



综述

紫外光自组网研究现状与未来展望

郭嘉, 袁仁智, 王思明, 彭木根, 杨闯
(北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100876)

摘要: 紫外光自组网融合了紫外光通信背景辐射低、非视距 (non-line-of-sight, NLOS) 通信、局域保密性好、气候适应性强, 以及自组网快速部署和高度灵活性等优点, 成为紫外光通信实用化发展的关键。尽管目前紫外光自组网的研究已取得一定进展, 但仍然存在物理层双工模式下节点自干扰、数据链路层媒体接入控制 (media access control, MAC) 协议的节点能耗高和同步困难、网络层网络连通性不佳和路由协议扩展性较差的问题。基于此, 对紫外光自组网物理层、数据链路层及网络层的研究现状展开综述, 并展望其未来发展方向。

关键词: 紫外光自组网; 物理层; MAC 协议; 路由协议

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025034

Research status and future prospects on ultraviolet Ad-Hoc network

GUO Jia, YUAN Renzhi, WANG Siming, PENG Mugen, YANG Chuang
School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and
Telecommunications, Beijing 100876, China

Abstract: Ultraviolet Ad-Hoc network integrates the advantages of ultraviolet communication, including low background radiation, non-line-of-sight (NLOS) communication, high local security, and strong adaptability to various climatic conditions, along with the benefits of rapid deployment and high flexibility in Ad-Hoc network. These features make it a key technology for the practical development of ultraviolet communication. Although significant progress has been made in ultraviolet Ad-Hoc network research, several challenges remain. These include self-interference issues in the physical layer due to the full-duplex mode, node energy consumption and synchronization problems in the data link layer's media access control (MAC) protocol, and poor network connectivity and scalability of routing protocols in the network layer. Based on this, the research status in the physical layer, data link layer, and network layer of ultraviolet Ad-Hoc network were reviewed, and the future development directions were also prospected.

Key words: ultraviolet Ad-Hoc network, physical layer, MAC protocol, routing protocol

收稿日期: 2024-11-04; 修回日期: 2025-01-26

通信作者: 袁仁智, renzhi.yuan@bupt.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金青年项目 (No.62201075)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No.62201075)

0 引言

相较于传统的射频通信,无线光通信具有频谱资源丰富、抗电磁干扰、功耗低等优点。因此,无线光通信成为6G通信中热点场景高容量接入的潜在解决方案。根据频段划分,无线光通信可以分为可见光通信、红外光通信以及紫外光通信3种。可见光通信和红外光通信等传统无线光通信技术要求收发端严格对准以维持视距链路,部署灵活性受到限制。此外,受太阳背景辐射影响,传统无线光通信具有较高背景噪声。不同于传统无线光通信,紫外光通信天然具有以下4种特性。(1)由于太阳背景辐射中200~280 nm范围内的短波紫光(ultraviolet-C, UVC)被臭氧层吸收,因此紫外光通信具有背景辐射低的特点;(2)由于紫外光受大气强散射作用影响,能够改变传输路径实现非视距(non-line-of-sight, NLOS)传播,因此紫外光通信具备NLOS通信能力;(3)大气对紫外光强吸收作用导致紫外光信号的强度按距离的指数规律衰减,在未获知不可见紫外光发射源位置的条件下无法进行有效窃听,因此紫外光通信具有良好的局域保密性;(4)由于紫外光通信主要利用大气中气体分子、气凝胶实现NLOS通信,雨雾天气条件下散射颗粒的增加能够增强紫外光的散射效应,因此紫外光通信具有很强的气候适应性。综上,紫外光通信具有背景辐射低、NLOS通信、局域保密性好和气候适应性强等优点,可应用于如灾害救援、战场保密通信等各类场景^[1-2]。

然而,当前紫外光通信的研究主要集中在点对点通信,尚未广泛应用于多用户互联互通的复杂网络环境。多用户互联互通是紫外光通信的一项重要挑战,尤其是在一些典型的应用场景下,如何搭建无基础设施的临时网络尤为关键。在一些如灾区救援、军事通信等场合,紫外光通信需要在缺乏现有通信基础设施支持的情况下,通过

自组织方式构建起临时网络。这要求紫外光通信系统不仅要具备高效的通信能力,还要能够灵活应对不同的网络拓扑结构和环境条件。传统的移动通信组网技术无法完全适应这种动态、临时的需求。因此,为了解决以上问题,有必要开展紫外光自组网的研究。紫外光自组网可以在没有预先建设基础设施的情况下,快速建立临时网络,从而满足复杂地形下的多节点动态通信需求。

目前,紫外光自组网的研究仍处于初级阶段,面临诸多亟待解决的挑战,同时,现有研究成果尚缺乏系统性的总结与综合评述。本文旨在填补这一空白,系统性梳理现有紫外光自组网的研究,主要涵盖物理层、数据链路层和网络层关键问题的研究。物理层主要介绍物理层链路间干扰、节点覆盖性和节点设计方案这3个方面的关键问题;数据链路层主要聚焦媒体接入控制(media access control, MAC)协议;网络层主要介绍网络连通性和路由协议。此外,本文还基于现有相关技术发展趋势,提出紫外光自组网在物理层、数据链路层和网络层的未来发展方向。

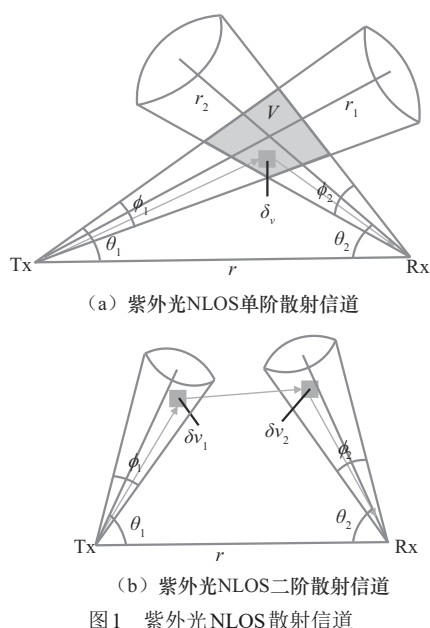
1 物理层

1.1 链路间干扰

紫外光NLOS散射信道如图1所示,其中, r 为发射端(transmit, Tx)到接收端(receive, Rx)的距离, θ_1 和 ϕ_1 分别为Tx的发射仰角和发散角, θ_2 和 ϕ_2 分别为Rx的接收仰角和视场角。发射的波束与接收端的视场在空间重叠,形成公共散射体区域 V , δv 为 V 中的任意一个微元体, r_1 和 r_2 分别为发射端到公共散射体的距离和公共散射体到接收端的距离。在紫外光NLOS单阶散射信道中,如图1(a)所示,信号经过公共散射体散射到达接收端,形成NLOS链路;在紫外光



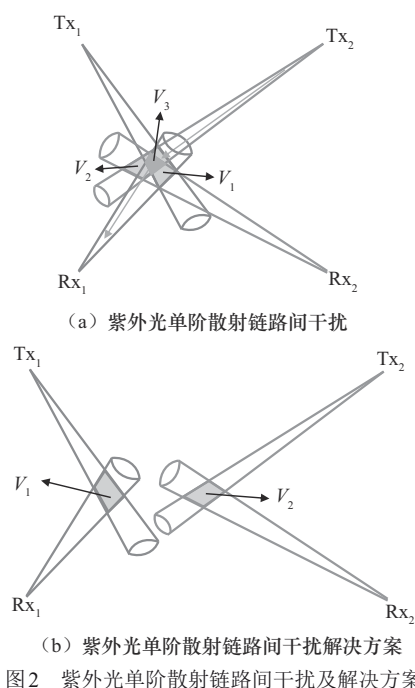
NLOS 二阶散射信道中, 如图 1 (b) 所示^[3], 2 个信号依次经过第 1 个散射点微元体 δv_1 和第 2 个散射点微元体 δv_2 , 到达接收端, 形成 NLOS 链路。



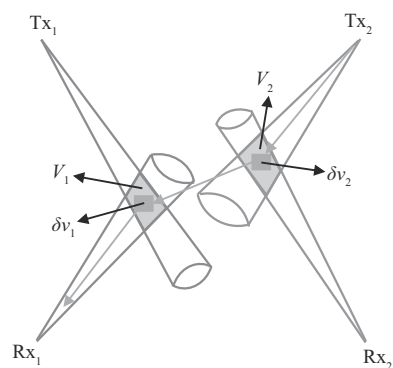
在紫外光自组网中, 多个发射端和多个接收端间 NLOS 链路的存在会导致链路间干扰问题。根据干扰信号考虑的散射阶数^[4-5], 链路间干扰可以分为单阶散射链路间干扰和多阶散射链路间干扰两种。在实际部署中, 单阶散射链路间干扰和多阶散射链路间干扰同时存在, 单阶散射链路间干扰强度一般大于多阶散射链路间干扰。

紫外光单阶散射链路间干扰及解决方案如图 2 所示。将 Tx_1 和 Rx_1 形成的紫外光 NLOS 链路视作当前通信链路, V_1 为相应的公共散射体; 将 Tx_2 和 Rx_2 形成的紫外光 NLOS 链路称为干扰链路, V_2 为相应的公共散射体。当通信链路和干扰链路同时传输信号时, V_1 和 V_2 会重叠形成通信链路和干扰链路共有的公共散射体 V_3 , Tx_2 发出的信号可经过公共散射体 V_3 散射到达 Rx_1 , 形成干扰信号。紫外光单阶散射链路间干扰可以通过空分复用来解决, 空分复用紫外光单阶散

射链路间干扰解决方案如图 2 (b) 所示, 只要通信链路和干扰链路的公共散射体在空间上无重叠部分, 干扰链路就无法对通信链路造成干扰。



紫外光多阶散射链路间干扰如图 3 所示, 以紫外光二阶散射链路间干扰为例, 当通信链路和干扰链路同时传输信号时, Tx_2 发出干扰信号依次经过第 1 个散射点微元体 δv_2 和第 2 个散射点微元体 δv_1 到达 Rx_1 。在紫外光 B 环境下, 通信链路和干扰链路无论采用何种收发几何配置均无法避免多阶散射链路间干扰。



在紫外光 NLOS 通信中路径损耗 L 随通信距离 r 呈指数增长, 短距离紫外光 NLOS 通信路径损耗可表示为^[6]:

$$L = \frac{P_t}{P_r} = \zeta r^\alpha \quad (1)$$

其中, P_t 为发射机的发射功率, 单位为 W; P_r 为接收机的接收功率, 单位为 W; ζ 为路径损耗因子; α 为路径损耗指数。

当采用开关键控 (on-off keying, OOK) 调制方式时, 考虑紫外光背景噪声低的特点, 可以使用泊松信道模型来计算到达接收端光子数的概率分布。在等先验发送概率情况下, 接收节点的误码率为^[7]:

$$P_e = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{m_{th}} \frac{(\lambda_s + \lambda_i)^k e^{-(\lambda_s + \lambda_i)}}{k!} + \frac{1}{2} \sum_{k=m_{th}+1}^{\infty} \frac{\lambda_i^k e^{-\lambda_i}}{k!} \quad (2)$$

其中, $m_{th} = \left\lfloor \frac{\lambda_s}{\ln(1 + \lambda_s/\lambda_i)} \right\rfloor$ 为最佳阈值, $\lambda_s =$

$\frac{\eta_1 \eta_2 P_t}{L_s R_b h \nu}$ 为接收到信号光子数的平均值, $\lambda_i = \sum_{j=1}^K \frac{\eta_1 \eta_2 P_i^j}{L_i^j R_i^j h \nu}$ 为接收到干扰光子数的平均值, η_1 为

光电倍增管 (photomultiplier tube, PMT) 探测效率, η_2 为光滤波片效率, L_s 为发射端到接收端的路径损耗, R_b 为发射端的比特传输速率, h 为普朗克常数, ν 为发射端的频率 (单位为 Hz), K 为干扰的数量, P_i^j 为第 j 个干扰的发射功率, L_i^j 为第 j 个干扰到达接收端的路径损耗, R_i^j 为第 j 个干扰的比特传输速率。若系统只有 1 个干扰源, 可以简化为 $\lambda_i = \frac{\eta_1 \eta_2 P_i}{L_i R_i h \nu}$ 。

此外, 如果不存在多用户干扰问题, 即 $\lambda_i = 0$ 或者最佳阈值 $m_{th} = 0$, 则误码率可以简化为:

$$P_e = \frac{1}{2} e^{-\lambda_s} = \frac{1}{2} \exp \left(- \frac{\eta_1 \eta_2 P_t}{\zeta_s R_b h \nu} r^{-\alpha_s} \right) \quad (3)$$

其中, ζ_s 为信号路径损耗因子, α_s 为信号路径损

耗指数。

若将多用户干扰视作一种特殊的噪声, 链路间干扰造成的影响可以使用 P_e 来量化。文献[6]研究发现, 减小接收端的接收仰角和干扰端的发射仰角可以降低非共面链路间干扰; 文献[7]研究发现, 增加发射功率或减小比特传输速率可以降低 P_e ; 文献[8]借助时分复用技术, 给干扰节点分配不同时间隙, 从而避免了紫外光自组网中的干扰问题; 文献[9]研究了不同发射端和接收端共址情况下的链路间干扰问题, 数值仿真结果表明, P_e 随距离线性增加, 相比于发散角, P_e 对视场角的变化更敏感; 文献[10]研究了无人机访问地面传感器网络的干扰情况, 并推导了存在干扰的情况下上行链路机载紫外光通信的误码率; 文献[11]分析了紫外光通信中存在的共面干扰、非共面干扰以及非共面且存在高度差干扰下的链路间干扰模型, 仿真结果表明, 在非共面且存在高度差干扰的情况下, 当干扰链路在通信链路上方时, P_e 随发散角增大而减小, 随发射仰角增大而增大, 随接收仰角的增大先减小后增大且逐渐趋于平缓, 当干扰链路在通信链路下方时, P_e 随发散角增大而增大, 随发射仰角的增大先减小后增大, 随接收仰角的增大先减小后增大。

1.2 节点覆盖性

为保证节点间传输的可靠性, 节点间建立的通信链路应该满足预先设置的误码率要求。由式 (5) 可知, 误码率 P_e 和节点间传输距离 r 正相关。设恰好满足预先设置误码率要求 P_e' 的传输距离为 r_{th} , 当 $r > r_{th}$ 时, $P_e > P_e'$ 将难以保障通信链路对误码率的要求; 当 $r \leq r_{th}$ 时, $P_e \leq P_e'$ 能够满足通信链路的误码率要求。因此, 紫外光自组网的节点覆盖范围主要取决于满足节点设计误码率要求的最大节点间传输距离, 即节点最大覆盖半径。节点最大覆盖半径主要受噪声模型和调制方式的影响。常用的紫外光通信调制技术有 OOK 调制和



脉冲位置调制 (pulse-position modulation, PPM), 噪声模型的选择取决于检测方法和背景噪声。具体来说, 当采用基于光子计数的检测, 并且光电探测器中的暗电流或背景照明引起的噪声保持在较低水平时, 噪声服从泊松 (Poisson) 分布, 采用 OOK 调制方式时节点最大覆盖半径可表示为^[12]:

$$r_{\text{OOK,P}} = \sqrt{\frac{\eta P_t}{h\nu\zeta R_b \ln(2P_e)}} \quad (4)$$

其中, η 为光滤波器和光电探测器的量子效率, P_t 为发射功率 (单位为 W), h 为普朗克常数, ν 为发射端的频率 (单位为 Hz), ζ 为 PMT 的响应性, R_b 为比特传输速率, P_e 为误码率。采用 PPM 方式时节点最大覆盖半径可表示为^[12]:

$$r_{\text{PPM,P}} = \sqrt{\frac{\eta P_t \ln M}{h\nu\zeta R_b \ln \frac{MP_e}{M-1}}} \quad (5)$$

其中, M 为 PPM 符号长度。

当背景噪声以热噪声占主导时, 噪声服从高斯 (Gaussian) 分布。采用 OOK 调制方式时节点的最大覆盖半径为^[12]:

$$r_{\text{OOK,G}} = \sqrt{\frac{\eta P_t}{\zeta \sqrt{N_0 R_b} Q^{-1}(P_e)}} \quad (6)$$

采用 PPM 方式时节点的最大覆盖半径可表示为^[12]:

$$r_{\text{PPM,G}} = \sqrt{\frac{\eta P_t}{\zeta Q^{-1}(P_e)}} \sqrt{\frac{M \ln M}{2N_0 R_b}} \quad (7)$$

其中, $Q(x)$ 为标准正态分布的互补累积分布函数, 定义为 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt$, $N_0 = q\zeta N_n h\nu$ 为白噪声功率谱密度, q 为电荷量, N_n 为噪声光子计数率。

现有紫外节点覆盖性的研究主要集中于噪声模型和调制方式对节点最大覆盖半径的影响。文献[12]分析了不同节点数量和不同调制方式下高斯噪声模型的节点最大覆盖半径; 文献[13]研究发现, 在泊松噪声模型下, 采用 PPM 方式的紫外光网络节点最大覆盖半径优于采用 OOK 调制方式的紫外光网络节点最大覆盖半径; 文献[14]仿真分析了采用泊松噪声模型时, 最小可达距离随收发仰角的减小而增大。

1.3 节点设计

NLOS 通信典型收发端几何配置模式如图 4 所示。根据发散角 ϕ_1 、发散仰角 θ_1 、视场角 ϕ_2 和接收仰角 θ_2 的不同所形成的公共散射体 V 的不同, NLOS 紫外光散射通信的收发端几何配置模式可以分为 NLOS-a 模式、NLOS-b 模式和 NLOS-c 模式。NLOS-a 模式是全向发送-全向接收模式, NLOS-b 模式是定向发送-全向接收模式, NLOS-c 模式是定向发送-定向接收模式。

当发射端波束和接收视场的轴线仰角均为 90° 时, 能够以 NLOS-a 模式实现紫外光自组网。然而, NLOS-a 模式不仅功率利用率低, 还会引入更多的链路间干扰。针对此问题, 文献[15]设计了一种半球形紫外光 NLOS-b 节点装置, 如图 5 所示, 发射装置由多个紫外光 LED 组成, 接收

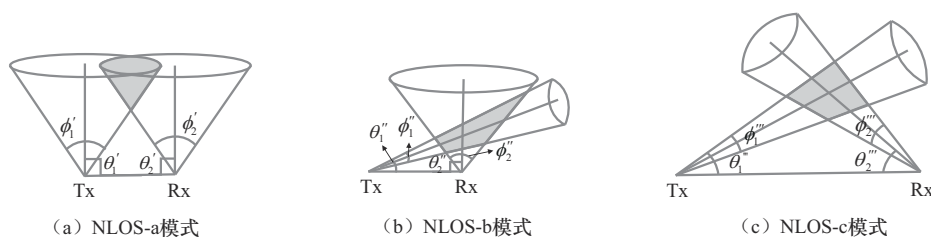


图4 NLOS通信典型收发端几何配置模式

装置全部垂直地面指向天空，根据接收装置相对发射装置的位置，选择发射装置中合适的紫外光 LED 发射紫外光信号，其他的紫外光 LED 不发射紫外光信号，这种节点设计具有操作简单的优点；文献[16]设计了一种棱台形紫外光 NLOS-b 节点装置，如图 6 所示，侧面是紫外光 LED 发射器，发射器可由多个同时发射的 LED 组成，顶部是全向光子探测接收器，这种节点设计方案同样采用 NLOS-b 模式；文献[17]提出了一种可旋转节点设计方案，如图 7 所示，将紫外 LED 和 PMT 以长方体棱为边界，分别安置在一对相邻面的两侧，通过伺服电机旋转该长方体结构，可以在紫外光视距通信和 NLOS 通信模式间切换，从节点还能够根据主节点发送的信息调整转速和相位，由于主从节点的收发装置一致，因此主从节点可以互换，能够实现理想紫外光自组网。

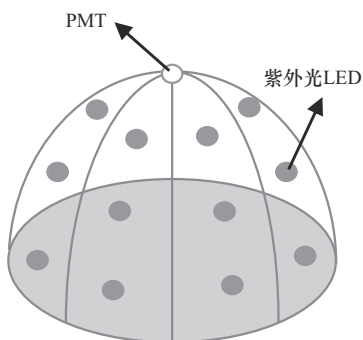


图5 半球形紫外光 NLOS-b 节点装置

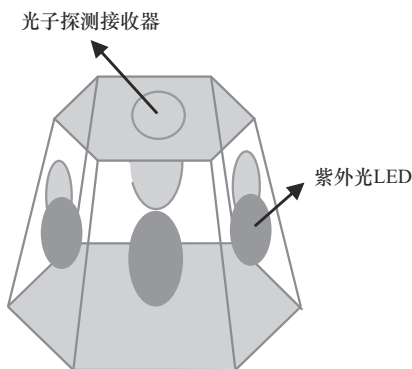
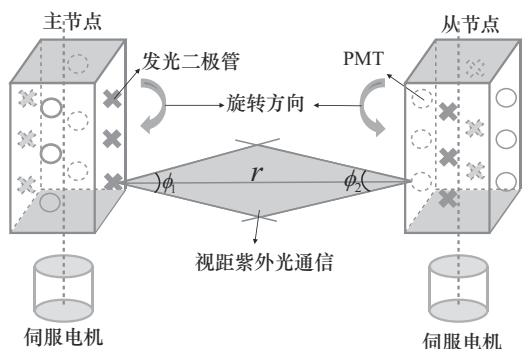
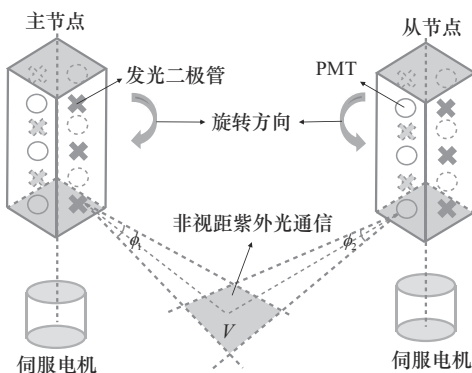


图6 棱台形紫外光 NLOS-b 节点装置



(a) 紫外光视距通信



(b) 紫外光 NLOS 通信

图7 可旋转节点设计方案

1.4 物理层未来研究展望

受紫外光多阶散射的影响，紫外光自组网各节点间存在链路间干扰。现有研究表明，链路间干扰会造成误码率的恶化，可以使用交替迭代牛顿法来联合优化每个中继节点的位置和发送功率，并使用空分耦合的全双工中继配置来降低链路间干扰的影响^[18]。从信号处理层面分析，对于链路间干扰问题可以使用抗干扰能力更强的正交频分复用调制技术；从信道特性层面分析，可以使用强化学习方法实时分析紫外光链路间的干扰情况，动态调整收发端参数，减轻链路间干扰；从环境影响层面分析，可以考虑大气湍流对紫外光通信的影响，从而建立湍流影响下的链路间干扰模型^[19-20]。

节点覆盖性可以采用节点最大覆盖半径来表征，节点最大覆盖半径受噪声模型和调制方式的影响。现有研究主要是在无多用户干扰情况下研



究节点的最大覆盖半径,未来可以研究在多用户干扰情况下的节点最大覆盖半径。此外,未来还可以使用误码率小的正交频分复用调制技术,以扩展节点的覆盖范围。同时,紫外光自组网可以使用自适应光学系统,通过动态调整收发仰角,并根据环境条件优化光束的传播路径,进而增大节点最大覆盖半径。

对于紫外光移动自组网通信节点设计,目前的设计可以实现视距紫外光通信系统和NLOS紫外光通信系统,尽管已有研究从理论层面给出了节点设计并通过仿真探究了可行性,但是仍停留在理论设计阶段,鲜有研究对节点设计展开实验。未来,关于紫外光移动自组网通信节点设计可能基于已有设计开发对应紫外光自组网节点通信设备,并且在不同的环境条件下测试性能,根据实际检测过程中出现的问题,再进行设计的不断改进。

2 数据链路层

MAC协议在紫外光网络中起着至关重要的作用,它负责协调和管理节点间的通信,方便自组网进行合理的资源分配和调度,并管理冲突和控制功率,以保障服务质量(quality of service, QoS),延长网络寿命和稳定性。

2.1 MAC协议

无线网络MAC协议根据媒介访问的策略,可以分为竞争型和无竞争型两类。无竞争型MAC协议由于预先定义和分配了媒介,使得节点可以在不竞争媒介的情况下进行传输,如时分多址(time division multiple access, TDMA)、码分多址(code division multiple access, CDMA)、频分多址(frequency division multiple access, FDMA)、轮询以及基于令牌方案。无竞争型MAC协议通常具有较低的通信时延和最小的带宽占用,从而能够为如音频和视频流传输等时延敏感的业务提供优先级。竞争型MAC协议也被称为随机访问

协议,网络中的各节点会在通信时竞争信道资源,竞争过程可能会导致多个节点同时竞争同一个信道资源,形成其余信道的长时间空闲,进而导致信道资源的浪费。考虑紫外光自组织具有动态的网络拓扑结构,竞争型MAC协议更适合紫外光自组网中节点加入后的突发数据流传输。因此,现有紫外光自组网的MAC协议多为竞争型。

紫外光自组网冲突避免信道接入协议(ultra-violet Ad-Hoc collision avoidance channel access protocol, UVCA)是一种竞争型MAC协议,UVCA工作流程如图8所示。紫外光节点的Light和Dark状态分别用信号位“0”和“1”来表示,信道有两种状态,当多个节点工作时,信道为Light状态,当所有节点都不工作时,信道处于Dark状态。只有节点控制帧的每一位都和信道状态相符合时,节点才能在控制帧发送完成后传输数据。该协议首先令每个节点持续监听信道,当信道保持Dark状态的持续时间超过分配的帧间空隙(distributed inter-frame space, DIFS)时,节点将启动控制帧的传输,控制帧由随机退避指数和优先级控制帧组成。控制帧传输前,节点根据“AND-OR”逻辑条件检查控制帧指定节点的发光状态是否与信道的空闲状态匹配,如果发光状态和信道状态一致,则节点发送数据。如果不一致,节点的竞争窗口值减少1,竞争窗口的初始值为 M ,如果竞争窗口值减小到0,则该值将保持在0处,直到节点成功竞争信道。一旦节点竞争信道成功以后,竞争窗口将重置为 M ,并为节点分配新的随机退避指数。最后,节点重新开始信道监听。

竞争型MAC协议的研究主要关注竞争机制和退避算法。文献[21]针对紫外光自组网中节点间信道资源占用不公平的问题,提出了一种基于退避计数器值的退避算法,根据退避计数器值的随机选取是否合理,采取相应的奖励与惩罚机制,以提升节点的公平性,但是该协议没有考虑紫外光的物理层特性;文献[16]考虑了紫外光通信

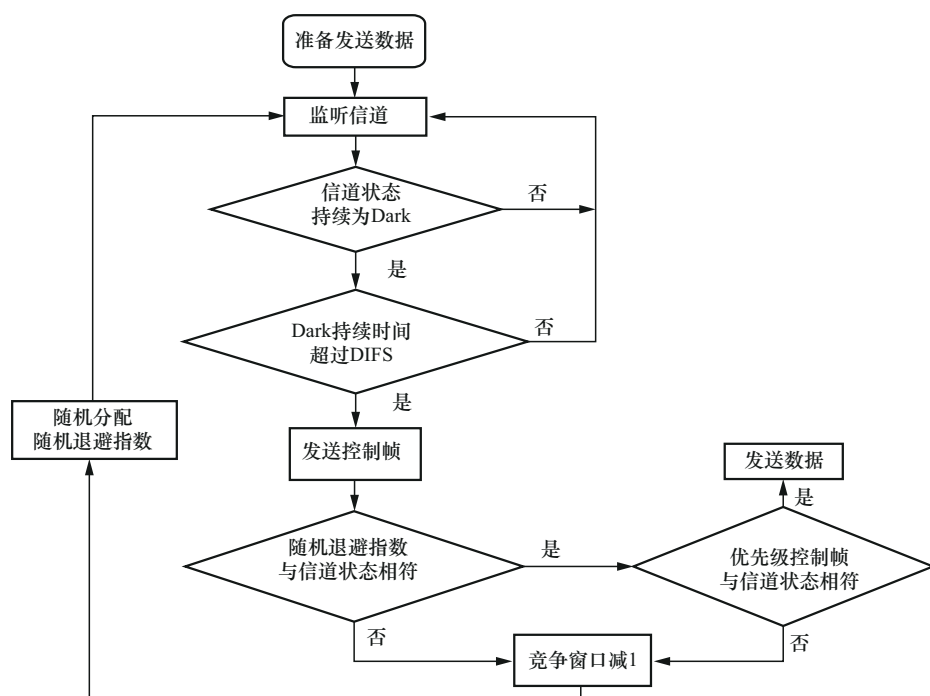


图8 UVCA工作流程

的物理层特性，提出了一种紫外光户外通信的MAC协议，各节点采用空分复用技术，从而提高了网络的吞吐量并降低了碰撞概率；文献[22]提出了一种基于紫外物理层特性的无损竞争MAC协议，利用紫外物理层的光功率叠加机制，为不同数据服务赋予不同优先级，相比时隙Aloha协议具有更高的吞吐量和更低的丢包率；文献[23]结合同步通信和异步通信的优点提出了一种基于TDMA的紫外光随机接入协作网络协议，通过动态时隙分配，以较低的时延和丢包率获得了较高的吞吐量。

此外，紫外光自组织网MAC协议设计还需要考虑各节点采用不同NLOS模式导致的通信覆盖问题。现有紫外光组织网络的研究主要参考射频通信的MAC协议，射频通信MAC协议可以分为基于全向天线的MAC协议和基于定向天线的MAC协议。在各节点采用NLOS-a模式的条件下，自组网可使用全向MAC协议。当节点采用NLOS-b或NLOS-c模式时，节点仅能覆盖某个区域方向内的节点，无法使用基于全向天线的

MAC协议，且基于定向天线的MAC协议需要节点具备在定向和全向模式间切换的能力，因此射频通信的定向MAC协议不适用于NLOS-b或NLOS-c模式的自组网。此外，受NLOS-b或NLOS-c模式下节点仅能定向覆盖特定区域的影响，节点间通信可能出现“耳聋”问题。具体来说，当覆盖区域以外的节点向主节点发送消息时，主节点无法接收到该节点设置的有向网络分配矢量（directional network allocation vector, DNAV），导致发送失败，退避窗口不断增加，进一步导致覆盖区域以外的节点判定主节点不可达，主节点就成了该节点的“耳聋”节点。

现有研究面向紫外光自组网MAC层存在的“耳聋”问题，根据基于定向天线的MAC协议设计了适用于各节点采用NLOS-b或NLOS-c模式的紫外光自组网协议。文献[24]针对各节点采用NLOS-b模式的自组网，提出了一种基于角度感知的定向MAC协议，该协议根据邻居表中记录的邻居节点、接口号和发送仰角等信息更新DNAV表，采用DNAV值为0的接口方向，避免了“耳



聋”节点的出现；文献[25]针对各节点采用NLOS-c模式的自组网，提出了基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向MAC协议，该协议通过在每个簇首节点上安装多个不同方向的紫外收发机，实现了多信道信息交换，从而明显缓解了“耳聋”问题。

2.2 数据链路层未来研究展望

目前，对于数据链路层的研究主要集中在MAC协议的信道访问冲突问题以及公平性与优先级管理问题上。未来，对MAC协议的研究应注重节点能耗管理和同步问题，且未来数据链路层会结合紫外光定位技术发展出更加灵活的调度机制^[26]，这种机制将根据节点间的距离和收发端的仰角等参数动态调整传输时序，或灵活地选择不同的传输模式，如LOS传输或NLOS传输。此外，未来数据链路层可能结合物理层和网络层研发出更高效的MAC协议，如MAC协议可以获取物理层的信道状态信息，并基于此动态调整数据包大小、传输速率和重传策略。此外，MAC协议还可以根据网络层的路由信息，优化局部链路的传输性能。同时，未来的数据链路层也可能结合机器学习设计出更智能的MAC协议，通过引入基于人工智能的自适应算法，节点可以根据历史通信数据和实时环境信息进行决策优化，动态调整传输速率、时延和功率控制，以应对变化的通信环境，从而进一步提升数据链路层的性能和适应性。

3 网络层

网络连通性是网络层的重要性能指标，直接

关系到整个紫外光自组网的畅通与高效运行，网络连通性保证了节点之间能够顺利交换信息，避免网络中断或数据包丢失，从而确保了网络的稳定性和持续性；路由协议负责确定数据包的下一跳路由，并且通过优化路由选择和动态调整路径有效应对拓扑变化和链路不稳定性，最大化网络的吞吐量和传输效率。紫外光自组网的网络层研究主要集中在网络连通性优化和路由协议设计两个方面。

3.1 网络连通性

若将紫外光自组网中的 n 个节点视作顶点，节点之间的紫外光通信链路视作边，则紫外光自组网拓扑结构可以表示为一个顶点集为 V 、边集为 E 的无向图 G 。其中，节点度 $d(u)$ 定义为节点的连边数， G 的最小度 $d_{\min}$ 定义为图 G 中所有节点度的最小值，全连通网络定义为网络中任意一对节点之间至少存在1条途径。当网络中所有节点采用相同的传输模式时，紫外光自组网全连通概率 P 取决于每个节点的节点密度 ρ 和节点最大覆盖半径 r_0 ，表示为^[12]：

$$P(d_{\min} > 0) = \left(1 - e^{-\pi \rho r_0^2}\right)^n \quad (8)$$

当噪声服从泊松分布，采用OOK调制方式时，将式(4)代入式(8)，可得紫外光自组网全连通概率为：

$$P(d_{\min} > 0) = \left[1 - \exp\left(-\pi \rho \left(-\frac{\eta P_t}{h\nu \zeta R_b \ln(2P_e)}\right)^{\frac{2}{\alpha}}\right)\right]^n \quad (9)$$

紫外光自组网 $d_{\min} \geq k$ 的概率为：

$$P(d_{\min} \geq k) = \left[1 - \sum_{i=0}^{k-1} \frac{\left(\pi \rho \left(-\frac{\eta P_t}{h\nu \zeta R_b \ln(2P_e)}\right)^{\frac{2}{\alpha}}\right)^i}{i!} e^{-\pi \rho \left(-\frac{\eta P_t}{h\nu \zeta R_b \ln(2P_e)}\right)^{\frac{2}{\alpha}}}\right]^n \quad (10)$$

节点采用的收发几何配置模式的方向性会对紫外光自组网的网络连通性造成影响,紫外光自组网独特的散射链路间干扰会影响节点的最大覆盖半径,进而影响网络连通性。文献[12]研究了各节点采用NLOS-a模式的紫外光自组网,仿真发现,采用PPM比采用OOK调制的紫外光自组网具有节点密度小、连通性高的特点,通过增加发射功率和减小传输速率可以提高紫外光自组网连通性;文献[13]研究发现,NLOS-b模式比NLOS-a模式具有更好的网络连通性,仿真结果表明,NLOS-c模式下,发散角为 10° 时比发散角为 17° 时的网络连通性高。然而,上述研究均局限于静态的网络连通性分析,并不适用于移动紫外自组网的分析。文献[27]研究了采用NLOS-a模式的紫外光无人机网络的连通性,采用随机路点模型(random waypoint model, RWP)和圆周运动模型(circle movement based model, CMBM)来表征无人机的运动,并分析了紫外光网络的 k 连通性概率的近似值;文献[14]在RWP框架下研究了3种模式下紫外光网络的 k 连通性,发现在相同的通信参数下,NLOS-c模式的紫外光网络连通性优于NLOS-a模式和NLOS-b模式;文献[28]研究了无人机与地面节点组成的紫外光网络的空地连通概率,发现增大发射机发散角可以提升网络的连通概率;文献[29]研究发现,使用定向天线阵列的紫外光自组网连通性优于使用全向天线的紫外光自组网,并使用迭代节点分配和功率控制算法分析了一个采用定向天线阵列的两层自组网^[30]。

3.2 路由协议

路由协议主要用于建立从源节点到目的节点之间的可达路径,实现紫外自组网节点间的数据传输。由于节点间建立的紫外光链路容易受到大气吸收、散射和湍流的影响,紫外自组网的网络拓扑具有动态变化特性,因此,无线自组网路由协议无法直接用于紫外光自组网。目前主要针对

两种紫外光自组网应用场景展开路由协议的研究,一类是地面紫外光自组网,另一类是机载紫外光自组网。地面紫外光自组网路由协议一般用路由请求(route request, RREQ)和路由回复(route reply, RREP)两种报文寻找、建立路由。机载紫外光自组网路由协议的特点在于使用分簇结构构造路由表,整个通信网络由若干个簇组成,将执行相同任务的3~5架飞行器组成一个集群。每个集群中的飞行器划分成长机、簇首僚机和成员僚机3个部分。长机负责任务决策,是指挥控制中心;每个集群中的领航飞行器作为簇首僚机,负责与其他飞行编队和长机进行通信;成员僚机服从簇首僚机的命令和控制。

多播自组网按需距离矢量(multicast Ad-Hoc on-demand distance vector, MAODV)路由协议,具有协议过程简单、存储开销小的特点,因此被首先应用于紫外光自组网,MAODV路由协议工作流程如图9所示。MAODV路由协议主要由路由路径的建立和路由维护两部分组成。在路由路径的建立过程中,首先进行路由请求,源节点向目的节点发送RREQ消息,相邻节点收到RREQ包后,先在路由表中查找是否有到目的节点的路由,若存在目的节点路由,则将路由信息写入RREP包发回源节点;若没有目的节点路由,则目的节点路由对应的跳数加1,再将RREQ转发给邻节点。若一个节点收到多个RREQ请求数据包,则按照到达时间顺序设定处理的优先级,若新到的RREQ跳数较少,则更新RREQ包并广播,然后建立反向路由。节点在转发RREQ包的同时,会在路由表中为源节点建立反向路由入口,记录RREQ包中的相关信息并设置路由定时器。若在设定周期内未使用,则将该路由作为备选路由。最后,路由协议执行路由回复过程,当节点明确目的节点的路由或其自身为目的节点时,会沿RREQ路径反向发送RREP消息,源节点收到RREP消息后正向路由即成功建立。在路

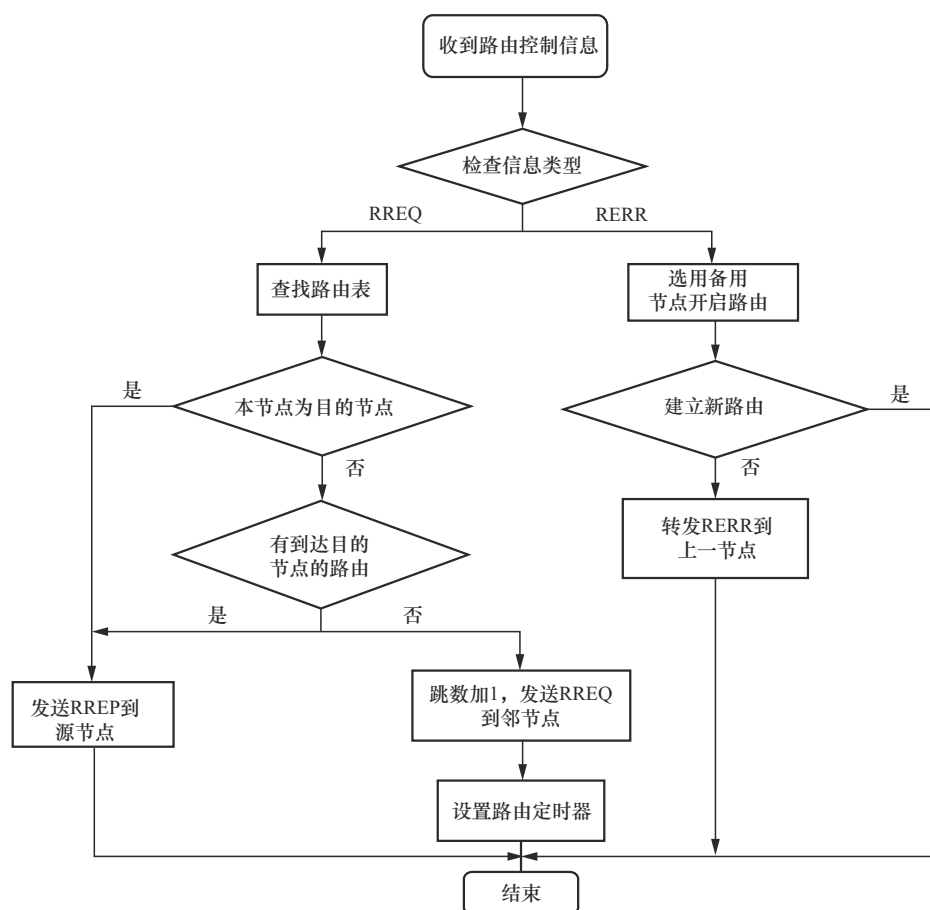


图9 MAODV路由协议工作流程

由维护过程中, 已建立的路由会一直被维护, 直到源节点不再需要为止。此外, 考虑自组网节点可能存在相对移动, 节点移动下路由协议的维护主要分为两种类型。若源节点移动, 则重新建立路由路径; 若非源节点移动, 受影响的源节点会收到连接失败消息, 即路由错误报告 (routing error report, RERR), 并在断开节点处选用备用节点开启路由。如果所有备用节点都无法建立新路由, 则沿断开节点向上发送 RERR, 直到成功建立新路由或重新启动路由发现过程。

在地面紫外光自组网场景下, 文献[31]基于 MAODV 路由协议, 提出了紫外光空分复用自组网路由协议, 仿真验证了该路由协议的有效性; 文献[32]针对 MAODV 路由协议存在的性能限制, 提出紫外光自组网按需多径距离矢量 (Ad-Hoc

on-demand multipath distance vector, AOMDV) 路由算法, 该算法通过在多条路径中选择一条作为主路径其余作为备份路径的方式, 实现了路径断裂时的快速切换, 相比 MAODV 路由协议, AOMDV 路由算法在节点数目多、运动区域大、最大移动速度高的场景下, 具有显著优势; 文献[33]针对在紫外光通信网络场景下的网络传输时延高和节点能量消耗不均衡等问题, 提出了一种基于改进蚁群算法的路由协议, 在状态转移概率公式中引入了网络节点能量, 以优先选择节点能量大的节点作为下一跳节点, 延长了网络的生存周期。

在机载紫外光自组网路由协议研究方面, 文献[34]针对传统动态源路由 (dynamic source routing, DSR) 协议在高速移动的机载紫外自组网场

景下无法适应网络拓扑快速变化的问题,提出了紫外光链路性能动态源路由 (ultraviolet link performance dynamic source routing, UV-PDSR) 协议,设计了考虑紫外链路状态和节点状态的权重因子,数值仿真结果表明,该协议有效提高了分组传输成功率,降低了端到端平均时延,更适合高速移动的机载紫外通信网络;文献[35]针对强电磁干扰和复杂环境的无人机蜂群协同作业问题,提出了一种无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法,引入了距离和能量两个因子,改进了候选簇首选举阈值,在簇间通信中综合考虑通信能耗和节点能量,通过构建路径权值函数选择最佳中继节点进行数据转发,有效平衡了无人机蜂群网络节点的能量消耗,延长了网络的生存时间。

3.3 网络层未来研究展望

目前紫外光自组网的连通性研究主要限定在 NLOS-a、NLOS-b 和 NLOS-c 3 种共面的收发几何配置模式下,实际紫外光自组网中发射端波束轴线和接收端视场轴线在地面上的投影会偏离收发端连线,形成非共面的收发几何配置^[36],现有研究会在此类场景下失效。因此,未来有必要对非共面收发几何配置下的紫外光自组网连通性展开分析。此外,未来紫外光自组网还可以考虑采用动态的节点密度管理,通过在网络中引入密集和稀疏区域,确保在不同环境下都能够维持稳定的网络连通性。

紫外光自组网对于路由协议的研究集中在网络拓扑动态变化时的路由维护和能耗问题,未来对路由协议的研究可以考虑拓扑控制与协议的扩展性。对于路由协议的扩展性研究,需要使用可以显著提高通信效率和数据传输速率的双工模式,但是紫外光自组网采用双工模式还需要考虑自干扰的影响^[37]。自干扰是指在同一节点的发送信号可能经过多阶散射,被当前节点的接收机接收形成干扰,这种干扰会降低通信质量,影响网

络的性能。未来的研究可以在路由协议中加入自干扰的制约因素。例如,在路由协议中,可以考虑节点的自干扰能力和通信质量,选择最优的传输路径,以提高网络的性能。此外,还可以根据紫外光通信自干扰的特点,研究新路由协议。例如,可以设计一种基于预测的自干扰管理机制,通过预测节点的自干扰情况,提前进行信道切换或调整发送功率,以减少自干扰的影响。

4 结束语

紫外光自组网作为一种新型的网络技术,具有广泛的应用前景,为未来的通信领域开辟了更多的可能性。然而,目前紫外光自组网的研究仍处于初级阶段,面临诸多挑战和待解问题。本文综述了紫外光自组网在物理层、数据链路层以及网络层的关键技术,并展望了这些层级的未来研究方向,旨在为紫外光自组网提供一个系统的参考框架,推动紫外光自组网技术的进一步发展与应用。

参考文献:

- [1] 彭木根,袁仁智,王志峰,等. 紫外光通信:原理、技术与展望[J]. 北京邮电大学学报, 2022, 45(3): 13-18.
PENG M G, YUAN R Z, WANG Z F, et al. Ultraviolet communication: principle, techniques, and prospects[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2022, 45(3): 13-18.
- [2] YUAN R Z, MA J S. Review of ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. China Communications, 2016, 13(6): 63-75.
- [3] 袁仁智,王志峰,彭木根. 紫外光通信散射信道模型分析与发展现状[J]. 电信科学, 2021, 37(6): 45-54.
YUAN R Z, WANG Z F, PENG M G. Analysis and status of the scattering channel model for ultraviolet communications[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(6): 45-54.
- [4] YUAN R Z, MA J S, SU P, et al. An integral model of two-order and three-order scattering for non-line-of-sight ultraviolet communication in a narrow beam case[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2366-2369.
- [5] YUAN R Z, MA J S, SU P, et al. Monte-Carlo integration models for multiple scattering based optical wireless communication[J].



- IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(1): 334-348.
- [6] 赵太飞, 张爱利, 金丹, 等. 无线紫外光非视距通信中链路间干扰模型研究[J]. 光学学报, 2013, 33(7): 706023.
- ZHAO T F, ZHANG A L, JIN D, et al. Research on the inter-link interference model in wireless ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(7): 706023.
- [7] JIANG X J, LUO P F, ZHANG M. Performance analysis of none-line-of-sight ultraviolet communications with multi-user interference[C]//Proceedings of the 2013 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Piscataway: IEEE Press, 2013: 199-203.
- [8] 李济波, 吴晓军, 王红星, 等. 紫外光非直视通信抗干扰中继链路方法及其功率需求分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(3): 30601.
- LI J B, WU X J, WANG H X, et al. Anti-interference relayed link method and power requirement analysis for ultraviolet non-line-of-sight communication[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(3): 30601.
- [9] SONG P, KE X Z, SONG F, et al. Multi-user interference in a non-line-of-sight ultraviolet communication network[J]. IET Communications, 2016, 10(13): 1640-1645.
- [10] TADAYYONI H, ARDAKANI M H, HEIDARPOUR A R, et al. Ultraviolet communications for unmanned aerial vehicle networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2022, 11(1): 178-182.
- [11] 赵太飞, 马倩文, 赵毅. 无线紫外光通信干扰链路性能研究[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(9): 433-439.
- ZHAO T F, MA Q W, ZHAO Y. Research on performance of wireless ultraviolet communication interference link[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2023, 60(9): 433-439.
- [12] VAVOULAS A, SANDALIDIS H, VAROUTAS D. Connectivity issues for ultraviolet UV-C networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(3): 199-205.
- [13] 赵太飞, 王玉, 高英英. 无线紫外光非视距通信网络的连通性能研究[J]. 光电子·激光, 2015, 26(1): 68-74.
- ZHAO T F, WANG Y, GAO Y Y. Connectivity performance analysis of UV-NLOS communication network[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2015, 26(1): 68-74.
- [14] LI C, LI J H, XU Z Y, et al. Study on the k-connectivity of UV communication network under the node distribution of RWP mobility model in the arbitrary polygon area[J]. IEEE Photonics Journal, 2020, 12(4): 7903912.
- [15] 赵太飞, 柯熙政, 冯艳玲. 大气日盲紫外无线光组网技术研究[J]. 光通信技术, 2010, 34(7): 50-53.
- ZHAO T F, KE X Z, FENG Y L. Technology research in the solar blind ultraviolet wireless network[J]. Optical Communication Technology, 2010, 34(7): 50-53.
- [16] LI Y Y, NING J X, XU Z Y, et al. UVOC-MAC: a MAC protocol for outdoor ultraviolet networks[C]//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Network Protocols. Piscataway: IEEE Press, 2010: 72-81.
- [17] 宋鹏, 周显礼, 赵太飞, 等. 紫外光移动自组网节点设计及通信性能分析[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 290-297.
- SONG P, ZHOU X L, ZHAO T F, et al. Node design and analysis of communication performance between nodes in ultraviolet mobile ad hoc networks[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 290-297.
- [18] WANG Z F, YUAN R Z, CHENG J L, et al. Joint optimization of full-duplex relay placement and transmit power for multihop ultraviolet communications[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2024, 11(7): 11960-11973.
- [19] WANG S M, PENG M G, YUAN R Z. MIMO free-space optical communications using photon-counting receivers under weak links[J]. IEEE Communications Letters, 2023, 27(4): 1185-1189.
- [20] CHU X Y, YUAN R Z, PENG M G. Turbulent single-scattering channel model for ultraviolet communications using equivalent scattering point approach[J]. IEEE Communications Letters, 2024, 28(7): 1579-1583.
- [21] 柯熙政, 何华, 陈祥. 一种新的紫外光自组织通信网络MAC层退避算法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 1002-1006.
- KE X Z, HE H, CHEN X. A new backoff algorithm of MAC layer in UV Ad-Hoc communication network[J]. Journal of Optoelectronics-Laser, 2010, 21(7): 1002-1006.
- [22] LI C, XU Z Y, LI J H, et al. Performance of the UV multinode network under the lossless contention MAC protocol[J]. IEEE Photonics Journal, 2022, 14(2): 7319207.
- [23] LI C, XU Z Y, WANG J Y, et al. Ultraviolet random access collaborative networking protocol based on time division multiple access[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2023, 15(6): 393-403.
- [24] 柯熙政, 陈锦妮, 侯兆敏. 紫外光非视距通信的定向媒体接入控制协议[J]. 光电子·激光, 2011, 22(8): 1190-1195.
- KE X Z, CHEN J N, HOU Z M. Directional media access control protocol for ultra violet non-line-of-sight communication[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(8): 1190-1195.
- [25] 张曦文, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于空分复用的多信道机间紫外光通信定向MAC协议[J]. 激光技术, 2016, 40(3): 451-455.
- ZHANG X W, ZHAO S H, LI Y J, et al. Multi-channel directional media access control protocol for airborne ultraviolet communication based on space division multiplexing[J]. Laser Technology, 2016, 40(3): 451-455.

- [26] YUAN R Z, WANG S M, LIU G, et al. Non-line-of-sight ultraviolet positioning using linearly-arrayed photon-counting receivers[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2024, 42(9): 2535-2549.
- [27] ZHAO T F, XIE Y, ZHANG Y. Connectivity properties for UAVs networks in wireless ultraviolet communication[J]. Photonic Network Communications, 2018, 35(3): 316-324.
- [28] SUN L, GONG C, XU Z Y. Connectivity analysis and user access design of ground-to-air ultraviolet communication networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2024, 16(10): 1006-1017.
- [29] QI H, ZOU D F, GONG C, et al. Two-dimensional intensity distribution and connectivity in ultraviolet Ad-Hoc network[C]// Proceedings of the ICC 2020 - 2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2020: 1-6.
- [30] QI H, ZOU D F, GONG C, et al. Two-dimensional intensity distribution and adaptive power allocation for ultraviolet Ad-Hoc network[J]. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2022, 6(1): 558-570.
- [31] 宋晓梅, 宋菲, 宋鹏, 等. 紫外光空分复用自组网路由协议[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1006005.
- SONG X M, SONG F, SONG P, et al. Routing protocol of ultraviolet space division multiplexing ad hoc network[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1006005.
- [32] 陈冲, 宋鹏, 李云红, 等. 紫外光自组网按需多径距离矢量路由算法[J]. 西安工程大学学报, 2019, 33(1): 74-80.
- CHEN C, SONG P, LI Y H, et al. Routing algorithm of UV Ad-Hoc network on-demand multipath distance vector[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2019, 33(1): 74-80.
- [33] 邱达, 李建华, 汪井源, 等. 一种用于紫外光通信网络的改进蚁群算法[J]. 光通信技术, 2024, 48(2): 12-17.
- QIU D, LI J H, WANG J Y, et al. Improved ant colony algorithm for ultraviolet communication network[J]. Optical Communication Technology, 2024, 48(2): 12-17.
- [34] ZHANG X W, WANG Y. A weighted routing protocol for airborne ultraviolet communication network based on link state perception[C]//Proceedings of the 2021 3rd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communication (CTISC). Piscataway: IEEE Press, 2021: 103-106.
- [35] 赵太飞, 程敏花, 张港, 等. 无线紫外光协作无人机蜂群能效优化路由算法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(5): 139-146.
- ZHAO T F, CHENG M H, ZHANG G, et al. Energy efficiency

optimization routing algorithm for wireless ultraviolet cooperative UAV swarm[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(5): 139-146.

- [36] WANG Z F, YUAN R Z, PENG M G. Inter-symbol interferences deteriorated ultraviolet communications using photon-counting receivers[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2024, 23(5): 4097-4113.

[作者简介]



郭嘉 (2000-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院硕士生, 主要研究方向为光网络路由与交换技术。



袁仁智 (1990-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院特聘研究员、博士生导师, 主要研究方向为无线光通信、水下光通信、光子量子检测及应用等。



王思明 (2000-), 男, 北京邮电大学信息与通信工程学院博士生, 主要研究方向为无线光通信、机器学习等。



彭木根 (1978-), 男, 博士, 北京邮电大学副校长、教授, 主要研究方向为6G无线组网、雾无线网络和智慧物联网等。



杨闯 (1991-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、博士生导师, 主要研究方向为6G太赫兹通信感知一体化理论与技术。