

零漂移放大器： 現可輕鬆用於高精密電路中

作者：Vicky Wong 和 Yoshinori Kusuda/
ADI 公司

顧名思義，零漂移放大器是指偏移電壓漂移非常接近於 0 的放大器。它使用自穩零或截波技術(或兼而有之)，並隨時間和溫度連續自校正直流誤差。這使得放大器能夠實現 μV 級偏移和極低的偏移漂移。因此，它尤為適用於高增益和高精密性能的信號調節電路中。例如，感測器(比如溫度、壓力或稱重感測器)一般產生低位準輸出電壓，因此需要一個放大器來放大信號，同時不應引入更多誤差。零漂移放大器針對超低偏移電壓和漂移、高共模抑制、高電源抑制以及更低的 $1/f$ 雜訊而設計，是在高要求系統應用中(比如檢測應用)實現高解析度的理想選擇，具有較長的产品生命週期。

零漂移放大器的基本架構

圖 1 顯示了基本截波放大器(單位增益配置)的電路圖。直流增益路徑包括輸入截波開關網路

(CHOP_{IN})、第一跨導放大器(G_{m1})、輸出截波開關網路(CHOP_{OUT})、第二跨導放大器(G_{m2})和頻率補償電容(C_1 和 C_2)。CHOP 和 CHOP' 透過時脈產生器和函數控制，可校正不希望出現的放大器直流偏移電壓(V_{OS})。

圖 1 顯示了相關時序圖以及預期輸出電壓(V_{OUT})。當 CHOP 時脈信號為高位準(A 階段)，放大器 G_{m1} 的差動輸入和輸出連接至信號路徑，並且無反轉。由於存在 V_{OS} ，因此產生正輸出電壓 V_{OUT} 。當 CHOP' 時脈信號為高位準(B 階段)， G_{m1} 的輸入和輸出連接信號路徑且反轉，並由於 V_{OS} 而產生負輸出電壓。來自 G_{m1} 的正負輸出電壓使輸出電壓等於 $\pm V_{\text{OS}}$ 。時域中的這種截波概念類似於頻域中的調變。換言之， G_{m1} 偏移電壓由 CHOP_{OUT} 向上調變到截波頻率。另一方面，輸入信號經由 CHOP_{IN} 和 CHOP_{OUT} 截波兩次。這與向上調

圖 1：截波架構

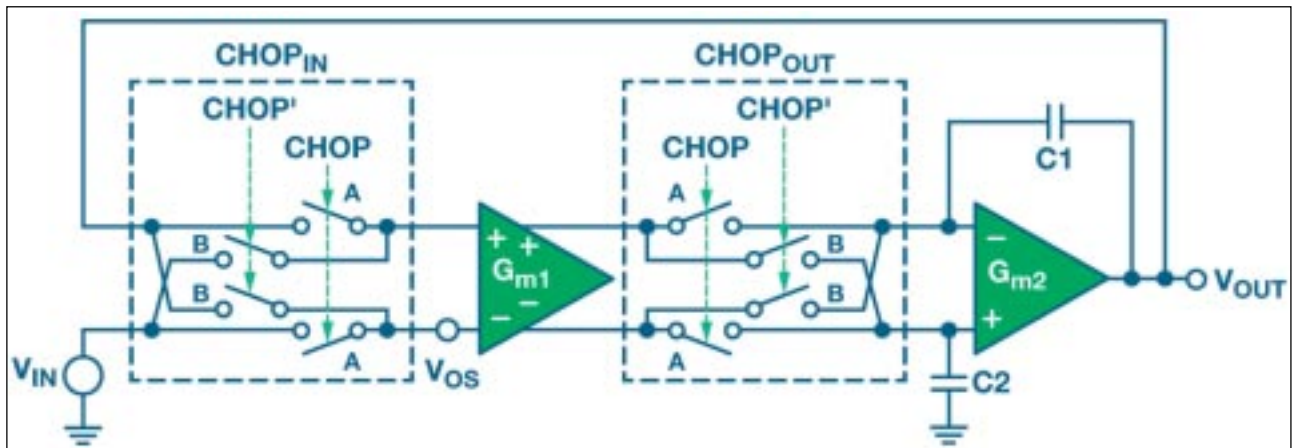
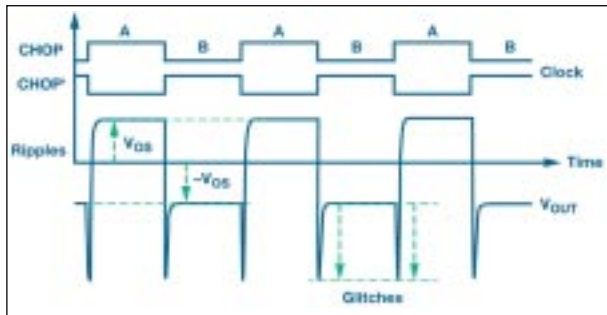


圖 2：截波時序圖



變然後向下調變到原始頻率的輸入信號相等。因此，進入輸出端的輸入信號不發生反轉。

正負輸出電壓(來自 $Gm1$ 的 $\pm V_{os}$)以電壓漣波的形式出現在 V_{out} (圖 2)。此外，CHOP 和 CHOP' 時脈透過開關相關的寄生電容耦合至差動輸入引腳。時脈改變狀態後，電荷注入差動輸入引腳。這些注入的電荷經由有限輸入源阻抗轉換為輸出電壓突波。突波的幅度和形狀取決於輸入源阻抗以及差動輸入引腳上注入電荷的數量和匹配程度。這些輸出漣波和突波會產生開關假像，並在雜訊頻譜中的截波頻率及其整數倍數頻率處出現增長。此外，每個零漂移放大器的開關假像幅度和頻率各有不同，並且各元件之間也有所不同。本文中，術語 " 截波 " 和 " 開關頻率 " 可以互換使用。

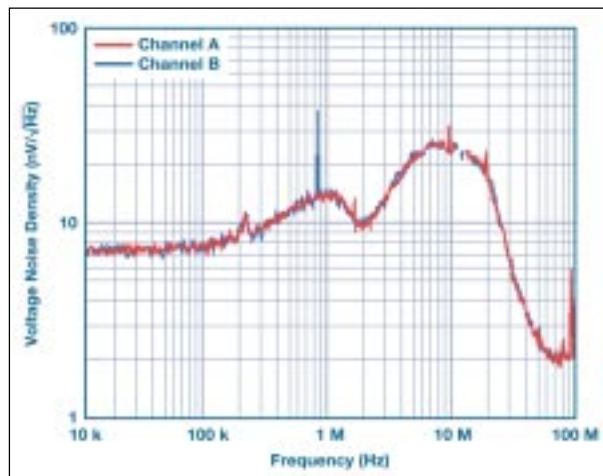
資料手冊中的開關假像

一般而言，零漂移放大器具有較大的寬頻雜訊和較低的開關頻率，範圍從幾千赫茲到幾十 k 赫茲。這限制了它們只能用於直流和低於 100 Hz 的應用，以使開關頻率保持在目標信號頻寬外。對於要求在更高頻寬下具有高精度和低漂移的應用，使用開關頻率較高的零漂移放大器很重要。事實上，開關頻率有時候可以看成零漂移放大器的品質因數。較新的零漂移放大器採用高階設計架構，針對在高很多的頻率下具有較小開關假像而設計。例如，除了在 4.8 MHz 處對偏移電壓進行截波，高電壓、雙通道、零漂移放大器 ADA4522-2 還採用專利的偏移和漣波校正迴路，最大程度減少開關假像。校正迴路工作頻率為 800 kHz，用於消除偏移

電壓 $\pm V_{os}$ (如圖 2 所示)。將 $\pm V_{os}$ 下降至其初始值的 1% 能改善 40 dB 開關假像。這樣可以減少系統設計人員實現系統級準確度目標的工作量。

檢測開關假像最簡單的方法是觀察放大器的電壓雜訊密度頻譜。圖 3 顯示了 ADA4522-2 折合到輸入的電壓雜訊密度圖。注意，通道 B 在其 800 kHz 開關頻率處表現出了雜訊頻譜的增加。正如前文所述，這種雜訊頻譜的增加是電荷注入不匹配產生的副作用。由於不匹配取決於元件對元件以及通道對通道，因此雜訊尖峰的幅度也有所不同，且並非所有元件都會表現出雜訊尖峰。例如，同一個元件的通道 A 在 800 kHz 開關頻率處並未表現出任何雜訊尖峰。各元件之間的開關頻率還可有 10% 到 20% 的差異，具體取決於內建時脈振盪器頻率的變化。

圖 3：ADA4522-2 電壓雜訊密度



不同零漂移放大器之間的雜訊對比

圖 4 顯示了三個不同高電壓、零漂移放大器折合到輸入的電壓雜訊密度。注意，測試的全部三個零漂移放大器都表現出了一定程度的開關假像。某些開關假像還在其整數倍頻率處重複。這些開關假像可能非常大，並有可能在電路設計中引入誤差。因此，瞭解它們對電路的影響，然後找到減輕影響的方法很重要。如果放大器具有高於開關頻率的閉環頻率，那麼這種雜訊頻譜的增加將會積分至整個頻寬中，並反映在輸出端。不僅如此，折合到輸入

圖 4：不同零漂移放大器的電壓雜訊密度

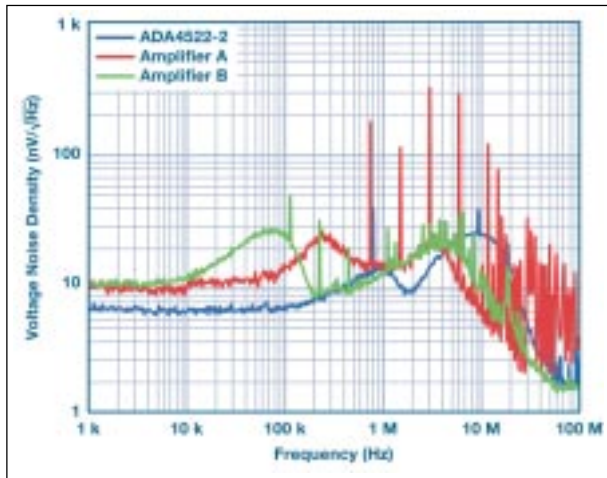
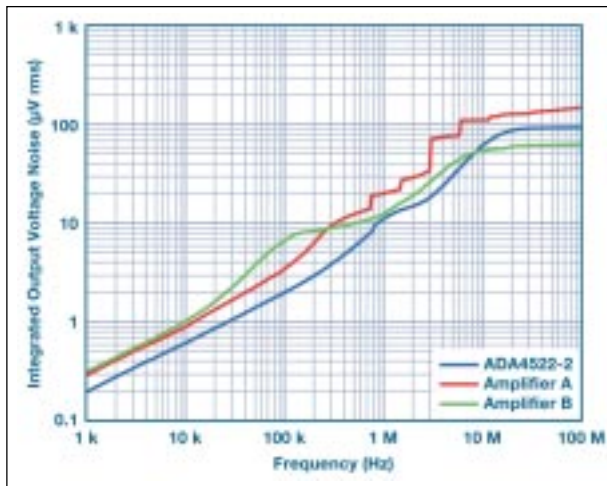


圖 5：積分輸出電壓雜訊



的電壓雜訊還會被放大器雜訊增益放大。例如，假定放大器配置為增益 100，那麼折合到輸出的有效雜訊電壓密度同樣會增加 100 倍。

積分至放大器輸出端的總 RMS 雜訊取決於放大器頻寬。輸出電壓雜訊隨可用頻寬而滾降；因此，增益越高或頻寬越寬，則輸出放大器雜訊的幅度也就越大。圖 5 顯示了積分輸出電壓雜訊與頻率的關係。這張圖對於理解相對頻率的總積分雜訊很有用。例如，如果放大器的頻寬透過濾波而限制在 100 kHz，那麼放大器的固有電壓雜訊引起的總輸出雜訊可由該圖得知，如表 1 所示。

使用通用乘法係數（稱為波峰因數）將 RMS 電壓轉換為峰峰值電壓，則峰峰值雜訊預計值如表 1 第三列所示。在一個 5V 系統中，ADA4522-2 提供

表 1：輸出積分雜訊

放大器	輸出雜訊 ($\mu\text{V rms}$)	峰峰值輸出雜訊 ($\mu\text{V p-p}$)
ADA4522-2	1.91	12.61
放大器 A	3.33	21.98
放大器 B	6.40	42.24

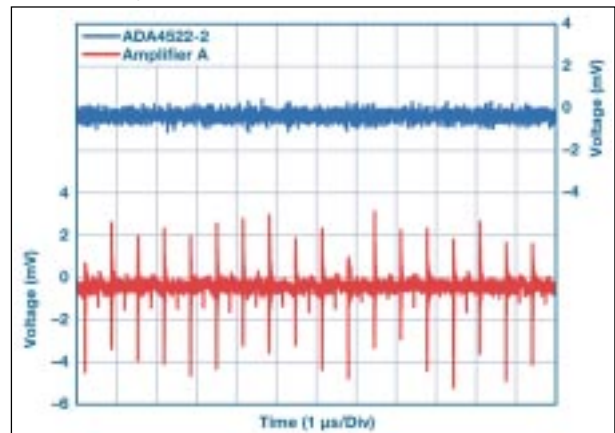
18.6 位元峰峰值解析度，而放大器 B 提供 16.8 位元峰峰值解析度。較低的總積分輸出雜訊總是有必要的，因為它增加了信雜比，並為整個系統帶來了更高的解析度。

圖 5 中需注意的另一個有意思的地方是積分雜訊在雜訊尖峰頻率處以階躍類函數的方式遞增。雜訊尖峰（雜訊能量增加）雖然很窄，但卻會大幅增加總輸出積分雜訊。

時域中的開關偽像

很多時候，在頻域的電壓雜訊密度頻譜中可以清楚地看到開關偽像。為了理解基於時間的開關偽像特性，可以將放大器配置為緩衝器，將其同相引腳接地，並透過示波器直接觀察輸出。圖 6 顯示了兩個零漂移放大器的典型輸出。注意，放大器 A 在多個幅度中表現出了輸出電壓尖峰。尖峰每隔 0.66 μs 就重複一次。這與圖 4 中 1.51 MHz 處看到的雜訊尖峰匹配。另一方面，ADA4522-2 在時域中未表現出任何開關偽像（藍色圖形）。換言之，雜訊尖峰低於測量系統的雜訊基準，無法測出。這

圖 6：時域中的輸出電壓雜訊



樣，設計人員可以在驅動 ADC 的應用中使用 ADA4522-2，並十分自信地知道雜訊尖峰不會有任何問題。

減少開關偽像的濾波器

有多種方法可以減少開關偽像的影響。這些方法最終都有賴於限制放大器頻寬，使其低於開關頻率。使用濾波器是抑制雜訊尖峰的有效方式。最簡單的設計是在放大器輸出端放置一個電阻 - 電容網路，形成低通濾波器(圖 7A)。圖 8 顯示了零漂移放大器的電壓雜訊密度，後置濾波器設計為低於開關頻率 10% 或 20%。800 kHz 時的雜訊尖峰從 36 nV/Hz(無後置濾波器)下降到 4.1 nV/Hz(後置濾波器為 80 kHz)，低於放大器的低頻寬頻雜訊水準。由於後置濾波器位於開關頻率以下 20% 頻率處(後置濾波器為 8 kHz)，雜訊尖峰不再可見，而 ADA4522-2 與其他任何傳統放大器都別無二致。

某些應用可能無法在放大器輸出端使用 RC 網路。放大器輸出電流流過濾波器電阻，導致電壓偏

圖 7：帶濾波器的零漂移放大器

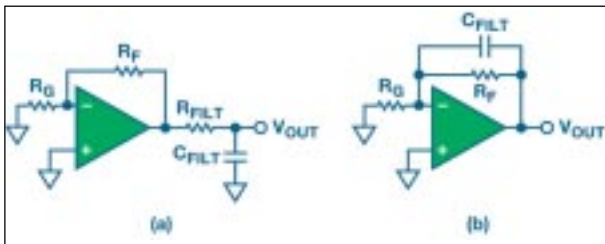


圖 8：具有後置濾波器的單位增益零漂移放大器電壓雜訊密度

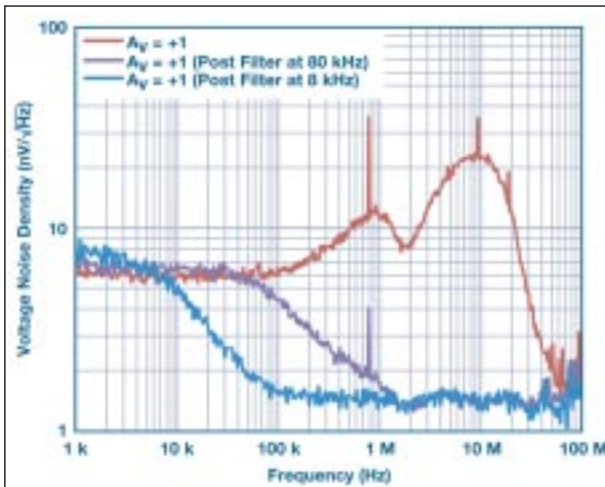
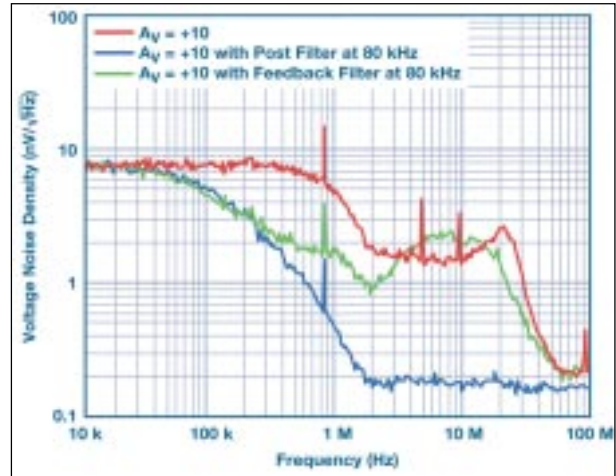


圖 9：開關偽像隨濾波而減少

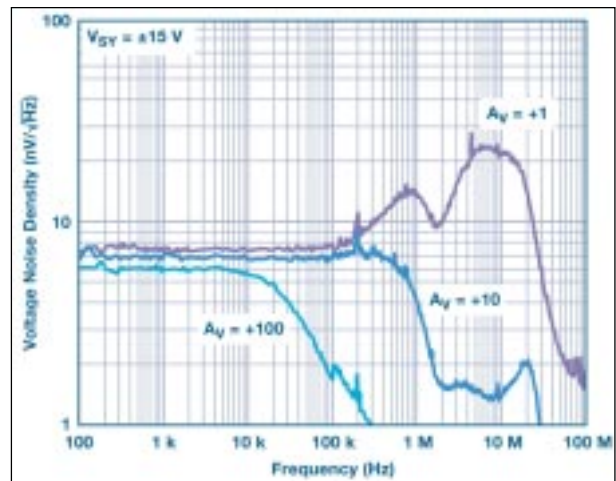


移，引起輸出誤差。這種情況下，可以選擇在回授迴路兩端放置一個回授電容來過濾雜訊尖峰(圖 7 (b))。圖 9 顯示的是放大器配置為增益 10 時，無濾波以及在開關頻率下方 10% 處有後置濾波器或回授濾波器情況下的輸出電壓雜訊密度。後置濾波器配置作為低通濾波器而言，比回授電容更為有效。

在高增益配置下使用零漂移放大器會有所幫助

很多設計人員都會使用零漂移放大器，但並未在系統中觀察到任何開關偽像。放大器配置可能是其中一個原因。零漂移放大器具有低漂移和偏移特性，常用來在高增益(比如 100 到 1000 的增益)配

圖 10：放大器頻寬隨增益滾降



置中對低位準幅度感測器信號執行信號調節。在高增益配置下使用放大器的效果與在放大器端放置一個低通濾波器的效果是一樣的。隨著增益的增加，頻寬會下降。圖 10 顯示了高增益配置如何降低開關效應。當閉環增益為 100 時，開關偽像在雜訊曲線上幾乎不可見。

ADA4522-2 用作零漂移放大器的優勢

ADI 最新的零漂移運算放大器 ADA4522-2 採用專利和創新的電路拓撲，可實現高開關頻率，並且相比之前的產品能最大程度減少開關偽像。當單位增益頻寬為 3 MHz 且開關頻率為 800 kHz 和 4.8 MHz 時，40 的增益配置便足夠過濾開關偽像，無需外部低通濾波。該元件具有低偏移電壓漂移(22 nV/°C 最大值)、低雜訊(5.8 nV/Hz，增益配置為 100)、低輸入偏置電流(150 pA 最大值)、高共模抑制和電源抑制性能，是電子秤、電流檢測、溫度感測器前端、稱重感測器和橋式感測器等精密應用以及其他大量漂移關鍵型應用的理想選擇。

結論

零漂移放大器具有極低的偏移電壓和漂移，是要求針對低位準信號進行高準確度放大應用的理想選擇。下文提供一些使用建議。

所有零漂移放大器都存在一定程度的開關偽像，這通常在電壓雜訊密度曲線中可以檢測到。

不同元件的開關偽像幅度也有所不同。

元件之間開關頻率的最高差異可達 20%。

開關偽像可在頻域和時域中檢測到。取決於具體應用，開關偽像可能導致誤差。

零漂移放大器通常用於高增益配置中；此時頻寬下降，因而很多情況下開關偽像不會導致任何問題。

減少開關偽像，從而降低輸出誤差量很重要。使用一個低通濾波器(RC 後置濾波器或回饋電容)以便在開關頻率之前滾降放大器頻寬便可抑制偽像。

高開關頻率可降低濾波器對於較寬、可用、且無偽像頻寬的要求。

作者介紹



Vicky Wong [vicky.wong@analog.com] 是 ADI 公司應用工程師，於 2008 年加入 ADI，負責精密放大器和參考電壓源產品。她擁有伊利諾大學香檳分校電氣工程學士和碩士學位。



Yoshinori Kusuda [yoshinori.kusuda@analog.com] 是線性和精密技術部門的 IC 設計工程師，工作地點在加利福尼亞聖約瑟市。他主要負責精密 CMOS 放大器和開關電容設計，分別於 2002 年和 2004 年獲得東京工業大學的電子工程學士和碩士學位。 