

低空经济下水利无人机河湖监测通信系统研究

Research on Water Conservancy Unmanned Aerial Vehicle River and Lake Monitoring Communication System for Low-Altitude Economy

陆皓^{1,2}, 冯利民¹, 赵莉², 钱春晓¹, 冯子轩³ (1. 中国联通甘肃分公司, 甘肃兰州 730050; 2. 兰州理工大学, 甘肃兰州 730050; 3. 福州大学, 福建福州 350002)

Lu Hao^{1,2}, Feng Limin¹, Zhao Li², Qian Chunxiao¹, Feng Zixuan³ (1. China Unicom Gansu Branch, Lanzhou 730050, China; 2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

摘要:

阐述了低空经济内涵、政策支持与城市布局,解析无人机河湖监测通信系统“无人机终端—无线链路—地面站”三层架构及应用优势。基于 Matlab 构建 2.4 GHz 频段仿真模型,模拟不同通信距离下误码率与吞吐量性能。结果表明:低信噪比时误码率随信噪比快速下降,中高信噪比后趋缓且距离越远误码率越高,通信距离增长会显著劣化系统性能;吞吐量先快速增长后饱和,近距离饱和上限更高。

关键词:

低空经济;智慧水利;无人机;误码率;吞吐量
doi: 10.12045/j.issn.1007-3043.2026.05.005
文章编号: 1007-3043(2026)05-0024-06
中图分类号: TN929.5
文献标识码: A
开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Abstract:

It expounds the connotation, policy support and urban layout of low-altitude economy, and analyzes the three-layer architecture of “UAV terminal – wireless link – ground station” and its application advantages in the UAV-based river and lake monitoring communication system. A simulation model operating at the 2.4 GHz frequency band is established based on Matlab to simulate the bit error rate (BER) and throughput performance under different communication distances. The simulation results show that at low signal-to-noise ratio (SNR), the BER decreases rapidly with the increase of SNR. The decreasing trend slows down in the medium and high SNR range, and the BER increases as the communication distance extends. The growth of communication distance will significantly degrade the system performance. In terms of throughput, it increases rapidly at first and then tends to saturate, with a higher saturation upper limit in short-distance scenarios.

Keywords:

Low-altitude economy; Smart water conservancy; Unmanned aerial vehicle (UAV); Bit error rate (BER); Throughput

引用格式: 陆皓,冯利民,赵莉,等. 低空经济下水利无人机河湖监测通信系统研究[J]. 邮电设计技术, 2026(5): 24–29.

1 概述

随着低空经济被纳入国家战略性新兴产业,低空空域的商业化与技术化应用迎来爆发式增长^[1],无人机作为核心载体,正与各行业深度融合并催生创新解

决方案。智慧水利作为现代化水利发展的核心方向,依托物联网、人工智能等技术实现治水、管水、用水的智能化升级,而河湖监测作为水利管理的关键环节,面临着覆盖范围广、地形复杂、实时性要求高等挑战,传统监测手段难以满足精准化、高效化需求。无人机凭借灵活机动、覆盖全面、响应迅速等优势,成为河湖监测的理想技术手段,其与智慧水利的融合已成为行业发展必然趋势^[2]。然而,无人机河湖监测的核心在

基金项目: 甘肃省科技计划资助项目(22YF7GA056)

收稿日期: 2026-03-10

于监测数据的实时可靠传输,无线通信链路的性能直接决定监测任务的成败,通信距离、信噪比等因素对误码率和吞吐量的影响亟待量化验证。为此,本文聚焦低空经济背景下无人机河湖监测通信系统,先阐述低空经济发展内涵与政策支撑,解析无人机与智慧水利的融合应用机制及系统架构;进而基于 Matlab 平台构建 2.4 GHz 频段通信仿真模型,模拟开阔水面场景下不同通信条件的性能表现;最终根据结果明确链路的性能特征,为工程实践中的参数配置与作业规划提供科学依据。

2 低空经济发展时代内涵与政策支撑

低空经济是以海拔 1 000 m 以下低空空域为核心载体,深度融合无人机、卫星通信、物联网、人工智能等新兴技术,开展商业运营与技术创新活动形成的新型经济形态。核心价值在于激活低空资源潜力,构建“空一地一人”协同的立体服务网络,涵盖农业监测、环境监控、应急救援、智能交通管理、低空旅游等多元应用场景,成为推动产业升级与经济增长的新引擎^[3]。

作为国家战略性新兴产业,低空经济正加速与各行业深度融合,依托无人机等核心装备的灵活机动优势,破解传统行业作业效率低、覆盖范围有限、人力成本高等问题,为城市高质量发展注入强劲动力^[4]。无人机系统作为低空经济的核心支撑,由飞行系统、任务载荷系统、地面控制系统构成,适配不同场景的作业需求,为低空经济的规模化发展提供技术基础。

国家层面已经构建了全方位的政策保障体系,为低空经济发展保驾护航。从 2021 年开始,《国家综合立体交通网规划纲要》《“十四五”现代综合交通运输体系发展规划》^[1]等政策相继出台,这些政策将低空经济纳入国家规划,明确推进空域管理改革与产业融合发展。2023 年,中央经济工作会议将低空经济列为战略性新兴产业,2024 年的政府工作报告进一步将其定位为新增增长引擎,凸显国家在战略上对其的重视^[2]。

在地方层面,深圳、广州、合肥等城市率先布局,形成各具特色的发展格局。深圳聚集了 1 700 多家无人机企业,年产值达 960 亿元,占全球消费类无人机市场的 74%^[5];广州聚集了 50 家低空经济相关企业,年产值约 130 亿元;合肥出台专项行动计划,在 2025 年建成具有国际影响力的“低空之城”。各地通过企业集聚、专项规划、试点示范等举措,加速“低空之城”建设,形成上下联动、协同推进的低空经济发展新格局^[6]。

3 无人机与智慧水利融合应用机制及系统架构

无人机与智慧水利的融合,以新一代信息技术为纽带,构建“数据采集—传输—分析—应用”全链条协同机制^[7],通过技术互补破解传统水利监测难题,实现河湖管理的智能化升级。

3.1 应用机制

3.1.1 多维感知与数据采集机制

依托无人机系统的飞行平台优势,结合任务载荷系统的多元化配置,构建全域覆盖的水利感知网络。无人机可搭载多光谱相机、pH 值传感器、溶解氧传感器等设备,按预设航线或远程操控模式,开展全天候、广范围的数据采集^[8]。既能够实时捕捉水位涨幅、堤坝裂缝、岸线侵占等视觉信息,又能精准获取水质参数、植被覆盖率等环境数据,同时通过 GNSS 定位模块实现采集点的精准定位,解决传统人工监测覆盖范围有限、危险区域难以抵达、数据时效性不足等问题^[9]。

3.1.2 无线通信与数据传输机制

采用“无人机终端—无线链路—地面站”三层架构,保障监测数据的实时可靠传输。无人机终端预处理采集数据后,通过 2.4 GHz(传输距离 1~5 km)或 5.8 GHz(抗干扰性强)频段的无线通信链路,采用 QPSK/8PSK 调制方式,将数据以 2~10 Mbit/s 的速率传输至地面站;地面站层通过数据接收模块和服务器完成数据解析、存储与可视化展示,同步生成监测报告,实现“采集—传输—呈现”的无缝衔接,为后续分析决策提供即时数据支撑。

3.1.3 智能分析与决策支撑机制

融合大数据、人工智能技术,构建水利专用分析模型^[10]。通过对无人机采集的海量数据进行训练学习,形成可自动识别河堤损坏、河道漂浮物、违章建筑、非法采砂等异常情况的 AI 算法,实现“实时巡、智能判”;同时结合历史数据与实时监测结果,建立三维模型,辅助水利管理部门开展蓄滞洪区预警、防汛指挥调度等工作,将数据资源转化为科学决策依据,提升治水、管水的精准度^[11]。

3.1.4 场景适配与高效应用机制

针对水利行业核心需求,形成多场景精准适配的应用模式。在防汛抗旱场景中,无人机快速进入人员车辆无法抵达的险情区域,实时回传水情图像,数据传输延迟小于 1 s,为应急决策提供支撑;在水质监测

中,沿航线采集多参数数据,生成水质分布图,精准识别蓝藻水华等污染^[12];在岸线管理与生态保护中,通过高清视频流回传与多光谱数据分析,实现违法行为智能识别(定位精度达0.5 m)与生态修复效果评估,成为河湖长制、水生态保护等工作的重要技术支撑。

3.2 系统架构

图1所示为应用系统架构与通信链路示意。图1清晰呈现了“无人机终端—通信中继—数据处理中心”三级协同架构,各模块通过专业化技术配置与无线链路联动,实现河湖监测数据“采集—传输—处理”的全流程闭环^[13]。具体技术功能如下。

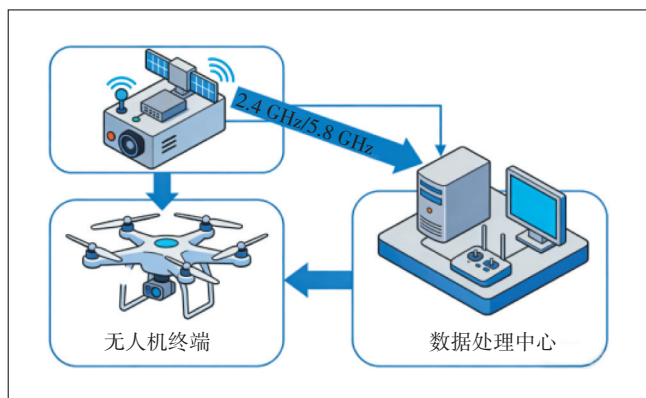


图1 应用系统架构与通信链路

a) 无人机终端。采用四旋翼布局设计,支持自主起降、预设航线飞行与超视距作业,适配河湖复杂作业环境。搭载多类型任务载荷,包括高清摄像头、多光谱传感器等,可同步采集水位变化、岸线状态等视觉数据与水质参数,配合GNSS定位模块实现对采集点的精准定位(定位精度达0.5 m)。配备信号收发单元,支持2.4 GHz/5.8 GHz双频段通信,可灵活切换链路以适配不同传输距离与抗干扰需求^[14]。

b) 通信中继单元。作为信号增强核心设备,采用FEC前向纠错编码技术修复传输误码,通过动态信道切换避开干扰,有效扩展通信距离、克服水面信号衰减问题。支持全双工通信模式,可同时接收无人机信号和向地面中心转发数据,端到端传输延迟控制在毫秒级,保障实时性。

c) 数据处理中心。由服务器、操控终端与可视化显示器组成,可对接收到的视频流、传感器数据进行实时解码与可视化展示,同步生成监测报告,支持操作人员远程调整无人机飞行参数与任务指令。集成智能分析算法,能自动识别河道漂浮物、堤坝裂缝等

异常情况,将原始数据转化为决策依据^[15]。

无人机终端按规划航线开展全域数据采集,通过双频段链路将原始数据传输至通信中继单元;中继单元对信号进行降噪、放大处理,补偿水面传输中的信号衰减,再稳定转发至数据处理中心;处理中心完成数据解析与智能分析,实时呈现监测结果并反馈控制指令,形成“采集—传输—分析—控制”的无缝协同。

4 河湖监测通信系统模型

针对智慧水利场景下无人机河湖监测的无线通信性能评估需求,构建了基于QPSK调制的无人机—地面站通信链路仿真模型,量化分析不同通信距离、信噪比下的误码率(BER)和吞吐量性能。模型结合自由空间传播损耗与河湖水体附加损耗,引入弱化瑞利衰落与帧头辅助信道估计补偿机制,通过大样本数据包统计提升仿真结果的工程贴合度。建模参数设置如表1所示。

表1 建模核心参数

参数	符号	取值	说明
载波频率/Hz	f_c	2.4×10^9	无人机常用ISM频段
采样率/Hz	f_s	10×10^6	基带采样率
数据包长度/bit	L_{pkt}	1 024	含帧头(8 bit)+有效载荷
数据包数量	N_{pkt}	10^4	提升统计稳定性
无人机高度/m	h_{UAV}	50	典型高度
地面站高度/m	h_{GS}	2	低空监测典型高度
通信距离范围	d	不同取值进行对比观测	—
光速/(m/s)	C	3×10^8	电磁波传播速度

建模边界限定:调制方式为QPSK,忽略降雨、多径反射等次要损耗,聚焦自由空间损耗、水体附加损耗与瑞利衰落的核心影响。

4.1 路径损耗模型

自由空间传播损耗采用经典Friis自由空间损耗公式来描述电磁波在无遮挡视距场景下的传播损耗为:

$$L_{\text{fs}} = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad (1)$$

其中, λ 为载波波长, $\lambda = C/f_c$, d 为无人机与地面站的通信距离, π 取3.14。

考虑到河湖场景下水体对电磁波的附加衰减,还应考虑河湖水体的附加损耗,这里采用连续线性模型避免分段阶跃效应:

$$L_{\text{water}} = 1 + \frac{0.05d}{100} \quad (2)$$

因此,总路径损耗等效为自由空间损耗与水体附加损耗之和:

$$L_{\text{total}} = L_{\text{fs}} + L_{\text{water}} \quad (3)$$

4.2 信道增益与衰落

信道增益转换,将 dB 域的总损耗转化为线性域的信道增益:

$$G_{\text{channel}} = 10^{\frac{L_{\text{total}}}{20}} \quad (4)$$

弱化瑞利衰落模型,低空视距通信中深度衰落概率低,因此对经典瑞利衰落进行弱化处理,使衰落系数围绕 0.9 小幅波动:

$$h_{\text{rayleigh}} = 0.9 + 0.1 \times \frac{\text{randn} + j \times \text{randn}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

其中,randn 为标准正态分布随机数, j 为虚数单位($j^2=-1$), $\sqrt{2}$ 为瑞利衰落归一化系数。

4.3 信号传输与解调

发射信号生成:发射数据包由 8 bit 已知帧头(固定序列[1 0 1 0 1 0 1 0])和 $L_{\text{pkt}}-8$ bit 随机有效载荷组成,经 QPSK 调制后得到发射信号 $s(t)$ 。

接收信号模型:接收信号为发射信号经衰落、信道增益后叠加加性高斯白噪声(AWGN)的结果:

$$r(t) = s(t) \times h_{\text{rayleigh}} \times G_{\text{channel}} + n(t) \quad (6)$$

其中, $n(t)$ 为 AWGN 噪声,功率由信噪比(SNR)(dB)决定,线性域信噪比转换公式为:

$$\text{SNR}_{\text{linear}} = 10^{\frac{\text{SNR}(\text{dB})}{10}} \quad (7)$$

信道估计与补偿:利用已知帧头估计衰落系数,抵消衰落对接收信号的影响:

$$\hat{h} = \text{mean} \left(\frac{r_{\text{header}}}{s_{\text{header}}} \right) \quad (8)$$

$$r_{\text{comp}}(t) = \frac{r(t)}{\hat{h}} \quad (9)$$

其中, r_{header} 为接收帧头信号, s_{header} 为发射帧头调制信号, $\hat{h}$ 为衰落估计值, $r_{\text{comp}}(t)$ 为补偿后接收信号,mean($\cdot$) 为均值运算。

解调与性能统计:补偿后的信号经 QPSK 解调得到接收数据,误码率(BER)和吞吐量计算公式为:

$$\text{BER} = \frac{N_{\text{error}}}{N_{\text{total}}} \quad (10)$$

$$\text{Throughput} = \frac{N_{\text{correct}} \times f_s}{N_{\text{total}}} \times 10^{-6} \quad (11)$$

其中, N_{error} 为总错误比特数, N_{correct} 为总正确比特数, N_{total} 为总传输比特数($N_{\text{total}} = N_{\text{pkt}} \times N_{\text{pkt}}$),吞吐量单位为 Mbit/s。

5 河湖监测通信系统仿真与分析

针对河湖监测场景设计连续水体附加损耗模型,弱化瑞利衰落以匹配低空视距通信特征,避免深度衰落导致的“BER 地板效应”;引入帧头辅助信道估计,模拟实际通信系统的衰落补偿机制,降低理论模型与工程实践的偏差;采用 10^4 个数据包(总比特数达 10^7) 提升统计精度和统计可靠性;同时量化误码率(可靠性)和吞吐量(速率),全面反映链路性能。

5.1 仿真流程设计

仿真流程主要包括数据生成、调制传输、信道补偿与解调和结果可视化 4 个部分,具体如图 2 所示。

5.2 误码率仿真结果分析

图 3 所示为 2.4 GHz 频段下,无人机与地面站通信距离分别为 100 m、600 m、1 100 m、1 600 m 时,链路误码率(BER)随信噪比(SNR)变化的对数特性曲线,直观反映了监测链路的通信可靠性。

仿真结果表明:各距离对应的 BER 均随 SNR 提升呈指数级下降。当 $\text{SNR} < 10$ dB 时,BER 下降斜率较

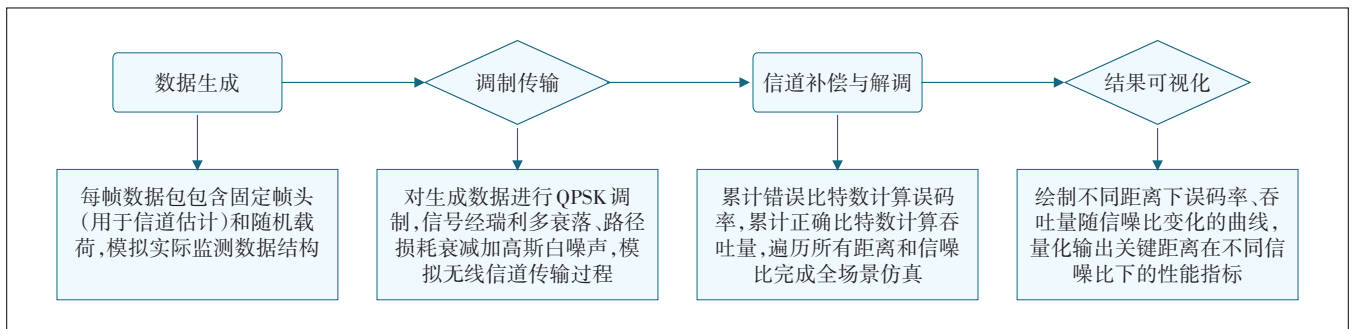


图2 仿真流程

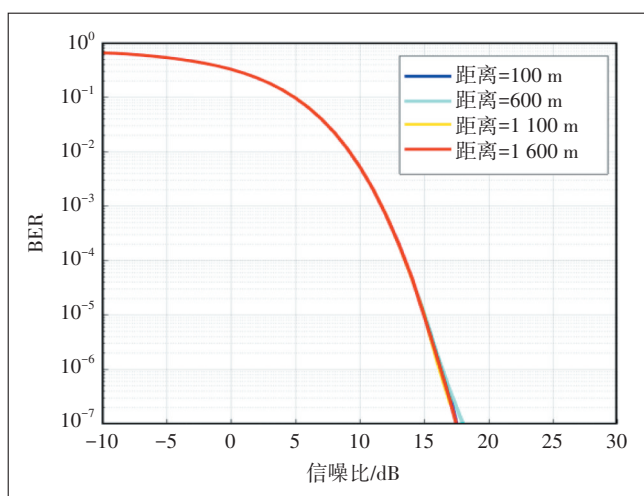


图3 短通信距离下的系统误码率性能

大,表明噪声是制约链路可靠性的核心因素;当10 dB $\leq$ SNR < 15 dB时,随SNR的增加系统误码率显著降低;当SNR $\geq$ 15 dB时,BER均降至 10^{-5} 以下,链路进入低误码稳定区间。

当SNR $\geq$ 17 dB时,所有距离的BER均低于 10^{-6} (满足水利监测数据传输的误码率要求);而当SNR过小时,无法保障数据的有效传输。当SNR $\geq$ 17 dB时,链路可同时实现低误码($< 10^{-6}$)的传输性能,能够支撑各类监测数据的可靠回传。

在相同SNR条件下,BER随通信距离增加而升高。这是路径损耗与水体附加衰减累积导致接收信号质量下降的直接体现。但是100 m、600 m、1 100 m、1 600 m的距离选择仅仅是满足近距离或视距通信环境中的使用需求,如果随着实际监测任务的变化,需要提高无人机航程时,系统的性能将发生明显的弱化。

因此为了对比中长通信距离对系统性能的影响,重新设置了无人机与地面站通信距离分别为10 km、20 km、25 km、30 km的仿真对照组,图4所示为2.4 GHz频段下,无人机与地面站通信距离分别为10 km、20 km、25 km、30 km的情况下,链路误码率(BER)随信噪比(SNR)变化的对数特性曲线,直观反映了中长通信距离下监测链路的通信性能。

与短距离场景相比,长距离下BER对通信距离的敏感性显著增强。例如当SNR=10 dB时,10 km距离的BER接近 10^{-1} ,而30 km距离的BER接近 10^0 (即误码率趋近100%),这是路径损耗与水体附加衰减随距离呈指数累积的直接结果。

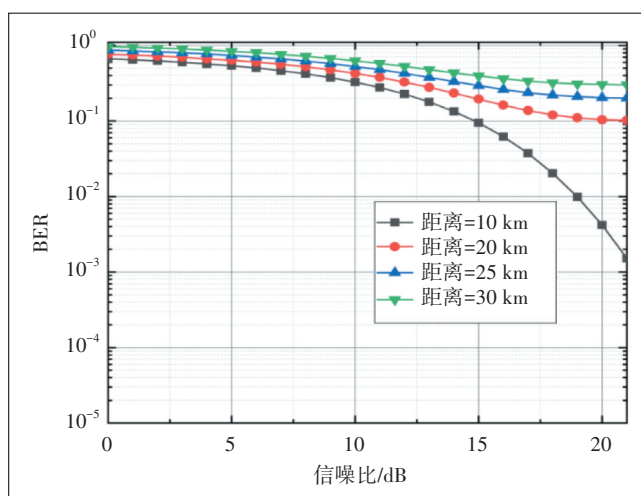


图4 中长通信距离下的系统误码率性能

在长距离场景,SNR需达到更高阈值才能保障有效通信。10 km距离需SNR $\geq$ 15 dB,BER才降至 10^{-2} 以下;而25 km、30 km距离在SNR $\leq$ 20 dB时,BER仍维持在 10^{-1} 以上,已无法满足监测数据的可靠传输需求。当通信距离超过20 km时,即使SNR提升至20 dB,BER仍高于 10^{-1} ,说明传统2.4 GHz频段的视距通信在河湖监测场景下的有效覆盖距离不宜超过20 km,否则需引入中继或更高功率的传输方案。

该仿真结果可为智慧水利长距离河湖监测的通信方案设计提供量化依据。若需覆盖20 km以上的监测区域,需结合中继无人机或频段优化等手段,以补偿长距离带来的链路衰减。

5.3 吞吐量仿真结果分析

图5所示为智慧水利无人机河湖监测场景中,2.4 GHz频段下不同通信距离(100 m、600 m、1 100 m、1 600 m)对应的链路吞吐量随信噪比(SNR)的变化规律。

a) 信噪比的影响。当SNR < 10 dB时,各距离下的吞吐量均随SNR提升呈快速增长趋势;当SNR $\geq$ 10 dB后,吞吐量逐渐趋于稳定,这是由于链路误码率已降至较低水平,数据传输的正确性受噪声的制约不再明显。

b) 通信距离的影响。在相同SNR条件下,吞吐量随通信距离增加而降低,例如,当SNR=30 dB时,100 m距离的吞吐量约为10 Mbit/s,而1 600 m距离的吞吐量约为7 Mbit/s,这是路径损耗与水体附加衰减随距离累积导致的链路增益下降所致。

c) 性能阈值。当SNR $\geq$ 10 dB时,100 m、600 m距

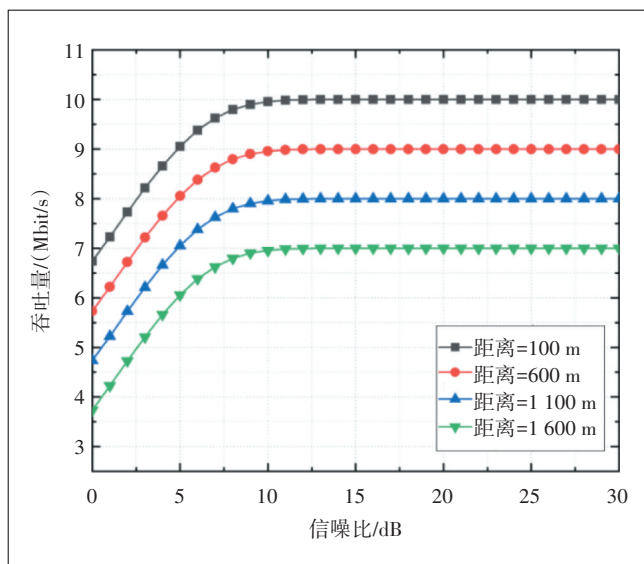


图5 不同通信距离下的系统吞吐量性能

离的吞吐量可稳定在9 Mbit/s以上,能够满足河湖监测中高清影像、环境传感器数据的实时回传需求;而1100 m、1600 m距离的吞吐量可分别稳定在8 Mbit/s、7 Mbit/s左右,适用于低速率监测数据(如水位、水质参数)的传输。因此在智慧水利无人机河湖监测场景中,需根据监测距离合理匹配通信参数,以保障数据传输的速率需求。

6 结束语

本文聚焦智慧水利无人机河湖监测场景,完成2.4 GHz频段无线通信链路的仿真建模与性能解析,分析了短/长距离(100 m~1.6 km/10~30 km)场景下误码率与吞吐量的核心特性,明确链路适用边界:对于2 km及以下的短距场景可适配精细化监测,常规通信即可实现高可靠和高吞吐率;对于10~20 km长距场景,仅支撑粗粒度监测,需配套使用功率增强或中继设备;对于超20 km场景,需采用频段优化或中继组网来补偿衰减。所建“自由空间损耗—水体附加衰减—弱化瑞利衰落”模型,可精准量化链路性能,为监测系统参数配置、协议设计提供量化支撑,助力工程落地。后续可依托多频段融合、自适应调制等技术,进一步拓展覆盖范围与抗干扰能力,满足复杂水利监测需求。

参考文献:

[1] 国务院.“十四五”现代综合交通运输体系发展规划[EB/OL]. (2021-12-09)[2025-12-25]. [https://www.gov.cn/gongbao/content/](https://www.gov.cn/gongbao/content/2022/content_5672664.htm)

2022/content_5672664.htm.

- [2] 李强.政府工作报告——2024年3月5日在第十四届全国人民代表大会第二次会议上[EB/OL]. (2024-03-12)[2025-12-25]. https://www.gov.cn/gongbao/2024/issue_11246/202403/content_6941846.html.
- [3] LUO G Y, LI J L, ZHANG Q X, et al. Toward low-altitude airspace management and UAV operations: requirements, architecture and enabling technologies[EB/OL]. [2025-08-26]. <https://arxiv.org/html/2506.08579v1>.
- [4] ZHAI Z Y, GAO Y, NI W, et al. Trajectory design for UAV-assisted logistics collection in low-altitude economy[EB/OL]. [2025-08-26]. <https://arxiv.org/abs/2511.07178>.
- [5] 深圳市宝安区政府办公室.深圳市宝安区低空经济产业创新发展实施方案(2023—2025年)[EB/OL]. (2023-07-29)[2025-12-25]. https://www.baoan.gov.cn/fgj/zwgk/qt/tzgg/content/post_10764660.html.
- [6] 饶闯江,管庆丹.结合无人机遥感与卷积神经网络的河湖水质动态监测[J].微型电脑应用,2025,41(7):39-42,46.
- [7] CHEN J H, XIAO Y, WANG Z, et al. ISFE-Net: an important spatial feature extraction network for UAV-based hyperspectral water quality monitoring in rivers[J]. Journal of Hydrology, 2026, 664(Part C): 134542.
- [8] SONG F, ZHANG W Y, YUAN T G, et al. UAV quantitative remote sensing of riparian zone vegetation for river and lake health assessment: a review[J]. Remote Sensing, 2024, 16(19):3560.
- [9] 陈海燕.智能无人机协同技术在河湖智慧化监测中的应用探索[J].科技经济市场,2025(8):85-87.
- [10] BANGIRA T, SIBANDA M, MUTANGA O, et al. Assessing the utility of drone technology in monitoring water availability and quality in small reservoirs[R]. Pretoria: Water Research Commission, 2025.
- [11] 钱海明,王春林,孙金彦,等.无人机免像控技术在河湖监测中的应用[J].测绘通报,2017(增刊1):195-196.
- [12] 刘文壮,梁文广,宋瑞平.无人机遥感技术在河湖岸线监管中的应用[J].水利信息化,2022(4):45-49.
- [13] 马成才,马永春,罗福正.基于无人机倾斜摄影的河湖水质污染范围监控方法研究[J].环境科学与管理,2024,49(5):133-137.
- [14] 汪恩良,胡胜博,韩红卫,等.基于无人机低空遥感和OTSU算法的黑龙江开江流凌密度研究[J].水利学报,2022,53(1):68-77.
- [15] 沈清华,叶文芳,王进科,等.大型水利工程无人机智慧化监控及其成果应用[J].水利技术监督,2024(10):42-44.

作者简介:

陆皓,毕业于兰州理工大学,工程师,硕士,主要从事政企客户解决方案支撑工作;冯利民,毕业于西安矿业学院,高级工程师,学士,主要从事全省政企客户解决方案统筹支撑工作;赵莉,毕业于北京邮电大学,高级工程师,硕士,主要从事政企客户解决方案支撑工作;钱春晓,毕业于兰州商学院,高级工程师,学士,主要从事政企客户解决方案支撑工作;冯子轩,福州大学至诚学院本科在读,主要研究方向为大数据与人工智能。