低空智能体光无线通信与感知网络：海洋场景

毛天琪，*IEEE*会员，刘佳悦，*IEEE*学生会员，隋泽平，*IEEE*会员，曹乐宇、梁晓、郑德志和王兆诚，*IEEE*会士

arXiv:2603.04042v1 [eess.SP] 4 Mar 2026

摘要——**从水下延伸至天空的跨域海洋连接，对于海上气象监测和海上勘探等众多数据密集型海事应用而言，已变得日益不可或缺。然而，受限于与地面网络的隔离、卫星资源有限，以及无线电波无法以高速率跨越水气界面的根本限制，宽带通信的实现面临严重阻碍。为此，本文提出一种连接水下、空气与临近空间的光网络，该网络由若干协同工作的低空平台（LAP）构成，这些平台作为具备计算能力、感知能力并能适应任务需求的智能体。网络架构包括三个针对特定场景的部分，即水气直连链路、低空网状网络和临近空间接入网络。借助协同感知和智能控制，系统将波束跟踪与资源优化紧密结合，从而在高机动性和严苛的海事动态环境下实现稳健组网。此外，本文综述了多项赋能技术，包括水气信道建模、海面扰动下的自适应波束对准、用于去中心化控制的群体智能组网、位姿-拓扑一体化规划，以及用于临近空间目标检测和波束对准的光学通感一体化（ISAC）。最后，本文还指出了尚待解决的问题，为构建可扩展、安全且超宽带的海洋光网络勾勒出清晰的发展路线图。**

关键词—**低空网络、光无线通信、智能体智能。**

I. 引言

随着人类活动范围不断扩大，海洋活动日益增多。各种现代远海活动，例如海上气象监测、海上目标侦察、水下作业和应急通信，都需要通信和组网接入，以支持海量数据传输、精准设备控制和适当的设备部署[1]。然而，现有架构链路彼此孤立且卫星资源有限，因而带宽有限、数据速率不稳定、灵活性不足 [2]，，难以满足任务多样、节点异构且带宽需求高的海事应用要求。为应对这些挑战，低空无线网络（LAWN）可作为解决这一问题的有效方案：它通过连接水下、空中、近空间和地面节点，在临近空间—空—地—海一体化网络架构中为海事应用提供灵活接入。这种海洋LAWN主要由各种自主低空平台（LAP）构成，其中以具备高机动性、分布式网络结构、主动感知能力和机载智能的无人机（UAV）为代表。因此，它能够快速部署、实现智能负载均衡并进行自适应波束调整，以较传统卫星方案更低的时延和更高的速率，支持海事单元与临近空间单元协同工作 [3]。

经典低空空中网络通常采用全射频（RF）通信进行数据交换 [4]，但这会受到带宽限制和窃听风险的影响。此外，由于射频信号在水介质中衰减严重，因此不再适用于与无人水下航行器或潜艇等水下平台通信。为此，凭借更强的水下穿透能力和充足的可用带宽，光无线通信（OWC）已成为低空平台通信与感知的一种创新方案[5]。然而，在不同通信场景下实现光学低空空中网络仍面临技术挑战，具体如下：

1) 水下-空中直连链路：跨界面传输不可避免地会受到波动海面的阻碍，导致波束方向发生时变偏移，因此需要实时信道感知和动态波束对准方案，以确保收发机增益稳定 [6]。

2) 低空平台间网络：从物理层角度来看，低空平台集群内部组网在高机动性下会受到强烈的多普勒频移影响。此外，对低空空中网络核心结构进行复杂的网络级优化也不可或缺 [7]。

3) 临近空间—空中传输：可靠的无线回程面临着极长距离传输下特有的信道非均匀性和严重的指向误差，因此需要借助人工智能和通感一体化（ISAC）等新兴技术实现高效的波束对准 [8]。

本文围绕以 LAWN 为核心的临近空间—空—地—海光网络开展了广泛研究，并系统分析了构成该系统的关键技术。在下文中，我们首先介绍按链路区分、适用于不同

T. Mao、J. Liu、L. Cao、X. Liang 和 D. Zheng 任职于临近空间环境特性与效应全国重点实验室、北京理工大学（中国北京 100081；电子邮箱：maotq@bit.edu.cn、jiayue liu@bit.edu.cn、leyu cao@bit.edu.cn、liang.xiao@bit.edu.cn、zhengdezhi@bit.edu.cn）。Z. Sui 任职于埃塞克斯大学计算机科学与电子工程学院（英国科尔切斯特 CO4 3SQ；电子邮箱：zeping-sui@outlook.com）。Z. Wang 任职于清华大学电子工程系（中国北京 100084；电子邮箱：zcwang@tsinghua.edu.cn）。

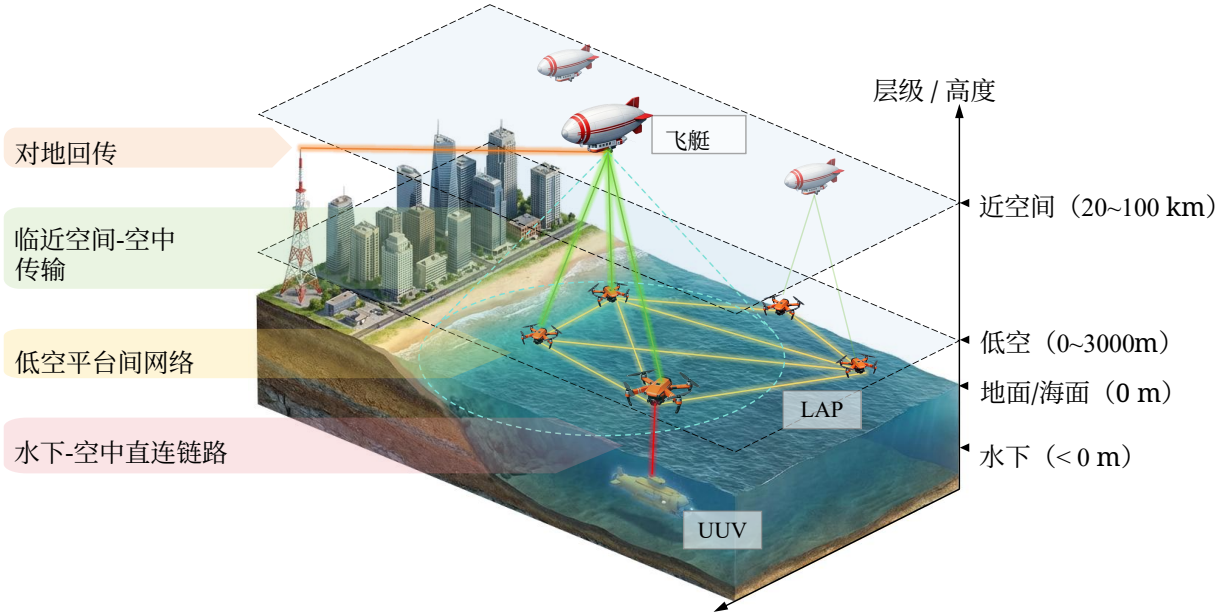


图1. 以LAWN为中心的近空间-空-地-海一体化光网络的网络架构，该网络运行于海洋场景中。

场景的整体系统架构，讨论各部分的软硬件构成，并分析现有实现方案的性能。随后，我们分析网络各部分涉及的关键技术，探讨它们在增强链路连接、优化网络和实现智能增强方面所发挥的作用。最后，我们研究了若干值得探索的开放性挑战和潜在研究方向，并指出相关技术发展的未来方向与机遇。

II. 网络架构

A. 网络结构

如图1所示，以LAWN为中心的临近空间-空中-地面-海洋光网络通常以多层架构实现，不同层的平台通过跨域网关和统一网络管理实现互联。该网络架构可依据物理高度划分为水下层、地面层、低空层和近空间层。近空间层由飞艇、系留气球等临近空间平台组成，提供广覆盖和远距离通信与定位服务，支撑海陆场景中的超视距传输。低空层由无人机和浮空器组成，作为可部署的组网与感知节点，通过调度智能体化LAP节点实现快速覆盖扩展和连接桥接。水下层由无人水下航行器组成，作为终端执行单元，通过与低空平台保持连接，在网络的统一支持下执行海洋任务。地面层通过大规模计算集群提供主要的计算与存储资源，从而实现远程智能支持、集中式数据处理以及全网范围内的全局资源分配。在上述架构中，光无线通信（OWC）已成为实现层内与层间连接的创新技术，从而构成整体网络。OWC载波的高传输速率天然满足了对高吞吐量链路日益增长的需求。此外，其优异的穿透性能为建立从水下到空气的跨界面链路提供了切实可行的途径。

B. 水下-空中直接光链路

水气直连链路连接水下节点（如无人水下航行器）与低空平台（如无人机）。它为无人水下航行器提供及时的网络接入，使其能够持续传输数据，从而在水下任务期间实现数据回传和实时航行器控制。然而，水下-空中光链路的传播环境极具挑战性，因为它不仅受两种介质的影响，还受到它们交界面的影响。从物理层面看，介质造成的光吸收和散射、碎屑或其他物体导致的遮挡和光束弯曲、水中的气泡、湍流，以及界面处的折射率不连续性，都会使光场发生畸变。从通信角度看，这些损伤通常归纳为三类主要问题：接收光强损耗、光束指向/角度偏差和到达延迟。在这些条件下，水下-空中光链路通常采用双向光收发机实现，包括光电组件（即用于发射的发光二极管和激光二极管，以及用于接收的光电二极管、单光子雪崩二极管和光电倍增管）；光学组件（即透镜系统和光学滤光片）；指向/转向设备（即微机电系统和多自由度万向架）。

在实际应用中，人们已针对上述问题（包括接收光强损耗、光束指向/角度偏差和到达延迟）提出了创新解决方案。在海洋环境中，波长为 450 nm 至 570 nm、通常称为“蓝光和绿光”的光，因其吸收和散射损耗较低，已广泛应用于科学研究和工程实践。为抵御动态海洋界面造成的指向偏差，人们采用光束对准技术，通过扩展卡尔曼滤波（EKF）等递归算法提供补偿指导，或借助能够自主感知环境的智能方法来适应角度变化。

C. 低空平台间网络

低空平台网络是海事情景中的架构骨干，可灵活连接网络下层、对等层和上层的设备。网络的主要构成单元是低空平台，它们与水下节点保持链路，为临近空间平台提供连接，并执行边缘感知与探测任务。因此，这些任务的多样性和复杂性要求构建多低空平台网络。低空平台移动性会导致物理连接和网络拓扑及时变化。此外，由于机载平台通常面临机载计算能力有限的问题，低空平台层通常采用高度去中心化的方式组织。鉴于上述应用背景，网络中的低空平台通常配备多种载荷，包括光收发器、视觉传感器和机载计算组件，以支持通信、感知和无线自组织网络任务。网络功能通常侧重于移动性管理、干扰协调和动态拓扑控制，以适应频繁的航线变化、空间变化和链路间歇性。在时变物理环境中，低空平台之间的空对空链路会经历快速的信道波动，因此，精准的信道估计和自适应调制对于缓解多径衰落和多普勒效应至关重要。从上层角度看，网络对移动性和灵活性的要求，需要联合优化低空平台运动与网络拓扑。这一耦合问题极其复杂，传统优化方法往往难以求解，因此有必要采用多智能体和群体智能方法进行分布式协同控制与组网。

D. 临近空间—空中传输

低空平台可为连接提供可部署的容量，而近空间层的飞艇则可为接入服务提供广域覆盖，确保低空平台到地面站之间有多条回传链路。在这种情况下，飞艇需要识别低空平台以建立多址网络，这促使人们采用光集成通信与感知（OISAC）和远距离光束对准。低空平台与近空间之间的链路通常建模为自由空间光通信系统。在此背景下，低空至太空的自由空间光通信指的是连接两个层级之间的激光链路，可在地面基础设施不可用或无法覆盖时提供高容量、低干扰的回传链路。在实际应用中，整体性能受光链路预算限制，其中包括终端孔径尺寸、发射功率以及捕获、瞄准与跟踪（PAT）的稳定性[9]。此外，从信道状态角度来看，湍流、闪烁、气溶胶和云层覆盖等大气效应可能导致衰落，甚至造成暂时中断。为在这些不利因素下维持可靠连接，此类系统通常会采用信道感知自适应技术，例如自适应调制与编码，以及自动重传请求/混合自动重传请求和重传策略等链路层可靠性机制。与射频方案相比，自由空间光链路具有更大的可用带宽、窄光束发散角带来的高方向性、较低的被截获和干扰概率，并且对频谱可用性的依赖较低，因此非常适合承载汇聚传感器数据、中继流量及其他时间敏感型任务数据流。

III. 关键技术

随着低空组网和光通信研究的发展，各种关键技术不断涌现，并已开始支撑该网络。本节按照网络结构的顺序介绍相关技术的当前发展情况。

A. 水下-空中 *OWC* 信道建模

复杂的跨介质信道是影响水下-空中光链路的主要因素。因此，准确的信道建模是相关研究进一步发展的基础前提和必要途径。信道建模面临的挑战源于水/空气介质中各异的传播效应，以及气水界面的时变动力学。这些因素共同作用，形成了极为复杂、难以用传统模型描述的信道。因此，近期研究致力于开发物理信息信道模型，以忠实刻画底层信号传播 [6]。为了重建物理因素对光信号的影响，近期研究采用统计光子模型来逼近信道 [10]。该方法将光束建模为光子的集合，以随机方式表示信道效应：通过控制每个光子的传播过程和角偏差的概率分布，刻画吸收、散射和界面诱导折射。因此，采用蒙特卡洛方法汇总所有光子的计算结果，从而反映水下-空中光信道的宏观特征。在这一框架下，若干技术方向仍在持续发展，包括：（i）分子吸收与散射模型；（ii）基于折射率波动的水下湍流建模；（iii）海面动力学与水气界面仿真；以及（iv）收发器子系统的概率表征。这些正在开展和已取得进展的工作共同推动着更完善的水下-空中光信道模型的形成。与

常用的指数损失抽象相比，这类物理信息且基于概率的模型能够提供更精确的建模，为理论分析和系统设计提供指导。

B. 水气链路的光束对准技术

水气光无线信道独特而关键的挑战在于动态海面，它会导致光束的强度和方向发生变化，因此需要采用相关技术来补偿波浪运动，并维持收发器 [10] 之间稳定的通信链路。波束对准也称为波束跟踪或波束转向，是应对上述问题的一项有效技术 [6]。波束对准硬件通常由光学透镜组和机械转向单元组成，还可能包括象限光电二极管和反射器等传感与回传光学元件，用于估计波束偏移。早期的经典算法采用基于均值漂移或扩展卡尔曼滤波（EKF）的反馈调节，通过象限光电二极管阵列中的强度差异补偿光束，并控制转向硬件实现实时对准。经典算法架构简单、易于应用，但通常需要初始预对准，且仍然是被动的，在感知动态海面状况和主动补偿方面能力有限。近期的方法则融入了基于学习的智能技术。一类研究采用深度强化学习（DRL）来适应海面动力学，并及时进行指向校正。另一类研究利用卷积神经网络（CNNs）进行主动视觉感知，提取特征并预测近期信道变化，从而实现前瞻性波束转向。这些创新算法具有较高的响应精度和主动感知能力，但对平台智能和计算支持提出了更高要求。迄今为止，如何设计兼顾时延、精度和资源消耗的算法，仍是相关研究持续优化的目标。

C. 群体智能赋能的网络

在低空平台集群应用中，网络必须在严苛条件下运行：平台快速机动，拓扑持续变化，链路质量不断波动。同时，任务需求可能突如其来，也可能骤然改变。尽管存在这些动态变化，系统仍需在严格的能量和机载计算能力限制下，为指挥控制和有效载荷流量提供低时延、高可靠的连接 [11]。在这种情况下，采用静态配置的传统网络设计往往会变得不稳定：维护全局拓扑信息的成本高昂，控制开销急剧增加，所产生的决策也可能滞后于实际情况。群体智能和分布式学习通过让网络根据局部观测和有限的邻居交互积累经验并进行自适应，从而弥补这一不足。在多智能体强化学习（MARL）中，每个低空平台（或簇头）都充当一个智能体，观察局部网络和任务线索，包括邻居连接性、链路质量、队列积压、相对几何关系、剩余能量，并选择下一跳转发、中继选择、拥塞感知调度或发射功率／信道决策等操作，以提升长期任务表现。多智能体强化学习的一种实用架构是集中训练、分散执行：策略在更丰富的数据上训练，随后部署为轻量级决策规则，在机载设备上运行并快速响应，而不依赖脆弱的中央控制器。图结构建模将集群表示为时变图，并基于局部邻域参数化控制策略，使学习到的策略能够适应集群规模扩展和拓扑变化。除多智能体强化学习外，联邦学习（FL）及相关分布式学习方案利用这样一个事实：有效的训练数据在整个集群中不断产生，但受带宽限制、隐私问题和间歇性连接的影响，难以集中起来。在这些方法中，低空平台在本地训练模型，并共享参数／模型更新，而非原始数据。此外，分层聚合和异步更新协议能够缓解掉队节点导致的延迟，并在网络分区情况下保持鲁棒性。与传统方法相比，这些群体智能和分布式学习方案能够通过自适应广泛传播降低控制开销，通过机载部分信息处理提升鲁棒性，并通过直接优化端到端目标而非孤立的链路指标，更好地处理跨层耦合。如何——

然而，尽管具备这些优势，仍存在若干关键挑战。学习与通信资源之间的冲突、多智能体强化学习系统的非平稳行为、联邦学习中的非独立同分布（non-IID）与数据漂移，以及环境造成的信道限制，都是亟待进一步解决的关键问题。

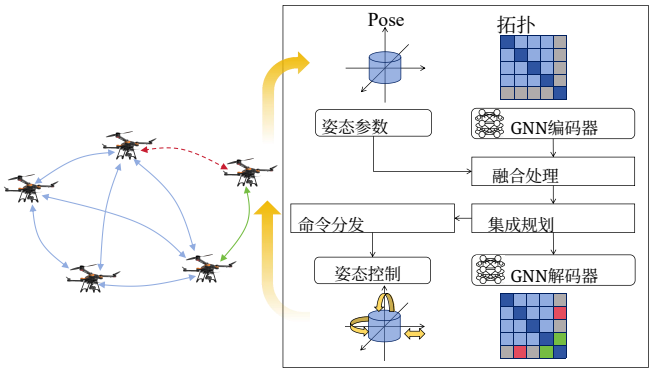


图2. LAWN 的姿态-拓扑集成网络规划。

D. 姿态-拓扑集成网络规划

低空网络中的设备可以按需重新定位，以适应不断变化的任务目标。同时，海洋环境中跨层信道的复杂性会导致设备移动过程中网络拓扑发生变化 [12]。因此，动态多节点网络规划和在线重构至关重要，可确保低空平台间网络为海洋活动提供及时、可靠的支持。先前的研究已奠定了技术

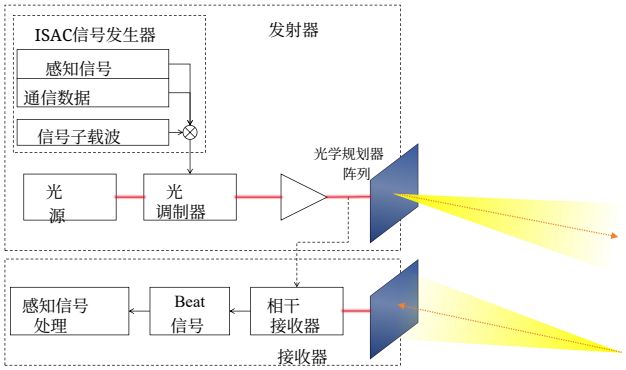


图 3. O-ISAC系统的架构。

基础。轨迹规划算法作为空间控制方法，通过施加数学约束、使用搜索算法并采用动态规划，求得全局或局部最优飞行轨迹，从而实现低空平台的移动部署。与此同时，网络规划算法负责处理网络结构和资源分配。通过链路连通性管理和动态带宽配置等算法，该方法能够实现网络管理和资源分配。如图2所示，近期研究尝试对空间规划和网络规划进行联合优化，包括在信号强度约束下优化轨迹和飞行姿态，以及采用位置加权资源分配进行网络设计。然而，上述大多数方法主要是在简化场景中开发和验证的，并依赖严格的建模假设。因此，它们往往无法恰当地描述并有效指导海洋环境中的综合系统。姿态-拓扑集成网络规划是一种创新的技术范式，将设备平台的空间信息与网络信息纳入同一模型。该方法通过环境-信道关系建立物理状态与网络拓扑之间的联系，并根据任务联合优化设备状态控制和网络资源分配。该方法涉及设备控制、光信道和网络管理等多种影响因素，因此适合应用深度学习算法实现端到端联合优化，或利用强化学习自适应地学习并响应环境参数。

E. 自由空间光通感一体化

连接临近空间平台与低空平台的需求，推动了光学一体化感知与通信（O-ISAC）的实现 [13]。这些链路需要同时实现高容量数据传输和高保真环境感知。传统射频（RF）方法受频谱稀缺和分辨率有限等固有因素制约，在动态空中环境中实现高效、统一的通信感知能力且不牺牲性能，面临重大挑战

权衡 [4]。如图 3 所示，O-ISAC 利用光载波的超大带宽和超短波长，提供了变革性的解决方案，使单条光链路能够同时实现高分辨率感知和高容量通信。发射的光载波不仅支持多吉比特数据传输，还可通过先进分析后向反射和散射信号，精确推导低空平台的运动学状态及周边环境特征。此外，这种双重功能满足了连接能力与态势感知的协同需求。它不仅实现了卓越的频谱效率，还通过空间约束和低截获概率提升了系统安全性。因此，O-ISAC 为跨层空中链路上的高频谱效率、安全且自主协同运行奠定了重要基础。尽管前景广阔，要实际部署 O-ISAC 以连接临近空间平台与低空低空平台，仍需解决若干关键问题。这些问题源于复杂的大气动力学、当前硬件的限制，以及需要建立统一的理论框架来指导通信与感知的深度协同。推进这项技术，需要开发智能自适应系统，使其能够根据实时环境感知进行动态波形设计和预测波束控制。此外，混合光电硬件的创新对于实现紧凑型多功能收发机至关重要。通过开发适用于光学系统的通信感知联合波形，并以跨层优化和机器学习为支撑，O-ISAC 有望成为安全、高效且具备自我感知能力的分层空中网络的基石。

IV. 未来研究与开放性挑战

A. 光无线信道建模

在该网络中，引入光无线通信以支持多种链路类型，包括低空近空间链路、空对空链路以及水空跨介质链路。同时，由于载波频率显著更高，光波的传播行为与射频波存在根本差异。因此，射频信道模型经过大量修改后才能适用于光无线信道。这些情况要求建立精确且忠实的光无线信道模型，以有效描述光信号的传播特性，为进一步研究光无线通信系统奠定基础。由于不同应用场景下的传播条件差异很大，信道建模必须针对目标场景进行设计。因此，信道可分为以下链路配置：

1) 水空光无线通信信道： 如图 4 (a) 所示，水到空气的光无线通信信道面临的主要问题是光束需要穿越两种截然不同的介质。具体而言，表面动力学会随机改变局部入射几何，从而导致接收功率和光束指向快速波动。近期研究已从多个方面着手解决这一问题。在表面建模方面，谱驱动谐波模型能够合成海浪，但这类模型往往过于理想化，无法捕捉破碎波/卷破波

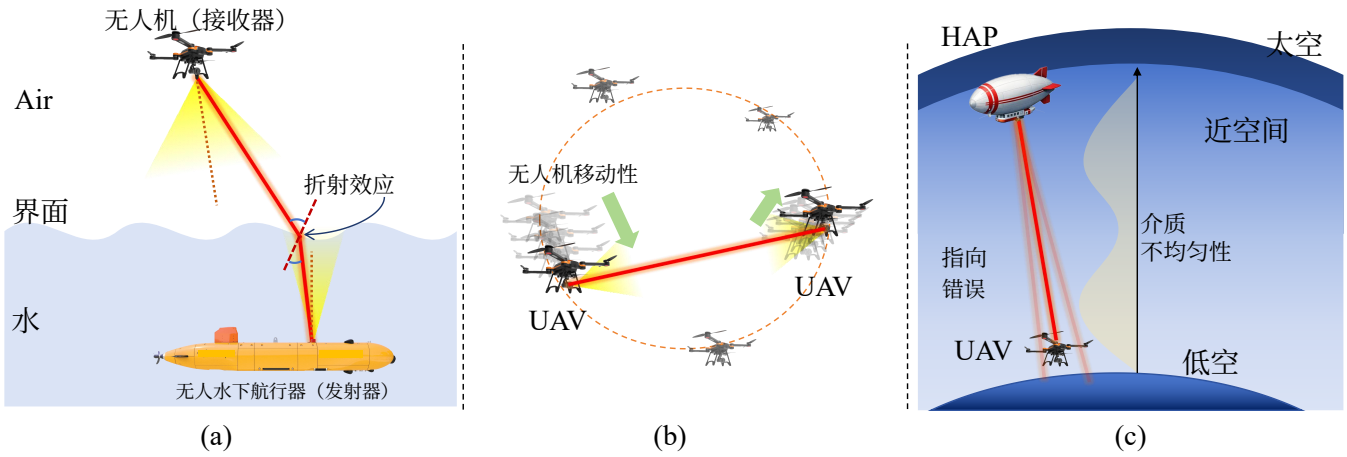


图 4. 光学 LAWN 系统中不同通信链路的光无线信道模型。(a) 水到空气直接光链路。(b) 动态低空平台之间的光无线链路。(c) 低空与近空间之间的自由空间光链路。

及其产生的气泡场 [10]。因此，能够在实际中有效考虑边界粗糙度和散射的波模型，是未来研究的一个重要方向。在传播建模方面，近期研究引入了几何光学模型和光子蒙特卡洛统计模拟器。然而，受简化假设和计算成本的限制，这些模拟器通常只能匹配受控实验室条件，无法可靠地外推至实际运行环境。因此，有必要开发忠实的跨界面模型以及计算高效的仿真流程。值得注意的是，近期已有少数研究探索了光场表述，以建立光无线通信模型，并进一步引入结构光来应对信道损伤。尽管以往研究仅考虑水下场景，这些方法仍有望扩展，或将成为另一个有前景的研究方向。

2）低空平台间信道：如图 4(b) 所示，低空平台间信道的核心问题在于通信两端均处于移动状态，这会导致频繁的指向变化和多普勒效应。该方向的研究仍处于起步阶段，且主要聚焦于双基地或单基地场景下的简化系统建模，而对两个动态移动终端之间通信信道的研究以及应对多普勒效应的方法仍然不足。随着低空空中网络的发展，动态空对空信道建模以及多普勒估计与补偿将成为重要的研究重点。

3）低空与近空间之间的自由空间光信道：如图 4（c）所示，低空与近空间之间的自由空间光信道面临的核心问题是信道介质的非均匀性，以及远距离通信中指向误差的放大。低空至近空间信道跨越多个特性各异的气象层，介质非均匀性和显著的大气湍流会导致信号衰减与散射 [14]。因此，建立一个覆盖多个气象层的非均匀信道模型是未来的研究方向之一。另一方面，低空与近空间平台之间的链路距离可达 10–100 km，即使轻微的角度失准也会转化为较大的位移。因此，精度应成为模型的首要考量。

总之，光无线信道建模将是一个复杂但重要的课题，并将长期作为一项研究议题。

B. 精确光束对准

在各种运行场景中，低空与近空间之间的链路在远距离上对指向误差极为敏感，而水空信道则会因海面动力学持续扰动有效界面而迅速变化。传统方案通常以四象限光电二极管（4QPD）和PID反馈控制为核心，在快衰落、突发扰动以及高度非平稳条件下难以有效应对 [6]。尽管近期研究已通过算法补偿、特定任务优化和智能增强提出了更为先进的方法，但对高灵敏度、环境自适应波束对准与跟踪技术的需求依然存在。一个可能的方向是感知驱动的自适应对准，即借助光学感知与通信一体化、光传感器阵列或基于视觉的反馈等感知技术来增强光链路。通过感知并估计信道与环境状态，并结合先验信道模型，该光束对准方案能够实现稳健的闭环控制，从而支持稳定的波束跟踪和持续对准。

C. 太阳噪声抑制

太阳噪声是开放环境中的光无线通信系统中所有暴露于阳光下的设备都会面临的常见挑战。由于阳光在宽广的光谱范围内携带大量能量，因此无法通过光学滤波将其完全抑制，并会通过直接照射、大气散射和海面反射影响接收器中的光敏传感器。高强度太阳噪声，例如

直接或反射的阳光，可能使光敏传感器饱和，从而阻断信号传输 [15]。因此，有必要通过波束转向避开直接或反射的太阳光路径。此外，大气散射噪声广泛存在，需要借助信号处理算法将其与信号分离。更重要的是，太阳噪声在上行链路和下行链路之间呈现出不对称性。由于方向和介质衰减存在差异，发射器和接收器所经历的太阳噪声水平及其统计特性也不同。因此，上行链路和下行链路不能简单地基于光路可逆性原理复用配置参数，而需要针对方向进行感知的太阳噪声自适应补偿。总之，太阳噪声抑制已成为一种普遍存在的系统级挑战。其实现与优化通常需要光学组件、信道建模、环境感知和信号处理算法之间的紧密协作，并且会显著影响系统中所有链路的性能。因此，太阳噪声抑制是光学低空空中无线网络的关键发展方向。

D. 物理层智能体智能

随着通信系统日趋复杂、低空边缘设备能力不断增强，本地智能体智能已不再仅仅可行，而是日益必要。这一趋势要求在边缘实现物理层智能，以支持信道状态感知、调制与波形自适应以及闭环协同控制。具体而言，物理层智能的瓶颈与其说在于峰值计算吞吐量，不如说在于严格时延与可靠性约束下的实时响应和严格正确性。这促使人们关注片上神经处理、高效推理流水线以及面向特定任务的应用感知智能。此外，为与高层应用和群体智能对接，跨协议层的跨层接口是一项关键发展重点。总之，物理层智能体智能构成光学低空空中无线网络的下一代基础，但仍有许多方向有待探索。

V. 结论

本文从系统性视角概述了光学低空网络，并分析了覆盖近空间、低空、地面和海洋场景的光无线网络结构所涉及的技术与开放性挑战。由于海洋场景独特，光无线通信有望成为低空网络的一种有效方案，可提供高速率传输或跨介质通信能力。然而，复杂的信道环境使这类系统的实现仍面临挑战。为解决这些问题，研究人员正在开发并应用一系列技术，包括光学一体化感知与通信、波束对准、自主组网以及联合位姿拓扑优化，涉及从物理层到网络层的各个方面。此外，人工智能和智能体终端设备的发展进一步提升了这类网络架构的优势。然而，仍有诸多问题亟待解决，包括信道建模、波束对准和环境影响补偿。这进一步凸显了该系统的改进潜力，也表明该领域仍存在值得进一步研究和探索的机遇。

参考文献

[1] H. Guo, J. Li, J. Liu, N. Tian, and N. Kato, “6G空天地海一体化网络安全综述,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 24, no. 1, pp. 53–87, 2022年11月. [2] F. S. Alqurashi, A. Trichili, N. Saeed, B. S. Ooi, and M.-S. Alouini, “海事通信：赋能技术、机遇与挑战综述,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 4, pp. 3525–3547, 2023年11月. [3] Z. Xiao, T. Mao, Z. Han, and X.-G. Xia, “近空间通信：空天地一体化网络中的新体制,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 29, no. 6, pp. 38–45, 2022. [4] J. Tang, Y. Yu, C. Pan, H. Ren, D. Wang, J. Wang, and X. You, “协作通感一体化赋能的低空经济,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 5, pp. 3837–3853, 2025年2月. [5] Y. Li, L. Wu, Z. Zhang, J. Dang, B. Zhu, X. Zhang, and Y. Wu, “面向无人机的感知辅助光无线通信,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 12, pp. 18 620–18 634, 2024年7月. [6] L.-K. Chen, Y. Shao, and Y. Di, “水下与水空光无线通信,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 40, no. 5, pp. 1440–1452, 2022年10月. [7] W. Fawaz, C. Abou-Rjeily, and C. Assi, “面向自由空间光通信系统的无人机辅助协作,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 56, no. 1, pp. 70–75, 2018 年 1 月 . [8] T. Mao, L. Zhang, Z. Xiao, Z. Han, and X.-G. Xia, “太赫兹频段近空间通信: 物理层视角,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 62, no. 2, pp. 110–116, 2024年2月. [9] M. Li, Y. Hong, C. Zeng, Y. Song, and X. Zhang, “无人机到卫星光通信系统研究,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 36, no. 9, pp. 2128–2138, 2018年8月. [10] T. Lin, C. Fu, T. Wei, N. Huang, X. Liu, L. Tang, L. Su, J. Luo, and C. Gong, “面向水空光无线通信的波动效应表征,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 41, no. 1, pp. 120–136, 2023 年 10 月 . [11] X. Hou, J. Wang, J. Du, C. Jiang, and Y. Ren, “面向自主智能体群体的分布式机器学习：综述,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 28, pp. 1597–1636, 2026年8月. [12] Z. Yang, C. Pan, M. Shikh-Bahaei, W. Xu, M. Chen, M. Elkashlan, and A. Nallanathan, “面向无人机使能通信的高度、波束宽度、位置与带宽联合优化,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 22, no. 8, pp. 1716–1719, 2018年6月. [13] Y. Wen, F. Yang, J. Song, and Z. Han, “基于直流偏置光正交频分复用的自由空间光集成感知与通信：性能指标与资源分配,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 2, pp. 2158–2173, 2025年9月. [14] S. Janji, A. Samorzewski, M. Wasilewska, and A. Kliks, “论无人机自由空间光回传中继的部署与可持续性,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 11, no. 8, pp. 1723–1727, 2022. [15] J. Zhang, G. Gao, B. Wang, X. Guan, L. Yin, J. Chen, and B. Luo, “采用法拉第原子线激光器与滤波器的抗背景噪声水下无线光通信,” *J. Lightw. Technol.*, vol. 40, no. 1, pp. 63–73, 2022年1月.