

文章编号:1007-5321(2020)06-0074-08

DOI:10.13190/j.jbupt.2020-142

无人机网络的覆盖及切换性能研究

焦铭晗, 彭木根, 刘晨熙

(北京邮电大学 网络与交换技术国家重点实验室, 北京 100876)

摘要: 无人机网络具有按需部署、灵活机动等优势,但传统陆地蜂窝网络的分析方法不再适用. 为此,考虑了两层无人机网络中地面用户的移动性,推导了系统覆盖概率、传输速率、边界的长度强度以及用户最大移动速度约束等网络关键性能指标的解析表达式,探究了无人机部署的密度、高度、地面用户移动速度对无人机网络覆盖及切换性能的影响. 理论及仿真结果表明,自适应地调整无人机部署的密度和高度能有效提升无人机网络的覆盖及切换性能.

关键词: 无人机网络; 用户移动性; 随机几何; 覆盖概率; 边界长度强度

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Research on Coverage and Handover Performance of Unmanned Aerial Vehicle Network

JIAO Ming-han, PENG Mu-gen, LIU Chen-xi

(State Key Laboratory of Networking and Switching Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: Unmanned aerial vehicle (UAV) networks can be deployed on demand and operate flexibly. However, the analytical approach for traditional terrestrial cellular networks cannot be directly applied to the UAV networks. Against this background, this paper investigates the coverage and handover performance of the UAV communication systems. With the consideration of user mobility in a 2-tier UAV communication system, the analytical expressions of the coverage probability, the transmission rate, the boundary length intensity, and the maximum velocity constraint of users are derived. The impacts of the UAV density, height, and the velocity of user on the coverage and handover performance of system are examined as well. Analytical and numerical results demonstrate that the coverage and handover performance of the UAV networks can be effectively boosted by adaptively adjusting the density and the height of the UAVs.

Key words: unmanned aerial vehicle network; user mobility; stochastic geometry; coverage probability; boundary length intensity

项目无人机网络具有按需部署、灵活机动等优势^[1-3],且无人机通信系统更有可能建立短距离视距(LoS, line of sight)通信链路,提供更好的链路质量^[4-5],从而有效地增强网络覆盖,支撑高速数据传

输^[4]. 因此,无人机网络被认为是新一代通信网络的有机组成部分,受到了学界和业界的广泛关注^[6-8]. 大量的研究工作是基于随机几何理论^[9]分析无人机网络的性能. 具体地,Zhou等^[10]基于泊松

收稿日期: 2020-08-29

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61471074); 北京市自然科学基金项目(JQ18016); 中央高校基本科研业务费专项项目(2020RC09)

作者简介: 焦铭晗(1997—),男,硕士生.

通信作者: 彭木根(1978—),男,教授,博士生导师, E-mail: pmg@bupt.edu.cn.

点过程性质分析了单层固定高度的无人机网络覆盖性能; Wang 等^[11]研究了单个无人机与地面基站协同服务下的网络覆盖性能; Turgut 等^[12]针对无人机与地面基站的双层场景分析了系统对分簇用户的接入概率、覆盖概率和频谱利用效率。

然而, 当前无人机网络的组网性能研究存在如下局限性: ① 当前无人机网络性能的分析工作多基于用户静态、位置固定的场景, 但实际业务中, 用户多处于移动状态^[13]且存在越区切换及服务基站的重连, 对组网性能产生的影响^[14]未被考虑; ② 现有研究场景中的无人机基站多建模为单层、固定高度的简单分布, 在实际应用中, 由于环境因素及设备性能的影响, 无人机基站间的服务高度往往不同, 在此情况下, 基站与用户间距离及服务、干扰信道的状态也更复杂, 研究中尚未被考虑。针对以上2个问题, 对于服务高度不同, 密度不同且分布独立的2层无人机网络, 基于随机几何和分析几何理论推导了系统覆盖性能的解析式, 将场景内用户的移动性与网络切换次数间的关系量化, 并分析得到了系统切换性能的解析解, 进而, 探究了无人机的部署密度、高度及用户的移动性对系统性能的影响, 解决了异构多层无人机网络的覆盖性能分析难题, 并提出了无人机网络三维空间下的切换性能分析方法。

1 无人机移动通信系统模型

无人机网络的下行场景如图1所示, 网络中的无人机基站依照服务高度分为2层, 且均为系留式无人机^[2]。2层无人机基站的位置服从独立的二维泊松点过程 Φ_{U_1} 和 Φ_{U_2} , 密度分别为 λ_1 与 λ_2 。第1层基站 Φ_{U_1} 的服务高度为 H_1 ; 第2层基站 Φ_{U_2} 的服务高度为 H_2 。2层无人机基站工作在相同频率, 且发射功率均为 S_U 。每个无人机对地面用户的服务建模为独立的 M/D/1 排队系统^[15]。此外, 系统中用户的位置服从密度为 λ_u 的泊松点过程 (PPP, poisson point process), 且以随机游走模型^[16]运动, 单位

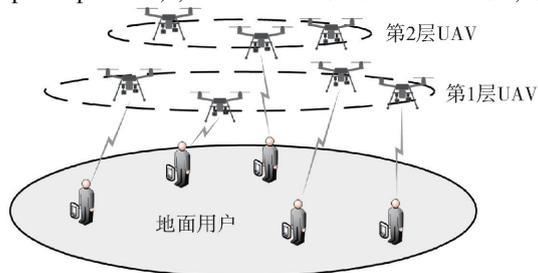


图1 无人机通信系统模型

时间内的移动方向与移动速度固定。用户接入时, 无人机通信网络将选取与其直线距离最短的基站进行服务。

由于地面障碍物的遮挡, 无人机与用户之间的信道可能为视距信道或非视距 (NLoS, non line-of-sight) 信道。信道视距/非视距的概率与无人机基站与用户仰角 θ 相关, 具体关系式分别为^[17]

$$P_{\text{LoS}} = \frac{1}{1 + C \exp[-B(\theta - C)]} = \frac{1}{1 + C \exp\{-B[\text{atan}(H/r) - C]\}} \quad (1)$$

$$P_{\text{NLoS}} = 1 - P_{\text{LoS}} \quad (2)$$

其中: B, C 均为环境常量, H 为无人机基站的高度, r 为无人机基站地面投影与用户的直线距离。

假设用户接入的无人机基站为 U_0 , 综合考虑信道的小尺度衰落和大尺度衰落^[12,17], 则用户的接收信号功率为

$$S_r = \begin{cases} S_U \|h_0\|^2 \eta_{\text{LoS}}^{-1} \|X_0\|^{-\alpha_{\text{LoS}}}, & \text{LoS mode} \\ S_U \|h_0\|^2 \eta_{\text{NLoS}}^{-1} \|X_0\|^{-\alpha_{\text{NLoS}}}, & \text{NLoS mode} \end{cases} \quad (3)$$

其中: $\|h_0\|^2$ 为信道的小尺度衰落, 考虑系统中所有无人机基站的传输信道为独立的瑞利信道^[5,18-19], 小尺度衰落服从均值为1的指数分布; $\|X_0\|$ 为用户到服务无人机基站的直线距离; $\eta_{\text{LoS}}, \eta_{\text{NLoS}}, \alpha_{\text{LoS}}, \alpha_{\text{NLoS}}$ 分别为视距信道与非视距信道的额外路径损耗和路损参数。

2 无人机移动通信系统的覆盖及切换性能

2.1 无人机移动通信系统的覆盖性能

为研究无人机移动通信系统的覆盖性能, 首先要分析各接入选择下的接入概率。根据网络中无人机基站的种类, 用户有2种接入选择: 接入第1层无人机基站或接入第2层无人机基站。下面根据泊松点过程的性质^[9]和与基站间的位置关系, 对用户接入不同层无人机基站的概率进行具体分析与推导。

当满足以下条件时, 用户将选择接入第1层无人机基站: ① 以用户为中心, r 为半径的区域内无第1层基站地面投影; ② 以用户为中心, 半径为 $r_{12} = \max(0, \sqrt{r^2 + H_1^2 - H_2^2})$ 的区域内无第2层基站地面投影。根据泊松点过程性质^[4], 用户接入第1层无人机基站的概率为

$$P_1 = \int_0^\infty f_{R_1 P_1}(r) dr = \int_0^\infty [1 - \exp(-\lambda_h \pi r^2)] \times \exp(-\lambda_1 \pi r^2) 2\lambda_1 \pi r dr \quad (4)$$

类似地,用户接入第2层无人机基站,需满足条件:①以用户为中心, r 为半径的区域无第2层基站地面投影;②以用户为中心, $r_{21} = \sqrt{r^2 + H_h^2 - H_1^2}$ 为半径的区域内无第1层基站的地面投影,则根据泊松点过程的性质,用户接入第2层无人机基站的概率为

$$P_2 = \int_0^\infty f_{R_1 P_2}(r) dr = \int_0^\infty [1 - \exp(-\lambda_1 \pi r^2)] \times \exp(-\lambda_h \pi r^2) 2\lambda_h \pi r dr \quad (5)$$

接下来分析系统中典型用户的接收信干比(SIR, signal-to-interference ratio). 用户接收有用信号时,会受到其他无人机基站的同频干扰,因此,典型用户的SIR可表示为

$$\gamma = \frac{S_r}{I_{U_1} + I_{U_2}} = \frac{S_r}{\sum_{j=1,2} \sum_{2i \in \Phi_{U_j}/U_0} S_{U_i} \|h_i\|^2 \eta_i^{-1} \|X_i\|^{-\alpha_i}} \quad (6)$$

其中: I_{U_1}, I_{U_2} 为第1,2层所有干扰信号的功率之和; $\|h_i\|^2, \eta_i, \|X_i\|, \alpha_i$ 分别为各干扰项的小尺度衰落、额外路径损耗、与用户间距离及路损参数. 基于式(4)~式(6),可得如下定理.

定理1 本系统的覆盖概率为

$$P_{\text{cov}} = \sum_{j=1,2} E_{R_1 P_j} \left\{ \sum_{m_1 \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}} P_{m_1} \exp \left[-2\lambda_1 \pi \times \int_{r_{j1} n_1 \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}} P_{n_1} \left(1 - \frac{1}{1 + \tau \eta_{m_1} \alpha_1^{\alpha_1} \eta_1^{-1} b_{n_1}^{-\alpha_{n_1}}} \right) l dl \right] \times \sum_{m_2 \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}} P_{m_2} \exp \left[-2\lambda_h \pi \times \int_{r_{j2} n_2 \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}} P_{n_2} \left(1 - \frac{1}{1 + \tau \eta_{m_2} \alpha_2^{\alpha_2} \eta_2^{-1} b_{n_2}^{-\alpha_{n_2}}} \right) l dl \right] \right\} \quad (7)$$

其中

$$a_1 = \sqrt{r^2 + H_1^2}, a_2 = \sqrt{r^2 + H_h^2} \quad (8)$$

$$b_1 = \sqrt{l^2 + H_1^2}, b_2 = \sqrt{l^2 + H_h^2} \quad (9)$$

证明 无人机移动通信的覆盖概率通常定义为典型用户的SIR大于一定阈值 τ 的概率^[9],可表示为

$$P_{\text{cov}} = P_{\text{cov}, U_1} + P_{\text{cov}, U_2} =$$

$$P(\gamma > \tau | U_0 \in \Phi_{U_1}) + P(\gamma > \tau | U_0 \in \Phi_{U_2}) \quad (10)$$

根据式(6)及覆盖概率的定义,式(10)中的各

项可进一步表示为

$$P_{\text{cov}, U_j} = P(\gamma > \tau | U_0 \in \Phi_{U_j}) = E_{R_1 P_j} \left\{ P[S_R > \tau(I_{U_1} + I_{U_2})] \right\} = E_{R_1 P_j} \left[\exp \left(-\tau \eta_0 r^{\alpha_0} \sum_{i \in \Phi_{U_1}/U_0} \|h_i\|^2 \eta_i^{-1} \|X\|^{-\alpha_i} \right) \times \exp \left(-\tau \eta_0 r^{\alpha_0} \sum_{i \in \Phi_{U_2}/U_0} \|h_i\|^2 \eta_i^{-1} \|X\|^{-\alpha_i} \right) \right] \quad (11)$$

其中 $j \in \{1, 2\}$.

根据二维泊松点过程的母函数泛函(PGFL, probability generating functional)^[9],式(11)进一步推导为

$$P(\gamma > \tau | U_0 \in \Phi_{U_j}) = E_{R_1 P_j} [F_{j1}(r) F_{j2}(r)] = E_{R_1 P_j} \left\{ \exp \left[-2\lambda_1 \pi \int_{r_{j1}}^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + \tau \eta_0 \alpha_1^{\alpha_1} \eta_1^{-1} b_1^{-\alpha_1}} \right) l dl \right] \times \exp \left[-2\lambda_h \pi \int_{r_{j2}}^\infty \left(1 - \frac{1}{1 + \tau \eta_0 \alpha_2^{\alpha_2} \eta_2^{-1} b_2^{-\alpha_2}} \right) l dl \right] \right\} \quad (12)$$

其中: $r_{11} = r_{22} = r; \eta_0, \eta_1, \eta_2$ 及 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$ 分别为服务信道、第1层无人机基站干扰信道以及第2层无人机基站干扰信道的额外路径损耗及路损常数.

进而,根据系统模型中对信道视距、非视距及其概率的定义,式(12)中 $F_{j1}(r), F_{j2}(r)$ 各项可细化为

$$F_{jk}(r) = \sum_{m \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}} P_m \exp \left[-2\lambda_k \pi \times \int_{r_{jn} n \in \{\text{LoS}, \text{NLoS}\}} P_n \left(1 - \frac{1}{1 + \tau \eta_m \alpha_k^{\alpha_m} \eta_n^{-1} b_k^{-\alpha_n}} \right) l dl \right] \quad (13)$$

其中: $k \in \{1, 2\}, \lambda_k = \lambda_1 (k=1) / \lambda_h (k=2)$. 将式(13)代入式(10)中,可得式(7),定理1得证.

2.2 用户移动性及切换影响

实际场景中,用户会因移动而产生越区切换,如图2所示.为量化用户移动性对系统性能的影响,分析用户移动速度与切换次数的内在关联.首先根据无人机基站位置及距离信息推导各类边界分布情况,并分析单位面积内包含边界长度的期望,即边界的长度强度.显然,直接分析二维场景中的一维指标十分困难.为此,提出一种将一维边界长度强度转化为二维指标的方法并进行分析,具体如下:以边界为中轴线, $2\Delta d$ 为宽生成矩形区域(见图2),定义边界的区域强度,即单位面积内包含生成矩形区域面积期望,表示为 $\zeta_{kj}(\Delta d)$. Δd 趋于0时,边界区域强度与长度强度间存在以下关系: $\zeta(\Delta d) = \zeta 2\Delta d$.

同时,根据系统模型中对用户移动性的描述,用户在单位时间内的移动轨迹可看作长度为 v 的直线段。因此,由蒲丰投针定理^[20]、边界的长度强度以及用户的移动速度,推导得到单位时间内用户的平均切换次数,用户移动速度与切换次数之间的关系得以量化。

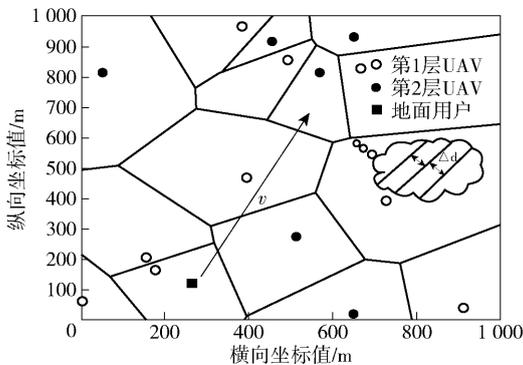


图2 用户越区切换的产生示意图

定义第 k 层无人机基站与第 j 层无人机基站之间边界的集合为 L_{kj} , 以边界为中轴线, 宽度为 $2\Delta d$ 的矩形区域集合为 $L_{kj}(\Delta d)$. 根据定义, k 层与 j 层无人机基站间矩形区域的区域强度为

$$\zeta_{kj}(\Delta d) = E[L_{kj}(\Delta d) \cap [0, 1]^2] \quad (14)$$

以地面为平面建立直角坐标系, 设典型用户位于原点, 接入的 k 层无人机基站相对于地面投影的坐标为 $(r_0, 0)$, j 层无人机基站的地面投影坐标 (x_0, y_0) . 对于任意边界 L_{kj} 上的坐标点 (x, y) , 有

$$(x - r_0)^2 + y^2 + H_j^2 = (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + H_k^2 \quad (15)$$

其中 H_j, H_k 分别为 j, k 层的无人机基站高度. 交换左右项, 可得

$$2(x_0 - r_0)x + 2y_0y + H_j^2 - H_k^2 + r_0^2 - x_0^2 - y_0^2 = 0 \quad (16)$$

式(16)实际上是直线的表达式, 直线与典型用户(原点)的欧式距离为

$$d_{\text{Euclid}} = \frac{|H_j^2 - H_k^2 + r_0^2 - x_0^2 - y_0^2|}{2\sqrt{(x_0 - r_0)^2 + y_0^2}} \quad (17)$$

对于矩形区域 $L_{kj}(\Delta d)$ 内的任意一点, 有

$$L_{kj}(\Delta d) = \{(x, y) \mid d_{\text{Euclid}} < \Delta d\} \quad (18)$$

转化坐标系为极坐标系, 得到

$$L_{kj}(\Delta d) = \left\{ (r, \theta) \mid \frac{|H_j^2 - H_k^2 + r_0^2 - r^2|}{2\sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r_0r\cos\theta}} < \Delta d \right\} \quad (19)$$

根据式(19)进一步推导得到

$$L_{kj}(\Delta d) = \{(r, \theta) \mid r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 > 0, r > \sqrt{r_0^2 + H_j^2 - H_k^2}, |H_j^2 - H_k^2 + r_0^2 - r^2| < 2\Delta d \sqrt{r^2 + r_0^2 - 2r_0r\cos\theta}\} \quad (20)$$

基于切换边界定义, $r = \sqrt{r_0^2 + h_j^2 - h_k^2} + \mathcal{O}(\Delta d)$.

因此, 式(20)进一步表示为

$$L_{kj}(\Delta d) = \{(r, \theta) \mid r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 > 0, r > \sqrt{r_0^2 + H_j^2 - H_k^2}, |H_j^2 - H_k^2 + r_0^2 - r^2| < 2\Delta d r_0 \sqrt{2(1 - \cos\theta)}\} + \mathcal{O}(\Delta d) \quad (21)$$

由式(21)中条件, 可推得矩形区域 $L_{kj}(\Delta d)$ 的整体面积. 根据极坐标特性, 对该区域面积的求解可以转化为对距离与角度的二重积分, 即

$$\begin{aligned} |L_{kj}(\Delta d)| &= \\ &2 \int_0^\pi \int_{\sqrt{r_0^2 + H_j^2 - H_k^2}}^{\sqrt{r_0^2 + H_j^2 - H_k^2} + 2\Delta d r_0 \sqrt{2(1 - \cos\theta)} + \mathcal{O}(\Delta d)} r dr d\theta \times \\ &\quad \mathbf{1}(r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 > 0) = \\ &\left[2\Delta d r_0 \int_0^\pi \sqrt{2(1 - \cos\theta)} d\theta + \mathcal{O}(\Delta d) \right] \times \\ &\quad \mathbf{1}(r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 > 0) \end{aligned} \quad (22)$$

其中

$$\mathbf{1}(r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 > 0) = \begin{cases} 1, & \text{若 } r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 > 0 \\ 0, & \text{若 } r_0^2 + H_j^2 - H_k^2 \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

基于式(15) ~ 式(23), 可得如下定理.

定理2 单位时间内用户的平均切换次数为

$$N(v) = \frac{2}{\pi} \zeta v = \frac{\zeta(\Delta d)v}{\pi \Delta d} \quad (24)$$

证明 基于对边界形成矩形区域的定义, 边界的区域强度等价于用户存在于 $L_{kj}(\Delta d)$ 内的概率. 根据泊松点过程^[9]性质, 用户与接入的第 k 层无人机基站距离为 r_0 的情况下, k, j 层间边界的区域强度为

$$\zeta_{kj}(\Delta d | r_0) = 1 - \exp[-\lambda_k |L_{kj}(\Delta d)|] \quad (25)$$

根据式(25)及式(4)、式(5)对系统接入概率的分析, 得出系统整体的边界区域强度:

$$\zeta(\Delta d) = \sum_{k=1}^2 \int_0^\infty \left\{ 1 - \exp\left[-\lambda_k \sum_{i=1}^2 |L_{ki}(\Delta d)|\right] \right\} \times f_{R1|P_k}(r_0) dr_0 \quad (26)$$

基于式(26)及 Δd 趋于 0 时边界区域强度与长度强度间的关系, 系统整体的边界长度强度为

$$\lim_{\Delta d \rightarrow 0} \zeta = \frac{\zeta(\Delta d)}{2\Delta d} \quad (27)$$

根据系统模型中对用户移动性的描述,用户在单位时间内的移动轨迹可看作长度为 v 的直线段. 基于蒲丰投针定理^[20],可得式(24),定理 2 得证.

2.3 最大移动速度约束

实际通信业务中,数据的传输效率不仅取决于网络的传输速率,也与基站内的排队过程及因越区切换导致的开销息息相关. 因此,接下来研究保证数据正常传输时的最大移动速度约束.

根据系统模型定义、接入概率的分析及排队理论^[11],2 层无人机基站的到达率分别为

$$\Lambda_1 = P_1 P_{\text{data}} \frac{\lambda_u}{\lambda_1}, \Lambda_h = P_2 P_{\text{data}} \frac{\lambda_u}{\lambda_h} \quad (28)$$

其中 P_{data} 为每位用户请求数据的概率. 设定 L 为传输数据包的大小,根据传输速率的相关分析,2 层无人机传输单个数据包的时延分别为

$$\frac{1}{\mu_1} = \frac{LP_1}{R_1}, \frac{1}{\mu_h} = \frac{LP_2}{R_2} \quad (29)$$

$R_{1,2}$ 为接入各层无人机时系统整体的传输速率,基于系统建模及无线通信理论^[9],可表示为

$$R_j = W \lg(1 + \tau) P(\gamma > \tau | U_0 \in \phi_{U_j}) \quad (30)$$

基于式(28)~式(30),可得接入两层无人机基站的服务强度分别为

$$\rho_1 = \frac{\Lambda_1}{\mu_1}, \rho_h = \frac{\Lambda_h}{\mu_h} \quad (31)$$

根据式(29)、式(31)以及 M/D/1 排队系统性质^[15],可得接入各层无人机基站时用户的平均排队时延为

$$D_{q,1} = \frac{1}{\Lambda_1} \frac{\rho_1^2}{2(1-\rho_1)}, D_{q,2} = \frac{1}{\Lambda_h} \frac{\rho_h^2}{2(1-\rho_h)} \quad (32)$$

在用户排队等待服务的过程中,因其移动性会有切换情况发生. 基于式(24)和式(32),用户在排队等待过程中的平均切换次数为

$$N_1(v) = \frac{2}{\pi} \zeta v D_{q,1}, N_2(v) = \frac{2}{\pi} \zeta v D_{q,2} \quad (33)$$

用户完成一次切换后,需要在新接入基站内重新排队并进行服务. 若系统能够正确完成数据传输,则用户在排队等待过程中的平均切换次数应小于 1,即

$$N_1(v) = \frac{2}{\pi} \zeta v D_{q,1} < 1, N_2(v) = \frac{2}{\pi} \zeta v D_{q,2} < 1 \quad (34)$$

由式(34),可得对应的最大移动速度约束为

$$v_{\max} = \min \left\{ \frac{\pi}{2\zeta D_{q,1}}, \frac{\pi}{2\zeta D_{q,2}} \right\} \quad (35)$$

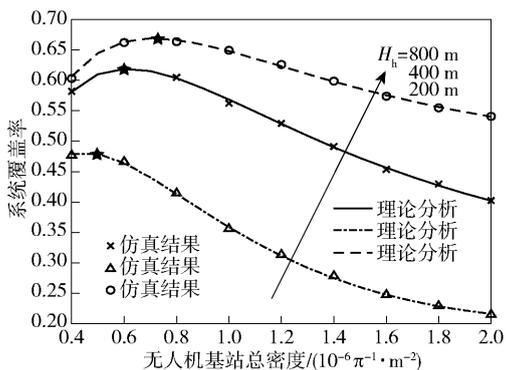
3 仿真结果与分析

在给定区域内对无人机系统性能进行仿真,以验证理论分析的正确性. 仿真范围设置为半径为 1 km 的圆形区域,仿真结果由 5 万次撒点仿真平均后得到. 具体的系统参数设置如表 1 所示.

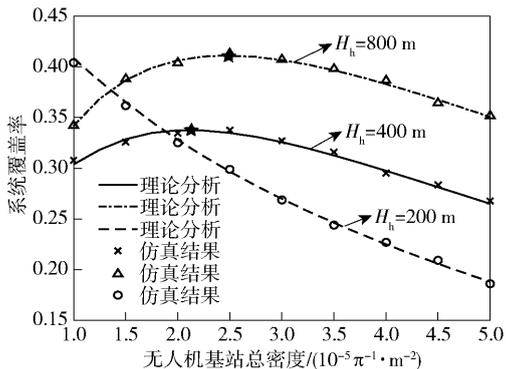
表 1 仿真参数

参数	取值
LoS, NLoS 信道额外路损	1, 10
LoS, NLoS 信道路损系数	3, 3.5
环境常数 B, C	0.13, 11.95
数据包尺寸/bit	1 000
服务带宽/Hz	1 000
信干比(SIR) 阈值/dB	0
无人机基站发射功率/dBm	33
用户请求数据概率	0.01

图 3 所示为无人机基站服务高度不同状态下,系统覆盖概率随基站总密度变化的趋势(固定 2 层无人机密度比为 1:1 且第 1 层无人机服务高度为 100 m). 通过对 3 种不同基站间高度比情况的仿真可知,无人机总密度较小时覆盖概率较高. 因此,若以更好的网络覆盖性能为首要需求,需控制无人机整体密度在较低水平. 此外,在无人机总密度较低时,更低的层间高度比将带来更好的覆盖性能;随着无人机密度的增加,高层间高度比时网络的覆盖性能逐渐优于低层间高度比时的网络覆盖性能. 基于仿真分析,在无人机整体密度较低时,基站间产生的干扰有限. 此时,更低的层间高度比可减少用户与接入节点间的距离,进而可提供更好的覆盖;随着无人机整体密度的增加,各高度比下的用户平均接入距离均显著降低. 此时,低层间高度比下的基站间干扰显著增大,使得整体覆盖性能也持续下降,逐渐低于高层间高度比的情况. 此外,对比单层地面基站场景^[21](基站总密度相同),在基站整体密度较低时,由于空中信道的传输衰落更小,双层无人机网络可以提供更好的覆盖性能;而整体密度较高时,地面基站的平均接入距离更近,覆盖性能也更稳定. 同时,对比单层无人机场景^[10],双层无人机网络的覆盖性能在无人机整体密度较低时稍差,但在整体密度较高时明显更优. 这也符合对无人机基站间高度比的分析.

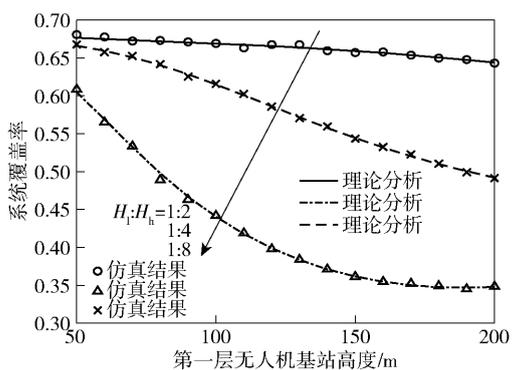


(a) 无人机基站总密度 $0.4\sim 2\times 10^{-6}(\pi^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ 时仿真结果

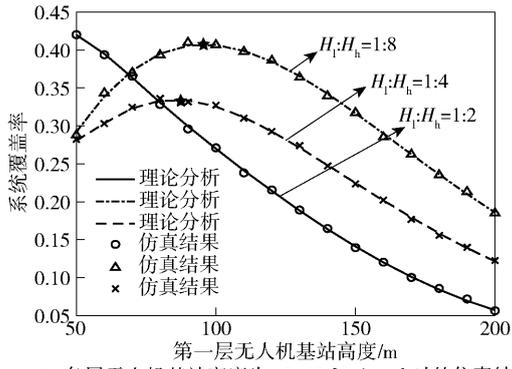


(b) 无人机基站总密度 $1\sim 5\times 10^{-5}(\pi^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ 时仿真结果

图 3 系统覆盖概率随无人机基站总密度的变化趋势



(a) 各层无人机基站密度为 $3.5\times 10^{-7}(\pi^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ 时的仿真结果



(b) 各层无人机基站密度为 $1.5\times 10^{-5}(\pi^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$ 时的仿真结果

图 4 系统覆盖概率随各层无人机基站高度的变化趋势

图 4 所示为系统覆盖概率随 2 层无人机基站服务高度变化的趋势. 由仿真结果分析, 对任意第 1 层无人机基站的高度, 在无人机基站整体密度较低时, 低层间高度比的情况较高层间高度比情况的用户平均接入距离更短, 因此也具有更好的覆盖性能; 当无人机整体密度较高时, 更高的层间密度比有效地减少了基站间干扰, 覆盖性能也相对更优. 结合图 3、图 4 分析, 无人机密度较低时接入距离是覆盖性能的主要影响因素; 密度较高时, 覆盖性能则主要取决于基站间干扰. 同样地, 对比单层地面基站^[21]和单层无人机基站^[10]场景 (基站总密度相同), 无论无人机基站服务高度如何变化, 系统覆盖性能的整体趋势与图 3 中分析一致. 这也说明, 对比地面基站场景, 双层无人机网络可以提供更优质的覆盖; 而对比单层无人机基站场景, 双层无人机网络在基站密度及服务高度变化时覆盖性能更加稳定.

图 5、图 6 所示为系统内边界的长度强度随无人基站密度及服务高度变化的趋势 (图 5 中无人机基站密度比为 1:1 且第 1 层无人机服务高度为 100 m, 图 6 中 2 层无人机基站密度均为 $5\times 10^{-6}(\pi^{-1}\cdot\text{m}^{-2})$). 由图可知, 整体边界长度强度随无人机基站密度增大而增大. 这是因为, 无人机密

度的增大使系统中的接入节点个数增加, 也将产生更多的层内、跨层边界. 同时, 整体边界的长度强度随无人机服务高度及层间高度比的增大呈下降趋势. 从理论层面分析, 无论是单层高度或层间高度比的增加, 都使 2 层无人机之间的高度差值增大, 也导致高层无人机的接入概率以及跨层边界的 $|L_{kj}(\Delta d)|$ 降低. 这使跨层及高层无人机层内边界的长度强度显著下降. 由式 (24) 可知, 用户单位时间内的切换次数与系统的边界密度呈正比例关系. 因此, 无人机密度的增加使得用户移动过程中的切换更加频繁, 而层间高度比与服务高度的提升则会减少移动过程中的切换.

图 7(a) 所示为不同用户密度下, 最大移动速度约束随无人机基站总密度变化的趋势 (固定两层无人机密度比为 1:1, 服务高度分别为 100 m 和 200 m). 据图可知, 随着无人机总密度的增加, 最大移动速度约束呈先上升后降低的趋势. 从理论角度分析, 式 (32) 中用户排队时延关于无人机密度的二阶偏导为

$$\frac{\partial^2 D_{q,j}}{\partial \lambda_u^2} = \frac{P_{\text{data}}^2 P_j^2}{\mu^3 \lambda_j^2 (1-\rho)^3} \quad (36)$$

其中 $j \in \{1, 2\}$. 根据参数计算可得, 2 层内的服务

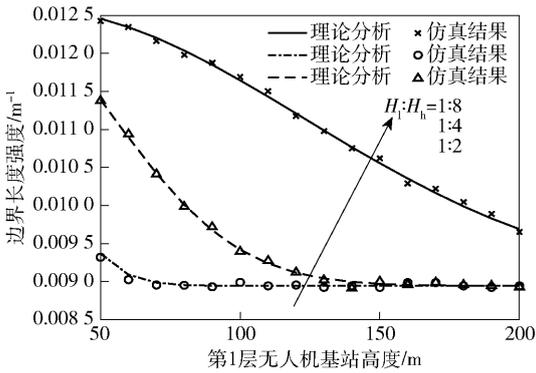


图5 边界长度强度随无人机基站总密度的变化趋势

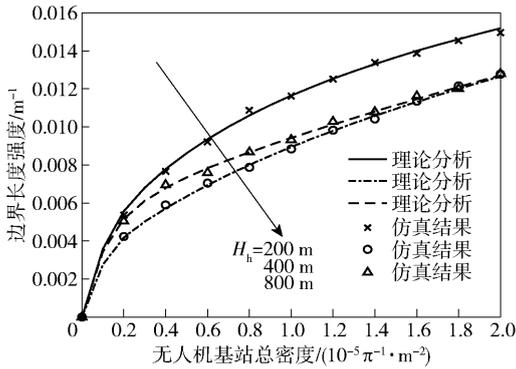


图6 边界长度强度随无人机基站密度的变化趋势

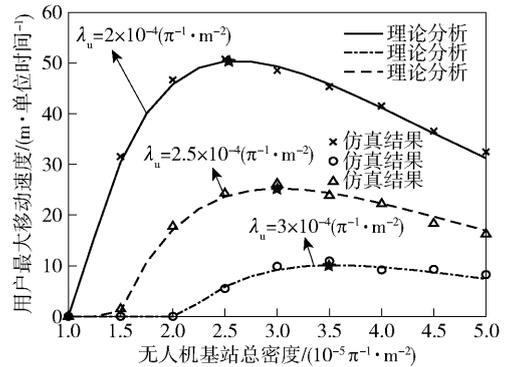
强度在无人机总密度变化时始终小于1,则二阶偏导值恒大于0,说明存在特定的无人机基站总密度能最大化用户移动速度约束,符合仿真结果.此外,随着用户密度增大,2层无人机基站的到达率与服务强度也显著增加,导致用户排队时延的增大,最大移动速度约束的降低,以及切换性能的降低.此外,排队时延关于无人机密度的一阶偏导为

$$\frac{\partial D_{q,j}}{\partial \lambda_u} = \frac{P_j P_{\text{data}}}{2\mu^2 \lambda_j (1-\rho)^2} \quad (37)$$

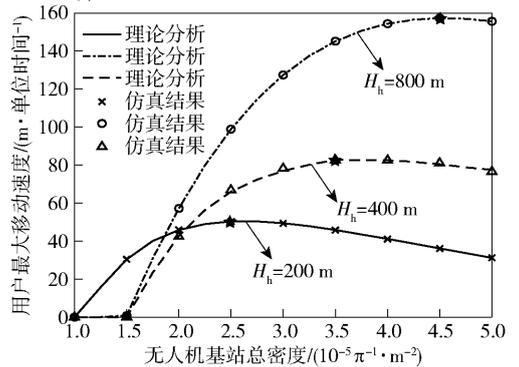
其中: $j \in \{1, 2\}$,由式(37)可知,该偏导恒大于0.因此,对应无人机密度值与用户密度呈正比例关系.随着用户密度的增加,最大移动速度约束取得最佳值时对应的无人机总密度也逐渐增大.

图7(b)所示为不同无人机服务高度下,最大移动速度约束随无人机基站密度变化的趋势(固定两层无人机密度比为1:1,用户密度为 $2 \times 10^{-4} (\pi^{-1} \cdot \text{m}^{-2})$ 且第1层无人机的服务高度为100 m).由图可知,随着无人机总密度的增加,最大移动速度约束呈先上升后下降的趋势.基于排队理论分析,无人机密度较低时用户密度远大于无人机密度,系统服务负载较高,使得最大移动速度约束处于较低水平.

当无人机整体密度增大时,服务负载降低,最大移动速度约束也随之提升.这说明无人机总密度是影响最大移动速度约束及系统切换性能的首要因素.另一方面,随着无人机密度的增大,基于图3和图5的分析,不同层间高度比下的覆盖性能均呈下降趋势,且边界的长度密度上升.两者的变化均对最大移动速度约束产生负面影响.同时,当无人机总密度较低时,层间高度差的增大使得最大移动速度约束显著下降.结合接入概率解析解与图3所示的仿真结果分析,在无人机密度较小时,层间高度差的增加不仅使覆盖性能下降,也降低了高层无人机的接入概率,从而使接入高层无人机基站用户的排队时延显著增大,导致系统无法保证移动用户的正常服务.但随着无人机整体密度的增大,层间高度比较高时对应的覆盖性能逐渐优于低层间高度比情况.基于图3、图5的仿真结果,高层间高度比对应的覆盖性能更好,且边界长度强度更低,因此也拥有更好的切换性能.



(a) 不同用户密度下用户最大移动速度仿真结果



(b) 不同服务高度下用户最大移动速度仿真结果

图7 用户最大速度随无人机基站密度的变化趋势

4 结束语

基于随机几何理论,对无人机移动通信系统覆盖及切换性能进行了研究,并对网络覆盖概率、传输

速率、边界长度强度以及用户最大移动速度进行分析。结果表明,系统在无人机总密度较低时拥有最佳覆盖性能。同时,无人机密度较低时接入距离是覆盖性能的主要影响因素;密度较高时,覆盖性能则主要取决于基站间的干扰。此外,无人机整体密度是影响系统切换性能的主要因素。系统切换性能与用户密度呈反比例关系,与无人机层间密度比呈正比例关系。

参考文献:

- [1] 张国敏, 王娜, 王睿, 等. 基于访问密度的 UAV 三维移动模型[J]. 北京邮电大学学报, 2017, 40(S1): 112-116.
Zhang Guomin, Wang Na, Wang Rui, et al. UAV 3D mobility model based on visit density[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2017, 40(S1): 112-116.
- [2] 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.
- [3] Cho H, Liu C, Lee J, et al. Impact of elevated base stations on the ultra-dense networks[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(6): 1268-1271.
- [4] Yanikomeroglu, Halim, Bor-Yaliniz, et al. The new frontier in RAN heterogeneity: multi-tier drone-cells [J]. IEEE Communications Magazine Articles News & Events of Interest to Communications Engineers, 2016, 54(11): 48-55.
- [5] Merwaday A, Tuncer A, Kumbhar A, et al. Improved throughput coverage in natural disasters: unmanned aerial base stations for public-safety communications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2016, 11(4): 53-60.
- [6] Pan Yu, Da Xinyu, Hu Hang, et al, Energy-efficiency optimization of UAV-based cognitive radio system [J]. IEEE Access, 2019(7): 155381-155391.
- [7] Yao Yuanyuan, Zhu Zhengyu, Huang Sai, et al, Energy efficiency characterization in heterogeneous IoT system with UAV swarms based on wireless power transfer[J]. IEEE Access, 2020(8): 967-979.
- [8] Zhu Zhengyu, Wang Ning, Hao Wanming, et al. Robust beamforming designs in secure MIMO SWIPT IoT networks with a non-linear channel model[J/OL]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 1(1): 1-1 [2020-08-07]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9162099>. DOI: 10.1109/JIOT.2020.3014933.
- [9] Haenggi M. Stochastic geometry for wireless networks[M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 100.
- [10] Zhou Lai, Yang Zhi, Zhou Shidong, et al. Coverage probability analysis of UAV cellular networks in urban environments [C] // IEEE International Conference on Communications Workshops. Kansas City: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [11] Wang X, Zhang H, Leung V C M. Modeling and performance analysis of UAV-assisted cellular networks in isolated regions [C] // IEEE International Conference on Communications Workshops. Kansas City: IEEE Press, 2018: 11-16.
- [12] Esma T, Cenk G M. Downlink analysis in unmanned aerial vehicle (UAV) assisted cellular networks with clustered users[J]. IEEE Access, 2018(6): 36313-36324.
- [13] Clayirci E, Akyildiz I F. User mobility pattern scheme for location update and paging in wireless systems[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2002, 1(3): 236-247.
- [14] Wang Bang, Kong Qiao, Liu Wenyu, et al. On efficient utilization of green energy in heterogeneous cellular networks[J]. IEEE Systems Journal, 2015, 11(2): 846-857.
- [15] 周炯盘. 通信网理论基础[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1991: 10-11.
Zhou Jiongpan. Communication theory basis[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 1991: 10-11.
- [16] Zonoozi M M, Dassanayake P. User mobility modeling and characterization of mobility patterns[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1997, 15(7): 1239-1252.
- [17] Hourani A, Kandeepan S, Jamalipour. A modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments [C] // IEEE Global Communications Conference. Austin: IEEE Press, 2014: 2898-2904.
- [18] 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.
- [19] Wang X, Gursoy M C. Coverage analysis for energy-harvesting UAV-assisted mmWave cellular networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 37(12): 2832-2850.
- [20] Bao Wei, Liang Ben. Stochastic geometric analysis of user mobility in heterogeneous wireless networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2015, 33(10): 2212-2225.
- [21] Andrews, Jeffrey G, Baccelli, et al. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks [J]. IEEE Transactions on Communications, 2011, 59(11): 3122-3134.