

## 面向接入回传一体化的毫米波空地网络建模与分析

卫海超<sup>①</sup> 邓娜<sup>\*②</sup> 朱近康<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(大连海事大学信息科学技术学院 大连 116026)

<sup>②</sup>(大连理工大学信息与通信工程学院 大连 116024)

<sup>③</sup>(中国科学技术大学信息科学技术学院 合肥 230026)

**摘要:** 无人机(UAV)作为空中基站有望成为传统地面网络的有力补充, 以提供灵活覆盖和容量增强的解决方案。然而, 大多现有研究忽略空中基站的无线回传这一实际因素对网络性能和用户体验的影响。为此, 考虑接入回传一体化的空地毫米波蜂窝网络场景, 其中无人机提供热点流量传输服务, 地面基站(TBS)提供无人机回传链路并且服务非热点区域用户, 以及接入和回传采用正交资源分配方法。针对该场景, 提取地面基站、无人机和用户的空间分布特性, 以及不同链路信号的传播特性, 该文采用随机几何理论建立与之匹配的毫米波空地网络模型, 推导了非热点用户的接入链路覆盖率和热点用户的接入回传链路的联合覆盖率。进一步地, 基于地面基站和无人机的负载特性分析, 推导了两种用户的速率覆盖率以及总体用户性能。基于所提分析框架, 该文研究了关键系统参数, 如接入链路频谱分配比例、无人机密度和热点用户密度等对用户性能的影响。

**关键词:** 毫米波空地网络; 接入回传一体化; 性能分析; 随机几何

中图分类号: TN929.5; V279

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2022)03-0915-09

DOI: [10.11999/JEIT211177](https://doi.org/10.11999/JEIT211177)

## Modeling and Analysis of Millimeter-wave Air-terrestrial Networks with Integrated Access and Backhaul

WEI Haichao<sup>①</sup> DENG Na<sup>②</sup> ZHU Jinkang<sup>③</sup>

<sup>①</sup>(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

<sup>②</sup>(School of Information and Communication Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

<sup>③</sup>(School of Information Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

**Abstract:** A millimeter-wave air-terrestrial network with integrated access and backhaul is considered to investigate the impact of the Unmanned Aerial Vehicle (UAV) wireless backhaul on the network performance and user experience, where UAVs provide hotspot traffic services, Terrestrial Base Stations (TBSs) provide UAV backhaul links and serve users in non-hotspot areas, and a spectrum partitioning resource allocation method is considered for the access and backhaul links. For this scenario, a stochastic geometry-based framework is established to model the millimeter wave air-ground network, and derive the coverage probabilities of both users. Furthermore, based on the load analysis of TBSs and UAVs, the rate coverage performances are provided as well as the overall user performance. Based on the proposed analytical framework, the impacts of key system parameters, such as access link spectrum allocation ratio, UAV, and hotspot user densities, on user performance are studied.

**Key words:** Millimeter-wave air-terrestrial network; Integrated access and backhaul; Performance analysis; Stochastic geometry

收稿日期: 2021-10-28; 改回日期: 2021-12-28; 网络出版: 2022-01-23

\*通信作者: 邓娜 dengna@dlut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61701071), 辽宁省自然科学基金(2021-MS-112), 中央高校基本科研业务费专项资金(DUT21JC04, 3132019348)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61701071), The Natural Science Foundation of Liaoning Province (2021-MS-112), The Fundamental Research Funds for the Central Universities (DUT21JC04, 3132019348)

## 1 引言

无人机(Unmanned Aerial Vehicles, UAVs)具有灵活部署和易避开障碍物的优点,可以为现有地面蜂窝网络提供盲区补充覆盖和短时热点传输等服务,从而达到覆盖增强以及容量提升的效果<sup>[1-3]</sup>。相对于地面基站(Terrestrial Base Stations, TBSs)仅能固定部署于地面的局限性, UAV可以灵活地部署在高度可调的3维空域使其以更高概率通过视距(Line-Of-Sight, LOS)链路为地面用户提供服务,从而获得比非视距(Non-Line-Of-Sight, NLOS)链路更强的有用信号质量<sup>[4,5]</sup>。然而,无人机无法采用有线方式进行数据回传,需要采用一种高容量的无线回传技术以保障UAV的灵活部署特性。UAV网络具有多种无线回传技术,例如Sub-6G、毫米波和光通信等技术,而综合考虑现有蜂窝网络设备的兼容性、频谱资源的丰富性,以及不同频段信号的传播能力,UAV和毫米波通信技术的结合既提供无线接入又支持大容量回传链路,从而形成一种接入回传一体化的毫米波空地网络架构。同时,该架构与第3代合作伙伴计划(3rd Generation Partnership Project, 3GPP)所设计的接入和回传一体化5G网络架构<sup>[6]</sup>是一致的,因此相关技术和方案可以平滑应用于毫米波空地网络中。然而,UAV的3维部署和毫米波信号传播特性使得关键性能指标和系统参数配置与地面网络并不一致,需要重新进行评估、设计与优化,从而为实际网络部署与运营提供指导。

由于随机几何是一个强力的大规模网络建模和分析的数学工具,能够有效捕捉到网络节点拓扑结构的多变性以及不规则性,目前已有诸多研究采用该理论对大规模空地网络进行建模以及对关键性能指标的分析。根据建模UAV空间分布特性的空间点过程类型,可以将现有文献分为两类:一种是采用有限区域的空间点过程(如二项式点过程)建模UAV部署在有限区域的场景,并与无限平面中由独立泊松点过程(Poisson Point Process, PPP)建模的TBS共存,进而通过考虑LOS和NLOS的概率传播模型来分析用户覆盖率和区域频谱效率<sup>[7,8]</sup>。另一种是将无人机部署扩展到无限平面场景,采用互相独立PPP建模无人机和TBS的(投影)位置,并研究用户接入链路的覆盖概率和可达速率,以及网络区域频谱效率等性能指标<sup>[9,10]</sup>。然而,这些文献一般假设理想的UAV回传链路条件去分析接入链路的性能特性,而不考虑UAV回传链路对接入链路的影响。近期文献<sup>[11]</sup>首次联合考虑了UAV回传链路和接入链路质量对覆盖率的影响,但并未

考虑TBS和UAV各自负载对UAV回传链路和用户接入链路资源分配的影响,进而影响用户的传输速率。

为此,本文考虑一种接入回传一体化的空地毫米波通信网络场景,其中UAV辅助TBS服务位于热点流量区域(如购物中心等)的用户,以及TBS为UAV提供回传链路并且服务非热点区域用户。针对该场景,将TBS和非热点用户的水平位置建模为两个独立PPP,同时提取UAV和热点用户的空间分布特性,将UAV的水平投影位置和热点用户分别建模为一个PPP以及以该PPP为父节点过程的Matérn簇过程(Matérn Cluster Process, MCP)。考虑不同链路信号的传播环境,建立与之匹配的毫米波信号的LOS和NLOS传播模型,利用随机几何理论推导了非热点用户的接入链路覆盖率和热点用户的回传和接入链路的联合覆盖率,并依托TBS和UAV的负载分布进一步地推导了两种用户的速率覆盖率性能以及总体用户速率性能。本文采用蒙特卡罗仿真验证了所得分析结果的有效性。结果表明:(1)存在最优的接入链路频谱分配比例因子、UAV密度和热点用户密度使得总体用户速率性能最大;(2)虽然空地网络的回传链路需要独占一部分频谱资源,但无人机的引入依然可以提升总体用户速率性能。

## 2 系统模型

本文考虑地面基站和无人机共存的下行空地毫米波通信网络,其中无人机部署在用户聚集的热点区域上提供接入链路,而地面基站为非热点区域的用户提供接入链路以及为无人机提供回传链路,如图1(a)所示。假设TBS位置服从密度为 $\lambda_T$ 的平面PPP $\Phi_T$ ,且每个TBS通过光纤将数据回传至核心网。假设UAV水平投影位置服从密度为 $\lambda_U$ 的独立PPP $\Phi_U$ ,悬停高度为 $h$ ,其中每个UAV装配两幅方向性天线阵列分别提供垂直向下的接入链路波束<sup>[12]</sup>和回程链路波束。根据用户位置在空间分布上的聚集程度,可将用户分为两类:一种是具有类似行为特性而聚集在共同区域(即热点区域)的热点用户(Hotspot UE, HUE),并假设这些用户成簇分布于以每个UAV水平投影为中心且半径为 $R$ 的圆盘区域,其中每个区域内的热点用户服从密度为 $\lambda_{HU}$ 的PPP,即HUE是以 $\Phi_U$ 为父节点过程的MCP $\Phi_{UU}$ ,密度为 $\lambda_{UU} = \lambda_U \lambda_{HU} \pi R^2$ ;另一种是具有相对独立行为特性而分散在整个网络的非热点用户(Non-hotspot UE, NUE),并假设这些用户以密度为 $\lambda_{TU}$ 的平面PPP $\Phi_{TU}$ 分布于整个平面中。假设所有用户均配置全向天线进行信号接收。此外,TBS和UAV的发

射功率分别为 $\mu_T$ 和 $\mu_U$ 。图1(b)为空地网络节点空间位置的一次实现。

## 2.1 信道模型

从发送端到接收端的信号强度主要受大尺度路损、小尺度衰落和天线增益的影响，分别建模如下：

(1) 大尺度路损模型：毫米波信号在视距和非视距传播环境下会有截然不同的路损特性，而不同通信链路的传播环境各不相同，因此需要针对性采用不同路损模型。由于TBS-UE链路是地面通信链路，一般采用仅与传输距离有关的LOS概率模型去表征毫米波信号的遮挡效应<sup>[13]</sup>，即LOS信道概率为 $\kappa_{TL}(r) = \exp(-\beta r)$ ，其中 $r$ 为TBS与UE之间的距离， $\beta$ 为遮挡效应参数，与遮挡物的密度和形状有关。因此，NLOS信道的概率为 $\kappa_{TN}(r) = 1 - \kappa_{TL}(r)$ 。LOS和NLOS链路的路损指数分别记为 $\alpha_L$ 和 $\alpha_N$ ，其中 $2 < \alpha_L < \alpha_N$ 。记 $\ell_T(x)$ 为TBS $x$ 到原点用户的随机路损函数，表示为

$$\ell_T(x) = \begin{cases} \varepsilon|x|^{-\alpha_L}, & \text{w.p. } \kappa_{TL}(|x|) \\ \varepsilon|x|^{-\alpha_N}, & \text{w.p. } \kappa_{TN}(|x|) \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\varepsilon$ 是信号在参考距离(如1 m)的传播损失。由于UAV-UE链路为空对地通信链路，本文采用与仰角有关的概率模型来表征毫米波信号的遮挡效应<sup>[14]</sup>，其中LOS信道的概率为

$$\kappa_{UL}(r, h) = \frac{1}{1 + A \exp(-B(\arctan(h/r) \times 180/\pi - A))} \quad (2)$$

$A$ 和 $B$ 是与环境有关的参量， $r$ 表示收发机的水平距离。因此，空对地通信链路的NLOS信道概率

为 $\kappa_{TN}(r) = 1 - \kappa_{TL}(r)$ 。记 $\ell_U(y)$ 为UAV $y$ 到原点用户的随机路损函数，表示为

$$\ell_U(y) = \begin{cases} \varepsilon(|y|^2 + h^2)^{-\alpha_L/2}, & \text{w.p. } \kappa_{UL}(|y|, h) \\ \varepsilon(|y|^2 + h^2)^{-\alpha_N/2}, & \text{w.p. } \kappa_{UN}(|y|, h) \end{cases} \quad (3)$$

对于TBS-UAV回传链路，由于TBS通常需要进行选址部署，假设TBS-UAV的回传链路为LOS信道，则TBS $x$ 到水平投影为原点的UAV的路损函数表示为 $\ell_b(x) = \varepsilon(|x|^2 + h^2)^{-\alpha_L/2}$ 。

(2) 小尺度衰落模型：本文采用常用的瑞利衰落作为小尺度衰落模型来简化分析<sup>1)</sup>，其中功率衰落系数表示为 $\xi_x$ ，服从均值为1的指数分布，即 $E[\xi_x] = 1$ ，且假设所有 $\xi_x$ 是相互独立的，且独立于点过程。

(3) 天线阵列增益模型：通常在TBS和UAV上配备定向天线阵列来弥补毫米波的严重传输损耗，且在用户和无人机的初始接入过程中，通过波束扫描或位置信息辅助机制实现有用信号链路的波束对准以达到最强天线阵列增益。为表征天线阵列增益的影响，本文采用扇区方向图的近似模型<sup>[16]</sup>，其中信号方向在主瓣宽 $\psi_{ij}$ 内的波束增益为主瓣增益 $G_{ij}$ ，其他方向的波束增益为旁瓣增益 $g_{ij}$ ， $i \in \{T, U\}$ 分别表示TBS或UAV， $j \in \{a, b\}$ 分别表示接入和回传链路。对于TBS-UE链路，假设TBS可以将主瓣波束对准其服务的用户，则有用信号的阵列增益为 $G_{Ta}$ ，而干扰TBS的波束则假设均匀随机分布于 $(-\pi, \pi]$ ，进而得到干扰波束增益以概率 $q_{Ta}$ 和 $\bar{q}_{Ta}$ 分别为 $G_{Ta}$ 和 $g_{Ta}$ ，其中 $q_{ij} = \psi_{ij}/(2\pi)$ 和 $\bar{q}_{ij} = 1 - q_{ij}$ 。对于TBS-UAV回传链路，类似可得有用信号的波

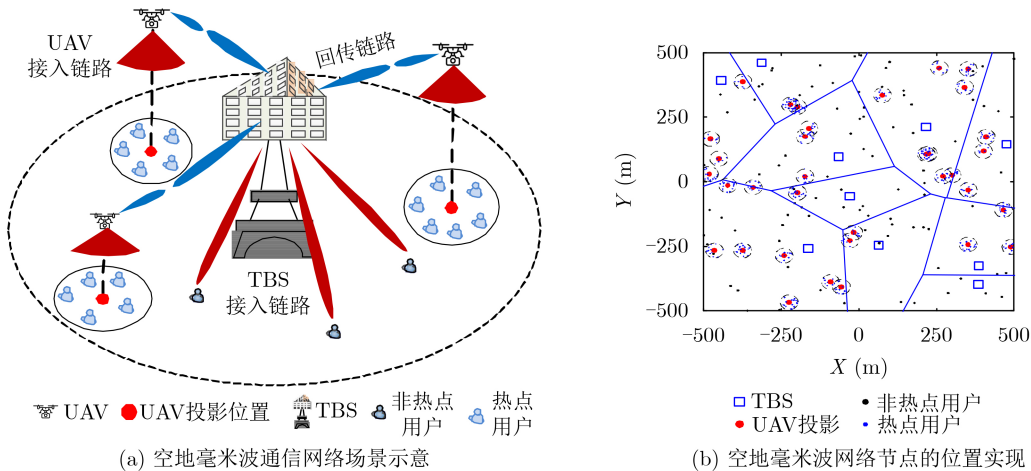


图1 空地毫米波通信网络场景

<sup>1)</sup>需要指出的是Nakagami衰落模型可以更好地模拟LOS链路传播特性，但导致更复杂的理论分析。同时，文献<sup>[15]</sup>表明Nakagami和瑞利衰落在用户性能体验上呈现相同的趋势。因此，本文采用更易分析的瑞利衰落模型。

束增益为 $G_1 = G_{Tb}G_{Ub}$ ，其中 $G_{Tb}$ 是TBS的发送波束增益， $G_{Ub}$ 是UAV的接收波束增益，而干扰信号的波束增益 $G$ 服从如下概率分布： $G \in \{G_k, k = 1, 2, 3, 4\}$ ，对应概率为 $q_k, k = 1, 2, 3, 4$ ，其中 $q_1 = q_{Tb}q_{Ub}$ ， $q_2 = q_{Tb}\bar{q}_{Ub}$ ， $q_3 = \bar{q}_{Tb}q_{Ub}$ ， $q_4 = \bar{q}_{Tb}\bar{q}_{Ub}$ ， $G_2 = G_{Tb}g_{Ub}$ ， $G_3 = g_{Tb}G_{Ub}$ 和 $G_4 = g_{Tb}g_{Ta}$ 。由于UAV-UE链路的波束始终垂直朝下，只要UE在以UAV水平投影位置为中心半径为 $h \tan(\theta_{Ua}/2)$ 的圆盘区域内，波束增益即为 $G_{Ua}$ ，而其他情况均为 $g_{Ua}$ 。

## 2.2 站点接入与资源分配策略

本文考虑NUE和UAV由最近TBS提供接入和回传服务，而HUE由最近UAV提供接入服务。为了抑制UAV对其他链路的干扰且以较强信号强度服务热点区域的HUE，将UAV配置合适的定向性阵列使得热点区域半径为UAV的主瓣波束覆盖区域，即 $R = h \tan(\theta_{Ua}/2)$ 。由于PPP是平稳点过程，通过分析位于原点的典型用户或水平投影位于原点的UAV可以表征不同用户或UAV的链路性能。对于资源分配问题，考虑整个系统带宽为 $W$ ，且接入和回传链路占用比例分别为 $\eta_a$ 和 $1 - \eta_a$ 的系统带宽。每个TBS(UAV)将接入资源 $\eta_a W$ 根据自身的用户数进行均分对用户服务，而每个TBS将回传资源 $(1 - \eta_a)W$ 根据所服务的UAV的用户数按比例分配进行服务。具体地，若典型NUE由TBS $x_0$ 服务，则分配给该非热点用户的带宽比例为 $w_{NUE} = \eta_a / \mathcal{N}_{x_0}$ ，其中 $\mathcal{N}_x$ 表示由TBS服务的NUE个数。若某个HUE由UAV $y_0$ 服务且对应的TBS为 $x_0$ ，则该UAV回传链路资源按照负载量成比例地由TBS进行分配，表示为

$$w_{b, y_0} = \frac{\mathcal{N}_{y_0}(1 - \eta_a)}{\sum_{y \in \Phi_U} \mathcal{N}_y \mathbf{I}(\text{BS}(y) = x_0)} \quad (4)$$

其中， $\mathcal{N}_y$ 表示由UAV $y$ 服务的HUE个数， $\text{BS}(y)$ 表示UAV $y$ 对应的服务TBS， $\mathbf{I}(\cdot)$ 表示示性函数。随后，将接入链路资源按照接入UAV $y_0$ 服务的HUE个数进行均分对用户服务，即 $\eta_a / \mathcal{N}_{y_0}$ 。

对于一个典型NUE，记其服务TBS为 $x_0 \in \Phi_T$ ，则NUE接入链路的信干噪比(Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio, SINR)为

$$\text{SINR}_{\text{NUE}} = \frac{\mu_T G_{Ta} \xi_{x_0} \ell_T(x_0)}{I_{\text{TN}} + I_{\text{UN}} + N_0} \quad (5)$$

其中， $I_{\text{TN}} = \sum_{x \in \Phi_T \setminus \{x_0\}} \mu_T G_x \xi_x \ell_T(x)$ 是TBS对NUE的干扰， $I_{\text{UN}} = \sum_{y \in \Phi_U} \mu_U G_y \xi_y \ell_U(y)$ 是UAV对NUE的干扰， $G_x$ 和 $G_y$ 分别是TBS和UAV到NUE的阵列增益， $N_0$ 为噪声功率。类似地，HUE接入链路SINR为

$$\text{SINR}_{\text{HUE}} = \frac{\mu_U G_{Ua} \xi_{y_0} \ell_U(y_0)}{I_{\text{TH}} + I_{\text{UH}} + N_0} \quad (6)$$

其中， $I_{\text{TH}} = \sum_{x \in \Phi_T} \mu_T G_x \xi_x \ell_T(x)$ 是TBS对HUE的干扰， $I_{\text{UH}} = \sum_{y \in \Phi_U \setminus \{y_0\}} \mu_U G_y \xi_y \ell_U(y)$ 是TBS对HUE的干扰。

由于UAV对用户服务的波束是垂直向下覆盖，难以对TBS-UAV回传链路造成强干扰。因此，UAV回传链路仅收到来自TBS的干扰，对应SINR表示为

$$\text{SINR}_{\text{bh}} = \frac{\mu_T G_1 \xi_{x_0} \ell_b(x_0)}{I_{\text{TU}} + N_0} \quad (7)$$

其中， $I_{\text{TU}} = \sum_{x \in \Phi_T \setminus \{x_0\}} \mu_T G_x \xi_x \ell_b(x)$ 是TBS对UAV回传链路的干扰。

进一步地，可以得到NUE和HUE的速率，分别表示为 $\tau_{\text{NUE}} = w_{\text{NUE}} W \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{NUE}})$ 和

$$\tau_{\text{HUE}} = \min \left( \frac{\eta_a W}{\mathcal{N}_{y_0}} \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{HUE}}), \frac{w_{b, y_0} W}{\mathcal{N}_{y_0}} \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{bh}}) \right) \quad (8)$$

其中，HUE的速率受限于UAV-HUE接入链路容量和TBS-UAV回传链路容量。

## 3 性能分析

本文分析基于SINR和速率的覆盖率<sup>[16]</sup>这两个常用性能指标，定义是SINR或速率大于目标阈值的概率。本节首先给出TBS和UAV的负载分布特性，随后给出两类用户的SINR分布特性，进而给出速率特性。

### 3.1 负载分析

由于HUE以密度为 $\lambda_{\text{HU}}$ 的PPP分布于以UAV水平投影为圆心且半径为 $R$ 的圆盘热点区域中，可直接给出接入某个UAV的HUE个数 $\mathcal{N}_{\text{HUE}}$ 服从一个均值为 $\lambda_{\text{HU}} \pi R^2$ 的泊松分布，表示为

$$P(\mathcal{N}_{\text{HUE}} = n) = \exp(-\lambda_{\text{HU}} \pi R^2) (\lambda_{\text{HU}} \pi R^2)^n / n!, \quad n = 0, 1, \dots \quad (9)$$

根据资源分配策略，需要求解TBS服务的NUE个数和间接服务的HUE个数，而这两个随机变量的分布需要通过概率生成函数(Probability Generating Function, PGF)方法进行推导。首先，根据最近距离接入准则，TBS的服务区域为其所在Voronoi小区，其中根据文献[17]可知该面积的概率密度函数为 $f(S) = (K \lambda_T)^K S^{K-1} \exp(-K \lambda_T S) / \Gamma(K)$ ， $K = 3.575$ ，其中 $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数。在给定小区面积为 $S$ 时，NUE和UAV个数的条件PGF分别为 $\Upsilon_{\text{NUE}}(z|S) = \exp(\lambda_{\text{TU}} S(z-1))$ 和 $\Upsilon_{\text{UAV}}(z|S) =$

$\exp(\lambda_U S(z-1))$ 。其次，由于每个UAV的HUE个数的PGF为 $\Upsilon_{\text{HUE}}(z) = \exp(\lambda_{\text{HU}} \pi R^2 (z-1))$ 且互相独立，则TBS小区内HUE总个数的条件PGF为 $\Upsilon_{\text{sum-HUE}}(z|S) = \exp(\lambda_U S(\Upsilon_{\text{HUE}}(z) - 1))$ 。随后，根据全概率公式可得两类用户的PGF分别为

$$\begin{aligned} \Upsilon_{\text{NUE}}(z) &= \int_0^\infty \exp(\lambda_{\text{TU}} S(z-1)) f(S) dS \\ &= (1 - \lambda_{\text{TU}}(z-1)/(\lambda_{\text{T}} K))^{-K} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Upsilon_{\text{sum-HUE}}(z) &= \int_0^\infty \exp(\lambda_U S(\Upsilon_{\text{HUE}}(z) - 1)) f(S) dS \\ &= (1 - \lambda_U(\Upsilon_{\text{HUE}}(z) - 1)/(\lambda_{\text{T}} K))^{-K} \end{aligned} \quad (11)$$

最后，可得各自概率分布为 $P(\mathcal{N}_{\text{NUE}} = n) = \Upsilon_{\text{NUE}}^{(n)}(0)/n!$ 和 $P(\mathcal{N}_{\text{sum-HUE}} = n) = \Upsilon_{\text{sum-HUE}}^{(n)}(0)/n!$ ， $n = 0, 1, \dots$ 。

### 3.2 SINR分布分析

本节分别给出BS-NUE链路的SINR分布和BS-

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{TN}}}(s) &= \mathbb{E} \left[ \exp \left( -s \sum_{x \in \Phi_{\text{T}} \setminus \{x_0\}} \mu_{\text{T}} G_x \xi_x \ell_{\text{T}}(x) \right) \right] = \mathbb{E} \left[ \prod_{x \in \Phi_{\text{T}} \setminus \{x_0\}} \left( \frac{q_{\text{Ta}}}{1 + s \mu_{\text{T}} G_{\text{Ta}} \ell_{\text{T}}(x)} + \frac{\bar{q}_{\text{Ta}}}{1 + s \mu_{\text{T}} g_{\text{Ta}} \ell_{\text{T}}(x)} \right) \right] \\ &\stackrel{(b)}{=} \exp \left( -2\pi \lambda_{\text{T}} \sum_{i \in \{L, N\}} \int_r^\infty \kappa_{\text{Ti}}(z) \left( \frac{q_{\text{Ta}}}{1 + (s \mu_{\text{T}} G_{\text{Ta}} \varepsilon)^{-1} z^{\alpha_i}} + \frac{\bar{q}_{\text{Ta}}}{1 + (s \mu_{\text{T}} g_{\text{Ta}} \varepsilon)^{-1} z^{\alpha_i}} \right) z dz \right) \end{aligned} \quad (13)$$

其中，步骤(b)是利用文献[18]第4节中PPP的概率生成函数(Probability Generating Function, PGFL)。类似地，可以推导出 $I_{\text{UN}}$ 的拉氏变换，表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{UN}}}(s) &= \mathbb{E} \left[ \prod_{y \in \Phi_{\text{U}}} \left( \frac{\mathbf{I}(|y| \leq R)}{1 + s \mu_{\text{U}} G_{\text{Ua}} \ell_{\text{U}}(y)} + \frac{\mathbf{I}(|y| > R)}{1 + s \mu_{\text{U}} g_{\text{Ua}} \ell_{\text{U}}(y)} \right) \right] \\ &= \exp \left( -2\pi \lambda_{\text{U}} \sum_{i \in \{L, N\}} \int_0^\infty \kappa_{\text{Ui}}(z, h) \left( 1 - \frac{\mathbf{I}(z \leq R)}{1 + s \mu_{\text{U}} G_{\text{Ua}} \varepsilon (z^2 + h^2)^{-\alpha_i/2}} - \frac{\mathbf{I}(z > R)}{1 + s \mu_{\text{U}} g_{\text{Ua}} \varepsilon (z^2 + h^2)^{-\alpha_i/2}} \right) z dz \right) \end{aligned} \quad (14)$$

综上，将两种干扰的拉氏变换代入式(12)，则得到典型NUE的覆盖率。

由于HUE的传输性能由BS-UAV回传链路和UAV-UE接入链路共同决定的，根据两跳链路的SINR表达式和覆盖率的定义，可以得到HUE的联合覆盖率，表示为

$$\begin{aligned} p_{\text{HUE}}(\theta_1, \theta_2) &= \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{bh}} > \theta_1, \\ &\text{SINR}_{\text{HUE}} > \theta_2) \stackrel{(c)}{\approx} \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{bh}} > \theta_1) \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{HUE}} > \theta_2) \end{aligned} \quad (15)$$

其中， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别是回传和接入链路的SINR目标阈值，步骤(c)是解耦两条链路中共同存在的TBS干扰

UAV-HUE两跳链路SINR的联合分布以分析用户传输可靠性。根据典型NUE的SINR表达式和覆盖率的定义，可以得到NUE的覆盖率，表示为

$$\begin{aligned} p_{\text{NUE}}(\theta) &= \mathbb{P} \left( \frac{\mu_{\text{T}} G_{\text{Ta}} \xi_{x_0} \ell_{\text{T}}(x_0)}{I_{\text{TN}} + I_{\text{UN}} + N_0} > \theta \right) \\ &\stackrel{(a)}{=} \int_0^\infty \sum_{i \in \{L, N\}} \kappa_{\text{Ti}}(r) \mathcal{L}_{I_{\text{TN}}} \left( \frac{\theta r^{\alpha_i}}{\varepsilon \mu_{\text{T}} G_{\text{Ta}}} \right) \\ &\quad \cdot \mathcal{L}_{I_{\text{UN}}} \left( \frac{\theta r^{\alpha_i}}{\varepsilon \mu_{\text{T}} G_{\text{Ta}}} \right) \exp \left( -\frac{\theta N_0 r^{\alpha_i}}{\varepsilon \mu_{\text{T}} G_{\text{Ta}}} \right) f_{|x_0|}(r) dr \end{aligned} \quad (12)$$

其中， $\theta$ 是NUE的目标SINR阈值，步骤(a)由如下过程可推导出结果：(1)有用信号链路历经LOS信道或NLOS信道；(2) $\mathcal{L}_X(s) = \mathbb{E}e^{-sX}$ 是随机变量 $X$ 的拉氏变换；(3) $I_{\text{TN}}$ 和 $I_{\text{UN}}$ 是互相独立的；(4) $\xi_{x_0}$ 遵循指数分布；(5)典型NUE到其服务TBS的服务距离 $|x_0|$ 的概率密度函数，并且由文献[18]第2节中PPP的接触距离分布函数可知 $f_{|x_0|}(r) = 2\lambda_{\text{T}} \pi r e^{-\lambda_{\text{T}} \pi r^2}$ 。因此覆盖率需要推导两种干扰的拉氏变换。对于 $I_{\text{TN}}$ ，其拉氏变换为

源而简化近似，而该近似的合理性在于回传和接入链路的波束分别是向空中和地下方向发射，二者历经的信道环境相对独立。基于此，两跳链路的联合覆盖率如式(16)表示：首先，BS-UAV回传链路的覆盖率为

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{bh}} > \theta_1) &= \int_0^\infty \exp \left( -\frac{\theta_1 N_0 (r^2 + h^2)^{\alpha_{\text{L}}/2}}{\varepsilon \mu_{\text{T}} G_1} \right) \\ &\quad \cdot \mathcal{L}_{I_{\text{TU}}} \left( \frac{\theta_1 (r^2 + h^2)^{\alpha_{\text{L}}/2}}{\varepsilon \mu_{\text{T}} G_1} \right) f_{|x_0|}(r) dr \end{aligned} \quad (16)$$

其中，干扰 $I_{\text{TU}}$ 的拉氏变换为

$$\mathcal{L}_{I_{\text{TU}}}(s) = \mathbb{E} \left[ \prod_{x \in \Phi_{\text{T}} \setminus \{x_0\}} \sum_{k=1}^4 \frac{q_k}{1 + s\mu_{\text{T}}G_k\ell_{\text{b}}(x)} \right] = \exp \left( -2\pi\lambda_{\text{T}} \sum_{k=1}^4 \int_r^{\infty} \frac{q_k z}{1 + (s\mu_{\text{T}}G_k\varepsilon)^{-1}z^{\alpha_{\text{L}}}} dz \right) \quad (17)$$

其次, UAV-HUE接入链路的覆盖率为

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{HUE}} > \theta_2) &= \mathbb{P} \left( \frac{\mu_{\text{U}}G_{\text{Ua}}\xi_{y_0}\ell_{\text{U}}(y_0)}{I_{\text{TH}} + I_{\text{UH}} + N_0} > \theta_2 \right) \stackrel{(d)}{=} \int_0^R \sum_{i \in \{L, N\}} \kappa_{\text{U}i}(r, h) \\ &\quad \cdot \mathcal{L}_{I_{\text{TH}}} \left( \frac{\theta_2(r^2 + h^2)^{\alpha_i/2}}{\mu_{\text{U}}G_{\text{Ua}}\varepsilon} \right) \mathcal{L}_{I_{\text{UH}}} \left( \frac{\theta_2(r^2 + h^2)^{\alpha_i/2}}{\mu_{\text{U}}G_{\text{Ua}}\varepsilon} \right) \exp \left( -\frac{\theta_2 N_0(r^2 + h^2)^{\alpha_i/2}}{\mu_{\text{U}}G_{\text{Ua}}\varepsilon} \right) \frac{2r}{R^2} dr \end{aligned} \quad (18)$$

其中, 步骤(d)的推导过程类似于式(12)的步骤(a)。对于 $I_{\text{TH}}$ , 其拉氏变换为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{TH}}}(s) &= \mathbb{E} \left[ \prod_{x \in \Phi_{\text{T}} \setminus \{x_0\}} \left( \frac{q_{\text{Ta}}}{1 + s\mu_{\text{T}}G_{\text{Ta}}\ell_{\text{T}}(x)} + \frac{\bar{q}_{\text{Ta}}}{1 + s\mu_{\text{T}}g_{\text{Ta}}\ell_{\text{T}}(x)} \right) \right] \\ &= \exp \left( -2\pi\lambda_{\text{T}} \sum_{i \in \{L, N\}} \int_0^{\infty} \kappa_{\text{T}i}(z) \left( \frac{q_{\text{Ta}}}{1 + (s\mu_{\text{T}}G_{\text{Ta}}\varepsilon)^{-1}z^{\alpha_i}} + \frac{\bar{q}_{\text{Ta}}}{1 + (s\mu_{\text{T}}g_{\text{Ta}}\varepsilon)^{-1}z^{\alpha_i}} \right) z dz \right) \end{aligned} \quad (19)$$

类似地, 推导出 $I_{\text{UH}}$ 的拉氏变换, 表示为

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{I_{\text{UH}}}(s) &= \mathbb{E} \left[ \prod_{y \in \Phi_{\text{U}}} \left( \frac{\mathbf{I}(|y| \leq R)}{1 + s\mu_{\text{U}}G_{\text{Ua}}\ell_{\text{U}}(y)} + \frac{\mathbf{I}(|y| > R)}{1 + s\mu_{\text{U}}g_{\text{Ua}}\ell_{\text{U}}(y)} \right) \right] \\ &= \exp \left( -2\pi\lambda_{\text{U}} \sum_{i \in \{L, N\}} \int_r^{\infty} \kappa_{\text{U}i}(z, h) \left( 1 - \frac{\mathbf{I}(z \leq R)}{1 + s\mu_{\text{U}}G_{\text{Ua}}\varepsilon(z^2 + h^2)^{-\alpha_i/2}} - \frac{\mathbf{I}(z > R)}{1 + s\mu_{\text{U}}g_{\text{Ua}}\varepsilon(z^2 + h^2)^{-\alpha_i/2}} \right) z dz \right) \end{aligned} \quad (20)$$

最后, 将两种干扰的拉氏变换代入式(18), 则得到HUE的接入链路覆盖率, 进而联合式(16)代入式(15)得到HUE两跳链路的综合覆盖率。

### 3.3 速率覆盖率分析

由3.1节和3.2节关于负载和用户SINR的分析, 可以推导不同用户速率覆盖率。对于NUE, 则有

$$\mathbb{P}(\tau_{\text{NUE}} > \tau) = \mathbb{P} \left( \frac{W}{\mathcal{N}_{\text{NUE}}} \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{NUE}}) > \tau \right) = \sum_{n=1}^{\infty} P(\mathcal{N}_{\text{NUE}} = n) p_{\text{NUE}}(2^{n\tau/W} - 1) \quad (21)$$

其中,  $\tau$ 是目标速率阈值。将式(10)和式(12)代入式(21), 可得NUE的速率覆盖率。对于HUE, 则有

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\tau_{\text{HUE}} > \tau) &= \mathbb{P} \left( \frac{W}{\mathcal{N}_{y_0}} \min(\eta_a \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{HUE}}), w_{\text{b}, y_0} \log_2(1 + \text{SINR}_{\text{bh}})) > \tau \right) \\ &= \mathbb{P}(\text{SINR}_{\text{HUE}} > 2^{\mathcal{N}_{y_0}\tau/(\eta_a W)} - 1, \text{SINR}_{\text{bh}} > 2^{\mathcal{N}_{y_0}\tau/(w_{\text{b}, y_0} W)} - 1) \end{aligned} \quad (22)$$

然而,  $\mathcal{N}_{y_0}$ 和 $w_{\text{b}, y_0}$ 的相关性使得速率覆盖率推导更为复杂, 因此采用如式(23)的近似以简化推导

$$(1 - \eta_a)\mathcal{N}_{y_0}/w_{\text{b}, y_0} = \mathcal{N}_{y_0} + \sum_{y \in \Phi_{\text{U}} \setminus \{y_0\}} \mathcal{N}_y \mathbf{I}(\text{BS}(y) = x_0) \stackrel{(e)}{\approx} \mathcal{N}_{y_0} + \lambda_{\text{U}}\lambda_{\text{HU}}\pi R^2/\lambda_{\text{T}} \quad (23)$$

其中, 步骤(e)根据文献[18]第8节中Slivnyak定理和采用TBS服务的平均用户个数近似TBS服务HUE个数。进一步地, 得到式(22)第1项的近似表达式, 如式(24)所示

$$\mathbb{P}(\tau_{\text{HUE}} > \tau) \approx \sum_{n=1}^{\infty} P(\mathcal{N}_{\text{HUE}} = n) \mathbb{P} \left( \text{SINR}_{\text{HUE}} > 2^{n\tau/(\eta_a W)} - 1, \text{SINR}_{\text{bh}} > 2^{(n + \lambda_{\text{U}}\lambda_{\text{HU}}\pi R^2/\lambda_{\text{T}})\tau/((1 - \eta_a)W)} - 1 \right) \quad (24)$$

将式(9)和式(15)代入式(24), 可得HUE的速率覆盖率。进一步可推导出总体用户的速率覆盖率, 表示为

$$P_{UE}(\tau) = \frac{\mathbb{P}(\tau_{NUE} > \tau)\lambda_{TU} + \mathbb{P}(\tau_{HUE} > \tau)\lambda_{HU}\pi R^2\lambda_U}{\lambda_{TU} + \lambda_{HU}\pi R^2\lambda_U} \quad (25)$$

### 4 数值结果分析

本节给出两类用户性能的理论结果和仿真验证，其中主要系统参数如表1所示。

图2分别给出了在不同TBS密度下基于SINR和速率的覆盖率理论结果与仿真验证，其中仿真结果是通过蒙特卡罗方法得到的。图2(a)显示SINR覆盖率的理论结果非常贴合仿真结果，验证了理论推导的正确性和式(15)中解耦近似的有效性，其中 $\theta_1 = 5$  dB。虽然HUE的两跳链路具有相同的TBS干扰源，两跳链路的SINR相关性不大。HUE的联合覆盖率要优于NUE的覆盖性能，体现了引入UAV服务用户的有效性，且随着TBS密度变大，NUE的性能变好而HUE的性能变差。因为TBS密度变大，拉近NUE的服务距离增强了有用信号，但也增强了对HUE的干扰。图2(b)显示NUE速率覆盖率的理论结果与仿真结果贴合，但HUE的理论结果在较小速率阈值时与仿真结果非常贴合。随着速率阈值增大时，理论结果与仿真偏差越大。原因是HUE速率覆盖率中式(23)的近似导致了TBS回传链

路的负载量至少大于 $\lambda_U\lambda_{HU}\pi R^2/\lambda_T$ ，而实际网络中HUE负载量可能小于该平均值使得HUE占用更多资源，从而达到更高速率。此外，随着TBS密度增大，HUE和NUE的速率覆盖率均增大，呈现了与基于SINR覆盖率不同的现象。因为TBS的密度增大使得TBS小区中NUE和HUE的负载量减少导致每个用户获得更多频谱资源，从而提升总体用户速率。

图3展示了总体用户的速率覆盖性能与3种关键系统参数的关系，其中 $\tau = 10$  Mbps。图3(a)展示了接入回传链路的频谱分配比例 $\eta_a$ 对总体用户的速率性能的影响，并且对比了纯地面网络性能。结果显示虽然空地网络的回传链路需要占用一定频谱资源，但无人机拉近用户的服务距离，依然提升了用户性能，进而弥补接入频谱资源的损失。随着 $\eta_a$ 的增大，用户性能呈现出先增大后减小的趋势。因为在 $\eta_a$ 增大的初期，接入频谱资源的增大使得用户获取更多频谱资源从而大幅提升其速率性能。随着 $\eta_a$ 持续增大，虽然接入频谱增大可以提升NUE的速率性能，但逐渐减少回传链路资源制约甚至降低HUE速率性能。此外，总体用户的速率性能随着TBS的密度的增大而增强。因为一方面TBS的密度增大拉近了UAV和NUE的服务距离，从而提升NUE的接入链路性能和UAV的回传链路性能。另一方面TBS的密度增大使得TBS的负载降低，提高了用户的可用频谱资源，从而提升了速率性能。图3(b)和图3(c)展示了UAV和热点用户密度对总体用户速率覆盖性能的影响。结果显示随着两种密度的增强，用户速率性能均呈现先提升至最优处随后降低趋势，其中不同的接入频谱分配比例对应不同最优点，且比例因子越小，最优UAV和热点用户密度越大，且对应的用户速率性能越好。因为UAV和热点用户密度的增大导致TBS小区中回传链路的负载量变大，需要分配更多频谱资源才能提升回传链路速率，进而提升用户速率性能，否则用户速率性能将降低。

表1 系统参数

参数	默认值
$\lambda_T, \lambda_U, \lambda_{TU}, \lambda_{HU}$	10 km <sup>2</sup> , 100 km <sup>2</sup> , 300 km <sup>2</sup> , 10000 km <sup>2</sup>
$\alpha_L, \alpha_N, \epsilon$	2.5, 4, -61 dB
$\beta, A, B$	1/200, 11.95, 0.136
$\mu_T, \mu_U$	40 W, 20 W
$W, \eta_a$	1 GHz, 0.5
$N_0$	-174 dBm/Hz+10log <sub>10</sub> W +10 dB(噪声系数)
$h$	50 m
$g_{ij}, g_{ij}, i \in \{T, U\}, j \in \{a, b\}$	18 dB, -2 dB
$\varphi_{ij}, i \in \{T, U\}, j \in \{a, b\}$	$\varphi_{Ua} = 15^\circ$ , 其他是 $10^\circ$

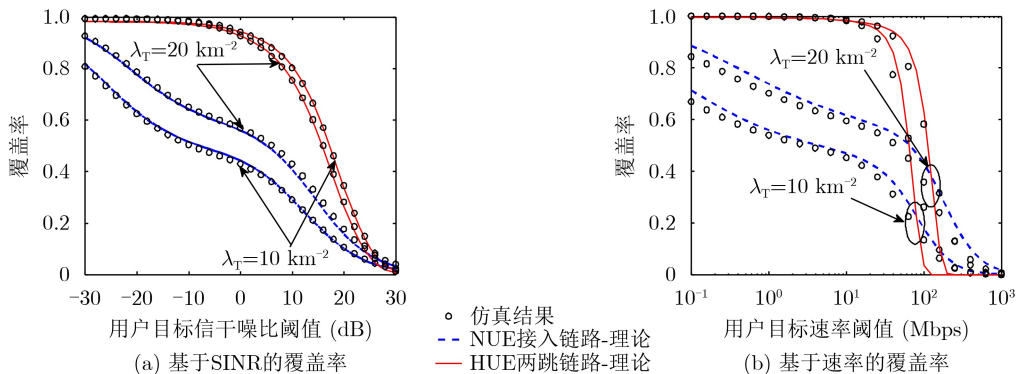


图2 基于用户SINR和速率覆盖率的理论结果与仿真验证

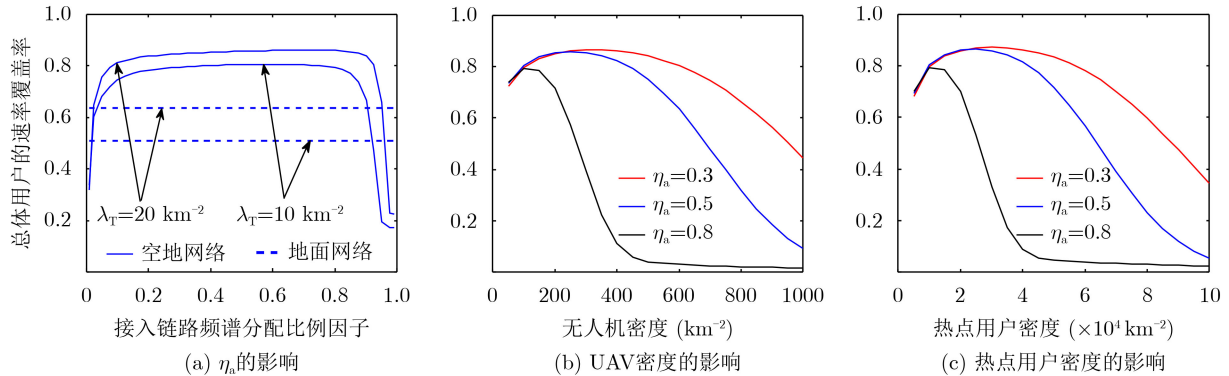


图3 总体用户的速率覆盖性能与关键系统参数的关系

## 5 结束语

本文研究了空地毫米波网络中的接入回传一体化问题, 其中地面基站为无人机空中基站提供无线回传功能。为充分研究一体化网络中接入链路与回传链路对用户体验的影响, 本文依托随机几何理论提出一个面向无人机辅助服务热点区域场景的空地毫米波网络模型, 推导了TBS接入链路和TBS-UAV-UE两跳链路的SINR统计分布, 其中采用了两跳链路独立解耦近似方法以简化理论结果。进一步地, 依托PGF分析方法分析了TBS和UAV各自的用户负载分布特性, 并推导了在接入回传链路采用正交资源分配方法下两类用户的速率覆盖性能, 其中采用了平均负载量的近似方法以简化理论结果。蒙特卡罗仿真验证了所提近似简化分析结果的有效性。结果表明虽然回传链路需要占用部分频谱资源, 接入回传一体化的空地毫米波通信网络性能依然优于单纯的地面毫米波网络。同时, 一些关键系统参数如资源分配比例系数和UAV密度等需要优化选取才能得到最优的速率性能。因此, 研究所得的理论结果和分析方法将为未来大规模空地网络的接入回传一体化部署与设计提供重要的理论指导。未来工作将考虑扩展到更一般的网络场景, 如采用更一般的信道衰落模型, 收发端均配置天线阵列, 波束对准存在误差和引入遮挡物的空间分布模型等。然而, 更一般的网络场景需要新的建模分析方法以应对更复杂的网络特性。

## 参考文献

- [1] FOTOUHI A, QIANG Haoran, DING Ming, *et al.* Survey on UAV cellular communications: Practical aspects, standardization advancements, regulation, and security challenges[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(4): 3417–3442. doi: [10.1109/COMST.2019.2906228](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2906228).
- [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. doi: [10.1109/COMST.2019.2902862](https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2902862).
- [3] PANG Xiaowei, TANG Jie, ZHAO Nan, *et al.* Energy-efficient design for mmWave-enabled NOMA-UAV networks[J]. *Science China Information Sciences*, 2021, 64(4): 140303. doi: [10.1007/S11432-020-2985-8](https://doi.org/10.1007/S11432-020-2985-8).
- [4] 沈学民, 承楠, 周海波, 等. 空天地一体化网络技术: 探索与展望[J]. *物联网学报*, 2020, 4(3): 3–19. doi: [10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00142](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00142).
- [5] SHEN Xuemin, CHENG Nan, ZHOU Haibo, *et al.* Space-air-ground integrated networks: Review and prospect[J]. *Chinese Journal on Internet of Things*, 2020, 4(3): 3–19. doi: [10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00142](https://doi.org/10.11959/j.issn.2096-3750.2020.00142).
- [6] 陈新颖, 盛敏, 李博, 等. 面向6G的无人机通信综述[J]. *电子与信息学报*, 2022, 44(3): 781–789. doi: [10.11999/JEIT210789](https://doi.org/10.11999/JEIT210789).
- [7] CHEN Xinying, SHENG Min, LI Bo, *et al.* Survey on unmanned aerial vehicle communications for 6G[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2022, 44(3): 781–789. doi: [10.11999/JEIT210789](https://doi.org/10.11999/JEIT210789).
- [8] MADAPATHA C, MAKKI B, FANG Chao, *et al.* On integrated access and backhaul networks: Current status and potentials[J]. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 2020, 1: 1374–1389. doi: [10.1109/OJCOMS.2020.3022529](https://doi.org/10.1109/OJCOMS.2020.3022529).
- [9] WANG Xianling, ZHANG Haijun, TIAN Yue, *et al.* Modeling and analysis of aerial base station-assisted cellular networks in finite areas under LoS and NLoS propagation[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2018, 17(10): 6985–7000. doi: [10.1109/TWC.2018.2865344](https://doi.org/10.1109/TWC.2018.2865344).
- [10] SUN Yanshi, DING Zhiguo, and DAI Xuchu. A user-centric cooperative scheme for UAV-assisted wireless networks in malfunction areas[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(12): 8786–8800. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2944911](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2944911).
- [11] AZARI M M, GERACI G, GARCIA-RODRIGUEZ A, *et al.* UAV-to-UAV communications in cellular networks[J]. *IEEE*



- Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(9): 6130–6144. doi: [10.1109/TWC.2020.3000303](https://doi.org/10.1109/TWC.2020.3000303).
- [10] KIM D, LEE J, and QUEK T Q S. Multi-layer unmanned aerial vehicle networks: Modeling and performance analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2020, 19(1): 325–339. doi: [10.1109/TWC.2019.2944378](https://doi.org/10.1109/TWC.2019.2944378).
- [11] KOUZAYHA N, ELSAWY H, DAHROUJ H, et al. Analysis of large scale aerial terrestrial networks with mmWave backhauling[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2021, 20(12): 8362–8380. doi: [10.1109/TWC.2021.3092293](https://doi.org/10.1109/TWC.2021.3092293).
- [12] 朱近康, 邓娜, 赵明. 蜂窝小区边缘同频嵌入垂直覆盖的网络性能[J]. 通信学报, 2015, 36(1): 2015002. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015002](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015002).  
ZHU Jinkang, DENG Na, and ZHAO Ming. Performance of cellular network embedded in the cell edge with vertical coverage by co-frequency[J]. *Journal on Communications*, 2015, 36(1): 2015002. doi: [10.11959/j.issn.1000-436x.2015002](https://doi.org/10.11959/j.issn.1000-436x.2015002).
- [13] BAI Tianyang and HEATH R W. Coverage and rate analysis for millimeter-wave cellular networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2015, 14(2): 1100–1114. doi: [10.1109/TWC.2014.2364267](https://doi.org/10.1109/TWC.2014.2364267).
- [14] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, and LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2014, 3(6): 569–572. doi: [10.1109/LWC.2014.2342736](https://doi.org/10.1109/LWC.2014.2342736).
- [15] DENG Na and HAENGGI M. A fine-grained analysis of millimeter-wave device-to-device networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(11): 4940–4954. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2725827](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2725827).
- [16] SAHA C and DHILLON H S. Millimeter wave integrated access and backhaul in 5G: Performance analysis and design insights[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2019, 37(12): 2669–2684. doi: [10.1109/JSAC.2019.2947997](https://doi.org/10.1109/JSAC.2019.2947997).
- [17] FERENC J S and NÉDA Z. On the size distribution of Poisson Voronoi cells[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 385(2): 518–526. doi: [10.1016/j.physa.2007.07.063](https://doi.org/10.1016/j.physa.2007.07.063).
- [18] HAENGGI M. *Stochastic Geometry for Wireless Networks*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2012: 38–169.
- 卫海超: 男, 1989年生, 讲师, 研究方向为通信网络理论与技术、网络建模与分析、随机几何、无线定位技术。  
邓娜: 女, 1988年生, 副教授, 研究方向为通信网络理论与技术、网络建模与分析、基于无线大数据的网络设计、随机几何。  
朱近康: 男, 1943年生, 教授, 研究方向为绿色无线移动通信、新一代高效无线移动通信、无线移动通信信号处理等。

责任编辑: 余蓉