

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306600

飞行器中继无线光通信研究进展*

韩美苗¹ 李雪¹ 柯熙政^{1,2}

(1. 西安理工大学自动化与信息工程学院 西安 710048; 2. 陕西省智能协同网络军民共建重点实验室 西安 710068)

摘要:飞行器中继可以快速构建端到端的通信网络,增强通信系统的覆盖范围和传输能力,强化信号强度和提高了数据传输速度,提高通信系统的可靠性。总结了无人机中继技术以及无人机中继在无线光通信中的国内外发展现状,并对无人机中继在无线光通信中关键技术进行了深入研究。对信道特性及其对通信的影响和抑制技术进行了分析,比较了不同调制解调方法的优缺点和通信过程中的光束捕获,跟踪和对准的具体方法,详细介绍了光束的快速对准。最后展望了无人机中继在无线光通信中的发展方向。

关键词: 无人机;无线光通信;中继协同;关键技术;研究进展

中图分类号: TN929.1 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.50

Research progress of aircraft relay wireless optical communication

Han Meimiao¹ Li Xue¹ Ke Xizheng^{1,2}

(1. College of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Shaanxi Provincial Key Laboratory of Intelligent Collaborative Network for Civil-Military Cooperation, Xi'an 710068, China)

Abstract: Aircraft relay can quickly build an end-to-end communication network, enhance the coverage and transmission capacity of the communication system, strengthen the signal reception and improve the data transmission speed, and improve the reliability of the communication system. This paper summarizes the development status of UAV relay technology and UAV relay in wireless optical communication at home and abroad, and conducts in-depth research on the key technologies of UAV relay in wireless optical communication. The channel characteristics and their influence on communication and suppression techniques are analyzed, the advantages and disadvantages of different modulation and demodulation methods and the specific methods of beam capture, tracking and alignment in the communication process are compared, and the fast alignment of the beam is introduced in detail. Finally, the development direction of UAV relay in wireless optical communication is prospected.

Keywords: UAV; wireless optical communication; relay collaborative; key technologies; research progress

0 引言

无线光通信是一种通过调制可见光、红外线等光波的强度、频率等参数来传输数字信息的通信技术^[1],具有传输速率高、工作频段不受监管等优点^[2]。在无线光通信过程中,地形、建筑物、天气等因素都会对信号的传输距离和传输质量造成一定的影响^[3]。因此,当信号源和目标之间距离较远或存在障碍物时,就需要进行中继将信号转发到更远的距离,扩大信号覆盖范围,从而提高通

信效率和可靠性^[4]。

随着无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)技术的进步及其生产成本的降低^[5],将无人机作为中继实现光通信已经成为了一种新型的通信技术,它通过将信号从地面传输到高空的无人机上,再由无人机中继将信号传输到目标地点,进而实现了对地面通信信号的增强和扩展^[6]。早期的无人机中继通信采用射频链路,与其相比,无线光通信链路具有更高的带宽和安全性^[7]。射频链路的关键在于动态通信链路的设计、射频信号的处理和抗干扰能力。但当无人机在空中通过射频链路进行通信

收稿日期: 2023-06-06 Received Date: 2023-06-06

* 基金项目: 陕西省重点产业创新项目(2017ZDCXL-GY-06-01)、国家自然科学基金面上项目(61377080)资助

时,现有的地面无线网络可能会受到其无线电干扰,而且多条射频链路彼此之间会相互干扰,使得实现空中射频链路变得困难^[8-10]。因此,无线光通信技术在无人机中继中的应用得到了广泛的关注和研究。

本文阐述了无人机中继在无线光通信中的国内外研究现状和系统原理,包括中继转发策略、中继系统模型以及无人机中继在光通信中所用到的协议和系统性能的评价指标,重点分析了无人机中继在光通信中的关键技术,包括信道特性、捕获对准和跟踪技术(acquisition, pointing, tracking, APT),调制解调技术和系统的轻量化设计,关于飞行器中继在无线光通信中的对准耗时长的问題,给出了非共视轴飞行器中继方法。最后对其发展方向进行了展望。

1 无人机中继光通信系统概述

1.1 无人机中继

当下,无人机行业发展迅速,可供选择的无人机越来越多,常用的中继飞行器^[11]有固定翼无人机、旋翼无人机、系留无人机、高空平台^[12]等。如图 1 所示,固定翼无人机具备飞行时间长,飞行速度快且距离远,载荷较大等优点,多用于远距离高载荷中继通信。多旋翼无人机由于可以随时悬停,生产成本较低已经成为无人机应用领域的的首选^[13]。系留无人机对起降的环境要求低,工作时长,而且部署灵活方便,主要在环境恶劣或者发生自然灾害的时候作为中继使用。高空平台也叫准静态飞行器,属于广义上的无人机系统,具有超高载荷和动力,通常作为卫星和地面间的中继节点,来降低卫星通信的负担。



图 1 中继飞行器的主要类型^[11]

Fig. 1 Main types of relay aircraft^[11]

上述 4 种类型的无人机都广泛应用于中继通信。相比于其他高空飞行器,无人机具有灵活、快速、高空等优

势,可以在地面通信网络无法覆盖的区域提供通信支持。同时,无人机还可以随时调整位置和高度,以达到最佳中继效果。因此,利用无人机作为中继在空-地和空-空之间能够建立起有效的光通信链路。

无人机中继通信系统模型如图 2 所示^[14],无人机在两个地面控制端之间作为中继提供通信服务。无人机之间的数据链路包括上行链路和下行链路,前者是向无人机发送来自地面控制端 1 的命令信息到远程控制链路,后者是向地面控制端机发送来自无人机的遥测信息到遥测链路^[15]。

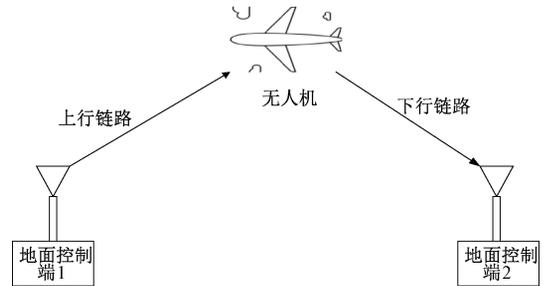


图 2 无人机中继通信系统模型^[14]

Fig. 2 UAV relay communication system model^[14]

由于无人机飞行在较高的高度,所以与地面控制端之间的通信链路可以近似为直视通信,满足无线光通信要求。

1.2 中继协作技术

在无人机中继协作技术中,源节点发出的信号经过中继节点的处理和转发后,最终传递到目的节点。中继节点的转发扩展了通信距离,不同的中继选择技术和中继位置的调整可以获得更好的信道环境,中继通信协议不同,应用场景也会不同。并且在无人机完成中继转发后也需要对其系统性能进行评估。因此,很有必要对中继转发策略中继系统模型、通信协议、性能评价指标等等进行分析。

1) 中继转发策略

中继可以扩大通信范围和增加视距传输,中继节点的转发策略一般有 3 种类型^[15],分为放大转发、译码转发、编码转发,示意图分别如图 3~5 所示。放大转发属于中继双跳,并且双跳之间相互独立,不存在干扰,通常用于高信噪比的情况。译码转发信号在中继节点处参与解调,并且对接收到的信号进行校验处理,判断其译码是否正确,如果正确,则重新进行编码转发,相反,则中继节点将不再发挥作用^[16]。编码转发原理与译码转发较为相似,不同之处在于当译码结果判断为错误时,中继节点会将错误的信息进行编码转发。该方法可以提高系统整体性能,但是过于复杂。不同中继转发策略的优缺点对比如表 1 所示。

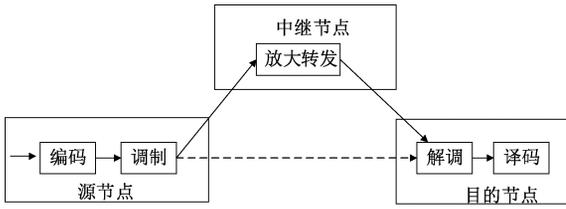


图 3 放大转发示意图^[15]

Fig. 3 Amplify and forward diagram^[15]

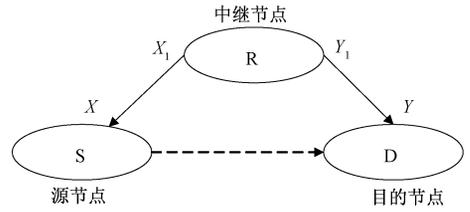


图 6 双跳单中继^[17]

Fig. 6 Double-hop single relay^[17]

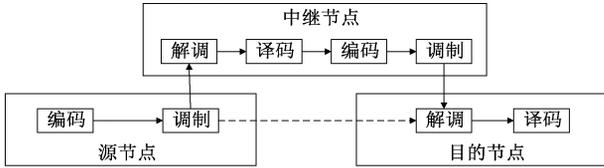


图 4 译码转发示意图^[15]

Fig. 4 Decoding and forwarding diagram^[15]

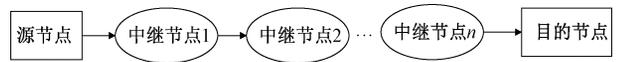


图 7 多跳多中继^[17]

Fig. 7 Multi-hop multi-relay^[17]

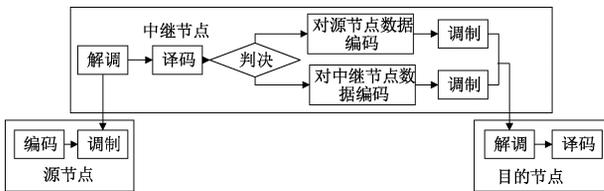


图 5 编码转发示意图^[15]

Fig. 5 Coding and forwarding diagram^[15]

表 1 中继转发策略优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of relay forwarding strategy

转发策略	优点	缺点
放大转发	提高信号强度, 实现较为容易	无法处理信号中的噪声和干扰, 信号质量容易受到影响
译码转发	处理信号噪声和干扰, 并进行纠错和差错控制	在校验时校验码的存在会使得传输的有效性下降, 而且计算量较大
编码转发	对信号进行编码和解码操作, 优化信号传输质量	复杂度和计算量大, 在实际场景中应用较少

2) 中继系统模型

按照中继的转发次数, 中继分为双跳和单跳中继, 而按照中继数目的不同, 中继又分为单中继和多中继。图 6 为双跳单中继, 其中将 S 作为源节点, D 作为目的节点, R 作为中继节点。当 S 端到 D 端的通信受阻时, 则通过 R 端进行辅助通信, 扩大通信覆盖范围, 提升通信系统性能。图 7 是在双跳单中继的基础上加入多个中继节点, 使得通信覆盖范围进一步扩大, 信号被多次转发。缺点是安全速率降低, 并且整个中继网络的复杂度提高, 通信时延和能耗成倍增加。

相较于传统的无线通信网络, 中继协作通信传输已经成为趋势, 用户可以选择不同的中继方式和转发协议来进行中继通信。在无人机中继通信系统中, 一般通过中断概率, 信噪比门限和误码率等来衡量所选择的中继转发方式和中继节点选择的合理性。

3) 中继通信协议

无人机中继需要支持多种通信协议, 包括 TCP/IP、UDP 等, 以满足不同应用场景的需求。其中 TCP/IP 协议是一种面向连接的协议, TCP 可以提供 IP 环境下的可靠数据传输, 可以保证数据传输的可靠性和完整性, 适用于无人机中继在无线光通信中传输大量数据的场景。而 UDP 协议是一个简单的面向消息的传输层协议, 属于无连接的协议, 传输速度快, 但不保证数据传输的可靠性和完整性, 适用于无人机中继在无线光通信中传输实时数据的场景。

4) 中继性能评价指标

无人机中继在无线光通信中的数据传输能力体现在吞吐量和中断概率上, 而系统的可靠性和抗干扰能力则体现在平均误码率、信噪比和信道容量上^[18]。

(1) 中断概率

中断概率通常体现整个通信系统的性能, 中断是由于目的节点的输出瞬时信噪比与规定的信噪比阈值相比小得多。因此, 将链路的输出瞬时信噪比低于阈值的概率定义为中断概率^[18]。其表达式可以写为:

$$P_{out} = \Pr(\gamma \leq \gamma_{th}) \quad (1)$$

式中: γ 表示系统的瞬时信噪比, γ_{th} 表示阈值, $\Pr(\cdot)$ 表示某一事件发生的概率。

(2) 平均误码率

平均误码率是指在传输过程中发生错误比特数与总比特数的比值, 体现了通信系统在一定时间内所传数据的准确性。平均误码率越低, 接收到数据的准确性越高。假设系统信号经过相干检测和二进制相移键控, 则无线

光通信系统的误码率为^[19]:

$$P_e = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\pi}\sigma^2} \exp\left[-\frac{(i_d + 0.5RIA\zeta)}{\sigma^2}\right] di_d \quad (2)$$

式中: σ^2 表示噪声方差, i_d 表示基带信号强度, R 表示光电探测器的响应系数, I 表示光强峰值的 1/2, A 表示载波振幅, ζ 表示调制指数。

(3) 信噪比

信噪比是指信号与噪声功率之间的比值。在无线光通信系统中,信噪比直接影响信号的质量和距离,可以通过增加发射功率,优化接收器灵敏度和减小环境干扰等来提高系统的信噪比。无人机中继无线光通信系统的信噪比表达式如下^[19]:

$$SNR = \frac{(IRA\zeta)^2 P_m}{\sigma^2} \quad (3)$$

式中: σ^2 表示噪声方差, I 表示光强峰值的 1/2, A 表示载波振幅, ζ 表示调制指数, P_m 表示副载波信号功率。

(4) 信道容量

信道容量指单位时间传输的最大信息量,与发射功率、接收器的灵敏度和传输距离等有关。在无线光通信中会受到衰减和噪声干扰等因素的影响,假设光信号受到大气湍流因素的干扰,则无线光通信系统中的平均信道容量为:

$$C = \int_0^{\infty} B \log_2(1 + SNR) P(I) dI \quad (4)$$

式中: B 表示信道带宽, SNR 表示信噪比, $P(I)$ 表示大气湍流下的光信号的概率密度函数, I 表示光强峰值的 1/2, $\int_0^{\infty} P(I) dI$ 表示对 I 从 0 到 ∞ 积分, $\log_2(\cdot)$ 表示对数。

(5) 中继系统吞吐量

吞吐量是指目标节点单位时间内收到的数据包个数。这一指标常用来表示网络传输数据包的能力。吞吐量值越小,网络的传输性能越差。在通信系统中,系统的吞吐量定义为单位时间之内发送节点与目的节点之间正确得到传送的信号的数据量^[16]。

2 无人机中继的研究现状

无人机中继光通信兼具了无线光通信的大容量与无人机的高机动性,对无人机中继光通信技术的进一步发展完善有着重要的意义。

2.1 国外研究现状

无线光通信技术在飞行器中继方面的应用引起了人们的广泛关注,世界各国都在研究飞行器中继在无线光通信的理论和关键技术,也都取得了不同的成果。

2013 年, Park 等^[20] 研究了射频/光通信 (radio

frequency/free-space optical, RF/FSO) 的无人机双跳中继系统,得出在低信噪比条件下,RF/FSO 中继系统的平均误差概率低于 RF/RF 中继系统。

2014 年, Kaadan 等^[21] 研究了无线光通信链路中悬停多旋翼无人机的不稳定性对系统性能影响,首次实现了两个多旋翼无人机之间的短距离无线光通信链路。

2018 年, Dabiri 等^[22] 首次对无人机中继全光通信链路的信道特性进行了随机性分析,并推导出各链路的中断概率。几年后,他们^[23] 又通过对信道模型的分析,得出无人机中继的最佳三维坐标和最佳光束模式,并推导出端到端信噪比的统计概率和误码率。

随后, Fawaz 等^[24] 通过设置多个无人机辅助中继,有效减小了大气湍流和衰减损失对无线光通信系统的影响。Dong 等^[25] 在无人机中继的前传和回传链路上,都搭载了无线光通信接收机,用以对突发事件的快速反应,并可进行灵活部署。

2019 年, Lee^[26] 等研究了双跳 FSO/RF 异构系统,采用时间离散与连续凸逼近法,以最大吞吐率为优化目标,获得无人机航迹的次最优解。不仅如此,他们还^[27] 采用了二分法和序贯规划法,对无人机的轨迹进行了优化,使得基于无线光通信的垂直无线回程网络的服务时间最大化。后来,他们结合对轨迹和吞吐量的优化方案,又找到了最优的缓冲区大小和最优的延迟时间要求,显著提高了吞吐量^[28]。

Wu 等^[29] 研究了无线光通信下的无人机中继辅助移动接入网络,设计了一种用户服务质量感知算法,利用无人机基站和移动用户关联策略,使服务移动用户数量最大化。Safi 等^[30] 研究了悬停无人机的波动导致的光束漂移和到达角起伏,利用象限探测器进行光束跟踪,找到最小化跟踪误差的最佳探测器尺寸,并且推导了跟踪误差和误码率的闭合表达式。几年后,他们发现采用可变焦距镜头调节光束尺寸可以进一步降低到达角抖动、瞄准误差等对系统性能的影响^[31]。

2020 年, Usman 等^[32] 提出了一种可移动基站辅助蜂窝网络的混合回传模式,实现了无线光通信和射频通信的灵活转换。Ansari 等^[33] 通过在悬停无人机上放置无线光通信接收器和能够接收光束能量的太阳能电池板来增加悬停无人机的悬停时间。

2022 年, Janji 等^[34] 使用可见图算法和最短路径法确定无人机中继站的位置,从而确保连续跳之间的直视通信。结果表明,此方法可以有效提高系统增益。

2023 年, Lee 等^[35] 将深度学习方法用于卫星-无人机集成的混合 FSO/RF 的非地面网络,实现吞吐量最大化。Singh 等^[36] 研究了悬停无人机中继在译码转发时无线光通信系统性能。利用直接检测技术,推导了点对点的信道增益的闭合表达式和中断概率。

无人机中继在无线光通信中的发展从单个无人机到无人机集群,从固定翼无人机到旋翼无人机,从空地链路到空空链路,从 FSO/FSO 链路到 FSO/RF 链路,研究的内容也从理论推导到模拟仿真再到实践应用。通过考虑

不同的中继转发方式和不同的衰减损失来研究无人机中继光通信系统的系统性能,显著改善了系统吞吐量,能耗等方面的性能。表 2 总结了国外无人机中继光通信系统的理论和关键技术的发展。

表 2 国外研究成果

Table 2 Foreign research results

年份	作者	研究内容	研究成果
2013	Park 等 ^[20]	理论推导出光通信链路在无人机中继的可行性	RF/FSO 的无人机中继系统的系统性能优于 RF/RF 的无人机中继
2014	Kaadan 等 ^[21]	多旋翼无人机的不稳定性对通信链路的影响	首次实现了两个多旋翼无人机之间的短距离无线光通信
2018	Dabiri 等 ^[22]	大气湍流和到达角起伏对空地链路的影响	首次对无人机全光通信链路的信道特性进行了随机性分析
2019	Lee 等 ^[26]	FSO/RF 链路的吞吐量最大化	无人机航迹的次最优解以及最大飞行时间
2019	Wu 等 ^[29]	中继辅助接入网络中无人机基站的位置	设计了用户服务质量感知算法,使服务的移动用户数量最大化
2019	Safi 等 ^[30]	光束漂移和指向误差对信道链路的影响	最小化跟踪误差的最佳探测器尺寸
2020	Usman 等 ^[32]	可移动基站辅助蜂窝网络混合回传链路	在无人机的不同状态下对无线光通信和射频通信动态选择
2020	Ansariffu ^[33]	无人机中继光通信的能耗	通过在无人机上放置太阳能板,增加了悬停无人机的悬停时间
2021	Dabiri 等 ^[23]	无人机的方向波动强度,障碍物高度对通信链路的影响	通过信道建模,得出最佳三维坐标和最佳光束模式
2021	Safi 等 ^[31]	到达角起伏和瞄准误差对通信链路的影响	利用四象限光电探测器阵列增大接收端的视野范围和采用可变焦距透镜调节光束大小
2022	Janji 等 ^[34]	障碍物对无人机中继光通信回传链路的影响	利用可见图算法和最短路径法确定无人机的位置,确保直视通信
2023	Lee 等 ^[35]	卫星-无人机中继之间的 RF/FSO 链路的吞吐量和能耗	将无人机作为卫星与地面之间的中继,提出了基于深度学习的无人机中继优化算法

2.2 国内研究现状

20 世纪 90 年代开始,我国开始研究无线光通信,21 世纪初,无人机中继技术在我国开始发展。直到近几年,无人机中继与无线光通信技术才结合起来,但很快就得到了全面的发展和研究,目前已经取得了一定的研究成果。

2017 年,安建欣等^[37]设计了无人机空地光通信系统,研究了在不同天气下的通信状况,通过对接收功率和功率变化范围进行分析后发现阴雨天功率变化范围较小,通信质量较好。该系统为无人机中继在无线光通信系统中的空地远距离信息传输提供了经验。

2018 年,徐林等^[38]设计了一种无人机机载激光通信设备,具有体积小、功耗低、数据传输稳定等优点,为无线光通信在无人机中继中的发展提供了高精度的设备。Jiang 等^[39]提出一种迭代算法,用于优化源节点和中继节点的功率分配和无人机轨迹问题,提高了系统的吞吐量。

2019 年,Yang 等^[40]研究了多跳混合的 RF/FSO 通信系统,考虑指向误差和路径损耗,得出系统的中断概率和无人机最优高度。元金海^[41]则同时对双跳光通信系统和多跳混合 RF/FSO 系统的信道特性进行研究,推导出通信过程中地面端到无人机,无人机到无人机之间的对准误差的概率密度函数,但并未考虑到光束的跟踪对准问题。

同年,谷志群^[42]研究了无人机中继自由空间光通信的链路负载均衡以及最小的网络时延。通过对无人机中继的位置和资源配置的联合优化,有效减少了网络时延,

但忽略了网络中 FSO 链路的不稳定性对系统的影响。

2020 年,胡明飞^[43]通过对无人机各模块的设计,实现无人机传输链路长度、稳定性和信道质量等指标的检测。在改善链路安全性的同时又减少了无人机下行数据链路的误码率,但该设计对多种天气的情况欠缺实验测试。

同年,雷小波^[44]对基于无人机混合 RF/FSO 的非正交多址通信系统进行了研究,推导出中断概率的闭合表达式。结果表明,无人机飞行高度,对准误差和大气湍流都会影响系统的性能。Ma 等^[45]和 Wang^[46]对悬停无人机的自由空间光串行多跳译码转发中继系统进行了研究,在考虑大气衰减、大气损耗、指向误差和到达角起伏等因素下,推导出各链路的中断概率表达式,重点优化了到达角起伏对无人机接收机视场角的影响,而对于发射功率的优化对系统的影响还缺少论证。

2021 年,梁韩立^[47]研究了无人机光通信中的光束自动跟踪。比较了 APT 系统内不同伺服电机性能状态,研究了光斑在不同的能量分布模型下的四象限探测器偏移量计算方法,以及通孔四象限探测器的中心定位算法,利用光斑检测的原理来完成对光束信号的捕获,对准和跟踪。并利用步进电机,反射镜和四象限探测器等仪器设计了一套轻巧且快速部署的 APT 系统,可以解决无线光通信系统无人机中继的载重有限问题,但该系统仅适用于无人机处于悬停状态下。

2022 年,Wang 等^[48]研究了双跳无人机中继光通信系统的性能,考虑了指向误差、衰减损耗和大气湍流对各

链路的影响。推导出了概率密度函数、累积分布函数和中断概率的表达式。Qu 等^[49]则推导出不同调制方式下的中断概率和平均误码率,并得出外差检测的系统比采用强度调制的系统性能更好。许子轩^[19]在此基础上,推导出了地面到无人机链路的信噪比。但他们对无人机由于运动与光源之间产生的偏差问题都未有研究。

接着,陆榕榕^[50]研究了无人机辅助 FSO 通信系统的保密性能,推导出保密中断概率的理论表达式,能够准确地评价系统的物理层保密性能,不足的是,对于飞行过程中能量损耗问题未有提及。而龙晓琼^[51]同样对物理层安全进行了研究,在直视和非直视条件下推导出中断安全概率和安全容量。并且将通信过程中本该被滤除掉的直流量通过能量收集装置重新收集起来,提升了系统的能量利用率。

徐溯等^[52]研究了光电混合架构的无人机中继通信,将射频链路收集到的用户信息通过无线光通信链路转发给基站,推导出高信噪比下中断概率表达式。马阳^[53]则研究了无人机中继异构的能量效率优化,利用一种迭代算法来得到无人机运行轨迹,结果表明该类算法可以避免中继缓存溢出,优化系统的能量效率,但文章只讨论了无人机处在二维位置的情况。

表 3 国内研究成果

Table 3 Domestic research results

年份	作者	研究成果	主要指标
2017	安建欣等 ^[37]	设计了适合小型无人机的无线光通信系统,以实现对用户数据高速远距离传输	通信距离:6.7 km 通信速率:1.25 Gb/s
2018	徐林等 ^[38]	设计了体积小,功耗低,扫描捕获跟踪效率高,通信链路建立时间短,数据传输稳定的无人机机载通信设备	通信距离:10.8 km 链路建立时间:<10 s
2020	胡明飞 ^[43]	改善了链路安全性并减少了光探测器饱和,实现了发射功率和束散角的实时调节	发射功率:0~100 MW 发射束散角:1/5 mrad
2021	梁寒立 ^[47]	设计了一套轻巧快速部署的 APT 系统,解决无人机载重有限的问题,并且设计了一种自动跟踪算法	跟踪精度:2.42 μ rad
2022	唐翰玲等 ^[55]	采用多输入单输出和单输出多输出技术用于上下行链路,提高系统增益和误码率	收发天线:3 系统增益:10 dB
2023	李春若等 ^[57]	将高空平台作为卫星与地面间的中继,使用 RADS 算法动态选择通信链路	当云层中云水量为 6 mg/m ³ 时, 平均速率:2.45 Gbps
2023	唐翰玲等 ^[56]	高空水平传输和单输入多输出技术,改善远距离误码率性能	无人机高度:6 km 误码率:10 ⁻⁶

综合国内外的研究现状发现,无线光通信在无人机中继中的研究主要集中在以下几个方面:1)信道影响因素的研究,如大气湍流,衰减损耗等。2)数据链路的快速建立的研究,如光束的快速对准等。3)通信设备的优化,如结构设计,光路设计等。4)传输技术的研究,如中继转发方式和调制解调类型等。无线光通信在无人机中继系统的研究在理论和应用上取得了一定的进展,但也有局限和不足,应该继续深入研究。

马津伟^[54]将无人机作为卫星与地面之间的中继进行资源调度,利用比例公平性调度算法,推导出射频和无线光通信的信噪比。显著提高了用户资源分配的公平性。

唐翰玲等^[55]研究了在大气湍流影响下的空地无人机斜程激光通信,采用多输入单输出技术和单输入多输出技术分别用于上下行链路,改善了大气湍流对系统造成的影响,提高了通信质量。在此基础上,利用单输入多输出技术和掺饵光纤放大器来进一步减少斜程链路中的湍流影响,实现远距离的误码率性能的提升^[56]。

2023 年,李春若等^[57]提出了一种 RADS 算法,该算法可以根据无线光通信链路的瞬时信噪比和阈值对比大小来切换两种通信链路,很大程度降低了中断概率,提升了传输速率,但忽略传输功率的优化问题。

国内关于设计和优化无人机中继光通信系统发展较快,主要从优化无人机的航行路径,改进信号处理算法和数据传输协议,以及研究无人机中继所需要的硬件设备,如通信模块,控制系统等。然后考虑无人机中继光通信在大气中传输时影响信道模型的因素,如大气湍流、大气衰减、指向误差等来优化系统性能。表 3 总结了国内的无人机中继光通信的主要参数指标和研究成果。

3 无人机中继光通信关键技术

无人机中继无线光通信是基于无人机搭载激光等无线光通信设备,对地面目标进行通信的中继传输技术,其具有高速率、长距离、抗干扰等优点。为了构建稳定高效的系统,重点考虑以下几个关键技术。

3.1 信道影响因素及其抑制技术

1) 信道模型

光通信系统和射频系统都不能在任意天气条件以及复杂环境下完全保持畅通,而 FSO/RF 信道同时具备光和射频通信的优点,可以将光和射频通信结合起来,提高链路利用率。因此,无人机与 RF/FSO 混合传输技术依然是当前的研究热点,这里主要介绍 FSO/RF 信道^[47]。

如图 8 所示为基于无人机中继的 RF/FSO 系统模型,由源节点和中继节点和用户 1、用户 2 组成,源节点到中继无人机之间利用无线光通信,中继无人机到用户之间利用射频通信。

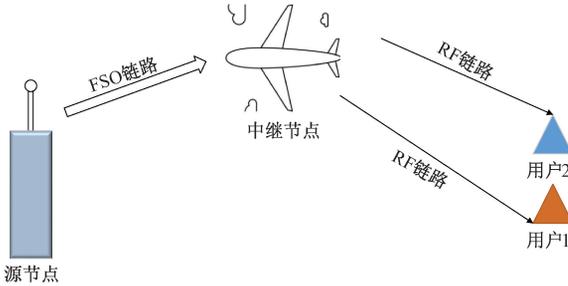


图 8 基于无人机中继的 RF/FSO 通信系统模型^[47]

Fig. 8 RF/FSO communication system model based on UAV relay^[47]

(1) 无线光通信链路

假设用户 1 和用户 2 有小数据包传输的通信服务,

当信息从信源被发送到中继无人机,该电信号可以表示为 $(\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2)$, S_1 和 S_2 表示递送给用户的数据包, α_1 和 α_2 分别表示为分配系数,且 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。经过调制后被发送到无人机中继,然后去掉直流信号,再经过解调,此时中继端的信号可以表示为:

$$y_1 = I\sqrt{p_1}\xi\eta(\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2) + n_1 \quad (5)$$

其中, $I = h_a h_p$ 表示无线光通信信道系数^[21], h_a 表示大气湍流系数, h_p 表示指示误差。 P_1 表示源节点处的发送功率, n_1 表示高斯白噪声, ξ 表示从光信号到电信号的转化效率, η 表示光电转换系数。

(2) 射频通信链路

由式(5)可知,无人机中继发送的信号为 y_1 , 将此信号以射频信号的方式通过解码转发的方式发出,则用户接收到的信号分别为:

$$\gamma_1 = \sqrt{\tau_1}\sqrt{p_2}h_1(\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2) + n_1 \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \sqrt{\tau_2}\sqrt{p_2}h_2(\alpha_1 s_1 + \alpha_2 s_2) + n_2 \quad (7)$$

其中, h_1 与 h_2 分别表示用户与中继之间的射频连接链路的信道增益,且 $h_1 h_2$ 服从莱斯分布, p_2 表示无人机的发射功率, n_1 与 n_2 表示用户信道中的高斯白噪声, τ 表示路径损耗衰减因子。

2) 信道特性

无人机作为中继进行光通信时,系统中的自由空间光信号会受到大气折射、大气吸收和大气散射的影响,使得系统性能的降低^[17]。影响无人机中继通信系统的因素及其抑制方法如表 4 所示。

表 4 信道影响因素及其抑制技术

Table 4 Channel influencing factors and its suppression technology

影响因素	产生原因	造成影响	抑制技术
路径损耗	信号在空气中传播时受到散射、反射和折射 ^[58]	信号能量逐渐减弱	增加发射功率,优化天线设计
多普勒效应	无人机和地面终端进行通信时存在相对运动 ^[59]	对接收信号的相位和频率有影响	信号预处理,自适应滤波或者光路补偿
多径效应	信号在传输过程中有多条传输路径,使得接收端接收到的信号相位相互叠加形成干扰 ^[59]	信号失真,时延扩展,脉冲展宽	分集接收或者信道均衡
大气湍流	大气温度,湿度的随机变化,导致折射率发生变化 ^[59]	脉冲展宽,接收光功率和平均信噪比降低,误码率增加	自适应光学技术增加光学天线口径
瞄准误差	由光电探测器偏移、建筑物晃动等现象引起 ^[60]	接收光功率降低	建立更准确的目标模型,更高精度的光学传感器和姿态控制系统
到达角起伏	无人机悬停时的方位的不停变化,目标节点接收到的信号功率的不稳定性和对焦平面上的抖动 ^[61]	系统的可靠性下降	自适应调制技术和自适应光路补偿

3.2 高精度捕获,对准和跟踪技术

通过对无人机中继信道模型分析可知,要构建一个稳定可靠的系统,实现地面与无人机之间的有效的信息传输,对捕获,对准和跟踪技术的精度要求越来越高。而且无人机由于体积小,重量轻,在空中受到气流的影响较大,影响飞行姿态,因此快速精确的光束对准是无人机机载激光通信的核心。APT 主要分为 3 个阶段^[52],首先是

捕获,具体是将无人机与地面端的光学通信链路连接起来,为后续的对准和跟踪奠定基础^[19]。其次是对准,主要是将无人机的光学接收机对准地面端的激光发射器,保证发射以及跟踪相关的视轴具备高精度的同轴度^[2]。最后是跟踪,即在对准完成后,对无人机与地面激光通信链路中的光学信号进行实时跟踪和调整^[19]。APT 系统在无人机中继激光通信中的工作流程如图 9 所示。首先

利用惯性导航系统对载体当前信息进行准确测量,实现自动初始指向,然后利用扫描捕获技术,用信标光和位置探测器引导进入跟踪阶段,驱动陀螺伺服转台引导激光进入探测器位置视场,进而实现激光通信链路建立。其中陀螺伺服转台可以减轻无人机载体由于飞行产生的高频振动,使系统可以在视场内进行自动跟踪^[62]。

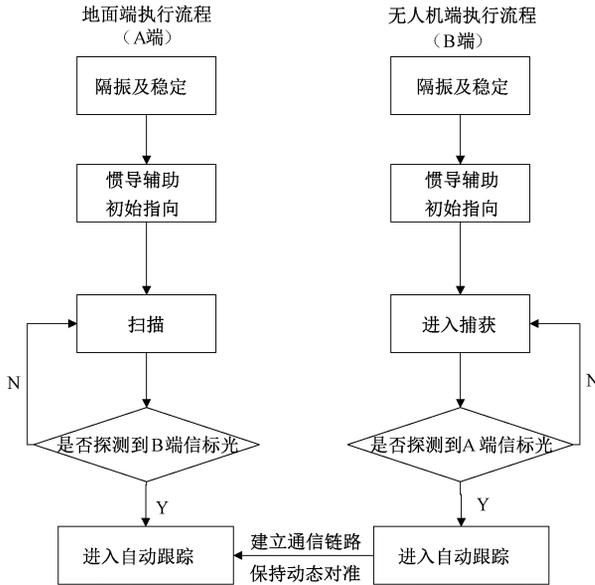


图 9 APT 系统工作流程^[62]

Fig. 9 APT system workflow^[62]

3.3 非共视轴飞行器中继技术

非共视轴通信是指无线光通信过程中由于收发端无法直接对准,需要对信号收发端的天线进行调整来实现发射端和接收端的对准,最终完成通信的过程。如图 10 为非共视轴通信的原理图^[63],图中采用二维反射镜对准。在发射天线到二维反射镜的标定粗对准系统中,采用标定相机进行定位标定,然后根据反馈的图像对发射天线进行调整。二维反射镜对接收天线的短轴精对准系统中,根据探测器 2 的反馈来调节二维反射镜,实现非共视轴通信。

利用反射镜可以很好的实现非共视轴激光通信,如图 11 是非共视轴通信在无人机中继中的应用^[47]。将二维电机转台和其他光学接收装置搭载到无人机上,对地面端发出的激光信号进行捕获对准和跟踪,使得两个地面终端通过无人机中继通信系统形成通信链路^[54]。发射端是从地面端 1 发出激光束信号,通过中继无人机搭载的二维电机转台中的反射镜反射后,经过透镜和四象限通孔探测器进行耦合,然后进入光纤后,再通过探测模块和驱动调制模块和激光管将激光信号重新发出。最后通过二向色镜和透镜以及带有反射镜的二维电机转台将激光信号回传到地面端 2。当地面端 1 作为发射端时,地

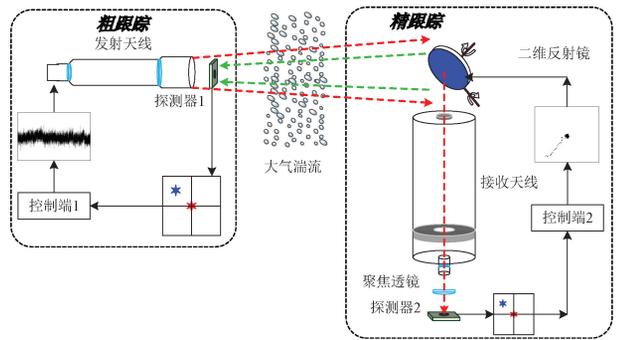


图 10 非共视轴通信原理^[63]

Fig. 10 Non-coaxial communication principle^[63]

面端 2 作为接收端,相反,当地面端 2 作为发射端时,地面端 1 就作为接收端。

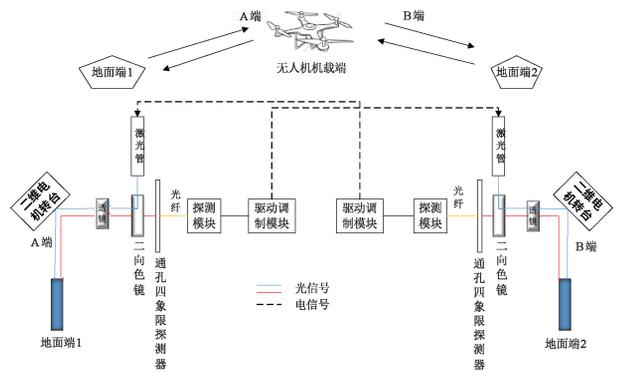


图 11 收发一体化的无人机中继 APT 系统原理^[47]

Fig. 11 The schematic diagram of the transceiver integrated UAV relay APT system^[47]

这种方法解决了传统无线光通信中光束对准耗时较长的问题。该方法为非共视轴自由空间的通信链路的建立提供了便利,对于飞行器中继在无线光通信中激光束实现快速对准有重大意义。

3.4 调制解调技术

无人机中继无线光通信中常用的调制方法是强度调制法,主要通过改变激光光源的输出功率来实现信息的传输。强度调制可分为基带信号强度调制和副载波强度调制,基带信号强度调制中最常用的是开关键控,当信息位为 1 时,则发送持续时间的光脉冲,信息位为 0 时,则不发送光脉冲^[45]。而副载波强度调制技术主要包括相移键控、差分相移键控和正交相移键控等^[19]。

在信号解调方面,系统需要对接收到的信号进行解调,以提取出有效信息,光通信中常用的两种解调方法有相干检测法和直接检测法。相干检测系统原理框图如图 12^[45]所示,接收信号与本地振荡器产生的相干载波共同进入光电检测器,然后进行放大处理,最后转换为需要的信息信号。直接检测则是对强度调制的光信号直接进

行包络检测并转换为电信号,然后经过放大^[20]。不同的调制解调方法各有其优缺点,具体对比如表 5 所示。

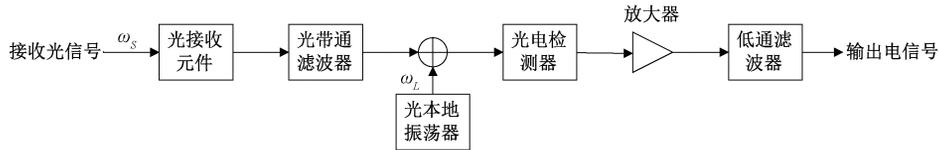


图 12 相干检测通信系统框图^[45]

Fig. 12 Block diagram of coherent detection communication system^[45]

表 5 调制解调方法优缺点对比

Table 5 Comparison of advantages and disadvantages of modulation and demodulation methods

		优点	缺点
调制方法	开关键控	带宽利用率高,实现方式简单	抗噪声性能差,调制的频率范围受限
	副载波	调制信号的频率范围较宽,	需要复杂的调制解调电路
	强度调制	可以传输较高的数据速率	
解调方法	相干检测	抗干扰能力强,可以实现较高精度的解调	需要使用复杂的电路和算法,对信号的相位和频率要求较高
	直接检测	结构简单,易于集成,可以增大传输速率完成大容量传输	抗干扰能力较差,频带利用率和接收灵敏度低

3.5 轻小型化设计技术

无人机激光通信的载荷重量越小,飞行时就会越灵活便捷,使得无人机有更多的搭载空间。无人机的轻小型化设计可以提高设备的适应性和综合性能。具体可以从如下几个方面入手:

1) 采用集成功能:通过优化激光器、反射镜、光纤等组件的选型和布局,缩小整个光传输系统的体积,并将通信设备与其他传感器、导航系统等集成在一起,从而减少设备数量和重量^[64]。

2) 采用低功耗电子元器件:选择低功耗的电子器件,包括功率放大器、光接收机、控制电路等,以降低设备的能耗,并减小所需的电源容量。

3) 采用高效的光学技术:通过采用自适应光学技术、多波束技术等高效的光学技术,可以提高光通信的性能,同时降低光通信设备的重量和功耗。

4 结论

文章介绍了无人机中继光通信系统的中继相关技术,阐述了无人机中继在无线光通信中的研究现状,针对无人机中继在无线光通信的几个关键技术做出了简要概述。未来发展趋势主要有如下几个方面:

1) 无人机中继通信系统会朝着 RF/FSO 异构方向发展:因为射频通信虽然易受干扰,不能高效通信,但穿透云雾的能力强,而自由空间光通信抗干扰能力强,但是容易受大气影响,所以为了最大程度的发挥不同频段通信系统的优势,构建射频/无线光通信异构系统为无人机中

继通信提供高效的数据连接,以实现更高效率、更安全可靠通信服务^[65]。

2) 无人机中继光通信系统会朝着智能化和自动化方向发展:如今,机器学习和人工智能发展迅速,当机器学习应用于无人机中继光通信系统中,可以帮助快速建立通信链路,提高数据传输速率和抗干扰能力,还可以使无人机自主选择最佳中继路径,所以与机器学习和人工智能相结合是未来无人机中继光通信发展的热点^[66]。

3) 无人机中继光通信的能源消耗会朝着节能高效的方向发展:无人机中继可以通过太阳能电池板、燃料电池等能源收集技术收集能量,保证其长时间运行。比如锂聚合物电池重量轻,电池放电时电压低,没有记忆效应。磷酸铁锂的蓄电池组的重量较轻,使用更加安全,工作温度范围更大。玻璃纤维和碳纤维以及强化环氧树脂的现代复合材料,在延长飞行时间、减轻无人机的重量以及增加其使用寿命方面也具有很好的发展潜力。而且无人机中继可以通过将收集到的能量分配给无线光通信设备和其他传感器设备,用来保证设备的正常运行。

4) 无人机中继光通信的中继协同机制会朝着更高效的方向发展:无人机中继无线光通信可以与卫星通信,移动通信等其他通信系统协同工作,形成一个完整的通信系统。进一步提高通信可靠性和覆盖范围,未来研究将加强对这种协同机制的探索和研究,以提高整个系统的性能和效率。

综上所述,无人机中继联合无线光通信是未来通信技术发展的重要趋势之一,在物联网、智能制造和智慧城市等方面具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 柯熙政, 邓莉君. 无线激光通信 [M]. 北京: 科学出版社, 2016.
KE X ZH, DENG L J. Wireless Laser Communication [M]. Beijing: Science Press, 2016.
- [2] 李征, 许东升, 梁静远, 等. 室外可见光通信路径损耗模型研究 [J]. 西安理工大学学报, 2023, 23(1): 1-10.
LI ZH, XU D SH, LIANG J Y, et al. Research on path loss model of outdoor visible light communication [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 23(1): 1-10.
- [3] 梁静远, 徐亚欣, 韩美苗, 等. 室内可见光通信异构融合系统研究进展 [J]. 光通信技术, 2023, 47(1): 46-50.
LIANG J Y, XU Y X, HAN M M, et al. Research progress of indoor visible light communication heterogeneous fusion system [J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(1): 46-50.
- [4] 李征, 廖志文, 梁静远, 等. 大气湍流模型的研究与展望 [J]. 光通信技术, 2023, 47(3): 9-17.
LI ZH, LIAO ZH W, LIANG J Y, et al. Research and prospect of atmospheric turbulence model [J]. Optical Communication Technology, 2023, 47(3): 9-17.
- [5] 柯熙政, 梁静远, 许东升, 等. 无线光通信类脉冲位置调制技术研究进展 [J]. 光电工程, 2022, 49(3): 3-21.
KE X ZH, LIANG J Y, XU D SH, et al. Research progress of pulse position modulation technology in wireless optical communication [J]. Optoelectronic Engineering, 2022, 49(3): 3-21.
- [6] 柯熙政, 秦欢欢, 杨尚君, 等. 车联网可见光通信系统夜间背景光噪声模型 [J]. 电波科学学报, 2021, 36(6): 986-990.
KE X ZH, QIN H H, YANG SH J, et al. Nighttime background light noise model of vehicular visible light communication system [J]. Journal of Radio Wave Science, 2021, 36(6): 986-990.
- [7] 王明军, 魏亚飞, 柯熙政. 复杂大气背景下机载通信终端与无人机目标之间的激光传输特性研究 [J]. 物理学报, 2019, 68(9): 140-148.
WANG M J, WEI Y F, KE X ZH. Research on laser transmission characteristics between airborne communication terminal and UAV target under complex atmospheric background [J]. According to Chinese Journal of Physics, 2019, 68(9): 140-148.
- [8] FAN Y, CHENG J, TSIFTISIS T A. Free-space optical communication with nonzero boresight pointing errors [J]. IEEE Transactions on Communications, 2014, 62(2): 713-725.
- [9] YAN L S, WANG F, WU W, et al. Current status and key technologies of unmanned aerial vehicle laser communication payloads [J]. Laser Optoelectron Prog, 2016, 53(8): 85-87.
- [10] LEE H, SANG H L, QUEK T, et al. Deep learning framework for wireless systems: Applications to optical wireless communications [J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(3): 35-41.
- [11] 郎为民, 田尚保, 李宇鸽, 等. 升空中继通信系统研究 [J]. 电信快报, 2022, 609(3): 1-5.
LANG W M, TIAN SH B, LI Y G, et al. Research on the airborne relay communication system [J]. Telecom Express, 2022, 609(3): 1-5.
- [12] 丁举鹏, 易芝玲, 王劲涛, 等. 无人机机载光无线通信研究进展 [J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 40-51.
DING J P, YI ZH L, WANG J T, et al. Research progress on airborne optical wireless communication for unmanned aerial vehicles [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2020, 57(23): 40-51.
- [13] 侯天浩, 行鸿彦, 刘洋. 多旋翼无人机在气象探测中的现状与展望 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(10): 7-15.
HOU T H, XING H Y, LIU Y. Status and prospects of multi-rotor UAVs in weather detection [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(10): 7-15.
- [14] 童敬辉, 丁佩, 花敏, 等. 基于强化学习的无人机中继网络节点轨迹优化 [J]. 通信技术, 2023, 56(1): 49-55.
TONG J H, DING P, HUA M, et al. Trajectory optimization of UAV relay network nodes based on reinforcement learning [J]. Communication Technology, 2023, 56(1): 49-55.
- [15] 何丹. 协作中继转发策略优化及编码协作研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2017.
HE D. Research on cooperative relay forwarding strategy optimization and coded cooperation [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2017.
- [16] 方晶. 无人机中继系统轨迹优化与资源分配研究 [D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2022.
FANG J. Research on trajectory optimization and resource allocation of UAV relay system [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2022.
- [17] 赵丰. 面向无线中继的多无人机协作和位置规划方法研究 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
ZHAO F. Research on multi-UAV cooperation and location planning for wireless relay [D]. Nanjing: Nanjing

- University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [18] 侯佳琳. 无人机中继传输系统效能评估分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2021.
HOU J L. Effectiveness evaluation and analysis of UAV relay transmission system [D]. Xi'an:Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2021.
- [19] 许子轩. 无人机辅助的无线光通信中继系统性能研究[D]. 上海:华东师范大学,2022.
XU Z X. Research on the performance of UAV-assisted wireless optical communication relay system [D]. Shanghai : East China Normal University, 2022.
- [20] PARK J, LEE E, PARK G, et al. Performance analysis of asymmetric RF/FSO dual-hop relaying systems for UAV applications [C]. IEEE Military Communications Conference. IEEE,2013;1651-1656.
- [21] KAADAN A, REFAI H H, LOPRESTI P G. Multielement FSO transceivers alignment for inter-UAV communications[J]. Journal of Lightwave Technology, 2014, 32(24): 4785-4795.
- [22] DABIRI M T, SADOUGH S M S, KHALIGHI M A. Channel modeling and parameter optimization for hovering UAV-based free-space optical links[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36(9): 2104-2113.
- [23] DABIRI M T, KHANKALANTARY S, PIRAN M J, et al. UAV-assisted free space optical communication system with amplify-and-forward relaying [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(9): 8926-8936.
- [24] FAWAZ W, ABOU-RJEILY C, ASSI C. UAV-aided cooperation for FSO communication systems[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1):70-75.
- [25] DONG Y, HASSAN M Z, CHENG J, et al. An edge computing empowered radio access network with UAV-mounted FSO fronthaul and backhaul: Key challenges and approaches [J]. Wireless Communications, 2018, 25(3):154-160.
- [26] LEE J H, PARK K H, ALOUINI M S, et al. On the throughput of mixed FSO/RF UAV-enabled mobile relaying systems with a buffer constraint[C]. ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2019.
- [27] LEE J H, PARK K H, ALOUINI M S, et al. Free space optical communication on UAV-assisted backhaul networks: Optimization for service time[C]. 2019 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE,2019.
- [28] LEE J H, PARK K H, KO Y C, et al. Throughput maximization of mixed FSO/RF UAV-aided mobile relaying with a buffer[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020,20(1): 683-694.
- [29] WU D, SUN X, ANSARI N. An FSO-based drone assisted mobile access network for emergency communications [J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering,2019,7(3):1597-1606.
- [30] SAFI H, DARGAHI A, CHENG J. Spatial beam tracking and data detection for an FSO link to a UAV in the presence of hovering fluctuations [J]. Signal Processing,DOI:10.48550/arXiv.1904.03774,2019.
- [31] SAFI H, DARGAHI A, CHENG J. Beam tracking for UAV-assisted FSO links with a four-quadrant detector[J]. IEEE Communications Letters, 2021,25(12):3908-3912.
- [32] USMAN M, ALTHUNIBAT S, QARAQE K. Mobility dependent hybrid RF/FSO backhaul in UAV assisted cellular networks[C]. IEEE 25th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks. Italy: IEEE,2020: 1-6.
- [33] ANSARI N, WU D, SUN X. FSO as backhaul and energizer for drone-assisted mobile access networks[J]. ICT Express, 2020,6(2):139-144.
- [34] JANJI S, SAMORZEWSKI A, WASILEWSKA M, et al. On the placement and sustainability of drone FSO backhaul relays [J]. IEEE Wireless Communications Letters,2022,11(8):1723-1727.
- [35] LEE J H, PARK J, BENNIS M, et al. Integrating LEO satellites and multi-UAV reinforcement learning for hybrid FSO/RF non-terrestrial networks [J]. Transactions on Vehicular Technology. IEEE,2023,72(3):3647-3662.
- [36] SINGH D, REDDY C S, SWAMINATHAN R. Hovering UAV-based FSO communications with DF relaying: A performance analysis [C]. National Conference on Communications. India: IEEE,2023:1-6.
- [37] 安建欣,何晓垒,杨乾远,等. 小型无人机空地无线激光通信的应用研究[J]. 光通信技术,2017,41(6): 10-13.
AN J X, HE X L, YANG Q Y, et al. Application research of small UAV air-ground wireless laser communication [J]. Optical Communication Technology, 2017,41(6):10-13.
- [38] 徐林,申永,安建欣,等. 一种无人机机载激光通信设备的研制[J]. 光通信技术,2018,42(10):60-62.
XU L, SHEN Y, AN J X, et al. Development of an UAV airborne laser communication equipment [J]. Optical Communication Technology, 2018,42(10):60-62.
- [39] JIANG X, WU Z, YIN Z, et al. Power and trajectory optimization for UAV-enabled amplify-and-forward relay

- networks[J]. IEEE Access, 2018, 6(1):48688-48696.
- [40] YANG L, YUAN J H, LIU X X, et al. On the performance of LAP-based multiple-hop RF/FSO systems [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2019, 55(1):499-505.
- [41] 元金海. 基于中继协作的无人机无线光通信系统性能分析研究[D]. 广州:广东工业大学, 2019.
- YUAN J H. Performance analysis of UAV wireless optical communication system based on relay cooperation [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2019.
- [42] 谷志群. 基于 FSO 的移动前传/回传网络拓扑优化技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2019.
- GU ZH Q. Research on topology optimization technology of mobile fronthaul/backhaul network based on FSO[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [43] 胡明飞. 轻小型无人机下行数据光传输机制研究[D]. 长春:长春理工大学, 2020.
- HU M F. Research on downlink data optical transmission mechanism of light and small UAV [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020.
- [44] 雷小波. 基于 NOMA 的无人机协作 FSO/RF 通信系统的性能研究[D]. 广州:广东工业大学, 2020.
- LEI X B. Performance study of NOMA-based UAV cooperative FSO/RF communication system [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [45] MA Y, WANG J Y, WANG J B, et al. Outage performance analysis and parameter optimization of hovering UAV-Based FSO system [C]. ICC 2020-2020 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2020.
- [46] WANG J Y, MA Y, LU R, et al. Hovering UAV-based FSO communications: Channel modelling, performance analysis, and parameter optimization[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2021, 39(10): 2946-2959.
- [47] 梁韩立. 机载激光通信自动跟踪控制系统设计与实现[D]. 西安:西安理工大学, 2021.
- LIANG H L. Design and implementation of automatic tracking control system for airborne laser communication [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [48] WANG J, XU G, ZHAO Z, et al. Performance analysis of dual-hop UAV-assisted FSO communication system with DF protocol [C]. 14th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. IEEE, 2022:900-904.
- [49] QU L, XU G, ZENG Z, et al. UAV-assisted RF/FSO relay system for space-air-ground integrated network: A performance analysis[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2022, 21(8): 6211-6225.
- [50] 陆榕榕. 基于 UAV 的 FSO 通信系统性能分析及优化[D]. 南京:南京邮电大学, 2022.
- LU R R. Performance analysis and optimization of UAV-based FSO communication system [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2022.
- [51] 龙晓琼. 基于无人机辅助的中继无线通信系统性能分析研究[D]. 广州:广东工业大学, 2020.
- LONG X Q. Research on performance analysis of relay wireless communication system based on UAV [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020.
- [52] 徐溯, 张际, 刁杨华, 等. 基于混合光电传输的无人机中继通信系统性能分析[J]. 电信科学, 2022, 38(4): 113-120.
- XU SH, ZHANG J, DIAO Y H, et al. Performance analysis of UAV relay communication system based on hybrid optoelectronic transmission [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(4): 113-120.
- [53] 马阳. 基于无人机中继的 FSO 通信关键技术研究[D]. 南京:东南大学, 2021.
- MA Y. Research on key technologies of FSO communication based on UAV relay [D]. Nanjing: Southeast University, 2021.
- [54] 马津伟. 星地融合网络中基于遍历容量的地面用户调度算法[J]. 火力与指挥控制, 2022, 47(2): 93-97, 102.
- MA J W. Ground user scheduling algorithm based on ergodic capacity in satellite-ground integrated network [J]. Fire and Command Control, 2022, 47(2): 93-97, 102.
- [55] 唐翰玲, 李勇军, 李怡, 等. 基于 MIMO 的无人机斜程激光通信性能分析[J]. 应用光学, 2022, 43(5): 1030-1036.
- TANG H L, LI Y J, LI Y, et al. Performance analysis of UAV oblique laser communication based on MIMO [J]. Application Optics, 2022, 43(5): 1030-1036.
- [56] 唐翰玲, 李勇军, 邵龙, 等. 无人机全光中继系统误码率性能分析[J]. 激光与红外, 2023, 53(7): 1066-1072.
- TANG H L, LI Y J, SHAO L, et al. BER performance analysis of all-optical relay system for UAV [J]. Laser and Infrared, 2023, 53(7): 1066-1072.
- [57] 李春若, 苑俊英. 基于速率匹配的 FSO 与 RF 间链路的动态切换算法[J]. 弹箭与制导学报, 2023, 43(2): 32-37.
- LI CH R, YUAN J Y. Dynamic switching algorithm between FSO and RF based on rate matching [J].

- Journal of Missiles and Guidance, 2023, 43(2):32-37.
- [58] WANG J Y, WANG J B, CHEN M, et al. Outage analysis for relay-aided free-space optical communications over turbulence channels with nonzero boresight pointing errors[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 12(6):1-15.
- [59] 柯熙政, 吴加丽, 杨尚君. 面向无线光通信的大气湍流研究进展与展望[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3):323-339.
- KE X ZH, WU J L, YANG SH J. Research progress and prospect of atmospheric turbulence for wireless optical communication [J]. Journal of Radio Wave Science, 2021, 36(3):323-339.
- [60] PARK J, LEE E, CHAE C, et al. Impact of pointing errors on the performance of coherent free-space optical systems[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2016, 32(28):181-184.
- [61] HUANG S, SAFARI M. Free-space optical communication impaired by angular fluctuations [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 25(16):7475-7487.
- [62] 孟立新. 机载激光通信中捕获与跟踪技术研究[D]. 长春:吉林大学, 2014.
- MENG L X. Research on acquisition and tracking technology in airborne laser communication [D]. Changchun: Jilin University, 2014.
- [63] 杨尚君, 柯熙政, 吴加丽, 等. 利用二维反射镜实现无线光通信快速对准[J]. 中国激光, 2022, 49(11):101-114.
- YANG SH Y, KE X ZH, WU J L, et al. Fast alignment of wireless optical communication using two-dimensional mirrors [J]. China Laser, 2022, 49(11):101-114.
- [64] 闫鲁生, 王峰, 吴畏, 等. 无人机激光通信载荷发展现状与关键技术[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(8):40-48.
- YAN L SH, WANG F, WU W, et al. The development status and key technologies of UAV laser communication payload [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2016, 53(8):40-48.
- [65] 苏绍璟, 童小钟, 魏俊宇, 等. 基于自由空间光的无人
- 机集群通信载荷技术发展现状与趋势[J]. 国防科技大学学报, 2021, 43(4):118-127.
- SU SH J, TONG X ZH, WEI J Y, et al. Development status and trend of UAV swarm communication payload technology based on free space light [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2021, 43(4):118-127.
- [66] 杨岳航, 陈武雄, 朱明, 等. 基于机器视觉的无人机自主着陆技术[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4):57-61.
- YANG Y H, CHEN W X, ZHU M, et al. Autonomous landing technology of UAV based on machine vision[J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(4):57-61.

作者简介



韩美苗, 2012 年于渭南师范学院获得学士学位, 2015 年于西安理工大学获得硕士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院博士研究生, 主要研究方向为部分相干光相干检测技术。

E-mail: kambibiyo@163.com

Han Meimiao received her B. Sc. degree from Weinan Normal College in 2012 and M. Sc. degree from Xi'an University of Technology in 2015. Now she is a Ph. D. student in the School of Automation and Information Engineering at Xi'an University of Technology. Her main research interest includes partially coherent optical coherent detection technology.



柯熙政(通信作者), 1996 年于中国科学院大学获得博士学位, 现为西安理工大学自动化与信息工程学院教授, 俄罗斯自然科学院外籍院士, 主要研究方向为无线光理论与技术。

E-mail: xzke@263.net

Ke Xizheng (Corresponding author) received his Ph. D. degree from University of Chinese Academy of Sciences in 1996. Now he is a professor at the School of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Foreign Academician of the Russian Academy of Natural Sciences. His main research interest includes theory and technology of optical wireless communication.