

被動匹配高速 ADC 類比輸入前端的藝術

Rob Reeder

Application Engineer
High-Speed Converter Group

Luke Allen

Application Engineer
High-Speed Converter Group

簡介

了解高速類比轉數位轉換器 (ADC) 前端設計所涉及的機制，有時像是一門獨有的藝術。設計任何高速類比接收器前端時，都不建議只是安裝一個平衡不平衡轉換器，然後從平衡不平衡轉換器的二次輸出拉兩條走線到 ADC 的輸入。眾所周知，就頻寬而言，平衡不平衡轉換器對寄生敏感，並且具有其他干擾。在本文中，我們將說明如何使用平衡不平衡轉換器，充分發揮被動式類比輸入設計的功效。如此可帶來的另一項優勢是不需要昂貴的平衡不平衡轉換器或昂貴的衰減墊，就能達到您想要的頻寬。

選擇適當平衡不平衡轉換器或變壓器的藝術

讓我們先從假定不需要 DC 耦合開始；也就是對 DC 頻率間隔取樣。由於平衡不平衡轉換器不需要額外的電源供應

器，因此使用平衡不平衡轉換器的優點包括降低整體功耗，以及縮減電路板空間需求。此外，由於無需因應額外的電源供應器，平衡不平衡轉換器就不會對連接至 ADC 本身的整體射頻 (RF) 訊號鏈增加雜訊，這代表訊號雜訊比 (SNR) 或雜訊頻譜密度不會劣化。

圖 1 顯示在相同應用中，使用兩種不同平衡不平衡轉換器搭配 TI 的 16 位元、雙通道 **ADC3669** ADC 的情況。即使這兩種平衡不平衡轉換器的額定頻寬相同，其最終反應也會不同，這是因為 ADC 內部取樣網路的不同 ADC 輸入阻抗組合，以及印刷電路板 (PCB) 走線寄生本身使然。請注意，如果兩個平衡不平衡轉換器均未採用「匹配」，則頻寬會非常快速地下降 [1]。

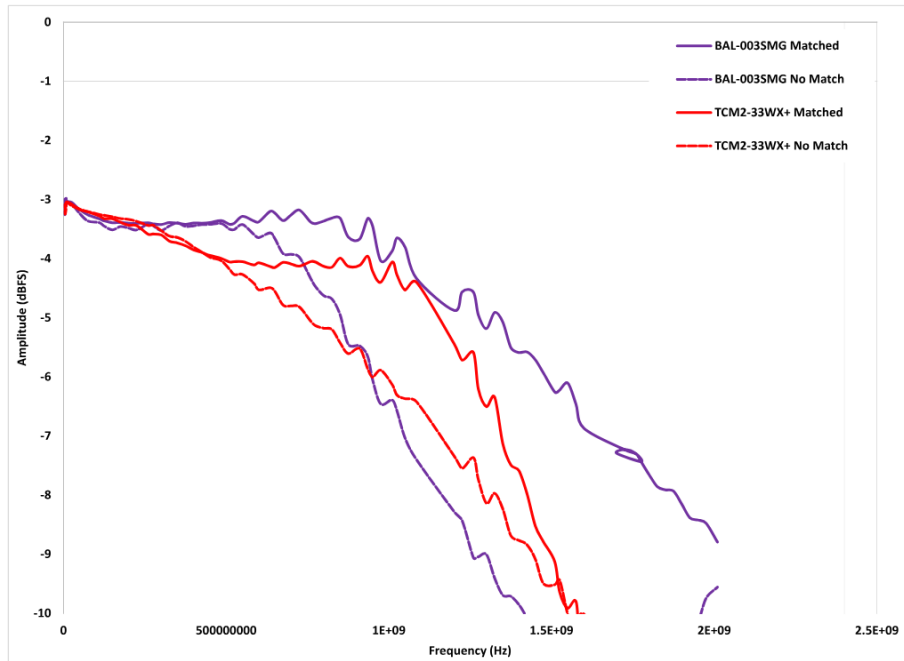


圖 1. ADC3669 和平衡不平衡轉換器頻寬比較：匹配 (實線) 相對於未匹配 (虛線)。

請仔細檢視平衡不平衡轉換器在產品規格表中的 PCB 外形尺寸和佈局建議。我們建議您確切遵循這些建議，否則平衡不平衡轉換器會產生不同的反應。平衡不平衡轉換器的特性是使用此外形尺寸因應產品規格表組合和測量其 S 參數，且只有在這些情況下能達到規格所述的性能。

為了了解平衡不平衡轉換器在特定頻寬上的相位不平衡，請注意當平衡不平衡轉換器的固有相位不平衡越差，ADC 所顯現的偶次失真（二次諧波失真 [HD2]）就越差。如果 HD2 對您的頻率規劃應用十分重要，我們建議您挑選具有良好相位不平衡的平衡不平衡轉換器。目前對此方面並沒

有良好的相關指引，因為每個 ADC 在其可用頻率範圍內對相位差異的靈敏度均不相同。一般而言，在應用的操作頻寬中選擇相位不平衡 ≤ 5 度的平衡不平衡轉換器，會是的開始。這種相位不平衡的程度幾乎不會增加 RF 訊號鏈陣列中已存在的彙總偶次失真 [2]。

圖 2 顯示在使用 ADC3669 時，同樣兩個匹配平衡不平衡轉換器情境之間的差異，以及其對偶次失真的影響。請注意，三次諧波失真 (HD3) 在頻率中相對相同，且沒有顯著差異。

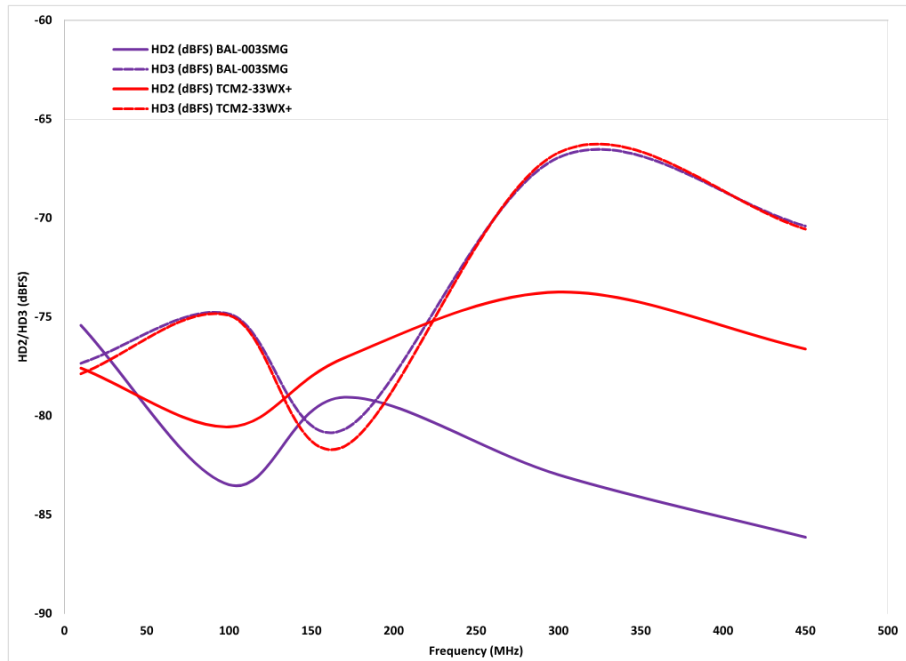


圖 2. 兩個平衡不平衡轉換器間的 ADC3669 HD2 和 HD3 比較：高成本相對於低成本。

選擇適當平衡不平衡轉換器匹配網路的藝術

多年來，大家進行了許多嘗試來模擬平衡不平衡轉換器匹配並讓其臻於完善。在經過數週到數月的模擬，並嘗試了解某種程度的 PCB 寄生後，您仍可能在打造 PCB 設計時發現該匹配無法奏效。我們建議使用 圖 3 所示的拓撲結構，以不同的方式展開設計程序。

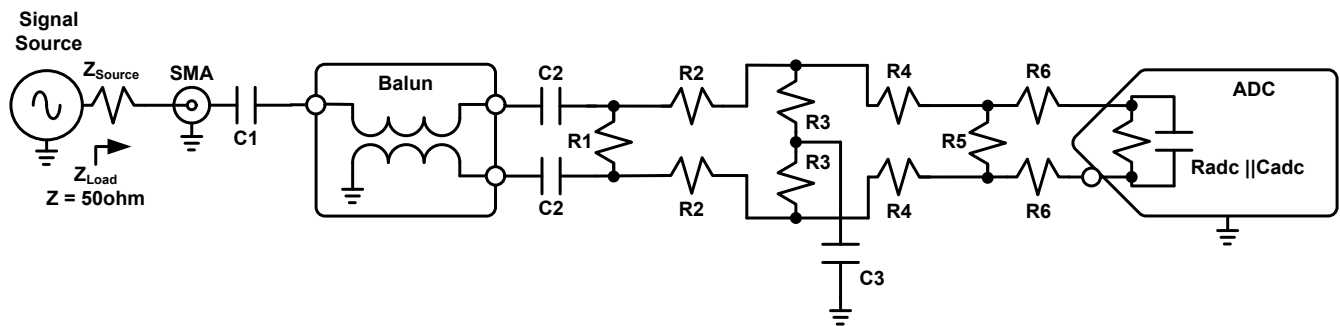


圖 3. 通用的被動網路元件預留位置。

如果您想知道所有前述心力和取捨是否確實值得，我們建議您再次參閱 圖 1。

現在讓我們說明每個元件，讓您了解其在 ADC 輸入匹配網路中的需求或功能：

- C1、C2。這些元件通常為 0.1 μ F，會阻擋 DC 饋入平衡不平衡轉換器或變壓器。部分平衡不平衡轉換器設計會連接至接地、DC 或兩者，並可能會使平衡不平衡轉換器的功能劣化，導致性能不佳。
- R1。此元件可在 DC 阻隔電容器後，於平衡不平衡轉換器輸出附近實現反向終端。如果您的走線長度夠長，可能會需要此元件。假定目標頻帶中無法達到完美匹配，則您可能需要反向終端來處理任何因不完美匹配在頻率範圍內來回滾動而累積的駐波。
- R2、R3、R4。這些元件可讓您採用各種匹配技術，並且可採用數種組合形式，以解決平衡不平衡轉換器和 ADC 匹配難題。針對最寬的頻帶匹配，R2、R3、R4 通常配置為匹配器，有助於消除平衡不平衡轉換器和 ADC 之間的駐波，並提供平衡不平衡轉換器和 ADC 所需的「堅實」50 Ω 阻抗。雖然這些元件以電阻器表示，但是也可以採取電容器或電感器的形式。
- C3。此電容器通常為 0.1 μ F，可將 R3 的中心點連接在一起，並實現 AC 電流路徑。增加 C3 也是好的構想，因為當超出 ADC 輸入全刻度範圍時，C3 就可讓此 AC 電流流至其他位置。C3 也可以改為安置在 R5。
- R5。此元件可在 ADC 輸入附近的對側實現反向終端，且並非一律必要。R5 可提供與 R1 相同的功能，不過

是從相反的角度，以協助解決可能累積的駐波。一般而言，當走線連線長度為 ≥ 300 mils 時，就需要 R1 或 R5。

- R6。這是回衝元件，通常採取電阻器的形式，但在部份情況下，電感器或低 Q 鐵氧體磁珠可協助抑制任何從 ADC 內部取樣電路返回類比輸入網路的殘餘電荷回衝。這些元件預留位置在使用無緩衝 ADC 時相當重要。

同樣地，如果您規劃從平衡不平衡轉換器輸出拉兩條走線到 ADC 輸入，請格外小心。除非您之前有結合使用平衡不平衡轉換器換衝器和 ADC 的經驗，否則即使您收集 S 參數、模擬並向您的同事證明了設計，此方法仍可能要價高昂。

使用 ADC3669 的藝術

我們的範例使用 16 位元、雙通道 **ADC3669** ADC，進行 1.5GHz 類比取樣頻寬的寬頻前端匹配設計。此範例也使用 Mini-Circuits 的 **TCM2-33WX+** 平衡不平衡轉換器，相對於較易匹配且較高成本的平衡不平衡轉換器，其頻寬為 3GHz，插入損耗則較低。而相較於相同頻率範圍中其他較低成本的不平衡轉換器，此平衡轉換器也具有非常良好的相位不平衡，為 < 5 度。

使用 **圖 3** 中的通用電路，所需元件並非純然電阻式以定義匹配。在此案例中，我們使用電阻器 (R)、內部寄生電容 (C) 和電感器 (L) (R2、R3 和 R6) 方法；請參閱 **圖 4**。

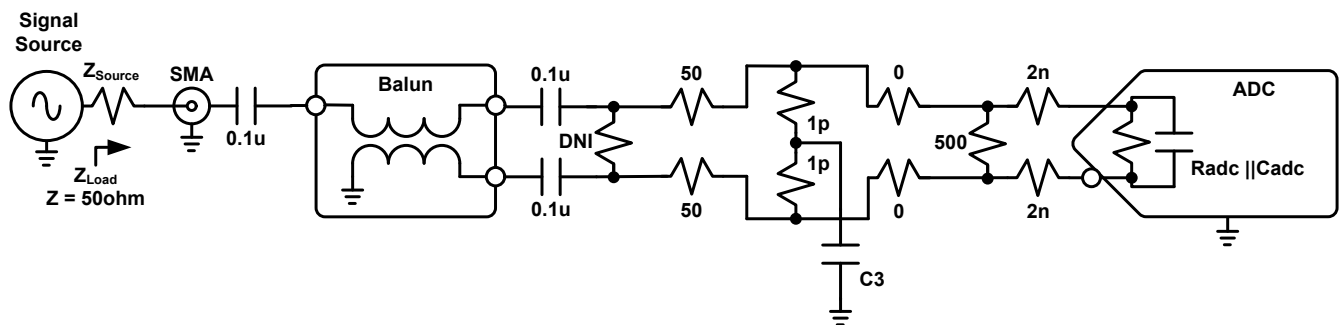


圖 4. 最終的被動網路匹配。

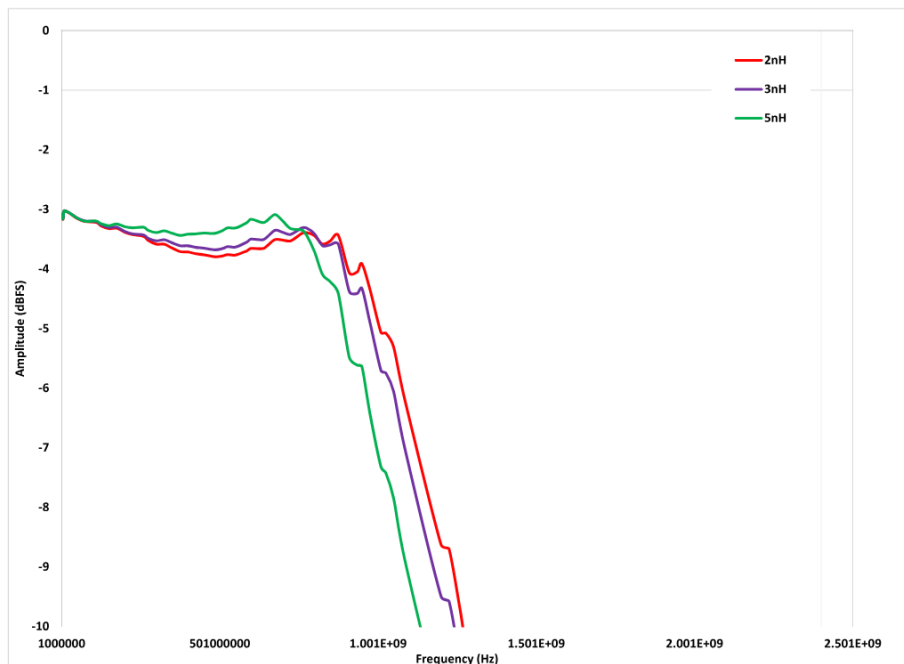
PCB 寄生仍是問題，因此您必須在電路板上測試數次不同迭代。

取得平衡不平衡轉換器和 ADC 的兩組 S 參數（若有），並使用您偏好的模擬軟體。使用 **圖 3** 提供的匹配網路格式，並對 R2、R3 和 R4 使用以下兩種方法之一：

- 衰減墊方法（R2、R3 和 R4 分別約為 8.6Ω、140Ω 和 8.6Ω），可提供 3dB 墊。若要進一步了解此方法，請參閱 Electronic Products 文章「Unraveling the Full-Scale Mysteries of Your RF Converter's Analog Inputs」。
- 分別對 R2、R3 和 R4 採用 R、C 和 L 方法，有助於使用 L 做為最後一個元件，以諧振消除 ADC 的 C。此方法可讓頻寬變平，使平衡不平衡轉換器能以其額定頻寬運作。不過，此方法確實需要進行一些迭代作業。

這裡的目標是不使用有損耗的衰減墊。因此，為了提供更多關於 R、C 和 L 方法的背景資訊，請參閱 [圖 5](#)、[圖 6](#) 及 [圖 7](#)，以了解在網路（請參閱 [圖 4](#)）中分別改變 L、C 和 R 的情況，以及其在定義最終頻寬和網路匹配方面的作用。

[圖 5](#) 顯示在維持所有其他元件值相同的情況下，改變 L 值會如何影響頻寬。請注意，隨著 L 值增加，頻寬會緩慢減少。這表示 L 值對 ADC 的 C 有負面的反應效應。



[圖 5](#). 不同 L 值在 R4 的通帶平坦度反應。

[圖 6](#) 顯示在維持所有其他元件值相同的情況下，更動 C 值會如何影響頻寬。請注意，隨著 C 值降低，頻寬會緩慢改善，而代價是頻寬平坦度。這表示隨著頻率變化，C 值對

平衡不平衡轉換器的回波損耗具有反應效應。這類電容器有助於保留平衡不平衡轉換器的頻寬與頻率。

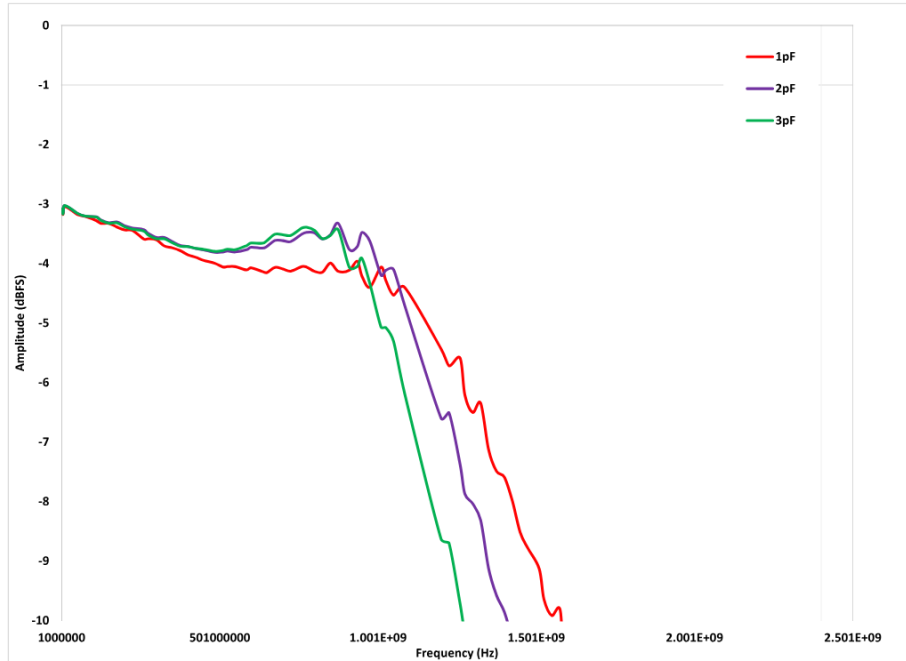


图 6. 不同 C 值在 R3 的通帶平坦度反應。

图 7 顯示在維持所有其他元件值相同的情況下，更動 R 值會如何影響頻寬。請注意，隨著 R 值增加，頻寬會緩慢改善，而代價是頻寬反應的平坦度或峰值。R 值的效應與 L

的效應幾乎相同，因此可在搭配使用平衡不平衡轉換器和 ADC 時，保留兩者的阻抗需求。

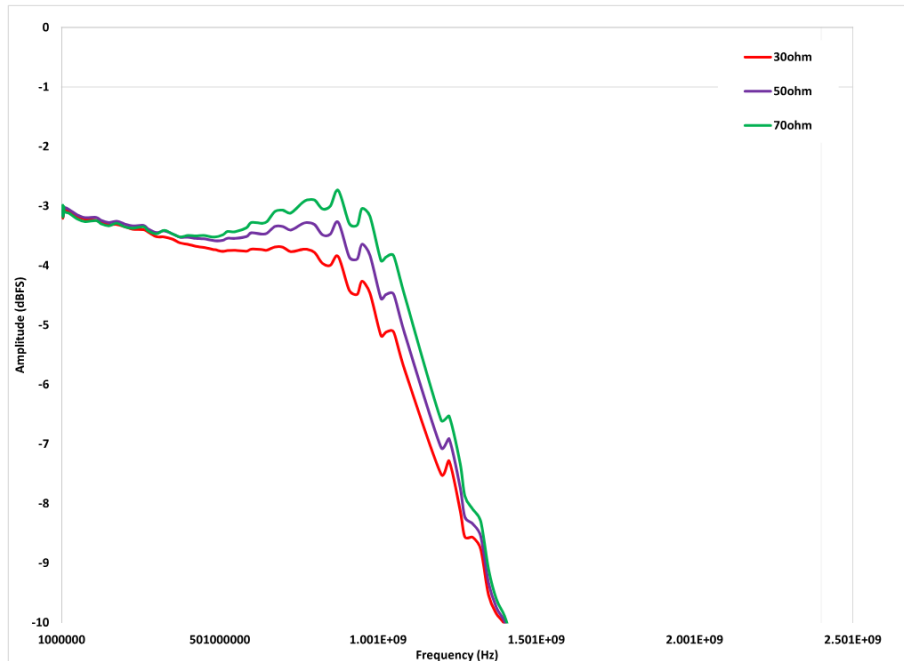


圖 7. 不同 R 值在 R2 的通帶平坦度反應。

使用模擬軟體中的「調整」功能來模擬 R、C 和 L 方法，可為您提供良好的起點，並讓您可了解各元件在網路匹配中扮演的角色。決定採用某些良好的起始值，有助於在根據應用需要而迭代匹配並使其臻於完善時，定義所需的方向。

在匹配設計過程中，完成轉換器應用頻寬的 AC 性能掃頻，可讓您深入了解性能動態變化的方式，並確保 ADC 沒有發生任何問題。

圖 8 顯示使用我們所述方法將輸入網路匹配至 1.5GHz 時，在 ADC3669 頻寬中所測量的 AC 性能（SNR 和無雜散動態範圍 [SFDR]）。

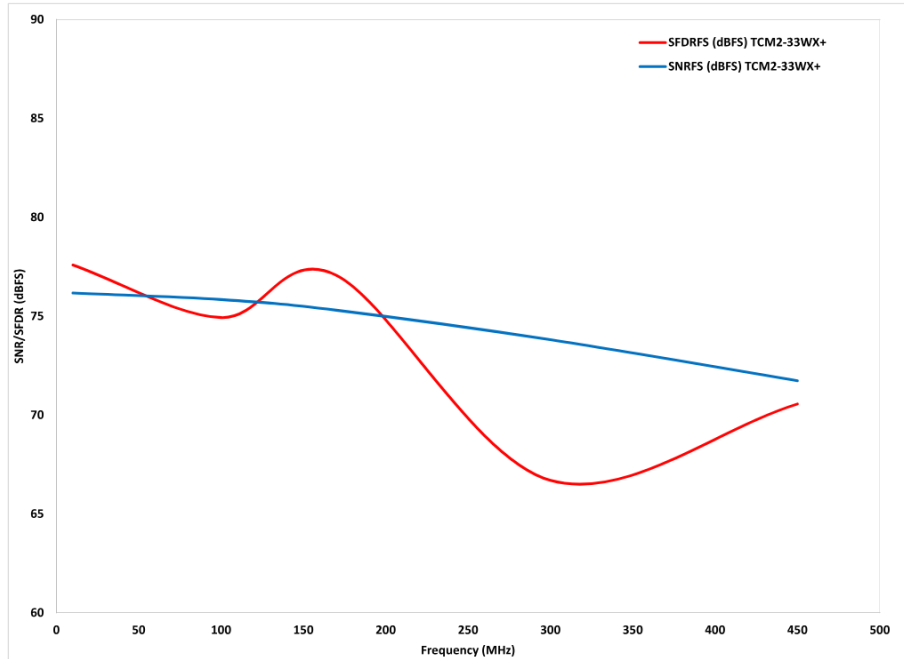


圖 8. 最終匹配網路的 AC 性能 (SNR/SFDR) 相對於頻率。

結論

以下是在 GHz 領域中處理平衡不平衡轉換器和 ADC 匹配網路設計時的基本步驟，以防止您下一次匹配作業受到頻寬阻礙：

- 針對您的特定應用，選擇略有頻寬超額的平衡不平衡轉換器或變壓器。
- 若 HD2 對您的頻率應用相當重要，請選擇相位不平衡 ≤ 5 度的平衡不平衡轉換器。
- 使用平衡不平衡轉換器或放大器和 ADC 時，簡化的輸入網路可提供大多數匹配作業所需的初始預留位置。
- 您可能不需列出所有元件，但一開始這些元件會有所幫助，因為在模擬中無法擷取所有電路板佈局與 PCB 寄生。

- 了解可能影響頻寬性能的取捨。其中部分取捨可能會影響 ADC 的線性性能。

參考資料

- Rob Reeder。2022 年。「[A Close Look at Active vs. Passive RF Converter Front Ends](#)」。Planet Analog，2022 年 1 月 24 日。
- Rob Reeder。2022 年。「[Evaluating high-speed RF converter front-end architectures](#)」。Planet Analog，2022 年 4 月 7 日。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated