

高精度的短波发射机功率校准控制系统设计

钟维辉, 于津, 张盼华

(同方电子科技有限公司 高端通信研究所, 江西九江 332000)

摘要: 短波发射机功率存在控制精度问题, 而校准生成的衰减值表格是其关键; 针对该问题, 设计一种高精度的短波发射机功率校准系统; 首先, 对发射机系统组成进行介绍, 分析了功率校准生成的衰减值表格和 AD 值表格的精度之间存在着非线性关系, 给出了功率校准原理框图; 其次, 设计了衰减值调整算法, 并在实际工程中进行试验和应用; 实验结果表明, 能够提高发射机功率控制精度 35%, 提升了发射机使用性能。

关键词: 短波通信; 发射机; 功率控制; 高精度

Design of High Precision Short Wave Transmitter Power of Calibration Control System

Zhong Weihui, Yu Jin, Zhang Panhua

(The High End Communications Institute, Tong Fang of Electronic Science and Technology Co., Ltd.,
Jiujiang 332100, China)

Abstract: The power of short-wave transmitter has the problem of control precision, and the attenuation value table generated by calibration is the key. Aiming at this problem, a high-precision short-wave transmitter power calibration system is designed. Firstly, the composition of the transmitter system is introduced, and the non-linear relation between the accuracy of attenuation value table and AD value table generated by power calibration is analyzed. Secondly, the attenuation value adjustment algorithm is designed and tested and applied in practical engineering. Experimental results show that the power control precision of the transmitter can be improved by 35%. The performance of the transmitter can be improved.

Keywords: short wave; communication; power control; high precision

0 引言

由于短波通信相比其他通信方式具有设备简单、价格低廉、通信距离远、抗摧毁能力强、抗干扰能力强、机动灵活不需中继等优点^[1], 在军事领域的应用具有不可替代作用^[2]。短波电台作为短波通信载体, 发射机又是短波电台主要组成部分, 其发射功率大小、发射频率成分是否干净、保护系统设计是否合理, 直接关乎发射机的使用性能和寿命^[3]。其中, 发射机功率的控制研究是一个重要的研究方向。

实际发射机功率控制过程中, 存在如下问题: 功率校准的操作过程非常繁琐、发射机功放管非线性输出、射频器件差异, 用检测电压计算输出功率精度不足等。其中, 文献 [4] 设计了高效率高线性度的功率放大器, 文献 [5] 对功率放大器非线性特性及矫正技术进行了研究、文献 [6] 对高功率放大器预失真技术进行了研究; 文献 [7] 对宽带高速电台发射机系统的保护设计应用进行了研究; 文献 [8] 对短波发射机的输出功率及其控制实现进行了研究。

发射功率控制精度, 是系统的重要指标。根据闭环控制原理和实际短波电台设计经验, 设计一种高精度的短波发射机功率校准系统。该功率校准系统对提升发射机的实际工作输出功率及其输出精度提供重要支撑与保障。

1 发射机系统

发射机系统是指由控制单元、激励器、预选器、功率放大器、谐波滤波器和天调接口单元组成的有机统一整体。其主要作用是完成对输入信号的调制、频率改变、滤波、放大等功能^[7]。发射时射频信号流程为: 从控制单元前面板进入的语音或数据信号经过音频放大、滤波处理后送至激励器, 然后进行音频 A/D 转换、调制、变频、射频 D/A 转换、滤波、放大等处理, 产生 1.6~30 MHz 的射频激励信号送至预选器进行激励信号放大, 再送到功率放大器放大后送至谐波滤波器进行滤波, 滤波后的射频功率信号通过天调接口模块进行射频、电源和控制信号合路, 送至天馈系统或假负载, 发射出去。发射时控制信号流程为: 外部设备输入发射键控 PTT 信号送至控制单元前面板, 控制单元开启发射通道, 控制激励器的激励放大电路、功放的功率放大电路、谐波滤波器的波段切换电路、天调的调谐电路工作。其中, 控制单元用于对发射机功率的控制, 是发射机系统的核心部分。

收稿日期: 2019-09-27; 修回日期: 2019-11-05。

作者简介: 钟维辉(1993-), 男, 江西会昌人, 本科, 助理工程师, 主要从事短波电台控制方向的研究。

1.1 发射机功率控制

控制单元对射频输出功率的控制, 是根据自动电平控制原理, 以功率校准时得到的衰减值表格和 AD 值表格为依据, 通过查表的方式, 找到对应工作频率下的衰减值, 作为初始衰减值, 送给功率放大器的数控衰减器, 使能射频通路功率输出。然后根据天调接口单元检波电路反馈的电压动态调整衰减值, 使功率输出不受外界影响, 稳定在允许范围内。

具体步骤是: 把采集的天调接口单元正向检测 AD 值和基准 AD 值表格中对应工作频率的 AD 值换算成功率值, 与基准功率相比较。检测功率值大, 则增大数控衰减器的衰减值; 检测功率值小, 则按台阶减小数控衰减器的衰减值。慢抬快降, 动态调整, 从而使得射频输出功率稳定在允许范围内。其中, 功率校准时生成的衰减值表格和基准电压 AD 值表格, 其精度和准确度会直接影响功率控制的精度。其原理框图如图 1。

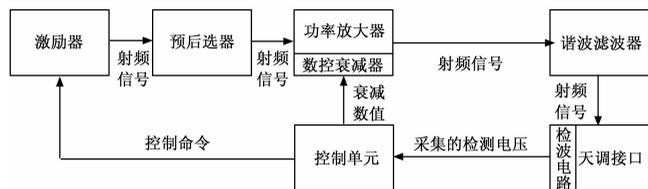


图 1 功率控制原理框图

由检测电压值换算检测功率的公式为:

$$P_{采} = P_{基准} \times \left(\frac{AD_{采}}{AD_{表}}\right)^2 \quad (1)$$

其中: $P_{采}$ 为检测电压换算后的检测功率值, $P_{基准}$ 为功率控制的基准功率值, $AD_{采}$ 为采集的天调接口正向检测电压 AD 值, $AD_{表}$ 为查基准电压 AD 值表格获得的 AD 值。

从图 2 可以看出, 表格中的衰减值和 AD 值与频率不存在线性相关, 但是其随频率变化趋势光滑, 而且数控衰减器控制精度只有 0.25 dB, 为简化计算, 落在两个测试频点之间的频率的衰减值和 AD 值可以按就近原则, 取邻近频点的衰减值和 AD 值做功率控制。若需再提高控制精度, 则减小校准步进, 但是存储数据量相应增加, 校准效率降低。

在实际发射时, 功率控制可以弥补由于温度上升等引起的功率变化。另外为了防止过大的驻波损坏元件, 还需结合反向检测 AD 值来计算反射系数和驻波比等参数调整衰减值^[8]。

1.2 发射机功率校准

由于发射机系统工作在不同频率、不同温度下, 其输出特性并不一致。如不同的频率下, 给功放相同的衰减值, 其功率输出差异较大。为了达到在不同的工作频率下, 能输出稳定的功率幅度, 则必须先进行功率校准^[9]。因此, 功率校准是实现不同频点、不同温度下功率输出幅度的重要手段和保障。

常见的发射机功率校准方式有两种: “人工校准” 和

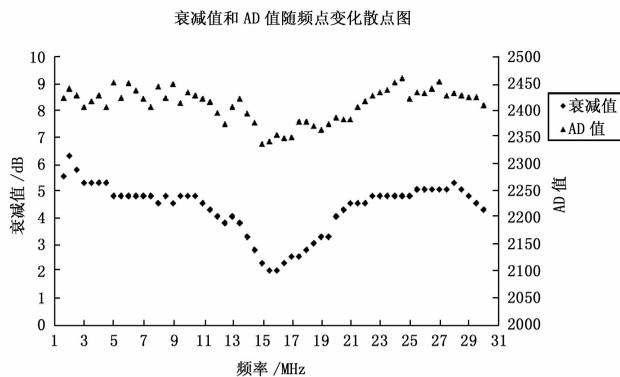


图 2 衰减值和 AD 值随频率变化散点图

“内部环路校准”。

1) 人工校准: 通过功率放大器单板调试获取衰减值表格, 写入控制软件并烧写至发射机控制单元。操作发射机转发后对功率计进行读数, 由于功放管非线性输出, 调整相同的衰减值与获得的功率增幅不成正比, 需根据读数与基准功率差值不断修改表格, 直至读数在误差允许范围内, 操作起来既耗时耗力又难于保证精度。其次, 由于电子器件差异, 比如功放管的差异, 还有焊接工艺的影响, 使得每台发射机不能使用相同的衰减表格, 完全不适用于发射机在车间批量生产的情况。

2) 内部环路校准: 开始校准时, 发射机按初始衰减值表格输出; 通过控制单元实时采集正向检测电压, 并换算成功率与基准功率进行比较。控制软件根据功率差值 (dB 表示) 自动调整数控衰减器的增益, 直至判断认为功率值在误差允许范围内, 功率校准结束。这种方式相比人工校准的方式, 有了很大的改进, 但是由于检测头检测值不是一个线性值, 将检测电压换算成功率, 其精度仍然存在缺陷。

2 系统设计

2.1 系统原理

高精度的短波发射机功率校准系统, 是通过结合精密测量的功率计和人机友好的终端机, 根据闭环控制原理, 以功率计获取的射频功率和驻波比信息作为系统的反馈参数, 发射机控制单元根据反馈参数自动调整功率放大器中数控衰减器的增益, 使得出去的射频功率能够输出在误差允许范围内。其工作原理如图 3。

开始校准后, ALC 终端下发控制命令和配置参数给控制单元, 控制单元置激励工作模式和工作频率, 并按初始衰减值送数控衰减器。当收到 ALC 终端的发射指令后, 控制单元打开射频发射通路。等待功率稳定后, ALC 终端通过向功率计发配置和读取命令获取到功率和驻波比信息, 并反馈给控制单元。同时, 控制单元从天调接口单元采集正向检测 AD 值, 记录并上传给 ALC 终端显示。控制单元根据获取的功率和驻波比信息, 与基准功率相比较, 自动

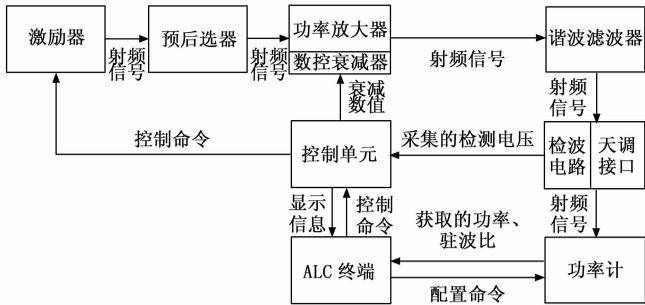


图 3 功率校准原理框图

计算应调整的衰减数值，记录并保存等待下一轮更新数控衰减器，然后按步进增加，继续下一个频点。经过多次调整后，所有工作频率输出功率均逼近于基准功率，控制单元把此时记录的正向检测 AD 值和衰减数值生成随频点变化的两张表格，并保存作为实际发射时功率控制的基准表格。实际功率与基准功率衰减差值计算公式为：

$$\Delta dB = 10 \times \lg \left(\frac{P_{\text{基准}}}{P_{\text{实际}}} \right) \quad (2)$$

其中： ΔdB 为实际功率与基准功率衰减差值（单位 dB）， $P_{\text{基准}}$ 为基准功率值， $P_{\text{实际}}$ 为实际功率值。

2.2 功率校准

功率校准生成控制单元做功率控制的衰减表格和 AD 值表格。其具体流程是：（1）控制单元收到功率校准指令后，置激励等幅报模式，控收发开关发；（2）获取 ALC 终端下发的功率等级、步进和校准频率等信息，送激励频率字和谐波滤波器波段码，置数控衰减器衰减值；（3）获取 ALC 终端的开始发射指令，打开射频发射通道；（4）ALC 终端等待 3 s 读取功率计功率值和驻波比信息，若功率值过大，则送停止校准指令，结束功率校准流程，否则，通知发射机撤功率，送停止发射指令；（5）控制单元获取停止发射指令后采集正向检测电压，关闭发射通道，上报衰减值和 AD 值信息；（6）ALC 终端送功率值和驻波比信息，获取控制单元上报的衰减值和 AD 值信息，保存数据，打印显示；（7）控制单元获取功率值和驻波比信息后，根据算法调整衰减值；（8）校准频率按步进增加，ALC 终端判断校准频率是否为终止频率，若是则送停止校准指令，结束功率校准流程，否则继续下一个频点的功率校准。

功率校准需要注意以下几点：（1）控制单元把收发开关控发后，校准过程保持，可以防止发通道开启延时，功率反射烧毁功放管；（2）ALC 终端下发频率前，先判断该频率上一次的发射功率是否在允许范围内，如果是，则跳过该频点，按步进增加，发送下一个频点，功率合格情况下不必再次调整，目的是提高校准效率；（3）发射单音后等待 3 s，ALC 终端再读取功率计，目的是稳定输出功率，保证数据准确性；（4）当 ALC 终端读取的功率值过大时，为了防止功放硬件保护电路启动告警，导致校准流程紊乱，应立即发送结束校准指令，结束校准流程；（5）每个频点

每一轮只更新一次衰减数值，当次更新后等待下一轮再作更新，这样可以把功放烧热，保证功率输出与实际输出状态一致，从而提高数据准确性；（6）所有频点校准完毕后，控制单元把衰减值表格和基准电压 AD 值表格固化在内部 Flash，数据不易丢失。

如图 4，衰减数值调整算法把从终端获取的功率、驻波比和控制单元采集的天调接口单元检波电压获得的 AD 值综合考虑，排除通信故障或设备故障，避免数据不可靠。主要分四种情况：（1）获取的功率值为 0；（2）获取的功率值较大时，驻波比不合格；（3）获取的功率值较大时，AD 值较小；（4）获取的功率值较小时，AD 值较大。出现任一种情况，校准数据都会无效，衰减数值不作调整。

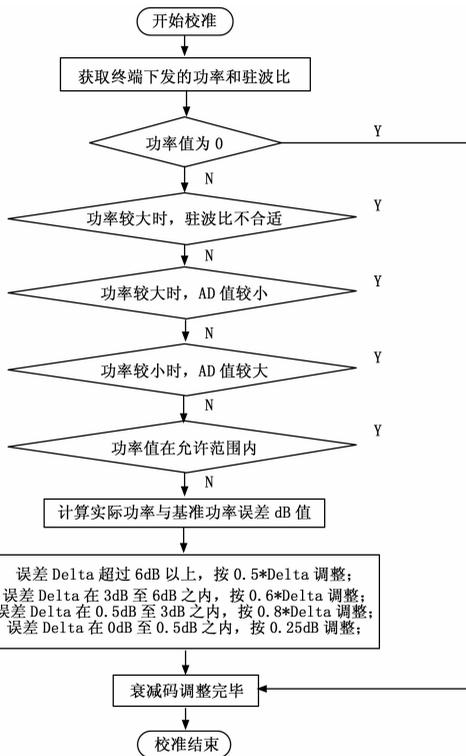


图 4 控制单元衰减数值调整算法

若四种情况均未出现，则判断功率值是否在允许范围内。若功率值在允许范围内，则衰减数值不作调整。否则，计算实际功率与基准功率差值（dB 表示），并按照功率差值范围决定衰减码调整步进，但衰减码调整步进需要解决校准效率和功放安全之间的矛盾。若衰减码调整步进过小，则会增加调整次数，从而降低功率校准效率；如果调整步进过大，由于功放管非线性输出，在功率抬升时，功放硬件保护电路可能会启动告警，甚至功放管被烧毁。实际在其它型号发射机上，应当调整参数以满足上述要求。

2.3 检查表格

2.3.1 查询表格子模块

查询表格是查询每个测试频点对应的衰减值和 AD 值。其具体流程是：（1）ALC 终端下发开始查询，并送功率等

级和步进, 控制单元收到后保存; (2) ALC 终端下发频率, 控制单元收到频率后上报衰减值和 AD 值, ALC 终端获取打印结果; (3) ALC 终端频率按步进增加, 继续给控制单元下发频率, 重复此步骤, 直至下发频率为终止频率, 则查询流程结束。最终可以从 ALC 终端上看到各个频点对应的衰减值和 AD 值, 供操作人员分析和校对数据。

2.3.2 功率检查子模块

功率校准完毕后进行功率检查。其具体流程是: (1) 控制单元收到功率检查指令后, 置激励等幅报模式, 控收发开关; (2) 获取 ALC 终端下发的功率等级、步进和检查频率等信息, 送激励频率字和谐波滤波器波段码, 置数控衰减器功率校准获得的衰减数据; (3) 获取 ALC 终端的发射指令, 打开射频发射通道; (4) ALC 终端读取功率计功率值和驻波比信息, 若功率值过大, 则送停止检查指令, 结束功率检查流程, 否则, 送停止发射指令, 通知发射机撤功率; (5) 控制单元采集正向检测电压, 关闭发射通道, 上报衰减值和 AD 值信息; (6) ALC 终端获取后将功率值、驻波比、衰减值和 AD 值等打印显示; (7) 检查频率按步进增加, ALC 终端判断检查频率是否为终止频率, 若是则送停止检查指令, 结束功率检查流程, 否则继续下一个频点的功率检查流程。大致与功率校准相同, 区别在于 ALC 终端不向控制单元下发功率值和驻波比, 同时控制单元也不调整衰减值。功率检查是为了检查功率校准数据, 如若功率检查发射功率在误差允许范围内, 则认定数据无误。

2.4 初始化表格

2.4.1 本地初始化子模块

本地初始化是一键式更新发射机内部的功率校准初始数据。其具体流程是: ALC 终端下发本地初始化命令, 控制单元收到后, 按衰减码的历史经验值初始化衰减表格, 并更新内部 Flash。历史经验值是过去十台发射机校准结果取平均值得到, 能接近实际衰减, 减少校准所花费的时间, 提高发射机校准的效率。

2.4.2 人工初始化子模块

当发现发射机功放特性差异较大时, 可以通过个人经验手动编辑, 调整表格, 从而达到快速校准的目的。具体过程是先修改配置文件, 然后打开 ALC 终端, 点击人工初始化, ALC 终端会下发初始化命令, 并附带配置文件里的衰减数据。控制单元收到后, 获取并初始化衰减表格, 同时更新内部 Flash。

2.4.3 更新功率表格子模块

该发射机功率校准分为四个功率等级, 分别是高功率、中功率、低功率、调谐功率。高功率等级校准结束后, 高功率的衰减表格和基准 AD 值表格已生成。因功率控制高功率以下等级不需基准 AD 值表格, 所以只要通过高功率衰减表格, 根据经验得到高功率与中功率衰减差值 (dB 表示, 下同)、高功率与低功率衰减差值、高功率与调谐功率衰

减值, 就可以快速生成中功率、低功率、调谐功率的衰减表格。具体流程是: 在配置文件修改三个差值, 修改完毕后, 打开 ALC 终端, 点击更新功率表格, ALC 终端会下发更新功率表格的命令, 控制单元收到后根据三个差值, 更新中功率、低功率、调谐功率的衰减表格, 并保存在内部 Flash。在发射机功放特性差异较大, 没有经验值或不想修改配置文件时, 通过这种方式生成衰减表格, 操作方便, 准确性高, 又能提高校准效率。

3 实验与分析

实验平台: (1) 硬件: 125 W 短波收发信机、RS 功率计、PC 机、USB 转 RS232 串口线、定制网口线; (2) 软件: 短波电台控制软件、ALC 终端软件等。

实验参数: 频率范围 1.6~30 MHz、步进 500 kHz、功率等级高功率。

如图 5, 为 ALC 终端软件, 将软件模式选择本地初始化, 执行 ALC 终端令控制单元打开射频通路发射功率, ALC 终端读取功率计功率值并下发给控制单元处理, 控制单元根据衰减调整算法更新衰减, 等待下一次校准。经过多次校准后, 实际输出功率无限逼近于基准功率。这时保存的衰减值和 AD 值即作为功率控制的基准表格。

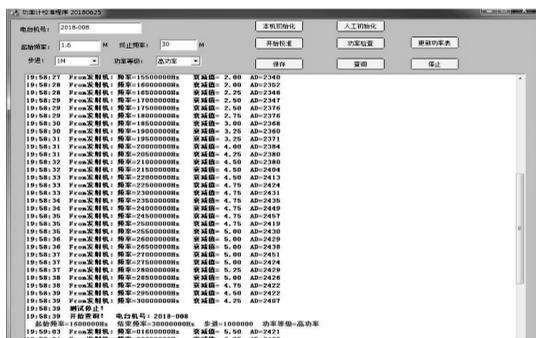


图 5 ALC 终端软件配置界面

图 6 分别使用本文方法、内部校准方法和人工校准方法生成的表格, 发射机做功率控制后其输出功率随频率变化曲线。本文介绍的功率校准方法生成的表格输出功率与 125 W 基准功率更加逼近, 具有更高的精度, 输出功率完全能够满足发射机电性能指标中的要求。

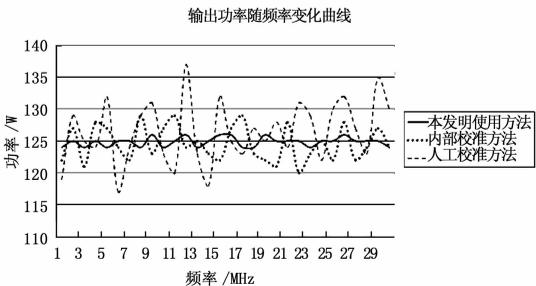


图 6 输出功率随频率变化曲线