

### 连接/参考器件

ADL6010	0.5 GHz至43.5 GHz、45 dB微波检波器
AD7091R	12位、1 MSPS精密ADC

## -30 dBm至+15 dBm范围的40 GHz微波功率计

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[ADL6010评估板\(ADL6010-EVALZ\)](#)

[AD7091R评估板\(EVAL-AD7091RSDZ\)](#)

[系统演示平台\(EVAL-SDP-CB1Z\)](#)

#### 设计和集成文件

[原理图、布局文件、物料清单](#)

### 电路功能与优势

图1所示电路是一款40 GHz精密微波功率计，具有45 dB范围，仅需两个器件。RF检波器有一个采用肖特基二极管的创新检波器单元，后接一个模拟线性化电路。一个低功耗、12位、1 MSPS模数转换器(ADC)通过串行外设接口(SPI)端口提供数字输出。

测量之前，在需要的特定RF频率执行简单的校准程序。然后，用户便可在测量模式下使用该系统。在测量模式下，[CN-0366评估板](#)显示施加于检波器输入端的校准RF输入功率(单位为dBm)。

采用5 V单电源供电时，该电路的总功耗低于9 mW。

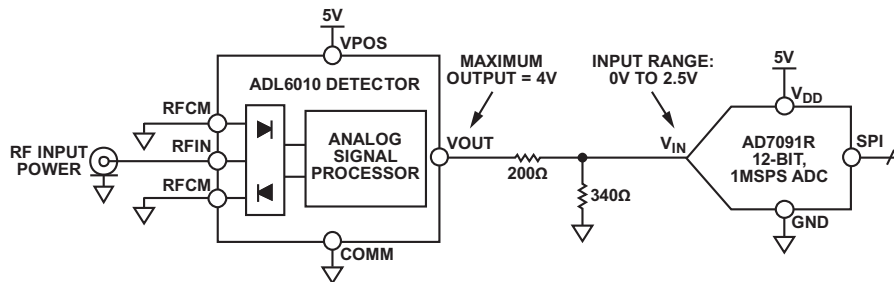


图1. 微波功率计原理示意图(未显示去耦和所有连接)

#### Rev. 0

Circuits from the Lab reference designs from Analog Devices have been designed and built by Analog Devices engineers. Standard engineering practices have been employed in the design and construction of each circuit, and their function and performance have been tested and verified in a lab environment at room temperature. However, you are solely responsible for testing the circuit and determining its suitability and applicability for your use and application. Accordingly, in no event shall Analog Devices be liable for direct, indirect, special, incidental, consequential or punitive damages due to any cause whatsoever connected to the use of any Circuits from the Lab circuits. (Continued on last page)

## 电路描述

图1所示电路利用RF和微波功率检波器ADL6010将交流波形转换为与输入波形幅度对应的比例输出电压。输出电压为线性电压，斜率单位为V/V rms。然而，在大多数功率计应用中，输出电压是一个代表输入波形幅度的稳定直流值ADL6010可提取带宽高达40 MHz的RF信号包络。

12位、1 MSPS ADC AD7091R对检波器输出进行采样，数据通过数据采集板处理，然后送至PC作进一步处理和分析。该ADC内置2.5 V基准电压源，可利用它来设置满量程电压。如果需要更大的满量程电压，可由外部基准电压源驱动到更高的电压。

该系统必须进行校准，因为输出电压取决于输入波形的频率。测量调制信号时，还需要一个校正系数。为了执行计算，提供了一个带简单图形用户界面的PC软件(CN-0366评估软件)。

## 功率检波器

ADL6010是一款45 dB包络检波器，工作频率范围是500 MHz到43.5 GHz。其线性电压斜率约为5.9 V/V rms，检波器绝对输入范围为-30 dBm至+15 dBm或-43 dBV至+2 dBV(50 Ω系统中)。检波器单元使用专有八肖特基二极管阵列，后接新颖的线性化电路，可创建相对于输入均方根电压幅度，总比例因子(或传递增益)标称值为5.9的线性电压表。利用输出均值电容，ADL6010可以检测具有可变包络的信号，但对于相同的输入功率，必须使用校正系数来补偿输出电压的变化。输出电压与均方根输入电压的关系如下：

$$V_{OUT} = Slope \times V_{RFIN} + Intercept$$

其中：

$V_{OUT}$ 为VOUT引脚上的电压。

$Slope$ 约为5.9 V/V rms(10 GHz时)。

$V_{RFIN}$ 为均方根输入电压。

$Intercept$ 为延长后数据经过Y轴的值。

图2为ADL6010的功能框图。

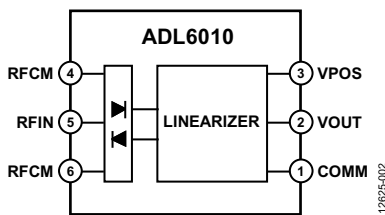


图2. ADL6010 RF/微波检波器功能框图

图3所示为不同频率下传递函数的变化。在1 GHz到40 GHz范围内，输出电压约有300 mV的差异。在整个频率范围内，温度变化小于±0.5 dB。图4和图5分别显示10 GHz和40 GHz下的温度变化。

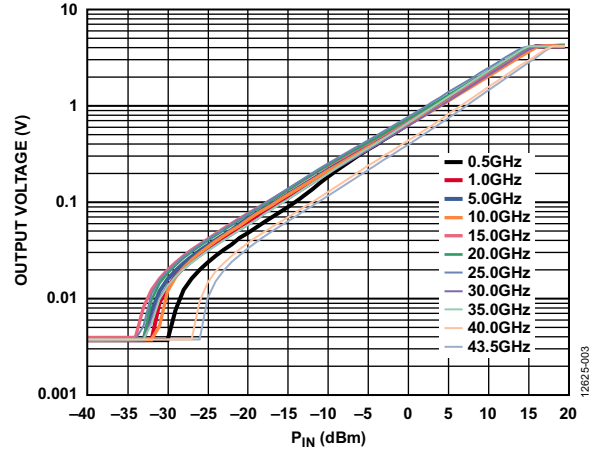


图3. 500 MHz到43.5 GHz频率范围内的传递函数

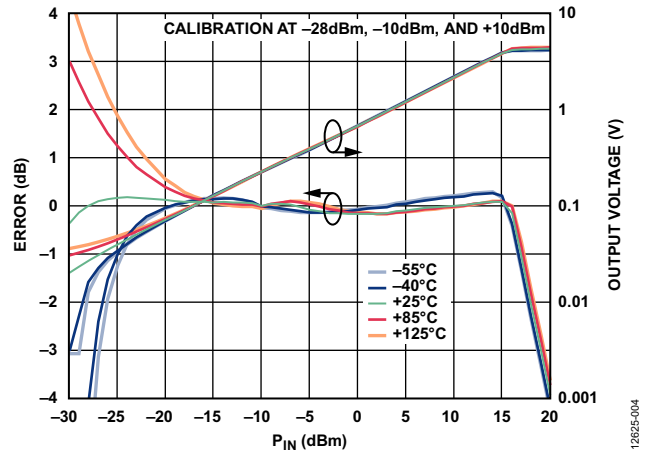


图4. 不同温度下10 GHz时的传递函数和误差

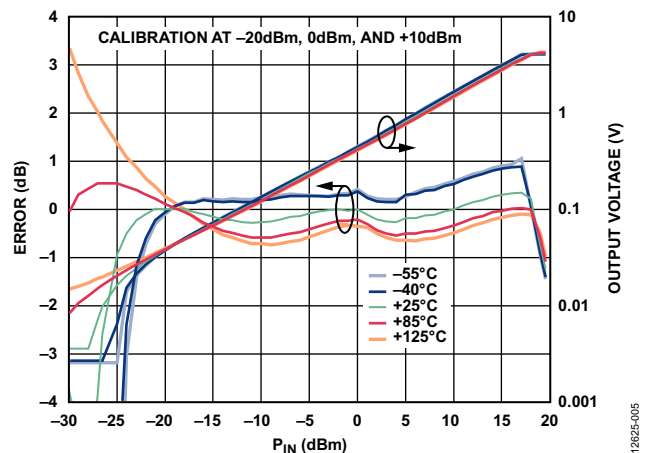


图5. 不同温度下40 GHz时的传递函数和误差

## 模数转换器

AD7091R是一款12位、1 MSPS ADC，输入电压范围为0 V至 $V_{REF}$ ，其基准电压由内部2.5 V基准电压源提供，或由取代内部基准电压源的外部基准电压源提供。外部基准电压源最高可达5 V。对于2.5 V满量程电压( $V_{REF} = 2.5 \text{ V}$ )，LSB大小为：

$$LSB = (2.5 \text{ V})/2^{12} = 610 \mu\text{V}$$

ADL6010的输出电压约为25 mV至4 V，因此，当AD7091R使用内部2.5 V基准电压源时，利用一个衰减比约为1.6的200  $\Omega$ /340  $\Omega$ 电阻分压器便能将信号幅度降低至该ADC支持的范围以内。

## 数据分析

EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)板与基于AD7091R评估板控制软件的软件一起使用，以捕捉ADC采样的数据。该软件可读出功率计值，并具有校准选项。功率计显示屏显示施加于ADL6010输入端的功率。为了利用ADL6010和AD7091R精确测量功率，应将两个不同电平的已知输入功率施加于ADL6010输入端，然后读取相应的ADC输出码。这四个值构成图上的两点，必须将其存储起来以供之后的校准程序使用。这两点为：

- 第1点： $(V_{LOW}, CODE_{LOW})$
- 第2点： $(V_{HIGH}, CODE_{HIGH})$

根据这两点便可求出斜率和截距，进而在特定工作频率下校准系统。

图6为软件功率水平显示。

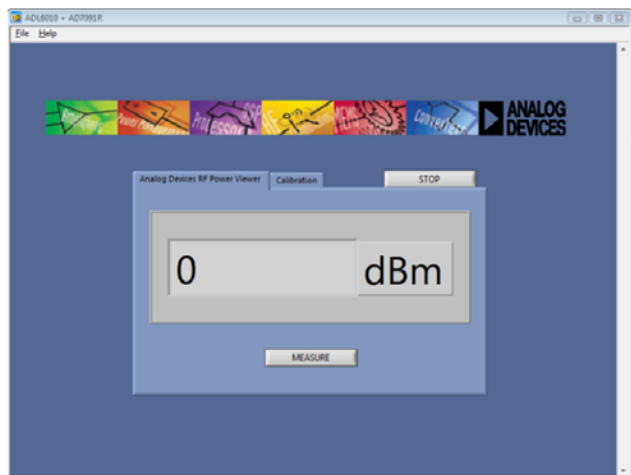


图6. CN-0366评估软件显示

## 系统传递函数

从检波器输入到ADC输出的系统斜率和截距为：

$$Slope_{SYS} = \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH} - V_{LOW}}$$

$$INT_{SYS} = CODE_{HIGH} - (Slope_{SYS} \times V_{HIGH})$$

其中：

$Slope_{SYS}$  为系统斜率。

$CODE_{HIGH}$ 、 $CODE_{LOW}$  分别为ADC的高码输出和低码输出。

$V_{HIGH}$ 、 $V_{LOW}$  分别为高RF电压和低RF电压。

$INT_{SYS}$  为系统截距。

系统整体传递函数为：

$$CODE = Slope_{SYS} \times V_{IN} + INT_{SYS}$$

其中， $V_{IN}$  为输入RF信号的均方根电压。

求解 $V_{IN}$ ：

$$V_{IN} = \frac{CODE - INT_{SYS}}{Slope_{SYS}}$$

因此，功率 $P_{IN}$  (dBm)可表示为：

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 10 \times \log_{10} \left[ \frac{10^3}{R} \left( \frac{CODE - INT}{Slope} \right)^2 \right]$$

对于50  $\Omega$ 输入阻抗，此公式可简化为：

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 13.01 \text{ dB} + 20 \times \log_{10} \left( \frac{CODE - INT}{Slope} \right) \quad (1)$$

## 用户校准算法

CN-0366评估软件在特定工作频率执行一次性校准。校准通过校准选项卡完成，如图6中的窗口所示。校准程序如下：

1. 将RF功率设置为高电平( $V_{HIGH}$ )。
2. 测量ADC输出码( $CODE_{HIGH}$ )。
3. 将RF功率设置为低电平( $V_{LOW}$ )。
4. 测量ADC输出码( $CODE_{LOW}$ )。
5. 计算系统斜率(单位为码/V)。
6. 计算系统截距(单位为码)。
7. 将斜率和截距存储为校准系数。
8. 用任意输入RF功率测量ADC码。
9. 利用该码、斜率和截距计算输入功率。

## 包括ADC的完整信号链的测量结果

利用CN-0366评估软件获取多个频率上的测量结果。每个频率都要先校准，再测量。结果如图7、图8和图9所示。图7中，注意误差与校准功率水平的相关性。选择适当的校准水平可能需要一些试错过程。

图7至图9显示了实测输入功率与施加于ADL6010输入端的实际功率的关系以及二者之间的误差。

数据是在0°C、25°C和70°C温度下获得，结果如图10、图11、图12和图13所示，分别针对1 GHz、10 GHz、20 GHz和30 GHz的频率。

注意，某些测量结果是利用不具均值功能的旧版软件获得的，因此在较低输入功率水平时会有较大纹波。

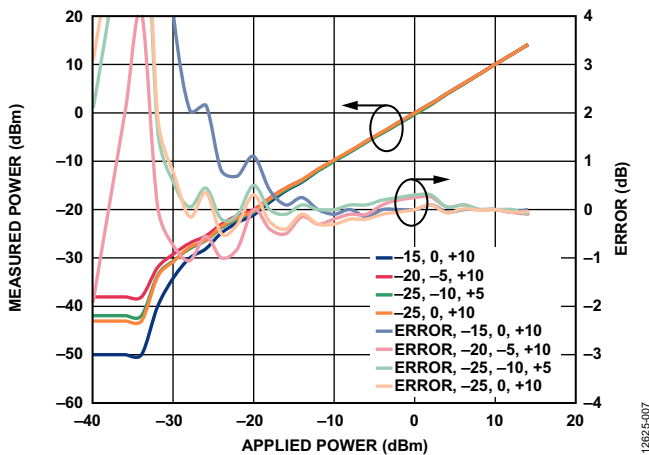


图7. 各种三点校准下实测功率和误差与施加功率的关系(1 GHz)

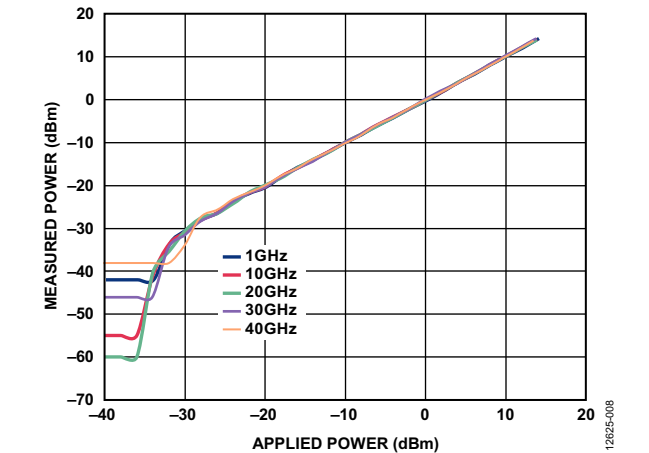


图8. 不同频率下实测功率与施加功率的关系

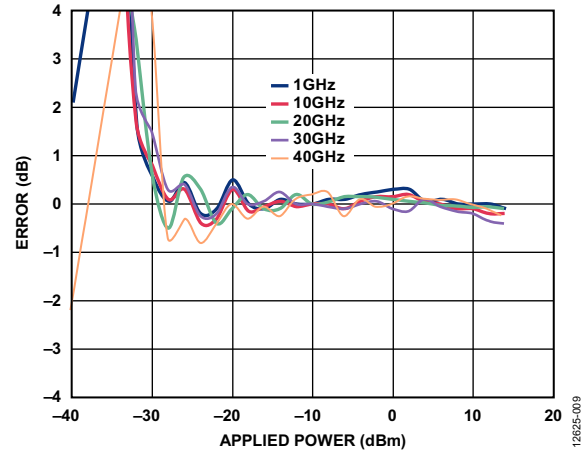


图9. 不同频率下实测功率误差与施加功率的关系

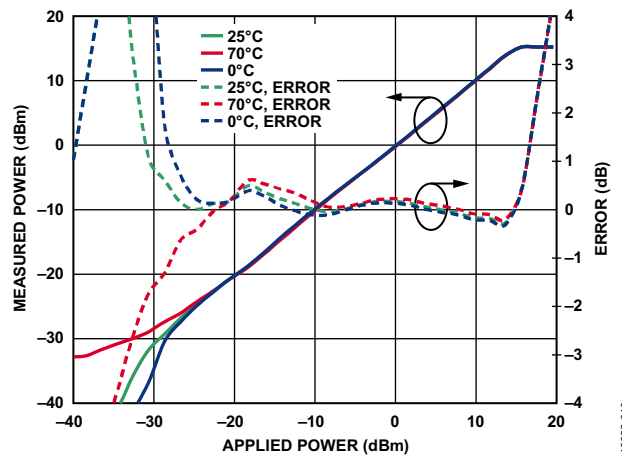


图10. 不同温度下实测功率和误差与施加功率的关系(1 GHz)

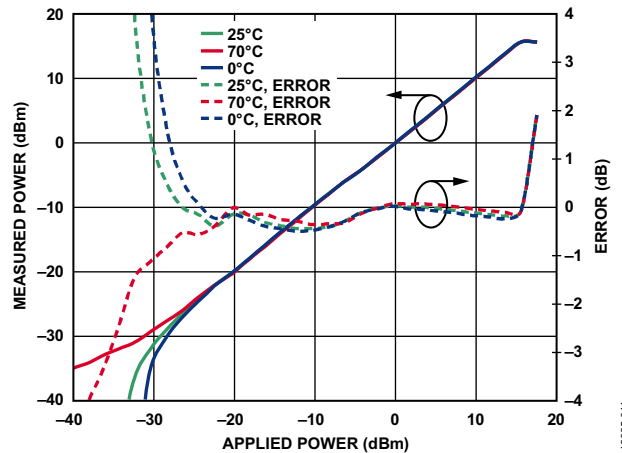


图11. 不同温度下实测功率和误差与施加功率的关系(10 GHz)

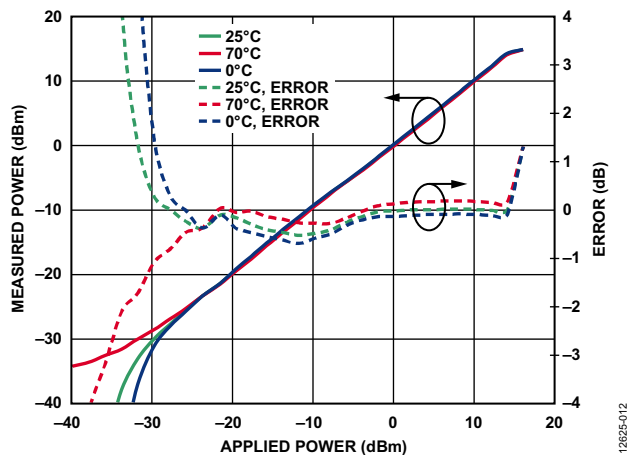


图12. 不同温度下实测功率和误差与施加功率的关系(20 GHz)

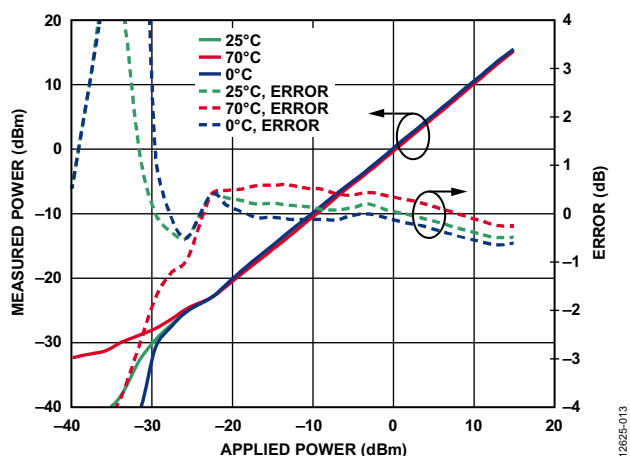


图13. 不同温度下实测功率和误差与施加功率的关系(30 GHz)

## 公式总结

下面总结了CN-0366中的公式，另外还给出了几个公式以使用户深入了解此功率计电路的功能。

ADL6010的传递函数为：

$$V_{OUT} = Slope_{DET} \times V_{IN} + INT_{DET}$$

其中：

$V_{OUT}$ 为检波器的直流输出电压。

$Slope_{DET}$ 为检波器的增益/斜率，单位为V/V rms。

$V_{IN}$ 为输入RF信号的均方根电压。

$INT_{DET}$ 为检波器的截距，单位为V。

求解 $V_{IN}$ ：

$$V_{IN} = \frac{V_{OUT} - INT_{DET}}{Slope_{DET}}$$

ADC传递函数(由ADL6010驱动时)为：

$$CODE = V_{OUT}/LSB$$

$$LSB = V_{REF}/4096$$

其中：

$CODE$ 为ADC输出码，这是一个范围从0到4096的无单位数字。

$V_{REF}$ 为ADC的满量程基准电压，单位为V。

$LSB$ 为ADC可以分辨的最小量化电压，单位为V/步或V/位。

求解 $V_{OUT}$ ：

$$V_{OUT} = CODE \times LSB$$

将此式代入前面的 $V_{IN}$ 公式可得：

$$V_{IN} = \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \quad (2)$$

将所有量再折合到输入功率可得：

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 10 \log_{10} \left[ 10^3 \frac{V_{IN}^2}{R} \right]$$

其中， $R$ 为ADL6010 RFIN引脚的阻抗。

将 $V_{IN}$ 代入功率计算公式可得：

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 10 \log_{10} \left[ \frac{10^3}{R} \left( \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \right)^2 \right]$$

上式简化后得到：

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 30 \text{ dB} - 10 \log_{10} R + 20 \log_{10} \left( \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \right)$$

如果 $R = 50 \Omega$ ，则上式可进一步简化为：

$$P_{IN} \text{ (dBm)} = 13.01 \text{ dB} + 20 \log_{10} \left( \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \right) \quad (3)$$

此公式涉及到ADL6010检波器输出斜率和截距，有助于从概念上了解系统的相互作用关系。然而，在实际应用中，系统的传递函数需要用系统的总斜率和截距来表示，其中斜率的单位为码/V，截距的单位为码。最终传递函数可以按如下方式推导。

用系统斜率( $slope_{SYS}$ )和系统截距( $INT_{SYS}$ )表示的系统传递函数的推导从公式2开始，公式2中的输入功率用检波器斜率( $slope_{DET}$ )和检波器截距( $INT_{DET}$ )表示。将 $V_{IN}$ 表达式(公式2)的分子和分母同时乘以 $1/LSB$ 便可实现推导，具体如下所示：

$$V_{IN} = \frac{CODE \times LSB - INT_{DET}}{Slope_{DET}} \times \frac{1/LSB}{1/LSB}$$

将此 $V_{IN}$ 表达式代入公式2便可得到公式1。

$INT_{DET}$  单位为V,  $Slope_{DET}$  单位为V/V rms, LSB单位为V/码。  
乘以1/LSB后,  $INT_{DET}$  变为等效ADC码, 检波器斜率变为系统斜率(单位为码/V rms), 如下式所示:

$$INT_{SYS} = INT_{DET}/LSB$$

$$Slope_{SYS} = Slope_{DET}/LSB$$

有关CN-0366电路的完整设计文件, 包括原理图、布局布线、Gerber和物料清单, 请参阅CN-0366设计支持包。

## 常见变化

在功率监控和VGA应用中, 常见做法是用耦合器获取传输线路的一些功率, 然后将信号馈入RF/微波检波器, 如图14所示。

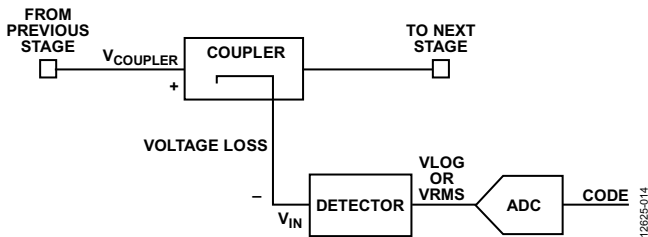


图14. 使用耦合器的功率计通用应用

校准此设置时, 上述校准程序不变。耦合器和传输线路的损耗通过校准消除, 并在斜率和截距公式中考虑。计算系统斜率和截距时, 使用施加于耦合器输入端的电压电平。系统斜率和截距用检波器输入电压和ADC输出码表示如下:

$$Slope_{SYS} = \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH} - V_{LOW}}$$

$$INT_{SYS} = CODE_{HIGH} - (Slope_{SYS} \times V_{HIGH})$$

其中:

$V_{HIGH}$ 、 $V_{LOW}$  分别为施加于检波器输入端的高电压和低电压 (图14中用一般形式 $V_{IN}$ 表示)。

$CODE_{HIGH}$ 、 $CODE_{LOW}$  分别为ADC的高输出和低输出。

若将已知电压施加于耦合器输入端(图14中用一般形式 $V_{COUPLER}$ 表示), 则耦合器输入与检波器输入之间具有如下一般关系:

$$V_{IN} = V_{COUPLER} \times Voltage Loss$$

其中,  $Voltage Loss$ 为小数形式的恒定衰减系数。

例如, 若从耦合器输入到检波器输入的电压损耗为20 dB, 则电压损耗系数为1/10。

如果使用耦合器输入端的电压电平, 而不是检波器输入端的电压电平, 则系统斜率的新表达式(包括耦合器和传输线路损耗)为:

$$Slope_{SYS} = \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH}' - V_{LOW}'}$$

其中,  $V_{HIGH}'$ 和 $V_{LOW}'$ 分别是耦合器输入端的高校准电压和低校准电压。

若用检波器输入电压以及耦合器和传输线路的损耗表示, 则上式变为:

$$Slope_{SYS} = Voltage Loss \times \frac{CODE_{HIGH} - CODE_{LOW}}{V_{HIGH} - V_{LOW}}$$

图15显示了一个采用10 dB损耗耦合器的系统在1 GHz和5 GHz时的传递函数。

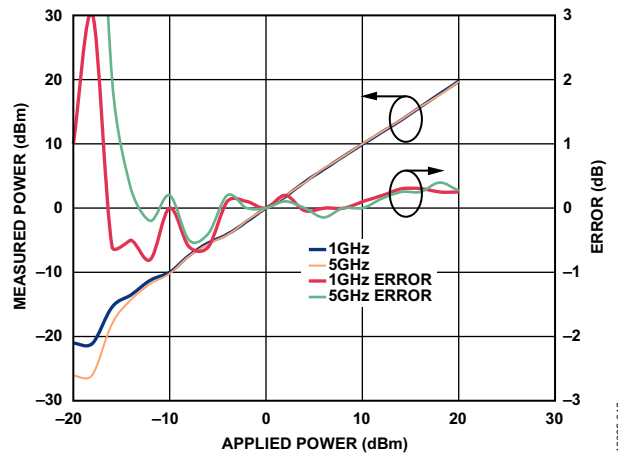


图15. 采用10 dB耦合器的系统在1 GHz和5 GHz时的实测功率和误差与施加功率的关系



## 电路评估与测试

### 设备要求

若要进行CN-0366中所述的评估，需要如下设备：

- ADL6010-EVALZ评估板。
- EVAL-AD7091RSDZ评估板。
- EVAL-SDP-CB1Z SDP板。
- Agilent E8257D信号发生器。
- Agilent 34410A数字万用表。
- 通过USB电缆将Windows® 7 PC连接到SDP板(随EVAL-SDP-CB1Z提供)。
- 用5 V电源为ADL6010-EVALZ板供电。
- 用9 V交流变直流壁装式转换器为EVAL-AD7091RSDZ评估板供电(随EVAL-AD7091RSDZ提供)。注意，EVAL-SDP-CB1Z由EVAL-AD7091RSDZ上的稳压器供电。
- CN-0366评估软件。

### 开始使用

对ADL6010-EVALZ评估板EVAL-AD7091RSDZ评估板进行如下改动和链路设置，以便实现图1所示电路。

对于ADL6010-EVALZ，用200  $\Omega$ 电阻(0402尺寸)替换R1。

对于EVAL-AD7091RSDZ，用0  $\Omega$ 电阻(0603尺寸)替换R1，用340  $\Omega$ 电阻(0603尺寸)替换C13。对于EVAL-AD7091RSDZ链路设置，将LK1调到位置C，将LK2调到位置C，LK3和LK4保持开路。

## 功能框图

图16显示了用于测试接收链的测试设置的功能框图。

### 设置与测试

设置和测试微波功率计系统的步骤如下：

1. 开启所有测试设备，等待测试设备预热完毕。
2. 将ADL6010-EVALZ评估板输入连接到Agilent信号发生器(建议利用管式连接器从信号发生器直接连到评估板)。
3. 将ADL6010-EVALZ评估板输出连接到EVAL-AD7091RSDZ评估板输入。
4. 将EVAL-SDP-CB1Z SDP板连接到EVAL-AD7091RSDZ评估板。
5. 通过USB电缆(随SDP板提供)将SDP板连接到PC。
6. 将CN-0366评估软件下载并安装到与SDP控制板相连的PC。
7. 正确安装软件后，运行可执行文件。
8. 开启信号发生器，将它设置为ADL6010工作范围以内的功率和频率。
9. 为了获得准确的功率读数，运行软件中的校准程序。
10. 软件GUI随即计算并显示施加于ADL6010输入端的功率。

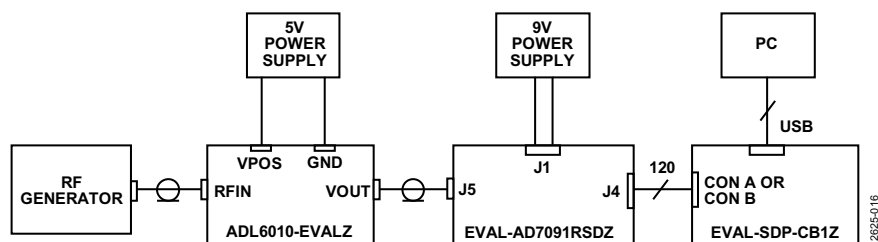


图16. 测试RF和微波功率计的功能框图

## 了解详情

[CN-0366设计支持包](#)

[Ardizzoni John, 高速印刷电路板布局实用指南, 模拟对话 39-09, 2005年9月](#)

[UG-409, EVAL-AD7091RSDZ评估板用户指南, ADI公司](#)

[ADIsimRF设计工具](#)

[CN-0178电路笔记, 通过软件校准的50 MHz至9 GHz RF功率测量系统, ADI公司](#)

[MT-031指南, 实现数据转换器的接地并解开AGND和DGND的谜团, ADI公司](#)

[MT-073指南, 高速可变增益放大器\(VGA\), ADI公司](#)

[MT-101指南, 去耦技术, ADI公司](#)

## 数据手册和评估板

[ADL6010数据手册和评估板](#)

[AD7091R数据手册和评估板](#)

## 修订历史

**2014年10月—修订版0: 初始版**

(Continued from first page) Circuits from the Lab reference designs are intended only for use with Analog Devices products and are the intellectual property of Analog Devices or its licensors. While you may use the Circuits from the Lab reference designs in the design of your product, no other license is granted by implication or otherwise under any patents or other intellectual property by application or use of the Circuits from the Lab reference designs. Information furnished by Analog Devices is believed to be accurate and reliable. However, Circuits from the Lab reference designs are supplied "as is" and without warranties of any kind, express, implied, or statutory including, but not limited to, any implied warranty of merchantability, noninfringement or fitness for a particular purpose and no responsibility is assumed by Analog Devices for their use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties that may result from their use. Analog Devices reserves the right to change any Circuits from the Lab reference designs at any time without notice but is under no obligation to do so.

©2014 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN12625sc-0-10/14(0)

