

doi:10.13756/j.gtxyj.2025.250247.

专题:纪念创刊50周年

王思明,袁仁智,杨闯,等. 紫外光通信定位一体化:关键技术与未来展望[J]. 光通信研究, 2025(6): 250247.

Wang S M, Yuan R Z, Yang C, et al. Integrated Ultraviolet Communications and Positioning: Key Technology and Future Prospect [J]. Study on Optical Communications, 2025(6): 250247.

# 紫外光通信定位一体化:关键技术与未来展望

王思明,袁仁智,杨闯,彭木根

(北京邮电大学 网络与交换技术全国重点实验室,北京 100876)

**摘要:**与传统无线光通信相比,紫外光通信(UVC)可以通过大气的强散射效应建立非视距(NLOS)链路,具有背景噪声低、局部保密性高、气候适应性强和组网灵活等优点。受大气对紫外光强吸收作用的影响,UVC需借助NLOS紫外光定位(UVP)技术维持以单阶散射为主的NLOS链路,从而尽可能减小路径损耗。目前UVC和UVP大多采用两套独立的系统实现,面临资源利用率低和定位实时性差的问题。为解决上述问题,文章引入了紫外光通信定位一体化(IUCaP)技术,首先明确其资源共享和功能协作分别带来的集成和协作两种潜在增益,其次对实现潜在增益的NLOS UVP、一体化波束控制(IBC)和通信定位协作机制等关键技术展开了介绍,最后阐述了当前IUCaP面临的研究趋势和挑战。

**关键词:**紫外光通信;紫外光定位;通信定位一体化

**中图分类号:**TN929.1 **文献标志码:**A

## Integrated Ultraviolet Communications and Positioning: Key Technology and Future Prospect

WANG Siming, YUAN Renzhi, YANG Chuang, PENG Mugen

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

**Abstract:** Compared with traditional wireless optical communication, Ultraviolet Communication (UVC) can establish Non Line of Sight (NLOS) links by leveraging the strong scattering effect of the atmosphere. It enjoys unique advantages such as low background noise, high local security, strong climate adaptability, and flexible networking. Affected by the strong atmospheric absorption of ultraviolet light, UVC needs to leverage NLOS Ultraviolet Positioning (UVP) technology to maintain single-scatter-dominated NLOS links for minimizing path loss. Current UVC and UVP are mostly implemented in two separate systems, leading to problems such as low resource utilization and poor real-time positioning performance. To address these issues, this review introduces the Integrated Ultraviolet Communication and Positioning (IUCaP) technology. First, the potential gains are clarified into two parts: integrated gain from resource sharing and collaborative gain from functional synergy. Second, the key technologies for achieving these gains, including NLOS UVP, Integrated Beam Control (IBC), and communication-positioning collaboration mechanisms are discussed in detail. Finally, current research trends and challenges of IUCaP are elaborated.

**Key words:** UVC; UVP; integrated communication and positioning

## 0 引言

以可见光、红外及激光为代表的传统无线光通信技术,因其所在波段光信号的直线传播特性和微弱的衍射效应,在建立非视距(Non Line of Sight, NLOS)链路方面存在困难,进而限制了其在跨障碍物通信场景中的应用<sup>[1]</sup>。相较之下,基于“日盲”波段(200~280 nm)的紫外光通信(Ultraviolet Communication, UVC)技术,能够有效利用大气分子和气溶胶对紫外光的强散射作用建立NLOS链路,具备优越的跨障碍物通信能力<sup>[1-2]</sup>。此外,臭氧层对

紫外光波段太阳背景辐射的强烈吸收效应,确保了地面UVC的低背景噪声环境。同时,紫外光不可见特性结合通信覆盖范围外信号的快速衰减,赋予了该技术独特的局部保密性。上述特性使得UVC在障碍物遮蔽或面向移动平台的保密通信中具备独特潜力,有望弥补传统无线光通信在此类复杂场景下通信能力的不足。

受散射过程中大气对光子的吸收作用影响,在UVC建立的NLOS链路中,光子经过单阶散射到达接收端的路径损耗显著低于多阶散射<sup>[3]</sup>。然而,单阶散射的维持需要控制收发端指向以保证发射端

收稿日期:2025-07-08; 修回日期:2025-07-17; 纸质出版日期:2025-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62201075)

作者简介:王思明(2000-),男,云南昆明人。博士,主要研究方向为紫外光通信定位一体化。

通信作者:袁仁智,研究员。E-mail:renzhi. Yuan@bupt.edu.cn

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

波束和接收视场相交形成公共散射体。当公共散射体无法维持时,以多阶散射为主的 NLOS 链路接收信号微弱,难以支撑远距和高速率通信<sup>[4-5]</sup>。在 UVC 系统的初始链路建立阶段,由于接收机缺乏发射机的先验位置信息和指向,建立以单阶散射为主的低路径损耗 NLOS 链路仍然是 UVC 实际应用中面临的一项关键挑战。为了应对这一挑战,UVC 系统可以采用紫外光定位(Ultraviolet Positioning, UVP)技术以估计发射机的位置和指向<sup>[6-10]</sup>。然而,当前 UVP 和 UVC 主要依赖分离的两套系统实现,不仅资源利用率低,还面临双系统处理时延导致的实时定位困难,无法实现收发指向的动态调整,导致 UVC 系统的性能和鲁棒性受限<sup>[11]</sup>。相较之下,紫外光通信定位一体化(Integrated Ultraviolet Communication and Positioning, IUCaP)技术通过共享资源和内部功能协作,能够提升 UVC 系统在实际应用场景下的性能和鲁棒性。因此,实现 IUCaP 对 UVC 的实际应用具有重要意义。

本文首先分析了 IUCaP 的潜在增益,然后阐述了 IUCaP 系统的主要构成并介绍了 IUCaP 的关键技术,最后综合分析了当前 IUCaP 的研究趋势与挑战,对其未来的发展态势进行了展望。

## 1 IUCaP 潜在增益

IUCaP 技术旨在解决传统 UVC 和 UVP 分离式系统固有的资源利用率低及协作处理延时高等局限性。相较于传统分离式系统,IUCaP 能够具备集成和协作两种潜在增益。集成增益主要通过硬件和信号资源的共享降低处理时延和提升资源利用率;协作增益主要依据通信和定位两种功能之间的互信息进行相互辅助,从而获取高于传统 UVC 和 UVP 分离式系统的增益。

### 1.1 集成增益

不同于当前分离的 UVC 和 UVP 系统设计方案,IUCaP 技术可将 UVC 和 UVP 两种功能集成在一个系统中,通过共享硬件资源和信号资源实现性能的提升,这种性能提升可视为 IUCaP 的集成增益。

尽管当前大部分 UVP 技术可直接采用 UVC 收发设备实现,但 UVP 和 UVC 技术对收发设备姿态和信号处理算法不同,导致 UVP 辅助下的 UVC 仅能使用两套独立系统实现,造成了时延和系统开发成本的增加<sup>[9-10,12-13]</sup>。针对当前 UVP 和 UVC 分离式系统无法共享硬件资源的困境,IUCaP 在硬

件资源方面主要探索了当前 UVP 和 UVC 收发设备姿态和信号处理的兼容性改进方法,确保了 UVC 和 UVP 两种功能可在一套硬件资源下同时实现,这种硬件资源的共享可有效降低系统开发的成本和处理时延。

此外,为避免信号的干扰,当前 UVP 和 UVC 技术通常占用不同的信号资源。然而,当前 UVC 和 UVP 系统大多将调制带宽受限的发光二极管(Light Emitting Diode, LED)作为紫外光发射源。受紫外光多径信道影响,高调制速率下信号容易发生混叠形成严重的码间干扰,导致实际可用的时隙、频分复用物理带宽以及码片资源减少<sup>[14-15]</sup>。同时,在大气对紫外光的散射影响下,从 LED 发出的光容易被多个接收端探测到,不仅容易形成严重的信道串扰,还使得可用的空间复用资源减少<sup>[16]</sup>。在上述因素共同影响下,分离系统设计下的 UVP 和 UVC 的非重叠信号资源分配将进一步造成系统信号资源的紧张,不利于用户容量的提升。为此,IUCaP 在信号资源方面主要通过一体化波形设计和一体化波束控制(Integrated Beam Control, IBC)耦合 UVC 和 UVP 的时域、频域、空间域及码片资源,这种信号资源的共享能够有效提升 IUCaP 系统的用户容量与能效。

### 1.2 协作增益

除共享资源和信息带来的性能提升以外,IUCaP 系统还能够通过 UVC 和 UVP 两种功能间信息的交互与协调实现信号处理、资源分配及建链任务决策等层面的联合工作,从而获取远超 UVC 和 UVP 分离系统的性能。这种性能的提升可以视作 IUCaP 的协作增益,协作增益主要通过通信辅助定位和定位辅助通信两种机制实现。

通信辅助定位是指利用 UVC 的信号处理流程增强 UVP 性能并简化 UVP 的过程,从而提升 UVP 的效率与精度。例如,IUCaP 可以直接利用通信信号中固有的同步序列或导频信息,通过捕获信道特征来实现高精度的定位,有效降低了系统的信令开销和资源消耗<sup>[11]</sup>。此外,在 IUCaP 系统节点组网初期,IUCaP 系统网络节点间可通过协议交换身份标识和收发机指向等关键信息,避免了复杂的定位盲搜索过程<sup>[9]</sup>。同时,IUCaP 系统组网后多节点可形成一定规模的定位网络,在通过融合多个节点定位信息的基础上,可实现远超单个节点的定位精度并显著降低 UVP 定位估计算法的复杂度<sup>[8,12,17]</sup>。

定位辅助通信则通过利用 UVP 所获取的相邻用户位置和收发机指向信息对通信链路的建立和维持提供指导,从而增强 UVC 通信链路的稳定性。一方面,在节点间建立链路的初始阶段以及障碍物遮挡后链路中断的重连阶段,IUCaP 系统主要利用 UVP 功能来获取目标节点的精确位置和收发机指向,并根据 UVP 获取的信息进行节点间链路的建立以缩短建链时间,提升连接成功率<sup>[9]</sup>;另一方面,移动 UVC 场景下由于节点间相对位置快速变化,仅凭 UVC 功能无法保持节点间的低损耗链路,导致链路容易发生中断<sup>[18]</sup>。IUCaP 可借助 UVP 实现对节点的连续定位,使得 IUCaP 系统能够提前进行波束调整和资源调度,主动规避因节点移动或环境突变可能导致的通信中断,进而保障了链路的稳定性和服务质量<sup>[19]</sup>。

## 2 IUCaP 关键技术

典型 IUCaP 系统框架图如图 1 所示,在发射信号处理链上,用户发送信息与当前节点的收发机指向信息首先在 IUCaP 核心算法的指导下进行联合编码。随后由一体化波形进行调制并进行导频嵌入。调制信号经过数/模转换和 LED 驱动电路,最终在 IBC 下由 LED 发射。而在接收信号处理链上,接收到的光信号经模/数转换后,首先提取导频信号用于信道估计以进行信道均衡。均衡后的信号再经过解调与解码,分离出用户发送信息和相应节

点的收发机指向信息。最后,IUCaP 算法综合利用解调出的各类信息以及信道估计的结果,完成对目标节点的定位。可见,该系统的核心是 IUCaP 算法模块,其关键技术主要包括 NLOS-UVP 技术、IBC、定位辅助通信以及通信辅助定位算法。

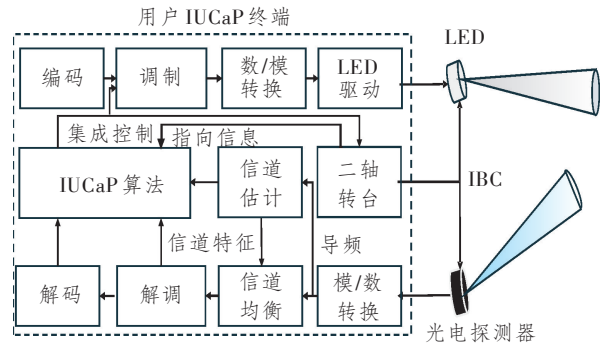


图 1 IUCaP 系统框架图

Figure 1 The block diagram of IUCaP system

### 2.1 NLOS-UVP 技术

IUCaP 中的 NLOS-UVP 是一个跨越多个层面的系统性能。其实现依赖于两个紧密耦合技术层面:一是链路级物理信道参数估计,其构成了 IUCaP 系统的信息获取单元;二是网络级的协同定位,其通过设计协作机制来融合本地感知信息,是实现协作增益的关键部分。当前两个技术层面上 NLOS-UVP 的定位精度如表 1 所示,其中一维定位范围表示研究中测试的最大收发直线距离;二维或三维则表示进行定位实验的区域或空间范围。

表 1 NLOS-UVP 定位精度与范围

Table 1 NLOS-UVP positioning accuracy

研究单位	所属技术	技术层面	定位精度		定位范围/m
			角度/°	距离/m	
美国 UCR <sup>[9,20]</sup>	邻居发现	链路级	≤45.0	/	100
西安邮电大学 <sup>[13]</sup>	偏振导航	链路级	/	25.3	500
北京邮电大学 <sup>[6,21]</sup>	RSSI	链路级	≤1.5	≤2.0	100
美国陆军实验室 <sup>[22]</sup>	RSSI	链路级	/	≤2.0	200
西安工程大学 <sup>[12]</sup>	AOA	网络级	/	≤2.0	150×150×100
西安理工大学 <sup>[10,17]</sup>	RSSI	网络级	/	≤5.0	100
中科大 <sup>[8]</sup>	TDOA	网络级	/	≤12.0	40×40

注:UCR为加利福尼亚大学河滨分校;RSSI为接收信号强度指示;AOA为到达角;TDOA为到达时间差。

链路级物理信道参数估计层面的 NLOS-UVP 核心在于利用接收的单一发射源信号实现收发机几项相关参数的估计。相关定位技术的研究可追溯至紫外光自组网中邻节点的发现<sup>[9,20]</sup>。例如,Li 等人<sup>[9]</sup>提出了一种紫外光自组网邻节点搜寻算法,其节点通过交换邻节点请求和邻节点反馈包来发现邻

居。邻节点反馈包中包含了发送节点用户标识符(Identifier, ID)和发送方向 ID,能够实现信源的粗略方位感知。然而,由于邻节点搜寻技术旨在发现连接而非精确定位,因此邻节点搜寻算法获取的信息通常无法提供精确的位置信息。为了进一步提升定位精度和增加可估计物理信道参数量,部分研究

开始尝试使用接收紫外信号的偏振以及脉冲宽度等特征来实现 NLOS-UVP<sup>[12-13]</sup>。但这些方法仅能实现收发距离的估计,同样无法满足 IUCaP 系统下物理信道参数估计的需求。使用单一信号特征的 UVP 方法探索结果表明,仅使用单一信号特征蕴含的定位信息可能不足以实现高精度的 UVP。为此,近期 NLOS-UVP 的研究开始尝试通过融合多信号特征以实现更精确的 UVP,例如, Yuan 等人<sup>[6]</sup>提出了一种基于接收功率峰值和相关接收指向信息的几何定位方法,该方法首先利用接收机在  $i$  个不同接收仰角下取得光功率峰值  $\{Pr_1, Pr_2, \dots, Pr_i\}$  的方向向量  $\{\mu_{R,1}, \mu_{R,2}, \dots, \mu_{R,i}\}$  和发射端波束轴线相交的假设,可以构建同时穿过收发端的平面以确定发射端方位角,并进一步在该平面上应用单阶散射模型求解优化问题  $\arg \min_{r, \theta} \sum_i (Pr(r, \theta, \mu_{R,i}) - Pr_i)^2$  以估计收发端距离  $r$  和发射端方向向量与收发端连线形成的仰角  $\theta$ ,其中,  $Pr(\cdot)$  为单阶散射模型; Liu 等人<sup>[21]</sup>在该方法基础上提出了一种适用于紫外光全双工通信的定位方法,通过对接收功率的强度实施自干扰消除并结合到达方位角信息来确定目标位置。然而,当前链路级物理信道参数估计方法本质均为信道特征求解收发几何的逆问题。由于不同的收发几何下,信道特征可能较为相似甚至相同,使得信道参数估计在特定几何下逆问题病态,定位结果存在模糊性。

为此,网络层面的协同定位技术主要是利用多节点接收信道特征的不同来解决 UVP 病态的问题,并融合多个节点的定位信息实现定位精度的提升。受无线定位算法发展影响,当前网络层面的协同定位技术主要依赖于分析接收到的紫外光信号的各项信道特征,例如 RSSI、AOA 和 TDOA 等。例如,赵太飞等人<sup>[17]</sup>研究了基于 RSSI 的 UVP 方法,该方法基于紫外光解析路径损耗模型和朗伯函数  $W$  的求反法推导了 NLOS 链路接收功率和收发距

离的关系  $r = \frac{\text{lambertw}\left(\frac{kz}{Pr}\right)}{z}$ , 式中:  $\text{lambertw}(\cdot)$  为朗伯  $W$  函数;  $k$  和  $z$  均为由收发几何参数决定的系数。

通过该关系能够利用锚节点接收信号强度估算收发端距离。苏彩霞等人<sup>[12]</sup>提出了基于信息编码的 AOA 定位方法,该方法主要通过由多个 LED 组成的全向发射阵列实现 AOA 角探测。Yu 等人<sup>[8]</sup>研究了基于 TDOA 的 UVP 方法,该方法通过接收

来自发射机的同步信号,获得信号的到达时间差以求解同目标节点相关的方程  $\|\mu_i - \mu\|_2 - \|\mu_j - \mu\|_2 = c \Delta t_{ij}$ , 从而实现信源定位,式中:  $\mu_i$  和  $\mu_j$  分别为第  $i$  个和第  $j$  个锚节点的位矢;  $c$  为真空光速;  $\Delta t_{ij}$  为两个锚节点间的到达时间差。为了进一步提升定位精度, Zhao 等人<sup>[10]</sup>提出了一种融合 RSSI 和 AOA 的定位算法,该算法通过将 RSSI 估计的距离投影到  $XOY$  平面上,再结合 AOA 测量的方位角和天顶角,计算出未知无人机的三维坐标。网络级协同定位借助多节点信息融合有效解决了模糊性问题,可进一步提升精度和鲁棒性。然而,网络级协同定位方法通常比物理信道参数估计具有更高的通信开销,使得其定位方案需要进一步考虑通信开销和定位性能联合优化的联合优化,这使得 IUCaP 下多节点协同定位算法相比链路级物理信道参数估计变得更加复杂。

## 2.2 IBC

波束赋形技术能够在功率受限的条件下提升信噪比,被广泛应用于提高频谱效率。然而,受两方面因素的影响, UVC 无法实现精确的波束赋形。一方面,当前常用的 UVC 器件多为 LED,无法控制发射光的相位;另一方面,大气对紫外光的散射作用使得紫外光相位杂散,接收端难以进行空间滤波。因此,发射波束和接收视场只能通过收发机的几何构型来控制,这可以被看作是一种特殊的波束赋形<sup>[19]</sup>。IBC 旨在通过调整同一套收发设备的几何配置,实现同时满足通信与定位功能的收发波束控制以获取集成增益。然而,通信与定位两种场景下对波束控制的要求存在差异。基于通信与定位在这些场景下的相对重要性,收发几何构型的设计可分为以通信为中心的 IBC、以定位为中心的 IBC 以及联合 IBC 3 类。

以通信为中心的 IBC 主要通过牺牲空间覆盖的广度换取特定链路方向上性能的提升,当前研究集中于 IBC 在物理层和网络层上的性能优化。图 2 所示为以通信为中心的 IBC 空间信噪比分布图,物理层性能优化旨在通过将有限的波束能量汇聚于目标接收机所在方位形成方向性链路以提升信噪比。Shan 等人<sup>[23]</sup>通过蒙特卡洛积分方法系统性地研究了系统收发几何构型对路径损耗的影响,其仿真结果表明,采用较小的发射俯仰角能有效形成能量集中的波束,从而显著降低路径损耗,提升信噪比;为了评估实际场景下以通信为中心 IBC 的性能, Shan

等人<sup>[24]</sup>还进一步研究了复杂天气条件对路径损耗的影响,其仿真结果表明,晴天下的低能见度或雨天环境,因其增强了前向散射,反而可能在特定几何构型下增强通信覆盖,而雾气浓度的增加则会因吸收和散射的共同作用导致覆盖范围减小。网络系统性能优化的研究重点则在于将 IBC 的性能优势扩展为整个网络的覆盖效益。例如,Li 等人<sup>[25]</sup>研究了不同收发几何构型对网络覆盖性能的影响。其仿真结果表明,当发射光束的发散角与接收机的视场角均在 50° 附近时,可实现较优的网络覆盖性能。

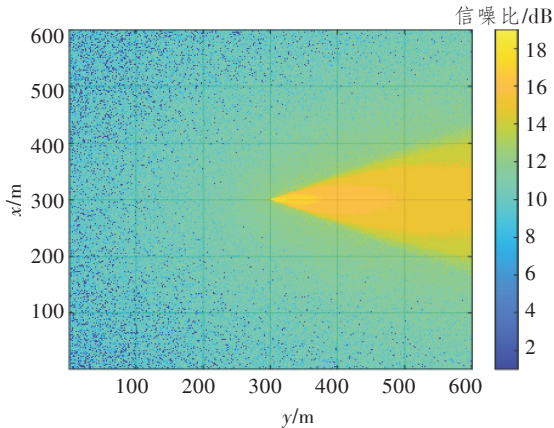


图 2 以通信为中心的 IBC 空间信噪比分布  
Figure 2 Communication-centric IBC spatial signal-to-noise ratio distribution

然而,以通信为中心的 IBC 使得接收功率空间分布不均,与当前 UVP 方法的需求存在矛盾。相应地,以定位为中心的 IBC 旨在设计满足 UVP 方法收发几何限制性要求的波束控制方案,但这通常以牺牲链路性能为代价。图 3 所示为以定位为中心的 IBC 空间信噪比分布图,由图可知,通过发射端的全向控制实现了区域内定位信号的有效覆盖。若将图 3 与图 2 对比,以通信为中心的 IBC 下的信噪比

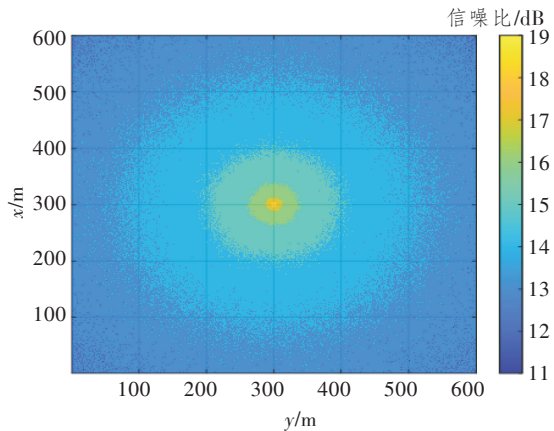


图 3 以定位为中心的 IBC 空间信噪比分布  
Figure 3 Positioning-centric IBC spatial signal-to-noise ratio distribution

比远大于以定位为中心的 IBC,导致有效通信距离被大幅压缩,形成了通信与定位性能相互制约的现象。以通信为中心的 IBC 和以定位为中心的 IBC 两种策略下信噪比的分布揭示了通信距离和定位覆盖范围的内在矛盾,该内在矛盾是实现 IUCaP 集成增益的核心挑战之一。

为了实现 IUCaP 下的集成增益,需要探索联合 IBC 方法以在满足定位需求的同时兼顾通信链路性能。考虑到当前 IBC 设计的限制主要由定位方法中的收发几何约束造成,因此联合 IBC 设计的最有效方法是探索能够放宽收发几何约束的定位方案,减小 UVC 和 UVP 对 IBC 要求的差异。近期的研究已开始通过利用 UVC 信道模型来放宽收发几何的约束。例如,Aung 等人<sup>[19]</sup>基于视距紫外信道模型提出了一种利用预先计算的功率分布在室内场景实现定位的方法,该方法收发几何没有限制;Yuan 等人<sup>[6]</sup>基于 NLOS 紫外信道模型提出了一种使用光子计数器阵列在无收发几何限制的情况下进行定位的方法,该方法同时适用于室内和室外场景。

### 2.3 定位辅助通信

当需要建立通信链路或已有链路因移动或遮挡发生中断时,传统 UVC 系统需采用盲搜索方式建立链路,面临效率低下的问题。定位辅助通信旨在利用 UVP 获取的定位信息调整波束控制状态,从而为 UVC 链路的建立和保持提供引导。

当需要与非合作节点建立 UVC 链路或者两个节点间的链路发生中断时,定位信息可以辅助 IBC 技术实现链路的建立。例如,Aung 等人<sup>[19]</sup>提出的室内 UVC 动态波束控制技术,其具体场景如图 4 所示,该方法首先利用部署在环境中的多个锚点,通过室内光定位算法实时估算出目标用户的位置与方

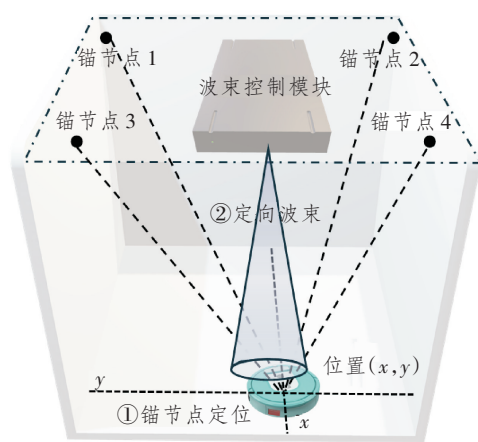


图 4 定位辅助通信场景

Figure 4 The positioning-assisted communication scenario

位。这使得系统无需进行全向的广播或扫描,直接通过调整收发机的收发几何进行一种特殊的波束赋形,即可将发射功率精准地导向已被定位的目标,从而快速建立起一条信噪比极高的初始通信链路。

在建立链路的条件下,UVC在UVP的辅助下可以通过对目标节点的持续定位与跟踪,确保UVC能够时刻保持与目标节点的低路径损耗链路,并具备突发障碍物遮挡下迅速重建链路的能力。例如,在Aung等人<sup>[19]</sup>提出的动态波束赋形方案通过室内部署的锚节点持续获取目标节点的位置,并基于获取的定位信息进行动态的波束控制。通过其提出的动态波束赋形方法,能够显著地提升信噪比。

#### 2.4 通信辅助定位

当前UVP方法需要根据提取的信号进行多个收发几何参数的估计,处理时延较高,难以满足IUCaP下的实时定位需求。为此,通信辅助定位通过将节点间UVC作为一种主动探测,利用UVC协议和物理帧的交互获取定位信息,从而降低UVP定位信息解算的复杂度。

通信辅助定位在协议层面主要表现为网络拓扑感知,例如,Li等人<sup>[9]</sup>的开创性工作能够通过其设计的紫外自组织网络邻节点发现协议交换相邻节点间的位置信息,其具体交换机制如图5所示,图中RX为接收机,TX为发射机。节点A首先向潜在的多个方向广播包含自身ID和指向ID的请求数据包。当节点B成功接收后,会返回一个包含请求节点ID、响应节点ID以及指向ID的反馈数据包。通过该邻节点发现协议,节点A能够建立邻居节点相对位置的感知,可以在网络层减小后续物理层定位估计的参数解算难度。

通信辅助定位在物理帧层面目前主要表现为精细时间戳的传递,例如,Yu等人<sup>[8]</sup>在通信帧头设计了特定的同步序列,使得接收机能够通过相关匹配以精确估计帧头的到达时刻,最终将到达时刻作为TDOA计算的时间戳。此设计同时实现通信帧同步和时分复用信号传输,能够在不增加额外帧结构的情况下传递高精度时间,辅助了后续的TDOA定位参数解算。

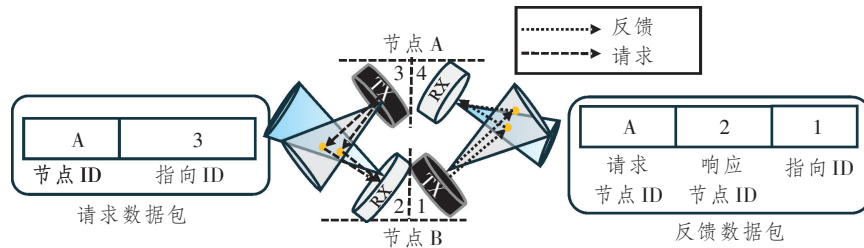


图5 邻节点搜寻机制

Figure 5 The neighbor discovery mechanism

### 3 研究趋势与挑战

目前IUCaP的研究仍处于起步阶段,诸如信号处理、帧结构及网络协议设计方面的实现机制尚缺乏研究。信号处理、性能优化以及开放式系统互联(Open Systems Interconnection, OSI)模型下的协议设计等方面的研究仍相对匮乏。此外,由于通信和定位对通信资源和硬件系统配置要求不同,一体化设计往往面临两种功能的折衷,探索在共享资源约束下通信和定位性能的联合优化算法也是未来IUCaP的主要挑战之一。

#### 3.1 一体化波形设计

由于UVC和UVP波形设计不同,导致系统难以使用同一套信号处理算法和硬件同时处理UVC和UVP信号,造成了传统分离式系统在资源利用与功能协同上存在固有瓶颈。为此,可参照当前无线通感一体化(Integrated Sensing and Communica-

tions, ISAC)中的波形设计探索能够同时承载通信数据并蕴含定位信息的一体化波形设计。然而,射频ISAC的一体化波形设计仅能处理复数形式的信号,紫外光系统只能使用强度调制/直接检测,使得信号必须以非负实数形式进行调制<sup>[26]</sup>。因此,当前射频ISAC波形设计方案无法被直接应用于IUCaP。同时,尽管当前无线光通信定位一体化(Optical Integrated Communication and Positioning, O-ICaP)发展迅速,但O-ICaP和IUCaP的通信和定位在实现原理上有根本的不同。一方面,O-ICaP高度依赖于视距链路通信,而IUCaP则可以借助大气对紫外光的散射作用建立NLOS链路;另一方面,O-ICaP主要借助反射光的相关检测实现定位,而IUCaP则可以直接利用接收紫外光信号实现定位。因此,O-ICaP的研究也难以直接应用于IUCaP中。UVC和UVP的研究较为分立,鲜有研究考虑一体化波形设计。在上述因素的共同影响下,

目前 IUCaP 一体化波形设计相关研究较为匮乏。

当前 IUCaP 一体化波形设计可以借鉴 O-ICaP 设计思路。例如,基于 TDOA 的多节点协作 UVP 方法通过卫星授时等手段可以同步多个锚节点的时钟,利用时钟同步下接收信号和发送信号的相关性来实现信号到达时间的探测<sup>[8]</sup>。而当前可见光 O-ICaP 的距离估计同样依赖于发射序列和接收序列相关检测,只是该方法受限于不同用户端时钟异步的影响,仅能将信号通过反射传回发射端进行相关计算<sup>[26-28]</sup>。然而,O-ICaP 的通信和定位均依赖于可见光的视距链路,难以适用于障碍物遮挡下的 NLOS 通信场景。尽管部分 UVP 研究已提出了 NLOS 场景下的 UVP 的方法,但此类研究并未给出相应的一体化波形设计。因此,设计能够共享相同时域、频域、空间或码片资源的一体化波形是 IUCaP 物理层的实现面临的挑战之一。为此,未来仍需针对现有 UVP 和 UVC 方法进一步探索能够实现资源共享的一体化波形,从而在物理层获得更多集成增益。

### 3.2 帧结构及网络协议设计

除物理层一体化的波形设计以外,帧结构和网络协议设计也是当前 IUCaP 实现的主要障碍之一。尽管当前紫外组网研究已给出 UVC 可行的帧结构和网络协议,但由于此类帧结构和网络协议未考虑一体化集成带来的资源分割和功能间的协作,无法直接用于 IUCaP 系统中。为此,未来 IUCaP 亟需借鉴现有紫外光自组织网络的相关协议,探索可行的 IUCaP 帧结构和网络设计。

IUCaP 帧结构设计的核心需求是寻找能够同时承载 UVC 和 UVP 双功能的帧格式。例如, Horyna 等人<sup>[29]</sup>提出的紫外光测向测距与通信(Ultra Violet Direction And Ranging - Communication, UVDAR-COM)系统可通过消息帧实现节点 ID、数据块和校验位等字段的集成,实现了通信与定位两种功能。同时,从通信辅助定位的角度出发,尽管 Yu 等人为支持基于 TDOA 的 UVP 所设计的帧结构能够被粗略视为一种通信辅助定位机制<sup>[8]</sup>,但当前通信辅助定位的帧结构仍然不足,设计能够辅助实现 UVP 低复杂度估计的帧结构也是 IUCaP 帧结构设计的研究方向之一。

此外,将多个节点通过网络协议组成集通信和传感于一体的网络也是未来 IUCaP 实现协作增益的关键技术之一。尽管 Li 等人<sup>[9]</sup>提出的 UVC 自

组网邻节点搜寻协议能够在实现多节点通信的同时对邻节点的潜在方向实现感知,但此协议仅能建立同目标节点的有效链路,与 IUCaP 网络的高定位精度和低路损通信要求仍存在差距。此外,受光子多径传播导致的码间串扰及 LED 的调制带宽影响,NLOS UVC 通信速率受限,紫外光全双工通信技术可被用于进一步提升 IUCaP 网络的通信速率。然而,在全双工模式下,IUCaP 节点受紫外光散射特性影响存在自干扰<sup>[15]</sup>。相较于当前 UVC 双工通信的自干扰消除算法,未来 IUCaP 网络有望通过设计相应网络协议实现空间上的波束管理和控制,从根本上解决自干扰问题。

### 3.3 通信定位联合性能优化

IUCaP 使得 UVP 和 UVC 需要借助共享资源来实现各自的功能,在共享资源约束下,UVC 和 UVP 由于资源竞争和一体化带来的耦合无法同时使得两种功能达到最优,成为 IUCaP 中集成增益相关关键技术需要面临的核心问题。因此,通信定位联合性能的优化是当前 IUCaP 面临的主要挑战之一,其研究需明确 UVC 和 UVP 各自的性能极限,并在此性能极限的基础上展开优化。

UVC 系统的性能上界由信息论中的信道容量来刻画<sup>[30]</sup>,UVC 等弱光通信的信道可以使用泊松信道模型描述。El-Shimy 等人<sup>[14]</sup>分析了输入二进制的 NLOS-UVC 通信信道,基于 Shannon-McMillan-Breiman 理论以及 BCJR (Bahl-Cocke-Jelinek-Raviv)算法给出了信道容量的数值计算方法。UVP 系统的性能极限则由估计理论中的误差下界来定义。当估计器所得参数为无偏估计时,其理论下界可通过克拉美-罗界(Cramer-Rao Bound, CRB)来逼近。现有研究已基于泊松分布的接收光子数推导了多种 UVP 场景下的 CRB<sup>[31-32]</sup>。此外,当估计器所得参数为有偏估计时,其误差下界则可通过更具普适性的温斯坦-韦斯界来约束<sup>[33]</sup>。这些界限定了系统所能达到的最高定位精度,即可行的最低定位误差标准差(Standard Deviation of Positioning Error, SDPE)。在 IUCaP 系统中,UVC 和 UVP 的性能极限在共享资源的约束下,其联合性能优化的核心问题在于寻找并逼近 UVP 指标与 UVC 指标之间的帕累托最优边界(Pareto-Optimal Boundary, POB)。目前 IUCaP 联合性能优化的研究较为匮乏,未来 IUCaP 的研究亟需根据当前理论极限明确联合优化的 POB。

## 4 结束语

本文探讨了 IUCaP 技术,该技术旨在解决当前 UVC 在 NLOS 链路建立和保持中面临的高路径损耗和实时定位能力不足等挑战。相比于当前 UVC, IUCaP 具有集成增益和协作增益两种潜在增益,能够显著提升 UVC 系统在部署后的鲁棒性。其中,集成增益主要通过 NLOS-UVP、IBC 和一体化波形设计以及通信定位联合性能优化等关键技术实现,可有效提升系统资源利用率并降低定位处理时延。协作增益主要通过定位辅助通信和通信辅助定位两大关键机制实现信息的交互与协调,以实现远超分离系统的性能。然而,由于当前 UVC 和 UVP 定位的研究较为分立,联合性能优化和一体化波形设计等一体化相关技术仍有待进一步研究。

### 参考文献:

- [1] Yuan R, Ma J. Review of Ultraviolet Non-Line-of-Sight Communication [J]. *China Communications*, 2016, 13(6): 63–75.
- [2] Wu T, Cao T, Yang F, et al. Ultraviolet-based Indoor Wireless Communications: Potentials, Scenarios, and Trends [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2024, 62(3): 82–88.
- [3] Yuan R, Ma J, 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.
- [4] Wu T, Ma J, Yuan R, et al. Single-Scatter Model for Short-Range Ultraviolet Communication in a Narrow Beam Case [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(3): 265–268.
- [5] Wu T, Ma J, Su P, et al. Modeling of Short-Range Ultraviolet Communication Channel based on Spherical Coordinate System [J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(2): 242–245.
- [6] Yuan R, Wang S, 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.
- [7] Wang S, Yuan R, Peng M, et al. Non-Line-of-Sight Ultraviolet Positioning Using Two Photon-Counting Receivers [C]//GLOBECOM 2023 - 2023 IEEE Global Communications Conference. Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2023: 10436721.
- [8] Yu S, Lü C, Yang Y, et al. Ultraviolet Positioning via TDOA: Error Analysis and System Prototype [J]. *Optics Express*, 2024, 32(19): 33144–33158.
- [9] Li Y, Wang L, Xu Z, et al. Neighbor Discovery for Ultraviolet Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2011, 29(10): 2002–2011.
- [10] Zhao T, Li M, Liu J, et al. Wireless UV Collaborative RSSI and the AOA Hybrid Localization Method for UAV Swarms [J]. *Applied Optics*, 2024, 63(35): 8986–8993.
- [11] Lv C, Yu R, Cao J, et al. Integrated Technology of Ultraviolet Communication and Positioning for Autonomous Collaboration of Unmanned Clusters [C]// *Advances in Guidance, Navigation and Control*. Singapore: Springer Nature Singapore, 2025: 570–579.
- [12] 苏彩霞. 无线紫外光移动自组网节点定位研究 [D]. 西安: 西安工程大学, 2019.
- [13] Su C X. Research on Node Localization of Wireless Ultraviolet Light Mobile Ad-Hoc Network [D]. Xi'an, China: Xi'an Polytechnic University, 2019.
- [14] 李春艳, 罗豆, 李庚鹏, 等. 基于偏振紫外光单次散射的非视距目标定位方法研究 [J]. *光电子·激光*, 2022, 33(3): 296–304.
- [15] Li C Y, Luo D, Li G P, et al. Research on Non-Line-of-Sight Target Location Method based on Single Scattering of Polarized Ultraviolet Light [J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2022, 33(3): 296–304.
- [16] El-Shimy M A, Hranilovic S. Binary-Input Non-Line-of-Sight Solar-Blind UV Channels: Modeling, Capacity and Coding [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2012, 4(12): 1008–1017.
- [17] Wang Z, Yuan R, Peng M. Inter-Symbol Interferences Deteriorated Ultraviolet Communications Using Photon-Counting Receivers [J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2024, 23(5): 4097–4113.
- [18] Arya S, Chung Y H. A Comprehensive Survey on Optical Scattering Communications: Current Research, New Trends, and Future Vision [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2024, 26(2): 1446–1477.
- [19] 赵太飞, 余叙叙, 包鹤, 等. 无线日盲紫外光测距定位方法 [J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2324–2332.
- [20] Zhao T F, Yu X X, Bao H, et al. Ranging and Positioning Method Using Wireless Solar Blind Ultraviolet [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2324–2332.
- [21] Chen G, Wu T, Yang F, et al. Ultraviolet-based UAV Swarm Communications: Potentials and Challenges [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2022,

- 29(5): 84–90.
- [19] Aung T Y, Arya S, Chung Y H. A Dynamic Beam-forming Technique for Ultraviolet-based Indoor Communications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(18): 10547–10553.
- [20] Zhao Y, Zuo Y, Qin H, et al. A Neighbor Discovery Protocol in Ultraviolet Wireless Networks [C]//2014 Asia Communications and Photonics Conference (ACP). Shanghai, China: IEEE, 2014: 8687576.
- [21] Liu G, Wang S, Yuan R, et al. Non-Line-of-Sight Optical Positioning under Full-Duplex Ultraviolet Communication Scenarios [C]//2024 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). Hangzhou, China: IEEE, 2024: 10681787.
- [22] Arslan C H, Dagefu F T, Twigg J N, et al. Non-Line-of-Sight Ranging via Ultraviolet Signals[C]//2023 International Conference on Military Communications and Information Systems (ICMCIS). Skopje, North Macedonia: IEEE, 2023: 10253547.
- [23] Shan T, Cheng J. Coverage Estimation for Secure Ultraviolet Communication [C]//MILCOM 2022-2022 IEEE Military Communications Conference (MILCOM). Rockville, MD, USA: IEEE, 2022: 10017601.
- [24] Shan T, Yuan R, He N, et al. Non-Line-of-Sight Ultraviolet Transmission Coverage in Non-Precipitating, Foggy, and Rainy Weather[J]. *Optics Express*, 2023, 31(23): 37703–37721.
- [25] Li C, Xu Z, Wang J, et al. Ultraviolet Network Coverage based on Non-Line-of-Sight Channel[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2024, 16(1): 7300810.
- [26] 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.
- [27] Muller E B, Silva V N H, Monteiro P P, et al. Joint Optical Wireless Communication and Localization Using OFDM [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2022, 34(14): 757–760.
- [28] Cui Y, Chen C, Cai Y, et al. Retroreflective Optical ISAC Using OFDM: Channel Modeling and Performance Analysis [J]. *Optics Letters*, 2024, 49(15): 4214–4217.
- [29] Horyna J, Walter V, Saska M. UVDAR-COM: UV-based Relative Localization of UAVs with Integrated Optical Communication [C]//2022 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2022: 1302–1308.
- [30] Chaaban A, Rezki Z, Alouini M S. On the Capacity of Intensity-Modulation Direct-Detection Gaussian Optical Wireless Communication Channels: a Tutorial[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2022, 24(1): 455–491.
- [31] Bashir M S, Tsai M C, Alouini M S. Cramér-Rao Bounds for Beam Tracking with Photon Counting Detector Arrays in Free-Space Optical Communications [J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2021, 2: 1065–1081.
- [32] Moore T J, Dagefu F T, Arslan C H, et al. Range Estimation of an Ultraviolet Communication Source Using a Mobile Sensor [C]//2023 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Glasgow, United Kingdom: IEEE, 2023: 10118980.
- [33] Weinstein E, Weiss A J. A General Class of Lower Bounds in Parameter Estimation [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1988, 34(2): 338–342.