

大规模无人机协助的多层异构网络设计及性能研究

贾向东^{*①②} 路 艺^① 纪澎善^① 吕亚平^①

^①(西北师范大学计算机科学与工程学院 兰州 730070)

^②(南京邮电大学江苏省无线通信重点实验室 南京 210003)

摘 要: 针对B5G/6G中的热点场景,为满足其超大网络容量的需求,该文构建了多无人机(UAV)协助的毫米波异构网络模型,将地面基站(G-BS)的分布建模为泊松点过程, UAV的分布建模为泊松簇过程,且UAV在地面上的投影以及地面用户设备(GUE)分布在G-BS的周围。为了探讨簇间级联的贡献和簇间干扰的影响,将该2层网络模型扩展为由簇间和簇内基站(BS)共同构成的4层网络模型,并提出了GUE同时与簇内(间)BS级联的4层级联方案。首先,通过传播模型分析了各层级联距离的路径损耗。其次,采用随机几何的方法,结合GUE在下行链路中受到的干扰,推导出GUE可实现的信号与干扰加噪声比(SINR)覆盖概率表达式。最后,仿真结果表明, UAV的高度和簇成员平均数对SINR覆盖概率会产生非单调的影响。同时,当UAV高度较小时,该文所提出的4层级联方案可实现的SINR覆盖概率性能优于仅考虑GUE与簇内BS级联的2层级联方案。

关键词: B5G/6G; 多层异构网络; 无人机; 泊松簇过程; 下行链路

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)09-2632-08

DOI: 10.11999/JEIT200443

Design of Large-scale UAV-assisted Multi-tier Heterogeneous Networks and Performance Research

JIA Xiangdong^{①②} LU Yi^① JI Pengshan^① LÜ Yaping^①

^①(College of Computer Science and Engineering, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

^②(Wireless Communication Key Laboratory of Jiangsu Province, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: In view of the hotspot scenarios in B5G/6G, in order to meet the needs of its ultra-large network capacity, a multi-Unmanned Aerial Vehicle (UAV) assisted millimeter wave heterogeneous network model is constructed. In this network model, the distribution of Ground Base Station (G-BS) is modeled as Poisson point process, the distribution of UAV is modeled as Poisson cluster process, and the projection of the UAV on ground and the Ground User Equipment (GUE) are distributed around the G-BS. For the sake of exploring the contribution of inter-cluster association and the impact of inter-cluster interference, the 2-tier network model is extended to 4-tier network model composed of inter-cluster and intra-cluster Base Station (BS). And the 4-tier association scheme in which the GUE is associated with intra-cluster BS and inter-cluster BS at the same time is proposed. Initially, the path loss of each tier's association distance is analyzed through the propagation model. Furthermore, using stochastic geometry method, combined with the interference of GUE in the downlink, the Signal-to-Interference plus Noise Ratio (SINR) coverage probability expression of GUE is derived. Finally, the simulation results show that the height of UAV and the average number of cluster members have non-monotonic effect on SINR coverage probability. When UAV height is low, compared with the 2-tier association scheme that GUE is only associated with the intra-cluster BS, the 4-tier association scheme proposed in this paper can improve the SINR coverage probability significantly.

Key words: B5G/6G; Multi-tier Heterogeneous Networks (HetNets); Unmanned Aerial Vehicle (UAV); Poisson Cluster Process (PCP); DownLink (DL)

收稿日期: 2020-06-03; 改回日期: 2020-12-19; 网络出版: 2021-02-25

*通信作者: 贾向东 jiaxd@nwnu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61861039), 甘肃省科技计划(18YF1GA060)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61861039), The Science and Technology Plan of Gansu Province (18YF1GA060)

1 引言

随着5G/6G网络的不断发展与探索, 无线通信技术亟需解决热点场景中存在的流量激增问题, 然而仅靠增加小区数量等常规方式扩充网络容量, 所花费的成本无疑很高。另外, 在传统的陆地通信中, 物理位置相对固定的基础网络设施在受到自然灾害等突发事件的破坏时, 很难在短时间内得到快速恢复。因此, 有必要寻找新的解决方案, 为热点应急通信提供服务。

首先, 无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)网络作为5G/6G空天地海一体化网络的重要组成部分, 有望缓解这一问题。与传统的陆地通信网络相比, 特别是在建筑物密集区域或偏远山区等覆盖有限的地方, UAV协助的通信网络更具成本效益和组网便捷灵活等特点。一组UAV可形成一个空中小小区网络, 为热点应急场景提供服务^[1], 其灵活性和高移动性易于建立视距(Line of Sight, LoS)链路, 可以减小路径损耗。其次, 毫米波(millimeter Wave, mm-Wave)也是改善5G/6G网络的关键技术之一, mm-Wave频段具有丰富的频谱资源^[2], 能够为用户提供更高的传输速率。然而, 因其具有较高的频率, mm-Wave信号会经历严重的路径损耗, 传播距离变短。为了克服这一问题, mm-Wave一般与多天线技术联合使用, 较短波长使得天线元件的尺寸和天线间距变得非常小, 便于在受尺寸限制的UAV上封装大规模天线阵列, 实现高波束赋形增益^[3]。因此, UAV可作为空中移动基站(Base Station, BS), 以协助mm-Wave频段上的地面蜂窝网络通信, 组成多层异构网络(Heterogeneous Networks, HetNets)^[1,4], 为热点应急通信提供服务。虽然这种新颖的网络架构同时利用了UAV和mm-Wave的优点, 由于面向热点区域, 服务BS的位置与地面用户设备(Ground User Equipment, GUE)之间一般存在耦合性或相关性。

目前, 关于这种UAV协助的多层网络模型, 已有相关文献做了探讨。文献^[5]通过建立2维天线增益模型研究了低空UAV协助的通信系统安全问题。然而, 其所构造的多层网络模型仅仅把UAV的位置建模为独立的泊松点过程(Poisson Point Process, PPP), 而没有考虑到GUE和无人机基站(Unmanned aerial vehicle-Base Station, U-BS)的耦合。当面向陆地热点应急通信场景建模时, 文献^[6]提出了基于泊松簇过程(Poisson Cluster Process, PCP)的网络模型, 将父过程建模为PPP, 而分布在父点过程周围的孩子点过程建模为PCP。该模型

能够有效捕获上述空间耦合, 适用于热点应急通信场景。因此, 基于文献^[6]的研究成果, 文献^[7]将U-BS和地面基站(Ground-Base Station, G-BS)均建模为独立的PPP, 同时将GUE的位置建模为PCP, 充分利用了U-BS和GUE之间的耦合。然而, 文献^[7]仅考虑了sub-6 GHz频带。文献^[8,9]均采用了与文献^[7]类似的分布模型。其中, 文献^[8]研究了UAV协助的mm-Wave无线携能通信网络性能, 其不足之处是没有考虑成簇分布的UAV。利用PCP的概念, 文献^[9]将U-BS在地面上的投影建模为父过程簇中心, GUE分散在簇中心周围, 同时研究了UAV协助的mm-Wave异构蜂窝网络的上下行链路。这些文献均没有考虑多个UAV以PCP分布的部署以及UAV簇密度对网络性能的影响, 难以满足热点场景中网络容量的需求。因此, 有必要对mm-Wave频段中以PCP分布的多UAV协助的HetNets进行研究。

2 系统模型

2.1 网络模型

如图1所示, 本文构建了由PPP分布的G-BS和PCP分布的U-BS组成的UAV协助的多层mm-Wave异构蜂窝模型。其中, 将宏小区构成的G-BS建模为PPP Φ_{G-BS} , 其密度表示为 λ_{G-BS} 。同时, 由于该模型针对现实地面热点场景, 故以G-BS为簇中心, 将小小区组成的U-BS建模为PCP $\Phi_{U-BS}(\lambda_{G-BS}, \bar{m})$, 其中U-BS在地面的投影以簇成员平均数 \bar{m} 分布在G-BS周围。

首先在所有簇中随机选择一个簇作为代表簇, 再随机选择代表簇中的一个GUE作为典型GUE, 对其DL进行分析。由于PPP的稳定性, 将所选典型GUE的位置设为原点^[10], 则代表簇中心的位置为 $x_0 \in \Phi_{G-BS}$ 。根据Slivnyak定理, 可确保剩余的PPP与 Φ_{G-BS} 具有相同的分布^[11]; 类似地, 代表簇中的U-BS与干扰簇中的U-BS也具有相同的分布。为了便于分析以及区分代表簇和干扰簇的影响, 将该2层网络模型扩展为4层网络模型。对于该扩展的4层网络模型, 采用最大BRP级联准则, 即典型GUE与提供最强的长期平均BRP的BS级联^[12]。假设同层BS的发射功率、偏置因子以及信道衰落的平均值相同, 则同一层中距离典型GUE最近的BS即为提供最大BRP的BS。如图1所示, 典型GUE与第0层的簇内U-BS级联的距离表示为 z_0 , 典型GUE与第1层的簇间U-BS级联的距离表示为 z , 典型GUE与第2层的簇内G-BS级联的距离表示为 $v_0 = \|x_0\|$, 典型GUE与第3层的簇间G-BS级联的距离表示为 $v = \|x\|$, $x \in \Phi_{G-BS} \setminus x_0$ 。同时, 本文也考

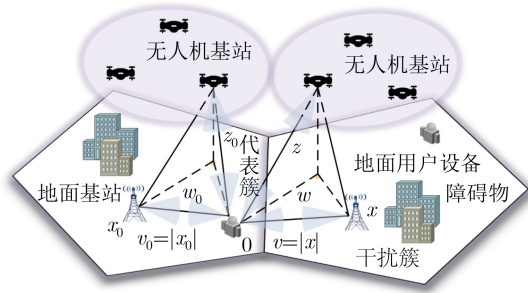


图1 UAV协助的多层异构蜂窝网络模型

虑了2层级联方案,即典型GUE仅级联到簇内的G-BS或U-BS。

2.2 传播模型

2.2.1 大规模衰落模型

针对所构造的4层网络模型中的第0层和第2层,簇内收发器之间距离较短且簇内U-BS通过调整位置和高度可以形成LoS链路。由于mm-Wave信号容易受到障碍物的影响,因此典型GUE和簇内BS之间同时考虑LoS和非视距(Non Line of Sight, NLoS)两种链路状态。对于第1层和第3层,考虑到典型GUE与簇间BS收发器之间距离较长且存在更多的障碍物,故仅考虑NLoS链路状态。

为了便于分析,采用视距球模型计算出LoS/NLoS链路的概率^[13]。当 $i \in \{0, 2\}$ 时,假设 R_i 为视距球的半径, r 为典型GUE和BS之间的距离。当 $r \leq R_i$ 时,典型GUE和BS之间为LoS链路,其概率为 $P_i^L(r)$;当 $r > R_i$ 时,为NLoS链路,其概率为 $P_i^N(r) = 1 - P_i^L(r)$ 。因此,LoS/NLoS链路概率函数为

$$P_i(r) = \begin{cases} P_{i,L} = P_i^L(r) I(r \leq R_i) \\ P_{i,N} = (1 - P_i^L(r)) I(r \leq R_i) + I(r > R_i) \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I(\cdot)$ 表示指标函数^[14]。当 $i = 0$ 时,典型GUE与簇内U-BS之间为LoS链路的概率为

$$P_0^L(r) = \frac{1}{1 + b \exp\left(-c \left(\frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{H}{r}\right) - b\right)\right)} \quad (2)$$

其中, b 和 c 是取决于环境的常数, H 表示UAV的高度^[15]。根据文献^[16],式(1)中,当 $i = 2$ 时,典型GUE与簇内G-BS之间为LoS链路的概率 $P_2^L(r)$ 可以近似为常数 P_2^L ,即 $P_2^L(r) = P_2^L$ 。

通过视距球模型,得出第0层和第2层的路径损耗为

$$L_i(r) = \begin{cases} L_{i,L}(r) = r^{\alpha_{i,L}}, & \text{依概率 } P_{i,L} \\ L_{i,N}(r) = r^{\alpha_{i,N}}, & \text{依概率 } P_{i,N} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\alpha_{i,L}$ 和 $\alpha_{i,N}$ 分别表示第 i 层的LoS和NLoS路径损耗指数。当 $i \in \{1, 3\}$ 时,典型GUE与簇间BS之间的路径损耗表示为 $L_i(r) = r^{\alpha_i}$,其中 α_i 表示第 i 层的路径损耗指数,其因传输环境不同而有所不同。

2.2.2 小规模衰落模型

本文不仅考虑了大规模衰落,而且还考虑了小规模衰落。Nakagami-m衰落是一种较为通用的小规模信道衰落模型。假设本文的4层网络模型中所有链路都经历独立的Nakagami-m衰落,典型GUE与T-BS之间链路的小规模衰落增益表示为 h_T , $T \in \{U, G\}$ 。对于LoS链路而言, h_T 是分布为 $h_T \sim \Gamma(N_L, 1/N_L)$ 的归一化Gamma随机变量;对于NLoS链路而言, h_T 是分布为 $h_T \sim \Gamma(N_N, 1/N_N)$ 的归一化Gamma随机变量,其中 N_L 和 N_N 分别表示LoS链路和NLoS链路的Nakagami-m衰落参数,并假定为正整数。

3 最近距离的路径损耗

假设典型GUE位于簇中心为 $x_0 \in \Phi_{G-BS}$ 的代表簇中,并且簇内U-BS的投影分散在代表簇中心周围。

3.1 第0层的路径损耗

假设典型GUE到簇内U-BS的最近距离为 z_0 。为了得到 z_0 的分布,首先选择任一簇内U-BS,即在非排序情形下研究簇内距离的统计特性。根据上述传播模型,典型GUE与簇内U-BS之间的链路为LoS或NLoS链路。由式(1)和式(3),可推导出任一簇内U-BS在地面投影距离 w_0 的LoS路径损耗密度测量为

$$\Lambda_{0,L}((0, t]) = \frac{1}{4\sigma^2} \left(t^{1/\alpha_{0,L}} \right)^2 P_{0,L} I(t < R_0^{\alpha_{0,L}}) \quad (4)$$

其中, σ^2 表示UAV距离分布方差,附录中给出了证明。同理, w_0 的NLoS链路的路径损耗密度测量为

$$\begin{aligned} \Lambda_{0,N}((0, t]) = & \frac{1}{4\sigma^2} \left((1 - P_{0,L}) \left| t^{1/\alpha_{0,N}} \right| \right)^2 I(t < R_0^{\alpha_{0,N}}) \\ & + (1 - P_{0,L}) R_0^2 I(t > R_0^{\alpha_{0,N}}) \\ & + (t^{2/\alpha_{0,N}} - R_0^2) I(t > R_0^{\alpha_{0,N}}) \end{aligned} \quad (5)$$

依据式(5),利用簇内U-BS的独立性和次序统计理论^[17],推导出最近距离 z_0 的路径损耗 $L_{0,t'}(z_0)$ 互补累计分布函数(Complementary Cumulative Distribution Function, CCDF)为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{L_{0,t'}(z_0)}(t) = & \exp\left(-\bar{m} \Lambda_{0,t'}\left(\left(0, \left(t^{2/\alpha_{0,t'}} - H^2\right)^{\alpha_{0,t'}/2}\right]\right)\right) \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $t' \in \{L, N\}$ 表示典型GUE与BS之间的链路分别为LoS链路和NLoS链路。同样的, 附录中给出了证明。因此, 最近距离 z_0 的路径损耗 $L_{0,t'}(z_0)$ 概率密度函数(Probability Density Function, PDF)为

$$f_{L_{0,t'}(z_0)}(t) = \bar{m} \cdot \exp\left(-\bar{m}A_{0,t'}\left(\left(0, \left(t^{2/\alpha_{0,t'}} - H^2\right)^{\alpha_{0,t'}/2}\right)\right)\right) \cdot \frac{dA_{0,t'}\left(\left(0, \left(t^{2/\alpha_{0,t'}} - H^2\right)^{\alpha_{0,t'}/2}\right)\right)}{dt} \quad (7)$$

基于以上表达式, 得出引理1。

引理 1 典型GUE到最近的簇内U-BS的路径损耗 L_0 的CCDF为 $\tilde{F}_{L_0}(t) = \sum \tilde{F}_{L_{0,t'}(z_0)}(t)$ 。

3.2 第2层的路径损耗

假设典型GUE到簇内G-BS的最近距离为 v_0 。根据上述传播模型, 典型GUE与簇内G-BS之间的链路为LoS或NLoS链路。由式(1)和式(3), 利用与式(4)和式(5)类似的方法, 推导出LoS链路和NLoS链路的路径损耗密度测量分别为

$$A_{2,L}((0, t]) = \frac{1}{2\sigma^2} \left(t^{1/\alpha_{2,L}}\right)^2 P_{2,L} I\left(t^{1/\alpha_{2,L}} < R_2\right) \quad (8)$$

$$A_{2,N}((0, t]) = \frac{1}{2\sigma^2} \left((1 - P_{2,L}) t^{2/\alpha_{2,N}} I(t < R_2^{\alpha_{2,N}}) + (1 - P_{2,L}) R_2^2 I(t > R_2^{\alpha_{2,N}}) + \left(t^{2/\alpha_{2,N}} - R_2^2\right) I(t > R_2^{\alpha_{2,N}}) \right) \quad (9)$$

同理, 推导出最近距离 v_0 的路径损耗 $L_{2,t'}(v_0)$ 的CCDF为

$$\tilde{F}_{L_{2,t'}(v_0)}(t) = \exp(-A_{2,t'}((0, t])) \quad (10)$$

对应地, 最近距离 v_0 的路径损耗 $L_{2,t'}(v_0)$ 的PDF为

$$f_{L_{2,t'}(v_0)}(t) = -\exp(-A_{2,t'}((0, t])) \frac{dA_{2,t'}((0, t]))}{dt} \quad (11)$$

基于以上表达式, 得出引理2。

引理 2 典型GUE到唯一的簇内G-BS的路径损耗 L_2 的CCDF为 $\tilde{F}_{L_2}(t) = \sum \tilde{F}_{L_{2,t'}(v_0)}(t)$ 。

3.3 第1层和第3层的路径损耗

假设典型GUE到簇间U-BS的最近距离为 z 。为了得到 z 的分布, 首先选择任一簇间U-BS, 即在非排序情形下研究簇间距离的统计特性。根据上述传播模型, 典型GUE与簇间U-BS之间的链路为NLoS链路。任一簇间U-BS在地面投影距离 w 的分布服从莱斯分布, 其条件PDF为^[18,19]

$$f_w(w|v) = \frac{w}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{(w^2 - H^2) + v^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{v\sqrt{w^2 - H^2}}{\sigma^2}\right) \quad (12)$$

其中, $I_0(\cdot)$ 表示修正的0阶第1类贝塞尔函数。继而可推导出任一簇间U-BS在地面投影距离 w 的CCDF为

$$\tilde{F}_w(w|v) = Q\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{v\sqrt{w^2 - H^2}}{\sigma^2}\right), w > H \quad (13)$$

其中, $Q(m, n)$ 是定义为 $Q(m, n) = \int_n^\infty t \exp\left(-\frac{t^2 + m^2}{2}\right) \cdot I_0(mt) dt$ 的Marcum Q函数。

基于以上表达式, 考虑簇间U-BS之间的独立性和次序统计理论, 得出引理3。

引理 3 典型GUE到最近的簇间U-BS的路径损耗 L_1 的CCDF为

$$\tilde{F}_{L_1}(t|v = \|x\|) = Q^m\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{v}{\sigma} \sqrt{t^{1/\alpha_1} - H^2}\right) \quad (14)$$

典型GUE到最近的簇间U-BS的路径损耗 L_1 的PDF为

$$f_{L_1}(t|v = \|x\|) = \bar{m} Q^{\bar{m}-1}\left(\frac{v}{\sigma}, \frac{v}{\sigma} \sqrt{t^{1/\alpha_1} - H^2}\right) \cdot \frac{2t^{2/\alpha_1-1}}{\alpha_1 \sigma^2} \exp\left(-\frac{(t^{2/\alpha_1} - H^2) + v^2}{\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{v}{\sigma^2} \sqrt{t^{2/\alpha_1} - H^2}\right) \quad (15)$$

同样地, 根据上述传播模型, 可得典型GUE与簇间G-BS之间的链路为NLoS链路。考虑簇间G-BS之间的独立性和次序统计理论, 得出引理4。

引理 4 典型GUE到第3层中最近的G-BS的路径损耗 L_3 的CCDF为

$$\tilde{F}_{L_3}(t) = \exp(-A_3([0, t])) = \exp\left(-\pi \lambda_{G-BS} t^{2/\alpha_3}\right) \quad (16)$$

典型GUE到第3层最近的G-BS的路径损耗 L_3 的PDF为

$$f_{L_3}(t) = -\exp(-A_3([0, t])) \frac{dA_3([0, t]))}{dt} \quad (17)$$

4 DL覆盖性能分析

4.1 DL SINR

假设在 $t' \in \{L, N\}$ 链路上, 典型GUE与第 i 层中最近的BS级联, 其级联距离表示为 $X_{i,t'}$, 路径损耗表示为 $L_{i,t'}(X_{i,t'})$, 则典型GUE接收到的SINR为

$$\text{SINR}_{i,t'} = \frac{P_i G_{M_i} h_{i,t'} L_{i,t'}^{-1} (X_{i,t'})}{I_{i,t'} + \sigma_0^2} \quad (18)$$

其中, $h_{i,t'}$ 表示参数为 $N_{i,t'}$ 的小规模衰落增益, 即 $h_{i,t'} \sim \Gamma(N_{i,t'}, 1/N_{i,t'})$, G_{M_i} 表示典型GUE从第 i 层发射器接收的最大发射增益, σ_0^2 表示加性噪声功率, $I_{i,t'}$ 表示典型GUE在 $t' \in \{L, N\}$ 链路上受到的总干扰, 表示为

$$I_{i,t'} = \sum_{t' \in \{L, N\}} \sum_{i \in \{0, 2\}} I_{i,t'} + \sum_{i \in \{1, 3\}} I_i \quad (19)$$

其中, 典型GUE受到簇内U-BS的干扰为

$$I_{0,t'} = \sum_{z_k \in \Phi_{U-BS}(\lambda_{G-BS}, \bar{m})} P_0 G_0 h_{0,t'} L_{0,t'}^{-1} (\|z_k\|) \quad (20)$$

典型GUE受到簇内G-BS的干扰为

$$I_{2,t'} = P_2 G_2 h_{2,t'} L_{2,t'}^{-1} (v_0) \quad (21)$$

考虑到典型GUE到第1层和第3层BS的路径损耗模型单一, 则典型GUE受到簇间U-BS的干扰为

$$I_1 = \sum_{x \in \Phi_{G-BS} \setminus x_0} \sum_{y \in N^x} P_1 G_1 h_1 L_1^{-1} (\|y + x\|) \quad (22)$$

典型GUE受到簇间G-BS的干扰为

$$I_3 = \sum_{x_k \in \Phi_{G-BS} \setminus x_0} P_3 G_3 h_3 L_3^{-1} (\|x_k\|) \quad (23)$$

4.2 DL SINR覆盖概率

DL SINR覆盖概率定义为典型GUE接收到的SINR大于某个阈值 $\tau > 0$ 的概率。因此, 当典型GUE在 $t' \in \{L, N\}$ 链路上与第 i 层BS相级联时, 相应的SINR覆盖概率为

$$P_{i,t'}(\tau) = P(\text{SINR}_{i,t'} > \tau) \quad (24)$$

因此, 在所考虑的通信场景中, 对于给定阈值 τ , 典型GUE的总SINR覆盖概率为

$$P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}} = P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}} + P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}} \quad (25)$$

其中, $P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}}$ 和 $P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}}$ 分别表示典型GUE与U-BS和G-BS级联时的覆盖概率, 分别表示为

$$P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}} = \sum_{t' \in \{L, N\}} A_{0,t'} P_{0,t'}(\tau) + A_1 P_1(\tau) \quad (26)$$

$$P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}} = \sum_{t' \in \{L, N\}} A_{2,t'} P_{2,t'}(\tau) + A_3 P_3(\tau) \quad (27)$$

其中, $A_{i,t'}$ 表示在 $t' \in \{L, N\}$ 链路上与第 i 层BS相级联的概率, $i \in \{0, 2\}$, A_i 表示与第 i 层BS相级联的概率, $i \in \{1, 3\}$ 。考虑到第0层和第2层的级联链路可能为LoS或NLoS链路, 利用上述路径损耗的分析, 推导出典型GUE与级联距离为 $X_{i,t'}(z_0(v_0))$ 的最近

簇内BS的级联概率为

$$A_{i,t'} = E_{L_{i,t'}} \left(P_{i,t'}(L_{i,t'}) \tilde{F}_{L_{j \setminus i}}(C_{j,i} L_{i,t'}(z_0(v_0))) \right) \quad (28)$$

其中, $E_X(\cdot)$ 表示对 X 的期望因子, $C_{j,i}$ 定义为 $C_{j,i} = \frac{P_j B_j G_{M_j}}{P_i B_i G_{M_i}}$, B_i 表示典型GUE与第 i 层BS级联的偏置因子。同理, 考虑到第1层和第3层的级联链路为单一的NLoS链路, 利用上述路径损耗的分析, 推导出典型GUE与级联距离为 $X_i(z(v))$ 的最近簇间BS的级联概率为

$$A_i = E_{L_i} \left(\prod_{j \in \{0, 2\}} \tilde{F}_{L_j}(C_{j,i} L_i(z(v))) \right) \cdot \tilde{F}_{L_{j \setminus i}}(C_{j,i} L_i(z(v))) \quad (29)$$

5 数值结果与分析

本节提供了数值结果以验证上述部分中获得的分析结果, 并说明关键系统参数对性能的影响。考虑了4层蜂窝HetNets模型, 整个网络共享的总带宽为20 MHz。为了便于阅读和分析, 表1列出了仿真参数。

表 1 系统参数值

参数	数值	参数	数值
$N_{0,t'}$	3	$\alpha_{0,L}$	2.1
N_1	2	$\alpha_{0,N}$	3.4
$N_{2,t'}$	3	α_1	3.4
N_3	2	$\alpha_{2,L}$	2.5
R_0	50~150 m	$\alpha_{2,N}$	3.6
R_2	30 m	α_3	3.6
B_i	1	τ	1.5

图2比较了当UAV高度 H 和簇成员平均数 \bar{m} 取不同值时, 两种级联方案可实现的SINR覆盖概率。首先图2(a)对两种级联方案实现的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}}$ 进行了比较, 发现无论UAV高度 H 和簇成员平均数 \bar{m} 取何值, 当典型GUE同时与簇内(间)的G-BS级联时, 对应的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}}$ 均大于仅与簇内G-BS级联所实现的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}}$ 。图中整体曲线走势呈单调递减状态, 无论簇成员平均数 \bar{m} 为何值, 4层级联方案中最低的UAV高度 H 对应的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}}$ 反而要大于2层级联方案中最高的UAV高度 H 对应的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{G-BS}}$ 。

图2(b)比较了两种级联方案可实现的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}}$ 。当UAV高度 H 较高时, 与预想的结果相反, 4层级联方案的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}}$ 小于2层级联方

案的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}}$ 。但随着UAV高度 H 逐渐降低, 典型GUE同时与簇内(间)的U-BS级联的优势逐渐体现出来, 对应的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}}$ 要大于仅与簇内U-BS级联所实现的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{U-BS}}$, 而且整体曲线也呈现下降趋势。

最后, 由于总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 是通过G-BS和U-BS两部分实现的SINR覆盖概率叠加而得到的, 因此, 在图2(c)中可以观察到当UAV高度 H 和簇成员平均数 \bar{m} 相同时, 4层级联方案的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 大于2层级联方案的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$; 当簇成员平均数 \bar{m} 取定值时, UAV高度 H 越低则总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 越大; 当UAV高度 H 取定值时, 簇成员平均数 \bar{m} 越小则实现的总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 越大。且在UAV高度 H 较低的情况下, 4层级联方案的SINR覆盖概率增益尤为显著。

图3对图2(c)进行了更加深入的研究, 融合了UAV距离分布方差 σ^2 这一因素, 将两种级联方案可实现的SINR总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 进行对比。由图3(a)可知, 当UAV高度 H 和UAV距离分布方差 σ^2 相同

时, 典型GUE同时与簇内(间)的BS级联对应的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 均大于仅与簇内BS级联所实现的覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 。当UAV距离分布方差 σ^2 取定值时, UAV高度 H 越低则实现的总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 越大; 当UAV高度 H 取定值时, UAV距离分布方差 σ^2 越小则实现的总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 越大。观察图3(b)发现整体曲线趋势与图3(a)类似, 只是当UAV高度 H 偏大且UAV距离分布方差 σ^2 偏小时, 总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 会急剧发生变化。比较图3(a)与图3(b), 可以得到当UAV高度 H 和UAV距离分布方差 σ^2 相同时, 簇成员平均数 \bar{m} 越小则实现的总覆盖概率 $P_{\text{Cov}}^{\text{Tot}}$ 越大这一结论。所以, 综合考虑图3中涉及的相关网络参数, 本文提出的4层级联方案能够有效优化DL链路的SINR覆盖概率, 特别当UAV高度 H 取较小值时, 进一步验证了图2给出的结论。

6 结束语

针对B5G/6G网络的热点区域, 构建了UAV协助的多层mm-Wave异构蜂窝网络模型, 并随之提出了一种全新的4层级联方案。根据mm-Wave信号

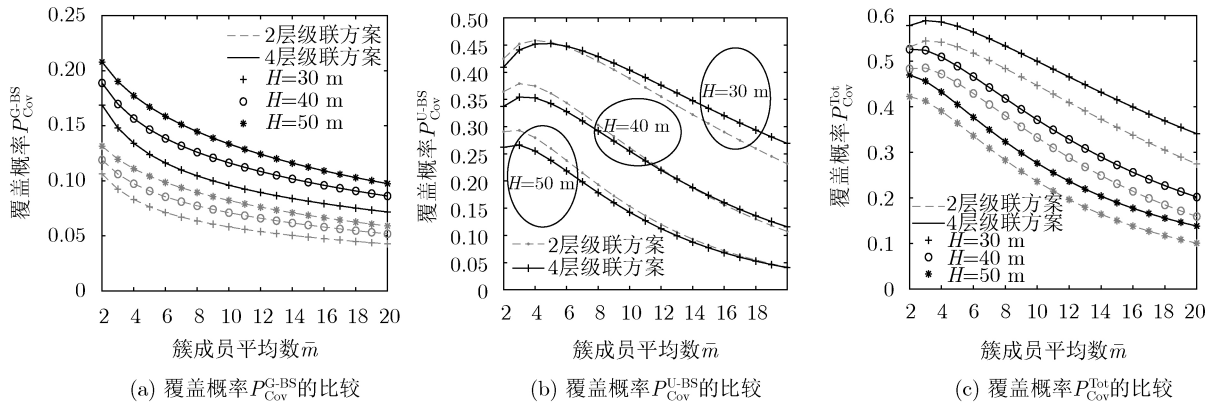


图2 2层和4层级联方案中的各层覆盖概率比较

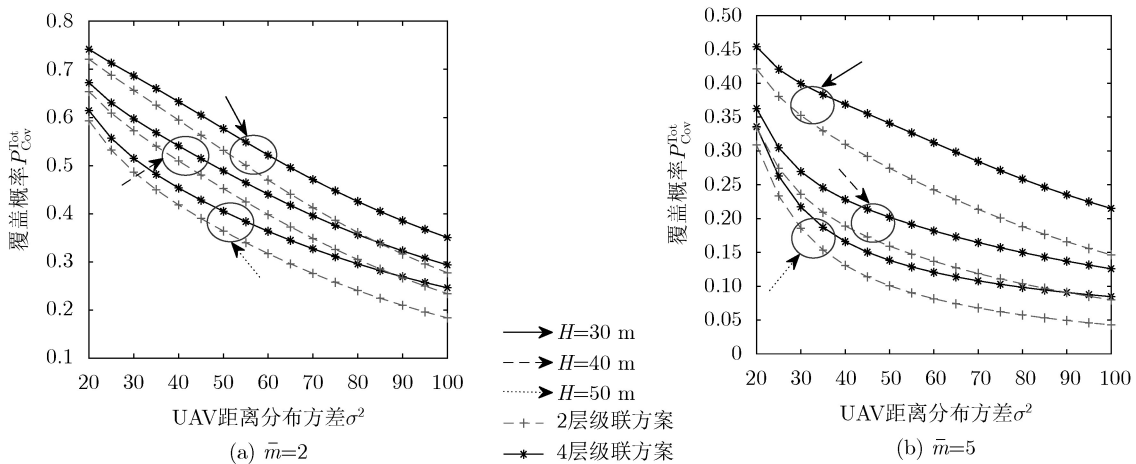


图3 2层和4层级联方案中的总覆盖概率比较

的传播模型, 计算了各层级链路的路径损耗。结合各层级联概率以及各层存在的干扰, 推导出DL覆盖概率并研究了相关参数对网络性能的影响。对比分析两种不同的级联方案, 仿真结果表明本文提出的级联方案可以有效提高系统的SINR覆盖概率。下一步将着手探讨UAV协助的多层Het-Nets中的能量采集等问题。

附录

式(4)的证明

假设任一簇内U-BS在地面上的投影距离表示为 w_0 , 则当典型GUE与簇内U-BS之间的链路为LoS链路时, 其路径损耗为 $L_{0,L}(w_0) = w_0^{\alpha_{0,L}}$, 结合式(1)和式(3), 推导出 w_0 的LoS路径损耗密度测量为

$$\begin{aligned} \Lambda_{0,L}((0, t]) &= \int_{R^2} P(L_{0,L}(w_0) < t) dw_0 \\ &= \frac{2\pi}{4\sigma^2 \times 2\pi} \int_0^\infty P(w_0^{\alpha_{0,L}} < t) w_0 \cdot dw_0 \\ &= \frac{P_{0,L}}{4\sigma^2} \int_0^{R_0} I(w_0 < t^{1/\alpha_{0,L}}) w_0 \cdot dw_0 \\ &= \frac{P_{0,L}}{4\sigma^2} \int_0^{\min(R_0, t^{1/\alpha_{0,L}})} w_0 \cdot dw_0 \\ &= \frac{1}{4\sigma^2} \left(t^{1/\alpha_{0,L}} \right)^2 P_{0,L} I(t < R_0^{\alpha_{0,L}}) \end{aligned}$$

式(6)的证明

在 $t' \in \{L, N\}$ 链路上, 任一簇内U-BS在地面投影距离 w_0 的路径损耗 $L_{0,t'}(w_0)$ 的CCDF为^[17]

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{L_{0,t'}(w_0)}(t) &= P\{L_{0,t'}(w_0) > t\} \\ &= \exp(-\Lambda_{0,t'}((0, t])) \end{aligned}$$

考虑到式(4)和式(5)给出了任一簇内U-BS在地面投影距离 w_0 的路径损耗密度测量, 结合图1中簇内U-BS的高度 H , 有 $w_0^2 = z_0^2 - H^2$ 。因此, 在 $t' \in \{L, N\}$ 链路上, 路径损耗 $L_{0,t'}(w_0)$ 的CCDF可以进一步写为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{L_{0,t'}(w_0)}(t) &= \exp\left(-\Lambda_{0,t'}\left(\left(0, \left(t^{2/\alpha_{0,t'}} - H^2\right)^{\alpha_{0,t'}/2}\right]\right)\right) \end{aligned}$$

利用簇内U-BS的独立性, 推导出最近距离 z_0 的路径损耗 $L_{0,t'}(z_0)$ 的CCDF为

$$\begin{aligned} \tilde{F}_{L_{0,t'}(z_0)}(t) &= P\{L_{0,t'}(z_0) > t\} \\ &= P\{\max\{L_{0,t'}(z_k)\} > t\} \\ &= \prod_{k=1}^{\bar{m}} P\{L_{0,t'}(z_k) > t\} = \left(\tilde{F}_{L_{0,t'}(z_0)}\right)^{\bar{m}} \\ &= \exp\left(-\bar{m}\Lambda_{0,t'}\right. \\ &\quad \cdot \left.\left(\left(0, \left(t^{2/\alpha_{0,t'}} - H^2\right)^{\alpha_{0,t'}/2}\right)\right)\right) \end{aligned}$$

参 考 文 献

- [1] 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](#).
- [2] 徐常志, 靳一, 李立, 等. 面向6G的星地融合无线传输技术[J]. *电子与信息学报*, 2021, 43(1): 28–36. doi: [10.11999/JEIT200363](#).
- [3] XU Changzhi, JIN Yi, LI Li, *et al.* Wireless transmission technology of satellite-terrestrial integration for 6G mobile communication[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2021, 43(1): 28–36. doi: [10.11999/JEIT200363](#).
- [4] 黄天宇, 马林华, 胡星, 等. 一种实用的毫米波大规模MIMO混合预编码算法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(8): 1788–1795. doi: [10.11999/JEIT161211](#).
- [5] HUANG Tianyu, MA Linhua, HU Xing, *et al.* Practical hybrid precoding algorithm for millimeter wave massive MIMO[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(8): 1788–1795. doi: [10.11999/JEIT161211](#).
- [6] 贾向东, 纪珊珊, 范巧玲, 等. 基于非正交多接入的多层全双工异构网回程方案及性能研究[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(4): 945–951. doi: [10.11999/JEIT180463](#).
- [7] JIA Xiangdong, JI Shanshan, FAN Qiaoling, *et al.* Backhaul scheme and performance study of full-duplex multi-tier heterogeneous networks based on non-orthogonal multiple access[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(4): 945–951. doi: [10.11999/JEIT180463](#).
- [8] ZHU Yongxu, ZHENG Gan, and 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](#).
- [9] TURGUT E and GURSOY M C. Uplink performance analysis in D2D-enabled millimeter-wave cellular networks with clustered users[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2019, 18(2): 1085–1100. doi: [10.1109/TWC.2018.2889755](#).
- [10] TURGUT E and 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](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2841655).
- [8] WANG Xueyuan and GURSOY M C. Simultaneous information and energy transfer in mmWave UAV-assisted cellular networks[C]. 2019 IEEE 20th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, Cannes, France, 2019: 1–5. doi: [10.1109/SPAWC.2019.8815566](https://doi.org/10.1109/SPAWC.2019.8815566).
- [9] YI Wenqiang, LIU Yuanwei, BODANESE E, *et al.* A unified spatial framework for UAV-aided mmWave networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2019, 67(12): 8801–8817. doi: [10.1109/TCOMM.2019.2945332](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2019.2945332).
- [10] SAHA C and DHILLON H S. Downlink coverage probability of K-tier HetNets with general non-uniform user distributions[C]. 2016 IEEE International Conference on Communications, Kuala Lumpur, Malaysia, 2016: 1–6. doi: [10.1109/ICC.2016.7511509](https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511509).
- [11] HAENGGI M. Stochastic Geometry For Wireless Networks[M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 13–16.
- [12] JO H S, SANG Y J, XIA Ping, *et al.* Heterogeneous cellular networks with flexible cell association: A comprehensive downlink SINR analysis[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012, 11(10): 3484–3495. doi: [10.1109/TWC.2012.081612.111361](https://doi.org/10.1109/TWC.2012.081612.111361).
- [13] BAI Tianyang and HEATH R. 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] WANG Xueyuan, TURGUT E, and GURSOY M C. Coverage in downlink heterogeneous mmWave cellular networks with user-centric small cell deployment[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(4): 3513–3533. doi: [10.1109/TVT.2019.2895816](https://doi.org/10.1109/TVT.2019.2895816).
- [15] AI-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).
- [16] WANG Xueyuan and GURSOY M C. Uplink coverage in heterogeneous mmWave cellular networks with user-centric small cell deployments[C]. 2018 IEEE 88th Vehicular Technology Conference, Chicago, USA, 2018: 1–5. doi: [10.1109/VTCFall.2018.8690884](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2018.8690884).
- [17] DAVID H A and NAGARAJA H N. Order Statistics[M]. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 2003: 18–27.
- [18] YI Wenqiang, LIU Yuanwei, and NALLANATHAN A. Modeling and analysis of D2D millimeter-wave networks with Poisson cluster processes[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2017, 65(12): 5574–5588. doi: [10.1109/TCOMM.2017.2744644](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2744644).
- [19] AFSHANG M, DHILLON H S, and CHONG P H J. Modeling and performance analysis of clustered device-to-device networks[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2016, 15(7): 4957–4972. doi: [10.1109/TWC.2016.2550024](https://doi.org/10.1109/TWC.2016.2550024).

贾向东: 男, 1971年生, 博士, 教授, 研究方向为移动与无线通信关键理论与技术。

路 艺: 女, 1997年生, 硕士生, 研究方向为异构网络。

纪澎善: 男, 1996年生, 硕士生, 研究方向为无人机通信网络。

吕亚平: 女, 1994年生, 硕士生, 研究方向为深度学习。

责任编辑: 马秀强