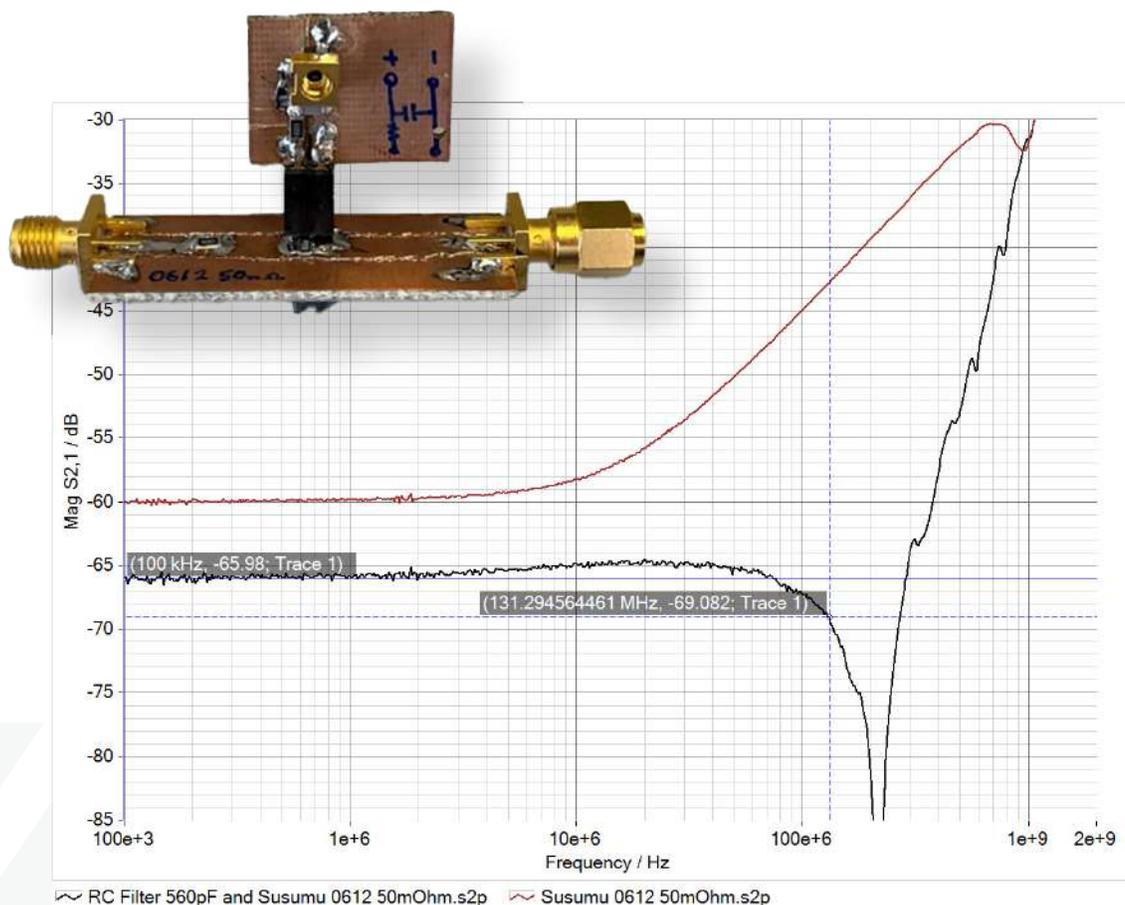




高頻量測中分流電阻 串聯電感的補償

應用工程師 Seamus Brokaw

白皮書



摘要

SMD 電阻和現成的電流觀測電阻 (CVR) 會引入寄生電感，導致振鈴和峰值過大。本文介紹了一種定義簡單 RC 濾波器的技術，可用於進行 1 MHz 以上、以分流器為基礎的電流量測。

VNA量測用於確定實體分流器的頻率響應。時域量測可顯示寄生電感的影響。

然後將分流器建模為串聯RL電路，並在模擬中加入 RC 濾波器以平坦化響應。應用並量測 RC 濾波器後，在頻域 (VNA) 和時域 (示波器) 上均顯示出效能的提升。

引言

在準確電流量測方面，電流互感器 (CT) 和電流鉗探棒等傳統方法通常是首選。然而，這些方法有其局限性，尤其是在嘗試擷取高頻訊號或快速暫態時。CT和電流鉗往往會引入相移、訊號衰減和頻寬限制等誤差，因此不太適合在 MHz 範圍內進行精確量測。

而電流分流器則使用低電阻元件將電流轉換為電壓，提供了一種直接量測方法。與CT和霍爾效應感測器不同，分流器不受磁干擾或外部磁場的影響，這使其在高電磁雜訊環境中也能可靠運作。此外，與CT相比，分流器的頻率響應更寬，而CT容易受到飽和效應的影響，低頻效能也有限。分流器還具有精巧的設計、更低的成本，並且通常引入的相位誤差極小，因此特別適合需要精確、高頻寬電流感測的應用。

然而，現成的SMD電阻和市售的CVR也存在各自的挑戰，主要是因為寄生電感所造成的影響。這種電感會引入振鈴，導致失真放大的峰值和不準確的結果，尤其是頻率在1 MHz 以上時。

為了克服這些問題並在 1 MHz 至 100 MHz 範圍內進行精確量測，我們需要新的補償和探測技術。透過妥善處理寄生效應，電流分流器可以在高頻環境中提供更好的完整性，使其成為要求精確度超出傳統電流量測方法能力的應用的理想選擇。TICP系列隔離電流探棒等新型偵測方法非常適合電流分流量測。其低雜訊架構和隔離設計允許超過 1000 V 的額定共模電壓和超過 140 dB 的共模抑制比 (CMRR)，同時量測從 μA 到 kA 的電流。

電阻器中的寄生串聯電感

表面貼裝電阻器的寄生串聯電感源自於電阻器的實體佈局和結構，使其在較高頻率下表現得像電感器。此電感會受到電阻材料(其薄膜或金屬箔設計的電感通常低於厚膜或繞線設計)等多種因素的影響。而電阻器的幾何形狀和尺寸也會產生一定程度的影響，若採用更大的封裝和更長的電流路徑，也會導致電感增加。內部佈局(包括端接長度和端子間距)會進一步影響電感值，進而顯著影響高頻電路的效能。

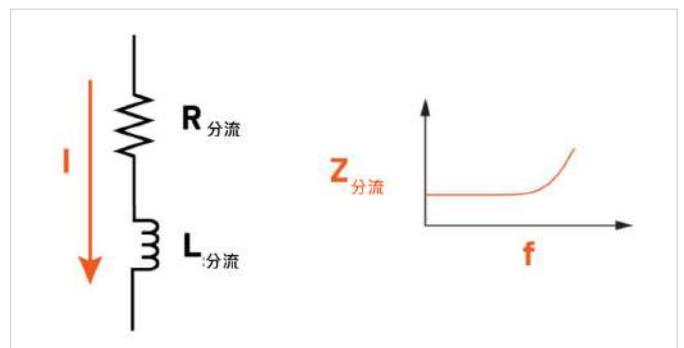


圖 1. 尤其是對於低阻值分流電阻器，寄生電感會在頻率超過 1 MHz 時開始影響整體分流阻抗。

轉折頻率出現在-3 dB點，此時傳遞函數 $H(\omega)$ 的振幅等於 $1/\sqrt{2}$ 。從該點開始，寄生電感的阻抗在分流阻抗中占主導地位，分流電阻的標稱電阻變得無關緊要。

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

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

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

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

從公式中，我們可以看到，隨著 R_S 值的減小，可用頻帶會降低；隨著寄生電感值的增加，可用頻帶也會下降。因此，為了獲得平坦的頻率響應，最好從電路能夠承受的最大分流電阻值開始，並盡可能地減少分流電感。

透過精心選擇電阻材料和「寬而短」的封裝尺寸（例如本文使用的 0612 封裝分流電阻），可以降低電感。另一種控制寄生電感的方法是將多個分流電阻並聯，並量測並聯組合兩端的電壓，因為並聯電感會降低總電感。

量測結果如何受到影響

在本例中，夾具上安裝了一個 50 mΩ、1W 的 0612 封裝電阻 (Susumu PRL1632-R050-F-T1)，並使用向量網路分析儀 (VNA) 量測頻率效能。

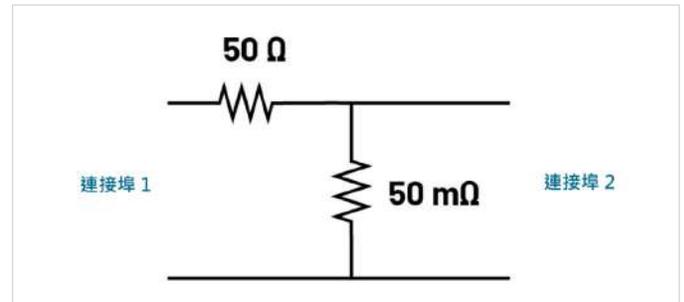


圖 2. 簡單的分流電阻電路，配置用於在向量網路分析儀 (VNA) 上進行 S21 量測。

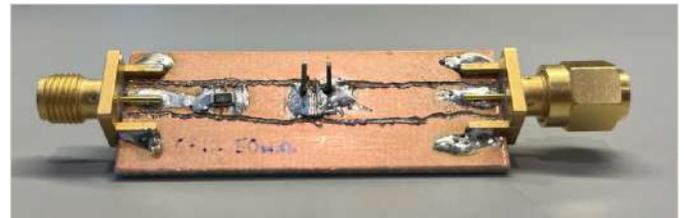
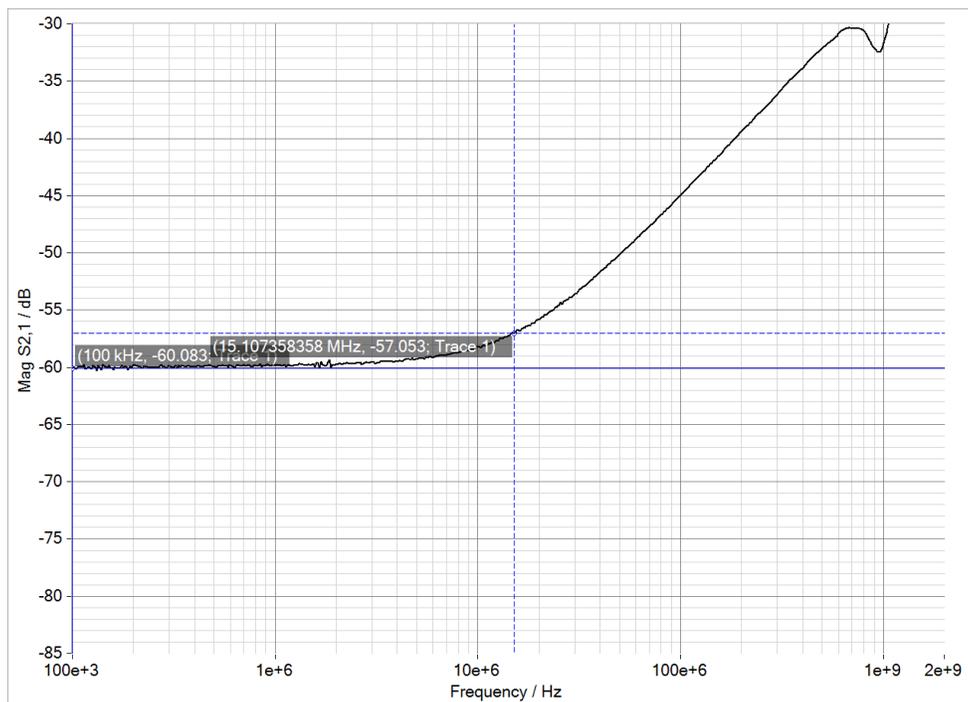


圖 3. 圖 2 中的電路，其中 50 mΩ 薄膜分流電阻採用 0612 封裝，安裝在夾具上。連接埠 2 跨接在 PCB 中心與分流電阻相連的方形接腳上。



~ Susumu 0612 50mOhm.s2p

圖 4. 圖 2 中分流電阻的 VNA 量測 (S21)。游標指示 15.1 MHz 的轉角頻率。

VNA 的 S21 圖顯示轉折頻率 (+3 dB 點) 位於 15.1 MHz。如果單獨使用分流電阻，任何高於 15.1 MHz 的量測結果都會被錯誤地放大和失真。這會影響每個邊緣的峰值電流量測，並導致無法在快速邊緣進行精確的功率計算。

圖 5 顯示了時域資料，比較直接來自產生器的被動探棒的步進響應與透過 50 mΩ 分流電阻的相同步進響應。邊緣顯著地被失真放大。被動探棒的步進響應代表了一種控制，因為其結構構成了一個經過精細調整且平坦的頻率響應量測系統。這與未補償的分流電阻的極端過衝形成了對比。

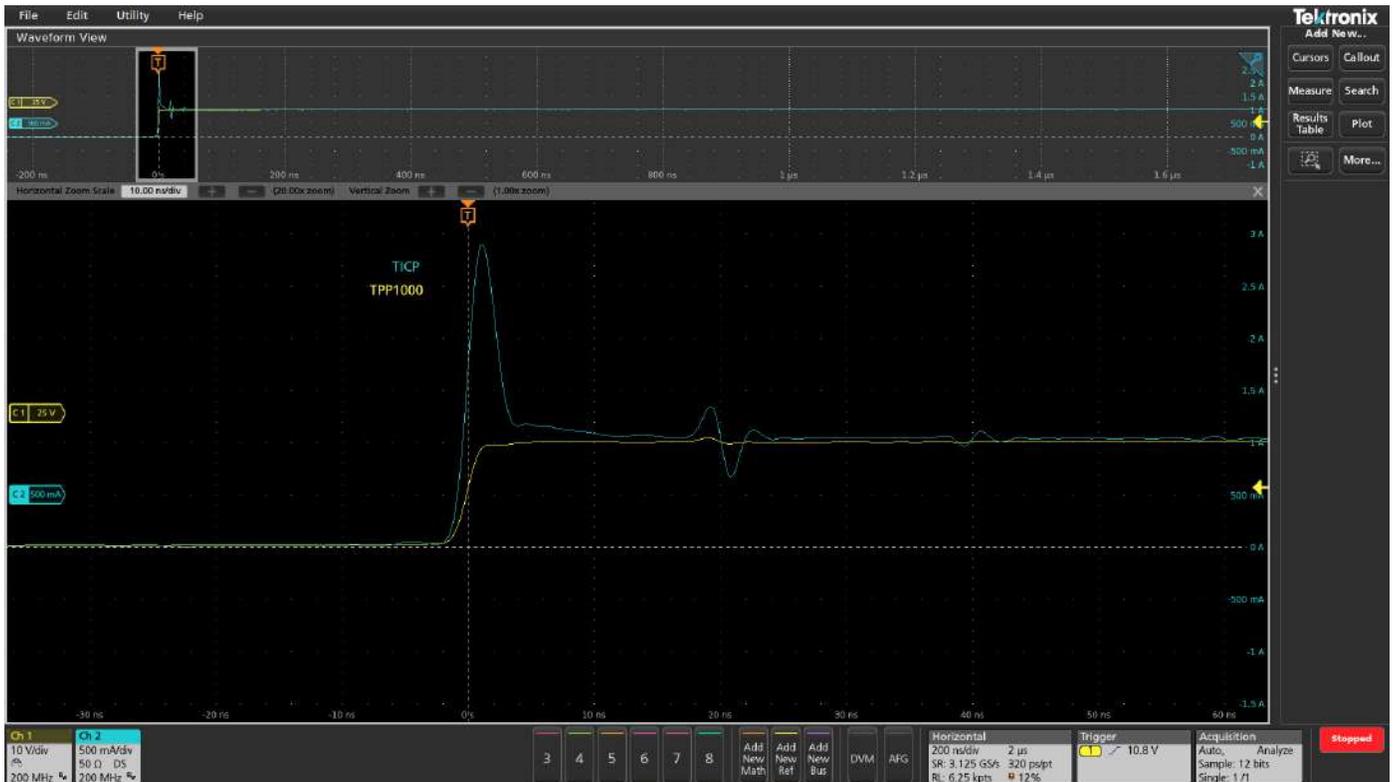
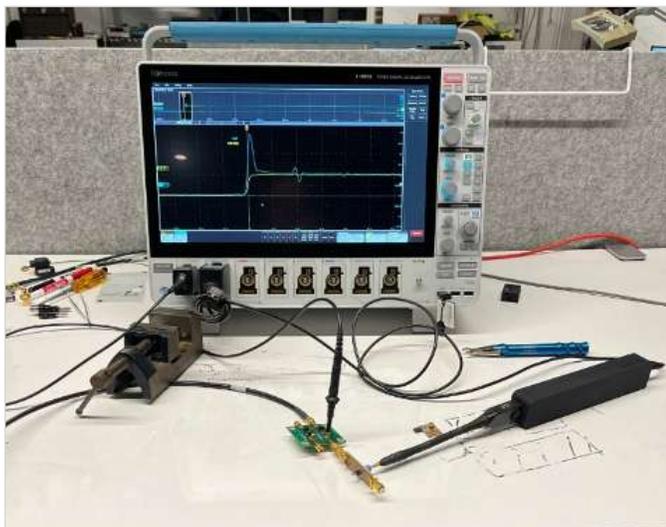


圖 5. 快速步進產生器的邊緣量測。黃色軌跡是使用直接連接到產生器輸出的 1 GHz 被動探棒測得。



藍色曲線則是使用電流分流探棒量測連接到相同產生器輸出的 50 mΩ 分流電阻的曲線。本例所使用的電流分流探棒是 Tektronix TICP 系列 IsoVu 隔離式電流分流探棒。若要量測分流器的訊號，像 TICP 這樣的低雜訊隔離探棒將會是理想的選擇。由於其隔離設計，我們可將分流器放置在電路中的任何位置，即使在 1800V 電壓軌上也是如此。而且，其低雜訊架構比任何高阻抗探棒都具有更高的靈敏度。在本例中，此探棒能夠準確量測分流器的過衝。

(左) 圖 6. 用於產生圖 5 中量測值的測試裝置。TPP1000 1 GHz 10x 被動探棒透過分線板連接到步進產生器的輸出端，該產生器的輸出端饋入分流電阻夾具。TICP100 隔離式電流分流探棒連接在分流器兩端。

模擬分流電阻和 RC 濾波器的電感

我們利用 VNA 取得的 15.1 MHz 轉折頻率，可建立分流電阻的等效電感和一個相符的單極點 RC 濾波器，以抵消寄生電感產生的零點。若使用電路模擬工具，則可改變有效串聯電感(ESL)值，直到轉折頻率與 VNA 的結果相符。

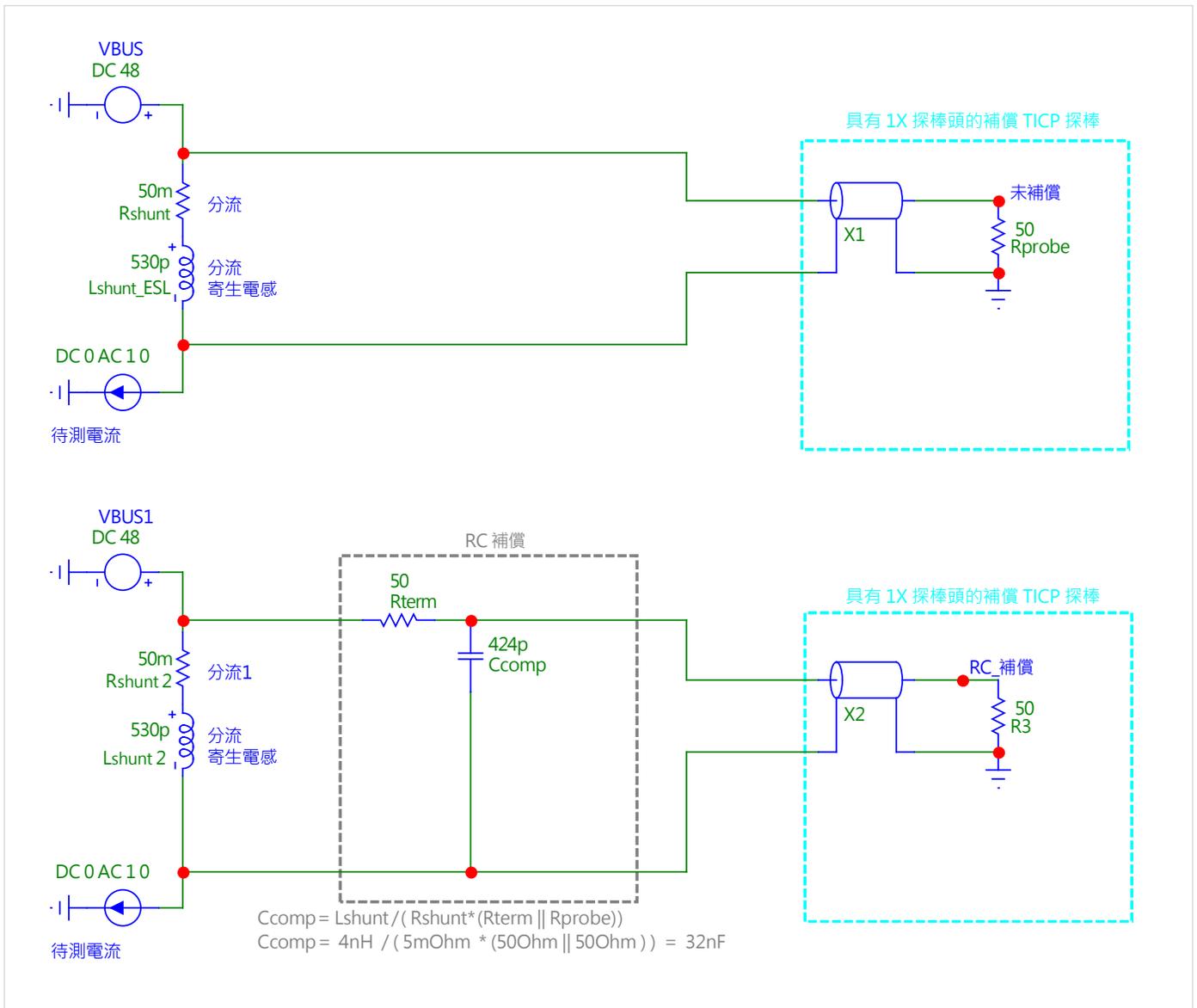


圖 7. 在上方模型中，代入 ESL 的迭代估計值，直到交流模擬中重複 15.1 MHz 的轉折頻率。在下方模型中，在電路中插入一個 R=50 Ω 的 RC 濾波器，以抵消分流器中的寄生電感。這兩個模擬的結果如圖 7 所示。

一旦模擬資料與實際 VNA 顯示的資料相符，就會模擬一個合適的 RC 濾波器來平坦化組合響應，如圖 7 下半部所示。我們可以改變 Ccomp 值來找到電容值，直到最終的頻率效能平坦為止。最終的 RC 濾波器模擬結果將用於製作實際濾波器，然後可以在 VNA 上再次檢查該組合的效能，並在示波器上使用時域步進響應進行檢查。

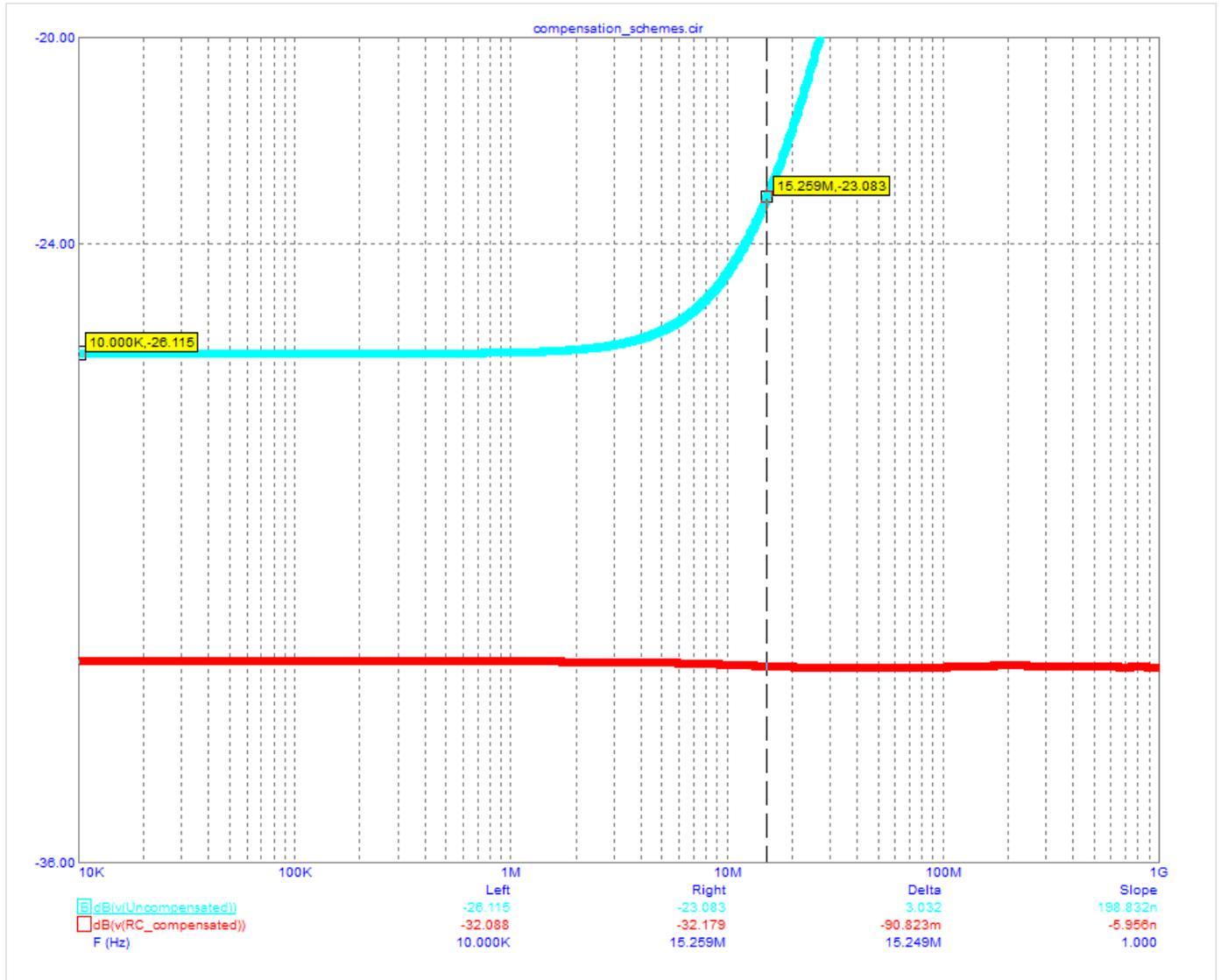


圖 8. 上方藍色軌跡顯示了未補償分流電阻對交流分析的響應，轉折頻率為 15.3 MHz。下方軌跡顯示了同一電路在添加 RC 濾波器後，響應更加平坦。

這些模擬預測 547 pF 電容會顯著地將電感衝擊平坦化。接下來，我們將建立該 RC 濾波器，並使用實際資料確認該組合的效能。

用於補償電感效應的 RC 濾波器

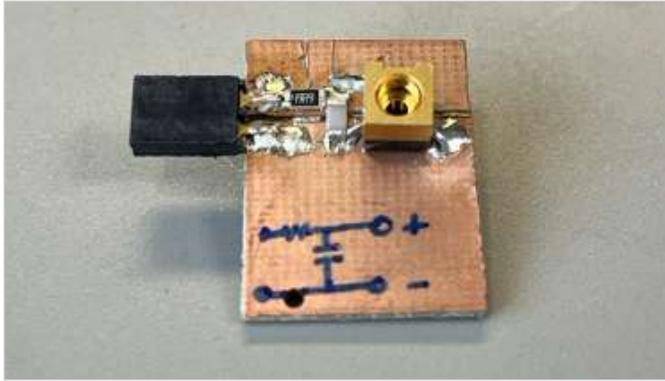


圖 9. 以模擬結果為基礎的低通 RC 濾波器 · $R=50\ \Omega$ · $C=547\ \text{pF}$ 。

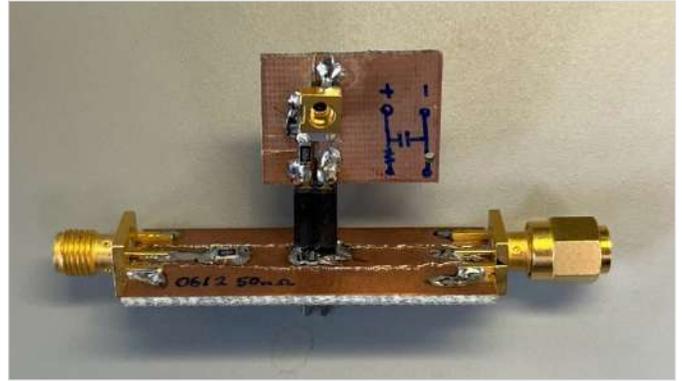


圖 10. 安裝了低通 RC 濾波器的分流夾具。

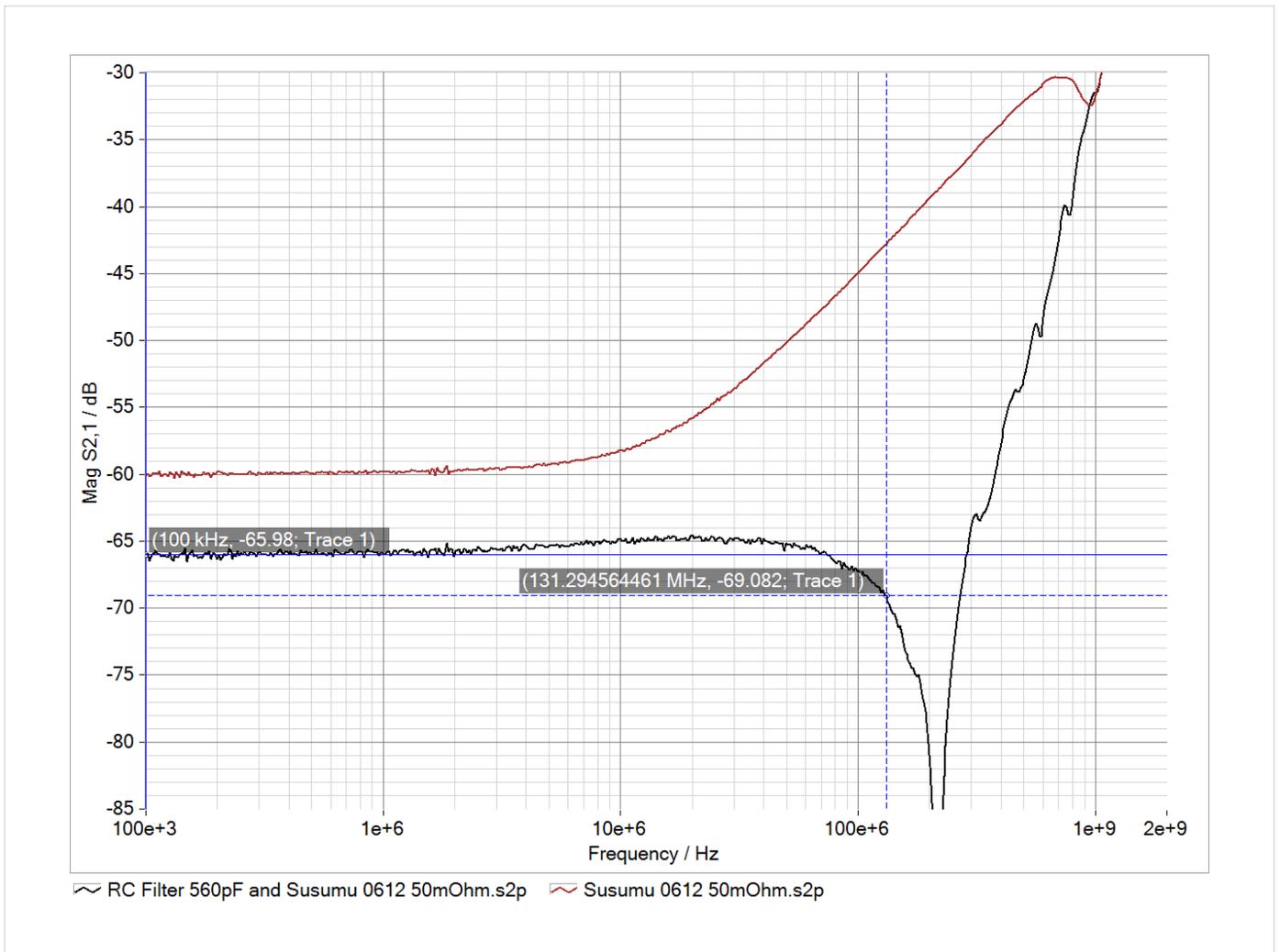


圖 11. 上方 (紅色) 軌跡表示未補償分流電阻的頻率響應。下方 (黑色) 軌跡表示含有 RC 補償的組合網路的頻率響應。

從使用此RC濾波器板的VNA資料來看，轉折頻率(-3 dB)從 15 MHz 提升至 130 MHz 以上。這比簡單的單極點濾波器的頻寬提高了 8 倍以上。

時域資訊也顯示出類似的情況，高頻邊緣與被動探棒的步進響應更加接近。再次提醒，此處使用被動探棒是為了展示一個接近理想狀態且便於比較的量測系統。

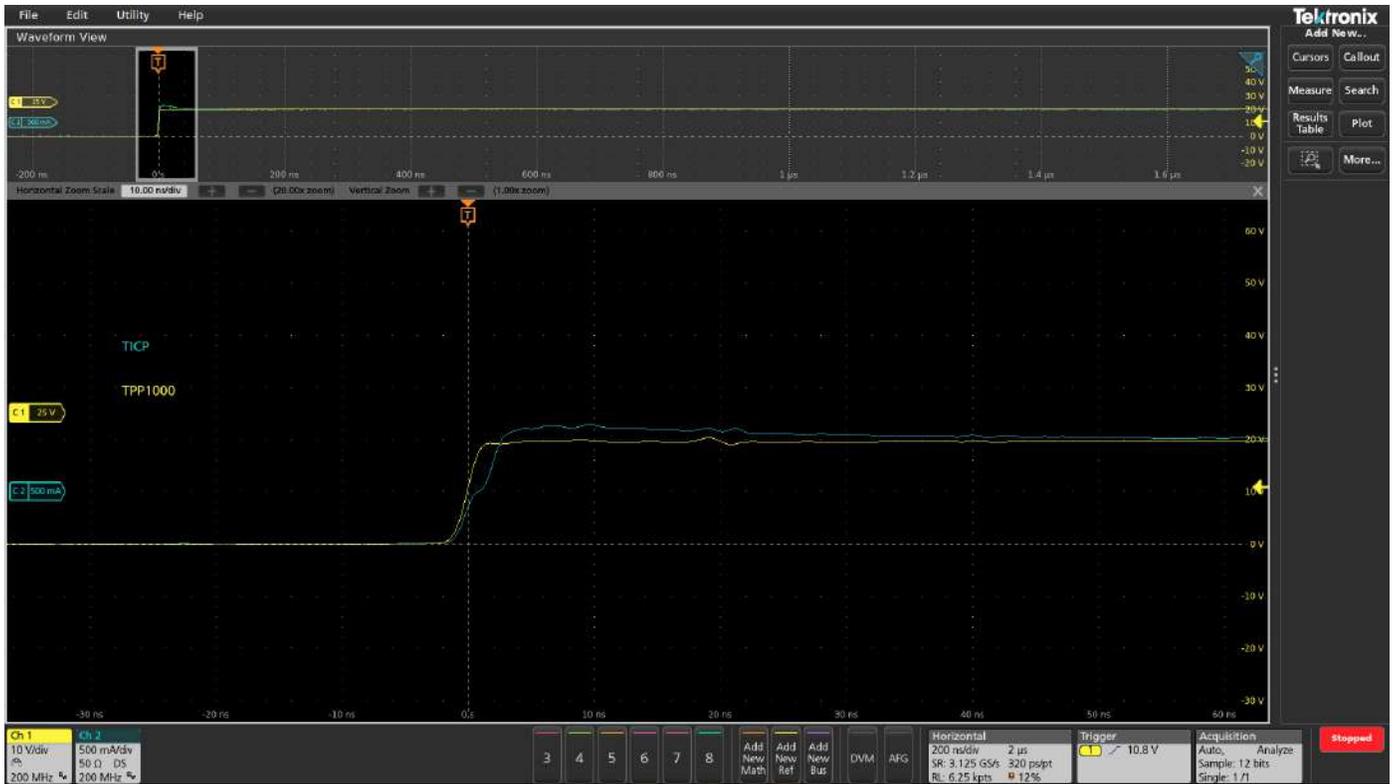


圖 12. 快速步進產生器的邊緣量測結果，類似於圖 5，但在分流電阻上應用了一個低通 RC 濾波器。黃色軌跡是使用直接連接到產生器輸出的 1 GHz 被動探棒測得。藍色軌跡則是使用電流分流探棒在安裝了低通濾波器 (R=50 Ω 和 C=547 pF) 的 50 mΩ 分流電阻上量測。



透過多極點設計和更精確的分流行為建模，可以進一步改進。如您所料，濾波板本身也存在寄生元件，這些元件也必須進行補償，形成一個收益遞減的無限循環。在 280 MHz 以上的 VNA 資料中可以看到寄生元件，此時分流器加濾波器的反應恢復到強烈電感狀態。

(左) 圖 13. 探測圖 12 中的量測值。TPP1000 (左) 顯示步進產生器的輸出。TICP100 隔離電流分流探棒連接在低通濾波器的電容兩端，而低通濾波器的電容則連接在分流電阻兩端。

結語

如果沒有補償，分流電阻會失真放大高頻訊號，導致錯誤的峰值電流讀數和過衝。20 MHz 頻寬濾波器可以濾除這種響應中最差的部分，但要取得 100 MHz 及以上的電流讀數，則必須使用補償濾波器。

電流分流器透過將電流轉換為低電阻元件上的電壓，提供直接的量測。與電流互感器 (CT) 和霍爾效應感測器不同，分流器不受磁干擾和外部磁場的影響，在高電磁雜訊環境中也能提供可靠的效能。其頻率響應也比電流互感器更寬，而電流互感器可能受到飽和度和低頻寬規格的限制。分流器設計精巧、成本低廉且相位誤差極小，特別適合需要精確、高頻寬電流感測的應用。

Tektronix 聯絡方式：

澳洲 1 800 709 465
奧地利* 00800 2255 4835
巴爾幹半島、以色列、南非及其他 ISE 國家 +41 52 675 3777
比利時* 00800 2255 4835
巴西 +55 (11) 3759 7627
加拿大 1 (800) 833 9200
中東歐及波羅的海諸國 +41 52 675 3777
中歐與希臘 +41 52 675 3777
丹麥 +45 80 88 1401
芬蘭 +41 52 675 3777
法國* 00800 2255 4835
德國* 00800 2255 4835
香港 400 820 5835
印度 000 800 650 1835
印尼 007 803 601 5249
義大利 00800 2255 4835
日本 81 (3) 67143010
盧森堡 +41 52 675 3777
馬來西亞 1 800 22 55835
墨西哥、中/南美洲和加勒比海諸國 52 (55) 88 69 35 25
中東、亞洲及北非 +41 52 675 3777
荷蘭* 00800 2255 4835
紐西蘭 0800 800 238
挪威 800 16098
中國 400 820 5835
菲律賓 1 800 1601 0077
波蘭 +41 52 675 3777
葡萄牙 80 08 12370
南韓 +82 2 565 1455
俄羅斯及獨立國協 +7 (495) 6647564
新加坡 800 6011 473
南非 +41 52 675 3777
西班牙* 00800 2255 4835
瑞典* 00800 2255 4835
瑞士* 00800 2255 4835
台灣 886 (2) 2656 6688
泰國 1 800 011 931
英國/愛爾蘭* 00800 2255 4835
美國 1 800 833 9200
越南 12060128

* 歐洲免費電話。若無法使用，
請致電：+41 52 675 3777
最後更新日 2022 年 2 月

Tektronix 台灣分公司

太克科技股份有限公司

114 台北市內湖堤頂大道二段 89 號 3 樓

電話：(02) 2656-6688 傳真：(02) 2799-8558

太克網站：tw.tek.com



Copyright © Tektronix, Inc. 版權所有。Tektronix 產品受到已經簽發及正在申請的美國和國外專利的保護。本文中的資訊代替以前出版的所有資料。技術規格和價格如有變更，恕不另行通知。TEKTRONIX 和 TEK 是 Tektronix, Inc 的註冊商標。本文提到的所有其他商標均為各自公司的服務標誌、商標或註冊商標。

2025 年 4 月

51T-74140-1

Tektronix[®]

