



摘要

Wi-Fi® 感測是一項快速發展的新興技術，它將現有的 Wi-Fi 基礎設施轉變為能夠追蹤運動的非侵入式空間感知感測器。隨著邊緣人工智慧 (AI) 的最新進展，Wi-Fi 感測模型和演算法有可能直接在低成本的 Wi-Fi MCU 上運行，並利用現有的 Wi-Fi 基礎設施。本白皮書探討了 Wi-Fi 感測技術的目的與優勢，以及嵌入式處理與軟體的進步如何讓其比以往更輕鬆地在各種應用中實作。本文亦將探討產業活動，以及像 Wi-Fi 聯盟和 IEEE 這樣的標準化組織如何看待科技的標準化和互通性。本文也探討了 TI Wi-Fi 正在開發的硬體和軟體解決方案，以實現這些新興用例。

目錄

1 簡介.....	2
2 Wi-Fi 感測有哪些優勢？.....	2
3 目前正在進行哪些行業活動？.....	4
4 德州儀器如何因應 Wi-Fi 感測技術的成長趨勢？.....	4
5 其他資源.....	5
6 結論.....	5

註冊商標

CCStudio™ is a trademark of Texas Instruments.

Wi-Fi® is a registered trademark of Wi-Fi Alliance.

藍牙® is a registered trademark of Bluetooth® SIG, INC.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited (or its subsidiaries or affiliates) in the US and/or elsewhere.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 簡介

隨著世界對智慧型聯網裝置的依賴日益加深，創新的應用案例也層出不窮。Wi-Fi 感測是物聯網 (IoT) 市場中正在興起的一項新技術。與需要專用硬體的傳統感測器不同，Wi-Fi 感測利用了大多數建築物和裝置中已有的無線基礎設施，從而實現了更具成本效益和可擴展性的活動檢測和環境感知設計。

傳統上，Wi-Fi 只有一個用途：在裝置之間無線傳輸資料。資料包攜帶有用的資訊，例如網路流量、視訊串流或網頁。Wi-Fi 感測技術改變了這項傳統，它將 Wi-Fi 訊號重新用於完全不同的應用——偵測和分析運動，而無需擷取運動所攜帶的資料。Wi-Fi 感測技術並非關注資料包內部的訊息，而是分析承載這些資料包的 Wi-Fi 頻道的品質和特性。

Wi-Fi 無線電在空中傳輸資料包時，訊號會遇到障礙物（如牆壁、家具或人），並以複雜的模式反射。當物體或人在訊號路徑中移動時，反射會發生可測量的變化。這些變更可以透過通道狀態資訊 (CSI) 來擷取，CSI 是對物理層屬性（如 OFDM 子載波上的訊號振幅和相位）的詳細測量，這些屬性在標準 Wi-Fi 無線電資料中已經可用。CSI 本質上是對發射器和接收器之間 Wi-Fi 通道的當前狀態進行表徵，以提供反映通道周圍環境的資料流。透過持續分析 CSI 測量資料，系統可以偵測到環境中的細微變化，並推斷正在發生的運動或活動。

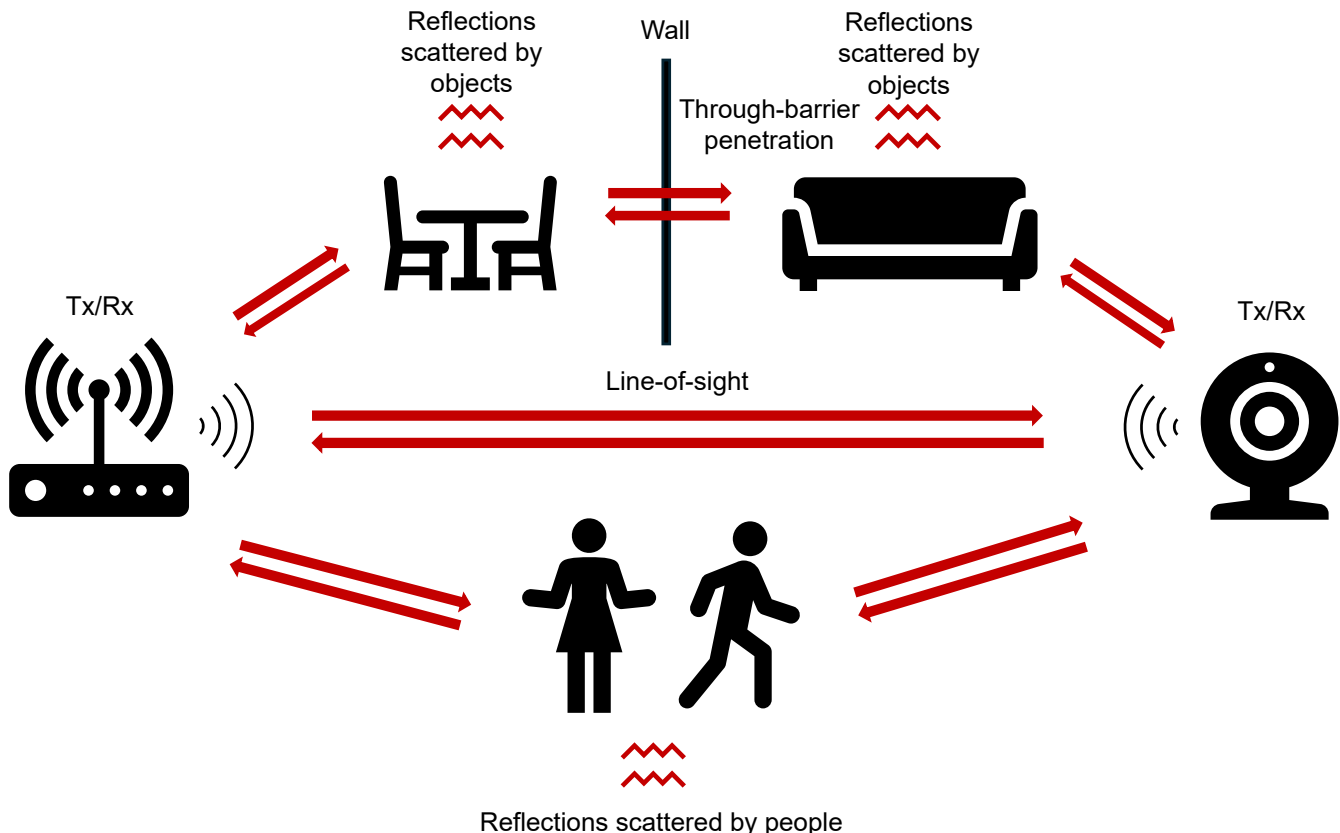


图 1-1. 流程圖

原始 CSI 資料需要進行複雜的分析才能提取出有意義的資訊。邊緣 AI（即在資料來源附近本地運行 AI 模型的能力）正是在這裡可發揮關鍵作用。基於 CSI 模式訓練的機器學習模型可以學習識別特定活動、偵測人員的存在與否、監測生命徵象或識別手勢。這些工具使開發人員能夠在資源受限的裝置上有效地訓練模型，並將這些模型部署到最終產品中。

2 Wi-Fi 感測有哪些優勢？

Wi-Fi 感測技術具有幾個引人注目的優勢，使其對產品開發人員極具吸引力。首先，該技術利用了現有的 Wi-Fi 協定和基礎設施——通道狀態資訊可以從 802.11 傳輸前導碼固有的傳統長訓練欄位 (L-LTF) 計算得出。802.11 訊框在傳輸時，其 L-LTF 包含所有子載波上的已知符號。這樣，接收器就可以提取以複數數組表示的通道狀態，每個子載波對應一個複數。在 20MHz 頻道中進行 OFDM 傳輸時，有五十二個這樣的子載波，從而在通道狀態中產生五十二個複數。通常情況下，接收器會利用頻道狀態資訊來解碼資料有效載荷，之後便予以丟棄；但在 Wi-Fi 感

測應用中，個別頻道狀態資訊本身才是關注的焦點。透過比較通道狀態逐訊框變化的方式，可以感測發射器和接收器之間射頻通道的物理變化，這些變化對應於物體的運動或其他物理變化。

因此，CSI 是 802.11 OFDM 的原生功能，無需修改協定或添加硬體。這意味著在任何現代 Wi-Fi 晶片上，都可以啟用 Wi-Fi 感測功能，從而在不增加系統成本的情況下重複使用現有的 Wi-Fi 網路，創造一種更具成本效益的方式，為聯網裝置添加感測功能。

此外，Wi-Fi 訊號不受環境光照條件的影響，而且由於 Wi-Fi 訊號可以穿透物理障礙，因此 Wi-Fi 感測不需要直接視線。例如，安置在臥室裡的智慧型插座可以偵測到外面走廊的移動情況——這是傳統運動感測器無法實現的。Wi-Fi 感測技術最重要的優勢之一就是能夠保護個人資料隱私，因為 Wi-Fi 感測完全依賴標準無線訊號，無需攝影機或其他侵入式監控設備。

這些優勢為 IoT 市場開啟了新的應用領域，使 Wi-Fi 能夠提供更多更具成本效益的感測選擇。在住宅保全或視訊監控領域，Wi-Fi 感測功能可以穿透牆壁，並偵測攝影機盲區內的人員活動。智慧型 HVAC、照明和家電系統利用 Wi-Fi 感應進行能源最佳化——例如，智慧型恆溫器可以偵測到長時間家中無人，並降低空調輸出，直到住戶回家。從節能到增強安全性再到健康監測，Wi-Fi 感測技術正在推動更智慧、更具空間感知能力的產品的發展。

Wi-Fi sensing enabled devices for occupancy detection

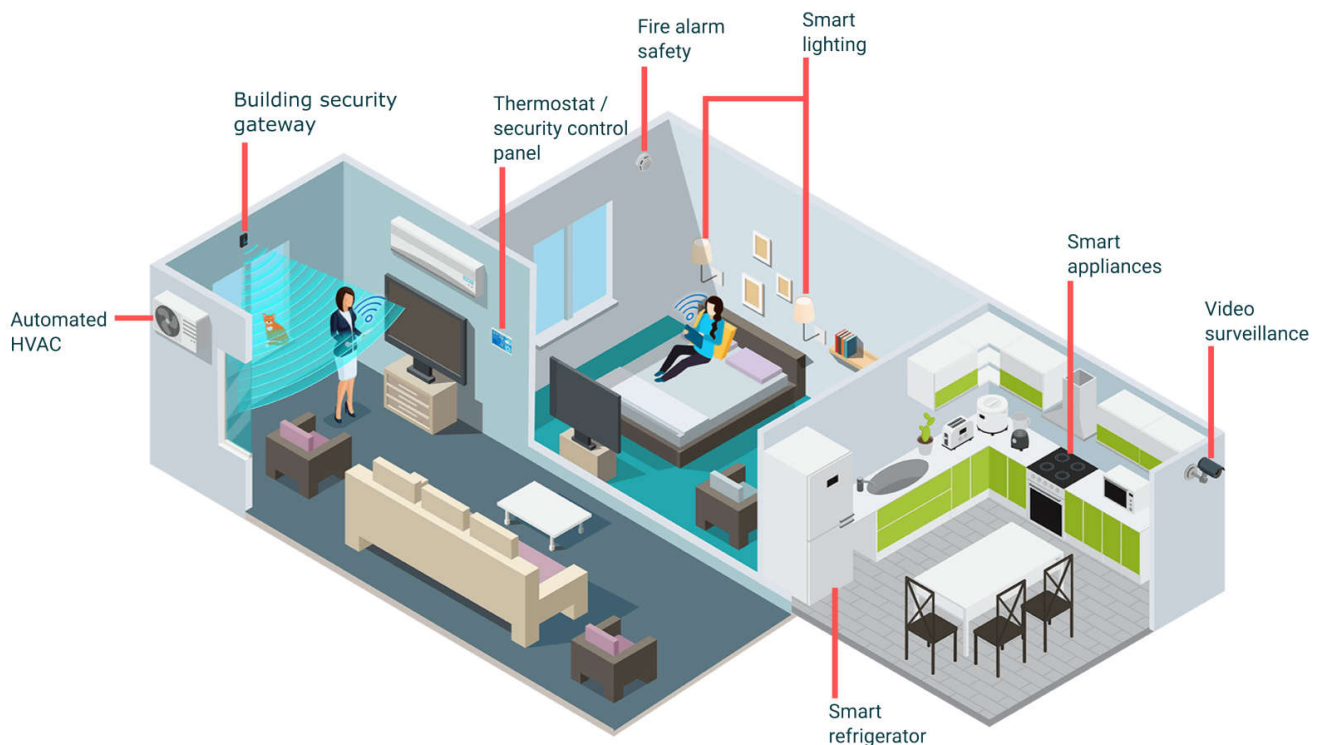


图 2-1. 智慧住宅

隨著 Wi-Fi 感測技術在智慧型裝置市場受到越來越多的關注，在產品部署之前，需要了解一些重要的權衡取舍。與其他技術（如雷達，其擅長精確的位置和速度測量）相比，Wi-Fi 感測技術犧牲了定位精度，換取了穿透障礙物和利用現有基礎設施的能力。

功耗是另一個需要考量的因素，因為 Wi-Fi 感測需要在一定時間內持續傳輸資料包，因此比被動紅外線等超低功耗感測替代方案消耗的功率大得多。因此，目前的 Wi-Fi 感測技術通常沒有針對電池供電設計進行最佳化。

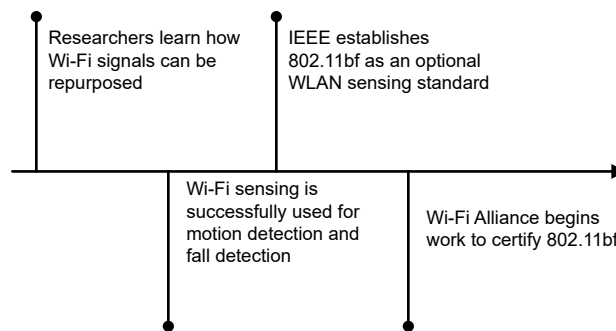
此外，Wi-Fi 感測需要兩台裝置（發送器和接收器）來提取 CSI 資料，這是一個基本性的架構限制。環境因素可能發揮重要作用——例如，房間內密集的障礙物會削弱訊號，而發送器和接收器的物理位置會直接影響感測精度。開發人員必須仔細考慮設備放置位置，並針對特定環境調整演算法，這正是 TI 正積極研究和開發的領域。

表 2-1. Wi-Fi 感測的優勢與考量事項

優勢	考量內容
- 利用現有的 Wi-Fi 基礎設施——無需額外硬體或修改協定 - 在任何照明條件下均能正常運作 - 可穿透物理障礙物和牆壁——無需視線接觸 - 無需攝影機或侵入式監控設備，可保護隱私 - 支援多種空間感知應用（例如，住宅保全、人員佔用檢測、能源最佳化和健康監測）	- 與雷達相比，定位精度較低 - 需要持續進行資料包傳輸（高功耗） - 需要發送器與接收器成對的架構 - 對環境因素和障礙物較為敏感——裝置的放置位置會影響精確度 - 需要針對特定環境進行仔細的演算法調優

3 目前正在進行哪些行業活動？

Wi-Fi 感測技術已經存在十多年了，但在標準化工作開始之前，其實作方式大多是專有的，並具備專屬的硬體支援。在 Wi-Fi 感測技術的早期，許多研究人員開始學習如何將 Wi-Fi 訊號重新用於位置感測和運動偵測。幾年後，開發人員設計出利用 Wi-Fi 感測技術來偵測人體跌倒的裝置。當這項技術最終在 2019 年進入消費市場時，IEEE 介入研究了這項技術，並最終在 2020 年將 802.11bf 標準確立為官方的 WLAN 感測技術標準。802.11bf 標準並非目前基礎設施執行 Wi-Fi 感測所必需，但該標準提供了可選的擴展功能，從而可以實現增強的功能。


圖 3-1. Wi-Fi 感測技術發展時間線

802.11bf 標準透過添加標準化的控制和協調機制來擴展 Wi-Fi 的感測能力。該標準定義了 WLAN 感測設備如何告知其他站點其 WLAN 感測能力、請求和配置支援感測的傳輸以及交換感測回饋和資訊。

隨著開發者對 Wi-Fi 感知技術的興趣日益濃厚，Wi-Fi 聯盟已開始設計框架，以認證 802.11bf 標準實作。此認證計畫旨在促進不同廠商產品之間的互通性，並加速市場接受。

4 德州儀器如何因應 Wi-Fi 感測技術的成長趨勢？

德州儀器透過硬體和軟體創新，讓 Wi-Fi 感測技術得以普及應用。CC3551E 是一款專為感測應用設計的 Wi-Fi 6 和藍牙®低功耗 5.4 無線 MCU。MCU 將 Arm® Cortex®-M33 處理器與嵌入式神經處理單元 (NPU) 結合，透過自訂資料路徑擴展 (CDE) 實現高效能、高能效的 AI 加速。

CC3551E 的架構分配工作負載，使用主 M33 處理器處理標準應用程式程式碼和無線網路協定堆疊，而 NPU 並行執行機器學習演算法和 CSI 資料分析的複雜操作。該裝置可從與連接的對等方交換的標準 Wi-Fi 訊號中原生提取 CSI 資料，並透過 API 公開這些資料，應用程式可以存取這些資料並將其傳遞給 NPU 以進行進一步分析。

提取 CSI 資料只是第一步。開發人員需要能以最少的程式設計專業知識來分析、測試和部署 AI 模型的工具。德州儀器透過兩種互補的方法來解決這個問題。經驗豐富的開發人員如果想要完全掌控 Wi-Fi 感測實作，可以開發具有專有感測功能和市場差異化的客製化設計。對於想要嘗試 Wi-Fi 感測應用但缺乏模型開發專業知識的開發者，德州儀器提供了 CCStudio™ Edge AI Studio。

TI 的 CCStudio™ Edge AI Studio 是一套圖形和命令行工具，可簡化並加速在德州儀器嵌入式設備（如 CC3551E）上進行邊緣 AI 開發。這些工具包括模型編輯器、模型分析器、模型選擇工具和模型製作器，可協助設計人員快速評估模型及其性能，而無需實際連接至評估板。開發人員還可以使用自己的資料訓練模型，以進行特定環境的最佳化，然後透過整合工具部署這些模型，這些工具可以處理 CC3551E 的模型壓縮和設備端 AI 處理。CCStudio™ Edge AI Studio 提供多種開發路徑，讓更多開發者能夠將創新應用推向市場。

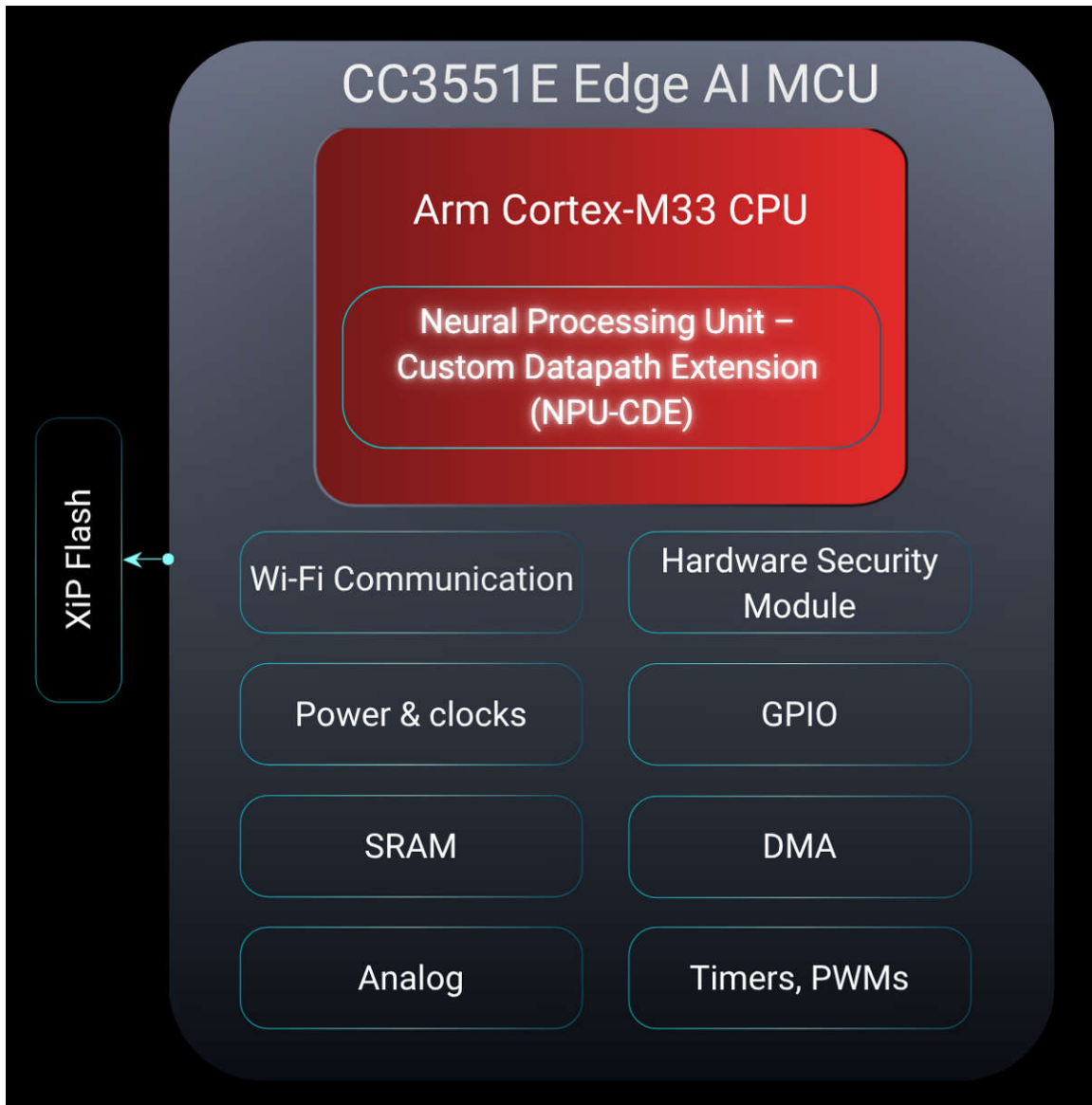


图 4-1. 邊緣 AI + CC3551E 方塊圖

5 其他資源

- 探索 TI 的 [CC3551E](#) – Wi-Fi 6 + BLE 5.4 組合無線 MCU
- 開始使用 TI 的 [LP-EM-CC35X1](#) 評估套件
- 了解 TI 的 [邊緣 AI Wi-Fi 感測使用案例](#)

6 結論

儘管 Wi-Fi 感測技術仍處於發展的早期階段，但 Wi-Fi 感測技術重塑空間感知應用的潛力正變得越來越明顯，尤其是在無需專用硬體或攝影機的情況下添加智慧感測功能方面。憑藉 802.11bf 標準等標準化工作、整合 AI 加速的 CC3551E 等改進的硬體以及 CCStudio™ Edge AI Studio 等符合直覺的軟體工具，實現 Wi-Fi 感測的門檻從未如此之低。現在，任何經驗水平的設計師都可以嘗試感測應用，用自己的資料訓練模型，並部署針對其特定環境量身定制的設計。隨著越來越多的開發人員熟悉這項技術，業界可以預期 Wi-Fi 感測將成為智慧住宅裝置、工業 IoT 系統和聯網應用的標準功能。隨著每一代 Wi-Fi 裝置和配套工具的不斷發展，Wi-Fi 感測技術也將不斷為保護隱私、經濟高效的感測能力開闢新的可能性。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATASHEETS), 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 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](#), [TI's General Quality Guidelines](#), or other applicable terms available either on [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. Unless TI explicitly designates a product as custom or customer-specified, TI products are standard, catalog, general purpose devices.

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

Copyright © 2026, Texas Instruments Incorporated

Last updated 10/2025