

降壓穩壓器輸出電壓漣波 測量中的高頻雜訊

相較於低壓差 (LDO) 穩壓器，開關電源具有更高的效率和更強的功率處理能力。但與此同時，功率場效電晶體 (FET) 的快速開關瞬態過程會產生向周圍輻射的電磁雜訊。在測量輸出電壓漣波時，這類輻射雜訊可被檢測到，並表現為高頻雜訊。倘若測試設定不當，可能會影響開關電源的真實性能表現。本文分析了電壓測量中出現高頻雜訊的根本原因，並釐清客戶是否需要為此類雜訊擔憂。文章透過 Ansys Maxwell 模擬電源周圍的輻射磁通分布，直覺呈現輻射效應。此外，本文亦提出了一種可測量電路中實際輸出電壓漣波並識別高頻雜訊引發的潛在問題的方法。

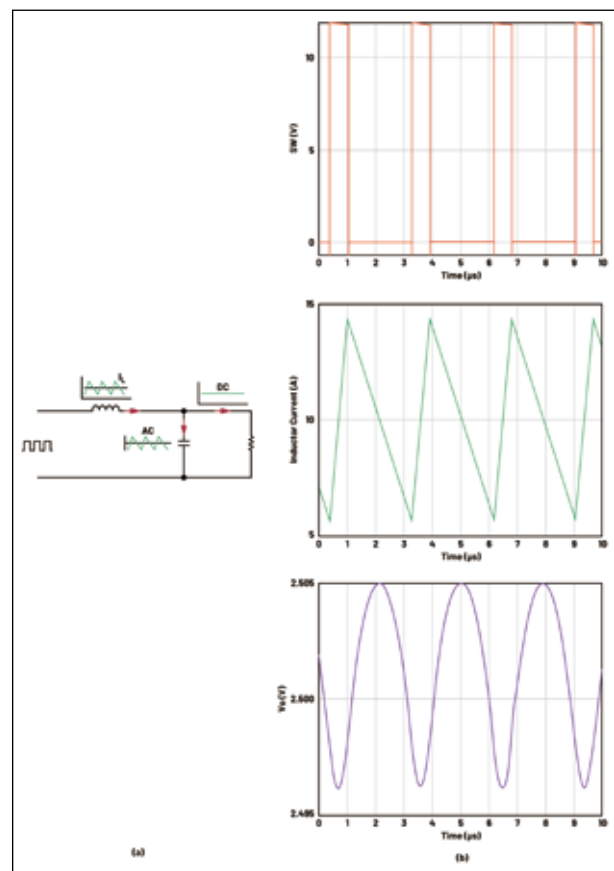
■作者：Yu Yan / ADI 資深應用工程師

在眾多應用中，開關電源憑藉高效率、高功率等優異特性，成為事實上的唯一選擇。降壓型功率轉換器是目前應用最廣泛的拓撲結構，透過脈衝寬度調變 (PWM) 控制開關特性，實現功率傳輸調節。但與此同時，功率 FET 在奈秒至數十奈秒級的快速開關瞬態過程中會引入高頻雜訊。例如，在對雜訊敏感的應用中，如果電源產生的高頻電壓尖峰與時脈訊號疊加，將會導致 ADC、ASIC、FPGA 等負載元件工作異常甚至失效。因此，明確高頻雜訊的根本成因、識別雜訊問題，並找到抑制或消除其影響的可行方案非常重要。而正確的雜訊 / 漣波測量方法尤為關鍵。

降壓轉換器的典型輸出電壓漣波

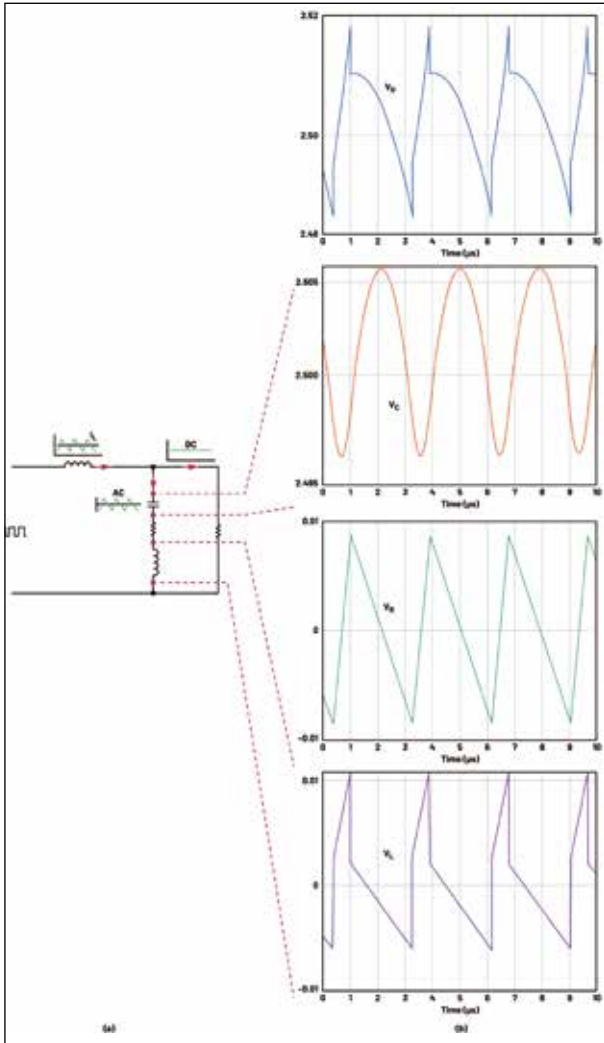
在典型降壓轉換器中，電感與電容構成濾波網路，為開關動作產生的交流訊號提供傳導通路徑。電感電流包含交流分量和直流分量。大部分交流分量將流入輸出電容，而直流分量只流向負載。若不考慮元件寄生參數 (如圖 1a 所示)，輸出電容兩端的輸出電壓漣波為平滑波形 (如圖 1b 所示)。

圖 1: 簡化降壓轉換器：(a) 無寄生參數的電路；(b) 開關波形



若考慮輸出電容的寄生電阻與寄生電感 (如圖 2a 所示)，輸出電壓漣波會發生顯著變

圖 2: 包含寄生參數的輸出電容 : (a) 簡化電路 ; (b) 輸出電壓波形



化 (如圖 2b 所示)。

圖 2b 中波形的交流分量主要分佈在開關頻率附近，範圍為數百 kHz 至數 MHz。但在實際測試中，輸出電壓通常會出現更高頻率的分量，頻率約為數百 MHz。功率電感的寄生電容可為這些數百 MHz 的訊號提供從開關節點到輸出端的導通路徑，如圖 3 所示。

圖 4a 提供了基於 LTM4628 μ Module 降壓穩壓器的輸出電壓測量示例，可以清楚觀察到開關頻率波形與高頻尖峰。而當探棒相對於電路板從垂直方向改為水平方向時，測得的輸出電壓漣波從 54mV 降至 42mV，如圖 4b 所示。

圖 3: 考慮電感寄生電容時的輸出電壓漣波 : (a) 開關節點至輸出端的導通路徑 ; (b) 開關波形

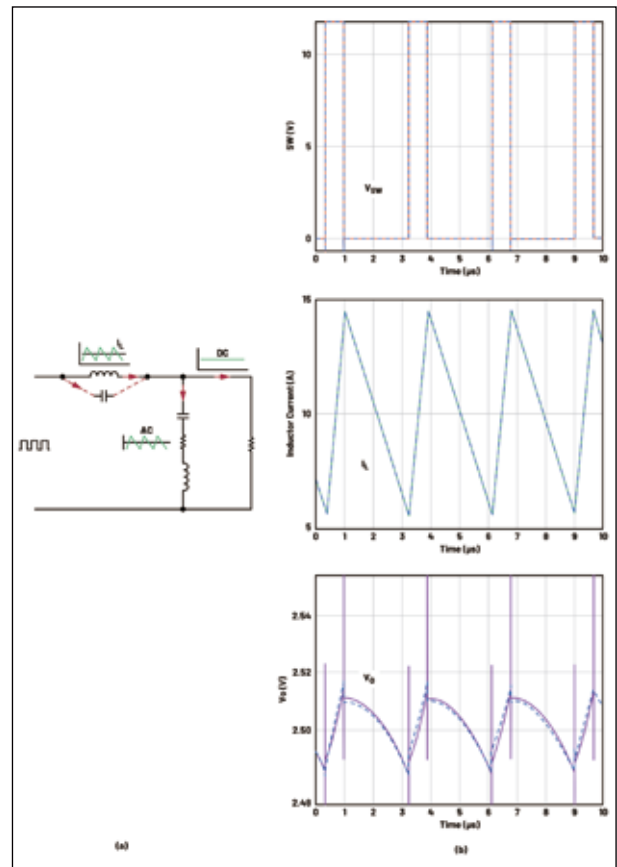


圖 5 展示了輸出電壓的測量方式。若僅考慮導通路徑上產生的輸出電壓漣波，測量結果不應隨探棒位置改變。同時，探棒拾取的高頻雜訊與開關動作同步。因此，探棒額外拾取的高頻雜訊很可能是快速開關瞬態過程中，熱迴路內高 di/dt 所感應的輻射雜訊。

為進一步驗證探棒位置所帶來的差異，分別採用通用探棒、BNC 線纜及主動差分探棒來測量輸出電壓漣波，如圖 6 所示。如圖所示，通用探棒需要額外彈簧作為接地回路，因而測量迴路更大。

表 1 提供了不同探棒的測量結果。相較於垂直放置測量，探棒水平放置時測得的高頻尖峰均更低。此外，使用通用探棒時的水平放置測量結果，要高於使用 BNC 線纜與差分探棒

圖 4: 採用通用被動探棒測量 LTM4628 的輸出電壓漣波：(a) 探棒垂直於展示板；(b) 探棒水平於展示板

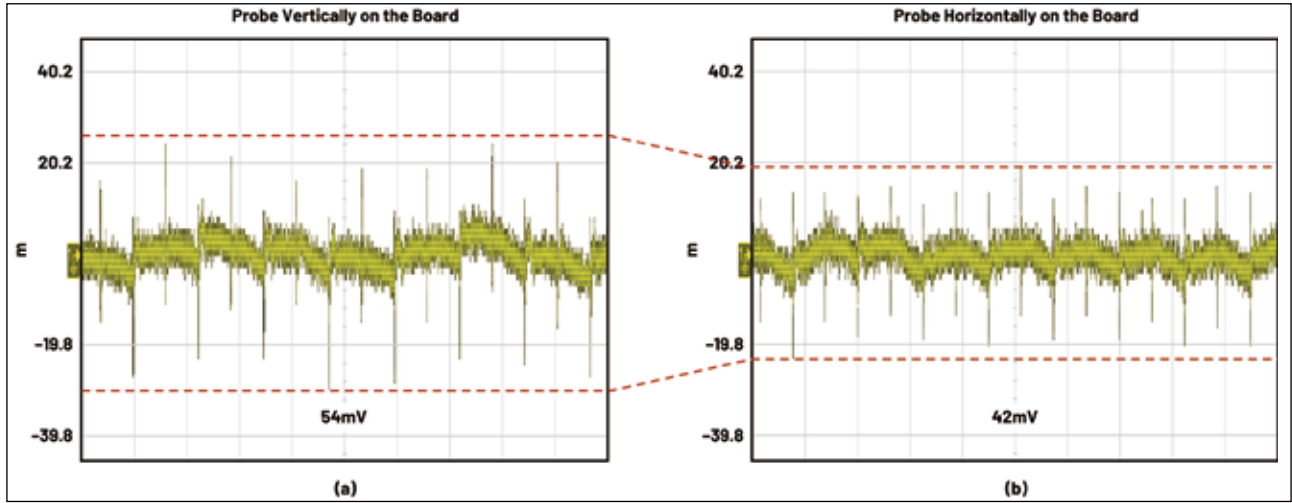
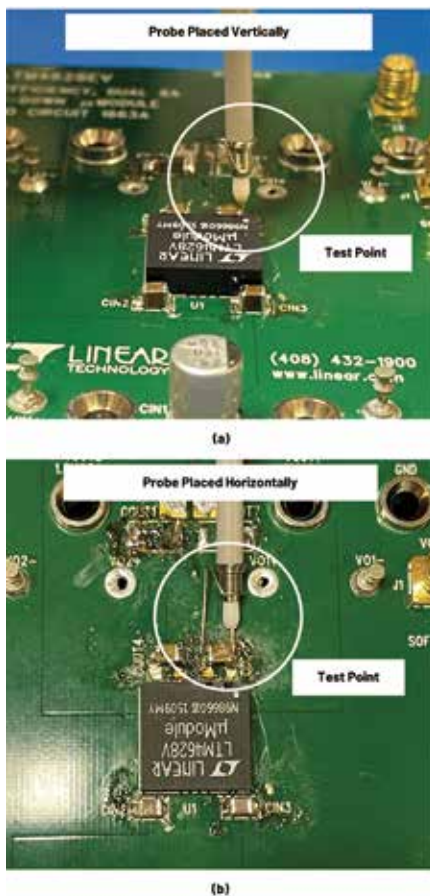


圖 5: 輸出電壓漣波測量設定：(a) 探棒垂直於展示板；(b) 探棒水平於展示板

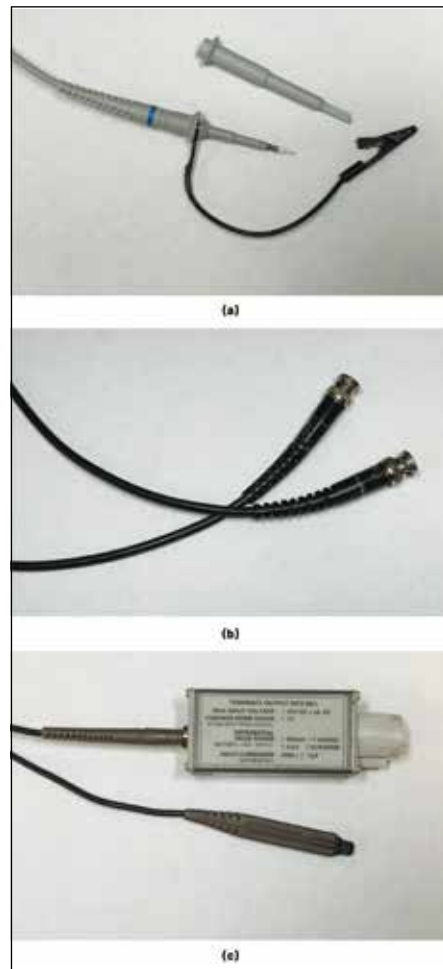


時的測量結果。

為了解輸出電壓漣波測量中出現的異常現象，基於簡化後的 LTM4628 物理結構搭建了如圖 7a 所示的 Maxwell 模擬模型。熱迴路 1 由模組內部的 MOSFET 與內部輸入電容構成；熱迴路 2 由 MOSFET 與

展示板上模組附近的外部輸入電容構成。向熱迴路 1 和熱迴路 2 均注入 300MHz 的等效電流，以類比開關瞬態過程中熱迴路內的高 di/dt

圖 6: 不同的探棒：(a) 通用探棒；(b) BNC 線纜；(c) 差分探棒



效應。圖 7b 展示了模組周圍的磁場 (H 場) 分佈。在展示板上方、模組周圍區域的 H 場強度顯著更高，顯示熱迴路產生的磁通極易被探棒測量迴路拾取。

圖 8 提供了放大後的 H 場分佈，以便更詳細地說明不同探棒位置導致測量結果差異

的根本原因。在圖 8 中，等效垂直測量環面所能拾取的磁通量約為水平測量環面的 8 倍。這

表 1: 採用垂直與水平測量方式時，不同探棒測得的輸出電壓漣波

探棒位置	垂直於評估板	水平於評估板
通用探棒	54mV	42mV
BNC 線纜 (50Ω 端電極)	48mV	28mV
差分探棒	114mV	28mV

圖 7: Maxwell 有限元分析 (FEA) 模擬：(a) 模擬模型；(b) H 場分佈

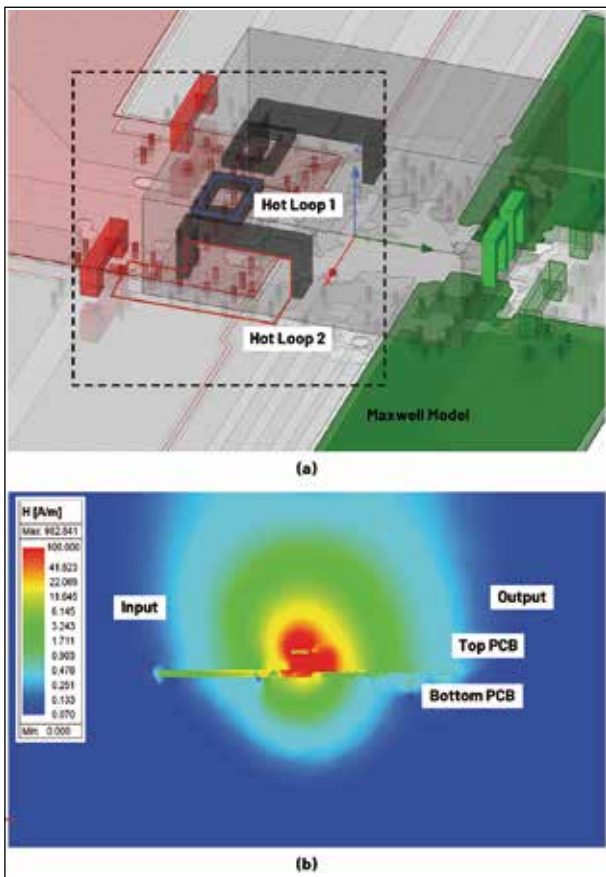


圖 9: VOUT 測量回路捕獲到的額外輻射雜訊。

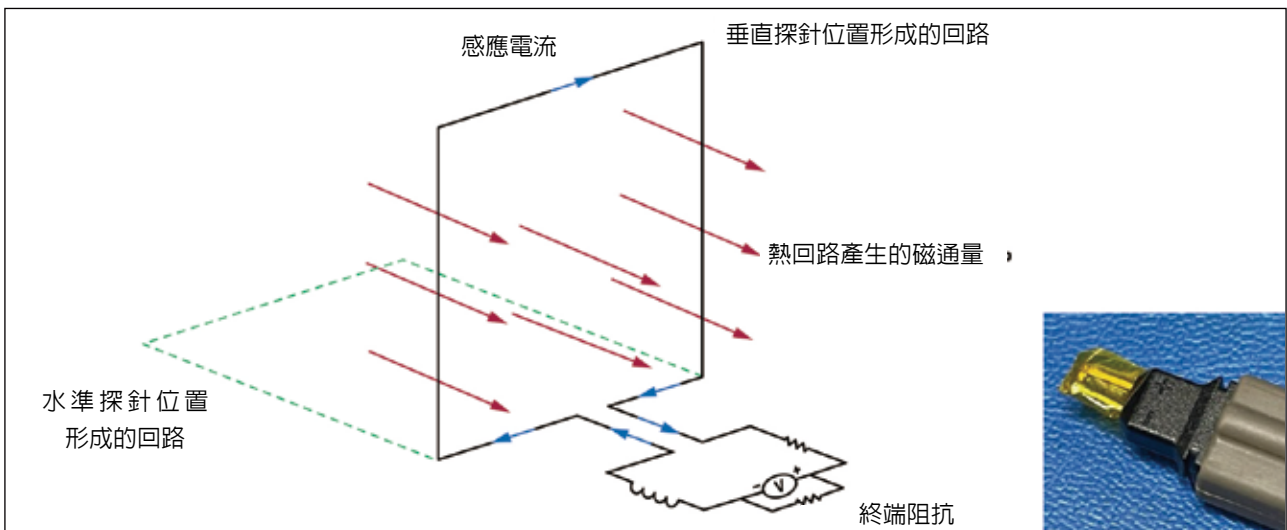
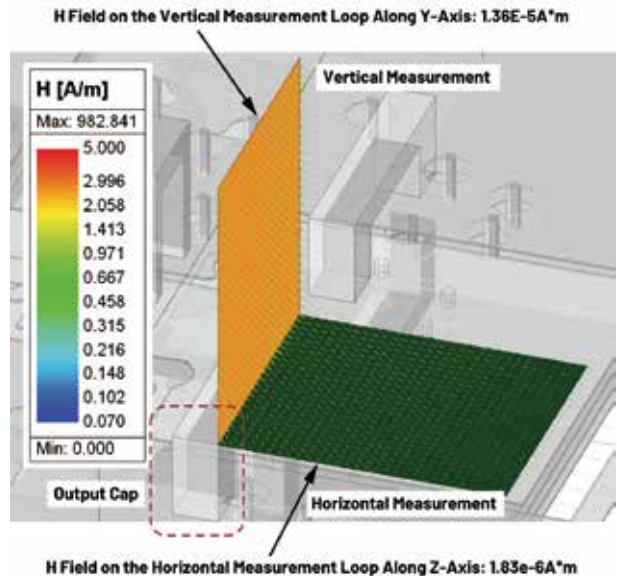


圖 8: 輸出電容周圍的詳細磁通分佈



是由於展示評估板上的厚銅鋪面對高頻磁通具有衰減作用，可以阻擋磁通穿透。因此，大部分磁通將沿展示板表面水平流動。

圖 9 更直覺地展示了垂直測量迴路為何能拾取更多由熱迴路產生的磁通。探棒的正極探棒、負極或接地探棒、探棒內部的回流路徑共同構成一個類似天線的迴路，可拾取開關穩壓器周圍的高頻磁通。

為進一步驗證此一原理，採用具有遮罩的同一款探棒測量輸出電壓 (VOUT) 漣波，如圖

10 所示。圖 10: 採用差分探棒的 VOUT 測量：(a) 無遮罩；(b) 具有銅箔遮罩

手動將銅箔環繞到差分探棒上形成遮罩層，探棒也將垂直於展示板。

結果顯示，相較於圖 11a 無遮罩測量，圖 11b 中採用遮罩探棒後，高頻雜訊顯著降低。除高頻雜訊外，兩幅圖中的開關頻率漣波基本一致。此外，基於圖 3 所分析，由於電感寄生電容

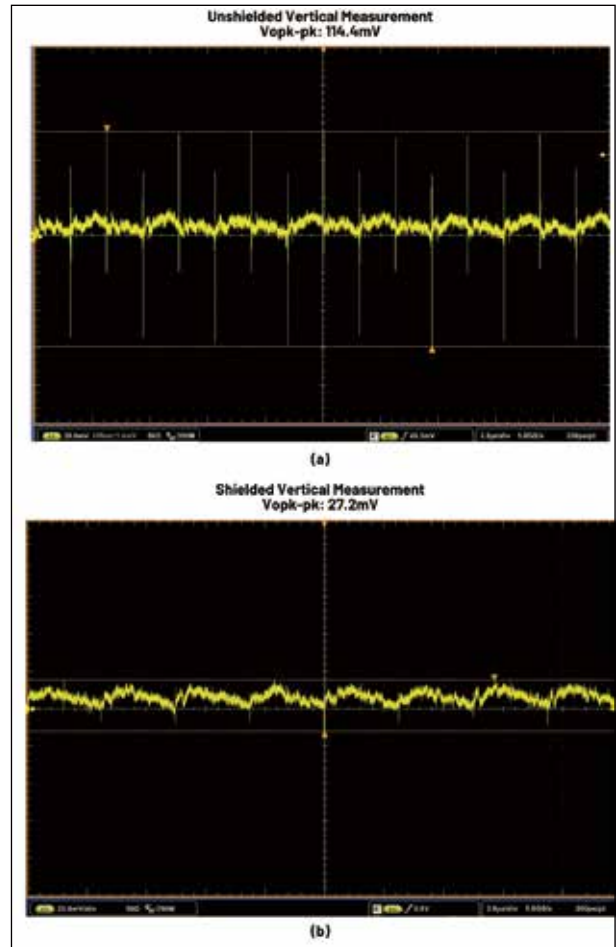
的影響，輸出電容兩端會存在高頻漣波，如圖 11b 中的波形所示。

結論

快速開關瞬態會在熱迴路中產生高 di/dt 。對於降壓轉換器的輸出電壓漣波，電感寄生電容所形成的導通路徑會在高 di/dt 作用下引入高頻雜訊。

但在實際的 VOUT 漣波測量中，往往會擷取到頻率更高的雜訊，且這類雜訊同樣與開關動作同步。這種額外漣波同樣是由熱迴路中高

圖 11: VOUT 測量結果：(a) 無遮罩時為 114.4mV；(b) 有遮罩時為 27.2mV。



di/dt 所產生的輻射雜訊。同時，高頻尖峰幅度會隨探棒在展示板上的位置而變化。Ansys 模擬結果顯示，垂直測量結構相較於水平測量結構，能夠拾取熱迴路產生的更多高頻磁通。

為進一步驗證此結論，採用具有遮罩探棒對輸出電壓漣波進行了測量。結果顯示，與無遮罩探棒相比，具有遮罩探棒測得的高頻雜訊顯著降低，證明探棒確實會拾取額外的高頻輻射雜訊。電路板上 COUT 兩端真實的 VOUT 漣波，小於探棒測量得到的 VOUT 漣波值。GTA