

低空无线信道小尺度衰落特性研究

于坤灿, 向新*, 王鹏, 董鹏宇

(空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

摘要 针对复杂情况下低空无线信道特性,选取近山地城镇环境视距和非视距2个场景在2.4 GHz频率下开展实地低空无线信道测量活动,分别收集1200组信道的多径幅度值,结合统计性方法分析其对应的均方根时延扩展与莱斯因子2种小尺度衰落特性,并进行拟合。测试结果表明:2种场景的均方根时延扩展平均值分别为255 ns、1429 ns,莱斯 K 因子平均值分别为3.8 dB、0.32 dB,前者莱斯 K 因子大于0 dB的比例为58.68%,说明该环境下莱斯信道为主;后者大于0 dB的比例为10.16%,说明该环境下瑞利信道为主;拟合的结果表明:均方根时延扩展Gamma拟合,莱斯 K 因子正态拟合,最后得出了对应的概率密度分布函数。

关键词 低空信道;均方根时延;莱斯 K 因子

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2023.05.012

中图分类号 TN929.5 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2023)05-0095-07

Research on Small-Scale Fading Characteristics of Low Altitude Wireless Channel

YU Kuncan, XIANG Xin*, WANG Peng, DONG Pengyu

(Aviation Engineering School, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract Under condition of complex conditions, this test is made, and two campus scenes are selected for field being at low-altitude wireless channel measurement with 2.4 GHz frequency. Multi-path amplitude values of 1200 groups and 1200 groups of channels are collected respectively. The corresponding root-mean-square time delay extension and Rice factor of the two small-scale fading characteristics are analyzed with statistical methods, and the fitting is made up. The test results show that the average root-mean-square delay spread of the two scenarios is 255 ns and 1429 ns respectively, and the average Rice K factor is 3.8 dB and 0.32 dB respectively, and the ratio of the former Rice K factor being greater than 0 dB is 58.68%, indicating that the Rice channel is the main channel in this environment. The proportion of the latter being greater than 0 dB is 10.16%, indicating that Rayleigh channel is the main channel in this environment. The fitting results show that the root mean square delay extension is a Gamma fitting, and the Rice K factor is a normal fitting, and the probability density distribution functions of the two characteristics are obtained.

Key words low altitude channel; root mean square time delay; Rice K factor

收稿日期: 2023-03-02

基金项目: 空军工程大学研究生创新实践基金(CXJ2022006)

作者简介: 于坤灿(1997-),女,河北衡水人,硕士生,研究方向为无线通信。E-mail:15631813108@163.com

通信作者: 向新(1974-),男,湖北枝江人,教授,博士生导师,研究方向为无线电通信与导航。E-mail:xxisdn2002@sina.com

引用格式: 于坤灿,向新,王鹏,等.低空无线信道小尺度衰落特性研究[J].空军工程大学学报,2023,24(5):95-101. YU Kuncan, XIANG Xin, WANG Peng, et al. Research on Small-Scale Fading Characteristics of Low Altitude Wireless Channel[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24(5): 95-101.

近年来,无人机技术发展迅猛,在军事和民用领域中的运用引起了行业学者对其通信问题的广泛关注。中小型无人机飞行场景为低空环境,飞行高度一般在几百米以下,该区域树木、建筑物、山丘等物体会阻碍和遮挡无人机与地面的通信信号,信号在多个障碍物的反射和绕射下传输,产生多条传播路径,使得信号相位和幅度随机变化,从而引起多径衰落。因此,针对低空无人机的通信因通信环境复杂,出现的通信质量差、信号不稳定等问题,深入研究低空无线信道,并分析其多径衰落特性具有重要的意义。

在过去的研究中,已经有许多学者对低空无线信道中的小尺度衰落特性进行了研究,其中文献[1~2]在 2.5 GHz 频率下分别对由中低高度的建筑、开阔的草地、树木、道路和湖泊组成的 2 个郊区场景进行了低空无人机空地信道测量,通过研究小尺度衰落特性提出了一种基于经验动态建模的信道模型,用于分析低空无人机的传输特性,该模型考虑了无人机的高度和水平变化、地形的影响等因素,更有效地描述了信道的时变性。文献[3]研究了 5.8 GHz 频率内由平坦地形、单层住宅组成的住宅区和只有低于 2 m 高灌木公园障碍物的沙漠区进行低空空地信道实测活动,并比较 2 种地形下的小尺度衰落特性。文献[4~5]在障碍物低于 15 m 建筑物的半城市场景下分别进行了 1 GHz、4 GHz、12 GHz、24 GHz 4 个频率内的空地信道测量,并基于多频率信道测量的数据结果进行了经验建模,提出了一种新的阴影衰落自相关模型。文献[6]在低空相对开放、建筑物密度低、高度低的郊区环境下进行了 3.9 GHz 频率的空地信道测量,并通过射线追踪和三维建模的形式对均方根时延扩展、路径损耗等信道特性进行了验证分析。文献[7~9]基于 L 波段和 C 波段对海域、郊区、丘陵、山脉、城市 5 种场景进行了多次实地低空空地信道测量,并根据测量的数据对低空信道的多径分量、时延扩展等信道参数进行分析,发现信道的散射多径分量在低空场景下存在随机性和明显间歇性。这些研究通过探究不同频率与单一场景下的无人机空地信道的特征参数进行无线信道的建模,但研究场景多为开阔地带,而在存在大型反射障碍物(如山体)、小型反射障碍物(如建筑)以及众多树木等复杂环境下的低空无线信道方面缺乏深入探讨。因此,本文根据我国无人机在 840.5~845 MHz、1430~1444 MHz 和 2408~2440 MHz 频率下的使用规定,选择 2.4 GHz 在低空场景下进行信道测量,通过分析信道测量结果,深入探讨了低空无线信道小尺度衰落特性问题,并提出相应的特性分布函数,以期构建适用于低空复杂环境的信道模型

提供真实且有价值的参考依据。

1 实地信道测量

1.1 场景分析

低空环境通常包括复杂的地形和地貌,如丘陵、峡谷、泥潭和河流等。同时,人造和自然障碍物居多,例如建筑物、树木和山丘等。这些障碍物可能导致信号传输过程中具有多个散反射路径。了解低空环境的复杂性并采取相应处理方法是确保无人机通信稳定的关键所在。本文针对在视距和非视距 2 种场景下对无线信道测量进行了研究,在视距场景下选择没有任何遮挡物的开阔区域作为测试环境;在非视距场景下,则选用建筑密集或树木茂盛等情况导致收发端不可见的区域进行测试。通过记录接收到的信道多径幅值分析小尺度衰落特性,2 种场景示意图见图 1。

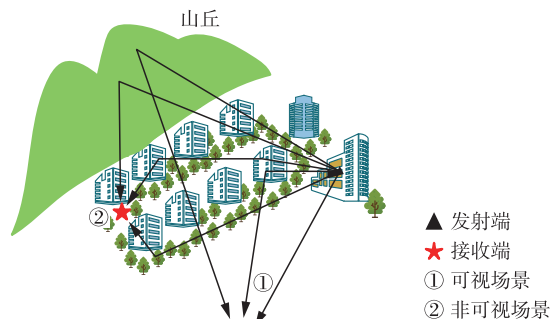


图 1 非视距场景与视距场景示意图

1.2 场景测试

1.2.1 测试原理

信道测试采用基于软件无线电的收发机,并通过滑动相关法进行信道估计完成信道测量。系统参数见表 1,原理框图与收发链路示意图见图 2 和图 3,其中接收机是 AD9361+FPGA 架构的软件无线电接收机。发射端对已知 PN 序列进行 QPSK 调制并由全向天线发送,通过网线直接将 AD9361 输出的下变频数据保存到上位机,之后由 MATLAB 接收程序进行处理。接收端完成匹配滤波与同步,并与本地 PN 序列进行滑动相关来估计信道的冲激响应。

表 1 系统参数

参数	设置值
中心频率/GHz	2.4
符号速率/M	9.8
符号间隔/ns	102
信号带宽/MHz	13.72
采样率/MHz	29.4

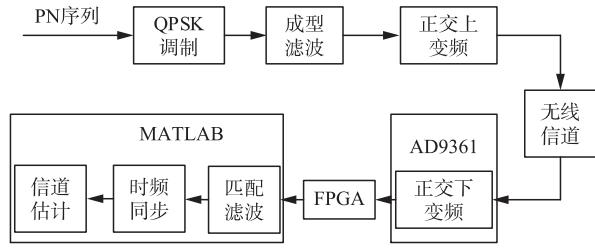


图 2 信道测试原理

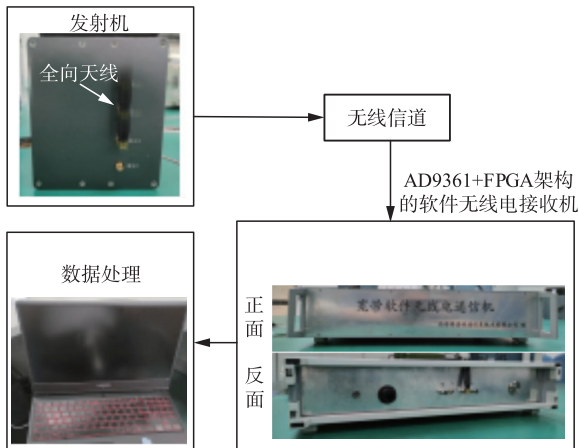


图 3 收发链路示意图

1.2.2 测试及处理流程

测量空地信道时,发射天线距离地面高度为 20 m,并与地面垂直放置,以避免因天线极化方向出现误差;之后在视距场景和非视距场景内确定接收天线位置并放置,所选接收天线位置与发射天线水平距离均为 50 m;分别对 2 个场景在 2.4 GHz 频率内收发两端的无线信道进行测量,重复该步骤,进行多次蒙特卡洛实验,得到多组信道数据并保存,之后通过 Matlab 结合最大似然估计对测量数据进行筛选,去除差异过大的不可靠数据。留下剩余的最佳数据,得到多组信道数据,在视距场景下得到 1 200 组信道及每信道多径幅值,在非视距场景下得到 1 200 组信道及每信道多径幅值,如图 4~图 5 所示,2 种场景下信道多径个数及占比如图 6~图 9 所示。

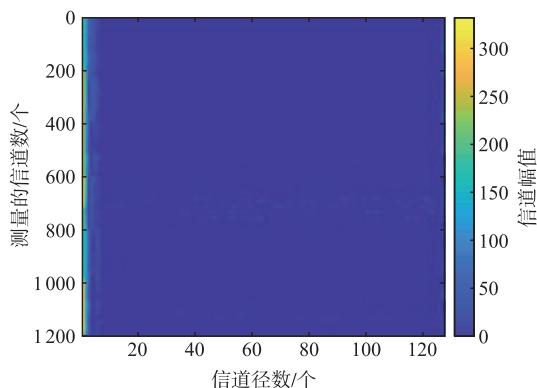


图 4 视距场景下测量的信道系数

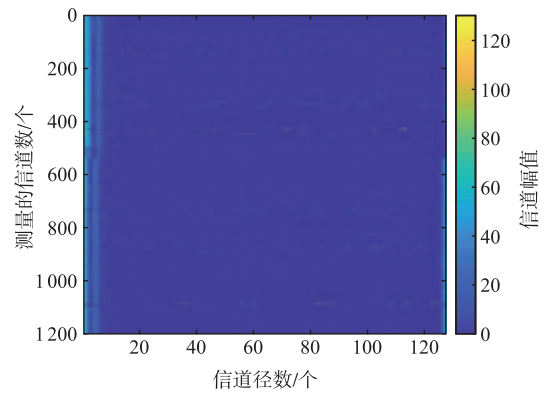


图 5 非视距场景下测量的信道系数

最后对测量得到的数据进行均方根时延扩展和莱斯 K 因子统计分析,并根据测试数据与 CDF 拟合图形得出本环境信道特性相关结论,2 种参数的具体处理分析见第 2 节。

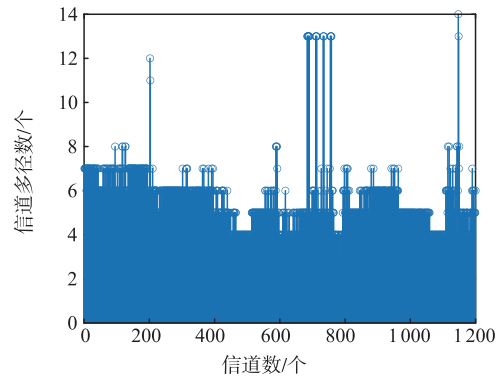


图 6 视距场景下各信道多径个数测试结果

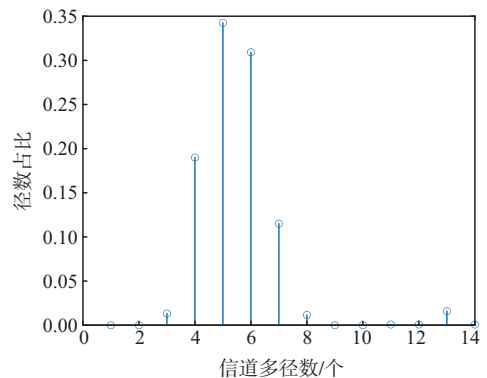


图 7 视距场景下各信道的多径个数占比

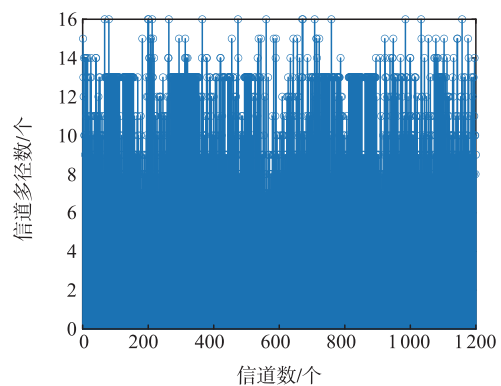


图 8 非视距场景下各信道多径个数测试结果

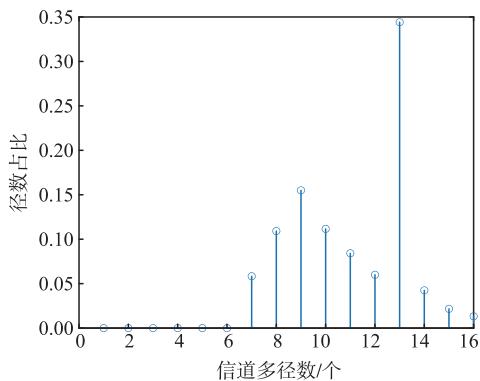


图9 非视距场景下各信道多径个数占比

2 小尺度衰落特性分析

小尺度衰落一般指短距离或短时间内信号场强的快速变化情况^[10]。均方根时延扩展、莱斯 K 因子 2 个参数对小尺度衰落特性有较大的影响,即均方根时延扩展值越大,信号在时域上的扩展效应越大,多径效应越明显,信道的小尺度衰落越大;莱斯 K 因子越大,多径干扰越不明显,小尺度衰落越小。因此,本文根据测试信道结果对这 2 个参数进行分析和拟合,观察与特性分析数据拟合度最高的分布函数,得到该小尺度衰落特性的统计特征,从而更直观地了解小尺度衰落特性的分布情况,以满足对未来低空无线信道小尺度衰落特性的预测^[11]。

2.1 均方根时延扩展分析

均方根时延扩展 (root mean square delay spread, RMS-DS) 是分析无线信道特性的重要参数,代表了信号在时域上的分散程度,亦可表示小尺度衰落程度。当均方根时延扩展较小时,多径之间的时延差异相对较小,多径之间的信号相位相对接近,信号在时间上的发生重叠,从而减少了多径干扰,小尺度衰落的程度也相对较小。反之,当均方根时延扩展较大时,多径之间的时延差异较大,信号相位相差较大,信号发生干扰和衰落的概率增加,小尺度衰落的程度也相对较大。均方根时延扩展如式 (1) 所示:

$$\tau_{\text{rms}} = \sqrt{E(\tau^2) - (\bar{\tau})^2} \quad (1)$$

式中: $E(\tau^2)$ 为信道功率时延分布平方的期望。

$$E(\tau^2) = \frac{\sum_i p_i(\tau_i) \tau_i^2}{\sum_i p_i(\tau_i)} \quad (2)$$

式中: $p_i(\tau_i)$ 为每一条传输路径的功率; τ_i 为每一条传输路径比初始传输路径时刻的延迟时间。

$$\tau_i = \tau_{N-1} - \tau_0 \quad (3)$$

式中: τ_0 为初始时刻; τ_{N-1} 为每一传输路径的时刻; $\bar{\tau}$ 为信道功率时延分布的一阶矩,即平均过量时延。

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_i p_i(\tau_i) \tau_i}{\sum_i p_i(\tau_i)} \quad (4)$$

均方根时延的扩展分析步骤见表 2。

表 2 基于测量结果的均方根时延扩展值分析步骤

输入	测量的 1 200 组信道及信道多径幅度值
输出	1 200 组信道及各信道对应的均方根时延扩展值
步骤 1	信道多径幅值进行平方得到信道多径的功率值 $p_i(\tau_i)$;
步骤 2	对每一信道多径功率进行归一化处理,即将信道中第 1 径数化为 1;
步骤 3	对测量得到的全部信道重复步骤 2 得到归一化处理后所有信道多径功率;
步骤 4	计算多径时延,符号间隔是 102 ns,即相邻 2 个离散信号点之间的时间间隔是 102 ns,因此第 i 径的时延为 $\tau_i = 120(i-1)$ ns;
步骤 5	通过式 (1) 分别计算 2 种环境的均方根时延扩展;
步骤 6	整理步骤 5 中运行出的数据,如图 10~图 11 和表 3 所示。

图 10~图 11 分别展示了视距场景与非视距场景的均方根时延扩展值,其中横坐标为测量多次真实环境得到信道个数,纵坐标为每信道对应均方根时延扩展的数值。由表 3 所示,视距场景下的 RMS-DS 值较小,平均值为 255 ns;非视距场景 RMS-DS 值较大,平均值为 1 429 ns,与图 6~图 9 多径分量的变化趋势相同,图 12 为 2 个场景下 RMS-DS 的累积分布函数 (cumulative distribution function, CDF) 对比图,其中 2 种场景下的均方根时延扩展值的 CDF 都能较好地拟合 Gamma 分布,形状参数分别为 0.73 和 2.66,尺度参数分别为 451.2 和 990,该 2 种场景下的 RMS-DS 概率密度函数见式 (5),其次通过拟合图可知在视距场景下,72.39% 的 RMS-DS 值在 148 ns 以内,6.98% 的 RMS-DS 值大于 1 200 ns。在非视距场景下,RMS-DS 最小值大于 147.88 ns,79.83% 以上的 RMS-DS 值大于 1 200 ns。

$$f(x) = \frac{1}{\Gamma(\alpha)\beta^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad (5)$$

式中: α 为形状参数; β 为尺度参数, $x \geq 0$ 。

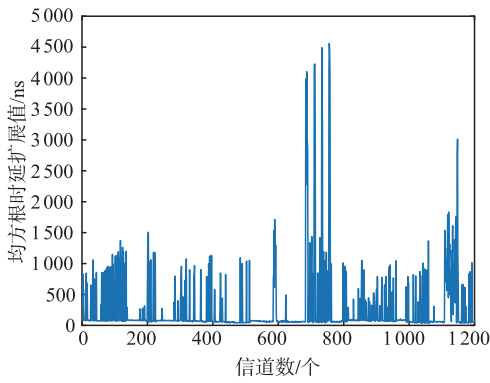


图 10 视距场景信道均方根时延扩展仿真结果

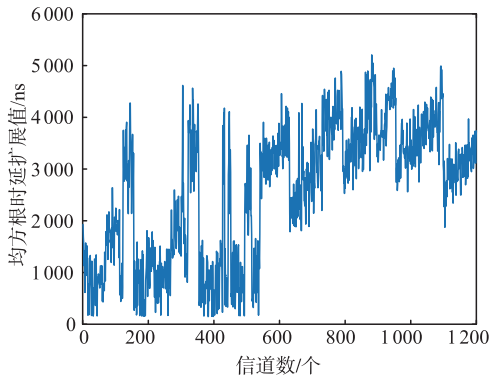


图 11 非视距场景信道均方根时延扩展仿真结果

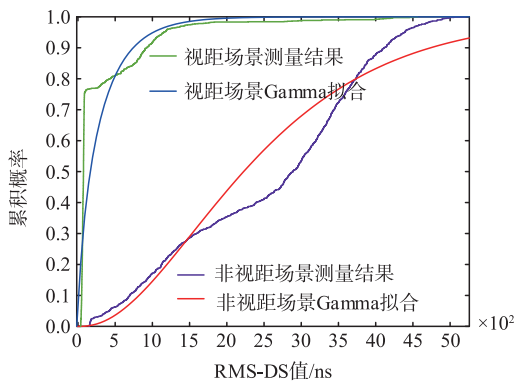


图 12 RMS-DS 测量值及拟合结果

表 3 均方根时延扩展值统计

值/ns	视距场景	非视距场景
最大值	4 560.7	4 927.2
中位值	81.6	1 233.8
平均值	255.1	1 429.5
标准差	500.4	958.8

2.2 莱斯 K 因子分析

莱斯 K 因子(Rice K-factor)是衡量无线信道小尺度衰落特性的重要参数之一,它描述了直射波与散射波之间强度比值。莱斯 K 因子值越大,多径之间的干扰越不明显,小尺度衰落程度越小。与此相反,当莱斯 K 因子值越小,多径之间的干扰就越大,小尺度衰落的程度大。通过对信道测量结果求均值,信号中与均值相同的为 LOS 信号能量。而

NLOS 能量则是信道的除 LOS 能量外的其他能量,可通过式(6)得出信道的莱斯 K 因子值。

$$K = \frac{c^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

式中: c^2 为接收信号中直射波部分的信号功率; $2\sigma^2$ 为接收信号中的反射、散射等信号功率的总和。分析步骤见表 4。

表 4 基于测量结果的莱斯 K 因子值分析步骤

输入	测量的 1 200 组信道与 1 200 组信道多径幅度值
输出	1 200 组信道与 1 200 组信道各自对应的莱斯 K 因子值。
步骤 1	信道多径幅度进行平方得到信道多径的功率值 $p_i(\tau_i)$;
步骤 2	对每一信道多径功率进行归一化处理,即将信道中第 1 径数化为 1;
步骤 3	对测量得到的全部信道重复步骤 2 得到归一化处理后所有信道多径功率;
步骤 4	提取每一信道的第 1 径,对剩下径对应的归一化功率求和;
步骤 5	通过式(3)计算信道的莱斯 K 因子值;
步骤 6	整理步骤 5 中运行出来的数据,并展示如图 13~14 与表 5 所示。

本文通过计算信道测量数据得到 2 种环境下的莱斯因子值,并对其 CDF 拟合结果对比,结果如图 15 所示,其中虚线代表实际测量分析的结果,实线代表根据 CDF 拟合的结果,其中 2 种场景下的莱斯 K 因子的 CDF 都能较好地拟合正态分布,2 种场景下的莱斯 K 因子的标准差分别为 2.2 dB 和 2.44 dB,2 种场景下的莱斯 K 因子概率密度函数如式(7)所示;其中视距场景下的莱斯 K 因子平均值大于非视距场景,分别为 3.8 dB 和 0.32 dB,与 RMS-DS 值变换趋势相反,这是因为在视距场景中建筑物较少,传播环境相比较宽阔,而非视距场景中的建筑物较多,传播环境复杂。为了更好地比较 2 种场景下莱斯 K 因子值,本文分析计算了 2 种环境下莱斯 K 因子大于 0 dB 的占比分别为 58.68% 和 10.16%,更加表明视距场景内的多径分量少于非视距场景,数据计算值与图 6~图 9 实际场景测量多径分量的特点相符合。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中: μ 为对应的期望; σ 为标准差。

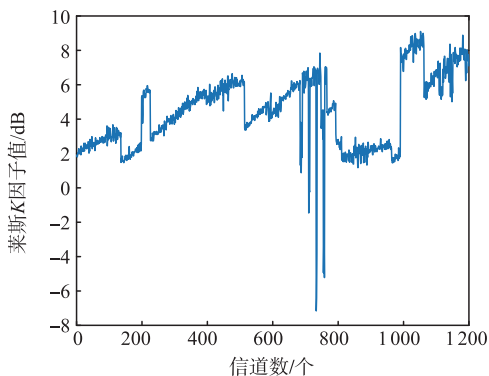


图 13 视距场景信道莱斯 K 因子仿真结果

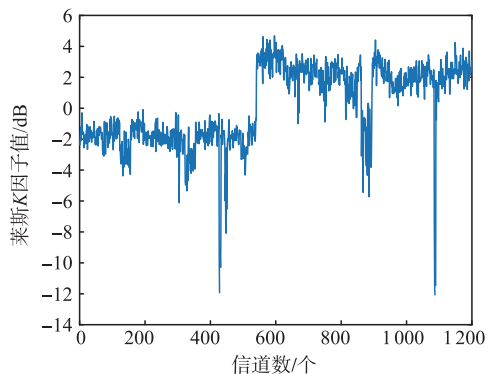


图 14 非视距场景信道莱斯 K 因子仿真结果

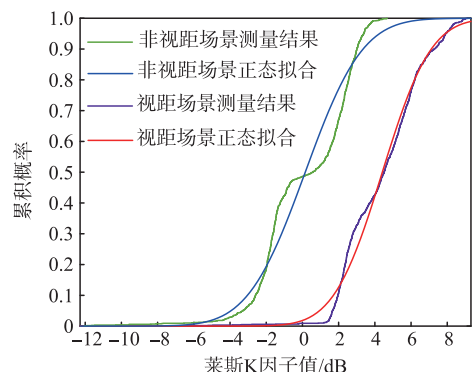


图 15 莱斯 K 因子测量及拟合结果

表 5 莱斯 K 因子值统计

数值	视距场景	非视距场景
最大值/dB	9.1	4.70
中位值/dB	3.6	1.20
平均值/dB	3.8	0.32
标准差/dB	2.2	2.44
大于 0 dB 占比/%	58.68	10.16

3 结语

在近山地城镇环境条件下,进行了 2.4 GHz 频率下的低空无线信道测量活动,包括视距和非视距 2 个场景。共收集了 1 200 组信道多径幅度值数据,并展现了 2 种场景下的信道多径个数。结果表明,在视距场景中主要存在 5 径,而在非视距场景中则

主要存在 13 径。基于测量数据分析得出结论:2 种场景下的均方根时延扩展平均值分别为 255 ns 和 1 429 ns;莱斯 K 因子平均值分别为 3.8 dB 和 0.32 dB。此外,本文还对 2 种场景下的均方根时延扩展和莱斯 K 因子累积分布函数曲线进行了拟合,发现均方根时延扩展可以较好地拟合 Gamma 分布,莱斯 K 因子值可以较好地拟合正态分布,并给出了相应的概率密度公式、形状参数 α 、尺度参数 β 、标准差等重要指标。最后,分别分析了 2 种场景下均方根时延值大于 1 200 ns 和小于 148 ns 与莱斯 K 因子大于 0 dB 和小于 0 dB 的占比值的情况,发现视距场景莱斯信道为主,非视距场景瑞利信道为主。这些结果将为低空无线通信技术提供新的理论支持,提高低空无人机通信的可靠性和稳定性。

参考文献

- [1] HUANG Z, RODRÍGUEZ-PIÑEIRO J, DOMÍNGUEZ-BOLAÑO T, et al. Empirical Dynamic Modeling for Low-altitude UAV Propagation Channels [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2021, 20(8): 5171-5185.
- [2] RODRÍGUEZ-PIÑEIRO J, DOMÍNGUEZ-BOLAÑO T, CAI X, et al. Air-to-Ground Channel Characterization for Low-Height UAVs in Realistic Network Deployments[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2020, 69(2): 992-1006.
- [3] GUTIERREZ R M, YU H, RONG Y, et al. Comparison of UAS-to-Ground Small-Scale Fading in Residential and Mountainous Desert Terrains[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(10): 9348-9358.
- [4] CUI Z, BRISO-RODRIGUEZ C, GUAN K, et al. Measurement-Based Modeling and Analysis of UAV Air-Ground Channels at 1 and 4 GHz[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2019, 18(9): 1804-1808.
- [5] CUI Z, BRISO-RODRIGUEZ C, GUAN K, et al. Multi-Frequency Air-to-Ground Channel Measurements and Analysis for UAV Communication Systems [J]. IEEE Access, 2020(8): 110565-110574.
- [6] 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 & Propagation, 2019, 13(9): 1503-1508.

- [7] MATOLAK D W , SUN R. 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(1):66.
- [8] SUN R , MATOLAK D W. Air-Ground Channel Characterization for Unmanned Aircraft Systems-Part II: Hilly & Mountainous Settings[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017(3):1-1.
- [9] DAVID, W, MATOLAK, et al. 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.
- [10] 啜钢,王文博,常永宇,等. 移动通信原理与系统[M]. 北京:北京邮电大学出版社, 2011.
- [11] 周涛,李华玉,秦鑫彤,等. 高速铁路信道小尺度衰落与非平稳特性研究[J]. 铁道学报,2019,41(4):88-95.
- [12] ZHU Q, MAO K, SONG M, et al. Map-Based Channel Modeling and Generation for U2V mmWave Communication[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(8): 8004-8015.
- [13] KAYA A, DE BEELDE B, JOSEPH W, et al. Geodesic Path Model for Indoor Propagation Loss Prediction of Narrowband Channels[J]. Sensors, 2022, 22(13): 4903.
- [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 & Propagation, 2019, 13(9): 1503-1508.
- [15] BRISO C, CALVO C, CUI Z, et al. Propagation Measurements and Modeling For Low Altitude UAVs from 1 to 24 GHz[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(3): 3439-3443.
- [16] 3GPP. Study on Channel Model for Frequencies from 0.5 to 100 GHz[R]. ETSI TR 138 901 V16.1.0,2020.

(编辑:徐楠楠)