

# 以 mmWave 雷達感測器打造適合居家使用的多患者非接觸式生命跡象感測器

**Greg Peake**

Field Applications Engineer

**Matthieu Chevrier**

Field Applications Engineer

## 簡介

人類生命跡象通常透過監控系統進行測量，這些系統歷來依賴於與患者身體的有線連接，通過心電圖和氧飽和度感測器的組合來報告心率和呼吸率。這些感測器很難與新生兒、嚴重燒傷的患者、患有癲癇症的患者或精神科病房的患者保持經常性接觸。對於常移動的患者，當患者在其住家移動時，監測生命跡象可能會是一項挑戰。

毫米波 (mmWave) 雷達感測器可偵測到非常細微的移動，即使是偵測患者胸部也沒問題。由於胸部移動會同時受到呼吸 (基本頻率) 和心率移動 (額外諧波) 的影響，胸部移動的精細量測是以非接觸式方式測量生命跡象。

此功能的主要促成因素是感測器有能力透過頻率調變連續波 (FMCW) 感測，和多輸入多輸出 (MIMO) 天線雷達系統的組合，偵測患者胸部的位置和速度。

感測器也能偵測病床的移動，並通知照護者注意患者可能發生褥瘡，或是一次監控多位患者，例如年老夫婦。此外，mmWave 感測器可偵測人員跌倒，並即時通知照護者。

## 整合的重要性

FMCW 系統中可確保準確且可重複量測的其中一項參數，是頻擾斜率線性度。將完整類比鏈整合在單體微波積體電路中，如此不僅可減少設計對設計的變化，也有助於提升整體量測線性度，因為其可在不同年齡與溫度下進行有效監控與校準。

查看 [圖 1](#) 中的德州儀器 (TI) IWR6843 方塊圖，可發現發送器接收器部分唯一的外部元件是標準 40-MHz 晶體。除了這個外部 40-MHz 晶體外，IWR6843 也提供與下列完整的發送器接收器整合：

- 斜率產生器。
- 分數相位鎖定迴路。
- 20-GHz 電壓控制振盪器 (VCO) 可在外部路由 (或從外部來源選擇) 時同步處理多個前端，並在更大的虛擬天線上進行一致的取樣。

IWR6843 也包括適用於發送器和接收器的完整射頻 (RF) 鏈，包括：

- 軟體可編程功率放大器可提供多種傳輸功率位準，讓連結預算適應環境與 RF 法規時擁有最大彈性。
- 動態可編程波束控制相移器。
- 低雜訊放大器可搭配功率放大器編程進行連結預算微調。
- 這種混頻器會從發送和接收頻擾產生中間頻率 (IF)。
- IF 類比濾波器。
- 具最高 25 MHz 取樣頻率的類比轉數位轉換器 (ADC)。

MMIC 系統單晶片整合完整 RF 鏈，可提供功能安全性所需的診斷能力水平。

IWR6843 上整合的全數位訊號鏈處理技術，其中提供：

- 一種雷達硬體加速器，支援 16 位元範圍、都卜勒或到達角度測距快速傅立葉轉換 (FFT)，以及傳統雷達訊號處理當中的固定誤報率 (CFAR)。
- 600-MHz 可完全編程的數位訊號處理器，提供完全客製化的訊號處理能力。
- 可完整編程的 200-MHz Arm® Cortex®-R4F 微控制器，適用於叢集、追蹤與應用級程式碼。

除了晶粒級整合外，IWR6843 的變體 IWR6843AOP 搭配封裝上天線，可進一步整合並縮小印刷電路板 (PCB) 面積，適合空間受限的應用或 RF 訊號的 PCB 佈線具有挑戰性時。

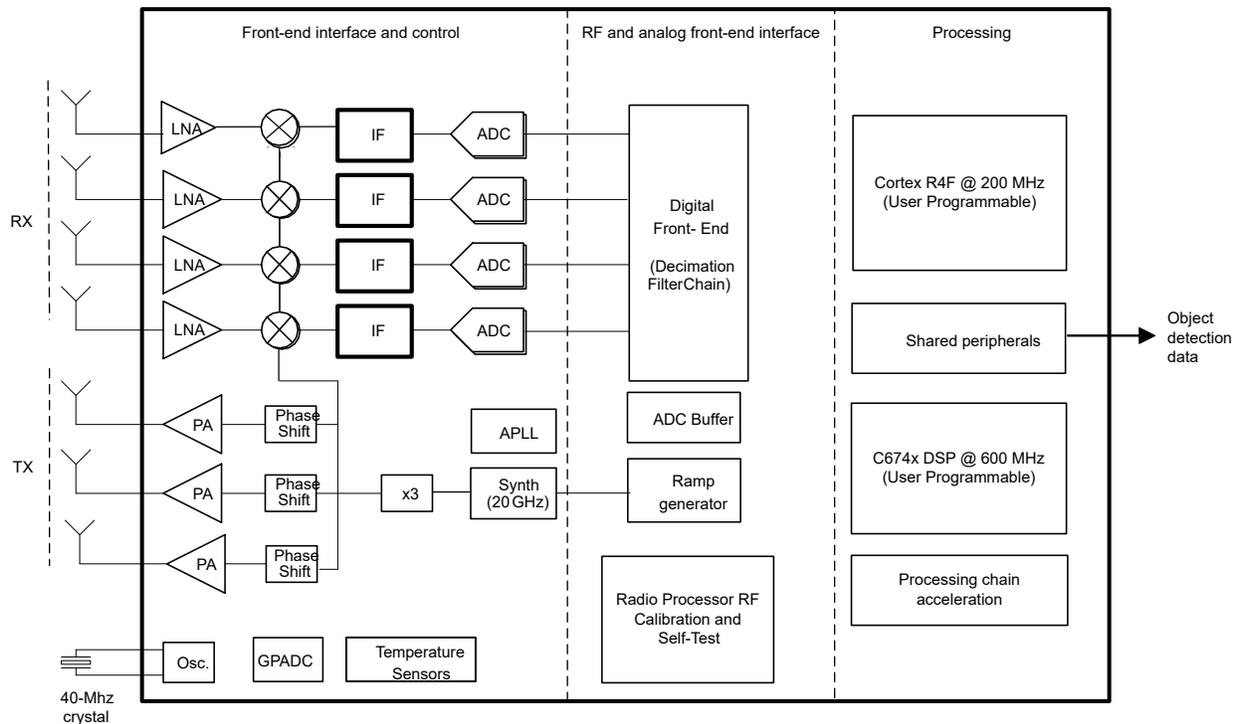


圖 1. IWR6843 方塊圖。

### FMCW

FMCW 提供最簡單的調變機制，以在測量距離時做到長距離和高準確度。FMCW 也提供徑向尺寸 (雷達和目標之間的直線) 速度量測的平均值，例如高速 (如車輛高速) 或是低速 (如胸部在呼吸時的升降情形)。追蹤這類微小的移動通常稱為都卜勒或微都卜勒偵測。

### 頻擾

頻擾描述 FMCW 中使用的調變；瞬時頻率  $f(t)$  會隨時間線性變化，因此這是線性頻率頻擾。發送的頻擾與接收到的頻擾之間的頻率差異，與飛時測距 (到達目標並返回的時間) 直接成正比，因此是到目標的距離。

方程式 1 將發送波形振幅表達為：

$$y_T(t) = A_T \times \sin(2\pi \times (f_0 + K \times t) \times t) \quad (1)$$

其中  $K$  是傳輸頻率按時間單位增加的斜率 (對於 IWR6843，此值可以是 0 到 250 MHz/ $\mu$ s 之間的任何值)， $A_T$  是訊號傳輸 (傳輸功率) 的振幅， $f_0$  是在頻擾開始時傳輸的最低頻率 (57 GHz 或 60 GHz 視所選 VCO 而定)。

方程式 2 將接收的波形振幅表達為：

$$y_R(t) = A_R \times \sin(2 \times \pi \times (f_0 + K \times (t - \delta)) \times (t - \delta)) \quad (2)$$

其中  $\delta = \frac{2 \times d}{v}$  (這是飛時測距的兩倍)， $d$  是到目標的距離， $v$  是光線在介質中的速度。

### 混波器

混頻器可將發送和接收訊號之間的頻率差相乘 (方程式 3)：

$$y_M = y_T \times y_R \quad (3)$$

根據基本三角函數規則，混頻器的輸出是兩個正弦的總和：一個是  $f_{TX}$  和  $f_{RX}$  之間的頻率差，另一個是總和。將混頻器的輸出穿過低通濾波器可恢復 IF 訊號，此訊號的頻率是發送器與接收器之間的頻率差。

方程式 4 以下列方式表示積化和差公式：

$$\sin(x) \times \sin(y) = \frac{1}{2} \times (\cos(x - y) + \cos(x + y)) \quad (4)$$

混頻器的輸出會穿過低通濾波器，產生 IF，其為發送器與接收器之間的差異 (因此數量與飛時測距成正比)。

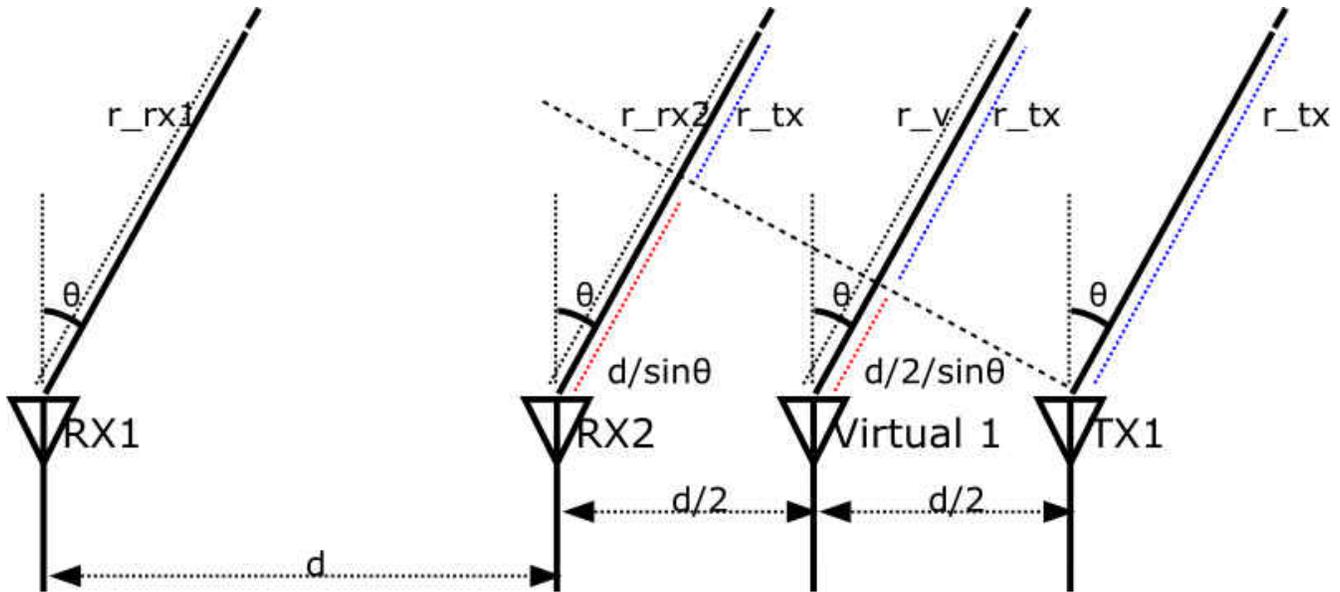
方程式 5 為產生的 IF 訊號：

$$y_{IF} = \cos\left(2\pi\left[-f_0\delta - 2 \times K \times \delta \times t + K \times \delta^2\right]\right) \quad (5)$$

ADC 將訊號數位化；請注意，訊號的頻率遠低於頻擾的頻率，因此透過正常 ADC 很容易通行。例如，IWR6843 中 ADC 的最大取樣頻率是 25 MHz。

從 **方程式 5** 可以清楚看到用於測量胸部移動的心率和呼吸率的都卜勒元素。

**圖 2** 說明了不同天線之間的飛時測距差異。



**圖 2.** MIMO 圖解每個接收天線的相位增加。

在較高的層級上、到達角度是根據每個接收天線測量的飛時測距差異而得。

在數學層面，從每個天線 **方程式 6** 定義追蹤向量為：

$$a(\theta) = \begin{bmatrix} e^{j \times 2\pi \times d \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} e^{j \times 2\pi \times d \times 2 \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} e^{j \times 2\pi \times d \times 3 \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} \\ \dots e^{j \times 2\pi \times d \times N \times \frac{\sin(\theta)}{\lambda}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

追蹤向量用於結合每個天線上每個目標的訊號。在 **方程式 7** 中，表示透過所有天線來自每個目標的所有訊號的總和， $x_i$  是  $i$  th 天線接收的訊號：

$$y(t) = a^H x(t) = \sum_1^N a_i \times x_i(t) \quad (7)$$

**方程式 8** 計算平均功率為：

## FFT 和峰值偵測

一旦訊號僅傳送相關資訊 ( $y_{IF}$  頻率為飛時測距影像)、訊號就會通過範圍 FFT，然後是 CFAR 或閾值演算法。

$$P(a) = \frac{1}{L} \times \sum_1^N |y(t)|^2 = a^H E\{x(t) \times x^H(t)\} a = a^H R a \quad (8)$$

傳統的接收波束成形又稱為 Bartlett 波束成形法，是以窄頻陣列為基礎的最古老的到達方向估計演算法。此演算法可將波束形成器相對於特定方向的輸出功率最大化，將 **方程式 9** 的關係最大化以下列方式表示：

$$\theta_{Bartlett} = \arg \max_a [P(a)] \quad (9)$$

為計算各 theta 的  $P(a(\theta))$ ，等式 10 將 R 近似為：

$$R_{zz} \approx \sum_{k=0}^n X(t) \times X^H(t) \quad (10)$$

其中 X 是訊號矩陣 (**方程式 11**)：

$$X(t) = \begin{pmatrix} x_1(t_1) & x_1(t_2) & \cdots & x_1(t_n) \\ x_1(t_1) & x_1(t_2) & \cdots & x_1(t_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_M(t_1) & x_M(t_2) & \cdots & x_M(t_n) \end{pmatrix} \quad (11)$$

從這些方程式中，您可以看到 MIMO 雷達如何啟用三個維度的位置推導。

### 以您想要感測的方向進行波束控制

使用雷達感測器擷取場景資料，通常牽涉在天線波束寬度提供的完整視角中進行每個幀週期的路線掃描。這個路線掃描會擷取相關和無關的物件反射，您需要從中擷取並製作特定物件，或在此情況下需要測量生命跡象的患者。識別患者的位置後，可以使用先前所述的發送波束成形來聚焦波束。

如果患者不在瞄準線、則可以啟動波束控制。此功能由 6 位元可配置相移器啟用，各發送器皆配備 5.625° 步進大小，並提供 64 種設定以涵蓋 0 至 360° 相移。相移器位於各自功率放大器之前，並根據主波束的聚焦位置，為每個發送通道個別編程，詳情請參閱 圖 3。相移器通常是以向量調變器為基礎的類比結構，此類調變器使用數位轉類比轉換器在放大之前在訊號上產生相移。

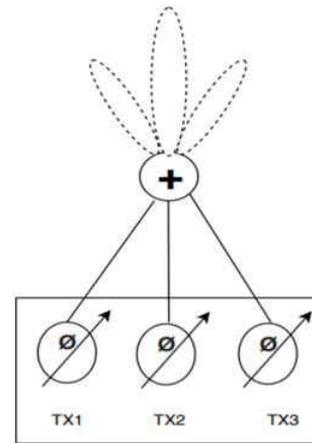


圖 3. 發送階段中包含相移器。

您可以即時編程移相器，以應付多個主體與雷達感測器處於不同方位角的情況：幀到幀（通常為 100 到 200 ms）或使用子幀時的更短時間。例如，波束可以在子幀基礎上以 20° 的步階從 -60° 掃描到 +60°，全場景掃描的持續時間小於 200 ms，如 圖 4 所示。這有助於感測從多個主體穿過一個房間，從牆壁到牆壁的生命跡象，使主體位於不同的角度，並透過發送波束連續點亮。

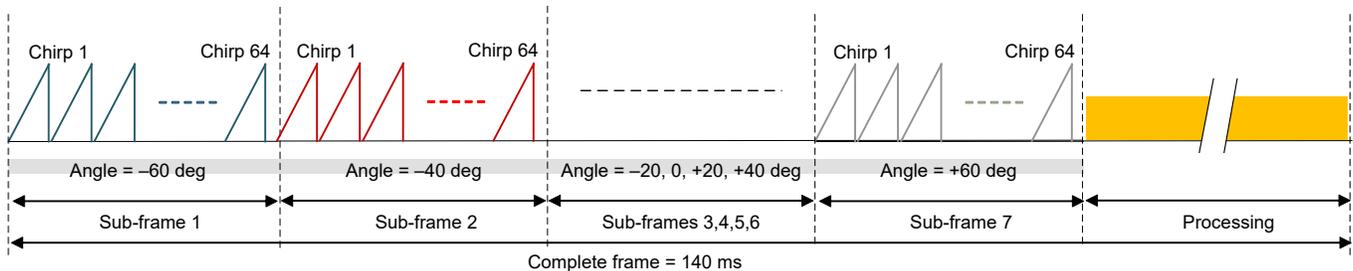


圖 4. 將每個子幀的波束角度變更為 20°。

### 校準

為了在電壓和溫度變化間維持性能，TI mmWave 雷達裝置支援在 RF 初始化階段 (稱為 RfInit() 應用程式編程介面) 以及執行期間 (在應用程式執行期間) 的開機時間校準。圖 5 說明校準類型的順序範例，其中包括：

- 類比相位鎖定迴路校準。
- 合成器 VCO。

- 局部振盪分布校準。
- ADC DC 偏移。
- IF 放大器高與低通截止頻率。
- 尖峰偵測器。
- 發送和接收增益。
- 靜態電流不相符。
- 發送相移器。

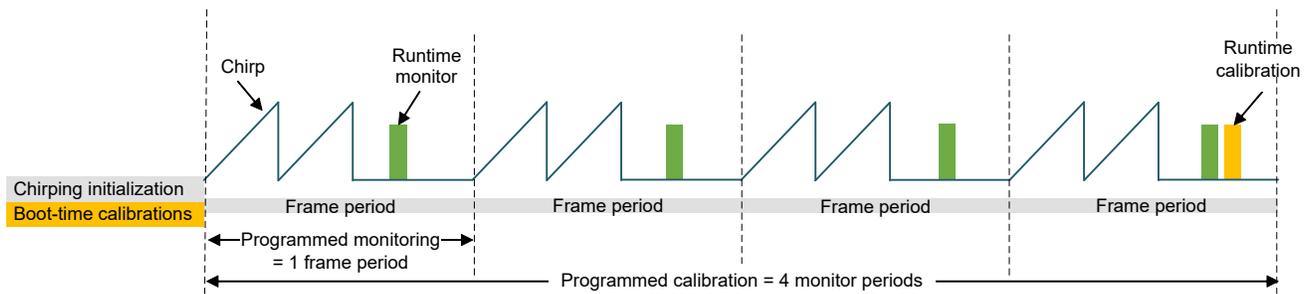


圖 5. 功能性蜂鳴、監控和校準的時序順序。

圖 6 說明了射頻前端中用於校準發送和接收類比前端參數的部分整合。隨著 PA 輸出和 LNA 輸入的功率偵測器，並與回送路徑搭配，持續監控及補償完整的前端是可行的。

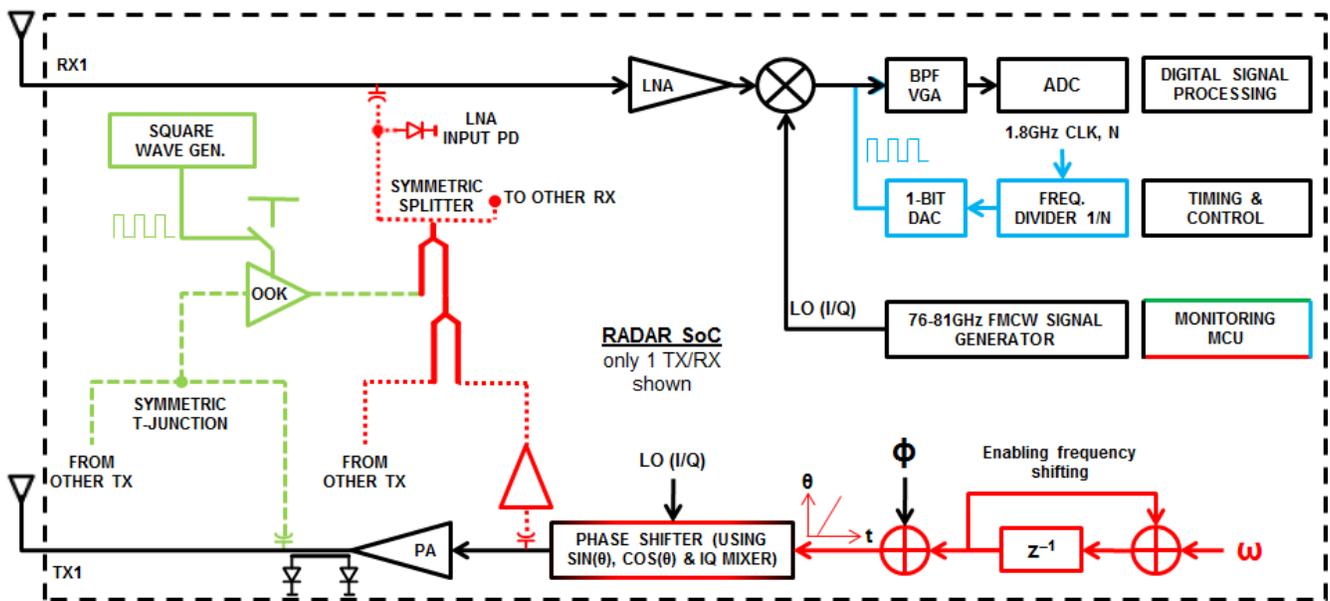


圖 6. IWR6843 中包含的診斷和監控概覽。

### 結論

TI mmWave 裝置包括 FMCW 雷達所需的高階整合功能，只需一個外部 40-MHz 晶體即可對完整的前端進行計時。此類產品可偵測三種尺寸的細微都卜勒動作，包括偵測人體呼吸和心率。

多重 TX 鏈與相移器的進一步整合，允許發送波束形成與波束控制在縮小的視角中改善 SNR，並維持 3D 感測的 MIMO 運作。

最後，整合所有類比零組件的監控與校準，在裝置使用壽命期間提供一致的性能。這種程度的類比整合使多患者非接觸式生命跡象感測器能夠在家中使用的。

## 相關網站

- 請參閱 TI Resource Explorer 中的 [Vital Signs Support Guide \(生命跡象支援指南\)](#) 和 [Vital Signs with People Tracking User' s Guide \(生命跡象與人員追蹤使用指南\)](#)。
- 了解「[在 TI mmWave 裝置中啓用功能安全](#)」訓練中的安全特性。
- 觀賞訓練影片「[mmWave 生命跡象實驗室](#)」。
- 德州儀器 [在 TI 的 mmWave 雷達裝置中進行自我校正](#)
- 德州儀器 [級聯連貫性和相移器校準](#)

**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。

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries) in the US and/or elsewhere.  
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 © 2023, Texas Instruments Incorporated