

文章编号: 2095-4980(2025)01-0049-07

不同山地坡度条件下的太赫兹信号特性研究

张 苗¹, 刘佳丽², 宋 健^{*1}, 顾业博¹, 王青旺¹

(1.昆明理工大学 信息工程与自动化学院, 云南 昆明 650031; 2.北京机械设备研究所, 北京 100006)

摘要: 山地环境通常具有多样化地形, 针对山地无线通信中由于地形遮挡导致信号传播路径复杂的问题, 提出了基于不同山地坡度下的太赫兹无线通信建模方法。通过数字高程模型(DEM)获取地形数据, 结合射线追踪法, 引入坡度因子对山地太赫兹信号传播特性进行分析; 对接收器的接收功率进行仿真实验, 建立地形坡度和接收功率的量化关系。仿真结果表明, 不同坡度区域在信号覆盖和时延特性方面存在显著差异: 山地中较平坦的区域通常具有更稳定的信号覆盖, 功率值分布较集中(-172.5~-117.5 dBm); 而在陡峭坡度区域, 信号覆盖表现不佳, 功率分布较分散, 但时延扩展分布较集中(0~3 ns)。

关键词: 山地坡度; 太赫兹信道建模; 数字高程模型; 射线追踪

中图分类号: TN98

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2024394

Study on terahertz signal characteristics under different mountain slope conditions

ZHANG Miao¹, LIU Jiali², SONG Jian^{*1}, GU Yebo¹, WANG Qingwang¹

(1.School of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650031, China; 2.Beijing Mechinery Equipment Research Institute, Beijing 100006, China)

Abstract: Mountainous environments typically feature diverse terrains. To address the issue of complex signal propagation paths in wireless communication due to terrain obstructions in mountainous areas, a modeling method for terahertz wireless communication under different mountain slopes is proposed. Terrain data is obtained through Digital Elevation Models(DEM), and the ray tracing method is combined with the introduction of a slope factor to analyze the propagation characteristics of terahertz signals in mountainous areas. Simulation experiments are conducted on the received power of the receiver to establish a quantitative relationship between terrain slope and received power. Simulation results indicate that there are significant differences in signal coverage and delay characteristics across regions with different slopes: flatter areas in the mountains generally have more stable signal coverage with a more concentrated power distribution(-172.5~-117.5 dBm); whereas in areas with steep slopes, signal coverage is poor, power distribution is more dispersed, but delay spread distribution is more concentrated (0~3 ns).

Keywords: mountain slope; terahertz channel modeling; Digital Elevation Model(DEM); ray tracing

太赫兹技术结合无人机作为空中基站应用, 可在紧急情况下迅速部署, 提供临时的大带宽、高可靠性和低延迟通信服务。因此, 这种技术能有效拓展到通信基础设施不足的区域, 为山地通信场景提供新的解决方案和应用前景。

对太赫兹信道建模能够深入解析极高频信号在复杂环境中的传播特性, 如山地环境, 通过准确的信道建模, 能够优化无线通信系统的设计, 这对未来的无线通信技术, 如 6G 尤为重要。当前研究主要侧重于城市街道^[1-3]、校园^[4]、室内^[5-8]、隧道^[9]等场景, 也有研究者在丘陵环境^[10]、郊区^[11]和不规则地形^[12]下对信道建模与测量。弋浩凡等^[13]通过室外场景的案例, 研究了不同气象条件对太赫兹频段信道特性的影响; XING Y C 等^[14]探讨了植被衰

收稿日期: 2024-08-22; 修回日期: 2024-10-09

*通信作者: 宋 健 email:songjian@kust.edu.cn

减(信号通过植被时的衰减)对信号传播的影响;吴强等^[15]针对复杂地形下测高难题,提出了基于太赫兹成像的自适应定高方法;文献[16]发现无人机对地的路径损耗与高度和频率密切相关;文献[17]提出了与无人机高度相关的路径损耗模型;文献[18]对不同无人机飞行高度、轨迹和位置等变量进行了测量,并深入分析了这些因素对信道特性的影响;文献[19]研究了在山地环境下,无人机通信的视距(Line Of Sight, LOS)概率和传播损耗特性。但尚未有研究深入探讨坡度地形对通信的影响,不同坡度对无线通信的影响主要体现在信号传播路径、信号衰减和多径效应等方面。因此,在不同坡度山地环境下对太赫兹无线信道建模至关重要。

常见的信道模型包括确定性模型、随机性模型和统计性模型。射线追踪技术可广泛用于从低频段到太赫兹频段的各种应用场景^[20]。本文通过数字高程模型(DEM)提取地形特征,实现对地形的精确建模;通过使用确定性模型并结合射线追踪技术,对山地环境中的无线信道进行建模,深入分析不同坡度地形对太赫兹无线信道特性的影响。

1 模型构建与研究方法

1.1 数字高程模型

本文首先通过地理空间数据云平台下载山地DEM数据;然后采用ArcGIS软件对下载的地图进行分割,提取坡度值;最后对地形取样点,获取该样点的坡度。

DEM是一个栅格数据集,其中每个像元代表一个地球表面特定点的高程值。从数学方面看,DEM表示区域D上的三维向量有限序列,用函数表示为:

$$V_i=(X_i, Y_i, Z_i), (i=1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: (X_i, Y_i) 为平面坐标; Z_i 为 (X_i, Y_i) 对应的高程。DEM基本的地形分析有坡度、坡向、山体阴影、等值线等,本文主要针对山地坡度因素对无线通信的影响进行研究。山地坡度是通过计算表面中心像元在水平方向 (dz/dx) 和垂直方向 (dz/dy) 的高程变化率确定的。坡度以度为单位的计算公式为:

$$\alpha = \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{dz}{dx} \right)^2 + \left(\frac{dz}{dy} \right)^2} \right) \times \frac{180}{\pi} \quad (2)$$

1.2 射线追踪算法

首先将分割完成的地图以“.tif”格式导入Wireless Insite软件,然后根据山地模型设置环境的相对介电系数和导电度等参数,接着配置天线、电波,放置发射器(Transmitter, Tx)和接收器(Receiver, Rx),最后设定计算引擎并对通信系统的数据进行分析。

采用射线追踪算法对山区的太赫兹无线通信进行模拟研究。射线追踪法是基于几何光学理论以及电磁场理论仿真特定环境下信号的传播路径,通过射线追踪技术能够对太赫兹信号传播进行精确建模^[21]。在所有场相干组合的情况下,接收功率表达式为^[22]:

$$P_R = \frac{\lambda^2 \beta}{8\pi\eta_0} \left| \sum_{i=1}^{N_p} [E_{\theta,i} g_{\theta}(\theta_i, \phi_i) + E_{\phi,i} g_{\phi}(\theta_i, \phi_i)] \right|^2 \quad (3)$$

式中: λ 为波长; η_0 为自由空间阻抗(377 Ω); N_p 为路径的数量; $E_{\theta,i}$ 和 $E_{\phi,i}$ 为接收点第 i 条路径电场的 θ 和 ϕ 分量, θ_i 和 ϕ_i 为到达方向,用函数表示为:

$$g_{\theta}(\theta, \phi) = \sqrt{|G_{\theta}(\theta, \phi)|} e^{j\psi_{\theta}} \quad (4)$$

式中: G_{θ} 为接收天线增益的 θ 分量; ψ_{θ} 为远区电场 θ 分量的相对相位; $g_{\phi}(\theta, \phi)$ 的计算公式同理。

β 为发射波形频谱 $S_T(f)$ 与接收机频率灵敏度频谱 $S_R(f)$ 的重叠:

$$\beta = \frac{\int_{f_T-(B_T/2)}^{f_T+(B_T/2)} S_T(f) S_R(f) df}{\int_{f_T-(B_T/2)}^{f_T+(B_T/2)} S_T(f) df} \quad (5)$$

式中： f_T 为发射波形的中心频率； B_T 为带宽。

时延扩展是分析多径效应的一项重要指标，通过在载波频率下假设窄带信号，并依据式(6)计算得出：

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_p} (t_i - \bar{t})^2 P_i}{P_R}} \quad (6)$$

式中： t_i 为第*i*条传播路径的到达时间； P_i 为第*i*条路径的时间平均功率； \bar{t} 为平均到达时间：

$$\bar{t} = \frac{\sum_{i=1}^{N_p} P_i t_i}{P_R} \quad (7)$$

1.3 关键信道参数

基于DEM数据，本文选取了3个坡度范围的山地，分别为 $0^\circ \sim 9.8^\circ$ 、 $16.9^\circ \sim 33.2^\circ$ 和 $40.2^\circ \sim 62.6^\circ$ 。如图1所示，随着山地的海拔越高，地表颜色逐渐趋向红色。图中绿色的正方体表示无人机作为空中基站(发射器，Tx)发射信号。在Tx的下方，红色的正方体表示地面上的Rx。在水平面上，以Tx为圆心，按10 m的间隔放置一圈Rx，且每一圈中的Rx彼此相隔2 m。这些Rx固定在距离地面1.5 m的位置，随着山地的起伏保持相对地面的高度不变，确保充分考虑接收器与地形坡度之间的相对高度差和位置对信号接收的影响。

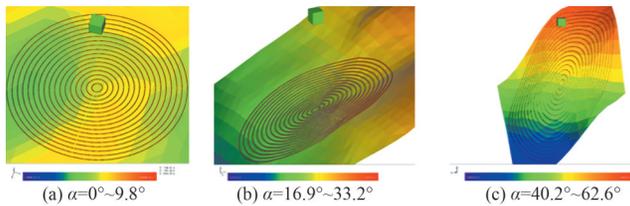


Fig.1 Mountainous terrain with different slopes
图1 不同坡度山地

表1 仿真信道参数

Table1 Simulation channel parameters	
parameter	value
center frequency/GHz	110
bandwidth/GHz	2
transmission power/dBm	0
transmitter height/m	200
receiver height/m	1.5
propagation model	X3D
number of reflections	6
number of transmissions	0
number of diffractions	1

针对山地地形的研究，本文中，地面的相对介电常数和导电度采用默认值，分别为25和0.02 S/m；Tx使用定向天线，Rx使用半波偶极子天线，同时对天线采用垂直极化的方式。在100 GHz以下的频段，已有研究人员发表了众多的成果^[23-26]，而100 GHz以上的山地信道研究相对较少。为促进100 GHz以上频段的应用和发展，本文设置中心频率为110 GHz，带宽为2 GHz。具体的信道参数如表1所示。

2 信道特性分析

山地环境复杂多变，坡度的变化直接影响信号传播路径和覆盖范围。本文首先通过仿真预测出以Tx为圆心，水平半径为170 m的信道传播路径，然后在此基础上计算接收功率。对3种坡度地形的接收功率进行仿真，结果如图2所示。从图2中可以看出，坡度的增大显著影响Rx的接收功率。随着坡度的增大，越来越多的Rx接收功率降低，最终导致Rx接收不到信号。产生这一现象的原因有两方面：首先，较陡的地形对信号的LOS造成了遮挡，显著增加了信号衰减；其次，处于陡峭山地表面的Rx相对于Tx处于较高的海拔位置。对于定向天线，路径损耗与天线的指向密切相关。由于天线指向向下，Rx未能有效接收到信号，从而导致信

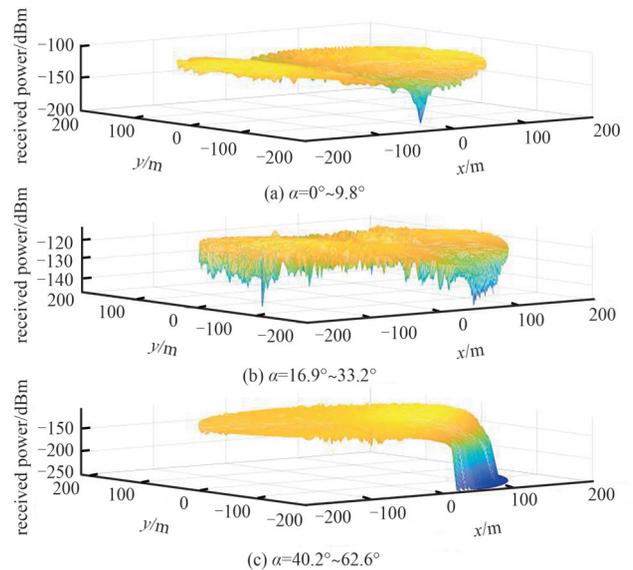


Fig.2 Received power coverage map for mountainous terrain with different slopes

图2 不同坡度山地的接收功率覆盖图

号无法接收。

为进一步探究不同坡度上的 Rx 接收功率随距离的变化，对比分析 3 个坡度范围的接收功率。仿真参数保持与上述信道参数一致，唯一的变化是 Rx 不再呈环状分布，而是均匀覆盖整个矩形地形，Rx 之间的间隔为 30 m，同时 Tx 位于地形的中央。不同坡度山地的接收功率随距离变化的仿真结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，整体上接收功率随着距离的增大呈下降趋势。在 250 m 的距离范围内，坡度变化范围为 $40.2^\circ \sim 62.6^\circ$ 的山地中，部分 Rx 未能实现通信。这主要是由于 Rx 相对于 Tx 的位置较高，尽管两者之间的物理距离较近，但由于地形的影响，信号路径被阻挡，导致接收端无法正常接收到信号。因此，随着坡度的增加，更容易出现非视距传播，增加信号的传播损耗。为缓解这一问题，可采取一些针对性的优化措施，如适当增加 Tx 的高度，使其能够覆盖更广泛的区域，减少被遮挡的概率，从而增加视距传播的可能性；另一种策略是采用全向天线或多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO) 天线，提高 Rx 接收到信号的机会。

对不同坡度条件下的接收功率进行累积分布函数(Cumulative Distribution Function, CDF)的比较分析，结果如图 4 所示。坡度介于 $0^\circ \sim 9.8^\circ$ 范围内的地形，接收功率值分布集中，变化范围为 $-172.5 \sim -117.5$ dBm；坡度介于 $16.9^\circ \sim 33.2^\circ$ 范围内的地形，接收功率值分布较为分散，变化范围为 $-235 \sim -115$ dBm；坡度介于 $40.2^\circ \sim 62.6^\circ$ 范围内的地形，有近 10% 的概率无法通信且接收功率值分布最分散，变化范围为 $-250 \sim -110$ dBm。通过对比不同坡度地形和环境下的接收功率 CDF，能够直观展示接收功率的整体分布情况，反映接收信号强度的统计特性。这种分析有助于提前识别潜在的通信盲区，特别是接收功率处于 -250 dBm 的区域。虽然接收功率整体偏低，但可通过适当增加发射功率达到可靠通信所需的接收功率。结合这些数据，可有效选择最优的基站位置，确保基站能够覆盖关键区域。同时，基于地形的特性，还可精确调整天线的方向，使其辐射范围最大化，进一步提升信号的覆盖效果。此外，通过分析接收功率的分布情况，能够优化传输功率设置，既避免过高的功率浪费，又确保在不同条件下维持稳定的信号传输质量。

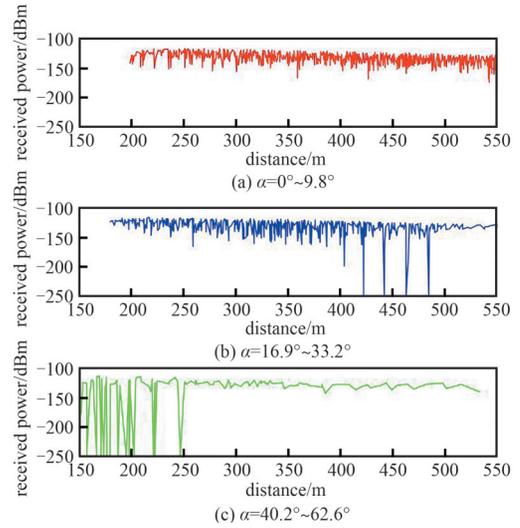


Fig.3 Simulated received power results for mountainous terrain with varying slope gradients
图 3 不同坡度山地的接收功率仿真结果

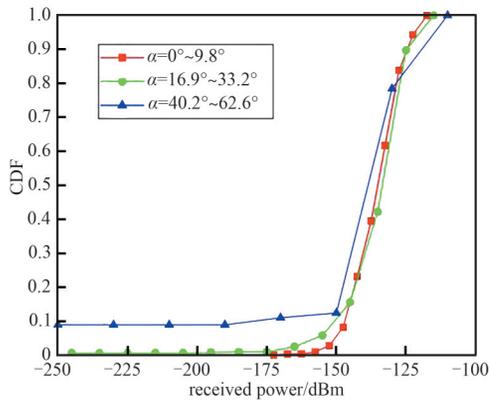


Fig.4 CDF of received power in mountainous terrain with varying slope gradients
图 4 不同坡度山地的接收功率的累积分布函数

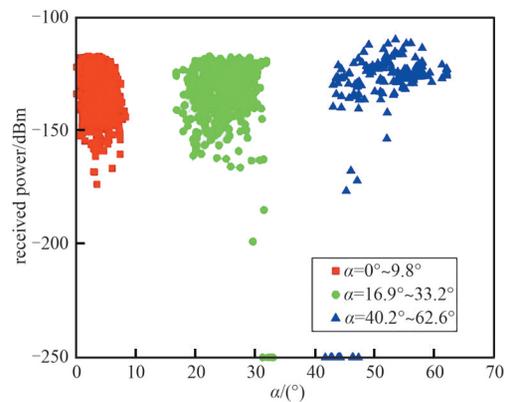


Fig.5 Received power distribution across different slope angles
图 5 不同坡度对应的接收功率图

在 Tx 和 Rx 的直线距离 550 m 内，不同坡度对应的接收功率如图 5 所示。在不同坡度的地形上，接收功率呈现出一定的非线性变化趋势。具体而言，在坡度为 $0^\circ \sim 9.8^\circ$ 的地形上，接收功率较为集中，表明在较为平缓的地形中，功率波动较小。随着坡度的增加，尽管在最陡峭的坡度地形下，部分 Rx 的接收功率增大，但也有部分 Rx 没有接收到信号。这种现象可能与信号传播路径的变化、坡度对信号遮挡的影响以及 Tx 相对 Rx 的高度相关。随着坡度增加，地形起伏导致部分信号路径受阻，某些接收点的信号出现衰减，部分接收点则出现信号中断。在较陡峭的地形中，虽然传输路径缩短导致某些区域增强了信号，但地形的遮挡效应更为显著，导致信号不稳定性增加。特别是，当 Rx 距离 Tx 更高时，由于 Tx 天线的朝向，导致 Rx 无法接收到信号。通过地形建模与仿真，

可预测不同坡度对信号传播的影响，从而制定针对性的通信策略。

根据接收功率的仿真数据，可进一步分析太赫兹信号特性，如时延扩展。在不同坡度的地形上，时延扩展累积分布函数表现出明显差异，如图 6 所示。在坡度介于 $0^\circ\sim 9.8^\circ$ 和 $16.9^\circ\sim 33.2^\circ$ 范围内的地形中，信号传播特性可能相似，它们的时延扩展分布接近；而在坡度介于 $40.2^\circ\sim 62.6^\circ$ 范围内的地形中，时延扩展较小，分布更加集中。在 3 块不同坡度变化的地形上，经观察发现，每个 Rx 的信号传播路径基本为 1~2 条，说明主要以视距和少量的反射路径为主。尽管地形坡度从平缓到陡峭逐渐增加，信号的多径效应并不显著。可能是由于地形简单、环境中可用反射面较少或传播距离较短，导致信号主要沿直达路径传播。这种现象也解释了为什么在较为陡峭的地形中时延扩展较小，因为信号传播路径较短且更加直接，较少受到反射信号的影响，从而减少了延迟。

3 结论

本文引入坡度因子对山地太赫兹无线通信进行分析，通过数字高程模型获取山地数据，并采用射线追踪法确保地形建模的精确性和信号传播路径的准确模拟；比较了不同山地坡度条件的太赫兹信号的传播特性。通过这项研究，揭示了陡峭坡度导致信号衰减增加的现象，深入理解了坡度对无线通信的影响，为提升山地环境中的通信质量和覆盖范围提供了理论依据。此外，本文的研究结果对山地太赫兹通信具有一定的普适性，结论有望推广至更高频段(如 220 GHz、340 GHz)的太赫兹通信。下一步研究工作将考虑更多实际地形因素，如植被覆盖、土壤类型等，以进一步提高仿真结果的准确性和价值。

参考文献：

- [1] MORAITIS N, NIKITA K S. Ray-tracing propagation modeling in urban environment at 140 GHz for 6G wireless networks[J]. IEEE Access, 2023(11):133835-133849. doi:10.1109/ACCESS.2023.3336814.
- [2] LEE I S, KIM K W, OH S J. Ray-tracing-based data expansion from limited sub-THz channel measurements in urban street[J]. IEEE Wireless Communications Letters, 2024,13(5):1305-1309. doi:10.1109/LWC.2024.3368273.
- [3] ABBASI N A, GOMEZ J L, KONDAVETI R, et al. THz band channel measurements and statistical modeling for urban D2D environments[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2023,22(3):1466-1479. doi:10.1109/TWC.2022.3184929.
- [4] 段夫巧, 邱彦衡, 毛开, 等. 基于无人机的空地信道特性测量系统[J]. 微波学报, 2023,39(3):23-29. (DUAN Fuqiao, QIU Yanheng, MAO Kai, et al. Measurement system of air-ground channel characteristics based on UAV[J]. Journal of Microwaves, 2023,39(3):23-29.) doi:10.14183/j.cnki.1005-6122.202303005.
- [5] VERDECIA-PEÑA R, GRASES-VALENZUELA A E, ALONSO J I. Propagation characterization based on ray-tracing at 60 GHz band: a typical indoor office scenario and validation measurements[C]// 2023 IEEE the 24th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC). Shanghai, China: IEEE, 2023: 346-350. doi: 10.1109/SPAWC.53906.2023.10304469.
- [6] AZPILICUETA L, SCHULTZE A, CELAYA-ECHARRI M, et al. Diffuse-scattering-informed geometric channel modeling for THz wireless communications systems[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023,71(10):8226-8238. doi: 10.1109/TAP.2023.3307868.
- [7] LI Yuanbo, WANG Yiqin, CHEN Yi, et al. Channel measurement and analysis in an indoor corridor scenario at 300 GHz[C]// ICC 2022-IEEE International Conference on Communications. [S.l.]: IEEE, 2022: 2888-2893. doi: 10.1109/ICC45855.2022.9839013.
- [8] WU Y Z, KOKKONIEMI J, HAN C, et al. Interference and coverage analysis for terahertz networks with indoor blockage effects and line-of-sight access point association[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021,20(3):1472-1486. doi:10.1109/TWC.2020.3033825.
- [9] ZHANG Yudong, LI Zheng, WANG Junhong, et al. A simplified 2-D ray tracing method for modeling radio wave coverage in tunnel environment[C]// 2022 International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). Harbin,

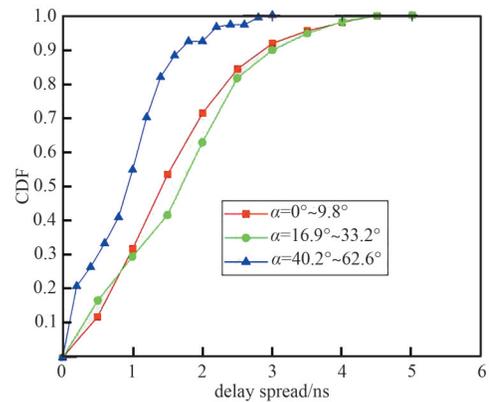


Fig.6 CDF of delay spread in mountainous terrains with varying slopes

图6 不同坡度山地的时延扩展的累积分布函数

- China:IEEE, 2022:1–3. doi:10.1109/ICMMT55580.2022.10023044.
- [10] CUI Z Z, BRISO-RODRÍGUEZ C, GUAN K, et al. Ultra-wideband air-to-ground channel measurements and modeling in hilly environment[C]// ICC 2020–2020 IEEE International Conference on Communications(ICC). Dublin, Ireland:IEEE, 2020: 1–6. doi:10.1109/ICC40277.2020.9148768.
- [11] KHAWAJA W, OZDEMIR O, GUVENC I. UAV air-to-ground channel characterization for mmWave systems[C]// 2017 IEEE the 86th Vehicular Technology Conference(VTC-Fall). Toronto, ON, Canada: IEEE, 2017: 1–5. doi: 10.1109/VTCFall.2017.8288376.
- [12] 胡焱, 伍启燕, 雷霞. 复杂地形中的电波传播损耗预测研究[J]. 微波学报, 2022, 38(4):95–100. (HU Yan, WU Qiyan, LEI Xia. Research on propagation loss prediction of radio wave in complex terrain[J]. Journal of Microwaves, 2022, 38(4):95–100.) doi:10.14183/j.cnki.1005–6122.202204019.
- [13] YI Haofan, GUAN Ke, HE Danping, et al. Terahertz wave propagation and channel characterization[J]. Journal on Communications, 2022, 43(1):34–48. doi:10.11959/j.issn.1000–436x.2022013.
- [14] XING Y C, RAPPAPORT T S. Propagation measurements and path loss models for sub-THz in urban microcells[C]// ICC 2021–IEEE International Conference on Communications. Montreal, QC, Canada: IEEE, 2021: 1–6. doi: 10.1109/ICC42927.2021.9500385.
- [15] 吴强, 邓佩佩, 陈仁爱, 等. 一种基于太赫兹成像的复杂地形自适应定高方法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2024, 22(6): 617–626. (WU Qiang, DENG Peipei, CHEN Ren'ai, et al. An adaptive height measuring method in complex terrain based on terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2024, 22(6): 617–626.) doi:10.11805/TKYDA2024091.
- [16] SHI Y, ENAMI R, WENSOWITCH J, et al. Measurement-based characterization of LOS and NLOS drone-to-ground channels[C]// 2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference(WCNC). Barcelona, Spain:IEEE, 2018:1–6. doi:10.1109/WCNC.2018.8377104.
- [17] CUI Z Z, BRISO-RODRÍGUEZ 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, 18(9):1804–1808. doi:10.1109/LAWP.2019.2930547.
- [18] ZHANG Zhaolei, LIU Yu, HUANG Jie, et al. Channel characterization and modeling for 6G UAV-assisted emergency communications in complicated mountainous scenarios[J]. Sensors, 2023, 23(11):4998. doi:10.3390/S23114998.
- [19] 丁鹏辉, 王青旺, 杨璐, 等. 110 GHz 频段山地无人机视距通信概率及传播损耗研究[J]. 电子技术应用, 2024, 50(7):39–45. (DING Penghui, WANG Qingwang, YANG Lu, et al. Study of UAV line-of-sight communication probability and propagation loss for mountain in 110 GHz band[J]. Application of Electronic Technique, 2024, 50(7):39–45.) doi:10.16157/j.issn.0258–7998.245109.
- [20] HE Danping, AI Bo, GUAN Ke, et al. The design and applications of high-performance ray-tracing simulation platform for 5G and beyond wireless communications:a tutorial[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(1):10–27. doi:10.1109/COMST.2018.2865724.
- [21] YI H F, HE D P, MATHIOPOULOS P T, et al. Ray tracing meets terahertz:challenges and opportunities[J]. IEEE Communications Magazine, 2024, 62(2):40–46. doi:10.1109/MCOM.001.2200454.
- [22] 赵轩. 基于射线追踪法的毫米波室内信道建模研究[J]. 通讯世界, 2020, 27(2):95–96. (ZHAO Xuan. Research on millimeter-wave indoor channel modeling based on ray-tracing method[J]. Telecom World, 2020, 27(2):95–96.) doi:10.3969/j.issn.1006–4222.2020.02.058.
- [23] CUI Zhuangzhuang, GUAN Ke, HE Danping, et al. Propagation modeling for UAV air-to-ground channel over the simple mountain terrain[C]// 2019 IEEE International Conference on Communications Workshops(ICC Workshops). Shanghai, China: IEEE, 2019:1–6. doi:10.1109/ICCW.2019.8756679.
- [24] JIA Guiyuan, WU Muqing, ZHAO Min, et al. A 3-D channel model for high-speed railway communications in mountain scenario[C]// The Proceedings of the Second International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems. Cham, Switzerland:Springer, 2014:1173–1181. doi:10.1007/978–3–319–00536–2_133.
- [25] SUN R Y, 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. doi: 10.1109/TVT. 2016. 2585504.
- [26] BIANCO G M, GIULIANO R, MARROCCO G, et al. Lora system for search and rescue:path-loss models and procedures in mountain scenarios[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(3):1985–1999. doi:10.1109/JIOT.2020.3017044.

作者简介：

张 苗(1999-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线信道建模 .email:20232104011@stu.kust.edu.cn.

顾业博(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为无线通信、物理层安全.

刘佳丽(1991-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为无线通信、无人智能.

王青旺(1990-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为人工智能、可解释多模融合智能认知等.

宋 健(1987-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为智能通信系统.

(上接第28页)

- [2] 史亮,左盼,周兴龙. 大动态微波宽带 SDLVA 的设计原理与功能调整[J]. 电子工艺技术, 2020,41(3):138-141,145. (SHI Liang, ZUO Pan, ZHOU Xinglong. Design principle and functional adjustment of large dynamic microwave broadband SDLVA[J]. Electronics Process Technology, 2020,41(3):138-141,145.) doi:10.14176/j.issn.1001-3474.2020.03.004.
- [3] 刘雪莲,蒋颖丹,张沁枫. 一种宽带大动态范围对数检波器电路的设计[J]. 固体电子学研究与进展, 2019,39(6):444-449. (LIU Xuelian, JIANG Yingdan, ZHANG Qinfeng. Design of a broadband large dynamic range logarithmic detector circuit[J]. Research and Progress in Solid State Electronics, 2019,39(6):444-449.)
- [4] 卿君,何卫国,陈明川,等. 基于 HSCH-9162 检波二极管的检波电路设计与测试[J]. 工业技术创新, 2022,9(3):135-141. (QING Jun, HE Weiguo, CHEN Mingchuan, et al. Design and test of detection circuit based on HSCH-9162 detector diode[J]. Industrial Technology Innovation, 2022,9(3):135-141.) doi:10.14103/j.issn.2095-8412.2022.06.018.
- [5] 王睿,张柳,王欢. 宽带检波对数放大技术及其应用[J]. 电子制作, 2020(21):48-49. (WANG Rui, ZHANG Liu, WANG Huan. Broadband detection logarithmic amplification technology and its applications[J]. Journal of Electronic Production, 2020(21):48-49.) doi:10.3969/j.issn.1006-5059.2020.21.018.
- [6] 顾希雅,姚常飞. V 波段宽带检波器的研究[J]. 计算机与数字工程, 2024,52(10):3165-3171. (GU Xiya, YAO Changfei. Research on V-band broadband detector[J]. Computer and Digital Engineering, 2024,52(10):3165-3171.)
- [7] 刘海瑞,POWELL Jeff, VIEGAS Colin, 等. 基于平面肖特基二极管的 W 波段检波器[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2016,14(5):668-672. (LIU Hairui, POWELL Jeff, VIEGAS Colin, et al. W-band detector based on planar Schottky diode[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2016,14(5):668-672.) doi:10.11805/TKYDA201605.0668.

作者简介：

赵丽萍(1978-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为微波毫米波前端、宽带检波对数放大技术研究 .email: zdmjsw2003@163.com.

张 冰(1987-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频电路、控制电路.

杨秀强(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频电路.

辜 霄(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频电路.

庞玉会(1978-), 女, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为射频电路.

杨先国(1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频电路.

吴 昊(1987-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为射频电路.