

基于 UAV 的移动物联网 远距离通信节能策略研究

王 巍^{1,2}, 赵继军¹, 彭 力², 黄晓丹¹, 李林茂¹, 魏丁丁¹

(1. 河北工程大学信息与电气工程学院, 河北邯郸 056038;

2. 江南大学物联网技术应用教育部工程中心, 物联网工程学院, 江苏无锡 214122)

摘 要: 针对应急移动物联网在缺少地面基站的情况下, 可靠节能地远距离传输重点区域全信息的要求, 本文将无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)作为空基通信平台, 研究应急移动物联网应用中大规模移动物联网设备能量受限条件下的远距离通信问题, 提出基于无人机的移动物联网远距离通信节能策略. 首先, 对该类物联网进行系统建模; 其次, 根据所建模型中地面设备无序立体地分散于重点区域的特点, 通过优化无人机的布署位置, 在提供可靠通信的同时, 降低地面设备的通信耗能; 再次, 根据地面设备运动性能强、活动范围广的特点, 通过研究无人机与地面移动设备的联合运动策略, 避免无人机频繁换簇覆盖所引起的远距离移动等大运动状态变化问题, 实现无人机的移动节能. 最后, 通过实验, 从通信耗能和运动耗能两方面验证了本文所提策略的有效性.

关键词: 应急移动物联网; 空基通信; 无人机; 节能

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2018)12-2914-09

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.12.013

Research on the Energy Saving Strategy for Long Distance Communication of Mobile Internet of Things Based on UAVs

WANG Wei^{1,2}, ZHAO Ji-jun¹, PENG Li², HUANG Xiao-dan¹, LI Lin-mao¹, WEI Ding-ding¹

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

2. Engineering Research Center of Internet of Things Technology Applications of the Ministry of Education, School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: Emergency needs full information. To transfer it from the disaster area without the ground base station needs a quick and a reliable network. It is a good solution to use emergency mobile Internet of Things (emIoT). This type of IoT is energy efficient and suit for long-distance transmission. Consider UAVs as an air-based communication platform. We researched on the long-distance communication in emIoT with mass mobile energy-constrained devices. An energy saving strategy based on UAVs is proposed. First, model this type of IoT. Second, according to the disorderly scattered ground devices in the stereo disaster area, the strategy optimizes UAVs deployment. It can provide a reliable communication and reduce the energy consumption of the communication at the same time. Third, given the ground equipment moves randomly and widely. A joint motion pattern about UAVs and ground mobile devices was analyzed. It avoids long-distance moving caused by frequent changes of cluster coverage with UAVs and reduces the mobile energy. Finally, from transferring to moving energy-saving, the effect of the proposed strategy is verified through experiments.

Key words: emergency mobile internet of things; space based communication; unmanned aerial vehicle (UAV); energy saving

收稿日期: 2016-12-23; 修回日期: 2017-11-25; 责任编辑: 梅志强

基金项目: 国家重点研发计划支持项目 (No. 2018YFF0301004); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61802107); 河北省自然科学基金项目 (No. F2015402108); 河北省高等学校科学技术研究项目 (No. QN2015046); 河北省物联网数据采集与处理工程技术研究中心开放课题 (No. 2016-2); 江苏省博士后科研资助计划项目 (No. 1601085C); 邯郸市科学技术研究与发展计划项目 (No. 1625202042-1)

1 引言

我国是自然灾害频发的国家之一,当自然灾害发生时,对受灾区域的全信息感知为应急救援决策、灾后评估、挽救生命财产和降低损失提供了保障,是综合国力的象征.因此,面向自然灾害的应急物联网相关理论与技术,已经引起了科研机构、相关企业及学者们越来越多的关注.同时,在国防、科研及应用领域中,应急物联网具有很好的应用前景.

面向自然灾害的应急物联网要求具有远距离通信、局域网自组网、精确定位等功能.在远距离通信方面,针对进入受灾区域的大量人员、无人搜救设备一般具有运动性强和活动范围广的特点,受灾区域前期物联网建设中未失效的信息感知节点分散而孤立的特点,以及上述所有全信息感知设备异构的特点,在缺少地面固定通信基站的情况下,研究受灾区域全信息可靠、节能地远距离传输方法是必要的.

应急通信领域中空基通信平台是近年国内外的发展趋势,目前空基通信平台也是我国信息化建设中的薄弱环节.无人机作为空基通信平台,吸引了越来越多的关注.一方面,作为无线中继,能够显著增强地面无线

设备的链接性,扩展地面网络的覆盖范围;另一方面,作为移动的空中基站,能够为地面用户提供可靠的上下行通信,提升无线网络的能力.与地面基站相比,基于无人机的空中基站的优势是其良好的移动型.无人机的飞行高度也为地面用户可靠的视距通信链路提供了保障.正是由于其高度可调与移动型,无人机能够向目标用户移动并以较低的通信耗能与用户建立连接,进而经济节能地获取移动分散的地面用户数据.这种效果对于有限的地面基站来说较难实现^[1].

无人机作为面向自然灾害的应急物联网的空中接口,可以有效地解决应急物联网应用中大规模移动异构物联网设备能量受限条件下的远距离通信问题^[2].无人机可移动到大规模移动物联网设备上方,获取移动物联网设备的数据,为超出直接通信范围的移动物联网设备提供交换信息的可能.在这样的大规模移动异构物联网中,无人机作为数据采集器,形成了网络的中间层^[3].为了提高网络的生存周期,实现绿色物联网,在保证可靠高效通信的前提下,网络的节能策略值得研究.基于无人机的无线网络相关研究如表 1 所示.

表 1 国内外相关研究

研究者	内容	网络类型	UAV 数量	不足
Mohammad Mozaffari, Walid Saad, et al. ^[4]	UAV 最优布署与移动	D2D 通信网络(Device-to-Device)	一个	未研究上行通信
Z. Han, A. L. Swindlehurst, et al. ^[5]	UAV 最优轨迹	Ad-hoc 网络	多个	未研究 UAV 运动
M. Mozaffari, W. Saad, et al. ^[6]	静态地面用户与 UAV 联合最优布署	IoT(Internet of Things)	多个	未研究地面用户的动态问题
Y. Pang, Y. Zhang, et al. ^[7]	高效地数据采集与簇头充电方法	WSN(Wireless Sensor Networks)	多个	只针对静态传感网,未研究最优布署问题
N. Abuzainab, W. Saad, et al. ^[8] C. Y. Tu, C. Y. Ho, et al. ^[9]	节能的上行传输策略	IoT/M2M 网络(Machine to Machine)	-	未考虑设备的运动
K. Daniel, S. Rohde, C. Wietfeld. ^[10,11]	过载和中断预防方法	蜂窝网络	多个	未研究 UAV 的覆盖性能
F. Jiang and A. L. Swindlehurst. ^[12]	UAV 最优轨迹	WSN	多个	只针对静态传感设备
S. Shalmashi, E. Bjornson, et al. ^[13] X. Lin, R. Heath, et al. ^[14]	蜂窝网络与 D2D 设备的共存	蜂窝网络	一个	未研究 UAV 覆盖和通信性能

与此同时,美国的通信运营商 Verizon 以及中国移动等,都在积极开展基于 UAV 的蜂窝网络移动基站研究.可以看出,基于 UAV 的无线网络研究已成为前沿.未来,随着可穿戴设备、无人驾驶汽车和智能终端等移动物联网设备的大规模使用和不断变化的网络拓扑结构,尤其是在通信基站较为缺乏的地区,对基于 UAV 的移动物联网需求将会更加明显,此时,大规模移动物联网的节能降耗问题就显得更加突出^[15,16].在较为广阔的空间内,地面设备位置实时变化,导致此类基于 UAV 的大规模移动物联网成为动态拓扑网络.分层路由的需求使得网络分簇研究成为必要,尤其是当多 UAV 空基平台能量输出不均衡,空基平台的接入设备数量有限,上行视距通信能量不足、区域信息协同中继任务动

态变化时,研究网络分簇具有实际意义和挑战性.此外,考虑到地面设备和 UAV 空基平台的空间位置约束,可靠视距通信的信号功率要求, QoS 等,多 UAV 空基平台的协同优化值得研究.因此,在上述有关网络分簇和 UAV 空基平台协同优化的多种约束和复杂情况下,本文将研究地面移动物联网设备与 UAV 的联合最优布署与移动策略,通过有效聚类和合理规划,实现基于 UAV 的大规模移动异构物联网的整体节能.

2 系统模型

大规模移动异构物联网的系统模型如图 1 所示,网络共分为三层:第一层为移动 Ad-Hoc 网络,第二层为由 UAV 组成的数据采集层,第三层为云端. UAV 作

为信息中转与交换的通道,完成底层移动物联网设备能量受限条件下的远距离通信. 设在地面区域 S_L 中,分布着 L 个 IoT 设备 ($L = \{1, 2, \dots, L\} \subset N^+$), 在空中区域 S_K 中,分布着 K 个 UAV ($K = \{1, 2, \dots, K\} \subset N^+$). 其中,第 i 个 IoT 设备的坐标为 (x_i, y_i, h_i) , 第 j 个 UAV 的坐标

为 $(x_{u,j}, y_{u,j}, h_{u,j})$, 每个 IoT 设备和 UAV 可以在三维空间运动,且云端可以获知其坐标. 假设 IoT 设备的上行通信采用正交频分多址 (Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA), 第 j 个 UAV 允许同时接入的 IoT 设备数上限为 M_j .

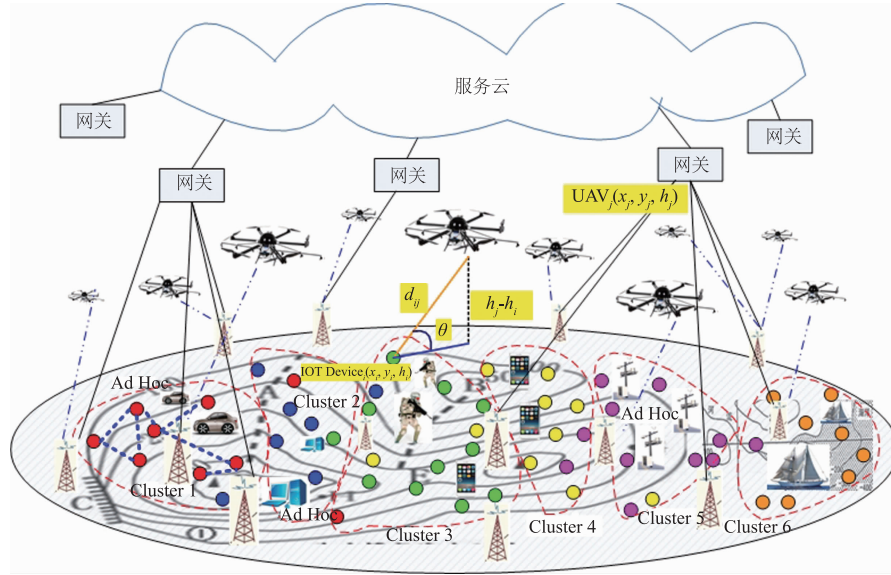


图1 系统模型

设地面 IoT 设备与空中 UAV 采用视距通信,其仰角为 θ ,则视距通信概率可用式(1)近似描述^[17],

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

其中, ψ 与 β 取决于载波频率和移动物联网所处环境的参数.

根据图 1 中 IoT 设备与 UAV 的空间关系可知,

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

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

为了保证可靠通信,要求 $P_{\text{LOS}}(\theta) \geq \varepsilon$ ($\lim \varepsilon = 1$), 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 j 个 UAV 接收第 i 个 IoT 设备的感测数据,其信号功率为 (dBm)^[17]:

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

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.

为了使感测数据在 UAV 中正确解码,发射功率应满足最小信噪比,对于 QPSK 调制,其误码率为: $\delta =$

$Q\left(\sqrt{\frac{2P_r^{ij}}{R_b N_o}}\right)$, 则第 i 个 IoT 设备的发射功率为 (mW):

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

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

3 节能策略

在大规模移动异构物联网中, UAV 可以有效地解决地面移动 IoT 设备能量受限条件下的远距离通信问题,为超出直接通信范围的移动物联网设备提供交换信息的可能. 此时,网络的能耗主要来自于 IoT 设备与 UAV 的通信以及 UAV 的移动,因此,本文将从这两方面开展研究,提出大规模移动异构物联网的节能策略.

3.1 通信节能

为了实现大规模移动异构物联网的有效节能,需要最小化通信功率,

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

在考虑到 UAV 允许同时接入的 IoT 设备数上限时,上述优化问题即为^[1]:

$$\{C_j^*, \mu_j^*\} = \arg \min_{C_j^*, \mu_j^*} \sum_{j=1}^K \sum_{i \in C_j} d_{ij}^2, j \in K \quad (6)$$

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

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

其中, $|C_j|$ 为与第 j 个 UAV 通信的移动 IoT 设备的数量, 这些设备作为一簇, 当第 j 个 UAV 移动到簇中心时, 能保证 d_{ij}^2 最小. 对于 K 个 UAV, 当都移动到各自的簇中心时, 就能得到上述问题的最优解. 因此, 需要将 L 个地面移动 IoT 设备分为 K 簇, 进而得到 K 个 UAV 的最优布署坐标. 同时, 由于 IoT 设备是可运动的, 此时变网络中的簇也将实时变化, K 个 UAV 的坐标需要实时更新以保证通信的动态节能.

首先, 根据网络中 UAV 的数量 K 将 L 个地面移动 IoT 设备分为 K 簇. 设移动 IoT 设备的水平面投影坐标为 $\mathbf{v}_i(x_i, y_i)$, $i \in L$, 设备分簇后各簇中心的水平面投影坐标为 $\boldsymbol{\mu}_j(x_j, y_j)$, $j \in K$, 则可用受约束的 K-mean 聚类方法实现对 L 个地面移动 IoT 设备的分簇.

其次, 在得到移动 IoT 设备分簇列表后, 则需要计算 K 个 UAV 的最优布署坐标, 最小化大规模移动异构物联网的通信功率. 由式(2)、(6)可得,

$$\min_{(x_{\mu_j}, y_{\mu_j}, h_{\mu_j})} \sum_{i \in C_j} (x_{\mu_j} - x_i)^2 + (y_{\mu_j} - y_i)^2 + (h_{\mu_j} - h_i)^2 \quad (7)$$

$$\text{s. t. } (x_{\mu_j} - x_i)^2 + (y_{\mu_j} - y_i)^2 + (h_{\mu_j} - h_i)^2 \left(1 - \frac{1}{\sin^2(P_{\text{LOS}}(\mathcal{E}))}\right) \leq 0 \quad (8)$$

其中, $i \in C_j, j \in K$.

上述最小化问题是一个非凸二次约束二次规划问题 (non-convex Quadratically Constrained Quadratic Program, non-convex QCQP)^[18], 可描述为,

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

$$\text{s. t. } \mathbf{s}^T \mathbf{P}_i \mathbf{s} + \mathbf{Q}_i^T \mathbf{s} + r_i \leq 0, i = 1, \dots, |C_j|$$

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

$$\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)^T, \mathbf{P}_0 = \begin{bmatrix} |C_j| & 0 & 0 \\ 0 & |C_j| & 0 \\ 0 & 0 & |C_j| \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{P}_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \omega \end{bmatrix}, \omega = 1 - \frac{1}{\sin^2(P_{\text{LOS}}(\mathcal{E}))},$$

$$\mathbf{Q}_0 = \left[-2 \sum_{i=1}^{|C_j|} x_i \quad -2 \sum_{i=1}^{|C_j|} y_i \quad -2 \sum_{i=1}^{|C_j|} h_i \right]^T,$$

$$\mathbf{Q}_i = [-2x_i \quad -2y_i \quad -2h_i \omega]^T,$$

$$r_0 = \sum_{i=1}^{|C_j|} x_i^2 + \sum_{i=1}^{|C_j|} y_i^2 + \sum_{i=1}^{|C_j|} h_i^2, r_i = x_i^2 + y_i^2 + h_i^2 \omega.$$

此类 non-convex QCQP 问题是 NP-Hard 的, 本文将利用正交变换的方法, 将此问题转化为松弛的二次约束二次规划问题 (Relaxation Quadratically Constrained Quadratic Program, RQCQP).

设 $f_i(\mathbf{s}) = \mathbf{s}^T \mathbf{P}_i \mathbf{s} + \mathbf{Q}_i^T \mathbf{s}$, $i = 0, \dots, |C_j|$, 并令 $\mathbf{s} =$

$\mathbf{W}_i \mathbf{t}_i, \mathbf{t}_i = (t_{i,1}, \dots, t_{i,n})^T$, 其中 $\mathbf{W}_i = (\mathbf{w}_{i,1}, \dots, \mathbf{w}_{i,n})$, $\mathbf{w}_{i,j} \in \mathbb{R}^{n \times 1}, j = 1, \dots, n$, 使得 $\mathbf{W}_i^T \mathbf{W}_i = \mathbf{I}_n$, $\mathbf{W}_i^T \mathbf{P}_i \mathbf{W}_i = \text{diag}(\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots)$.

设 $\lambda_{i,1} \geq \lambda_{i,2} \geq \dots \geq \lambda_{i,r_i} \geq 0 > \lambda_{i,r_i+1} \geq \lambda_{i,n}$, 则,

$$f_i(\mathbf{s}) = \mathbf{s}^T \mathbf{P}_i \mathbf{s} + \mathbf{Q}_i^T \mathbf{s} = \sum_{j=1}^{r_i} \lambda_{i,j} t_{i,j}^2 + \sum_{j=r_i+1}^n \lambda_{i,j} t_{i,j}^2 + \sum_{j=1}^n \mathbf{Q}_i^T \mathbf{w}_{i,j} t_{i,j}, i = 0, \dots, |C_j|.$$

由于 $\mathbf{s} = \mathbf{W}_i \mathbf{t}_i$, 因此,

$$\mathbf{t}_i = \mathbf{W}_i^{-1} \mathbf{s} = \mathbf{W}_i^T \mathbf{s} = (\mathbf{w}_{i,1}, \dots, \mathbf{w}_{i,n})^T \mathbf{s} = (\mathbf{w}_{i,1}^T \mathbf{s}, \dots, \mathbf{w}_{i,n}^T \mathbf{s})^T = (t_{i,1}, \dots, t_{i,n})^T.$$

取 $\tilde{l}_{i,j}^k = \min\{\mathbf{w}_{i,j}^T \mathbf{s} | \mathbf{l}^k \leq \mathbf{s} \leq \mathbf{u}^k\}$, $\tilde{u}_{i,j}^k = \max\{\mathbf{w}_{i,j}^T \mathbf{s} | \mathbf{l}^k \leq \mathbf{s} \leq \mathbf{u}^k\}$, 则 $\tilde{l}_{i,j}^k \leq t_{i,j} \leq \tilde{u}_{i,j}^k$, 所以 $(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k) t_{i,j} - \frac{(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k)^2}{4} \leq t_{i,j}^2 \leq$

$(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k) t_{i,j} - \tilde{l}_{i,j}^k \tilde{u}_{i,j}^k$, 则

$$f_i(\mathbf{s}) \geq \sum_{j=1}^{r_i} \lambda_{i,j} \left[(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k) t_{i,j} - \frac{(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k)^2}{4} \right]$$

$$+ \sum_{j=r_i+1}^n \lambda_{i,j} [(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k) t_{i,j} - \tilde{l}_{i,j}^k \tilde{u}_{i,j}^k] + \sum_{j=1}^n \mathbf{Q}_i^T \mathbf{w}_{i,j} t_{i,j}$$

$$= \left\{ \sum_{j=1}^n [\lambda_{i,j} (\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k) + \mathbf{Q}_i^T \mathbf{w}_{i,j}] \mathbf{w}_{i,j}^T \mathbf{s} - \left(\sum_{j=1}^{r_i} \lambda_{i,j} \frac{(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k)^2}{4} + \sum_{j=r_i+1}^n \lambda_{i,j} \tilde{l}_{i,j}^k \tilde{u}_{i,j}^k \right) \right\} = g_i^k(\mathbf{s})$$

$i = 1, \dots, |C_j|$

$$\text{设 } \mathbf{b}_i^k = \sum_{j=1}^n [\lambda_{i,j} (\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k) + \mathbf{Q}_i^T \mathbf{w}_{i,j}] \mathbf{w}_{i,j}^T,$$

$$c_i^k = - \left(\sum_{j=1}^{r_i} \lambda_{i,j} \frac{(\tilde{l}_{i,j}^k + \tilde{u}_{i,j}^k)^2}{4} + \sum_{j=r_i+1}^n \lambda_{i,j} \tilde{l}_{i,j}^k \tilde{u}_{i,j}^k \right)$$

$i = 1, \dots, |C_j|$.

可得, $g_i^k(\mathbf{s}) = \mathbf{b}_i^k \mathbf{s} + c_i^k, i = 1, \dots, |C_j|$.

因此, 式(7)、(8)表示的非凸二次约束二次规划问题 (non-convex QCQP) 的松弛规划问题 (RQCQP) 为:

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

$$\text{s. t. } \mathbf{b}_i^k \mathbf{s} + c_i^k + r_i \leq 0, i = 1, \dots, |C_j| \quad (9)$$

其中,

$$\mathbf{b}_i^k = [(l_1 + u_1) - 2x_i \quad (l_2 + u_2) - 2y_i \quad (l_3 + u_3)\omega - 2h_i \omega],$$

$$c_i^k = \frac{-(l_1 + u_1)^2}{4} + \frac{-(l_2 + u_2)^2}{4} - \omega l_3 u_3.$$

通过聚类和求解松弛的非凸二次约束二次规划问题, 即可得到 t 时刻 K 个 UAV 的最优布署坐标 $\mathbf{s}_{i,j}^*$ ($j \in K$). 同时, 算法的迭代也可适应由 IoT 设备运动带来的网络拓扑结构变化的影响, 使得上述大规模移动异构物联网的通信动态节能.

算法 1 基于 RQCQP 的异构 emIoT 通信动态节能算法

函数 1: $[s_{i,j}^*, P_i^j, |C_j|] = \text{EnergySaving_Comm}(L, K, (x_i, y_i, h_i))$
1: {

```

2: [Cluster Index of IoT Devices,  $\mu_j$ ] = KMeans( $v_i$ )
3: for each IoT devices cluster  $\in L$  do
4:    $|C_j| = \text{sum}(\text{Cluster Index of IoT Devices})$ 
5: end for
6:  $s_{i,j}^* = \text{RQCQP\_for\_emIoT}((x_i, y_i, h_i), |C_j|, \mu_j, K)$ 
7: Initialize  $f_c, \delta, N_0, R_b, B, \eta$ 
8: for each UAV  $\in K$  do
9:    $P_i^{ij} \leftarrow f_c, \delta, N_0, R_b, B, \eta, (x_i, y_i, h_i), s_{i,j}^*$ 
10: end for
11: }
函数 2:  $s_{i,j}^* = \text{RQCQP\_for\_emIoT}((x_i, y_i, h_i), |C_j|, \mu_j, K)$ 
1: {
2:   Initialize  $\varepsilon, \psi, \beta$ 
3:   for each UAV  $\in K$  do
4:      $P_0 \leftarrow |C_j|$ 
5:      $b_i^k, c_i^k \leftarrow \varepsilon, \psi, \beta$ 
6:      $Q_0 \leftarrow (x_i, y_i, h_i)$ 
7:      $r_0, r_i \leftarrow (x_i, y_i, h_i)$ 
8:      $s_{i,j}^* \leftarrow \text{Solve RQCQP in formula (9)}$ 
9:   end for
10: }

```

3.2 移动节能

移动物联网是一个时变网络,需要根据实时的移动 IoT 设备分簇列表和位置,进行 UAV 的最优布署. 为了使其减少运动状态的变化,节省运动耗能,延长网络生存周期,研究 UAV 与 IoT 设备分簇的联合运动策略,确定 UAV 覆盖簇,避免频繁换簇覆盖所引起的远距离移动等大运动状态变化问题,实现移动节能是必要的.

由于地面 IoT 设备的运动, UAV 的移动节能策略需要与 IoT 设备分簇情况联合设计,如图 2 所示. 地面 IoT 设备运动导致分簇的整体位置和簇内节点数动态变化,进而影响到负责该簇通信 UAV 的运动.

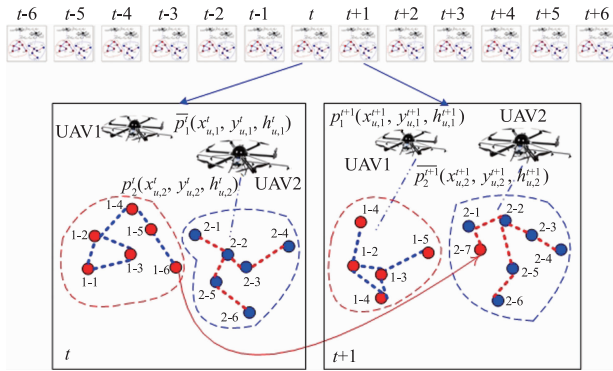


图2 IoT设备分簇变化情况示意图

在空中区域 S_k 中, 设 t 时刻第 $j(j \in K)$ 个 UAV 的位置、姿态、速度以及加速度分别为 $p_j^t, \tau_j^t, v_j^t, a_j^t$. 其中, $p_j^t = (x_{u,j}^t, y_{u,j}^t, h_{u,j}^t)$ 表示 UAV 的航路点, $\tau_j^t = (\tau_{1,j}^t, \tau_{2,j}^t)$ 分别表示 UAV 的航向角和俯仰角, $v_j^t = (v_{x,j}^t, v_{y,j}^t, v_{h,j}^t)$ 表示 UAV 的三维速度分量, $a_j^t = (a_{x,j}^t, a_{y,j}^t, a_{h,j}^t)$ 表示 UAV

的三维加速度分量. 本文中假设上述物理量的检测传感器同步采样, 且数据传输无时延. 此时, 在 UAV 与 IoT 设备分簇的联合运动策略下, 第 j 个 UAV 的节能移动可表示为如下形式: $S_j^t(p_j^t, \tau_j^t, v_j^t, a_j^t) \xrightarrow{\text{comm}_j, \text{move}_j} S_j^{t+1}(p_j^{t+1}, \tau_j^{t+1}, v_j^{t+1}, a_j^{t+1})$. 则当扩展为 K 个 UAV 时, 有, $\prod_{j=1}^K S_j^t(p_j^t, \tau_j^t, v_j^t, a_j^t) \xrightarrow{\prod \text{comm}, \prod \text{move}} \prod_{j=1}^K S_j^{t+1}(p_j^{t+1}, \tau_j^{t+1}, v_j^{t+1}, a_j^{t+1})$, 其中, $\prod \text{comm}$ 为上一小节所确定的大规模移动异构物联网的通信节能约束条件, $\prod \text{move}$ 为 UAV 与 IoT 设备分簇的联合运动策略.

本文仅讨论旋翼 UAV, 且面向 IoT 设备数据的稳定采集, 而非突发状况监测, 因此假设飞行姿态恒定, 加速度 $a_j^t \equiv 0$ [19]. 此时, UAV 与移动 IoT 设备分簇的联合运动能耗主要由 K 个 UAV 的航路点变化与航路点间的速度决定. 设 t 时刻第 j 个 UAV 由最优布署坐标 $s_{i,j}^*$ 运动到 $t+1$ 时刻第 l 个 UAV 的最优布署坐标 $s_{i+1,l}^*$, 位移为 $D_{j,l} = p_{j,l}^{t+1} - p_j^t = s_{i+1,l}^* - s_{i,j}^* = D_{j,l}^x \cdot e_x + D_{j,l}^y \cdot e_y + D_{j,l}^z \cdot e_z (j, l \in K)$, 则联合运动能耗为 [20],

$$E_{j,l}(D_{j,l}, v_j^t) = \int_{t=0}^{t=\|D_{j,l}\|/\|v_j^t\|} p(\|v_j^t\|) dt = \frac{p(\|v_j^t\|) \cdot \|D_{j,l}\|}{\|v_j^t\|} = \frac{p(\|D_{j,l}\| \cdot \|v_j^t\| / \sqrt{(D_{j,l}^x)^2 + (D_{j,l}^y)^2}) \cdot \sqrt{(D_{j,l}^x)^2 + (D_{j,l}^y)^2}}{\|v_j^t\|}$$

其中, v_j^t 是 UAV 的三维速度分量 v_j^t 在 XY 平面上的投影, 即移动 IoT 设备分簇的对地移动速度. 则 $t+1$ 时刻 K 个 UAV 的移动节能策略可描述为:

$$\begin{aligned} & \min_Q \| (Q * E)_{K \times K} \times I_{K \times 1} \|_1 \\ & \text{s. t. } \sum_{l \in K} Q = \sum_{l \in K} (Q_{j,l}) = 1, \\ & \sum_{j \in K} Q = \sum_{j \in K} (Q_{j,l}) = 1, Q_{j,l} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, UAV 的移动策略矩阵 $Q = (Q_{j,l})$ 为 0-1 稀疏矩阵, 当 UAV 存在从 t 时刻最优布署坐标运动到 $t+1$ 时刻最优布署坐标的策略时, 其元素值为 1, 否则为 0. 联合运动能耗矩阵 $E = (E_{j,l}(D_{j,l}, v_j^t))$.

对于上述的优化问题, 应用 Monge-Kantorovich duality 理论可获得最优解, 得到 UAV 与 IoT 设备分簇的联合运动策略, 确定 UAV 覆盖簇, 从而避免频繁换簇覆盖所引起的远距离移动等大运动状态变化问题, 实现移动节能 [21, 22].

算法2 UAV 与 IoT 设备分簇的联合移动节能算法

```

Q = EnergySaving_Move( $s_{i,j}^*, s_{i+1,l}^*, v_j^t$ )
1: {
2:    $v_j^t \leftarrow v_j^t$ 
3:    $\|D_{j,l}\|, D_{j,l}^x, D_{j,l}^y \leftarrow s_{i,j}^*, s_{i+1,l}^*$ 
4:    $E_{j,l} \leftarrow \|D_{j,l}\|, D_{j,l}^x, D_{j,l}^y$ 

```


5: $Q \leftarrow \text{minimize } E_{j,l}$
6: }

4 实验

仿真实验中,设 L 个地面移动 IoT 设备被初始布署在 $5 \times 5 \times 0.2(\text{km}^3)$ 的城市环境里,移动后其布署位置满足正态分布. 仿真参数如表 2 所示.

表 2 仿真参数

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

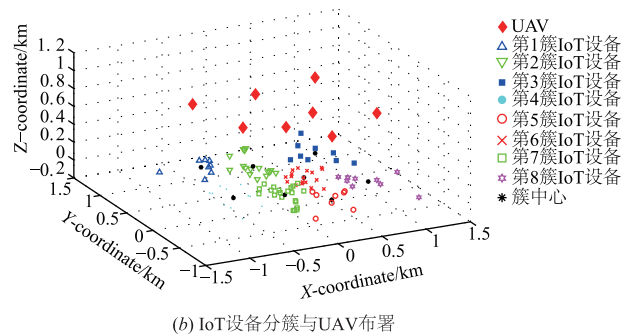
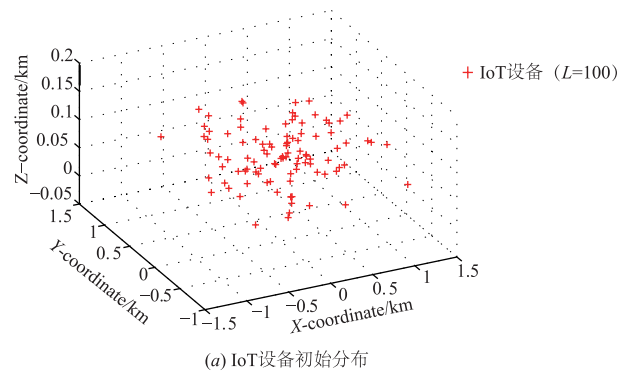


图3 地面IoT设备与UAV布署

图3展示了 $L=100$ 个地面移动 IoT 设备的初始分布以及应用本文方法所确定的最优 UAV 布署效果. 此次实验采用 8 个 UAV, 如图 3(a) 所示, 100 个 IoT 设备初始分布位置随机, 基于通信节能策略, 首先形成了 8 个最优分簇, 其次在各簇聚类中心的影响下, UAV 的布署位置实现最优, 如图 3(b) 所示.

图4展示了 8 个 UAV 与 $L=100$ 个 IoT 设备静态通

信的实验结果. 8 个静止悬浮的 UAV 与簇内 IoT 设备通信时, 各簇 IoT 设备的总发射能量, 如图 4(a) 所示. 最大总发射能量为 9.1mW, 最小总发射能量为 3.5mW, 平均值为 5.94mW, 各簇 IoT 设备总发射能量较为均衡. 图 4(b) 展示了各簇 IoT 设备的平均高度, 以及各簇 IoT 设备的数量. 平均高度最高的移动 IoT 设备出现在第五簇, 其高度为 0.12255km, 平均高度最低的移动 IoT 设备出现在第 2 簇, 其高度为 0.093084km; 地面移动 IoT 设备数量最多的簇为第 2 簇, 数量最少的簇为第 1、3 簇. 对图 3 综合分析后可以看出, 与每个 UAV 通信的各簇 IoT 设备的总发射能量受该簇 IoT 设备的数量影响较大, 导致其变化规律近似, 而各簇 IoT 设备的高度对总发射能量也是有少许影响的, IoT 设备的数量相同时, 高度越大, 距离与该簇通信的 UAV 较近, 因此总发射能量较低, 反之较高, 此现象可以从 1、3 簇和 5、8 簇观察得到.

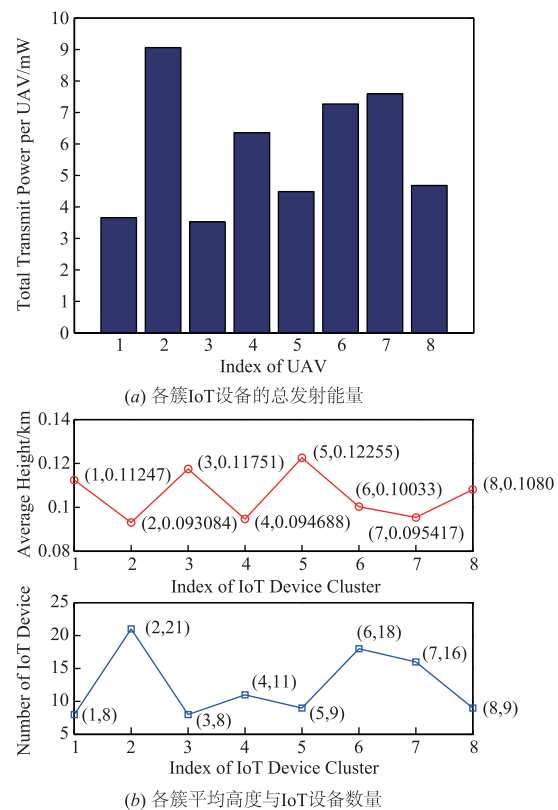


图4 地面IoT设备与UAV静态通信

图5展示了 8 个 UAV 与 $L=100$ 个 IoT 设备动态通信的实验结果. 在 10 个单位时间内, 8 个 UAV 与簇内 IoT 设备通信时, 各簇 IoT 设备总发射能量的连续变化数据, 整体较为均衡. 但在一些时间点上存在发射总能量较大的簇, 如第 8s 时的第 7 簇, 根据上述对静态通信实验结果的分析, 可知此时第 7 簇的 IoT 设备较多, 大幅增加了该簇 IoT 设备的总发射能量.

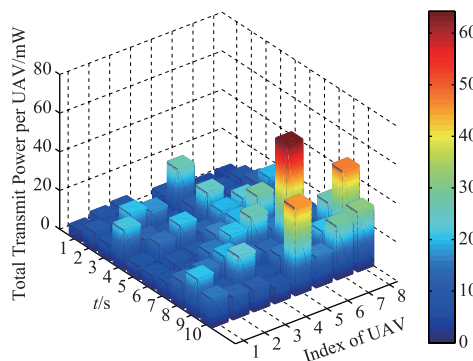


图5 地面IoT设备与UAV动态通信

图6展示了随着UAV数量的变化($K = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$), 各簇IoT设备($L = 100$)的平均发射能量. 实验中, 将本文提出的方法与Voronoi方法进行了对比. 在基于Voronoi方法进行UAV布署时, 设与各UAV通信的移动IoT设备数量相同($\lfloor \frac{L}{K} \rfloor$), 且均匀分布在

目标区域中, UAV高度为500m, IoT设备与最近的UAV通信. 可以看出, 本文提出的方法由于UAV的布署方案是根据IoT设备的位置动态计算得到的, 且在计算过程中考虑了通信节能的要求, 因此性能优于Voronoi方法. 同时, 图6可以看出, 随着UAV数量的增加, 地面IoT设备在保证可靠、节能通信的前提下, 可以更接近于UAV, 因此, 各簇IoT设备的平均发射能量不断降低. 但是, 平均发射能量的减少却是非线性的, 对于100个地面IoT设备来说, 从6个UAV增加到7个UAV所带来的平均发射能量的减少量明显下降, 因此, 基于本文所提出的方法, 在大规模移动异构物联网的实际应用中, 应综合考虑UAV的成本和平均发射能量的变化.

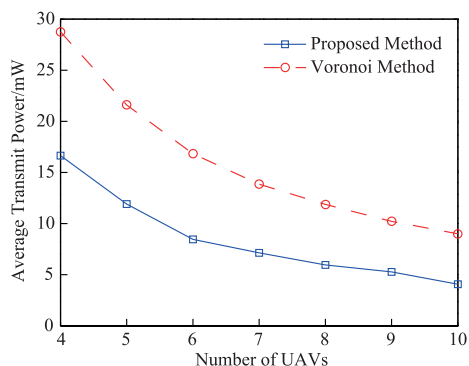


图6 UAV数量变化时平均发射能量

图7展示了基于本文所提出的方法, 对不同数量 $K = \{4, 5, 6, 7, 8, 9, 10\}$ 的UAV空基平台, $L = \{60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200\}$ 的IoT地面设备的组合情况进行仿真实验, 在统计网络通信总能耗后, 计算各IoT设备的平均通信能耗变化情况. 可以看出, 当 K 取

某定值时, 平均通信能耗随IoT设备数量变化略微呈现增长趋势, 主要是由于IoT设备数量的增加, 导致各簇IoT设备在一定的分布下, 增加了与最优位置的UAV空基平台的通信距离, 但曲线整体较为平稳, 说明IoT设备数量的变化对平均通信能耗影响较小. 同时, 综合考虑 K 和 L 的变化, 当 K 值较小而 L 值较大时, 为本文所提方法平均能耗较大的情况, 此时曲线趋于收敛, 平均能耗仅为0.76mW. 结合图6所示的结论, Voronoi方法在 $K = 10, L = 100$ 时的通信能耗为0.9mW. 综上, 本文所提方法在IoT设备数量变化时仍能保持通信节能.

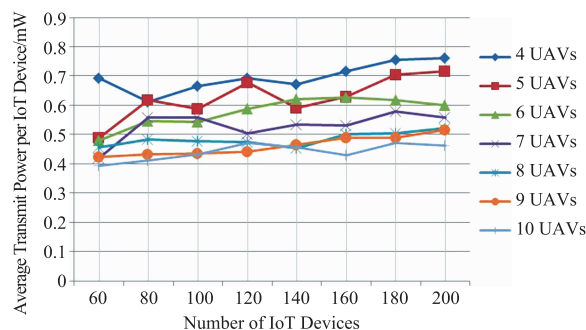
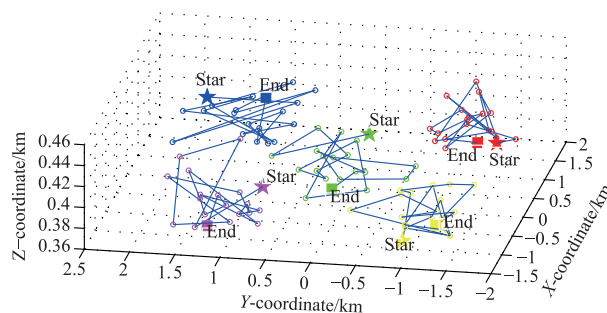
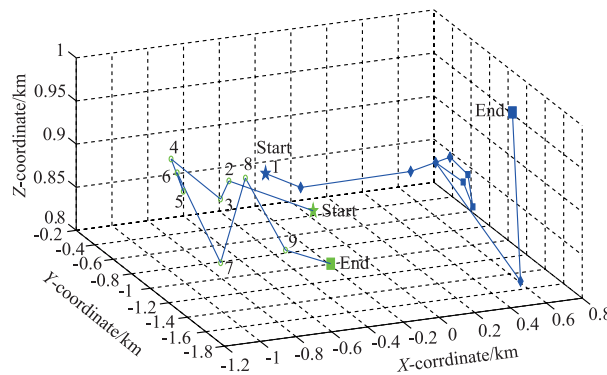


图7 IoT设备数量变化时平均发射能量

图8展示了在本文提出的移动节能策略下, UAV随地面IoT设备($L = 100$)的运动而改变其布署位置时的动态轨迹. 此次实验共模拟100个地面移动IoT设备的实时运动, 导致各簇UAV的最优布署位置动态变化过程, 图



(a) 20个单位时间5个UAV



(b) 10个单位时间2个UAV

图8 UAV的移动轨迹

8(a)展示了20个单位时间内5个UAV的分簇移动过程,图8(b)展示了10个单位时间内2个UAV的分簇移动过程,其中★为UAV的初始位置,■为UAV的最终位置。IoT设备的实时运动,导致物联网结构不断变化,设备分簇也动态更新,但基于本文的方法,UAV能够实时移动到其最优位置,在保证通信节能和移动节能的前提下,实现与移动IoT设备的数据交换。

图9展示了在本文提出的移动节能策略下,UAV的移动与地面IoT($L=100$)设备分簇的运动联合设计时,8个UAV在10个单位时间内的9次同步运动中所消耗的能量。各UAV的平均移动能耗仅为9kJ,且整体较为均衡,从而延长大规模移动异构物联网的生命周期。在UAV移动过程中,也存在移动耗能较大的情况,如第3个UAV的第2次移动,主要是由于地面IoT设备的分簇情况发生了较大的变化造成的。

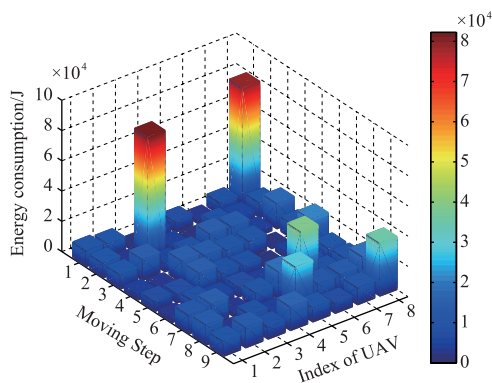


图9 UAV移动耗能

图10展示了当 k' ($k' < K$)个UAV失效后,由于UAV数量变化导致其余 $K - k'$ 个UAV需要重新布署,再次建立与 $L=100$ 个地面IoT设备通信时 $K - k'$ 个UAV的移动耗能。实验中,我们假设 $K=10$ 个UAV初始布署在最优位置,随着时间延长,由于电力问题UAV开始失效,可以看出,失效的UAV越多,剩余UAV重新布署时的移动能耗越大,特别是在7个UAV失效时,剩余3个UAV重新布署的移动能耗显著提高,此时对于

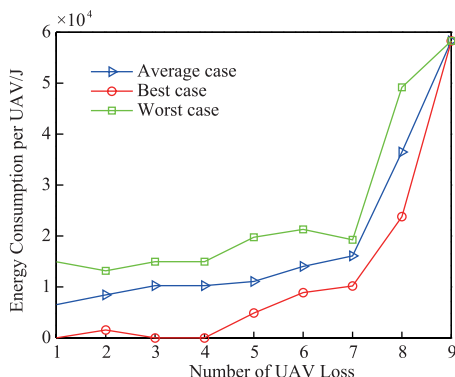


图10 UAV失效后的重新布署耗能

剩余的3个UAV,负载过大,这将导致大规模移动异构物联网的数据采集层整体失效。

5 总结

本文提出了一种基于无人机的应急移动物联网远距离通信节能策略。根据地面物联网设备无序立体地分散于所关注重点区域的特点,通过优化无人机的布署位置,在提供可靠通信的同时,降低地面设备的通信耗能。同时根据地面设备运动性能强、活动范围广的特点,通过研究无人机与地面移动设备的联合运动策略,避免无人机频繁换簇覆盖所引起的远距离移动等大运动状态变化问题,实现无人机的移动节能,进而解决应急移动物联网应用中大规模移动物联网设备能量受限条件下的远距离通信问题。

参考文献

- [1] M Mozaffari, W Saad, M Bennis, et al. Mobile Internet of Things: can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture [A]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2016. 1-6.
- [2] 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 Zan-jie. Resource allocation algorithms in wireless networks [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [3] 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 Lei, Huang Hui-lin, Qian Xin. Large machine-to-machine heterogeneous network architecture [J]. ZTE Technology Journal, 2014, 20(6): 48-51. (in Chinese)
- [4] M Mozaffari, W Saad, M Bennis, M Debbah. Unmanned aerial vehicle with underlaid device-to-device communications: performance and tradeoffs [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(6): 3949-3963.
- [5] Z Han, A L Swindlehurst, K Liu. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3533-3546.
- [6] M Mozaffari, W Saad, M Bennis, M Debbah. Optimal transport theory for power-efficient deployment of unmanned aerial vehicles [A]. IEEE International Conference on Communications (ICC) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2016. 1-6.
- [7] Y Pang, Y Zhang, Y Gu, M Pan, Z Han, P Li. Efficient data collection for wireless rechargeable sensor clusters in harsh terrains using UAVs [A]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) [C]. Washington, DC, USA:

- IEEE, 2014. 234 – 239
- [8] N Abuzainab, W Saad, H V Poor. Cognitive hierarchy theory for heterogeneous uplink multiple access in the internet of things [A]. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2016. 1252 – 1256
- [9] C-Y Tu, C-Y Ho, C-Y Huang. Energy-efficient algorithms and evaluations for massive access management in cellular based machine to machine communications [A]. Vehicular Technology Conference (VTC) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2011. 1 – 5
- [10] K Daniel, C Wietfeld. Using public network infrastructures for UAV remote sensing in civilian security operations [J]. Homeland Security Affairs, 2011, (S3): 1 – 7.
- [11] S Rohde, C Wietfeld. Interference aware positioning of aerial relays for cell overload and outage compensation [A]. IEEE Vehicular Technology Conference (VTC) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2012. 1 – 5
- [12] F Jiang, A L Swindlehurst. Optimization of UAV heading for the ground-to-air uplink [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2012, 30(5): 993 – 1005.
- [13] S Shalmashi, E Bjornson, M Kountouris, K W Sung, M Debbah. Energy efficiency and sum rate tradeoffs for massive MIMO systems with underlaid device-to-device communications [J]. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2016, 2016(1): 175.
- [14] X Lin, R Heath, J Andrews. The interplay between massive MIMO and underlaid D2D networking [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2015, 14(6): 1 – 10.
- [15] 陈珍萍, 黄友锐, 唐超礼, 等. 物联网感知层低能耗时间同步方法研究 [J]. 电子学报, 2016, 44(1): 193 – 199.
Chen Zhen-ping, Huang You-rui, Tang Chao-li, et al. Research on low energy consumption time synchronization method for Internet of Things' perception layer [J]. Acta Electronica Sinica, 2016, 44(1): 193 – 199. (in Chinese)
- [16] 黄辰, 李可维, 张伟, 等. 无线物联网中基于网络编码的能量受限数据传输机制 [J]. 电子学报, 2013, 41(1): 144 – 147.
Huang Chen, Li Ke-wei, Zhang Wei, et al. Network coding based energy constrained data transmission mechanism in wireless Internet of Things [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(1): 144 – 147. (in Chinese)
- [17] A Hourani, S Kandeepan, A Amalipour. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments [A]. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2014. 2898 – 2904
- [18] 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 Chao-wei, Song Hai-zhou. 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. (in Chinese)
- [19] 祝小平, 周洲, 王峰. 无人机协同路径规划 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Zhu Xiao-ping, Zhou Zhou, Wang Yi. Cooperative Path Planning Of Unmanned Aerial Vehicles [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [20] C Di Franco, G Buttazzo. Energy-aware coverage path planning of UAVs [C]. IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICAR-SC) [C]. Washington, DC, USA: IEEE, 2015, 111 – 117.
- [21] C Villani. Topics in Optimal Transportation [M]. Providence: American Mathematical Society, 2003.
- [22] Q Xia. Motivations, ideas and applications of ramified optimal transportation [J]. ESAIM: Mathematical Modelling and Numerical Analysis, 2015, 49(6): 1791 – 1832.

作者简介



王 巍 男, 1983 年 11 月出生, 河北邯郸人, 副教授, 硕士生导师. 主要从事公共安全物联网、隐式人机交互方面的研究工作.
E-mail: wangwei83@hebeu.edu.cn



赵继军 男, 1970 年 9 月出生, 河北邯郸人, 教授, 硕士生导师. 主要从事宽带通信网、传感网与物联网等方面的研究工作.
E-mail: zjijun@hebeu.edu.cn



彭 力 男, 1967 年 3 月出生, 河北唐山人, 教授, 博士生导师. 主要从事视觉物联网的相关研究.
E-mail: pengli@jiangnan.edu.cn