

摘要

森林中无人机辅助的物联网物理层安全通信多目标优化研究

在森林环境中，无人机辅助通信应用场景广泛，然而由于地形的复杂性、信道传输的开放性和无人机续航能力有限的特性，其安全通信和节省能耗方面存在着一些挑战。本文对森林中无人机辅助的物联网（Internet of Things, IoT）物理层安全通信和缩减能耗的多目标优化展开研究。

在森林场景下采用多个无人机组成了虚拟天线阵列，通过协作波束成形技术，实现存在窃听者的情况下辅助 IoT 安全通信。但组成虚拟天线阵列过程中会消耗无人机有限的能量。基于冲突的多目标并针对于森林环境下无人机传输的两种场景，本文具体工作如下：

（1）在无人机飞行高度较低时，考虑到植被干扰以及地面造成的信号损失，使用一种包含树冠、地面造成波束损耗的森林信道模型，并针对此低空通信场景同时对无人机的三维位置信息和阵元激励电流进行优化，建立最大化安全通信传输速率和最小化推进能耗的无人机低空多目标优化问题（Low Altitude Multi-objective Optimization Problem, LAMOP）。为了求解 LAMOP 提出了一种改进的多目标粒子群优化（Enhanced Multi-objective Particle Swarm Optimization, EMOPSO）算法。算法在初始化粒子群个体位置时采用 Circle 映射替代了传统的随机数生成方法，与传统的随机数生成方法相比获得了不规则性和随机性的提升，有利于探索更广泛的解空间；进一步使用了基于最优集突变方法，在每次粒子群位置更新过程中，通过评价重复最优解的次数来判断算法的收敛速度，确定粒子变异时机，以有效地避免算法陷入局部最优；最后结合了基于灰狼算法的位置更新方法作为 EMOPSO 的更新机制，该方法联立三个特殊粒子共同更新粒子位置，从而有效地避免了粒子陷入局部最优解以保障算法的全局搜索能力。仿真实验结果表明，EMOPSO 算法在不同阵元数量情况下，对比于其他优化算法具有更好的有效性、稳定性和收敛性。

（2）在无人机飞行高度较高时，通过概率视距（Probabilistic Line-of-sight, PLoS）模型对无人机无线通信信道进行建模。针对高空飞行辅助 IoT 无线通信的应用，提出了一种联合优化无人机的三维位置信息和无人机阵列中阵元的激励电

流的方法,并建立一个基于高空飞行无人机空中基站的高安全传输速率和低飞行能耗的高空多目标优化问题(High Altitude Multi-objective Optimization Problem, HAMOP)。为解决该问题提出了一个改进的多目标樽海鞘优化算法(Enhanced Multi-objective Salp Swarm Algorithm, EMSSA)。算法结合 Chebyshev 映射和随机数方法选择表现更好的解对种群进行初始化,增强了种群多样性并提升了种群质量;引入柯西算子进行变异以使粒子更容易搜索到更优解,从而避免陷入局部最优;EMSSA 还在传统多目标樽海鞘算法(Multi-objective Salp Swarm Algorithm, MSSA)的樽海鞘链领导者位置更新部分结合了多元宇宙优化(Multi-verse Optimizer, MVO)算法中虫洞的更新方法,扩充了可以精准控制搜索步长的参数集,旨在增强算法的寻优能力。实验结果证明,改进的 EMSSA 在无人机不同规模情况下解决 HAMOP 问题的效果最优。

关键词:

无人机, 无人机辅助无线通信, 虚拟天线阵列, 协作波束成形, 多目标优化

Abstract

Research on Multi-objective Optimization of UAV-assisted Physical Layer Security Communication of IoT in Forest

In forest environments, UAV-assisted communication is used in a wide range of scenarios, however, there are challenges in its secure communication and energy saving due to the complexity of the terrain, the openness of channel transmission and the limited range of UAVs. In this paper, we investigate the multi-objective optimization of UAV-assisted Internet of Things (IoT) physical layer secure communication and energy consumption reduction in forests.

A virtual antenna array is formed using multiple UAVs in forest to achieve assisted IoT secure communication in the presence of eavesdroppers through collaborative beamforming techniques. However, the process of forming virtual antenna arrays consumes the limited energy of UAVs. Based on the conflicting multiple targets and for two scenarios of UAV transmission in forest environment, the specific work in this paper is as follows:

(1) At low UAV flight altitude, considering vegetation interference and the signal loss caused by the ground, a forest channel model containing the tree canopy and beam loss caused by the ground is used, and the three-dimensional (3D) position information of the UAV and the array excitation current are simultaneously optimized for this low-altitude communication scenario to establish a low-altitude multi-objective optimization problem (LAMOP) for UAVs that maximizes the safe communication transmission rate and minimizes propulsion energy consumption. An enhanced multi-objective particle swarm optimization (EMOPSO) algorithm is proposed to solve the LAMOP. The algorithm uses Circle mapping instead of the traditional random number generation method in initializing the particle swarm individual positions, which obtains the improvement of irregularity and distribution compared with the traditional random number generation method and facilitates the exploration of a wider solution space. Furthermore, the mutation method based on the optimal set is used. During each particle

swarm location update process, the convergence speed of the algorithm is judged by evaluating the number of times the optimal solution is repeated, and the opportunity of particle mutation are determined to effectively avoid the algorithm falling into local optimization. The method combines the position update method based on the gray wolf algorithm as the update mechanism of EMOPSO, which jointly uses three special particles to update the particle positions, thus effectively avoiding the particles to fall into the local optimal solution to guarantee the global search ability of the algorithm. The simulation results show that the EMOPSO algorithm has better effectiveness, stability, and convergence compared to other optimization algorithms under different array element numbers.

(2) The probabilistic line-of-sight (PLoS) model was used to model the wireless communication channel when the UAV was flying at a high altitude. Aiming at the application of high-altitude flight assiste IoT wireless communication, a method was proposed to optimize the 3D position information of UAV and the excitation current of array element in UAV array. A high altitude multi-objective optimization problem (HAMOP) based on the air base station of high altitude UAV with high safe transmission rate and low flight loss was established. To solve this problem, an enhanced multi-objective salp swarm algorithm (EMSSA) was proposed. The algorithm combines Chebyshev mapping and random number methods to select better performing solutions for population initialization, which enhances population diversity and improves population quality. In this algorithm, Cauchy operator is introduced to make it easier to search for a better solution, so as to avoid falling into the local optimum. EMSSA also combined the update method of wormhole in the multi-verse optimizer (MVO) in the traditional multi-objective salp swarm algorithm (MSSA) to update the position of salp chain leader. The parameter set which can control the search step size is extended to enhance the search ability of the algorithm. The experimental results show that the EMSSA has the best effect in solving the HAMOP problem in different sizes of UAVs.

Keywords:

UAV, UAV-assisted wireless communication, Virtual antenna arrays, Collaborative beamforming, Multi-objective optimization

关于学位论文使用授权的声明

本人完全了解吉林大学有关保留、使用学位论文的规定，同意吉林大学保留或向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权吉林大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

（保密论文在解密后应遵守此规定）

论文级别： ☒ 硕士 ☐ 博士

学科专业： 软件工程

论文题目： 森林中无人机辅助的物联网物理层安全通信多目标优化研究

作者签名： 李若楠

指导教师签名： 王春民

2023 年 5 月 24 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 无人机通信研究现状	3
1.2.2 无人机辅助 IoT 通信研究现状	4
1.2.3 无人机安全通信研究现状	5
1.2.4 无人机虚拟阵列和波束成形技术研究现状	6
1.3 研究内容和章节安排	7
1.3.1 研究内容	7
1.3.2 章节安排	9
第 2 章 系统模型与问题构建	10
2.1 系统模型	10
2.1.1 无人机无线通信网络模型	10
2.1.2 无人机能量损耗模型	12
2.2 多目标优化问题	13
2.2.1 帕累托定义	13
2.2.2 多目标优化问题构建	13
2.3 本章小结	14
第 3 章 LAMOP 问题构建和求解	15
3.1 低空场景森林信道模型	15

3.2	LAMOP 的优化问题构建	17
3.3	优化算法.....	19
3.3.1	粒子群优化算法.....	19
3.3.2	多目标粒子群优化算法.....	20
3.4	改进的多目标粒子群算法.....	21
3.4.1	基于 Circle 混沌的初始化.....	21
3.4.2	基于灰狼算法的搜索更新方法.....	22
3.4.3	基于最优集的突变方法.....	24
3.4.4	基于 EMOPSO 算法的 LAMOP 问题求解.....	25
3.5	仿真实验与分析.....	27
3.5.1	参数设置.....	27
3.5.2	优化结果.....	28
3.6	小结.....	32
第 4 章	HAMOP 问题构建和求解	34
4.1	高空场景森林信道模型.....	34
4.2	HAMOP 的优化问题构建	35
4.3	优化算法.....	37
4.3.1	樽海鞘优化算法.....	37
4.3.2	多目标樽海鞘优化算法.....	38
4.4	改进的多目标樽海鞘算法.....	39
4.4.1	基于 Chebyshev 映射的初始化.....	39
4.4.2	基于柯西算子的变异方法.....	39

4.4.3 基于 MVO 算法的虫洞更新方法	40
4.4.4 基于 EMSSA 算法的 HAMOP 问题求解	42
4.5 仿真实验与分析	43
4.5.1 参数设置	43
4.5.2 优化结果	44
4.6 本章小结	48
第 5 章 总结与展望	50
5.1 总结	50
5.2 展望	51
参考文献	52
在学期间科研成果	57
致谢	58

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

无人机（Unmanned Aerial Vehicles, UAVs）是一种集军事、民用和商业于一体的新型应用技术。无人机具备灵活可控、覆盖范围广、低成本、隐蔽性好且移动速度快等特点^{[1][2]}。随着各国的发展愈加倾向于利用高新科技的创新和使用，无人机近些年来受到了广泛关注，在各种应用领域取得了巨大的发展，促使了如搜救、递送物资等多样业务场景的诞生，极大的便捷了人们的工作和生活^{[3][4]}。

无人机可以帮助地面蜂窝通信进行高速传输，对比于地面蜂窝通信，无人机无线通信主要有以下特性：首先，无人机具有高灵活性。地面蜂窝通信的高度基本在 10 m-25 m 之间，而无人机可以达到的飞行高度在 100 m 以上，因此无人机可以根据无线通信任务的需求，控制自身移动到特定位置，并保持悬停状态。无人机的可控三维（Three-dimensional, 3D）机动性为通信提供了极高的自由度，为了提高链路的通信质量，可以通过调整无人机的位置来实现该目的。其次，可以实现按需部署。无人机重量一般较小，在地面固定基础设施被破坏或者不存在的紧急情况下，无人机可以低成本地通过临时部署，及时提供信号传输，实现通信恢复后救援、消防等功能。第三，高概率视距（Line-of-sight, LoS）信道。传统的地面基站通信由于高度较低，会存在阴影和多路径影响造成的信号损耗较高。由于无人机的飞行高度较高，在实际飞行发送信号过程中接触散射体较少，因此具有很高概率在 LoS 信道传输信号，这会导致通信信号的衰落较小，有利于实现高可靠传输。因此部署无人机对比构建普通蜂窝基础设施操作更加简单，提供服务更加便利且可以降低成本^[5]。

近年来，利用无人机实现辅助物联网（Internet of Things, IoT）设备通信的应用得到了广泛的关注^[3]。然而通常 IoT 设备发射功率较小，无法远距离通信，导致 IoT 节点在一些环境复杂地区无法连网，例如在森林环境中用于环境监测的传感器。当前，越来越多的 IoT 设备被部署在森林等野外环境中，但对于在森林

环境下的无人机辅助通信研究工作还十分有限,因此本文的研究目的在于进一步探索无人机辅助 IoT 设备在森林场景下的应用。

然而,单架无人机的容错率较低。在恶劣的环境下,单架无人机飞行过程中一旦受损,将对通信效率造成极大的影响。并且受到通信设备的限制,单架无人机无法实现对大范围区域的辅助通信。针对于单无人机的局限问题,可采用多架无人机共同配合,形成虚拟天线阵列(Virtual Antenna Array, VAA)^[6]。根据电磁波叠加原理,各无人机的传输信号将加权叠加,并指向目标接受者。对比于单架无人机,多个无人机能够取得更好的通信速率、覆盖范围,从而提高完成任务效率^[7]。

目前,无人机通信网络在面对森林环境时仍面临许多困难。例如,森林环境具有严重的多径反射,而无人机往往配备全向单天线,这将导致传输性能显著降低。而且森林环境较为隐蔽,在完成通信任务中,由于无线信道是开放的,无人机传输信息的同时会存在窃听者的攻击,容易造成信息泄漏。甚者,一些不法的窃听者会对无人机进行恶意攻击。因此安全地传输数据避免信息泄露成为现今无人机通信一个重要且有挑战性的问题^[8]。

物理层安全技术中的波束成形技术被认为是无人机不同应用场景下提高保密性能的一个有效方法^[9]。此技术利用空间自由度使加权信号传输具有指向性的特性实现安全传输。考虑到传输目标位置和窃听者的位置,设计在提供辅助无线通信服务时,使目标设备接收的信号更多,窃听者接受的信号更少,从而增加无线通信保密率,使无人机能够尽快完成数据传输任务,可为其他任务节省能量^[10]。

但移动无人机个体的过程中会增加无人机的能耗,而无人机的能量是有限的。因此需要同时优化无人机的安全通信速率和能量消耗。综上所述,对森林中无人机辅助的 IoT 物理层安全通信多目标优化研究有很重要的意义。

1.2 国内外研究现状

前些年,无人机在军事方面使用较多,无人机在作战中不仅可以起到监视、侦察等作用,在无人机相关技术投入大量研究后,无人机还可以作为攻击型战斗

设备。随着科技的不断发展，无人机的功能逐渐拓展，在民用和商用领域也受到各界关注，无人机在互联网交付、协助救援和临时通信等任务中都得到了广泛的应用。

1.2.1 无人机通信研究现状

与传统的地面基站相比，由于其灵活性与机动性，无人机可以在空中提供信号。无人机不仅覆盖范围更广、无视地形缺陷、避开障碍物能力强，而且无人机在飞行中更高的高度，使其可以获得更高概率的 LoS 通道。无人机在一些自然灾害或者环境复杂的情况下，可以作为空中基站，按需部署，协助地面基站进行通信，并为地面设备提供多种类型和广泛的网络支持。对比传统基站，在森林和山区等复杂通信场景中传输数据所需的技术条件和成本消耗更低。此外，无人机还可以充当中继，提高远程发送机和接收机之间的通信效率。由于部署无人机对比构建普通蜂窝基础设施操作更加简单，提供服务更加便利且可以降低成本^[5]，近些年来，将无人机作为空中基站辅助无线通信的应用吸引了越来越多学者的关注和研究。

Omar Sami Oubbati 等人介绍了无人机在辅助无线通信过程中的类型选择。无人机根据其作业高度、机体重量、内部动力模式以及尺寸大小的不同可以分为三类无人飞行器，包括低空平台、高空平台和卫星^[11]。无人机大致可以分为两种类型，分别是固定翼无人机以及旋翼无人机，两种无人机各有优缺点^[12]。固定翼无人机具有速度更快，重载荷特性等优点。旋翼无人机对比于固定翼无人机，虽然机动性较差，重量更小，但旋翼无人机具有悬停能力，而固定翼无人机在高空时必须保持移动，因此在本文中选择旋翼无人机作为传输设备。Zhang J 等人研究了无人机在海上作为辅助移动中继系统的应用。作者介绍了通过设定无人机的位置，提高了向海上用户传输在无人机中未缓存的特定数据的平均可达率^[13]。Arvind Merwaday 等人研究了在遭受自然灾害或者恶意损坏后，导致固定基础通信设施损坏情境下，无人机作为空中基站辅助通信，提高网络吞吐量的问题。作者利用无人机的机动性，提出了调整无人机的位置部署，通过无人机空中基站和

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/158066046071006046>