

非对称成对载波接入无人机 5G 通信网 终端链路功率校准系统设计

郑朔毅

(中国移动通信集团有限公司 福建分公司, 福州 353003)

摘要: 无人机上的射频前端设备在处理信号时存在非线性特性, 若在进行功率校准时, 按照线性模型进行校准, 会产生较大的误差; 对此, 研究非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路功率校准系统; 在系统硬件部分, 改装链路功率计、载波/通信信号分析仪、频谱仪、衰减器与放大器 etc 硬件元件; 在系统软件设计部分, 模拟通信网终端链路中非对称成对载波接入过程建立终端链路, 根据链路特性, 分配无人机 5G 通信网终端链路功率; 并将其作为功率校准目标, 通过观测通信网终端链路实时功率, 校准目标与功率观测值以确定功率校准量, 实现系统的通信网终端链路功率校准功能; 通过系统测试得出结论: 与传统系统相比, 优化设计系统的功率校准偏差量明显降低, 误码率和丢包率的平均值分别为 1.2% 和 0.4%, 由此提升无人机 5G 通信网的通信质量。

关键词: 非对称成对载波; 无人机; 5G 通信网; 终端链路; 功率校准系统;

Design of 5G Communication Network Terminal Link Power Calibration System for an Asymmetric Paired Carrier Access UAV

ZHENG Shuoyi

(Fujian Branch of China Mobile Communications Group Co., Ltd., Fuzhou 353003, China)

Abstract: The RF front-end equipment on unmanned aerial vehicles (UAVs) exhibits nonlinear characteristics in signal processing. If power calibration is performed according to a linear model, it will result in significant errors. Therefore, research is conducted on the terminal link power calibration system for an asymmetric paired carrier access UAV 5G communication network. In the system hardware, modify hardware components such as a link power meter, a carrier/communication signal analyzer, a spectrometer, an attenuator, and an amplifier. In the system software, simulate the asymmetric paired carrier access process in the communication network terminal link to establish the terminal link, and allocate the power of the drone 5G communication network terminal link based on the link characteristics. And as a power calibration target, observe real-time power, calibration targets, and power observation value in the communication network terminal link, to determine the power calibration, achieving the power calibration function of the system's communication network terminal link. The conclusion drawn from the system testing is that compared with traditional systems, the optimized system significantly reduces the power calibration deviation, with an average error rate of 1.2% and packet loss rate of 0.4%, thereby improving the communication quality of the drone 5G communication network.

Keywords: asymmetric paired carriers; UAV; 5G communication network; terminal link; power calibration system

0 引言

非对称成对载波多址接入技术涉及在通信系统中使用非对称的成对载波来传输信息。这种技术允许系统以非对称的方式分配上行和下行链路的载波资源, 以优化系统性能, 满足不同用户或不同业务类型的需求。无人

机 5G 通信网终端链路是指无人机在 5G 通信网络环境下, 与地面控制站或其他终端设备进行数据传输的通道^[1]。将非对称成对载波接入到无人机 5G 通信网终端链路中能够优化资源分配、提升通信效率和增强网络灵活性, 然而链路功率会直接影响无人机与地面基站之间

收稿日期:2024-10-11; 修回日期:2024-12-04。

作者简介:郑朔毅(1978-),男,硕士研究生,高级工程师。

引用格式:郑朔毅. 非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路功率校准系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(11): 244-251.

的通信距离和覆盖范围，也会影响接入链路的通信质量、容量以及频谱效率，为保证无人机 5G 通信网环境中信号传输的准确性和稳定性，本文设计并开发了链路功率校准系统。链路功率校准是指对通信链路中信号的传输功率进行精确测量和调整的过程，以确保信号在传输过程中保持适当的功率水平，从而满足通信系统的性能要求。其主要目的是消除链路中的功率偏差，提高信号传输的准确性和可靠性，同时优化频谱资源的利用，减少系统间的干扰。

现阶段发展较为成熟的校准系统中，文献 [2] 提出的基于能量效率的功率校准系统遵循最大化系统能量效率的原则，划分卫星用户与地面用户集群并进行筛选，在考量系统内干扰水平、发射功率上限及用户服务质量要求等限制因素下，构建了地面与卫星间的功率分配优化框架，通过运用连续凸近似技术和 Dinkelbach 方法，将原本基于能量效率的非凸优化难题转化为易于处理的凸优化问题，借助拉格朗日对偶理论与次梯度迭代算法，求解出了该优化问题的解析表达式，达到功率校准的目的。然而在无人机通信环境中，通信设备的工作环境会发生快速变化，导致功率需求随机变化，上述传统方法需要及时响应功率需求，因此得出的功率校准结果存在一定偏差。文献 [3] 提出的采用 DDPG 的功率校准系统在不完整信道信息下，联合求解波束成形与功率控制，提出信息交互协议，增强基站环境感知，设计双模型系统，集训分执，解决联合优化，基站上传本地样本至云端，云端先以深度 Q 学习设计波束，后转用深度确定性策略梯度校准链路功率。然而上述系统在运行过程中，DDPG 算法需要足够的训练数据来确保模型能够准确反映实际通信环境中的功率需求，若实际训练数据存在获取错误，则会直接影响功率的校准效果。文献 [4] 提出的基于深度强化学习的链路功率校准系统利用基于行动者批评深度强化学习的去中心化解决方案，其中每个用户都充当代理，依靠最小的信息交换在本地获得最佳策略，将当前功率与最佳功率比对，得出链路功率的校准结果。然而上述方法主要以上行链路作为功率校准对象，将其应用到无人机 5G 通信网终端环境中，无法保证校准功能。文献 [5] 提出的基于 OFDM 的无人机通信链路功率校准系统引入一种增强的注水算法，灵活地在各个子信道上动态分配数据负载，集成多样化的 M-QAM 调制技术，以此实现功率的自适应分配与校准。上述系统需要能够准确测量并调整无人机通信链路中各个子信道的功率，若无法精准测量链路功率，则无法保证功率的校准功能。文献 [6] 提出多目标联合的上行链路功率优化算法，MJOP 算法先建立基于 UAV 位置、高度和波束宽度 3 个变量联合的目标函数，然后运用基于扰动理论的迭代方法求解，

并将目标函数拆分成关于 UAV 二维位置 UAV 的高度 H 以及波束宽度的 2 个子问题再分别求解，有效地减少了上行链路功率。然而，MJOP 算法涉及多个变量（UAV 位置、高度和波束宽度）的联合优化，会导致算法的计算复杂度较高。文献 [7] 提出了一种基于深度强化学习的功率分配算法，旨在最大化系统能量效率。基于蜂窝网络的下行链路模型对系统能量效率进行了建模。其次，构建了含有两层隐藏层的深度 Q 网络作为行为状态值函数，用以优化系统功率。然而，虽然采用了含有两层隐藏层的 DQN 网络结构，但这种结构可能并不总是最优的。如果网络结构过于简单，可能无法充分捕捉系统的复杂性和非线性特征，导致控制性能下降。

综上所述，传统功率校准系统均存在校准功能不佳的问题，进而影响无人机 5G 通信网的通信质量，为此以非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路为背景，优化设计链路功率校准系统，旨在提升链路功率的校准精度。

1 通信网终端链路功率校准硬件系统设计

优化设计的非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路功率校准系统由硬件和软件两部分组成，硬件部分主要包含链路功率计、载波/通信信号分析仪、频谱仪、衰减器与放大器、功率校准执行器、抗电磁干扰设计等硬件设备，具体架构如图 1 所示。是用来检测链路的实时功率、检测无人机 5G 通信网状态、通信信号处理，并支持系统功率校准功能的实现。

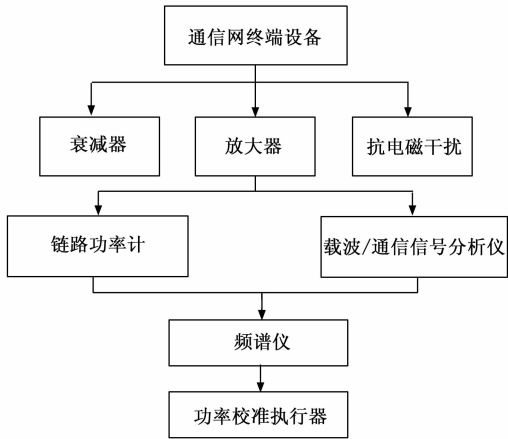


图 1 统硬件架构

1.1 链路功率计

针对无人机装备及其无线数据链系统射频信号的特点，既要满足大功率检测时功率计安全，不被烧坏，又要保证小功率量程时准确度高^[2]。优化设计系统中使用链路功率计的组成结构如图 2 所示。

图 2 表示的链路功率计采用采用热电偶式 C 波段中

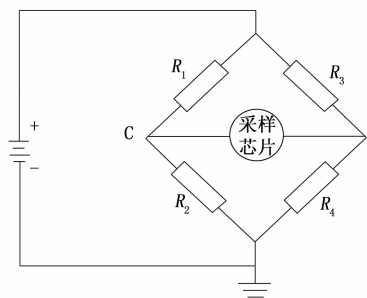


图2 链路功率计组成结构图

功率计设计,由功率探头、功率传感器、功率指示器等部分组成。在功率探头的设计中,选用了薄膜热电偶片,这要求射频输入端具备优异的匹配性能。鉴于薄膜热电偶片能在较宽的 0°C 至 45°C 温度范围内稳定工作,设计中融入了隔热材料,以减小功率探头内部热电偶片受外界温度及环境因素的干扰,并将温度影响的校正值融入功率算法中^[3]。鉴于热电偶输出的电压信号较为微弱,采用了高性能的低噪声放大器,确保检测过程具有高灵敏度且信号稳定。功率指示器负责将功率传感器输出的信号进行进一步处理并显示在显示器上,功率指示器由信号放大电路、变换电路和显示器3个部分组成,放大电路能够对输入信号进行放大处理,以提高信号的幅度和信噪比,变换电路将放大后的信号转换为适合显示器显示的格式^[4]。功率传感器负责将高频电信号通过能量转换为可以直接检测的电信号,在设计指示器部分时,集成了24位A/D转换电路,实现了对电压的高精度测量,最小可分辨电压低于 0.01mV 。同时,该设计确保了数据采集速率高达每秒100次,有效提升了整体测量效率。

1.2 载波/通信信号分析仪

载波/通信信号分析仪的工作目的是对非对称成对载波和无人机5G通信网状态信号进行分析,从而确定对应状态下链路功率的最佳值。优化设计系统中优化设计的载波/通信信号分析仪包括中央处理器、存储器、输入外设、输出外设、数据通路和外部资源等元件。优化设计的载波/通信信号分析仪以Tiny4412核心板作为核心元件,采用双排针设计结构,并引出大部分CPU功能引脚。在核心板内部加设DDR3内存和高速eMMC闪存,保证为实时采集与分析完成的载波/通信信号提供充足的存储空间^[5]。优化设计的载波/通信信号分析仪共设4个串口和3个USB接口,可以外连其它可移动的设备进行功能性扩展,满足不同载波/通信信号类型的分析需求。

1.3 频谱仪

非对称成对载波接入无人机5G通信网终端链路功率校准系统中频谱仪用来监测和分析终端链路所在频段

的频谱使用情况,避免干扰,确保校准的准确性。系统频谱仪由射频前端、信号处理单元、校准源等部分组成,射频前端负责接收无人机5G通信网中的射频信号,并进行初步的滤波、放大和频率转换,为保证对通信信号的精准分析,在射频前端选择更适合无人机5G通信频段的高增益、低噪声天线,以提高信号接收能力,采用更高精度的带通滤波器,以更好地滤除带外噪声和干扰^[6]。同时在射频前端增设一个可调增益放大器,以便在不同信号强度下自动调整增益,保持信号处理的最佳状态。此外,还需要对频谱仪中的校准源进行优化,选择具有更高稳定性和精度的校准信号发生器替换传统信号发生器,以确保校准过程的准确性。

1.4 衰减器与放大器

在无人机5G通信网中,衰减器可以安装在链路中的不同位置,以调整信号的功率水平,使其符合接收设备的要求。衰减器的工作原理通常是通过吸收或反射部分信号能量来实现信号强度的降低^[7]。将系统中的衰减器改装成可调衰减器,可以通过电子控制或机械调节来改变衰减量,保证其能够适用于需要动态调整信号强度的场景,符合无人机5G通信网环境。图3表示的是优化设计中改装的功率衰减器。

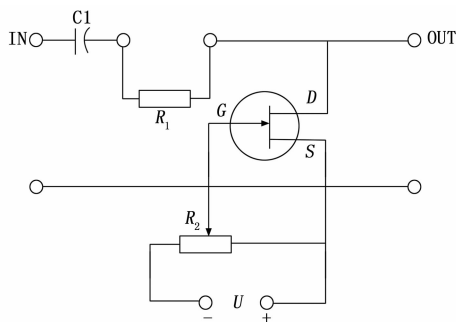


图3 功率衰减器工作原理图

本文无人机5G通信网中,将放大器放置在链路后端,放大器可以在信号经过大部分传输路径后再进行放大,以补偿在传输过程中可能发生的衰减。放大器的工作原理是通过将输入信号的能量转换为更大的输出信号能量来实现信号的放大^[8]。在传统功率放大器的基础上,加设一个自适应芯片,使放大器能够根据输入信号的强度自动调整增益,有效避免信号过强或过弱导致的问题。

1.5 功率校准执行器

功率校准执行器是系统终端链路功率校准功能的执行元件,该元件能够接收来自链路中的信号,并对信号的功率水平、频率、相位进行检测,将检测到的信号功率与预设的校准标准或目标功率进行比较,判断信号功率是否偏离校准标准,根据判断结果驱动功率校准执行器,生成校准执行信号,从而达到预期功率标准。根据

功率校准执行器的运行原理，功率校准执行器的核心元件为控制单元，能够读取功率计输出信号，并输出执行信号^[9]。优化设计功率校准执行器的内部组成以及电路连接情况如图 4 所示。

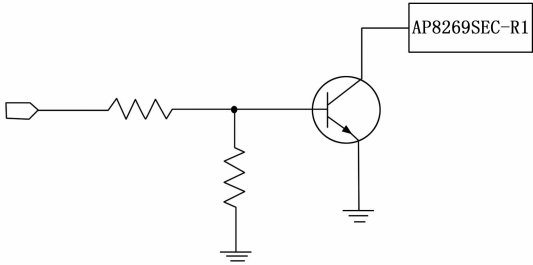


图 4 功率校准执行器内部组成

从图 4 中可以看出，优化设计系统中使用的控制元件为 AP8269SEC-R1，集成 PWM 控制、保护等功能，减少了外围电路元件的数量。同时在功率校准执行器内部加设一个散热装置，用于散发执行器在工作过程中产生的热量，降低元件工作温度对执行效果产生的负面影响。

1.6 抗电磁干扰设计

由于无人机的飞行环境较为复杂，会面临复杂的电磁环境，因此终端链路功率校准系统的抗电磁干扰设计至关重要^[10]。以高磁导率材料作为原料在各个硬件系统元件外部制作屏蔽层，用来阻挡无人机 5G 通信网外部电磁辐射。同时在硬件系统的信号输入和输出端口安装带通滤波器，用来过滤电磁干扰信号。

2 通信网终端链路功率校准系统软件功能设计

链路功率是指在通信链路中，信号从发送端传输到接收端时所需的功率^[11]。在此次研究中，以非对称成对载波接入的无人机 5G 通信网终端链路作为校准背景，对终端链路的实时功率以及影响因素进行度量。以分配功率作为校准目标，以当前功率作为校准的初始值，通过两者之间偏差的计算，确定具体的功率校准值，在硬件系统的支持下，达到通信网终端链路功率校准的目的。

无人机 5G 通信网由发送端、传输链路和接收端 3 个部分组成，传输链路即为任意两者之间的无线传输信道。在无人机 5G 通信网中，非对称成对载波接入旨在优化上行和下行链路之间的数据传输，其中上行和下行链路分别为无人机到基站以及基站到无人机的传输链路^[12-13]。则上行链路的工作过程可以量化表示为：

$$x_{up}(t) = \sum_{i=1}^{n_{up}} A_k \cos(2\pi f_{up} t + \varphi_k) + N_{up} \quad (1)$$

其中： n_{up} 为非对称成对载波接入的上行链路数量， A_k 和 φ_k 分别为第 k 个上行链路的传输幅值和相位值， f_{up} 为载波频率， N_{up} 为上行链路中的噪声^[14]。按照上述

方式可以得出非对称成对载波接入通信网终端下行链路的过程。重复上述过程，即可实现对非对称成对载波接入过程的模拟。

根据通信网终端链路中非对称成对载波接入过程的模拟结果，构建无人机 5G 通信网终端链路，以此作为功率校准环境。构建的无人机 5G 通信网终端链路包括上行和下行链路两部分，具体的构建结果为：

$$\begin{cases} C_{up} = B_{up} \log_2 x_{up}(t) (1 + y_{\text{modulate}} P_{up} G_{up} A_{up} \rho_N B_{up} + Q_{up}) \\ C_{down} = B_{down} \log_2 x_{up}(t) (1 + y_{\text{modulate}} P_{down} G_{down} A_{down} \rho_N B_{down} + Q_{down}) \end{cases} \quad (2)$$

式中， y_{modulate} 为调制函数， B_{up} 和 B_{down} 分别为上行和下行链路的带宽， P_{up} 和 P_{down} 为上行和下行链路的通信发射功率， G 为信道增益， ρ_N 为信道中的噪声功率谱密度， Q_{up} 和 Q_{down} 对应的是上行和下行链路的干扰功率^[15]。在接入非对称成对载波情况下，得出无人机 5G 通信网终端链路的建立结果。

无人机 5G 通信网终端链路功率的分配就是确定各终端链路的理论链路功率，以此作为终端链路功率的校准目标。无人机 5G 通信网终端链路功率的分配原理，如图 5 所示。

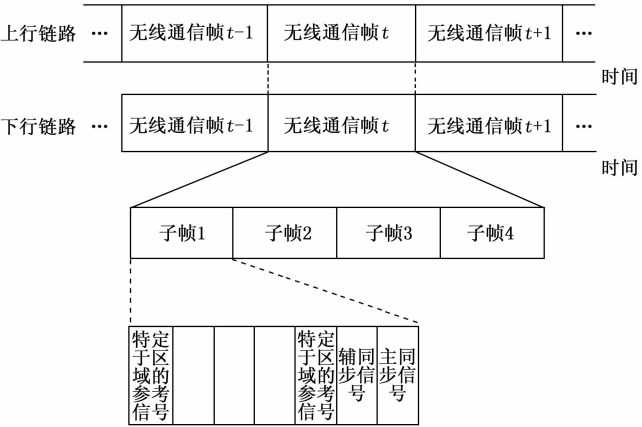


图 5 无人机 5G 通信网终端链路功率分配原理图

在满足功率限制和通信质量要求的前提下，以提高无人机 5G 通信网吞吐量、最小化误码率为目的，确定通信网各个终端链路的功率分配结果^[16]。无人机 5G 通信网终端上行链路功率的分配结果为：

$$P_{up-F} = \gamma_{\text{allocation-up}} \psi_{up} (\rho_N B_{up} (\sigma_{up} - 1) C_{up} C_{down})^{\psi_{\omega}} \quad (3)$$

式中， σ_{up} 为上行链路的目标信噪比， $\gamma_{\text{allocation-up}}$ 和 ψ_{up} 分别对应的是分配系数和注水程度系数。其中 $\gamma_{\text{allocation-up}}$ 和 ψ_{up} 的计算公式如下：

$$\begin{cases} \gamma_{\text{allocationup}} = \int_0^{\infty} \frac{\varphi^2 |(\kappa_{\text{surround}}^z T_{\text{max}}) \times \bar{T}|}{x_{up}} d\varphi \\ \psi_{up} = \log_2(\bar{\omega} \cdot g) \end{cases} \quad (4)$$

式中， φ 为通信网络执行数据分配控制操作过程中的被

积向量, κ_{surround} 和 χ 分别为通信网络中恒定数据传输分子的环境系数和链路极点的平均数量信息, T_{max} 和 $\bar{T}$ 分别为最大和平均数据传输周期, x_{up} 为上行链路中的通信信号, ω 和 g 分别为链路权重系数和链路功率增益^[17]。按照方式, 可以得出无人机 5G 通信网终端下行链路功率的分配, 以此作为功率校准目标。

非对称成对载波接入无人机 5G 通信网环境中, 影响链路功率的因素包括路径损耗、天线增益、无人机飞行高度与速度等, 其中路径损耗通常表示为信号在发射端和接收端之间传播时功率的减少量, 通信网在自由空间环境中的路径损耗可以表示为:

$$s = 20\lg(d \times \lambda) P_{\text{up-F}} \quad (5)$$

式中, d 表示的是发射端与接收端之间的距离, λ 为通信信号波长。在已知通信信号发射功率的情况下, 路径损耗与链路功率之间的影响关系可以量化表示为:

$$P_{\text{LINK}} = P_{\text{send}} \cdot 10^{-s} \quad (6)$$

从公式 (6) 中可以看出, 路径损耗取值越大, 对应链路功率越小, 即路径损耗为链路功率的负影响因素。天线增益是天线在特定方向上相对于理想点源天线的辐射或接收功率的增强, 综合考虑发射天线增益、接收天线增益即可得出天线增益影响下链路功率的计算结果, 由此得出天线增益和链路功率中的影响关系^[18]。无人机的飞行高度会直接影响无人机与地面基站之间的距离, 则信号的传输距离增加, 路径损耗随之增加, 由此降低链路功率。无人机飞行速度与链路功率之间的影响关系如图 6 所示。

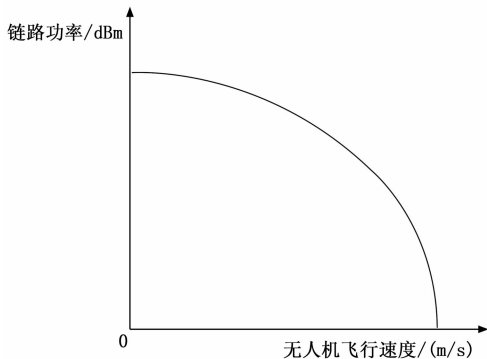


图 6 无人机飞行速度与链路功率之间的影响关系图

按照上述方式可以得出其他所有因素与通信网终端链路功率之间影响关系的分析结果。

利用硬件系统中的功率计设备, 对非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端上行和下行链路的实时功率进行观测, 链路功率的观测结果即为系统链路校准的初始值。任意时刻通信网络环境中任意链路的功率采集结果为:

$$P(t) = \kappa_{\text{gather}} (P_{\text{send}}(t) + s(t) + \kappa_{\text{quality}}) P_{\text{LINK}} \quad (7)$$

式中, $P_{\text{send}}(t)$ 和 $s(t)$ 分别表示的是 t 时刻通信网络的发射功率和路径损耗值, κ_{quality} 和 κ_{gather} 为通信链路的质量系数和功率采集系数^[19]。在硬件设备支持下, 重复上述操作即可得出任意时刻链路功率的采集结果。

通过实时观测链路功率与分配链路功率的对比, 得出通信网终端链路功率校准量的计算结果, 具体计算公式如下:

$$J(t) = P(t) - P_F \quad (8)$$

将分配的链路功率数据代入到公式 (8) 中, 即可得出功率校准量的具体取值。根据公式 (8) 计算校准量的正负属性, 确定链路功率的校准方向^[20]。在已知链路功率校准量的情况下, 执行通信网终端链路功率的校准工作。在实际的链路功率校准过程中, 将计算得出的校准量输入到硬件系统中的校准执行器中, 生成校准信号将其作用到无人机 5G 通信网的发射或接收终端, 即可完成链路功率的校准工作。在实际的系统运行过程中, 重复上述流程, 若检测得出链路的分配功率与观测功率取值相同, 则退出链路功率校准程序。具体设计流程如图 7 所示。

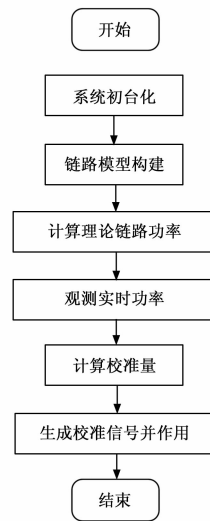


图 7 通信网终端链路功率校准流程图

3 系统测试

3.1 布设无人机 5G 通信网络环境

无人机型号选择的是 DJI Mavic 3 Pro, 支持 5.1 K 高清视频拍摄。通信服务器型号选择 NF2180M3。在通信网络覆盖范围内, 规划无人机的飞行轨迹, 如图 8 所示。

如图 8 所示飞行轨迹, 通过选择经过河流和山坡等不同地域的飞行轨迹, 可以覆盖多种典型的地理场景。这有助于全面测试链路功率校准系统在不同地理、气象和电磁环境下的动态适应性。为保证优化设计链路功率校准系统具有动态环境适应性, 设置无人机的飞行高度

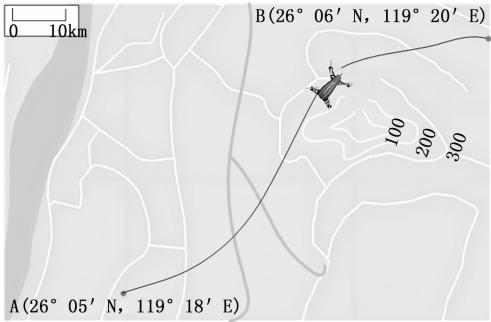


图 8 无人机 5G 通信网络环境中无人机飞行轨迹图

分别为 100 m 和 300 m，在不同飞行高度中无人机的飞行轨迹相同，由此生成两种实验工况，分别记为工况一和工况二。最终布设无人机 5G 通信网络环境中最大终端数量为 50，通信带宽为 5 MHz，损耗功率为 1 W，噪声功率谱密度为 175 dBm/Hz。

在非对称成对载波接入布设无人机 5G 通信网络环境过程中，设定主站和小站载波频率为 80 Hz 和 60 Hz，以实现非对称的数据传输。根据信道特性和系统性能要求，选择 QAM 调制方式，设定载波相位为 0.2，采用相位锁定环技术跟踪和锁定载波相位。设定载波信号的振幅大小为 2.0 mm，选择 CDMA 多址接入方式，以支持多个用户或设备的同时接入。接入非对称成对载波后，无人机 5G 通信网络的码片速率为 1.5 Mbps，最大信道响应窗长为 16，载波波长为 30，载频为 2 GHz。

3.2 配置通信网终端链路功率初始值

根据无人机 5G 通信网络环境中设置的终端设备数量，生成相应数量的终端链路，以保证通信信号强度为目的，配置通信网终端链路功率的初始值。其中部分链路初始值和期望值的配置结果如表 1 所示。

按照上述方式可以得出不同工况下，无人机 5G 通信网所有终端链路功率期望值的配置结果。根据非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路功率校准硬件系统的优化设计结果，将相关的硬件设备安装到无人机 5G 通信网以及终端链路功率的校准环境中。

表 1 通信网终端链路功率初始、期望值配置表

终端链路编号	工况一终端链路功率		工况二终端链路功率	
	初始值/dBm	期望值/dBm	初始值/dBm	期望值/dBm
L1	6	18	8	25
L2	6	15	8	28
L3	6	20	8	30
L4	6	16	8	26
L5	6	18	8	32
L6	6	18	8	35
L7	6	12	8	27
L8	6	9	8	24

3.3 测试指标

根据实验目的从校准功能和运行性能两个方面设置测试指标，其中校准功能的测试指标为校准偏差量，测试结果为：

ϵ = | P_calibration - P_desire | (9)

式中，P_calibration 和 P_desire 分别为校准系统作用下的链路功率以及链路功率的期望值。计算得出粗校准偏差量取值越小，证明对应系统的校准功能越优。而校准系统的最终目的是保证非对称成对载波接入无人机 5G 通信网的通信质量，因此设置运行性能测试指标为通信误码率和丢包率，该指标的测试结果为：

{ η_err = n_err / n_com × 100 % η_leak = (n_com - n_suc) / n_com × 100 % (10)

式中，n_err、n_suc 和 n_com 分别对应的是通信错误数据量、成功通信数据量以及通信目标数据量。最终计算结果通信误码率和丢包率取值越小，说明对应系统的运行性能越优。

实验设置文献 [2] 基于能量效率的功率校准系统和文献 [4] 基于深度强化学习的链路功率校准系统作为实验对比系统。

基于能量效率的功率校准系统参数设定：卫星发射功率上限设定为 300 W；地面用户发射功率上限设定为 10 W；近似精度参数设定为 0.1；拉格朗日乘子初始值设定为 0.1；更新步长设定为 0.01。基于深度强化学习的链路功率校准系统参数设定：离散化设定为 100 个状态；功率调整范围为 -5~5 dBm；行动者网络学习率设定为 0.005；批评者网络学习率设定为 0.003；初始探索率设定为 0.9；折扣因子设定为 0.95。

3.4 系统测试结果分析

优化设计非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路功率校准系统的软件部分使用 Eclipse 作为开发工具，将软件系统转换为程序代码，由此实现软件系统的开发。将布设的无人机 5G 通信网络接入到功率校准软件系统中，实现各终端链路功率校准任务的执行结果，如图 9 所示。

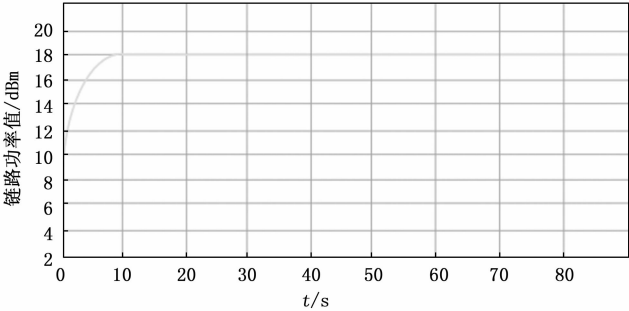


图 9 无人机 5G 通信网终端链路功率校准系统

重复上述操作可以得出不同工况下，任意时刻所有无人机 5G 通信网终端链路的功率校准结果。由图 9 可以看出，经过 10 s 后链路功率成功达到校准目标功率 18 dBm。

利用相同的开发工具实现对比系统的开发与运行，得出响应的链路功率校准结果。无人机飞行高度为 100 m 工况下，得出不同系统校准功能的测试结果，如表 2 所示。

表 2 工况一下系统校准功能测试数据表

终端链路编号	基于能量效率的功率校准系统下的实际链路功率/dBm	基于深度强化学习的链路功率校准系统下的实际链路功率/dBm	非对称成对载波接入无人机 5G 通信网终端链路功率校准系统下的实际链路功率/dBm
L1	15	17	18
L2	18	13	15
L3	24	22	20
L4	12	14	15
L5	15	16	18
L6	16	17	18
L7	15	13	12
L8	12	11	10

将表 2 中的数据代入到公式（9）中，计算得出两种传统系统的平均校准偏差分别为 3.13 dBm 和 1.63 dBm，而优化设计系统校准偏差的平均值为 0.25 dBm。按照上述方式可以得出工况二下的系统功能测试结果，如图 10 所示。

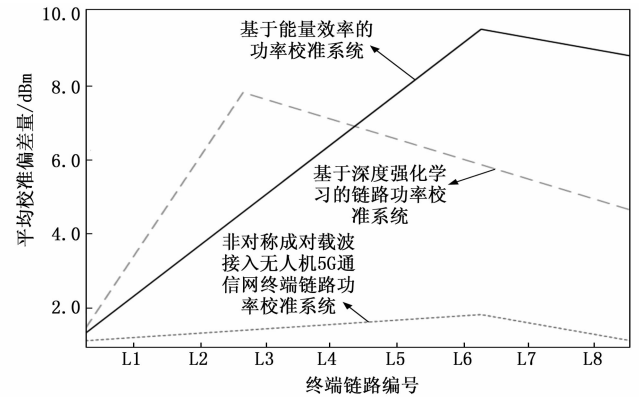


图 10 工况二下的系统校准功能测试对比结果

从图 10 中可以直观看出，综合考虑通信网络中的多条链路，在两种传统校准系统作用下，通信网终端链路的校准偏差量平均值分别为 6.4 dBm 和 5.6 dBm，而在优化设计系统作用下，通信网络终端链路的平均校准偏差为 0.9 dBm，由此得出结论：与两种传统方法相比，在工况二环境下，优化设计系统的校准偏差明显降低，即具有更优的校准功能。

综合考虑两种无人机飞行工况，得出不同校准系统

作用下，5G 通信网通信质量的测试对比结果，如图 11 所示。

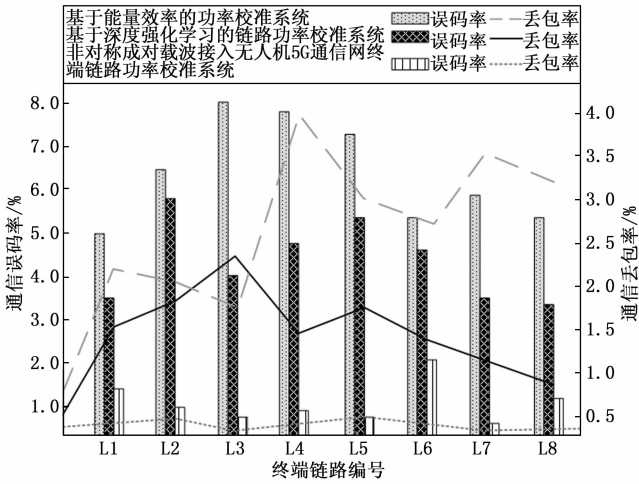


图 11 校准系统运行性能测试结果

从图 11 中可以看出，通过两种传统功率校准系统的应用，非对称成对载波接入无人机 5G 通信网的平均误码率分别为 6.1% 和 5.3%，平均丢包率分别为 3.2% 和 1.3%，而通过优化设计校准系统的应用，5G 通信网的实际误码率和丢包率的平均值分别为 1.2% 和 0.4%，由此得出结论：与两种传统方法相比，在优化设计校准系统下，非对称成对载波接入无人机 5G 通信网的通信误码率和丢包率明显降低，由此证明优化设计系统具有更优的运行性能。

4 结束语

无人机 5G 通信网终端链路利用 5G 技术的高速度、低时延和广连接等特点，实现了无人机与地面控制站之间的高效、实时通信，为无人机的飞行控制、任务执行和数据传输提供了强有力的支持。在此次研究中，对非对称成对载波接入无人机 5G 通信网的终端链路功率校准系统进行优化设计，直接实现对链路功率的准确校准，间接提升通信网络质量，对于推动无人机技术发展、提升任务执行能力、促进产业升级、增强网络安全性等方面具有积极意义。

参考文献：

[1] 邹诚诚, 张达敏, 张琳娜, 等. 一种新型 NOMA 下行链路功率分配方案 [J]. 小型微型计算机系统, 2022, 43 (12): 2638 - 2643.

[2] 李 信, 李勇军, 赵尚弘. 基于能量效率的星地 NOMA 网络功率分配算法 [J]. 电子学报, 2023, 51 (5): 1310 - 1318.

[3] 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.

[4] BRAGA, IRAN MESQUITA, et al. Decentralized joint pilot and data power control based on deep reinforcement learning for the uplink of cell-free systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology 72, 2022 (1): 957 - 972.

[5] 丛伟, 李宏, 康勇. 基于 OFDM 的无人机通信链路功率分配研究 [J]. 电子测量技术, 2007 (8): 124 - 126.

[6] 张延年, 吴昊, 张云. 多目标联合的上行链路功率优化算法 [J]. 无线电工程, 2021, 51 (11): 51.

[7] 周凡, 王鸿, 宋荣方. 密集异构蜂窝网络中基于深度强化学习的下行链路功率分配算法 [J]. 南京邮电大学学报: 自然科学版, 2021, 41 (2): 8.

[8] 苏桐, 李瑶, 盛立志, 等. 空间 X 射线通信链路建模与功率分析 [J]. 光子学报, 2017, 46 (10): 212 - 219.

[9] 徐春风, 韩成, 姜会林. 航空平台间激光通信捕获链路功率分析与仿真 [J]. 兵工学报, 2016, 37 (11): 2015 - 2021.

[10] 杨郑玉, 张祖凡, 吴爱爱, 等. 一种基于叠加编码的下行链路功率优化方案 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2011, 23 (6): 665 - 669.

[11] 陈超. 基于 UWB 技术的无线通信系统链路性能分析 [J]. 中国科技信息, 2023 (18): 102 - 105.

[12] 温林强, 饶炯辉, 喻俊瑞. 基于半导体激光器的激光通信链路光功率衰减建模分析 [J]. 光学与光电技术, 2015, 13 (6): 22 - 26.

[13] 钟怀东, 徐慨, 侯柳英. Ka 频段卫星通信上行链路自适应功率控制 [J]. 计算机工程, 2009, 35 (10): 107 - 108.

[14] 陈勇, 吴金兰, 刘焕淋, 等. 室内多输入多输出可见光通信系统接入点与功率分配优化 [J]. 光学学报, 2024, 44 (3): 28 - 37.

[15] 张光华, 樊宗源, 张琳, 等. 基于 SCMA 中下行链路的比例因子功率分配方案 [J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2022, 40 (4): 539 - 545.

[16] 李晖, 刘思恒, 林志阳, 等. 卫星网络下行链路基于 NOMA 的公平功率分配方案 [J]. 现代电子技术, 2022, 45 (1): 11 - 16.

[17] 傅云冲, 魏昌宁, 宋振林, 等. 多波束高通量卫星的出向链路功率带宽平衡系统 [J]. 电波科学学报, 2023, 38 (2): 277 - 283.

[18] 刘爱军, 宫立平, 韩晨, 等. 非对称成对载波多址接入系统下行链路中的功率分配优化 [J]. 电子与信息学报, 2023, 45 (11): 4016 - 4025.

[19] 王小瑞, 徐宏, 陈冬冬. 深空星间光通信 PDM 系统链路设计研究 [J]. 光通信技术, 2022, 46 (6): 35 - 38.

[20] 姜万昌, 王涛, 郑国男, 等. 基于主备路由的电力通信网关键链路识别算法 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48 (10): 203 - 215.

[22] SU Y, SALEH M, FETZER T, et al. ZebraPose: coarse to fine surface encoding for 6DoF object pose estimation [M]. ArXiv, 2022.

[23] SSD-6D: making RGB-based 3D detection and 6D pose estimation great again [C] //IEEE International Conference on Computer Vision, 2017: 1530 - 1538.

[24] OnePose: One-Shot object pose estimation without CAD models | IEEE conference publication | IEEE Xplore [Z].

[25] [2303.12787] EPro-PnP: generalized end-to-end probabilistic perspective-n-points for monocular object pose estimation [Z].

[26] QI C R, YI L, SU H, et al. PointNet++: deep hierarchical feature learning on point sets in a metric space [M]. ArXiv, 2017.

[27] QI C R, SU H, MO K, et al. PointNet: deep learning on point sets for 3D classification and segmentation [M]. ArXiv, 2017.

[28] WANG C, XU D, ZHU Y, et al. DenseFusion: 6D object pose estimation by iterative dense fusion [M]. ArXiv, 2019.

[29] 成先镜. 双目视觉匹配算法及其关键技术研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.

(上接第 243 页)

[13] DUAN K, BAI S, XIE L, et al. CenterNet: keypoint triplets for object detection [J]. ArXiv, 2019.

[14] CARION N, MASSA F, SYNNAEVE G, et al. End-to-end object detection with transformers [M]. ArXiv, 2020.

[15] HOWARD A, SANDLER M, CHU G, et al. Searching for mobileNetV3 [M]. ArXiv, 2019.

[16] RAMACHANDRAN P, ZOPH B, LE Q V. Searching for activation functions [M]. ArXiv, 2017.

[17] YANG Z, LI Z, JIANG X, et al. Focal and global knowledge distillation for detectors [M]. ArXiv, 2022.

[18] WANG M, SUN H, SHI J, et al. Q-YOLO: efficient inference for real-time object detection [M]. ArXiv, 2023.

[19] YASEEN M. What is YOLOv8: an In-depth exploration of the internal features of the next-generation object detector [M]. ArXiv, 2024.

[20] ZHU Y, LI M, YAO W, et al. A review of 6D object pose estimation [C] //2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC): IEEE, 2022: 1647 - 1655.

[21] GUAN J, HAO Y, WU Q, et al. A survey of 6DoF object pose estimation methods for different application scenarios [J]. Sensors, 2024, 24 (4): 1076.