

无人机辅助的蜂窝数据流量卸载及 保密传输方案

张尚伟¹, 刘家佳¹, 许铁鑫²

(1. 西北工业大学网络空间安全学院, 710072, 西安; 2. 中国人民解放军 31668 部队, 810000, 西宁)

摘要: 为解决传统蜂窝网络中边缘用户上行通信链路质量较差且容易遭到窃听的问题,提出了一种移动无人机辅助的流量卸载和保密传输方案。首先根据空地视距信道特性,建立了基于接收信号强度阈值的信道接入机制,解决了用户传输模式选择问题;其次,根据空地信道接入时延、无人机飞行高度和速度,确定了任意时刻无人机链路的覆盖范围;然后,利用随机几何理论,给出了平均可达速率解析式和安全容量评估方法;最后,通过仿真实验验证所提方案和理论结果的有效性,并给出关键参数的最优化配置方案。仿真结果表明,与传统蜂窝网络相比,所提出的基于移动无人机的组网方案能够在保证用户公平性的基础上,使网络上行通信速率提高约 40%,安全容量提高约 70%。

关键词: 无人机;蜂窝网络;流量卸载;保密传输

中图分类号: TN929 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202102014 **文章编号:** 0253-987X(2021)02-0121-08



OSID 码

An Unmanned Aerial Vehicle-Assisted Cellular Data Traffic Offloading and Secure Transmission Scheme

ZHANG Shangwei¹, LIU Jiajia¹, XU Tiexin²

(1. School of Cybersecurity, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. Unit 31668 of PLA, Xining 810000, China)

Abstract: A cruising unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted traffic offloading and secrecy transmission scheme is proposed to solve the problem that the uplink quality of cell-edge users is poor and easy to be eavesdropped in traditional cellular networks. Firstly, according to the line-of-sight propagation characteristics of the air-to-ground channel, a channel access mechanism based on the threshold of the received signal strength is established to solve the problem of user transmission mode selection. Then, the coverage region of UAV's link at any time is determined by considering important factors such as channel access delay, flight altitude and speed of the UAV. Additionally, an analytic formula of average accessible rate is derived and an appropriate method to evaluate the network secrecy rate is given by using the random geometry theory. Finally, the validity of the proposed scheme and theoretical results is verified by simulation experiments, and the optimal settings of key parameters are presented to achieve the optimum network performances. Simulation results and comparisons with traditional cellular networks show that the proposed mobile UAV-based networking scheme increases the uplink rate by about

40% and the security capacity by about 70% on the basis of ensuring the users fairness.

Keywords: unmanned aerial vehicle; cellular network; traffic offloading; secrecy transmission

受限于频谱资源、传输时延、网络容量和覆盖范围,传统的地面蜂窝网络面临瓶颈,无法满足爆炸性增长的通信需求^[1]。由无人机组成的高/低空通信平台作为一种新兴的无线接入手段,应用涉及军事、民用、应急通信等多个领域^[2],是目前全球通信网络领域的研究热点。目前,无人机通信主要应用于两类典型问题场景:无人机灾后应急通信恢复和无人机辅助通信网络场景。无人机辅助通信网络主要包括无人机辅助蜂窝网(流量卸载、边缘计算任务分配)、多层异构网(资源分配、干扰管理)、车联网(位置优化、路径规划)、无线传感网(路由管理、无线充电)以及物联网(数据采集、轨迹优化)等^[3-4]。其中,针对蜂窝网络流量过载的5G典型问题场景,通过部署无人机能够提供有效解决方案,受到广泛关注。由于空地信道及网络拓扑随无人机移动而发生剧烈变化,对移动无人机辅助蜂窝网络性能的评估面临巨大挑战,大部分相关工作较少考虑无人机的移动性^[5-7]。Lyu等人在文献[8]中通过部署无人机沿基站边缘区域环绕飞行来卸载基站流量,并给出网络平均吞吐量下界。然而,文献[8]提出的基于无人机覆盖区域内用户终端与无人机通信时间相等的假设,与现实情况相去甚远,虽能得到网络基本性能解析式,但无法精确反映该场景下实际可达的网络基本性能,局限性较大。文献[9]基于巡航飞行无人机通信网络提出了一种优化无人机飞行位置的方法来提高能量效率,但该工作只针对无人机处于静止状态时的网络性能进行分析,忽略了无人机移动性对网络性能和能量效率的影响。

尽管无人机能够灵活地提供广覆盖、大容量、高可靠的通信服务,但在现实应用中空地信道容易遭到监听而导致信息泄露,面临着严重的安全威胁,针对无人机的安全攻击事件层出不穷^[10]。同时,传统的加密方法复杂度较高,无法大规模应用到能量和运算能力受限的无人机通信系统中,已经成为限制无人机通信业务广泛开展的严重障碍。作为增强无线通信安全的新手段,物理层安全技术利用物理层信道特性来实现信息的保密传输^[11],而空地视距(LOS)信道的存在和灵活的移动性使得无人机通信在物理层安全性能方面拥有巨大的潜力^[12]。现有关于无人机保密传输方案的研究工作大部分关注悬停无人机辅助通信^[13]或者实施辅助干扰^[14-15]的网

络场景,缺少针对移动无人机辅助通信保密传输的研究。

基于上述研究的不足,本文针对无人机辅助卸载蜂窝网络流量的应用场景,考虑边缘用户上行链路信道质量较差的问题,通过在基站边缘部署移动无人机来增强边缘用户通信性能和物理层安全容量。首先,在网络频谱资源有限的情况下,利用随机几何理论建立数学框架解析评估不同信道接入机制下蜂窝网络上行通信性能;然后,通过引入信道接入时延,对移动无人机辅助蜂窝网络平均可达速率进行评估和解析,并通过仿真实验验证理论结果的准确性和有效性;最后,利用仿真实验分析讨论部署移动无人机辅助蜂窝网络在物理层安全容量上的提升,探索讨论不同的网络参数设置对保密传输性能的影响,并给出网络最优化参数配置。

1 系统模型

如图 1 所示,在半径为 R 的圆形区域内,合法用户服从密度为 λ_L 的泊松分布 Φ_L ,与位于该区域中心的基站建立上行通信。由于基站边缘区域用户与基站距离较远导致上行链路信道质量较差,加之终端设备发射功率有限,使得基站边缘用户通信服务质量较差,因此考虑在基站边缘区域部署一架巡航飞行无人机作为移动基站,其飞行速度记为 V ,飞行高度记为 h 。假设该区域中存在非法窃听者,且符合密度为 λ_E 的泊松分布 Φ_E ,时刻处于被动窃听状态。整个网络可用频谱带宽为 W ,被均匀划分成 K 个正交子信道,其中 τK 个子信道分配给基站用户(其中 τ 为子信道分配比例, $0 \leq \tau \leq 1$), $(1-\tau)K$ 个子信道分配给无人机用户。

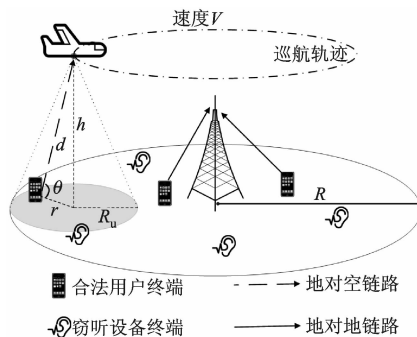


图 1 系统模型

根据文献[16]中的空地链路模型,地面用户到

无人机的链路类型,如 LOS 链路或非视距(NLOS)链路,取决于其到无人机的仰角 θ 。假设无人机利用多普勒效应补偿技术抵消移动产生的多普勒效应,则无人机接收到的信号功率为

$$\left. \begin{aligned} P_{r, \text{LOS}} &= P_t \zeta d^{-\alpha_1}, & \theta \geq \theta_0 \\ P_{r, \text{NLOS}} &= \eta P_t \zeta d^{-\alpha_1}, & \theta < \theta_0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: θ_0 为 LOS 链路仰角阈值; P_t 为用户发射功率; ζ 为在参考距离 1 m 处空地的信道功率增益; $\alpha_1=2$ 为 LOS 传播环境下空地链路的路损指数; η 为 NLOS 链路附加衰减因子; $d=(h^2+r^2)^{1/2}$ 为用户到无人机距离; r 为无人机到用户水平距离。

对于地面蜂窝通信,设定地面无线信道为准静态瑞利衰落信道,此时地面基站和窃听者接收到合法用户的信号功率分别表示为

$$\left. \begin{aligned} P_r &= P_t h_b d_L^{-\alpha_n} \\ P_{r,e} &= P_t h_e d_E^{-\alpha_n} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: h_b 和 h_e 分别为相互独立且服从均值为 μ 和 ν 指数分布的瑞利信道衰落系数,且 h_b 服从 $\exp(\mu)$ 分布, h_e 服从 $\exp(\nu)$ 分布; $\alpha_n > 2$ 为地面无线信道路径损耗指数; d_L 为合法用户与基站之间的距离; d_E 为窃听者与合法用户之间的距离。

2 信道接入机制

由于信道质量对网络性能和保密传输性能影响较大,为确保上行链路信道质量较高的合法用户能够建立通信,本文使用基于接收信号功率强度的信道接入机制。其中,合法用户向无人机和基站发送导频信号来测试信道质量,若无人机或基站接收到的信号强度大于给定阈值 β ,则建立连接,否则连接中断;其次,对于无人机上行通信链路,鉴于同样条件下空地 LOS 信道质量明显优于 NLOS 信道,限定处在无人机 LOS 链路区域内的合法用户能够与无人机建立上行通信,即为

$$\left. \begin{aligned} P_t \zeta d^{-\alpha_1} &> \beta \\ P_t h_b d_L^{-\alpha_n} &> \beta \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

按照上述机制,可得基站覆盖半径为 R 范围内任一合法用户与基站建立连接概率为^[17]

$$\rho_b(R) = P_r \{ P_t h_b r^{-\alpha_n} > \beta \} = \int_0^R \exp\left(-\mu \frac{\beta r^{\alpha_n}}{P_t}\right) f_{r,b}(r) dr \quad (4)$$

式中: $f_{r,b}(r)=2r/R^2$ 为用户到基站通信距离 r 的概率密度函数。考虑到无线信号传播速度远远大于无人机飞行速度,按照上述信道接入机制,任一时刻无人机的理论覆盖半径为

$$R_u = \min \left\{ \sqrt{\left(\frac{P_t \zeta}{\beta} \right)^{2/\alpha_1}} - h, \frac{h}{\tan \theta_0} \right\} \quad (5)$$

式中: $h < (P_t \zeta / \beta)^{2/\alpha_1}$;最小值函数 $\min\{\cdot\}$ 内的前项表示无人机空地通信链路的最大覆盖半径,后项确保空地信道为 LOS 链路,可以看出覆盖范围受到飞行高度影响较大。值得注意的是,地面用户随无人机位置的变化而改变,为了描述无人机的移动性对地面覆盖区域的影响,在前期工作^[18]中针对下行通信链路的信道接入时延模型可用于本文上行 LOS 链路的分析。具体来说,地面用户从进入无人机覆盖范围内到与无人机成功建立通信需要消耗一定的时间,即为信道接入时延(记为 t_0),如图 2 所示,假设无人机从 t_1 到 t_2 时刻的飞行时间为 $t_0=t_2-t_1$,则其飞行距离为 Vt_0 ,在 t_0 时间段内,无人机上行通信实际覆盖范围如图中阴影区域所示。

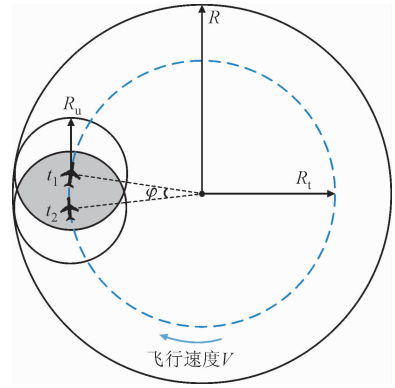


图 2 无人机上行视距链路覆盖区域

设定无人机巡航轨迹半径为 $R_t=R-R_u$,给定巡航无人机速度 V ,可以得到信道接入延迟时间内无人机飞行产生的角度为 $\phi=Vt_0/R_t$ 。为了提高资源利用率,无人机根据地面用户发射功率和基站覆盖区域半径灵活调整飞行高度以达到区域全覆盖,此时基站上行通信覆盖区域半径为

$$R_b = R_t - \sqrt{R_u^2 - \left(R_t \sin \frac{\phi}{2} \right)^2} \quad (6)$$

且无人机上行通信实际覆盖范围面积为

$$S_0 = 2R_u^2 \arccos\left(\frac{R_t \sin \frac{\phi}{2}}{R_u}\right) - 2R_t \sin \frac{\phi}{2} \sqrt{R_u^2 - \left(R_t \sin \frac{\phi}{2} \right)^2} \quad (7)$$

3 平均可达速率

本节分别针对部署和未部署无人机的场景展开对比和网络性能解析,其中未部署无人机场景根据是否使用基于接收信号强度的信道接入机制进一步

分成网络场景 1 和场景 2。

3.1 场景 1

场景 1 为未部署无人机,随机信道接入机制。该场景中基站将所有可用子信道 K 随机分配给用户,则任一用户获得任一信道的概率为

$$\rho_1 = \min \left\{ 1, \frac{K}{\lambda_L \pi R^2} \right\} \quad (8)$$

给定信道噪声功率 N_0 ,可得该场景下任一用户上行链路平均可达速率为

$$R_1 = \rho_1 \frac{W}{K} E[\ln(1 + R_{SN,1})] \quad (9)$$

式中

$$\begin{aligned} E[\ln(1 + R_{SN,1})] = & \int_0^R \int_0^\infty P_r \left[\ln \left(1 + \frac{P_t h_b r^{-\alpha_n}}{N_0} \right) > t \right] f_r(r) dt dr = \\ & \int_0^R \frac{2r}{R^2} \int_0^\infty \exp \left(-\mu \frac{(2^t - 1) N_0 r^{\alpha_n}}{P_t} \right) dt dr \quad (10) \end{aligned}$$

3.2 场景 2

场景 2 为未部署无人机,基于接收信号强度的信道接入机制。基站只与接收到信号功率大于 β 的用户建立上行通信,则任一合法用户与基站建立连接的概率为 $\rho_b = \rho_b(R)$ 。给定基站可用子信道数量 K ,任一合法用户被分配到任一可用信道的概率为

$$\xi_2 = \left(\sum_{n=1}^K \frac{(\rho_b \lambda_L \pi R^2)^n \exp(-\rho_b \lambda_L \pi R^2)}{n!} + \sum_{n=K+1}^\infty \frac{(\rho_b \lambda_L \pi R^2)^n \exp(-\rho_b \lambda_L \pi R^2)}{n!} \frac{K}{n} \right) \quad (11)$$

该场景下任一用户上行链路平均可达速率为

$$R_2 = \frac{W}{K} \frac{\rho_b \xi_2}{1 - \exp(-\rho_b \lambda_L \pi R^2)} E[\ln(1 + R_{SN,2})] \quad (12)$$

式中

$$\begin{aligned} E[\ln(1 + R_{SN,2})] = & E \left[\ln(1 + R_{SN,2}) - \ln \left(1 + \frac{\beta}{N_0} \right) \right] + \ln \left(1 + \frac{\beta}{N_0} \right) \\ & \int_0^R \int_0^\infty \exp \left(-\mu \frac{(2^t (1 + \beta/N_0) - 1) N_0 r^{\alpha_n}}{P_t} \right) \frac{2r}{R^2} dt dr \quad (13) \end{aligned}$$

进一步可以得到

$$\begin{aligned} E \left[\ln(1 + R_{SN,2}) - \ln \left(1 + \frac{\beta}{N_0} \right) \right] = & \frac{1}{\rho_b} \int_0^R \int_0^\infty \exp \left(-\mu \frac{(2^t (1 + \beta/N_0) - 1) N_0 r^{\alpha_n}}{P_t} \right) \frac{2r}{R^2} dt dr \\ & \quad (14) \end{aligned}$$

3.3 场景 3

场景 3 为部署无人机,基于接收信号强度阈值 β 的信道接入机制。该场景下任一用户上行通信链路平均可达速率表示为

$$R'_c = \tau_b R_c^b + \tau_u R_c^u \quad (15)$$

式中: $\tau_b = (R_b/R)^2$, $\tau_u = S_0/(\pi R^2)$, 分别为任一用户位于基站或者无人机覆盖范围内的概率。对于在基站覆盖范围内的任一用户来说,容易得出其上行通信链路平均可达速率为

$$R_c^b = \frac{W}{K} \frac{\rho'_b \xi_{3,b}}{1 - \exp(-\rho'_b \lambda_L \pi R_b^2)} E[\ln(1 + R_{SN,3b})] \quad (16)$$

式中: $\rho'_b = \rho_b(R_b)$; $\xi_{3,b}$ 为在给定可用信道数量为 τK 情况下,任一用户获得任一可用子信道的概率,其表达式如下为

$$\begin{aligned} \xi_{3,b} = & \left(\sum_{n=1}^{\tau K} \frac{(\rho'_b \lambda_L \pi R_b^2)^n \exp(-\rho'_b \lambda_L \pi R_b^2)}{n!} + \sum_{n=\tau K+1}^\infty \frac{(\rho'_b \lambda_L \pi R_b^2)^n \exp(-\rho'_b \lambda_L \pi R_b^2)}{n!} \frac{\tau K}{n} \right) \quad (17) \end{aligned}$$

使用与式(14)相同的方法可以进一步得到

$$\begin{aligned} E[\ln(1 + R_{SN,3b})] = & \ln \left(1 + \frac{\beta}{N_0} \right) + \frac{1}{\rho'_b} \cdot \\ & \int_0^{R_b} \int_0^\infty \exp \left(-\mu \frac{(2^t (1 + \beta/N_0) - 1) N_0 r^{\alpha_n}}{P_t} \right) \frac{2r}{R_b^2} dt dr \quad (18) \end{aligned}$$

对于无人机上行链路,任一用户与无人机建立的上行链路平均可达速率表示为

$$R_c^u = \frac{W}{K} \frac{\xi_{3,u}}{1 - \exp(-\lambda_L S_0)} E[\ln(1 + R_{SN,3u})] \quad (19)$$

式中: $\xi_{3,u}$ 为给定无人机区域内可用子信道数量 $(1 - \tau)K$ 条件下,任一地面用户获得任一可用子信道的概率,表示为

$$\begin{aligned} \xi_{3,u} = & \left(\sum_{n=1}^{(1-\tau)K} \frac{(\lambda_L S_0)^n \exp(-\lambda_L S_0)}{n!} + \sum_{n=(1-\tau)K+1}^\infty \frac{(\lambda_L S_0)^n \exp(-\lambda_L S_0)}{n!} \frac{(1-\tau)K}{n} \right) \quad (20) \end{aligned}$$

根据文献[18-19]中的结论,可进一步得到

$$\begin{aligned} E[\ln(1 + R_{SN,3u})] = & \int_0^{d_{u1}} \ln \left(1 + \frac{P_t \zeta}{(h^2 + r^2)^{\alpha_1/2} N_0} \right) f_{r,u1}(r) dr + \\ & \int_{d_{u1}}^{d_{u2}} \ln \left(1 + \frac{P_t \zeta}{(h^2 + r^2)^{\alpha_1/2} N_0} \right) f_{r,u2}(r) dr \quad (21) \end{aligned}$$

式中: $d_{u1} = R_u - R_t \sin(\varphi/2)$; $d_{u2} = [R_u^2 - (R_t \sin(\varphi/2))^2]^{1/2}$; $f_{r,u1}(r)$ 和 $f_{r,u2}(r)$ 分别为无人机与地面用户间水平距离的概率密度函数,分别表示为

$$f_{r,u1}(r) = \frac{2\pi r}{S_0} \quad (22)$$

$$f_{r,u2}(r) =$$

$$\begin{aligned}
& \frac{2r}{S_0} \left(\pi - 2 \arccos \left(\frac{R_u^2 - (R_t \sin(\varphi/2))^2 - r^2}{2rR_t \sin(\varphi/2)} \right) \right) + \\
& 2R_u \sqrt{\left(2R_u R_t \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 - \left(R_u^2 + \left(R_t \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 - r^2 \right)^2} - \\
& 2R_u \sqrt{\left(2rR_t \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 - \left(R_u^2 - \left(R_t \sin \frac{\varphi}{2} \right)^2 - r^2 \right)^2}
\end{aligned} \quad (23)$$

4 安全容量

根据 Wyner 提出的窃听模型^[20],假设整个区域中的非法窃听者针对最近的处于通信状态的合法用户展开窃听。在没有部署无人机的场景中,任一合法用户到无人机的上行链路安全容量可以表示为 $C_{\text{sec}} = [C_R - C_E]^+$,其中, $[x]^+ = \max\{x, 0\}$ 、 C_R 为合法用户的信道遍历容量, C_E 为窃听者获取相应合法用户信息遍历容量。当 $C_R < C_E$ 时,将发生窃听事件。在部署无人机的场景中,任一合法用户到无人机上行链路安全容量可以表示为

$$C'_{\text{sec}} = [\tau_b(C_R^b - C_E^b) + \tau_u(C_R^u - C_E^u)]^+ \quad (24)$$

式中: τ_b 为合法用户位于基站通信范围且获得信道的概率; τ_u 为合法用户位于无人通信范围且获得信道的概率。假设合法和窃听接收终端处的噪声功率一致,可得基站覆盖范围内合法用户建立的上行链路通信瞬时安全容量为

$$C_R^b - C_E^b = \frac{W}{K} \text{lb} \left(\frac{N_0 + P_t h_b d_b^{-\alpha_n}}{N_0 + P_t h_e d_e^{-\alpha_n}} \right) \quad (25)$$

而处在边缘区域的合法用户与无人机建立的上行链路通信瞬时安全容量为

$$C_R^u - C_E^u = \frac{W}{K} \text{lb} \left(\frac{N_0 + P_t \zeta (h^2 + r_u^2)^{-\alpha_1/2}}{N_0 + P_t h_e r_e^{-\alpha_n}} \right) \quad (26)$$

在该网络场景下合法用户发送机密信息被窃听的概率为

$$P'_{\text{int}} = \tau_b P_r \{C_R^b < C_E^b\} + \tau_u P_r \{C_R^u < C_E^u\} \quad (27)$$

通过以上表达式可知只有当地面合法用户信道质量优于窃听信道质量,才能实现保密传输。而信道质量与通信双方的距离有很大的关系,对于处在基站覆盖边缘处的合法用户,由于其到基站通信链路距离过长,因此安全性无法得到保障。在边缘部署无人机,可以利用无人机到地面用户之间较好的 LOS 信道质量来实现数据的保密传输。由于针对该场景中窃听者和合法通信用户之间距离分布非常复杂,无法得到易于分析的显式解析式,本文通过仿真实验来分析无人机辅助的蜂窝网络在通信安全性上的有效性及相关优势。

5 仿真实验

仿真实验参数设置如下: $W = 10$ MHz, $K = 30$, $P_t = 251$ mW (即 24 dBm,为 UMTS/3G 系统中规定的移动终端最大发射功率), $t_0 = 1$ s, $V = 10$ m/s, $\theta_0 = \pi/5$, $\alpha_1 = 2$, $\alpha_n = 4$, $\mu = \nu = 1$, $\zeta = -50$ dB, $N_0 = -104$ dBm。采用上述参数,使用 Matlab 进行蒙特卡罗仿真,结果如图 3~图 10 所示。

从图 3 可以看出,部署无人机的网络场景中的平均可达速率高于单一基站的场景,当用户密度较小时,部署无人机网络场景中上行通信速率较单一基站场景 2 高出约 40%;当用户密度较大时,虽然场景 2 中用户上行通信平均可达速率和部署无人机场景性能趋于一致,但场景 2 中边缘用户服务质量无法保证,用户公平性较差。在图 4 中,随着子信道分配比例 τ 不断增加,基站上行通信范围内用户的可用子信道不断增加,而与无人机通信用户的可用子信道不断减少,当 $\tau \approx 0.65$ 时,整个网络系统的平均可达速率达到最高,因此针对不同网络场景参数配置情况,无人机和基站上行通信的频谱资源存在最优分配方案。

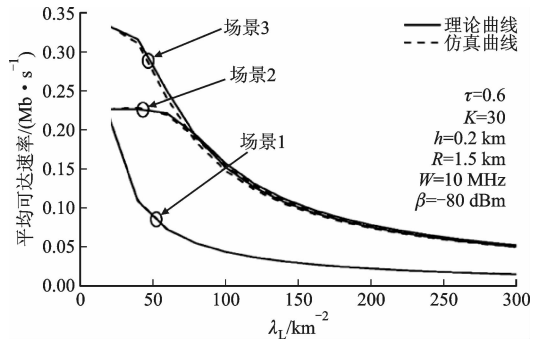


图3 用户密度对平均可达速率的影响

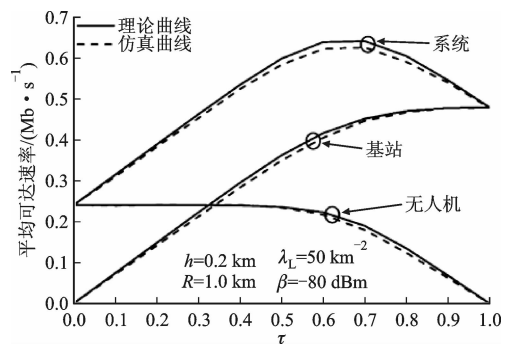


图4 子信道分配比例对平均可达速率的影响

在图 5 中,随着无人机飞行高度 h 的增加,无人机上行通信速率先增加后降低,基站上行通信速率先保持稳定后逐渐减少,当 $h \approx 230$ m 时,网络系统

平均可达速率达到最大值。这是由于随着无人机飞行高度的增加,地面用户与无人机建立 LOS 链路的概率也在逐渐增大,使得无人机上行通信平均可达速率增加,而当无人机高度进一步增高时,其到地面用户的长距离通信对上行通信造成较大的路径损耗引起传输速率的降低。对于基站通信来说,无人机飞行高度的增加导致基站覆盖上行链路范围逐渐减少,当基站范围内用户数量低于分配的子信道数量时,基站上行通信频谱效率大大降低,使得平均可达速率显著降低。

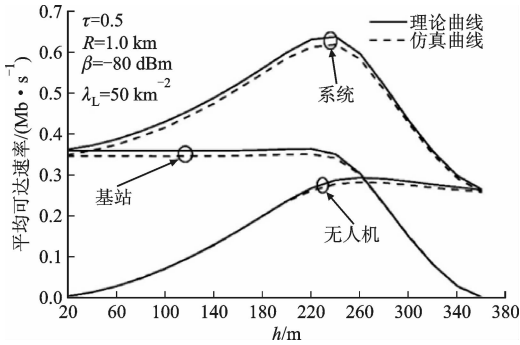


图 5 无人机高度对平均可达速率的影响

图 6 显示信号强度阈值 β 对平均可达速率的影响。随着 β 的增加,对上行链路信道的质量要求越来越高,使得距离无人机或者基站距离较近的用户获得通信的机会大大增加,使得网络平均可达速率逐渐增加;当 $\beta > -80$ dBm 时,绝大部分用户由于信道质量不达标而无法通信,仅有的可以建立上行通信的用户数量逐渐开始减少并低于可用子信道数量,大大降低了网络频谱效率,导致整个网络性能的下降, $\beta \approx -80$ dBm 为网络最优配置。

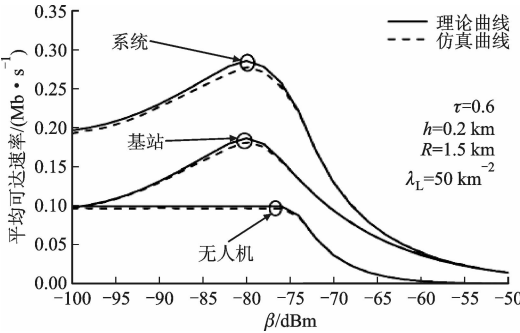


图 6 信号强度阈值 β 对平均可达速率的影响

在图 7 中,随着 λ_E 增加,网络安全容量显著降低,可以看出通过部署无人机辅助蜂窝通信在增强网络安全容量方面有明显的优势。图 8 显示子信道分配对不同场景网络安全容量的影响且存在最优配置,当 $\tau < 0.2$ 时场景 2 的安全容量高于场景 3,而

随着 τ 的不断增加,场景 3 中的安全容量逐渐增加并在 $\tau \approx 0.6$ 时达到最大,随后逐渐降低,因此需要根据不同场景优化子信道配置方案使整个网络安全容量达到最优。

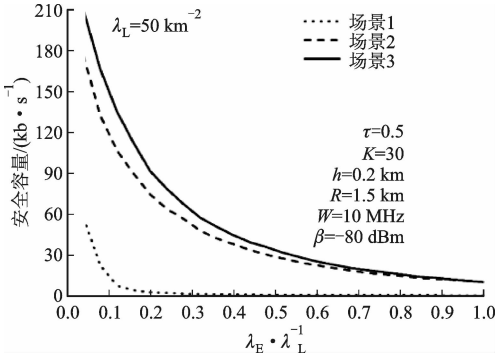


图 7 窃听用户与合法用户密度之比对安全容量的影响

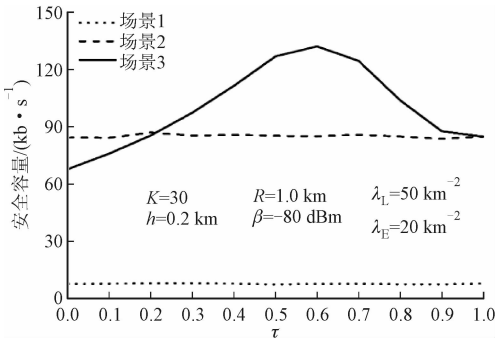


图 8 子信道分配比例对安全容量的影响

图 9 显示网络安全容量随着无人机飞行高度 h 的变化情况,当 $h < 150$ m 时,场景 3 的安全容量低于场景 2,随着 h 增加,场景 3 的安全容量先增加后降低,在 $h \approx 250$ m 时达到最大值,相比场景 2 高出约 70%。这是由于当 h 非常低时,仅有极少量的用户处在空地 LOS 链路范围内,分配给无人机上行通信的子信道没有得到充分的利用;当 h 逐渐增加时,用户数量逐渐增大,使得频谱效率逐渐提高,安全容量增加;当 h 非常大时,虽然地空 LOS 链路用户数量增加,但过高的路径损耗一方面使得无人机 LOS

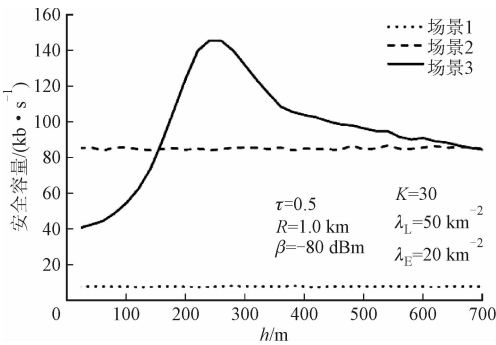


图 9 无人机高度对安全容量的影响

链路范围内能够成功建立上行通信的用户数量逐渐降低,另一方面使得合法用户和无人机之间链路容量相较于该合法用户与窃听者之间窃听信道容量的优势明显降低,导致安全容量的减少。

图 10 给出了阈值 β 对网络安全容量的影响,可以看出,部署无人机场景的安全容量要明显优于单一基站的网络场景,而场景 2 和场景 3 中最优的 β 配置不同,对于场景 2,当 $\beta \approx -80$ dBm 时,网络安全容量达到最大值,对于场景 3,最优配置为 $\beta \approx -75$ dBm,这是由于同样情况下,空地 LOS 链路的信道质量要优于地面无线信道质量,正是由于空地 LOS 信道较地面窃听信道有较强的质量优势,因此通过部署无人机来增强现有蜂窝网络保密传输性能是行之有效的办法之一。

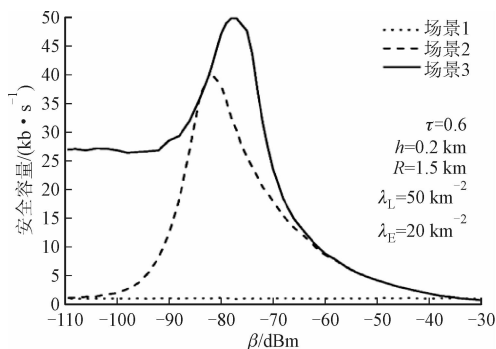


图 10 阈值 β 对安全容量的影响

6 结 论

本文通过在基站边缘区域部署移动飞行无人机来卸载基站流量并增强边缘用户的通信性能和保密传输性能。利用随机几何理论工具建立理论框架分析移动无人机辅助蜂窝网络上行通信基本性能,给出了解析式,并通过仿真实验分析对比了不同网络场景下物理层安全容量性能指标,分别给出了 λ_L 、 λ_E 、 h 、 τ 、 β 关键参数与网络基本性能和安全容量的关系,并给出了优化的 h 、 τ 、 β 参数配置方案。结果表明,通过合理的参数配置,移动无人机不仅能够兼具用户公平性的情况下增强蜂窝网络上行通信基本性能,还能够有效提高整个网络的保密传输性能。

本文研究仅针对单个无人机辅助蜂窝网络的简单场景,还有较多潜在的方向需要研究:①本文所部署的无人机高度和巡航速度均为固定值,可以进一步扩展到高度和速度均存在变化的贴近现实的应用场景;②针对无人机辅助蜂窝网络安全容量的显式解析有助于深刻揭示无人机辅助空地网络的安全特性,是目前该领域内的难点工作;③随着区域内

基站和部署无人机数量的增加,针对大规模空地网络中频谱资源分配和无人机部署的优化方案需要进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 李进良. 2017 年全面清理及综合发展移动通信网络的分析 [J]. 移动通信, 2017, 41(1): 21-24, 30.
LI Jinliang. Analysis on comprehensive clean-up and integrated development of mobile communication networks in 2017 [J]. Mobile Communications, 2017, 41(1): 21-24, 30.
- [2] 王巍, 彭力, 赵继军, 等. 移动物联网非完整约束中继的协同任务规划 [J]. 电子学报, 2019, 47(6): 1251-1259.
WANG Wei, PENG Li, ZHAO Jijun, et al. Cooperative task planning of ground relay with nonholonomic constraints in mobile internet of things based on UAVs [J]. Acta Electronica Sinica, 2019, 47(6): 1251-1259.
- [3] 闵欢, 卢虎, 史浩东. 采用深度神经网络的无人机蜂群视觉协同控制算法 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(9): 173-179, 196.
MIN Huan, LU Hu, SHI Haodong. Visual collaborative control for unmanned aerial vehicle swarm based on deep neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(9): 173-179, 196.
- [4] NGUYEN M N, NGUYEN L D, DUONG T Q, et al. Real-time optimal resource allocation for embedded UAV communication systems [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2019, 8(1): 225-228.
- [5] HOU Tianwei, LIU Yuanwei, SONG Zhengyu, et al. Multiple antenna aided NOMA in UAV networks: a stochastic geometry approach [J]. IEEE Transactions on Communications, 2019, 67(2): 1031-1044.
- [6] LIU C, HO K, WU J. MmWave UAV networks with multi-cell association: performance limit and optimization [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2019, 37(12): 2814-2831.
- [7] ZHANG Chiya, ZHANG Wei. Spectrum sharing for drone networks [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2017, 35(1): 136-144.
- [8] LYU Jiangbin, ZENG Yong, ZHANG Rui. Spectrum sharing and cyclical multiple access in UAV-aided cellular offloading [C] // IEEE Global Communications Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2017: 1-6.
- [9] 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.
- [10] HAMAMREH J M, FURQAN H M, ARSLAN H. Classifications and applications of physical layer security techniques for confidentiality: a comprehensive survey [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(2): 1773-1828.
- [11] 宋华伟, 金梁, 王旭. 无线网络物理层安全认证方法 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(4): 105-110, 138. SONG Huawei, JIN Liang, WANG Xu. A security authentication method for wireless network physical layers [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(4): 105-110, 138.
- [12] ZHU Yongxu, ZHENG Gan, 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.
- [13] BAO Tingnan, YANG H C, HASNA M O. Secrecy performance analysis of UAV-assisted relaying communication systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(1): 1122-1126.
- [14] CHEN Yang, ZHANG Zhongpei. UAV-aided secure transmission in MISOME wiretap channels with imperfect CSI [J]. IEEE Access, 2019, 7: 98107-98121.
- [15] LI Yupeng, ZHANG Rongqing, ZHANG Jianhua, et al. Cooperative jamming via spectrum sharing for secure UAV communications [J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(3): 326-330.
- [16] LIU Miao, YANG Jie, GUI Guan. DSF-NOMA: UAV-assisted emergency communication technology in a heterogeneous internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5508-5519.
- [17] 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.
- [18] ZHANG Shangwei, LIU Jiajia. Analysis and optimization of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications in post-disaster areas [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(12): 12049-12060.
- [19] ZHANG Shangwei, LIU Jiajia, SUN Wen. Stochastic geometric analysis of multiple unmanned aerial vehicle-assisted communications over internet of things [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(3): 5446-5460.
- [20] WYNER A D. The wire-tap channel [J]. Bell System Technic, 1975, 54: 1355-1387.

[本刊相关文献链接]

- 邵彦彰, 王磊, 薛奕蕾. 采用分布式 Alamouti 编码的虚拟全双工中继通信方案. 2020, 54(12): 45-53. [doi:10.7652/xjtuxb202012006]
- 曹鑫, 王磊, 薛奕蕾. 采用二重天线激活矩阵的差分空间调制算法. 2020, 54(10): 36-44. [doi:10.7652/xjtuxb202010005]
- 赵贝贝, 冯莉芳. 室内可见光通信系统切换机制设计. 2019, 53(8): 107-113. [doi:10.7652/xjtuxb201908014]
- 胡旭东, 张成文, 刘玉涛, 等. 面向 OFDM 系统的高精度窄带干扰抑制算法. 2019, 53(8): 114-120, 128. [doi:10.7652/xjtuxb201908015]
- 曹鑫, 王磊, 邵彦彰. 采用 Alamouti 码构造的正交空间调制及低复杂度解码算法. 2019, 53(6): 69-76. [doi:10.7652/xjtuxb201906010]
- 徐静, 许思文, 孙黎. 多发单收窃听信道中人工噪声辅助的鲁棒波束成形设计. 2017, 51(11): 118-124. [doi:10.7652/xjtuxb201711016]

(编辑 刘杨)