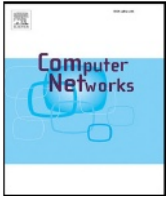




内容列表可在 ScienceDirect 上找到

计算机网络

杂志主页:www.elsevier.com/locate/comnet



offspeed:无人机辅助边缘计算的最优节能飞行速度调度

叶伟都, 罗俊洲\*, 山锋, 吴文佳, 杨明

东南大学计算机科学与工程学院, 江苏南京 211189

条信息

关键词:  
无人  
机  
边缘计算数据采集能耗  
飞行速度调度优化算法

摘要

数以百万计的物联网设备已被广泛部署, 支持智慧城市、工业互联网、智能交通等应用。这些物联网设备定期上传他们收集的数据, 并重新配置自己, 以适应动态环境。对于低端物联网设备来说, 这两种操作都是资源消耗。提出了一种基于边缘计算的无人机(UAV)飞行方式, 从物联网设备上收集数据并完成重构计算任务。与现有的大多数研究不同, 本文的研究重点是在单个任务执行期限和通信范围的约束下, 利用实用的能量模型, 分配适当的飞行速度以使无人机的能量消耗最小。提出了节能飞行速度调度(EESS)问题, 并设计了一种新的图表来可视化和分析该问题。在此基础上, 提出了一种最优节能飞行速度调度(offspeed)算法来解决离线版本的 EESS 问题。利用 offspeed 和从理论分析中获得的最优属性, 开发了一种在线启发式速度调度算法, 用于更现实的场景, 即在无人机飞近之前, 来自物联网设备的信息一直是未知的。最后, 仿真结果表明我们的在线启发式算法接近最优。该研究为基于实际推进能量模型的无人机航速调度提供了新的研究方向。——

1.介绍

数以百万计的物联网设备已被广泛部署, 支持智慧城市、工业互联网、智能交通等应用。物联网设备的主要任务是收集数据并上传这些数据进行集中分析, 另一项重要任务是定期重新配置自己, 以适应动态环境。然而, 这两种操作都消耗能量。首先, 长距离无线数据传输非常消耗能源;其次, 重新配置涉及对新收集的数据进行密集计算。重新配置可以确保物联网设备使用与动态环境相匹配的配置, 因此节约能源具有重要意义。然而, 物联网设备资源有限, 通常缺乏车载能量和计算能力。因此, 避免远程无线数据传输和星上密集计算对重构至关重要。

无人机辅助边缘计算是将计算边缘节点安装在无人机上进行调度的一种很有前途的技术

飞近每个物联网设备进行数据收集和重新配置计算。因此, 物联网设备需要等待无人机靠近自身后才能传输采集到的数据, 传输距离较短。与此同时, 物联网设备不再执行密集的重新配置计算。相反, 挂载的边缘节点在接收到所有数据后立即进行计算, 并在无人机飞走之前将结果返回给物联网设备。减少了物联网设备在能耗方面的负担。与基于传统地面基站和地面移动汇聚点的方法相比, 无人机辅助边缘计算具有较高的移动性和计算能力, 具有更大的灵活性, 在智慧城市、工业互联网和智能交通等领域发挥着重要作用。

我们没有将物联网设备部署在某个区域, 而是专注于沿着一条线路部署它们, 这也有很多应用, 如道路、水/石油/天然气管道或河流海岸。图 1 给出了该系统的应用场景示例。在这个场景中, 一组

国家重点研发计划(no . 2017YFB1003000、2018YFB0803400)部分资助;国家自然科学基金项目(no . 61632008、61532013、61702097、62072102、62072103);江苏省网络与信息安全重点实验室;BM2003201);计算机网络与信息集成教育部重点实验室(93K-9);

\*通讯作者。

E-mail: jl原因@seu.edu.cn (J. Luo)

<https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107577>

2020 年 7 月 4 日收到;2020 年 8 月 27 日以修订后的表格收到;2020 年 10 月 5 日在线开放  
1389-1286/©2020 Elsevier B.V.版权所有。

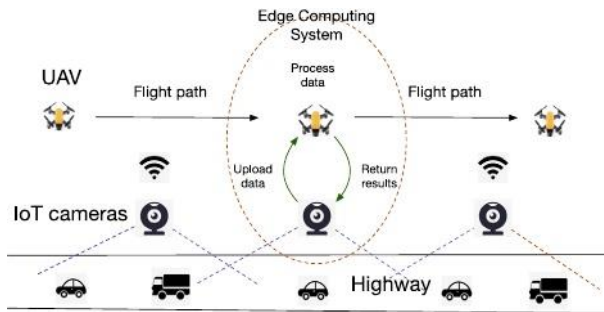


图 1 所示。一个应用程序场景的说明。在高速公路沿线部署了物联网摄像头来收集交通数据。这些物联网摄像头被假定能够自我重新配置，以适应动态流量。但是，一个好的重新配置需要对最近的数据进行密集的计算，并且是由最后期限驱动的。一架边缘计算功能的无人机飞上空，从近距离位置的摄像头收集数据。重新配置的结果从这个无人机返回到这些相机。如何控制飞行速度，使无人机的能耗降到最低，使每一个物联网设备都有足够的时间上传数据，并在规定的期限内完成每一个重新配置任务。

物联网监控摄像头部署在给定的高速公路/道路上，监控交通并收集感兴趣的数据，如车辆数量、车辆类型和速度，之后可用于智能交通目的，如道路使用和维护，以及司机行为分析。这些物联网摄像头能够通过改变其感知间隔和感知质量设置，对不同的交通状况进行自我重新配置。然而，一个好的重新配置高度依赖于最新的数据来适应动态流量，即，对最近收集到的数据进行密集计算，可以很好地重新配置。因此，所有来自物联网设备的重新配置计算任务都是由最后期限驱动的。假设高速公路/公路位于缺乏通信基础设施的偏远位置，该工作使用边缘计算支持的无人机从近距离位置的摄像机收集数据，然后执行重新配置计算。通过这种方式，电池供电的物联网摄像头节省了能源。

无人机辅助边缘计算是当前学术界的研究趋势[1-17]，研究重点是将计算任务从物联网设备上卸载。能源对无人机至关重要，原因显而易见。然而，文献中的相关研究在考虑无人机能耗时，要么忽略了推进能量[9,10,13,14]，要么假设了一个简单的飞行能量模型[1,3,8,15,16]。Zeng et al.[18]指出，推进能量可能占无人机总能耗的 95% 以上，细粒度推进能量模型对于降低无人机的能源消耗具有重要意义。研究表明，无人机的推进功率主要受其飞行速度的影响[5,18 - 20]，因此通过控制无人机的飞行速度来降低无人机的推进能耗是可行的。但在相关研究中，采用了简单的推进能量模型。例如，一些相关的著作[2,8]假设飞行功率与飞行速度成正比，还有一些相关的著作[3,4]假设飞行功率与飞行速度的平方成正比，都过于简单。我们采用了复杂的无人机飞行能耗模型[19]，该模型中无人机具有最节能的飞行速度，任何较低或较高的速度都会消耗更多的能量。

在无人机辅助边缘计算中，卸载任务的执行期限非常重要。然而，一些相关研究[4,19,21-23]没有考虑任务的执行时间，其他一些相关研究[2,5,9,23]假设任务的执行期限简单，例如每个任务都有相同的执行期限。虽然常见的截止日期假设可以简化理论分析，简化问题求解过程，但单一的截止日期模型没有明确考虑单个卸载任务的执行延迟，这对物联网设备至关重要。我们允许每个被卸载任务的单独计算截止日期，并将推进能量最小化

在考虑通信距离约束的情况下，通过调整无人机的飞行速度来实现。

总的来说，本文采用了最实用的飞行能量模型，并允许每个卸载任务的执行都有单独的截止日期，这使得我们的 EESS 问题非常难以优化解决。读者可以从以下对我们的问题的挑战中感受到这种基本性质。(1)根据我们实际的推进能耗模型，一架无人机具有最节能的飞行速度，任何较低或较高的速度都会消耗更多的功率。在这种最节能的飞行速度不受其他限制的情况下，选择一个速度是具有挑战性的。(2)一方面，每个物联网设备在其通信范围内必须有足够的无人机时间上传所有数据，因此无人机飞行速度要慢；另一方面，每次重新配置任务都必须在规定期限内完成，因此无人机飞行速度要快。必须找到最好的取舍。(3)物联网设备之间的通信范围可能会重叠，无人机一次只能采集一台设备的数据。因此，每个物联网设备都在争夺无人机传送自己数据的时间。而且，每个设备要传输的数据量不同，通信范围大小也不同，这样的竞争相当复杂。

本文的主要贡献如下：

- 提出一种无人机辅助的边缘计算系统，从物联网设备收集数据并完成卸载重构计算。我们采用了一种复杂的无人机飞行能耗模型[19]，该模型中无人机具有最节能的飞行速度，任何较低或较高的速度都将消耗更多的功率。
- 我们首次尝试通过调整无人机的飞行速度来最小化无人机的推进能量，同时考虑通信距离限制和每个卸载任务的单个计算期限。在此基础上，提出了能量高效飞行速度调度问题。
- 设计了一个新颖的图表，以一种简单而吸引人的方式将 EESS 问题可视化。利用可视化图提出了一种最优节能飞行速度调度(offspeed)算法，并从理论上证明了该算法能最优求解离线 EESS 问题。
- 基于 offspeed 理论分析获得的最优性，开发了一种启发式在线算法，用于更现实的场景，即在无人机飞近之前，物联网设备的信息一直是未知的。仿真结果也表明我们的在线启发式算法是接近最优的。该研究为基于实际推进能量模型的无人机航速调度提供了一个新的研究方向。

本文的其余部分组织如下。第二部分介绍了无人机辅助边缘计算系统的相关工作和无人机节能策略。第 3 节提出了系统模型，并阐述了 EESS 问题。第四节介绍了一种新的图形虚拟化方法和一些优化性质。第 5、6 节解决了离线版本的 EESS 问题。第 7 节解决了在线 EESS 问题。最后，第 8 节给出了仿真结果，第 9 节给出了结论。

2.相关的工作

介绍了近年来无人机辅助边缘计算和无人机节能策略的研究进展。

2.1.UAV-assisted 边缘计算

无人机辅助边缘计算是一种很有前景的技术，可以减轻物联网设备的负担。Yong 等[18]对无人机辅助无线网络的多项工作进行了研究，认为无人机挂载边缘节点是一种可行的卸载物联网设备任务的方法，特别是对于实时计算任务。Jeong et al.[6]考虑

无人机作为移动云，辅助地面物联网设备完成计算任务。他们提出了一种将无人机飞行轨迹和卸载策略相结合的优化模型，以最大限度地减少无人机和地面用户的能源消耗。Hu 等人[7]设置边缘计算使无人机能够计算从地面用户卸载的任务。与之前的作品[6]不同，Hu 等[7]假设用户上传的所有任务都是时间敏感的，每个任务都有自己的截止日期。Cao 等人[8]开发了一种蜂窝连接的无人机移动边缘计算系统，无人机由地面基站(TBS)为计算卸载提供服务。提出了一种资源分区策略，通过对资源分区、无人机航迹和比特分配进行联合优化，使无人机能耗最小化。Hu 等人将计算服务器安装在无人机上，帮助用户设备(UE)完成任务。提出了在带宽约束下无人机和终端总能耗最小的联合优化问题。Zhou 等人[24]还在物联网中应用了无人机启用的 MEC 电源系统，并在他们的工作中使用了 WPT(无线功率传输)技术，为无人机提供持续的电源，以最大限度地提高通信速率。

以上工作主要讨论了无人机单无人机场景下的无人机辅助边缘计算系统，以及无人机多无人机场景下的无人机辅助边缘计算系统。Zhang 等[10]部署了大量无人机群，有效扩大物联网设备覆盖范围。本次研究的无人机分为两层，下层为旋翼飞行器，飞行高度较低，直接为地面用户服务，上层为固定翼飞行器，向下层无人机发送指令。Wang et al.[25]也建立了多无人机使能系统，将多架无人机部署为飞行边缘云，服务于大规模用户。他们提出了一个联合优化问题，该问题考虑了无人机的数量和它们的位置，并决定地面用户是否必须将任务卸载给无人机。

然而，这些工作大多集中在物联网设备海量采集数据的卸载上，很少关注物联网设备的数据重构。

2.2. 无人机节能策略

节能是无人机的另一个重要因素，因为大多数无人机是由电池驱动的，其工作时间从根本上受到其机载能量的限制。也有一些致力于降低无人机能耗的工作。Franco 等[26]提出了一种利用无人机覆盖给定区域内所有点的路径规划策略。他们提出了一种能量感知的路径规划算法，该算法在满足覆盖和分辨率约束的同时最小化消耗。Mazaffari 等人[27]在物联网网络中部署了多架无人机，从物联网设备收集数据。他们将无人机的总传输能耗降至最低，实现了物联网设备的上行可靠通信。Yong 等人提出了一种旋翼无人机的能量消耗模型，包括推进能量和通信相关的能量。在该模型的基础上，通过对无人机航迹和网络吞吐量的联合优化，实现了无人机能耗的最小化。Alzenad 等人[29]在考虑垂直和水平维度的三维场景中使用无人机安装的基站为地面物联网设备提供服务。他们的目标是，将无人机的发射功率降至最低，最大限度地增加物联网设备的覆盖数量。Trotta 等人[30]提出了一种网络架构，其中无人机被派遣到 PoI(兴趣点)执行城市规模的视频监控。为了延长无人机的工作时间，他们在公交车顶部设置了充电站，无人机可以降落在公交车上给自己的电池充电。

由于推进功率占无人机功耗的大部分，且主要受其飞行速度的影响，因此通过优化无人机的飞行速度来最小化推进功率也有一些研究。Yong 等人[19]提出了一个能耗模型

说明飞行速度对无人机推进功率的影响很大。根据该模型，他们找出了无人机在每个时隙的合适飞行速度，从而使无人机的能量消耗最小化。Eom 等人[21]研究了一种无线通信系统，无人机在该系统中完成了对多个物联网设备的传输任务。他们的目标是在地面物联网设备最大电池存储容量的约束下，将推进功率降至最低。Xu 等[22]结合 WPT 技术延长了无人机的工作时间，同时最小化了无人机的推进功率。他们首先考虑没有最大飞行速度限制的情况，然后加入速度限制。

但这些工作主要是通过优化无人机与物联网设备之间的空对地通信信道来节约无人机的能源，没有考虑任务的计算时间。此外，这些工作只能得到启发式或近似解，而不能得到最优结果。

2.3. 高效节能的无人机辅助边缘计算

也有一些相关工作集中在无人机和物联网设备的能耗方面[1 - 5,9]。Yu 等人[1]提出了一种新型无人机支持的边缘计算系统，包括无人机和边缘云(ECs)，以协同向物联网设备提供 MEC 服务。通过考虑无人机的位置和任务分配，提出了无人机能耗最小化的优化问题。Zhang 等人提出了一种新的以通信能量、计算能量和无人机飞行能量消耗为目标的优化问题。Zhang 等[4]提出了一种基于随机计算任务模型的无人机辅助移动边缘计算系统，该系统以最小化传感器和无人机的平均加权能耗为目标。Li 等[5]研究了一种无人机辅助的移动边缘计算场景，以最小化无人机的能量消耗来优化计算卸载。Hu 等人[9]的目标是在截止日期和无人机轨迹约束下使无人机和终端的总能耗最小化。Liu 等人[23]研究了无人机启用的无线 MEC 系统，其中一个能量传输服务器和一个 MEC 服务器安装在无人机上。该工作旨在通过联合优化 CPU 频率、卸载量、发射功率和无人机飞行轨迹，使所需总能量最小化。

然而，这些作品中的大多数对每个任务都有相同的截止日期，这在现实场景中是不现实的。在这项工作中，我们定义了每个任务的单独期限，并试图找到无人机的最小能源消耗。

总体而言，大多数无人机辅助边缘计算系统缺乏细粒度的推进能耗模型。在减少推进能量的研究中，很少有不考虑任务计算时间或达到最优结果的。在此基础上，提出了一种最优节能航速调度算法来解决上述问题。

3.系统模型和问题制定

3.1. 网络模型

我们认为  $m$  物联网设备沿着一条线部署来监控环境，表示为  $M=\{Sn_1, Sn_2, \cdots, Sn_m\}$ ，它有很多应用，如道路、水/石油/天然气管道或河流海岸。无人机在固定高度  $H$  飞行，在其上安装边缘节点，收集数据，完成从物联网设备卸载的任务。这款无人机定期起飞，服务于每一个物联网设备，即一次旅行。每次无人机游，物联网设备  $Sn_i$  有一个重新配置任务  $Ui=(Ci, Di, Ti)$ ，其中  $Ci$  描述了完成此任务的 CPU 周期总数;  $Di$  表示收集数据的大小; 和  $T_i$  是完成这项任务的最后期限， $i=1,2, \cdots, m$ 。无人机必须在用户返回之前返回重新配置结果

在不同的解决方案上传。当无人机完成物联网设备的所有重新配置任务后，就会返回机场。数据采集过程中，无人机可以在飞行过程中采集物联网设备的数据，但每次只允许接收单个物联网设备的数据。在任务计算过程中，无人机能够同时执行多个重构任务。

假设无人机与物联网设备的接收速率为 $R$ ，无人机的 CPU 频率为 $f_{UAV}$ ，都是预先知道的固定数字。在此基础上，任务 $i$ 的接收时间应为：

$$t_i^* = \frac{D_i}{R}$$

其中任务 $i$ 的计算时间为：

$$t_i^+ = \frac{C_i}{f_{UAV}}$$

由于收集的数据很大，而且 UAV 上的 cpu 足够强大，所以我们假定接收时间是 $t_i^*$ 一般大于计算时间 $t_i^+$ ，即 $t_i^* \geq t_i^+$ ， $\forall i, j$ 。让重新配置任务的截止日期为 $T_i$ ，完成数据采集，完成重构任务并返回结果。我们忽略了向物联网设备发送重新配置设置所带来的延迟和能耗，因为重新配置结果的数据大小比收集的原始数据小得多。

### 3.2. 能源消耗模型

无人机的能量消耗包括三部分：通信能量、计算能量和推进能量。由于推进能量远大于计算和通信能量，本文仅考虑无人机的推进能量消耗。

固定翼无人机在约束速度的直线飞行中，推进能量消耗以[19]的封闭形式表示，如式(1)所示：

$$p = c_1 v^3 + c_2 \quad (1)$$

其中 $p$ 代表无人机的推进力， $c_1$ 和 $c_2$ 都与飞机的重量、机翼面积、空气密度等有关。因此，无人机的推进功率与速度有关 $v$ 。

UAV 有最优飞行速度花费最少的能量消耗。一方面，当飞行速度足够小时，会消耗大量的能量(式(1)的第二部分会太大)。另一方面，当飞行速度足够大时，也会消耗大量的能量(式(1)的第一部分会太大)。总的来说，应该有一个适当的飞行速度，无人机花费最少的能源消耗，任何更高或更低的速度将花费更多。

根据式(1)，可在附录 F 中计算出无人机实现最小推进能量时的最优速度。

### 3.3. 问题公式化

我们假设物联网设备通信范围重叠，如图 2 所示。请注意，非重叠场景可以分为几个重叠场景。我们假设无人机沿着这条线飞行，收集数据，并在 $m$ 物联网设备自己的截止日期 $T$ 内完成卸载的重新配置任务 $i$ 。无人机不能以太快的速度飞行，因为它必须完成物联网设备通信范围内的所有任务。另一方面，无人机不能以太低的速度飞行，因为它必须在截止日期 $T$ 之前完成每个物联网设备的任务 $i$ 。在上述约束条件下，我们的目标是使无人机的能耗最小化。

具体来说，我们将无人机在 $d$ 位置的飞行速度定义为 $v(d)$ ，其中 $d$ 是无人机飞行路径中的一个位置。则无人机从 $d=0$ 到 $d=x$ 所花费的飞行时间可以由

$$t = \int_0^x \frac{dd}{v(d)}$$

物联网设备 $Sn_i$ 假设有一个通信范围，从 $b_i$ 结束于 $d_i$ 。 $Sn_i$ 只允许无人机在该飞行范围内上传其采集的数据，且必须在无人机仍在该飞行范围内时返回重构计算结果。我们假设通信范围有不同的范围大小，但对齐。换句话说， $d_i - b_i$ 可能因物联网设备而异，但是从左开始的范围必须从左结束，并且在另一个范围内没有范围。所以我们有 $b_1 < b_2 < \dots < b_m$ 和 $d_1 < d_2 < \dots < d_m$ 。不失一般性，让 $b_1 = 0$ 和 $d_m = D$ 。这样的假设是合理的，因为相同类型的物联网设备通常有相似的通信范围，它们彼此放置在一个距离，以监测不同的区域。

因此，无人机访问和服务物联网设备的顺序是按照物联网设备的索引排序的。因此，我们假定 $i + \sum_{j=1}^i t_j^* = 1t_j^*$ 是合理且紧凑的。由于无人机一次从一个物联网设备上采集数据，因此在开始任务 $i$ 之前，数据的采集时间总和为 $\sum_{i=1}^i t_j^* = 1t_j^*$ 。完成任务 $i$ ， $t_i^* + t_i^+$ 需要时间，所以 $t_i + t_j^* = 1t_j^*$ 是最少的时间来完成的任务。

因为对于每个 $Sn_i$ ， $i = 1, 2, \dots, m$ ，UAV 必须从它那里收集数据，完成重新配置任务并返回结果给它，因此，至少 $t_i^* + t_i^+$  UAV 时间必须花在通信范围 $(b_i, d_i)$ 。约束是这样写的

$$\int_0^{d_i} \frac{dd}{v(d)} \geq t_i^* + t_i^+.$$

但是，由于物联网设备的通信范围是重叠的，所以飞行范围是 $Sn_i$ 并不一定意味着无人机服务(收集数据并完成重新配置数据) $Sn_i$ 。假设 $d = \alpha_i$ 无人机从 $Sn$ 采集完数据的切换位置是 $i$ 从 $Sn$ 开始收集 $i+1$ ，并假定 $d = \beta_i$ 无人机返回重新配置结果的位置是 $Sn_{i-1}$ 。让 $\alpha_0 = 0$ 。切换位置和返回位置必须在通信范围内 $(b_i, d_i)$ ，因此我们有以下范围限制。

$$b_i \leq \alpha_{i-1} < \alpha_i < \beta_i \leq d_i, \forall i. \quad (C1)$$

然后，我们有以下的完成约束

$$\int_{\alpha_{i-1}}^{\alpha_i} \frac{dd}{v(d)} \geq t_i^*. \quad (C2)$$

Since 定义 $Sn_i$ 的重新配置期限 $T_i = t_i^* + t_i^+$ 。因此，无人机必须从物联网设备 $Sn$ 完成所有任务 $i$ 对 $Sn_m$ 自己之前的最后期限，作为拖延的约束

$$\int_0^{\beta_i} \frac{dd}{v(d)} \leq T_i. \quad (C3)$$

根据推进能量模型 Eq.(1)，并且由于 $v(d)$ 是无人机在位置 $d$ 的速度，然后我们有飞行功率 $p(d)$ 在位置 $d$ 作为 $p(d) = c_1 \times v(d)^3 + \frac{c_2}{v(d)}$ 。因此位置 $d$ 的能耗为 $e = p(d) \times dd$ 。的总能量

无人机的消费可以集成为

$$E = \int_0^D p(d) \frac{dd}{v(d)}. \quad (3)$$

我们现在对 EESS 问题的定义如下。

**定义 1 (EESS 问题)。**鉴于 $m$ 物联网设备和上述无人机辅助边缘计算系统，能量高效飞行速度调度(EESS)问题是确定无人机在每个距离 $d$ 的飞行速度 $v(d)$ ，以在满足范围约束 Eq. (C1)、完成约束 Eq. (C2)和延迟约束 Eq. (C3)的情况下，最小化 Eq.(3)中的推进能量消耗。





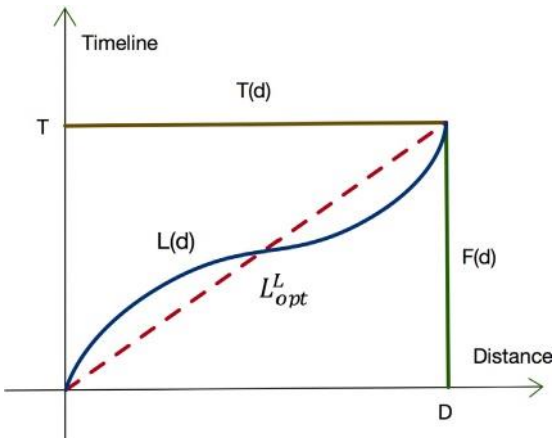


图 4 所示。使用恒定的无人机飞行速度可以达到比使用变化的飞行速度更高的能源效率。最优累积曲线是两点之间的直线，只要这是可行的。

证明。请参阅附录一。

引理 2(恒速性质)。使用恒定的无人机飞行速度可以达到比使用变化的飞行速度更高的能源效率。证明。假设无人机速度变化。在不失一般性的前提下，设图 4 中对应的累积曲线为  $L(d)$ 。则将无人机的能耗描述为：

$$E_{L(d)} = \int_0^D p(v(d)) \frac{dd}{v(d)} = \int_0^D \frac{p(v(d))}{v(d)} dd \tag{6}$$

如果无人机以匀速飞行，则记其能耗为：

$$E_{opt}^L = p\left(\frac{D}{T}\right) \cdot T = p\left(\frac{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}}{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}}\right) \cdot \int_0^D \frac{dd}{v(d)} \tag{7}$$

我们考虑以下 Jensen 不等式[31]的形式，

$$p\left(\frac{\int_0^D f(d)g(d)dd}{\int_0^D g(d)dd}\right) \leq \frac{\int_0^D p(f(d))g(d)dd}{\int_0^D g(d)dd} \tag{8}$$

让  $f(d)=v(d)$  和  $g(d)=\frac{1}{v(d)}$ ，我们得到

$$p\left(\frac{\int_0^D v(d) \cdot \frac{dd}{v(d)}}{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}}\right) \leq \frac{\int_0^D p(v(d)) \cdot \frac{dd}{v(d)}}{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}} \tag{9}$$

将不等式中的  $T(\int_0^D \frac{dd}{v(d)})$  相乘，得到： $v(d)$

$$p\left(\frac{\int_0^D v(d) \cdot \frac{dd}{v(d)}}{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}}\right) \cdot \int_0^D \frac{dd}{v(d)} \leq \int_0^D p(v(d)) \cdot \frac{dd}{v(d)} \tag{10}$$

$$p\left(\frac{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}}{\int_0^D \frac{dd}{v(d)}}\right) \cdot \int_0^D \frac{dd}{v(d)} \leq \int_0^D p(v(d)) \cdot \frac{dd}{v(d)} \tag{11}$$

$$p\left(\frac{D}{T}\right) \cdot T \leq \int_0^D p(v(d)) \cdot \frac{dd}{v(d)} \tag{12}$$

最后,我们有

$$E_{opt}^L \leq E_{L(d)} \tag{13}$$

引理 2 之后有一个直接的推论。

推论 1。在距离-时间图中，只要可行，两点之间的最优累积曲线是直线的。

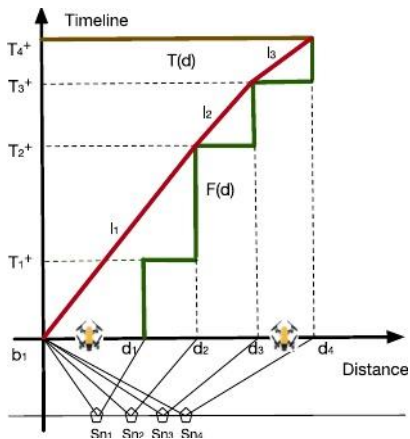


图 5 所示。EESS-L 问题的图形可视化，其中红色的子线是最优解。我们的算法在迭代中工作。主要步骤如下：我们将原点与每个角落一一连接，测试连接的直线的斜率，然后选择斜率最大的直线作为第一条副直线。然后问题重复出现。

5.特殊情况下的最优解

由于 EESS 问题难以直接求解，我们从两个简化的特例入手。通过求解这些特殊情况，我们得到了一般问题的一些重要性质。

5.1.共享起始位置的 EESS 问题

在定义 1 给出的 EESS 问题中，当所有物联网设备共享其通信范围的一个共同起始位置时，即， $b_1=b_2=\dots=b_m=0$  时，我们称这种特殊情况为 EESS-L 问题。注意，在 EESS-L 问题中，通信距离终止位置是不同的，即， $d_1 < d_2 < \dots < d_m$ 。

EESS-L 问题的图形可视化如图 5 所示。其中，我们可以看到上界曲线  $T(d)$  是一条直线，下界曲线  $F(d)$  与一般问题保持相同。

更特别的是，我们有  $F(d_i)=t_i$  和  $T(d)=t_i+m \cdot j = 1t_j$ 。根据推论 1，最优累积曲线  $L_{opt}$  可以分为  $j$  子行，举例说明为  $l_i, i=1,2,\dots,m$  (见图 5 红线)。每条子线  $l_i$  从职位  $q$  开始  $i$  与边  $s_i$ ，并终止于  $q_{i+1}$ ，并让  $q_1=(0,0)$ 。

在我们直接讨论算法之前，我们想首先介绍一些关于最优累积曲线的重要性质  $L_{Lopt}$

EESS-L 问题。

引理 3。最优累积曲线  $L_{Lopt}$  只能减小其斜率。

证明。请参阅附录 B。

引理 4。最优累积曲线  $L_{Lopt}$  只在曲线的下界角减小其斜率，即， $F(d_i), i=1,2,\dots,m$ 。

证明。请参阅附录 C。

有了上面两个引理，我们现在引入算法的高级思想。很明显，任何最优累积曲线  $L_{Lopt}$  由一组次线  $l_i$  组成，这样  $L_{Lopt}$  仅通过减少斜率和在  $F(d)$  的角落改变方向。因此，如果我们找到所有改变方向的角， $L_{Lopt}$  曲线就可以确定。因此，我们专注于寻找第一个改变方向的角，例如，确定第一个副线。我们将原点与每个角一一连接，以测试连接线的斜率。我们选择的

坡度最大的线段为第一副线段，对应的转角为第一变向转角。从这个角开始，同样的问题重复，我们找到下一条支线和角。

详细的伪代码在算法 1 中给出。

算法 1 EESS-L 优化算法

```
输入： 每个物联网设备的接收时间 $t^*_i$ 
        每个物联网设备计算时间 $t^+_i$ 
        各物联网设备通信范围 $i$ ，从 0 到 $d_i$ 
        用户数量 $m$ ，无人机初始状态 $q_1$ 

输出： 无人机的飞行速度 $v_j$ 在每次迭代中 $j$ 
        无人机的飞行状态 $q_j$ 在每次迭代中 $j$ 
        无人机的飞行能量 $Efly$ 

1:  $i=1, j=1, v=0, Efly=0$ 
2: while  $i \leq m$  do
3:   求最大斜率副线 $l_j$ 与边坡 $s_j$ 从无人机的
   当前状态 $q_j$ 到每一个弯角 $F(d)$ 后距离 $d_i$ 
4:    $v_j = \frac{1}{g_j}$ 
5:   更新 $q_{j+1}$ 作为 $l$ 的终点 $j$ 并将 $i$ 更新为
   相应的物联网设备。
6:    $j=j+1$ 
7: 结束时
8: 根据 $v$ 和 $q$ 计算 $Efly$ 
9: 返回 $v, Efly, q$ 
```

该算法在迭代中工作。每次迭代确定一条子线及其对应的方向变换角。注意，变量 $q_j$ 定义为迭代 $j$ 中无人机的初始飞行状态。算法 1 试图找到最大斜率的直线 $l_j$ 与边坡 $s_j$ 从原点 $q_j$ 到  $F(d)$ 的方向改变角点 $(d_i, F(d_i))$ 。那么无人机的最优飞行速度为 $v_j = s_1$ 。最后，算法更新无人机的原点状态，用于下一次迭代 $q_{j+1}$ 及其对应的物联网设备 $i$ ，当无人机服务于所有物联网设备时，算法终止( $i > m$ )。

定理 1. 算法 1 在 $O(m)$ 中计算 EESS-L 问题的最优解<sup>2)</sup>的步骤。

证明。我们用反证法证明。假设算法 1 产生的解不是最优的，最优累积曲线 $L^{opt}$ 和我们计算的不一样。接下来我们展示这样的 $L^{opt}$ 不能最优。如图 6 所示，我们的算法得到的累积曲线为 $l_1, l_2, l_3 \in L^L$ 。假设最优累积曲线 $LLopt$ 与 $LL$ 不同。有两种情况，要么 $Lopt$ curve 的一部分在 $LL$ 曲线下面，要么 $LLopt$ 的一部分在 $LL$ 曲线上面

案例 1。如图 6 所示，不使用子行 $l_1$  为了通过 $LL$ 曲线连接原点和第二个角， $LLopt$ 曲线使用两条子线 $l_1'$  和 $l_2'$  来连接原点和第二个角，这两条子线在子线 $l$ 下面<sup>1)</sup>。显然，我们有副直线斜率不等式 $s'_2 > s_1 > s'_1$ ，其中 $s'_2, s_1, s'_1$ 是子线路 $l$ 的斜率<sup>2)</sup>， $l_1$  和 $l_1'$  分别的。根据引理 2 和推论 1，求解的能耗为 $L^L$ 曲线小于 $LLopt$ ，这与 $Lopt$ 是最优的假设相矛盾。

例 2。假设 $LLopt$ 曲线的一部分在 $LL$ 曲线上，如图 6 所示，假设曲线 $l_3opt$ 的斜率满足 $s_{opt3} > s_1$ 。如图 6 所示，不使用子行 $l_1, l_2$  和 $l_3$  将起点连接到最终目的地 $F(d_m)$ 。的 $LLopt$ 曲线使用两条子线 $l_3$  和 $l_4'$  连接原点和第二个角，这两条子线在子线 $l$ 上面<sup>1)</sup>， $l_2$  和 $l_3$ 。显然，我们可以在 $l_3$  和 $l_4'$  之间找到另一条直线 $l_5$ 。我们有子直线斜率不等式 $s'_3 > s'_5 > s'_4$ ，其中 $s'_3, s'_5$  和 $s'_4$  是子直线 $l$ 的斜率<sup>3)</sup>， $l_3$

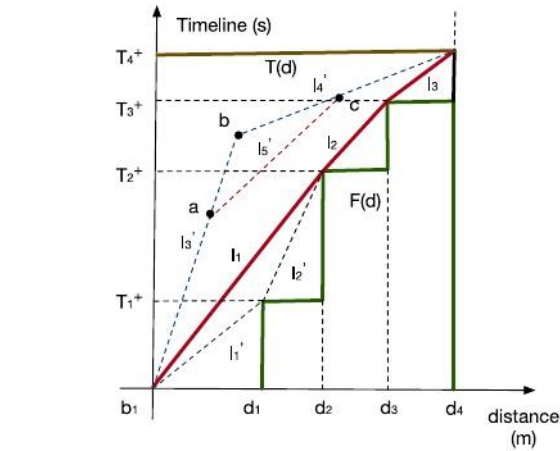


图 6 所示。算法 1 的 EESS-L 问题结果的示例，其中算法 1 产生的累积曲线为 $l_1, l_2, l_3 \in L^L$  (红色实线)。我们证明 $L^L$  通过矛盾达到最佳在情况 1 中，不是 $l_1$ ， $LLopt$ 使用两个子行 $l_1', l_2'$  代替。显然， $s'_2 > s_1 > s'_1$ ，表示 $LLopt$ 不是最优。2. $LLopt$ 使用 $l_3, l_4'$  相反，在边坡 $s'_3 > l_1$ 。然后，可以在 $l_3$  和 $l_4'$  之间找到 $s'_5$  行<sup>4)</sup> 哪里 $s'_3 > s'_5 > s'_4$ ，表明 $LLopt$ 不是最优的。(关于这个图例中有关颜色的解释，读者可参阅本文的网页版本。)

和 $l_4'$  分别。根据引理 2 和推论 1，求解的能耗为 $L^L$ 曲线小于 $L^{opt}$ ，这与 $LLopt$ 是最优的假设相矛盾。由于两种情况都是不可能的，所以我们必须有 $LLopt=LL$ 。在每次迭代中，算法 1 尝试从原始状态 $q$ 找到最大斜率 $j$ 向每一个改变方向的角落 $F(d)$ 。算法 1 的最大步长为 $m*(m-1)$   $O(m^2)$ 复杂度<sup>2)</sup>。

5.2. 共享终止位置的 EESS 问题

在定义 1 给出的 EESS 问题中，当所有物联网设备共享其通信范围的一个共同终端位置时，即， $d_1=d_2=\dots=d_m=0$  时，我们称这种特殊情况为 EESS-U 问题。注意，在 EESS-U 问题中，通信距离终止位置是不同的，即， $b_1 < b_2 < \dots < b_m$ 。

EESS-U 问题的图形可视化如图 7 所示。下限曲线中我们可以看到 $F(d)$ 是一条直线,有上特别,束缚我们曲线有 $TT(d)(di)$ 保持= $\sum ij=1t*j$ 相同, $F(dasi)=$ 一般 $dm$ 。显示的问题。推论 1, 最优累积曲线 $Lopt$ 可以分为 $j$ 子行, 举例说明为 $l_i, i=1, 2, \dots, j$ (见图 7 中的红线)。每条子线 $l_i$ 从职位 $q$ 开始 $i$ 与边坡 $s_i$  终止于 $q_{i+1}$ , 并让 $q_1=(0, 0)$ 。

与之前定义的 EESS-L 问题相似，我们有关于最优累积曲线 $LUopt$ 的两个最优性质。它们的证明是相似的，但省略了。

引理 5. 斜 一个最优的累积曲线 $LUopt$ 必须只增加它的斜率。

引理 6. 最优累积曲线 $LUopt$ 只在曲线的上界角增加其斜率，即， $\pi d_i, i=1, 2, \dots, m$ 。

很明显， $LUopt$ 由一组子线 $li$ 组成， $LUopt$ 只通过增加坡度改变方向，并且只在 $T(d)$ 的角落。因此，我们专注于寻找第一个改变方向的角，例如，确定第一个副线。我们将原点与每个角一一连接，以测试连接线的斜率。我们选择斜率最大的直线作为第一条副直线，对应的

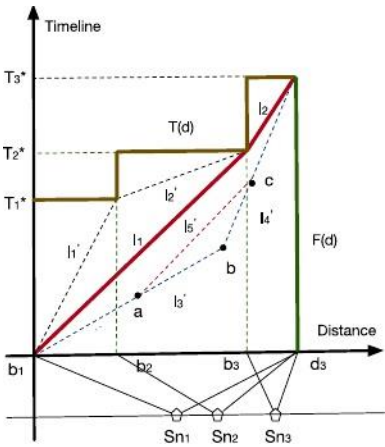


图 7 所示，EESS-U 问题的算法 2 结果的示例，其中算法 1 产生的累积曲线为 $l_i, l_i \in L^*$  (红色实线)。我们用反证法证明 $L^*$ 是最优的。在情况 1 中， $L_{Lopt}$ 使用两个子行 $l_1^*, l_2^*$ ，而不是 $l_1$ 。显然， $s_1' > s_1 > s_2'$ ，表示 $L_{Lopt}$ 不是最优。在情况 2 中， $L_{Lopt}$ 使用 $l_1^*, l_4^*$ 相反，这里斜率 $s_3' < l_1$ 。然后，可以在 $l_1$ 之间找到 $s_3'$ 和 $l_4'$ 在 $s_3' < s_5 < s_4'$ ，表明 $L_{Lopt}$ 不是最优的。

转角为第一个改变方向的转角。从这个角开始，同样的问题重复，我们找到下一条支线和角。  
伪代码在算法 2 中给出。

算法 2 EESS-U 的优化算法

```
输入： 每个物联网设备的接收时间 $t^*_i$ 
      每个物联网设备计算时间 $t^+_i$ 
      各物联网设备通信范围 $i$ ，从 $(b_i(d,0),0)$ 
      物联网设备数量 $m$ ，无人机初始状态 $q_1$ 

输出： 无人机的飞行速度 $v_j$ 在每次迭代中 $j$ 
      无人机的飞行能量 $Efly$ 

1:  $i=1, j=1, v=0, Efly=0$ 
2: while  $i \leq m$  do
3:   求最小斜率副线 $l_j$ 与边坡 $s_j$ 从无人机的
   当前状态 $q_j$ 到每一个弯角 $T(d)$ 后距离 $b_i$ 

4:    $v_j = \frac{1}{s_j}$ 
5:   更新 $q_{j+1}$ 作为 $l$ 的终点 $j$ 并将 $i$ 更新为
   相应的物联网设备。
6:    $j=j+1$ 
7: 结束时
8: 根据 $v$ 和 $q$ 计算 $Efly$ 
9: 返回 $v, Efly, q$ 
```

算法 2 的正确性由以下定理给出。  
定理 2。算法 2 在 $\mathcal{Q}(m)$ 中计算 EESS-U 问题的最优解<sup>2)</sup>的步骤。  
定理 2 的证明与定理 1 的证明相似，为了简洁起见，这里省略。

6.offspeed 算法的一般情况

我们现在已经准备好解决一般的 EESS 问题，它不会对物联网设备的通信范围施加任何额外的限制。最优累积曲线会随坡度的增大和减小而改变方向。然而，在特殊情况下，即。引理 4 和 6 仍然成立。换句话说， $L_{opt}$  只在下限曲线上减小其斜率

角，它只在曲线的上界角增加它的斜率。因此，我们不需要证明就直接给出了下面的引理。

引理 7(最优累积曲线性质)。最优累积曲线 $L_{opt}(d)$ 要么相交 $F(d)$ 或 $T(d)$ ,即对于一些 $i$ 我们要么 $L_{opt}(d_i)=F(d_i)$ 或 $L_{opt}(b_i)=T(b_i)$ 。  
•如果我们 $L_{opt}(d_i)=F(d_i)$ 点 $d_i$ ,然后 $L_{opt}$ 曲线必须减少其斜率 $d=d_i$ 。  
•如果我们 $L_{opt}(b_i)=T(b_i)$ 点 $b_i$ ,然后 $L_{opt}$ 曲线必须增加其斜率 $d=b_i$ 。

引理 8(唯一性)。如果存在一个最优累积曲线 $L_{opt}(d)$ 满足引理 7，那么 $L_{opt}(d)$ 必须是唯一的。

证明。请参阅附录 D。

根据引理 7 和 8，我们可以推断，如果算法服从引理 7 中的最优累积曲线性质，则该算法一定是最优的。为此，我们提出了一种最优节能飞行速度调度(offspeed)算法来解决离线 EESS 问题。该算法保证其输出曲线服从引理 7 中的属性，引理 7 表示为 $L(d)$ 。

基本的想法很简单:我们找到子直线的第一部分，然后重复相同的问题。要找到第一条副线，只需要找到第一条变斜率点即可。从引理 7，我们已经知道这样一个点必须在下界曲线 $F(d)d=d_i$ 或者在上界曲线 $T(d)d=b_i$ ,即，两条曲线的角。因此，我们测试每一个可能的角落。图 8 给出了一个例子。我们把原点和一个角连接起来，看看得到的线是否可行。我们按照每个角的距离顺序来测试每个角。除非目前的线路不可行，否则我们将继续在下一个角落进行测试。最后一条可行的副线就是我们要找的那条，而拐角就是最优的第一个斜率变化点。详细的形式化步骤在算法 offspeed 中给出。

算法 3 比正常速度慢的

```
输入:数量的物联网设备 $m(b_i,d_i),t^*_i,t^+_i,i=1,2,m$ 
输出:无人机飞行速度 $v_j$ 在每次迭代 $j$ 无人机的飞行能量 $Efly$ 

1:  $i=1, j=1, v=0, Efly=0, q_1=(0,0)$ 
2: while  $i \leq m$  do
3:  $l_j$ 线从 $q_i$ 来 $(d_i,F(d_i))$ 
4:  $l_j'$ 是行 $q_i$ 来 $(b_i,T(b_i))$ 
5:  $s_j$ 是 $l_j$ 的斜率
6:  $s_j'$ 是 $l_j'$ 的斜率
7: 表示 $l$ 的分机号 $j$ 然后相交 $T(d)$ 
8:

9:    $v_j = \frac{1}{s_j}$ 
    $v = v \cup \{v_j\}$ 
    $j = j + 1, q_j = (d_i, F(d_i))$ 
end if

10:
11:
12: 如果延长线 $l_j'$ 相交 $F(d)$ , 那么
13:    $v_j = \frac{1}{s_j'}$ 
14:    $v = v \cup \{v_j\}$ 
15:    $j = j + 1, q_j = (b_i, T(b_i))$ 

16: 如果
17: 我+ 1 =
18: 结束时
19: 根据 $v$ 和 $q$ 计算 $Efly$ 
20: 返回 $v, Efly$ 
```

为了更好地理解 offspeed 算法，图 8 中提供了示例来说明详细步骤。  
在图 8 中，累积曲线从原点(0,0)开始，在两条界限曲线 $T(d)$ 和 $F(d)$ 之间。为了更好的



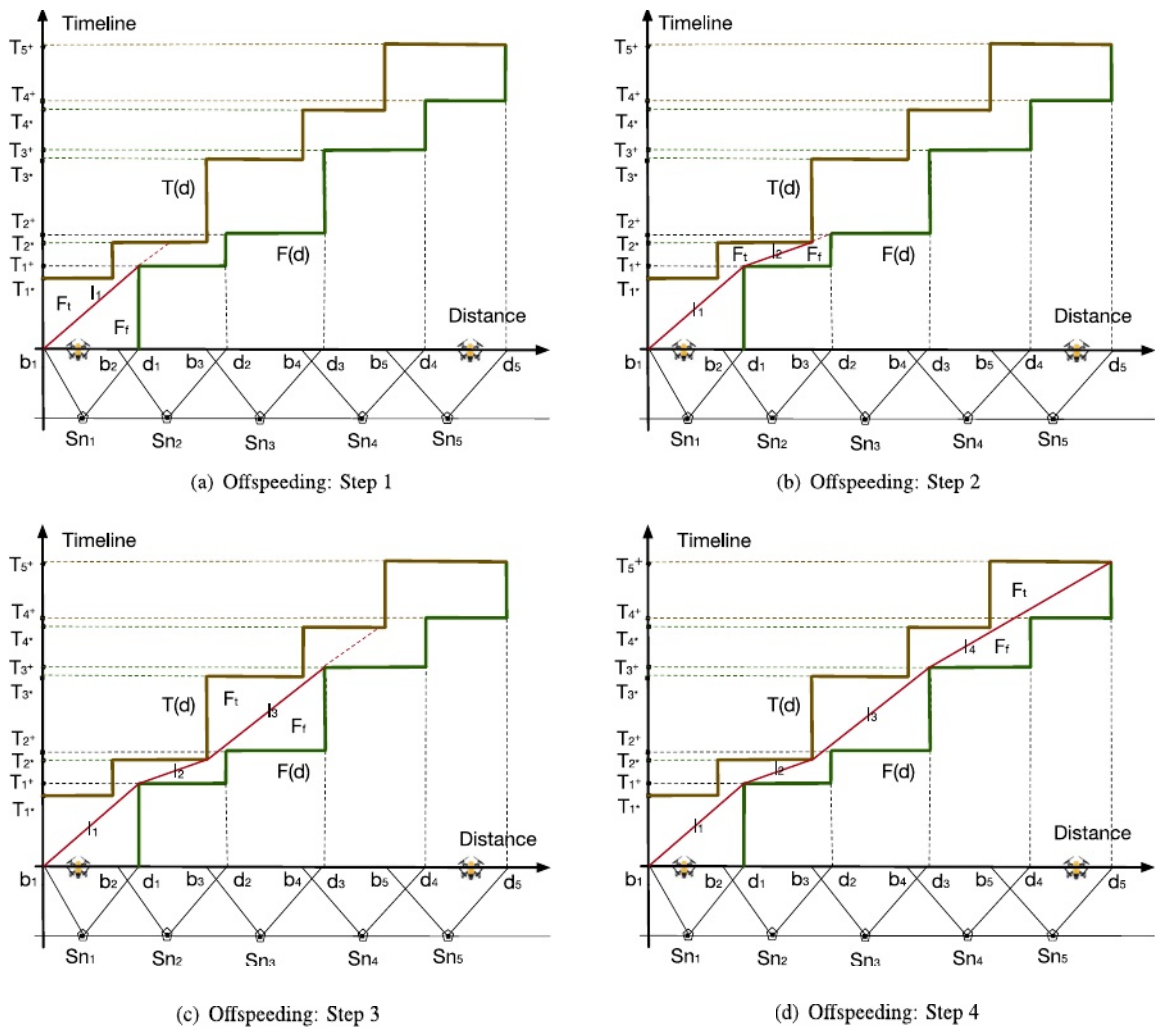


图 8 所示, offspeed 算法的工作方式。在每一步中, offspeed 算法都试图找到最长的直线  $l_i$  在  $T(d)$  和  $F(d)$  之间。具体来说, 我们按照每个角  $d$  的顺序测试每个角。除非目前的线路不可行, 否则我们将继续在下一个角落进行测试。最后一条可行的副线就是我们要找的那条, 而拐角就是最优的第一个斜率变化点。当无人机到达目的地  $d$  时, 算法终止, 各副线的斜率为无人机速度的倒数。

说明算法 offspeed, 我们定义  $F_i$  作为与上界  $T(d)$  和  $F$  交互的一组子行  $F$  作为与下界  $F(d)$  交互的一组子行。在每个步骤中, 我们试图找到集合  $F$  之间的边界子线  $F_i$  和  $F_j$ 。例如, 在步骤 1 中, 红色全行  $l_1$  是边界子线, 为  $l_1$  与  $F(d)$  的转向角相交, 其延长线与  $T(d)$  相交。在步骤 2 中, 红色全行  $l_2$  是边界子线, 自  $l_2$  与  $T(d)$  的转向角相交, 其延长线与  $F(d)$  相交。步骤 3 和步骤 4 与前面的步骤类似, 迭代结束, 直到 UAV 到达目标点  $d_5$ 。

定理 3. 算法 offspeed 可以在  $O(m)$  中获得 EESS 问题的最优解<sup>2)</sup>的步骤。

证明。请参阅附录 E。

### 7.在线启发式算法

在上一节中, 我们提出了一个最优离线算法 off 超速来解决 EESS 问题。在本节中, 我们利用 offspeed 的结果来考虑更现实的场景

在无人机飞近之前, 物联网设备的信息是未知的, 并提出了一种名为 EDS(紧急截止日期模拟)的在线算法, 以最小化无人机的推进能量。

EDS 的基本思想与算法 1 相似, 算法 1 首先连接了无人机当前的状态  $q_p$  到下界  $F(d)$  的每个角落, 选择坡度最大的线路, 直到无人机飞出  $m$ th 物联网设备的通信范围。但与算法 1 不同的是, 无人机在飞进物联网设备的通信范围后, 才知道物联网设备的存在, 只能确定局部最优飞行速度  $v_j$  根据当前已知物联网设备的信息。因此, 算法 EDS 得到的无人机飞行速度是一组飞行速度, 是无人机进入或飞出物联网设备通信范围时确定的。

在算法 EDS 中, 参数  $v$  定义为无人机飞行速度的集合,  $q_p$  为迭代中无人机的当前状态  $p$ (第 1 行)。变量  $k$  表示无人机已经知道的物联网设备数量,  $j$  表示无人机飞过的物联网设备数量(第 2 行)。

一旦无人机进入新的物联网设备的通信范围(第 4 行第 9 行)或飞出已知物联网设备的通信范围(第 10 行第 15 行), 算法 EDS 将确定一个新的

在线算法 EDS

```
输入:每个任务的接收时间t*i
    每个任务的计算时间t+i
    各物联网设备通信范围i, 从(b,d,0), 0)物联网设备数量m
输出:无人机飞行速度v
    无人机的飞行能量Efly
1: q1 = (0, 0), v = ∅
2: k = 0, j = 1, p = 1
3: while j <= m do
4: 如果无人机飞进一个新的物联网设备的通信范围, 那么
5: 无人机获取当前飞行状态qp
6:     k = k + 1, m' = k - j + 1
7:     使用算法 1 计算v' 输入的
        ***(m, t, t, b, d, q), 其中i ≤ k。
8:     v = v ∪ {v'[1]}, p = p + 1.
9:     如果
10: 如果无人机飞出物联网设备的通信范围, 那么
11: 无人机获取当前飞行状态qp
12:     j = j + 1, m' = k - j + 1
13:     使用算法 1 计算v' 输入的
        {m', t*i, t+, b, d, q}, 其中i ≤ k。
14:     v = v ∪ {v'[1]}, p = p + 1.
15:     如果
16: 结束时
17: 用v和q计算Efly
18: 返回v, Efly
```

飞行速度。具体来说, 它首先获取其当前状态*q*<sub>*p*</sub>(第 5 行和第 11 行)和当前服务的任务数量*m*'。然后利用算法 1 得到最优飞行速度*v*'。根据目前的信息*m*' 设备(第 7 行和 13 行)。然后无人机改变其飞行速度作为集合*v*的第一个元素。名叫*v*' [1], 用于*v*中的以下元素。当无人机飞进新的物联网设备的通信范围时(第 8 行和第 14 行)可能会发生变化。

当无人机飞出*m*th 物联网设备的通信范围时, 算法 EDS 终止, 我们根据设置*v*和*q*<sub>*p*</sub>计算总推进能量*E**fly*(第 17 行)。

算法 EDS 的时间复杂度为*O*(*m*<sup>2</sup>), 因为该算法首先旅行所有*m*用户, 然后使用算法 1 在物联网设备*m*中找到无人机的最优飞行速度。第一步的时间复杂度为*O*(*m*), 第二步的复杂度为*O*(*m*)。总体而言, 算法 EDS 的时间复杂度为*O*(*m*<sup>2</sup>)。

8.绩效评估

本节通过仿真实验对最优离线算法 off 超速和在线算法 EDS 进行性能评估。

8.1.实验设置

在我们的实验中, 无人机在一个固定的高度*H*= 100 米飞行。无人机上安装计算边缘节点, 可处理 5 ~ 1000 个物联网设备上传的任务。每个物联网设备*i*只有一个单独的任务*u*<sub>*i*</sub>待处理, 物联网设备*Cri*通信范围为 5 m ~ 60 m。接收时间*t*\**i*在 0.005 s 到 2 s 之间, 计算时间*t*\*是*i*的 0.15 ~ 0.35 倍吗。*t*\*<sub>*i*</sub>。总的来说, 我们给出了仿真参数, 如表 1[25]所示。

为了更好地说明我们的算法的优势, 我们提出了另一种基于简单策略的在线算法 LDS。我们首先为每个物联网设备定义了一个名为*TPD*(每距离时间)的概念

*i*, 其值为 — *i* 每个*i*。在 LDS 算法中, 无人机计算

表 1

仿真参数。

参数	意义	价值
<i>t</i> <sub><i>i</i></sub>	每个物联网设备的接收时间	0.005~2 年
<i>t</i> <sub><i>i</i></sub>	计算每个物联网设备的时间	代
<i>m</i>	物联网设备数量	是 <i>t</i> *的 0.15 ~ 0.35 倍 <sub><i>i</i></sub>
<i>v</i> <sub>max</sub>	最大飞行速度	50~1000
<i>H</i>	无人机高度	60 米/秒
<i>c</i> <sub>1</sub>	能量模型参数	100 米
<i>c</i> <sub>2</sub>	能量模型参数	9.26*10-4
<i>C</i> <sub><i>r</i></sub>	物联网设备通信范围	2250
		5 米~60 米

每个物联网设备*i*对应*TPD*, 获取其每次服务的物联网设备数量, 记为*m*'。参数*Dis*(*p*)定义为物联网设备数量*m*的距离。无人机服务不变, *p*为 1 到 2 的距离数*m*+ 1。然后,价值*TPD*在距离*Dis*(*p*)*m*的总和。物联网设备的*TPD*号和飞行速度*v*是其*TPD*的倒数。例如, 如果无人机服务两个物联网设备*i*和*j*在*Dis*(2)的距离, 那么*TPD*<sub>*Dis*(2)</sub>=*TPD*<sub>*i*</sub>+*TPD*<sub>*j*</sub>和*V*<sub>*p*</sub>= *T*<sub>*PD*</sub>、飞行速度

*vDis*(2)=*TPD*+*T* <sup>1</sup> <sub>(*i* *p*)</sub>。

此外, 本文还将提出的算法 ALG[32]与算法 offspeed 和 EDS 进行了比较。ALG 的核心思想是将传输任务分为平均传输速率和剩余速率两组, 并通过比较这两组中的飞行速度来更新任务的接收速率, 这是一种“最大剩余时间”算法。将无线设备的传输能量模拟为无人机的推进能量, 假设传输速率为无人机的飞行速度, 利用 ALG 可以解决本文提出的 EESS 问题。

在此基础上, 对离线最优算法 offspeed、在线算法 EDS 进行了仿真实验, 并对算法 LDS 和 ALG 进行了比较。

8.2.物联网设备数量的影响

本部分通过一组实验, 探讨了无人机推进能量与物联网设备数量的关系。让*Cri*= 50m 表示每台物联网设备的通信范围*i*, 设备*i*与*i*+1 的重叠范围用*x*表示,即,*x*<sub>*i*</sub>是*Cri*的 0.15 ~ 0.35 倍吗<sub>*i*</sub>。此外, 每个物联网设备的接收时间为*t*\*<sub>*i*</sub>= 1s, 其计算时间*t*+<sub>*i*</sub>为*t*的 0.15 ~ 0.35 倍\*<sub>*i*</sub>。在这些设置的基础上, 我们比较了在物联网设备数量从 50 到 1000 之间变化的情况下, offspeed、EDS、ALG 和 LDS 无人机的推进能量。

结果如图 9 所示。从图中可以看出, 算法 offspeed 的性能最好, 算法 EDS 的性能接近于算法 offspeed。ALG 算法比 EDS 和 offspeed 算法消耗更多的能量, 因为它只考虑相邻两个 SNs 之间的飞行速度, EDS 考虑所有无人机已知的 SNs, offspeed 考虑所有 SNs 的信息。随着 SN 个数的增加, 算法 offspeed 和算法 EDS 之间的差距也在增大, 因为 Off-超速总是能获得每个 SN 的最优结果, 而算法 EDS 不能, 导致算法 offspeed 和算法 EDS 之间存在差距。当物联网设备数量增加时, 算法 EDS 会比算法 offspeed 有更多的机会得出不同的解决方案, 导致算法 EDS 和算法 offspeed 之间的累积差距较大。

8.3.物联网设备部署密度的影响

在这一部分中, 我们对无人机的推进功率和物联网设备的部署密度进行了一组实验。具体来说, 无人机的飞行总距离限制在 3000 米, 我们部署

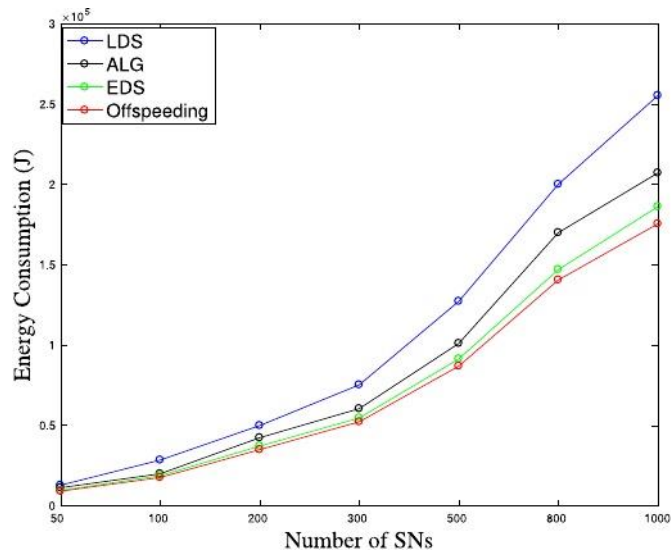


图 9 所示。物联网设备数量对推进能量对算法性能的影响。

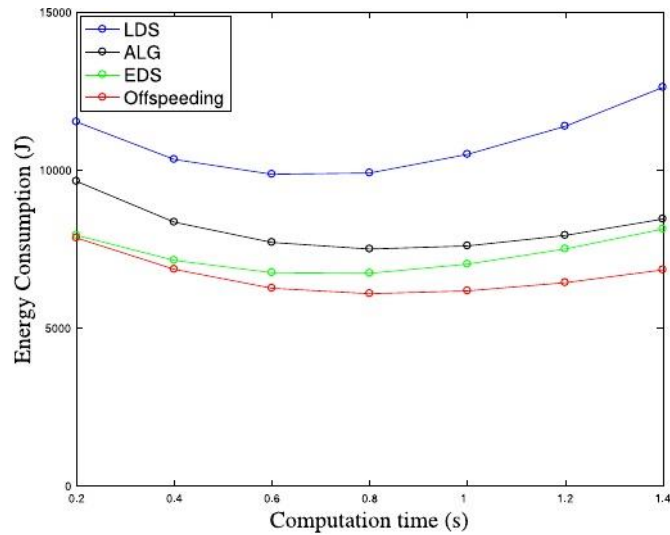


图 11 所示。计算时间对推进能量算法性能的影响。

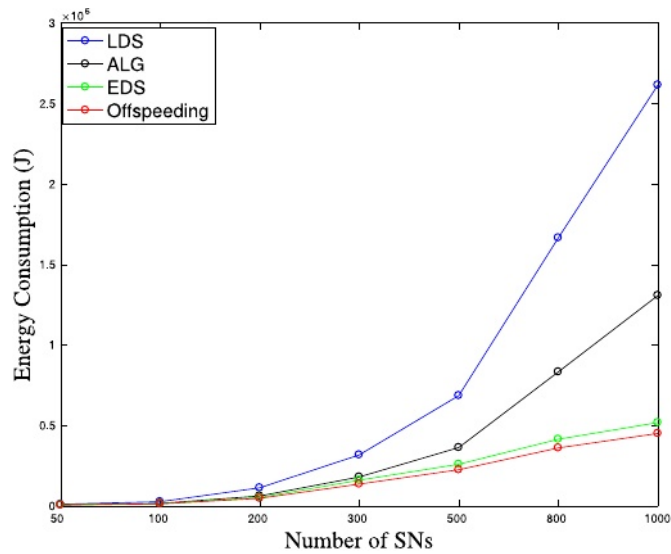


图 10 所示。推进能量对物联网设备密度对算法性能的影响。

在该无人机的飞行路线中，平均有 50 ~ 1000 个物联网设备。则每个物联网设备的平均通信范围为  $\frac{3000}{m}$ 。

参数  $x_i \in X$  定义为物联网设备  $i$  与  $i+1$  的重叠范围，即  $x_i$  是  $0.15 \sim 0.35$  倍的平均通信距离  $\frac{3000}{m}$ 。为此，每个物联网设备的通信范围  $i$  可以  $m$  编写：

$$\begin{cases} \{3000 \\ +x_i \mid 3000mcr_i\} \\ +x_i \mid 3000(m+x_i-1) \end{cases} \begin{cases} \text{---} \\ m+x_i-1 \\ \text{---} \end{cases} \begin{cases} i=1 \\ 1 \\ <i < m \end{cases}$$

本实验中的接收时间为  $t^*i = 1$  s，计算时间  $t+iis$  是  $t^*i$  的  $0.15 \sim 0.35$  倍。

结果如图 10 所示。与之前的实验类似，图 10 中算法 offspeed 取得了最好的结果，算法 EDS 的结果与算法 offspeed 接近。我们还可以发现算法 ALG 和 LDS 的解比算法 offspeed 和 EDS 的解消耗更多的能量。此外，随着物联网设备数量的增加，三种算法的解决方案都将消耗更多的能量，算法 LDS 和算法 offspeed /EDS 之间的差距也越来越大。

### 8.4. 计算时间的影响

在这一部分，我们部署了 500 台物联网设备，将无人机的飞行总距离限制在 3000 米。每台物联网设备的通信范围与上一节相同，设备数量为 500 台。每个物联网设备的接收时间为  $ti^* = 5$  秒，计算时间为  $t+i$  该任务的执行时间为 0.2 秒 ~ 1.4 秒。

结果如图 11 所示。与其他三种算法 EDS、LDS 和 ALG 相比，offspeed 算法消耗的能量最少。当任务的计算时间  $t^*$  增加，能耗  $i$  当  $t$  时，UAV 首先下降并达到最低点  $i^* = 0.8$  s。  $0.8 \text{ s} < t$  时，无人机推进功率增大  $i^* < 1.4$  s。一个是  $i$  手，当  $t+i < 0.8$  s 时，每台物联网设备的计算时间过短，无人机必须飞得更快，比  $t+i = 0.8$  s 消耗更多的能量。另一方面，当  $ti^+ > 0.8$  s 时，计算时间  $t^*$  太长，则 UAV  $i$  不得不降低飞行速度，花费更多时间服务物联网设备  $i$ ，这也需要更多的能源。

### 9. 结论

研究了无人机辅助边缘计算的能量高效航速调度问题。与现有的大多数研究不同，本文的研究重点是在单个任务执行期限和通信范围的约束下，利用实用的能量模型，分配适当的飞行速度以使无人机的能量消耗最小。具体地，我们提出了 EESS 问题，并设计了一个新颖的图表来可视化和分析问题。针对 EESS 问题直接求解的复杂性，首先分析了 EESS- 1 和 EESS- u 两种简化特殊情况，得到了一般问题的一些重要性质。在此基础上，提出了 offspeed 算法

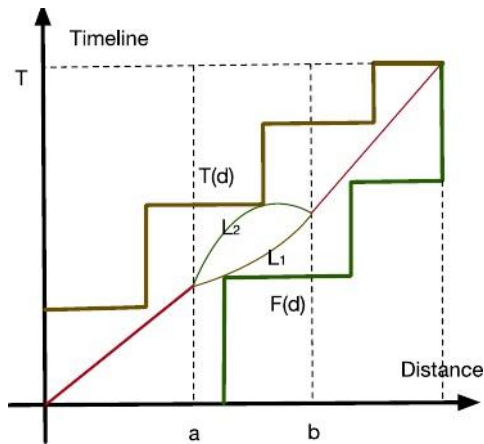


图 12 所示。假设  $L_2$  和  $L_1$  是两个不同的解，服从引理 7，同时满足式(14)和式(15)。然而，对于曲线  $L_1$ ，这个假设是不正确的， $L_1$  必须是凸和曲线  $L_2$  在(14)和(15)的约束下必须是凹的，这违背了引理 3 和引理 5。因此，满足引理 7 的解必须是唯一的。

证明了该方法是最优的。在此基础上，提出了一种启发式在线算法 EDS，以解决在更真实的场景下物联网设备信息不可知直至无人机飞近的 EESS 问题。最后，通过仿真实验对本文提出的算法进行了评价，结果表明本文提出的在线算法 EDS 接近最优。

未来将考虑建立一个包含无人机通信和计算能量的细粒度能量消耗模型。在此基础上，通过设计最优飞行轨迹和适当的飞行速度，使无人机在最后期限约束下的能量消耗最小。

竞争利益声明

作者声明，他们没有已知的竞争的经济利益或个人关系，可能会影响这篇论文报告的工作。

附录 a 引理的证明

证明。自  $p(v)=c_1v^3+cv^2$ ，我们有  $p(v)'=(c_1*3v^2+c2) v(d)$  — =  $6c_1 * v(d) + \frac{2*c_2}{v(d)^3} > 0$ ，所以它是一个凸函数。 ■

附录 b 引理证明

证明。我们用反证法证明。假设曲线  $L$  的斜率消耗的能量小于它的斜率。图 6 给出了一个例子，其中累积曲线  $l_1, l_2$  和  $l_3$  减少他们的斜坡。假设最优曲线  $L_{opt}$  与  $L$  不同， $l_1, l_2, l_3$ ，例如，无人机在曲线  $l_1'$ ， $l_2'$ ， $l_2$ ， $l_3$  飞行，其中  $l_2'$  的斜率，定义为  $s_2'$  大于子线  $l$  的斜率  $s_1'$ 。显然，我们有一个不等式  $s_2' > s_1' > s''$ 。由引理 2 和推论 1 可知， $l_1'$  和  $l_2'$  的总能耗大于  $l_1$ ，说明曲线  $L_{opt}$  在斜率增大时不是最优曲线。 ■

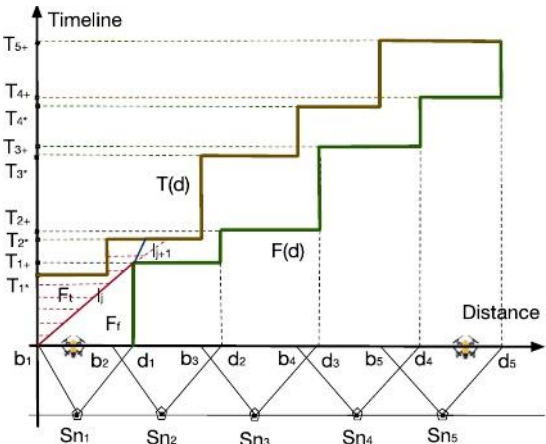


图 13 所示。我们假设  $L_{a1}$  是 offspeed 算法的一个解，它违反了引理 3。例如，直线  $L$  的斜率  $s_{a1}$  满足  $s_{a1} > s_j$  当  $T_{j+1} = F(d_j)$ 。然而，对于  $L$  来说，这种假设是不正确的， $s_{a1}$  是否包含在以前的解决方案  $L_j, L_{a1} \in F_{oj}$  (用红色的地平线标记)，表示  $L_{a1}$  并不是 off 超速的解决方案。因此，offspeed 的解必须服从引理 3。

附录 c 引理证明

证明。我们用反证法证明了引理 4。假设曲线  $L_{opt}$  与下界  $F(d)$  不相交，消耗更少的能量。图 6 给出了一个例子，其中累积曲线  $l_1, l_2, l_3$  减少了它们的坡度。假设最优曲线  $L_{opt}$  不同于  $l_1, l_2, l_3$ ，例如，无人机在曲线  $l_4'$  和  $l_5'$  不相交下界  $F(d)$ 。显然，我们可以找到另一个现有的副线  $l_3'$  和  $l_4$ ，其斜率满足  $s_3' > s_5' > s_4'$ ，根据引理 2 和推论 1， $l_3'$  和  $l_4$  的总能耗  $s_4$  的值大于  $l_5$ ，表明当  $L_{opt}$  不与下界  $F(d)$  相交时，曲线  $L_{opt}$  不是最优的。

附录 d 引理证明

证明。我们假设存在不止一个满足引理 7 的解。让  $l_1$  和  $l_2$  是两条不同曲线的解  $L$ ， $l_1$  和  $l_2$  是相同的在  $[0,a]$  和  $[b,D]$ ，但不同  $(a,b)$ ，地点：

$$\begin{cases} l_1(d) = l_2(d) & 0 \leq d \leq a, b \leq d \leq D \\ l_1(d) \neq l_2(d) & a < d < b \end{cases} \quad (14)$$

不损失一般，我们假定  $l_1(i) \leq l_2(i)$ ， $i \in (a, b)$ ，因此

$$F(i) \leq l_1(i) < l_2(i) \leq T(i), \quad i \in (a, b) \quad (15)$$

假设  $l_1(a)=l_2(a)$  和  $l_1(i) > l_2(i)$  当  $i \in (a,b)$  和  $l_1(b)=l_2(b)$ ，如图 12。

基于引理 4， $l_1(i)$  必须与  $F$  相交  $(i)$  当  $i < b, F(i) \leq l_1(i) \leq l_2(i) \leq T(i)$ ， $i \in (a, b)$ 。另一方面， $l_2(i)$  必须与  $T$  相交  $(i) i \in (a,b)$  基于引理 6。让  $l_1(b)=l_2(b)$   $l_1(i)$  必须是一个凸函数和  $l_2(i)$  必须是一个凹函数，违背了引理 3 和引理 5。

因此， $L$  是不可能的， $l_1$  和  $l_2$  在(14)和(15)的约束下，两者都服从 Lemma 7，这与证明解服从 Lemma 7 必须唯一的假设相矛盾。 ■

附录 E.定理证明

证明。引理 8 证明，如果存在满足引理 3-6 的算法，那么它一定是 EESS 问题的最优算法。

因此，这部分证明了算法 offspeed 满足引理 3-6。

对于引子 4 和 6，算法 offspeed 的结果与  $F(d)$  或  $T(d)$  相交 (offspeed 中的第 7 行和第 12 行)。



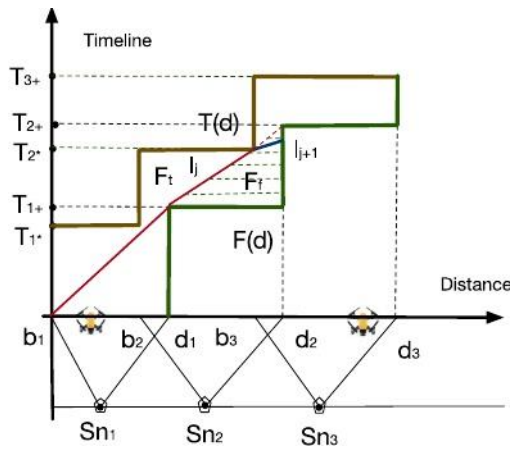


图 14 所示。我们假设  $l_{j+1}$  是 offspeed 算法的一个解，它违反了引理 5。例如，直线  $l$  的斜率  $s_{j+1}$  满足  $s_{j+1} < s_j$  当  $T_{j+1} \neq T(b_j)$ 。然而，对于  $l$  来说，这种假设是不正确的  $s_{j+1}$  是否包含在以前的解决方案  $l_j, l_{j+1} \in F_{j/}$  (用绿色的地平线线标记)，表示  $l_{j+1}$  并不是 off 超速的解决方案。因此 offspeed 的解必须服从引理 5。

对于引理 3，我们假设一个反例:offspeed 在  $j$  迭代中与  $F(d)$  相交，下一次迭代的斜率满足  $s_{j+1} > s_j$  (如图 13)。在这个场景中，新的解决方案  $L_{j+1}$  将包括在以前的上界区域  $F_{j/}$  (标记为红线)，因为  $L_{j+1}$  的斜率是  $s_{j+1}$ ，满足  $s_{j+1} > s_j$ ，这是不正确的。因此，这种情况是不可能的，算法 offspeed 服从引理 3。

对于引理 5，我们还假设一个反例:offspeed 在  $j$  迭代中与  $T(d)$  相交，下一次迭代的斜率满足  $s_{j+1} < s_j$  (如图 14)。在这个场景中，新的解决方案  $L_{j+1}$  将包括在以前的上界区域  $F_{j/}$  (标记为红线)，因为  $L_{j+1}$  的斜率是  $s_{j+1}$ ，满足  $s_{j+1} < s_j$ ，这是不正确的。因此，这种情况是不可能的，offspeed 遵循引理 5。

总的来说，offspeed 算法服从引理 3-6，因此它一定是最优算法。

在 offspeed 算法的每一次迭代中，我们都试图从原点开始寻找最长的可行子线，而这条子线的终点就是下一次迭代的起点。然后，对于最坏的情况，UAV 从原点出发，不幸地在找到合适的副线之前测试所有其他点，即。即原点附近的点。在这种情况下，总迭代次数应为  $(2m-1)+(2m-2)+\dots+1$ ，即  $2m^2 - m$ 。因此，offspeed 算法的复杂度为  $O(m^2)$ 。■

附录 f 无人机最小推进功率航速

证明。表示  $v^*$  为无人机的最小推进动力飞行速度。根据式(1)，无人机的功耗为: $p(v)=c_1*v^3+c_2v$

由于附录 A 证明了方程是凸的，方程的推导为:

$$p'(v)=(3c_1*v^2-c_2)$$
$$\frac{d}{dv}$$

让  $p'(v)=0$ ，则最佳飞行速度  $v^*$  是:  $\sqrt{\frac{c_2}{3c_1}}$

参考文献

于振宇, 龚勇, 龚善, 郭勇, 无人机移动边缘计算的协同任务卸载与资源分配, 计算机工程学报, 29(4)(2020), 397 - 397。

[2] t. y. j. 厕所, d. l. • 肖联合计算和通信设计 UAV-assisted 在物联网移动边计算, IEEE 反式. Ind. Inf. 16(8)(2020) 5505-5516.

郭辉, 刘杰, 面向边缘物联网的无人机增强智能卸载, 中国机械工程学报, 2015。印度 Inf. 16(4)(2020) 2737-2746。

张军, 周丽丽, 唐庆强, 胡旭东, 赵慧, 魏军, 无人机辅助移动边缘计算的随机卸载与轨迹调度, 计算机工程学报, 26 (2)(2019)

李敏, 程宁, 高杰, 王勇, 赵亮, 沈旭平, 高效节能无人机辅助移动边缘计算:资源分配与轨迹优化, 中国机械工程, 2017,14(2):393 - 397。阿明费。技术 69(3)(2020)3424-3438。

[6] S. Jeong, O. Simeone, J. Kang, 基于无人机云的移动边缘计算:位分配和路径规划的优化, IEEE Trans. 阿明费。技术。 67(3)(2018)2049-2063。

曹晓文, 徐杰, 张锐, 张锐, 基于移动边界的蜂窝连接无人机的计算卸载与轨迹优化, 载:2018 IEEE 第十九届无线通信信号处理进展国际研讨会 (SPAWC), 2018, pp. 1-5。

胡旭东, 杨凯, 郑振中, 黄国强, 无人机辅助中继与边缘计算:调度与轨迹优化, 电子与控制学报, 2017,32(3):371 - 378。无线通信。 18(10)(2019)4738-4752。

张强, 冯振宇, 张伟, 张伟, 潘明华, 基于物联网的无人机网络结构与路由算法, 电子与信息学报, 6(2)(2019)3727-3742。

刁新宇, 郑军, 蔡赞, 吴勇, 吴亚安, 无人机辅助移动边缘计算的合理数据分配与轨迹优化, 通信学报。 Lett. 23(12)(2019) 2357-2361。

Dimitrios Sikeridis, Eirini Eleni Tsiropoulou, Michael Devetsikiotis, Symeon Papavassiliou, 无线供电公共安全物联网:无人机辅助的自适应学习方法实现能源效率, J. Netw. 第一版。应用 123(2018)69-79。

杨丽丽, 姚海华, 王军, 蒋春华, 刘勇, 基于多无人机的物联网负载均衡移动边缘计算, 中国机械工程, 26 (8)(2020)

段锐, 王杰, 杜军, 姜春江, 白涛, 任勇, 异构云多无人机系统的功率延迟权衡, 载:《国际电子与信息学报》2019 - 2019, pp. 1-6。

钱宇文, 王飞飞, 李军, 石龙, 舒锋, 基于能量约束的无人机辅助移动边缘计算的用户关联与路径规划, IEEE Wirel. Commun. 列托人。水控制法(2019)。

胡晓燕, 王凯 Kit, 杨坤, 郑忠斌, 无人机辅助中继与边缘计算:调度与轨迹优化, 电子与控制学报, 2017,32(3):394 - 397。无线 Commun. Pp (99) (2019)

刘勇, 熊科, 倪强, 范平, 李国华, 刘勇, 无人机辅助无线协同移动边缘计算:联合卸载, cpu 控制, 轨迹优化, 中国机械工程, 26(4)(2020)2777-2790。

曾勇, 吴青青, 张睿, “从空中接入:5G 及以上无人机通信教程”, 中国民用航空航天大学学报(自然科学版), 32(12)(2019)2327 - 2335。

曾勇, 张锐, 基于轨迹优化的节能无人机通信, 电子与控制学报。无线通信。 16(6)(2017)3747-3760。

张伟, 张伟, 张伟, 无人机网络的频谱共享, 电子学报。社区。 35(1)(2017)136-144。

[21] S. Eom, H. Lee, J. Park, I. Lee, 具有推进能量约束的无人机辅助无线通信设计, 载:2018 IEEE 国际通信会议 (ICC), 2018, pp. 1-6。

徐军, 曾勇, 张锐, 张锐, 无人机无线能量传输的路径设计与优化, 电子学报, 2017,38(3):371 - 378。无线通信。 17(8)(2018)5092-5106。

刘勇, 熊科, 倪强, 范平, 刘志强, 李志强, 无人机辅助无线协同移动边缘计算:联合卸载, cpu 控制, 轨迹优化, 中国机械工程, 29(4)(2020)2777-2790。

周飞, 吴勇, 胡荣强, 钱勇, 基于无人机的无线移动边缘计算系统的计算速率最大化, 计算机工程与应用, vol. 31, ei. 地区公社。 36(9)(2018)1927-1941。

王勇, 王克志, 黄培秋, 黄培秋, 基于多无人机的大规模移动用户边缘计算联合部署与任务调度优化, 中国计算机工程学报, 2017,32(3):371 - 378。Cybern. (2019) 1 - 14 页。

[26] C.D. Franco, G. Buttazzo, 无人机能源感知覆盖路径规划, 载:2015 IEEE 自主机器人系统与竞赛国际会议, 2015, pp. 111-117。

Mohammad Mozaffari, Walid Saad, Mehdi Bennis, Merouane Debbah, 移动无人机节能物联网通信, IEEE Trans 无线通信。 16(11)(2017)7574-7589。

曾勇, 徐军, 张锐, 一种旋翼无人机无线通信的能量最小化方法, 电子与控制学报, 2017,14(3):371 - 378。无线通信。 18(4)(2019)2329-2345。

Mohamed Alzenad, Amr El-Keyi, Faraj Lagum, Halim Yanikomeroglu, 无人机基站 (UAV-BS) 的三维布局, 节能最大覆盖, IEEE Wirel. Commun. Lett 6(4)(2017) 434-437。

[30] a . Trotta, F.D. Andreagiovanni, M. Di Felice, E. Natalizio, K.R. Chowdhury, 当无人  
机乘坐公交车:走向节能的城市规模视频监控, 载于:IEEE INFOCOM 2018 - IEEE  
计算机通信会议, 2018,pp. 1043-1051。

[31] Murtaza A. Zafer, Eytan Modiano, 一种基于服务质量约束的节能数据传输的微积  
分方法, IEEE/ACM Trans. 网络 17(3)(2009)898-911。

吴伟, 王建军, 李敏, 刘凯, 单飞, 罗建军, 参与式传感系统的节能传输, 电子与  
控制学报. 地区公社. 34(12)(2016)4048-4062。



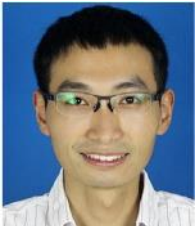
**叶伟部**, 2015 年毕业于南京林业大学, 获计算机科学学士学位。现于东南大学计算机科学与工程学院攻读博士学位。主要研究方向为边缘计算和无人机辅助网络。



**罗俊洲**分别于 1982 年、1992 年和 2000 年获得东南大学应用数  
学专业学士学位和计算机网络专业硕士和博士学位。东南大学  
计算机科学与工程学院正教授。他是 IEEE 计算机学会成员  
和 IEEE SMC 计算机支持协同工作设计技术委员会的联  
合主席, 他是 ACM 成员和 ACM SIGCOMM 中国主席。主  
要研究方向为下一代网络架构、网络安全、云计算和无线  
局域网。



**冯山**, 2015 年获东南大学计算机科学博士学位, 中国南京。现  
任东南大学计算机科学与工程学院副教授。2010 年至  
2012 年, 他是美国密苏里州堪萨斯城大学计算与工程学院  
的访问学者。他目前的研究方向包括能源收集、无线能量  
传输、无人机辅助网络、群体智能和算法设计与分析。



**吴文佳**, 分别于 2006 年和 2013 年获得东南大学计算机科学  
士学位和博士学位。东南大学计算机科学与工程学院副教授。  
他的研究领域包括无线和移动网络。



**杨明**, 2007 年获东南大学计算机科学博士学位。现任东南大学  
计算机科学与工程学院副教授。主要研究方向为网络安全  
与隐私。CCF、ACM 成员, 教育部计算机网络与信息集成  
重点实验室副主任。