

Application Note

毫米波传感器入门



Jitendra Gupta and Pradipta Bandyopadhyay

摘要

毫米波雷达传感器可承受恶劣的环境条件，帮助克服汽车和工业应用中的视觉感应挑战。这些完全集成的产品支持具有远距离、高分辨率和边缘智能的感应应用。本文档可帮助用户充分了解雷达的工作原理并开始开发。本文档的内容以系统的方式编排，以帮助用户了解开发流程。本应用手册介绍了从选择传感器到生产的各个步骤。本文档的范围旨在协助用户完成设计开发的每个阶段。本应用手册还列出了 TI 的所有配套资料，以协助用户了解毫米波传感器并构建定制设计。本应用手册仅专注于汽车领域。

内容

1 简介	3
2 术语	3
3 发现阶段	4
3.1 什么是毫米波传感器？.....	4
3.2 为什么汽车和 ADAS 中需要毫米波传感器？.....	5
3.3 了解频率选择和法规.....	6
3.4 什么是成像雷达？.....	6
3.5 如何查看 TI 产品组合并选择产品？.....	6
4 评估阶段	10
4.1 硬件.....	10
4.2 软件和工具.....	12
4.3 查找和选择合适的合作伙伴资源.....	16
5 开发阶段	18
5.1 主引导加载程序和辅助引导加载程序.....	18
5.2 SDK.....	19
5.3 编译器.....	20
5.4 射频前端配置和毫米波 DFP.....	21
5.5 安全方面.....	22
5.6 安保方面.....	24
5.7 信号处理链.....	24
5.8 MCAL 和 Autosar.....	25
5.9 硬件模块设计.....	26
6 生产阶段	27
6.1 校准.....	27
6.2 毫米波生产测试.....	27
6.3 FCC 和 RED 合规性.....	27
6.4 功能安全认证.....	27
6.5 质量流程和客户故障分析.....	28
6.6 OTP KeyWriter.....	29
7 总结	29
8 参考资料	29

插图清单

图 1-1. 毫米波传感器开发的不同阶段.....	3
图 3-1. 毫米波培训系列登录页面.....	4
图 3-2. Radar Academy 登录页面.....	5

图 3-3. 自主级别和相应的感应要求.....	6
图 3-4. AWR2944 产品页面.....	7
图 3-5. 根据应用从 TI.com 选择零件.....	8
图 3-6. 选择零件所需的 Adas 技术.....	8
图 3-7. 根据应用选择器件.....	9
图 4-1. AWR2944EVM 工具页面.....	10
图 4-2. AWR2944EVM 技术文档.....	11
图 4-3. Radar Toolbox 登录页面.....	12
图 4-4. Radar Toolbox 应用列表.....	13
图 4-5. Radar Toolbox 示例项目列表.....	13
图 4-6. Radar Toolbox 工具列表.....	14
图 4-7. 查找合作伙伴目录.....	16
图 4-8. 浏览“搜索”选项卡.....	17
图 5-1. 软件方框图.....	19
图 5-2. 雷达的通用功能方框图.....	21
图 5-3. Autosar 堆栈.....	25
图 6-1. 质量政策和规程.....	28
图 6-2. 客户故障分析管理流程.....	28

表格清单

表 5-1. 安全交付产品.....	23
--------------------	----

商标

Code Composer Studio™ and EnergyTrace™ are trademarks of Texas Instruments.

以太网® is a registered trademark of Xerox Corporation.

Windows® is a registered trademark of Microsoft Corporation.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.

Arm® is a registered trademark of tm.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

本应用手册分为以下各部分，涵盖毫米波传感器的所有方面。

- **发现阶段**：旨在帮助用户了解毫米波传感器和汽车行业的要求，并为应用选择合适的产品。
- **评估阶段**：深入了解 TI 提供的评估产品，以对传感器执行初始测试并最终确定产品选择。
- **开发阶段**：记录传感器的软件和硬件开发方面。本部分协助用户使用毫米波传感器开发定制项目。
- **生产阶段**：概述毫米波传感器的生产方面。



图 1-1. 毫米波传感器开发的不同阶段

2 术语

本**术语**模块提供与 TI 雷达传感器相关的术语和缩略词的字典。

3 发现阶段

本阶段介绍什么是毫米波传感器、为什么需要传感器，以及如何从 TI 提供的产品组合中选择传感器。

3.1 什么是毫米波传感器？

毫米波 (mmWave) 是一种使用短波长电磁波的特殊雷达技术。雷达系统发射电磁波信号，路径中的物体则反射这些信号。通过捕捉反射的信号，雷达系统可以确定物体的距离、速度和角度。

毫米波雷达可发射波长为毫米级的信号。这被视为电磁谱中的短波长，是该技术的优势之一。处理毫米波信号所需的系统组件（如天线）的尺寸确实很小。短波长的另一项优势是高精度。工作频率为 **76-81GHz**（对应波长约为 **4mm**）的毫米波系统能够检测小至几分之一毫米的运动。

完整的毫米波雷达系统包括发送 (TX) 和接收 (RX) 射频 (RF) 组件：模拟组件（如时钟）、数字组件（如模数转换器 (ADC)）、微控制器 (MCU) 和数字信号处理器 (DSP)。TI 器件可实现一种称为调频连续波 (FMCW) 的特殊毫米波技术。顾名思义，FMCW 雷达连续发射调频信号，以测量距离、角度和速度。这与周期性发射短脉冲的传统脉冲雷达系统不同。

TI 参考配套资料

- 毫米波培训课程提供基础内容和实践示例，供用户学习 FMCW 技术和毫米波传感器的基础知识，从而快速开始开发。可以通过[毫米波培训系列](#)来访问该培训。

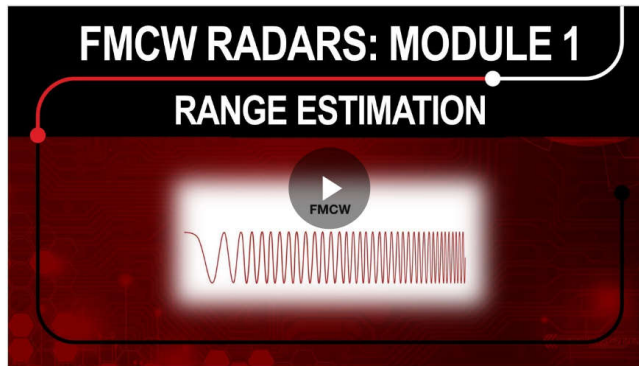
备注

强烈建议所有用户参加该培训系列，以了解 FMCW 雷达的基本工作原理。

VIDEO SERIES

mmWave radar sensors

The mmWave training curriculum provides foundational content and hands-on examples for you to learn the fundamentals of FMCW technology and mmWave sensors to start development quickly. Our portfolio of mmWave sensors include: Automotive mmWave radar sensors and industrial mmWave radar sensors.



Intro to mmWave Sensing : FMCW Radars - Module 1 : Range Estimation

00:22:22 | 06 JUN 2024

[About](#) [Transcript \(4 languages\)](#)

Topics

[Expand all](#)

Introduction to mmWave radar sensing: FMCW radars (5)

 Intro to mmWave Sensing : FMCW Radars - Module 1 : Range Estimation
00:22:22

 Intro to mmWave Sensing : FMCW Radars - Module 2 : The Phase of the IF Signal
00:16:27

 Intro to mmWave Sensing : FMCW Radars - Module 3 : Velocity Estimation
00:13:51

 Intro to mmWave Sensing : FMCW Radars - Module 4 : Some System Design Topics
00:16:30

Intro to mmWave Sensing : FMCW Radars - Module 5 : Angle Estimation

图 3-1. 毫米波培训系列登录页面

- **Radar Academy** 是一系列培训模块，供所有开发人员了解 TI 的雷达传感器产品和底层毫米波雷达技术。该 Academy 探讨了毫米波传感的技术基础，并演示了如何将其用于 TI 的雷达传感器产品系列。可通过 [Radar Academy](#) 访问该培训。

备注

TI 工程师会定期更新 **Radar Academy**，强烈推荐给所有希望学习和了解雷达概念和工作原理的用户。

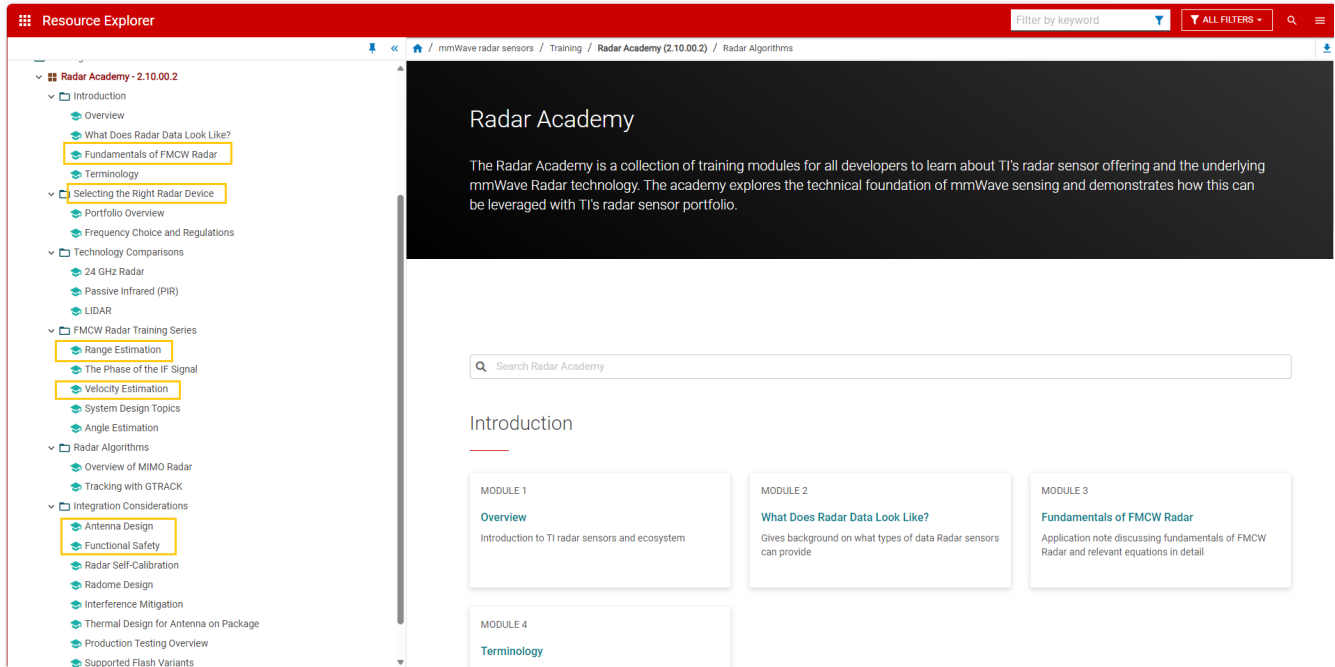


图 3-2. Radar Academy 登录页面

- TI 利用 CMOS 设计在更高晶体管密度和低功耗方面的传统优势打造一个引人注目的毫米波器件系列。[CMOS MMIC 准备就绪 - 技术概述应用手册](#)列举了在 TI 毫米波感应器件中使用 CMOS 面临的一些挑战、相应的设计和优势。
- [从传统 24GHz 转向先进 77GHz 雷达白皮书](#)讨论了行业向 77GHz 雷达的转变以及用户可以实现的各种优势。TI 拥有一系列高度集成的雷达传感器，使客户能够在雷达应用中充分利用 77GHz 频段的优势。

3.2 为什么汽车和 ADAS 中需要毫米波传感器？

随着汽车的自动驾驶水平提高，选择合适的传感器数量和类型变得更加复杂。虽然有传统的传感方案可供选择，但多年来，雷达在汽车行业中的应用已使安全和效率的定义发生了积极的变化。

由于雷达可以在雨、雪、灰尘和明亮的阳光等极端环境条件下工作，还能提供精确的距离和速度信息，因此雷达被认为是满足新车评价规程 (NCAP) 要求的最合适的感应方式。车辆架构越来越依赖于智能雷达传感器，所有处理都在边缘进行，以将对象列表发送到中央电子控制单元。

雷达传感已成为所需高级驾驶辅助系统 (ADAS) 功能的一种经济高效的感应方式，可以满足汽车工程师学会的车辆自主级别 2+ 甚至 3+ 的要求，如 [图 3-3](#) 所示。

Level 2+ 5 sensors	Front: 1 short range 1 medium range
	Rear: 1 short range 1 medium range 1 long range
Level 3+ 7 or more sensors	All of the sensors named above for front and rear Plus sensors on each side of the car for 360° coverage
Level 4 and beyond All sensing modalities	Front: Short- and medium-range sensors Rear: Short-, medium- and long-range sensors Sides: May include all sensing modalities including cameras, radar and lidar

图 3-3. 自主级别和相应的感应要求

欧洲新车安全评鉴协会 (NCAP) 近期更新了雷达标准，以便在新车中改善驾驶辅助功能。NCAP 标准因地区而异。在美国，NCAP 由美国国家公路交通安全管理局 (NHTSA) 监管。全球 NCAP 是一个集中的组织。但是，所有组织都有着共同的目标：设定标准来提高汽车和驾驶安全性。这些组织提供 0-5 星的评级来帮助消费者在购买新车时做出明智决策。

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI)，[ADAS 工程师需要了解的雷达 NCAP 新要求技术文章](#)提供了更详细的信息。
- 德州仪器 (TI)，[使用 TI 的 AWR2944 雷达传感器满足角雷达 NCAP 法规视频](#)协助理解 NCAP 法规和 TI 的 AWR2944 性能。

3.3 了解频率选择和法规

TI 的毫米波雷达传感器可在以下两个频段之一运行：60GHz 频段或 77GHz 频段。根据当地政府法规，雷达产品可以在其中一个频段运行。通常，77GHz 频段用于 ADAS 汽车应用，例如车辆防撞和油箱液位感应应用。60GHz 频段通常用于车内汽车应用（例如儿童存在检测）和商业应用（例如家用跌倒检测）。

TI 参考配套资料

Radar Academy 模块介绍了有关全球频率调节的 TI 毫米波。可从[频率选择和法规](#)访问本培训。

3.4 什么是成像雷达？

成像雷达通过传感器配置实现，其中多个低功耗 TI 毫米波传感器级联在一起并作为一个单元同步运行，具有许多接收和发送通道，可显著提高角度分辨率和雷达测距性能。角度分辨率是区分相同距离和相同相对速度物体的能力。

TI 参考配套资料

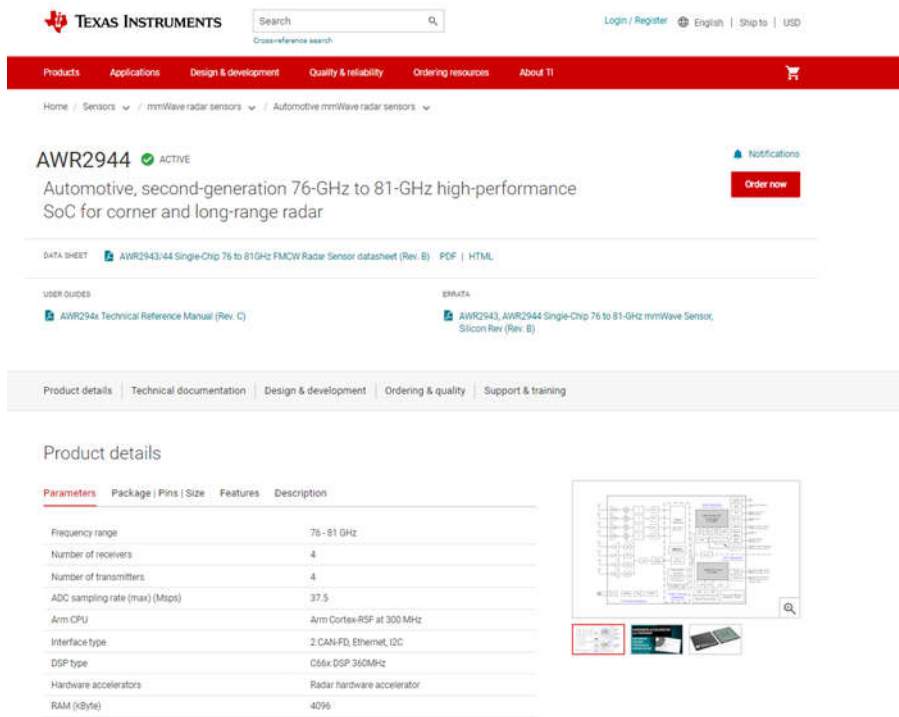
以下配套资料捕获了成像雷达的所有详细信息。

- [成像雷达](#)是 TI.com 上成像雷达的登录页面。用户可以访问有关成像雷达的所有配套资料。
- [成像雷达：《一个传感器管控所有》技术文章](#)说明了什么是成像雷达以及为什么汽车领域需要成像雷达。可在级联系统中使用 AWR2243 和 AWR1243 等 TI 器件，以满足成像雷达的要求。
- [毫米波汽车成像雷达系统 - 远距离检测视频](#)展示了 TI 成像雷达系统的功能。毫米波汽车成像雷达系统利用四个 AWR1243 传感器作为一个单元来实现远距离检测。

3.5 如何查看 TI 产品组合并选择产品？

[汽车毫米波雷达传感器](#)展示 TI.com 上的汽车毫米波传感器和所有产品。提供所有必需信息，如产品编号、频率范围、发送器和接收器数量、接口类型等，以找到适合应用的理想产品。

然后，可以转至所选器件的特定产品页面来查看产品。产品页面提供所有产品详细信息、技术文档、设计和开发实用程序等，如下所示。请注意，AWR2944 是作为参考示例使用。



AWR2944 ACTIVE Notifications Order now

Automotive, second-generation 76-GHz to 81-GHz high-performance SoC for corner and long-range radar

DATA SHEET [AWR2943/44 Single-Chip 76 to 81-GHz FMCW Radar Sensor datasheet \(Rev. B\)](#) PDF | HTML

USER GUIDES [AWR294x Technical Reference Manual \(Rev. C\)](#) ERRATA [AWR2943, AWR2944 Single-Chip 76 to 81-GHz mmWave Sensor, Silicon Rev \(Rev. B\)](#)

Product details | Technical documentation | Design & development | Ordering & quality | Support & training

Product details

Parameters	Package Pins Size	Features	Description
Frequency range			76 - 81 GHz
Number of receivers			4
Number of transmitters			4
ADC sampling rate (max) (MSPS)			37.5
Arm CPU			Arm Cortex-R5F at 300 MHz
Interface type			2 CAN-FD, Ethernet, I2C
DSP type			C66x DSP 360MHz
Hardware accelerators			Radar hardware accelerator
RAM (KByte)			4096

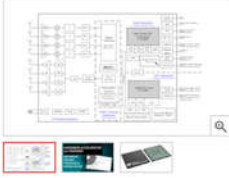


图 3-4. AWR2944 产品页面

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI), [选择合适的雷达器件网页](#)

3.5.1 根据应用选择零件

用户可以根据目标应用选择 TI 器件。图 3-5 到 图 3-7 以简化的方式解释该流程。

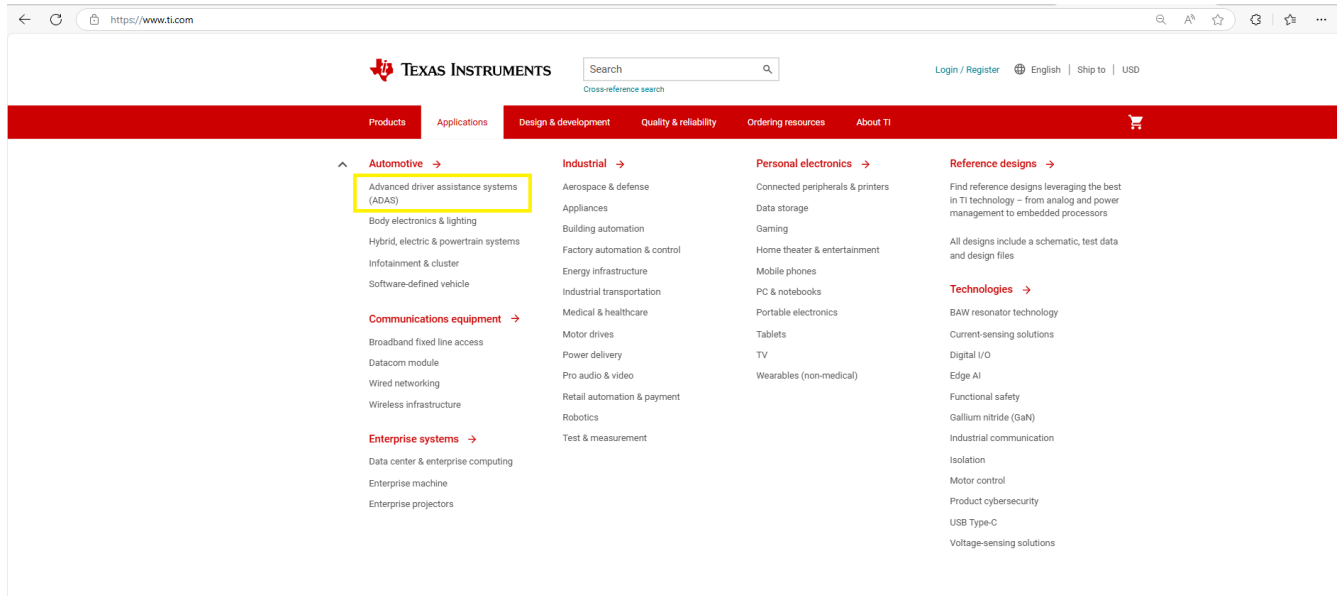


图 3-5. 根据应用从 TI.com 选择零件

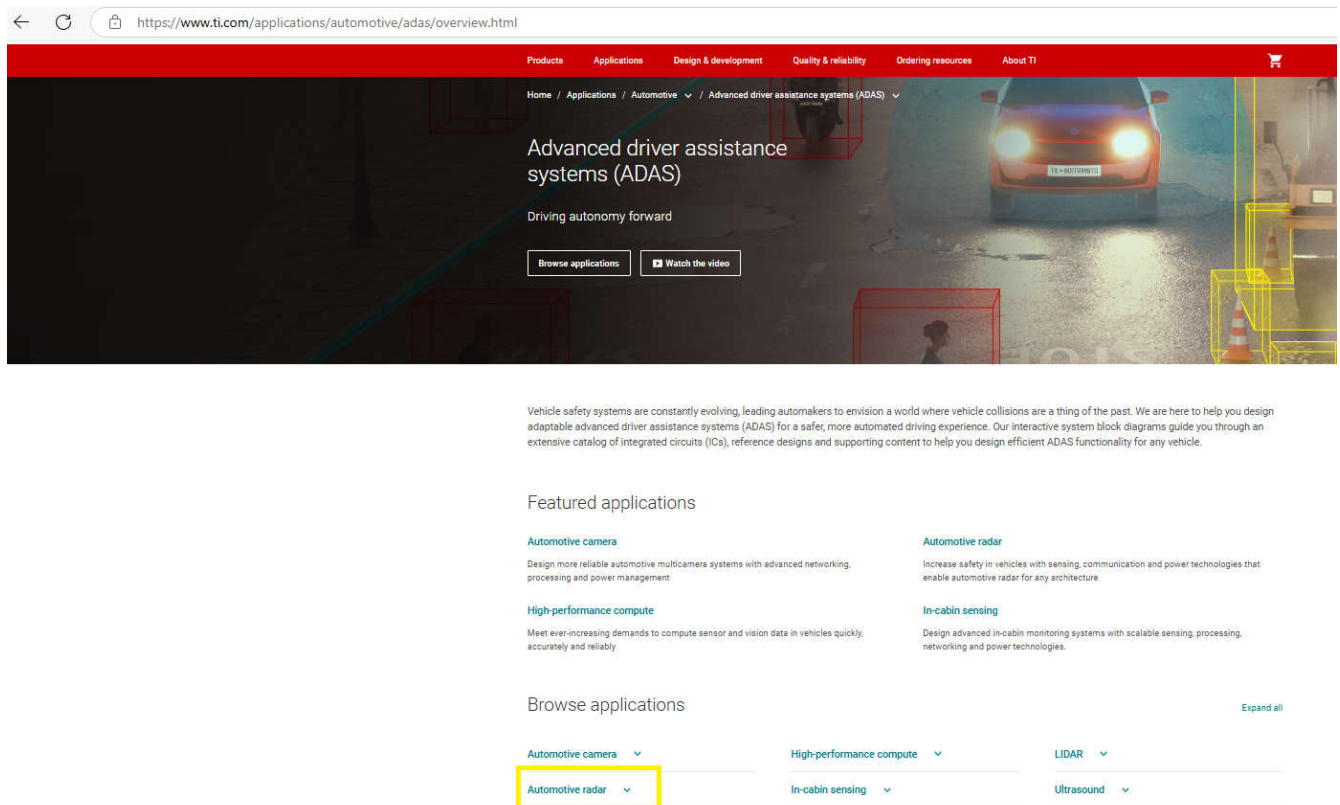


图 3-6. 选择零件所需的 Adas 技术

Browse applications

[Expand all](#)

Automotive camera ▾

High-performance compute ▾

LIDAR ▾

Automotive radar ▲

In-cabin sensing ▾

Ultrasound ▾

Imaging radar

Long range radar - 76 to 81GHz with RFCMOS

Radar ECU

Satellite/streaming radar module for central processing

Short/medium range radar - 76 to 81GHz with RFCMOS

Ultra short range radar

[→ Learn more](#)

图 3-7. 根据应用选择器件

4 评估阶段

评估产品分为硬件和软件工具产品。以下部分提供了对这些产品的更多见解。本阶段还介绍我们的合作伙伴提供的各种资源，帮助用户入门、评估或开发。

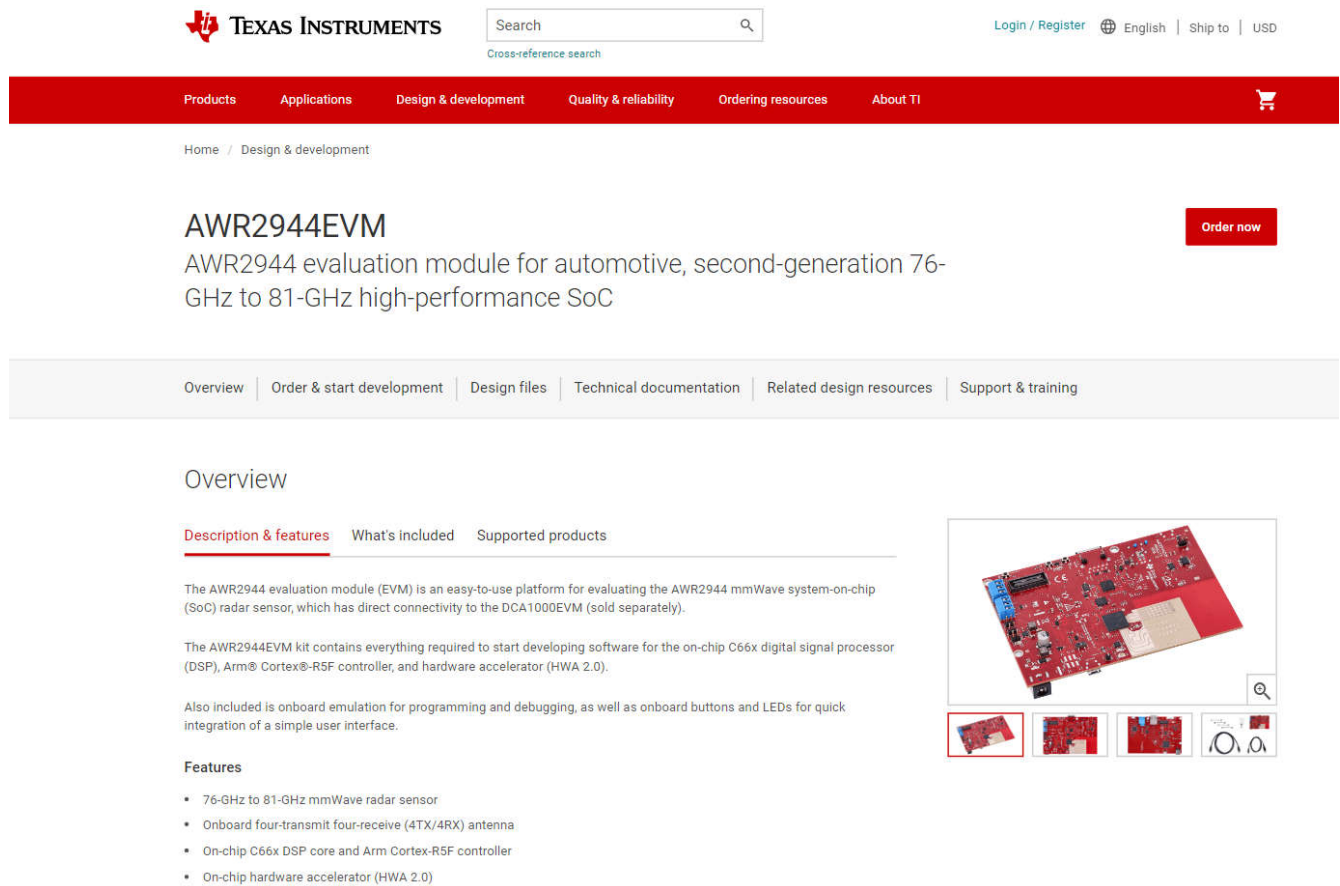
4.1 硬件

为了帮助用户进行评估，我们提供了多种评估模块和采集板。TI 建议使用评估硬件来了解毫米波传感器并根据应用要求评估传感器性能。

4.1.1 EVM

评估模块 (EVM) 是用于评估任何毫米波传感器的易用平台。EVM 附带快速入门指南，可使用预编程的 OOB 演示即插即用 EVM。

作为示例，提供了 AWR2944 网站剪辑以供参考。可以直接从网站订购 EVM 进行评估。该网页还提供 EVM 的设计文件 (包含原理图、BOM 等)。可在 TI.com 上的 EVM 工具页面找到 EVM 的用户指南和其他相关文档。



The screenshot shows the Texas Instruments website interface for the AWR2944EVM product. At the top, there is a search bar and navigation links for 'Login / Register', 'English', 'Ship to', and 'USD'. Below the navigation bar, the product name 'AWR2944EVM' is prominently displayed, along with a description: 'AWR2944 evaluation module for automotive, second-generation 76-GHz to 81-GHz high-performance SoC'. A red 'Order now' button is visible. The page also features a navigation menu with options like 'Overview', 'Order & start development', 'Design files', 'Technical documentation', 'Related design resources', and 'Support & training'. The main content area includes a 'Description & features' section with text about the EVM's capabilities and a list of features such as '76-GHz to 81-GHz mmWave radar sensor' and 'On-board four-transmit four-receive (4TX/4RX) antenna'. A large image of the AWR2944EVM board is shown on the right side of the page.

图 4-1. AWR2944EVM 工具页面

Design files

↓ AWR2944EVM Schematic, Assembly, and BOM Files (Rev. A)	SPRR440A.ZIP (7408 KB)
↓ AWR2944EVM Design Database and Layout Files (Rev. A)	SPRR441A.ZIP (17578 KB)

Technical documentation

★ = Top documentation selected by TI

Type	Title	Date ↓↑
★ EVM User's guide	AWR2944 Evaluation Module User's Guide (Rev. B)	03 Jul 2024
Data sheet	AWR2943/AWR2944 Single-Chip 76 to 81GHz FMCW Radar Sensor datasheet (Rev. C)	30 Jul 2024
User guide	AWR294x Technical Reference Manual (Rev. C)	21 Nov 2023
Errata	AWR2943, AWR2944 Single-Chip 76 to 81-GHz mmWave Sensor, Silicon Rev (Rev. B)	27 Oct 2023
Design guide	High-End Corner Radar Reference Design	12 Nov 2021
Certificate	AWR2944EVM EU RoHS Declaration of Conformity (DoC)	08 Nov 2021
Application note	mmWave Radar Radome Design Guide	17 Aug 2021
Application note	TI mmWave Radar sensor RF PCB Design, Manufacturing and Validation Guide	07 May 2018

图 4-2. AWR2944EVM 技术文档

备注

用户还可以查看我们的合作伙伴提供的其他 EVM 和电路板，以帮助实现评估目标。该过程如 节 4.3 中所述。

4.1.2 DCA1000EVM

DCA1000 评估模块 (EVM) 是一种捕获设计，可通过 TI AWR 雷达传感器 EVM 的两通道 (使用 AWR1642、AWR1843、AWR294x) 和四通道 (使用 AWR2243) 低电压差分信号 (LVDS) 流量提供实时数据捕获和流式传输。数据可以通过 1Gbps 以太网®实时流式传输到运行 MMWAVE-STUDIO 工具的 PC 机上，以进行捕获、可视化，然后可以将其传递给所选的应用进行数据分析和算法开发。

TI 参考配套资料

- [DCA1000 EVM](#) 是 DCA1000EVM 的登录页面。用户可以参考设计文件、技术文档、支持和培训资源并订购套件。
- [DCA1000 培训视频](#)介绍了如何使用毫米波 EVM 以及 DCA1000 采集卡和 mmWave Studio 捕获和后处理原始数据

备注

DCA1000 与 MMWAVE-STUDIO 构成非常持久的组合，用于评估 TI 的毫米波传感器产品。可直接使用 EVM 运行刷写前的 OOB 演示，并且可以使用 DCA1000 采集 ADC 数据。然后，可以使用任何后处理算法评估该数据的准确性和正确性。TI 强烈建议使用此设置进行评估。

4.2 软件和工具

TI 提供各种软件包和工具来支持用户评估和开发毫米波传感器。尽管 TI 建议使用所有软件包、IDE、编译器包等，但这并不约束或限制用户使用所有工具、IDE、调试器、编译器包等。

对于毫米波传感器评估和开发，TI 提供了 SDK、MCAL、SDL、CLANG 编译器包以及许多工具来评估射频性能或辅助开发，如 Radar Toolbox、mmWave Studio、Uniflash 等。

4.2.1 软件开发套件 (SDK)

每个包含集成 MCU 的 TI 雷达传感器都有一个关联的 SDK。SDK 包含可充分利用雷达传感器处理功能所需的所有软件组件，如内核、驱动程序和示例代码。SDK 还包含每个驱动程序的单元测试，用户可以修改或使用这些测试来评估用例以及检查是否满足应用要求。

备注

SDK 将在开发阶段部分详细讨论。

TI 参考配套资料

- AWR1443、AWR1642、AWR1843、AWR6843 : [毫米波 SDK](#)
- AWR2944、AWR2944P、AWR2544 : [毫米波 MCU Plus SDK](#)

4.2.2 Radar Toolbox

Radar Toolbox 和 Resource Explorer 是各种应用的工具和示例代码集合。用户可以找到各种应用的示例代码和用于查看输出数据的可视化工具。通过 [图 4-3](#) 至 [图 4-6](#) 可了解工具箱和内容。

备注

TI 强烈建议使用工具箱参考、学习和了解毫米波传感器的开发。

备注

可通过 [Radar Toolbox](#) 访问 Radar Toolbox。

[图 4-3](#) 展示了 Radar Toolbox 的登录页面。

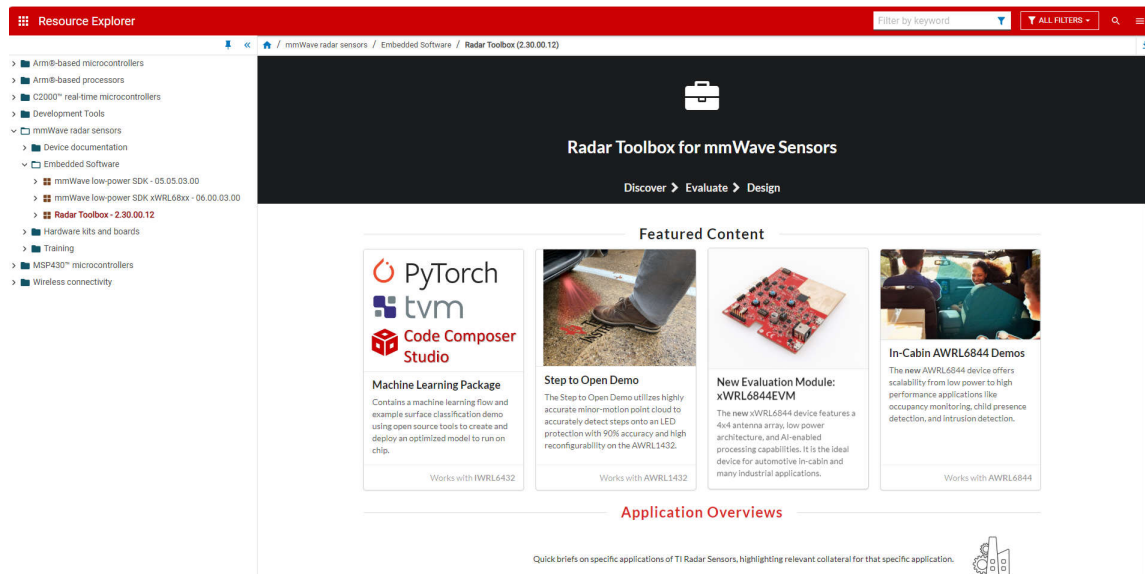


图 4-3. Radar Toolbox 登录页面

[图 4-4](#) 展示了工具箱涵盖的各种应用。TI 为汽车领域中的大多数热门应用（例如角雷达、前置雷达等）提供参考代码。

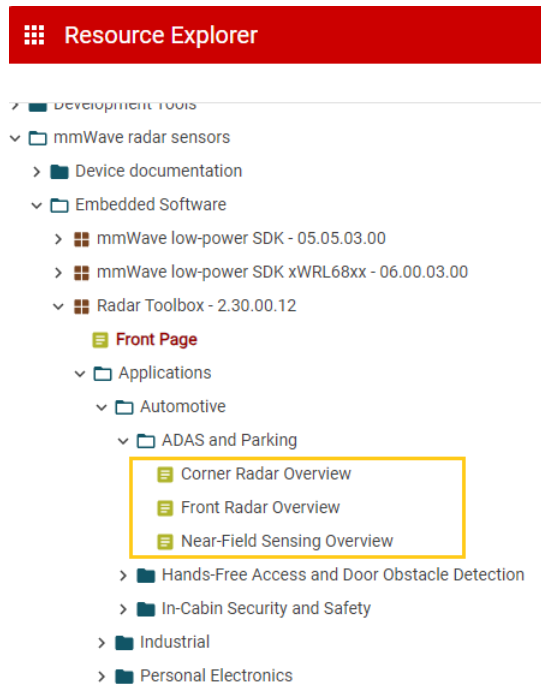


图 4-4. Radar Toolbox 应用列表

TI 提供了许多示例项目，供用户根据应用要求执行评估并进入开发阶段。Radar Toolbox 涵盖的主题包括安全演示、HECR 演示、MRR 或 SRR 演示和 BSD。

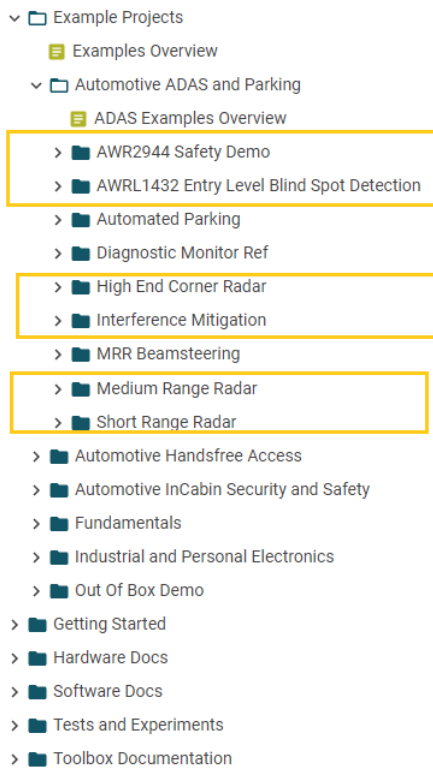


图 4-5. Radar Toolbox 示例项目列表

TI 支持多种工具。工具箱中提供 JTAG flasher 或 Studio CLI 等最常用的工具。

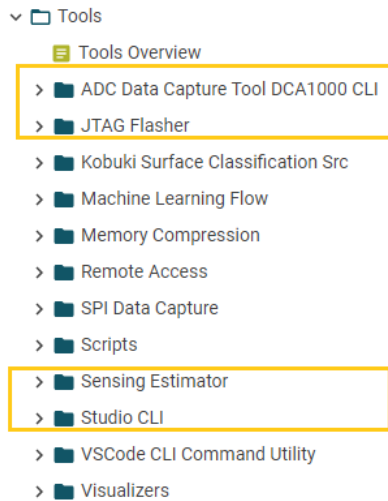


图 4-6. Radar Toolbox 工具列表

4.2.3 mmWave DFP

mmWave - DFP 是用于 TI 雷达收发器器件的器件固件包。此固件包提供了固件、ROM 补丁和 API，可从外部主机器件实时无缝控制和配置射频操作，并支持进行定期校准和功能安全监控。这使得射频收发器能够自包含，并能够适应动态条件（例如温度变化），并尽可能地减少外部主机角度的外部干预。

备注

DFP 将在开发阶段部分详细讨论。

TI 参考配套资料

- AWR1443、AWR1642、AWR1843、AWR6843：[毫米波 SDK](#)
- AWR2944、AWR2944LC、AWR2544：[毫米波 MCU Plus SDK](#)
- AWR1243、AWR2243：[MMWAVE-DFP](#)

4.2.4 毫米波感应估算器

毫米波感应估算器是一款图形化 Web 工具，旨在简化 TI 雷达传感器的线性调频脉冲设计。该工具可使用从雷达传感器暴露的各种可配置参数快速进行实验，并实时计算和显示性能指标。

TI 参考配套资料

- [感应估算器](#)可直接指向感应估算器 Web 工具。
- [毫米波感应估算器概述视频](#)概括介绍了毫米波感应估算器工具，并展示了如何使用该工具为所需的用例生成毫米波传感器线性调频脉冲配置。

4.2.5 mmWave Studio

mmWave studio 是一款独立的 Windows® GUI，它具有配置和控制毫米波传感器模块以及收集模数转换 (ADC) 数据以进行离线分析的功能。ADC 数据捕获旨在评估和表征射频 (RF) 性能，以及进行信号处理算法的 PC 开发。MMWAVE-STUDIO 提供线性调频脉冲设计评估和原型验证功能，并可对我们的雷达器件高级功能进行实验。MMWAVE-STUDIO 适用于直接收集 ADC 数据并微调低电平线性调频脉冲参数的高级用户。雷达演示的典型评估不需要此功能。MMWAVE-STUDIO 提供了 ADC 数据的基本后处理和可视化，以及基于 MATLAB® 的后处理示例，这些示例可用作入门参考。

TI 参考配套资料

- [MMWAVE-STUDIO](#) 指向 MMWAVE-STUDIO 产品页面。所有资源都可以在此页面上找到。

备注

MMWAVE-STUDIO 直接连接到我们的传感器模块，并需要 DCA1000EVM 将 ADC 数据流式传输到 PC 以进行捕获。TI 强烈建议所有用户使用这种组合来捕获原始 ADC 数据并对数据执行各种后处理方法。

4.2.6 Code Composer Studio™

Code Composer Studio™ 是适用于 TI 微控制器和处理器的集成开发环境 (IDE)。CCS 包含一整套用于开发和调试嵌入式应用的工具。Code Composer Studio 包含用于优化的 C/C++ 编译器、源代码编辑器、项目构建环境、调试器、性能分析器以及很多其他功能。直观的 IDE 将引导您完成应用开发流程的每个步骤熟悉的工具和界面使入门变得简单。

CCS 的一些显著特性如下所述。

- Code Composer Studio 包括专为 TI 器件获得卓越性能和理想代码大小而定制的 C/C++ 编译器。TI Arm Clang 编译器将 LLVM 和 Clang 与 TI 增添的功能 (如链接时优化) 相结合，为基于 Arm® 的 TI 微控制器提供出色的代码大小。
- 通过 Resource Explorer 可以访问嵌入式开发所需的资源。快速访问为所使用器件定制的示例、培训、软件开发套件和文档。Resource Explorer 随 Code Composer Studio 一起提供，也可以通过 TI 开发人员专区在云中获取。
- SysConfig 是一款直观而全面的工具，用于配置引脚、外设、驱动程序、无线电和其他组件。SysConfig 可简化配置难题并加快软件开发。
- EnergyTrace™ 是一款分析工具，用于测量和显示微控制器和无线连接应用的电能系统配置并帮助优化应用，从而实现超低功耗。
- Code Composer Studio 提供许多高级调试功能。利用运行时对象视图可深入了解 RTOS 对象 (例如任务、堆栈、计时器和信标) 的状态。
- Code Composer Studio 拥有完整的脚本环境，允许自动执行重复性任务，例如测试和性能基准测试。

TI 参考配套资料

[CCSTUDIO](#) 指向 CCSTUDIO 的登录页面。所有资源均在用户的登录页面上提供。

备注

不强制要求将 CCS 用作唯一的 IDE 和调试选项。用户可以选择使用所选的 IDE 和任何调试程序。不存在器件限制。

4.2.7 UniFlash

UniFlash 是一款用于对 TI 毫米波传感器板载闪存进行编程的软件工具。UniFlash 提供图形界面和命令行界面。UniFlash 工具可用于使用最终应用映像对闪存进行编程。

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI)，[UNIFLASH](#) 网页

备注

TI 支持多个接口来刷写 EVM 上的板载存储器。支持 UART、JTAG、以太网和 CAN 等接口，TI 还提供支持刷写的工具。SDK 中的以下路径提供了所有详细信息，TI 建议仔细阅读内容以了解 TI 提供的所有刷写实用程序。提供了 AWR2944 器件参考资料的文件路径。用户还可以选择与该器件对应的文件夹。工具用法保持不变。

ti/mmwave_mcuplus_sdk_xx_xx_xx_xx/mcu_plus_sdk_awr294x_xx_xx_xx_xx/docs/api_guide_awr294x/TOOLS_FLASH.html

4.3 查找和选择合适的合作伙伴资源

我们的合作伙伴提供专用产品和服务来帮助用户解决问题。搜索我们的合作伙伴目录，以查找可满足您需求的技术专家并与其交流，从而加快产品上市步伐。

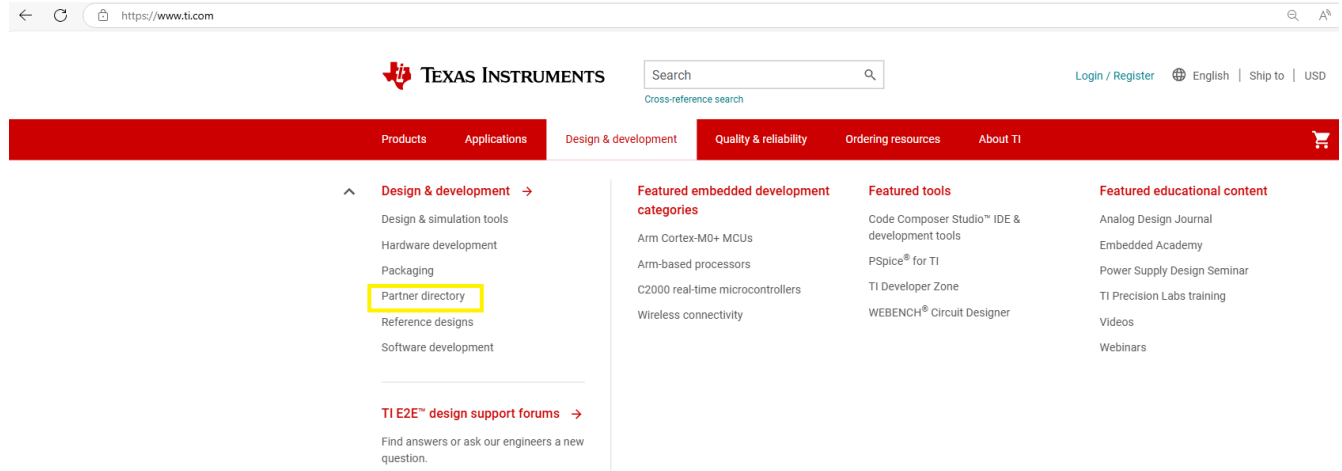


图 4-7. 查找合作伙伴目录

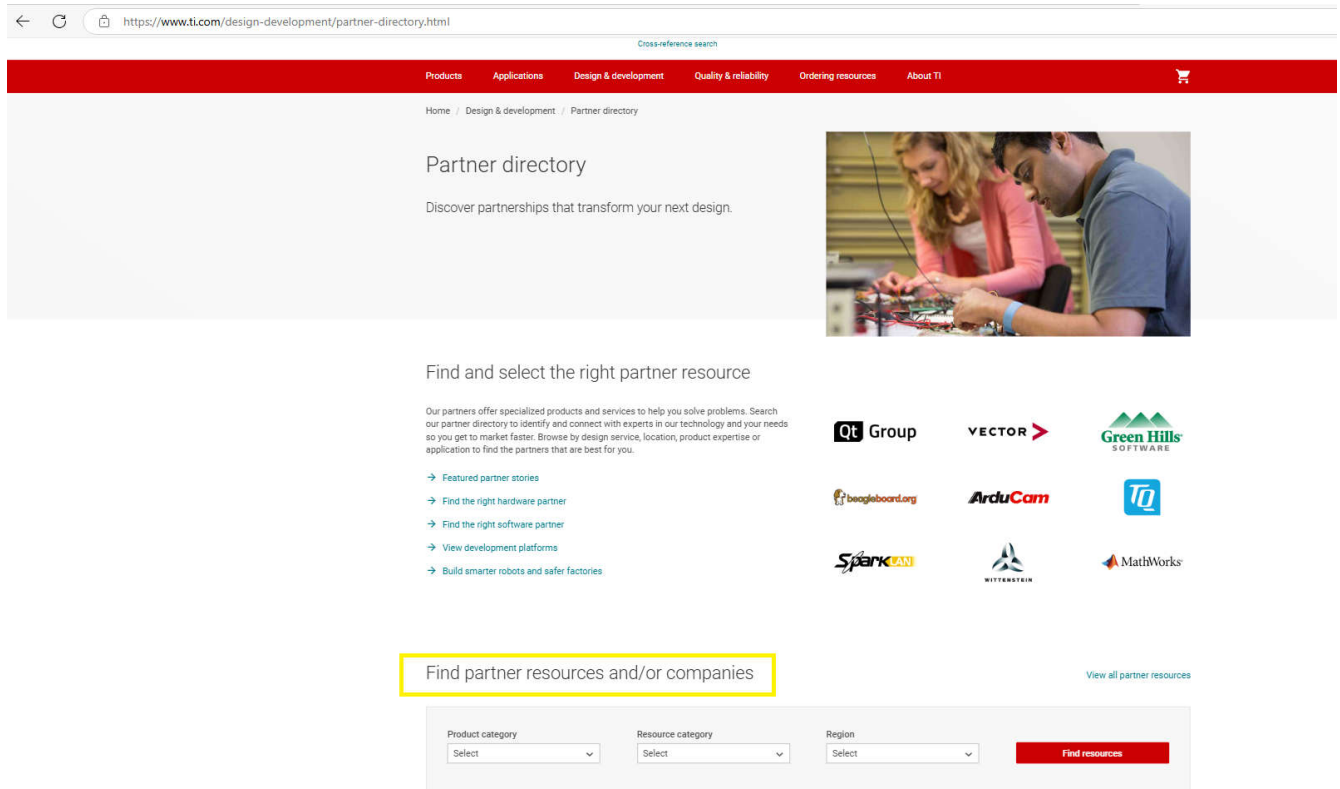


图 4-8. 浏览“搜索”选项卡

“搜索”选项卡使用户可以基于区域执行资源搜索，以查找硬件、软件开发及其他相关资源。请务必查看该页面以解决任何开发需求。

5 开发阶段

开发阶段可大致分为七个方面

- 主引导加载程序和辅助引导加载程序
- SDK
- 编译器
- 射频前端配置和毫米波 DFP
- 安全方面
- 安保方面
- 信号处理链
- MCAL, Autosar
- 硬件模块设计

让我们详细讨论所有方面以便更好地理解。对于每个方面，还需要提到一组文档，这有助于更好地设计/开发该阶段。

5.1 主引导加载程序和辅助引导加载程序

引导加载程序在大多数嵌入式器件中发挥着至关重要的作用。引导加载程序是一小段软件，在嵌入式器件上的主应用程序代码之前运行。主要目的是初始化硬件、设置内存，以及将应用代码从闪存存储器等存储器件加载到 RAM 中。引导加载程序还可以提供其他功能，例如更新固件、调试或与其他器件通信。

引导加载程序主要有两种类型：主引导加载程序和辅助引导加载程序。主引导加载程序是器件上电或复位时执行的第一个代码。这通常存储在只读存储器 (ROM) 或只读存储器的受保护区域中。主引导加载程序负责执行基本硬件初始化并跳转到辅助引导加载程序或应用代码。辅助引导加载程序是主引导加载程序之后的代码。这通常存储在闪存存储器或外部存储器件中。辅助引导加载程序负责将应用代码从存储器件加载到 RAM，并将控制功能传输到应用。辅助引导加载程序还可以执行更复杂的任务，例如检查应用代码的完整性、验证数字签名或允许用户选择不同的固件版本。请参阅以下应用手册，深入了解毫米波引导加载程序。

备注

开发人员必须参考 SDK 中提供的用于引导过程的示例驱动程序。示例代码为用户增加了大量见解，并提供了定制引导驱动程序开发的基本框架。请使用以下路径。(AWR2944 器件供参考)

ti\mmwave_mcuplus_sdk_04_xx_xx_xx\mcu_plus_sdk_awr294x_xx_xx_xx_xx\examples\drivers\boot

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI)，适用于第一代器件引导加载程序的 [AWR1642、AWR1843 引导加载程序流程应用手册](#)。
- 德州仪器 (TI)，[AWR1642、AWR1843 应用启动顺序应用手册](#) 详细介绍了第一代器件的启动序列。
- 德州仪器 (TI)，适用于第二代器件引导加载程序的 [AWR294x、AWR2544 主引导加载程序和辅助引导加载程序应用手册](#)。

5.2 SDK

图 5-1 显示 SDK 中的软件模块。

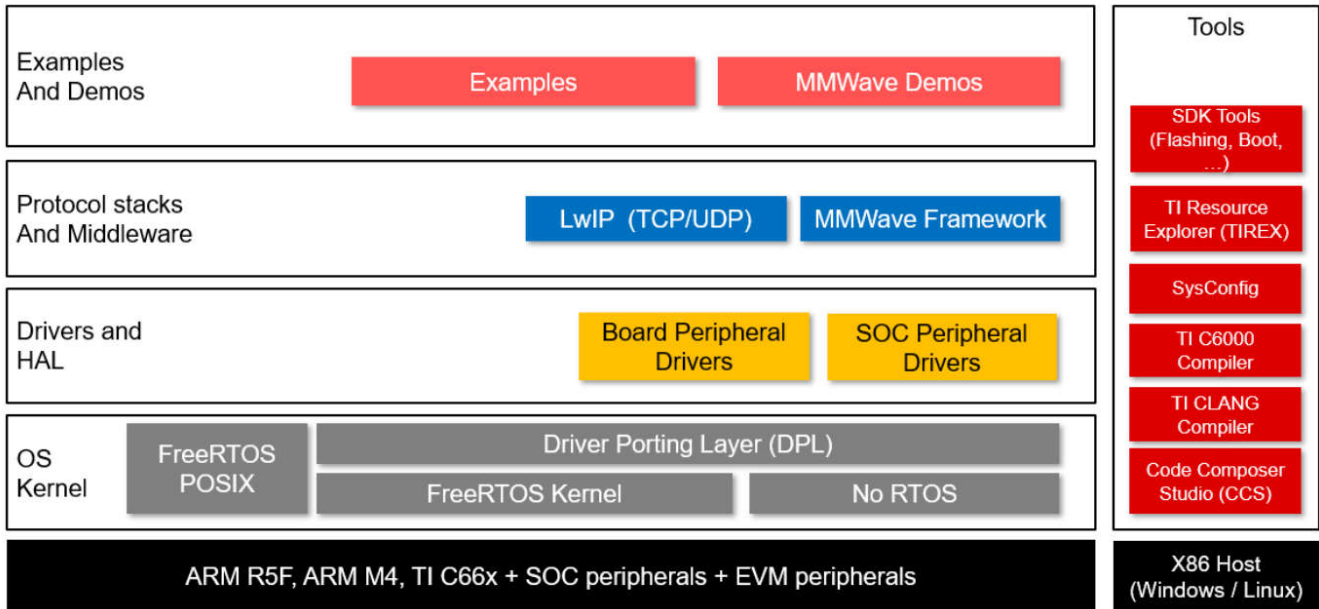


图 5-1. 软件方框图

请使用以下文件路径参阅 SDK 的自述文档。建议用户通读 图 5-1 中的所有模块，以更好地理解每个部分。此处使用 AWR2944 作为参考。

[ti/mmwave_mcuplus_sdk_xx_xx_xx_xx/mcu_plus_sdk_awr294x_xx_xx_xx_xx/docs/api_guide_awr294x/index.html](https://ti.com/mmwave_mcuplus_sdk_xx_xx_xx_xx/mcu_plus_sdk_awr294x_xx_xx_xx_xx/docs/api_guide_awr294x/index.html)

毫米波 SDK 分为两大组件：毫米波套件和毫米波演示。

毫米波套件

毫米波套件是毫米波 SDK 的基础软件部分，并包含以下更小的组件：

- 驱动程序 (MCU PLUS SDK 的一部分)：器件驱动程序库以及 SOC 内外设的 API。示例包括 I2C、GPIO、UART。
- DPL (MCU PLUS SDK 的一部分)：驱动程序用于提取象操作系统环境的 API。示例包括信标、硬件中断、互斥、时钟。
- mmWaveLink 和固件 (器件固件包 (dfp) 的一部分)
- mmWave API
- 数据处理层 (管理器、处理单元)
- 电路板设置和闪存工具包

毫米波演示

SDK 提供了介绍毫米波应用各种控制和数据处理方面的演示。PC 上演示输出的数据可视化作为这些演示的一部分提供。这些演示是提供给客户的示例代码，用于了解毫米波器件和 SDK 的基础知识。这些演示还帮助用户着手开发定制应用。

备注

开始使用毫米波 SDK 的最佳方法是开始运行作为软件包一部分提供的各种演示之一。TI 毫米波 EVM 提供预先刷写的毫米波 OOB 演示。成功运行 OOB 演示是开始开发毫米波传感器的重要步骤，强烈建议新手开发人员使用。

这些演示（源代码和预编译的二进制文件）位于 `mmwave_mcuplus_sdk_<ver>/ti/demo/<platform>/mmw/` 文件夹。

备注

毫米波演示使用毫米波 SDK（软件开发套件）中的驱动程序展示 SoC 的一些雷达感应和物体检测功能。因此，用户可以指定线性调频脉冲轮廓并实时显示检测到的物体和其他信息。演示文档文件夹中提供了有关该演示的详细说明，可以使用以下文件路径浏览：`mmwave_mcuplus_sdk_<ver>/docs/mmwave_sdk_module_documentation.html`。该演示可使用 TI Gallery App [mmWave_Demo_Visualizer](#) 可视化检测到的物体和其他实时信息。

备注

MMWAVE MCUPLUS SDK 用户指南是所有用户的重要文档。该文档深入介绍了 SDK 入门、运行 OOB 演示、SDK 雷达处理链、优化技术和各种调试技术，从而为用户提供帮助。下面提供了该文档的路径。`C:\ti\mmwave_mcuplus_sdk_xx_xx_xx_xx\mmwave_mcuplus_sdk_xx_xx_xx_xx\docs`

TI 参考配套资料

- AWR1443、AWR1642、AWR1843、AWR6843：[毫米波 SDK](#)
- AWR2944、AWR2944P、AWR2544：[毫米波 MCU Plus SDK](#)

5.3 编译器

TI 提供两组编译器

- TI CLANG 编译器：TI 针对 ARM 内核的基于 CLANG 的 ARM 编译器
- TI C6000 编译器：TI 的 DSP 内核编译器

TI Arm Clang 编译器

[tiarmclang](#) 编译器基于开源 LLVM 编译器基础架构和 Clang 前端。[tiarmclang](#) 编译器使用 TI Linker 和 C 运行时，这可带来提高稳定性和减小代码量的额外优势。[tiarmclang](#) 的优势包括：

- 出色的 C/C++ 标准支持
- 基于源代码的覆盖率
- 通过 [armcl/gcc](#) 缩减了代码大小
- GCC 兼容性
- 全面的文档：入门指南、迁移指南和编译器工具用户手册
- [编译器鉴定套件](#) 可帮助编译器符合 ISO 26262 和 IEC 61508 等功能安全标准。

TI C6000 编译器

TI C6000 C/C++ 编译器和汇编语言工具支持开发适用于 TI C6000 数字信号处理器平台的应用，包括 C66x 多核、C674x 和 C64x+ 单核数字信号处理器。下面列出了 C6000 的显著特性。

- 支持 C++14 标准 ISO/IEC 14882:2014。
- 编译 OpenCL-C 内核时，缩短了编译时间并减少了内存使用量。
- 提高了 OpenCL-C 矢量类型性能。

备注

TI 不强制要求用户使用任何特定的编译器集。可以根据 TI 或第三方的用户偏好选择和使用编译器包和工具。

5.4 射频前端配置和毫米波 DFP

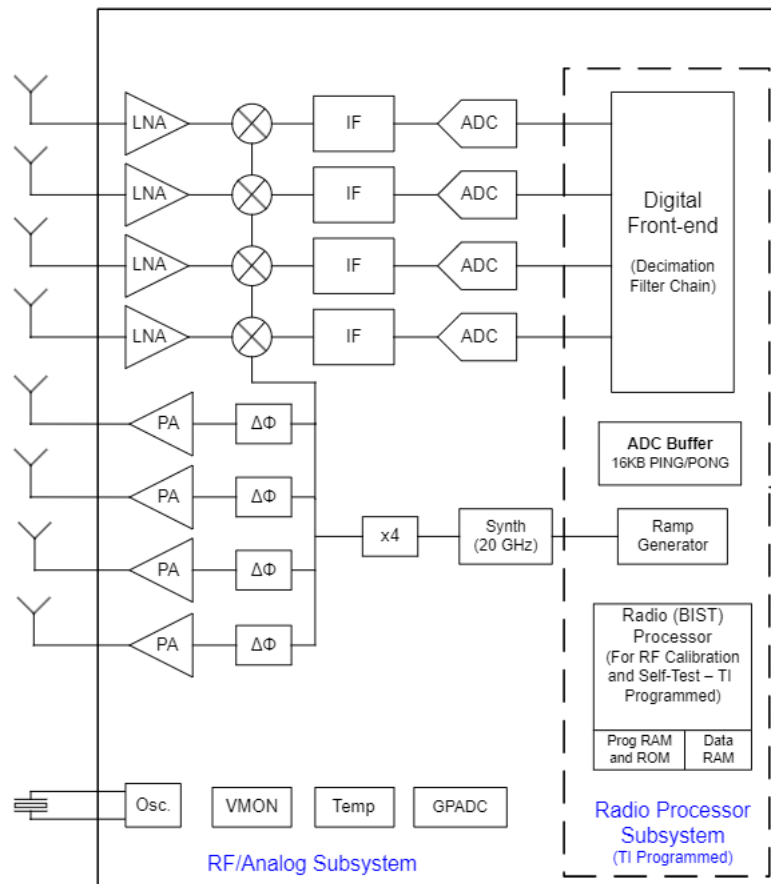


图 5-2. 雷达的通用功能方框图

图 5-2 是 TI 毫米波传感器雷达子系统的通用功能方框图。该子系统是模拟和数字组件的混合。毫米波 DFP 是适用于 TI 毫米波传感器的器件固件包，可提供固件、ROM 补丁和 API。它们实时提供对射频操作的无缝控制和配置，并允许定期安排校准和功能安全监控。这使得射频收发器能够自包含，并能够适应动态条件（例如温度变化），并尽可能地减少外部主机角度的外部干预。

毫米波器件固件包 (DFP) 分为三大组件：毫米波固件、mmWaveLink 和毫米波射频评估。

毫米波固件

毫米波固件负责配置 TI 毫米波雷达器件中的射频和模拟、数字前端，并包含以下组件：

- 雷达 SS 固件

通过 mmWaveLink 框架中的 API，雷达 SS 固件的所有服务均可供主 SS 或 DSP SS（如果适用于器件）等用户可编程内核或子系统使用。

mmWavelink

mmWaveLink 框架可充当雷达子系统的驱动程序。mmWaveLink 框架公开了一套低级 API，允许应用启用、配置和控制雷达 SS。mmWaveLink 框架为应用提供定义明确的平台和 OS 抽象，以便插入通信驱动程序，并使用 OS 例程回调与 TI 毫米波器件进行通信。

毫米波射频评估

为了进行毫米波射频和系统评估，可以使用 mmWave Studio 工具，该工具旨在与 TI 毫米波器件的所有型号进行通信，以进行射频和系统性能评估。射频评估提供了可编程到传感器上以使用 Studio 工具的固件。

备注

DFP 用户指南是帮助用户了解器件前端配置和高级功能的重要文档。本用户指南提供了有关链接测试示例的更多信息，开发人员可以使用该示例检查使用 mmWavelink 框架和大多数毫米波 DFP API 的参考实现。示例代码提供了使用大多数器件前端功能的框架，必须始终由开发人员进行检查。可在以下路径找到用户指南：

ti\mmwave_mcuplus_sdk_04_xx_xx_xx\mmwave_dfp_02_xx_xx_xx\docs

备注

ICD（接口控制文档）定义了 TI 毫米波传感器的接口控制规范。这是前端器件和 SOC 器件的必读文档，可供了解与雷达子系统的通信协议。ICD 路径如下：

ti\mmwave_mcuplus_sdk_04_xx_xx_xx\mmwave_dfp_02_xx_xx_xx\docs

TI 参考配套资料

- AWR1443、AWR1642、AWR1843、AWR6843：[毫米波 SDK](#)
- AWR2944、AWR2944LC、AWR2544：[毫米波 MCU Plus SDK](#)
- AWR1243、AWR2243：<https://www.ti.com/tool/MMWAVE-DFP>

5.5 安全方面

汽车雷达传感器具有安全功能，并通过了 Technischer Überwachungsverein (TÜV) SÜD 的 ASIL B 认证。本部分介绍雷达传感器的功能安全。

什么是功能安全？

功能安全是指减少由于 E/E 系统故障行为造成的危险而导致的不必要风险。目标是将风险降低到可接受的风险水平。

为什么选择功能安全？

随着汽车市场的自主化程度越来越高，汽车制造商（OEM、一级供应商、硅供应商）越来越需要满足更严格的功能安全标准。全球 NCAP 制定了这些标准，旨在提高汽车和驾驶安全性。这些标准旨在更大限度地减少设备故障和人身伤害。满足这些标准可以增强消费者的信心，证明汽车在市场上的可靠性和稳健性。

为了解决潜在的故障，TI 毫米波 (mmWave) 雷达器件的设计、实施和测试均符合硬件和软件开发流程。硬件和软件开发流程已经过 Technischer Überwachungsverein (TÜV) SÜD 认证，符合 ISO 26262 和 IEC 61508 标准。专为汽车应用设计的 TI 毫米波雷达器件也经过了 TÜV-SÜD 认证，符合 ISO 26262 标准。

毫米波安全交付产品

TI 为客户端的功能安全开发提供了各种交付产品。下面提供了完整的列表。

表 5-1. 安全交付产品

名称	机密性	类型	无障碍声明
器件安全手册	需要 NDA	文档	安全资源
安全分析报告 FMEDA	需要 NDA	文档	安全资源
器件数据表	无需 NDA	文档	ti.com
监控应用手册	需要 NDA	文档	安全资源
器件固件包	无需 NDA	软件包	ti.com
MCAL (适用于所选器件)	需要 NDA	软件包	安全资源
安全编译器资质审核套件	无需 NDA	软件包	ti.com
安全诊断库 (适用于所选器件)	无需 NDA	软件包	ti.com

所有与安全相关的文档大多可通过 NDA 流程获得。为了保密，本文档中不会详细讨论功能安全，仅提供开始进行功能安全开发的信息。

备注

请查看 [节 8](#) 以开始该过程。

备注

TI 的雷达毫米波集成芯片 (IC) 包括硬件和固件元件，可实现对毫米波、模拟和数字部分的监控。这些内置功能通过固件 API 向用户公开。监控应用手册旨在帮助用户构建用于对 API 进行编程和使用的软件，以实现最终产品的安全目标。为此，本应用手册介绍了监控机制，说明了 API 提供的编程选项，展示了这些 API 生成的监控报告的示例后处理，并展示了 TI 内部实验中示例编程条件下的报告。如需实现各种可用的监控，必须参考监控应用手册。

备注

为帮助客户验证 TI ARM、C6000、C7000 或 C2000/CLA C/C++ 编译器的定制使用符合 IEC 61508 和 ISO 26262 等功能安全标准，我们开发了安全编译器鉴定套件。有关鉴定步骤和流程的所有详细信息，请参阅以下部分提供的链接。

备注

毫米波传感器提供各种安全机制和功能，以及使用这些安全机制和功能的建议。软件诊断库 (SDL) 为这些安全机制和功能提供了接口。SDL 提供这些接口，以协助开发涉及功能安全的软件应用程序。软件诊断库由用于错误捕获和安全机制的不同块组成。错误响应由应用程序根据器件安全要求进行管理。应用程序接口采用软件 API 的形式。用户可以直接使用 SDL 驱动程序库，在定制应用中实施功能安全措施。有关更多详细信息，请参考 SDL 软件包。

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI), [使用毫米波雷达传感器且符合功能安全标准的系统设计指南](#) 功能安全信息
- 德州仪器 (TI), [了解汽车和工业感应应用中的功能安全技术文章](#)
- 德州仪器 (TI), [安全编译器鉴定套件](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [Radar Toolbox 中的参考设计](#) 网页
- 德州仪器 (TI), [实现毫米波传感器的功能安全](#) 视频

5.6 安保方面

随着网络犯罪数量的增加，网络安全变得越来越重要。提供安全的执行环境是毫米波高安全性 (HS) 器件的主要目标。毫米波器件的安保必须囊括汽车等垂直市场的特定需求以及广泛市场客户需求。

器件要实现的主要安保目标包括

- 防止恶意代码或外部影响 (外设或 JTAG) 修改客户软件和数据的方法
- 验证仅客户软件在器件上运行的方法
- 防止 IP 被盗

所有与安保相关的文档都可以通过 NDA 流程获得。为了保证机密性，本文档中未详细讨论安保，仅提供以上概述。

备注

请查看[其他资源](#)部分，开始该过程。

5.7 信号处理链

本部分详细介绍雷达传感器的信号处理链。此时，用户已对 FMCW 雷达的基本工作和功能了如指掌。如果没有，请参阅 FMCW 培训系列，然后再继续下一部分。

5.7.1 如何使用 FMCW 雷达？

FMCW 雷达使用线性调频脉冲进行雷达探测和测距。线性调频脉冲是线性变化频率的正弦波。在毫米波传感器中，用户可以根据需要配置线性调频脉冲，以满足距离、距离分辨率、最大可检测速度、视场等系统性能参数的要求。

对 [TI 雷达器件中的线性调频脉冲参数进行编程应用手册](#) 介绍了如何根据终端应用和用例在快速 FMCW 雷达器件中选择正确的线性调频脉冲参数，以及如何在 TI 的雷达器件上对其进行编程。

[MIMO 雷达应用手册](#) 介绍了 MIMO 雷达的基本原理和不同的设计可能性。本文档还深入说明了 TDM-MIMO 策略。

在器件特定 MCU Plus SDK 包中使用如下所示的路径，用户可以找到 DDM-MIMO 策略的深入说明。

ti\mmwave_mcuplus_sdk_04_xx_xx_xx\mmwave_mcuplus_sdk_04_xx_xx_xx\ti\datapath\dpc\objectdetection\objdethwaDDMA\docs\doxygen\html\index.html

[AWR294x 收发器的干扰缓解应用手册](#) 介绍了干扰机制和使用专为 TI 系列雷达器件设计的算法和硬件挂钩减轻干扰的方法。

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI)，[对 TI 雷达器件中的线性调频脉冲参数进行编程应用手册](#)
- 德州仪器 (TI)，[MIMO 雷达应用手册](#)
- 德州仪器 (TI)，[AWR294x 收发器的干扰缓解应用手册](#)

5.8 MCAL 和 Autosar

微控制器抽象层 (MCAL) 是 AUTOSAR 堆栈的最低软件层。MCAL 包含可以直接访问硬件的软件模块，负责系统初始化。与 AUTOSAR 兼容的驱动程序由 TI 提供，是 MCAL 的一部分，在此基础上可以进一步构建应用。MCAL 还实施通知机制，以支持向进程分配命令、响应和信息。

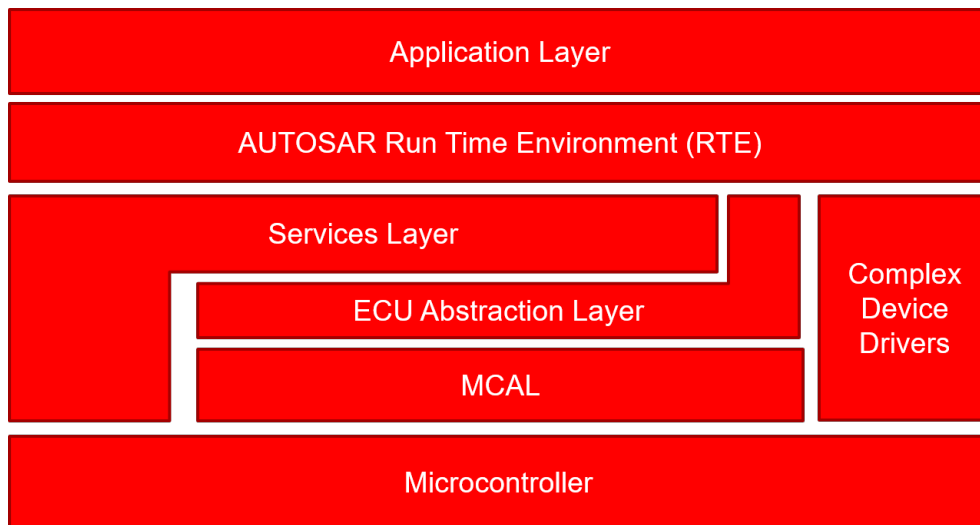


图 5-3. Autosar 堆栈

TI 提供了 MCAL 驱动程序，以使 AUTOSAR 在 SOC 上运行。客户需要从第三方或内部采购其他 AUTOSAR 软件堆栈。这些 SOC 预计将用于安全关键型系统，因此需要符合 ISO26262 规范。AUTOSAR MCAL 的目标合规性是 ASIL-B。MCAL 驱动程序实施 AUTOSAR 4.3.1 版本中提到的软件规范。

备注

MCAL 软件包仅在签订 NDA 后才会与用户共享。为了保证机密性，本文档不会进一步讨论 MCAL。

5.9 硬件模块设计

TI 提供了以下配套资料来协助进行硬件模块设计。

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI), [天线设计](#) 列出了设计天线时要考虑的几个因素, 使设计人员能够更大限度地提高特定应用的可实现性能。
- 德州仪器 (TI), [TI 毫米波雷达传感器射频 PCB 设计、制造和验证指南应用手册](#) 可帮助传感器设计人员设计、制造和验证新的毫米波传感器板。
- 德州仪器 (TI), [毫米波传感器支持的闪存型号应用手册](#) 介绍了 TI 毫米波传感器支持的闪存型号。
- 德州仪器 (TI), [毫米波雷达天线罩设计指南应用手册](#) 介绍了雷达天线罩设计, 并重点介绍了在考虑雷达传感器性能的同时设计毫米波雷达天线罩的关键问题。
- 德州仪器 (TI), [解决角雷达系统的 3 大电源设计难题](#), 技术文章
- 德州仪器 (TI), [TI 倒装芯片 BGA 封装的可靠性优势](#), 营销白皮书
- 德州仪器 (TI), [封装天线毫米波传感器的热设计指南应用手册](#) 可帮助了解 TI 封装天线毫米波传感器产品的热设计方面。
- 德州仪器 (TI), [集成注意事项网页](#)
- 德州仪器 (TI), [硬件设计检查清单](#) 是 AWR2944 的设计检查清单。
- 德州仪器 (TI), [使用毫米波传感器进行系统性能测量应用手册](#) 讨论了使用高性能毫米波传感器的系统性能测量结果。
- 德州仪器 (TI), [毫米波雷达器件的放置和角度最佳实践](#) 应用简报

6 生产阶段

TI ECS 样片可用于客户评估或样片构建。对于 A 样片，客户能够使用经过三温测试的工程样片 (FCS)。客户需要在 B 样片之前对硅进行射频冻结。冻结的射频器件用于 B 样片。B 样片可用于 FOT (现场运行测试) 以收集 100 万英里的数据。DV 样片必须是最终的硅片。PV 样片是经过 RTM 和 PPAP 的器件。

在下一个阶段，指针将协助毫米波传感器的开发。

- 校准
- 生产测试
- FCC 和 RED 合规性
- 安全认证
- 质量流程和客户故障分析
- 安全密钥 (OTP) 写入

6.1 校准

器件校准可分为两个部分：

- 工厂校准
- 天线校准

执行工厂校准可减轻工艺和温度对雷达模拟性能的影响。通过参阅 [mmwave_dfp_user_guide.pdf](#) 中的“部分：工厂校准”可了解工厂校准流程。

下面显示所有相关的校准应用手册，其中深入介绍了毫米波传感器中的所有校准。

TI 参考配套资料

- 德州仪器 (TI)，[TI 毫米波雷达器件中的自校准功能应用手册](#)
- 德州仪器 (TI)，[级联一致性和移相器校准应用手册](#)

6.2 毫米波生产测试

[毫米波生产测试概述应用手册](#)旨在作为采用 TI 雷达芯片的雷达传感器的测试指南。本文档是高级指南，为在生产过程中对雷达传感器单元进行设置测试提供帮助。本文档描述了雷达测试的一般要求、实际测试设置和运行测试所需的软件 (因雷达的实际应用而异)。用户应设计测试软件并根据雷达应用确定所有测试的适当限制条件。

6.3 FCC 和 RED 合规性

[TI 毫米波雷达器件监管合规指南应用手册](#)介绍了符合毫米波雷达器件监管标准的要求。其中详细介绍了无线电设备指令 (RED) (欧洲销售设备的标准) 和联邦通信委员会 (FCC) (美国标准)。本文档还介绍了 TI 为这些测试提供的工具、各种常见问题以及对应的解决方案。

6.4 功能安全认证

配套资料有助于进行安全认证。

- 德州仪器 (TI)，[功能安全页面 TI Resource Explorer](#) 网页
- 德州仪器 (TI)，[功能安全技术](#) 网页
- 德州仪器 (TI)，[如何将 TI 编译器鉴定套件应用于功能安全开发](#) 网页

6.5 质量流程和客户故障分析

有关 TI 的全面半导体质量政策和规程（涵盖新产品资质认证和流程变更通知和及时解决客户案例）均可在 TI.com/quality 上找到

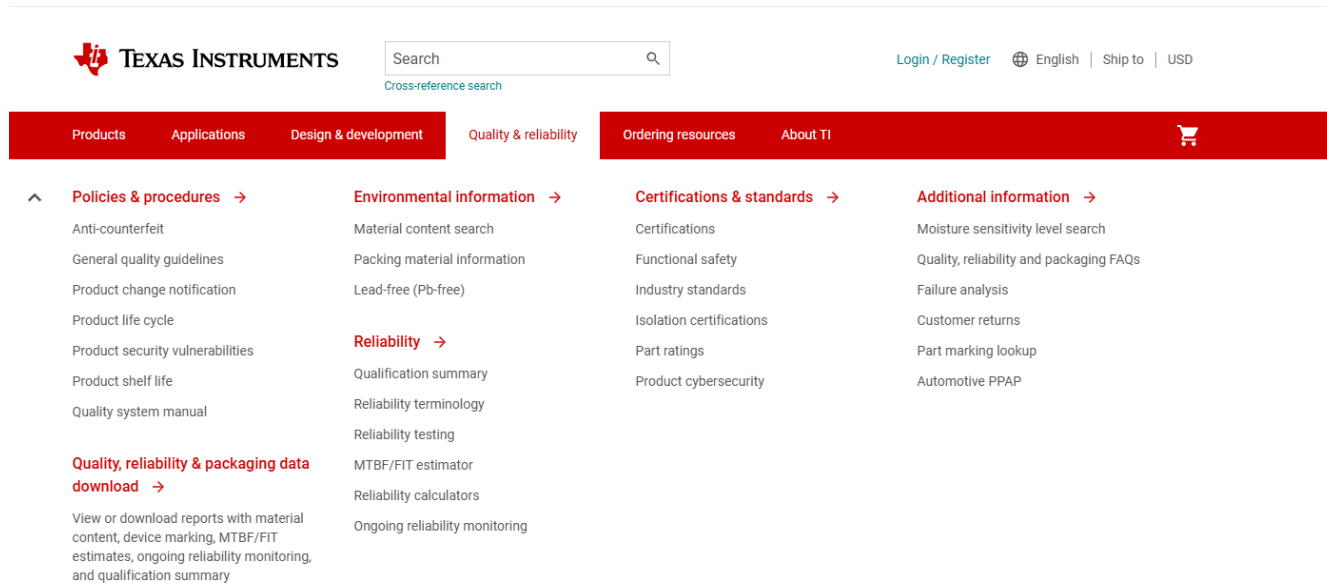


图 6-1. 质量政策和规程

6.5.1 客户故障分析流程

如果客户遇到包含嵌入式软件的 TI 产品问题，TI 具有既定的客户故障分析流程，可通过 TI.com 上的客户故障分析门户 (CRP) 来处理不合格问题申请。接受申请后，就会对报告的问题进行全面、及时的分析，包括采取适当的整改措施。

6.5.2 参考

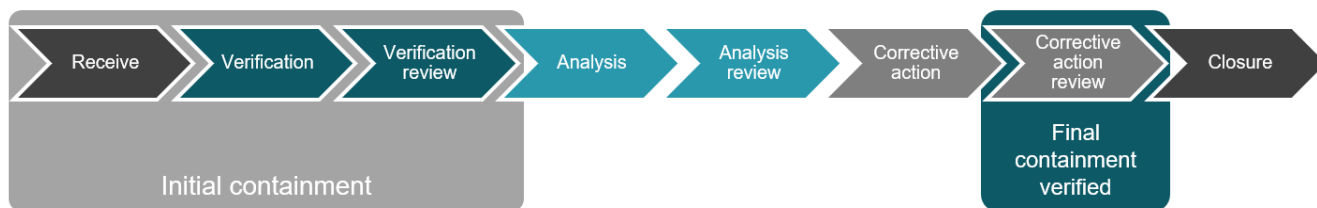


图 6-2. 客户故障分析管理流程

请遵循以下指南申请客户故障分析

TI 产品问题	TI 联系人
可能出现的运输、包装或标签问题	联系 TI 客户支持部门
需要技术应用支持或调试指导	请咨询我们的工程师
观察到不符合数据表电气、机械或功能规格的情况	通过 CPR (客户产品故障分析) 联系 TI 客户质量团队
RMA 和现场故障分析	请遵循 TI 客户故障分析指引

6.6 OTP KeyWriter

HS-FS (现场安全型)：这是器件离开 TI 工厂且未对客户密钥进行编程的状态。在这种状态下，器件会保护 ROM 代码、TI 密钥和某些安全外设。HS-FS 器件不会强制执行安全引导过程。

HS-SE (强制安全型)：这是对客户密钥进行编程后器件的状态。HS-SE 器件会强制执行安全引导。

OTP (一次性可编程) KeyWriter 是一款软件工具，可在器件电子保险丝中配置客户密钥，以强制安全引导和建立信任根。此软件包也适用于签署了 NDA 的客户。请查看“其他资源”部分，开始该过程。

7 总结

本应用手册介绍了毫米波传感器，并描述了传感器的功能。本文档还介绍了成像雷达，以及世界各地的频率法规和标准。接下来，本应用手册介绍传感器的评估过程，并提供不同开发方面所需的必要信息。最后，还向用户说明生产阶段。此外，还提供了各种资料来源，以在开发的任何阶段为用户提供帮助。

8 参考资料

参考资料在整个文档中提供。

- 德州仪器 (TI)，[TI E2E 社区论坛](#) - TI E2E 社区是提出技术问题的最佳平台。TI 工程师将评估问题并提供问题的解决方案。社区很有可能已经回答过类似的问题。使用该社区可以获得用户所有问题的回答，或者提出新问题以获得 TI 核实的回答。
- 如果用户需要有关本地 TI FAE 支持的更多信息但无法联系我们的各个团队、想要评估一些样片或联系我们的营销团队，或者有任何非技术问题，请通过 tiradar_support@list.ti.com 联系 TI。TI 代表会评估问题并采取适当的措施来解决问题。

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司