

基于无人机的物联网空基中继鲁棒优化

王巍^{1,2,3}, 谷壬倩^{1,2}, 彭力³, 赵继军^{1,2}, 魏忠诚^{1,2}, 常存喜⁴

(1. 河北工程大学信息与电气工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 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; 4. 中国民用航空总局第二研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 面向应急管理平台中感知网络缺少地面基站时的关键区域信息传输需求, 考虑应急物联网节点空间定位存在的不确定性, 提出基于无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)的物联网空基中继鲁棒优化方法。首先, 建立此类物联网的系统模型; 其次, 根据建立的非凸非线性模型与地面物联网终端设备定位精度存在较大关联, 且定位信息的细微扰动可导致模型求解无效的实际情况, 对系统模型进行了松弛并引入物联网设备定位数据的不确定性描述, 进而得到低空域无人机中继通信功率优化问题的鲁棒对等模型; 再次, 给出了模型求解算法; 最后, 通过仿真实验, 从无人机部署效果和通信功率控制等方面验证了本文所提方法的有效性和鲁棒性, 同时, 分析了影响本文所述方法效能的因素。

关键词: 公共安全; 应急物联网; 无人机; 空基中继; 鲁棒性

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi:10.11959/j.issn.2096-3750.2022.00261

Robust optimization of air based relay for internet of things based on UAV

WANG Wei^{1,2,3}, GU Renqian^{1,2}, PENG Li³, ZHAO Jijun^{1,2}, WEI Zhongcheng^{1,2}, CHANG Cunxi⁴

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

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

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

4. The Second Research Institute of Civil Aviation Administration of China, Chengdu 610041, China

Abstract: Faced with the need of key regional information transmission in the emergency situation where the perception network lacks of ground base stations, considered about the uncertainty of spatial positioning of emergency internet of things (eIoT) nodes, a robust optimization method for air-based relay of eIoT based on unmanned aerial vehicle (UAV) was proposed. Firstly, the system modeling of this kind of eIoT was carried out. Secondly, according to the fact that the non-convex and nonlinear model has a great correlation with the positioning accuracy of the ground-based eIoT equipment and the tiny disturbance of the positioning information can lead to the invalid solution of the model, the system model was relaxed and the uncertainty description of the location data of the eIoT equipment was introduced, Then the

收稿日期: 2021-08-23; 修回日期: 2022-02-11

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-中国移动科研基金资助项目 (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), The Education Ministry and China Mobile Science Research Foundation (No.MCM20170204); The Science and Technology Research Project of Higher Education Institutions of Hebei Province (No. ZD2020171), The Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research Funds (No. 1601085C)

robust equivalent model of the low altitude UAV relay communication power optimization problem was obtained. Thirdly, the model solving algorithm was given. Finally, the effectiveness and robustness of the proposed method were verified from the deployment of UAV and communication energy consumption. At the same time, the factors effecting the effectiveness of the proposed method were analyzed.

Key words: public security, emergency internet of things, UAV, air-based relay, robustness

0 引言

公共安全体系作为智慧城市建设的一个重要领域,面临着社会治安防控体系不够健全、抵御事故和灾难的能力较弱、防灾减灾能力亟须提升和公共卫生形势较为严峻等诸多问题。根据我国公共安全战略的发展要求,大力推动智慧城市公共安全体系建设,需要融合大数据、云计算、物联网、人工智能等新技术,深入开展公共安全体系建设与应急管理工作,实现城市公共安全从更多依赖人类感知的系统到借助机器的精确感知,从局域、分时的防控到全域、全时的监测,从相对被动的响应到实时的预测预警等方向和维度的转变,提高应急管理能力。

公共安全物联网通过联网基础设施、联网无人机、联网车辆、联网装备,更快速、更安全、更有效地响应公共安全事件,协助建设智慧城市。其中,面向应急管理,在缺少地面固定通信基站的情况下,以无人机作为空基平台,基于无人机的应急物联网得到了广泛关注,具有良好的应用前景^[1-2]。

针对进入突发事件所在区域的大量人员所携设备、无人感知搜救设备以及此区域已存在的未失效的信息感知节点,地理位置信息是异构设备协同组网、网络传输优化、应急资源调度等各类应用的基础。但由于设备定位精度不同、建筑物遮挡、环境干扰等因素,无法获得各类异构设备的精确位置信息。这种情况下,针对基于无人机的物联网数据中继问题,研究可靠、节能、鲁棒地传输重点区域感知信息的方法是必要的。

随着无人机、无人车技术的发展,目前的无人系统虽不能完全代替人类,但不可否认它是现有系统的有效补充,许多情况下可在突发事件所在区域内更高效地完成应急任务。

20世纪90年代末,无人机在美国开始应用于突发事件的应急救援与灾害监测领域,英国政府和应急服务部门采用无人机新技术保证社区的健康和安全,加拿大也逐步开展了无人机运送医疗物

品、应急药品的业务。2008年,我国汶川大地震发生后,中国科学院的研究团队应用遥感无人机,开展对震中受灾区域灾情的航拍工作。随后在玉树地震、芦山地震等灾后救援中,遥感无人机发挥的作用越来越大。2017年,我国九寨沟地震发生后,深圳市大疆创新科技有限公司应用无人机航测、追踪现场,为应急救援团队提供大量信息。中国移动有限公司与华为技术有限公司联合开展无人机高空基站的应用,快速恢复了受灾区域30多平方千米范围内的通信,这种敏捷、高效部署的通信网络,为救援队提供了有效的通信链接。2018年6月21日,中国民用航空应急救援联盟应急无人机专业委员会正式成立,建议建立全国统一的常备应急无人机支援力量,同时研究无人机对提升应急管理能力的技术规范 and 标准,并提出适合我国国情的应急无人机施行方案。

1 相关研究

无人机作为空中数据中继,可以有效解决突发事件区域通信基站缺乏问题,提升大规模通信网络的实时通信能力^[3]。同时无人机还可为地面终端设备提供信息中继和缓存支持,为无法实现直接通信的物联网终端设备提供信息交换的途径^[4]。在这样的系统架构中,无人机作为空中数据中继为事件全区域传递信息^[5]。按照无人机数量和滞空方式的不同,空中数据中继可以分为单机静态滞空数据中继、单机动态滞空数据中继、多机静态滞空数据中继以及多机动态滞空数据中继。Mozaffari等^[6]在2016年针对单机静态、动态两种场景中设备到设备(D2D, device to device)通信进行了讨论,得到了关于最优部署情况下的覆盖率、通信时延等重要结论。Sharma等^[7]在2017年针对5G异构通信环境的成本与效用,开展多机静态场景中智能部署与覆盖研究,提高了每个网络用户设备(UE, user equipment)的容量。2018年,Naqvi等^[8]提出了多机动态形式的无人机基站辅助通信方法,探索了与传统基站通信协同运行的方案。

早期的研究多考虑无人机的滞空能力,在低空域对地面固定设备提供定点视距通信,即单机/多机静态中继方式。通过功率优化,实现较高的区域覆盖率,用户覆盖率的研究也较为成熟。随着无人机电池能量密度的提高、电源管理技术的增强、翼型设计带来的飞行效率的提升等,无人机的移动能力(包括飞行速度、飞行轨迹等方面)逐渐显现,成为功率优化的一个新维度,单机/多机动态中继方式也被人们所关注。因此,无人机组网中拟通过功率优化解决的问题类别也在不断增加,包括无人机功率分配问题、无人机位置部署与优化问题、无人机飞行轨迹优化问题等,这些问题目前仍处于发展阶段。文献[9]通过无人机轨迹和功率联合优化,最大化用户最小可达通信平均速率。文献[10]通过无人机轨迹和干扰功率联合优化,减少了干扰信号的总功率,提高了有效监听速率。文献[11]通过联合优化无人机轨迹和传输功率,实现全双工协作通信。文献[12]应用注水算法解决无人机通信系统的最佳功率分配问题。文献[13]面向无人机中继通信网络,通过轨迹和功率控制联合优化,基于无人机的移动性能,提升了主信道容量,并抑制了窃听信道容量的增加,进而增大了安全容量,实现信息的安全传输。文献[14]针对多无人机为无蜂窝网络覆盖地区用户提供无线数据传输的问题,研究了无人机配备单根天线场景下的用户速率和功率分配,实现了干扰管理。

在无人机数据中继网络中,地面物联网设备的精确空间位置信息是相关研究的基础,但是由于设备、定位算法以及环境干扰等因素,坐标信息的确定性受到影响。对于可能出现的坐标信息不确定情况,拓展现有无人机空中数据中继领域的研究工作,是本文的出发点。针对信息的不确定性,保证已有算法免受或降低数据不确定性的影响,研究者围绕鲁棒性开展了研究工作,目前这类研究多集中在飞行器姿态鲁棒控制^[15-16]、多机鲁棒编队^[17-19]、鲁棒导航^[20]、网络安全鲁棒性^[21-22]、鲁棒通信^[23-24]等方面,而在基于无人机空基平台的数据鲁棒中继方面的研究不多。为了提高无人机中继网络的性能,如保证通信链路可靠、均衡负载、降低通信能耗,本文将开展基于无人机的物联网空基中继鲁棒优化研究,所做工作是对现有基于无人机的物联网系统确定性模型研究的拓展,具有重要的理论意义和应用价值。

本文主要的研究工作如下。

1) 建立基于无人机的空基中继网络确定性模型。实时最小化通信功率,并满足同时接入物联网设备数量约束、时变分簇全覆盖约束、可靠通信约束。考虑目标函数和约束条件形式的相似性,建立基于增广向量的无人机空基中继确定性优化问题。该问题是一个非凸、非线性的 NP-Hard 问题,很难直接获得最优解,本文基于正交变换方法对此问题进行松弛,将原问题转换为凸优化问题。

2) 考虑模型中实时空间定位参数存在不确定性影响,建立基于定位参数误差下的低空域无人机中继通信功率鲁棒优化问题。随后应用椭球不确定集对参数不确定性进行描述,将含参数摄动的优化模型转换为确定性的形式,定义约束系数表达式,得到鲁棒优化模型的鲁棒对等模型进行求解,并给出了本文的算法步骤。

3) 仿真结果表明,本文算法是有效的,且具有很好的鲁棒性能。与确定性优化算法对比,通信能耗控制方面也具有良好的效果。同时给出了实时空间定位参数估计椭球误差域半径对算法性能的影响分析。

2 系统模型

基于无人机空基平台的应急物联网系统模型如图1所示,网络共分为3层,第1层为各类物联网设备,第2层为由无人机组成的低空域空基中继,第3层为地面控制站(包括卫星中继)。

假设在突发事件所在地面区域 $S_{\mathcal{L}}$ 中,分布着 L 个物联网设备 ($L = \{1, 2, \dots, L\} \subset N^+$), 在低空域 S_k 中,分布着 K 个无人机 ($K = \{1, 2, \dots, K\} \subset N^+$)。其中,第 i 个物联网设备的坐标为 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{h}_i)$, 第 j 个无人机的坐标为 $(x_{u,j}, y_{u,j}, h_{u,j})$ 。在面对自然灾害救援等应急情况时,由于定位设备参数波动、定位算法误差以及信道干扰等因素,以及坐标数据更新不同步等问题,地面控制站获取的 (x_i, y_i, h_i) 实时位置坐标存在不确定性 $(\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta h_i)$, 即 $x_i = \bar{x}_i + \Delta x_i$, $y_i = \bar{y}_i + \Delta y_i$, $h_i = \bar{h}_i + \Delta h_i$ 。此外,假设物联网设备的上行通信采用正交频分多址 (OFDMA, orthogonal frequency division multiple access), 第 j 个无人机允许同时接入的物联网终端设备数上限为 M_j 。

设地面物联网终端设备与低空域无人机采用视距通信,其通信仰角为 θ , 此时视距通信概率描

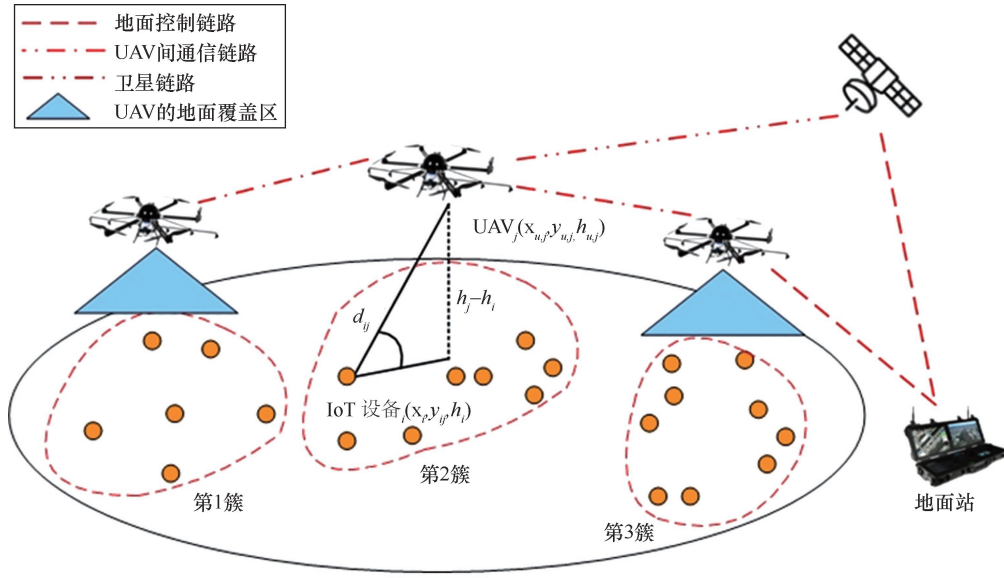


图1 基于无人机空基平台的应急物联网系统模型

述为^[25]

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

其中, ψ 与 β 受载波频率和应急物联网的实际环境参数影响。

根据图1中地面物联网设备与低空域无人机的空间关系可知,

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

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

为了保证可靠通信, 要求 P_{Los} 大于或等于某一门限值 ε , 且尽可能接近 1, 即 $P_{\text{Los}}(\theta) \geq \varepsilon (\lim \varepsilon = 1)$, 则 $\theta \geq P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon)$,

$$d_{ij} \leq \frac{|h_i - h_{u,j}|}{\sin(P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon))} \quad (2)$$

第 i 个物联网终端设备的感测数据传输给第 j 个无人机, 信号功率 (单位为 dBm) 为^[25]

$$P_r^{ij} = P_t^{ij} - 10\alpha \log\left(\frac{4\pi f_c d_{ij}}{c}\right) - \eta \quad (3)$$

其中, P_t^{ij} 为发射功率, f_c 为载波频率, $\alpha = 2$ 为视距通信的路径衰减指数, η 为自由空间传播损耗余量, c 为光速。

考虑正确解码物联网终端设备感测数据的要求, 其发射功率需满足最小信噪比, 对于正交相移

键控 (QPSK, quadrature phase shift keying) 调制,

误码率是 $\delta = Q\left(\sqrt{\frac{2P_r^{ij}}{R_b N_o}}\right)$, 则第 i 个物联网设备的

发射功率为:

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

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

3 问题描述与算法设计

3.1 确定性优化问题描述与转换

在基于无人机空基中继的物联网系统中, 当网络规模较大, 且具有移动性、异构性特点时, 为了实现网络的有效节能, 需要最小化物联网终端设备的发射总功率, 即

$$\min_{C_j, \mu_j} \sum_{j=1}^K \sum_{i \in C_j} P_t^{ij}, j \in \mathcal{K} \quad (5)$$

当无人机空基中继允许同时接入的物联网终端设备数有上限时, 上述优化问题可描述为^[26]

$$\{C_j^*, \mu_j^*\} = \arg \min_{C_j^*, \mu_j^*} \sum_{j=1}^K \sum_{i \in C_j} d_{ij}^2, j \in \mathcal{K}$$

$$\text{s.t. } C_j \cap C_m = \emptyset, j \neq m, j, m \in \mathcal{K}$$

$$\sum_{j=1}^K |C_j| = L, d_{i,j} \leq \frac{|h_i - h_{u,j}|}{\sin(P_{\text{Los}}^{-1}(\varepsilon))}, |C_j| \leq M_j \quad (6)$$

其中, 与第 j 个低空域无人机中继通信的物联网终端

设备数量为 $|C_j|$ ，作为一簇设备，当第 j 个无人机运动到该簇中心时，可以保证 d_j^2 最小。同理，对于 K 个无人机而言，全部运动至各自簇中心时，上述问题可得最优解。因此，首先需要将 L 个地面物联网设备分为 K 簇，如应用 K -means++算法；随后通过求解优化问题，得到 K 个低空域无人机基站的最优部署方案。

对于上述优化问题，可以将其描述为一个非凸二次约束二次规划问题^[27]。

$$\text{P1: } \begin{cases} \min_s s^T P_0 s + Q_0^T s + r_0 \\ \text{s.t. } s^T P_i s + Q_i^T s + r_i \leq 0, i=1, \dots, |C_j| \end{cases} \quad (7)$$

其中，

$$\begin{aligned} s &= [x \ y \ h]^T \in \mathcal{S}_{\mathcal{X}} = \{s \in \mathcal{R}^3 : l \leq s \leq u\} \\ t &= [l_1 \ l_2 \ l_3]^T \\ u &= [u_1 \ u_2 \ u_3]^T \\ P_0 &= \begin{bmatrix} |C_j| & 0 & 0 \\ 0 & |C_j| & 0 \\ 0 & 0 & |C_j| \end{bmatrix} \\ P_i &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega \end{bmatrix} \\ \omega &= 1 - \frac{1}{\sin^2(P_{\text{LOS}}^{-1}(\varepsilon))} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_0 &= \left[-2 \sum_{i=1}^{|C_j|} x_i \quad -2 \sum_{i=1}^{|C_j|} y_i \quad -2 \sum_{i=1}^{|C_j|} h_i \right]^T \\ Q_i &= [-2x_i \quad -2y_i \quad -2h_i \omega]^T \\ r_0 &= \sum_{i=1}^{|C_j|} x_i^2 + \sum_{i=1}^{|C_j|} y_i^2 + \sum_{i=1}^{|C_j|} h_i^2 \\ r_i &= x_i^2 + y_i^2 + h_i^2 \omega \end{aligned}$$

此时，引入变量 t ，式(7)描述的非凸二次约束二次规划问题P1可以转化为

$$\text{P2: } \begin{cases} \min_s t \\ \text{s.t. } s^T P_0 s + Q_0^T s + r_0 \leq t \\ \quad s^T P_i s + Q_i^T s + r_i \leq 0, i=1, \dots, |C_j| \end{cases} \quad (8)$$

设待优化变量 s 的增广向量为 $\tilde{s} = [x \ y \ h \ t]^T = \{\tilde{s} \in \mathcal{R}^4 : \tilde{l} \leq \tilde{s} \leq \tilde{u}\}$ ， $\tilde{l} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ l_4]^T$ ， $\tilde{u} = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ u_4]^T$ ，则根据式(8)可以得到

$$\text{P3: } \begin{cases} \min_s t \\ \text{s.t. } \tilde{s}^T \tilde{P}_0 \tilde{s} + \tilde{Q}_0^T \tilde{s} + r_0 \leq 0 \\ \quad \tilde{s}^T \tilde{P}_i \tilde{s} + \tilde{Q}_i^T \tilde{s} + r_i \leq 0, i=1, \dots, |C_j| \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{其中, } \tilde{P}_0 = \begin{bmatrix} P_0 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}, \tilde{Q}_0 = [Q_0^T \quad -1]^T, \tilde{P}_i = \begin{bmatrix} P_i & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 \end{bmatrix}, \tilde{Q}_i = [Q_i^T \quad 0]^T.$$

3.2 非凸优化问题的松弛

此类非凸二次约束二次规划问题P3是NP-Hard的，在基于正交变换法进行松弛后，即可将问题P3转化为

$$\text{P4: } \begin{cases} \min_s t \\ \text{s.t. } \mathbf{b}_i^k \tilde{s} + c_i^k + r_i \leq 0, i=0, \dots, |C_j| \end{cases} \quad (10)$$

其中，

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_0^k &= \begin{bmatrix} (l_1 + u_1)|C_j| - 2 \sum_{i=1}^{|C_j|} x_i & (l_2 + u_2)|C_j| - 2 \sum_{i=1}^{|C_j|} y_i \\ (l_3 + u_3)|C_j| - 2 \sum_{i=1}^{|C_j|} h_i - 1 \end{bmatrix} \\ c_0^k &= \frac{-(l_1 + u_1)^2 |C_j|}{4} + \frac{-(l_2 + u_2)^2 |C_j|}{4} + \frac{-(l_3 + u_3)^2 |C_j|}{4} \\ \mathbf{b}_i^k &= [(l_1 + u_1) - 2x_i \quad (l_2 + u_2) - 2y_i \quad (l_3 + u_3)\omega - 2h_i \omega \quad 0] \\ c_i^k &= \frac{-(l_1 + u_1)^2}{4} + \frac{-(l_2 + u_2)^2}{4} - \omega l_3 u_3 \end{aligned}$$

3.3 不确定性鲁棒优化问题描述与求解

根据上述优化模型，变量 \mathbf{b}_i^k 和 r_i ($i=0, \dots, |C_j|$)与IoT设备定位坐标有关。在面对自然灾害救援等应急情况时，环境参数、设备参数的波动会造成定位数据不精确、数据更新不同步等问题，此时的优化模型参数具有了不确定性。设变量 \mathbf{b}_i^k 和 r_i 的误差分别为 \mathbf{e}_i^b 和 e_i^r ($i=0, \dots, |C_j|$)，则低空域无人机中继通信功率鲁棒优化模型为

$$\text{P5: } \begin{cases} \min_s t \\ \text{s.t. } (\mathbf{b}_i^k + \mathbf{e}_i^b) \tilde{s} + c_i^k + (r_i + e_i^r) \leq 0, i=0, \dots, |C_j| \end{cases} \quad (11)$$

考虑定位数据的概率分布以及鲁棒优化模型的求解难度，本文中不确定集采用椭球不确定集。椭球误差域半径分别为 $\boldsymbol{\varepsilon}_i^b$ 和 ε_i^r ，则 $\mathbf{e}_i^b = \boldsymbol{\xi}_i^b \boldsymbol{\varepsilon}_i^b$ ， $e_i^r = \xi_i^r \varepsilon_i^r$ ($i=0, \dots, |C_j|, l=1, 2, 3, 4, \|\boldsymbol{\xi}_i^b\|_2 \leq 1$)。定义以下矩阵

$$[M^0 | n^0] = \begin{bmatrix} \mathbf{b}_0^k & -r_0 - c_0^k \\ \mathbf{b}_1^k & -r_1 - c_1^k \\ \vdots & \vdots \\ \mathbf{b}_{|C_j|}^k & -r_{|C_j|} - c_{|C_j|}^k \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} [M^1 | n^1] &= \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(1) & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_1^b(1) & 0 & 0 & 0 & | & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots \\ \boldsymbol{\varepsilon}_{|C_j|}^b(1) & 0 & 0 & 0 & | & 0 \end{bmatrix} \\ [M^2 | n^2] &= \begin{bmatrix} 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(2) & 0 & 0 & | & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_1^b(2) & 0 & 0 & | & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_{|C_j|}^b(2) & 0 & 0 & | & 0 \end{bmatrix} \\ [M^3 | n^3] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(3) & 0 & | & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_1^b(3) & 0 & | & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_{|C_j|}^b(3) & 0 & | & 0 \end{bmatrix} \\ [M^4 | n^4] &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & | & -\boldsymbol{\varepsilon}_0^r \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & -\boldsymbol{\varepsilon}_1^r \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & | & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & | & -\boldsymbol{\varepsilon}_{|C_j|}^r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

因此，低空域无人机中继通信功率鲁棒优化问题 P5 的约束条件中，约束系数表达式为

$$U_E = \left\{ [M^0 | n^0] + \sum_{i=1}^4 \xi_i [M^i | n^i] \right\}, \|\boldsymbol{\xi}\| \leq 1.$$

对于 \mathbf{b}_i^k 、 c_i^k 和 r_i ，当 $i=0$ 和 $i \neq 0$ 时的表达式不一致，因此，约束条件 1 可表示为

$$[M^0(1) + \sum_{i=1}^4 \xi_i M^i(1)] \tilde{\mathbf{s}} \leq \mathbf{n}^0(1) + \sum_{i=1}^4 \xi_i \mathbf{n}^i(1), \|\boldsymbol{\xi}\| \leq 1.$$

等价于 $\max_{\|\boldsymbol{\xi}\| \leq 1} \xi_1 \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(1)x + \xi_2 \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(2)y + \xi_3 \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(3)h + \xi_4 \boldsymbol{\varepsilon}_0^r \leq -r_0 - c_0^k - \mathbf{b}_0^k(1)x - \mathbf{b}_0^k(2)y - \mathbf{b}_0^k(3)h + t$ ，即 $\sqrt{[\boldsymbol{\varepsilon}_0^b(1)x]^2 + [\boldsymbol{\varepsilon}_0^b(2)y]^2 + [\boldsymbol{\varepsilon}_0^b(3)h]^2 + [\boldsymbol{\varepsilon}_0^r]^2} \leq -r_0 - c_0^k - \mathbf{b}_0^k(1)x - \mathbf{b}_0^k(2)y - \mathbf{b}_0^k(3)h + t$ 。约束条件 $i(i=1, \dots, |C_j|)$ 可表示为 $\sqrt{[\boldsymbol{\varepsilon}_i^b(1)x]^2 + [\boldsymbol{\varepsilon}_i^b(2)y]^2 + [\boldsymbol{\varepsilon}_i^b(3)h]^2 + [\boldsymbol{\varepsilon}_i^r]^2} \leq -r_i - c_i^k - \mathbf{b}_i^k(1)x - \mathbf{b}_i^k(2)y - \mathbf{b}_i^k(3)h$ 。

此时，低空域无人机中继通信功率鲁棒优化问题 P5 的鲁棒对等模型为

$$P6: \begin{cases} \min_{\tilde{\mathbf{s}}} \mathbf{c}^T \tilde{\mathbf{s}} \\ \text{s.t. } \|\mathbf{A}_0 \tilde{\mathbf{s}} + \mathbf{b}_0\|_2 \leq \mathbf{c}_0^T \tilde{\mathbf{s}} + d_0 \\ \|\mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{s}} + \mathbf{b}_i\|_2 \leq \mathbf{c}_i^T \tilde{\mathbf{s}} + d_i, \quad i=1, \dots, |C_j| \end{cases} \quad (12)$$

其中， $\mathbf{c}^T = [0 \ 0 \ 0 \ 1]$ ， $\mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_0^b(3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$,

$$\mathbf{b}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_0^r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{c}_0^T = [-\mathbf{b}_0^k], \quad d_0 = -r_0 - c_0^k,$$

$$\mathbf{A}_i = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\varepsilon}_i^b(1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_i^b(2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_i^b(3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{b}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \boldsymbol{\varepsilon}_i^r \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{c}_i^T = [-\mathbf{b}_i^k], \quad d_i = -r_i - c_i^k.$$

通过求解此二阶锥规划问题 (SOCP, second order cone programming)，即可得到低空域无人机中继通信功率鲁棒优化问题的最优解。

3.4 无人机中继鲁棒优化算法设计

针对基于无人机的物联网空基中继应用，上述无人机中继通信功率鲁棒优化算法如算法 1 所示。

算法 1 函数 1: $[s_{i,j}^*, P_i^{ij}, C_j] = \text{Robust Relay Comm}(L, K, (x_i, y_i, h_i))$

```
{
    [Devices Cluster Index,  $\boldsymbol{\mu}_j$ ] using KMeans++
    algorithm with  $((x_i, y_i, h_i), M_j)$ 
```

```
for each IoT devices cluster  $\in L$  do
     $|C_j| = \text{sum}(\text{Devices Cluster Index})$ 
```

```
end for
```

```
 $s_{i,j}^* = \text{Robust Opti}((x_i, y_i, h_i), |C_j|, \boldsymbol{\mu}_j, K, \boldsymbol{\varepsilon}_i^b, \boldsymbol{\varepsilon}_i^r)$ 
```

```
Initialize  $f_c, \delta, N_0, R_b, B, \eta$ 
```

```
for each UAV  $\in K$  do
```

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

```
end for
```

```
}
```

函数 2: $s_{i,j}^* = \text{Robust Opti}((x_i, y_i, h_i), |C_j|, \boldsymbol{\mu}_j, K, \boldsymbol{\varepsilon}_i^b, \boldsymbol{\varepsilon}_i^r)$

```
{
```

```
Initialize  $\varepsilon, \psi, \beta$ 
```

```
for each UAV  $\in K$  do
```

```
     $\mathbf{A}_i \leftarrow \boldsymbol{\varepsilon}_i^b$ 
```

```
     $\mathbf{b}_i \leftarrow \boldsymbol{\varepsilon}_i^r$ 
```

```

 $c_i \leftarrow \varepsilon, \psi, \beta, (x_i, y_i, h_i)$ 
 $d_i \leftarrow \varepsilon, (x_i, y_i, h_i), |C_j|$ 
 $s_{i,\cdot}^* \leftarrow \text{Solve SOCP in formula (12)}$ 
end for
}

```

4 仿真分析

在仿真实验中，设在 $5 \text{ km} \times 5 \text{ km} \times 0.2 \text{ km}$ 的区域中，随机部署 L 个物联网终端设备，仿真参数见表 1。

表 1 仿真参数

参数	描述	值
L	物联网设备数量	60~200
f_c	载波频率	2 GHz
v_j'	UAV 的速度	(5,5,0.5) m/s
δ	误码率	10^{-8}
ε	视距通信概率	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
η	附加路径损耗	5 dB
ψ	环境参数 1	11.95
β	环境参数 2	0.14

低空域无人机中继鲁棒优化如图 2 所示，展示了 $L=100$ 个物联网终端设备的初始分布以及基于本文所提出的无人机中继鲁棒优化方法实现的无人机最优部署效果。此次实验采用 10 个相同的无

人机基站作为低空域中继，允许接入的物联网设备数量上限相同。首先，初始随机分布的物联网设备形成了 10 个数量较为平衡的最优分簇，如图 2(a) 的 3D 视图中高度分布在 $0 \sim 0.2 \text{ km}$ 范围内的符号所示；其次，在物联网设备定位数据不精确、模型参数具有不确定性的情况下，低空域无人机部署位置实现鲁棒最优，解决了基于无人机的物联网空基中继问题，如图 2(b) 的正视图 (Front View) 中 “●” 所示。同时，增加了对比实验，在不考虑系统模型参数的不确定性时，采用文献[28]提出的松弛二次约束二次规划问题 (RQCQP, relaxed quadratic constrained quadratic programming problem) 方法求解，无人机最优部署位置如图 2(b) 中 “◆” 所示，这种部署结果是静态的绝对最优效果。可以看出，两种方法的应用，在无人机部署效果方面具有一定偏差，但整体偏差并不大，说明本文所提的鲁棒方法，在解决基于无人机的物联网数据中继问题时，适应了由物联网设备定位不精确带来的系统模型不确定性的变化，并且实现了不确定性条件下无人机最优部署，所提出的方法是有效的。

物联网设备发射总功率与椭圆误差域半径关系如图 3 所示，展示了 $L=100$ 个物联网终端设备与 10 个低空域无人机中继进行静态通信实验，其总功率、平均高度和设备数量间的关系。在图 3(a) 所示的各簇物联网终端设备总发射功率柱状图中，总发射功率的最大值是 1.348 mW，最小值是 0.430 mW，平均值是 0.847 mW，各簇物联网设备总发射功率较为均衡。在图 3(b) 所示的各簇物联网终端设备的平均高度，以及各簇设备的数量折线图中，第 1 簇终端设备的平均高度最高，为

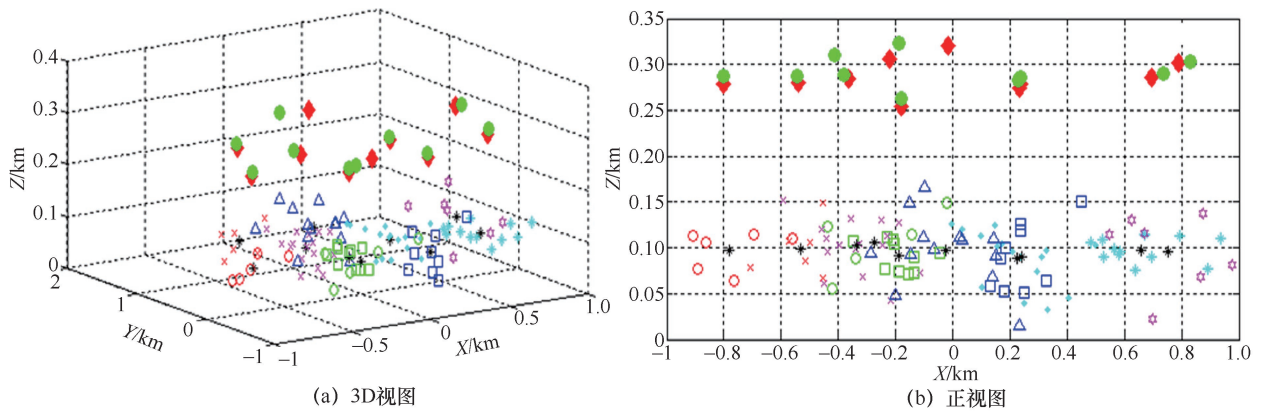


图 2 低空域无人机中继鲁棒优化

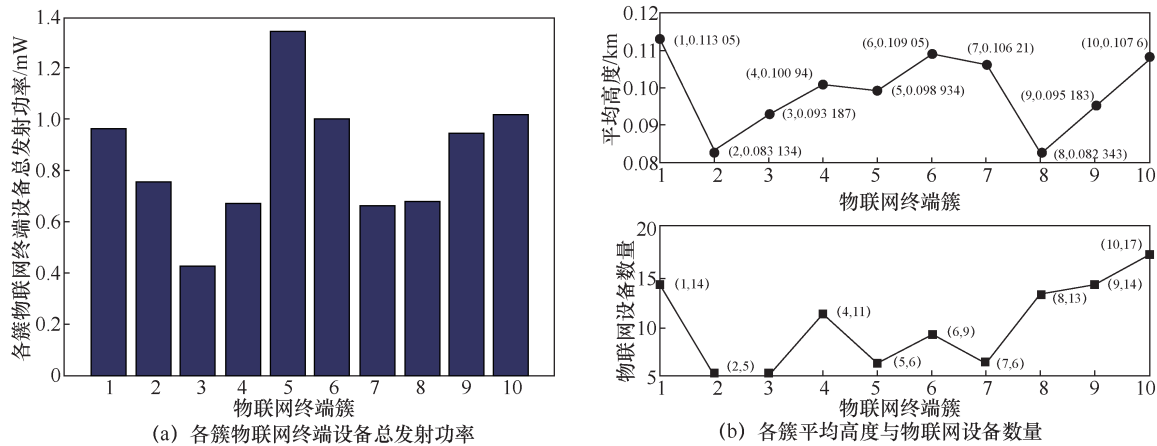


图3 物联网设备与低空域无人机静态通信

0.113 km，第8簇终端设备的平均高度最低，为0.082 km。第10簇拥有数量最多的地面物联网设备，第2、3簇所拥有的终端设备数量最少。结合图3(a)、图3(b)整体分析后可以得出，各簇物联网终端设备的整体数量对各簇总发射功率影响较大，各簇物联网终端设备的高度对总发射功率影响较小。因此，当两簇物联网终端设备具有相同的设备数量时，设备空间高程坐标越大，距离与该簇设备通信的无人机空基中继越近，因此终端设备总发射功率也越低，反之较高，此现象可以从第2、3簇和第5、7簇观察得到。同时，由于系统模型存在参数不确定性，基于无人机的物联网数据中继问题求解是在不确定集中的鲁棒优化过程，相比于文献[28]提出的RQCQP确定性方法求解，各簇物联网设备总发射功率的变化规律也存在跳变现象，可以从第5簇观察得到。

根据上一节对低空域无人机中继通信功率鲁棒优化模型的建立过程，为了量化的描述由物联网设备定位坐标不精确而带来的系统模型不确定性，本文引入了椭球不确定集，其椭球误差域半径分别为 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r 。这两个参数的引入，一方面为解决基于无人机的物联网空基中继鲁棒优化问题提供了途径，另一方面，也使得无人机数据中继过程中的部署从最优退化为鲁棒最优，其影响可以根据式(5)通过实时通信功率看出。

物联网设备的发射总功率与椭球误差域半径的关系如图4所示。分别取 $\epsilon_i^b = \{[0 \ 0 \ 0], [0.1 \ 0.1 \ 0.1], \dots, [1 \ 1 \ 1]\}$ ， $\epsilon_i^r = \{0, 0.1, \dots, 1\}$ 离散样本点，其组合形成图4中横坐标所示的11个类别，纵坐标为100个地面物联网设备与10个无人机通信时的上行通信总功率。可以看出，随着椭

球误差域半径 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r 的增大，通信总功率非线性增大，将很快造成物联网设备的失效，进而降低整个物联网的生命周期，这说明引入的 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r 参数，需要合理预估和选择其取值。此实验结果所对应的实际情况为：当物联网设备定位坐标误差越大，对低空域无人机中继通信模型进行鲁棒优化时的容许误差限也需要更大，即需要提供较大的椭球误差域半径 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r ，此时，无人机就需要提升自身飞行高度，以保障合适的视距通信仰角 θ ，而飞行高度的上升，直接影响到地面物联网设备通信总功率的增加。

图4中的3条曲线，由上到下分别对应 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r 同时增加、 ϵ_i^b 取定值 ϵ_i^r 增加、以及 ϵ_i^r 取定值 ϵ_i^b 增加的3种情况。“o”所标识的曲线距离“Δ”所标识的曲线，与距离“□”所标识的曲线相比，差距较小，说明椭球误差域半径 ϵ_i^b 对物联网设备通信总功率的影响大于 ϵ_i^r ，这主要是因为 ϵ_i^b 是椭球误差域半径向量，包括多个维度，因此在引入的 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r 参数进行中继鲁棒优化问题求解，对 ϵ_i^b 需要更合理的估计。

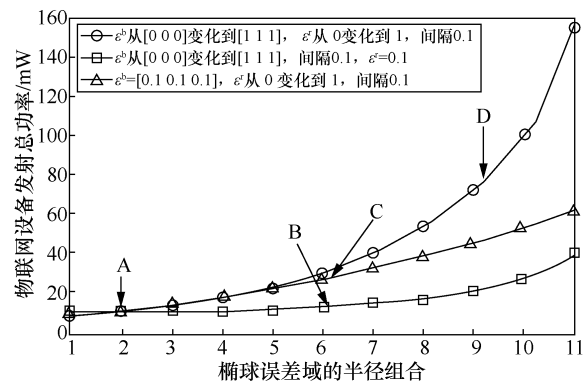


图4 物联网设备发射总功率与椭球误差域半径关系

物联网设备的发射总功率与物联网设备定位误差关系如图 5 所示,从图 4 所示的 ϵ_i^b 和 ϵ_i^r 的不同组合样本点中,取 A、B、C、D 4 种组合情况进行中继问题求解后的鲁棒测试,分别对应于图 5(a)~图 5(d)。

图 5(a)~图 5(d)中横坐标为物联网设备位置的实际误差域半径,分别为 0 km、 0.5×10^{-3} km、 1.0×10^{-3} km、 1.5×10^{-3} km、 2.0×10^{-3} km、 2.5×10^{-3} km,纵坐标为 100 个地面物联网设备与 10 个无人机通信时的上行通信总功率,“o”为各实际误差域半径下分别进行 100 次试验的结果,折线为试验结果散点包络线。首先,以图 5(a)为例,当优化所用的物联网设备位置估计椭圆误差域半径 $\epsilon_i^b = [0.1 \ 0.1 \ 0.1]$ 、 $\epsilon_i^r = 0.1$ 时,设备位置实际误差域半径在 1.0×10^{-3} km 以下时可以得到良好性能的解,使得通信总功率基本控制在零误差域半径通信功率值的 $\pm 0.1\%$ 内。其次,从图 5(a)与图 5(b)对比可知,当物联网设备位置估计椭圆误差域半径

ϵ_i^r 不变 ϵ_i^b 增大时,可以使得设备位置的实际误差域半径提高 1.5×10^{-3} km,也能保证通信总功率基本控制在零误差域半径通信功率值的 $\pm 0.1\%$ 内,仍然得到良好性能的解。同理,从图 5(a)与(c)对比可知,当物联网设备位置估计椭圆误差域半径 ϵ_i^b 不变 ϵ_i^r 增大时,物联网设备位置的实际误差域半径提高 2.0×10^{-3} km,通信总功率也控制在零误差域半径通信功率值的 $\pm 0.1\%$ 内,得到良好性能的解。最后,对于图 5(d),当物联网设备位置估计椭圆误差域半径 $\epsilon_i^b = [0.8 \ 0.8 \ 0.8]$ 、 $\epsilon_i^r = 0.8$ 时,设备位置实际误差域半径在 2.5×10^{-3} km 时通信总功率仍小于零误差域半径通信功率值的 $\pm 0.1\%$,表明解具有良好性能。

以上试验结果都说明应用本文所提出的方法求解基于无人机的物联网数据中继问题时,解具有鲁棒性。当选取合适的物联网设备位置估计椭圆误差域半径时,只要设备位置实际误差域半径在一定范围内变化,都可以将物联网设备通信总功率控制

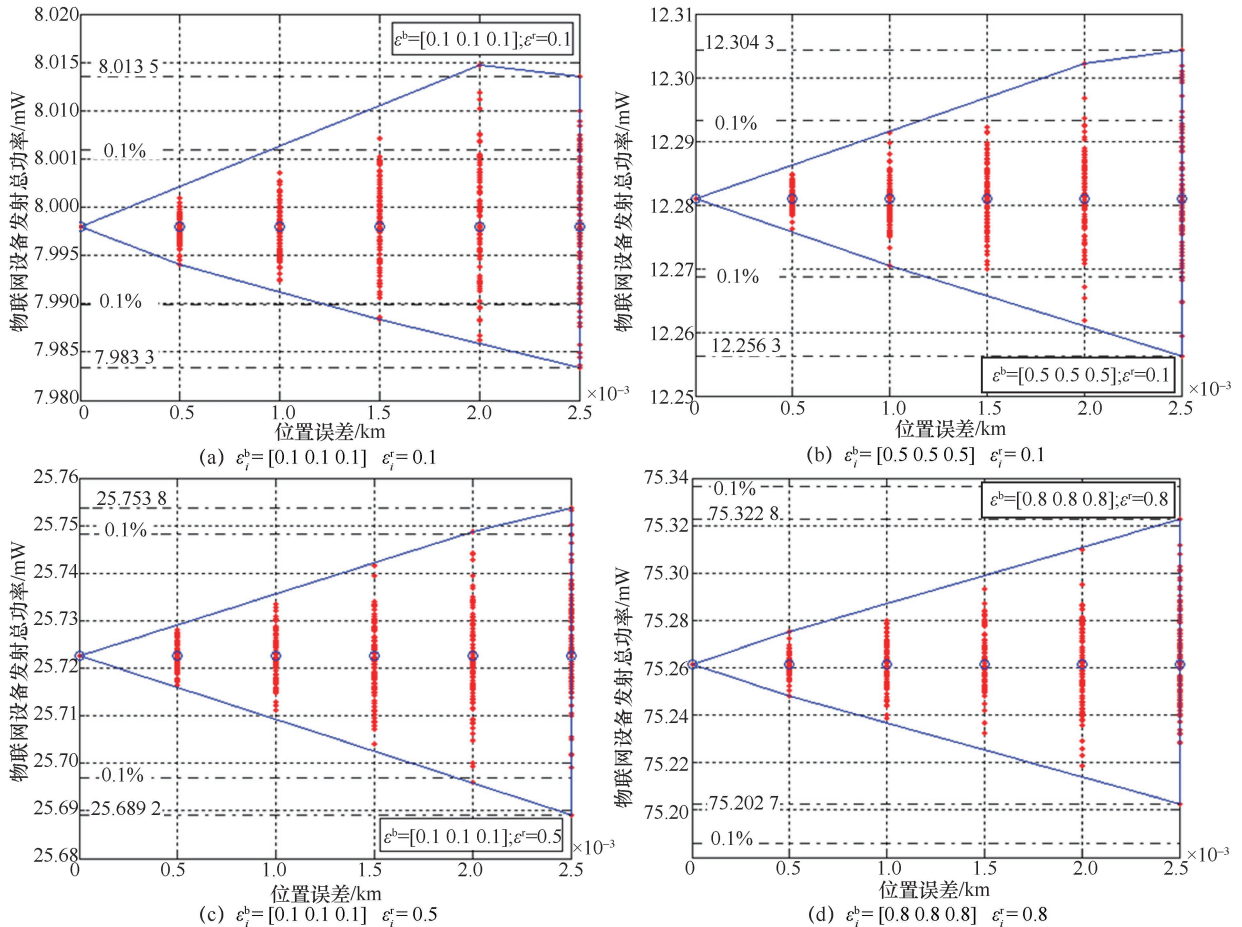


图 5 物联网设备的发射总功率与物联网设备定位误差关系

在零误差域半径通信功率值的 $\pm 0.1\%$ 内。

此外，在求解中继问题时，鲁棒优化的结果是从物联网设备位置估计椭球误差域半径而来，是从最坏情况出发的优化，实际情况可能很少出现这种最坏情况，即图 5 中包络线所示的情况，此时，所得到的鲁棒优化解在一定程度上是冗余的，解具有保守性。

通过图 4 与图 5 可以看出，随着物联网设备位置估计椭球误差域半径 ε_i^b 和 ε_i^r 的增大，所得到的解的鲁棒性增强，但并非 ε_i^b 和 ε_i^r 越大越好，较大的 ε_i^b 和 ε_i^r ，造成物联网设备通信总功率增长较快，因此需要对其合理预估和选择，尤其是参数 ε_i^b 。

本文所提出的方法，是为了解决由物联网设备定位坐标不精确而带来的系统模型不确定性情况下的物联网数据的中继问题，即原来依靠确定性优化方法得到的最优解，目前面对不确定性问题，已不再是最优甚至变得不可行，是一种使得基于无人机的物联网数据中继过程免受设备定位坐标不确定性影响的方法。不同无人机数量时的物联网设备平均发射功率如图 6 所示，展现了针对物联网数据中继问题，在无人机数量不同时，确定性方法 RQCQP 与本文方法 RO 导致的地面物联网设备平均发射功率的变化情况。其中横坐标为无人机数量 ($K = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$)，纵坐标为 $L = 100$ 个地面物联网设备平均发射功率，每种无人机数量情况下进行 20 次试验。与 RQCQP 相比，整体上使用鲁棒优化 (RO, robust optimization) 方法使得地面物联网设备平均发射功率有所增加，这主要是因为 RO 方法是从最坏情况出发的优化，即上述保守性的解释，也正是因为保守性，才有了鲁棒性。此外，当无人机数量增加时，两种方法所得到的地面物联网设备平均发射功率不断趋近，这主要是因为每簇无人机所接入的物联网设备数量减少，物联网设备位置的实际误差域半径减小，RO 方法所考虑的设备定位坐标不确定性有所降低所致。

地面物联网设备与无人机动态通信如图 7 所示，展示了 8 个无人机空基中继与 $L = 100$ 个物联网终端设备动态通信时的发射总功率的变化情况。实验中设定了 10 个离散单位时间，可以看出，各簇物联网设备发射总功率整体较为均衡，只是在某些离散时刻，发射总功率增加，如第 2 簇在第 6 s 时。根据上述对图 3 的静态通信实验结果的分析，可知是由于第 6 s 时第 2 簇的物联网设备数量增加较多，大幅提高了该簇物联网设备的发射总功率。

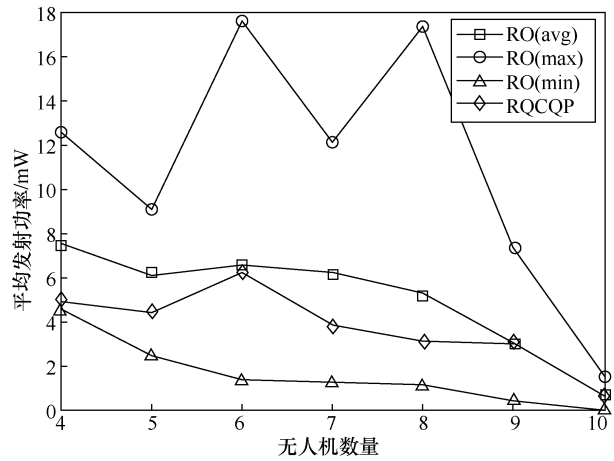


图 6 不同无人机数量时的物联网设备平均发射功率

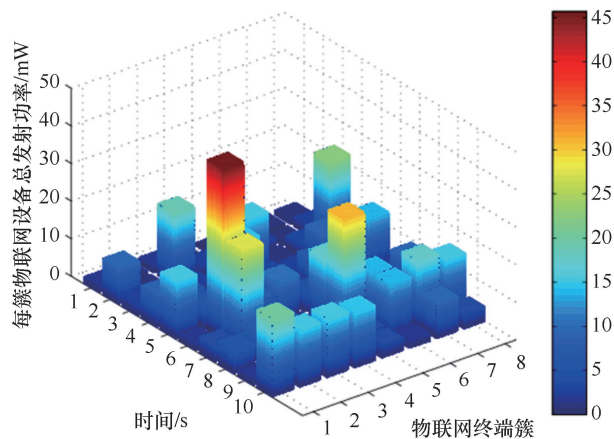


图 7 地面物联网设备与无人机动态通信

5 结束语

面向公共安全事件的应急管理，针对感知网络平台中应急物联网设备定位精度不同、建筑物遮挡、环境干扰、参数漂移等多种因素所造成得各类异构设备位置信息无法精确获得的问题，即物联网空基中继模型存在的参数不确定性问题，本文提出了一种基于低空域无人机的物联网空基中继鲁棒优化方法。考虑通信质量和通信能耗的要求，建立实时通信功率确定性优化模型，并通过引入增广向量将模型进行转换；利用正交变换法将非凸的确定性优化模型进行松弛；随后引入椭球不确定集对物联网空基中继模型存在的设备定位信息不确定性进行描述，将原确定性问题拓展为不确定性鲁棒优化问题，并得到鲁棒对等模型进行求解。仿真结果表明，本文算法具有较好的鲁棒性和能效性能。本文所做工作是对现有基于无人机的物联网系统确定性模型相关研究的拓展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 高杨, 李东生, 程泽新. 无人机分布式集群态势感知模型研究[J]. 电子与信息学报, 2018, 40(6): 1271-1278.
GAO Y, LI D S, CHENG Z X. UAV distributed swarm situation awareness model[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2018, 40(6): 1271-1278.
- [3] 黄赞杰. 无线网络环境下的资源分配问题算法研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2015.
HUANG Z J. Resource allocation algorithms in wireless networks[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015.
- [4] 任佳智, 田辉, 范绍帅, 等. 基于用户偏好预测的无人机部署和缓存策略[J]. 通信学报, 2020, 41(6): 1-13.
REN J Z, TIAN H, FAN S S, et al. UAV deployment and caching scheme based on user preference prediction[J]. Journal on Communications, 2020, 41(6): 1-13.
- [5] 顾磊, 黄辉林, 钱昕. 大规模物联网中多层次立体异构网络拓扑研究[J]. 中兴通讯技术, 2014, 20(6): 48-51.
GU L, HUANG H L, QIAN X. Large machine-to-machine heterogeneous network architecture[J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(6): 48-51.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 崔方宇, 蔡云龙, 赵民建. 基于 NOMA 的无人机轨迹与功率联合优化[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2020, 40(1): 14-20.
CUI F Y, CAI Y L, ZHAO M J. Joint trajectory design and power allocation for NOMA-based mobile-UAV communication networks[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University (Natural Sciences), 2020, 40(1): 14-20.
- [10] 黄梦雅. 基于无人机主动监听技术的安全速率优化研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
HUANG M Y. Research on security rate optimization based on UAV proactive eavesdropping[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [11] 何冬悦. 基于无人机中继的全双工协作通信研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
HE D Y. Research on full-duplex cooperative communication based on UAV relay[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [12] 裴璐. 面向无人机通信系统的功率分配关键技术研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
PEI L. Research on key technologies of power allocation for UAV communication system[D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [13] 张军泉. 基于联合轨迹优化和功率控制的 UAV 中继系统的安全传输策略[D]. 南昌: 南昌大学, 2020.
ZHANG J Q. Security transmission strategy of UAV relay system based on joint trajectory optimization and power control[D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.
- [14] 李阳. 多无人机协作传输系统中功率优化和预编码设计研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
LI Y. Research on power optimization and precoding design for multi-UAVs cooperative transmission system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020.
- [15] MIRANDA-COLORADOR, AGUILAR L T. Robust PID control of quadrotors with power reduction analysis[J]. ISA Transactions, 2020, 98: 47-62.
- [16] MU C X, ZHANG Y. Learning-based robust tracking control of quadrotor with time-varying and coupling uncertainties[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2020, 31(1): 259-273.
- [17] 李正平, 鲜斌. 基于虚拟结构法的分布式多无人机鲁棒编队控制[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2423-2431.
LI Z P, XIAN B. Robust distributed formation control of multiple unmanned aerial vehicles based on virtual structure[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(11): 2423-2431.
- [18] 张佳龙, 闫建国, 张普. 基于自适应方法的多无人机编队队形控制[J]. 航空学报, 2020, 41(1): 323385.
ZHANG J L, YAN J G, ZHANG P. Multi-UAV formation forming control based on adaptive method under wind field disturbances[J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2020, 41(1): 323385.
- [19] 田菁, 陈岩, 沈林成. 不确定环境中多无人机协同搜索算法[J]. 电子与信息学报, 2007, 29(10): 2325-2328.
TIAN J, CHEN Y, SHEN L C. Cooperative search algorithm for multi-UAVs in uncertainty environment[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2007, 29(10): 2325-2328.
- [20] 刘鹏. 四旋翼无人机系统辨识及鲁棒性导航研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
LIU P. A research of quadrotor identification and robust navigation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020.
- [21] 陈珩, 范铭楷, 李泽宏, 等. 蜂群无人机系统的网络鲁棒性设计[J]. 系统工程与电子技术, 2019, 41(11): 2633-2640.
CHEN W, FAN M K, LI Z H, et al. Design of network robustness for drone swarm system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2019, 41(11): 2633-2640.
- [22] 陈卓, 吕娜, 陈坤, 等. 基于时空图卷积网络的无人机网络入侵检测方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(5): 1068-1076.
CHEN Z, LYU N, CHEN K, et al. UAV network intrusion detection method based on spatio-temporal graph convolutional network[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(5): 1068-1076.
- [23] FAN W L, WU Y, JU S H, et al. Secure UAV communication with robust communication and trajectory design[C]//Proceedings of 2019 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems (CITS). Piscataway: IEEE Press, 2019: 1-5.
- [24] CUI M, ZHANG G C, WU Q Q, et al. Robust trajectory and transmit power design for secure UAV communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(9): 9042-9046.
- [25] 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.

[26] 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. Piscataway: IEEE Press, 2016: 1-6.

[27] 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.

[28] 王巍, 赵继军, 彭力, 等. 基于 UAV 的移动物联网远距离通信节能策略研究[J]. 电子学报, 2018, 46(12): 2914-2922.

WANG W, ZHAO J J, PENG L, et al. Research on the energy saving strategy for long distance communication of mobile Internet of Things based on UAVs[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(12): 2914-2922.



彭力 (1967-), 男, 江南大学教授, 主要研究方向为视觉物联网等。



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

[作者简介]



王巍 (1983-), 男, 博士, 河北工程大学副教授, 主要研究方向为应急物联网、优化理论等。



魏忠诚 (1987-), 男, 博士, 河北工程大学信息与电气工程学院副教授, 主要研究方向为物联网、人工智能、城市公共安全等。



谷任倩 (1996-), 女, 河北工程大学硕士生, 主要研究方向为应急物联网、鲁棒优化。



常存喜 (1983-), 男, 中国民用航空总局第二研究所科研开发中心软件工程师, 主要研究方向为民航机场、空管及航空公司等业务领域的信息系统软件架构设计、系统开发等。