Technical White Paper

无人机应用中的毫米波用例

Jason Clark

1 简介

无人驾驶航空器系统 (UAS) 通常被称为无人机，正日益成为人们日常生活中的一部分。从用于拍照或录像的消费级无人机，到用于极速配送食品或生活用品的商用无人机，无人机已经融入社会，并且（在很大程度上）被人们所接受。同样，在国防应用中，无人机在过去几十年里改变现代战争面貌的程度，超过了任何其他技术。

无人机的增长在安全性、可靠性及探测方面带来了新的挑战，而这些性能在早期型号中要么缺失，要么受到限制。正如汽车在安全标准方面不断进步一样，无人机也正遵循着类似的发展路径。汽车制造商越来越多地采用毫米波 (mmWave) 雷达作为盲区监测、自适应巡航控制和防撞的工具，因为它能够在各种天气环境中进行物体检测与识别，同时兼具体积小和成本效益高的优势。不难看出，这项技术同样可以应用于无人机的多种使用场景中。

2 雷达概述

首先，我们来探讨雷达的一些特性。传统雷达系统发射电磁波脉冲，并寻找这些脉冲的反射回波。发射脉冲与接收脉冲之间的延迟时间决定了到目标的距离，而多普勒频移则与目标（相对于发射机）的速度成正比。这些传统雷达系统的工作频率介于 30MHz (UHF) 至 18GHz（Ku 波段）之间。较低频率由于大气吸收较少，可以传播得更远；而较高频率则允许使用更小的天线和更窄的波束，从而实现更高的角分辨率和更好的目标识别能力。

与传统雷达不同，毫米波设备采用了一种称为调频连续波 (FMCW) 的系统，它使用的是连续变化的频率，而不是短脉冲。FMCW 系统通常体积更小、功耗更低，且更适合短中程雷达应用。顾名思义，毫米波雷达以短波长工作，因此其工作频率更高，例如 60GHz 或 77GHz。由于天线通常以 ½ 波长间距进行最佳布置，因此毫米波系统可以比传统雷达系统小得多。更高的频率还使得系统能够检测更小的物体、提供更高的距离与角分辨率，并具备更好的目标识别能力。

3 无人机用例

毫米波雷达用于无人机的主要用例有四个：

1. 防撞（中远距离，中等视场角 (FOV)）：正如在汽车应用中一样，无人机可以在树木、电线和建筑物等障碍物之间以相对较高的速度飞行。检测和避开这些障碍物不仅对于无人机本身的安全至关重要，对于无人机周围或下方的人员和财产也同样非常重要。
2. 高度计（短距至中距，窄 FOV）：为实现安全运行所需的态势感知，无人机不仅需要看清周围环境，还需要看清下方，以确定其高于地面或其他障碍物的高度。与高度同样重要的是，在降落时需确定无人机下方的地面类型，因为降落在水面上极有可能导致飞行器损毁。雷达非常擅长测定距离和进行表面分类，并且当与摄像头信息结合时，这些信息还可通过一种称为“光流”的概念用于建图和速度估算。这些技术可用于在电磁对抗环境中进行导航。
3. 近距探测（短距，宽 FOV）：在国防应用中，无人机正越来越多地被用于拦截其他无人机或军火。雷达可用于引导无人机飞向目标，但用一架无人机撞击另一架小型无人机非常困难。为了提高拦截成功率，可利用雷达来确定目标何时足够接近，以便触发有效载荷。
4. 反 UAS（最远距离）：由于无人机成本低廉而导致其数量迅速激增，因此探测单架无人机或无人机蜂群对于保护部队和基地至关重要。传统的国防雷达造价数百万美元且体积相对庞大，这使得它们不适合用于保护小规模、分散部署的部队。毫米波雷达可用于构建成本更低的车载或单兵便携式探测系统。

English Document: SDAA581
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 天线类型

利用现代半导体工艺技术，毫米波雷达系统（包括低噪声放大器 (LNA)、功率放大器 (PA)、混频器、本机震荡期 (LO)、数据转换器及微处理器/数字信号处理器）如今可以集成在单个集成电路 (IC) 或芯片中。这些器件可以与不同类型的天线配对使用，而各类天线各有不同的优势：

1. 贴片天线可集成在印刷电路板 (PCB) 上，以实现低成本和最佳性能/探测距离。
2. 波导天线，在此方案中，IC 将电磁波穿过封装底部发射到波导中，这被称为封装上发射 (LOP)。这使得其能够实现更小的尺寸和良好的性能/探测距离。不同的 LOP 天线可以与同一块 PCB 配合使用，以满足不同的系统级要求。
3. 现代封装技术还允许将完整的雷达天线集成在 IC 封装上，这被称为封装上天线 (AOP)。AOP 具有最小的尺寸和最低的成本，但仅适用于较短距离的探测。

5 总结

德州仪器 (TI) 提供了针对这些不同应用和天线组合而设计的器件。例如：

	防撞	高度计	接近检测	计数器 UAS
雷达芯片	AWR2944P	AWR2944P	IWRL6432AOP	AWR2188
天线类型	贴片或波导	贴片或波导	封装天线	波导
处理器/DSP	集成式	集成式	集成式	TDA4VEN-Q1
电源管理	LP87745-Q1	LP87745-Q1	TPS650365-Q1	LP87725-Q1

以下是 TI 使用毫米波雷达 EVM 模块进行测试的一些示例：

- 防撞：无人机障碍物检测
- 高度计：无人机高度计 xWRL6432AOP 用户指南

有关 TI 完整毫米波雷达产品系列的更多信息，请访问此处：毫米波雷达传感器 | TI.com

随着无人机的需求和应用场景不断演进，凭借体积小、重量轻、功耗低、性能高且成本低的综合优势，毫米波雷达的使用将会日益广泛。

English Document: SDAA581
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 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。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月