Yoshida K, Turnbull G A, et al. Organic Semiconductors for Visible Light Communications[J]. Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 2020, 378(2169): 20190186.
- [11] Mulyawan R, Gomez A, Chun H, et al. A Comparative Study of Optical Concentrators for Visible Light Communications[J]. Broadband Access Communication Technologies XI, 2017: 101280L.
- [12] Smestad G, Ries H, Winston R, et al. The Thermodynamic Limits of Light Concentrators[J]. Solar Energy Materials, 1990, 21(2-3): 99-111.
- [13] Weber W H, Lambe J. Luminescent Greenhouse Collector for Solar Radiation[J]. Applied Optics, 1976, 15(10): 2299-2300.
- [14] Collins S, O' Brien D C, Watt A. High Gain, Wide Field of View Concentrator for Optical Communications[J]. Optics Letters, 2014, 39(7): 1756-1759.
- [15] Ali W, Manousiadis P P, O' Brien D C, et al. A Gigabit VLC Receiver that Incorporates a Fluorescent Antenna and a SiPM[J]. Journal of Lightwave Technology, 2022, 40(16): 5369-5375.

- [16] Meucci M, Aresti M, Cossu G, et al. Comparative Test of Novel Fluorescent Optical Antennas for LED- and Laser-based Optical Wireless Communications[J]. *Advanced Optical Materials*, 2025, 13(13): 2402367.
- [17] Portnoi M, Haigh P A, MacDonald T J, et al. Bandwidth Limits of Luminescent Solar Concentrators as Detectors in Free-Space Optical Communication Systems[J]. *Light: Science & Applications*, 2021, 10: 3.
- [18] Wang N, Bi W, Liu Y, et al. Recent Progress of Fluorescent Liquid Crystals[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2025, 432: 127741.
- [19] He C, Lim Y, Murata H. Study of Using Different Colors of Fluorescent Fibers as Optical Antennas in White LED based-Visible Light Communications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(3): 4015-4028.
- [20] Kodama S, Kobayashi H, Okinaga W, et al. Performance of New Kuraray Wavelength-Shifting Fibers with Short Decay Time[J]. *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2024, 2024(5): 053H01.
- [21] Collins S, Mulyawan R, Rajbhandari S, et al. A Simple Wide Field of View Concentrator for Free Space Visible Light Communications[C]//2015 IEEE Summer Topicals Meeting Series (SUM). Nassau, Bahamas. IEEE, 2015: 7248184.
- [22] Manousiadis P P, Chun H, Rajbhandari S, et al. Optical Antennas for Wavelength Division Multiplexing in Visible Light Communications beyond the Étendue Limit[J]. *Advanced Optical Materials*, 2020, 8(4): 1901139.
- [23] Cho S, Chun H. Reflection based Coupling Efficiency Enhancement in a Fluorescent Planar Concentrator for an Optical Wireless Receiver[J]. *Optics Express*, 2021, 29(18): 28901-28911.
- [24] He C, Collins S, Murata H. Capillary-based Fluorescent Antenna for Visible Light Communications[J]. *Optics Express*, 2023, 31(11): 17716-17730.
- [25] Farenc J, Mangeret R, Boulanger A, et al. A Fluorescent Plastic Optical Fiber Sensor for the Detection of Corona Discharges in High Voltage Electrical Equipment[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1994, 65(1): 155-160.
- [26] Peyronel T, Quirk K J, Wang S C, et al. Luminescent Detector for Free-Space Optical Communication[J]. *Optica*, 2016, 3(7): 787-792.
- [27] Dong Y, Shi M, Yang X, et al. Nanopatterned Luminescent Concentrators for Visible Light Communications[J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21926-21934.
- [28] Riaz A, Collins S. A Wide Field of View VLC Receiver for Smartphones[C]//2020 European Conference on Optical Communications (ECOC). Brussels, Belgium. IEEE, 2021: 9333306.
- [29] Sait M, Trichili A, Alkhazragi O, et al. Dual-Wavelength Luminescent Fibers Receiver for Wide Field-of-View, Gb/s Underwater Optical Wireless Communication[J]. *Optics Express*, 2021, 29(23): 38014-38026.
- [30] He C, Collins S. A Two-Stage Fluorescent Antenna for Visible Light Communication Uplinks[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(21): 1190-1193.
- [31] 余礼芬, 吕欣欣, 钟润, 等. 液晶智能超表面辅助的室内可见光通信系统优化设计[J]. *工程科学学报*, 2025, 47(2): 307-314.
- Yu L S, Lü X X, Zhong R, et al. Optimization Design of Liquid Crystal-Based Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Indoor Visible Light Communication Systems[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(2): 307-314.
- [32] He C, Tang Y, Chen C, et al. Wavelength Division Multiplexing in Visible Light Communications Using Fluorescent Fiber Antennas[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2024, 42(10): 3725-3735.
- [33] Burton A, Le Minh H, Ghassemlooy Z, et al. Experimental Demonstration of 50-Mb/s Visible Light Communications Using 4×4 MIMO[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(9): 945-948.
- [34] Mulyawan R, Chun H, Gomez A, et al. MIMO Visible Light Communications Using a Wide Field-of-View Fluorescent Concentrator[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(3): 306-309.
- [35] Tang Y, Ding X, Li Z, et al. Crosstalk-Free MIMO VLC Using Two Orthogonal Polarizations Multiplexed Large FOV Fluorescent Antennas[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2023, 35(23): 1271-1274.

- [36] Ali Umair M, Seminara M, Meucci M, et al. Long-Range Optical Wireless Communication System based on a Large-Area, Q-Dots Fluorescent Antenna[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(2): 2200575.
- [37] Kang C H, Trichili A, Alkhazragi O, et al. Ultraviolet-to-Blue Color-Converting Scintillating-Fibers Photoreceiver for 375-nm Laser-based Underwater Wireless Optical Communication[J]. *Optics Express*, 2019, 27(21): 30450-30461.
- [38] Guo Y, Marie S, Kong M, et al. Underwater Turbulence on Scintillating-Fiber based Omnidirectional Underwater Wireless Optical Communication System[C]//*Next-Generation Optical Communication: Components, Sub-Systems, and Systems XI*. San Francisco, USA: SPIE, 2022: 72-81.
- [39] Oh S, Lee Y, Yu M, et al. Smart License Plate in Combination with Fluorescent Concentrator for Vehicular Visible Light Communication System[J]. *Sensors*, 2022, 22(7): 2485.
- [40] Yu X, Chen C, He C, et al. Low-Crosstalk, Filter-Free, and Secure WDM for Optical Inter-CubeSat Communication Using Fluorescent Fiber Antennas[J]. *Optics Express*, 2025, 33(12): 26461-26472.