

## 基于无人机的物联网无线通信的潜力与方法

宋庆恒<sup>1,2</sup>, 郑福春<sup>1,3</sup>

(1. 东南大学移动通信国家重点实验室, 江苏 南京 210096;

2. 怀化学院武陵山片区生态农业智能控制技术湖南省重点实验室, 湖南 怀化 418008;

3. 哈尔滨工业大学(深圳)电子与信息工程学院, 广东 深圳 518055)

**摘要:** 在地面物联网基础设施缺失的环境下, 基于无人机的无线通信平台为物联网传感器节点提供了有效的低成本无线连接。与地面物联网通信平台相比, 低空无人机无线通信系统具有部署速度快、成本低、可按需部署、配置灵活以及短范围视距连接带来的通信信道质量更好等优点。另一方面, 无人机的高移动性、能量受限等特点给无人机物联网无线通信带来新的挑战。研究了物联网场景下的无人机无线通信技术, 描述了无人机空—地信道特性和功率消耗模型, 重点介绍了无人机在物联网数据分发/收集、数据中继等方面的应用、机会和方法。

**关键词:** 无人机; 空—地信道; 功率消耗模型; 物联网无线通信

**中图分类号:** TN929.53

**文献标识码:** A

**doi:** 10.11959/j.issn.2096-3750.2019.00096

## Potential and methods of wireless communications for Internet of things based on UAV

SONG Qingheng<sup>1,2</sup>, ZHENG Fuchun<sup>1,3</sup>

1. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China

2. The Key Laboratory of Intelligent Control of Ecological Agriculture in Wuling Mountain Area, Huaihua University, Huaihua 418008, China

3. School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology (Shenzhen), Shenzhen 518055, China

**Abstract:** In the absence of terrestrial infrastructure for Internet of things (IoT), an effective low-cost wireless connection can be provided by an unmanned aerial vehicle (UAV) based wireless communication platform. Compared with the terrestrial IoT communication platform, the low-altitude UAV wireless communication system enjoys the advantage of rapid deployment, low cost, on-demand deployment, flexible configuration and better communication channel quality due to short-range line-of-sight links. On the other hand, several new challenges must be overcome due to the high mobility and energy consumption limitations of UAV. An overview of UAV enabled IoT wireless communication was provided, including the air-to-ground channel model, the power consumption model, as well as the applications in UAV based data dissemination/collection and relay, with particular reference to the new opportunities and solutions in these application areas.

**Key words:** UAV, air-to-ground channel, power consumption model, wireless communication of IoT

### 1 引言

无人机空地通信是我国推进天地一体化信息网络重大工程的重要组成部分, 拥有广阔的应用前景, 同时也面临着重要的技术挑战。针对未来移动通信业务量的指数级增长及多样化需求所带来的挑战, 充分挖掘无人机通信系统的优势和潜力, 对

国家开发利用邻近空间资源具有重要的战略意义, 可促进国民经济快速发展, 并带动我国新兴产业发展。历史上, 无人机主要应用于军事领域, 部署于敌方区域, 进行情报侦察等以减少士兵伤亡。近年来, 随着设备的小型化、制造成本的不断降低和性能的持续提升, 小型无人机在民用和商用领域应用增长迅速, 实体场景包括实时监测、无线覆盖、远

程感知、物流、应急搜救、通信中继、精准农业、安全监管以及民用设施检查等<sup>[1]</sup>。

无人机代表未来通用航空业的发展方向之一，将成为世界经济增长的一项新动力。根据普华永道公司的研究报告<sup>[2]</sup>，无人机市场规模到2025年有望达450亿美元，其中，通信相关设备的市场规模占总市场规模的80%，年均复合增长率高达7.6%，预计将新增100万个工作岗位，无人机无线通信具有旺盛的市场需求和广阔的发展前景。无人机可分为固定翼无人机和旋翼无人机两类，分别具有优缺点<sup>[3]</sup>。固定翼无人机通常速度较快、载重能力较强，但需要保持连续的向前运动以维持空中飞行；旋翼无人机移动能力和载重能力有限，但是在空中可朝任意方向飞行并可以悬停在任意期望位置。无人机的选择主要依赖于具体应用，在不同应用场景中，利用无人机实现高速无线通信是对现有通信网络基础设施的有效补充，是5G通信的重要组成部分<sup>[4]</sup>。

与传统地面蜂窝通信和卫星通信相比，无人机无线通信具有以下重要优点：1) 由于无人机无线通信系统的成本优势和快速部署能力，使得其适合于突发事件或者持续时间有限的任务，如自然灾害造成的通信基础设施破坏时的应急通信恢复、体育比赛场馆等热点区域蜂窝基站超负荷时的数据卸载、大规模物联网网络的周期性数据分发/收集等<sup>[4-7]</sup>。2) 无人机的可控制移动性带来新的设计自由度，如根据环境变化动态调整无人机位置及状态实现无人机通信的性能提升<sup>[8]</sup>。3) 为通信基础设施缺失区域提供覆盖连接，如山区电力巡检、边境巡查和海洋数据收集等<sup>[9-11]</sup>。另外，与地面车载通信相比，无人机无线通信具有通信信道好、移动性不易受地面建筑物影响等优点。

综上所述，无人机无线通信具有响应快速、机动灵活、成本低、可按需部署、信道好并且一定程度可控等优点，在国防安全、应急响应以及防灾减灾等方面具有广阔的应用场景。在无人机物联网无线通信中，充分挖掘无人机特性，通过优化无人机轨迹、资源分配以及多天线设计等实现通信服务质量、可达速率、能量效率和任务完成时间等性能的提升，具有重要的理论价值和实际意义。

## 2 无人机空—地信道特性

无人机空地无线通信中的空—地信道，一般包

含较强的视距链路，但该视距链路偶尔会被地形、周围建筑物甚至机身阻挡，存在一定的随机性，而其随机概率在理论上取决于俯仰角的大小。空—地信道也会受周围环境如山脉、地面、树木等的有限散射或反射影响，大多数空—地信道测量主要集中在诸如路径损耗指数和阴影衰落等大尺度特性方面。

在文献[12]中，对于开放场地和校园环境，将空—地信道建模为自由空间路径损耗模型。该模型数学分析简单，在无人机户外平原通信中得到广泛应用<sup>[13-15]</sup>。文献[16]的测量结果表明，在城市环境中，路径损耗遵循距离—依赖的趋势，并且受低俯仰角的影响显著，其中，额外的路径损耗模型参考了包含周围建筑物反射和散射损耗的陆地宏蜂窝模型和刀刃衍射理论。文献[17]研究了城郊环境，分析了高度和距离对路径损耗的影响，采用简化的双斜率模型分析无人机高度对路径损耗的影响，通过对数正态模型分析无人机水平距离对路径损耗的影响。文献[18]针对城市和农村地形提出了一种依赖距离和频率的经验路径损耗模型，其中，无人机高度是关键建模参数。文献[19]提出了一种高度依赖的路径损耗模型，其中，在15~120 m时，路径损耗和阴影衰落随着高度的增长而降低；在高于100 m时，传播条件近似为自由空间传播。文献[20]提出了一种角度依赖的信道模型，包含额外路径损耗和阴影衰落。文献[21]提出了一种统计空—地信道模型，将接收机分为3组，即具有视距连接或接近视距连接、非视距连接和深度衰落连接。将路径损耗模型建模为高度和覆盖半径的函数，其中，视距连接概率为俯仰角的函数，得到平均路径损耗。具体来说，文献[21]将高度依赖和角度依赖的信道扩展到了4种常用场景，即城郊、城市、密集城市和摩天大楼城市，然后将视距概率和额外阴影衰落建模成依赖环境参数俯仰角的函数，得到平均路径损耗。另一种信道建模思想是利用陆地移动信道模型，将空—地信道建模为大尺度信道衰落和小尺度信道衰落，考虑占优势的视距成分存在，将小尺度信道衰落建模为莱斯信道<sup>[22-23]</sup>。文献[24]和文献[25]结合统计信道和莱斯信道的特征，利用文献[21]的测试数据，将信道建模成大尺度衰落和小尺度衰落，路径损耗指数建模成俯仰角的函数，小尺度衰落建模为莱斯分布，其中，莱斯因子建模为俯仰角的函数。

在实际情况下,需要根据应用场景、周围环境以及无人机飞行高度等选择合适的无人机空—地信道模型。然而,在现有的空—地信道建模中,无人机通信过程中由于移动性带来的多普勒效应影响还没有得到很好的研究,无人机的移动性使得空—地信道的信道估计更具挑战性。在频带日趋紧张的今天,毫米波通信频段的使用对空—地信道特性的影响急待进一步研究。

### 3 无人机的功率消耗模型

制约无人机物联网通信性能的瓶颈之一是无人机有限的尺寸和携重能力,有限的在板能量必须得到有效利用以增强通信性能,延长无人机续航时间,因此研究无人机飞行过程中的能量消耗具有重要意义。与陆地物联网通信系统相比,无人机物联网通信过程中需要额外消耗推进能量以维持飞行姿态和空中移动。在实际情况下,无人机的推进功率消耗一般远高于通信相关能量。因此,能量有效的无人机物联网无线通信系统与传统地面物联网通信系统有很大区别。

文献[15]通过优化无人机轨迹进行能量有效的无人机通信的初步尝试,在给定时间内使得固定翼无人机通信系统的能量效率最大化。为实现该目的,将固定翼无人机功率消耗建模为无人机飞行速度和加速度的函数,此外,得到了直线飞行和圆周飞行的简化功率消耗模型。固定翼无人机水平飞行的功率消耗模型可以表示为

$$P_C = \left[ a_1 \|\mathbf{v}\|^3 + \frac{a_2}{\|\mathbf{v}\|} \left( 1 + \frac{\|\mathbf{a}\|^2 - (\mathbf{a}^T \mathbf{v})^2 / \|\mathbf{v}\|^2}{g^2} \right) + m \mathbf{a}^T \mathbf{v} \right] \quad (1)$$

其中,  $a_1$  和  $a_2$  是空气动力学和飞机设计相关的常数,  $\mathbf{v}$  为速度矢量,  $\mathbf{a}$  为加速度矢量,  $m$  为无人机重量,  $g$  为重力加速度,  $(\cdot)^T$  为转置运算,  $\|\cdot\|$  为幅度运算,  $\|\cdot\|$  为欧氏范数。

无人机水平直线飞行的功率消耗模型可简化为

$$P_C = \left[ a_1 V^3 + \frac{a_2}{V} + m a' V \right] \quad (2)$$

其中,  $a'$  为水平直线飞行的加速度,  $V$  为水平直线飞行的速度。

无人机水平圆周飞行的功率消耗模型可简化为

$$P_C = \left[ a_1 V^3 + \frac{a_2}{V} \left( 1 + \frac{a_1^2}{g^2} \right) + m a_{\parallel} V \right] \quad (3)$$

其中,  $a_{\perp}$  表示离心加速度,  $a_{\parallel}$  表示切向加速度,式(2)和式(3)为式(1)的特例。文献[26]扩展到旋转翼无人机场景,考虑飞行—悬浮—通信协议,最小化旋转翼无人机通信过程的总消耗能量,将旋转翼无人机水平飞行的功率消耗模型建模为飞行速度的函数,但未考虑加速度对功率消耗的影响。无人机水平直线飞行的功率消耗模型和无人机水平圆周飞行的功率消耗模型主要针对二维平面飞行,三维空间飞行要求无人机可进行爬升和下降,其功率消耗模型更复杂,目前尚未有文献研究三维空间飞行的无人机功率消耗模型。为解决无人机能量有限问题,一方面可研发能量密度更高的电池或者更轻的高强度复合材料以降低无人机重量;另一方面可采用太阳能或其他新型供电方式,但尚未有文献研究太阳能供电的无人机功率消耗模型。

### 4 基于无人机的物联网无线通信

无人机的高移动性为增强无人机物联网无线通信性能提供了机会。本节讨论利用无人机受控制的移动性进行物联网无线通信的两种应用场景,即基于无人机的物联网数据中继和无人机物联网数据分发/收集。

#### 4.1 基于无人机的物联网数据中继

陆地中继系统已经得到广泛的研究,主要有解码—转发和放大—转发两种中继策略,中继传输方式有半双工中继和全双工中继。半双工中继频谱利用率较低,全双工中继可以在相同的时频资源下同时接收和发射,频谱利用率较高,但也带来了自干扰。目前,主要研究自干扰的消除和抑制、系统性能的优化等。相对于陆地中继系统,无人机因其快速部署能力、环境适应能力以及无人机和地面用户之间的高视距连接概率,被广泛应用于灾后应急响应和热点区域过载基站的数据卸载等场景,如利用无人机中继建立临时连接,帮助完成无可靠直接连接的两个或多个远距离用户间的数据传输<sup>[4-5]</sup>。文献[23]研究固定翼无人机圆形轨迹中继,提出了一种可变速率中继方法优化时间分配,实现性能提升。文献[27]通过优化无人机的航向角,在满足单独连接速率高于某个给定阈值时使得无人机 MIMO 中继系统的上行数据速率最大化,根据相关矩阵的特征值推导遍历归一化速率的闭式表达式。文献[28]通过优化无人机的位置,最大化中继通信的可靠性,其中,可靠性采用功率损耗、中断概率以及误比特率进行

度量。文献[29]考虑无人机移动中继系统，在无人机移动性约束的限制下，通过优化源/中继发射功率和无人机轨迹以最大化吞吐量，其中，发射功率优化采用阶梯注水架构，对给定的发射功率采用连续凸优化方法优化无人机轨迹，然后交替迭代获得最优发射功率和无人机轨迹。文献[30]通过无人机轨迹、源/中继发射功率的联合优化实现中断概率的最小化，并提出了一种低复杂度方法获得轨迹和功率的闭式表达式。文献[31]通过优化时间分配、无人机飞行速度和轨迹来最大化频谱效率和能量效率，考虑能量最优的圆形轨迹，结果表明，可利用无人机轨迹设计实现最大可达频谱效率和能量效率的权衡。上述文献主要研究单天线无人机中继系统，如何利用多天线带来的分集增益和阵列增益还没有得到很好的研究。

研究能量最优的无人机中继系统，基于无人机的物联网中继通信如图 1 所示<sup>[32]</sup>。物联网数据收集器  $S$  收集的各物联网传感器节点的数据通过无人机中继传到远程数据中心  $D$ ，假设  $S$  和  $D$  之间没有直接链路，固定翼无人机采用能量最优的圆周轨迹和半双工解码转发中继策略，无人机采用多天线，假设无人机已知全局信道状态信息。其中，无人机高度为  $100\text{ m}$ ，莱斯因子为  $10$ ，带宽为  $1\text{ MHz}$ ，总发射功率为  $2\text{ W}$ ，噪声功率谱密度为  $-174\text{ dBm/Hz}$ ，对于无人机功率消耗模型，假设  $a_1 = 9.26 \times 10^{-4}$ ， $a_2 = 2\ 250$ 。

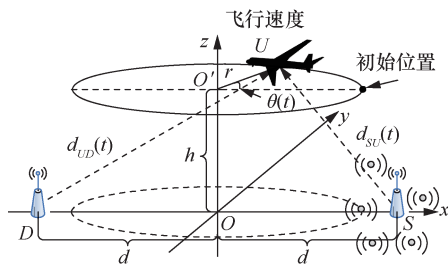


图 1 基于无人机的物联网中继通信

在总发射功率受限的条件下，通过优化波束成形、功率分配、无人机旋转半径和无人机旋转速度使得中继过程的能量效率最大化。对不同的  $S$  和  $D$  之间的距离（以下简称“ $SD$  距离”），如  $1\ 000\text{ m}$ 、 $500\text{ m}$  和  $200\text{ m}$ ，其最优旋转半径分别为  $476\text{ m}$ 、 $364\text{ m}$  和  $276\text{ m}$ ，无人机不同位置的最优发射功率如图 2 所示。当无人机距离信源  $S$  较近时，信宿  $D$  应采用较大的发射功率；当无人机距离信宿  $D$  较近时，信源  $S$  采用较大的发射功率。

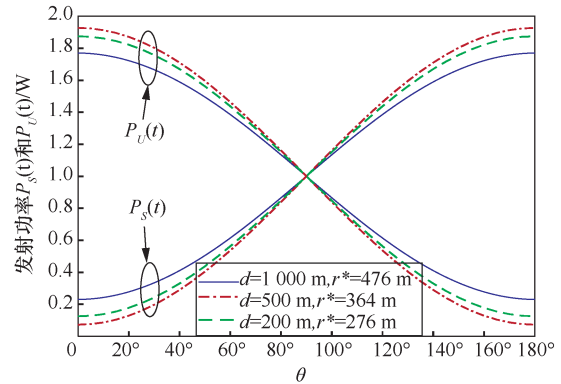


图 2 无人机不同位置的最优发射功率

能量效率和旋转半径之间的关系如图 3 所示，在给定的  $SD$  距离为  $1\ 000\text{ m}$  的情况下，对于不同的天线数目，均存在最优旋转半径使得能量效率最大。随着旋转半径的增加，能量效率先单调递增达到最优值后再单调递减。随着天线数目的变化，不同天线数目的最优旋转半径近似排列成一条直线，增加无人机天线数目可极大地增强无人机中继的能量效率。

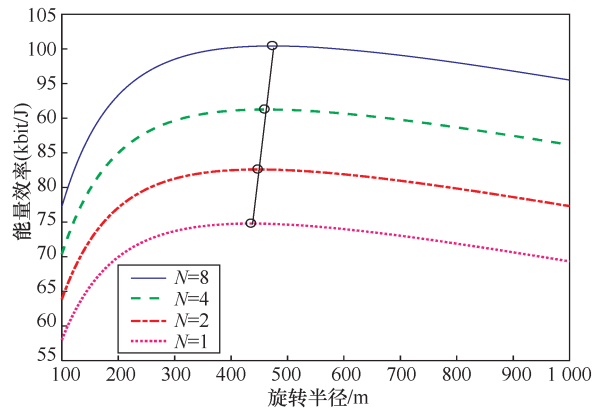


图 3 能量效率和旋转半径之间的关系

无人机的移动性引起信道估计误差，文献[32]假设无人机已知全局信道状态信息，将该场景继续扩展到信道估计误差场景<sup>[33]</sup>，采用统计功率分配策略和最大比合并/最大比传输波束成形策略，目标是 minimized 端到端中断概率。假设无人机天线数目为  $4$ ，源和目标之间的距离为  $2\ 000\text{ m}$ ，无人机飞行高度为  $1\ 000\text{ m}$ ，无人机旋转半径为  $1\ 000\text{ m}$ ，速率阈值为  $0.5\text{ bit}/(\text{s}\cdot\text{Hz})^{-1}$ 。不同的信道估计误差对平均中断概率的影响如图 4 所示，首先，在总发射功率相同的情况下，信道估计误差越小，则性能越优。此外，与平均功率分配方法相比，统计功率分配方法可大幅度降低信道估计误差对中断概率的影响。

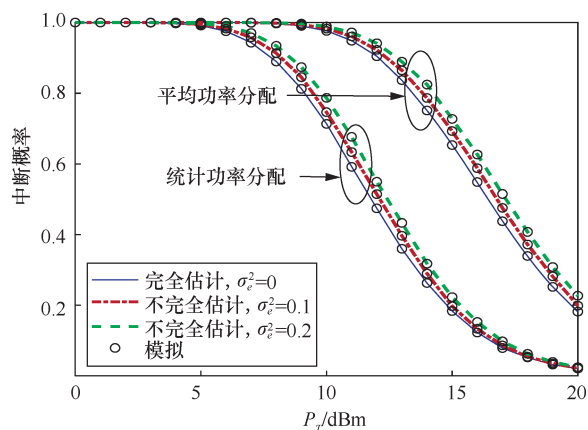


图4 不同的信道估计误差对平均中断概率的影响

不同的天线数目对平均中断概率的影响如图5所示,其中,信道估计误差为 $\sigma_e^2 = 0.1$ 。随着总发射功率的增加,中断概率单调递减,增加无人机天线数目可改善中断性能。证实了多天线可提供可观的阵列增益,因此在无人机无线通信中具有广阔的前景。

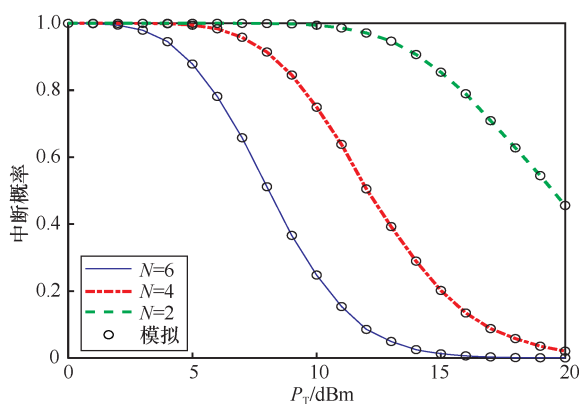


图5 不同的天线数目对平均中断概率的影响

#### 4.2 无人机物联网数据分发/收集

由于成本较低、高度可控和移动性,无人机被广泛应用于大规模分布式物联网传感器网络的数据分发/收集中,这类应用一般对时延不敏感。基于无人机的物联网数据分发/收集如图6所示,采用周期性分发/收集方式,如精准农业、城市气象监测、PM2.5 测量以及水质、水位监测等<sup>[34-36]</sup>。

在地面节点位置已知的情况下,无人机轨迹优化可以为无线通信性能增强提供新的设计自由度。但是新的限制也为无人机轨迹优化增加了难度,如初始/最终状态(位置、速度及加速度)、无人机的最大/最小飞行速度、最大加速度或最大转弯角、碰撞避免以及禁飞区等。在无人机轨迹优化中,通常考虑三大性能折中,即吞吐量—时延折中、吞吐量

—能量消耗折中和时延—能量消耗折中。常用的无人机轨迹优化技术有动态规划、强化学习、图论、最短路径求解、混合整数线性规划、块梯度下降法和连续凸优化等。但是,现有的无人机通信轨迹优化方案主要针对户外平原地区,信道模型一般采用自由空间传播路径损耗模型,若将应用范围扩展到一般的环境有待进一步研究(如城市地形、城郊地形等)。此外,还需要研究多天线无人机轨迹优化对通信性能的影响。

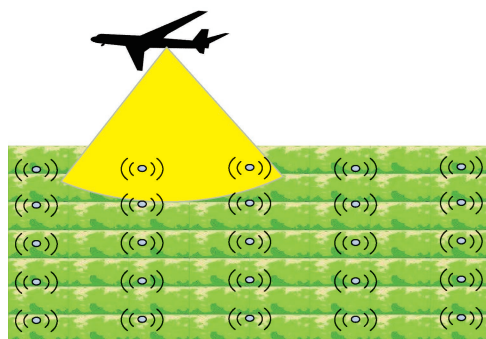


图6 基于无人机的物联网数据分发/收集

在无人机通信中,可通过优化无人机轨迹或三维空间位置实现任务完成时间的最小化、传感器发射能量的最小化等<sup>[37-43]</sup>。文献[37]采用无人机作为空中基站收集地面物联网节点的数据,提出了一种新架构综合优化无人机的三维位置、移动、设备—无人机连接和上行功率控制,实现无人机—物联网节点的可靠通信,使得物联网节点的总发射功率最小化。文献[38]研究了多无人机协作收集远端无线传感器网络数据中的路径规划,采用遗传算法、快速搜索随机树算法和最优快速搜索随机树算法进行路径规划,无人机协作完成给定航路点的访问和数据收集,但该文献没有给出如何确定航路点。文献[39]考虑大规模传感器网络的数据收集,将设计过程分解为网络部署、节点定位、锚点搜索、路径规划和数据收集,采用基于网格分解的 FPPWR 算法,保证总飞行路径最短。文献[40]在满足一定量的数据被可靠收集的前提下,通过优化传感器节点唤醒调度无人机轨迹来最小化传感器节点的最大能量消耗。该问题被建模为混合整数规划凸优化问题,应用连续的凸优化和迭代算法得到次优解。文献[41]采用无人机收集排列在一条直线上的传感器数据,目标是在满足传感器能量限制下完成一定量数据的收集并使得无人机的巡航时间最短,特别地,采用注水算法优化传感器发射功率,采用二项

搜索寻找最优的无人机飞行速度。文献[42]研究无人机多播系统，部署无人机向多个地面物联网节点分发一个共同文件，目标是在满足文件成功恢复概率的条件下，优化无人机轨迹以最小化任务完成时间，提出了一种基于虚拟基站部署的航路点设计方法，通过求解线性规划问题得到最优的航路点以访问各个航路点的无人机飞行速度。文献[43]提出了一种 fly-hover-and-communicate 协议，将地面物联网节点分解成多个互不相交的点簇，无人机按照顺序访问各个簇中心，通过优化无人机高度和天线波束宽度来最小化下行多播、下行广播和上行多址接入场景的任务完成时间。但是文献[37]至文献[43]均假设无人机知道各个地面物联网节点的实时位置信息，这会大幅度增加物联网传感器节点的成本。当节点位置信息未知时，提出的算法将失效。在这种情况下，设计有效的无人机轨迹并实现给定区域的数据有效分发/收集具有实际意义。

基于上述问题，考虑了矩形区域无人机数据多播如图 7 所示<sup>[44]</sup>。无人机采用有效的 ZigZag 轨迹来回扫描矩形区域，扫描方向垂直于矩形的长边，可有效减少矩形区域外的无人机飞行距离。假设无人机天线波束宽度可调，通过优化无人机天线波束宽度、飞行速度和飞行高度，可分别最小化无人机多播任务的完成时间和能量消耗。其中，矩形区域大小为  $6\text{ km} \times 5\text{ km}$ ，公共数据大小为  $10\text{ Mbit}$ ，带宽为  $1\text{ MHz}$ ，无人机发射功率为  $15\text{ dBm}$ 。完成时间比较如图 8 所示，针对完成时间最小化而言，最优高度为无人机允许的最大高度。此外，时间最小化消耗的时间优于能量最小化消耗的时间。当超过一定高度时，时间最小化消耗的时间与能量最小化消耗的时间趋于重合，这是由于当高度超过某个给定阈值时，两者的最优波束宽度都等于波束宽度的最小值。

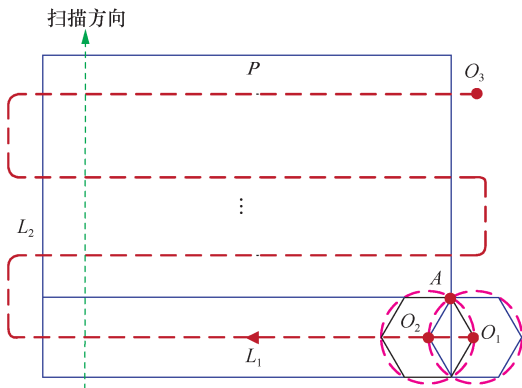


图 7 矩形区域无人机数据多播

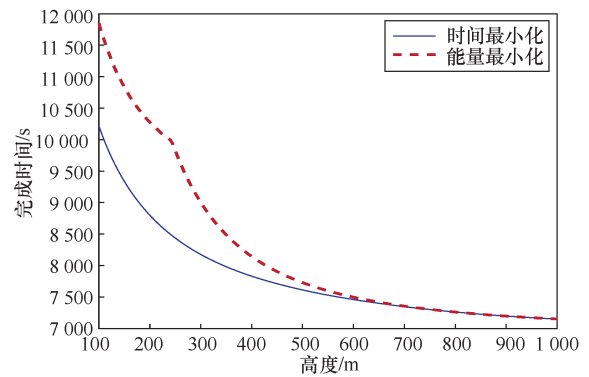


图 8 完成时间比较

能量消耗比较如图 9 所示，存在最优高度使得无人机能量消耗最小，此外，能量最小化消耗的能量优于时间最小化消耗的能量。当超过一定高度时，时间最小化消耗的能量与能量最小化消耗的能量图形重合，这是由于当高度超过某个给定阈值时，两者的最优波束宽度都等于波束宽度的最小值。

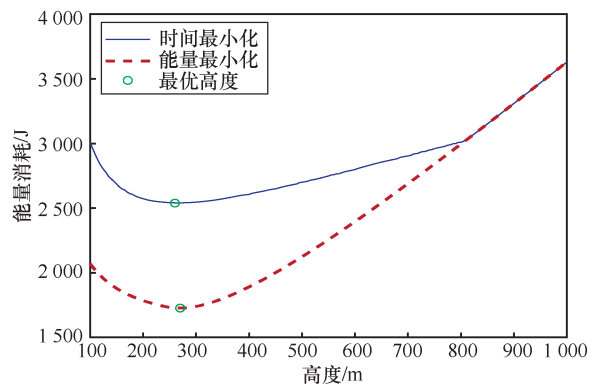


图 9 能量消耗比较

针对不同的部署区域形状，如何实现给定区域数据的有效分发/收集有待进一步研究，如凸多边形区域、凹多边形区域以及存在孔洞的多边形区域等。在无人机数据分发/收集中，受无人机的尺寸、重量和功率限制，可用能量和滞空时间有限，因此，最小化无人机数据分发/收集任务完成时间或最小化能量消耗是提升无人机通信系统性能的关键。考虑单无人机能量限制，研究多无人机协同实现不同形状区域数据的有效分发/收集具有实际意义。进一步考虑无人机的能量限制，还可研究多无人机协同完成不同形状多边形区域的物联网传感器数据的有效分发/收集，通过优化无人机轨迹、无人机任务分配、传感器节点分解、干扰抑制以及资源分配等方案实现通信能量效率和任务完成时间等性能的提升。利用多天线无人机，还可进一步提升物联网

传感器数据分发/收集的性能。

## 5 结束语

本文分析了无人机通信的信道建模、能耗模型的研究现状,总结了无人机在物联网中继、物联网数据分发/收集中的机会、挑战和方法,指出了轨迹优化、多天线多无人机协作等技术可有效增强物联网无线通信的性能,为无人机物联网无线通信系统的优化、设计提供了参考。在无人机物联网无线通信中,充分挖掘无人机的特性,选择合适的信道模型和无人机功率消耗模型,通过优化无人机轨迹、资源分配和多天线设计等实现通信服务质量、能量效率和任务完成时间等性能的提升,具有重要的理论价值和实际意义。

### 参考文献:

- [1] US Department of Transportation. Unmanned Aircraft System (UAS) service demand 2015-2035: literature review & projections of future usage[S]. 2013.
- [2] PwC. Global market for commercial applications of drone technology valued at over 127bn[R]. Pricewaterhouse Coopers, 2018.
- [3] FILIPPONE A. Flight performance of fixed and rotary wing aircraft[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [4] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [5] HAYAT S, YANMAZ E, MUZAFFAR R. Survey on unmanned aerial vehicle networks for civil applications: a communications viewpoint[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2016, 18(4): 2624-2661.
- [6] LIN X, YAJNANARAYANA V, MURUGANATHAN S D, et al. The sky is not the limit: LTE for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 204-210.
- [7] JAWHAR I, MOHAMED N, AL-JAROODI J, et al. Communication and networking of UAV-based systems: classification and associated architectures[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2017(84): 93-108.
- [8] YALINIZ R I B, EL-KEYI A, YANIKOMEROGLU H, et al. Efficient 3D placement of an aerial base station in next generation cellular networks[C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2016: 1-5.
- [9] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Efficient deployment of multiple unmanned aerial vehicles for optimal wireless coverage[J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(8): 1647-1650.
- [10] ALZENAD M, EL-KEYI A, LAGUM F, et al. 3D placement of an unmanned aerial vehicle base station (UAV-BS) for energy-efficient maximal coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017, 6(4): 434-437.
- [11] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.
- [12] YANMAZ E, KUSCHNIG R, BETTSTETTER C. Channel measurements over IEEE 802.11a-based UAV-to-ground links[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'11). IEEE, 2011: 1280-1284.
- [13] ZENG Y, XU X, ZHANG R. Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(4): 2233-2246.
- [14] HE H, ZHANG S, ZENG Y, et al. Joint altitude and beamwidth optimization for UAV-enabled multiuser communications[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2): 344-347.
- [15] ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient UAV communication with trajectory optimization[J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2017, 16(6): 3747-3760.
- [16] SIMUNEK M, PECHAC P, FONTAN F P. Excess loss model for low elevation links in urban areas for UAVs[J]. Radio Engineering, 2011, 20(3): 561-568.
- [17] CAI X S, GONZALEZ-PLAZA A, ALONSO D, et al. Low altitude UAV propagation channel modelling[C]//2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE, 2017: 1443-1447.
- [18] GODDEMEIER N, DANIEL K, WIETFELD C. Coverage evaluation of wireless networks for unmanned aerial systems[C]//IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM'10). IEEE, 2010: 1760-1765.
- [19] TAVARES T, SEBASTIAO P, SOUTO N, et al. Generalized LUI propagation model for UAVs communications using terrestrial cellular networks[C]//IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-Fall'15). IEEE, 2015: 1-6.
- [20] AL-HOURANI A, GOMEZ K. Modeling cellular-to-UAV path-loss for suburban environments[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017(99): 1.
- [21] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Global Communications Conference. IEEE, 2014: 2898-2904.
- [22] GODDEMEIER N, WIETFELD C. Investigation of air-to-air channel characteristics and a UAV specific extension to the rice model[C]//IEEE Global Communications (GLOBECOM'15). IEEE, 2015: 1-5.
- [23] ONO F, OCHIAI H, MIURA R. A wireless relay network based on unmanned aircraft system with rate optimization[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2016, 15(11): 7699-7708.
- [24] AZARI M M, ROSAS F, CHEN K C, et al. Joint sum-rate and power gain analysis of an aerial base station[C]//2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). IEEE, 2016: 1-6.
- [25] AZARI M M, ROSAS F, CHEN K C, et al. Ultra reliable UAV communication using altitude and cooperation diversity[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(1): 330-344.
- [26] ZENG Y, XU J, ZHANG R, et al. Energy minimization for wireless communication with rotary-wing UAV[J]. Computer Science, 2018: 1-31.
- [27] ZHAN P, YU K, SWINDLEHURST A L. Wireless relay communications with unmanned aerial vehicles: performance and optimization[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2011, 47(3): 2068-2085.
- [28] CHEN Y, FENG W, ZHENG G. Optimum placement of UAV as re-

- lays[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2): 248-251.
- [29] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Throughput maximization for UAV-enabled mobile relaying systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 2016, 64(12): 4983-4996.
- [30] ZHANG S H, ZHANG H L, DI B Y, et al. Joint trajectory and power optimization for UAV relay networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(1): 161-164.
- [31] ZHANG J W, ZENG Y, ZHANG R. Spectrum and energy efficiency maximization in UAV-enabled mobile relaying[C]//2017 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2017: 1-6.
- [32] SONG Q H, ZHENG F C. Energy efficient multi-antenna UAV-enabled mobile relay[J]. China Communications, 2018, 15(8): 41-50.
- [33] SONG Q H, JIN S, ZHENG F C. Joint power allocation and beamforming for UAV-enabled relaying systems with channel estimation errors[C]//2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring). IEEE, 2018: 1-5.
- [34] ASADI A, WANG Q, MANCUSO V. A survey on device-to-device communication in cellular networks[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2014, 16(4): 1801-1819.
- [35] MOTLAGH N H, BAGAA M, TALEB T. UAV-based IoT platform: a crowd surveillance use case[J]. IEEE Communications Magazine, 2017, 55(2): 128-134.
- [36] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Mobile Internet of things: can UAVs provide an energy-efficient mobile architecture[C]//2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). IEEE, 2016: 1-6.
- [37] MOZAFFARI M, SAAD W, BENNIS M, et al. Mobile unmanned aerial vehicles (UAVs) for energy-efficient Internet of things communications[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7574-7589.
- [38] ALEJO D, COBANO J A, HEREDIA G, et al. Efficient trajectory planning for WSN data collection with multiple UAVs[M]. Berlin: Springer, 2015.
- [39] WANG C, MA F, YAN J, et al. Efficient aerial data collection with UAV in large-scale wireless sensor networks[J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 11(11): 1-19.
- [40] ZHAN C, ZENG Y, ZHANG R. Energy-efficient data collection in UAV enabled wireless sensor network[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2017(99): 1.
- [41] GONG J, CHANG T H, SHEN C, et al. Aviation time minimization of UAV for data collection over wireless sensor networks[J]. Computer Science, 2018.
- [42] ZENG Y, XU X, ZHANG R. Trajectory design for completion time minimization in UAV-enabled multicasting[J]. IEEE Transactions Wireless Communications, 2018, 17(4): 2233-2246.
- [43] HE H, ZHANG S, ZENG Y, et al. Joint altitude and beamwidth optimization for UAV-enabled multiuser communications[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(2): 344-347.
- [44] SONG Q H, JIN S, ZHENG F C, et al. Completion time and energy consumption minimization for UAV-enabled multicasting[J]. IEEE Wireless Communications Letter, 2019: 1.

## [作者简介]



宋庆恒（1980—），男，湖北崇阳人，东南大学博士生，主要研究方向为无人机通信、MIMO 和物联网通信等。



郑福春（1963—），男，澳大利亚籍，东南大学教授，主要研究方向为超密集网络、绿色通信、低时延通信、大规模接入和大规模天线系统等。