

基于无人机基站的节能通信部署研究

李莹雪¹ 赵继军^{1 2} 魏忠诚^{1 2}

¹(河北工程大学信息与电气工程学院 河北 邯郸 056038)

²(河北工程大学河北安防信息感知与处理重点实验室 河北 邯郸 056038)

摘 要 为保证用户服务质量(Quality of Service, QoS),针对用户分布不均匀状态,解决无人机基站以最小发射功率覆盖相同数量用户问题,提出一种基于最小包围圆和 K-means 算法的无人机优化部署方法。利用贪心算法思想将部署问题解耦为垂直和水平放置问题,分别通过求解最优性确定无人机基站三维部署位置。利用聚类分析方法构建用户簇,采用最小包围圆思想对无人机基站水平位置进行优化;以最小化通信能耗为目标,建立无人机基站通信模型确定无人机最优飞行高度;联合两种优化方案确定三维部署位置。针对用户不同分布状态对无人机基站发射功率的仿真实验,验证了部署方法的有效性。

关键词 无人机基站 应急通信 空对地通信 三维部署 节能 服务质量

中图分类号 TP393 文献标志码 A DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2022.05.024

ENERGY – EFFICIENT DEPLOYMENT OF UNMANNED AERIAL VEHICLE BASE STATION

Li Yingxue¹ Zhao Jijun^{1 2} Wei Zhongcheng^{1 2}

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

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

Abstract Aiming at the uneven distribution of user, we propose a UAV optimal deployment method based on the minimum enclosing circle and K-means algorithm, so as to solve the problem that the UAV base station covers the same number of users with the minimum transmission power and ensure the quality of service(QoS) of users. The greedy algorithm was used to simplify the deployment problem into vertical and horizontal placement, and the optimality was respectively solved to determine the 3D deployment location of the UAV base station. We adopted cluster analysis to construct user clusters and applied minimum enclosing circle to optimize the horizontal deployment position of UAV base stations. Aimed at minimizing communication energy consumption, a communication model of UAV base station was established to determine the optimal flight altitude. The 3D deployment location was determined by combining both optimal solutions. The simulation experiments were carried out on the UAV base station transmit power for different user distribution states, which verified the effectiveness of the deployment method.

Keywords UAV base station Emergency response Aerial to ground communication Three-dimensional deployment Energy-efficient Quality of service

0 引 言

当面临突发公共事件如自然灾害、社会安全事件或者事故灾难时,现有的通信网络、地面基站可能被破

坏,导致网络超载或瘫痪^[1-2]。因此,建立一个健壮、能够快速部署、成本低廉的应急通信机制对保障人民生命财产安全是至关重要的。现有的应急通信系统主要是由应急通信车和卫星组成,但是受到道路状况、调用距离、受灾面积等因素影响,通信车往往难以精准定

收稿日期:2020-02-19。国家重点研发计划项目(2018YFF03010040);河北省自然科学基金项目(F2018402251)。李莹雪,硕士生,主研领域:物联网通信。赵继军,教授。魏忠诚,博士。

位并保证响应速度。而随着小型无人机技术的成熟,在应急通信中通过部署无人机基站恢复网络通信成为近年来国内外研究的热点。无人机具有可移动性、灵活性、高度可控性,以及建立良好视距链路(Line of Sight ,LOS) 通信特点^[3-5]。在突发事件区域通过适当地部署无人机基站,可以为地面用户提供可靠、低成本的无线通信解决方案。但由于技术和条件所限,很难在短时间内调用大量的无人机,所以必须充分利用每架无人机,使无人机基站(UAV base stations ,UAV-BSs) 以最小发射功率覆盖相同的用户数量。

针对以上问题,本文提出一种面向非均匀分布设备的无人机基站部署方法,采用最小包围圆和 K-means 算法实现位置优化。通过解决最小包围圆问题,利用 K-means 算法以及 Voronoi 图构建水平部署位置;利用路径损耗及覆盖半径-飞行高度间函数关系,获得最佳飞行高度;最后结合高度及水平最优位置获得无人机基站三维位置,使无人机基站以最小的传输功率覆盖相同数量用户。

1 相关工作

无人机基站辅助网络通信已经成为研究热点,本节对无人机基站部署中的两个关键问题,空对地信道模型建立以及最优无人机部署相关约束条件进行了文献调研。

在空对地信道模型建立过程中,无线信号传播受发射机和接收机之间介质的影响。与地面通信相比,空对地通信更容易受到覆盖范围和容量影响;与以视距链路为主导的空中通信相比,空对地通信更容易阻塞。因此,无人机通信系统的优化设计及部署需要更精准的空对地信道模型。文献[6]提出一种基于仰角的视距链路函数方法,得到了高密度城市环境中无人机基站和地面接收机之间的视距链路连接概率,但是没有建立完全阴影衰落模型。文献[7]研究了空对地路径损耗、延迟和衰落的仿真及测量对比。文献[8]中提出了用于城市环境的无人机基站和地面用户通模型,建立了关于仰视角的视距链路函数,同时考虑了无人机基站与地面用户之间的视距通信链路和非视距链路(Non Line of Sight ,NLOS) 连接,并推导出每种链路发生概率。

近年来针对单无人机基站最优部署的研究越来越多,文献[9]采用 S 型视距链路函数模型优化了不同性能指标下无人机飞行高度。文献[10]和文献[11]讨论了无人机中继定位问题,但固定了无人机飞行高度,并且不考虑城市环境对通信性能的影响。文献

[12]中对上述两个问题进行了论述,通过将平均路径损耗与阈值进行比较确定覆盖范围,得到了无人机基站最大覆盖范围与飞行高度间函数关系。文献[13]假设无人机基站以最大功率传输,通过确定三维位置,增加单无人机基站用户覆盖数量。

但是无人机基站部署问题与多种因素相关,如部署环境、无人机载能、无人机数量、飞行高度等,因此不能只考虑单无人机的最优部署^[14]。文献[15]提出了一种在异构网络中降低网络总延时的无人机最优分布方法。定位问题描述为设备部署位置的极值问题,利用熵的概念形成最优算法解决无人机最优部署。文献[16]提出了一种用于无人机和多用户间的任务分配模型。采用博弈论理论针对无人机部署和任务分配问题提出了一种新的算法,该算法能够提高网络性能。文献[17]研究了满足地面静态用户对响应速率要求的无人机基站最优位置部署方法。文献[18]提出一种新的高速缓存的无人机框架,最大限度地提高了用户的体验质量(Quality of Experience ,QoE),同时最小化了无人机基站的发射功率。

综上所述,对无人机基站部署问题中信道分配、网络延迟、响应速度、能耗等约束条件进行了研究,但是考虑用户分布对节能通信影响较少。因此,在空对地信道模型以及无人机部署问题研究基础上,联合考虑用户非均匀分布状态及无人机基站发射功率,利用贪心算法思想提出基于最小包围圆和 K-means 的优化部署方法并进行了仿真实验。

2 系统模型

在某城市环境中包含一组使用蜂窝网络通信的地面用户设备,假设该区域因地面基站损毁导致网络瘫痪。为保证用户设备对外信号发出的连续性,面向非均匀随机分布的地面设备部署多架无人机基站辅助通信进行流量卸载,实现无人机部署数量最少、通信能耗最低并且满足用户设备通信服务质量需求。建立典型的无人机基站部署场景及通信模型如图 1 所示。

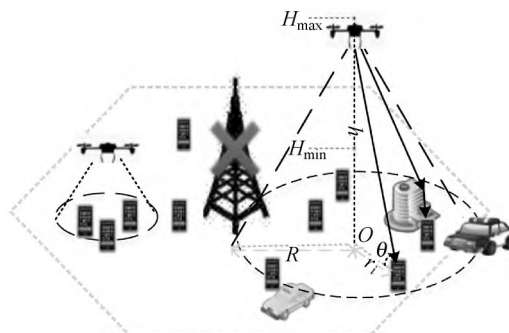


图1 无人机基站部署场景及通信模型

无人机基站位置表示为 $U_D(x_D, y_D, h)$, 其中 U 表示无人机基站集合。 $L_i(x_i, y_i)$ 表示用户 i 的坐标位置, 其中 L 表示用户设备集合。 H_{\min} 是无人机允许飞行的最低高度, H_{\max} 是无人机飞行的最大高度。

针对已经提出的几种空对地信道模型, 考虑模型的通用性, 本文采用基于仰角视距链路函数模型^[6]。如图1所示的无人机基站通信模型中, R 是无人机基站覆盖半径, θ 是用户设备到无人机基站的仰视角, h 和 r_i 分别是无人机基站高度以及与用户间水平距离, d_i 表示无人机基站与用户 L_i 之间的直线距离。

2.1 设备连接概率

无人机基站的信号传播主要是依靠视距链路和非视距链路, 链路的连接概率取决于部署环境、建筑物的高度和密度、设备仰角, 在保证通信成功的情况下, 地面用户 L_i 和无人机基站间视距链路连接概率表示为:

$$P_{\text{LOS}} = \frac{1}{1 + a \exp\left(-b\left(\frac{180}{\pi}\theta - a\right)\right)} \quad (1)$$

式中: a 和 b 取决于设备所处环境的恒定参数^[19]。根据图1中用户 L_i 和无人机的空间关系可知 $\theta = \arctan\left(\frac{h}{r_i}\right)$,

$$r_i = \sqrt{(x_D - x_i)^2 + (y_D - y_i)^2}.$$

非视距连接概率表示为:

$$P_{\text{NLOS}} = 1 - P_{\text{LOS}} \quad (2)$$

式中: P_{LOS} 可以看作是 θ 和环境参数的一个连续函数, 当仰角增加时视距链路连接概率增加。如图2所示, 其中曲线表示根据文献[19]计算的四种城市环境中视距链路连接概率。

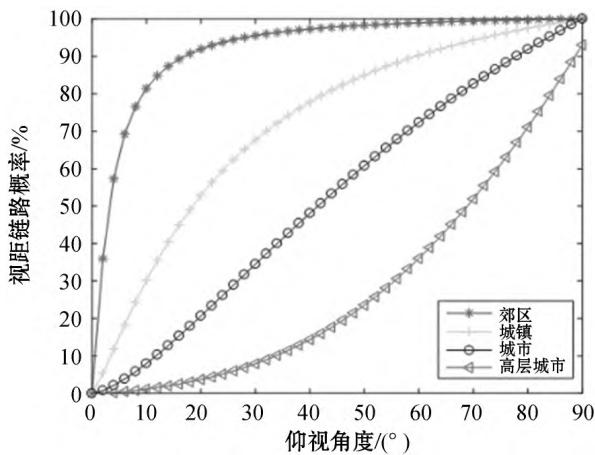


图2 不同环境下视距连接概率与仰角关系

根据仿真图形可知当设备仰角增加时视距链路连接概率增加, 因此单无人机基站可以通过增加无人机飞行高度使设备仰角增加, 从而可以提高视距链路连接概率。

2.2 路径损耗模型

由于无人机基站部署过程中通信信道长期改变, 因此本文不考虑无线信道的随机特性只处理平均路径损耗。视距链路路径损耗和非视距链路路径损耗以 dB 为单位, 损耗模型为:

$$PL_{\text{LOS}} = 20\log\left(\frac{4\pi f_c d_i}{c}\right) + \eta_{\text{LOS}} \quad (3)$$

$$PL_{\text{NLOS}} = 20\log\left(\frac{4\pi f_c d_i}{c}\right) + \eta_{\text{NLOS}} \quad (4)$$

式中: f_c 是载波频率; $d_i = \sqrt{h^2 + r_i^2}$; η_{LOS} 和 η_{NLOS} 分别是视距链路和非视距链路的平均附加路径损耗。当部署环境中相关地形未知时, 无法确定是以视距通信链路为主还是非视距通信链路为主^[20]。因此, 本文处理平均路径损耗:

$$PL = P_{\text{LOS}} \times PL_{\text{LOS}} + P_{\text{NLOS}} \times PL_{\text{NLOS}} \quad (5)$$

将式(1)、式(3)和式(4)代入式(5), 利用仰视角和飞行高度 h 以及覆盖半径 R 间函数, 可以整理出关于仰视角和覆盖半径的平均路径损耗表达式:

$$PL = \frac{A}{1 + a \exp\left(-b\left(\frac{180}{\pi}\theta - a\right)\right)} + 20\log\left(\frac{R}{\cos\theta}\right) + 20\log\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right) + \eta_{\text{NLOS}} \quad (6)$$

式中: $A = \eta_{\text{LOS}} - \eta_{\text{NLOS}}$ 和 $20\log\left(\frac{4\pi f_c}{c}\right)$ 为常数; PL 是关于高度和覆盖半径的函数。

3 通信节能部署方法

3.1 无人机基站数量初始估计

无人机水平位置及部署数量与用户分布情况有关。为优化水平部署位置, 需要根据覆盖范围或基站容量计算无人机基站数量。本文研究部署多架无人机基站为用户设备提供可靠性通信, 因此以无人机基站容量为约束条件计算无人机基站部署数量。

无人机部署数量由单无人机基站允许接入最大设备数量上限和用户数量决定。无人机基站允许接入最大设备数量 N_u 计算公式为:

$$N_u = \left\lfloor \frac{C_{\text{BS}}}{S} \right\rfloor \quad (7)$$

式中: $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示向下取整函数; S 是用户目标下载速率; $C_{\text{BS}} = B \times \eta$ 是无人机基站容量, B 是无人机基站的总带宽, η 是系统的频谱效率。

无人机基站初始部署数量 N_{BS} 计算公式为:

$$N_{BS} = \left\lceil \frac{N}{N_u} \right\rceil \quad (8)$$

式中: $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整函数; N 是区域内需要覆盖的用户总数。

3.2 水平位置优化

为保障地面用户和无人机基站间的连接概率, 首先需要对地面用户进行分簇^[21]。采用以距离为约束条件的 K-means 聚类算法对 N 个用户分簇, 根据计算出的初始无人机数量将用户分为 N_{BS} 簇, 其中无人机基站水平坐标为用户簇的质心, 表示为 $V_D(x_D, y_D)$, $D \in N_{BS}$ 。得到用户分簇列表后, 为实现面向非均匀分布设备的无人机基站节能通信, 采用最小包围圆思想进行水平位置优化。

无人机基站覆盖区域为圆形, C_i 表示覆盖半径为 R 的覆盖区域。对覆盖区域 C_i 进行优化, 使得它包围簇中所有用户, 即当用户 L_i 位于距覆盖区域 C_i 中心最远时, 该用户 L_i 可以被覆盖。令 $U_i \in \{0, 1\}$ 作为二元决策变量, 当用户 L_i 位于覆盖区域内时, $U_i = 1$, 否则 $U_i = 0$ 。因此可以写成:

$$(x_i - x_D)^2 + (y_i - y_D)^2 \leq R^2 + M(1 - U_i) \quad (9)$$

式中: M 是一个满足约束条件的无限大常数, 当 $U_i = 0$ 时同样满足约束条件。水平部署问题定义为:

$$\max_{x_i, y_i, U_i} \sum_{i \in L} U_i \quad (10)$$

$$\text{s. t. } (x_i - x_D)^2 + (y_i - y_D)^2 \leq R^2 + M(1 - U_i)$$

$$\forall i \in L \quad U_i \in \{0, 1\}$$

(x_i^D, y_i^D) 以及 $L^{\text{cov}} \in L$ 分别表示通过求式 (10) 得到的覆盖区域 C_i 的中心水平位置以及覆盖用户集合。式 (10) 的一个混合整数非线性规划问题 (Mixed integer non-linear programming, MINLP), 可以通过 MOSEK 工具解决该问题。为有效地利用无人机发射功率, 以较低的发射功率满足相同数量用户的通信质量需求, 需要对无人机基站的水平部署位置再次进行优化。由于覆盖边缘区域可能不存在用户设备, 可以缩小无人机基站覆盖半径, 实现以较低发射功率覆盖相同数量的用户, 该问题称为最小包围圆问题。因此在设备聚类后为实现节能通信采用最小包围圆思想进行位置优化, 优化问题描述为:

$$\min_{x_i^D, y_i^D, r} r \quad (11)$$

$$\text{s. t. } (x_i - x_D)^2 + (y_i - y_D)^2 \leq r^2, \forall i \in L^{\text{cov}}$$

通过求解式 (11) 得到优化后覆盖区域中心 (x_D^*, y_D^*) 和最小覆盖半径 R_i 。式 (11) 可以转换为一个二阶锥规划问题 (Second Order Cone Problem, SOCP), 通过 CXV 工具解决。其中距离无人机基站水平位置最远

的用户为边缘用户, 与覆盖区域其他用户比具有最大路径损耗。

3.3 最优飞行高度

为保证用户服务质量, 用户设备的接收功率必须超过一定的阈值 $P_{r-\min}$, 由式 (6) 可以看出, 当环境确定、无人机基站部署位置确定时, 所有和无人机基站水平位置距离相等的地面用户路径损耗相同。因此, 在无人机基站覆盖区域边缘的用户存在最大路径损耗 PL_{th} , 即覆盖范围内任意用户 L_i 的路径损耗都小于等于某一阈值 $PL(h, r_i) \leq PL_{th}$, 则该无人机基站覆盖区域内所有用户都满足通信服务质量, 并且无人机基站以最低的传输功率覆盖相同数量用户。无人机基站最小发射功率表示为:

$$P_{t-\min} = P_{r-\min} + PL_{th} \quad (12)$$

式中: $P_{r-\min}$ 为用户最小接收功率; PL_{th} 表示无人机基站覆盖范围内最大路径损耗。

无人机基站边缘用户存在最大路径损耗 PL_{th} 。由于 PL (dB) 方程是隐式方程, 为了获得覆盖范围与飞行高度间最优关系, 需要寻找式 (6) 中半径-高度曲线方向改变的临界点。满足 $\frac{\partial R}{\partial h} = 0$, 公式如下:

$$\frac{\pi}{9 \ln(10)} \tan(\theta_{OPT}) + \frac{abA \exp\left(-b\left(\frac{180}{\pi}\theta_{OPT} - a\right)\right)}{\left(a \exp\left(-b\left(\frac{180}{\pi}\theta_{OPT} - a\right)\right) + 1\right)^2} = 0 \quad (13)$$

图 3 表示当最大路径损耗一定时, 如 $PL_{th} = 100$ dB 和 $PL_{th} = 103$ dB, 无人机飞行高度和覆盖半径间函数关系。由图可知在同一环境不同最大路径损耗条件下, 覆盖半径和飞行高度间有且只有一个平稳点。通过求解式 (13) 可以得到某特定环境中最优仰视角度 θ_{OPT} 。根据公式计算, 获得在郊区、农村、城镇和城市四种环境中, 设备和无人机基站间最优仰视角度分别为 20.34° 、 42.44° 、 54.62° 、 75.52° 。

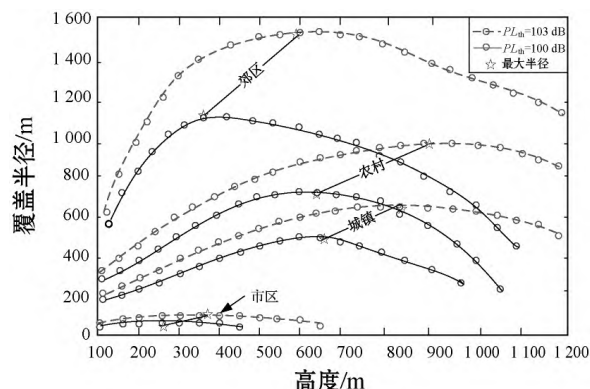


图3 路径损耗固定时不同环境下覆盖区域半径和部署高度
综上所述, 在无人机部署环境、最小覆盖半径已知

时,无人机最优飞行高度表示为:

$$H_{\text{OPT}} = f(R_i)$$

(14)

式中: H_{OPT} 表示覆盖半径为 R_i 的最优飞行高度。但是根据无人机基站水平位置优化结果分析可知,边缘用户设备可能不具有最佳仰视角 θ_{OPT} ,因此假设存在某一飞行高度能够降低覆盖范围内所有用户路径损耗,根据飞行高度及路径损耗间关系可知在最低飞行高度和最佳飞行高度间,随着飞行高度增加路径损耗减少,如图 4 所示。因此通过优化无人机基站水平部署位置确定最小覆盖半径后,无人机基站最佳飞行高度为: $h^* = \max(H_{\min}, H_{\text{OPT}})$,当无人机基站飞行高度为 h^* 时能够以最小发射功率覆盖相同数量的地面用户。

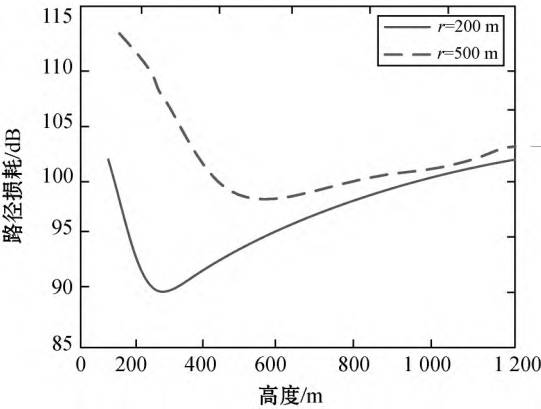


图 4 半径固定时路径损耗和飞行高度间函数关系

3.4 无人机基站三维位置部署算法

结合无人机最优水平部署位置和最佳飞行高度,利用贪心算法思想通过解决聚类 and 最小包围圆问题,即可得到 N_{BS} 架无人机基站的最优三维部署。无人机基站最优三维位置部署算法如算法 1 所示。

算法 1 无人机基站三维最优位置部署

输入: $a, b, \eta_{\text{LOS}}, \eta_{\text{NLOS}}, (x_i, y_i), \theta_{\text{OPT}}, H_{\min}, P_{r-\min}$ 。
输出: (x_D^*, y_D^*, h^*) 。
(1) 根据无人机基站容量和用户下载速率计算无人机基站数量 N_{BS} 。
(2) 通过求解式(10)得到初始无人机基站水平位置 (x_i^D, y_i^D) 及覆盖用户集合 L^{cov} 。
(3) 利用最小包围圆思想对无人机基站位置进行优化,获得最小覆盖半径 R_i 及最优水平位置 (x_D^*, y_D^*) 。
(4) 根据最小覆盖半径及路径损耗模型,计算无人机飞行高度 h^* 。

4 数值仿真

利用 MATLAB 软件作为仿真平台,仿真实验面积为 $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$; L 个用户随机分布在该区域;在文献[13]和文献[19]基础上给出了不同环境下空对地信

道参数的数值以及仿真参数,如表 1 所示。为了描述用户分布情况,本文引入变异系数(CoV)进行描述,即使用适当定义的点间距离度量值来表示与均匀性的偏差^[22]。CoV 定义为 $C_d = \frac{\sigma_d}{\mu_d}$,其中 μ_d 和 σ_d 分别是平均值和标准差。 $C_d = 1$ 表示用户均匀分布情况; $C_d > 1$ 表示用户在热点周围形成集群的情况。

表 1 城市参数及仿真参数

参数	描述	数值
a	环境参数 1	12.08
b	环境参数 2	0.11
η_{LOS}	LOS 附加路径损耗	1.6
η_{NLOS}	NLOS 附加路径损耗	23
f_c	载波频率	2 GHz
B	无人机基站总带宽	20 MHz
η	频谱效率	2.5 bit/s/Hz
H_{\min}	最低飞行高度	100 m
S	用户下载速率	1 Mbit/s
P_t	无人机基站最大发射功率	37 dBm
$P_{r-\min}$	用户接收功率	-70 dBm

在城市环境中当无人机基站最大覆盖半径固定时,如 $r=200 \text{ m}$ 和 $r=500 \text{ m}$,空对地路径损耗与高度之间关系如图 4 所示。根据图中曲线趋势可知,当无人机飞行高度增加时,路径损耗首先减少然后增加,并且存在唯一路径损耗最低点。这是因为在无人机飞行高度较低时,由于存在建筑物的遮挡以及其他物体的反射,采用非视距链路通信概率远高于视距链路通信概率,且非视距链路具有较高的额外路径损耗,随着飞行高度增加视距通信概率也增加,因此路径损耗首先降低。但是路径损耗也与无人机基站和用户设备之间的距离有关,当无人机飞行至某一特定高度之后,无人机基站和用户间距离增加,在通信链路上自由空间损耗增加并且占主导地位,因此随着高度的增加路径损耗也增加。结合图 3 和图 4 可知,在某一城市环境中存在唯一最佳无人机飞行高度,该飞行高度使无人机基站覆盖面积最大且无人机基站和用户间路径损耗最小。随着无人机基站水平位置优化,在无人机最低飞行高度和最佳飞行高度之间,存在某一飞行高度,该飞行高度能满足无人机基站以最小发射功率覆盖相同数量用户的需求。

图 5 表示不同变异系数下用户分布情况。图 5(a)是具有泊松特点的用户随机分布情况 $C_d = 1$;图 5

(b) 具有超泊松分布特点的用户分布 $C_d = 6$ 。

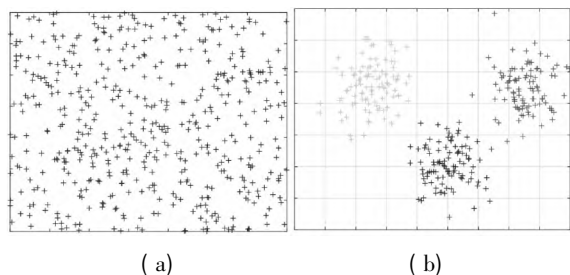


图5 具有泊松和超泊松特性的设备分布

图6显示了采用K-means算法下,1000个用户分簇情况和无人机基站水平位置情况,实验中每个设备簇包括一个簇头节点,该位置表示无人机基站的水平位置。图中“黑点”表示分布的用户,“星”表示无人机基站水平投影位置。根据Voronoi图特点,每个多边形内有一个生成元;每个多边形内点到该生成元距离短于到其他生成元距离,因此满足覆盖范围内用户 L_i 通信链路上路径损耗都小于等于 PL_{th} ,能够保证用户服务质量。根据式(12)预设的无人机基站数量进行用户分簇,部署无人机基站满足该区域设备通信需求。仿真结果表示分布状况为 $C_d = 1$ 的用户分簇,由于无人机基站间覆盖重叠区域,无人机覆盖范围内设备数量增加且存在设备间干扰,导致无人机基站不能满足覆盖范围内所有设备正常通行,因此该实验中设备覆盖率约为91%。通过优化无人机水平位置解决最小包围圆问题,能够解决该问题提高设备覆盖率。

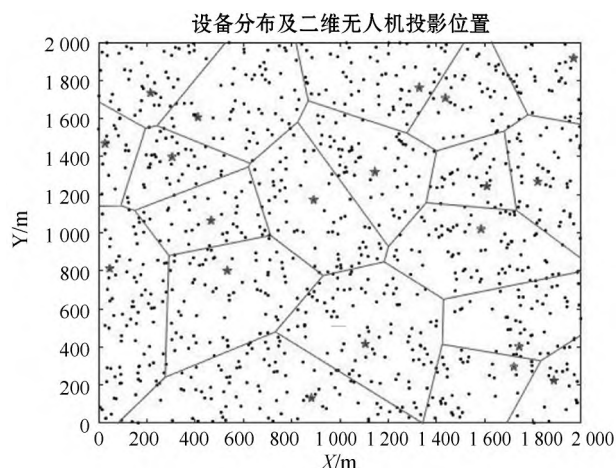


图6 设备分簇

将本文方法部署在不同环境中,针对不同用户密度进行仿真对比,假设用户密度分别为 $\lambda = 9$ 个/ km^2 和 $\lambda = 6$ 个/ km^2 。图7显示了用户变异系数和平均传输功率间关系对比。由图可知,在变异系数较低时,因为用户均匀分布在覆盖区域内,在覆盖边缘区域的用户有较大的路径损耗,为保证用户正常通信,因此无人机基站的平均发射功率较高。但是随着变异系数的增加,覆盖区域内的设备都趋近于无人机基站水平

位置,而覆盖边缘位置有少量或没有用户,这种情况下可以缩小覆盖半径降低飞行高度,以较低的发射功率覆盖设备集群,实现无人机基站的节能通信。

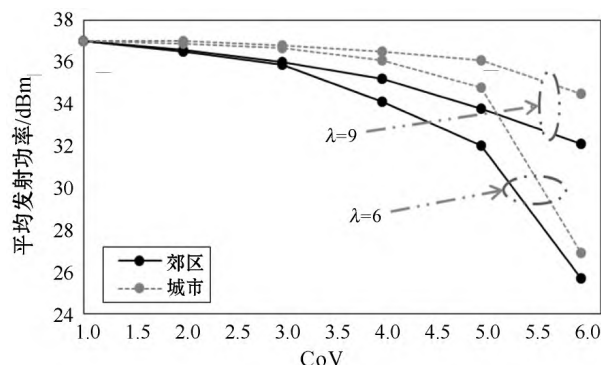


图7 平均发射功率和CoV间函数关系

在相同部署环境中,将本文方法与K-means部署方法进行对比。基于K-means的无人机基站部署方法是将用户设备分为 N_{BS} 簇构建Voronoi图,其中无人机基站水平位置为用户簇中心位置,而本文方法与K-means方法的区别是利用最小包围算法对水平位置及覆盖半径进行优化。图8表示随着用户变异系数增加,本文方法与K-means方法实验对比结果。可以看出,随着用户变异系数增加,本文提出的基于最小包围圆的优化部署方法与直接采用K-means部署方法相比,可降低约60%的无人机基站发射功率实现了减少无人机通信能耗的目的。由于该部署方法在计算时考虑到了边缘设备最大路径损耗问题,使无人机基站能够以更小的发射功率,覆盖相同的设备集群,因此性能优于直接采用K-means部署方法。当变异系数为1时,设备均匀分布在覆盖范围内,通过优化部署后的覆盖半径变化较小,因此本文方法与K-means方法实验结果近似。由于在实际应用中用户分布状态为非均匀分布,因此本文主要针对非均匀分布状态下的设备,提出无人机基站的节能通信部署方法,该部署方法具有一定的实用性。

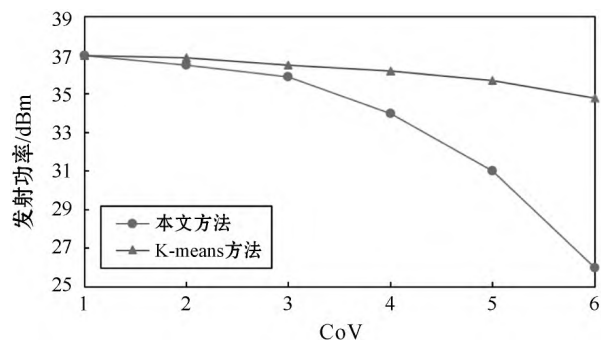


图8 用户变异系数与发射功率间函数

通过对无人机基站发射功率的仿真实验,验证了面向非均匀分布用户基于最小包围圆和K-means算法的无人机基站节能通信部署方法的可行性。

5 结 语

本文提出一种面向非均匀分布用户的无人机基站节能通信方法。根据用户通信服务质量需求,采用基于最小包围圆和 K-means 算法,使无人机基站以最小传输功率提供网络服务,通过将问题解耦为垂直与水平最优解的方法,确定无人机基站最优三维部署。仿真结果表明无人机飞行高度和路径损耗存在唯一最优解,即在相同部署环境中无人机基站和地面用户间存在唯一最优仰视角,同时随着地面用户变异系数增加无人机基站的发射功率明显降低,验证了本文方法的可行性。本文的研究工作考虑了无人机基站的静态部署问题,在未来研究中,将对无人机基站移动节能策略进行研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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, 2021(8): 2002 – 2015.
- [3] 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.
- [4] Bor-Yaliniz I, Yanikomeroglu H. The new frontier in RAN heterogeneity: Multi-tier drone-cells[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(11): 48 – 55.
- [5] Kalantari E, Shakir M Z, Yanikomeroglu H, et al. Backhaul-aware robust 3D drone placement in 5G + wireless networks[C]//2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), 2017: 109 – 114.
- [6] Feng Q, Tameh E K, Nix A R, et al. WLCp2-06: Modeling the likelihood of line-of-sight for air-to-ground radio propagation in urban environments [C]//IEEE Globecom 2006, 2006: 1 – 5.
- [7] Matolak D W, Sun R. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 66(1): 26 – 44.
- [8] Holis J, Pechac P. Elevation dependent shadowing model for mobile communications via high altitude platforms in built-up areas[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2008, 56(4): 1078 – 1084.
- [9] Hayajneh A M, Zaidi S A R, McLernon D C, et al. Optimal dimensioning and performance analysis of drone-based wireless communications [C]//2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2016: 1 – 6.
- [10] Rohde S, Putzke M, Wietfeld C. Ad hoc self-healing of OFDMA networks using UAV-based relays[J]. Ad Hoc Networks, 2013, 11(7): 1893 – 1906.
- [11] Li X, Guo D, Yin H, et al. Drone-assisted public safety wireless broadband network [C]//2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2015: 323 – 328.
- [12] Al-Hourani A, Kandeepan S, Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569 – 572.
- [13] Bor-Yaliniz R I, El-Keyi A, Yanikomeroglu H. Efficient 3-D placement of an aerial base station in next generation cellular networks [C]//2016 IEEE International Conference on Communications (ICC), 2016: 1 – 5.
- [14] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, et al. A tutorial on UAVs for wireless networks: Applications, challenges, and open problems [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2334 – 2360.
- [15] Sharma V, Sabatini R, Ramasamy S. UAVs assisted delay optimization in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Communications Letters, 2016, 20(12): 2526 – 2529.
- [16] Saad W, Han Z, Basar T, et al. A selfish approach to coalition formation among unmanned air vehicles in wireless networks [C]//2009 International Conference on Game Theory for Networks, 2009: 259 – 267.
- [17] Han Z, Swindlehurst A L, Liu K R. Optimization of MANET connectivity via smart deployment/movement of unmanned air vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2009, 58(7): 3533 – 3546.
- [18] Chen M, Mozaffari M, Saad W, et al. Caching in the sky: Proactive deployment of cache-enabled unmanned aerial vehicles for optimized quality-of-experience [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(5): 1046 – 1061.
- [19] ITU-R. P. 526 – 8, Propagation by Diffraction [S]. The ITU Radiocommunication Assembly, 2003.
- [20] Mozaffari M, Saad W, Bennis M, et al. Drone small cells in the clouds: Design, deployment and performance analysis [C]//2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), 2015: 1 – 6.
- [21] 崔朝阳,孙甲琦,徐松艳,等. 适用于集群无人机的自组网安全分簇算法[J]. 山东大学学报(理学版), 2018, 53(7): 51 – 59.
- [22] Mirahsan M, Schoenen R, Yanikomeroglu H. HetHetNets: Heterogeneous traffic distribution in heterogeneous wireless cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(10): 2252 – 2265.