

文章编号:2095-6134(2022)05-0704-08

基于 Matern 硬核点过程的无人机辅助 蜂窝网络吞吐量分析*

刘梦冰,邱玲[†],梁晓雯

(中国科学技术大学 中国科学院无线光电通信重点实验室,合肥 230027)

(2020 年 8 月 10 日收稿;2020 年 11 月 25 日收修改稿)

Liu M B, Qiu L, Liang X W. Throughput analysis of UAV-assisted cellular networks by Matern hardcore point processes[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2022, 39(5): 704-711. DOI:10. 7523/j.ucas. 2020. 0053.

摘 要 无人机与传统的地面蜂窝基站混合组网有望成为一种实现数据高速传输的重要手段。针对这一场景,提出一种针对下行双层异构网络吞吐量性能的分析框架,采用泊松点过程对地面基站的位置进行建模,同时考虑到无人机之间存在的最小安全距离约束,采用 Matern 硬核点过程对无人机的位置进行建模,利用随机几何工具推导得到用户平均数据速率的简易表达式。根据得到的解析表达式,进而讨论无人机高度和功率控制因子的最优参数组合。结果表明,在提出的网络模型下选择适当的功率控制因子可以在保证地面基站用户速率的同时,有效地提高无人机用户的平均数据速率。

关键词 无人机;Matern 硬核点过程;平均数据速率;随机几何

中图分类号:TN929. 5 文献标志码:A DOI:10. 7523/j.ucas. 2020. 0053

Throughput analysis of UAV-assisted cellular networks by Matern hardcore point processes

LIU Mengbing, QIU Ling, LIANG Xiaowen

(CAS Key Laboratory of Wireless-Optical Communications, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract Unmanned aerial vehicles (UAVs) have been expected to coexist with conventional terrestrial cellular networks and become an important component to support high rate transmissions. This paper presents an analytical framework for evaluating the throughput performance of a downlink two-tier heterogeneous network. The locations of terrestrial base stations (BSs) are modeled by Poisson point processes. Considering the minimum distance constraint among UAVs, Matern hardcore point processes is utilized to model the locations of UAVs. Tools of stochastic geometry are invoked to derive more tractable expressions for average data rates of users. With the analytical results, we discuss the optimal combinations of UAVs' height and power control factor. The result shows that an appropriate power control factor can effectively maximize UAV users' average data rate as well as guaranteeing the BS users' performance under our proposed model.

* 国家自然科学基金(61672484)资助

[†] 通信作者, E-mail: lqiu@ustc.edu.cn

Keywords unmanned aerial vehicles; Matern hardcore point processes; average data rate; stochastic geometry

近年来,由于用户对移动数据速率的需求不断增长,无人机(unmanned aerial vehicles, UAVs)通信技术吸引了学术界和工业界的广泛关注^[1-3]。无人机凭借体积小、易于部署等特性,为地面用户提供临时的无线通信链路来辅助传统的地面基站,以此应对某些突发事件短期内对网络资源的过度需求,例如节假日、演唱会以及灾害救援等场景。无人机和地面基站(base stations, BSs)混合部署的无人机辅助蜂窝网络系统已经被认为是一种既可以满足高速率数据需求又能够减轻传统地面基站负载的有效方法^[1]。

就无人机辅助蜂窝通信网络而言,主要的研究方向分为两类,一是充分利用无人机的灵活性,通过设计无人机的运动轨迹来提升系统性能^[4],另一个方向则是本文所关注的内容,即利用随机几何将基站和无人机的位置建模成随机点过程,从而有效地评估系统的网络级性能指标^[5],为无人机与地面基站的位置部署提供启示性指导。由于泊松点过程(Poisson point processes, PPP)易于处理的特性,大多数相关文献都将无人机位置建模为 PPP^[6-8]。然而,在一些特定的场景下,PPP 难以准确地刻画无人机的分布特性,采用其他更加合适的拓扑模型可以得到更加准确的结果^[9-11]。例如,考虑到无人机部署在基站受损地区等有限区域内的情况,文献[9]利用二项点过程对无人机的位置进行建模,分析了该无人机辅助通信系统下的覆盖率。考虑热点地区的基站呈簇分布特性,文献[10]利用泊松簇过程对无人机的位置进行建模并通过分析得到了最大化系统覆盖率的最优部署高度。考虑到无人机实际部署中存在最小距离限制,文献[11]利用 Matern 硬核点过程(Matern hardcore point processes, MHP)建模单层无人机网络,并推导分析了安全速率。

上述无人机辅助蜂窝网络系统的相关工作为网络部署设计提供了理论依据,但依然存在不足之处。因而,本文的研究动机有如下两点:1)虽然文献[11]利用 MHP 建模了无人机网络,但其研究的是单层网络,双层空地网络模型仍有待进一步的研究。由于 MHP 的点间排斥特性以及考虑双层空地共信道网络下会额外引入的跨层干扰,总干扰项的拉普拉斯函数的计算将会变得更

加复杂。因此为了便于评估系统性能,需要推导更为简洁的系统性能表达式。2)由于无人机空对地(air-to-ground, A2G)信道的视距(line-of-sight, LoS)主导特性,在双层共信道网络中无人机的 A2G 信道将会不可避免地对地面基站用户造成严重的跨层干扰。采取有效的干扰管理措施可以更好地抑制 A2G 信道的跨层干扰,保护基站用户速率并提升系统性能,例如主区域保护措施^[7]、功率控制等。综合考虑上述两点,本文形成了一个系统的数学框架,即基于 MHP 的双层无人机辅助蜂窝网络系统性能分析框架。

本文考虑采用 PPP 来建模地面基站的位置,利用 MHP 建模无人机的位置以确保无人机之间的距离满足最小安全限制^[12]。同时利用功率控制来缓解无人机对基站用户造成的干扰。除此之外,由于 MHP 模型下总干扰的拉普拉斯变换比 PPP 更为复杂,分析时更加困难,本文基于平均干扰信号比(mean interference-to-signal ratio, MISR)增益法^[13],首次得到基于 MHP 建模的空地异构网络的 MISR 增益值,并利用该增益值将信干比(signal-to-interference ratio, SIR)分布简化近似为 PPP 模型下的 SIR 分布。基于上述推导得到的 SIR 近似分布,获得了更为简洁的用户平均速率近似表达式,并通过蒙特卡洛仿真对该表达式的准确性进行验证,探究了各关键系统参数对空地双层网络性能的影响。结果表明无人机高度和功率控制因子均会对性能造成明显的影响,而且通过优化分析可以发现在本文的框架下功率控制对性能的影响较之高度更为显著。

1 系统模型

本文考虑如图 1 所示的下行双层异构网络,其中 u 和 b 分别表示无人机层和基站层。无人机部署在高度为 h 的平面内,其位置分布建模为密度为 λ_u 的 MHP 点过程 $\Phi_u = \{x_0^u, x_1^u, x_2^u, \dots\}$ 。地面基站建模为密度为 λ_b 的 PPP 点过程 $\Phi_b = \{x_0^b, x_1^b, x_2^b, \dots\}$ 。无人机的传输功率为 P_u ,每个无人机服务距其最近的单天线用户,用户服从 PPP 分布,无人机用户和其对应的服务无人机之间的距离分布为 $f_{r_u}(r) = 2\pi\lambda_u r e^{-\pi\lambda_u(r^2-h^2)}$ 。地面基站的

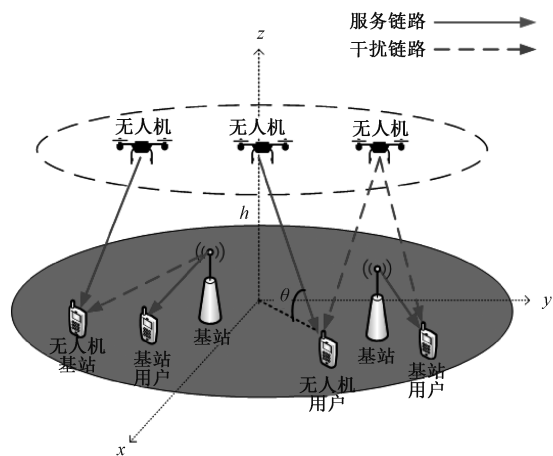


图 1 系统模型图

Fig. 1 The picture of system model

发射功率为 P_b , 每个基站服务一个用户, 用户均匀分布在以基站 x_i^b 为中心, 半径为 R_b 的圆形区域内, 基站用户和服务基站之间的距离分布为 $f_{r_b}(r) = \frac{2r}{R_b^2}, 0 \leq r \leq R_b$ [14]。考虑到频谱资源的稀缺性, 假设无人机与基站采取频率复用。为避免频谱复用场景下地面基站受到的来自无人机的强烈干扰, 对无人机采用功率控制降低自身传输功率到 ηP_u , $\eta \in [0, 1]$ 是功率控制因子。

对于地面基站与地面用户之间的地对地 (ground-to-ground, G2G) 传输, 采用路径损耗指数 $\alpha_b > 2$ 的标准路径损耗模型并假设该信道的小尺度衰落为均值为 1 的瑞利衰落。无人机到地面用户的 A2G 信道根据环境的不同, 可以是 LoS 或非视距 (non-LoS, NLoS) 型信道, 信道为 LoS 的概率表达式 [15] 为

$$P_L(r) = \frac{1}{1 + C \exp[-B(\theta - C)]}, \quad (1)$$

其中: $\theta = \frac{180}{\pi} \arcsin\left(\frac{h}{r}\right)$, 表示的是一个 A2G 信道的仰角, B, C 为常量, 与部署环境相关。NLoS 信道的概率为 $P_N(r) = 1 - P_L(r)$ 。无人机分布的点过程 Φ_u 根据 LoS 概率可以分为相互独立的两个集合, 属于 LoS 信道的集合 $\Phi_L = \{x_0^L, x_1^L, x_2^L, \dots\}$ 与属于 NLoS 信道的集合 $\Phi_N = \{x_0^N, x_1^N, x_2^N, \dots\}$, 路径损耗指数分别为 α_L 和 α_N 。小尺度衰落为 Nakagami- m 衰落模型 [16], 参数为 m_L 和 m_N ,

服从分布函数为 $f_{g_{x_i^u}}(g) = \frac{m^m g^{m-1}}{\Gamma(m)} e^{-mg}$, $\forall x_i^u \in$

Φ_u , 其中 $\Gamma(m) = \int_0^\infty x^{m-1} e^{-x} dx$ 。考虑到该网络属于典型的干扰受限网络模型, 本文忽略噪声影响。

首先定义用户端的 SIR, 由于 MHP 与 PPP 均为静态点过程, 考虑位于原点的典型用户进行分析:

1) 典型基站用户接收到的 SIR_0^b 表达式为

$$SIR_0^b = \frac{g_{00}^{bb} \|x_0^b\|^{-\alpha_b}}{I_u^b + I_b}, \quad (2)$$

其中: I_u^b 为接收到的来自无人机的总干扰, I_b 为来自除服务基站以外的其他基站的总干扰。

$$I_u^b = \frac{\eta P_u}{P_b} \left(\sum_{x_i^L \in \Phi_L} \|x_i^L\|^{-\alpha_L} g_{i0}^{Lb} + \sum_{x_j^N \in \Phi_N} \|x_j^N\|^{-\alpha_N} g_{j0}^{Nb} \right), \quad (3)$$

$$I_b = \sum_{x_k^b \in \Phi_b \setminus \{x_0^b\}} \|x_k^b\|^{-\alpha_b} g_{k0}^{bb}. \quad (4)$$

其中: $g_{00}^{bb}, g_{k0}^{bb} \sim \exp(1)$ 是典型基站用户到服务基站 x_0^b 和干扰基站 $x_k^b \in \Phi_b \setminus \{x_0^b\}$ 的信道之间的信道增益 [17]。 g_{i0}^{Lb}, g_{j0}^{Nb} 分别表示典型基站用户到 LoS 无人机 $x_i^L \in \Phi_L$ 与 NLoS 无人机 $x_j^N \in \Phi_N$ 之间的信道增益, 服从参数分别为 m_L 和 m_N 的 Gamma 分布。

2) 典型无人机用户接收到的 SIR_0^s 表达式为

$$SIR_0^s = \frac{g_{00}^{ss} \|x_0^s\|^{-\alpha_s}}{I_b^s + I_u^s}, \quad (5)$$

其中: I_b^s 是来自所有基站的总干扰, I_u^s 是来自干扰无人机的总干扰和, 具体表达式如下

$$I_u^s = \sum_{x_i^s \in \Phi_s \setminus \{x_0^s\}} \|x_i^s\|^{-\alpha_s} g_{i0}^{ss} + \sum_{x_j^{s'} \in \Phi_{s'}} \|x_j^{s'}\|^{-\alpha_{s'}} g_{j0}^{s's}, \quad (6)$$

$$I_b^s = \frac{P_b}{\eta P_{u_{x_k^b \in \Phi_b}}} \sum_{x_k^b \in \Phi_b} \|x_k^b\|^{-\alpha_b} g_{k0}^{bs}. \quad (7)$$

其中: $s \in \{L, N\}, s' \in \{L, N\} \setminus \{s\}$ 。 $g_{k0}^{bs} \sim \exp(1)$ 是典型无人机用户和地面基站 $x_k^b \in \Phi_b$ 之间的信道增益。 g_{00}^{ss} 与 $g_{i0}^{ss}, g_{j0}^{s's}$ 分别是典型无人机用户与它的服务无人机 x_0^s 和干扰无人机 ($x_i^s \in \Phi_s \setminus \{x_0^s\}, x_j^{s'} \in \Phi_{s'}$) 之间的信道增益, 服从参数为 m_s 的 Gamma 分布。

系统区域频谱效率 (area spectrum efficiency, ASE) 定义为单位面积内每赫兹的平均吞吐量

$$ASE = \lambda_u R_u + \lambda_b R_b. \quad (8)$$

其中: $R_u = \mathbb{E}[\log(1 + SIR_0^s)]$ 表示典型无人机用

户的平均数据速率, $R_B = \mathbb{E} [\log(1 + \text{SIR}_0^b)]$ 表示典型基站用户的平均数据速率。

2 Matern 硬核点过程

MHP 是一种具有排斥特性的点过程, 即 MHP 内部两点之间的距离不能小于某一阈值 d , 如图 2 所示。

MHP 是由一个 PPP 点过程 $\Phi_P = \{x_0^P, x_1^P, x_2^P, \dots\}$ 经过稀释得来的^[12], 即 MHP 密度可表示为

$$\lambda_u = \frac{1 - \exp(-\lambda_P \pi d^2)}{\pi d^2}. \quad (9)$$

对于 Φ_P , 利用坎贝尔定理可以得到 Φ_P 中去除位于原点 ‘O’ 的服务无人机之外的其他干扰无人机的平均数目表达式

$$\mathbb{E}^{!o} \left[\sum_{v \in \Phi_P} f(v) \right] = \int_{\mathbb{R}^2} \lambda_P f(v) dv. \quad (10)$$

而对于 MHP 点过程 Φ_u , 其表达式为

$$\mathbb{E}^{!o} \left[\sum_{v \in \Phi_u} f(v) \right] = \lambda_u^{-1} \int_{\mathbb{R}^2} f(v) \chi^{(2)}(v) dv, \quad (11)$$

$$\chi^{(2)}(v) =$$

$$\begin{cases} \frac{2V(v)[1 - e^{-\lambda_P \pi d^2}] - 2\pi d^2[1 - e^{-\lambda_P V(v)}]}{\pi d^2 V(v)[V(v) - \pi d^2]}, & d \leq v \leq 2d, \\ \lambda_u^2, & v \geq 2d, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (12)$$

其中: $f(v): \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, \infty]$ 是可测可积函数; $\chi^{(2)}(v)$ 为 Φ_u 的二阶密度积, v 为服务无人机与干扰无人机之间的距离。 $V(v)$ 表示图 2 中两圆相交处的面积, 其表达式为

$$V(v) = 2\pi d^2 - 2d^2 \cos^{-1}\left(\frac{v}{2d}\right) + v \sqrt{d^2 - \frac{v^2}{4}}. \quad (13)$$

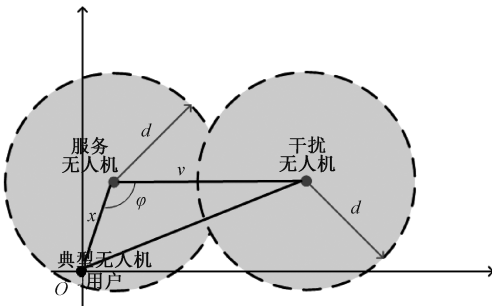


图2 MHP 示意图

Fig. 2 The picture of MHP

3 MHP 下基于 MISR 的增益值

由上一节可以发现 MHP 点过程内部的排斥特性使得干扰计算过程变得十分繁琐。为解决这个问题, 采用基于 MISR 的增益方法来将其 SIR 分布近似转化为 PPP 的 SIR 分布^[13], 计算公式为

$$G = \frac{\text{MISR}_{\text{PPP}}}{\text{MISR}}, \quad (14)$$

其中: $\text{MISR} \triangleq \mathbb{E}(1/\mathbb{E}_g(S))$, $\mathbb{E}_g(S)$ 为衰落过程中的平均信号功率。接下来将在定理 1 中推导得到 MISR_{PPP} 与 MISR_{MHP} 。

定理 1 MISR_{PPP} 与 MISR_{MHP} 表达式如下:

$$\text{MISR}_{\text{PPP}} = \sum_{s \in \{L, N\}} \int_h^\infty P_s(r) \mathbb{E}_{P,s}(\text{ISR} | r) f_{r_P}(r) dr. \quad (15)$$

$$\text{MISR}_{\text{MHP}} = \sum_{s \in \{L, N\}} \int_h^\infty P_s(r) \mathbb{E}_{u,s}(\text{ISR} | r) f_{r_u}(r) dr. \quad (16)$$

其中:

$$\mathbb{E}_{P,s}(\text{ISR} | r) = 2\pi \lambda_P r^{\alpha_s} \sum_{q \in \{L, N\}} \int_r^\infty P_q(y) y^{1-\alpha_q} dy. \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_{u,s}(\text{ISR} | r) &= \frac{r^{\alpha_s 2\pi v_1}}{\lambda_u} \iint F(x, v, \varphi) \chi_1^{(2)}(v) dv d\varphi + \\ &\quad \frac{r^{\alpha_s 2\pi \infty}}{\lambda_u} \iint F(x, v, \varphi) \chi_2^{(2)}(v) dv d\varphi, \end{aligned} \quad (18)$$

$$F(x, v, \varphi) = \sum_{q \in \{L, N\}} \frac{P_q(v) v}{(\sqrt{v^2 + r^2 - 2xvcos(\varphi)})^{\alpha_q}}. \quad (19)$$

其中: 水平距离 $x = \sqrt{r^2 - h^2}$, 积分上下界 $v_1 = \max[d, 2x |\cos(\varphi)|]$, $v_2 = \max[2d, 2x |\cos(\varphi)|]$ 。

用户距离分布函数为 $f_k(r) = 2\pi \lambda_k r e^{-\pi \lambda_k (r^2 - h^2)}$, $k \in \{u, P\}$ 。为简化表达式, $\chi^{(2)}(v)$ 简化为

$$\chi^{(2)}(v) = \begin{cases} \chi_1^{(2)}(v), & \text{if } d \leq v \leq 2d, \\ \chi_2^{(2)}(v), & \text{if } v \geq 2d. \end{cases} \quad (20)$$

证明: 见附录定理 1 的证明。

4 用户平均可达速率分析

利用容量引理^[18], 定理 2 给出了无人机用户速率 \hat{R}_u 与基站用户速率 \hat{R}_B 的近似表达式。

定理 2 \hat{R}_u 与 \hat{R}_b 的表达式为

$$\hat{R}_u = \sum_{s \in \{L, N\}} \int_0^\infty \int_h^\infty \frac{1 - (1 + z/m_s)^{-m_s}}{z} P_s(r) e^{-K_s(r,z)} f_{r_p}(r) dr dz, \quad (21)$$

$$\hat{R}_b = \int_0^{R_b} \int_0^\infty \frac{1 - (z + 1)^{-1}}{z} e^{-K_b(r,z)} \frac{2r}{R_b^2} dr dz, \quad (22)$$

其中, $K_s(r, z)$ 与 $K_b(r, z)$ 具体表达式如下:

$$K_s(r, z) = 2\pi\lambda_p \int_r^\infty \kappa_s(r, y, z) y dy + \frac{2\pi\lambda_b}{\alpha_b} \left(\frac{z P_b r^{\alpha_b}}{\eta P_u} \right)^{\frac{2}{\alpha_b}} B\left(\frac{2}{\alpha_b}, 1 - \frac{2}{\alpha_b}\right), \quad (23)$$

$$K_b(r, z) = 2\pi\lambda_u \int_h^\infty \kappa_b(r, y, z) y dy + \frac{2\pi\lambda_b}{\alpha_b} \left(\frac{z P_u r^{\alpha_b}}{\eta P_b} \right)^{\frac{2}{\alpha_b}} B\left(\frac{2}{\alpha_b}, 1 - \frac{2}{\alpha_b}\right), \quad (24)$$

上式中, $B(P, Q) = \int_0^1 x^{P-1} (1-x)^{Q-1} dx$ 。 $\kappa_s(r, y, z)$ 与 $\kappa_b(r, y, z)$ 表达式为:

$$\kappa_s(r, y, z) = \sum_{q \in \{L, N\}} \left[1 - \left(1 + z \frac{y^{-\alpha_q} r^{\alpha_s}}{m_q G} \right)^{-m_q} \right] P_q(y), \quad (25)$$

$$\kappa_b(r, y, z) = \sum_{q \in \{L, N\}} \left[1 - \left(1 + z \frac{\eta P_u r^{\alpha_b}}{P_b m_q y^{\alpha_q}} \right)^{-m_q} \right] P_q(y). \quad (26)$$

证明:见附录定理 2 的证明。

关于系统 ASE 表达式,将式 (21) 和式 (22) 代入式(8)即可得到,为节省空间不再赘述。

5 仿真结果与分析

本节基于 MATLAB 仿真检验理论解析式的准确性。考虑仿真环境为密集城市环境,参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数设置

Table 1 Numerical/Simulation parameters

部署参数	参数值	部署参数	参数值
$\lambda_u / \text{km}^{-2}$	10	$\lambda_b / \text{km}^{-2}$	10
P_u / dBm	37	P_b / dBm	37
α_L	3	α_N	4
m_L	3	m_N	1
α_b	4	d/m	100
B	0.136	C	11.95

图 3 和图 4 分别给出了无人机组网场景下无人机用户与基站用户的平均数据速率以及单层无人机网络或单层基站网络下的用户平均数据速率。

根据仿真结果对比,可以发现理论值结果与仿真结果吻合,验证了基于 MISR 增益法得到的用户数据速率近似表达式的准确性,在之后的分析中可以利用理论结果代替复杂且耗时的仿真来评估在不同参数下的网络性能并进行下一步的优化配置等。图 5 则展示了系统 ASE 与无人机部署密度之间的关系,可以发现通过部署无人机辅助地面基站可以有效改善系统的整体 ASE,而且当无人机的密度过大时,干扰也随着增大,此时互干扰问题带来的影响会大于密集部署带来的增益导致系统 ASE 开始出现下降趋势。

由上述结果可以看出无人机的部署给地面基站用户带来的跨层干扰使基站用户端的性能变差。通过推导得到的解析表达式结果可以进一步形成一个优化问题,在保证基站用户维持在一定速率以

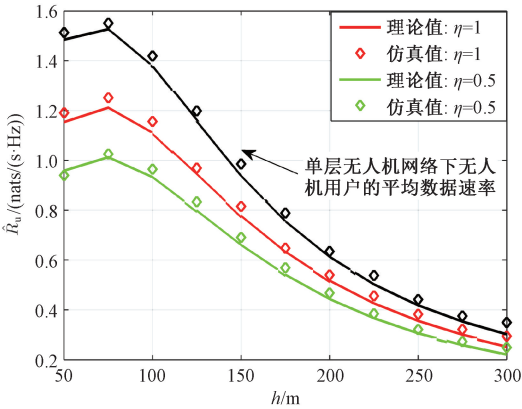


图 3 无人机用户平均数据速率

Fig. 3 UAV user's average data rate

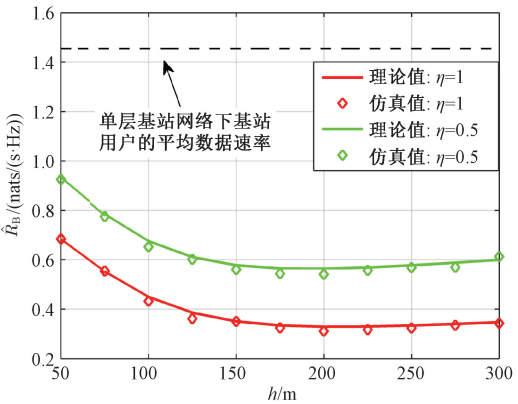


图 4 基站用户平均数据速率

Fig. 4 BS users' average data rate

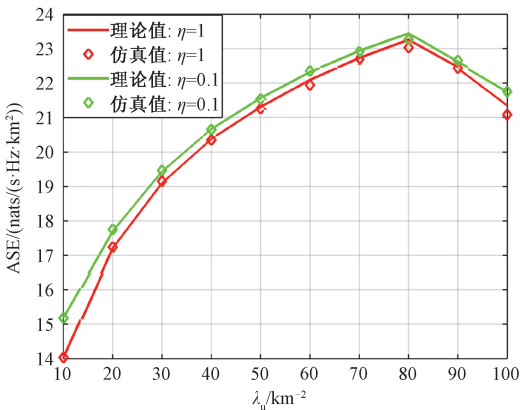


图5 系统 ASE

Fig. 5 System ASE

上的前提下,通过调整无人机传输功率与部署高度的大小,最优化无人机用户的速率。通过解优化问题可以得到无人机的最优参数配置,进而在最大化无人机用户平均数据速率的同时实现基站用户与无人机用户二者性能之间的一个平衡。

6 无人机最优配置参数

本节将讨论如何得到无人机用户与基站用户的性能之间平衡的最优参数值。换言之,在约束条件 $\hat{R}_B(\eta, h) \geq R_{th}$ 下,需要找到最优的 (η^*, h^*) 来最大化 $\hat{R}_u(\eta, h)$, 其中 R_{th} 是基站用户平均数据速率的阈值,形成优化问题如下

$$P_0: \max_{h; \eta \in [0,1]} \hat{R}_u(\eta, h) \tag{27}$$
$$\text{s. t. } \hat{R}_B(\eta, h) \geq R_{th}.$$

基于莱布尼茨积分法则,可以证明 $\hat{R}_u(\eta, h)$ 随 η 单调递增,而 $\hat{R}_B(\eta, h)$ 随 η 单调递减。通过反证法可以发现 P_0 的约束可以用 $\hat{R}_B(\eta, h) = R_{th}$ 来代替。首先,以一定的精度遍历 $[50, 300]$ 范围内所有的 h 。然后根据用户速率对 η 的单调性,通过二分查找求出满足 $\hat{R}_B(\eta, h) = R_{th}$ 情况下所有 (η, h) 组合。最后,选择令 $\hat{R}_u(\eta, h)$ 最大化的 (η^*, h^*) 作为最优参数组合,结果如表 2 所示。

表 2 P_0 的最优参数

Table 2 The optimal solution to P_0

R_{th}	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1
h^*	70	50	50	50	50	50
η^*	0.87	0.92	0.53	0.30	0.17	0.09
\hat{R}_u^*	1.20	1.14	1.07	0.99	0.90	0.78

由于无人机需要牺牲自身用户性能来保证基站用户的性能,由表 2 可以观察到 \hat{R}_u 随着 R_{th} 单调递减。除此之外,注意到除了 $R_{th} = 0.6$ 这一特殊情况, η^* 随着 R_{th} 的增加而减少但是 h^* 总是 50 m,这是因为无人机用户平均数据速率存在一个最优高度,可以通过更低的功率控制因子来得到更高的 \hat{R}_u^* 。 η^* 总体趋势是在不断降低,这是因为在 h^* 维持不变的前提下,为了满足更高的 R_{th} ,无人机需要通过不断降低 η^* 来降低自己的传输功率从而减少对基站用户的跨层干扰。通过上述结果,明显可以发现相较于调整无人机的部署高度,调整无人机的传输功率对系统性能的影响更为显著。

7 结束语

本文研究双层无人机辅助蜂窝网络系统下的统计性能,首次得到 MHP 模型下的 MISR 增益值,并推导得到更简洁的用户平均数据速率近似表达式,最后通过仿真验证了表达式的准确性。仿真结果展示了系统关键部署参数对平均用户数据速率的影响。此外,针对无人机部署高度与功率控制因子对用户数据速率的影响,讨论了两种参数的最优组合,优化结果表明功率控制因子对性能的影响相比高度更为显著。目前本文仅考虑了下行无人机辅助通信网络下用户数据速率进行推导分析,未来可以将本文的工作扩展到上行链路中,关注基站端接收到来自用户的信号干扰比分布以及各系统参数对性能指标的影响。

参考文献

[1] Zeng Y, Wu Q Q, Zhang R. Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond [J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375. DOI: 10. 1109/JPROC. 2019. 2952892.

[2] 顾育津,宋孝成,刘晓培,等. 基于拉普拉斯人工势场的无人机避障控制[J]. 中国科学院大学学报, 2020, 37(5): 681-687. DOI: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2020. 05. 013.

[3] 马娇,董勇伟,李原,等. 多旋翼无人机微多普勒特性分析与特征提取[J]. 中国科学院大学学报, 2019, 36(2): 235-243. DOI: 10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2019. 02. 011.

[4] Wu Q Q, Zeng Y, Zhang R. Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2018, 17(3): 2109-2121. DOI: 10. 1109/TWC. 2017. 2789293.

[5] Andrews J G, Baccelli F, Ganti R K. A tractable approach to

- coverage and rate in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59 (11): 3122-3134. DOI:10.1109/TCOMM.2011.100411.100541.
- [6] 张尚伟,刘家佳,许铁鑫. 无人机辅助的蜂窝数据流量卸载及保密传输方案[J]. 西安交通大学学报, 2021,55(2): 121-128. DOI:10.7652/xjtub202102014.
- [7] Zhang C Y, Zhang W. Spectrum sharing for drone networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35 (1): 136-144. DOI: 10.1109/JSAC.2016.2633040.
- [8] Turgut E, Gursoy M C. Downlink analysis in unmanned aerial vehicle (UAV) assisted cellular networks with clustered users [J]. IEEE Access, 2018, 6:36313-36324. DOI:10.1109/ACCESS.2018.2841655.
- [9] Hayajneh A M, Zaidi S A R, McLernon D C, et al. Drone empowered small cellular disaster recovery networks for resilient smart cities[C]//2016 IEEE International Conference on Sensing, Communication and Networking. June 27, 2016, London UK. IEEE, 2016: 1-6. DOI: 10.1109/SECONW.2016.7746806.
- [10] Yi W Q, Liu Y W, Nallanathan A, et al. A unified spatial framework for clustered UAV networks based on stochastic geometry [C] // 2018 IEEE Global Communications Conference. December 9-13, 2018, Abu Dhabi, United Arab Emirates. IEEE, 2018:1-6. DOI:10.1109/GLOCOM.2018.8648138.
- [11] Zhu Y X, Zheng G, Fitch M. Secrecy rate analysis of UAV-enabled mmWave networks using Matérn hardcore point processes [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2018, 36 (7): 1397-1409. DOI:10.1109/JSAC.2018.2825158.
- [12] Ibrahim A M, ElBatt T, El-Keyi A. Coverage probability analysis for wireless networks using repulsive point processes [C] //2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications. September 8-11, 2013, London, UK: IEEE, 2013: 1002-1007. DOI:10.1109/PIMRC.2013.6666284.
- [13] Haenggi M. The mean interference-to-signal ratio and its key role in cellular and amorphous networks[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3 (6): 597-600. DOI:10.1109/LWC.2014.2357444.
- [14] Chen G J, Qiu L, Li Y J. Stochastic geometry analysis of coordinated beamforming small cell networks with CSI delay [J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22 (5): 1066-1069. DOI:10.1109/LCOMM.2018.2814608.
- [15] Al-Hourani A, Kandeepan S, Lardner S. Optimal LAP altitude for maximum coverage [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3 (6): 569-572. DOI: 10.1109/LWC.2014.2342736.
- [16] Wackerly D D, Mendenhall W, Scheaffer R L. Mathematical statistics with applications [M]. 7th ed. [S. l.]: Thomson Brooks, 2008.
- [17] Zhang J, Andrews J G. Adaptive spatial intercell interference cancellation in multicell wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28 (9): 1455-1468. DOI:10.1109/JSAC.2010.101207.
- [18] Hamdi K A. A useful lemma for capacity analysis of fading interference channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2010, 58 (2): 411-416. DOI: 10.1109/TCOMM.2010.02.080117.

附录

定理 1 的证明

PPP 和 MHP 模型下无人机层 $\mathbb{E}_{\mathbf{p},s}(\bar{\text{ISR}}|r)$ 和 $\mathbb{E}_{\mathbf{u},s}(\bar{\text{ISR}}|r)(s \in \{\text{L},\text{N}\})$ 的计算式如下。对于 PPP 点过程 $\Phi_{\mathbf{p}} = \{x_0^{\mathbf{p}}, x_1^{\mathbf{p}}, x_2^{\mathbf{p}}, \cdots\}$, 可根据概率 LoS 模型将其分为两个相互独立的集合, $\Phi_{\mathbf{p}} = \Phi_{\mathbf{p},\text{L}} \cup \Phi_{\mathbf{p},\text{N}}$, 其中 $\Phi_{\mathbf{p},\text{L}} = \{x_0^{\mathbf{p},\text{L}}, x_1^{\mathbf{p},\text{L}}, x_2^{\mathbf{p},\text{L}}, \cdots\}$, $\Phi_{\mathbf{p},\text{N}} = \{x_0^{\mathbf{p},\text{N}}, x_1^{\mathbf{p},\text{N}}, x_2^{\mathbf{p},\text{N}}, \cdots\}$ 。为简化表示, 假设服务信道距离为 r , 干扰信道距离为 y , 首先考虑服务 A2G 信道为 LoS 型的情况:

$$\begin{aligned} \mathbb{E}_{\mathbf{p},\text{L}}(\bar{\text{ISR}}|r) &= \left[\sum_{x_i^{\mathbf{p},\text{L}} \in \Phi_{\mathbf{p},\text{L}} \setminus \{x_0^{\mathbf{p},\text{L}}\}} \frac{\|x_0^{\mathbf{p},\text{L}}\|^{\alpha_{\text{L}}}}{\|x_i^{\mathbf{p},\text{L}}\|^{\alpha_{\text{L}}}} + \sum_{x_j^{\mathbf{p},\text{N}} \in \Phi_{\mathbf{p},\text{N}}} \frac{\|x_0^{\mathbf{p},\text{L}}\|^{\alpha_{\text{L}}}}{\|x_j^{\mathbf{p},\text{N}}\|^{\alpha_{\text{N}}}} \right] \stackrel{(a)}{=} \sum_{q \in \{\text{L},\text{N}\}} 2\pi\lambda_{\mathbf{p}} r^{\alpha_{\text{L}}} \int_r^\infty P_q(y) y^{1-\alpha_q} dy, \quad (\text{A1}) \\ \mathbb{E}_{\mathbf{u},\text{L}}(\bar{\text{ISR}}|r) &= \sum_{x_i^{\text{L}} \in \Phi_{\text{L}} \setminus \{x_0^{\text{L}}\}} \left(\frac{\|x_0^{\text{L}}\|}{\|x_i^{\text{L}}\|} \right)^{\alpha_{\text{L}}} + \sum_{x_j^{\text{N}} \in \Phi_{\text{N}}} \frac{\|x_0^{\text{L}}\|^{\alpha_{\text{L}}}}{\|x_j^{\text{N}}\|^{\alpha_{\text{N}}}} \\ &\stackrel{(b)}{=} \frac{r^{\alpha_{\text{L}}}}{\lambda_{\text{u}}} \left[\iint \sum_{0 \leq v_1 \leq \sum_{q \in \{\text{L},\text{N}\}} \frac{P_q(v) \chi_1^{(2)}(v) v}{(\sqrt{v^2 + r^2} - 2xv \cos(\varphi))^{\alpha_q}} d\varphi dv + \int \sum_{0 \leq v_2 \leq \sum_{q \in \{\text{L},\text{N}\}} \frac{P_q(v) \chi_2^{(2)}(v) v}{(\sqrt{v^2 + r^2} - 2xv \cos(\varphi))^{\alpha_q}} dv d\varphi \right]. \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

其中:(a)、(b)服从坎贝尔定理。当服务信道为 NLoS 信道时的 $\mathbb{E}_{\mathbf{p},\text{N}}(\bar{\text{ISR}}|r)$, $\mathbb{E}_{\mathbf{u},\text{N}}(\bar{\text{ISR}}|r)$ 的表达式可以通过将式(28)和式(29)中的 $r^{\alpha_{\text{L}}}$ 替换成 $r^{\alpha_{\text{N}}}$ 得到。

定理 2 的证明

利用容量计算引理^[18],可以推导用户平均数据率的表达式

$$\mathbb{E} \left[\log \left(1 + \frac{X}{Y} \right) \right] = \int_0^\infty \frac{1}{z} \mathbb{E} [e^{-zY}] (1 - \mathbb{E} [e^{-zX}]) dz. \quad (A3)$$

利用 MISR 增益值缩放阈值 z ,可以将非 PPP 网络的 SIR 分布精确地近似为 PPP 网络的 SIR 分布:

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\text{SIR}_0^s > z) &= \mathbb{P}(g_{00}^{ss} > z \parallel x_0^{P,s} \parallel^{\alpha_s}(I_b^s + I_u)) \\ &\approx \mathbb{P}(g_{00}^{ss} > z \parallel x_0^{P,s} \parallel^{\alpha_s}(I_b^s + I_u^{\text{PPP}}/G)), \end{aligned} \quad (A4)$$

$$I_u^{\text{PPP}} = \sum_{x_i^{P,s} \in \Phi_{P,s} \setminus \{x_0^s\}} \|x_i^{P,s}\|^{-\alpha_s} g_{i0}^{ss} + \sum_{x_j^{P,s'} \in \Phi_{P,s'}} \|x_j^{P,s'}\|^{-\alpha_{s'}} g_{j0}^{s's}. \quad (A5)$$

基于得到的 SIR 近似分布关系,利用 SIR 分布与容量的关系 $\hat{R}_u = \sum_{s \in \{L,N\}} \int_0^\infty \frac{\mathbb{P}(\text{SIR}_0^s > z)}{1+z} dz$,可以得到无人机用户的近似平均数据速率:

$$\hat{R}_u = \sum_{s \in \{L,N\}} \int_0^\infty \int_h^\infty \frac{1 - \mathbb{E} [e^{-zg_{00}^{ss}}]}{z} \mathcal{L}_{I,s}(z) f_{r_p}(r) dz. \quad (A6)$$

其中: $\mathbb{E} [e^{-zg_{00}^{ss}}] = (z/m_s + 1)^{-m_s}$,典型用户与服务无人机之间的信道增益 g_{00}^{ss} 服从参数为 m_s 的 Nakagami- m 衰落模型。干扰项 $\mathcal{L}_{I,s}(z) = \mathbb{E} [e^{-z \parallel x_0^{P,s} \parallel^{\alpha_s}(I_b^s + I_u^{\text{PPP}}/G)}]$,假设无人机服务信道为 LoS 型, $\mathcal{L}_{I,L}(z)$ 的展开式如下

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I,L}(z) &= \mathbb{E}_{x_i^{P,L} \in \Phi_{P,L} \setminus \{x_0^{P,L}\}} \left[e^{-\frac{\parallel x_0^{P,L} \parallel^{\alpha_{L,LL}}}{\parallel x_i^{P,L} \parallel^{\alpha_{LG}}}} \right] \times \mathbb{E}_{x_j^{P,N} \in \Phi_{P,N}} \left[e^{-\frac{\parallel x_0^{P,L} \parallel^{\alpha_{L,NL}}}{\parallel x_j^{P,N} \parallel^{\alpha_{NG}}}} \right] \times \mathbb{E}_{x_k^b \in \Phi_b} \left[e^{-\frac{P_b \parallel x_0^{P,L} \parallel^{\alpha_{L,LL}}}{\eta P_u \parallel x_k^b \parallel^{\alpha_b}}} \right] \\ &\stackrel{(c)}{=} \exp \left\{ -2\pi\lambda_p \int_{r,q \in \{L,N\}} \left[1 - \left(1 + z \frac{y^{-\alpha_q} r^{\alpha_L}}{m_q G} \right)^{-m_q} \right] P_q(y) y dy \right\} \times \exp \left\{ -\frac{2\pi\lambda_b}{\alpha_b} \left(\frac{z P_b r^{\alpha_L}}{\eta P_u} \right)^{\frac{2}{\alpha_b}} B \left(\frac{2}{\alpha_b}, 1 - \frac{2}{\alpha_b} \right) \right\}. \end{aligned} \quad (A7)$$

其中:(c)为总干扰的概率生成泛函。 $g_{k0}^{\text{bL}} \sim \exp(1)$, $g_{i0}^{\text{LL}}, g_{j0}^{\text{NL}}$ 服从参数为 m_L 与 m_N 的 Nakagami- m 衰落。将(34)中的 r^{α_L} 替换为 r^{α_N} 可得到 $\mathcal{L}_{I,N}(z)$ 。

基站用户的近似平均数据速率为

$$\hat{R}_B = \int_0^\infty \int_0^{R_b} \frac{1 - \mathbb{E} [e^{-zg_{00}^{\text{bb}}}] }{z} \mathcal{L}_{I,b}(z) f_{r_b}(r) dr dz. \quad (A8)$$

其中: $\mathbb{E} [e^{-zg_{00}^{\text{bb}}}] = (z + 1)^{-1}$, g_{00}^{bb} 服从瑞利衰落。 $\mathcal{L}_{I,b}(z) = \mathbb{E} [e^{-z \parallel x_0^b \parallel^{\alpha_b}(I_u^b + I_b)}]$ 的展开式为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I,b}(z) &= \mathbb{E}_{x_i^L \in \Phi_L} \left[e^{-\frac{\eta P_u \parallel x_0^b \parallel^{\alpha_b}}{P_b \parallel x_i^L \parallel^{\alpha_L}} g_{i0}^{\text{Lb}}} \right] \times \mathbb{E}_{x_j^N \in \Phi_N} \left[e^{-\frac{\eta P_u \parallel x_0^b \parallel^{\alpha_b}}{P_b \parallel x_j^N \parallel^{\alpha_N}} g_{j0}^{\text{Nb}}} \right] \times \mathbb{E}_{x_k^b \in \Phi_b \setminus \{x_0^b\}} \left[e^{-\frac{\parallel x_0^b \parallel^{\alpha_b}}{\parallel x_k^b \parallel^{\alpha_b}} g_{k0}^{\text{bb}}} \right] \\ &= \exp \left\{ -2\pi\lambda_u \int_{h,q \in \{L,N\}} \left[1 - \left(1 + z \frac{\eta P_u r^{\alpha_b}}{m_q P_b y^{\alpha_q}} \right)^{-m_q} \right] P_q(y) y dy \right\} \times \exp \left[-\frac{2\pi\lambda_b}{\alpha_b} z^{\frac{2}{\alpha_b}} r^2 B \left(\frac{2}{\alpha_b}, 1 - \frac{2}{\alpha_b} \right) \right]. \end{aligned} \quad (A9)$$