



专题：无人机空地无线通信技术

基于抛物方程的无人机通信场景传播特性分析

韩慧¹, 郝玉龙², 杨铖^{2,3}, 王健^{2,3,4}

(1. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 河南 洛阳 471003;

2. 天津大学微电子学院, 天津 300072;

3. 天津大学青岛海洋技术研究院, 山东 青岛 266200;

4. 山东海洋信息感知与传输工程技术研究中心, 山东 青岛 266200)

摘要: 为提高无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 毫米波通信场景传播特性的分析精度, 基于抛物方程 (parabolic equation, PE) 理论建立了一种无人机通信场景传播特性分析方法, 并针对都市和郊区两种典型无人机空地通信场景下的传播特性进行仿真。结果表明, 提出的方法能够有效地反映地形地物变化对无人机空地通信信号传播产生的影响, 对比 ITU-R 统计预测方法, 两种场景下预测结果趋势均保持一致。该方法可实现毫米波无人机应用场景传播特性有效预测, 对无人机毫米波通信系统设计、研制、测试等环节提供支撑。

关键词: 无人机; 通信; 电波传播; 抛物方程; 仿真

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2022347

Analysis of propagation characteristics of UAV communication scenarios based on parabolic equation

HAN Hui¹, HAO Yulong², YANG Cheng^{2,3}, WANG Jian^{2,3,4}

1. State Key Lab of Complex Electromagnetic Environmental Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China

2. School of Microelectronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3. Qingdao Institute for Ocean Technology, Tianjin University, Qingdao 266200, China

4. Shandong Engineering Technology Research Center of Ocean Information Awareness and Transmission, Qingdao 266200, China

Abstract: To improve the analysis accuracy of the propagation characteristics of UAV millimeter-wave communication scenarios, a method based on the parabolic equation was developed to analyze the propagation characteristics of UAV communication scenarios and simulate the propagation characteristics in urban and suburban areas. The results show that the proposed method can effectively express the influence of terrain parameters on the UAV air-ground communication link. Overall, the prediction results are consistent with the ITU-R statistical method in both scenarios. Effective prediction of the propagation characteristics of millimeter-wave UAV application scenarios can be realized

收稿日期: 2022-06-13; 修回日期: 2022-07-28

通信作者: 杨铖, ych2041@tju.edu.cn

基金项目: 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室资助项目 (No. CEMEE-002-20220224, No. CEMEE2022G0201)

Foundation Items: State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System (No. CEMEE2022G0201, No. CEMEE-002-20220224)



with the proposed method, which may support the design, development, and testing of UAV millimeter-wave communication systems.

Key words: UAV, communication, radio propagation, parabolic equation, simulation

0 引言

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 是无人驾驶飞行器的简称。无人机受到工业、科研以及国防领域的广泛关注, 其应用场景包括远程监视、应急救援、侦查打击、包裹投递和中继通信等^[1]。特别是 UAV 辅助通信 (UAV-assisted communication, UAVAC), 已成为学术界关注的 5G^[2]和 6G 的重要通信方式^[3]。该通信方式可以作为蜂窝系统的有效补充手段^[4], 成为未来空域交通的一部分^[5]。UAVAC, 与其他通信方式相比, 具有灵活部署、快速响应、环境适应性强等优势。UAV 价格低廉可极大降低部署成本, 同时采用不同的 UAV 可适应不同的通信需求。例如, 在偏远地区或地震、台风等自然灾害地区, 出现基础设施不足或通信设施失效的情况时利用 UAV 进行覆盖扩展; 在人口密集和流量大的热点区域内, 通过 UAV 增强覆盖, 提升用户容量; 在交通控制、货物运输、航拍、应急救援等领域, 作为常规或增补手段发挥作用。UAVAC 的主要应用场景之一是将 UAV 作为空中蜂窝基站^[4], 与地面用户的传统蜂窝通信相比, UAV 蜂窝通信具有明显不同的特点, 这给技术研究与应用带来了新机遇和新挑战^[6]。对于能够实现高速率通信的毫米波段, UAV 通信网络能够充分发挥 UAVAC 的灵活性^[7], 弥补毫米波传播的不足, 并保持了毫米波信号的优势^[8]。

在 UAV 空对地 (air-to-ground, AG) 无线服务的应用中, 准确地预测 UAV 空中基站的覆盖范围至关重要^[9]。为此, 针对典型场景下 UAV-AG 电波传播预测问题, 国内外学术界针对性研究了基于实测数据的统计模型和基于理论分析的确定性模型。早期, Al-Hourani 等^[9]提出了一种用于预测低空平台与地面终端之间空对地路径传播损耗的统

计模型。近年, Matolak 和 Sun 团队根据水上、丘陵、山区、郊区和城市当地环境的测量结果, 提出了修正对数距离的航路传播损耗分析模型^[10-12]。Chen 等^[13]基于机器学习方法, 以分段射线追踪 (ray tracing, RT) 为基础, 利用极大似然方法构造了一个联合聚类与回归的传播预测模型。2019 年, Khawaja 等^[5]在讨论了典型场景和测量的基础上, 系统阐述了大尺度衰减、小尺度衰落、MIMO 信道特性和模型, 并进行信道仿真。Cui 等^[14]针对低空 UAV-AG 信道, 在分析郊区环境信道测量的结果上, 对比射线追踪模拟结果, 给出了路径损耗、均方根时延扩展和多路径分量数量的高度相关模型; 并在视距和非视距情况下提取了大尺度和小尺度信道参数, 提出了一种与高度相关的路径损失模型, 并对阴影衰落和快速衰落进行统计分析^[15]。同年, Yan 等^[16]提出了考虑链路损耗和信道衰落影响的无人机通信链路预算管理的设计准则。针对 UAV 通信场景传播损耗预测复杂的问题, Zhang 等^[2]区分室外视距和非视距场景提出了一种经验模型。在国内, 杨靖文等^[17-18]基于 RT 理论构建了一种 UAV 基站对地信道分析模型, 并针对 2.6 GHz^[17]和 28 GHz^[18]信号进行了仿真分析。程乐乐等^[19]基于 RT 原理构建了一个毫米波三维几何信道模型, 并提出了一种针对该模型的信道参数更新算法。朱秋明等^[20]基于几何的随机模型, 同时考虑了无人机快速运动所带来的非平稳传播环境, 提出了一种新的三维非平稳 MIMO 信道模型。李艳丽等^[21]针对基于无人机中继的星地认知网络, 提出了两种波束成形 (beam forming, BF) 算法。此外, 国际电信联盟 (International Telecommunications Union, ITU) 给出了可用于上述场景低于 4 GHz 的经验性模型^[22]和高达 50 GHz 的确定性模型^[23]。传播特性预测方法对比见表 1, 其中对比了

表 1 传播特性预测方法对比

方法	类型	适用频段	适用场景	特点
ITU-R P.1546	经验性预测模型	30~4 000 MHz	天线离地高度小于 3 km、路径长度在 1~1 000 km 的地面业务	能够预测陆地、海面、混合路径对流层无线电路特性
ITU-R P.2001	确定性预测模型	30 MHz~50 GHz	对流层内路径长度为 3~1 000 km 的地面业务	能够预测不同传播机制下信号的衰落和增强
射线追踪方法	确定性预测模型	—	基于直射、反射和透射等传播机制的电磁波传播	描绘电磁波射线传播轨迹, 对传播情况提供定性的描述
抛物方程方法	确定性预测模型	—	复杂大气和地表环境下的电磁波传播	能够根据边界条件, 精确评估复杂环境下的电波传播效应

电波应用领域主要使用的无线电波传播特性预测方法, 分析发现, 相对于传统的统计预测模型和射线追踪模型, 基于抛物方程理论的确定性模型采用数值计算技术, 分析 UAV 应用场景中毫米波频段的无线电波受大气折射、地形绕射和反射效应影响, 能够定性和定量地评估复杂大气和地表环境下电磁波传输特性, 在预测精度上有着巨大优势。

当前和未来的 UAV 的应用场景需要精确的 AG 传播信道模型, 以设计和评估 UAV-AG 通信传输能力, 相对于地面传播预测模型, UAV-AG 传播预测模型研究还有待进一步深入, 特别是确定性方法的模型。所以, 本文面向城市典型应用场景, 基于抛物方程 (parabolic equation, PE) 提出了 UAV-AG 传播预测方法, 以支撑 UAV-AG 通信系统设计、评估等应用。

1 分析方法

抛物方程理论起源于 20 世纪 40 年代, 其研究最初是为了解决声波的传播问题, 后被引入电波传播特性的分析^[24]。之后的数十年, 学者们进一步发展了抛物方程理论。可以说, PE 方法是一种有效的电磁场数值计算方法, 具有经验模型所不具有的精度、计算优势和充分性。抛物方程方法是一种前向的全波分析方法, 它将传播过程中的反射、衍射以及前向波散射均考虑在内。它在求解大区域、大范围的传播时, 能够呈现复杂环境下的无线电波的传播状况^[25]。

在忽略电磁波的后向传播的情况下, 椭圆形

的波动方程^[26]就可以近似成抛物方程, 以便于进行数值运算。PE 方程是从亥姆霍兹方程出发, 通过分离快速变化的相位项, 得到了在近轴方向 (本文中的水平 x 方向) 传播角范围内缓慢变化的简化函数^[27]。通过引入简化函数 $u(x, z) = \exp(-ikx)\varphi(x, z)$, 利用函数 u 表示的波动方程如下:

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2(n^2 - 1) \right] u(x, z) = 0 \quad (1)$$

其中, $k = 2\pi/\lambda$ 表示自由空间波数, λ 为波长, n 为大气折射指数, x 和 z 分别表示直角坐标系下的传播距离和高度坐标, i 为虚数单位。式 (1) 中的微分算子可以分解成两个伪微分算子, 并可将其转化成向前和向后传播的波方程, 即:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \begin{cases} -ik(1-Q)u \\ -ik(1+Q)u \end{cases} \quad (2)$$

其中,

$$Q = \sqrt{1+q}$$

$$q = \frac{1}{k^2} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + (n^2 - 1)$$

忽略其中的后向传播部分, 前向传播的 PE 可表示为:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = -ik(1-Q)u \quad (3)$$

利用一阶泰勒展开式, 即有 $\sqrt{1+q} \approx 1 + \frac{q}{2}$,

则可得到标准 PE 表达式:



$$\left[\frac{\partial^2}{\partial z^2} + 2ik \frac{\partial}{\partial x} + k^2(n^2 - 1) \right] u(x, z) = 0 \quad (4)$$

在大传播角情况时可采用宽角 PE^[28-29]，即：

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \left[ikA(\sqrt{1+A}+1)^{-1} + ik(n-1) \right] u \quad (5)$$

其中，

$$A = \partial^2 / (k^2 \partial z^2)$$

$$B = n^2 - 1$$

采用分布傅里叶变换方法对式(5)进行求解，即可得到：

$$u(x + \Delta x, z) = \exp[ik(n-1)\Delta x] \times F^{-1} \left\{ \exp \left[-\frac{ip^2 \Delta x}{k} \left(\sqrt{1 - \frac{p^2}{k^2}} + 1 \right)^{-1} \right] \times F \{ u(x, z) \} \right\} \quad (6)$$

其中， F 表示傅里叶变换， $p = k \sin \theta$ 表示变换变量（ θ 是水平方向的传播角度），这就是分布步进 PE 的表达形式。

分步 PE 方法利用传播场的初始值，从发射天线开始，在每一段步进距离范围内，使用傅里叶变换方法，获得垂直方向上的场，沿距离范围逐步前进。

在无线电波传播特性预测中，路径损耗是重要参数，其与传播场的关系为^[27]：

$$PL = -20 \lg |u| + 20 \lg(4\pi) + 10 \lg x - 30 \lg \lambda \quad (7)$$

虽然国内外学者针对 PE 方法展开了一系列研究，但对 UAV 典型应用场景的电波传播特性分析很少有涉及。而在 UAV-AG 通信设计中，需要采用高精度信道模型实现传播特性预测。因此，本文基于抛物方程，建立了一种无人机通信场景传播特性分析方法，利用带有广角算子的分步 PE，求解各个场景的传播特性。

2 仿真分析

UAV-AG 城区传播示意图如图 1 所示，通过在空中飞行的无人机上安装通信基站，地面分布

的固定或移动终端接收信号，实现空对地的广域覆盖。UAV-AG 数据传输过程中，无线电信号受地形、地物以及大气等因素的影响，引起电波的反射、散射和绕射效应，形成多径传播，并且信道会受各种噪声干扰，造成数据传输质量下降。通信过程中，无线传输信道随工作频段的不同而表现出差异性。目前，UAV 的可用频谱主要集中在 UHF、L 和 C 波段，我国规划了 840.5~845 MHz、1 430~1 444 MHz、2 400~2 476 MHz、5 725~5 829 MHz 频段用于遥控、遥测以及信息传输。



图 1 UAV-AG 城区传播示意图

此外，为验证无人机通信场景传播特性分析方法的可行性与可靠性，本文采集了典型场景高程信息，利用文中方法和 ITU-R P.1546 方法对典型场景的传播特性进行仿真分析，并对两种方法下的预测结果进行对比。

其中，仿真条件设置如下：信号频率为 2 450 MHz，采用水平极化高斯天线，3 dB 波束宽度为 30°，天线架设高度为 180 m（高于仿真区域内最高建筑高度），接收高度为 100 m，路径长度为 2 128 m，大气环境设置为标准大气，设置地面大气修正折射率为 300 M 单位（M-unit）。

2.1 典型场景传播特性仿真分析

2.1.1 都市场景

都市场景区域仿真结果如图 2 所示，所选都

市场景的特点为建筑物密集且分布不均匀, 距离发射点近的区域建筑物较稀疏且高度较低, 距发射点较远的区域建筑物高大且密集。基于该场景的特性, 利用本文方法对传输特性进行预测。由图 2 可以看出, 随着距离的增加, 传播损耗逐渐增大。具体可表现为距离发射点近的空旷区域呈现低损耗的深色, 而距离发射点较远的空旷区域呈现高损耗的浅色, 与电波传播规律相符。另一方面, 仿真结果与地势变化相匹配, 在建筑物密集的区域, 受遮挡效应影响传输损耗迅速增大, 速率远高于建筑物稀疏区域。具体表现为距发射点距离相同的两处, 在建筑物密集区域路径损耗显著高于建筑物稀疏区域。建筑物背后损耗值迅速增大, 体现地形地物对无人机空地通信场景的信号传输的影响。

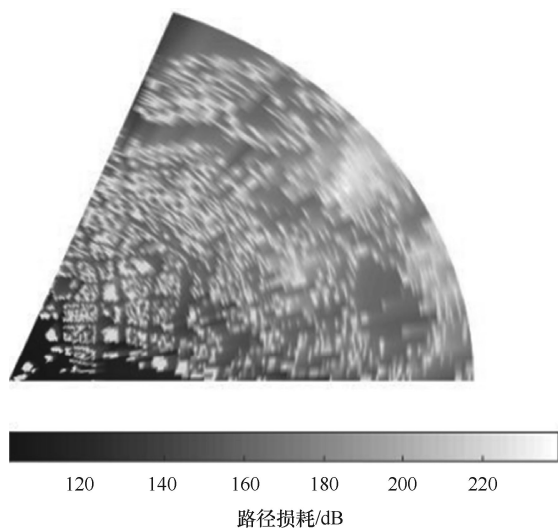


图2 都市场景区域仿真结果

2.1.2 郊区场景

郊区场景区域仿真结果如图 3 所示, 所选典型郊区场景的特点为仅有少量建筑物整体地形平坦。利用本文方法, 对截取区域的传播特性进行仿真。由图 3 可以看出, 电磁波传播过程中覆盖效果较好, 仅在建筑物后有少量盲区, 传播损耗以发射点位置为圆心, 向外损耗逐渐增大。

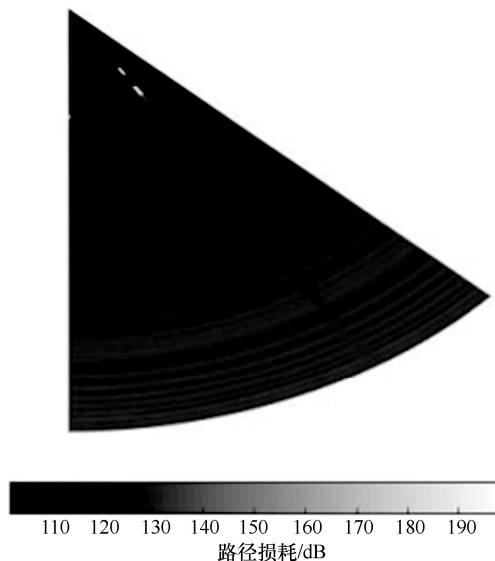


图3 郊区场景区域仿真结果

2.2 与 ITU-R 模型对比分析

ITU-R P.1546 方法于 2001 年首次被提出, 并在之后的几年中进行了多次修订^[22]。该方法基于典型海陆环境、标称频率、距离发射天线高度以及时间概率、等效辐射功率场强实验数据的统计分析结果进行内插或外推, 并通过地形条件进行修正, 最终获得场强, 属于典型的半经验预测方法。

为验证建立的 UAV-AG 传播特性分析方法的可行性, 本文将典型场景预测结果与 ITU-R P.1546 方法进行对比, 结果如图 4 所示。可以得出, 本文方法与 ITU-R P.1546 模型所得路径损耗整体变化趋势相同, 验证了 UAV-AG 传播特性分析方法的可靠性。在仿真区域, 该方法路径损耗变化范围主要集中于 101.25~249.78 dB, ITU-R P.1546 模型路径损耗变化范围为 99.88~146.11 dB。从路径损耗数值变化可以看出, 本文方法更能反映路径损耗随距离的变化。此外, 在受建筑物遮挡的区域, ITU-R P.1546 模型路径损耗呈现平滑过渡趋势, 体现出半经验模型的修正性特点。与该规律不同, 以 PE 方法为基础建立的 UAV-AG 传播特性分析模型, 预测的路径损耗在建筑物遮挡区域呈现突增的特点, 路径损耗随着地形起伏也表现出明显的变化趋势, 即损耗的极差明显, 较 ITU-R P.1546 模型更能体现



地势变化对电波传播的影响。例如发射方位约 135° 方位处, 存在一条由于楼宇障碍而形成的条形高损耗线; 再例如发射方位约 180° 方位处, 在楼宇后方存在类似“彗尾”的现象, 这是 ITU-R P.1546 方法预测结果所不存在的。

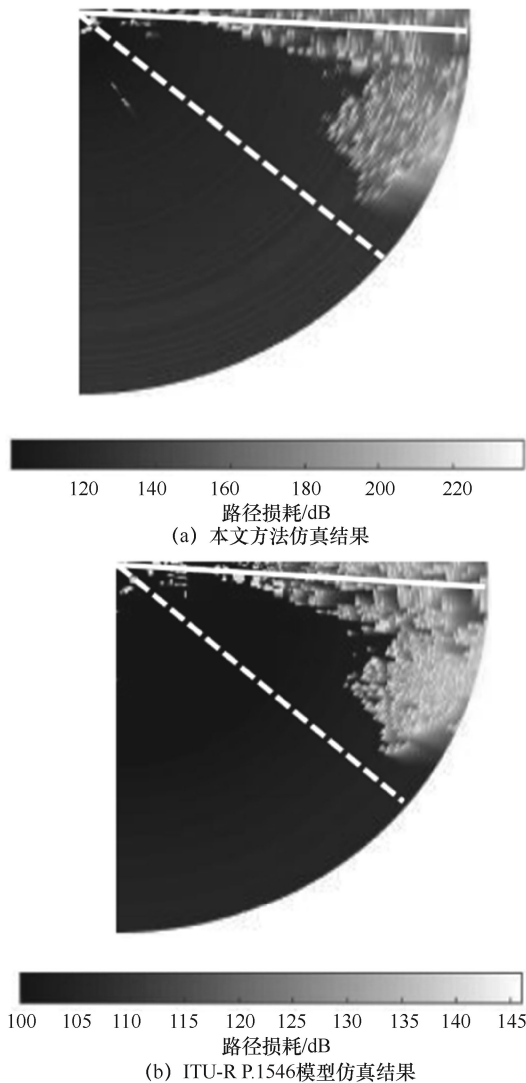


图4 本文方法与ITU-R P.1546模型仿真结果对比

以上分析证实了 UAV-AG 传播特性分析方法的可靠性, 且该方法相对于 ITU-R P.1546 模型, 更能体现传播距离、地形起伏和建筑物遮挡对电波传播的影响。

2.3 典型场景预测结果对比分析

本节选取典型都市场景 (如图4实线) 与典型郊区场景 (如图4虚线) 对本文所提方法与

ITU-R P.1546 模型预测结果进行对比, 为了消除奇异样本数据导致的不良影响及客观评价两种方法的性能, 首先对路径损耗及偏差数据进行归一化处理, 并引入高斯概率密度等客观指标对两种方法的预测结果进行分析。

其中, 路径损耗归一化方法为:

$$L_{\text{nom}} = \frac{L}{L_{\text{max}}} \quad (8)$$

其中, L 为原始路径损耗数据, L_{max} 为测试场景中路径损耗的最大值。

偏差归一化方法为:

$$d_{\text{nom}} = \frac{d}{d_{\text{max}}} \quad (9)$$

其中, d 为原始偏差数据, d_{max} 为测试场景中偏差的最大值。

高斯模型适用于超短波微波频段下衰落特性的统计, 服从高斯分布的信号包络 x 的概率密度计算方法为^[30-31]:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (10)$$

其中, μ 、 σ 分别为期望值和标准差, $-\infty < x < +\infty$ 。

本文方法与 ITU-R P.1546 模型偏差统计分布如图5所示, 同时利用 Kolmogorov-Smirnov 检验方法^[30-31], 实现对归一化偏差高斯分布曲线的拟合, 并计算对应的方差。其中, 典型都市场景下本文方法的方差为 0.28 dB, 而 ITU-R P.1546 模型的方差为 0.20 dB; 典型郊区场景下两种方法的方差分别为 0.24 dB 和 0.26 dB。由图5中可以看出本文所提的方法的偏差分布较 ITU-R P.1546 模型更为分散, 即在同样的传播路径下, 本文所提方法的传播预测损耗变化更为显著, 特别是在归一化偏差 $[-1, -0.5]$ 内。都市场景传播损耗大小主要由建筑物遮挡决定, 郊区场景传播损耗主要由距离远近决定, 本文所提方法比 ITU-R P.1546 模型更能体现地形对路径损耗的影响, 即 ITU-R P.1546 模型相对集中, 而本文方法的偏差分布概率相对分散。

基于图 4 中仿真对比结果进行极值统计, 本文方法与 ITU-R P.1546 模型在典型场景的对比结果见表 2。从表 2 也可以看出, 本文方法比 ITU-R P.1546 模型更能体现路径损耗随距离的变化明显, 即损耗的极差明显。

两种典型场景下本文方法与 ITU-R P.1546 模型路径损耗随距离变化曲线如图 6 所示, 从典型都市场景可以看出在受建筑物遮挡的区域, ITU-R P.1546 模型路径损耗呈现平滑过渡趋势, 体现半经验模型的修正性特点。与该规律不同, 以 PE 方法为基础建立的 UAV-AG 传播特性分析模型, 预测的路径损耗在建筑物遮挡区域呈现突增的特点。从典型郊区场景可以看出, 本文方法路径损耗随着距离增加表现出明显的变化趋势, 而且对地形地物的缓慢变化也有明显的传播损耗变化, 较 ITU-R P.1546 模型更能体现地形地物及距离变

化对电波传播的影响。

3 结束语

本文基于 PE 方法建立了一种 UAV-AG 传播特性分析模型, 针对都市、郊区等典型应用场景, 实现了电波传播特性仿真分析。结果表明: 模型能够实现对典型场景的仿真分析, 并反映无人机空地通信场景中传播距离、地形起伏和建筑物遮挡对电波传播的影响, 体现了“确定型预测”的优势; 模型能够对拟定通信场景的宏观覆盖特性进行分析, 分析结果与 ITU 方法有着较好的一致性。本文研究成果可用于 UAV-AG 优化部署, 辅助系统及网络建设; 本文的研究思路也可用于支撑 UAV-AG 通信系统的设计。本文研究结果将有助于 UAV-AG 信道建模和无人机无线通信系统的性能分析。

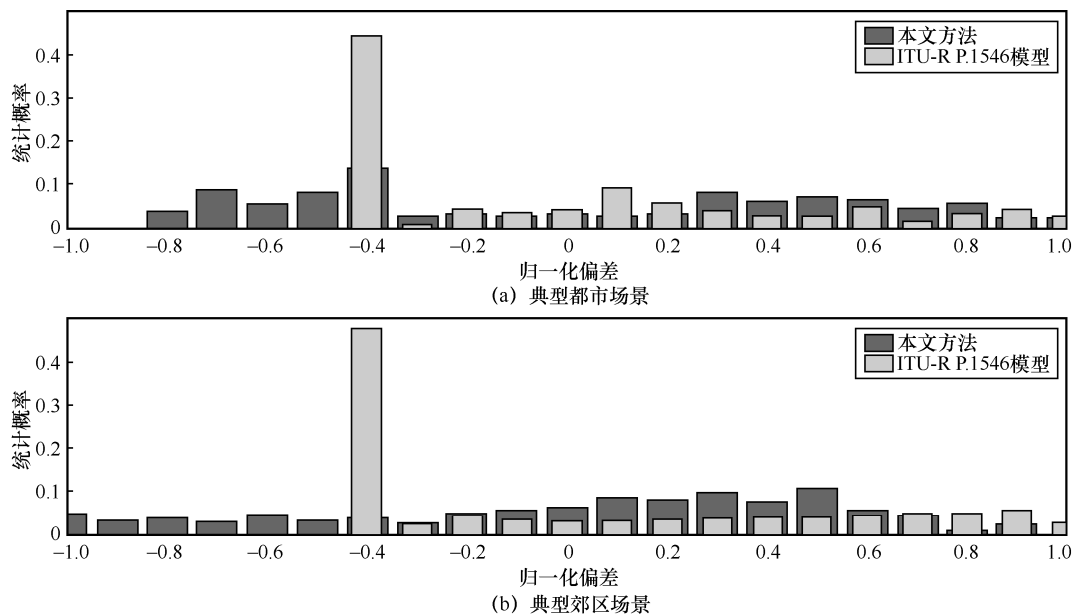


图 5 本文方法与 ITU-R P.1546 模型偏差统计分布

表 2 本文方法与 ITU-R P.1546 模型极值对比

场景名称	方法	极大值/dB	极小值/dB	极差值/dB
典型都市场景	本文方法	174.99	102.21	72.78
	ITU-R P.1546 模型	134.09	99.88	34.21
典型郊区场景	本文方法	134.14	102.18	31.96
	ITU-R P.1546 模型	106.44	99.88	6.56

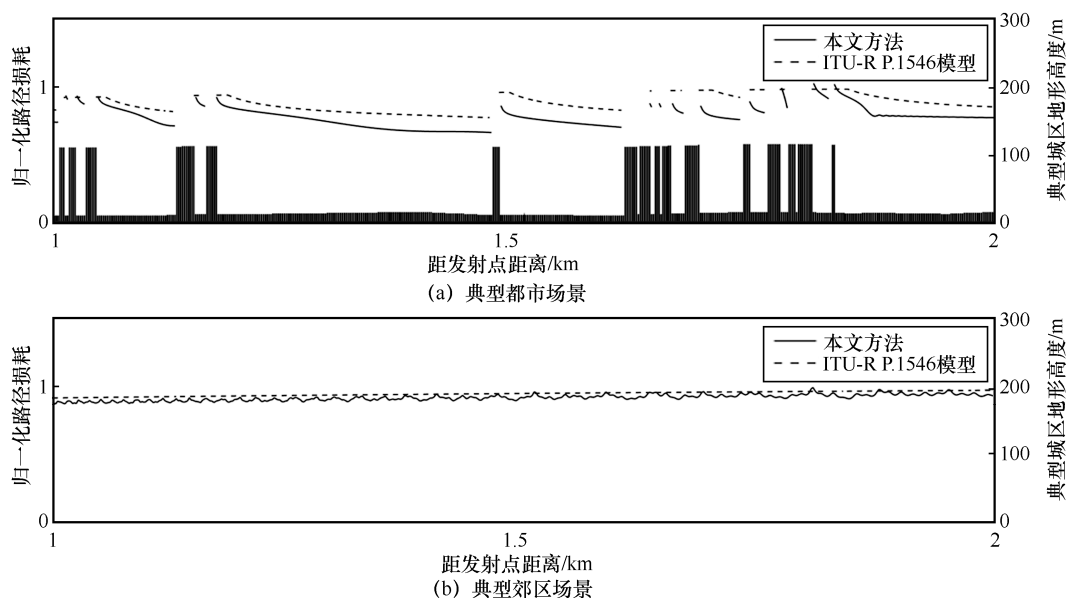


图6 路径损耗随距离变化曲线

在未来的工作中, 将针对典型无人机应用场景开展通信试验, 掌握实际无人机通信链路的无线电波传播特性, 进一步系统地分析预测方法的准确性。

参考文献:

- [1] ZENG Y, ZHANG R, LIM T J. Wireless communications with unmanned aerial vehicles: opportunities and challenges[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 36-42.
- [2] ZHANG L, ZHAO H, HOU S, et al. A survey on 5G millimeter wave communications for UAV-assisted wireless networks[J]. IEEE Access, 2019(7): 117460-117504.
- [3] 王健, 杨闯, 闫宁宁. 面向 B5G 和 6G 通信的数字孪生信道研究[J]. 电波科学学报, 2021, 36(3), 340-348.
WANG J, YANG C, YAN N N. Study on digital twin channel for the B5G and 6G communication[J]. Chinese journal of radio science, 2021, 36(3): 1-10.
- [4] ZENG Y, LYU J B, ZHANG R. Cellular-connected UAV: potential, challenges, and promising technologies[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 120-127.
- [5] 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.
- [6] XIAO Z Y, XIA P F, XIA X G. Enabling UAV cellular with millimeter-wave communication: potentials and approaches[J]. IEEE Communications Magazine, 2016, 54(5): 66-73.
- [7] 朱秋明, 华博宇, 毛开, 等. 无人机毫米波信道建模进展和挑战[J]. 数据采集与处理, 2020, 35(6): 1049-1059.
ZHU Q M, HUA B Y, MAO K, et al. Advances and challenges of UAV millimeter-wave channel modeling[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(6): 1049-1059.
- [8] ZHANG C Y, ZHANG W Z, WANG W, et al. Research challenges and opportunities of UAV millimeter-wave communications[J]. IEEE Wireless Communications, 2019, 26(1): 58-62.
- [9] AL-HOURANI A, KANDEEPAN S, JAMALIPOUR A. Modeling air-to-ground path loss for low altitude platforms in urban environments[C]//Proceedings of 2014 IEEE Global Communications Conference. Piscataway: IEEE Press, 2014: 2898-2904.
- [10] MATOLAK D W, SUN R Y. Unmanned aircraft systems: air-ground channel characterization for future applications[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2015, 10(2): 79-85.
- [11] SUN R, MATOLAK D W. Air-ground channel characterization for unmanned aircraft systems part II: hilly and mountainous settings[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(3): 1913-1925.
- [12] MATOLAK D W, SUN R. 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.
- [13] CHEN J T, YATNALLI U, GESBERT D. Learning radio maps for UAV-aided wireless networks: a segmented regression approach[C]//Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Communications. Piscataway: IEEE Press, 2017: 1-6.
- [14] CUI Z, BRISO C, GUAN K, et al. Low-altitude UAV air-ground propagation channel measurement and analysis in a suburban environment at 3.9 GHz [J]. IET Microwaves Antennas and Propagation, 2019, 13(9): 1503-1508.
- [15] CUI Z, BRISO C, GUAN K, 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: 1-5.
- [16] YAN C, FU L, ZHANG J, et al. A comprehensive survey on

- UAV communication channel modeling[J]. IEEE Access, 2019(7): 107769-107792.
- [17] 杨婧文, 陈小敏, 仲伟志, 等. 无人机空中基站对地信道建模及功率覆盖预测[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(6): 1125-1132. YANG J W, CHEN X M, ZHONG W Z, et al. Channel modeling and coverage prediction for link between UAV-based base stations and ground[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2019, 34(6): 1125-1132.
- [18] 杨婧文, 朱秋明, 王健, 等. 无人机空对地毫米波通信路径损耗预测[J]. 应用科学学报, 2021, 39(3): 398-408. YANG J W, ZHU Q M, WANG J, et al. Path loss prediction for UAV-to-ground millimeter wave communications[J]. Journal of Applied Sciences, 2021, 39(3): 398-408.
- [19] 程乐乐, 朱秋明, 陆智俊, 等. 无人机毫米波信道建模及统计特性研究[J]. 信号处理, 2019, 35(8): 1385-1391. CHENG L L, ZHU Q M, LU Z J, et al. On the modeling and characteristics analyze for UAV-based millimeter wave channels[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(8): 1385-1391.
- [20] ZHU Q M, JIANG K L, CHEN X M, et al. A novel 3D non-stationary UAV-MIMO channel model and its statistical properties[J]. China Communications, 2018, 15(12): 147-158.
- [21] 李艳丽, 林志, 王子宁, 等. 基于无人机中继的星地认知网络波束成形算法[J]. 电信科学, 2021, 37(8): 27-37. LI Y L, LIN Z, WANG Z N, et al. Beamforming algorithm for cognitive satellite and terrestrial network based on UAV relay[J]. Telecommunications Science, 2021, 37(8): 27-37.
- [22] ITU. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz: Recommendation ITU-R P. 1546-6 [S]. 2019.
- [23] ITU. A general purpose wide-range terrestrial propagation model in the frequency range 30 MHz to 50 GHz: Recommendation ITU-R P. 2001-4 [S]. 2021.
- [24] LENTOVICH M A, FOCK V A. Solution of propagation of electromagnetic waves along the earth's surface by the method of parabolic equations [J]. Journal of Physics-USSR, 1946, 10(1): 13-23.
- [25] 郭建炎, 王剑莹, 龙云亮. 基于抛物方程法的粗糙海面电波传播分析[J]. 通信学报, 2009, 30(6): 47-52. GUO J Y, WANG J Y, LONG Y L. Analysis of radio wave propagation over rough sea surface based on parabolic equation method[J]. Journal on Communications, 2009, 30(6): 47-52.
- [26] AKORLI F K, COSTA E. An efficient solution of an integral equation applicable to simulation of propagation along irregular terrain[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2001, 49(7): 1033-1036.
- [27] OZGUN O, APAYDIN G, KUZUOGLU M, et al. PETOOL: MATLAB-based one-way and two-way split-step parabolic equation tool for radiowave propagation over variable terrain[J]. Computer Physics Communications, 2011, 182(12): 2638-2654.
- [28] CLAERBOUT J F. Fundamentals of geophysical data

processing with application to petroleum prospect[M]. New York: McGraw-Hill, 1976.

- [29] COLLINS M D. A split-step Padé solution for the parabolic wave equation[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 1993, 94(4): 1736-1742.
- [30] 士亚菲, 王健, 杨铖, 等. 热带海洋区域超短波信号衰落分布特性研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(5): 750-755. SHI Y F, WANG J, YANG C, et al. Fading distribution characteristics of ultrashort wave signals in tropical ocean regions[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2020, 35(5): 750-755.
- [31] WANG J, SHI Y, YANG C, et al. Research on fading characteristics of ultrahigh frequency signals in Karst landform around radio quiet zone of FAST[J]. Radio Science, 2020, 55(10), 1-10.

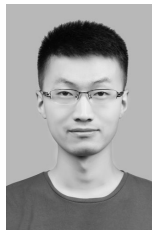
[作者简介]



韩慧(1980—), 女, 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室副研究员, 主要研究方向为电磁环境特性与模拟、通信对抗。



郝玉龙(1998—), 男, 天津大学微电子学院硕士生, 主要研究方向为无线电波传播特性分析及建模。



杨铖(1991—), 男, 天津大学微电子学院博士生, 主要研究方向为无线电波传播特性分析及建模。



王健(1979—), 男, 博士, 天津大学微电子学院硕士生导师, 天津大学青岛海洋技术研究院特聘研究员, 山东海洋信息感知与传输工程技术研究中心常务副主任, 主要研究方向为无线通信信道建模与应用、电磁环境评估与频谱管理。