

## 设备接入受限的 UAV 空基应急物联网节点分簇部署研究

王巍<sup>1,2,3</sup>, 梁雅静<sup>1,2</sup>, 彭力<sup>3</sup>, 魏忠诚<sup>1,2</sup>, 赵继军<sup>1,2</sup>

(1.河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 河北工程大学河北省安防信息感知与处理重点实验室, 河北 邯郸 056038; 3. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 针对公共安全应用场景中应急物联网缺少地面基站的情况, 将无人机 (UAV, unmanned aerial vehicle) 作为空基基站, 解决应急物联网地面终端设备接入受限条件下的节点分簇部署问题。提出了一种基于按需  $K$ -means 分簇方法 (ODKM, on-demand  $K$ -means) 的空基基站分簇部署方法。首先, 通过两次聚类, 按照不同无人机空基基站的设备接入能力进行基站选择与设备分簇; 其次, 通过求解一个松弛的非凸非线性优化模型, 实现基于能效优化的无人机空基基站部署。实验结果表明, 所提方法可以满足无人机基站接入能力的约束, 并在均衡各簇传输能耗方面有着较好的性能, 实现了地面终端设备按需接入时的通信节能。

**关键词:** 应急物联网; 空基通信; 无人机; 接入受限

**中图分类号:** TP393

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2021.00220

## Node clustered deployment of emergency Internet of things based on UAV with equipment access restriction

WANG Wei<sup>1,2,3</sup>, LIANG Yajing<sup>1,2</sup>, PENG Li<sup>3</sup>, WEI Zhongcheng<sup>1,2</sup>, ZHAO Jijun<sup>1,2</sup>

1. School of Information and Electrical Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

2. Hebei Provincial Key Laboratory of Security & Protection Information Sensing and Processing, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China

3. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China

**Abstract:** Lack of ground base station in emergency Internet of things for public security application scenarios, the unmanned aerial vehicle (UAV) as the air-based base station was adopted to solve the problem of node cluster deployment under the condition of limited access of emergency Internet of things ground terminal equipment. A clustering deployment method based on on-demand  $K$ -means (ODKM) was proposed. Firstly, base station selection and equipment clustering were carried out according to the equipment access ability of different UAV air-based base stations through two clustering steps. Secondly, by solving a relaxed non convex nonlinear optimization model, the UAV air-based base station deployment based on energy efficiency optimization was realized. The experimental results show that the proposed method can meet the constraints of UAV base station access ability, and has a good performance in balancing the transmission energy consumption of each cluster, and realizes the goal of communication energy saving when the ground terminal equipment needs to access.

**Key words:** emergency Internet of things, space based communication, unmanned aerial vehicle, access restriction

收稿日期: 2020-08-31; 修回日期: 2021-02-01

通信作者: 王巍, wangwei83@hebeu.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划 (No.2018YFF0301004); 国家自然科学基金资助项目 (No.61802107); 教育部-中国移动科研基金 (No.MCM20170204); 河北省高等学校科学技术研究项目 (No.ZD2020171); 江苏省博士后科研资助计划项目 (No.1601085C)

**Foundation Items:** The National Key Research and Development Program of China (No.2018YFF0301004), The National Natural Science Foundation of China (No.61802107), Education Ministry and China Mobile Science Research Foundation (No.MCM20170204), Science and Technology Research Project of the Higher Education Institutions of Hebei Province (No.ZD2020171), Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (No.1601085C)

## 1 引言

伴随着中国经济与社会的高速发展,公共安全领域所面对的形势越来越严峻。中国社会科学院城市发展与环境研究所于 2017 年 9 月发布了《公共安全蓝皮书:中国城市公共安全发展报告(2016-2017)》,指出我国城市公共安全在社会治安防控体系、事故灾难防御、防灾减灾以及公共卫生方面存在问题,拟构建“互联网+公共安全”的新模式。

物联网作为最新一代信息领域技术的代表,实现了“人—人、人—物、物—物”之间的信息共享,可以更好地支撑公共安全日常管理,以及对突发事件的应急处置,为保障城市公共安全和维护社会稳定提供了强有力的科技支撑。公共安全物联网将通过联网基础设施、联网无人机、联网车辆、联网装备,更快、更安全、更有效地应对公共安全事故,协助建设智慧城市。

针对突发事件,基于无人机的应急移动物联网得到了广泛关注。在国防、科研及民用领域中,应急物联网发展具备良好的应用研究前景<sup>[1-3]</sup>。应急物联网要求具备远距离通信、局域自组网、精确定位等功能。对于大量搜救人员和无人搜救设备在进入受灾区域后,通常具有很强的运动性和较广的活动范围,同时受到突发事件影响的区域存在着分散和孤立的没有失效的物联网感知节点,当没有固定的地面通信基站时,研究基于无人机的空基基站实现灾区信息可靠的、节能的长距离通信方法是必要的。

## 2 相关工作

近年来,基于无人机的传感网和物联网的研究逐步升温。Han 等<sup>[4]</sup>在 2009 年针对多无人机的 Ad-hoc 网络,研究了无人机的最优轨迹,但是并未深入考虑其运动模式。在此基础上,Jiang 等<sup>[5]</sup>结合无线传感器网络的层次结构和通信方式,也将研究重点集中在无人机的最优轨迹方面,只针对静态传感设备开展工作。随后,在 2011 年,Daniel 等<sup>[6-7]</sup>开展了蜂窝网络(cellular network)中基于无人机空基平台通信方面的研究,对通信过载等问题进行了探索,但是并未讨论无人机空基平台的覆盖性能对通信的影响。Tu 等<sup>[8]</sup>对 M2M 网络中的通信节能上行传输策略进行了探索,仍然未考虑设备的运动所带来的影响。

2014 年,Pang 等<sup>[9]</sup>以基于无人机空基平台的静态无线传感器网络的能耗问题作为出发点,研究了

高效的数据采集与簇头充电方法,逐渐开始关注此类网络的能耗问题。考虑到更为丰富的实际环境类型对物联网设备能量的持续性要求,Tuna 等<sup>[10]</sup>在其研究中使用无人机作为物联网的通信基站。由于其良好的移动性,无人机可以接近和跟随地面特定的应急物联网设备,在网络故障出现之后,可快速扩展其覆盖范围,完成网络拓扑重建,提供快速部署方案的同时保持对物联网节点的低通信发射功率要求<sup>[11]</sup>。Mozaffari 等<sup>[12-13]</sup>在 2016 年的研究中,讨论了当存在 D2D 下层链接时无人机的最佳位置。而在其后续研究中,开展了物联网环境中多个无人机的定位工作,并基于 *K-means* 进行感知节点分簇,以提供有效的数据聚合<sup>[14-15]</sup>。Athukoralage 等<sup>[16]</sup>将 LTE-Unlicensed 基站安装在 UAV 上,提出了一种基于博弈理论的分簇方法,用于 Wi-Fi 接入点之间的负载均衡。2018 年,Naqvi 等<sup>[17]</sup>提出了无人机基站的辅助通信方法,探索了与传统基站通信协同运行的方案。

在无人机的部署研究中,需要完成感知节点分簇。目前的很多研究工作,关注重点在部署算法,而对于分簇,特别是带有约束条件的分簇算法研究不多。事实上,感知节点分簇问题属于带约束条件的聚类分类问题。目前,对于带约束条件的聚类分类算法,从约束条件来源来看,可以分为参数约束和数据约束两类。参数约束是对个体对象或聚类参数的约束,来自相关领域的经验知识;数据约束主要来自于数据的高维性,会使得数据失去聚类趋势,模糊聚类边界。此外,根据文献[18]对带约束条件的聚类算法研究,根据约束条件施加的对象范围,约束条件可以分为全局级约束、聚类级约束、特征级约束和实例级约束。

带约束条件的聚类分类算法,通常用于处理特定应用领域中的特定需求,需要基于特定的领域知识,而领域知识是非常大的概念,不存在一种统一的表达形式,需要结合特定问题具体分析。

1) 现阶段对带约束条件的聚类分类算法,在解决数据约束类别的问题上进行了较多工作,如文献[19]研究了基于稀疏约束的二维聚类算法,将降维过程和聚类过程融合到统一算法框架中,寻找更好的子空间进行特征表示,并且进行动态联合优化。文献[20]研究了基于边缘距离约束的深度聚类方法,基于深度神经网络解决大规模高维数据的聚类,提高簇内紧凑性和簇间的差异性。对于多视角

数据聚类研究, 张嘉旭等<sup>[21]</sup>提出了基于低秩约束的熵加权多视角模糊聚类算法, 引入核范数对多个视角之间的模糊隶属度矩阵进行低秩约束, 并使用交替方向乘子法进行目标函数的优化。Chen 等<sup>[22]</sup>研究了自适应权重多视角约束谱聚类方法, 通过自适应权重学习策略, 可以很好地区分不同视角的重要性, 提升预测精度。

2) 对于参数约束类别的问题, 由于需要结合相关领域的经验知识, 目前的研究多集中在应用领域, 结合特定问题具体分析。因此, 根据不同的无人机系统模型和感知节点分簇需求, 研究带有约束条件的分簇算法是必要的。

同时, 很多行业也积极致力于此领域的研究。美国 Verizon 无线公司以及中国移动通信集团公司等, 都开展了基于无人机的蜂窝通信移动型基站的研究。Facebook 的 Aquila 成为在高空提供无线网络的“空中基站”, 谷歌的 Project Loon 最近也被部署在波多黎各的灾难响应场景中。2019年3月14日, 中国航天科工宣布, 其基于临近空间太阳能无人机来构建空中局域网的飞云工程开展并顺利地完成了多架次自主飞行验证, 取得了阶段性成果。目前, 该工程主要利用太阳能无人机搭载空中局域网设备等通信载荷, 对地进行通信覆盖。飞云工程旨在

构建基于长航时无人机的空中局域网, 重点瞄准应急通信等应用方向。

综上所述, 基于各种类型无人机的应急网络已成为研究前沿。今后随着大量可穿戴设备、智能汽车和智能终端等物联网设备的使用, 在缺少固定通信基站的场景中, 基于无人机空基基站的应用需求将会增加, 此时, 空基平台接入设备数量受限的情况将更加凸显。当上行视距通信能量不足时, 研究接入设备数量受限条件下的节点分簇部署问题具有实际意义和挑战性。

本文对此问题展开研究, 主要的研究工作如下: 在无人机空基应急物联网场景模型的基础上, 讨论无人机基站允许同时接入的物联网设备数上限和实际接入的设备数量之间的关系, 完成设备接入受限的情况分类; 提出一种地面物联网设备节点按需  $K$ -means 分簇算法, 实现无人机基站选择与设备分簇; 基于设备分簇方案, 实现基于能效优化的无人机空基基站部署, 通过仿真实验, 验证本文方法可以实现地面终端设备按需接入时的通信节能目标。

### 3 系统模型

本文所涉及的 UAV 空基应急物联网场景如图 1 所示。系统模型具有 3 层结构, 分别为: 由地面固

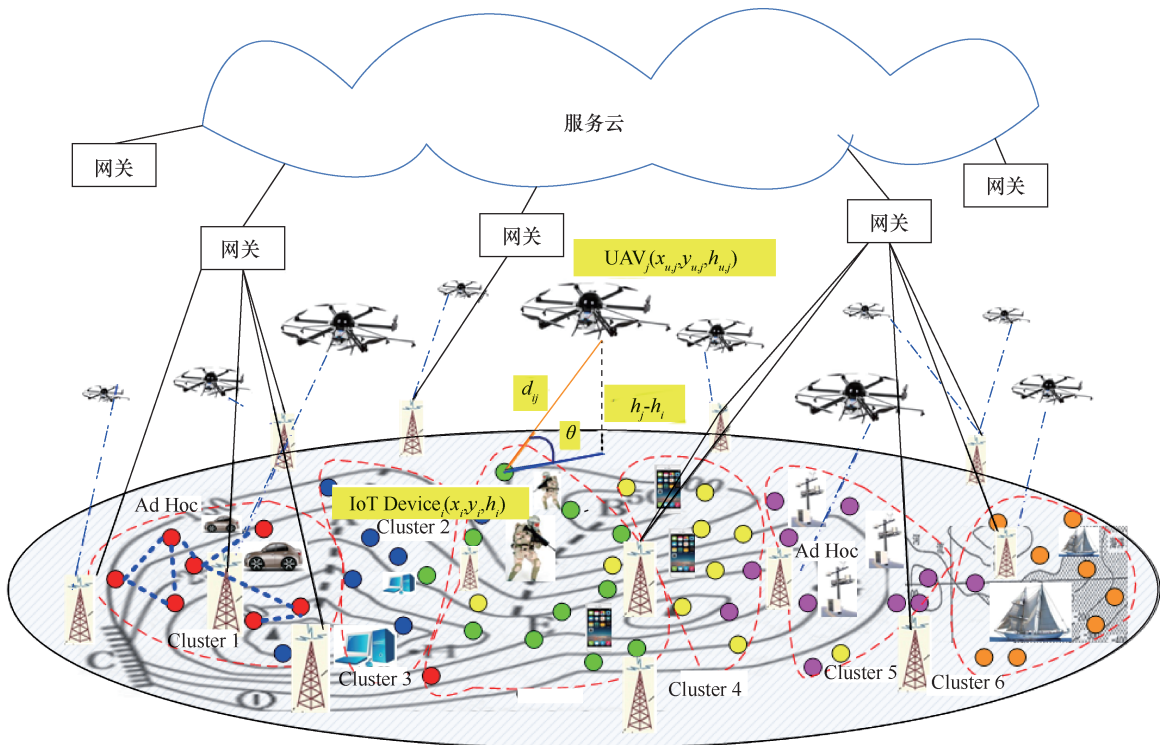


图1 系统模型

定感知设备、移动搜救设备、手持终端等组成的移动 Ad Hoc 网络层；由 UAV 组成的空基中继层；以及由地面控制站、应急管理现场指挥系统等组成的应用层。对于第 1 层，假设在某一地面区域  $\mathcal{S}_L$  内，存在  $L$  个物联网设备 ( $\mathcal{L} = \{1, 2, \dots, L\} \subset \mathcal{N}^*$ )，第  $i$  个物联网设备的空间定位坐标为  $(x_i, y_i, h_i)$ ；对于第 2 层，假设在某一空中区域  $\mathcal{S}_K$  中，部署了  $K$  个无人机 ( $\mathcal{K} = \{1, 2, \dots, K\} \subset \mathcal{N}^*$ )，第  $j$  个无人机的坐标为  $(x_{u,j}, y_{u,j}, h_{u,j})$ 。上述地面物联网设备和空中无人机均可以在三维空间运动，且其空间位置坐标可获知。在地面物联网设备与无人机空基基站通信时，采用 OFDMA 进行上行通信，第  $j$  个无人机基站允许同时接入的物联网设备数上限为  $M_j$ ，实际接入的设备数量为  $|C_j|$ ，因此对于所有的地面物联网设备，将被分为两类：可接入设备集  $D^A = \{D_{ki}^A | k \in \mathcal{K}, i \in \mathcal{L}\}$  和不可接入设备集  $D^{UA} = \{D_j^{UA} | j \in \mathcal{L}\}$ ， $i + j = L$ 。

地面终端设备与空基基站使用视距通信方式，其通信仰角为  $\theta$ ，视距通信概率可近似描述为式(1)<sup>[23]</sup>

$$P_{\text{Los}} = \frac{1}{1 + \psi \exp(-\beta[\theta - \psi])} \quad (1)$$

其中，参数  $\psi$  与  $\beta$  取决于载波频率和应急物联网所处的环境。

在图 1 所示的系统模型中，地面物联网终端设备与无人机空基基站的空基关系可以描述为

$$\theta = \frac{180}{\pi} \times \sin^{-1} \frac{|h_i - h_{u,j}|}{d_{ij}} \quad (2)$$

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_{u,j})^2 + (y_i - y_{u,j})^2 + (h_i - h_{u,j})^2} \quad (3)$$

考虑可靠通信的要求， $P_{\text{Los}}(\theta) \geq \varepsilon$  ( $\lim \varepsilon = 1$ )，则

$$\theta \geq P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon) \quad (4)$$

$$d_{ij} \leq \frac{|h_i - h_{u,j}|}{\sin(P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon))} \quad (5)$$

第  $j$  个无人机在接收第  $i$  个地面物联网终端设备的数据时，其通信功率为(单位：dBm)<sup>[23]</sup>

$$P_r^{ij} = P_t^{ij} - 10\alpha \log\left(\frac{4\pi f_c d_{ij}}{c}\right) - \eta \quad (6)$$

其中， $P_t^{ij}$  为地面物联网设备发射功率， $f_c$  为载波频率， $\alpha = 2$  为视距通信的路径衰减指数， $\eta$  为自由

空间传播损耗余量， $c$  为光速值。

为了保证所传输的感测信息在无人机中继层解码正确，地面物联网设备的发射功率应满足最小信噪比需求，对于正交相移键控调制方式，其误码率为  $\delta = Q\left(\sqrt{\frac{2P_r^{ij}}{R_b N_0}}\right)$ ，则第  $i$  个地面物联网终端设备发射功率应为(单位：mW)

$$P_t^{ij} = [Q^{-1}(\delta)]^2 \frac{R_b N_0}{2} 10^{n/10} \left(\frac{4\pi f_c d_{ij}}{c}\right)^2 \quad (7)$$

其中， $Q^{-1}(\cdot)$  是  $Q(\cdot)$  的反函数， $N_0$  为噪声功率谱密度， $R_b$  为传输码率。

## 4 节点分簇部署方法

在基于无人机的应急物联网应用中，无人机空基基站常采用系留无人机，此时其能源供应是基本可以得到保障的。而由于地面物联网设备缺乏持续的后备能源，为了延长其网络生命周期，且更及时地传输地面信息，因此本文以地面终端设备按需接入时的通信节能为研究目标，为此提出了一种新的节点分簇部署方法。

### 4.1 无人机基站选择与设备分簇

地面终端设备在接入无人机空基基站进行数据通信前，需完成地面设备节点分簇，此时应考虑无人机基站的接入能力。根据系统模型中无人机基站允许同时接入的物联网设备数上限  $M_j$  以及实际接入的设备数量  $|C_j|$ ，以保证  $|C_j| \leq M_j$  的约束。

在实际应用中，根据地面物联网设备总量和无人机空基基站的总接入能力，上述接入数量约束可进一步分为以下 3 种情况。

$$\sum_{j=1}^K |C_j| \leq \min(M_j) \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^K |C_j| < \sum_{j=1}^K M_j \quad (9)$$

$$\frac{\sum_{j=1}^K |C_j|}{K} \geq \max(M_j) \quad (10)$$

情况 1：在所有无人机中，当允许接入设备数量最小的无人机可以满足所有物联网终端设备的接入需求时，即式(8)表示的情况，此时可使用  $K$ -means 等任意一种基于划分的聚类算法完成网络节点的分簇，这也是文献[1,14]所讨论的情况。

情况 2: 对式(9)表示的情况, 即无人机空基基站的总接入能力可以满足地面物联网设备总量, 但各无人机的接入能力有所差异的情况。

由于  $K$ -means 等聚类算法可能使得各个簇的数据量不均匀, 按照文献[1,14]采用  $K$ -means 聚类算法, 当各簇数量无法满足  $|\mathcal{C}_j| \leq M_j$  时, 通信节能问题无法求解。此外, 各无人机基站通信设备差异, 或者外界环境的影响, 导致基站允许接入设备数量上限  $M_j$  各不相同, 需要在物联网终端设备分簇时, 考虑各无人机的设备接入能力。为了解决上述两个问题, 需要考虑新网络节点分簇方法, 拓展文献[1,14]所提出方法的适用范围, 增加其普适性。为此本文提出一种地面物联网设备节点按需  $K$ -means 分簇算法 (ODKM, on-demand  $K$ -means), 算法描述如下。

首先, 应用  $K$ -means++ 对所有物联网终端设备进行聚类, 得到初始的无人机接入设备分簇以及簇中心; 其次, 根据初始簇中心坐标计算各物联网终端设备到各簇中心的距离, 在此基础上计算各物联网终端设备到每一簇中心的距离与到最远簇的距离之差, 并按升序排序; 再次, 对于每一个初始簇中心, 根据所有物联网终端设备升序排序表, 按照各无人机基站的设备接入数量需求  $M_j^{\text{on-demand}}$ , 分别在排序表中选出前  $M_j^{\text{on-demand}}$  项, 得到按需的物联网终端设备节点分簇; 最后, 再次应用  $K$ -means++, 得到按需分簇情况下的新的簇中心。

情况 3: 当允许接入设备数量最大的无人机不能满足地面物联网设备均匀分簇时的接入需求, 即式(10)表示的情况, 此时无论如何分簇, 都无法使所有地面物联网设备同时接入。为了保证地面监测信息的及时传输, 尽可能最大化地面终端设备接入数量, 此时使  $M_j^{\text{on-demand}} = M_j$ , 与情况 2 相似, 实现情况 3 时的地面物联网设备分簇。

#### 4.2 基于能效优化的无人机空基基站部署

对于上述基于无人机的应急物联网, 为了实现地面终端设备的通信能效控制, 需要实时最小化终端设备发射功率, 即

$$\min_{\mathcal{C}_j, \mu_j} \sum_{j=1}^K \sum_{i \in \mathcal{C}_j} P_i^j, j \in K \quad (8)$$

根据第 4.1 节所描述的地面物联网设备总量和无人机空基基站的总接入能力之间的关系, 上述最

小化问题表述为<sup>[1]</sup>

$$\{\mathcal{C}_j^*, \mu_j^*\} = \arg \min_{\mathcal{C}_j, \mu_j} \sum_{j=1}^K \sum_{i \in \mathcal{C}_j} d_{ij}^2, j \in K \quad (12)$$

$$\text{s.t. } \mathcal{C}_j \cap \mathcal{C}_m = \emptyset, j \neq m, j, m \in \mathcal{K}$$

$$\sum_{j=1}^K |\mathcal{C}_j| = \mathcal{L}, d_{i,j} \leq \frac{|h_i - h_{\mu,j}|}{\sin(P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon))}, |\mathcal{C}_j| \leq M_j \quad (13)$$

对于聚类到一簇中的地面物联网终端设备, 当第  $j$  个无人机部署到该簇中心时, 可使得  $d_{ij}^2$  最小。对于所有的  $K$  个无人机, 全部部署到各簇中心时, 上述最小化问题式(12)可求解。因此, 需要计算各无人机空基基站的最优部署位置, 保证通信节能, 即

$$\begin{aligned} & \min_{(x_{\mu,j}, y_{\mu,j}, h_{\mu,j})} \sum_{i \in \mathcal{C}_j} (x_{\mu,j} - x_i)^2 + \\ & (y_{\mu,j} - y_i)^2 + (h_{\mu,j} - h_i)^2 \\ & \text{s.t. } (x_{\mu,j} - x_i)^2 + (y_{\mu,j} - y_i)^2 + \\ & (h_{\mu,j} - h_i)^2 \left( 1 - \frac{1}{\sin^2(P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon))} \right) \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

其中,  $i \in \mathcal{C}_j, j \in \mathcal{K}$ 。

对上述优化问题建立优化模型

$$\min_s s^T \mathbf{P}_0 \mathbf{s} + \mathbf{Q}_0^T \mathbf{s} + r_0$$

$$\text{s.t. } s^T \mathbf{P}_i \mathbf{s} + \mathbf{Q}_i^T \mathbf{s} + r_i \leq 0, i = 1, \dots, |\mathcal{C}_j| \quad (15)$$

其中,  $\mathbf{s} \in S_K = \{\mathbf{s} \in \mathbb{R}^3 : \mathbf{l} \leq \mathbf{s} \leq \mathbf{u}\}$ ,  $\mathbf{l} = (l_1, l_2, l_3)^T$ ,

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)^T, \mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} |\mathcal{C}_j| & 0 & 0 \\ 0 & |\mathcal{C}_j| & 0 \\ 0 & 0 & |\mathcal{C}_j| \end{bmatrix}, \mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega \end{bmatrix},$$

$$\omega = 1 - \frac{1}{\sin^2(P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon))}, \mathbf{Q}_0 = \left[ -2 \sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_j|} x_i - 2 \sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_j|} y_i - 2 \sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_j|} h_i \right]^T,$$

$$\mathbf{Q}_i = [-2x_i \quad -2y_i \quad -2h_i \omega]^T, r_0 = \sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_j|} x_i^2 + \sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_j|} y_i^2 +$$

$$\sum_{i=1}^{|\mathcal{C}_j|} h_i^2, r_i = x_i^2 + y_i^2 + h_i^2 \omega.$$

由于约束条件的二次项系数  $\mathbf{P}_i$  非正定, 因此优化模型是一个非线性非凸二次约束二次规划问题<sup>[24]</sup>, 此类非凸二次约束二次规划问题是 NP-hard 的, 应用正交变换方法, 此问题可转化成对应的松弛二次约

束二次规划问题, 进而得到求解<sup>[14]</sup>。

### 4.3 算法描述

基于上述算法的无人机空基基站分簇部署整体流程描述如下。

此算法以无人机(UAV)为空基基站, 解决应急物联网地面终端设备接入受限情况下的节点集群部署问题。

**输入**  $(x_i, y_i, h_i)$ : 第  $i$  个物联网设备的空间位置坐标

$M_j$ : 同时允许接入第  $j$  个 UAV 的物联网设备最大数量

$L$ : 物联网设备数量

$K$ : 无人机数量

**输出**  $s_{i,j}^*$ :  $t$  时刻第  $j$  个 UAV 的最优部署位置

$P_i^{j,t}$ :  $t$  时刻第  $i$  个地面物联网设备与第  $j$  个 UAV 的发射功率

$|C_j|$ : 同时接入第  $j$  个 UAV 的物联网设备实际数量

$$[s_{i,j}^*, P_i^{j,t}, |C_j|] = \text{CDM-ODKM}(M_j, L, K, (x_i, y_i, h_i))$$

1) {

2) if  $\sum_{j=1}^K |C_j| \leq \min(M_j)$  then

3)  $\mu_j \leftarrow K\text{-means}$  算法

4) goto 20

5) end if

6) if  $\sum_{j=1}^K |C_j| < \sum_{j=1}^K M_j$  then

7) goto 13

8) end if

9) if  $\frac{\sum_{j=1}^K |C_j|}{K} \geq \max(M_j)$  then

10)  $M_j^{\text{on-demand}} = M_j$

11) goto 13

12) end if

13) 初始化  $K\text{-means++}$

14) for  $\mathcal{L}$  中每一台物联网设备

15) 计算到其最近的聚类的距离减去到其最远的聚类的距离

16) 按升序对物联网点排序  $\leftarrow$  排序

17) 设备分簇  $\leftarrow$  通过  $M_j^{\text{on-demand}}$  和排序分配物联网点至新的聚类

18)  $\mu_j \leftarrow$  使用新的聚类重用  $K\text{-means++}$

19) end for

20) for  $\mathcal{L}$  中每一簇物联网设备聚类

21)  $|C_j| = \text{sum}(\text{物联网设备分簇})$

22) end for

23)  $s_{i,j}^*$  由式(10)、式(11)求解

24) 初始化  $f_c, \delta, N_0, R_b, B, \eta$

25) for  $\forall \text{UAV} \in K$  do

26)  $P_i^{j,t} \leftarrow f_c, \delta, N_0, R_b, B, \eta, (x_i, y_i, h_i), s_{i,j}^*$

27) end for

28) }

此流程为节点分簇部署算法一次运行的过程, 根据地面物联网终端设备的移动情况, 以及应急物联网网络拓扑结构的变化, 按需进行算法的更新迭代。

## 5 实验与分析

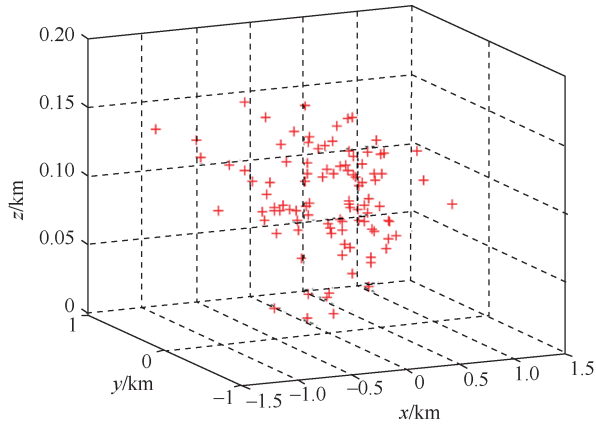
在本文的仿真实验中, 考虑  $5 \text{ km} \times 5 \text{ km} \times 0.2 \text{ km}$  的空间内随机部署  $L$  个地面物联网设备, 具体的仿真参数见表 1。由于本文所提方法是了解决设备接入受限条件下的应急物联网空基基站分簇部署问题, 实现地面终端设备按需接入时的通信节能目标, 因此以下实验主要从地面终端设备能否按需分簇以及能效控制效果开展。

表 1 仿真参数

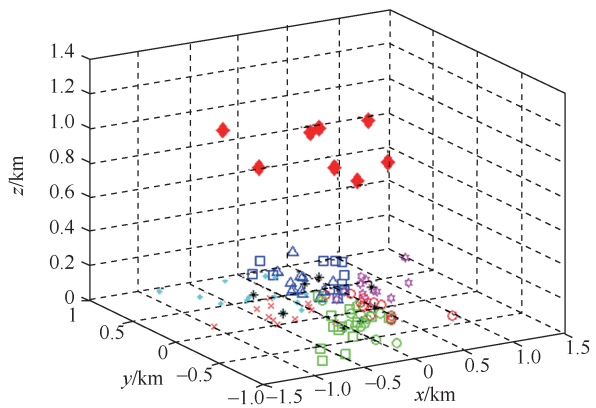
参数	描述	值
$L$	IoT 设备数量	60~200
$f_c$	载波频率	2 GHz
$v_j'$	UAV 的速度	(5,5,0.5) m/s
$\delta$	误码率要求	$10^{-8}$
$\varepsilon$	视距通信概率要求	0.95
$N_0$	噪声功率谱密度	-170 dBm/Hz
$R_b$	数据传输速率	200 kbit/s
$B$	传输带宽	200 kHz
$\eta$	附加路径损耗	5 dB
$\psi$	环境参数 1	11.95
$\beta$	环境参数 2	0.14

空-地节点分簇部署如图 2 所示。  $L=100$  个地面物联网终端设备随机分布, 如图 2(a)所示, 由于真实情况下地势存在变化, 因此实验中也考虑了终端设备空间位置高程坐标的影响, 其变化范围为  $0 \sim 0.2 \text{ km}$ 。根据本文所提出的无人机空基基站分簇

部署方法中的按需 *K*-means 分簇算法 (算法 1), 采用 8 个具有不同接入设备数量上限的无人机空基基站, 形成 8 个设备数量不同的地面物联网设备最优分簇, 在此基础上, 应用基于能效优化的无人机基站部署算法 (算法 2), 实现无人机空基基站的最优分簇部署, 部署效果如图 2(b)所示, 可以看出本文所提方法对物联网终端设备接入受限条件下的按需分簇是有效的。



(a) 地面物联网设备的初始分布结果

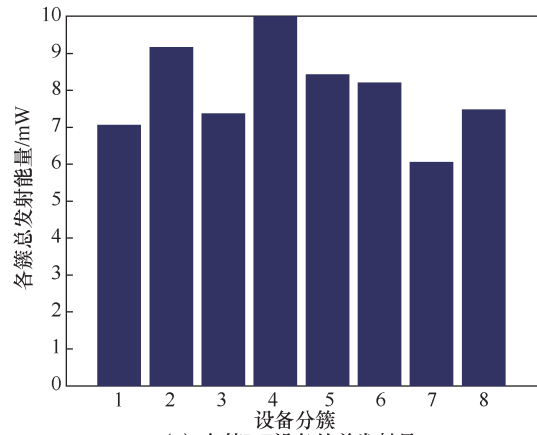


(b) 物联网设备分簇效果与无人机基站部署

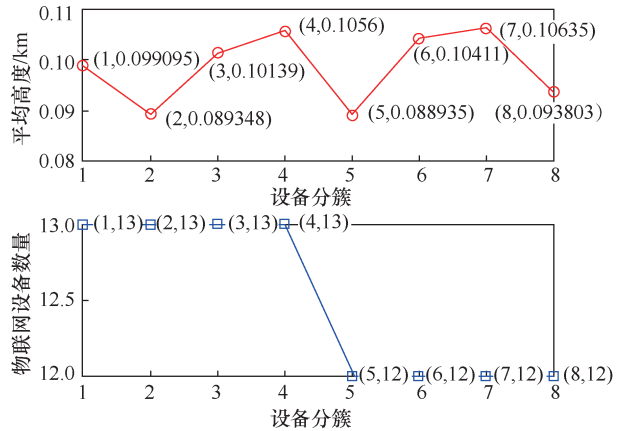
图 2 空-地节点分簇部署

图 3 给出了 8 个静止悬浮的无人机空基基站与  $L=100$  个地面物联网终端设备组成应急物联网, 开展静态通信实验的结果。此实验调整了各无人机接入设备数量上限, 允许同时接入的物联网设备数上限  $M_j$  相同。图 3(a)记录了各簇地面物联网终端设备的总发射功率, 其中最大总发射功率是 9.98 mW, 最小总发射功率是 6.08 mW, 平均值是 7.96 mW, 各簇物联网终端设备总发射功率较为均衡。图 3(b)同时记录了各簇物联网终端设备的空间位置高程坐标和实际接入的终端设备的

数量  $|C_j|$ 。最大的地面物联网终端设备平均空间位置高程坐标出现在第 7 簇, 高度是 0.106 35 km, 最小的地面物联网终端设备平均空间位置高程坐标出现在第 5 簇, 其高度是 0.088 935 km。对于实际接入的设备数量  $|C_j|$ , 由于使用了 8 个相同的无人机空基基站, 允许接入的设备数上限  $M_j$  相同, 因此各簇物联网终端设备数量均衡, 为 12 个或 13 个。



(a) 各簇IoT设备的总发射量



(b) 各簇平均高度与IoT设备数量

图 3 地面 IoT 设备与 UAV 静态通信

通过对图 3(a)和图 3(b)的综合分析, 可以看出对于每个无人机空基基站来说, 本簇物联网终端设备的总发射功率与设备的空间位置高程坐标无明显相关性, 这与文献得出的结论有所差异。主要是因为, 当以 *K*-means 方法进行网络节点分簇时, 只以物联网终端设备的地理坐标为属性进行聚类, 此时, 各簇设备的  $(x_i, y_i)$  坐标到簇中心的平均距离较为接近, 根据  $P_i^j$  和  $d_{ij}$  的计算公式, 可知各簇物联网终端设备的总发射功率与该簇设备的数量正相关, 与该簇设备的平均高度负相关。当采用本文提

出的按需  $K$ -means 方法时,不但需要以物联网终端设备的空间位置为属性进行聚类,还要使各簇设备按照无人机空基站的接入数量要求进行均衡化或者按需均衡化,导致一些物联网终端设备无法接入最近邻的无人机空基基站中,而是被均衡接入次近邻的空基基站中,使得各簇设备的  $(x_i, y_i)$  坐标到簇中心的平均距离不同。根据  $P_i^u$  和  $d_{ij}$  的计算式,当各簇物联网终端设备具有近似相同的数量时,总发射功率与该簇设备平均高度的相关性不明显。

图 4 比较了无人机空基基站数量变化时的地面物联网终端设备平均发射功率变化的情况。从图 4 可以看出,在保证可靠、节能通信的前提下,随着无人机空基基站数量的增加(从  $K=4$  到  $K=10$ ),地面物联网终端设备的平均发射功率非线性减小,原因是更多的无人机分簇使得地面物联网终端设备分布更为集中,也可以更接近于簇内的无人机空基基站,而变化的非线性说明在基于无人机空基基站的应急物联网实际应用中,应综合考虑无人机的成本和平均发射能量的变化,这一结论与文献[1,12]是一致的。在本文实验中,分别采用了 3 种设备分簇算法,分别是本文提出的按需  $K$ -means 算法(算法 1)、 $K$ -means 算法(文献 1 算法)和 Voronoi 算法,比较地面终端设备分簇以及能效控制效果。可以看出,相对于具有较低平均发射功率的  $K$ -means 算法和较高平均发射功率的 Voronoi 算法而言,本文提出的按需  $K$ -means 算法效果介于两者之间,原因是在进行地面物联网终端设备平均发射功率控制时,除了尽可能减小通信距离,满足通信节能的要求,还要按照无人机基站的接入数量要求进行均衡化或者按需均衡化,因此性能优于 Voronoi 算法,而略差于单纯使用  $K$ -means 算法。在解决设备接入条件下的应急物联网空基基站分簇部署问题,实现地面终端设备按需接入时的通信节能目标时,本文所提方法是可行有效的。

此外,对不同数量的无人机空基基站( $K = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ )和不同数量的物联网终端设备( $L = \{60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200\}$ )的组合情况进行仿真实验。实验数据也与文献[1,12]中所用  $K$ -means 算法时的结果近似,表明本文方法在 IoT 设备数量变化时仍然适用。

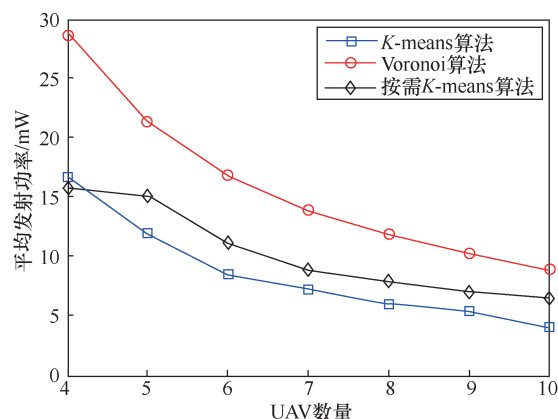


图 4 无人机空基基站数量变化时地面物联网终端设备平均发射功率

## 6 结束语

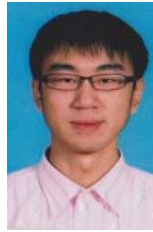
本文提出了一种无人机空基基站分簇部署方法,用于解决设备接入受限条件下的应急物联网空基基站分簇部署问题,实现地面终端设备按需接入时的通信节能目标。该方法所包括的按需分簇算法按需  $K$ -means 可以根据不同无人机基站允许接入设备数量的需求,结合地面物联网终端设备在事件发生区域分散的特点进行无人机基站选择与设备分簇。在提供可靠通信的前提下,基于能效优化的无人机空基基站部署算法完成无人机的布署位置优化,降低地面设备的通信耗能。实验结果表明,本文算法在满足无人机基站接入能力的约束、均衡各簇传输能耗方面有着较好的性能。

## 参考文献:

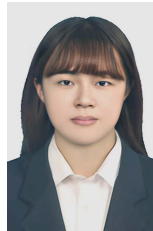
- [1] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Mobile Internet of things: can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture? [C]//Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [2] 陈前斌, 李国军, 李国权, 等. 应急指挥物联网系统架构与关键技术[J]. 物联网学报, 2018, 2(3): 82-90.  
CHEN Q B, LI G J, LI G Q, et al. System architecture and key technologies of emergency command Internet of things[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2018, 2(3): 82-90.
- [3] 郑博, 张衡阳, 李勇, 等. 空中骨干网覆盖策略[J]. 通信学报, 2018, 39(11): 36-43.  
ZHENG B, ZHANG H Y, LI Y, et al. Coverage in airborne backbone network[J]. Journal on Communications, 2018, 39(11): 36-43.
- [4] HAN Z, SWINDLEHURST A L, LIU K. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3533-3546.
- [5] JIANG F, SWINDLEHURST A L. Optimization of UAV heading for the ground-to-air uplink[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(5): 993-1005.
- [6] DANIEL K, WIETFELD C. Using public network infrastructures for UAV remote sensing in civilian security operations[J]. Homeland Se-

- curity Affairs, 2011, (S3): 1-7.
- [7] ROHDE S, WIETFELD C. Interference aware positioning of aerial relays for cell overload and outage compensation[C]//Proceedings of 2012 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC). Piscataway: IEEE Press, 2012: 1-5.
- [8] TU C Y, HO C Y, HUANG C Y. Energy-efficient algorithms and evaluations for massive access management in cellular based machine to machine communications[C]//Proceedings of 2011 Vehicular Technology Conference (VTC). Piscataway: IEEE Press, 2011: 1-5.
- [9] PANG Y, ZHANG Y, GU Y, et al. Efficient data collection for wireless rechargeable sensor clusters in harsh terrains using UAVs[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2014: 234-239.
- [10] TUNA G, NEFZI B, CONTE G. Unmanned aerial vehicle-aided communications system for disaster recovery[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2014, 41: 27-36.
- [11] SHARMA V, SRINIVASAN K, CHAO H C, et al. Intelligent deployment of UAVs in 5G heterogeneous communication environment for improved coverage[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017, 85: 94-105.
- [12] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: performance and tradeoffs[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 3949-3963.
- [13] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles[C]//Proceedings of 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.
- [14] 王巍, 彭力, 赵继军, 等. 移动物联网非完整约束中继的协同任务规划[J]. 电子学报, 2019, 47(6): 1251-1259.  
WANG W, PENG L, ZHAO J J, et al. Cooperative task planning of ground relay with nonholonomic constraints in mobile Internet of things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1251-1259.
- [15] 王巍, 彭力, 赵继军, 等. 基于旋翼无人机近地面空间应急物联网节点动态协同部署[J]. 自动化学报, 2019.  
WANG W, PENG L, ZHAO J J, et al. Dynamic cooperative deployment of emergency Internet of things near ground space based on drone[J]. Acta Automatica Sinica, 2019.
- [16] ATHUKORALAGE D, GUVENC I, SAAD W, et al. Regret based learning for UAV assisted LTE-U/WiFi public safety networks[C]//Proceedings of 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-7.
- [17] NAQVI S A R, HASSAN S A, PERVAIZ H, et al. Drone-aided communication as a key enabler for 5G and resilient public safety networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(1): 36-42.
- [18] 冯兴杰, 黄亚楼. 带约束条件的聚类算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(7): 12-14, 169.  
FENG X J, HUANG Y L. Research on the algorithm of the constrained clustering[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(7): 12-14, 169.
- [19] 赵泽雨. 基于稀疏约束的二维聚类算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2019.  
ZHAO Z Y. Two-dimensional clustering algorithms based on sparse constraints[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.
- [20] 邵旭颖. 基于边缘距离约束的深度聚类方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.  
SHAO X Y. Research on distance margin-based deep discriminative clustering methods[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018.
- [21] 张嘉旭, 王骏, 张春香, 等. 基于低秩约束的熵加权多视角模糊聚类算法[J]. 自动化学报, 2020: 1-12.  
ZHANG J X, WANG J, ZHANG C X, et al. Entropy-weighting multi-view fuzzy c-means with low rank constrain[J]. Acta Automatica Sinica, 2020: 1-12.
- [22] CHEN C, QIAN H, CHEN W H, et al. Auto-weighted multi-view constrained spectral clustering[J]. Neurocomputing, 2019, 366:1-11.
- [23] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2898-2904.
- [24] 田朝薇, 宋海洲. 求非凸二次约束二次规划全局解的凸规划方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 458-462.  
TIAN Z W, SONG H Z. A convex optimization method for global optimal solution of quadratic programming problem with non-convex quadratic constraints[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2011, 32(4): 458-462.

## [作者简介]



王巍 (1983- ), 男, 博士, 河北工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为公共安全物联网、隐式人机交互等。



梁雅静 (1995- ), 女, 河北工程大学硕士生, 主要研究方向为无人机组网。



彭力 (1967- ), 男, 博士, 江南大学教授、博士生导师, 主要研究方向为视觉物联网等。



魏忠诚 (1987- ), 男, 博士, 河北工程大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为智慧城市、公共安全、物联网、人工智能等。



赵继军 (1970- ), 男, 博士, 河北工程大学教授、博士生导师, 主要研究方向为宽带通信网、传感网与物联网等。