



专题：低空物联网与低空安全

一种低空立体组网场景下简化的下行干扰模型

周娇¹, 李新¹, 曹蕾¹, 陈蔚燕¹, 范雯¹, 张欣², 秦洁³, 许乐飞³

(1. 中国移动通信有限公司研究院, 北京 100053;

2. 北京邮电大学信息与通信工程学院, 北京 100193;

3. 中国移动通信集团广东有限公司深圳分公司, 广东 深圳 518033)

摘要: 为更好地保障低空立体组网的性能, 可采用天线主瓣向上的方式覆盖低空。与传统地面组网场景相比, 低空组网面临干扰小区数量多、干扰影响范围广、干扰受高度影响大等难题。分析了低空立体组网的分层特征, 揭示了其干扰特性, 并基于该特性, 结合多小区三角投影的关系, 对天线上倾场景下的低空组网的下行干扰进行了数学建模。该模型仅采用倾角以及用户与基站的相对位置信息, 即可获得低空覆盖的性能, 简化了低空场景下的性能和干扰分析过程。

关键词: 低空立体分层组网; 低空干扰模型; 主服务小区和干扰小区分布

中图分类号: TN919

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2025051

A simplified downlink interference model for low-altitude three-dimensional networking scenarios

ZHOU Jiao¹, LI Xin¹, CAO Lei¹, CHEN Weiyan¹, FAN Wen¹, ZHANG Xin², QIN Jie³, XU Lefei³

1. China Mobile Research Institute, Beijing 100053, China

2. School of Information and Communication Engineering, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100193, China

3. China Mobile Communications Group Guangdong Co., Ltd., Shenzhen Branch, Shenzhen 518033, China

Abstract: To better ensure the performance of low-altitude networking, the antenna main lobe can be used to cover low-altitude. Compared to traditional ground networking scenarios, it faces interference challenges such as a large number of interfering cells, a wider range of interference impact, and high interference susceptibility. The layered characteristics of the low-altitude three-dimensional networking were analyzed, and its interference characteristics were revealed. Based on these characteristics, combined with the relationship of multi-cell triangular projection, a mathematically model was developed for the downlink interference in low-altitude networking with upward-tilted antennas. This model could obtain the performance of low-altitude coverage using only the angle of tilt and the relative position information between users and base stations, thereby simplifying the process of performance and interference analysis in low-altitude scenarios.

Key words: low-altitude three-dimensional layered networking, low-altitude interference model, main serving cell and interference cell distribution

收稿日期: 2025-02-13; 修回日期: 2025-03-06

通信作者: 周娇, zhoujiao@chinamobile.com

0 引言

近年来,基于蜂窝网络的网联无人机受到业界的广泛关注。低空无人机快递、无人机物流、应急救援等业务量急剧增长,这对无人机通信链路提出了更高的要求。与Wi-Fi等其他网络相比^[1],蜂窝网络支持广域覆盖,可实现对无人机的超视距远程飞行控制。然而,现有的蜂窝网络主要为服务地面用户而设计,采用基站天线下的覆盖方式,以非视距(non-line-of-sight, NLOS)传播环境为主,地面用户受到的干扰范围有限。若复用现有的蜂窝网络,利用天线旁瓣来服务低空用户^[2],因旁瓣覆盖弱且存在零陷等问题,难以满足低空覆盖需求^[3]。

随着低空经济快速发展,低空场景开始采用基站天线上倾的覆盖方式来满足低空区域的覆盖需求。此场景下,以视距(line-of-sight, LOS)传播环境为主^[4],由于缺少建筑物的遮挡,干扰不受控,表现为干扰小区数量更多、干扰信号能量更强、干扰影响范围更大,且干扰受飞行高度的影响显著。项目组在多个城市的低空区域,于垂直高度100~600 m的外场测试结果显示,低空区域的下行信干噪比(signal to interference plus noise ratio, SINR)比地面SINR低约10 dB,低空SINR的性能将直接影响无人机的在网性能,如在网率、离线率等。本文主要分析低空立体组网场景下的下行干扰特征,并提出低空下行干扰的预测评估模型。

现有关于低空干扰评估模型的研究主要集中在低空信道建模和天线建模。文献[5]研究了利用位置感知波束在各种5G超密集组网(ultra-dense network, UDN)场景中评估信干比(signal to interference ratio, SIR),评估SIR的方法是链路级仿真。文献[6]提出了一种基于簇的低空无人机对载(UAV-to-vehicle, U2V)非平稳信道模型,为了全面模拟散射环境,设计了一种新的连续簇进

化算法,以捕捉信道的非平稳性。文献[7]分析了低空场景下的高LOS概率,这种环境虽然有助于稳定的传输并简化信道模型的估计,但同时也带来了更强烈的干扰,这些干扰会对无人机的飞行性能产生影响,威胁飞行安全^[8]。文献[9]研究了不同天线倾角下高LOS概率下的覆盖对干扰的影响,得到了角度上倾对低空覆盖有益的结论,后续分析即基于此角度上倾的结论。文献[10]评估了不同信道模型下的干扰性能,揭示了LOS场景下的干扰较NLOS场景更大,对系统性能影响更高。文献[11]研究了低空天线下倾组网场景中的下行SINR的计算方法,文献[12]推导了低空天线上倾场景下的SINR公式。然而,文献[11]和文献[12]均未考虑低空高度分层特征对干扰的影响,未给出组网场景的服务小区及干扰小区的分布,因此无法准确评估干扰。

现有文献主要从信道、天线等精细化角度评估低空网络性能,而从商用场景工程实施的角度考虑较少。基于此,需要一种快速、便捷、有效的评估方法,以指导商用网络的前期规划和后期性能评估,从而解决低空网络外场飞行测试成本过高、规划和优化难度过大的问题。本文旨在建立一个针对低空天线上倾场景的下行干扰简化模型,通过该模型可快速、便捷、有效地评估低空连片组网的覆盖性能。

本文首先研究了典型的低空航道线状覆盖场景下天线上倾时的低空立体组网的分层及干扰特性,揭示了低空干扰随高度分层而变化的特征,并将低空线状覆盖场景通过干扰邻区扩展至低空区域覆盖场景,对其下行干扰进行建模,提出了一种基于多小区三角投影关系的低空干扰模型。该模型仅采用倾角和用户与基站的相对位置参数,便可获得低空覆盖的性能,极大地简化了低空场景的性能和干扰分析,即根据网络部署的倾角、用户与基站的位置,可获得纯LOS径场景下的低空网络性能,降低网规网优的难度和成本。



无人机需要避障飞行,无人机的场景大概率为纯LOS场景。该模型可评估低空LOS场景三维空间的SINR值,与低空立体组网分层特性相关,不同层的干扰小区集合不同,可基于提出的主服务及干扰小区分布获得。

本文主要包含4个部分:首先基于目前较普遍的低空航道线状场景梳理低空立体组网的分层特性,并提出了基于分层的覆盖及干扰特性;其次通过邻区关系扩展航道线状场景至连片覆盖场景,详细阐述了干扰评估模型的建立;再次通过仿真实验和外场测试,验证了理论模型;最后对研究成果进行了总结。需要说明的是,本文提到的干扰,如无特殊标注,皆为下行干扰。

1 低空立体组网分层的定义及特性

与天线下倾的地面网络不同,天线上倾覆盖低空时,因LOS传播环境,信号形成了立体视距传播,这种传播方式在提升覆盖率的同时,也带来了更复杂的立体干扰问题。传统的低空组网分层通常根据业务需求进行划分^[13]。为便于分析低空组网的立体干扰现象,本节定义了低空立体组网的分层,并提出了基于这些分层的覆盖及干扰特性。

为简化分析,本节仅考虑低空航道线状场景,并做出如下假定:各基站站高相同、站间距相同^[14]、天线主瓣宽度及上倾角度相同、主瓣波束下边缘与基站高度所在的水平面对齐。在此场景下,各小区主瓣波束上边缘在低空形成交点,基于各交点的水平连线形成了不同高度的各层。低空立体组网分层具有如下覆盖及干扰特性:在同一站点上空,不同高度上的服务小区不同;在相同高度上,不同站点的上空对应的服务小区也各不相同;服务小区和干扰小区随分层的变化而变化。

在低空网络覆盖立体分层中,每个小区天线主瓣所覆盖的高度范围受限于垂直波宽,当上倾角度较小时,无法覆盖到本站上空。此时,本站

上空方向将会出现覆盖空洞,该空洞由邻区的主瓣进行覆盖,本站上空方向高度的不同,覆盖的邻区也会有所不同。

低空立体组网分层示意图如图1所示,其中低空组网基站采用主瓣覆盖^[15],4层波束打向空中,地面基站波束打向地面。基站波束示意图如图2所示,低空组网基站波束分为左、右两个扇区,以覆盖低空航道线状场景,假定同一个基站的左、右两个扇区进行了小区合并。本区头顶上空的柱形覆盖区域内,服务小区和干扰邻区的集合不同。低空立体组网的分层特性如图3所示。图3给出了低空各区域的服务小区编号,不同高度的服务小区和邻区皆不同,因此,在进行低空干扰模型建模时,需要确定不同层的服务小区和干扰小区集合。

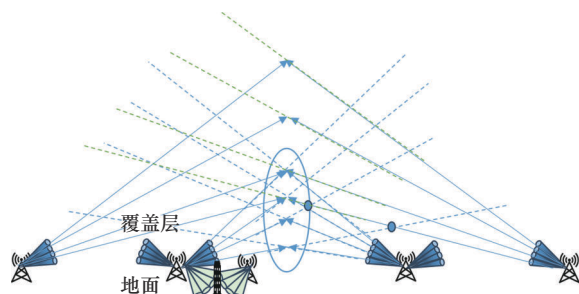


图1 低空立体组网分层示意图

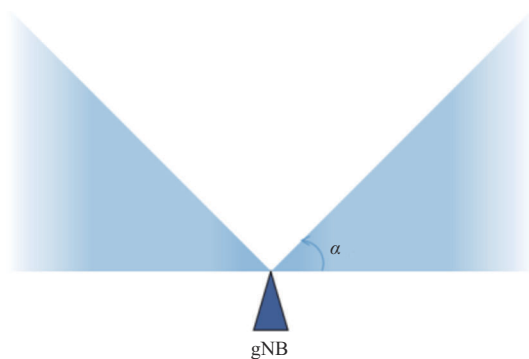


图2 基站波束示意图

2 低空下行干扰评估模型

低空干扰评估模型,以传统通信原理为基础,根据射线传输规律,结合多小区三角投影关系获取。该模型可实现基于用户的位置、服务小

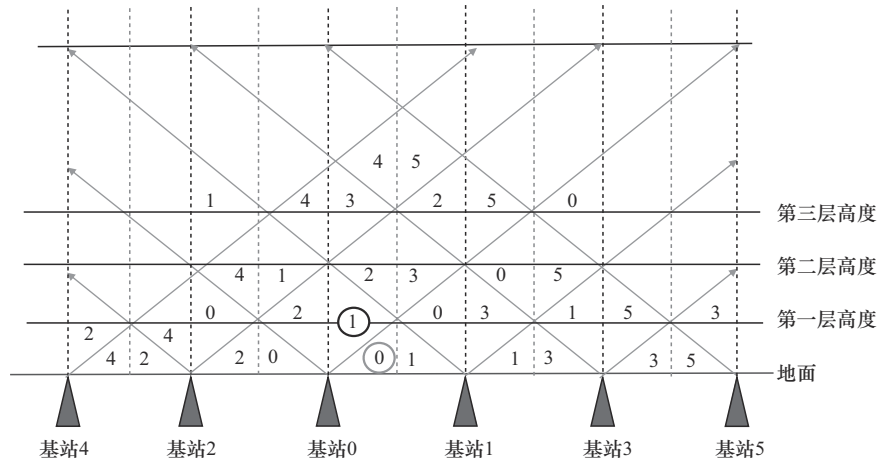


图3 低空立体组网的分层特性

区和干扰小区的水平面投影关系及干扰小区集合等估算用户所在位置的 SINR 值。本节首先分析航道线状组网场景下的低空干扰模型，然后根据低空立体组网分层特性确定干扰模型中干扰邻区的集合扩展至连片组网场景。

2.1 组网场景下低空干扰评估模型

低空立体组网系统可采用大张角宽波束天线，以 5G 系统为例，波束水平宽度为 65° ，垂直宽度为 24° 。在线状两扇区覆盖场景下（覆盖基站处于同一平面、同一直线且均匀分布，每个基站采用两扇区背向覆盖）。线状覆盖场景下的射线干扰如图 4 所示，其中圆点为小区边缘用户位置， α 为用户与基站连接线，与其在地面投影之间的夹角。

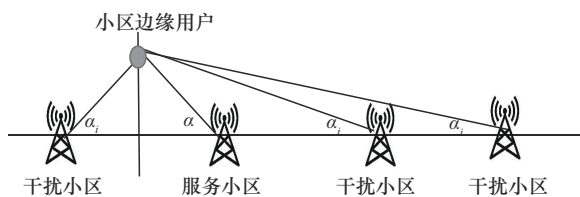


图4 线状覆盖场景下的射线干扰

低空航道线状组网场景下的低空干扰模型基于以下假设。

假设 1 线状组网场景下不同基站的射线波束^[16]在同一垂直平面内的交点不为空，从而形成

干扰。

假设 2 所有基站的发射功率、天线增益、其他损益相同，且为一个固定值。

设 P 为基站发射功率， A 为基站天线增益， O 为其他损耗，包括穿透损耗、阴影衰落、线路损耗等。PL 为满足低空场景的路损（pathloss）模型，本文采用 3GPP TS38.901^[17] 中的自由空间 LOS 径场景下路损模型， $PL=28+22\lg d+20\lg f_c$ ，其中 f_c 为中心频点，单位为 GHz，本次分析中假定 f_c 为 4.9 GHz， d 为距离，单位为 m，PL 为路径损耗，单位为 dB。处于射线相交点的用户受到的干扰大小如下所示。

$$I = \sum_{i=1}^N P_i PL_i A_i O_i = PAO \sum_{i=1}^N B \times C \times D = PAOBD \sum_{i=1}^N 10^{-2.2\lg dis} \quad (1)$$

其中， $B=10^{-2.8}$ ， $D=10^{-2\lg f_c}$ ， $C=10^{-2.2\lg dis}$ ， $f_c=4.9$ GHz， B 、 C 、 D 由路损表达式 $PL=28+22\lg d+20\lg f_c$ 中的相关项转化为线性值获得。

设 $PAOBD=\text{Const}$ ， $dis = \frac{d}{\cos \alpha}$ 为用户到基站的直线距离， d 为用户到地面服务小区在水平面的投影距离（简称用户到服务小区的投影距离）， α 为用户与地面服务小区连线，与其在地面投影间的夹角。



用户接收到的干扰为接收到的所有邻区信号的功率和，计算式为：

$$I = \text{Const} \sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \frac{d_i}{\cos \alpha_i}} = \text{Const} \sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \left(\frac{d}{\cos \alpha} \times \frac{\cos \alpha}{d} \times \frac{d_i}{\cos \alpha_i} \right)} \quad (2)$$

其中， d_i 为用户到第 i 个干扰小区在水平面的投影距离（简称用户到干扰小区的投影距离）， α_i 为用户与干扰小区连线，与其在地面投影间的夹角。

假设 3 $d_i = n_i d$ ，即用户与地面干扰小区的投影距离是与地面服务小区的投影距离的 n_i 倍。

假设 4 $\alpha_i = \arctan \frac{h}{d_i}$ ，其中 h 为用户高度，当 $\alpha < 30^\circ$ 时， $\alpha_i \approx \frac{h}{d_i}$ ，采用假设 3 中 $d_i = n_i d$ ，则 $\alpha < 30^\circ$ 时， $\alpha_i \approx \frac{\alpha}{n_i}$ ， $\alpha \approx n_i \alpha_i$ 。

式（2）则可以进一步表示为：

$$I = \text{Const} \sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \left(\frac{d}{\cos \alpha} \times \frac{\cos \alpha}{d} \times \frac{n_i d}{\cos(\alpha/n_i)} \right)} \quad (3)$$

$$I = \text{Const} \times 10^{-2.21g \frac{d}{\cos \alpha}} \times \sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \left(\frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha/n_i)} \times n_i \right)} \quad (4)$$

其中， n_i 是地面的服务小区到用户的投影距离的 n 倍。

则有：

SINR =

$$\frac{\text{Const} \times 10^{-2.21g \frac{d}{\cos \alpha}}}{\text{Const} \times 10^{-2.21g \frac{d}{\cos \alpha}} \times \sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \left(\frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha/n_i)} \times n_i \right)} + N_0} \quad (5)$$

其中，SINR 为线性值，分母为接收到的服务小区的有用功率，分子为接收到的邻区的干扰信号功率和干扰底噪， N_0 为干扰底噪， $N_0 = -174 + 10 \lg \text{BW}$ ，BW 为带宽，单位为 Hz。

在底噪远大于干扰的场景下，SINR 计算式为：

$$\text{SINR} = \frac{\text{Const} \times 10^{-2.21g \frac{d}{\cos \alpha}}}{N_0} \quad (6)$$

在底噪远小于干扰的场景下，SINR 计算式为：

$$\text{SINR} \approx \text{SIR} = \frac{\text{Const} \times 10^{-2.21g \frac{d}{\cos \alpha}}}{\text{Const} \times 10^{-2.21g \frac{d}{\cos \alpha}} \times \sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \left(\frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha/n_i)} \times n_i \right)}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N 10^{-2.21g \left(\frac{\cos \alpha}{\cos(\alpha/n_i)} \times n_i \right)}} \quad (7)$$

其中， N 为干扰波束/小区个数，SINR 为信干噪比，SIR 为信干比。

根据上述假设，可以得到以下结论：低空立体组网干扰模型中，干扰小区到用户的投影距离是服务小区到用户的投影距离 n 倍时，且垂直夹角 $\alpha < 30^\circ$ 前提下，干扰与用户到服务小区和干扰小区的投影位置关系，以及干扰波束/小区个数、波束角度相关，用户高度等因素已体现到投影距离和波束角度参数中。线状组网仅考虑了航道线状场景的邻区，对于连片区域组网场景，邻区关系可在线状组网场景基础上通过拓展得到。

2.2 低空主服务及干扰小区分布

干扰评估模型中需要明确主服务小区及干扰小区，低空立体组网场景垂直方向不同层的主服务小区和干扰小区集不同，根据用户所处的位置和高度获得主服务小区和干扰邻区分布。本文主服务小区的定义采用常规定义，为用户接收到各个小区的功率中最大的小区^[18]，本节与第 2.1 节假设所有站点天线增益一致，在第 3 节叠加考虑天线影响。

与地面主服务小区分布相对固定不同，低空立体组网场景的主服务小区在不同高度不同。低空覆盖场景存在塔上黑的问题，即在服务小区上

空没有覆盖,由邻区在服务小区上空形成越区覆盖。地面小区的塔上黑和邻区的越区覆盖,形成服务小区的分层覆盖。

低空主服务及干扰小区分布可参照图3,地面小区空中第一层服务小区由地面服务小区第一圈邻区覆盖,第二层服务小区由第二圈邻区覆盖,依此类推。以地面服务小区0为中心,站间距的1/2为半径,在地面服务小区0上空圆柱体内,低空服务小区分层覆盖,且圆柱体内左侧锯齿三角形空间对应的物理小区标识(physical cell ID, PCI)集依次为地面服务小区0中心连接线右侧邻区列表,右侧锯齿三角形空间对应的PCI集依次为地面服务小区0中心连接线上左侧邻区列表。

根据邻区关系,可将低空航道线状覆盖场景扩展到低空连片区域覆盖场景。低空干扰预测模型,首先根据用户水平投影位置确定用户地面服务小区,然后根据用户的垂直高度和水平位置确定用户对应的主服务小区和邻区列表集。考虑主服务及干扰小区,低空干扰预测模型式(7)中的邻区 N 为: $N = \text{rightlist}\{L|L \in N, L > M\} \cup \text{leftlist}\{L|L \in N, L > M\}$,表示用户所受的干扰邻区列表集为左右邻区列表中第 M 层以上的邻区列表集合,其中 M 为层数,表示用户所处的分层位置,根据用户位置、高度和地面站点位置及站间距获得。

3 模型仿真及外场验证

为了验证理论评估模型的准确性,通过系统仿真和外场测试,与第2节的理论评估进行对比。首先搭建低空立体组网系统仿真平台,系统仿真中采用3GPP TS38.901定义的宽波束天线,天线上倾配置,参考现网天线设备能力,增强主瓣增益,减少旁瓣增益,然后开展实地外场测试,在理论评估中叠加外场测试天线模型,与外场测试数据进行对比。

3.1 系统仿真评估

仿真平台采用维也纳大学开放平台“系统仿真平台”,校验低空理论干扰模型。在原始平台上,加入了多输入多输出(multiple-in multiple-out, MIMO)信道模块,修改原始平台参数,实现低空5G NR系统仿真。系统仿真参数见表1。

表1 系统仿真参数

仿真参数	数值
发送频率	4.9 GHz
带宽	100 MHz
基站站间距	2 000 m
基站天线高度	30 m
用户所在高度	1.5 m/200 m/400 m/600 m
基站天线上倾角度	20°
基站天线类型	TR36873_3DAntenna
基站发送功率	200 W
终端发送天线数	2
终端接收天线数	4

模拟低空场景,信道采用LOS径传输,无阴影衰落、穿透损耗和快衰。天线模型包括天线上倾0°时的天线方向和天线上倾20°时的天线方向,分别如图5、图6所示。

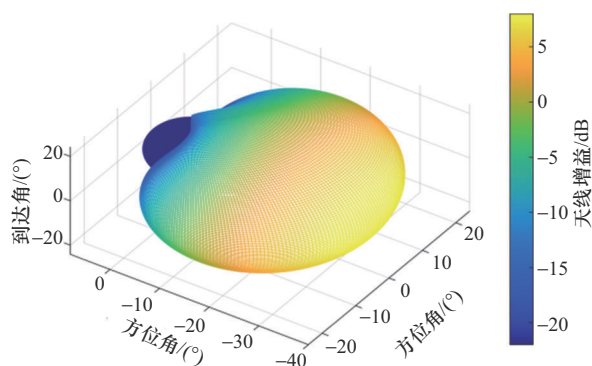


图5 天线上倾0°时的天线方向

产品实现过程中可以通过抑制旁瓣,增加主瓣覆盖性能,降低旁瓣覆盖影响。天线上倾20°且旁瓣抑制后的天线方向如图7所示。

在区域内选择48个点的位置反映整体区域,

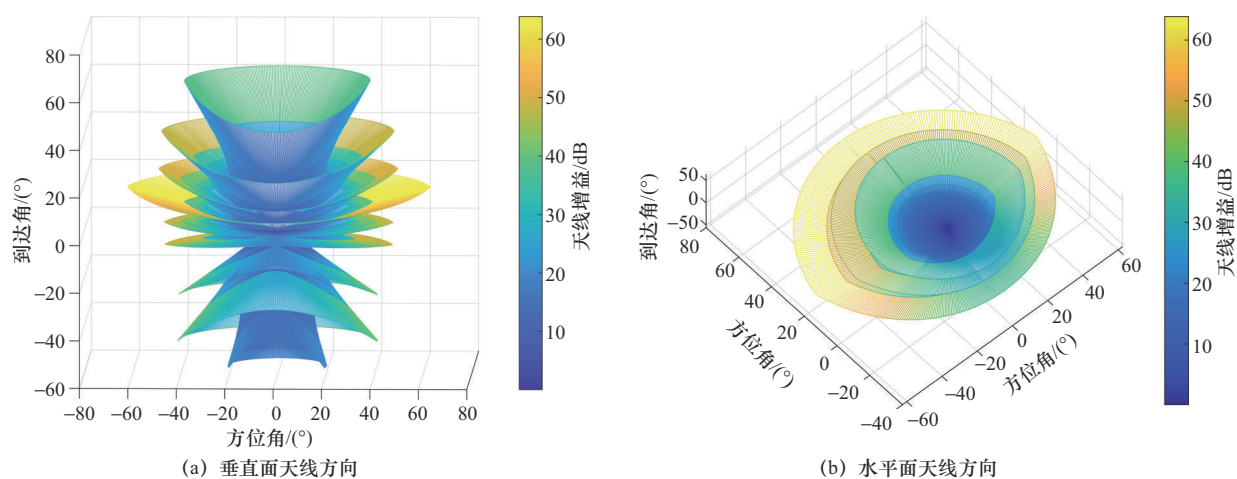


图6 天线上倾20°时的天线方向

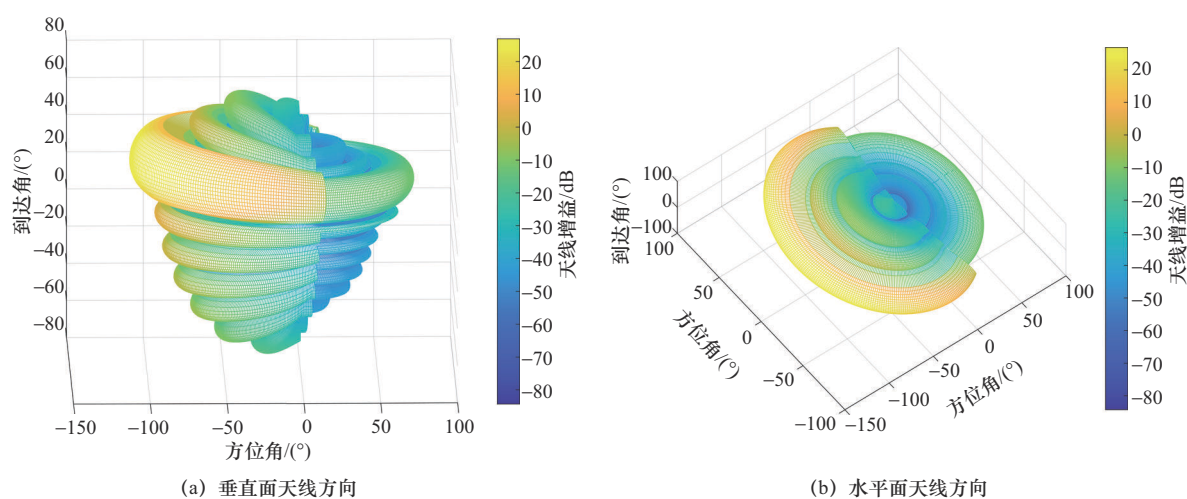


图7 上倾20°且旁瓣抑制后的天线方向

高度位于低空场景0~600 m, 每间隔 100 m, 部署48个水平位置的用户, 用户不同高度的水平位置用户点位如图8所示, 每个高度分别进行仿真, 采用干扰模型计算获取评估值。根据用户的水平

位置和垂直位置, 获取模型预测值和系统仿真值, 不同高度相同位置的理论模型预测与系统仿真对比如图9所示。需要注意的是, 图9中的 SINR 已经由式(8)的线性值转化为 dB 值。

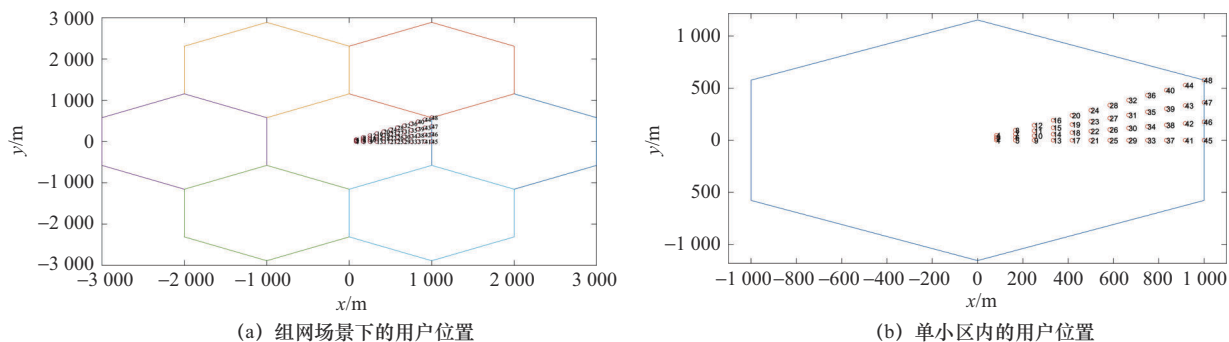


图8 用户不同高度的水平位置用户点位

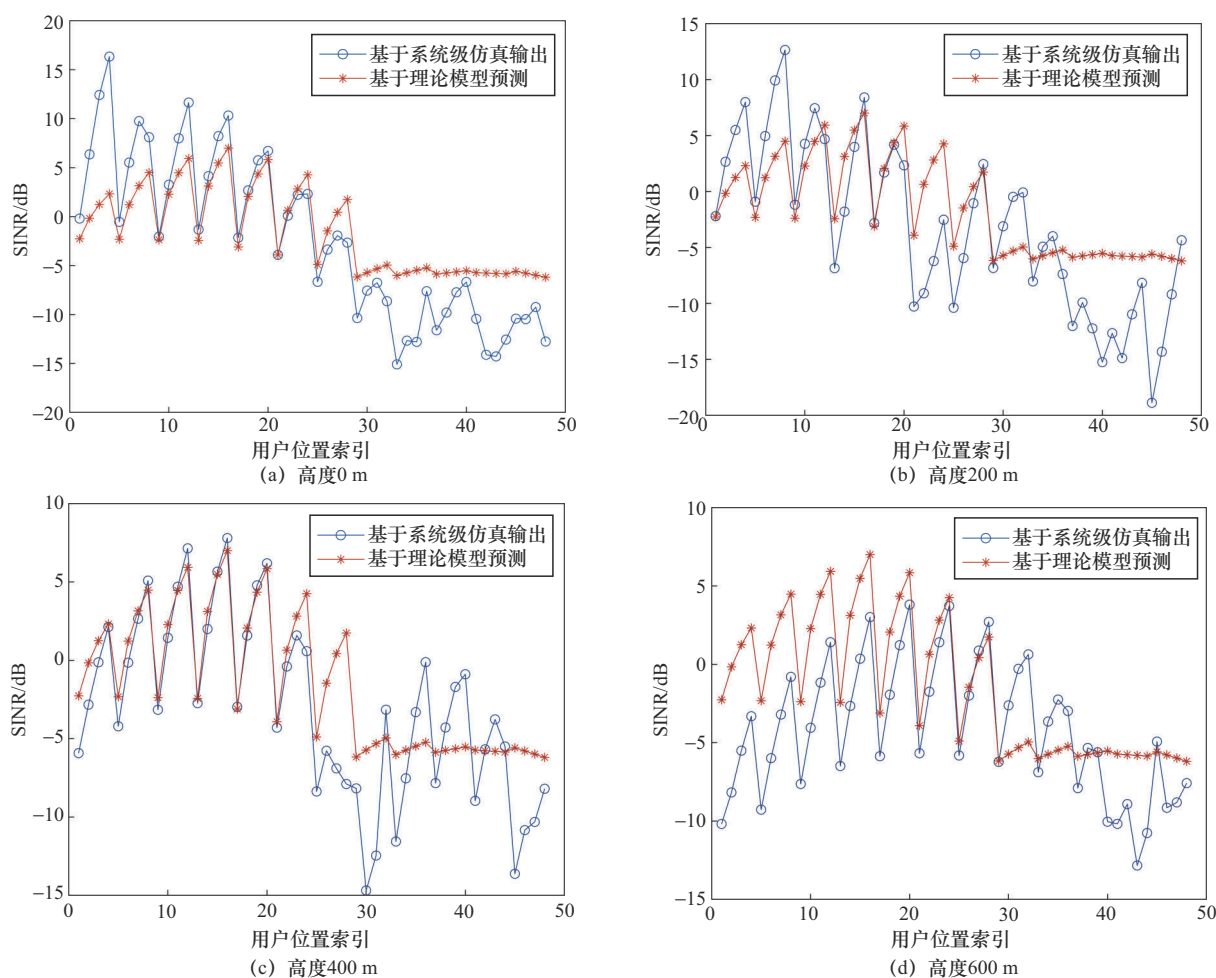


图9 不同高度相同位置的理论模型预测与系统仿真对比

由图9可知,理论评估值与系统仿真值基本一致。其中,理论评估值为根据式(7)叠加天线增益,获取不同高度的邻区后计算所得;系统仿真值是根据搭建的系统仿真平台采用表1中的参数仿真获得19小区环境下中心小区用户的性能,并进行比较。理论评估和系统仿真中,用户和基站的位置一致,天线模型一致,LOS信道模型一致。

3.2 外场测试验证

在常州外场开展了低空测试,站间距1 000 m,站高20~30 m,新建7个4.9 GHz站点,天线上倾角20°,测试区域建筑物最高80 m。用户在100 m、200 m、300 m和500 m高度飞行,飞行

半径为100 m、300 m、500 m、800 m和1 200 m。外场实测天线模型如图10所示,垂直24°,水平120°。

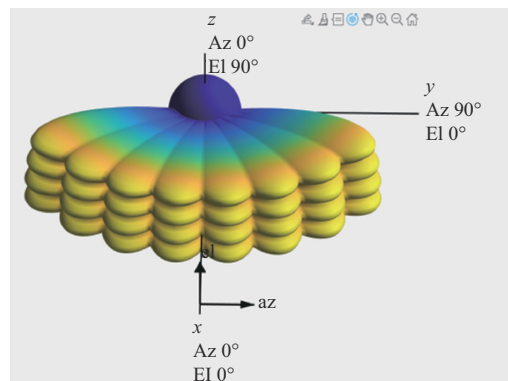


图10 外场实测天线模型模拟



外场测试实际天线模型存在不规则的旁瓣影响,与理论分析结果存在细微差异。按实地外场的真实基站位置和用户位置部署,获得理论评估数值,对比实测外场测试数值,对理论评估算法按外场环境拟合。首先,对不同高度的理论评估值的邻区干扰程度按外场测试场景进行校准,保持理论评估和外场测试干扰的平均值一致(外场测试发现,因受现网复杂环境等影响,实测干扰与基于理论模型预测的干扰存在一定差异);其次,对理论评估值采用其均值和方差进行标准化处理(将理论评估值数据减去平均值然后除以方差);最后,对比较准后的理论评估值与外场测试数据。不同高度不同半径的理论评估值与外场测试值对比如图11所示。

根据式(7)叠加天线增益计算获得的理论评估值经过拟合外场实际环境的干扰、SINR标准化处理后,能基本反映外场低空覆盖立体空间不同位置网络的覆盖和干扰情况。不同高度不同半径的理论评估值校准后与外场实测数据平均SINR差值见表2。

3.3 方案应用及拓展

低空为三维立体空间,全域测试工作量大、成本高,通过本文提出的模型可快速、便捷、有效地估计空间中任意一点的SINR值,获得低空组网的覆盖、干扰等特征,辅助低空航线轨迹优化,如为用户选择覆盖最优或切换最少的路径,提升用户飞行过程的通信连续性和可靠性。

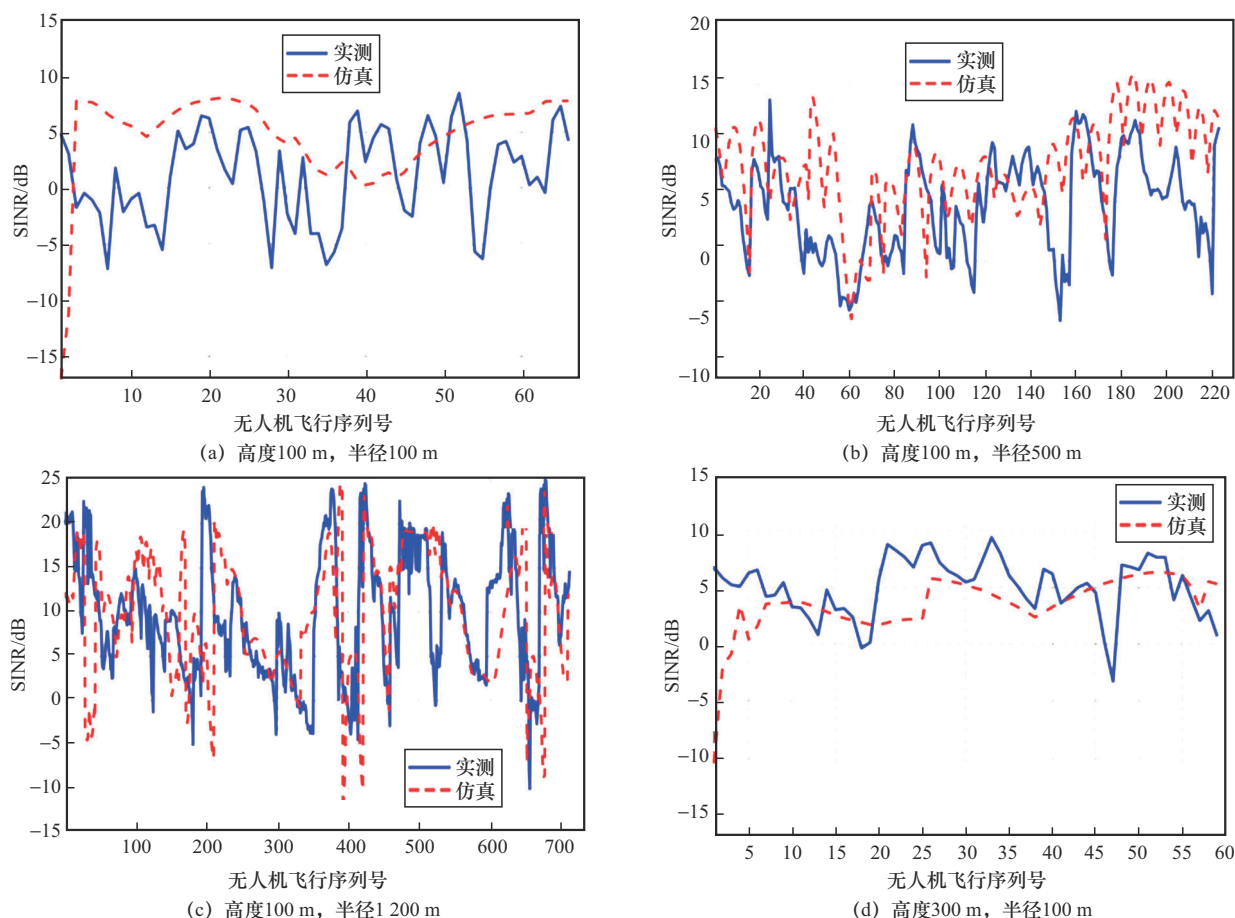


图11 不同高度不同半径的理论评估值与外场测试值对比

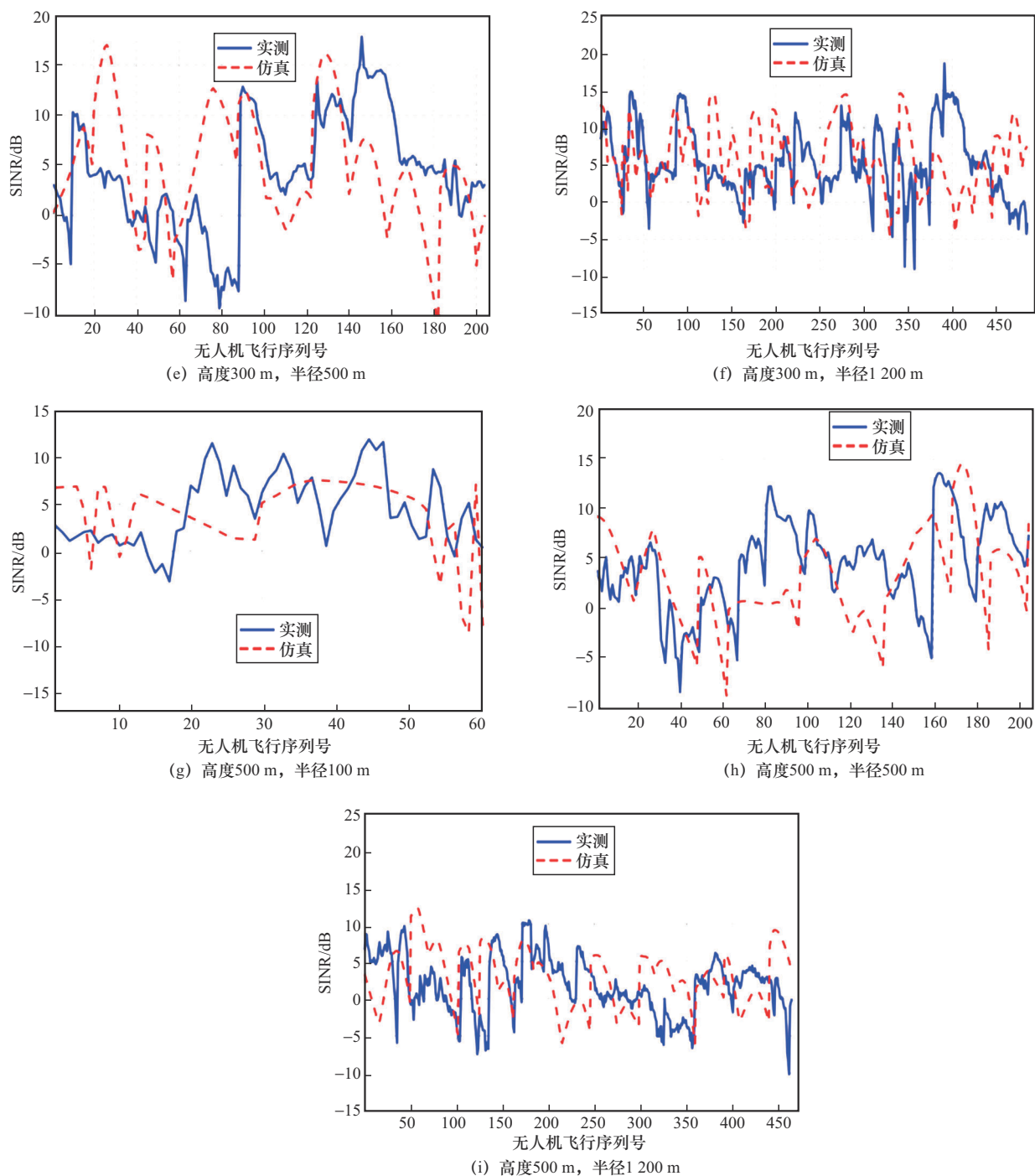


图11 不同高度不同半径的理论评估值与外场测试值对比(续)

此外,通过理论评估、系统仿真和外场测试均可以发现,低空 SINR 比地面低约 10 dB,后续可进一步研究适用于低空的新型组网方案,通过加大站间距、减少邻区个数、规划天线覆盖等手段降低干扰。

4 结束语

采用基站天线上倾、天线主瓣覆盖低空,可更好地满足较高高度下的低空覆盖需求,但因 LOS 传播面临复杂的干扰问题,本文首先分析低



表2 不同高度不同半径的理论评估值校准后与外场实测数据平均SINR差值

高度	不同高度不同半径的理论评估值校准后与外场实测数据平均SINR差值/dB					均值
	半径为 100 m	半径为 200 m	半径为 500 m	半径为 800 m	半径为 1 200 m	
100 m	-3.40	0.50	-3.40	0.40	-0.05	-1.00
200 m	-0.09	0.03	3.90	-3.00	-0.10	0.10
300 m	1.50	0.16	-0.70	0.10	-0.40	0.10
500 m	0.30	-3.00	1.00	0.09	-0.90	-0.40

空航道线状组网场景时天线上倾的低空立体组网基于分层的覆盖及干扰特性，不同层的服务小区及干扰小区集合不同；提出了主服务及干扰小区分布，获得低空立体空间的干扰小区集合，根据干扰小区扩展低空航道场景至连片组网场景；基于该邻区干扰小区集合及多小区三角投影关系，提出了一种在天线上倾组网场景下的低空连片组网场景的下行干扰的数学简化模型，可快速、便捷、有效地评估低空场景三维空间任意位置的SINR值。

低空场景中以LOS径传输为主，信道环境较为简单，网络覆盖与天线模型关系较大。现网的天线模型与理论模型存在差异，尤其是不规则的旁瓣对覆盖的影响无法评估，导致理论评估、系统仿真和外场测试3种之间的数据存在细微差异，参考表2，平均差距不到1 dB。后续研究工作将在不同场景中获取多样化数据进行智能化学习，针对不同场景，对干扰、站间距、站型等参数进行拟合，构建一个通用大模型，该大模型以本文所提出的理论评估模型为基础，通过对干扰等参数的校准，进一步强化理论评估模型的精细化评估性能，使其适用于多种复杂环境。

参考文献：

[1] ZENG Y, WU Q Q, ZHANG R. Accessing from the sky: a tutorial on UAV communications for 5G and beyond[J]. Proceedings of the IEEE, 2019, 107(12): 2327-2375.

[2] Qualcomm. Paving the path to 5G: optimizing commercial LTE networks for drone communication[EB]. 2016.

[3] 3GPP. Technical specification group radio access network: study on enhanced LTE support for aerial vehicles[R]. 2017.

[4] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Proceedings of the 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2898-2904.

[5] FOKIN G, VOLGUSHEV D. Model for interference evaluation in 5G millimeter-wave ultra-dense network with location-aware beamforming[J]. Information, 2023, 14(1): 40.

[6] SU Z, LI C Z, CHEN W. A non-stationary cluster-based channel model for low-altitude unmanned-aerial-vehicle-to-vehicle communications[J]. Drones, 2023, 7(10): 640.

[7] KIM D, LEE J, QUEK T Q S. Performance analysis for multi-layer unmanned aerial vehicle networks[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps). Piscataway: IEEE Press, 2018: 1-6.

[8] WU Q Q, MEI W D, ZHANG R. Safeguarding wireless network with UAVs: a physical layer security perspective[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(5): 12-18.

[9] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, LARDNER S. Optimal LAP altitude for maximum coverage[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2014, 3(6): 569-572.

[10] KHAWAJA W, GUVENC I, MATOLAK D W, et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2361-2391.

[11] LIU J Y, SHENG M, LYU R L, et al. Performance analysis and optimization of UAV integrated terrestrial cellular network[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1841-1855.

[12] AMER R, SAAD W, MARCHETTI N. Toward a connected sky: performance of beamforming with down-tilted antennas for ground and UAV user co-existence[J]. IEEE Communications Letters, 2019, 23(10): 1840-1844.

[13] KIM D, LEE J, 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.

[14] DU Y Y, ZHANG H T, PENG J L. Modeling and coverage analysis for cellular-connected UAVs with up-tilted antenna[J]. IEEE Communications Letters, 2022, 26(11): 2572-2575.

[15] VAN DER BERGH B, CHIUMENTO A, POLLIN S. LTE in the sky: trading off propagation benefits with interference costs for

aerial nodes[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 44-50.

[16] DINES K A, LYTLE R J. Computerized geophysical tomography[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(7): 1065-1073.

[17] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[R]. 2022.

[18] IEEE B E. IEEE draft standard for broadband over power line networks: medium access control and physical layer specifications[R]. 2010.

[作者简介]



周娇 (1983-), 女, 中国移动通信有限公司研究院高级研究员、工程师, 主要研究方向为 4G/5G 网络的规划和建设, 以及网络问题的解决方案。



李新 (1977-), 男, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为移动通信技术、产业推广。



曹蕾 (1981-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院高级工程师, 主要研究方向为移动物联网和 5G 等领域的关键技术、标准制定、产品开发、测试和评估、应用推广和运营优化。

陈蔚燕 (1994-), 女, 博士, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要从事移动通信技术研究工作。

范雯 (1996-), 女, 中国移动通信有限公司研究院研究员, 主要从事移动通信技术研究工作。

张欣 (1975-), 男, 博士, 北京邮电大学信息与通信工程学院副教授、博士生导师, 主要从事无线通信系统理论与技术研究工作。

秦洁 (1981-), 女, 中国移动通信集团广东有限公司深圳分公司副总经理、高级工程师, 主要从事无线网络规划和优化工作。

许乐飞 (1977-), 男, 中国移动通信集团广东有限公司深圳分公司研究员, 主要从事无线网络规划和优化工作。