飞机电力线载波通信测试环境设计与研究

向 胜[1]，姜安杰[1]，陈佳涵[1]，柳国连[1]，潘睿诚[1]，李 昂[1,2*]

[1]南京邮电大学通信与信息工程学院 江苏南京
[2]南京邮电大学空天地海通信技术一体化研究院 江苏南京

【摘要】28V 低压电力线载波通信信道特性较差，易受到干扰，影响系统通信效果，因此需要相应的载波通信仿真平台来模拟和评估其通信性能。本文通过对测试环境需求进行分析，设计并搭建了一套软硬件协同的飞机低压电力线载波通信测试环境。实验证明，相比传统测试环境的单一测试场景，该测试平台能够对低压电力线载波通信环境中负载变化、干扰变化、衰减变化实现精准模拟仿真。本测试环境操作简单，实用性强，为低压电力线载波通信设备的性能评估提供了可靠的技术支持。

【关键词】电力线载波通信；低压电力线；噪声特性
【基金项目】国家自然科学基金（62306151）
【收稿日期】2025 年 1 月 20 日 【出刊日期】2025 年 2 月 18 日 【DOI】10.12208/j.jeea.20250068

Design and implementation of powerline communication test environment for aircraft

Sheng Xiang[1], Anjie Jiang[1], Jiahan Chen[1], Guolian Liu[1], Ruicheng Pan[1], Ang Li[1,2]*

[1]School of Communications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu
[2]Institute of Space-Air-Ground-Sea Integrated Communication Technology, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

【**Abstract**】The 28V low-voltage power line communication channel exhibits poor characteristics and susceptibility to interference, affecting system performance. This paper designs and implements a software-hardware integrated test environment for aircraft low-voltage powerline carrier communication. Experiments demonstrate the platform's ability to accurately simulate load variations, electromagnetic interference, and line attenuation in powerline communication environments. The test environment is user-friendly and practical, providing reliable technical support for performance evaluation of low-voltage powerline communication devices.

【**Keywords**】Powerline communication; Low-voltage powerline; Noise characteristics

引言

电力线载波通信（Power Line Communication，PLC）是一种利用现有电力线作为传输媒介，将信息资源进行系统整合后调制在同一个高频载波上进行传输的通信方式[1]，其发展历史久远、技术成熟度高，是电力系统中特有的一种通信方式[2]。该技术能够通过现有电力网传输多媒体数据，有效减少设备的数量和复杂度，从而降低成本和维护难度。此外，电力线路不易受到外部攻击，并且采用加密和认证等安全机制确保数据的机密性和完整性，有效满足了国防航空领域对于高保密性、高安全性的通信需求。例如在航空领域，电力线载波通信已展现出独特的应用价值。以波音 787 为例，其配电系统采用双通道 28V 直流网络架构，通过 PLC 技术实现了座舱照明控制模块与配电单元间的数据传输，成功替代了传统 CAN 总线布线方案[3]。

目前，载波通信技术有多种实现方案[4]，在载波信号调制方式、中心频点、路由协议和信号耦合方式等方面各不相同。然而，对于自研的机载低压电力线载波通信设备，其通信性能尚不明确，是否符

*通讯作者：李昂

合标准仍需进一步验证。同时，由于测试装备的限制，现有测试手段存在一定局限性，无法对载波通信产品的通信功能进行全面、合理的验证，致使载波通信设备性能的检验与应用需求存在脱节。因此，开展相关的测试与评估工作是十分必要的。由于电力网和通信网的结构复杂性和差异性，低压电力线载波通信的信道特性[5]主要体现在电力网接入负载变化，各种噪声干扰特性以及载波信号的衰减特性三方面。这些因素直接影响数据传输的质量，包括误码率以及传输速率等。因此，测试环境不仅需要考虑用电负载变化，同时也需考虑信道噪声与衰减的影响，并需要对测试过程进行全流程监控，以便研发人员及时掌握通信成功率、波形图等信息。为此，测试环境应具备软硬件联动能力，能够对电力线载波通信设备进行多维度的性能测试。

综上所述，设计并构建一个适用于飞机低压电力线载波通信模拟测试环境尤为必要[6]。本文对机载电力线载波通信需求进行了具体分析，设计了一种适用于飞机低压电力线载波通信的模拟测试环境。其中，硬件平台包含负载模拟器、衰减器、噪声干扰发生器等主要设备；软件平台采用插件化设计与前后端分层架构，使得测试环境具备高度的自动化与智能化，提高测试效率与准确性。通过仿真实验对电力线载波通信成功率等关键指标进行了分析。实验结果表明，本文设计的低压电力线载波通信测试环境能够有效模拟飞机电力线载波通信的工作状态，并为后续研究提供了完备的软硬件设施与测试平台。

1 测试环境需求

1.1 负载模拟分析

负载电流是指通过电力线路传输的电流，它来自通飞机上各类电气设备和系统。不同设备和系统的配置会导致负载电流的差异，这些电流可能从几毫安到几十安不等。与此同时，电气设备和系统还会产生电磁干扰，这些干扰通过电力线路传播至PLC 通信系统，可能导致 PLC 信号的失真、干扰甚至严重降低通信质量。电力线上的负载变化对电力线载波通信系统的性能有着显著影响。例如，当负载增大时，可能导致传输距离缩短和信号衰减加剧。

1.2 干扰模拟分析

电力线作为共享信道，不同电气设备通过电力线路产生的各种干扰，会对电力线载波通信的传输质量产生重要影响。这些干扰主要包括同频干扰、开机大电流干扰、线缆串扰等[7]。1）同频干扰：多源设备共用频段时，相同频率的电磁信号相互叠加，导致接收端无法解析目标信号。例如，某型航电维护端口与 PLC 基频重叠时，维护设备启动后 PLC 信噪比下降 6dB，通信误码率显著增加。2）开机大电流干扰：作为感性负载的线圈，其通断过程会产生很大的尖峰电压，如襟翼作动器启停时，线圈通断产生的瞬态电压尖峰可达2.8kV/μs，持续时间120ms，覆盖 3 个 PLC 数据帧，导致信号失真造成干扰。3）线缆串扰：机舱内电缆间距不足引发容性/感性耦合。实际案例中，某 Cessna 172R 机型因天线布局不合理导致无线电信号覆盖区重叠，引发导航系统误判。

1.3 衰减模拟分析

在供电网络中，高频信号可能会受到衰减。衰减会导致信号强度降低，从而影响通信质量。信号衰减导致信号强度下降，从而限制 PLC 信号的传输距离。随着传输距离的增加，信号可能会逐渐衰减到无法正常解调的程度。随着信号衰减，信号的形状和质量可能会发生变化，导致信号失真和失真率的增加。其中信号衰减率取决于电力线路的长度、电缆类型、材料和频率等因素。

综上，设计电力线载波系统时需要考虑负载、干扰以及衰减变化对通信效果的影响。

2 测试环境设计

2.1 测试环境系统结构

根据测试环境需求，本文提出了如图 1 所示的飞机电力线载波通信模拟测试方案。在功能上，测试环境主要用于集成电力网与通信网融合通信样机并开展测试的类机载模拟测试，以验证通信原理样机功能和性能指标。该环境具备多功能负载模拟、信道衰减模拟、类机载电力线传输特性等功能，并辅以测试环境监控软件以便把控测试进程、记录关键指标。照图 1 进行接线后，首先，操作人员通过监控计算机发送信号，经飞控计算机转发后，控制部署于飞机上的通信原理样机 A 进行指令调制，得到加载至 28V 电网的电力线载波信号；其次通信原理样机 A 连接至载波信号解耦器，输出滤波后的载波信号，以便程控衰减器控制信号幅度；载波信号解耦器通过 SMA 接口连接程控衰减器；然后程控衰减器通过 SMA 接口再连接至干扰耦合器以及载波

信号耦合器，将信号重新加载到 28V 电力线网络；最后，通信原理样机 B 与 C 接收到指令信息，并将监控电路所获取的信息传输至监控计算机，通过软件分析，得到不同信道下通信原理样机的传输性能。

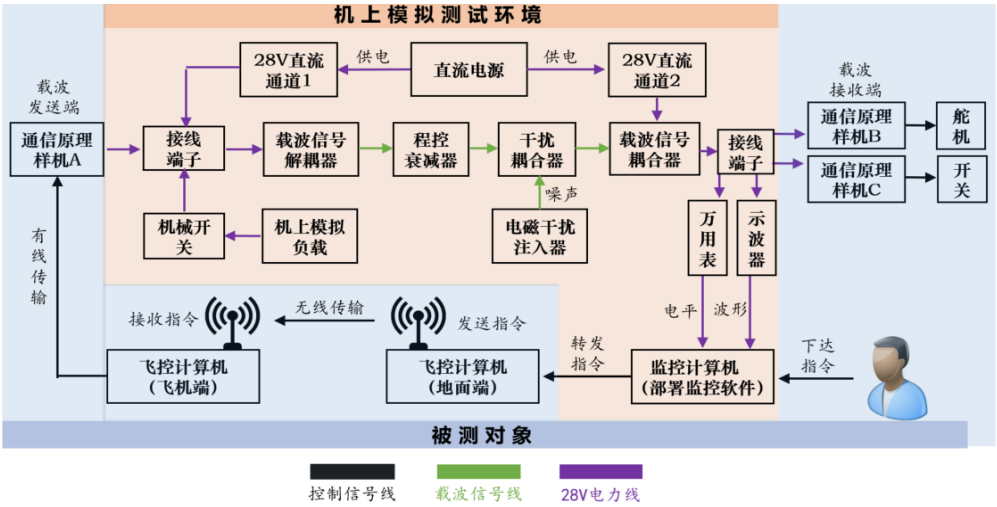


图 1　低压电力线载波通信测试环境结构图

2.2 硬件依赖

硬件电路主要由以下几个部分构成：

1）信号衰减电路：对信号进行提取并模拟真实信道衰减。由于飞机的电力线路环境复杂，包括电线长度、电线材质等因素都会对信号传输产生影响，导致信号强度的变化。信号衰减电路主要由两部分组成：载波信号解耦电路及程控衰减器。

2）噪声耦合电路：模拟各种信道噪声并将其注入到信道中。在实际的低压电力线载波通信系统中，噪声是无法避免的，它可能来自于电源、电器设备、天线等多种源头。噪声耦合电路主要分为电磁干扰注入电路和干扰耦合电路。

3）电源电路：负责对原理样机进行供电。可编程直流电源为我们提供了对电源参数的精确控制。在实际飞行环境中，电源条件可能会因为各种因素（如电源负载、电源线长度、电源线材质等）而发生变化，这些变化可能会对通信设备的性能产生影响。

4）信道监测电路：负责对信道中信号的波形、峰峰值以及电力线的电压进行实时检测。信道监测电路主要分为信号监测以及电压监测。

5）机上负载模拟电路：负责模拟机上用电器开关对信号产生的影响。在实际的飞机电力线载波通信系统中，机上用电器的负载可能会对通信信号产生影响，例如，当用电器启动或关闭时，可能会引起电源电压的波动，从而影响通信信号的质量。

2.3 监控软件设计

监控软件采用前后端分离的架构设计理念，并由 TypeScript 与 Python 混合编程进行实现，在前端部分，本系统结合了 Electron 框架与 Vue 技术，并使用 TypeScript 作为主要的开发语言，以实现一个高度互动且响应迅速的用户界面。对于后端，Python 的使用确保了功能的稳定性和可扩展性。为了确保 UI 界面的交互体验，系统还融入了多线程并发处理、面向对象的组件通信以及逻辑与界面分离的设计思想。这些确保了系统的高效性和灵活性，使测试人员能够方便地进行数据操作和分析，软件总体框架如图 2 所示。

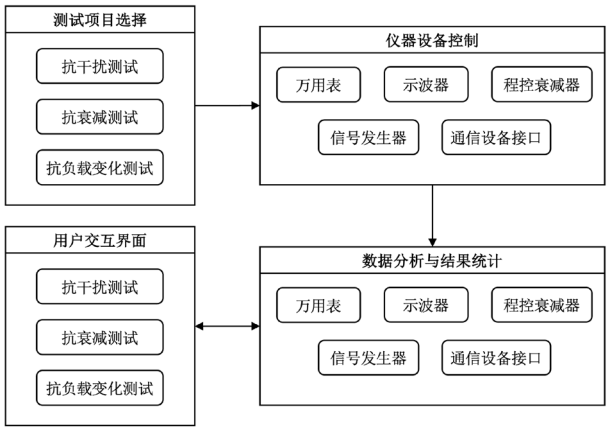


图 2　监控软件总体框架图

该软件主要包含以下模块：1）监控设备控制单元模块。通过该单元，用于可以控制监控设备（如电磁干扰注入器、示波器等）各种操作，以改变测试环

境中的参数。2）通信监控单元模块。该部分在用户监控设备接入情况下，提供实时数据波形、电平显示，用户可查看历史数据，了解载波通信设备的性能和运行情况。3）测试结果统计单元模块：该部分可在执行抗干扰测试、抗衰减测试、抗负载变化测试后，对比收发双方的通信数据，统计误码率、电平、传输速率三个指标，并将统计后的数据显示出来。系统主界面如图 3 所示，包括“测试项目”、“偏好设置”、“测试输出终端”、“测试主界面”等功能。

图 3　软件界面设计图

2.4 测试原理

如图 4 所示为通信测试流程图，测试分为抗负载变化测试、抗噪声变化测试以及抗衰减变化测试。抗负载变化测试通过机上模拟负载按不同档位（50 至 1000 欧姆）调整阻抗值，目的在于找出通信原理样机间成功通信的最小阻抗；测试过程中，系统不断降低阻抗直至通信失败，记录临界参数。抗噪声变化测试则利用电磁干扰注入器生成各类噪声信号（方波、正弦波、三角波），调整载波信号强度和不同种类的噪声参数，评估通信样机在各种干扰条件下的性能表现。抗衰减变化测试是在通信信道上使用程控衰减器，从-12dB 初始值逐步增加衰减（-1dB/次），记录成功通信的临界衰减值。

在进行载波通信测试时，我们主要通过误码率（BER）评估系统性能。误码率是指在一定数量的比特传输过程中，接收端检测到的错误比特数与传输总比特数的比值：

$$BER = \frac{N_e}{N_t} \quad (1)$$

其中，N_e表示接收错误的比特数，N_t表示传输的总比特数。对于本文采用的 2FSK 调制系统，误码率与系统参数存在复杂关系。实验中，我们将根据不同测试场景下的误码率变化，评估系统在各种条件下的通信性能。

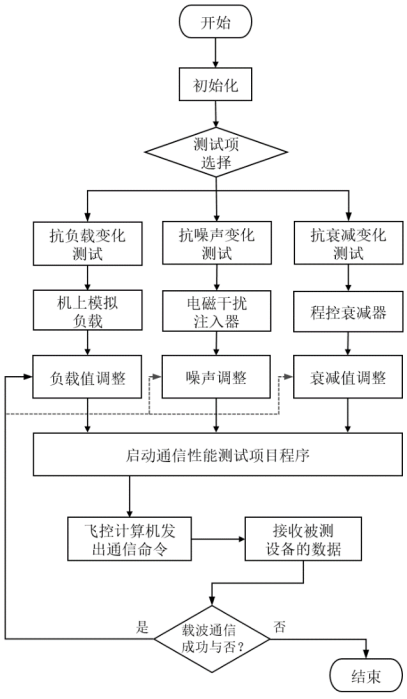


图 4　通信模拟测试流程图

3 实验分析

为了测试所设计电力线载波通信测试环境设计可行性与有效性，本实验参照第二章节搭建了如图5所示通信模拟测试环境。

其通信波特率为115200baud，采用二进制频移键控（2FSK）技术，转换速度快、抗干扰、抗误码、抗衰落性强且技术上易于实现[8-9]。基于 Vivado 2018.2 平台和 Verilog 硬件编程语言，采用模块化设计方法实现整个调制解调系统，得到了基于 FPGA 的较高性能和较低误码率的调制解调器，使得该设备能够在28V直流电源的加持下，利用电力线传输，实现机上的数据收发。

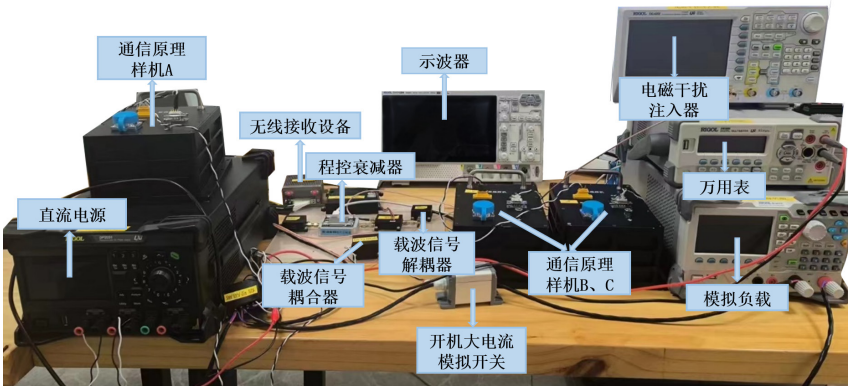


图5　通信模拟测试环境实物图

硬件环境：计算机CPU采用Intel酷睿i7 2.0GHz，内存不小于2GB，硬盘容量不小于256GB，具有标准网络接口，包含鼠标、键盘等通用外设。

软件环境：操作系统 Windows 7/Windows 10。

连接步骤：首先，将直流电源 1 通道通过信号隔离模块与原理样机 A（载波发送端）的电源接口相连，原理样机 A 的 RS485 调试接口与飞控计算机（飞机端）连接；将直流电源 2 通道通过信号隔离模块分别与原理样机 B、C（载波接收端）的电源接口相连，B、C 上的 RS485 调试接口通过 RS485 转 USB 线与监控计算机相连；监控计算机通过 RS485 转 USB 线与飞控计算机（地面端）相连。其次，将原理样机 A 通过信号隔离模块与载波信号解耦器、程控衰减器、干扰耦合器、载波信号耦合器依次相连，再通过信号隔离模块分别与原理样机 B、C（载波接收端）连接，接入电磁干扰注入器，并将机上模拟负载通过负载接入开关连接进系统中。再次，将程控衰减器通过 USB 线与监控计算机连接，通过 2.5mil 端子线与干扰耦合器连接；将电磁干扰注入器的输出端置为关闭，在上位机上设置程控衰减器衰减为 0dB。然后，将直流电源 1、2 通道电压设为 28V，最大输出电流设为 1A，打开 1、2 通道的输出；打开机上稳压源的开关，机上稳压源有蓝光闪烁代表正常工作。针对以下三种不同测试内容进行相对应操作。同时，为保证数据可靠，均进行 5 次重复实验，取 3 次稳定工况数据计算均值。

3.1 抗负载变化测试

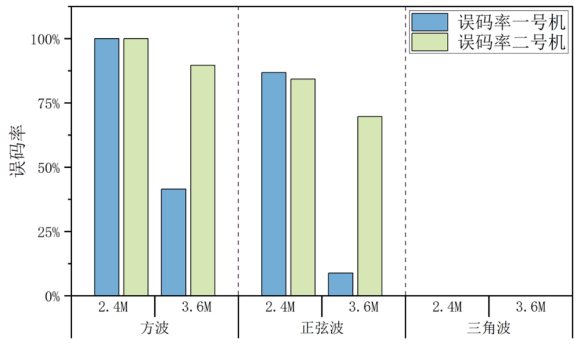
抗负载变化测试结果如表 1 所示。根据实验可知，当负载低于 200 欧姆时，因电流过大，测试环境与设备无法正常工作，故设置负载大小为 200～1000 欧姆，以步进值 100 欧姆进行递增，观测传输速率、及误码率。通过结果可知从 200 欧姆到 1000 欧姆负载时设备都能正常运行且传输速率大于等于 25kbit/s，传输误码率小于10^{-5}。加入负载时对电平以及电流有轻微影响，但运行过程中对电平影响不大，说明机上其他用电器不会造成设备无法正常通信，但是在开启的瞬间会对电平有轻微影响，结果符合逻辑。所设计的测试环境可实现对飞机电力线载波通信中负载变化的模拟。

表 1　抗负载变化测试结果

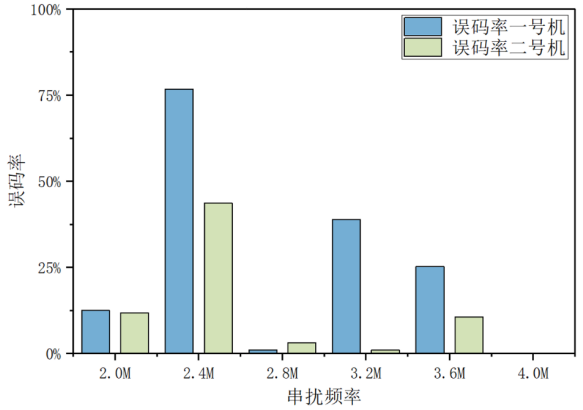
负载值	传输速率	误码率
50Ω	无法正常工作	无法正常工作
100Ω	无法正常工作	无法正常工作
200Ω	25~115.2kbit/s	0~10^{-5}
400Ω	25~115.2kbit/s	0~10^{-5}
600Ω	25~115.2kbit/s	0~10^{-5}
800Ω	25~115.2kbit/s	0~10^{-5}
1000Ω	25~115.2kbit/s	0~10^{-5}

3.2 抗干扰变化测试

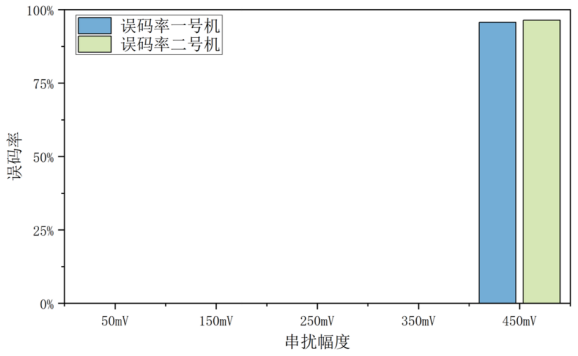
1）固定噪声频率和振幅，分别设置波形为方波、正弦波、三角波，对不同波形串扰进行测试。不同串扰波形测试结果如图 6（a）所示。根据实验结果可知，不同波形的串扰能成功注入，并且对误码率的影响不同，在多次测试中发现，两台机器性能有细微差别，同时三角波噪声产生的误码率最小，小于10^{-5}，而方波噪声产生的误码率最大，在串扰频率为 2.4M 时，为 100%。



(a) 不同串扰波形误码率



(b) 不同串扰频率误码率



(c) 不同串扰幅度误码率

图 6　不同串扰类型误码率

2）固定噪声波形和振幅，设置频率为 2M～4M，以步进值 0.4M 进行递增，对不同频率进行测试。不同串扰频率测试结果如图 6（b）所示。根据实验结果可知，串扰频率在 2～3.6M 时，传输速率小于 25kbit/s，误码率大于10^{-5}，其中串扰频率在 2.4MHz 时误码率最大，一号机误码率为 76.7%，二号机误码率为 43.6%；串扰在其他频率区间时，误码率小于10^{-5}，传输速率大于 25kbit/s。

3）固定噪声波形和频率，设置振幅为 50mV～450mV，以步进值 50mV 进行递增，对不同振幅进行测试。不同串扰频率测试结果如图 6（c）所示，当串扰幅度小于等于 350mV 时，传输速率大于等于 25kbit/s，误码率小于10^{-5}；而当串扰幅度达到 450mV 时，误码率分别为 95.7%及 96.4%。

实验结果表明，不同波形、不同频率和不同幅度的干扰对系统误码率产生不同影响。特别地，当干扰频率在 2.4MHz 附近时，系统误码率达到最大值。当干扰频率接近系统工作频率时，系统误码率可表示为：

$$BER_{interference} = BER_0 \cdot \left(1 + \beta \cdot \frac{A_{interference}}{|f_{interference} - f_{carrier}|}\right) \quad (2)$$

其中，BER_0为无干扰时的基础误码率，$A_{interference}$为干扰信号幅度，$f_{interference}$为干扰信号频率，$f_{carrier}$为载波信号频率，β为系统相关系数。该模型解释了为何 2.4MHz 频率干扰产生最大误码率，以及干扰幅度增大导致误码率增加的实验现象。实验可知测试结果符合低压电力线载波通信情况，所设计的测试环境可实现对飞机电力线载波通信中干扰变化的模拟。

3.3 抗衰减变化测试

设置衰减数值为-12～-20dB，步进值设为-1dB，观测传输速率、电平、误码率。测试结果如图 7 所示。通过实验测试结果可知，两台通信原理样机抗衰减能力相当。衰减值在 0～-17dB 时，传输速度维持在 25kb/s 以上，此时传输误码率小于10^{-5}；当衰减值由-17dB 变为-18dB 及以上时，传输速率归零，此时传输误码率变为 100%，这种现象可以通过 2FSK 调制系统的误码率理论模型解释：

$$BER = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{2N_0}} \quad (3)$$

其中，E_b为每比特能量，与信号功率成正比；

N_0为噪声功率谱密度。

当信号经过衰减后，E_b减小，导致误码率增加。当衰减达到某一临界值时，E_b低于系统检测阈值，接收端无法正确解调信号，误码率急剧上升至 100%。所设计的测试环境可实现对飞机电力线载波通信中衰落变化的模拟。

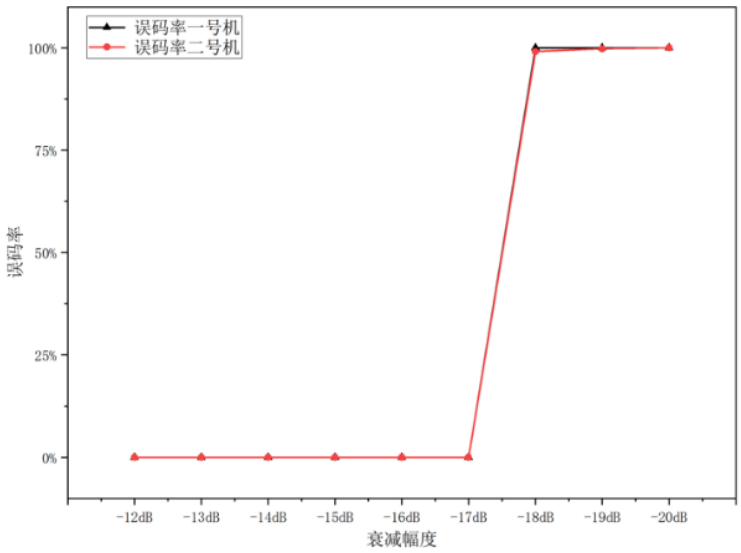


图 7　不同衰减幅度误码率

4 结论

本文主要设计了一个模拟飞机电力线载波通信测试环境，实现对飞机电力线载波通信的精准模拟仿真。本文具体分析了测试场景需求，使用基于同轴程控衰减器、噪声耦合器、射频偏置器等关键部件，使测试过程更加稳定，测试结果更加准确、可靠。此外，开发了一个模拟测试环境监控软件，以监控机上电力网与通信网融合通信环境的运行情况，该软件与至少三台载波通信原理样机、电磁干扰注入器、示波器等结合使用，可模拟机上负载变化、电磁干扰变化、线路衰减变化等，并记录通信原理样机在不同条件下的数据传输速率、误码率、电平等。通过实验可知该测试环境能精准模拟飞机电力线载波通信环境并以此进行测试，为后续载波通信特性研究提供了可靠的软硬件支持。

参考文献

[1] 陈智雄, 刘宗山, 金鑫, 等. 基于协作通信的电力线通信关键技术研究综述[J]. 电网技术, 2025, 49(4): 1668-1680.

[2] Zhang Y，Huang T，Bompard E F. Big data analytics in smart grids: a review[J].Energy informatics,2018,1(1):1-24.

[3] Channi H K, Kumar P, Dhingra A. Application of PLC in the Mechatronics Industry[J]. Computational Intelligent Techniques in Mechatronics, 2024: 185-209.

[4] 郝伟琦, 王贤辉, 李铮, 等. 高速电力线载波信道分析模块的设计与实现[J]. 电子技术应用, 2021, 47(6): 100-104.

[5] 李亚钦.低压电力线载波通信传输特性[J].电子通信与计算机科学,2024,6(5):176-178.

[6] 龙婷婷,关进金,刘娜.飞机电力线载波数据通信技术分析[J].科技创新与应用,2017 (17):90.

[7] 荆俊明,石建明,张秀蓉,等.舞台载波通信自适应跳频抗干扰仿真分析[J].电子测量与仪器学报,2023,35(10):145-152.

[8] 李桂枝,黄鸿捷,谢文娣.基于 FPGA 的 2FSK 调制解调器设计与仿真[J].电子制作,2020(16):11-12.

[9] 陈永红,张砦,黄莉莉,等.基于 FPGA 的机载电力线载波通信调制解调模块设计[J].计算机测量与控制,2022,30(5):251-256.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
OPEN ACCESS