

RF功率校准提高无线发射机的性能

作者: Eamon Nash

简介

在设计无线发射机时，RF功率的测量和控制是一项关键考虑因素。高功率RF放大器(PA)极少在开环模式下工作，也就是说，送到天线口的功率并没有以某种方式进行监控。但是，如发送功率大小、网络鲁棒性以及与其它无线网络共存的法规要求对发送功率进行严格控制。除了这些外部要求以外，精确的RF功率控制可以提高频谱性能，并且节省发射机功率放大器的成本和功耗。

为了调节发送功率，可能需要在出厂时对功率放大器的输出功率进行某种形式的校准。对于不同的复杂度和有效性，校准算法的变化很大。本应用笔记介绍如何实现典型的RF功率控制方案，并且比较了多种工厂校准算法的效果和效率。

具有集成功率控制的典型无线发射机

如图1所示，这是一个典型的无线发射机框图，集成了发射功率测量和控制功能。通过采用定向耦合器，PA的一小部分信号被反馈到RF检波器。在该情况下，耦合器的位置一般靠近天线，位于双工器和隔离器之后，因此在校准过程中需考虑与这些器件相关的功率损耗。

定向耦合器的耦合系数的典型值为20 dB~30 dB，因此耦合器的反馈信号比送到天线口的信号低20 dB~30 dB。以该方

式耦合信号功率将导致发射路径中的功率损耗，该插入损耗通常为零点几分贝。

在无线基础设施应用中，最大发射功率的典型范围是30 dBm~50 dBm (1W~100W)，对于测量发射功率的RF检波器而言，定向耦合器的信号仍然太强。因此，在耦合器和RF检波器之间需要进行额外的信号衰减。

现代均方根和非均方根响应RF检波器的功率检测范围约为30dB到100dB，并且输出相对温度和频率的变化是稳定的。在大部分应用中，检波器的输出通过模数转换器(ADC)转化为数字量，使用非易失性存储器(EEPROM)中存储的校准系数，从ADC获得的码被转换为发射功率的读数。将此功率读数与设置点功率电平进行比较，如果在设置点功率和测得的功率之间存在差异，则应进行功率调节。这个功率调整可以在信号链上多个点中任何一个点上完成。如调节基带数据的幅度，调节可变增益放大器(在IF或RF端)，或者改变PA的增益。这样，增益控制环路对其自身进行调节，并使发射功率保持在要求的范围内。需要着重指出的是，VVA和PA的增益控制传递函数常常是非线性的，因此，由给定增益调节获得的实际增益变化是不确定的，所以需要一种控制环路，它能够提供关于所执行的调节的反馈信息，以及对后续重复操作过程的指导信息。

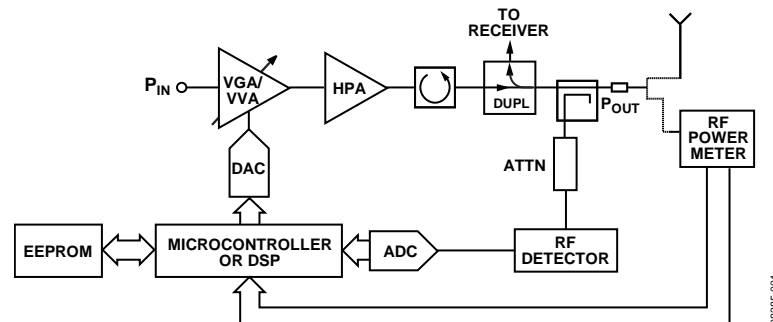


图1. 集成发射功率控制的典型RF功率放大器。
集成的RF功率检波器能够提供关于正在发送的功率的当前水平的连续反馈信息。
外部RF功率计可以与RF功率检波器结合使用，以对发射机进行校准。

目录

简介	1	RF检波器传递函数	5
具有集成功率控制的典型无线发射机	1	RF功率控制环路的现场操作	6
对出厂校准的需求	3	校准后误差	7
RF检波器传递函数	3	结论	8

对出厂校准的需求

在之前描述的典型无线发射机系统中，几乎没有任何元件能够提供非常好的绝对增益精度特性。考虑发射功率误差目标为 ± 1 dB的情况。器件的绝对增益，如PA、可变电电压衰减器(VVA)、RF增益模块、以及信号链路中的其它元件，会随器件的不同而变化，致使发射功率的误差远高于 ± 1 dB。此外，随着温度和频率的变化，信号链的增益也会进一步变化，因此，有必要连续地监控发射功率。

输出功率校准可被定义为将外部基准源的精度传递到被校准的系统中。在执行校准时，需要断开天线的连接，将其更换为外部测量基准源，如RF功率计，如图1所示。从而将精密外部功率计的精度传递到发射器的集成功率检波器中。校准过程还需设定一个或多个功率电平，将获取的功率计读数和RF检波器电压这些信息存储在非易失性存储器(EEPROM)中。然后，断开功率计并重新连接天线，发射器能够精确地调节自身的功率。当其它参数，如放大器的增益vs.温度、发射频率和期望的输出功率电平变化，经校准的片内的RF检波器将用作具有绝对精度的内置功

率计，它能确保发射机的发射功率维持在确定的容差范围之内。

关于出厂校准程序将在“校准RF功率控制环路”部分介绍。首先，应该检查一下典型RF功率检波器的特性。系统的RF检波器的线性度和稳定性相对温度和频率的关系对校准程序的复杂度和可实现的校准后精度有很大的影响。

RF检波器传递函数

图2所示的是对数响应RF检波器(对数放大器)的传递函数与温度的关系(为便于说明问题图中进行了比例放大处理)。在该对数放大器的线性工作范围内，可以使用简单的一阶方程对此对数放大器的传递函数建模。图中显示了三条曲线：在 $+25^{\circ}\text{C}$ 、 $+85^{\circ}\text{C}$ 和 -40°C 时，输出电压与输入功率的关系。在 25°C 时，检波器的输出电压范围大约从 -60dBm 输入功率的 1.8V 到 0dBm 的 0.4V 。传递函数曲线与上面的虚线非常接近(被传递函数曲线所覆盖)。尽管该传递函数仅在首尾端偏离该直线，但可以注意到，在 -10dBm 和 -5dBm 功率电平之间也呈现出非线性。

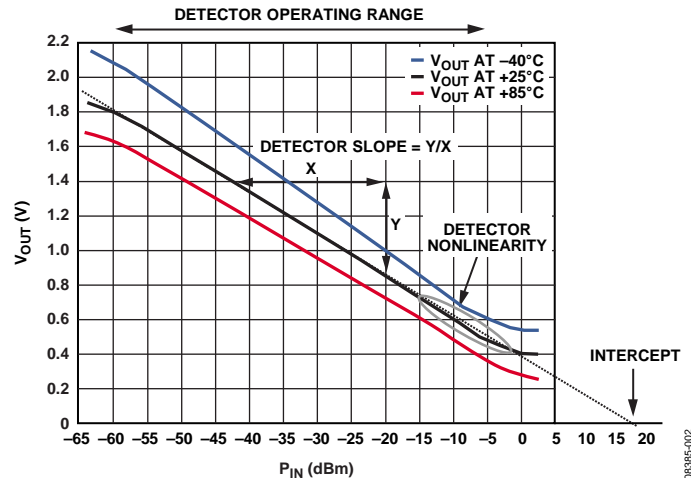


图2. 具有温度漂移的对数响应RF功率检波器的传递函数(V_{OUT} vs. P_{IN}), 为方便说明这里进行了比例放大。

通过快速的计算，该检波器的斜率约为-25mV/dB，也就是说，输入功率的1 dB的变化将导致输出电压的25 mV的变化。在动态范围的线性部分，斜率是恒定不变的，因此，尽管在-10 dBm附近可以观察到略微的非线性，但是我们仍可以使用下面的方程对该传递函数在25°C下的特性进行建模：

$$V_{OUT} = Slope \times (P_{IN} - Intercept)$$

其中的截距是直线延长线与x轴相交的点(见图2)。

因此，可以使用这个简单的一阶方程对检波器的传递函数建模。从校准的角度来看，由于允许在校准过程中通过利用和测量两个不同的功率电平来建立检波器的传递函数，因此这是极为有利的。

下面考虑该检波器随温度的变化特性。当输入功率为-10dBm时，可以注意到，在环境温度为-40°C或+85°C条件

下，输出电压的变化约为100mV。通过之前对斜率(-25 mV/dB)的计算，这相当于测量到的功率变化了±4 dB，这在大部分实际系统中是不可接受的。实际上，我们需要一种传递函数随温度的漂移很小的检波器。这确保在室温下执行的校准程序在温度变化时仍然有效，这样发射机就可以在室温下进行出厂校准，避免了在高温和低温环境下反复执行成本高昂和耗时的校准程序。

如果发射机是频率捷变的，并且在指定频带内需要在多个频点发射信号，那么用户必须考虑检波器的频率相关性。理想情况是，RF检波器在指定频带内的响应应该比较稳定。这样就可以在单个频率下(通常在中频)校准发射机，并且校准过的发射机在频率变化时变化很小，能够保证精度。

表1列出了ADI公司不同的均方根和非均方根响应检波器的检波范围和温度稳定度。

表1. 均方根和非均方根响应RF功率检波器

器件	最大输入频率 (GHz)	动态范围(dB)	温度漂移(dB)	封装	注释
AD8317	10	55	±0.5	2 mm×3 mm、8引脚LFCSP封装	非均方根对数检波器
AD8318	8	70	±0.5	4 mm×4 mm、16引脚LFCSP封装	非均方根对数检波器
AD8319	10	45	±0.5	2 mm×3 mm、8引脚LFCSP封装	非均方根对数检波器
ADL5513	4	80	±0.5	3 mm×3 mm、16引脚LFCSP封装	非均方根对数检波器
ADL5519	10	62	±0.5	5 mm×5 mm、32引脚LFCSP封装	双非均方根对数检波器
AD8361	2.5	30	±0.25	6引脚SOT-23、8引脚MSOP	线性V/V均方根检波器
ADL5501	6	30	±0.1	2.1 mm×2 mm、6引脚SC-70封装	线性V/V均方根检波器
AD8362	3.8	65	±1.0	6.4 mm×5 mm、16引脚TSSOP封装	均方根对数检波器
AD8363	6	50	±0.5	4 mm×4 mm、16引脚LFCSP封装	均方根对数检波器
AD8364	2.7	60	±0.5	5 mm×5 mm、32引脚LFCSP封装	双均方根对数检波器

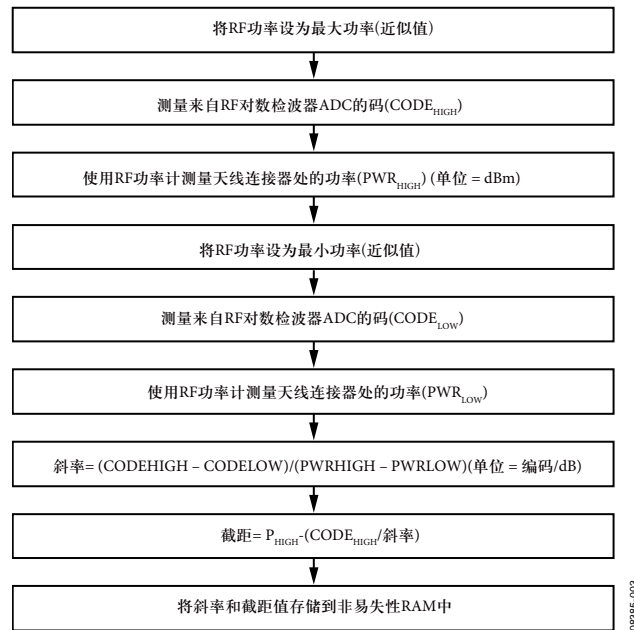


图3. 用集成对数检波器校准发射机的简单两点式校准流程

校准RF功率控制环路

图3所示的是用于校准与图1类似的发射机的流程图。这个简单快捷的2点校准程序适用于仅需要大致设定功率电平的情况(但是必须进行精确测量)。要使这个校准有效,集成的RF检波器相对温度和频率变化必须是稳定的,并且具有可以使用简单方程对其建模的可预测的响应。

必须确保发射机的工作功率范围与RF检波器的线性工作范围匹配。首先,拆掉天线并将功率计连接到天线连接器上;然后,将输出功率电平设定为接近最大功率。由功率

计测量天线连接器处的功率,并将其发送到发射机电路板上微控制器或数字信号处理器(DSP)。同时对RF检波器的ADC采样,并将其读数提供给发射机的处理器。

接下来,将发射机的输出功率减少到接近最小功率,并且重复上述操作(测量天线连接器处的功率,并对RF检波器ADC进行采样)。

使用这四个读数(低和高功率电平、低和高ADC码),可以计算出斜率和截距(参见图3),并且将计算结果存储在非易失性存储器中。

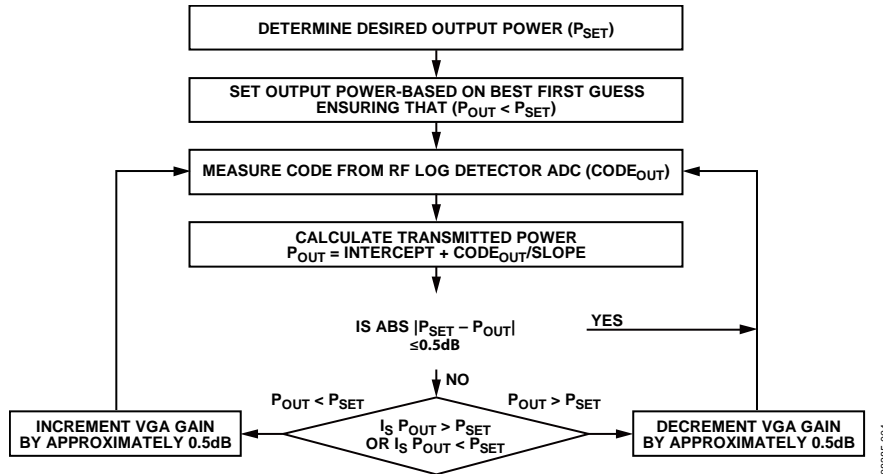


图4. 校准后发射机的运行流程

RF功率控制环路的现场操作

如图4所示，这是一个在校准之后精确设定发射机功率的流程图。在这个例子中，目标是使发射功率误差小于或等于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。首先，根据最佳初始估值来设定输出功率电平，接下来对检波器的ADC采样，从存储器中读取预先设定的斜率和截距信息，计算发射输出功率电平。

如果输出功率不在 P_{SET} 的 $\pm 0.5\text{dB}$ 的范围内，则使用可变电压衰减器(VVA)使输出功率增加或减少约 0.5dB 。在这里使用“近似值”，是因为VVA的传递函数可能是非线性的。然后，再重新测量发射功率，并且逐渐增加功率，直到误差小于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。

当功率电平处于该容差内，则在必要时持续对其进行监测和调节。例如，如果信号链中的元件的增益随温度漂移，当测得功率超出 $\pm 0.5\text{dB}$ 的设置范围，控制环路就会起作用。

这个算法还有其它变化。例如，如果期望输出功率尽可能低但仍然离设置点小于 0.5dB ，这时就必须采取不同的方法。在这种情况下，第一个功率设置低于期望的功率电平（并在容差范围外）。然后，环路测量功率，但设置增量更小，例如 $+0.1\text{dB}$ 。这样，输出功率总是小于设置功率并逐渐接近设置功率。一旦输出功率进入 -0.5dB 范围内，功率停止增加。这确保实际功率电平总低于设置功率电平，同时在容差范围内。

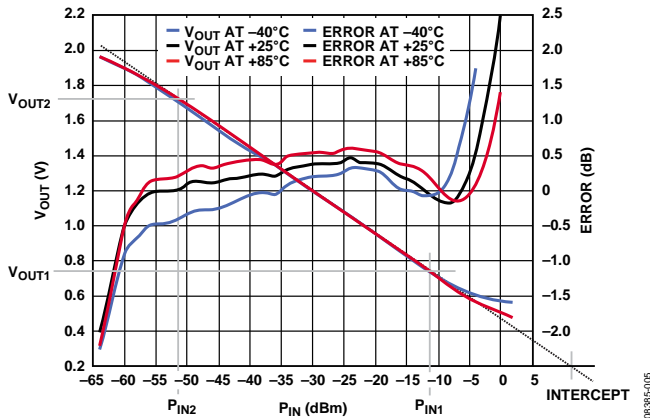


图5. 校准点在检波器的线性工作范围内的两点校准提供了良好的整体性能

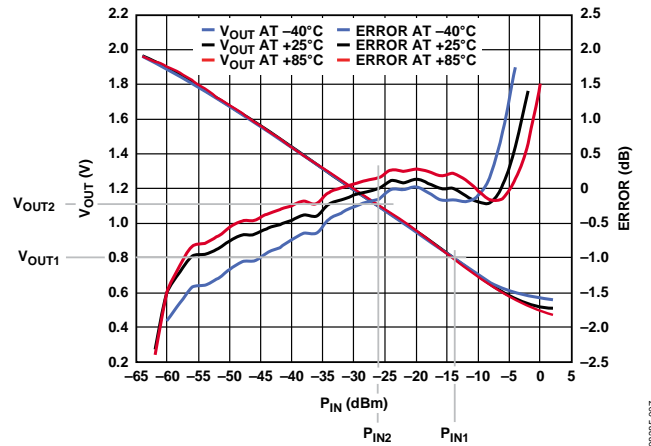


图7. 校准点紧靠在一起的两点校准提高了狭窄范围上的精度

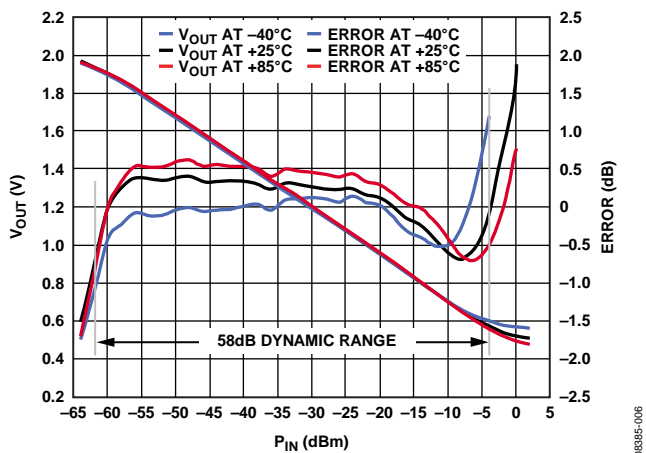


图6. 移动校准点到不太线性的工作范围扩展了工作范围, 但其代价是降低了精度

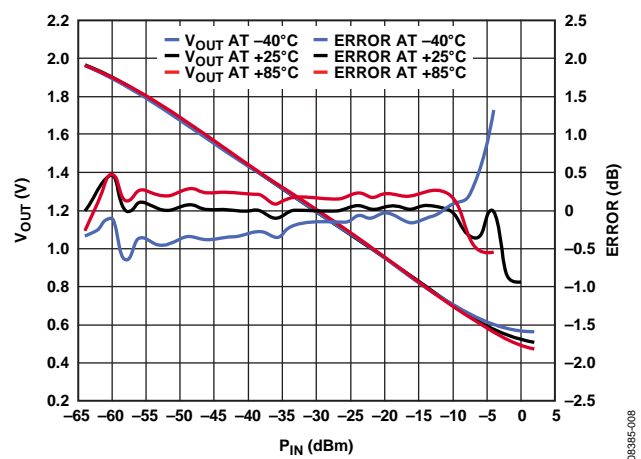


图8. 多点校准扩展了检波器范围并能提高线性度, 但需要更复杂的校准过程

校准后误差

图5到图8是同一RF检波器在不同的校准点以及不同数目的校准点所获得的数据。图5所示的是ADI公司的AD8318检波器在2.2GHz下的传递函数，AD8318是一款宽动态范围的RF对数检波器，频率高达8GHz。在这个例子中，使用了2点校准程序（在-12 dBm和-52 dBm处）对检波器执行校准。当校准完成时，可以绘制测量残差的曲线。应当注意，该误差是非零的，即使是在当初校准的室温下也是如此。这是因为对数放大器并非完美地符合理想的 V_{OUT} vs. P_{IN} 方程($V_{OUT} = \text{斜率} * (P_{IN} - \text{截距})$)，即使是在线性区域内。但是，-12 dBm和-52 dBm校准点处的误差等于零。

图5还包括在-40°C和+85°C下的输出电压的误差曲线。这些误差曲线是使用25°C斜率和截距校准系数计算而得的。除非实现基于温度的校准程序，否则必须使用略有残留温度漂移的25°C校准系数。

在许多应用中，当PA在最大功率下发射信号时最好具有较高的精度。这一点在许多层面上都具有意义。首先，提出了在全功率或额定功率下具有较高精度的要求。然而，从系统设计的角度来看，也有利于提高额定功率下的精度。考虑设计用于发送45 dBm(约30 W)功率的发射机，如果我们知道校准程序至多能够提供 ± 2 dB的精度，那么PA电路（功率晶体管和散热器）必须被设计为安全地发射高达47 dBm或50 W的功率。显而易见，这造成了成本和体积的浪费。而如果可以设计校准后精度为 ± 0.5 dB的系统，这样PA仅需要安全地发送45.5 dBm或约36 W的功率，不会过大地增大体积。

通过改变执行校准的位置，在某些情况下可以很大程度地改变可实现的精度。图7是用不同校准点获得的与图5同样的测量数据。应当注意，图7中，在-10dBm到-30dBm的范围内精度是非常高的(大约 ± 0.25 dB)。

然而，精度会在远离校准点的更低的功率电平处下降。

在图6中，为了以牺牲线性度为代价来增加动态范围而移动校准点。这里的校准点是-4dBm和-60dBm。这些点位于器件的线性范围的末端。同样地，可观察到校准点处25°C的误差是0 dB，并且AD8318能保持小于±1dB误差的范围扩展到25°C时60dB和整个温度范围的58 dB。该方法的缺点在于增加了总测量误差，特别增加了检波器范围的顶端处的误差。

图8所示的是使用更复杂的多点算法获得的校准后误差。在该情况下，将多个输出功率电平(在该实例中间距为6 dB)施加到发射机，并且在每个功率电平下测量检波器的输出电压。用这些测量结果将传递函数拆分为多个部分，每部分具有自身的斜率和截距。该算法往往可以极大地减小由于检波器非线性引起的误差，使温度漂移成为主要的误差源。该方法的缺点在于，校准程序所需时间较长，并且需要使用较多的存储器存储多个斜率和截距校准系数。

图8表明了功率检波器在其动态范围的低端和高端表现的有意思的差异。虽然多点校准扩展了动态范围的高点，但是这个扩展不是很有意义，因为它增加了温度漂移。注意图中室温、热和冷曲线在-10dBm上发生分离的现象。这个结果在低功率电平更有意义。同样，多点校准有助于扩展低端动态范围。然而，在这种情况下，室温、热和冷曲线紧密重叠，甚至即使在非线性时也是如此。因此，当这种非线性通过多点校准被消除之后，这种校准在温度变化下表现稳定。这帮助AD8318的传递函数扩展到-65 dBm。

结论

在需要精确RF功率发射的应用中，通常需要某种形式的系统校准。现代基于IC的RF功率检波器具有线性响应，并且随温度和频率的变化是稳定的。这可以极大的简化系统校准程序，能够提供±0.5 dB或更优的系统精度。校准点的位置和数目对校准后精度有极大的影响。