水下激光通信技术及应用研究

兰春虎

中通服咨询设计研究院有限公司　江苏　南京　210019

摘　要：全面地分析水下激光通信技术的相关原理、系统架构及主要组成，对蓝绿激光光源、调制解调、信道补偿、光束对准跟踪等重要环节的技术特点加以论述。根据海水信道的吸收、散射、湍流三大主要特点，确定各种水体环境对通信距离和稳定性的影响机制，整理出该技术在海洋资源勘探、水下无人平台组网、水下基础设施监测等典型场景中的应用价值。水下激光通信因为具有高带宽、低延迟、保密性强的特点，已经成为水下高速通信的主要方案，但是它仍然存在复杂的环境适应性、动态对准难等问题，未来需要不断攻克相关的技术难题，持续提升系统的性能，为海洋开发和监测体系的智能化升级提供支持。

关键词：水下激光通信；蓝绿激光；信道特性；海洋资源勘探

引言：海洋是地球的资源宝库，深海开发、海洋监测、水下作业等活动中对高速稳定水下通信技术的需求越来越迫切。传统的水下声学通信速度慢、延时大，不能满足高清数据、实时控制信号的传输。无线电波在水中衰减严重，传输距离很短。水下激光通信利用蓝绿激光的海水低衰减特点，具有带宽大、速率高、保密性强等特点，可以突破传统水下通信速率的瓶颈，是水下高速通信的研究热点。目前该技术已经在海洋资源勘探、无人平台协同等各方面显示出应用前景，但还存在着海水信道干扰、动态对准困难等问题，对它的技术体系和应用场景进行系统的研究，可以为以后的技术改进和工程应用提供借鉴。

1 水下激光通信技术基础

1.1 技术原理

水下激光通信本质上就是光载波调制解调技术在水下环境中的延伸，核心就是利用蓝绿激光在海水中低衰减的特点，把电信号加载到光载波上，通过水下信道传输后还原电信号，实现信息交互。完整的传输过程是原始信息经过压缩编码后得到基带信号，然后经过调制电路驱动蓝绿激光器发光，将电信号调制成光信号。光信号经过光学系统的准直扩束之后，就进入水下信道，克服了海水吸收、散射和湍流的影响来传输到接收端。接收端用光学天线将光信号汇聚起来，然后用光电探测器把光信号转换成电信号，经过放大、滤波、解调和解码处理，得到原始信息。选择蓝绿激光作为研究对象技术上很关键[1]。海水对于不同波段光的吸收和散射差别很大，红光、红外光以及紫外光衰减严重，但是 450-530nm 蓝绿光处在海水“透射窗口”里，衰减系数比其他波段要低得多，可以完成远距离传输。

1.2 系统架构

水下激光通信系统为模块化集成体系，核心由发射端、水下信道、接收端、控制与信号处理模块四部分组成，各模块协同完成信号传输全流程。系统整体架构如图 1 所示。



图 1 水下激光通信系统架构图

发射端是电光转换和光束优化的装置，主要由蓝绿激光器、驱动电路等组成，可以将电信号加载到光载波上，并对光束进行优化。水下信道是传输媒介，吸收、散射、湍流等都会使信号衰减、码间串扰、稳定性下降。接收端完成光电转换和信号恢复的工作，通过光学天线收集光信号，使用灵敏度高的光电探测器把光信号转换成电信号，经过放大、滤波后再还原出原来的信号。控制及信号处理模块属于系统的中枢部分，它能够对信道的状态实施监控，并且会自主调节相关的参数，

借助纠错以及同步算法来抵消干扰，并从而维持链路的稳定。

1.3 系统核心组件参数对比

水下激光通信系统核心组件的性能参数直接决定通信距离、速率与稳定性，主流组件类型及关键参数对比如表 1 所示。

表 1 水下激光通信系统核心组件参数对比

组件类型	主流选型	核心参数	性能特点
激光器	半导体激光器（LD）	波长 450-532 nm，功率 10-100 mW，调制速率 1-10 Gbps	体积小、功耗低、调制速率高，适用于中短距离高速通信
垂直外腔面发射激光器（VECSEL）	波长 480-500 nm，功率 50-200 mW，线宽 ＜1 MHz	输出功率高、光束质量好、传输距离远，适用于长距离通信	高功率、高光束质量、波长灵活、外腔功能强
光电探测器	雪崩光电二极管（APD）	响应波长 400-600 nm，灵敏度 0.5-1 A/W，暗电流 ＜10 nA	灵敏度高、响应速度快、体积小，适用于中短距离接收
光电倍增管（PMT）	响应波长 300-650 nm，灵敏度 10-100 A/W，暗电流 ＜1 nA	灵敏度极高、噪声低，适用于长距离微弱光信号接收	高灵敏度、低噪声、响应快、增益大，弱光探测能力极强
调制器	声光调制器（AOM）	调制速率 10-100 MHz，消光比 ＞20 dB	插入损耗低、稳定性好，适用于低速长距离通信
电光调制器（EOM）	调制速率 1-10 Gbps，消光比 ＞30 dB	调制速率高、带宽大，适用于高速短距离通信	高速调制、低插入损耗、消光比高、带宽宽、偏振特性优

2 水下激光通信关键技术

2.1 蓝绿激光光源技术

光源是水下激光通信的关键，要达到波长匹配、功率稳定、光束质量好、调制速率高的标准。目前主流光源为半导体激光器和 VECSEL，半导体激光器技术成熟、成本低、体积小，可以实现高速调制，但是输出功率小、光束发散角大。VECSEL 利用半导体激光器和固体激光器的优缺点结合的技术，输出功率大、光束质量好、线宽窄，适合长距离传输，但是结构复杂、成本高。未来光源技术会向着高功率、窄线宽、低功耗、小型化方向发展，量子点激光器、光纤激光器等新型光源逐渐成为研究热点，用优化的波长和功率来适应不同的水质环境，提高通信系统的环境适应性。采用配合温控和驱动电路的方案，对光源的噪声和功率漂移进行抑制，以达到提高水下通信系统稳定性、可靠性、延长其使用寿命的目的。

2.2 调制解调技术

调制解调技术直接影响到通信速率以及抗干扰的能力，水下激光通信要达到高带宽效率、强抗多径干扰、低误码率这三个目的。主流调制方式有脉冲位置调制（PPM）、多进制相移键控（MPSK）、正交频分复用（OFDM），PPM 用脉冲位置来承载信息，抗干扰能力强、功耗小，适合长距离低速率通信。MPSK 用相位的变化来承载信息，带宽利用率高，调制速率快，适合于中短距离高速通信。OFDM 采用多载波并行传输的方式，可以有效地克服多径效应和频率选择性衰落，提高频谱效率和抗干扰能力，是目前高速水下激光通信的主要调制方式。解调技术把软判决法同均衡算法，前向纠错编码联系起来使用，以减轻信道的噪声以及码间的串扰效果来改善误码率，从而提高通信的可靠性。

2.3 信道补偿与抗干扰技术

海水信道中吸收、散射、湍流等因素严重制约水下通信质量，信道补偿与抗干扰技术成为研究重点。光学补偿借助自适应光学校正光束畸变，稳定接收光功率；信号处理补偿通过均衡算法抑制码间串扰，结合分集接收、自适应滤波减弱光强闪烁与背景噪声干扰。链路自适应可实时感知信道状态，动态调整发射功率、调制方式与编码速率，兼顾恶劣环境通信稳定性与良好信道传输效率。多波长复用能并行传输信号，进一步提升抗干扰能力。各类技术协同运用，可有效削弱海水信道衰减干扰，显著提升水下激光通信传输可靠性[2] 。

2.4 光束对准与跟踪技术

水下激光通信光束发散角小，对发射端和接收端的空间对准精度要求很高，水下平台的动态运动（AUV 漂移、洋流冲击）很容易使光束偏离接收视场，造成链路中断。光束对准与跟踪技术分为初始对准、精跟踪、动态维持三个阶段，初始对准用广角探测和粗扫描快速建立链路。精跟踪用高精度的光电探测器和伺服系统进行实时补偿来保证光束的精确定位，得到微米级的对准精度。动态保持就是用平台运动姿态传感器的数据来预测光束偏移的趋势，进而提前调节发射的角度来适应水下动态的环境。未来用机器视觉同人工智能算法融合起

来，改良在繁杂的水下环境下精准定位以及跟踪能力。

3 水下激光通信信道特性分析

3.1 吸收特性

海水对蓝绿激光的吸收主要源于水分子振动吸收、溶解有机物（黄色物质）吸收、悬浮颗粒吸收。水分子在 450-530 nm 波段吸收系数较低，是该波段成为透射窗口的核心原因。溶解有机物对短波长蓝光吸收较强，随波长增加吸收减弱。悬浮颗粒（泥沙、浮游生物）吸收系数与颗粒浓度、粒径正相关，浑浊水体中吸收效应显著增强。吸收导致光信号能量不可逆损耗，直接限制最大通信距离，通信距离随吸收系数增大呈指数衰减。

3.2 散射特性

散射是水下激光信号畸变的主要原因，分为前向散射和后向散射，是由水中悬浮颗粒、气泡和浮游生物引起的。前向散射使得光束变分散、能量也变分散，所以接收端的光功率降低，码间串扰增大。后向散射会造成一部分光信号反向传到发射端、接收端，增大了背景噪声。散射强度和颗粒浓度、粒径、光束波长有关，波长越长，散射损耗越小，所以长波长绿光（520 ~ 530nm）在浑浊水体中适应性比蓝光（450 ~ 480nm）好。由于散射造成的多径传播会成为制约高速通信的主要因素，所以要利用均衡算法和调制技术来抑制码间串扰。

3.3 湍流特性

水下湍流由温度梯度、盐度梯度、流速剪切引发，导致海水折射率随机起伏，进而引发光强闪烁、光束漂移、到达角起伏与空间相干性退化。光强闪烁导致接收端光功率随机波动，信噪比不稳定，误码率升高。光束漂移使光束中心偏离接收天线，降低接收光功率。到达角起伏导致光信号入射角度随机变化，影响光电探测器的接收效率。湍流强度随水深、流速与环境温度变化，浅海区域湍流效应显著强于深海，需通过自适应光学技术与信号处理算法抑制湍流影响，提升通信稳定性。

4 水下激光通信典型应用场景

4.1 海洋资源勘探与开发

海洋资源勘探属于水下激光通信的主要应用领域，给海底矿产勘探、海洋油气开发、深海生物资源调查赋予高速数据传输支持。海底矿产勘探时，水下无人潜航器（AUV）配备高清相机、多波束测深仪和传感器，借助水下激光通信即时把海底地形图、矿产分布情况以及传感器所采集的数据传回地面，不需要将设备回收起来就可以立刻开展数据的分析工作，从而加快勘探速度并加强数据的及时性。海洋油气开发时，水下生产设施、钻井平台和控制中心用激光通信链路互相联系，把设备运行状况，生产数据和操控命令及时传递出去，从而保证油气生产的安全高效运作，取代传统的电缆，削减部署费用并缩减维护难题。

4.2 水下无人平台组网通信

随着水下无人技术发展，AUV、水下无人艇（USV）、水下传感器节点等无人平台协同作业成为海洋开发的主流模式，水下激光通信为无人平台自组网、协同控制、数据共享提供关键支撑。水下激光通信方向性好、隐蔽性强、带宽高，可实现多平台间高速点对点通信，构建水下无线光网络。AUV 集群通过激光通信链路实时交换位置信息、任务数据与传感器数据，实现编队协同、路径规划与任务协同。水下传感器网络节点通过激光通信将监测数据汇聚至网关，再回传至水面基站，构建“水下 - 水面 - 岸基”一体化海洋监测网络，支持海洋环境长期实时监测。

4.3 水下基础设施监测与维护

水下基础设施（跨海大桥桥墩、海底隧道、水下管道、港口码头）长时间处在复杂的海水环境里，会被腐蚀、冲刷、生物附着等影响，要经常执行监测与保养任务，水下激光通信给基础设施状态监测、高清视频巡检、维护指令传输提供高效通信方案。水下监测设备上装有激光通信模块，能够把结构的应力，腐蚀状况，位移变动这些监测信息传递到水面以上的平台上来。水下巡检机器人利用激光通信把高清视频回传上来，可以即时对基础设施的缺陷做出识别和定位。维修人员利用激光通信向机器人下发控制指令进行维修工作，从而达到远程控制维修的目的，减小了水下作业的风险。

结束语

水下激光通信以蓝绿激光为载波搭建高效水下传输体系，原理清晰、架构模块化，核心器件持续优化，为水下高速通信提供可行方案。海水信道的吸收、散射、湍流易干扰通信，可通过光源优化、信号处理及自适应技术加以抑制。目前该技术已初步应用于海洋勘探、无人平台组网、海基设施监测等领域，发展前景广阔。后续需攻克复杂水体适配、远距稳定传输、规模化组网等难题，推动其向高速、小型化、智能化升级，助力海洋强国建设。

参考文献

[1] 杨尚君, 梁静远, 柯熙政. 水下无线光通信模型及其实验研究进展 [J]. 光通信技术,2024,48(6):1-7.

[2] 张林, 王大帅, 张鹏, 等. 水下无线光通信抗湍流调制技术 [J]. 光通信技术,2024,48(6):11-16.