

# 擴頻頻率調變可降低 EMI

■作者：Greg Zimmer/ADI 電池管理系統部行銷經理  
Kevin Scott/ADI 電源產品部產品行銷經理

電磁輻射 (EMR)、電磁干擾 (EMI) 和電磁相容性 (EMC) 是涉及來自帶電粒子的能量以及可能干擾電路性能和訊號傳輸的相關磁場的術語。隨著無線通訊的激增，通訊裝置不計其數，再加上越來越多的通訊方法 (包括蜂巢區、Wi-Fi、衛星、GPS 等) 使用的頻譜越來越多 (有些頻段相互重疊)，電磁干擾成了客觀存在的事實。為了減輕此影響，許多政府機構和監管組織對通訊裝置、設備和儀器可發射的輻射量設定了限制。這類規範的示例之一是 CISPR 16-1-3，它涉及無線電干擾和抗擾度測量設備和測量方法。

根據相關的特徵，電磁干擾可分為傳導干擾 (透過電源傳輸) 或輻射干擾 (通過空氣傳輸)。切換開關電源會產生兩種類型的干擾。ADI 為減少傳導干擾和輻射干擾實施的一項技術是擴頻頻率調變 (SSFM)。該技術用於我們一些基於電感和電容的切換開關電源、矽振盪器和 LED 驅動器，將雜訊擴展到更寬的頻段上，從而降低特定頻率下的峰值雜訊和平均值雜訊。

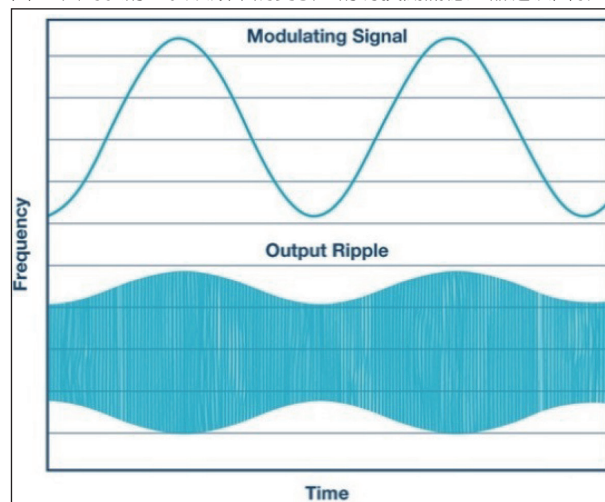
SSFM 不允許發射能量在任何接收器的頻段中停留過長時間，從而改善了 EMI。有效 SSFM 的關鍵決定因素是頻率擴展量和調變速率。對於切換開關穩壓器應用而言，典型擴展量為  $\pm 10\%$ ，最佳調變速率取決於調變方式。SSFM 可採用各種頻率擴展方法，例如使用正弦波或三角波調變時脈頻率。

## 調變方法

大多數切換開關穩壓器都會呈現與頻率相關的漣波：切換開關頻率越低則漣波越多，切換開關頻率越高則漣波越少。因此，如果對切換開關時脈進行頻率調變，則切換開關穩壓器的漣波將呈現幅度

調變。如果時脈的調變訊號是週期性的 (例如正弦波或三角波)，則將呈現週期性的漣波調變，而且在調變頻率上存在一個明顯的頻譜分量 (圖 1)。

圖 1：由時脈的正弦波頻率調變引起的切換開關穩壓器漣波圖解。

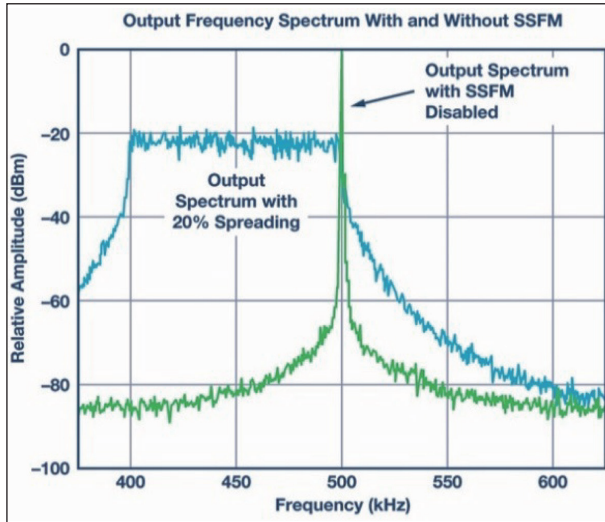


由於調變頻率遠低於切換開關穩壓器的時脈頻率，因此可能難以濾除。由於下游電路中的電源雜訊耦合或有限的電源抑制，這可能導致可聽音或明顯的偽像等問題。偽隨機頻率調變能夠消除這種週期性漣波。採用偽隨機頻率調變時，時脈以偽隨機方式從一個頻率轉換到另一個頻率。由於切換開關穩壓器的輸出漣波由類雜訊訊號進行幅度調變，因此輸出看似沒有進行調變，而且下游系統的影響可以忽略不計。

## 調變量

隨著 SSFM 頻率範圍的增加，頻內時間的百分比隨之減少。從下方圖 2 中可以看到，與單個未調變的窄頻訊號相比，調變頻率呈現為寬頻訊號而且峰值降低 20 dB。如果發射訊號不常進入接收器的

圖 2：擴頻調變在更寬的時脈頻段內產生更低的峰值能量。



頻段而且停留的時間很短（相對於其回應時間），那麼則可以顯著降低 EMI。例如，在降低 EMI 方面， $\pm 10\%$  的頻率調變比  $\pm 2\%$  的頻率調變有效得多。不過，切換開關穩壓器所能容許的頻率範圍是有限的。一般來說，大多數切換開關穩壓器都能輕鬆容忍  $\pm 10\%$  的頻率變化。

## 調變速率

與調變量類似，對於某個給定的接收器，隨著頻率調變速率的增加（跳頻速率），給定接收器的 EMI 處於頻內的時間將減少，因此 EMI 將降低。然而，切換開關穩壓器所能追蹤的頻率變化速率（ $df/dt$ ）具有一個限值。其解決方案則是找出那個不影響切換開關穩壓器輸出調節性能的最高調變速率。

## 測量 EMI

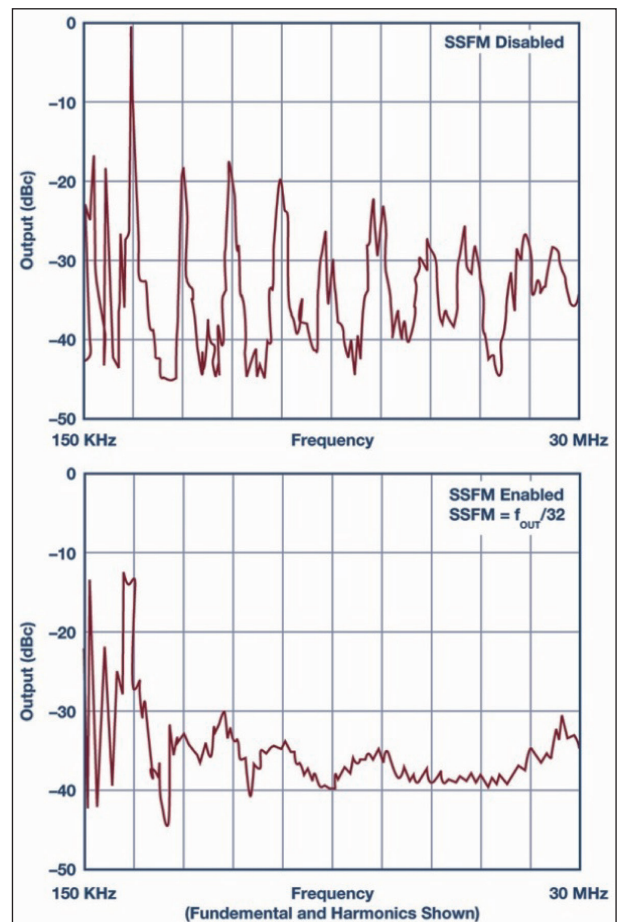
測量 EMI 的典型方法為峰值檢測、准峰值檢測或平均值檢測。對於這些測試而言，適當地設定測試設備的頻寬，以反映實際目標頻寬並確定 SSFM 的有效性。在進行頻率調變時，檢測器會隨著發射掃描整個檢測器的頻段而進行回應。當檢測器的頻寬相較於調變速率較小時，檢測器的有限回應時間會導致 EMI 測量值衰減。相反，檢測器的回應時間不會影響固定頻率發射，從而不會觀測到 EMI 衰

減。峰值檢測測試顯示通過 SSFM 得到的改善直接對應於衰減量。准峰值檢測測試還可以顯示進一步的 EMI 改善，因為它包括了工作週期的影響。具體而言，固定頻率發射產生 100% 的工作週期，而來自 SSFM 的工作週期隨發射在檢測器頻段內所占的時間量而減少。最後，平均值檢測測試能夠顯示最明顯的 EMI 改善，因為它使用低通過濾峰值檢測訊號，從而生成平均頻內能量。在固定頻率發射時，平均值和峰值能量相等，SSFM 則不同，它對峰值檢測能量和頻內時間量均進行衰減，從而產生更低的平均值檢測結果。許多監管測試便要求系統需通過准峰值和平均值兩種檢測測試。

## SSFM 和接收器頻寬

無論是否啓用 SSFM，在任何時刻，切換開關

圖 3：使用啓用 SSFM 和未啓用 SSFM 的 LTC6908 切換開關穩壓器的輸出頻譜（9 kHz 解析度頻寬）。



穩壓器的峰值發射可能看起來都是相同的。這怎麼可能？SSFM 的有效性部分取決於接收器的頻寬。要接收暫態的發射快照，需要無限頻寬。每個實際系統的頻寬都是有限的。如果時脈頻率的變化快於接收器的頻寬，將顯著降低接收干擾。

## 矽振盪器中的 SSFM

LTC6909、LTC6902 和 LTC6908 是具有擴頻調變的八相、四相和雙相輸出的多相矽振盪器。這些元件通常用於為切換開關電源提供時脈。多相操作有效地增加了系統的切換開關頻率 ( 因為相位表現為切換開關頻率的增加 )，並且擴頻調變使每個器件在一定頻率範圍內切換開關，從而在更寬的頻段上擴展傳導 EMI。LTC6908 具有 5 kHz 至 10 MHz 的頻率範圍，提供兩個輸出，並具有兩種可選版本：LTC6908-1 提供具有  $180^\circ$  相移的兩個輸出，而 LTC6908-2 提供具有  $90^\circ$  相移的兩個輸出。前者非常適合同步兩個單切換開關穩壓器，後者則非常適合同步兩個雙相雙切換開關穩壓器。四通道 LTC6902 具有 5 kHz 至 20 MHz 的頻率範圍，可編程用作等間距的雙相、三相或四相輸出。LTC6909 具有 12 kHz 至 6.67 MHz 的頻率範圍，最多可編程提供八相輸出。

為了解決上述週期性漣波問題，這些矽振盪器使用偽隨機頻率調變。利用該技術，切換開關穩壓器時脈以偽隨機方式從一個頻率轉換到另一個頻

率。頻率偏移率或跳頻速率越高，切換開關穩壓器在給定頻率下的工作時間越短，並且對於給定的接收器間隔，EMI 在頻內的時間將越短。

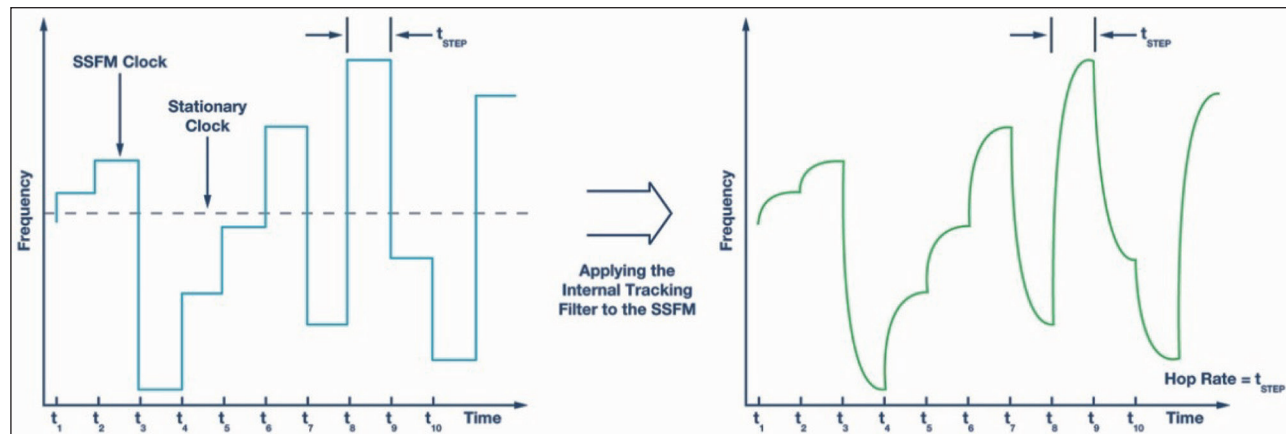
但是，跳頻速率有一個限制。如果頻率以超出切換開關穩壓器頻寬的速率跳變，則可能會在時脈頻率轉換邊緣發生輸出尖峰。較小的切換開關穩壓器頻寬會導致更明顯的尖峰。因此，LTC6908 和 LTC6909 包含一個專有的追蹤濾波器，可以實現從一個頻率到下一個頻率的平滑轉換 (LTC6902 採用一個 25 kHz 的內部低通濾波器)。內部濾波器追蹤跳頻速率，為所有頻率和調變速率提供最佳平滑性能。

對於許多邏輯系統來說，這種濾波調變訊號可能是可接受的，但必須仔細考慮逐週期的抖動問題。即便使用了追蹤濾波器，給定穩壓器的頻寬仍有可能不足以滿足高速率頻率調變的要求。為應對頻寬限制，LTC6908/LTC6909 的跳頻速率可以從預設速率 ( 即標稱頻率的  $1/16$  ) 降低到標稱頻率的  $1/32$  或  $1/64$ 。

## 電源中的 SSFM

切換開關穩壓器基於逐週期運行，以將功率傳輸到輸出。在大多數情況下，工作頻率要麼是固定的，要麼是基於輸出負載的常數。這種轉換方法在工作頻率 ( 基波 ) 和工作頻率的倍頻 ( 諧波 ) 下產生較大的雜訊分量。

圖 4：偽隨機調變說明了 LTC6908/LTC6909 內部跟蹤濾波器的影響。





### LTM4608A：具有 SSFM 的 8 A、2.7 V 至 5.5 V<sub>IN</sub> DC/DC $\mu$ Module 降壓型穩壓器

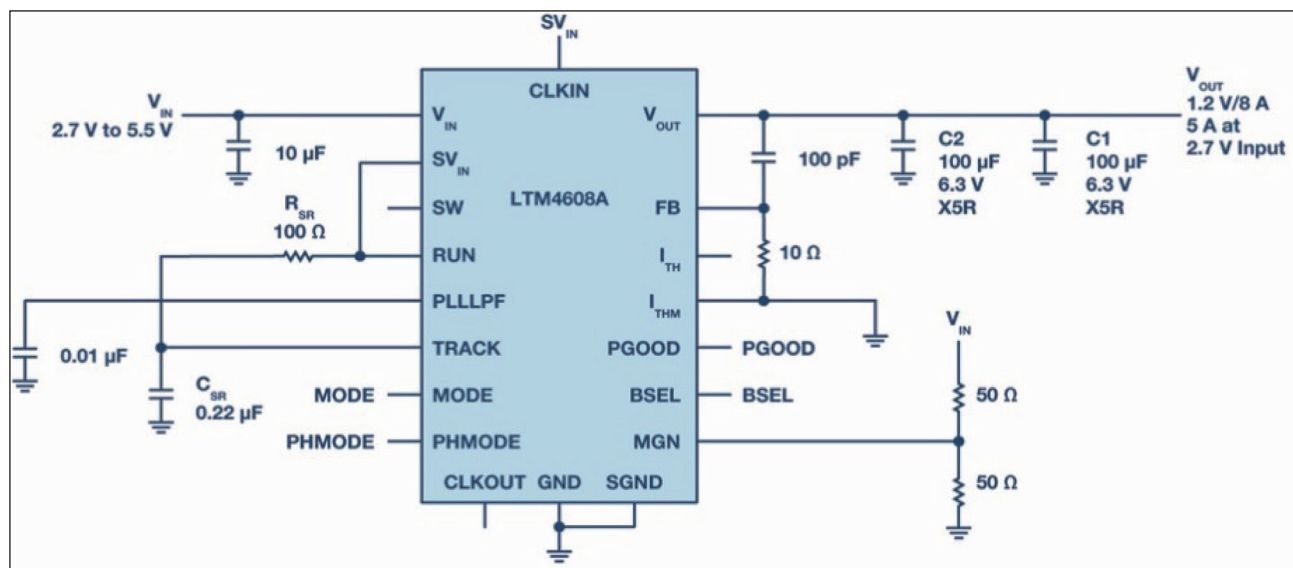
為了降低切換開關雜訊，可以將 LTM4608A 的 CLKIN 引腳連接到 SV<sub>IN</sub>（低功耗電路電源電壓引腳）以啓用擴頻功能。在擴頻模式下，LTM4608A 的內部振盪器設計用於產生時脈脈衝，其週期在逐週期的基礎上隨機的，但固定在標稱頻率的 70% 到 130% 之間。這有利於在一定頻率範圍內擴展切換開關雜訊，從而顯著降低峰值雜訊。如果 CLKIN 接地或由外部頻率同步訊號驅動，則禁用擴頻操作。圖 5 顯示了啓用擴頻操作的工作電路。必須在 PLL LPF 針腳上放置一個 0.01  $\mu$ F 的接地電容，以控制擴頻頻率變化的壓擺率。元件值由以下公式確定：

$$R_{SR} \geq 1 \div -(1n(1 - 0.592 \div V_{IN}) \times 500 \times C_{SR})$$

### LT8609：具有 SSFM 的 42 V 輸入、2 A 同步降壓型轉換器

LT8609 是一款微功率降壓型轉換器，可在高切換開關頻率下保持高效率（2 MHz 時為 93%），而允許使用更小的外部元件。SSFM 模式的運作類似於脈衝跳躍工作模式，其主要區別在於切換開關頻率由 3 kHz 三角波上下調變。調變範圍的低端透過切換開關頻率（由 RT 針腳上的電阻設定）來設定，

圖 5：啓用擴頻的 LTM4608A。



高端則設定為比 RT 設置的頻率高約 20%。要啓用擴頻模式，須將 SYNC 針腳連接到 INTV<sub>CC</sub> 或將其驅動到 3.2 V 和 5 V 之間的電壓。

### LTC3251/LTC3252：具有 SSFM 的電荷泵降壓型穩壓器

LTC3251/LTC3252 是 2.7 V 至 5.5 V、單路輸出 500 mA/ 雙路輸出 250 mA 的電荷泵降壓型穩壓器，可生成時脈脈衝，其週期在逐週期的基礎上隨機的，但固定在 1 MHz 到 1.6 MHz 之間。圖 6 和圖 7 顯示了與傳統降壓型轉換器相比，LTC3251 的擴頻特性顯著降低了峰值諧波雜訊，並幾乎消除了

圖 6：禁用 SSFM 的 LTC3251。

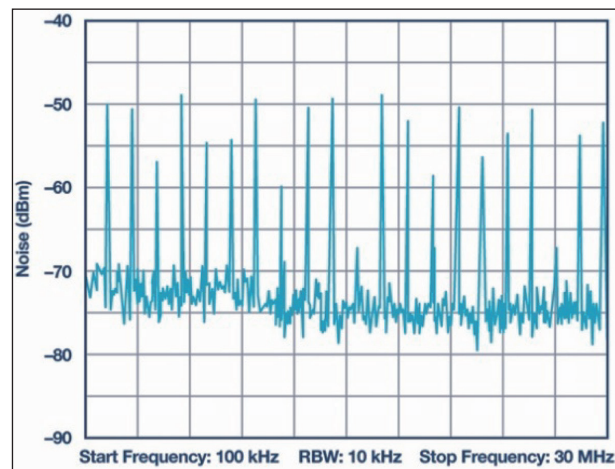
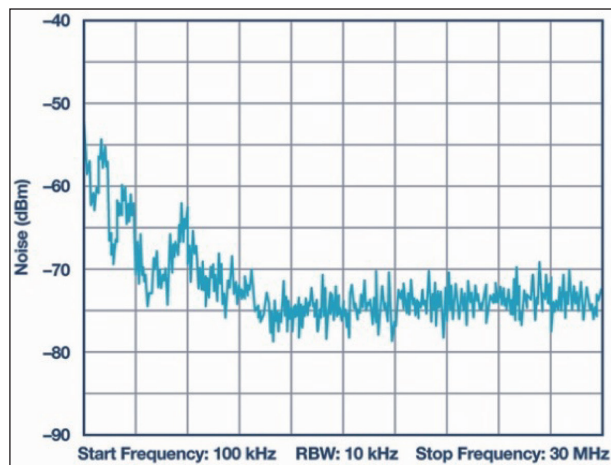


圖 7：啓用 SSFM 的 LTC3251。



諧波。LTC3251 提供可選的擴頻操作，而 LTC3252 則始終啓用擴頻。

## LED 驅動器中的 SSFM

### LT3795：具有 SSFM 的 110 V 多拓撲 LED 控制器

對於汽車和顯示幕照明應用的 EMI 問題而言，切換開關穩壓器 LED 驅動器也是個問題。為了提高 EMI 性能，LT3795 110 V 多拓撲 LED 驅動控制器整合了 SSFM。如果 RAMP 針腳上有一個電容，則會產生一個介於 1 V 和 2 V 之間的三角波。然後將該訊號饋入內部振盪器，在基頻的 70% 和基頻之間對切換開關頻率進行調變，基頻由時脈頻率設置電阻 RT 設定。調變頻率計算公式如下：

$$12 \mu\text{A} / (2 \times 1 \text{ V} \times C_{\text{RAMP}})$$

圖 8 和圖 9 顯示了傳統的升壓切換開關轉換器電路（將 RAMP 針腳連接到 GND）和啓用擴頻調變的升壓切換開關轉換器（RAMP 針腳上為 6.8 nF）之間的雜訊頻譜比較。圖 8 顯示了平均值傳導 EMI，圖 9 顯示了峰值傳導 EMI。EMI 測量的結果易受使用電容選擇的 RAMP 頻率的影響。1 kHz 是優化峰值測量的良好起點，但為了在特定系統中獲得整體 EMI 的最佳結果，可能需要對該值進行一些微調。

圖 8：LT3795 平均值傳導 EMI。

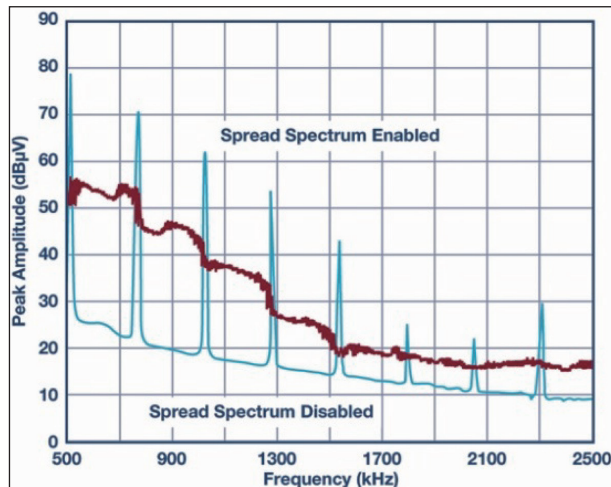
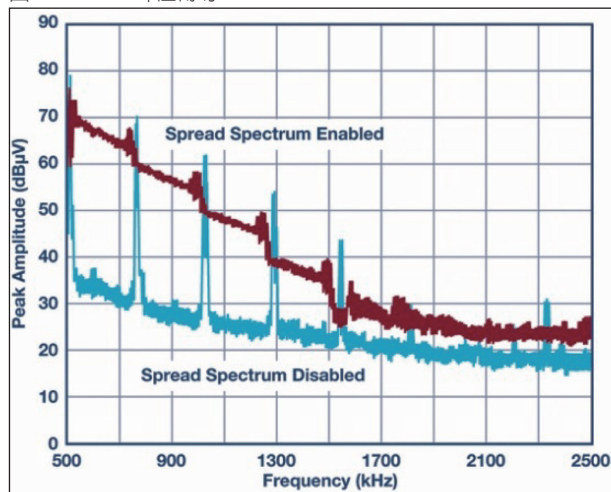


圖 9：LT3795 峰值傳導 EMI。

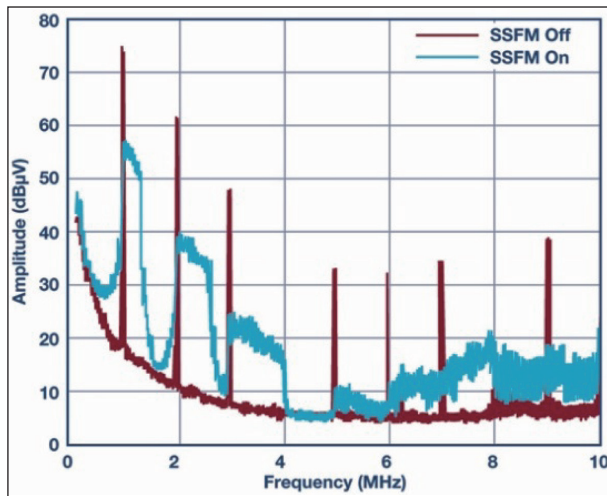


### LT3952：具有 SSFM 的多拓撲 42 V<sub>IN</sub>、60 V/4 A LED 驅動器

LT3952 是一款 60 V/4 A 電源切換開關式、恒流、恒壓、多拓撲 LED 驅動器，提供可選的 SSFM。振盪器頻率以偽隨機方式從標稱頻率 ( $f_{\text{sw}}$ ) 變化到高於標稱值的 31%，步長為 1%。這種單向調整使 LT3952 只需將標稱頻率編程至其上方一點就可以避免系統中的敏感頻段（例如 AM 無線電頻譜）。成比例的步長允許用戶輕鬆確定適用於指定的 EMI 測試倉大小的時脈頻率值 (RT 引腳)，並且偽隨機方法可以從頻率變化本身提供音調抑制。

偽隨機值的更新使用  $f_{\text{sw}}/32$  的速率，與振盪器頻率成正比。該速率允許整組頻率在標準 EMI 測試停留時間內多次通過。

圖 10: LT3952 平均值傳導 EMI。



ADI 同時也提供了許多其他產品，藉以有效利用設計技術來降低 EMI。如上所述，使用 SSFM 是

其中一種技術。其他方法還包括減緩快速內部時脈邊緣和內部濾波。採用我們的 Silent Switcher 技術實現了另一種創新方法，透過佈局有效降低 EMI。LT8640 是一款獨特的 42 V 輸入、微功率同步降壓型切換開關穩壓器，它將 Silent Switcher 技術和 SSFM 相結合以降低 EMI。因此，當您在設計中再次遇到 EMI 問題時，請務必查看我們的低 EMI 產品，以說明您更輕鬆地符合 EMI 標準。

#### 注：

- 對於微處理器和資料時脈，± 2% 的 SSFM 很常見，因為它們不能容忍較大的頻率變化。
- 完全偽隨機序列的重複速率保證小於 20 Hz。CTA

## ADI 與 Jungo 共同開發提升車輛安全性的座艙監測技術

Analog Devices, Inc.(ADI) 宣佈與 Jungo 合作，共同開發基於飛時測距 (ToF) 和 2D 紅外線 (IR) 技術的攝影機解決方案，以實現車內駕駛員及座艙監測。結合 ADI 的 ToF 技術和 Jungo 的 CoDriver 軟體將可透過觀察頭部、身體位置以及眼睛注視情況來監測車內人員的睡意和注意力分散程度。該解決方案並可望實現基於臉部、身體和手勢的智慧互動，提供每位車內人員的人臉識別功能，實現個性化資訊娛樂及服務，以及共乘支付等功能。

ADI 汽車連接暨感測產品總監 Vlad Bulavsky 表示：「ADI 與 Jungo 的合作，為目前手勢控制之外的創新擴增實境應用開啓了大門。我們相信此次合作可將座艙監測和基於 ToF 的駕駛員和乘客監測提升到一個新的層次，進而提高行車安全性。」

3D ToF 為一項無掃描 LIDAR(光檢測和測距) 技術，藉由發射奈秒級高功率光脈衝來捕捉相關場景的深度資訊(通常是短距內)。ADI 提供可直接提升 3D ToF 系統功能的產品和解決方案，包括處理、雷射驅動器、電源管理以及開發板和軟體 / 元件，進而快速實現 3D ToF 解決方案。

Jungo 的 CoDriver 軟體運用先進的深度學習、機器學習和電腦視覺演算法，透過面向駕駛員的攝影機即時偵測駕駛員狀態。該軟體並支援車內全面偵測技術，例如乘客人數統計、安全帶使用情況偵測、危急醫療偵測或觀察等功能。

Jungo Ltd. 執行長 Ophir Herbst 表示：「OEM 廠商已運用 Jungo 的 CoDriver 監測演算法來保障駕駛員和乘客的安全，並開發監測車內乘客狀態的創新用例。透過我們的演算法和 ADI 領先的 ToF 技術使車輛更智慧，協助 OEM 滿足法規要求，並於下一代車輛中實現創新。」