

對數位預失真進行故障排除和微調的完整指南 (I)

本文主要介紹 ADRV9002 的數位預失真 (DPD) 功能，但其中所採用的一些檢測技術也可應用於一般 DPD 系統。首先，概述關於 DPD 的背景資訊，以及使用者試驗其系統時可能會遇到的一些典型問題。最後，文章介紹在 DPD 軟體工具的協助下可應用於 DPD 演算法以分析性能的調優策略。

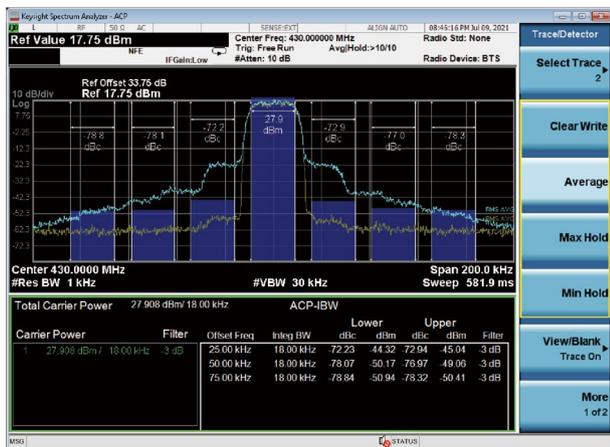
■作者：Wangning Ge / ADI 產品應用工程師

簡介

數位預失真 (通常稱為 DPD) 是無線通訊系統中廣泛使用的一個演算法。DPD 目的在抑制透過射頻頻率功率放大器 (PA) 傳遞的寬頻訊號上的頻譜再生，進而提高 PA 的整體效率。一般而言，在處理高功率輸入訊號時，PA 會出現非線性效應和效率不高的問題。由於頻譜再生，相鄰頻段出現非線性效應和頻譜干擾。圖 1 顯示在 ADRV9002 平台上使用 TETRA1 標準進行 DPD 校正之前和之後的頻譜再生。

ADRV9002 提供經過功率優化的內部可編程 DPD 演算法，該演算法可自訂以校正 PA 的非線性效應，進而提升整體鄰道功率比 (ACPR)。儘管 DPD 能夠為通訊系統帶來預期

圖 1: 使用 ADRV9002 的 TETRA1 DPD。



的優勢，但缺乏經驗的人員開始使用 DPD 時往往困難重重，更別提正確設定了。這主要因為數位預失真涉及多個因素，可能會導致誤差，進而降低 DPD 性能。即使在正確設定硬體後，要確定正確的參數以微調 DPD 並獲得最優解決方案，這仍可能具有挑戰性。本文目的在協助於 ADRV9002 中使用 DPD 選項的工程師，並列出了用戶通常會遇到的一些典型問題，及提供有關使用可用參數微調 DPD 模式以獲得最優 DPD 性能的一些一般策略。此外，文中並介紹如何使用 MATLAB 工具協助分析 DPD。這將有助於消除許多常見的錯誤，並提供有關內部 DPD 操作的一些見解。最後，本文還將協助用戶開始使用 DPD，並提供有關理論概念和解決實際問題的有用資訊。

啟用 DPD 選項時，ADRV9002 可提供高達 20 MHz 的訊號頻寬。這是因為接收頻寬限制在 100 MHz。DPD 通常將以發射頻寬 5 倍的接收頻寬工作，因此可以看到和校正三階和五階互調訊號。ADRV9002 支援的最高 PA 峰值功率訊號約為 1 dB (通常稱為 P1dB) 壓縮區。該指標表示 PA 壓縮的程度。如果 PA 壓縮超過 P1dB 點，則無法保證 DPD 正常工作。但是，這個要求並不嚴格；我們看到在許多情況

下，DPD 在超過 P1dB 點時依舊能夠工作，並且仍然提供非常卓越的 ACPR。但這需要具體問題具體分析。一般而言，如果壓縮得太嚴重，DPD 可能會出現不穩定和崩潰的問題。在文章後面的部分中，我們將詳細討論壓縮區，包括如何使用 MATLAB 工具觀察目前 PA 壓縮狀態。

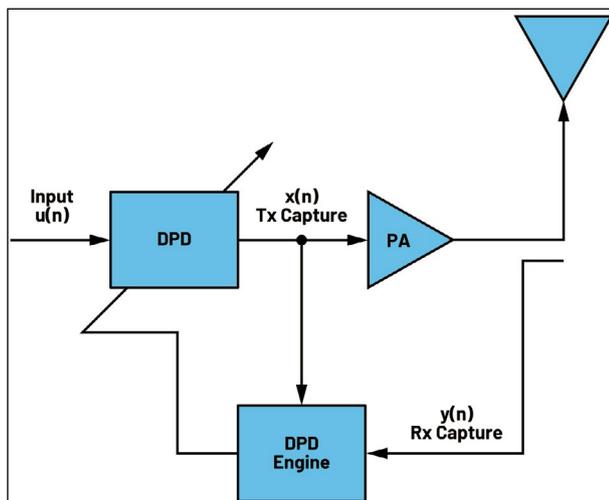
有關 DPD 的更多詳細資訊，請參見 UG-1828 的「數位預失真」章節。

架構

執行 DPD 功能有兩種基本方法。第一種方法稱為間接 DPD，即在 PA 前後擷取訊號。與之不同的是直接 DPD 方法，即在 DPD 模組前和 PA 後擷取訊號。每種方法的優勢和劣勢不在本文章的討論範圍內。間接 DPD 透過分析 PA 前後的訊號瞭解其非線性特性，並在 DPD 模組上執行反轉。直接 DPD 分析 DPD 前和 PA 後的訊號，並透過在 DPD 模組上應用預失真來消除二者之間的誤差。用戶必須瞭解，ADRV9002 使用的是間接方法以及與之相關的影響。另外，請務必瞭解，在使用 MATLAB 工具時，擷取資料也是採用間接方法。

圖 2 顯示了 ADRV9002 的簡化 DPD 操作方框圖。輸入訊號 $u(n)$ 進入 DPD 模組。DPD

圖 2: 間接 DPD 的簡化方框圖。



將對訊號進行預失真處理，並產生 $x(n)$ 。在此我們稱之為發射擷取，不過這實際上是發射訊號的預失真版本。然後，訊號經過 PA，成為 $y(n)$ ，訊號最終發送到空中。我們將 $y(n)$ 稱為接收擷取，不過這實際上是 PA 後的發射訊號。然後， $y(n)$ 回饋到接收器埠，作為觀察接收器。本質上，DPD 引擎將使用擷取的 $x(n)$ 和 $y(n)$ ，然後產生係數，在 DPD 的下一輪反覆運算中將應用這些係數。

工作模式

ADRV9002 在 DPD 上支援 TDD 和 FDD 操作。在 TDD 模式下，每個發射幀都會更新 DPD。這表示在發射幀期間，接收器將充當觀察路徑。在 FDD 中，由於發射器和接收器同時運行，因此需要專用接收器通道。ADRV9002 中的 2T2R 能夠在 2T2R/1T1R TDD 和 1T1R FDD 模式下支援 DPD。

DPD 模式

結構

以下等式顯示在發射路徑中實現的 DPD 模式。

$$x(n) = \sum_{t=0}^{T-1} \Psi_t(|u(n-l_t)|) u(n-k_t) \quad (1)$$

$$\Psi_t(|u(n-l_t)|) = \sum_{i=0}^7 b_{t,l_t,i} a_{t,l_t,i} |u(n-l_t)|^i$$

其中：

$u(n)$ 是 DPD 的輸入訊號

$x(n)$ 是 DPD 的輸出訊號

T 是 DPD 模式的總分支數

Ψ_t 是用於實現分支 t 查閱資料表 (LUT) 的多項式函數

l_t 是幅度延遲

k_i 是資料延遲

$a_{t,lt,i}$ 是 DPD 引擎計算的係數

$b_{t,lt,i}$ 是啟用或禁用項的開關

i 是多項式項的指數和冪

使用者可為每個分支配置多項式的項數量。ADRV9002 提供 3 個記憶項分支和 1 個交叉項分支，每個分支的階從 0 到 7。

模式選擇

ADRV9002 提供的預設模式選項 (如圖 3 所示)，該模式應該適合大多數常見用例。或者，用戶可透過啟用和禁用項，選擇自己的模式。前 3 個分支 (0 到 2) 表示記憶項，其中分支 1 是中心分支。分支 3 是交叉項分支。

注意，為了與記憶項分支區分，分支 3 (或交叉項分支) 不應啟用零階項。

o LUT 大小：用戶可設定 LUT 大小。

ADRV9002 提供兩個選項，256 和 512。選擇 512 大小，用戶將獲得更好的量化雜訊位準，進而獲得更好的 ACPR，因為一般而言，較大的尺寸將提供更高的訊號解析度。對於窄頻應用，我們建議使用 512 作為預設選項。256 可用於寬頻，因為雜訊位準並不嚴格，並且可以改善計算和功率。

o 預 LUT 縮放：使用者可設定預 LUT 縮放模組，

圖 3: DPD 模式多項式的項。

Figure 3 shows the configuration for enabling DPD for Tx1. The interface includes the following settings:

- Enable DPD for Tx1
- LUT Size: 512
- Pre-LUT Scale: 2
- Model Tap Polynomial Terms: Custom

The polynomial terms are configured for four taps (Tap 0 to Tap 3) with the following masks:

Tap	Term 0	Term 1	Term 2	Term 3	Term 4	Term 5	Term 6	Term 7	Mask
Tap 0	<input checked="" type="checkbox"/> a_0	<input checked="" type="checkbox"/> a_1x	<input checked="" type="checkbox"/> a_2x^2	<input checked="" type="checkbox"/> a_3x^3	<input checked="" type="checkbox"/> a_4x^4	<input type="checkbox"/> a_5x^5	<input type="checkbox"/> a_6x^6	<input type="checkbox"/> a_7x^7	Mask: 0x1F
Tap 1	<input checked="" type="checkbox"/> a_0	<input checked="" type="checkbox"/> a_1x	<input checked="" type="checkbox"/> a_2x^2	<input checked="" type="checkbox"/> a_3x^3	<input checked="" type="checkbox"/> a_4x^4	<input checked="" type="checkbox"/> a_5x^5	<input checked="" type="checkbox"/> a_6x^6	<input type="checkbox"/> a_7x^7	Mask: 0x7F
Tap 2	<input checked="" type="checkbox"/> a_0	<input checked="" type="checkbox"/> a_1x	<input checked="" type="checkbox"/> a_2x^2	<input checked="" type="checkbox"/> a_3x^3	<input checked="" type="checkbox"/> a_4x^4	<input type="checkbox"/> a_5x^5	<input type="checkbox"/> a_6x^6	<input type="checkbox"/> a_7x^7	Mask: 0x1F
Tap 3	<input type="checkbox"/> a_0	<input checked="" type="checkbox"/> a_1x	<input checked="" type="checkbox"/> a_2x^2	<input checked="" type="checkbox"/> a_3x^3	<input checked="" type="checkbox"/> a_4x^4	<input type="checkbox"/> a_5x^5	<input type="checkbox"/> a_6x^6	<input type="checkbox"/> a_7x^7	Mask: 0x1E

以便對輸入資料進行縮放，使其更適合壓縮擴展器。壓縮擴展器選擇來自發射器的訊號，對其進行壓縮，以適合 8 位 LUT 位址。根據輸入訊號位準，使用者可調整該值，以優化 LUT 利用率。其值可以在 (0, 4) 的範圍內設定，步進為 0.25。在本文的最後一個部分，提供了更多有關壓縮擴展器的內容。

配置

圖 4: 啟用 DPD 的基本配置。

Figure 4 shows the basic configuration for enabling DPD. The interface includes the following settings:

- External Loopback with External PA on Rx1B: After PA
- Peak Power: Ideal external loopback peak power is -18 dBm with a tolerance of ± 5 dBm. Peak Power: -18 dBm
- External Path Delay: There is a granularity of 100 ps (0.1 ns) to the external path delay. Path Delay: 15300 ps

為了執行 DPD，用戶將必須在 PA 上啟用外部環回路徑，然後設定回饋功率，以確保其未超出範圍。注意，這是峰值功率，不是平均功率。功率太強或者太弱都會影響 DPD 性能。使用者還需要設定外部路徑延遲，可使用 External_Delay_Measurement.py 獲取。使用者可在 IronPython 資料夾下的 ADRV9002 評估軟體安裝路徑中找到該腳本。

注意，只需為高採樣速

率曲線設定外部延遲 (例如, LTE 10 MHz)。對於低採樣速率曲線 (TETRA1 25 kHz), 用戶可將其設定為 0。在本文的後段, 我們將使用該軟體工具來觀察擷取資料, 以瞭解外部延遲的影響。

其他設定

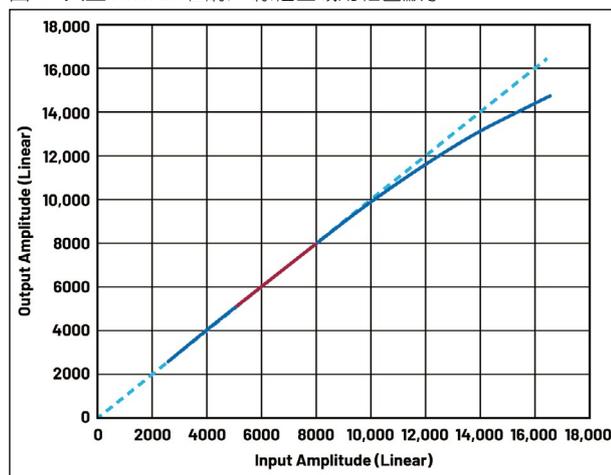
使用者可配置樣本數量。預設情況下, 使用者可設定 4096 個樣本。建議使用預設值。在大多數情況下, 預設的 4096 個樣本將為 DPD 提供最優解決方案。

其他功率縮放是更進階的參數。在大多數情況下, 建議對 ADRV9002 使用預設值 4。該參數與內部相關矩陣有關。根據我們的實驗, 預設值為我們測試的現有波形和 PA 提供最佳性能。在少數情況下, 如果輸入訊號幅度極小或極大, 使用者可嘗試將該值調整成較小

圖 5: DPD 上的其他配置。

Number of Samples	<input type="text" value="4096"/>
Additional Power Scale	<input type="text" value="4"/>
Rx/Tx Normalization	
Lower Threshold	<input type="text" value="-25"/> dBFS
Upper Threshold	<input type="text" value="-15"/> dBFS

圖 6: 典型 AM/AM 曲線。線性區域用紅色顯示。



和較大的值, 以使相關矩陣維持適當的條件數, 進而獲得更穩定的解決方案。

o Rx/Tx 規範化: 用戶應將接收器 / 發射器規範化設定為資料呈線性的區域。在圖 6 中, 線性區域用紅色顯示。在該區域, 資料的幕沒有到達壓縮區, 並且夠高, 可用於計算增益。選擇該區域後, DPD 可估算發射器和接收器的增益, 然後繼續對演算法進行進一步處理。在大多數情況下, -25 dBFS 至 -15 dBFS 應適合大多數標準 PA。但是, 用戶仍然應該留意, 因為特殊 PA 可能具有截然不同的 AM/AM 曲線形狀, 在此種情況下, 將需要進行適當的修改。本文後面部分將對此進行更詳細說明。

設定

硬體設定

典型設定如圖 7 所示。在訊號進入 PA 之前, 需要低通濾波器, 以防止出現 LO 訊號諧波。在某些情況下, 如果內部 LO 相位雜訊性能無法滿足應用需求, 則可能需要外部 LO。在此種情況下, 外部 LO 源需要與 DEV_CLK 同步。近帶雜訊要求更嚴格的窄頻 DPD 通常需要外部 LO。通常建議在 PA 前提供一個可變衰減器, 用於防止對 PA 造成損害。回饋訊號應具有適當的衰減, 以便按照上一部分中討論的方式設定峰值功率。

軟體設定

IronPython

下載 IronPython 庫, 以便在 GUI 上執行 IronPython 代碼。

在這裡, 使用者可以在 GUI 的 IronPython 視窗中運行 `dpd_capture.py`, 如圖 8 所示, 其會與 MATLAB 工具一起提供, 以獲取發射器和

圖 7: 典型 DPD 硬體方框圖。

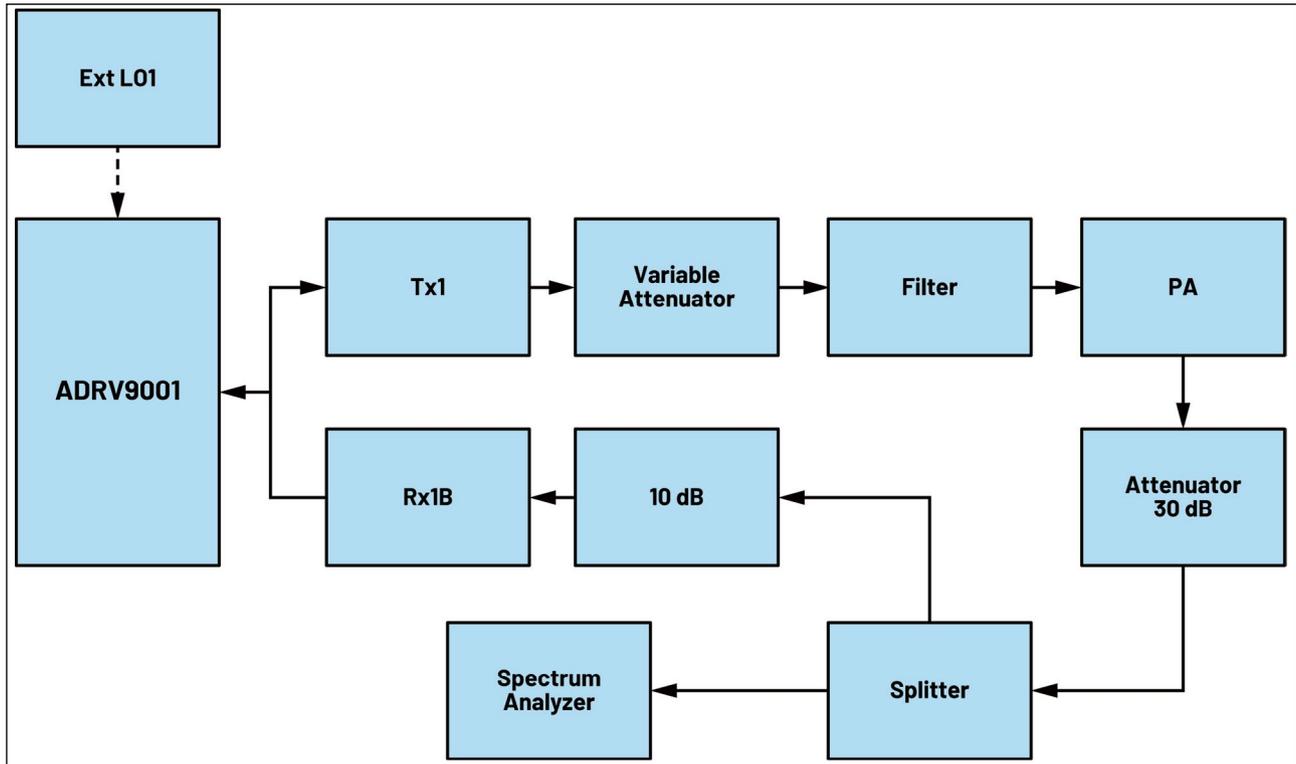


圖 8: IronPython GUI 窗口。

```

1 import System
2 import clr
3 import time
4 from System import Array
5 import sys
6 import os
7
8 sys.path.append(os.getcwd())
9
10 clr.AddReference("AnalogDevices.EvalClient.dll")
11 clr.AddReference("AnalogDevices.EvalClient.Adrv9001.Board.dll")
12 clr.AddReference("AnalogDevices.EvalClient.Adrv9001.Device.dll")
13 clr.AddReference("AnalogDevices.EvalClient.Fpga9001.Device.dll")
14 clr.AddReference("AnalogDevices.EvalClient.Zc706Sd28.Platform.dll")
15 clr.AddReference("AnalogDevices.Adrv9001.ProfileTypes.dll")
16
17 from AnalogDevices.EvalClient import PlatformBuilder, ServerManager, Transport
18 from AnalogDevices.EvalClient.Adrv9001.Board import Adrv9001Board

```

接收器的擷取資料。DPD 採樣速率也包含在擷取的檔中。

注意，該腳本應在啟動或校準狀態下運行。

MATLAB 工具

MATLAB 工具分析從 `dpd_capture.py` 中擷取的資料。該工具將協助檢查訊號完整性、訊號對齊、PA 壓縮水準，最後是 DPD 的微調。

MATLAB 工具需要 MATLAB Runtime。首次安裝需要一些時間下載。安裝完成後，用戶可載入 IronPython 腳本擷取的資料，然後觀察圖形，如圖 9 所示。

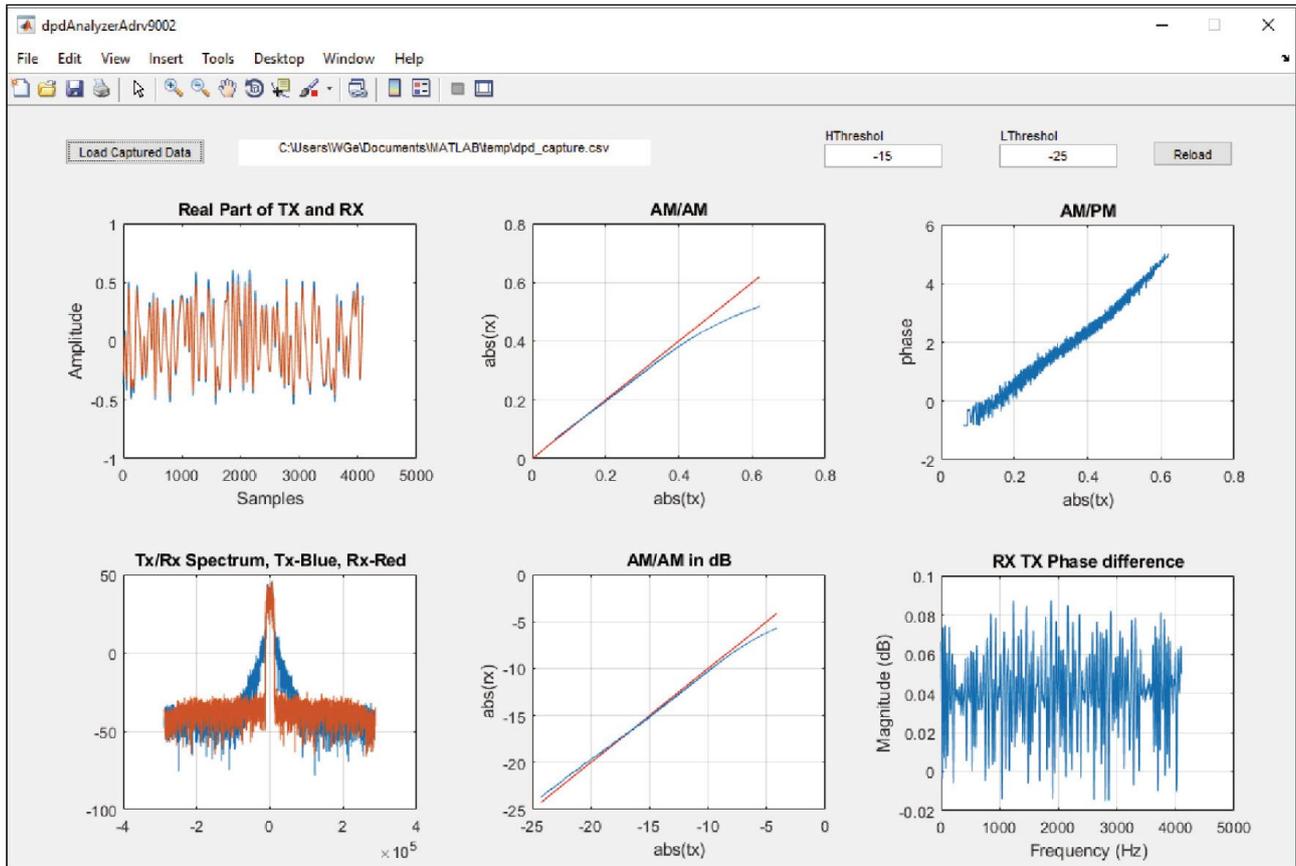
此外，使用者還可設定資料規範化的高/低閾值，然後按「重新載入」以查看變化。

首先，我們在時域中繪製了規範化的發射器和接收器資料。使用者可以放大圖形來觀察發射器和接收器的對齊狀態。此處只顯示了資料的實部，但用戶也可輕鬆繪製虛部。實部和虛部通常應該對齊或不對齊。

然後是發射器和接收器頻譜——其中，藍色是發射器，紅色是接收器。注意，這是間接 DPD——發射器資料將是預失真資料，而不是 SSI 埠上的發射器資料路徑。

接下來，我們有兩條 AM/AM 曲線，這兩條曲線均在線性和 dB 坐標系中。這些是有關 DPD 性能和 PA 壓縮狀態的重要指標。

圖 9: MATLAB DPD 分析儀。



還提供 AM/PM 曲線和接收器 / 發射器相位差。

此外，還有高閾值和低閾值數字。這些數位應該與 ADRV9002 TES 評估軟體中的設定相匹配。

注意，由於我們提供了 API 來擷取資料，因此如果需要，使用者可以開發自己的圖形和分析模型。該工具提供用於分析 DPD 的一些常見檢查。API 包括：

`adi_ADRV9002_dpd_CaptureData_Read`，這是讀取 DPD 擷取資料，必須在校準或啟動狀態下運行。

`adi_ADRV9002_DpdCfg_t` → `dpdSamplingRate_Hz`，這是 DPD 採樣速率，是唯讀參數。

典型問題

DPD 可能受許多不同因素的影響。因此，請務必確保用戶已經加以考量並檢查了列出的所有潛在問題。在考量所有問題之前，使用者應確保硬體正確連接。

發送資料超載

圖 10 顯示了 ADRV9002 實現 DPD 的簡化示意框圖。來自介面的發射器資料可能會使 DAC 超載。如果 DAC 超載，發射器的 RF 訊號在 PA 介入之前就已失真。因此，請務必確保發射器資料不會使 DAC 超載。

用戶可透過 GUI 觀察發射器 DAC 是否超載。圖 11 顯示 TETRA1 25 kHz 波形。峰值與數字滿量程仍相距甚遠。對於 ADRV9002，建議與滿量程至少保持幾 dB，避免導致 DAC 超

圖 10:DPD 的簡化硬體方框圖。

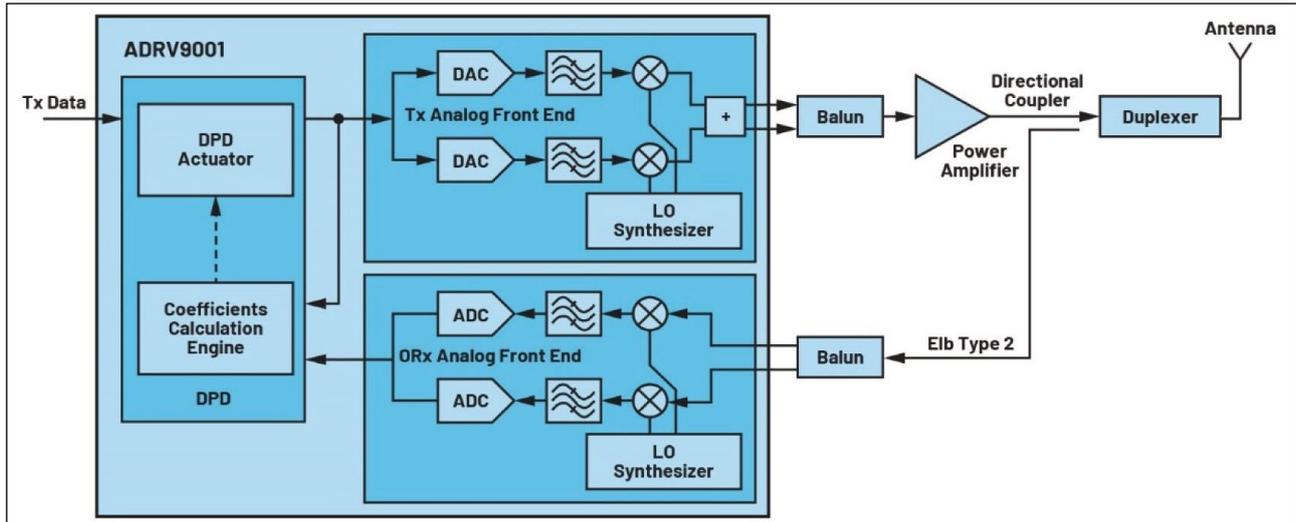
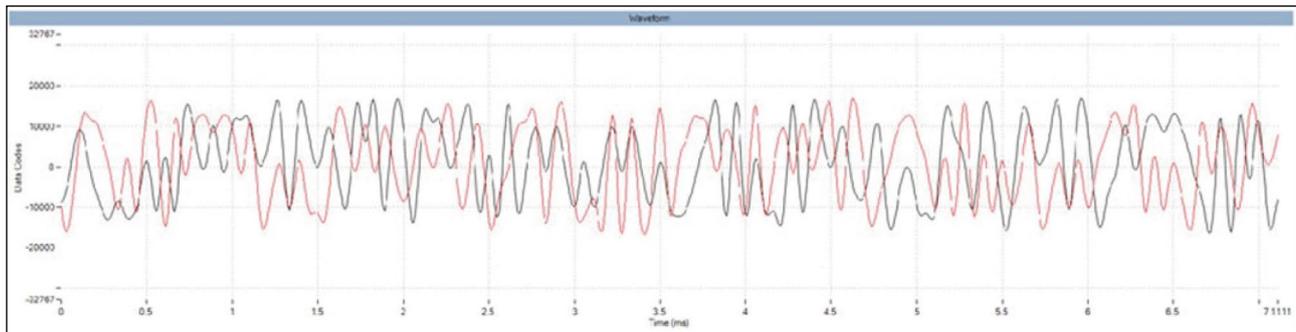


圖 11: 時域中的一部分 TETRA1 標準波形。



載。很難量化用戶應該回退多少——這是因為 DPD 將嘗試執行預失真，預失真訊號將為「峰值擴展」，因而可能會導致 DAC 超載。這取決於 DPD 如何應對特定 PA——一般而言，PA 壓縮得越厲害，所需的峰值擴展空間就越大。

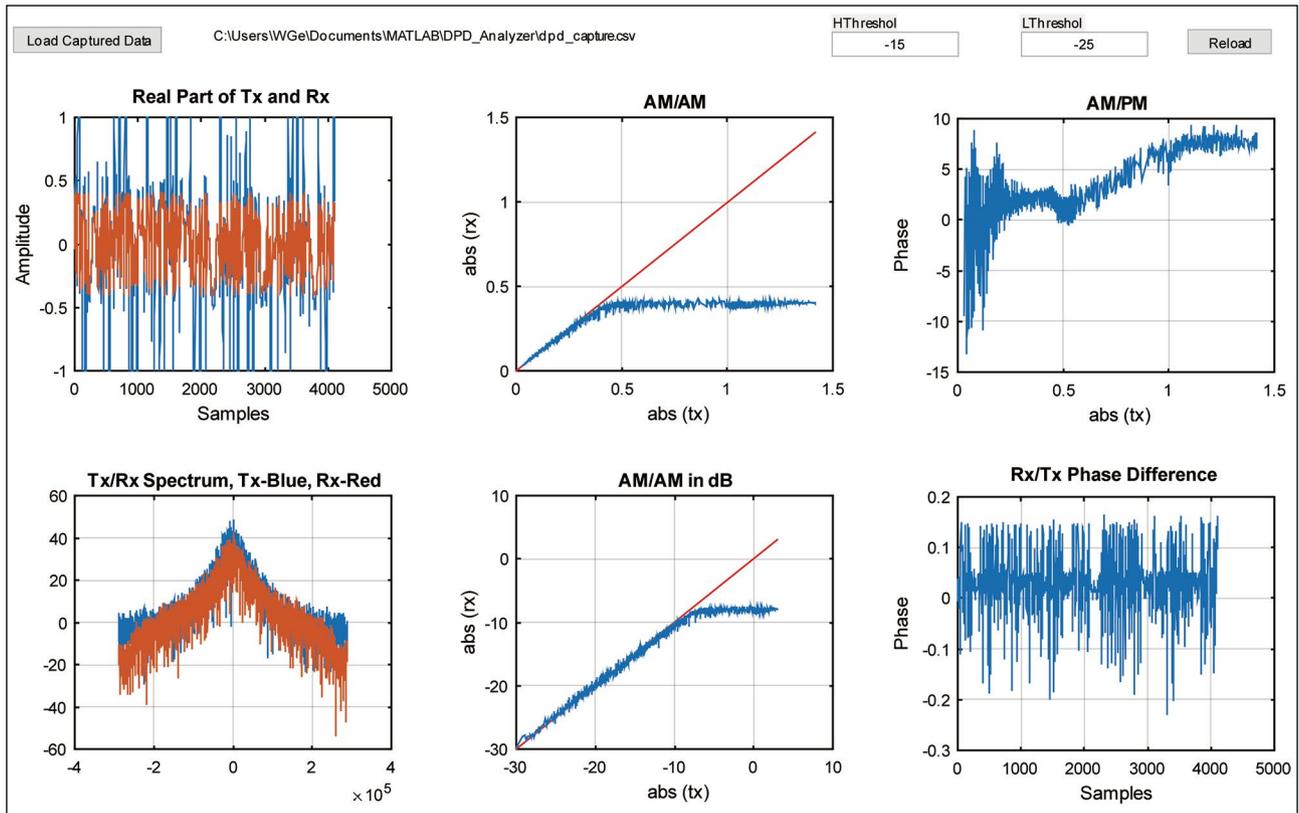
接收器資料超載

另一個常見錯誤，是接收器資料導致回饋 DAC 超載。造成該錯誤的原因，是沒有足夠的衰減返回到接收器埠。這可以從檢測工具中觀察出來，造成的影響是接收器資料被裁剪，因此，發射器和接收器無法有效對齊，導致 DPD 出現計算錯誤。DPD 通常會表現不佳，進而使整個頻譜中的雜訊增加。

接收器資料欠載

相較於接收器超載，這個問題常常被忽視。造成該問題的原因是沒有正確設定回饋衰減。使用者可能給回饋路徑提供過多的衰減，這導致接收器資料太小。預設情況下，建議對 ADRV9002 使用 -18 dBm 峰值，因其能夠將資料從類比轉換為數位，達到已知良好的 DPD 功率位準。但使用者可以根據自己的需求調整該數字。用戶應該瞭解，DPD 回饋接收器使用的衰減器與常規接收器不同，其步長更高。衰減水準透過用戶設定的峰值功率位準進行調整。 -23 dBm 是最低功率位準 (0 衰減)——如果超出該範圍，將得到低功率位準，這會影響 DPD 性能。根據經驗，使用者應確保始終正確測量和設定回饋功率。很多時候，用戶往往

圖 12：接收器資料過驅。



會嘗試不同的功率位準，但忘記正確設定回饋功率，進而導致該問題。

TDD 與 FDD

TDD 模式下的 DPD 必須在自動狀態機中運行。使用 TES 進行評估時，在手動 TDD 模式下，使用者仍可啟用 DPD，但性能會很差。這是因為 DPD 只能基於幀工作。在手動 TDD 模式下，幀的長度將由發射 / 接收啟用訊號切換來確定。換言之，每次播放和停止就是一個幀。但是，在人工切換的時間內，PA 已轉變為不同的溫度狀態。因此，如果不使用可以頻繁切換發射啟用訊號的自動 TDD 模式，將無法維持 DPD 狀態。然而，在 FDD 模式下，DPD 應正常進行。

例如，用戶可能希望使用 TETRA1，其遵循類似 TDD 的幀方案（實際上是 TDM-FDD）。

因此，不應該直接選擇 TDD 模式並手動檢查 DPD，並且 DPD 往往表現糟糕。相反，用戶可以使用「客製 FDD」設定檔，選擇與 TETRA1 相同的採樣速率和頻寬，或者使用者可以設定 TETRA1 TDD 幀定時，並使用自動 TDD 模式。這兩種方法都可以提供比手動 TDD 更好的性能。

發射器 / 接收器未對齊

ADRV9002 將嘗試對齊發射器和接收器資料的時間。當使用者擷取到資料時，使用者期望資料是對齊的。延遲測量在初始校準時完成。但是，對於高採樣速率曲線，需要單獨完成更精準的子樣本對齊。CTA

(下期待續)