

## 交錯式反相電荷泵—第二部分：

# 實現和結果

■作者：Jon Kraft /ADI 資深現場應用工程師

Alexander Ilustrisimo/ADI 電源管理產品應用工程師

## 簡介

本系列文章的第一部分介紹了一種從正電源產生低雜訊負電壓軌的獨特方法，並說明了控制其運行的方程式推導過程。第二部分將藉由 ADI 新產品 ADP5600 深入探討這種交錯式反相電荷泵 (IICP) 的實際例子。我們將 ADP5600 的電壓漣波及電磁輻射干擾與標準反相電荷泵進行比較，以揭示交錯如何改善低雜訊性能。我們還將其應用於低雜訊相位陣列波束成型電路，並使用第一部分中的公式來優化該解決方案的性能。

## 全球首款商用交錯式反相電荷泵

如第一部分所述，積體電路中使用 IICP 來產生較小的負偏置軌。ADP5600 獨特地將低雜訊 IICP 與其他低雜訊特性和高階故障保護功能結合在一起。

ADP5600 是一款交錯式電荷泵逆變器，整合了低壓差 (LDO) 線性穩壓器。與傳統的基於電感或電容的解決方案相比，其獨特的電荷泵級具有更低的輸出電壓漣波和反射輸入電流雜訊。交錯作為一種低雜訊概念很巧妙，但交錯通道並不能解決所有雜訊問題。為了實現真正的低雜訊，需要一種專門設計的 IC 來實現 IICP 的低雜訊優勢，同時保持解決方案的小尺寸和高效率。

## 固定和可編程切換頻率

許多反相電荷泵的工作頻率為幾百 kHz。這種相對較低的頻率限值要求相對較大的電容，並限制了頻率雜散可以放置的位置。ADP5600 可以在 100

kHz 至 1.1 MHz 的切換頻率下工作，因而能在現代系統中高效使用。此外，該頻率始終是固定的，不隨輸出負載而變化。切換頻率變化 (展頻調變) 通常用於提高電荷泵效率，但在雜訊敏感的系統中可能會產生問題。

## 外部頻率同步

許多低雜訊系統需要將高幅度切換雜訊置於規定的頻段中，以使所產生的雜訊對系統的影響最小。考慮到這一點，在雜訊敏感系統中，轉換器的工作頻率是同步的，但在電荷泵逆變器中，同步很少見。相較之下，ADP5600 可以同步到高達 2.2 MHz 的外部時脈。

## 低壓差穩壓器

ADP5600 的輸入電壓範圍很寬，其電荷泵輸出電壓可能過高，無法為低壓電路供電。因此，ADP5600 內建了一個 LDO 後置穩壓器。它還有一個以正電壓為基準的電源正常訊號接腳，以便在 LDO 輸出處於穩壓狀態時輕鬆進行電源時序控制。

## 故障保護

最後，ADP5600 具有一套全面的故障保護特性，適合於穩健的應用。保護特性包括過載保護、短路飛跨電容保護、欠壓鎖定 (UVLO)、精密啟動和熱關斷。另一個新穎的特性是飛跨電容限流，它也能降低飛跨電容充電時的峰值電流尖峰。

## ADP5600 測試資料

第一部分從理論上證明了與非交錯解決方案相比，IICP 架構可明顯改善漣波。為簡潔起見，第一部分中說明的推導是理想化的，忽略了寄生效應、佈局依賴性 (IC 和 PCB)、时序失配 (即不完美的 50% 振盪器) 和 RDS 失配。這些因素導致與計算和測量的電壓漣波有些偏差。一如既往，最好將 ADP5600 投入使用，觀測其性能，並使用推導的方程式指導電路優化以獲得最佳性能。

此處使用標準 ADP5600 評估板，但插入了

RFLY，並修改了 CFLY 和 COUT 的值。此外，我們使用 ADP5600 的 SYNC 特性來改變切換頻率。圖 1 所示框圖表明，各電荷泵以該 SYNC 頻率的一半進行切換。也就是說， $f_{OSC} = \frac{1}{2} f_{SYNC}$ 。

圖 3 和圖 4 分別顯示了在相同條件下運行時，交錯式和非交錯式反相電荷泵的輸出電壓漣波。

在這些條件下，ADP5600 的輸入和輸出電壓漣波幾乎比傳統反相電荷泵低 14 倍。我們還能確定此電壓漣波是否與本系列第一部分中推導出的方程式一致。回顧第一部分，IICP 的輸出 (或輸入) 電

圖 1: ADP5600 交錯式反相電荷泵簡化框圖。

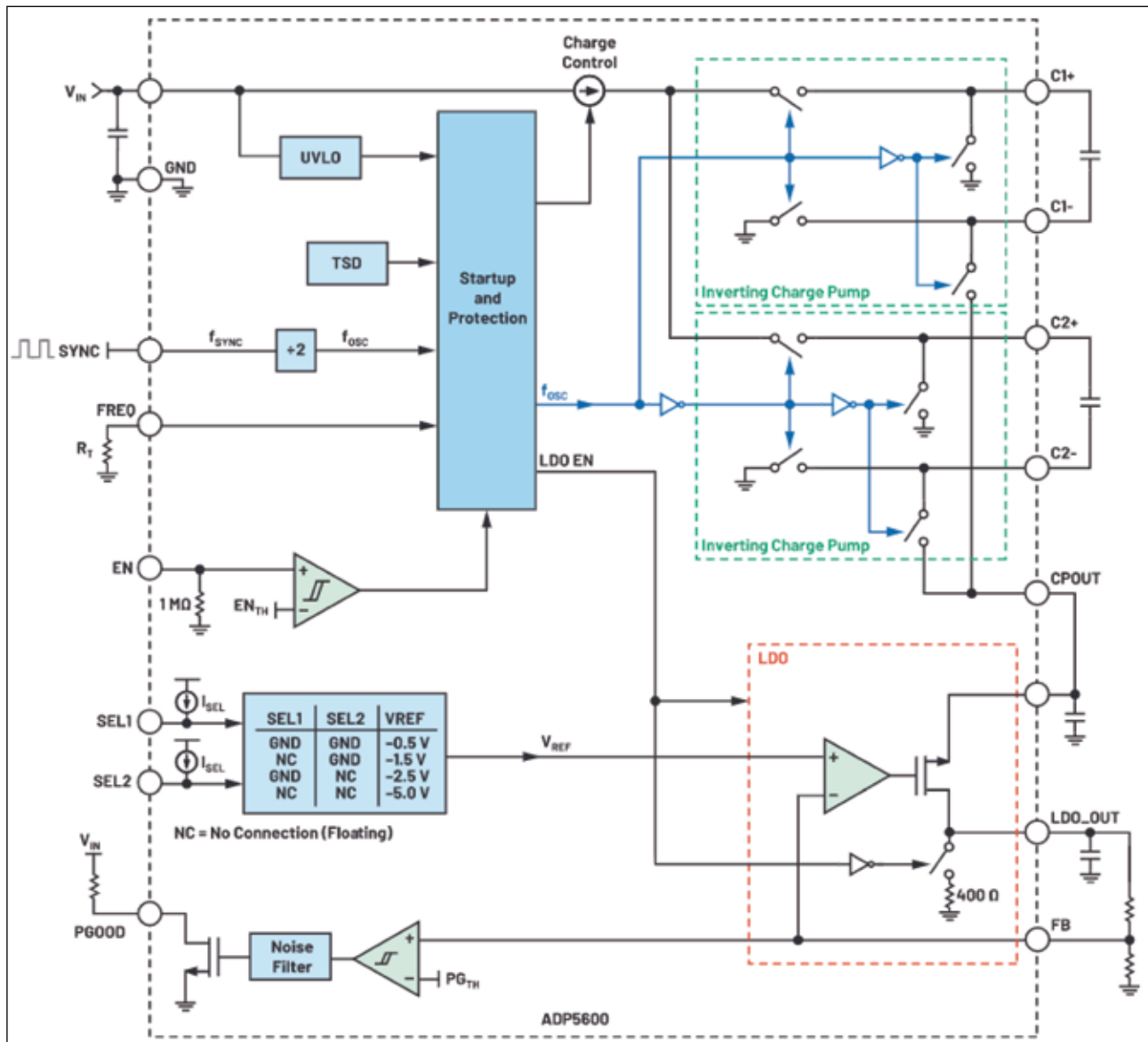
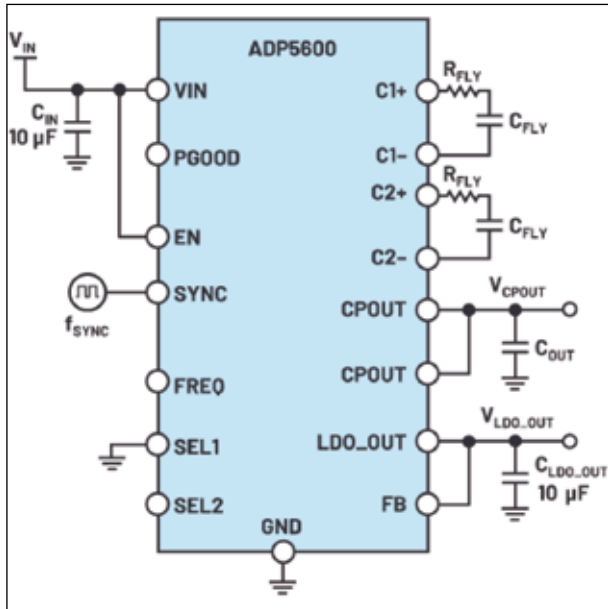


圖 2:ADP5600 交錯式反相電荷泵測試設定。



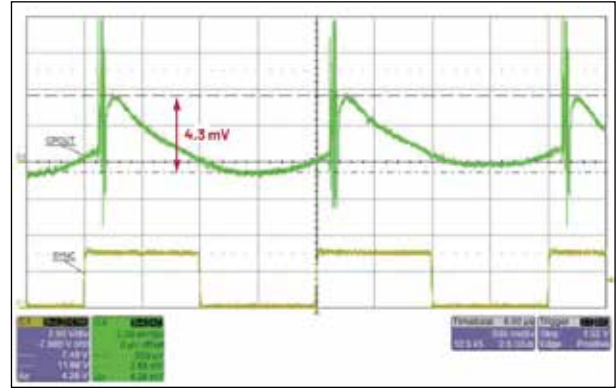
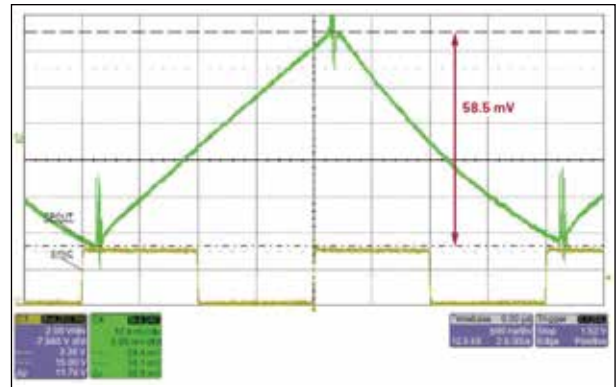
壓漣波由下式提供：

$$\Delta V_{OUT} = \frac{I_{LOAD}}{4 \times f_{OSC} \times C_{OUT}} - I_{LOAD} \times (R_{OUT} - 2 \times R_{ON}) \times \left( \frac{C_{FLY}}{C_{OUT}} \times \frac{\beta - 1}{\sqrt{\beta}} \right) \quad (1)$$

where  $\beta = e^{1/8RC}$  where  $f$  is  $f_{OSC}$ ,  $R$  is  $R_{ON}$ , and  $C$  is  $C_{FLY}$

使用式 1，並將實際值代入  $R_{OUT}$  和  $R_{ON}$ ，便可比較計算出的和測量到的輸出電壓漣波。表 1 提供了多種測試配置下的結果，並指出相對於非交錯式電荷泵方案的改善幅度。

表 1 顯示了交錯電壓漣波與式 1 的預測非常吻合。另外還顯示了其相對於標準的非交錯式反相電

圖 3:ADP5600 IICP 輸出電壓， $V_{IN}=6\text{ V}$ ， $C_{OUT}=C_{FLY}=2.2\text{ }\mu\text{F}$ ， $f_{OSC}=250\text{ kHz}$ ， $I_{LOAD}=50\text{ mA}$ 圖 4: 標準反相電荷泵輸出電， $V_{IN}=6\text{ V}$ ， $C_{OUT}=C_{FLY}=2.2\text{ }\mu\text{F}$ ， $f_{OSC}=250\text{ kHz}$ ， $I_{LOAD}=50\text{ mA}$ 

荷泵的改善幅度。此表中的某些設定還包括與  $C_{FLY}$  串聯的附加外部電阻  $R_{FLY}$ 。結果表示， $R_{FLY}$  進一步降低了電壓漣波，但要以電荷泵輸出電阻為代價。式 1 和本系列文章第一部分中的分析也對此進行了預測。

表 1. 不同使用案例下的  $V_{OUT}$  漣波： $V_{IN}=12\text{ V}$ ， $I_{LOAD}=50\text{ mA}$ ， $R_{ON}=2.35\text{ }\Omega^*$ 

| $f_{OSC}(\text{kHz})$ | $C_{OUT}(\mu\text{F})$ | $C_{FLY}(\mu\text{F})$ | $R_{FLY}(\Omega)$ | 實測 $V_{OUT}(\text{V})$ | 實測 $R_{OUT}(\Omega)$ | $V_{OUT}$ 漣波 (mV) |     | 相對於非交錯式的改善 |
|-----------------------|------------------------|------------------------|-------------------|------------------------|----------------------|-------------------|-----|------------|
|                       |                        |                        |                   |                        |                      | 實測                | 計算  |            |
| 250                   | 1.6                    | 1.6                    | 0                 | 11.48                  | 10                   | 5.3               | 6.0 | 12×        |
| 250                   | 1.8                    | 1.8                    | 25                | 8.86                   | 63                   | 3.4               | 3.2 | 18×        |
| 250                   | 4.6                    | 1.6                    | 0                 | 11.48                  | 10                   | 1.9               | 2.4 | 12×        |
| 500                   | 2.8                    | 1.6                    | 0                 | 11.45                  | 11                   | 2.5               | 2.9 | 7.5×       |
| 500                   | 1.5                    | 1.8                    | 25                | 8.74                   | 65                   | 3.1               | 2.7 | 10×        |
| 1000                  | 1.6                    | 1.6                    | 0                 | 11.40                  | 12                   | 4.3               | 4.2 | 3.7×       |
| 1000                  | 1.8                    | 1.8                    | 25                | 8.438                  | 71                   | 2.8               | 2.8 | 5.6×       |

\* 使用的是  $C_{OUT}$  和  $C_{FLY}$  的實際電容值 (電容在電壓下會降額)，而不是標稱值。

除輸出電壓連波外，

IICP 的電磁輻射騷擾與標準電荷泵相比也有所改善。為了衡量這一點，將一根 25 mm 天線放在評估板上(圖 5)，並測試了多種配置。圖 6 顯示了這樣一種配置與標準

圖 5: 採用 ADP5600 評估板的電磁輻射干擾測試設定



準的非交錯式電荷泵逆變器的比較。IICP 拓撲可將第一和第三切換諧波的雜訊降低 12 dB 至 15 dB。

## IICP 應用示例

資料轉換器、RF 放大器和 RF 切換需要低雜訊電源。這些系統中的電源設計面臨的主要挑戰是：

圖 7: ADAR1000 加上四個 ADTR1107 電源軌

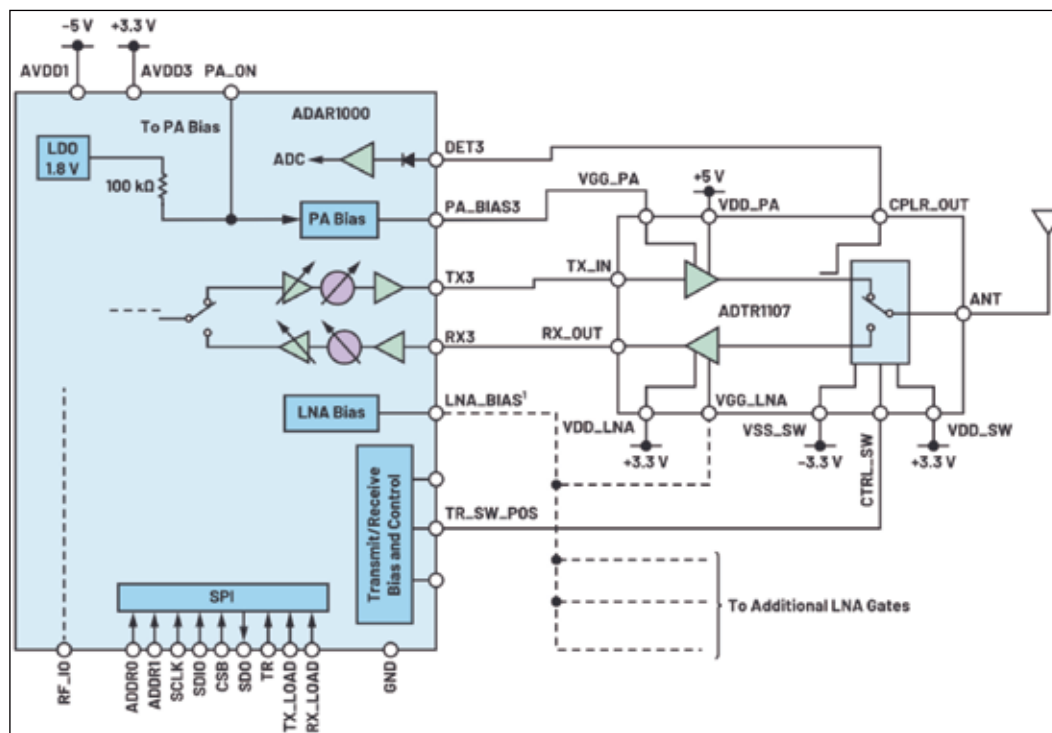
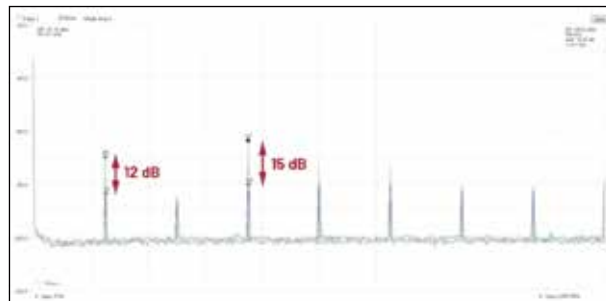


圖 6: 電磁輻射干擾， $V_{IN} = 12\text{ V}$ ， $I_{LOAD} = 50\text{ mA}$ ， $C_{FLY} = C_{OUT} = 2.2\text{ }\mu\text{F}$ ， $f_{SYNC} = 500\text{ kHz}$ 。綠色 = 標準，藍色 = IICP



- \* 功耗和高溫運行
- \* EMI 抗擾度和低 EMI 貢獻
- \* 輸入電壓範圍大
- \* 解決方案尺寸和面積應最小化

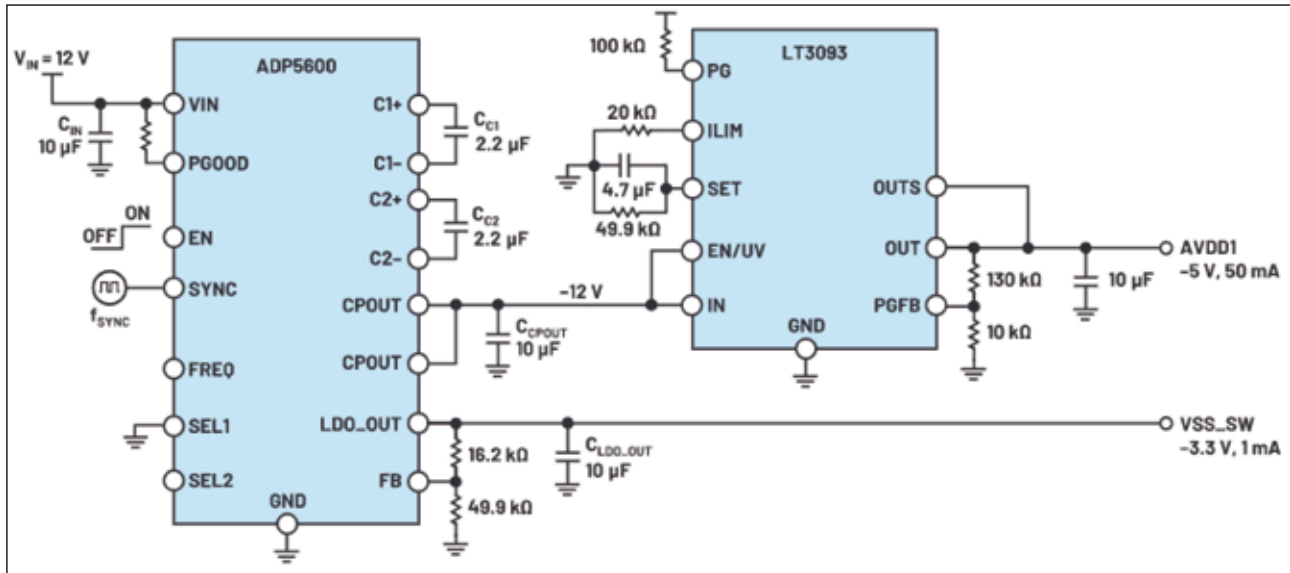
為了說明 IICP 的完整設計和優勢，我們考慮一個為 RF 放大器、RF 切換和相位陣列波束成型器供電的應用。該應用包含在 ADTR1107 產品手冊中，圖 7 複製自其中。此示例需要幾個大功率正電壓軌——在這裡是感性降壓轉換器的工作。另外還需要兩個負電壓軌：AVDD1 和 VSS\_SW。

ADAR1000 使用 AVDD1 為 VGG\_PA 和 LNA\_BIAS 產生低雜訊偏置軌。AVDD1 為 -5 V、50

mA，VSS\_SW 為 ADTR1107 中 RF 切換的 -3.3 V、<100  $\mu\text{A}$  電源軌。每個 ADAR1000 使用四個 ADTR1107，因此 -3.3 V 電源軌最大汲取 1 mA 電流。通常，這些系統的電源軌為 12 V。

ADP5600 是從 12 V 電壓產生 -5 V、50 mA 和 -3.3 V、1 mA 電源軌的理想選擇，

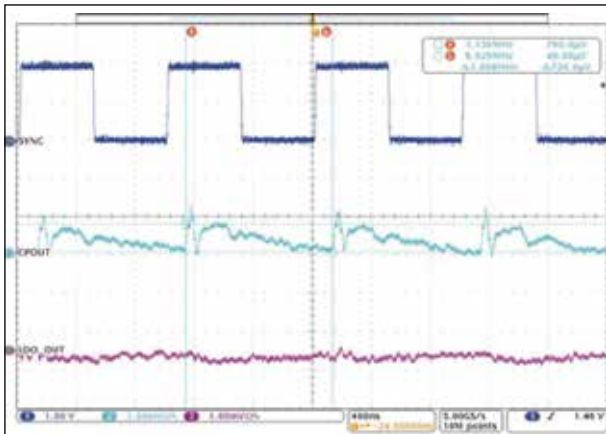
圖 8: ADP5600 和 LT3093 用於為 AVDD1 和 VSS\_SW 供電



因為它實現了低輸入和輸出電壓漣波以及低電磁輻射干擾。此外，它能同步寬廣範圍的切換頻率，因而允許將切換雜訊放在對系統影響最小的位置。圖 8 顯示了最終設計。

LT3093 是一款超低雜訊 LDO 線性穩壓器，該元件支援高電壓，允許將 ADP5600 電荷泵輸出 (CPOUT) 直接連接到其輸入。其  $-5\text{ V}$  輸出由 SET 接腳上的電阻設置，當 AVDD1 電源軌符合要求時，可編程的電源良好接腳可以通知其他系統。ADP5600 的 LDO 調節電流低得多的 VSS\_SW 軌。儘管沒有 LT3093 那麼低的雜訊或那麼高的電源抑

圖 9: 電荷泵輸出電壓漣波， $V_{IN} = 12\text{ V}$ ， $C_{OUT} = 10\text{ }\mu\text{F}$  (標準值)， $C_{FLY} = 2.2\text{ }\mu\text{F}$  (標準值)， $f_{SYNC} = 1\text{ MHz}$  ( $f_{OSC} = 500\text{ kHz}$ )， $I_{LOAD} = 50\text{ mA}$



制比 (PSRR)，但它能夠為 VSS\_SW 提供穩定的電源軌。所有三個軌 (電荷泵、AVDD1 和 VSS\_SW) 的輸出電壓漣波如圖 9 所示。

## 結論

本系列文章由兩部分組成，提出了一種從正電源產生低雜訊負電源軌的新方法。第一部分介紹了交錯式反相電荷泵操作背後的概念。第二部分將這些想法付諸實踐，利用 ADI 的新產品 ADP5600 建構並測試了一個完整解決方案，並使用第一部分中推導出的數學模型對該解決方案進行了優化。另外還將其傳導發射和電磁輻射干擾與標準反相電荷泵進行了比較。在某些情況下，與標準電荷泵逆變器相比，其改善幅度可高達 18 倍，這對於滿足現代精密和 RF 系統的低雜訊要求非常重要。

## 致謝

感謝 Sherlyn Dela Cruz、Roger Peppiette 和 Steve Knoth 的協助。CTA