

超短波电台无线信道模型仿真软件的设计与实现

姜 凯¹ 孙秀芳^{2*} 程 兰¹
JIANG Kai SUN Xiufang CHENG Lan

摘 要

在使用超短波电台进行通信时,通信质量深受无线信道特性的影响。基于此,文章提出了一种基于理论分析并结合武汉周边郊区的无线信道模型仿真软件的设计方法,通过案例研究演示了其在模拟训练系统中的应用价值。首先从理论层面深入分析了信号衰减、地理环境和电磁干扰对超短波电台通信质量的具体影响。详细阐述了在超短波电台模拟训练过程中,如何针对定频、模拟和跳频3种不同的工作模式,依据相关因素计算信噪比,并据此生成通信质量等级,以供模拟训练设备使用。同时,提供了程序实现的具体流程和部分源代码。最终,通过模拟训练系统的联合调试测试,结果证实了该软件的稳定性和可靠性,从而为模拟训练服务提供了强有力的支持。

关键词

信号衰减;地理环境;电磁干扰;信噪比

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.05.020

0 引言

随着现代信息技术的飞速发展,无线通信设备在人们的生活、工作和学习中扮演着越来越重要的角色。无线通信设备以其便捷性、灵活性和广泛的应用场景,成为现代社会不可或缺的一部分。无线信道是无线通信设备接发送接收两端间信号传输的载体,其传播特性研究与其精确的信道模型建立有利于复杂多变的无线通信系统的设计和优化。

为提高通信系统的性能、降低研发成本,无线信道模型仿真技术应运而生。该技术可通过对信道模型的理论分析和实际测量数据的拟合,构建出能够反映实际通信环境的仿真模型。在此基础上,可以对通信系统进行性能预测、参数优化和故障诊断,从而为无线通信技术的创新发展提供有力支持。

面向未来通信新的应用场景,张建华等人^[1]提出了一种面向 6G 标准的扩展几何统计性信道模型,该模型后向兼容主流的高精度 5G 标准模型,便于代际更迭的信道仿真器实

现。顾成远等人^[2]提出了一种用于构建工业互联网使用的通用路径损耗模型,可用于描述工业互联网场景下无线信道的路径损耗。权仕鑫等人^[3]提出了一种在车联网仿真环境中支持加载无线信道模型的仿真平台,可用于车联网融合通信技术的场景仿真。高猛等人^[4]构建了一种信道大尺度和小尺度衰落的数学模型,可用于仿真分析不同应用环境下 OFDM 和 HMCT 两种调制方式的无人机通信系统性能。夏兆宇等人^[5]对微波星地链路与激光星间链路信道特性进行了建模仿真,为微波与激光融合的卫星互联网链路设计提供有意义的参考。李国军等人^[6]在分析现有短波宽带信道模型局限性的基础上,提出了一种适用于固定与机动不同场景下的短波通信信道模型。

面向当期主流的视距通信应用场景,超短波通信系统支持多种应用,包括语音、数据、图像传输等,在广播、航空、海上通信等领域具有重要应用。为了设计高效的超短波通信系统并进行仿真优化,需要信道模型来评估系统性能,如覆盖范围、信号质量、干扰水平等。研究人员通过大量的实地测量来收集超短波信号传播数据,并进行分析,以理解其传播特性,并建立了统计模型来描述超短波信道的统计特性,如路径损耗、多径效应、阴影效应等。陈柯威等人^[7]基于 LVC 思想,对 Okumura-Hata 等经典模型进行了仿真,分析并验证了超短波在不同场景中传播损耗特性。谷国贤等人^[8]基于虚实结合的试验方式,指出了试验装备试验可由模拟器和数字仿真系统所代替。兰田等人^[9]分析了丘陵地貌下超短波信道模型的适用性,并提出了一种较优的绕射损耗算法,并提出超短波传播模型需要本地化。刘广凯等人^[10]

1. 武汉交通职业学院电子与信息工程学院 湖北武汉 430065

2. 武汉软件工程职业学院(武汉开放大学)计算机学院
湖北武汉 430205

[基金项目] 全国高等院校计算机基础教育研究会资助课题“新工科背景下云计算技术应用专业技能高考学生和普通高考学生科学思维能力培养方式的比较研究”(2024-AFCEC-610); 武汉交通职业学院校级课题“基于协同理论的高职院校产教融合实践中心建设路径研究”(Z2024002); 湖北省自然科学基金资助项目“光子晶体光纤氧传感器的光传播特性和机理研究”(2023AFB536)

对目前现有的超短波通信信道模型的建模方法和理论基础进行了梳理,并总结了超短波通信信道的参数模型及其验证方法。王洪发等人^[11]设计并改进了一种基于地面业务点传播到面场强的预测方法,用于提高超短波传播监测效率。毕学军等人^[12]根据超短波地理信息系统传播特点,构建了简单信道传播模型,可对不同地形条件进行通信仿真。李慧等人^[13]根据超短波传播路径损耗经典公式 Okumura-Hata 无法满足工程实践中对传播损耗精度的计算,提出了一种适合于城市环境的路径损耗公式。孟凯等人^[14]在比对了几种超短波传播模型,基于此给出了一种易于工程实践的场强算法模型。

通过上述信道建模的过程,研究人员和工程师能够在仿真环境中复现实际信道的特性,但是受新兴应用场景以及不断变化的无线电环境的影响,超短波信道模型的需求将更加精确和实用,并且更能满足本地化的需要。

在本文中,首先探讨了信号衰减、地理环境和电磁干扰对无线通信质量的影响。信号衰减是指信号在传播过程中由于距离增加、障碍物阻挡等因素导致的强度减弱。地理环境,如地形起伏、建筑物分布,会影响信号的传播路径和覆盖范围。电磁干扰,包括同频干扰、邻频干扰等,会降低信号的质量,影响通信的可靠性。接着,详细介绍了武汉周边地区超短波通信电台在定频、模拟和跳频方式下,如何根据信号衰减、地理环境和电磁干扰等相关因素,计算出信噪比。信噪比是衡量通信质量的重要指标,决定了通信的可靠性和有效性。通过综合考虑这些因素,可以更准确地评估通信质量,为超短波电台模拟训练设备提供逼真的训练场景。在文章的最后部分,介绍了超短波环境下有线信道中实现无线先到模拟的程序实现流程和部分源代码。这些流程和代码展示了如何将理论分析转化为实际的程序设计,以实现通信质量的模拟和评估。通过这种方式,超短波电台模拟训练设备可以更好地反映出实际通信环境中的复杂性和多变性,为通信人员提供有效的训练手段。

总而言之,本文从理论到实践,全面探讨了超短波无线通信质量的影响因素,并提供了具体的计算方法和程序实现流程。这对于提高无线通信系统的性能和可靠性,以及提升通信人员的训练效果,具有重要意义。

1 理论基础

1.1 信号传输过程中的衰减

在理想情况下,接收机功率按发射机和接收机之间距离的平方(d^2)规律衰减^[15]。即:

$$P_{RX} = P_{TX} G_{RX} G_{TX} \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \quad (1)$$

式中: G_{RX} 和 G_{TX} 分别是接收天线和发送天线的增益; λ 是增益; P_{TX} 是发送功率。

信道功率随着距离的增加,在某个特定功率时,信噪比就会达不到维持可靠通信所需的门限值。

但是在实际环境中,接收机功率衰减更快,通常可以按(d^4)计算衰减。

d^4 功率定律:

$$P_{RX}(d) = P_{RX}(1m) - 20 \log(d_{break}|m) - n \log(d/d_{break}) \quad (2)$$

$P_{RX}(1m)$ 的计算机公式:

$$P_{RX}(1m) = P_{TX}|_{dB} + G_{TX}|_{dB} + G_{RX}|_{dB} + 20 \log \left(\frac{\lambda_m}{4\pi d} \right) \quad (3)$$

式中: d_{break} 是断点距离, n 根据不同的环境下适当取不同的衰减系数,以模拟出不同的环境对通信效果的衰减。

1.2 地理环境对通信质量的影响

在实际地理环境中,需要根据地貌、地物计算信号经过绕射、散射后的衰减。为了简化处理,本文将地理环境划分为平原、丘陵、山地等不同类型,不同类型的地理环境对应不同的衰减因子,可以反映出地理环境对通信的影响。

1.3 电磁干扰对通信质量的影响

干扰可以看作是高斯型的,因此干扰可以等效为噪声,所以信干比 SIR 也就具备了和噪声受限情况下的信噪比 SNR 相同的数值。

2 算法简介

2.1 概述

以自由空间损耗作为基础,叠加地理环境、干扰等对通信效果的影响。

假定接收机噪声和干扰综合后的噪声电平为 X_{dBm} , 到达接收机的功率信号为 Y_{dBm} , 则信噪比:

$$SNR = Y_{dBm} - X_{dBm} \quad (4)$$

根据 SNR 的大小,结合不同模式、不同速率等因素,划分通信质量等级,下发给各模拟训练设备。

2.2 定频和模拟方式

2.2.1 信噪比计算

根据发射机和接收机距离、地理环境、电磁干扰分别计算出对应的信号到达接收机时的功率电平,参考接收机噪声功率,计算出 SNR, 然后根据 SNR 划分通信质量等级。

等效的接收机噪声电平噪声计算公式为:

$$P_{RX_Noise} = 10^{\left(\frac{P_{RX_EMI}|_{dBm}}{10}\right)} + 10^{\left(\frac{P_{RX_Hot}|_{dBm}}{10}\right)} \quad (5)$$

式中: P_{RX_Noise} 为干扰和噪声共同作用的等效噪声电平; P_{RX_EMI} 为干扰电平; P_{RX_Hot} 为接收机噪声电平。

信噪比 SNR 计算为：发射信号功率大小 + 不同的自然环境因素引起的衰减 - 等效的接收机噪声电平噪声。

$$SNR = P_{TX|dB} + A_{TX|dB} - P_{RX_Noise} \quad (6)$$

式中： $P_{TX|dB}$ 为发射信号功率； $A_{TX|dB}$ 为信号传输衰减； P_{RX_Noise} 为等效的接收机电平噪声。

2.2.2 通信质量等级划分

实测电台不同的数据成功率和语音效果所对应的电平下，根据测试结果和计算出的 SNR，通过查表得出通信质量等级下发。

2.3 跳频方式

首先在单频点情况下，计算热噪声和干扰共同贡献的等效噪声电平，并计算出信噪比 SNR，根据 SNR 的大小确定是否为阻塞干扰。

计算过程：将 dBm 转化为线性功率表示，然后热噪声和干扰线性功率相加，再转换为对数形式。

那么实际的等效噪声为：

$$P_{RX_Noise} = P_{RX_Total|dBm} \times B_{EMI} + P_{RX_Hot|dBm} \times (1 - B_{EMI}) \quad (7)$$

式中： P_{RX_Noise} 为实际的等效的噪声电平； P_{RX_Total} 为 EMI 和接收机噪声叠加的等效噪声； P_{RX_Hot} 为接收机噪声； B_{EMI} 为干扰带宽占跳频总带宽的百分比。

若干扰电平起到主导作用，则该频点即为阻塞干扰，根据未被干扰部分频段的信噪比，并结合阻塞干扰的比例，确定出通信质量等级下发给模拟训练设备。

3 程序实现

3.1 实装台测试数据

为尽可能地模拟出 VHF 通信效果，需要参考实装台测试结果。

实装台测试分为无扰和有扰两种情况。

在无扰情况下，需测出实装电台同步概率、不同速率下的每种数据成功率（10% 一档，若需更精确，则可继续细分，以下同）的对应接收电平，以及语音效果在 0~5 分下所对应的电平。

在有扰的情况下，测出不同的干扰下（10% 一档）的同步概率、不同速率下对应的典型分组长度下的每种数据成功率（10% 一档）下的接收信号电平，以及不同的语音效果所对应的电平。

3.2 程序流程和主界面

程序实现首先计算出发射机到达接收机的信号衰减、干扰的衰减，再根据发射机信号的功率和干扰源的功率，计算出信号和干扰到达接收机的电平。

若是定频和模拟方式，直接将干扰源电平和噪声叠加，计算出 SNR，通过查找表产生通信质量等级，并送往电台处理。若当前工作模式为跳频，首先判断出干扰源和噪声是否超出错跳检测门限，若超出错跳检测门限，则按照对应的干扰计算出干扰，查找相应的表格。程序流程图如图 1 所示。信道模拟软件主界面如图 2 所示。

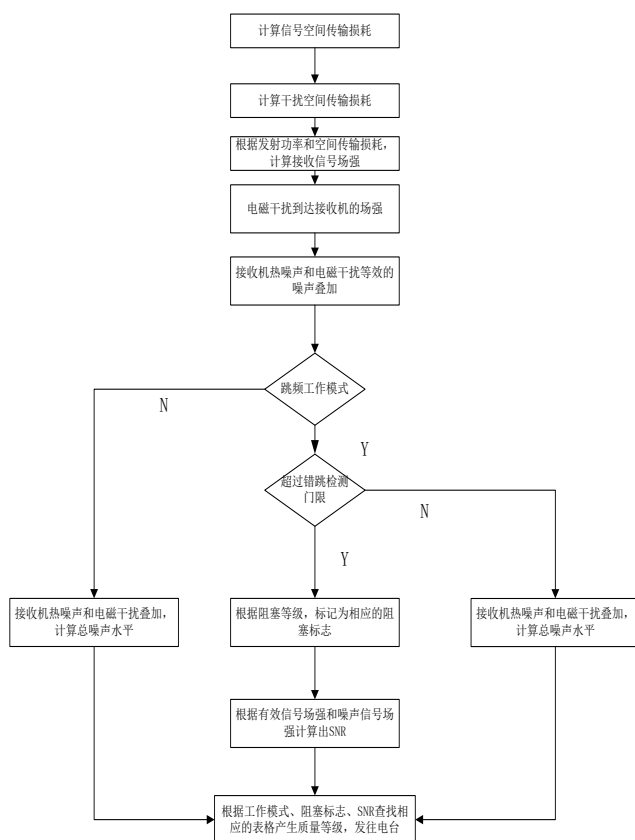


图 1 信道模拟软件通信质量设定流程图

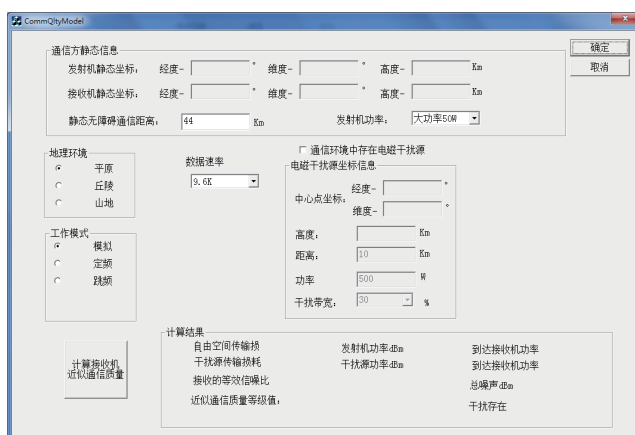


图 2 信道模拟软件主界面

3.3 主要程序源码

3.3.1 计算信号衰减

函数功能：根据环境类型和发射频率以及发射机和接收机的距离，计算出信号从发射源到接收机的衰减。

输入：环境类型、频率、距离。

输出：信号衰减（dB）。

```
#include <iostream>
#include <string>

double CMonitVHFQualityDlg::ComputeSignalAtten(int Environtype, double TxFreq, double Distance)
{
    double lamda=optspeed/TxFreq; /*波长*/
    double d_break=4*h_tx*h_rx/lamda; /*断点*/
    double P_RX_1m=20*log10(lamda/4/pi); /*一米处的衰减*/
    double P_RX_Atten;
    if (Environtype==0)
        P_RX_Atten=P_RX_1m-20*log10(d_break)-planeAtten*log10(Distance*1000/d_break)+AttenaGain;
    else if (Environtype==1)
        P_RX_Atten=P_RX_1m-20*log10(d_break)-hillAtten*log10(Distance*1000/d_break)+AttenaGain;
    else
        P_RX_Atten=P_RX_1m-20*log10(d_break)-mountAtten*log10(Distance*1000/d_break)+AttenaGain;
    return P_RX_Atten;
}
```

3.3.2 通信质量等级计算

函数功能：根据输入的环境类型、工作模式、发射机频率、距离、发射机功率、干扰源功率、距离、干扰类型、用户速率计算出通信质量等级。

输入：环境类型、工作模式、发射机频率、距离、发射机功率、干扰源功率、距离、干扰类型、用户速率。

输出：质量等级。

```
#include <iostream>
#include <string>
int CMonitVHFQualityDlg::ComputeCommQtyGrade(int Environtype, int RadioworkMode, double TxFreq, double Distance, double TxPower, bool EMIEExist, double EMIFreq, double EMIPower, double EMISourceDist, int EMIType, unsigned char TxUserSpeed)
{
    unsigned char tmpCommQtyGrade;
    double Rx_Total_Noise;
    double Rx_EMI_Noise;
    double EMI_Band_Num;
    bool EMITrueExist;
    if(EMIType==0)
        EMI_Band_Num=0.3;
    else if (EMIType==1)
        EMI_Band_Num=0.5;
    else if (EMIType==2)
        EMI_Band_Num=0.7;
    /*FreeSpaceTranLoss=ComputeSignalAtten(Environtype,TxFreq,FreeSpaceDist);*/
    EMITranLoss=ComputeSignalAtten(Environtype, EMIFreq, EMISourceDist);
    Rx_EMI_Noise=EMIPower+EMITranLoss;
    Rx_Total_Noise=10*log10(pow(10,-11.9)+pow(10,Rx_EMI_Noise/10));
    // m_Total_Noise = FloatTransStr(Rx_Total_Noise)+".dBm";
    RxPowerBm = FreeSpaceTranLoss + TxPower;
    if(EMIEExist)
        SimlTxSNR=RxPowerBm-Rx_Total_Noise;
    else
        SimlTxSNR=RxPowerBm-Rx_Hot_Noise;
    if(RadioworkMode==2)
    {
        if(SimlTxSNR<-6)
        {
            SimlTxSNR=RxPowerBm-Rx_Hot_Noise;
            EMITrueExist=true;
        }
        else
        {
            SimlTxSNR=EMI_Band_Num*SimlTxSNR+(1-EMI_Band_Num)*(RxPowerBm-Rx_Hot_Noise);
            EMITrueExist=false;
        }
    }
    // m_SimlTxSNR = FloatTransStr(SimlTxSNR)+".dB";
    // if(EMITrueExist)
    // m_Noise_Exist="存在";
    // else
    // m_Noise_Exist="不存在";
    tmpCommQtyGrade = IndexVHFCommQtyGrade(RadioworkMode, SimlTxSNR, EMITrueExist, EMIType, TxUserSpeed);
    return tmpCommQtyGrade;
}
```

4 结果与分析

4.1 测试说明

在本软件设计实现过程中，使用 Visual C++ 为集成开发平台，并以超短波电台在武汉郊区的实际测试数据为支撑。通过将理论分析与实测数据相结合，在这基础上，开发了一款信道模型仿真软件，其主要功能是对模拟网络中的超短波电台模拟器的通信信道质量进行模拟，并通过匹配通信网内的超短波电台的工作参数，完成有线室内状态下模拟安装超短波电台间的通信。为验证该软件的功能及其数据管理的稳

定性，根据图 3 所示搭建了综合测试环境，使用的测试设备见表 1 所示，并进行了全面的测试。

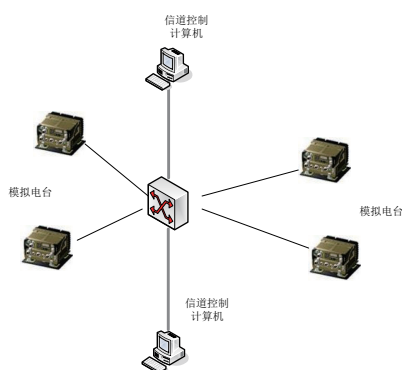


图 3 信道模拟软件综合试验环境测试布置图

表 1 综合测试设备表

序号	名称	数量
1	TCR171 电台模拟信道器主机	4
2	手柄式送受话器	2
3	PC 主机（安装信道控制软件）	2
4	电源线	按需
5	以太网线	按需
6	数据线缆	按需
7	交换机	1

4.2 测试参数

- (1) 超短波电台模拟训练器工作频段：30 MHz~88 MHz；
- (2) 超短波电台模拟训练器可用带宽：25 kHz；
- (3) 超短波电台模拟训练器传输距离：8 km~20 km；
- (4) 超短波电台模拟训练器工作模式：定频突发模式、模拟工作模式、跳频突发模式；
- (5) 超短波电台最高空口数据率：32 kbit/s；
- (6) 用户速率：1.2、2.4、4.8、9.6、19.2、38.4 kbit/s；
- (7) 通信方式：模拟话、声码话、数据传输；
- (8) 编码方案：RS 编码、1/2 卷积码与 TCM（4CPM）的结合。

4.3 测试过程

为强调 Visual C++ 与实测数据的联合应用，本文主要进行信道组网功能测试。这项功能测试旨在全面评估信道模拟软件的性能和稳定性。

信道组网功能旨在有线环境下模拟无线通信功能，即确定在何种条件下电台之间能够进行通信。该功能主要涉及通信参数的匹配，其中通信参数一致的电台需归入同一组播组，不一致的则不属于同一组播组。匹配过程实际上就是评估通信信道质量等级以执行程序模拟信道的过程。

例如，在模拟工作方式下，只要两个设备的频率相同，即被视为同一组播组。因此，在模拟方式下，通信参数仅包

括频率、信道通信质量等级。而在跳频情况下,需要匹配的参数包括表号、网号、密钥号、网络模式、波形类型、信道通信质量等级等。只有当这些参数完全相同时,设备才被认定为同一组播组。信道组网过程中的通信等级设置如图4所示。

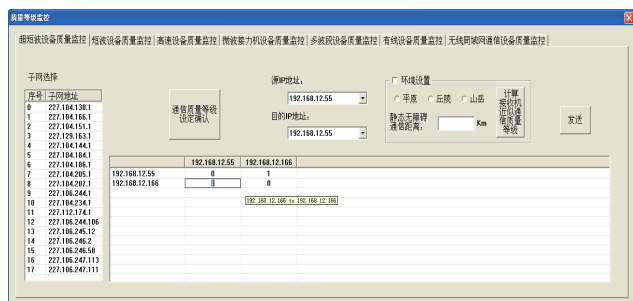


图4 信道模拟软件信道组网功能测试

信道组网功能的测试步骤如下:

(1) 根据图3的指引,将信道控制计算机与模拟训练电台连接妥当。

(2) 设置模拟训练电台的通信参数使其一致包括信道通信质量等级设定,此时电台应能够互相通话。

(3) 更改模拟训练电台的通信参数使其不一致包括信道通信质量等级设定,此时电台应无法互相通话,以验证组网功能的正确性。

经过测试,信道组网功能表现正常,能够顺利通过测试。这项测试的次数和时间都是随机选择的,以确保测试结果的准确性和可靠性。

4.4 结果讨论

本文设计并实现的信道模拟软件,在模拟训练系统的综合测试中表现出色。软件运行稳定,数据管理效果优良,有效支撑了模拟训练的需求,提升了整个系统的可靠性和灵活性。利用信号衰减、地理环境和电磁干扰等相关因素,计算出信噪比,进而通信质量等级下发给模拟训练设备,这一结果证明了采用VC++ ADO结合超短波电台实测数据的设计策略不仅提高了在超短波信道质量等级模拟的准确度,还极大地提升了信道模拟的本地化测试的精度,对于信道模拟软件的本地化性能提升有显著的正向影响。

5 结语

本文提出了一种基于理论分析并结合武汉周边郊区的无线信道模型仿真软件的设计方法,通过案例研究演示了其在模拟训练系统中的应用价值。该软件成功提升了信道设备数据的仿真准确度和效率,为模拟训练服务的优化提供了坚实的基础,为模拟训练领域的科研人员和教育工作者提供了一种可借鉴的解决方案,有助于推动该领域的技术进步和教育创新。未来的研究将聚焦于进一步提升软件的扩展性和鲁棒性,以及探索更广阔的模拟训练应用场景。

参考文献:

- [1] 张建华,王珩,张宇翔,等.6G信道新特性与建模研究:挑战、进展与展望[J].中国科学:信息科学,2024,54(5):1114-1143.
- [2] 顾成远,刘洋.工业互联网场景下路径损耗建模研究[J].无线电通信技术,2025,51(1):131-138.
- [3] 权仕鑫,孙溶辰,刘留,等.车联网融合通信技术的场景仿真与分析[J].应用科技,2024,51(5):190-196.
- [4] 高猛,屠佳,纪雅峻,等.无人机系统地空信道建模与仿真[J].计算机仿真,2023,40(8):41-47.
- [5] 夏兆宇,林玉洁,陈浩,等.微波与激光融合的卫星互联网信道特性研究[J].中国电子科学研究院学报,2024,19(3):228-238.
- [6] 李国军,王彦淞,叶昌荣,等.基于ITS模型的短波宽带移动信道建模与仿真[J].科学技术与工程,2024,24(2):611-621.
- [7] 陈柯威,刘宏波,马俊凯.超短波信道模型的仿真与分析[J].舰船电子工程,2022,42(2):87-90.
- [8] 谷国贤,龙东魁.基于虚实结合的陆军数字化装备体系试验装备体系构成研究[J].价值工程,2016,35(30):177-179.
- [9] 兰田,孙慧贤,全厚德,等.丘陵环境下超短波传播模型适用性研究[J].火力与指挥控制,2018,43(9):114-118.
- [10] 刘广凯,全厚德,崔佩璋,等.超短波信道建模方法[J].火力与指挥控制,2016,41(4):9-14.
- [11] 王洪发,陈宇,王健.一种典型超短波传播预测方法及其业务应用[J].信息通信,2016(5):23-24.
- [12] 毕学军,张杨,王小振.战术无线通信信道传播模型[J].四川兵工学报,2013,34(10):80-82.
- [13] 李慧,谢拥军,李晓峰,等.超短波电波传播路径损耗中值公式的数值实验建模[J].电子器件,2010,33(2):197-200.
- [14] 孟凯,党大鹏,黄晓飞.超短波信噪比模型研究[J].舰船电子对抗,2013,36(4):64-66.
- [15] 耿京朝,李艳斌.超短波电波传播的分析与计算[J].无线电通信技术,2002(3):18-20.

【作者简介】

姜凯(1982—),男,河南开封人,高级工程师,硕士,研究方向:无线通信和嵌入式软件方面。

孙秀芳(1983—),通信作者(email: sunshine_way@foxmail.com),女,湖北麻城人,硕士,高级工程师,研究方向:高职教育、软件工程。

(收稿日期:2024-12-08 修回日期:2025-05-12)