

基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统设计

刘小飞

(陕西交通职业技术学院 交通信息学院, 西安 710018)

摘要: 无人机多模终端可支持多种频段通信模式, 保障无人机在不同环境下与外部控制中心通信链路的稳定; 但多模终端多种模式信号间相互作用产生的互调失真, 会降低射频功率校准后的通信质量系数; 为此, 设计了一种高效、精确的基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统; 硬件系统经过优化设计, 包括改装射频功率测量仪以支持多终端同步测试, 加设无人机蜂群自组网多模终端信号滤波器, 过滤多模信号中的干扰成分, 以减少互调失真对射频功率测量的干扰, 构建包含射频功率放大器、数字步进衰减器及校准电路的射频功率校准执行器, 增设以 FPGA 为核心的主控元件实现智能化协同控制, 实现校准硬件系统的优化; 通过模拟多模终端工作过程, 确定其发射和接收终端校准目标, 测量终端实时射频功率; 经硬件优化和校准目标的准确确定, 对比实时射频功率与校准目标, 得出含精确校准量的控制指令, 执行该指令实现射频功率校准功能; 通过系统测试实验得出结论: 优化设计系统校准后的信号互调失真产物功率电平降低了 7 dBc, 综合静态和动态环境, 优化设计系统的射频功率校准误差减小 2.53 dBm, 在校准系统作用下, 无人机多模终端通信质量系数明显提升。

关键词: FPGA 协同控制; 无人机多模终端; 射频功率校准; 互调失真抑制; 硬件系统优化

Design of Real Time Calibration System for Multi mode Terminal RF Power of UAVs Based on FPGA Collaborative Control

LIU Xiaofei

(School of Transportation Information, Shaanxi College of Communication Technology, Xi'an 710018, China)

Abstract: The drone's multi-mode terminal can support multiple frequency band communication modes, which ensures stable communication links between the drone and the external control center in different environments. However, the intermodulation distortion generated by the interaction between multiple mode signals in multi-mode terminal will reduce communication quality coefficients after RF power calibration. Therefore, this study designs an efficient and accurate real-time RF power calibration system for multi-mode terminal of unmanned aerial vehicles (UAVs) based on FPGA collaborative control. The hardware system has been optimized and designed, including the modification of an RF power measuring instrument to support multi-terminal synchronous testing, the addition of a drone swarm self-organizing network multi-mode terminal signal filter to filter out interference components in multi-mode signals to reduce the interference of intermodulation distortion on RF power measurement, the construction of an RF power calibration actuator including an RF power amplifier, a digital step attenuator, and a calibration circuit, and the addition of a main control component with FPGA as the core to achieve intelligent collaborative control and optimize the calibration hardware system. By simulating the working process of the multi-mode terminal, the calibration targets for its transmitting and receiving terminals are determined, and the real-time RF power of the terminal is measured. Through hardware optimization and accurate determination of calibration targets, comparing real-time RF power with calibration targets, the control instructions containing precise calibration quantities can be obtained, and the RF power calibration function can be achieved by executing these instructions. The conclusion drawn from the system testing experiment is that the optimized system reduces the power level of signal intermodulation distortion products by 7 dBc

收稿日期:2024-12-27; 修回日期:2025-02-11。

基金项目:国家级自然项目科学基金(71902011371);陕西高等教育教学改革研究项目(21GG005)。

作者简介:刘小飞(1983-),男,硕士,讲师。

引用格式:刘小飞. 基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(6): 254-263, 271.

after the calibration. Considering both static and dynamic environments, the RF power calibration error of the optimized system is reduced by 2.53 dBm. Under the action of the calibration system, the communication quality coefficient of the drone's multi-mode terminal is significantly improved.

Keywords: FPGA collaborative control; multi mode terminal for UAVs; RF power calibration; intermodulation distortion suppression; hardware system optimization

0 引言

在当今无人机技术飞速发展的背景下,无人机在众多领域得到了广泛应用,其多模终端作为实现无人机与外部通信的关键设备,需要支持多种频段的通信模式,以确保在复杂多变的环境下,无人机与外部控制中心之间通信链路的稳定可靠^[1-2]。然而,随着无人机应用场景的日益复杂和通信需求的不断提高,对多模终端射频功率的精确校准变得愈发重要。射频功率校准的准确性直接关系到无人机通信的质量和效率。但目前在实际应用中,多模终端存在多种模式信号相互作用产生互调失真的问题,这严重影响了射频功率校准后的通信质量系数,给无人机的高效、稳定通信带来了巨大挑战。因此,如何有效解决这一问题,实现无人机多模终端射频功率的实时、精确校准,成为当前无人机通信领域亟待解决的重要课题。

无人机多模终端射频功率校准是指对无人机上搭载的多模通信终端的射频输出功率进行精确调整和优化,以确保其符合预定的通信标准和实际需求。现阶段发展较为成熟的射频功率校准系统中,文献[3]提出的基于准牛顿控制算法的射频功率放大控制系统在65 nm CMOS工艺中使用准牛顿控制算法实现CMOS功率放大器的新鲁棒方法,该方法在2.4~16.4 GHz频带的冗余宽带上提供了最佳性能参数,采用并推导了零极点补偿技术,在功率放大器的支持下,实现无线系统终端的功率校准控制。上述系统仅能对射频功率进行放大校准,在多模信号环境下,可能存在其他频段或者信号组合产生的互调失真无法被有效抑制的情况。文献[4]提出的基于图着色的功率控制系统通过实施基于图形着色原理的导频分配策略,有效减轻了导频污染问题,提升了信道估计的精确度,借助最大-最小功率调控算法,降低多用户间因同频而产生的相互干扰,从而确保了系统中各类用户混合服务质量的满足,并实现了功率的有效控制与精准校准。基于图着色的功率控制系统无法对互调失真进行抑制或修正,导致终端射频功率分配产生偏差,最终导致校准结果与预期结果存在明显偏差。文献[5]提出的基于SumTree采样结合Double DQN的多用户动态功率控制系统在不断适应动态环境变化的过程中,系统通过持续学习,采用较低的发射功率来执行功率控制任务,该系统能够分离目标Q值动作的选择与目标Q值的计算过程,降低过度估计的风

险,并有效减少了算法执行中的损耗。然而该系统当互调失真较为严重时,算法可能无法像硬件优化方法那样有效地减少互调失真对射频功率测量的影响,从而影响功率校准的准确性。文献[6]提出的采用DDPG的功率控制系统终端接收到来自各基站的这些本地样本后,首先利用深度Q学习技术对波束成形方案进行精心设计与优化,鉴于深度Q学习在处理连续变量上的局限性,终端随后转而采用深度确定性策略梯度算法来求解功率控制问题,这一转换有效解决了原深度Q学习在连续控制场景中的不适用性问题。上述系统在运行过程中,采用DDPG的算法在处理这种复杂的多模信号时,可能没有充分考虑到不同模式信号之间的相互作用以及由此产生的互调失真等问题,无法保证最终的功率校准效果。

鉴于现有方法在应对多模终端射频功率校准中存在的不足,尤其是在多模信号互调失真处理方面的缺陷,本文聚焦于无人机多模终端,设计一种新的基于FPGA协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统,以有效解决这些问题并实现更精确的射频功率校准。

1 基于FPGA协同控制的无人机多模终端射频功率校准硬件系统设计

无人机多模终端射频功率系统包含射频功率测量仪、功率放大器、衰减器、校准执行器以及主控元件。其中,射频功率测量仪将测量到的无人机多模终端的射频功率信号传输给主控元件的输入输出模块,为主控元件提供校准所需的初始数据。多模终端信号滤波器接收来自无人机多模终端的多模信号,对其进行滤波处理后,将干净的信号输出给射频功率测量仪进行测量,同时也将相关信号反馈给主控元件。射频功率放大器接收经过滤波的射频信号,进行功率放大后输出。其工作状态由主控元件通过输入输出模块发送控制信号进行调整。射频功率衰减器接收放大后的射频信号,根据主控元件的指令对功率进行衰减。其衰减量和步进精度由主控元件控制。射频功率校准电路连接功率放大器和衰减器,根据主控元件的指令协调两者的工作,以实现精确的射频功率校准。同时,将校准过程中的状态信息反馈给主控元件。主控元件通过输入输出模块接收来自射频功率测量仪、多模终端信号滤波器和射频功率校准执行器的信号,经过内部可编辑逻辑单元的处理后,输出控制信号到这些设备,实现对整个

系统的智能化协同控制。无人机多模终端射频功率系统硬件组成如图 1 所示。

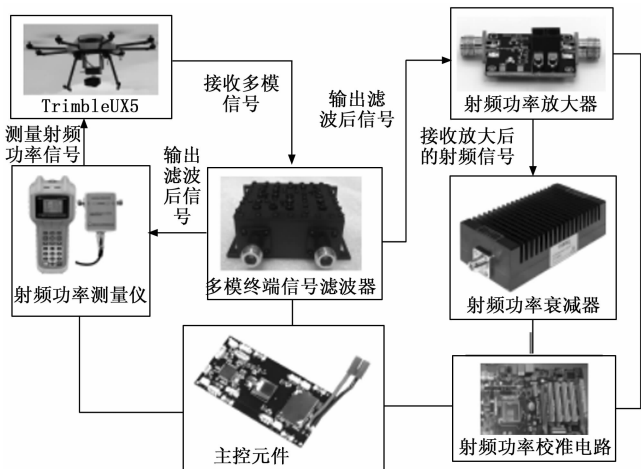


图 1 无人机多模终端射频功率系统硬件组成图

然而，在无人机多模终端的硬件系统中，多模信号中的干扰成分会导致互调失真，这严重影响着射频功率测量的准确性，而传统的射频功率测量仪可能无法很好地应对这种复杂的情况。同时，要实现精确的射频功率校准，需要协调功率放大器、衰减器以及校准执行器等多个元件之间的关系。

为了解决这些难点问题，通过对射频功率测量仪进行改装，使其能够更好地适应多模信号环境；加设多模终端信号滤波器，有效过滤干扰成分，从而减少互调失真对测量结果的影响；构建射频功率校准电路，将功率放大器和衰减器进行有效连接，并对校准执行器进行优化；同时，对主控元件进行改装，使其基于 FPGA 实现智能化协同控制，进而优化整个校准硬件系统。这些方法的综合应用，有助于显著提高硬件系统的整体性能，确保射频功率测量的准确性，提升系统在实际应用中的稳定性和可靠性，为无人机多模终端的高效运行提供坚实的硬件支撑。

1.1 改装射频功率测量仪

在原有硬件系统中，所使用的射频功率测量仪在测量无人机多模终端实际射频功率时存在一定局限性。原测量仪采用传统的传感器探头，其测量频率范围较窄，无法完全覆盖无人机通信中常用的频段，且只能对单个终端设备进行测量，难以满足多个终端设备射频功率同步测试的需求，测试效率和准确性较低，功率的动态测量范围也相对有限。

在硬件系统中，射频功率测量仪主要用来测量无人机多模终端的实际射频功率，将其作为射频功率校准的初始值。在优化设计硬件系统中，使用的射频功率测量仪为 XL14-4304A 型号的射频功率传感器，该传感器在 800 MHz 以下时，最大测量功率为 150 W，频率范围覆

盖 25~500 MHz，覆盖了无人机通信中常用的频段。该设备以能量守恒定律作为工作原理，即将输入电路中的功率等于输出电路中的功率。通过将高频电信号通过能量转换为可以直接检测的电信号，实现功率的测量。

为满足多个终端设备射频功率同步测试的需求，对 XL14-4304A 型号的射频功率测量仪进行改装。移除原有的传统传感器探头，安装二极管探头，确保其稳定连接。并利用多通道技术，以便同时接收和测量来自多个终端设备的射频信号，从而提高了测试效率和准确性。其中，插入驻波比在 25~512 MHz 时为 1.08，在 512 MHz 以上为 1.12，从而有效地扩展了功率的动态测量范围，从而为多个终端设备射频功率的同步测试提供了可能。

1.2 加设无人机多模终端信号滤波器

传统的射频功率校准系统通常缺乏对多模终端信号的特殊处理机制，在面对复杂的多模信号环境时，互调失真容易对射频功率测量产生不利影响，同时，无人机多模终端在实际运行环境中，外界干扰也会给射频功率信号以及校准控制信号带来诸多负面影响。为解决这些问题，本系统在传统硬件系统的基础上，专门加设了一个无人机多模终端信号滤波器。该滤波器对于有效抑制多模信号中的干扰成分、减少互调失真具有显著效果，是提高射频功率校准精度的关键因素之一。滤波器的核心工作电路如图 2 所示。

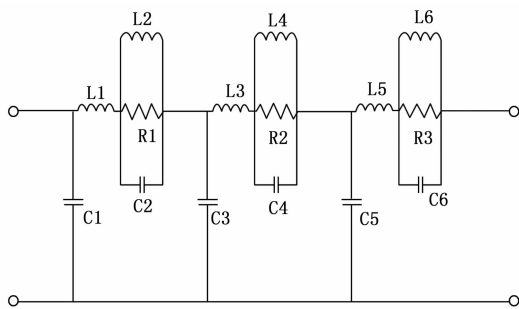


图 2 无人机多模终端信号滤波器工作电路图

在信号滤波器改装过程中，充分考虑了无人机多模终端的特性。针对其通信特点，调整滤波器输入接口的接线结构，并配备多种可选探头，接口包括 N 型、SMA 型，方便与滤波器和其他射频设备连接，以适应不同频段和功率范围的测量需求，从而保证信号滤波器能够覆盖多个通信频段、支持多模信号处理的滤波器阵列。

采用模块化设计思路，将滤波器分解为多个子模块，每个模块针对特定频段或调制方式进行优化，以实现高效、精准的滤波效果。针对无人机多模终端通信中的高频信号，可考虑采用数字滤波器结合高性能 DSP 的方式，以此实现更高的滤波精度和更快的处理速度，

从而有效地过滤多模信号中的干扰成分。

1.3 多模终端射频功率校准执行器

本系统构建的射频功率校准电路与优化后的多模终端射频功率校准执行器之间实现了协同工作的创新机制。通过精确的电路设计和执行器优化，二者能够实时、精准地配合，根据主控元件的指令快速调整射频功率，从而提高校准速度和精度方面具有独特的优势。根据无人机多模终端实际射频功率与目标射频功率之间的偏差，可以将射频功率校准工作分为功率放大、功率衰减等多种类型，为保证射频功率校准任务的有效执行，改装设计校准执行器，执行器包含放大器、衰减器、校准电路等多个部分，根据系统运行需求，调用相应元件，执行相应的校准任务。

1.3.1 射频功率放大器

优化设计硬件系统中射频功率放大器的组成结构如图 3 所示。

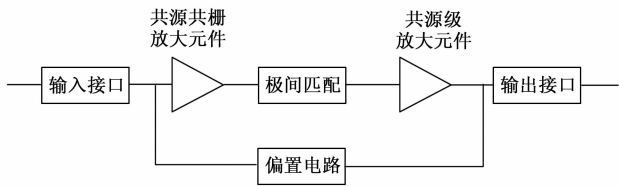


图 3 射频功率放大器组成结构图

从图 3 中可以看出，优化设计的射频功率放大器采用两级放大结构，第一级放大电路使用共源共栅放大电路，采用 GaN 基的高频 FET 晶体管、负载电阻为 50 Ω，第二级采用共源级放大电路作为输出级，放大电路的场效应管为 GaAs 高频 FET，同时耦合电容和旁路电容，工作频率范围 2.4~5.8 GHz，增益 15 dB，最大输出功率 5 W。其中共栅放大电路由两个 MOSFET 级联而成，其中一个 MOSFET 的源极和栅极直接连接在一起，共用一个输入信号，并连接一个负载电阻。共源级放大电路主要由场效应管、源极电阻、栅极电阻、漏极电阻以及必要的耦合电容和旁路电容组成。在这种电路中，场效应管的栅极作为输入端，漏极作为输出端，而源极则通常接地或通过电阻接地^[7]。

在实际运行过程中，将无人机多模终端射频功率信号分别输入到共源共栅和共源级放大模块中，达到预期的功率放大效果，为后续的射频功率校准工作提供足够的功率支持。

1.3.2 射频功率衰减器

射频功率衰减器的工作目的是降低当前输入的射频功率，优化设计系统中使用的衰减器作为数字步进衰减器^[8]。选取 Pasternack PE4302 系列数字步进衰减器，衰减范围为 0~31.5 dB，步进精度可达 0.5 dB，满足精确控制衰减的需求，工作频率范围可覆盖 DC 至

6 GHz，适用于多种无线通信应用。

为了更好地适应无人机多模终端的蜂群自组网环境，对射频功率衰减器的结构进行了调整，采用布里吉曼拓扑结构。这种拓扑结构能够更精确地控制衰减和相位响应。根据内部拓扑结构的调整结果，尽量减少信号路径上的不连续性和反射，以降低插入损耗和回波损耗，确保射频功率衰减过程的稳定性和准确性。

1.3.3 射频功率校准电路

为了准确执行不同的射频功率校准任务，构建射频功率校准电路，校准电路的设计结果如图 4 所示。

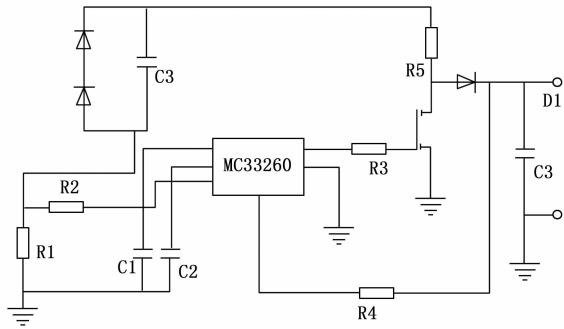


图 4 射频功率校准电路图

图 4 中，D1 为输入端口，主要负责接收无人机多模终端在蜂群自组网环境中的射频信号。优化设计的射频功率校准电路包含电阻器和耦合电容等元件，其中电阻器在电路里起到分压、限流或者作为匹配元件的作用。此射频功率校准电路通过连接功率放大器和衰减器，从而为射频功率校准工作提供必要的电路基础，确保校准工作的顺利进行。

1.4 主控元件

在硬件系统中，为确保优化设计后的各个硬件元件，包括射频功率测量仪、无人机多模终端信号滤波器、连接功率放大器和衰减器的射频功率校准电路、多模终端射频功率校准执行器等之间能够协同运行，在传统硬件系统的基础上增设了一个主控元件。对主控元件的改装不仅仅是简单的硬件升级，更重要的是在软件程序方面的智能化创新。通过编写智能化的控制程序，主控元件能够根据无人机多模终端的实时工作状态自动调整校准策略。这种智能化的调整机制使得系统在面对复杂多变的工作环境时，具备更强的适应能力，进而显著提高了系统的整体性能以及运行的可靠性。

此主控元件采用 FPGA 作为核心部件，能够提供硬件数字电路所需的逻辑门阵列、寄存器资源以及常用的运算单元^[9]。FPGA 对改装后的射频功率测量仪、加设的无人机蜂群自组网多模终端信号滤波器以及构建的射频功率校准执行器进行智能化协同控制。FPGA 能够根据多模终端的实时工作状态，协调射频功率测量仪同

步对多个终端进行测试,确保获取准确的实时射频功率数据。同时,会控制信号滤波器及时过滤多模信号中的干扰成分,减少互调失真对测量的影响,为校准执行器提供可靠的输入。

优化设计的主控元件由输入输出模块、可编辑逻辑单元等部分组成,其中输入输出模块用于接收各个元件(如射频功率测量仪、信号滤波器、射频功率校准电路中的功率放大器和衰减器以及射频功率校准执行器等)工作信号,并输出控制信号。通过多样化的配置方案,I/O 模块能够单独适应多种电气规范,确保各类输入输出信号的阻抗匹配需求得以满足^[10]。作为 FPGA 芯片内部的基础构建块,可配置逻辑单元根据配置信息构建出多样化的数字电路,这些 CLB 广泛集成了查找表、选通电路及触发器,共同组成了一个可灵活调整的电路开关矩阵。通过精心配置,这些单元能够转化为组合逻辑、触发器功能或分布式 RAM 等电路形式。将上述组成元件通过互连电路进行连接,保证控制信号能够成功生成与输出,为整个硬件系统的协同运行提供坚实的保障。

2 多模终端射频功率校准系统软件功能设计

本系统软件以无人机多模终端为核心对象,依托硬件系统的支持,实现对无人机多模终端射频功率的准确校准功能。其主要功能包括模拟无人机多模终端工作过程、确定多模终端射频功率校准目标、测量多模终端实时射频功率、生成多模终端射频功率校准控制指令以及实现无人机多模终端射频功率校准功能。通过这些功能的协同作用,能够有效克服因多种模式信号互调失真等因素造成的射频功率测量不准确问题,保障无人机多模终端系统的稳定运行和高效通信。首先,基于优化后的硬件系统模拟无人机多模终端的工作过程,分析多种模式信号共存时的交互状态;根据模拟结果,综合考虑无人机实际的通信任务,确定多模终端射频功率的校准目标;利用硬件系统中的射频功率测量仪采集多模终端的工作信号,经过滤波处理后测量多模终端的实时射频功率;将实时测量的射频功率与校准目标进行对比,计算校准控制量,生成多模终端射频功率校准控制指令;采用开环和闭环相结合的功率控制方式,驱动硬件系统中的校准执行器执行校准控制指令,实现对无人机多模终端射频功率的校准,直至达到校准目标。

2.1 模拟无人机多模终端工作过程

在无人机多模终端的运行环境中,多种模式信号相互作用时产生的互调失真现象,会给射频功率的测量与校准工作带来严重干扰。为了解决这一问题,基于优化后的硬件系统,对无人机多模终端的工作过程进行模拟。通过这种模拟方式,可以深入分析多种模式信号共

存时的交互状态,准确把握互调失真对射频功率测量干扰的根源,为在实际系统中实现射频功率的精确测量和校准提供有效指导,最终提高整个无人机多模终端系统的通信效率。

无人机多模终端通过与外部设备之间建立的无线通信链路,实现信息的实时交换和共享。在这个过程中,每架无人机都具备路由和主机的双重功能,能够自主地进行数据转发和路由维护^[11]。无人机多模终端系统主要由无人机、引领无人机、成员无人机、无人机蜂群、地面基站等部分组成,在这样的系统环境中,能够支持多种通信模式和标准的无人机设备,即为多模终端。

在多模终端工作时,多种模式信号共存可能会由于信号的相互干扰导致射频功率测量不准确。而明确信号传输过程中的正常衰减和相位变化规律,能够与因互调失真等异常因素导致的变化区分开来。对于无人机多模终端系统,其中任意无人机终端的发射信号可以量化表示为:

$$x_{\text{receive}} = x_{\text{transmit}} - \left[20\lg(d) + 20\lg(f) + \lg\left(\frac{4\pi}{v_c}\right) \right] \quad (1)$$

式中, x_{transmit} 和 x_{receive} 分别为初始发射信号和最终接收信号, d 、 f 和 v_c 分别对应的是通信信号传输距离、通信频率和光速^[12]。根据公式(1)可以准确预测接收信号的强度和相位,当测量结果与预测值出现偏差时,就可以初步判断是互调失真或者其他异常因素的影响,从而为后续准确测量射频功率提供基础数据和判断依据。

在无人机多模终端系统中,不同角色的无人机能耗模式不同,而能耗与信号传输的稳定性和功率控制密切相关。在通信状态下,无人机的总能耗可以表示为:

$$E_z = E_{\text{com}} + E_{\text{power}} \quad (2)$$

式中, E_{com} 和 E_{power} 分别为通信能耗和动力能耗,通信能耗具体包含无线电发射能耗和接收能耗^[13]。

在无人机多模终端系统中,不同角色的无人机在切换过程中,如果能量管理不当,可能会导致网络拓扑结构的不稳定,进而影响信号传输和射频功率。按照无人机多模终端系统中引领机、侦察机、跟随机 3 种角色的切换,在理想情况下,无人机蜂群整体能量将同时耗尽,此时获得最大的网络生存时间为:

$$T_{\text{max}} = \frac{x_{\text{receive}}(n_{\text{lead}} + n_{\text{investigate}} + n_{\text{follow}})(E_z - E_0)}{H_{\text{lead}} + H_{\text{investigate}} + H_{\text{follow}}} \quad (3)$$

其中: n_{lead} 、 $n_{\text{investigate}}$ 和 n_{follow} 分别为 3 种角色无人机的数量, H_{lead} 、 $H_{\text{investigate}}$ 和 H_{follow} 分别为 3 种角色无人机的功耗值, E_0 为无人机的初始能量。

按照上述方式,即可实现对无人机多模终端工作过程的模拟。

2.2 确定多模终端射频功率校准目标

根据无人机多模终端工作过程的模拟结果,综合考

考虑无人机实际的通信任务，确定多模终端射频功率的理论值，以此作为射频功率的校准目标^[14]。多模终端射频功率包括发射功率和接收功率两个部分，发射功率是指无人机在进行通信时，通过天线辐射到自由空间的平均功率。对于任意一架无人机，其发射功率的理论值可以表示为：

$$P_{\text{transmit-m}}(i) = n_{\text{com}} \{10\lg[P_{\text{out}}(i)] + G_{\text{transmit}}\} \quad (4)$$

其中： $P_{\text{out}}(i)$ 为第 i 个无人机的实际输出功率， G_{transmit} 为发射天线的增益值， n_{com} 为无人机通信数据量^[15]。另外，多模终端射频功率中接收功率理论值的计算结果为：

$$P_{\text{receive-m}}(i) = \frac{P_{\text{transmit-m}}(i)G_{\text{transmit}}G_{\text{receive}}}{\varphi_{\text{route}}} \quad (5)$$

式中， G_{receive} 为接收天线增益， φ_{route} 为通信信号传输路径损耗，其中变量 φ_{route} 的具体取值由空气损耗、障碍物损耗以及阴影衰落等因素决定^[16]。

按照上述方式，综合考虑无人机在实际环境中执行的通信任务，确定各多模终端射频功率校准目标的确定结果。通过这种方式，为后续基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准提供明确的目标依据。

2.3 测量多模终端实时射频功率

在多模终端环境下，无人机信号传输复杂，各种模式的信号相互交织，如果不能准确测量射频功率，可能会引起网络拓扑结构的不稳定。实时射频功率测量可以为维持网络的稳定提供保障，确保每架无人机都能正常发挥其路由和主机的双重功能，保障整个无人机多模终端系统的正常运行。在此背景下，利用硬件系统中的射频功率测量仪来测量多模终端实时射频功率成为解决问题的关键步骤。

利用硬件系统中的射频功率测量仪，通过无人机多模终端工作参数的采集，求解多模终端射频功率的实际值^[17]。首先利用射频功率测量仪的信号采集元件，对多模终端的实时工作信号 $c(t)$ 进行采集，采集结果如下：

$$c(t) = \kappa_c \times c_s(t) \times \frac{f_{\text{com}}}{f_c} \quad (6)$$

式中， $c_s(t)$ 为 t 时刻无人机任意多模终端的实际通信信号， κ_c 为终端工作信号的采集系数， f_{com} 和 f_c 分别对应的是无人机的通信频率和工作信号采集频率^[18]。这一步骤有助于获取多模终端原始的工作信号状态，为后续准确测量射频功率奠定基础。因为只有准确获取原始信号，才能在后续步骤中分析是否存在因互调失真等因素导致的信号异常对射频功率测量的影响。

在多模信号共存的环境下，原始采集的信号可能包含多种干扰成分，滤波处理能够去除一些因互调失真或

其他干扰因素产生的杂波信号，使得采集结果满足质量要求。为保证优化设计系统的校准精度，利用硬件系统中的滤波器对初始采集的工作信号进行滤波处理，处理过程可以量化表示为：

$$c_{\text{filtering}}(t) = y_{\text{filtering}}[c(t)] \quad (7)$$

其中： $c_{\text{filtering}}(t)$ 为滤波处理后的工作信号， $y_{\text{filtering}}()$ 为工作信号滤波函数。

将实时采集的所有工作信号代入公式 (7) 中，即可得出满足质量要求的工作信号采集结果。在实时工作信号的支持下，得出多模终端实时射频功率的测量结果，即：

$$\begin{cases} P_{\text{transmit}}(t) = \frac{U_{\text{RMS}}^2}{R}, U_{\text{RMS}} \in c_{\text{filtering}}(t) \\ P_{\text{receive}}(t) = 10\lg[P_{\text{transmit}}(t)] - P_{\text{loss}} \end{cases} \quad (8)$$

式中， U_{RMS} 和 R 分别为通信信号电压均方根值和负载阻抗值， P_{loss} 为实际通信阻抗，可通过传感器的运行即可得出 P_{loss} 的具体取值^[19]。重复上述操作，对无人机多模终端运行数据进行更新，并得出任意时刻多模终端射频功率的动态测量结果。

2.4 生成多模终端射频功率校准控制指令

在无人机多模终端工作场景下，之前的硬件优化和校准目标确定为此步骤奠定基础，将实时射频功率与校准目标对比得出包含精确校准量的控制指令意义重大。其能检测因互调失真等造成的功率偏差，量化偏离程度以解决功率测量不准确问题，有助于精准调整系统提高信号传输质量、维持信息交换高效性和网络结构稳定。

模拟多模终端工作过程确定发射和接收终端校准目标后，FPGA 主控元件会综合分析实时射频功率与校准目标之间的差异，会协同校准执行器中的射频功率放大器、数字步进衰减器及校准电路，根据差异生成精确的控制指令，使得各部件相互配合，共同实现射频功率的校准功能。这种硬件与软件、各个部件之间的相互配合与协调工作，充分体现了“协同控制”的特点，从而确保系统能够高效、精确地完成无人机多模终端射频功率的实时校准任务。根据实时测量到的射频功率值和基准数据之间的偏差，计算当前射频功率的校准控制量，计算公式如下：

$$\begin{cases} \Delta P_{\text{transmit}}(t) = P_{\text{transmit}}(t) - P_{\text{transmit-m}} \\ \Delta P_{\text{receive}}(t) = P_{\text{receive}}(t) - P_{\text{receive-m}} \end{cases} \quad (9)$$

将相关数据的测量与计算结果代入公式 (9) 中，即可得出校准控制量的计算结果。根据公式 (9) 表示校准控制量的正负属性可以确定当前射频功率与校准目标之间的大小关系，若 $\Delta P_{\text{transmit}}(t)$ 取值为正，说明当前射频功率高于校准目标，这意味着多模终端射频功率过高可能是受到互调失真等因素影响，此时需要对多模终端射频功率进行衰减处理；反之，当 $\Delta P_{\text{transmit}}(t)$ 取值为

负时也能得出相应处理方式。进而以计算得出的多模终端射频功率校准控制量为内容,生成作用到多模终端的射频功率校准控制指令,生成结果为:

$$K = \theta \times [\Delta P_{\text{transmit}}(t) + \Delta P_{\text{receive}}(t)] \quad (10)$$

其中: θ 为校准方向角。

通过公式 (9) (10) 的联立,即可得出多模终端射频功率校准控制指令的生成结果。这一系列操作有助于精准调整多模终端的射频功率,克服因互调失真等因素造成的射频功率测量不准确的问题,从而保障无人机多模终端系统的稳定运行和高效通信。

2.5 实现无人机多模终端射频功率校准功能

为执行生成的多模终端射频功率校准控制指令,采用开环和闭环相结合功率控制方式,实现系统的射频功率校准功能。多模终端射频功率的校准控制原理如图 5 所示。

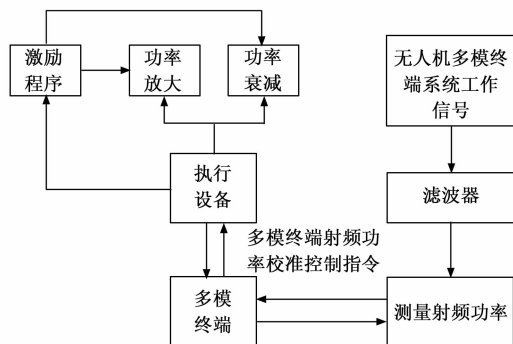


图 5 多模终端射频功率的校准控制原理图

在实际的多模终端射频功率校准过程中,开环功率控制机制旨在预估信道衰减状况,并据此执行相应的补偿操作。在系统中,每个多模终端依据接收到的上行链路信号强度评估路径损耗,进而调整地面基站的发射功率。而闭环功率控制则是地面基站依据自身发送的功率调控指令,动态调整其发射功率的过程。此过程中,基站会监测并分析来自各地面基站的信干比,将其与预设阈值进行对比,以决定是提升还是降低对地面基站的发射功率指令^[20]。地面基站结合接收到的功率控制指令与自身的开环估算结果,综合确定在闭环控制模式下应采用的发射功率水平。以多模终端射频功率的放大校准控制为例,需要对其放大系数进行计算,计算公式如下:

$$\gamma_{\text{amplify}} = K \frac{\Delta P}{t_{\text{calibration}}} \quad (11)$$

其中: $t_{\text{calibration}}$ 为多模终端射频功率的预期校准时间。在公式 (11) 的支持下,驱动硬件系统中的校准执行器执行生成的校准控制指令。当通过测量发现当前多模终端射频功率与校准目标值相同时,即表明校准任务执行完成,此时系统会终止射频功率校准程序。这样,通过开环和闭环相结合的功率控制方式,能够更加精准、高

效地实现无人机多模终端的射频功率校准功能,确保系统的稳定运行和通信质量。

3 系统测试

为测试基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统的校准功能和应用性能,设计了系统测试实验。根据实验目的将系统测试实验分成校准功能测试和应用性能测试两个部分,系统校准功能测试主要是利用优化设计系统,判断多模终端的实际发射、接收功率是否与预期校准目标相同,从而验证优化设计系统的功率校准精度。而系统应用功能测试则是判断在优化设计校准系统作用下,是否能够保障无人机之间的通信质量。为保证优化设计校准系统能够适应无人机的不同运行状态,此次实验分别从静态和动态两种工况下进行,通过重复实验得出系统功能和性能的精准测试结果。

3.1 准备无人机样机

此次实验准备 TrimbleUX5、SLA-4800、DJI Mini4 Pro 三种型号的无人机设备作为实验样机,用于搭载多模终端进行测试。其中 TrimbleUX5 型无人机采用航空泡沫材料和碳纤骨架的复合结构,配备强劲的动力系统,支持高海拔飞行,同时集成先进的飞行控制技术,配备 TrimbleAccess 野外操作软件,实现高度自动化设计。该型号无人机的最大飞行高度为 5 000 m,滞空时间最大值为 50 min。SLA-4800 型无人机完全采用碳纤维材料制成,集成多种高精度传感器和卓越的控制算法,配备 Waypoint 自动飞行系统。SLA-4800 型无人机的轴距为 1 400 mm,巡航速度和爬升速率分别为 12 m/s 和 6 m/s,空载重量为 5.5 kg。DJI Mini4 Pro 型无人机采用超轻型可折叠机身设计,搭载旗舰级 DJI O4 图传系统,支持远达 20 km 的高清图传。在实验开始之前,首先检查无人机本体、遥控器、电池、充电器、存储卡等配件齐全且完好无损,且确保无人机电池处于满电状态。

3.2 布设无人机多模终端通信环境

以准备的无人机样机为多模终端,在路由器、交换机等设备的支持下,构建无人机多模终端通信环境,通信环境的拓扑结构如图 6 所示。

图 6 表示的自组网中包含的无人机数量为 12 个,在通信环境布设过程中,需要保证所有搭载多模终端的无人机均配有无线通信模块,从而支持所需的通信频段和协议。使用 TP-Link TL-R860M 作为无人机通信环境的路由器,该路由器内置防火墙,保证布设网络的通信安全。交换机型号选择的是 TP-LINK 5 口百兆交换机,集线器为 RS485/232 型。根据无人机蜂群的特点和需求,选择 TCP/IP 作为通信协议。

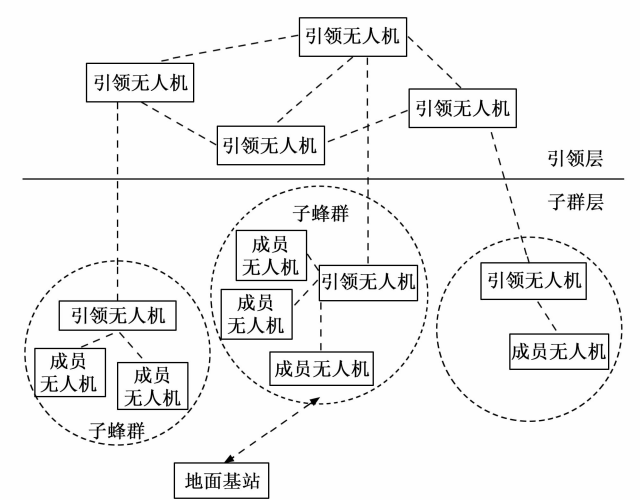


图 6 无人机多模终端通信环境组成结构图

为保证优化设计系统能够适应无人机的不同运行状态，分别设定静态和动态两种工况，静态网络工况下，网络中的所有无人机均处于悬停状态，飞行高度在区间 $[0, 200]$ 内，在执行通信任务过程中无人机不会产生明显位移。对于动态工况，模拟多种复杂的实际飞行场景，以更全面地测试系统性能。具体如下：

1) 直线飞行场景：部分无人机按照预设的直线轨迹进行飞行，飞行速度设定在 $3\sim 8\text{ m/s}$ 之间，模拟无人机在开阔区域进行长距离通信任务时的状态。飞行高度在 $50\sim 150\text{ m}$ 范围内随机变化，以模拟不同的飞行环境对射频功率的影响。

2) 圆周飞行场景：安排一组无人机围绕一个固定点进行圆周飞行，圆周半径在 $50\sim 200\text{ m}$ 之间，飞行速度保持在 $5\sim 10\text{ m/s}$ 。这种场景模拟了无人机在进行区域巡逻或监测任务时的飞行状态，此时无人机之间的相对位置和距离不断变化，对射频功率的校准和通信质量提出了更高的要求。

3) 编队飞行场景：多架无人机组成特定的编队形状（如三角形、菱形等）进行飞行，编队飞行过程中，无人机之间需要保持相对稳定的距离和位置关系。飞行速度在 $4\sim 7\text{ m/s}$ 之间，飞行高度在 $80\sim 180\text{ m}$ 范围内波动。编队飞行场景模拟了无人机在执行协同任务时的实际情况，对系统的实时校准能力和通信稳定性是一个严峻的考验。

在此基础上，分别确定无人机样机的实时飞行位置和飞行轨迹，使网络中的无人机处于移动状态，实现动态无人机通信环境的布设。

3.3 生成多模终端射频功率校准控制任务

在静态和动态网络工况下，设定无人机多模终端射频功率的初始值，以此作为射频功率校准的初始数据。射频功率初始数据的设定情况如图 7 所示。

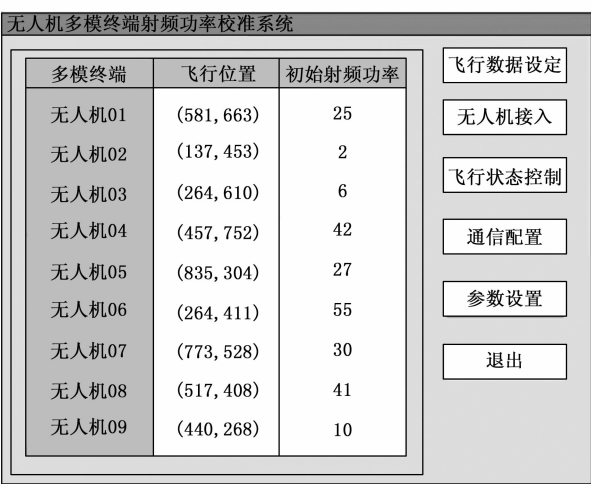


图 7 多模终端射频功率初始值设定界面

根据无人机通信任务的需求，设定各个多模终端的射频功率预期值，由此得出多模终端射频功率校准任务的生成结果，如表 1 所示。

表 1 轮对各个分量与原始信号比较

多模终端节点编号	网络通信数据量/MB	静态工况下的射频功率目标值/dBm	动态工况下的射频功率目标值/dBm
P1	580	15	25
P2	620	18	29
P3	770	16	28
P4	450	8	20
P5	330	12	26
P6	560	10	25
P7	1 080	14	30
P8	940	27	19

由于无人机的运行状态处于动态变化中，因此多模终端射频功率及其校准控制任务存在动态变化，并实时记录射频功率的初始值和目标值。

3.4 描述系统测试实验过程

将多模终端与无人机系统中的通信模块相连接，确保数据传输的畅通无阻，使用专用线缆将射频功率校准设备连接到多模终端的射频接口上，以便进行功率测量和调整。将多模终端和校准设备固定在无人机上，确保其在飞行过程中不会因振动而松动或损坏。

基于优化后的硬件系统，在软件中编写模拟程序，模拟无人机多模终端多种模式信号共存时的工作状态。利用硬件系统中的射频功率测量仪采集多模终端的工作信号。在软件中，通过 FPGA 的接口驱动程序，实现对射频功率测量仪的控制和数据读取。采集到的信号可能包含噪声和干扰，需要进行滤波处理。在软件中实现数字滤波算法，通过对采集到的信号进行滤波，去除噪声和干扰，提高信号的质量，以便准确测量多模终端的实时射频功率。在软件中编写程序，将经过滤波处理后

测量得到的多模终端实时射频功率与校准目标进行比较。计算两者之间的差值,作为校准控制的依据,将校准控制量转换为校准执行器能够识别的控制指令。在开环控制的基础上,引入闭环控制机制。如果发现功率仍然存在偏差,则根据偏差情况再次调整校准控制指令,驱动校准执行器进行进一步的功率调整,直到达到校准目标。在无人机处于运行状态下,得出各多模终端射频功率的校准结果,系统运行结果如图 8 所示。

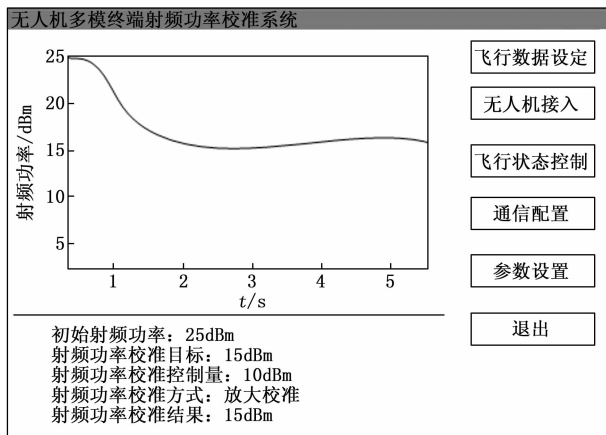


图 8 多模终端射频功率校准系统运行界面

重复上述操作,得出静态和动态两种工况下,无人机多模终端射频功率的校准输出结果。

3.5 设置系统测试指标

根据实验目的,设置多模终端射频功率校准误差作为系统校准功能测试指标,该指标的测试结果为:

$$\epsilon = |P_{\text{calibration}} - P_m| \quad (12)$$

式中, $P_{\text{calibration}}$ 和 P_m 分别为系统作用下射频功率的校准结果以及校准目标数据,在实际测试过程中,包含发射功率和接收功率两个部分。计算得出射频功率校准误差越小,说明系统校准功能越优。

基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统设计的目的是提高无人机通信质量,因此设置系统的应用性能测试指标为通信质量系数,测试结果如下:

$$\zeta = \omega_1 W + \omega_2 \times \frac{1}{\tau} + \omega_3 \times (1 - \eta) + \omega_4 \times (v_{up} + v_{down}) \quad (13)$$

其中: W 、 τ 、 η 、 v_{up} 和 v_{down} 分别为无人机蜂群自组网的吞吐量、通信时延、丢包率、上行速率和下行速率, ω_i 为融合权重参数。最终计算得出通信质量系数取值越大,说明对应系统的应用性能越优。

3.6 系统测试实验结果与分析

3.6.1 互调失真抑制效果分析

选用型号为 XL14-4304A 的频谱分析仪,该频谱分

析仪具有高分辨率以及高精度的功率测量能力,能够准确测量信号的互调失真产物的功率电平。使用高精度 Aeroflex 3025 6 GHz 数字射频信号源作为信号输入源,其中的 3025 射频信号源与 3010 频率合成器一起组成了一个结构紧凑、高精度的数字信号发生器,3025 在 3U 高的 PXI 机架中仅占用两个插槽,以模拟无人机多模终端可能遇到的各种信号情况。选取功率电平作为评价指标,验证系统的互调失真抑制效果如图 9 所示。

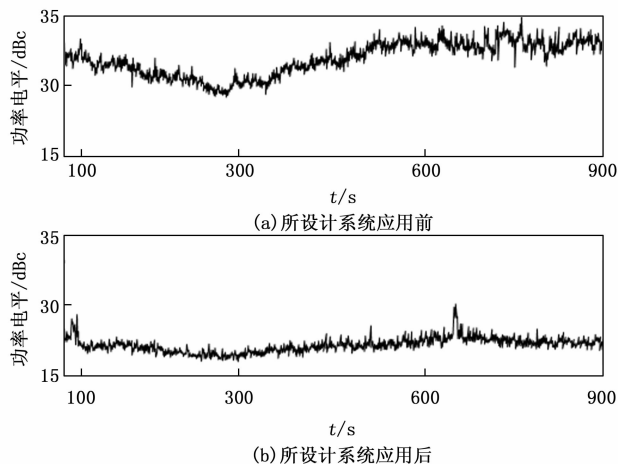


图 9 互调失真抑制效果

从图 9 可知,通过频谱分析仪测量校准前后信号的互调失真产物的功率电平。本系统校准后的信号互调失真产物功率电平相比传统系统降低了 7 dBc,表明本系统设计的信号滤波器以及整体的校准策略在抑制互调失真方面效果显著。

3.6.2 系统校准功能测试结果

为了对比验证本系统的性能,实验设置文献 [3] 的基于准牛顿控制算法的射频功率放大控制系统和文献 [4] 的基于图着色的功率控制系统作为对比实验,将它们应用到相同的无人机通信环境中,得出对应多模终端射频功率的校准结果。设置准牛顿算法的初始步长设置为 0.1,收敛精度设置为 10^{-6} 。图着色算法功率分配的调整周期设置为 100 ms,以确保系统能够及时响应多模终端的状态变化。

在静态网络工况下,无人机多模终端射频功率校准功能的测试结果,如表 2 所示。

将表 2 中的数据代入公式 (12) 中,计算得出静态网络环境下,3 种系统射频功率校准误差的平均值分别为 4.00、2.25 和 0.50 dBm,动态工况下 3 种系统射频功率校准误差的平均值分别为 5.75、3.88 和 2.38 dBm,由此证明校准系统在动态环境中的射频功率校准误差更大,且优化设计系统的功率校准误差更小。这表明优化设计系统在射频功率校准方面具有更好的准确性和稳定性。无论是在相对稳定的静态网络环

境，还是在复杂多变的动态工况下，优化设计系统都能够更精准地进行射频功率校准，从而减少校准误差，这也进一步证明了优化设计系统在射频功率校准方面具有更优的性能。

表 2 多模终端射频功率校准功能测试数据表

多模终端节点编号	基于准牛顿控制算法的射频功率放大控制系统作用下的射频功率校准值/dBm		基于图着色的功率控制系统作用下的射频功率校准值/dBm		基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统作用下的射频功率校准值/dBm	
	静态环境	动态环境	静态环境	动态环境	静态环境	动态环境
P1	18	29	12	27	15	23
P2	14	22	16	26	18	27
P3	11	21	13	22	15	25
P4	11	27	10	25	9	22
P5	16	22	14	23	12	24
P6	15	29	12	29	10	22
P7	18	38	16	34	15	32
P8	23	14	29	15	28	16

3.6.3 系统应用性能测试结果

在多模终端射频功率校准系统作用下，对无人机通信质量进行测定，通过相关数据的统计与公式（13）的计算，得出系统应用性能的测试对比结果，如图 10 所示。

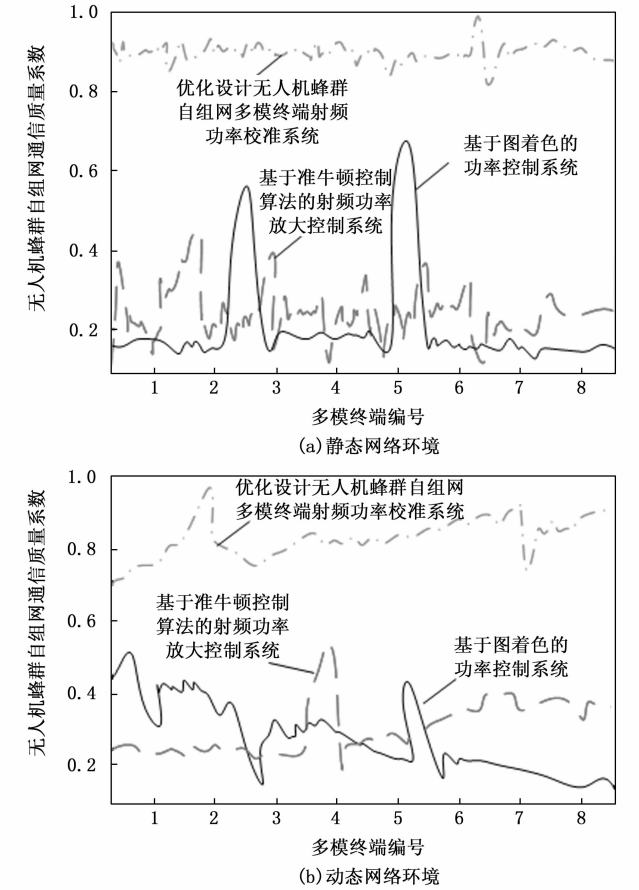


图 10 多模终端射频功率校准系统应用性能测试对比结果

(下转第 271 页)

由图 10 能够直观地发现，无论是在静态网络环境，还是在动态网络环境之中，应用基于 FPGA 协同控制的无人机多模终端射频功率实时校准系统均能够显著提升无人机的通信质量。通过对比可以看到，其通信质量系数相较于另外两种对比方法明显更高，这充分表明该优化设计系统具备更卓越的应用性能。

4 结束语

针对无人机多模终端因互调失真导致通信质量系数降低的问题，设计了基于 FPGA 协同控制的射频功率实时校准系统。通过硬件系统的优化设计，包括改装测量仪、增设滤波器、构建校准执行器及主控元件等，确定校准目标并对比实时功率得出控制指令以实现校准功能。经系统测试，优化设计系统在降低信号互调失真、减小射频功率校准误差方面成效显著，且能有效提升无人机多模终端通信质量系数。

尽管本研究取得了一定成果，但仍存在一些可以进一步探索和完善的方面。在未来的研究中，计划引入机器学习算法对不同工况下的射频功率变化进行预测，提前调整校准策略。另一方面，将考虑拓展系统的兼容性，使其不仅能够应用于现有的无人机多模终端，还能适配更多类型和型号的无人机设备，增强系统的通用性和实用性。此外，还会深入研究系统在极端环境条件（如高温、高湿度、强电磁干扰等）下的性能表现，并针对性地进行改进和优化，以确保系统在各种恶劣条件下都能稳定可靠地工作。

参考文献：

[1] 牛英滔, 姚 行, 张 凯. 基于干扰观测的无线通信系统抗干扰功率控制算法 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (11): 4033 - 4040.

[2] 徐素洁, 胡 欣, 王 银, 等. 基于深度强化学习的卫星动态功率控制技术 [J]. 陆军工程大学学报, 2022, 1 (2): 13 - 20.

[3] KUMAR K, KUMAR S, KANAUJIA B. A highly robust RF 65nm CMOS power amplifier design using Quasi-Newton control algorithm for wireless system [J]. Integration, 2023, 93: 1 - 11.

[4] 肖海林, 何怡玲, 胡智群, 等. 无小区大规模 MIMO 系统中基于图着色的导频分配与功率控制算法 [J]. 信号处理, 2023, 39 (7): 1309 - 1318.

[5] 刘 骏, 王永华, 王 磊, 等. 基于 SumTree 采样结合 Double DQN 的非合作式多用户动态功率控制方法 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (10): 1603 - 1611.

[6] 李中捷, 高 伟, 熊吉源, 等. 采用 DDPG 的联合波束成形和功率控制算法 [J]. 西安电子科技大学学报, 2022, 49 (4): 39 - 48.