

**Circuits from the Lab<sup>®</sup>**  
Reference Designs

*Circuits from the Lab<sup>®</sup> reference designs are engineered and tested for quick and easy system integration to help solve today's analog, mixed-signal, and RF design challenges. For more information and/or support, visit [www.analog.com/CN0387](http://www.analog.com/CN0387).*

### 连接/参考器件

ADL6010	快速响应、45 dB范围、0.5 GHz至43.5 GHz包络检波器
AD7091R	1 MSPS、超低功耗、12位ADC，采用10引脚LFCSP和MSOP封装
HMC547	GaAs MMIC、SPDT、非反射式开关，DC至28 GHz

## 免校准回损测量系统

### 评估和设计支持

#### 电路评估板

[CN-0387回损测量评估板\(EV-VSWR-SDZ\)](#)

[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所示电路可以准确测量无线发射器中的回损，测量范围为1 GHz至28 GHz，无需系统校准。

设计在单电路板上实现，采用一个非反射式RF开关、一个微波RF检波器和一个12位精密模数转换器(ADC)。为了在尽可能宽的频率范围内评估电路，采用了一个带SMA连接器的双端口定向耦合器，而非窄带表贴式定向耦合器。

电路可测量最高达20 dB的回损，输入功率范围为25 dB(在较小的输入功率范围内，可以测量超过20 dB的回损)。

电路的一个独有特点是可以利用来自RF检波器的数字化电压的一个简单比值来计算回损，因而无需系统校准。

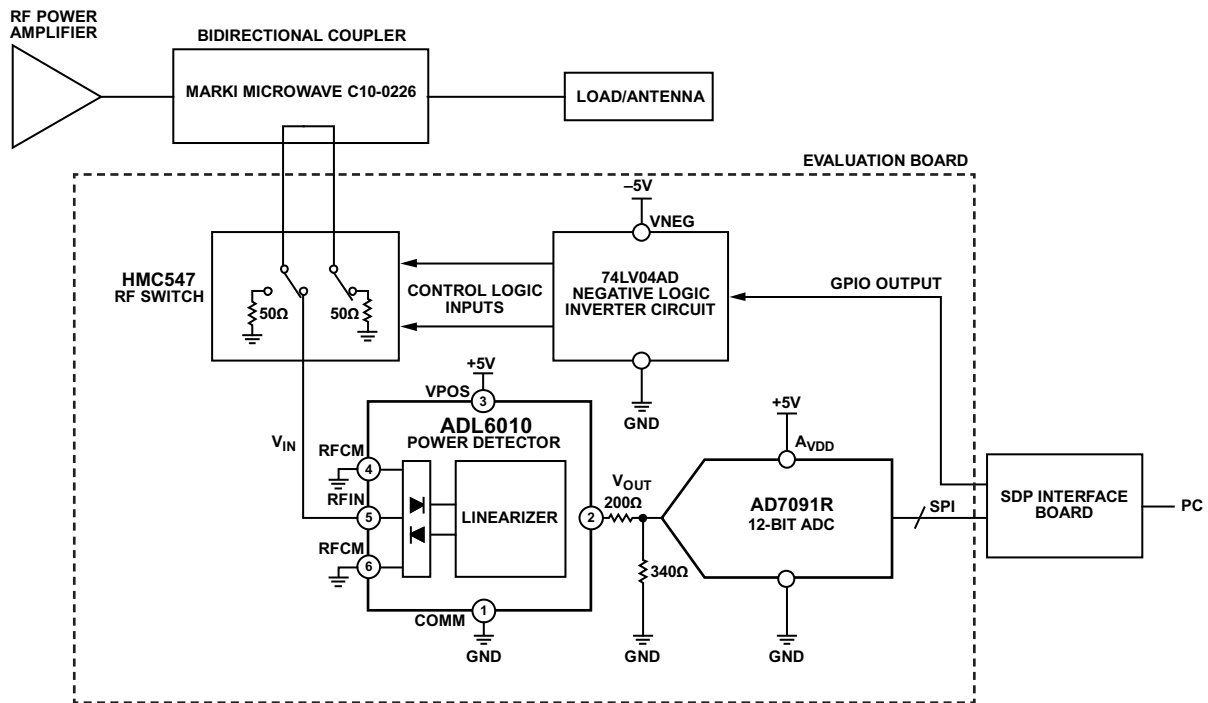


图1. 电压驻波比(VSWR)评估板测量设置(未显示全部连接和去耦)

#### Rev. A

Circuits from the Lab<sup>®</sup> 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)

One Technology Way, P.O. Box 9106, Norwood, MA 02062-9106, U.S.A.  
Tel: 781.329.4700 [www.analog.com](http://www.analog.com)  
Fax: 781.461.3113 ©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved.

## 电路描述

使一个在1 GHz至28 GHz范围内的RF信号通过一个RF耦合器(Marki Microwave C10-0226), 馈送至一个匹配的50 Ω负载或天线, 如图1所示。正向和反向耦合端口连接至HMC547, 后者为一款单刀双掷(SPDT)非反射式开关。开关输入在正向与反向耦合端口之间切换, 同时在50 Ω时端接相反端口, 如此, 两个耦合端口总会看到一个50 Ω的负载。

RF开关的输出端口驱动ADL6010, 这是一款微波RF检波器, 工作频率范围为500 MHz至43.5 GHz。检波器的输出电压与输入信号的幅度成正比。ADL6010是一款线性V/V检波器, 其标称斜率为2.1 V/V。

AD7091R 12位ADC以1 MSPS的速率对功率检波器输出电压采样。(也可使用较低的采样速率, 结果会降低ADC中的功耗)。

AD7091R把模拟电压转换为一个数字代码。然后, EVAL-SDP-CB1Z (SDP-B)接口板用串行外设接口(SPI)通信来控制ADC, 并把结果发送到电脑上, 以便进行系统评估和回损计算。然后, 用ADC采样的正向耦合电压与反向耦合电压之比计算VSWR、回损和反射系数。

## 回损计算

下列推导式展示了正向与反向电压之比与系统回损之间的关系。这种关系对系统的免校准特性起着关键作用。

检波器在其线性工作区的系统传递函数可以用众所周知的直线等式来表示:

$$y = mx + c$$

其中:  
*m*为斜率。  
*c*为截距。

用真实电路参数,

$$V_{OUT} = m \times V_{IN} + c \quad (1)$$

如前所述, *m*标称值为2.1, 但可能因频率和器件而异。*c*的值通常接近零。

用*V<sub>IN</sub>*改写等式1,

$$\Rightarrow V_{IN} = \frac{V_{OUT} - c}{m} \quad (2)$$

把等式转换为功率,

$$\Rightarrow P_{IN} = \frac{\left(\frac{V - c}{m}\right)^2}{R} \quad (3)$$

然后转换为dBm,

$$P_{IN_{dBm}} = 10 \times \log \left( 1000 \times \frac{\left(\frac{V_{OUT} - c}{m}\right)^2}{R} \right) \quad (4)$$

如果包括ADC, 则等式变为

$$P_{IN_{dBm}} = 10 \times \log \left( 1000 \times \frac{\left(\frac{CODE - c'}{m'}\right)^2}{R} \right) \quad (5)$$

其中:

*m'*为检波器和ADC组合信号链的斜率。  
*c'*为检波器和ADC组合信号链的截距。

回损为正向与反向功率之差, 单位为dBm:

$$P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{1000 \times \frac{\left(\frac{CODE_F - c'}{m'}\right)^2}{R}}{1000 \times \frac{\left(\frac{CODE_R - c'}{m'}\right)^2}{R}} \right) \quad (6)$$

$$\Rightarrow P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{(CODE_F - c')^2}{(CODE_R - c')^2} \right) \quad (7)$$

由于*c'*接近零且CODE<sub>F</sub>和CODE<sub>R</sub>一般远远大于*c'*, 所以, 公式可简化为

$$P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{CODE_F^2}{CODE_R^2} \right) \quad (8)$$

本节的推导表明, 无需校准即可计算回损, 因为公式不包括信号链的斜率(*m'*)或截距(*c'*)。

## RF开关

HMC547是一款非反射式SPDT RF开关, 频率范围为DC至28 GHz。如图2框图中所示, 开关会在50 Ω时在内部端接任一输入, 同时, 另一个输入则馈入RFC输出。开关的快速开关时间一般为6 ns。开关的A和B逻辑输入由-5 V高电平和0 V低电平负电压逻辑控制。HMC547数据手册中包括一种推荐的控制电路。该电路由一个驱动74LV04AD逆变器的5.1 V齐纳二极管电平转换器构成。逆变器的供电电压范围为-5 V至0 V, 而非0 V至+5 V。完整的电源电路见CN-0387设计支持包中的详细原理图, 网址: [www.analog.com/CN0387-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0387-DesignSupport)。

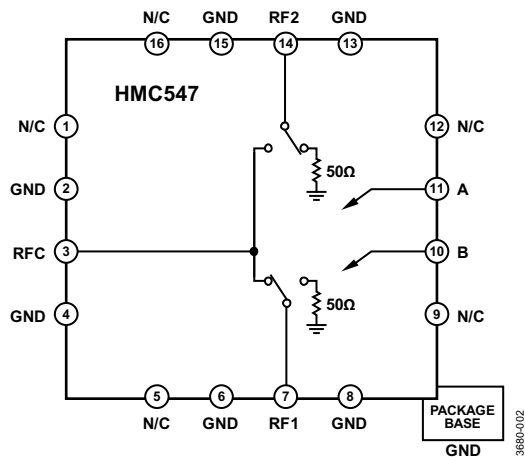


图2. HMC547俯视图

### 功率检波器

ADL6010功率检波器具有线性V/V特性，这是本应用的关键。为驱动该器件，向VPOS引脚施加一个+5 V的DC电压，并舍入至COMM引脚，如图3所示。

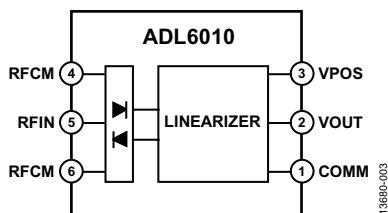


图3. ADL6010 RF/微波检波器功能框图

如图4所示，输出电压随频率而变化。传递函数随频率的这种变化并不会对电路性能造成任何不利影响，因为回损计算依赖于特定频率下的比率式计算。

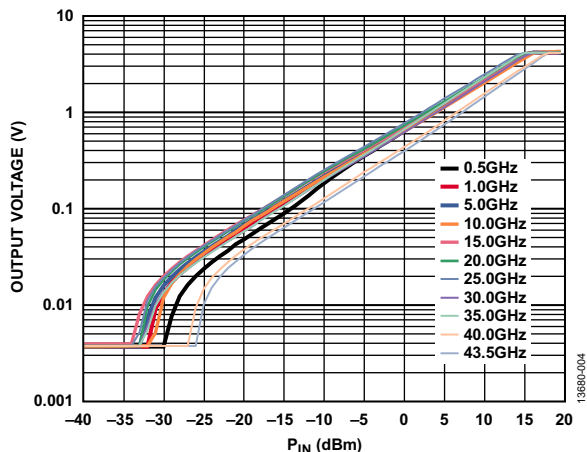
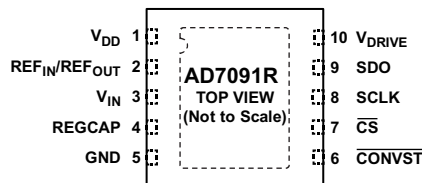


图4. 500 MHz到43.5 GHz频率范围内的传递函数

### 模数转换器



NOTES  
1. THE EXPOSED PAD IS NOT CONNECTED INTERNALLY. FOR INCREASED RELIABILITY OF THE SOLDER JOINTS AND FOR MAXIMUM THERMAL CAPABILITY, SOLDER THE EXPOSED PAD TO THE SUBSTRATE, GND.

图5. AD7091R模数转换器

AD7091R是一款12位逐次逼近型寄存器(SAR) ADC，吞吐速率高达1 MSPS。尽管可以使用一个精度超高的外部基准电压，但本应用并不要求这样做。在本电路中，使用了2.5 V的内部基准电压，结果产生的LSB大小为

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

由于ADL6010的输出电压的最大值可以达到约3 V，因此，必须在检波器与ADC之间用一个200 Ω/340 Ω电阻分压器来衰减该电压，如图1所示。该电阻分压器的标称衰减比为1.6。

### 定向耦合器

定向耦合器把正向或反向信号的一部分耦合至功率检波器以便进行测量。一般而言，耦合器有4个端口，如图6所示。

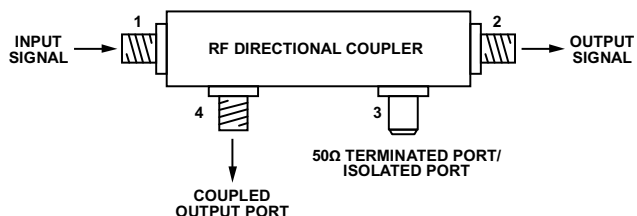


图6. 定向耦合器

在图6的配置中，输入信号被耦合至端口4，端口3在50 Ω时端接，以实现对该信号的非反射式耦合。如果在50 Ω时端接端口4而非端口3，则反射信号会被耦合到端口3。

在该电路中，并未使用前面展示的直接连接端口的50 Ω端接，相反，两个端口都馈入RF开关输入端。因此，可以认为耦合器是双向的，因为50 Ω端接电阻由HMC547从内部施加到端口3或端口4，具体取决于开关的状态。

本电路选用的RF耦合器是Marki Microwave C10-0226带状线耦合器。该耦合器具有10 dB耦合能力，意味着耦合信号比输入信号少10 dB。本电路用带SMA连接器的定向耦合器是为了展示其在尽可能宽的频率范围内的工作情况。也可使用表贴式耦合器；但这种器件一般具有较窄的频率范围。

## 数据分析

EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台(SDP)板与评估软件一起使用，以捕捉ADC采样的数据。

软件用前面推导出来的等式8计算回损。反射系数和VSWR都由该等式推导而来。

$$P_{F_{dBm}} - P_{R_{dBm}} = 10 \times \log \left( \frac{CODE_F^2}{CODE_R^2} \right) \quad (8)$$

图7显示了软件GUI的结果显示窗格。

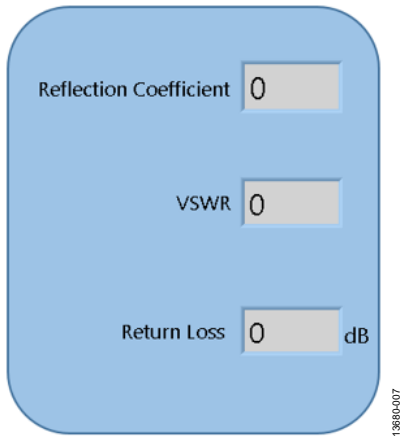


图7. CN-0387评估软件显示

## 检波器采样策略

为了准确测量系统的回损，在测量正向和反向电压时，正向与反向测量之间的时间延迟必须短。图8所示为连续采样时执行的采样序列。

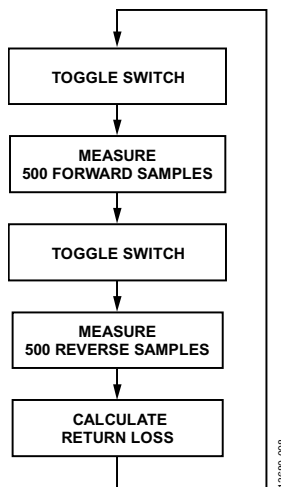


图8. 采样序列

当RF开关收到信号切换开关时，开关位会发生变化，正向或反向耦合端口信号被馈入功率检波器。在回损计算步骤中，会求500个正向样本和500个反向样本的均值，并根据平均正向和反向电压的比值计算回损。

ADC的采样速率为1 MSPS。因此，测量500个样本需要耗时500 μs。在正向与反向周期之间，用SDP-B接口的通用输入/输出(GPIO)切换开关位大约耗时400 μs。时序图见图9。

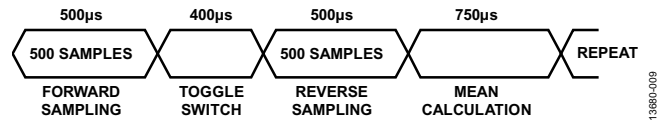


图9. 时序图表示

利用正向和反向电压测量结果的均值计算回损、反射系数和VSWR。为了在更新前清楚读取结果，先求出50个样本的均值，然后再在GUI结果窗格上显示结果。

关于EVAL-VSWR-SDZ板的完整文档(包括原理图、布局、Gerber文件和物料清单)可从CN-0387设计支持包中下载，网址：[www.analog.com/CN0387-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0387-DesignSupport)。

## 常见变化

如前所述，本电路使用带连接器的宽带定向耦合器是为了展示其在尽可能宽的频率范围内的工作情况。也可使用表贴式定向耦合器或印刷电路定向耦合器；但这些器件一般具有较窄的频率范围。

也可使用耦合因子较高的定向耦合器，这类耦合器的插入损耗一般较低。但我们建议要注意电路的尺寸，以实现测量范围的最大化。例如，如果最大系统功率为+35 dBm，则使用一个20 dB的定向耦合器会使检波器的最大功率设为约+15 dBm，这已是输入范围的上限。

## 电路评估与测试

### 设备要求

若要进行本电路笔记中所描述的评估，需要如下设备：

- EV-VSWR-SDZ评估板。
- 一个适当额定值的宽带RF耦合器。本评估使用的是 Marki Microwave C10-0226。但可以使用规格合适并且带 3.5 mm SMA型连接器的任意耦合器。
- EVAL-SDP-CB1Z SDP-B板。
- 一个信号发生器(输出频率范围为500 MHz至28 GHz)。
- 一个合适的电源单元，输出电压为6 V dc。
- CN-0387评估软件，可从<ftp://ftp.analog.com/pub/cftl/CN0387/>下载。
- 一个SMA衰减器和50 Ω端接。
- 一台运行Windows® 7的电脑，并通过USB线与SDP-B板相连(随EVAL-SDP-CB1Z一起提供)。

### 设置与测试

为了设置和测试VSWR测量系统，要把LK6设为B位，把LK22放到位，然后执行下列步骤：

1. 开启所有测试设备，等待所有设备引导完毕。

2. 用适当额定值的RF线，把RF耦合器的输入和输出耦合端口分别接到评估板的RF1和RF2 3.5 mm SMA连接上。
3. 把耦合器输入端口连接到信号发生器的50 Ω输出端。
4. 把耦合器的输出端连接到一个50 Ω端接或额定值合适的RF衰减器端接上。
5. 把EVAL-SDP-CB1Z SDP接口板连接到EV-VSWR-SDZ评估板。
6. 通过提供的USB线把SDP接口板连接到电脑。
7. 把电源从DC电源连接到评估板香蕉插槽的电源和接地端。
8. 把CN-0387评估软件下载并安装到与SDP-B控制板相连的电脑上。
9. 正确安装软件后，运行可执行文件。
10. 把信号发生器的输出频率设为2 GHz，把功率水平设为15 dBm输出。然后开启信号发生器的输出。
11. 在软件显示中，选择**连续**，然后单击**捕获**。软件会连续重复测量；当收集到每个测量结果时，GUI显示将更新回损值和相应的VSWR和反射系数值。

### 测试设置的功能框图

图10所示为测试设置的功能框图。

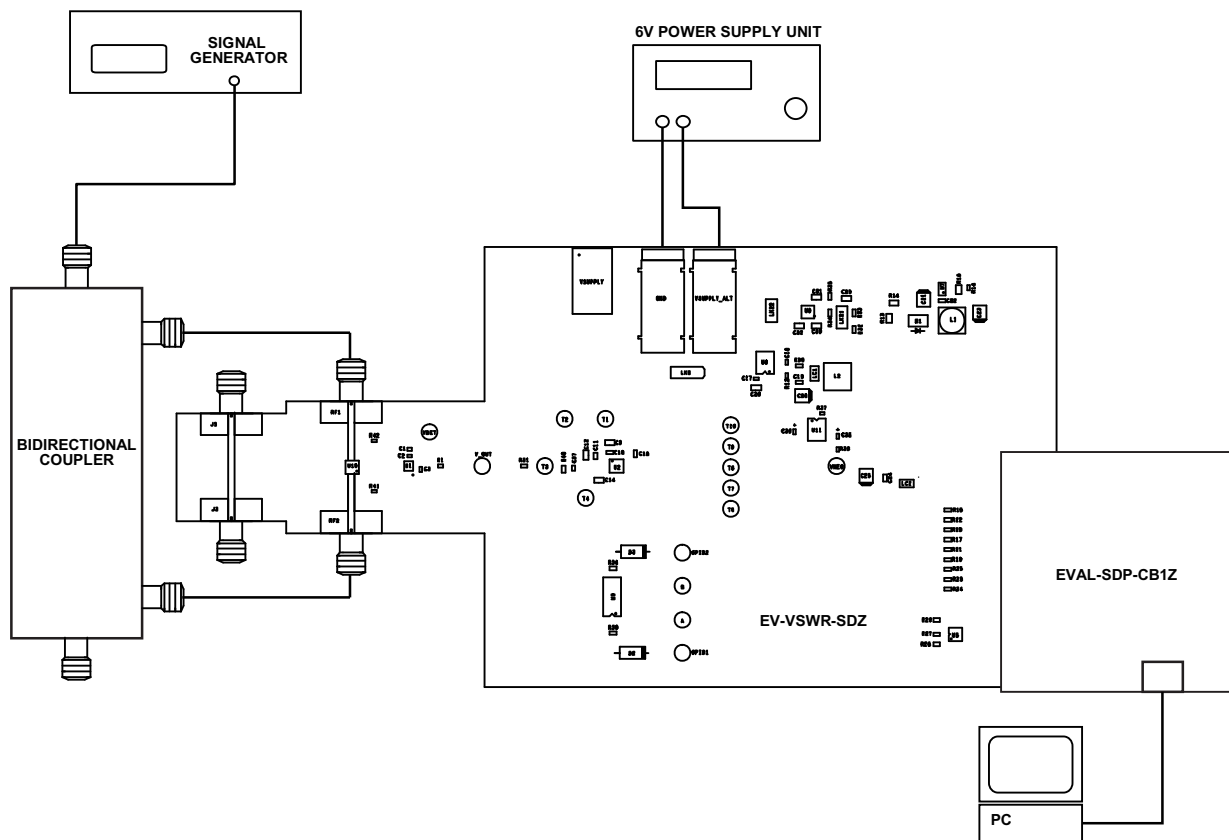


图10. 测试设置功能框图

## 测试结果

通过调节RF输入功率水平手动收集测量结果。不同输出配置中的回损是在ADL6010的功率范围内测量的。

同时还用Keysight高级设计系统(ADS)运行RF仿真。该软件是一款面向RF和微波应用的电子设计仿真工具。仿真是为了验证RF输入走线插入损耗和反射是否处于特定限值范围以内，同时模拟定向耦合器的性能。

Marki Microwave C10-0226定向耦合器提供了一个仿真模型文件，即.s4p文件。该文件中的信息描述了耦合器的S参数，在ADS中可以方便地用于仿真目的。在DC至耦合器26.5 GHz的频率上限范围内进行仿真，每次仿真时，输入功率均设为0 dBm。

## 回损测量

在测试EV-VSWR-SDZ评估板时，将一个9 dB的衰减器端接连接到耦合器输出端，以验证与仿真结果相比，是否能在选定频率下测得预期衰减水平。

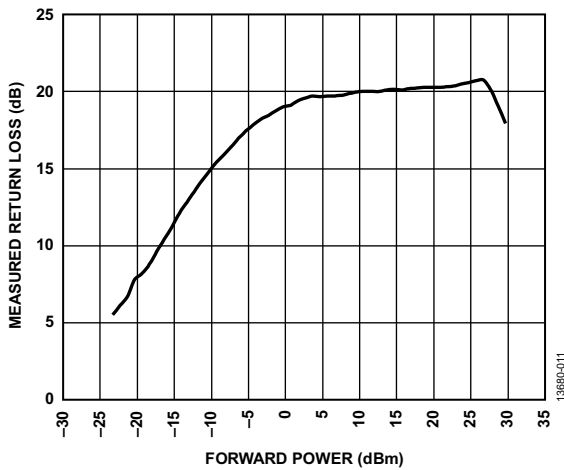


图11. 回损测量

如图11所示，在0 dBm至25 dBm的输入功率范围内，测得的回损保持在20 dB，几乎不变。该值为前述正向和反向衰减（9 dB + 9 dB）与耦合器在2 GHz下用Marki Microwave C10-0226时的正向插入损耗之和。在正向耦合端口的输入功率达到约27 dBm之后，回损会显著减小。之所以会减小是因为正向耦合端口的耦合功率接近+15 dBm(10 dB耦合)，此为ADL6010的功率上限。随着输入功率减小，测得回损会开始减小，因为反向耦合端口的反射功率降至-30 dBm的下限以下。图11所示为ADL6010可以测量20 dB回损的功率范围。

## 功率检波器测得功率

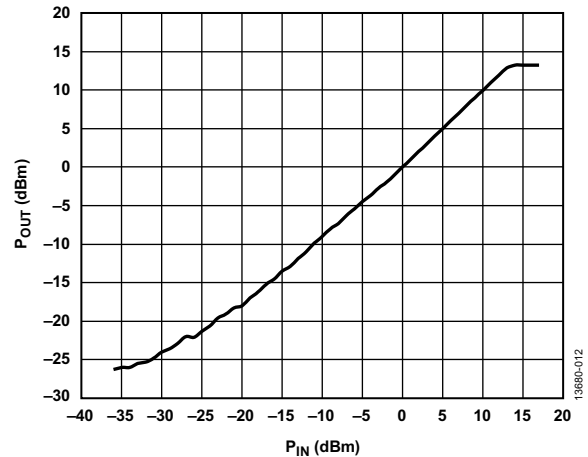


图12. 输入功率与测得耦合输出功率

图12展示了测得功率随输入功率而变化的情况。在每个功率水平下，在2 GHz条件下执行一个校准例程，以取得正向耦合端口的准确功率测量值。随着输入功率的增加，测得功率将达到检波器的限值，即15 dBm。类似地，随着输入功率的减小，会达到检波器的下限，测量精度会随之下降。

## 开路配置

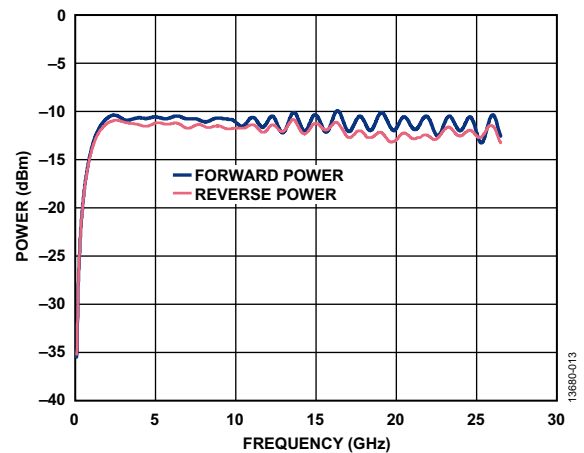


图13. 耦合器正向和反向功率与频率的关系——开路

图13表明，当正向和反向功率水平的值接近时，回损接近0 dB，与前面提到的50 Ω端接情况不同。

该开路仿真展示了信号主体是如何通过相反方向的耦合器反射回正向波的。正向波与反射波之差由耦合器在频率范围内的插入损耗导致。此图表明，确切的回损与VSWR测量值会随所用耦合器而变化，原因是耦合器阻抗在频率范围内的匹配不理想。



另外，可以设置一个阈值回损，以指示系统中是否发生了失配且失配远远大于耦合器回损。

### 50 $\Omega$ 输出端接电路配置

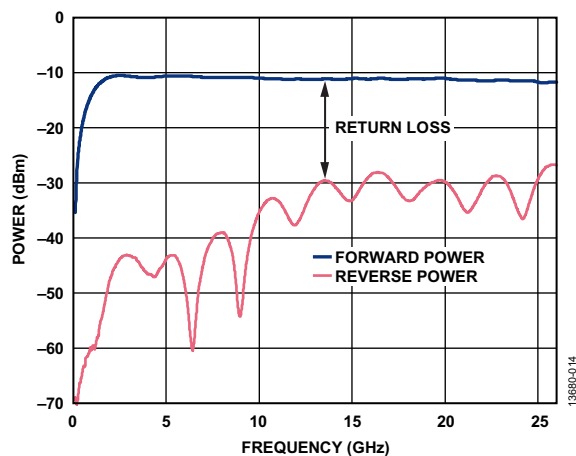


图14. 耦合器正向和反向功率与频率的关系——50  $\Omega$ 端接

图14展示了Marki Microwave C10-0226 RF耦合器在50  $\Omega$ 端接输出条件下的正向插入损耗和反射信号，其中，0 dBm的功率水平被施加于耦合器正向端口。耦合器的额定工作频率范围为2 GHz至26.5 GHz。因此，在图14中，不出所料，当频率超过2 GHz时，耦合器开始工作。仿真中，在耦合器上使用了一条匹配完善的传输线路，其输出阻抗为50  $\Omega$ 。任意频率下的回损为正向与反向功率之差。此图表明，回损随频率变化。然而，在该频率范围内，回损接近20 dB，这是可以接受的，因为回损值大于20 dB时，可以忽略不计。

### 3 dB输出衰减器电路配置

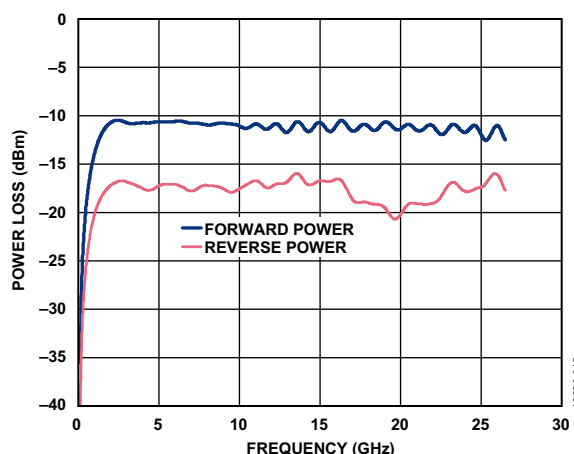


图15. 耦合器正向和反向功率与频率的关系——3 dB衰减器

在图15中，回损在6 dB至约15 GHz的范围内相对稳定，在此之后，耦合器损耗增加，衰减提高。

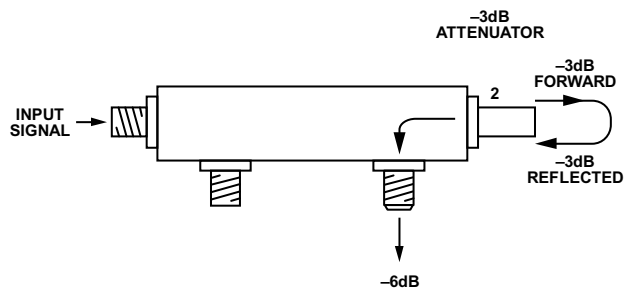


图16. 带6 dB衰减的耦合器

6 dB衰减的原因在于，3 dB耦合器会使入射信号和反射信号同时衰减3 dB。如图16所示，信号先在正向衰减3 dB，然后反射并再次衰减3 dB。测得的反射信号为正向和反射衰减累计结果。

### 校准结构走线插入损耗

RF走线插入损耗是用EV-VSWR-SDZ评估板的布局文件仿真的。将该布局文件导入ADS工具以运行仿真，以确定板上RF走线的损耗。

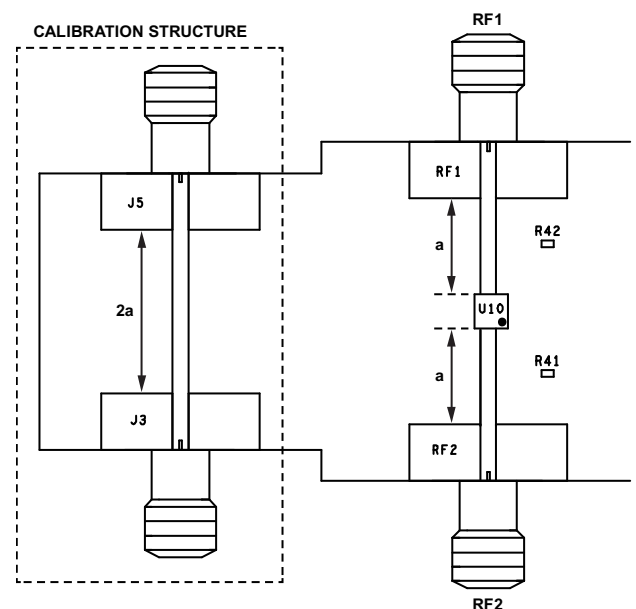


图17. 校准结构

仿真中使用了图17在评估板部分显示的校准结构。在评估板设计中纳入该结构是为了测量从SMA连接器到开关的损耗（距离A）。如图所示，校准结构的长度刚好为从RF1/RF2到HMC547开关(U10)的距离的两倍。为了在特定频率下测量这些RF走线损耗，把信号施加到一个校准结构连接器上，然后再在相反方向的连接器上测量。

在从DC至26.5 GHz的范围内，在该结构上运行ADS仿真工具，以模拟RF直线的插入损耗。

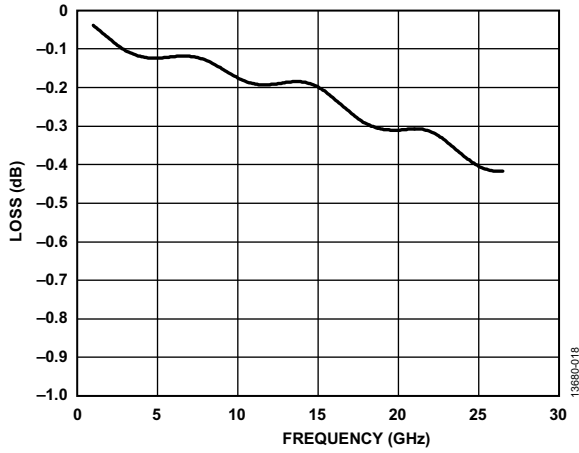


图18. 校准结构损耗——频率与功率

如图18所示，校准结构的插入损耗在26.5 GHz频率下会达到最大衰减值，即约-0.4 dB。

一般认为该插入损耗处于评估板可接受的限值范围以内。如果该插入损耗较大，结果会限制测量结果。

图19为与EVAL-SDP-CB1Z板相连的EV-VSWR-SDZ的照片。面向HMC547LC3的一款电气等效更换器件将于2016年6月上市。

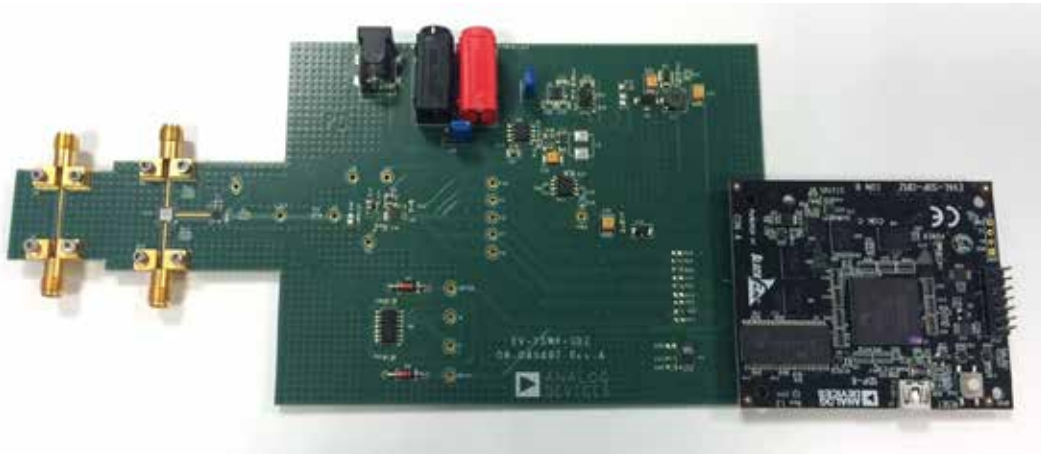


图19. EV-VSWR-SDZ板连接至EVAL-SDP-CB1Z板



**了解详情**

CN-0387设计支持包:

[www.analog.com/CN0387-DesignSupport](http://www.analog.com/CN0387-DesignSupport)

EVAL-SDP-CB1Z系统演示平台用户指南(UG-277)

EVAL-AD7091RSDZ评估板用户指南(UG-409)

ADIsimRF设计工具

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。

电路笔记CN-0366, 一款范围为-30 dBm至+15 dBm的40 GHz微波功率计, ADI公司。

电路笔记CN-0178, 软件校准型50 MHz至9 GHz RF功率测量系统, ADI公司。

MT-031教程, 《实现数据转换器的接地并解开“AGND”和“DGND”的谜团》, ADI公司。

MT-073教程, 《高速可变增益放大器(VGA)》, ADI公司。

MT-101教程, 《去耦技术》, ADI公司。

**数据手册和评估板**

HMC547LC3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**

**2015年10月—修订版0至修订版A**

更改“设置与测试”部分 .....5

**2015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.

©2015 Analog Devices, Inc. All rights reserved. Trademarks and registered trademarks are the property of their respective owners.  
CN13680sc-0-10/15(A)

