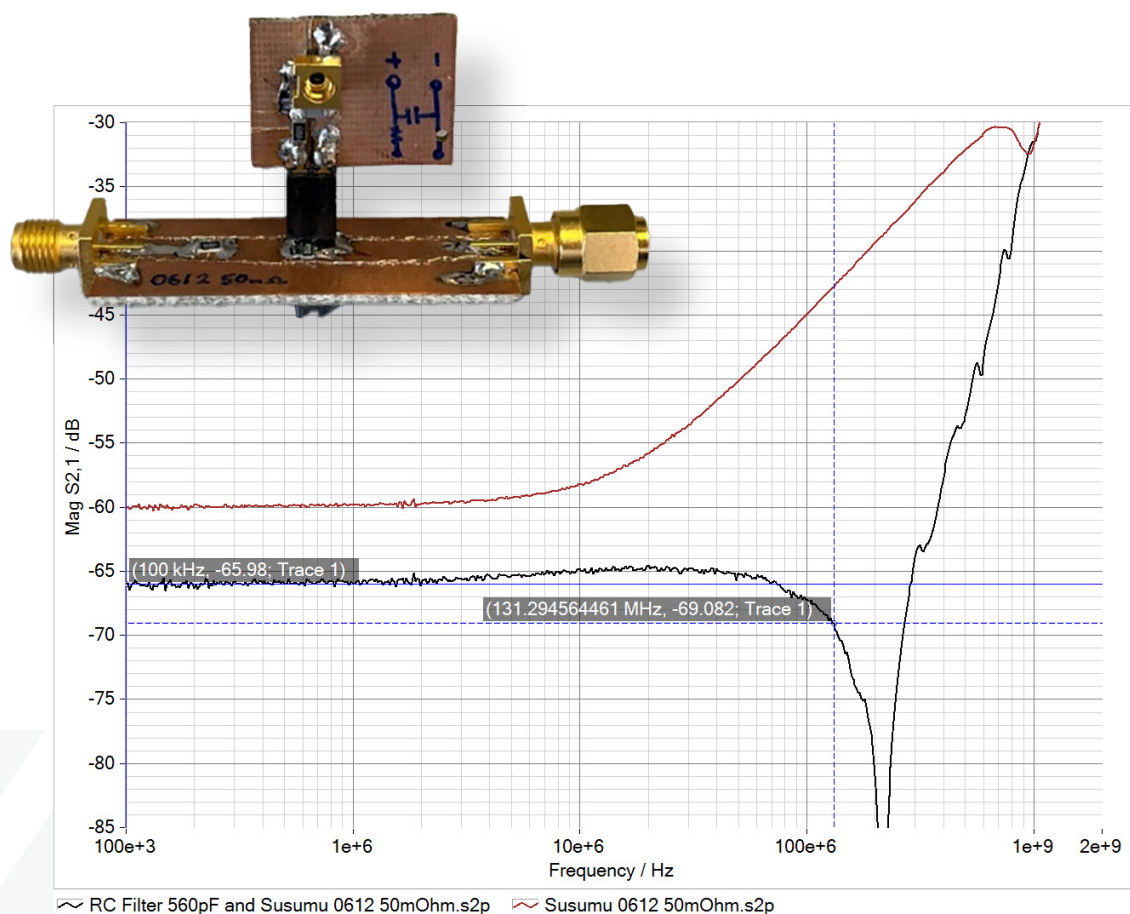


# 用于高频测量的 分流电阻串联电感补偿

Seamus Brokaw, 应用工程师

白皮书



## 摘要

表面贴装电阻器 (SMD) 和现成的电流检测电阻器 (CVR) 会引入寄生电感，从而导致振铃和过冲峰值失真。本文描述了一种定义简单 RC 滤波器的技术，以实现超过 1 MHz 的基于分流器的电流测量。

使用矢量网络分析仪 (VNA) 测量来确定物理分流器的频率响应。时域测量显示了寄生电感的影响。

然后将分流器建模为一个串联 RL 电路，并在仿真中添加一个 RC 滤波器以平坦化响应。应用 RC 滤波器并进行测量，以展示在频域 (VNA) 和时域 (示波器) 两方面的改进。

## 引言

在进行精确电流测量时，传统方法如电流互感器 (CT) 和电流钳探头通常是首选。然而，这些方法存在局限性，尤其是在试图捕获高频信号或快速瞬变时。电流互感器和电流钳往往会引入相位偏移、信号衰减和带宽限制等误差，使其不太适合 MHz 范围内的精确测量。

电流分流器通过使用低阻值元件将电流转换为电压，提供了一种直接的测量方法。与电流互感器和霍尔效应传感器不同，分流器不受磁干扰或外部场的影响，这使其在高电磁噪声环境中非常可靠。此外，与可能遭受饱和效应和低频性能限制的电流互感器相比，分流器提供了更宽的频率响应。分流器还具有紧凑的设计、成本更低的特点，并且通常引入的相位误差极小，这使其在需要精确、高带宽电流感测的应用中特别适用。

然而，现成的 SMD 电阻器和商用电流检测电阻器 (CVR) 也面临其自身的挑战，主要源于寄生电感。这种电感会引入振铃、过冲峰值失真和不准确的结果，尤其是在超过 1 MHz 时。

为了克服这些问题并在 1 MHz 至 100 MHz 范围内实现精确测量，需要新的补偿和探测技术。通过妥善处理寄生效应，电流分流器可以在高频环境中提供更好的保真度，使其成为要求精度超出传统电流测量方法能力范围应用的更优选择。像 TICP 系列隔离电流探头这样的新探测方法非常适合电流分流测量。其低噪声架构和隔离设计允许超过 1000 V 的共模电压额定值和超过 140 dB 的共模抑制比 (CMRR)，同时测量范围从  $\mu\text{A}$  电流到 kA 电流。

## 电阻器中的寄生串联电感

表面贴装电阻器中的寄生串联电感源于电阻器的物理布局 and 结构，导致其在较高频率下表现得像电感器。这种电感受多种因素影响，例如电阻材料（薄膜或金属箔设计通常比厚膜或线绕设计具有更低的电感）。电阻器的几何形状和尺寸也起着作用，较大的封装和较长的电流路径会增加电感。内部布局，包括端子长度和端子间距，进一步影响电感值，这可能显著影响高频电路中的性能。

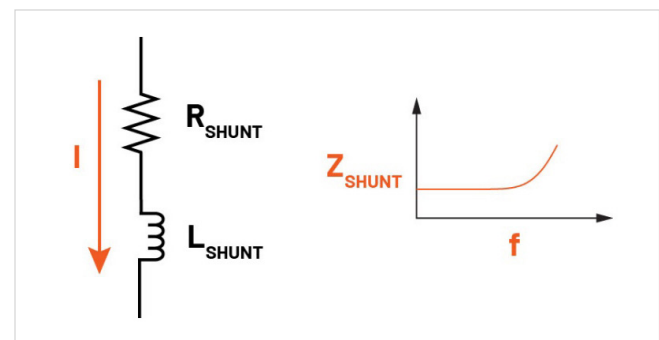


图 1. 特别是对于低阻值的分流电阻，寄生电感在频率超过 1 MHz 时开始影响整体分流阻抗。

转折频率出现在 -3 dB 点，此时传递函数  $H(\omega)$  的幅度等于  $1/\sqrt{2}$ 。从该点开始，寄生电感的阻抗主导了分流阻抗，分流器的标称电阻变得无关紧要。

$$H(\omega) = \frac{R_S}{(R_S + j\omega L_S)}$$

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\omega_0 = \frac{R_S}{L_S}$$

$$f_c = \frac{R_S}{2\pi L_S}$$

研究该方程，我们可以看到有用的频带随着  $R_S$  值的减小而变低，也随着寄生电感值的增加而下降。因此，为了获得平坦的频率响应，最好从电路能承受的最大分流电阻值开始，并尽一切可能最小化分流电感。

可以通过仔细选择电阻材料、选择“宽而短”的封装尺寸（如本文使用的 0612 封装分流器）来降低电感。管理寄生电感的另一种方法是将多个分流器并联放置，并测量并联组合两端的电压，因为并联的电感器会降低组合的总电感。

## 测量如何受到影响

在本例中，一个 50 mΩ、1 W 的 0612 封装电阻器（Susumu PRL1632-R050-F-T1）安装在夹具上，并使用 VNA 测量其频率性能。

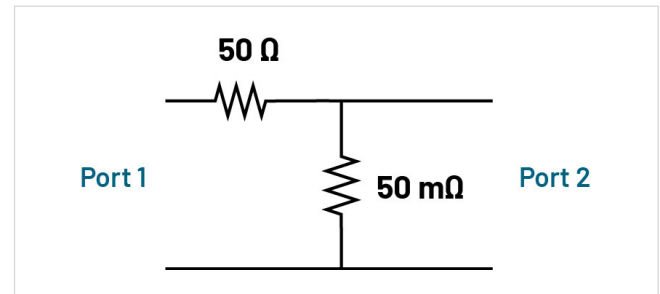


图 2. 一个简单的分流电阻电路，配置用于在矢量网络分析仪（VNA）上进行 S21 测量。

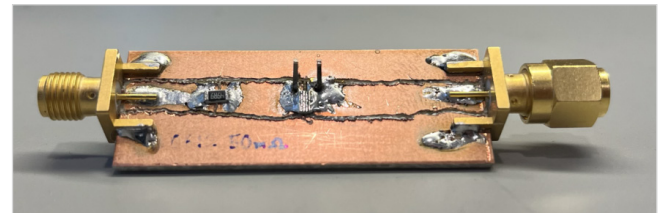
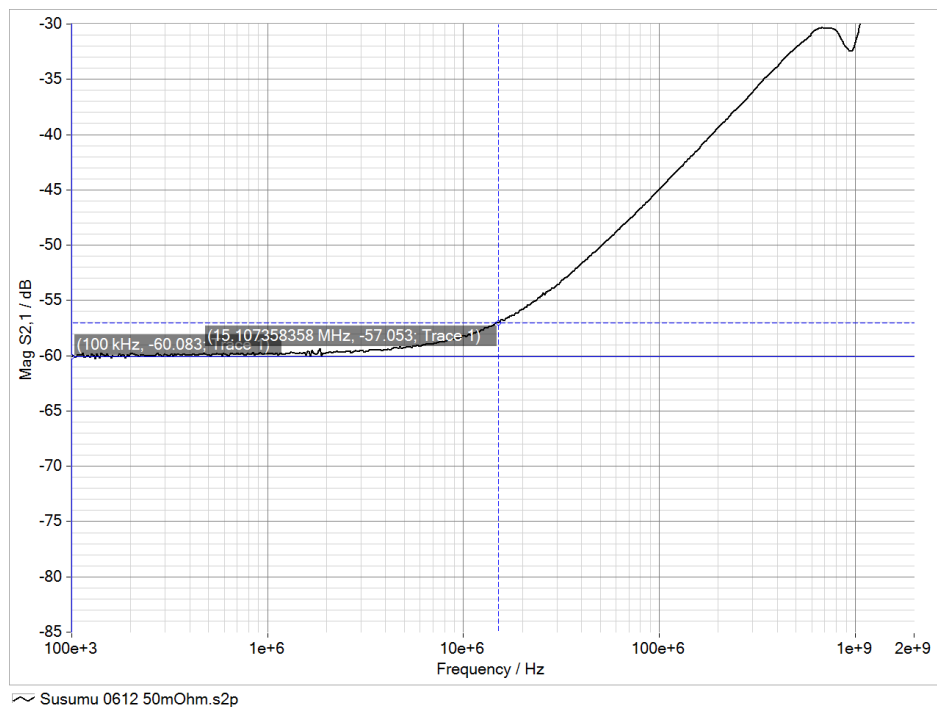


图 3. 图 2 中的电路，带有一个 50 mΩ 的薄膜分流电阻器，采用 0612 封装，安装在夹具上。端口 2 连接在连接到 PCB 中心分流电阻器的方形引脚上。



~ Susumu 0612 50mOhm.s2p

图 4. 图 2 中分流电阻器的 VNA 测量 (S21)。光标指示的转折频率为 15.1MHz。

VNA 的 S21 图显示转折频率（-3 dB 点）在 15.1 MHz。仅使用此分流器时，任何超过 15.1 MHz 的测量都将被错误地放大和失真。这将影响每个边沿的峰值电流测量，并使得在快速边沿上进行精确的功率计算变得不可能。

图 5 显示了时域数据，比较了来自信号发生器的无源探头阶跃响应与通过 50 mΩ 分流器的相同阶跃响应。边沿被显著失真放大。无源探头阶跃响应代表一个控制参考，因为其结构构成了一个精细调谐且平坦的频率响应测量系统。这与未补偿分流电阻器的极端过冲形成对比。

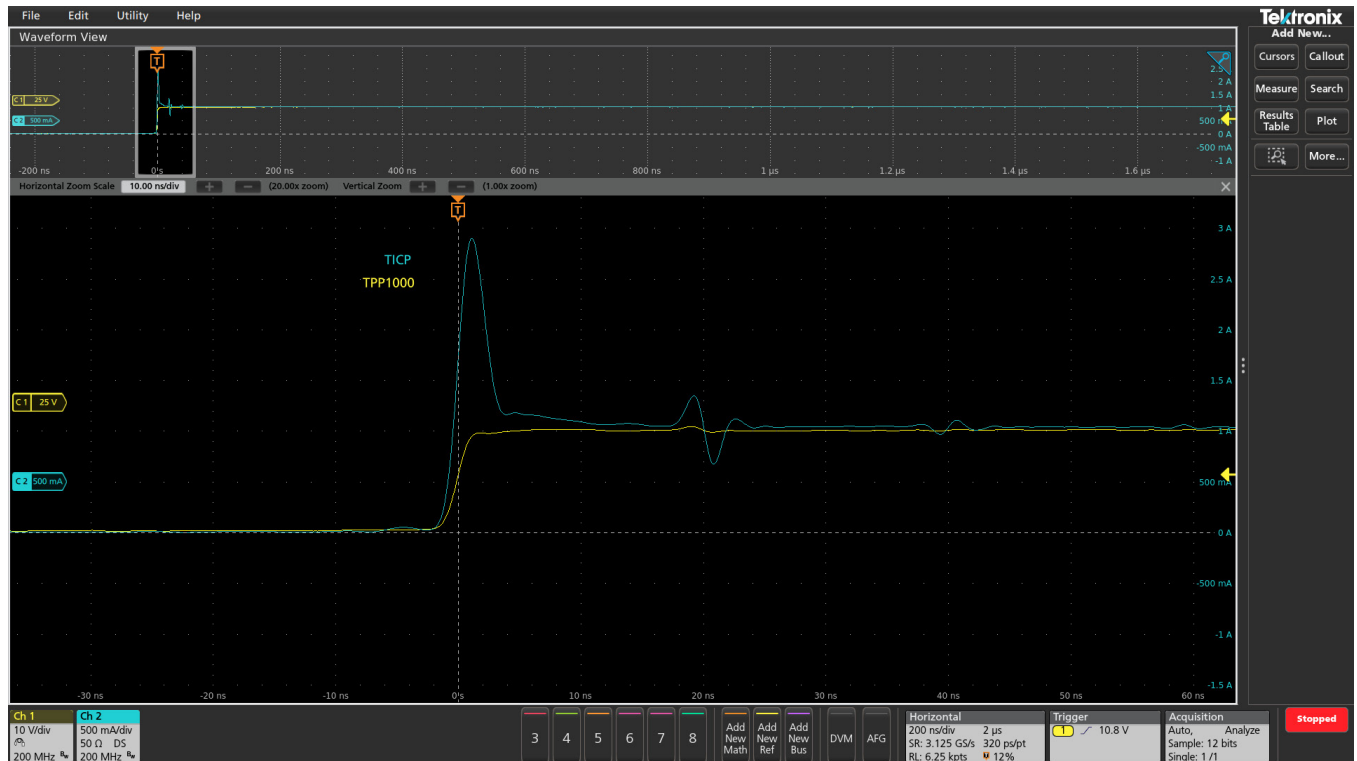
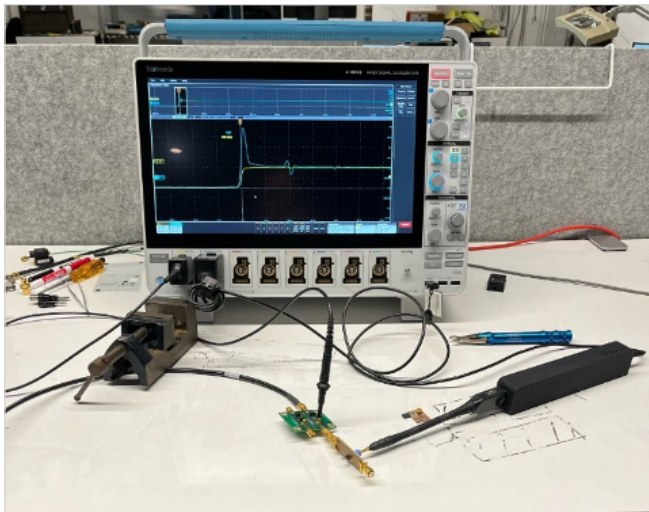


图 5. 快速阶跃发生器边沿的测量。黄色迹线是使用连接到发生器输出的 1 GHz 无源探头测量的。蓝色迹线来自测量 50 mΩ 分流电阻两端电压的电流分流探头，该分流器连接到同一个发生器输出。



本示例中使用的电流分流探头是泰克 T1CP 系列 IsoVu 隔离式电流分流探头。要测量分流器上的信号，像 T1CP 这样的低噪声隔离探头是理想的选择。隔离允许分流器放置在电路中的任何位置，甚至在 1800 V 电压轨上。低噪声架构提供了比任何高阻抗探头更高的灵敏度。该探头在本示例中忠实地测量了分流器的过冲。

(左) 图 6. 用于生成图 5 测量的测试设置。

一个 TPP1000 1 GHz 10x 无源探头通过转接板连接到阶跃发生器的输出端，该输出馈入分流电阻器夹具。

一个 T1CP100 隔离电流分流探头连接在分流器两端。

# 模拟分流器的电感和 RC 滤波器

利用在 VNA 上获得的 15.1 MHz 转折频率，可以创建分流器的等效电感和匹配的单极点 RC 滤波器，以抵消寄生电感引起的零点。使用电路仿真工具，调整等效串联电感（ESL）值，直到转折频率与 VNA 结果匹配。

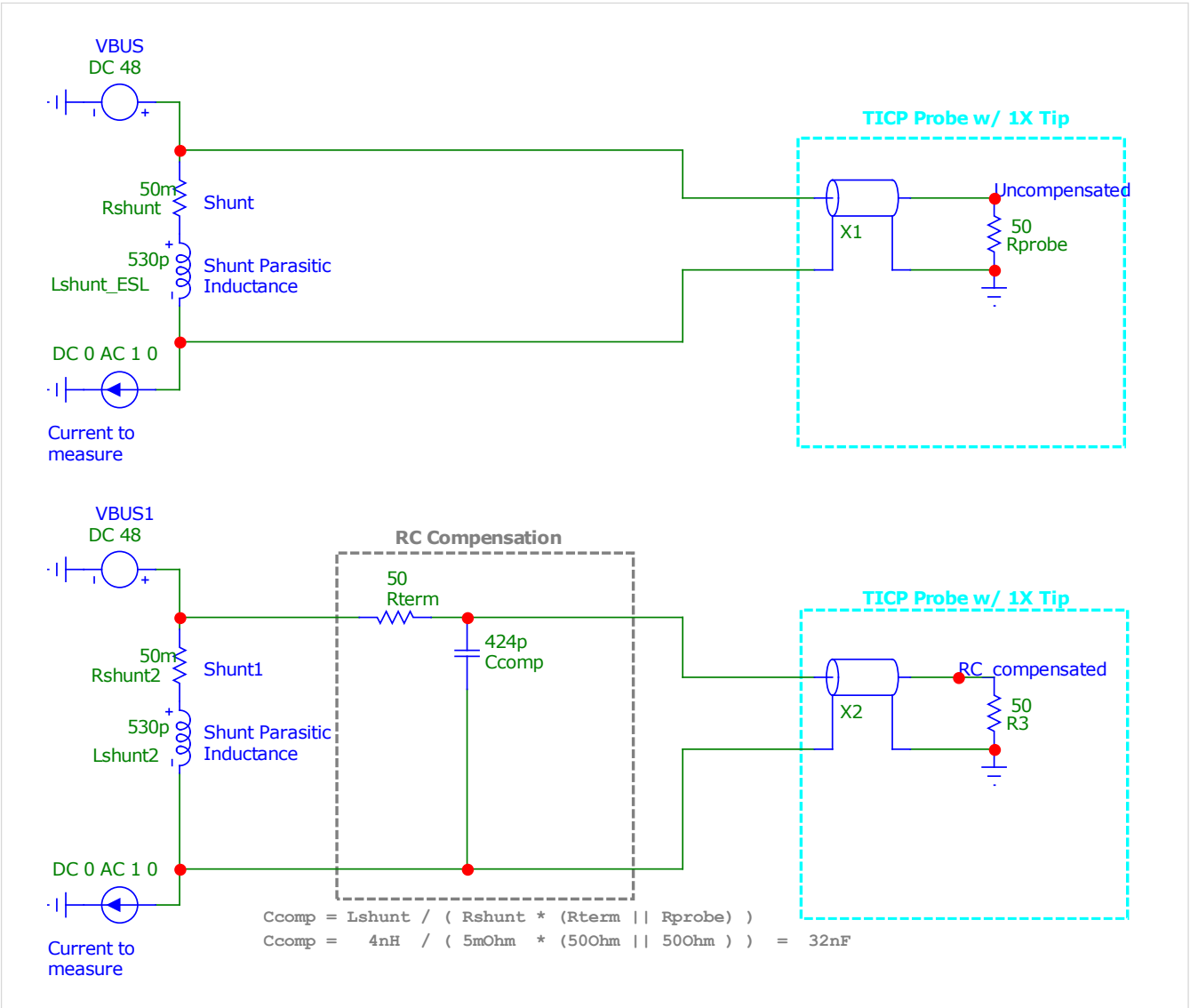


图 7. 在上部模型中，迭代估计 ESL 值，直到在 AC 仿真中复现 15.1 MHz 转折频率。在下部模型中，一个 R=50 Ω 的 RC 滤波器被插入电路中，以抵消分流器中的寄生电感。这两个仿真的结果如图 7 所示

一旦仿真数据与实际 VNA 显示的数据匹配，就仿真一个合适的 RC 滤波器来平坦化组合响应，如图 7 下部所示。通过改变 Ccomp 值，直到产生的频率性能平坦，可以找到电容值。得到的 RC 滤波器仿真将用于制作一个实物滤波器，然后可以在 VNA 上以及使用示波器进行时域阶跃响应对该组合的性能进行再次检查。

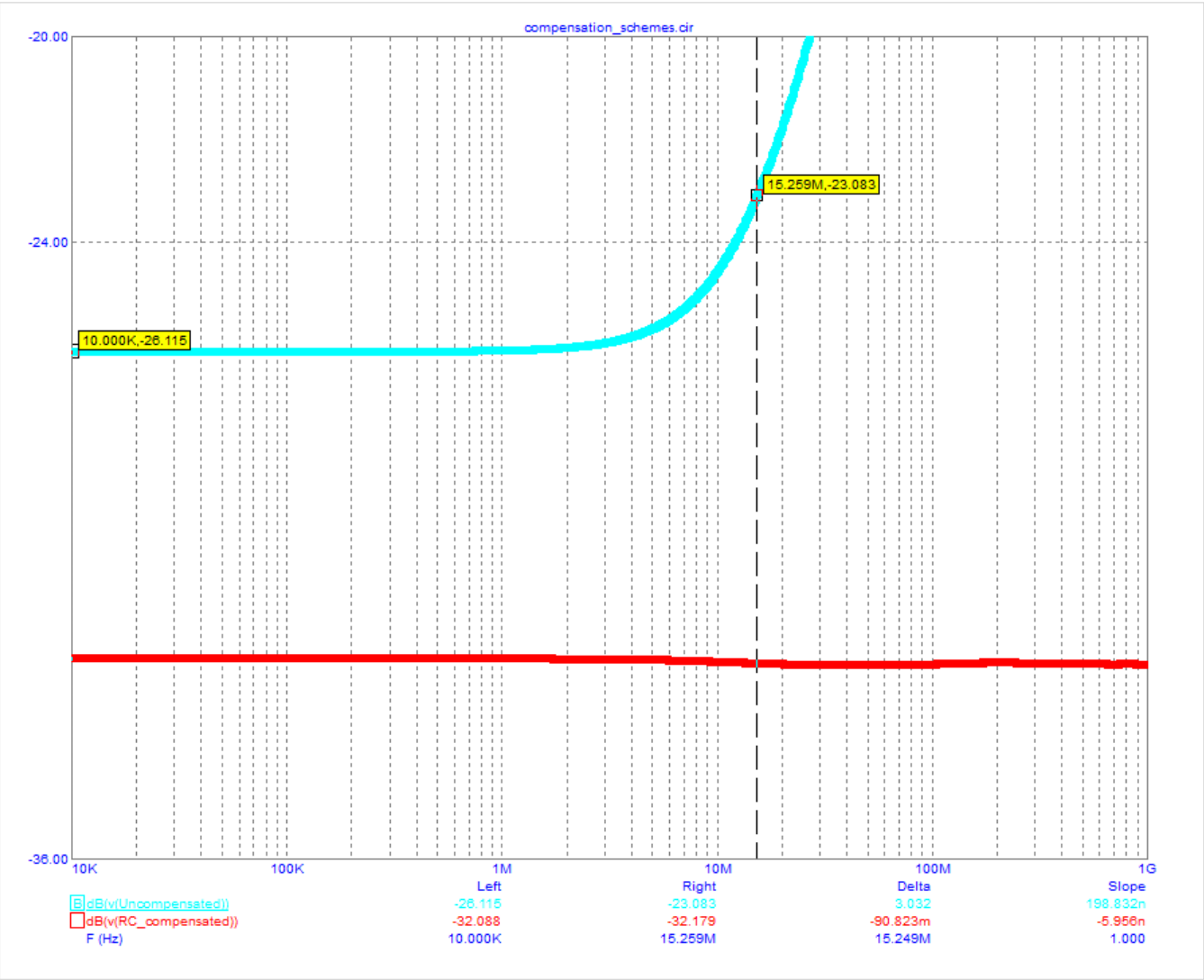


图 8. 上部蓝色迹线显示了未补偿分流器对 AC 分析的响应，转折频率为 15.3 MHz。下部迹线显示了添加 RC 滤波器后同一电路的平坦得多的响应。

这些仿真预测一个 547 pF 的电容器将显著平坦化电感引起的尖峰。接下来，将构建该 RC 滤波器，并用实际数据确认组合的性能。



## 用于补偿电感效应的 RC 滤波器

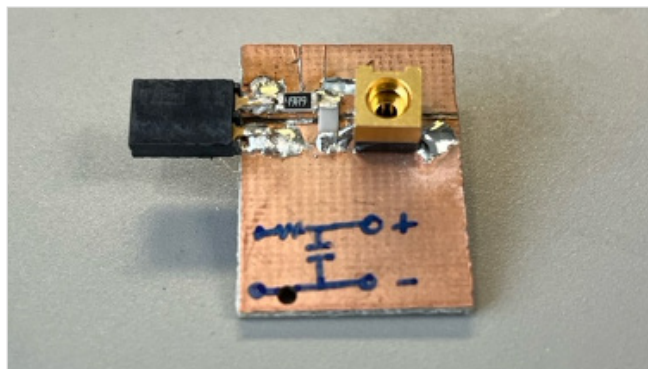


图 9. 基于仿真结果的低通 RC 滤波器， $R=50\ \Omega$ ， $C=547\ \text{pF}$ 。

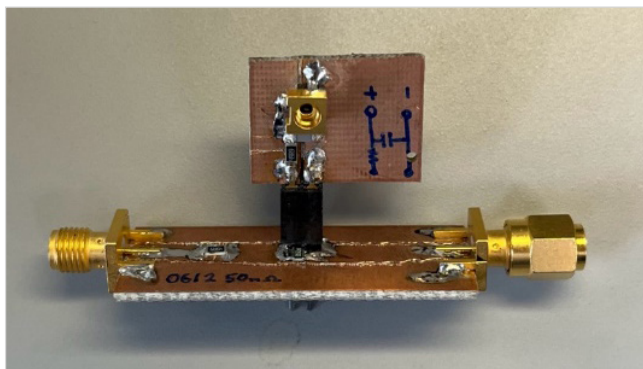


图 10. 安装了低通 RC 滤波器的分流器夹具。

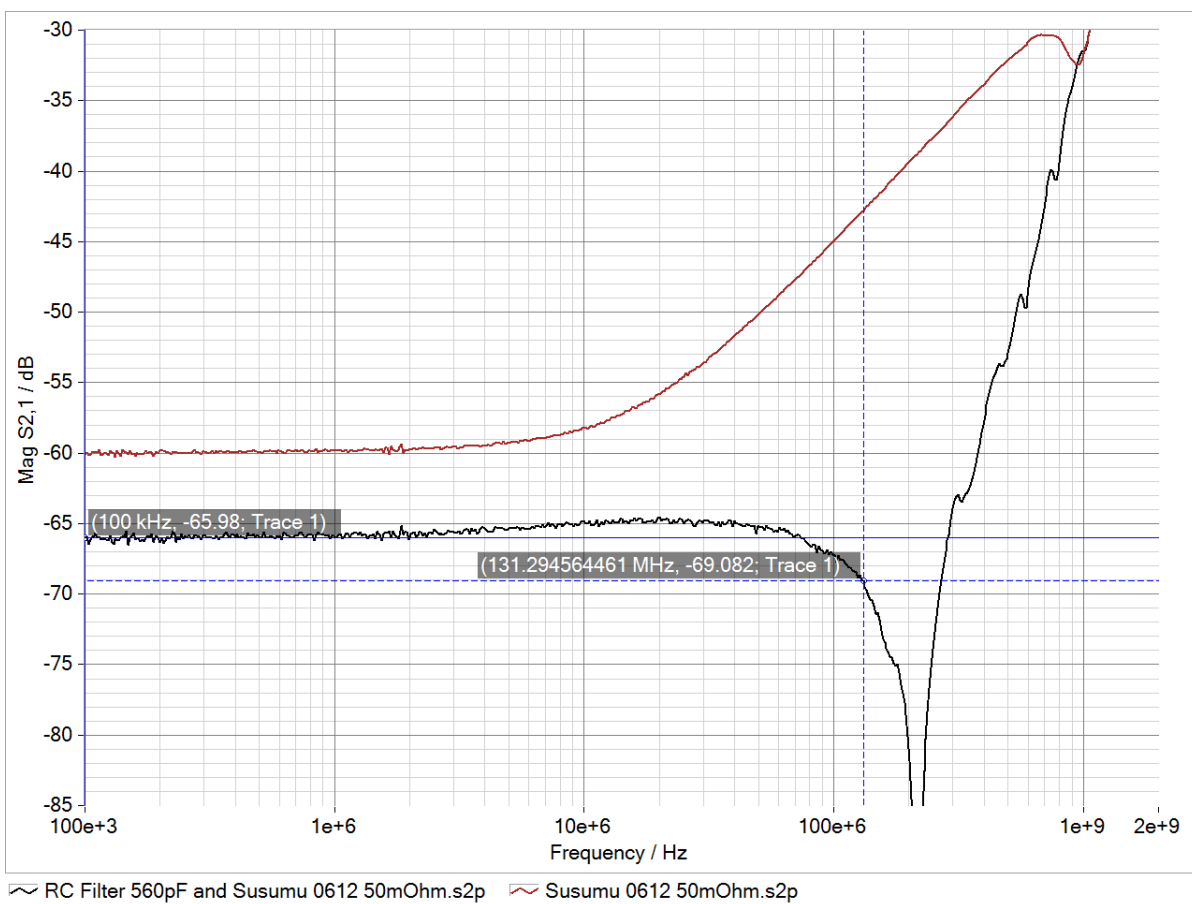


图 11. 上部（红色）迹线代表未补偿分流电阻器的频率响应。下部（黑色）迹线代表带 RC 补偿的组合网络的频率响应。

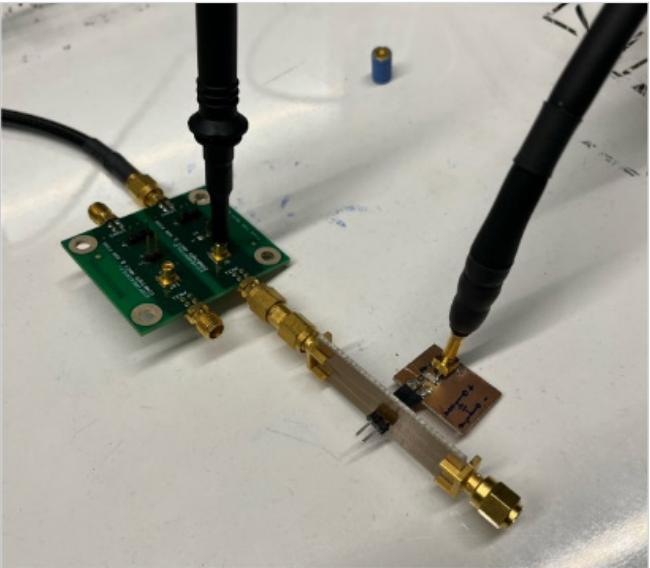
用于高频测量的分流电阻串联电感补偿

根据带此 RC 滤波器板的 VNA 数据，转折频率 ( $-3\text{ dB}$ ) 从  $15\text{ MHz}$  提高到超过  $130\text{ MHz}$ 。这是一个简单的单极点滤波器带来的超过 8 倍的带宽提升。

时域信息显示了类似的情况，高频边沿与无源探头阶跃响应的匹配度大大提高。再次说明，这里使用无源探头是为了展示一个接近理想且可用于比较的测量系统。



图 12. 快速阶跃发生器边沿的测量,类似于图 5,但在分流器两端应用了低通 RC 滤波器。黄色迹线是使用连接到发生器输出的  $1\text{GHz}$  无源探头测量的。蓝色迹线来自测量安装了低通滤波器 ( $R=50\ \Omega$ ,  $C=547\text{ pF}$ ) 的  $50\text{ m}\Omega$  分流器两端电压的电流分流探头。



通过多极点设计和更精确的分流器行为建模，可以进一步改进。正如您可能预期的那样，滤波器板本身也有其自身的寄生元件，这些元件也必须被补偿，这是一个收益递减的无限循环。在 VNA 数据中高于  $280\text{ MHz}$  处可以看到这些寄生元件的影响，此时分流器加滤波器的响应再次呈现强烈的感性。

(左) 图 13. 进行图 10 测量的探测示意图。TPP1000 (左) 显示阶跃发生器的输出。TICP1001 隔离电流分流探头连接在低通滤波器的电容两端，该滤波器已连接在分流电阻器两端。



## 结论

如果不进行补偿，分流电阻器会失真放大高频信号，导致错误的峰值电流读数和过度的过冲。20 MHz 带宽的滤波器可以抑制这种响应的最差部分，但要获得高达 100 MHz 及以上的电流读数，必须使用补偿滤波器。

电流分流器通过将电流转换为低阻值元件两端的电压，提供了一种直接、简单的测量方法。与电流互感器（CT）和霍尔效应传感器不同，分流器不受磁干扰和外部场的影响，在高电磁噪声环境中提供可靠的性能。它们还提供比电流互感器更宽的频率响应，电流互感器可能受到饱和和低带宽规格的限制。凭借其紧凑的设计、较低的成本和最小的相位误差，分流器特别适用于需要精确、高带宽电流感测的应用。



扫码关注泰克公众微信号

**如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！**

**或登录泰克公司中文网站：[tek.com.cn](http://tek.com.cn)**

**泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835**

**服务时间：9:00am-5:00pm，周一至周五**

**Tektronix (China) Co., Ltd.**  
**泰克科技 (中国) 有限公司**  
**泰克中国客户服务中心**  
**免费热线：400-820-5835**

**Beijing Branch**  
**泰克科技 (中国) 有限公司**  
**北京分公司**  
北京市朝阳区酒仙桥路 6 号院  
电子城国际电子总部二期  
七号楼 2 层 203 单元  
邮编：100015  
E-mail: china.mktg@tektronix.com

**Shanghai Branch**  
**泰克科技 (中国) 有限公司**  
**上海分公司**  
上海市长宁区福泉北路 518 号  
9 座 5 楼  
邮编：200335  
电话：(86 21) 3397 0800  
E-mail: china.mktg@tektronix.com

**Shenzhen Branch**  
**泰克科技 (中国) 有限公司**  
**深圳分公司**  
广东省深圳市深南东路 5002 号  
信兴广场地王商业大厦 3001-3002 室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
E-mail: china.mktg@tektronix.com

**Chengdu Branch**  
**泰克科技 (中国) 有限公司**  
**成都分公司**  
四川省成都市锦江区三色路 38 号  
博瑞创意成都 B 座 1604  
邮编：610063  
电话：(86 28) 8620 3028  
E-mail: china.mktg@tektronix.com

**Wuhan Branch**  
**泰克科技 (中国) 有限公司**  
**武汉分公司**  
湖北武汉市洪山区文化大道 555 号  
融创智谷二期 B1 栋 7 层 05 室  
邮编：430072  
E-mail: china.mktg@tektronix.com

更多宝贵资源，请访问 [TEK.COM.CN](http://TEK.COM.CN)

版权所有 © 泰克科技。保留所有权利。泰克产品受美国及外国专利保护，包括已授权和待授权专利。本出版物中的信息取代之前所有发布材料中的信息。保留规格和价格变更的权利。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克公司的注册商标。所有其他贸易名称均为其各自公司的服务标志、商标或注册商标。

041125 SBG 51C-74140-1

