

无人机毫米波信道建模进展和挑战

朱秋明^{1,2}, 华博宇^{1,2}, 毛开^{1,2}, 仲伟志^{1,3}, 陈小敏^{1,2}, 周彤彤^{1,2}

(1. 南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 南京, 211106; 2. 南京航空航天大学电子信息工程学院, 南京, 211106; 3. 南京航空航天大学航天学院, 南京, 211106)

摘要: 无人机毫米波通信技术结合无人机和毫米波的优势, 提供高速数据传输和广域网络覆盖能力, 在军用通信系统中拥有广阔的应用前景。精确的信道模型是无人机毫米波系统设计和性能评估的重要理论基础。不同于传统移动通信场景, 无人机通信信道具有明显的三维传播特征, 构建模型需要考虑包括三维散射空间、三维飞行轨迹及姿态、三维阵列天线和三维窄波束等多种因素。本文首先总结了无人机毫米波信道建模的新需求和挑战, 并详细阐述了无线信道建模方法以及现有信道模型的研究进展, 最后给出了信道建模的发展方向及关键技术, 旨在为无人机毫米波信道模型的科学构建和标准化等研究提供参考。

关键词: 信道模型; 无人机; 毫米波; 三维传播

中图分类号: TN011 **文献标志码:** A

Advances and Challenges of UAV Millimeter-Wave Channel Modeling

ZHU Qiuming^{1,2}, HUA Boyu^{1,2}, MAO Kai^{1,2}, ZHONG Weizhi^{1,3}, CHEN Xiaomin^{1,2},
ZHOU Tongtong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China; 2. College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China; 3. Academy of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 211106, China)

Abstract: Combining the advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) and millimeter-wave technologies, the UAV millimeter-wave (mmWave) communication system can provide high-speed data transmission and wide network coverage capability, which leads to a broad application prospect in military communication systems. The accurate channel model is vital for the UAV mmWave communication system design and performance evaluation. Different from the conventional mobile communication scenarios, the UAV mmWave communication scenario has obvious three-dimensional propagation characteristics. The key factors, i. e., three-dimensional scattering space, three-dimensional flight trajectory and posture, three-dimensional array antenna and three-dimensional narrow beam, should be taken into account in the channel modeling. This paper summarizes the new requirements and challenges of UAV mmWave channel modeling, and then reviews the wireless channel modeling method and the

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(61827801)资助项目; 国防科技重点实验室基金(6142001190105)资助项目; 航空科学基金(201901052001)资助项目; 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室基金(2020Z0207B)资助项目; 中央高校基本科研业务费专项(NS2020026, NS2020063)资助项目。

收稿日期: 2020-09-13; **修订日期:** 2020-10-16

research progress of channel models. Finally, the future development of UAV mmWave channel modeling and key technologies are given, which aims to provide reference for the scientific construction and standardization of UAV mmWave channel models.

Key words: channel model; unmanned aerial vehicle; millimeter-wave; three-dimensional propagation

引 言

无人机(Unmanned aerial vehicle, UAV)因成本低、构造简单且人员伤亡率低等优势引起了全球各个国家的关注。目前,UAV在航拍、遥感监测、预警灾害和应急通信等领域发挥了巨大作用。据报道,全球无人机的销售额将在2021年达到120亿美元,近5年以7.6%的复合增长率稳步提升^[1]。中国国务院颁布的《中国制造2025》纲领文件中,也明确要求大力推进UAV领域的突破性发展。

毫米波(Millimeter-wave, mmWave)频段具有较传统通信频段更短的波长,能够支持Gbit/s量级的数据传输,符合高速率大容量的通信系统发展需求。事实上,第5代(The fifth generation, 5G)移动通信系统结合毫米波和大规模天线技术,已经能够提供高达10 Gbit/s的数据速率^[2]。然而,毫米波频段具有更高的路径损耗和更低的散射特性,导致毫米波通信系统对视距(Line of sight, LOS)传播条件有更高的要求^[3]。UAV由于较高的飞行位置,通信过程中往往存在视距路径,使其成为毫米波通信技术的绝佳搭载平台。目前,利用毫米波和大规模天线技术实施UAV对地面控制站或UAV之间数据通信已成为学术界和工业界的研究热点^[4]。例如,美国国防高级研究计划局(Defense advanced research projects agency, DARPA)正在研制一种基于UAV的毫米波通信网络,用以连接战场士兵和前线基地、战术作战中心以及情报监视侦察设施。在可预见的未来,无论是民用空中基站还是军用的战地通信,UAV毫米波通信都有着巨大的潜在价值。

构建精确且符合真实UAV通信场景的毫米波信道模型,是研究UAV毫米波通信系统的理论基础,也是未来对UAV毫米波通信系统性能评估的基本手段。不同于传统陆地通信场景,UAV毫米波通信具有明显的三维传播特征,包括空间域、姿态域和方向域的全三维传播。因此,信道模型也需要考虑包括三维散射空间、三维飞行轨迹及姿态、三维阵列天线和三维窄波束等多种因素。目前,针对毫米波频段的UAV信道建模研究还处于起步阶段,科学准确的信道模型亟待研究开发。本文首先针对UAV毫米波通信场景提出了模型构建需要支持的新特性,并介绍了当前信道建模的方法及局限性,重点对UAV毫米波信道相关主流模型进行详细阐述和比较。最后,对信道模型发展趋势以及具有潜力的关键技术进行了展望,旨在为UAV毫米波新型信道模型的科学构建提供参考依据,进而为高效可靠的UAV毫米波通信系统提供理论支撑。

1 信道模型需求与挑战

1.1 对高频段超宽带的支持

国际电信联盟(International telecommunication union, ITU)近日公布5G毫米波频段包括24.25~27.5 GHz、37~43.5 GHz、45.5~47 GHz、47.2~48.2 GHz和66~71 GHz。相比传统通信系统100 MHz左右的可用带宽,毫米波通信系统的可用带宽应大于2 GHz或达到中心频率的10%^[5]。针对sub-6 GHz通信系统设计的信道模型,无法满足毫米波通信系统特有的高频段和超宽带特性。例如,文献[6]指出,毫米波通信具有传播损耗更大、信道变化更快和信号绕射能力更低等新特性,且各频段的信道特性表现出较大差异性。

特别地,对UAV毫米波通信场景,信号传播过程可能遭遇地面、建筑物、山脉甚至水面等散射体,

产生大量反射、绕射和散射信号。其中,时延非常接近的路径信号可近似成一簇,接收信号由不同时刻、不同方向到达的空时簇组成。不论是UAV位置、速度和姿态的变化,还是地面端移动或者传播环境的改变,都会导致部分散射体失效引起对应簇消失,同时有新的散射体出现产生新的空时簇。相较陆地毫米波通信场景,UAV毫米波通信场景的空时簇生灭现象更加频繁,多径传播或时延域失真情况更为复杂多变,这些由于高频段、超宽带导致的新特征都应纳入模型构建的考虑范畴。此外,新模型不仅需要精确表征高频段的信道参数,还应考虑传统场景和传统频段信道特性的兼容性。

1.2 对三维散射空间的支持

对于陆地移动通信场景而言,尽管收发天线周边的散射体处于三维空间,但收发端通常比较近,并且短时间内垂直方向的位置变化比较小,俯仰角的变化对传播带来的影响程度相对较低。因此,早期信道模型往往忽略高度参数对信道特性的影响,近似采用二维信道模型描述。随着5G系统研究的日益深入,研究人员对传统二维模型进行升级,将收发天线的高度参数纳入考虑,实现了对三维散射空间的支持,提升了信道参数表征的精确度和科学性^[7]。

三维信道模型采用三维矢量描述收发端和散射体的瞬时地理位置,传播信号的离开方向和到达方向的表征也进一步细化描述为离开方位角和俯仰角、到达方位角和俯仰角。特别地,UAV毫米波通信是一种充分利用三维大尺度空间的通信技术,UAV在立体空间进行大范围飞行,垂直方向位置和信号传播的俯仰角在整个通信过程中存在非常明显的变化。信道实测结果也表明,UAV速度大小、飞行角度和位置高度等对信道模型的统计特性产生了明显影响^[8]。因此,构建UAV毫米波信道模型时必须体现其特有的大范围三维散射空间的传播特性。

1.3 对三维速度姿态的支持

以蜂窝移动和车联网(Vehicle to vehicle, V2V)为代表的陆地通信系统,短时间内收发端的移动位置可近似限定在二维平面。然而,UAV的移动速度具有明显三维特性,飞行轨迹也分布在整个三维空间,信道模型必须支持三维的移动速度。

文献^[9]通过对收发端的速度参数进行分析,指出速度对移动通信信道的空时相关性有着至关重要的影响。在此基础上,文献^[10]陆续提出的V2V信道模型,都将运动端的移动速度扩展为三维矢量表示,文献^[11]针对UAV通信场景提出了一种任意三维速度和飞行轨迹的UAV信道模型。需要强调的是,陆地移动端如行人,车辆等的速度只存在二维方向,仅用单个角度参数就可以完整描述。然而,UAV飞行过程中,存在机身斜倾、翻转等飞行器特有行为,需要更多的角度参数来描述机体的三维姿态信息^[12],因此三维飞行速度及姿态因素都应当被充分纳入信道模型。

1.4 对三维阵列波束的支持

大规模阵列天线技术能够充分利用空间资源以及多径传播特性,在不增加频谱资源和发射功率的前提下,成倍地提升信道容量。对于毫米波通信而言,天线阵列可以形成强方向性波束改善通信链路的质量,进而弥补毫米波路径损耗高的缺点。比如,通过一个 8×16 的毫米波天线阵列产生定向波束,可获得20 dB的额外增益^[13]。此外,对波束形状进行优化设计,还可以增强主瓣增益,抑制旁瓣能量,从而进一步达到有效覆盖和干扰抑制的目的^[14]。

地面基站往往采用固定的俯仰角,根据水平维度的信息调整二维波束进行波束对准。UAV处于大范围三维立体空间,可以灵活利用垂直方向获取细窄化的三维波束,以此提高天线阵列增益和有效通信距离,同时降低不同链路间的干扰和信号被截听的概率。此外,UAV飞行过程中,收发端之间的信号俯仰角难以保证恒定,还必须进行动态的波束搜索、跟踪和对准^[15],该特性也将对UAV信道模型的构建产生重要影响。

2 信道建模方法与局限

信道建模本质上是以电波传播规律为依据,利用信道实测数据,对信道特性包括单位冲激响应或传递函数等进行定量描述。目前,针对毫米波频段信道,研究人员开发了多种方法进行建模研究,主要包括确定性建模和统计性建模两大类方法。一般来说,不同的信道建模方法是在精确度、复杂度和泛用度之间进行权衡,每种方法都存在优势和局限。

2.1 确定性信道建模方法

确定性信道建模方法具有较高的精确度,模型参数在单次仿真中保持固定不变。例如,针对特定通信场景,可利用信道探测器、矢量网络分析仪等设备,直接测量得到信道的确定性冲激响应或传递函数,并根据测试数据进行建模^[16]。为了提高障碍物和散射环境的描述精度,可在实际测试中辅以激光扫描技术,将场景描述为一系列数据点,也称为点云技术^[17]。点云建模方法可以精确表征特定传播信道的参数,已被应用于毫米波频段^[18]。基于实测的确定性建模方法适用于特定静态场景的信道建模,模型拥有很高的逼真度,但泛用度比较差,并且需要耗费大量的人力及时间成本。基于射线跟踪(Ray tracing, RT)技术的建模方法最近几年得到了广泛关注^[19-20],该方法根据几何光学和一致性绕射理论,对收发端之间每一条信号传播路径进行跟踪,最终得到每条路径的功率、时延和相位等参数。

图1给出了RT方法进行信道建模的基本过程,包括三维场景重构、射线分解跟踪和信道响应获取3个典型步骤,图1中 T_x 表示发射端, R_x 表示接收端。射线与散射体接触后会发生反射和绕射等现象,图1(c)给出了信号传播过程的几种典型轨迹,包括视距路径、反射路径和散射路径。RT方法建模精度极度依赖散射体电特性(如相对介电常数、电导率、磁导率)的准确描述,并且计算复杂度较高。实际中,通常需要对场景进行特征提取并三维重构,在保证基本精度前提下大大提升建模效率^[21]。例如,文献[22]提出了一种基于数据库简化的数字地图预处理方法用于地形地物重构,文献[23]则研究了利用不规则三角面简化重构场景的方法。

2.2 统计性信道建模方法

对于统计性信道建模方法,信道模型的全部或部分参数采用统计分布的形式进行描述,且随机分布一般通过分析大量实测数据获得。Saleh-Valenzuela(SV)模型的建模方法是一种经典的统计性方法,该方法基于测量结果在时延域和角度域以簇为单位划分随机产生的多径分量,进而生成信道参数,已被应用于IEEE 802.15.3c和IEEE 802.11ad标准化模型的构建^[24-25]。基于传播图的建模方法借鉴图论原理,用图的顶点映射发射机、接收机和散射体,用图的边来映射顶点之间传播路径。每一条边代表不同的概率函数,用来描述信号传播过程中的随机关系^[26]。

基于几何分布的信道建模方法是目前应用最广泛的一种统计性方法,将传播路径表示为簇和簇内射线的叠加,根据特定几何条件约束下的散射体位置获得簇和簇内射线参数^[27]。图2给出了一种基于几何分布的V2V信道模型示意图,散射体随机分布于空间中若干个散射簇内^[28]。首先利用分簇的参数化冲激响应函数构建信道模型框架,通过假设散射簇的几何分布以及簇内散射体的统计特性等约束条件,获取信道参数进而完成信道模型构建。目前,该方法已被应用于多种主流模型,包括NYU WIRELESS, 3GPP TR 38.901, METIS及mmMAGIC等^[25]。

3 现有模型分析与比较

目前尚无针对UAV毫米波通信的标准化信道模型,但是国内外团队已经开展了大量的前期研究,研究成果反映了UAV毫米波信道的新特性,也能够为UAV毫米波信道模型标准化提供参考。

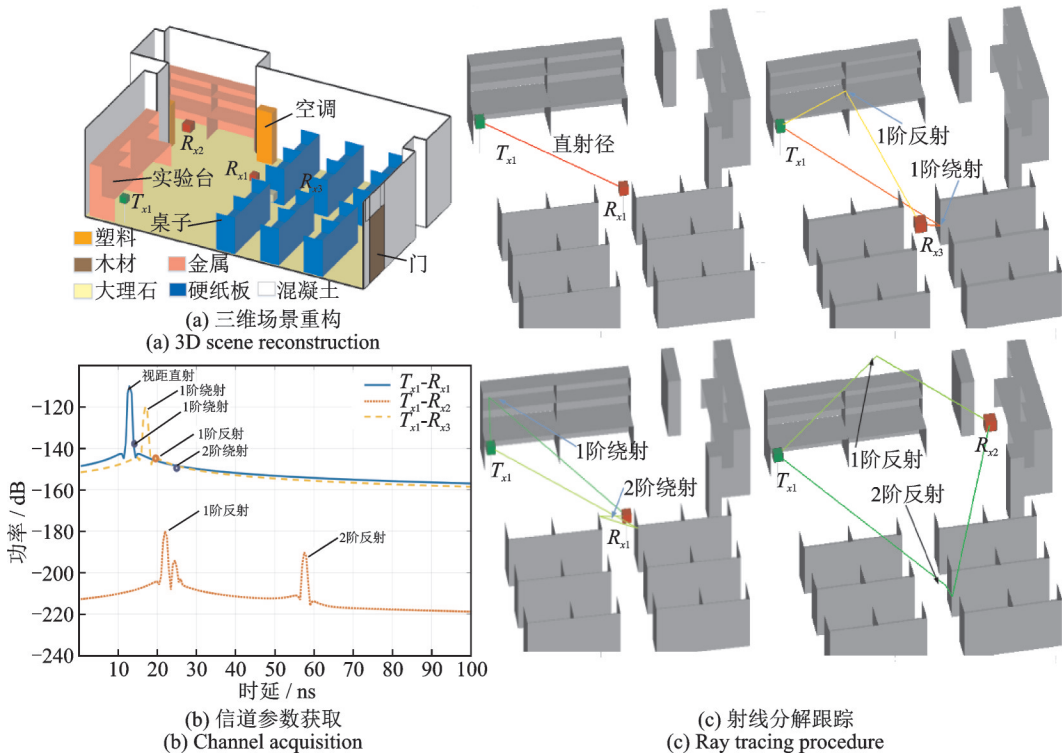


图1 基于RT方法的确定性信道建模过程
Fig.1 Deterministic channel modeling based on RT method

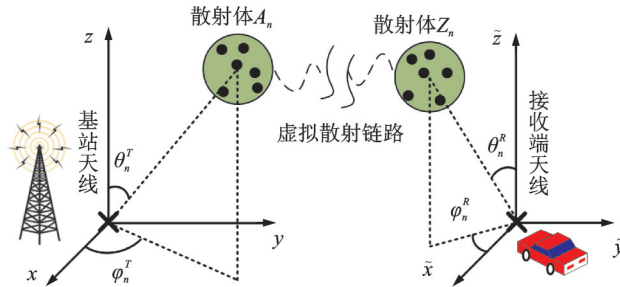


图2 基于散射体几何分布的统计性信道建模方法
Fig.2 Statistical channel modeling based on the geometric distribution of scatterers

3.1 基于实测数据的信道模型

近年来,国内外科研人员使用信道探测仪、矢量网络分析仪等设备,对毫米波信号传播进行了大量的实测研究,提出了许多陆地场景下的毫米波信道模型,包括室内场景^[29]、室外场景^[30]、隧道场景^[31]和高铁场景^[32]等。

为了构建针对 UAV 场景的信道模型,研究人员搭建 UAV 测量平台并开展了信道实测。例如,文献[33]中实测了 5.2 GHz 频段无人机在悬停状态下地面接收功率及路径损耗。文献[34]在沙漠、山区等地段实测了 L/S 波段 UAV 信道的接收功率及时延扩展。文献[35]在水域、山区和城市等多场景实测了 UAV 信道的路径损耗及视距莱斯因子。进一步地,基于实测数据的 UAV 信道模型也被陆续提出,该

类研究重点关注的信道特性包括路径损耗、均方根时延拓展和莱斯因子等。例如,文献[36]根据实测数据提出了一种UAV信道的路径衰落模型,并研究了阴影衰落和快衰落等信道特性;文献[37]对传统对数-距离路径损耗公式进行了修正,并设定多径分量与直射径分量强度的比值遵循高斯分布,不同场景对应不同的均值和标准差。文献[38]基于28 GHz频段的实测数据,给出了一种毫米波信道的路径损耗模型,但没有考虑小尺度衰落的特性。相较于其他类型的信道模型,基于实测数据的模型最符合真实环境的信道特性,但测试的设备要求及时间成本较高,且在小尺度信道衰落的机理分析方面难度较大。

3.2 基于射线跟踪的信道模型

基于RT方法的信道模型在诸多场景中已得到充分研究,例如室内场景^[39]、城市场景^[40]、郊外场景^[41]、地铁场景^[42]及隧道场景^[43]等。此外,RT方法对高频段信道建模有很强的适用性,被认为是预测毫米波信号传播模型最准确、最通用的确定性方法^[44]。例如,文献[26]提出了一种基于RT方法的毫米波信道模型,通过将毫米波频段的漫反射多径分量与镜面反射分量分开表征,进一步提升了模型构建的精确性;文献[45]通过与实测结果比对,证明了通过合理分配散射体材质的电磁参数,RT方法具有较高的精度;文献[46]则通过对障碍物和散射体分配不同的材质特性,结合RT方法给出了一种毫米波信道模型。

针对UAV通信场景,RT方法作为信道特性的有效分析手段,也得到研究人员的广泛应用。例如,文献[47]针对UAV与地面基站间的俯仰角变化,探究了角度对信道的大尺度衰落特性的影响。文献[48]通过重构海岛场景三维地图,采用RT方法分析了海岛附近UAV毫米波信道的传播损耗、时延和到达角度等参数。文献[49]针对城市、郊区和海面场景,研究了28 GHz频段UAV信道的小尺度衰落和空时相关特性。文献[50]利用RT方法建立了城市场景毫米波信道模型,并分析UAV高度参数对信道干扰噪声比的影响。文献[51]则通过对城市、山丘、森林和海洋等场景的重构,结合RT方法对UAV毫米波信道的时延功率谱和信号角度分布进行了讨论。相较于其他类型的信道模型,基于RT方法的模型具有场景构建灵活性高、数据获取成本较低等优势,但同样存在对小尺度衰落分析难度大的缺点。

3.3 基于几何分布的信道模型

几何统计性信道模型(Geometry-based stochastic channel model, GSCM)只需较少参数即可描述信道的三维传播特性,模型精度由散射体的几何约束条件决定,也是目前主流的UAV信道模型。根据对周围散射几何体的分布假设,GSCM可以进一步细分为不规则型几何统计性信道模型(Irregular shaped geometry-based stochastic channel model, IS-GSCM)和规则型几何统计性信道模型(Regular shaped geometry-based stochastic channel model, RS-GSCM)。IS-GSCM通过预先定义的分布如传播区域均匀分布等,将散射体配置在随机位置。例如,文献[52]提出的UAV时域非平稳IS-GSCM,存在视距分量情况下散射体服从均匀分布;文献[53]给出的双簇IS-GSCM,信号经过多跳到达接收端,信道特性由传播路径经历的散射体决定。值得注意的是,IS-GSCM中信号与散射体的相互作用可以被直接估计,或利用RT方法进行统计^[54]。另一方面,RS-GSCM将散射体设定分布在规则的几何形状表面,例如圆柱体^[55]、双圆柱体^[56]、椭圆柱体^[57]、球体^[58]、椭球体^[59]和半球体^[7]。该类模型的优点是通常可以获得信道统计特性的理论解,虽然信道复现时由于仿真次数有限,无法达到理论值,但误差可控制在允许范围内。

针对UAV通信场景,文献[60]将散射体布置在多个共焦距的椭圆以及一个圆柱体上,提出一种支持多天线技术的时变UAV信道模型;文献[61]使用多个圆柱体和单环分别描述静止散射体和移动散射体,给出一种考虑路径散射体生灭过程的UAV信道模型;文献[62]的散射体则分布在空心圆柱体内外径及外表面上,只需要改动相关参数便可使UAV信道模型支持多种散射场景。第3代合作伙伴计划(3rd generation partnership project, 3GPP)提供了一种面向0.5~100 GHz的通用信道建模方法,体现了GSCM对毫米波频段具备一定兼容性^[5]。同时,文献[63]将毫米波新特性纳入UAV信道建模过程,使

GSCM具备对大规模天线阵列的支持。文献[64]考虑了UAV飞行过程俯仰角的大幅变化,提出一种支持任意三维轨迹及机身姿态的GSCM。总体而言,GSCM的模型框架比较灵活,辅以RT方法还能实现适度复杂度的特定场景和动态场景的信道建模。事实上,METIS,mmMAGIC和5GCMSIG等标准化模型就借鉴了RT方法,对相邻GSCM参数进行内插,实现了动态场景信道平滑过渡。相较于其他类型的信道模型,GSCM具有模型通用性强、散射体信息全面等优势,适合针对信道的小尺度衰落展开研究。

4 未来发展与关键技术

4.1 基于机器学习的信道实测数据分析

针对实际传播场景获取信道参数,是UAV毫米波信道模型运行准确的关键技术之一。利用RT方法对毫米波传播参数预测比较准确,但难以体现UAV快速时变环境的随机性和非平稳性。机器学习技术的本质是凭借经验改善系统性能,利用智能算法从实际数据中获取规律。因此,利用实际测量或仿真产生大量信道数据,结合机器学习方法进行分析,是发现UAV信道随机性和非平稳性内在机理的有效手段。

特别地,针对UAV毫米波信道而言,新场景带来的信道特性变化目前都是未知的,利用机器学习方法对海量信道数据进行分析,能够更好地利用多径分量的空间及角度信息和模型参数之间的内在关联发掘新特性。例如,文献[65]使用核功率密度的聚类算法将多径分量科学地划入不同的簇,进而将基于散射簇的信道模型应用于大规模输入输出系统;文献[66]采用随机森林及K最邻近算法,对RT仿真数据进行处理,得到了优于传统方法的信道参数估计结果。将通过机器学习方法得到的信道参数与目前已有的信道模型进行有机结合的思路,有望成为未来UAV毫米波信道建模的主流方法。

4.2 多场景高动态高频段三维信道模型

UAV飞行环境复杂,执行任务种类繁多,加上毫米波通信频段跨度非常大,要求信道模型框架具有普适性和灵活度。现有模型框架一般服务于sub-6 GHz通信系统,散射体的位置由固定的几何关系或数学分布产生,难以满足UAV信道多场景、高移动、高频段和超宽带的信道建模需求。如何对现有方法进行合理的扩展与融合,科学搭建灵活的模型框架,是未来UAV毫米波信道建模的重要前提。例如,文献[64]提出的支持任意轨迹和天线姿态的非平稳UAV信道模型,为UAV毫米波三维信道模型框架构建提供了参考。

UAV空间位置与飞行姿态的捷变性将导致信道状态的快速动态变化,信道呈现明显的非平稳特性,信道参数也具有快速时变特性,因此探究非平稳信道模型的新特性以及信道参数的时间演进规律十分重要。例如,文献[56]在到达角和离开角的计算中引入时间参数,使信道模型具有时变特性;文献[67]提出了一种改进的非平稳信道模型并对参数的计算方法进行了研究,通过积分项的引入改善了时变多普勒频率参数的不连续性。文献[68]基于RT技术,对毫米波频段UAV信道的参数进行了分析,并研究了时延扩展和离开、到达角分布等特性。新一代的标准化UAV毫米波信道模型需要同时科学精准地表征毫米波信号传播特性和三维快速时变场景的非平稳特性,合适的模型框架和参数演进算法都至关重要。

4.3 大规模天线阵列三维波束跟踪对准

毫米波波束宽度随着大规模天线阵列规模增加而变窄,虽然可以获得极高的增益,但是窄波束指向性系统对收发端的快速移动非常敏感。因此,UAV毫米波通信链路在飞行任务中将一直处于波束不断扫描和校准的过程,将毫米波三维波束动态跟踪与信道模型相结合,也是未来UAV毫米波信道建模的关键技术。

目前,针对搭载天线阵列的UAV毫米波三维波束动态跟踪技术已获得研究人员的高度关注。例如,文献[69]对UAV通信场景下的毫米波波束跟踪算法进行了研究,通过量化空间角度并改进正交匹配追踪算法,在不提高系统复杂度的情况下实现了频谱效率的有效提升。文献[70]提供了一种面向UAV毫米波通信的波束对准策略,通过引入离散傅里叶拟变换构造具有平顶特性的训练波束以跟踪UAV的抖动,结合波束赋形和几何贪婪算法,该方法的精度和效率得到了证明。特别地,文献[71]提出了一种基于高斯双波束的波束对准方案,并基于三状态马尔科夫链实现了信道建模,模型状态连接比率与实测数据具有一致性。对大规模阵列天线及三维波束跟踪对准技术的兼容,是UAV毫米波通信系统广泛应用的前提条件,也有望成为未来信道建模中必不可少的环节。

5 结束语

UAV毫米波通信作为未来极具潜力的通信技术,在空中基站、无线中继、应急通信以及战场通信等方面得到了越来越多的关注。构建精确符合真实场景的无人机毫米波信道模型,是实现高效可靠的无人机通信系统的理论基础,也是测试和评估通信系统的重要依据。本文提出了无人机毫米波信道建模面临的新需求与挑战,并总结了当前常见的无线信道建模方法,包括确定性和统计性建模方法的特点以及局限性。在此基础上,分析比较了面向无人机场景的主流信道模型,并总结了未来值得深入研究的信道建模关键技术,为未来建立标准化无人机毫米波信道模型提供了重要参考。

参考文献:

- [1] JOSHI D. Commercial unmanned aerial vehicle (UAV) market analysis, industry TRENDS, companies and what you should know[EB/OL]. (2017-8-1)[2020-3-1].<http://www.businessinsider.com/commercial-uav-market-analysis-2017-8/?IR=T>.
- [2] WANG Chengxiang, BIAN Ji, SUN Jian, et al. A survey of 5G channel measurements and models[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2018, 20(4): 3142-3168.
- [3] 孙健, 张文胜, 王承祥. 5G高频段信道测量与建模进展[J]. *电子学报*, 2017, 45(5): 1249-1260.
SUN Jian, ZHANG Wensheng, WANG Chengxiang. Progress in measurement and modeling of 5G high-frequency channel[J]. *Chinese Journal of Electronics*, 2017, 45(5): 1249-1260.
- [4] ZHANG Chiya, ZHANG Weizheng, WANG Wei, et al. Research challenges and opportunities of UAV millimeter-wave communications[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 58-62.
- [5] 3GPP. ETSI TR 138 901-2018, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz[S]. Nice France: ETSI, 2020.
- [6] 庞立华, 张阳, 任光亮, 等. 5G无线通信系统信道建模的现状和挑战[J]. *电波科学学报*, 2017, 32(5): 487-497.
PANG Lihua, ZHANG Yang, REN Guangliang, et al. Current situation and challenges of channel modeling for 5G wireless communication system[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2017, 32(5): 487-497.
- [7] ZHU Qiuming, JIANG Kaili, CHEN Xiaomin, et al. A novel 3D non-stationary UAV-MIMO channel model and its statistical properties[J]. *China Communication*, 2018, 15(12): 147-158.
- [8] MATOLAK D W, SUN R Y. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part I: Methods, measurements, and models for over-water settings[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2017, 66(1): 26-44.
- [9] ZHU Qiuming, LI Weidong, WANG Chengxiang, et al. Temporal correlations for a non-stationary vehicle-to-vehicle channel model allowing velocity variations[J]. *IEEE Communications Letters*, 2019, 23(7): 1280-1284.
- [10] JIANG Hao, ZHANG Zaichen, DANG Jian, et al. A novel 3-D massive MIMO channel model for vehicle-to-vehicle communication environments[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2018, 66(1): 79-90.
- [11] ZHU Qiuming, YANG Ying, WANG Chengxiang, et al. Spatial correlations of a 3-D non-stationary MIMO channel model with 3-D antenna arrays and 3-D arbitrary trajectories[J]. *IEEE Wireless Communications Letters*, 2019, 8(2): 512-515.
- [12] 刘放, 陈明, 高丽. 捷联惯导系统软件测试中的飞行轨迹设计及应用[J]. *测控技术*, 2003, 22(5): 60-63.
LIU Fang, CHEN Ming, GAO Li. Flight path design and application of strapdown inertial navigation system software test[J]. *Measurement & Control Technology*, 2003, 22(5): 60-63.
- [13] SUN R Y, GENTILE C A, SENIC J, et al. Millimeter-wave radio channels vs. synthetic beamwidth[J]. *IEEE*

- Communications Magazine, 2018, 56(12): 53-59.
- [14] ZHONG Weizhi, XU Lei, ZHU Qiuming, et al. A novel beam design method for mmWave multi-antenna arrays with mutual coupling reduction[J]. China Communications, 2019, 16(10): 37-44.
- [15] ZHONG Weizhi, XU Lei, LIU Xin, et al. Adaptive beam design for UAV network with uniform plane array[J]. Physical Communication, 2019, 34: 58-65.
- [16] ZHAO Xiongwen, DU Fei, GENG Suiyan, et al. Playback of 5G and beyond measured MIMO channels by an ANN-based modeling and simulation framework[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(9): 1945-1954.
- [17] SALOUS S, DEGLI-ESPOSTI V, FUSCHINI F, et al. Millimeter-wave propagation: Characterization and modeling toward fifth-generation systems[J]. IEEE Antennas & Propagation Magazine, 2016, 58(6): 115-127.
- [18] JARVELAINEN J, HANEDA K, KARTTUNEN A. Indoor propagation channel simulations at 60 GHz using point cloud data[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(10): 4457-4467.
- [19] ZHAO Xiongwen, LI Shu, WANG Qi, et al. Channel measurements, modeling, simulation and validation at 32 GHz in outdoor microcells for 5G radio systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 1062-1072.
- [20] BAS C U, WANG Rui, SANGODOYIN S, et al. 28 GHz microcell measurement campaign for residential environment[C]// Proceedings of IEEE Global Communications Conference. Singapore: IEEE, 2018: 1-6.
- [21] CHENG Lele, ZHU Qiuming, WANG Chengxiang, et al. Modeling and simulation for UAV air-to-ground mmwave channels [C]// Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2020: 1-5.
- [22] HUSSAIN S, BRENNAN C. An efficient ray-tracing acceleration technique for mobile receivers in urban environments[C]// Proceedings of Computing and Electromagnetics International Workshop. Barcelona, Spain: IEEE, 2017: 47-48.
- [23] DEGLI-ESPOSTI V, FUSCHINI F, VITUCCI E M, et al. Speed-up techniques for ray tracing field prediction models[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2009, 57(5): 1469-1480.
- [24] WU Xianyue, WANG Chengxiang, SUN Jian, et al. 60-GHz millimeter-wave channel measurements and modeling for indoor office environments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2017, 65(4): 1912-1924.
- [25] HUANG Jie, LIU Yu, WANG Chengxiang, et al. 5G millimeter wave channel sounders, measurements, and models: Recent developments and future challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2019, 57(1): 138-145.
- [26] TIAN Li, DEGLI-ESPOSTI V, VITUCCI E M, et al. Semi-deterministic radio channel modeling based on graph theory and ray-tracing[J]. IEEE Transactions on Antennas & Propagation, 2016, 64(6): 2475-2486.
- [27] CHANG Hengtai, BIAN Ji, WANG Chengxiang, et al. A 3D non-stationary wideband GBSM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels[J]. IEEE Access, 2019, 7: 70719-70732.
- [28] ZHU Qiuming, YANG Ying, CHEN Xiaomin, et al. A novel 3D non-stationary vehicle-to-vehicle channel model and its spatial-temporal correlation properties[J]. IEEE Access, 2018, 6: 43633-43643.
- [29] YANG Shan, LIU Yuanjian, LI Shuangde, et al. Simulation and analysis of 60 GHz millimeter wave propagation characteristics in laboratory environment[C]// Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology. Chengdu, China: IEEE, 2018: 1-3.
- [30] ZHAO Xiongwen, LI Shu, WANG Qi, et al. Channel measurements, modeling, simulation and validation at 32 GHz in outdoor microcells for 5G radio systems[J]. IEEE Access, 2017, 5: 1062-1072.
- [31] LIU Xi, YIN Xiaoyu, ZHENG Guoxin. Experimental investigation of millimeter-wave MIMO channel characteristics in tunnel [J]. IEEE Access, 2019, 7: 108395-108399.
- [32] LIU Yu, WANG Chengxiang, HUANG Jie, et al. Novel 3-D nonstationary mmWave massive MIMO channel models for 5G high-speed train wireless communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(3): 2077-2086.
- [33] YANMAZ E, KUSCHNIG R, BETTSTETTER C. Achieving air-ground communications in 802.11 networks with three-dimensional aerial mobility[C]// Proceedings of Proceedings IEEE INFOCOM. Turin, Italy: IEEE, 2013: 120-124.
- [34] RICE M, JENSEN M. Multipath propagation for helicopter-to-ground MIMO links[C]// Proceedings of Military Communications Conference. Baltimore, MD, USA: IEEE, 2011: 447-452.
- [35] DAVID W, MATOLAK D W, SUN R Y. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems—Part III: The suburban and near-urban environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(8): 6607-6618.
- [36] CUI Zhuangzhuang, BRISO C, GUAN Ke, et al. Measurement-based modeling and analysis of UAV air-ground channels at 1

- GHz and 4 GHz[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2019, 18(9): 1804-1808.
- [37] CAI Xuesong, RODRÍGUEZ-PINEIRO J, YIN Xuefeng, et al. An empirical air-to-ground channel model based on passive measurements in LTE[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(2): 1140-1154.
- [38] KO J, HUR S, LEE S, et al. 28 GHz channel measurements and modeling in a ski resort town in Pyeongchang for 5G cellular network systems[C]//*Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation*. Davos, Switzerland: IEEE, 2016: 1-5.
- [39] CHAMAANI S, MIRTAHERI S A, NECHAYEV Y I, et al. MICS band indoor channel modeling using ray tracing method [C]//*Proceedings of International Symposium on Telecommunications*. Tehran, Iran: IEEE, 2010: 126-131.
- [40] SCHETTINO D N, MOREIRA F J S, REGO C G. Efficient ray tracing for radio channel characterization of urban scenarios [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2007, 43(4): 1305-1308.
- [41] CHU Xi, BRISO C, HE Danping, et al. Channel modeling for low-altitude UAV in suburban environments based on ray tracer [C]//*Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation*. London, UK: IET, 2018: 1-5.
- [42] ZHENG Chunfu, XU Ziheng, HE Danping, et al. Millimeter-wave channel measurement based ray-tracing calibration and analysis in metro[C]//*Proceedings of IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*. Atlanta, GA, USA: IEEE, 2019: 1-2.
- [43] ZHOU Chenming. Ray tracing and modal methods for modeling radio propagation in tunnels with rough walls[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2017, 65(5): 2624-2634.
- [44] SASMAL S, MISHRA S, BEHERA B R, et al. Ray tracing channel model for millimeter-(mm-)wave systems[C]//*Proceedings of International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies*. Ramanathapuram, India: IEEE, 2016: 281-284.
- [45] ZHOU Andong, HUANG Jie, SUN Jian, et al. 60 GHz channel measurements and ray tracing modeling in an indoor environment[C]//*Proceedings of International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*. Nanjing, China: IEEE, 2017: 1-6.
- [46] PASCUAL-GARCIA J, MOLINA-GARCIA-PARDO J, MARTINEZ-INGLES M, et al. On the importance of diffuse scattering model parameterization in indoor wireless channels at mm-Wave frequencies[J]. *IEEE Access*, 2016, 4: 688-701.
- [47] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//*Proceedings of IEEE Global Communications Conference*. Austin, TX, USA: IEEE, 2014: 2898-2904.
- [48] KHAWAJA W, OZDEMIR O, GUVENC I. UAV air-to-ground channel characterization for mmWave systems[C]//*Proceedings of Vehicular Technology Conference*. Toronto, ON, Canada: IEEE, 2017: 1-5.
- [49] KHAWAJA W, OZDEMIR O, GUVENC I. Temporal and spatial characteristics of mm Wave propagation channels for UAVs[C]//*Proceedings of Global Symposium on Millimeter Waves*. Boulder, CO, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [50] ALBERTO P, FOU DA A, IBRAHIM A S. Ray tracing analysis for UAV-assisted integrated access and backhaul millimeter wave networks[C]//*Proceedings of International Symposium on "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"*. Washington, DC, USA: IEEE, 2019: 1-5.
- [51] JIANG Shan, ZHU Qiuming, WANG Chengxiang, et al. Map-based UAV mmWave channel model and characteristic analysis [C]//*Proceedings of International Conference on Computer and Communications*. Chongqing, China: IEEE, 2020:1-6.
- [52] BLANDINO S, KALTENBERGER F, FEILEN M. Wireless channel simulator testbed for airborne receivers[C]//*Proceedings of IEEE Globecom Workshops*. San Diego, CA, USA: IEEE, 2015: 1-6.
- [53] LI Weidong, CHEN Xiaomin, ZHU Qiuming, et al. A novel segment-based model for non-stationary vehicle-to-vehicle channels with velocity variations[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 133442-133451.
- [54] DANIEL K, PUTZKE M, DUSZA B, et al. Three dimensional channel characterization for low altitude aerial vehicles[C]//*Proceedings of International Symposium on Wireless Communication Systems*. York, UK: IEEE, 2010: 756-760.
- [55] ZENG Linzhou, CHENG Xiang, WANG Chengxiang, et al. A 3D geometry-based stochastic channel model for UAV-MIMO channels[C]//*Proceedings of Wireless Communications and Networking Conference*. San Francisco, CA, USA: IEEE, 2017: 1-5.
- [56] ZHANG Xi, CHENG Xiang. Three-dimensional non-stationary geometry-based stochastic model for UAV-MIMO Ricean fading channels[J]. *IET Communications*, 2019, 13(16): 2617-2627.

- [57] JIANG Hao, ZHANG Zaichen, WU Liang, et al. Three-dimensional geometry-based UAV-MIMO channel modeling for A2G communication environments[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(7): 1438-1441.
- [58] KSENDZOV A. A geometrical 3D multi-cluster mobile-to-mobile MIMO channel model with Rician correlated fading[C]// Proceedings of International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops. Lisbon, Portugal: IEEE, 2016: 191-195.
- [59] GULFAM S M, NAWAZ S J, AHMED A, et al. A novel 3D analytical scattering model for air-to-ground fading channels[J]. Applied Sciences, 2016, 6(8): 207-228.
- [60] CHANG Hengtai, BIAN Ji, WANG Chengxiang, et al. A 3D non-stationary wideband GSCM for low-altitude UAV-to-ground V2V MIMO channels[J]. IEEE Access, 2019, 7: 70719-70732.
- [61] LIAN Zhuxian, JIANG Lingge, HE Chen, et al. A non-stationary 3-D wideband GBSM for HAP-MIMO communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1128-1139.
- [62] CHENG Xiang, LI Yiran. A 3-D geometry-based stochastic model for UAV-MIMO wideband nonstationary channels[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1654-1662.
- [63] MICHAELIDIS E T, NOMIKOS N, TRAKADAS P, et al. Three-dimensional modeling of mmWave doubly massive MIMO aerial fading channels[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 69(2): 1190-1202.
- [64] ZHU Qiuming, WANG Yawen, JIANG Kaili, et al. 3D non-stationary geometry-based multi-input multi-output channel model for UAV-ground communication systems[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2019, 13(8): 1104-1112.
- [65] HE Ruisi, LI Qingyong, AI Bo, et al. A kernel-power-density based algorithm for channel multipath components clustering[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2017, 16(11): 7138-7151.
- [66] YANG Guanshu, ZHANG Yan, HE Zunwen, et al. Machine-learning-based prediction methods for path loss and delay spread in air-to-ground millimeter-wave channels[J]. IET Microwaves, Antennas & Propagation, 2019, 13(8): 1113-1121.
- [67] ZHU Qiuming, LI Hao, FU Yu, et al. A novel 3D non-stationary wireless MIMO channel simulator and hardware emulator[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 3865-3878.
- [68] ZHU Qiuming, JIANG Shan, WANG Chengxiang, et al. Effects of digital map on the RT-based channel model for UAV mmWave communications[C]//Proceedings of International Wireless Communications and Mobile Computing. Limassol, Cyprus: IEEE, 2020: 1648-1653.
- [69] ZHONG Weizhi, XU Lei, ZHU Qiuming, et al. MmWave beamforming for UAV communications with unstable beam pointing[J]. China Communications, 2019, 16(1): 37-46.
- [70] ZHONG Weizhi, GU Yong, ZHU Qiuming, et al. A Novel 3D beam training strategy for mmWave UAV communications [C]//Proceedings of European Conference on Antennas and Propagation. Copenhagen, Denmark: IEEE, 2020: 1-5.
- [71] TAN Yi, WANG Chengxiang, ZHU Qiuming, et al. A novel beamforming scheme for mobile-to-mobile millimeter wave communications[C]//Proceedings of 22nd International ITG Workshop on Smart Antennas. Bochum, Germany: VDE, 2018: 1-6.

作者简介:



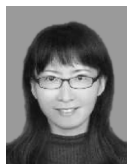
朱秋明(1979-),男,副教授,研究方向:信道测量与模拟、无人机通信,E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn。



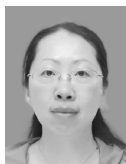
华博宇(1992-),通信作者,男,助理实验师,研究方向:信道建模与仿真,E-mail: byhua@nuaa.edu.cn。



毛开(1994-),男,博士研究生,研究方向:信道测量与建模。



仲伟志(1980-),女,副教授,研究方向:无人机波束跟踪。



陈小敏(1975-),女,副教授,研究方向:无线通信技术。



周彤彤(1998-),女,硕士研究生,研究方向:无线信道建模。