

Technical Article

利用 79GHz 毫米波雷达技术提升脚踢传感器姿势识别



电容式脚踢传感器于 2011 年推出，让用户只需在后保险杠下方轻轻一踢，即可**感应开启后备箱，无需用手**，这大大提升了用车便利性。Huf 率先推出了这项技术，并持续进行优化，使脚踢传感器检测更加精准、可靠，同时逐步拓展其技术路线，不再局限于电容式传感器方案。而电容式传感器需要在车辆中采用不同的安装位置，相较于德州仪器 (TI) 的 79GHz 毫米波 (mmWave) 技术，其制造与安装更为复杂。

电容式技术方案

在工程实现中，一大挑战是提升脚踢传感器的识别准确性，即区分用户有意的操作动作（有效用例）与无意或无关的运动（误触发用例），例如行人经过、儿童玩耍，或雨雪等天气条件造成的干扰。虽然检测脚踢动作本身在技术上并不复杂，但如何防止后备箱被意外开启则至关重要。

Huf 采用电容式传感器技术应对这一挑战，通过在车辆保险杠上布置两个电极（请参见图 1），实现对车辆后方及下方的动作检测。两个电极共同界定了检测区域的宽度。该系统结合测量信号与 Huf 的智能算法对动作进行评估，判断其属于有效用例还是误触发用例。

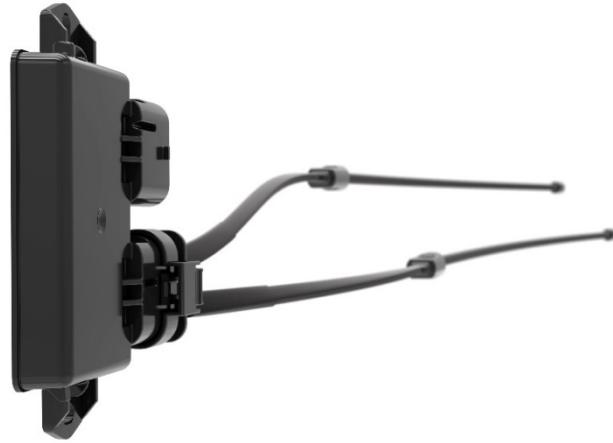


图 1. 带两个电极的电容式传感器

Huf 和 TI 如何重新定义姿势识别

精确的姿势识别，以及对有效用例与误触发用例进行可靠区分，本身即构成独特的技术挑战。这两者都取决于传感器在车辆中的集成方式。例如，传感器在后保险杠中的具体安装位置可能会限制其感知范围，使得用户在车辆靠近其他车辆或停在路缘边时，只能在特定区域进行踢脚操作。

基于这些原因，Huf 采用 TI 的毫米波雷达片上系统，开发出一种新的设计方案。Huf 踢脚传感器（请参见图 2）利用 TI 的 79GHz 毫米波雷达技术，在简化车辆集成的同时，凭借更大的感知视场实现了更精准、更可靠的姿势识别。与其他带宽较短的雷达方案相比，79GHz 带宽提供了更宽的探测范围以及更优异的速度分辨率。

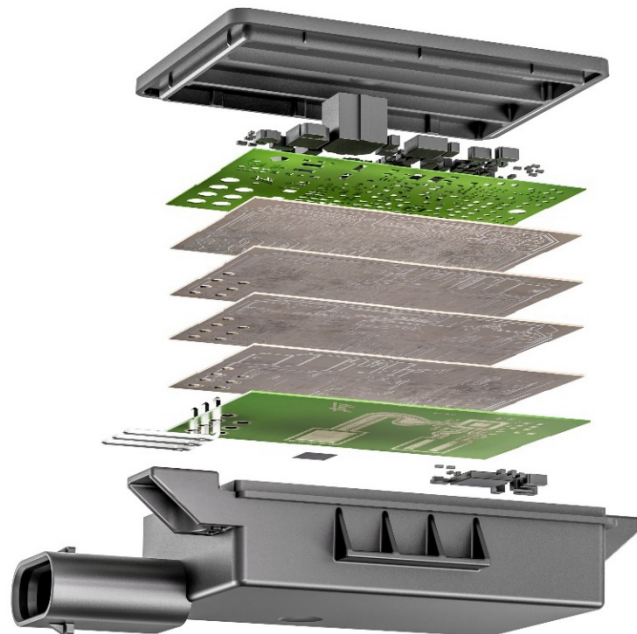


图 2. 带有 TI 毫米波雷达片上系统的 Huf 脚踢传感器模块组件分层结构

Huf 的系统采用了可调脚踢范围参数，这是一个创新特性，即使用户距离保险杠较远，系统也能感应到他们的动作。这种基于毫米波雷达的方案还具备近乎即插即用的集成能力，可应用于车辆的几乎任意位置，使汽车制造商能够设计更多基于姿势的无接触进入功能，例如开启车门（请参见图 3），或通过脚或手的挥动动作开启后备箱。

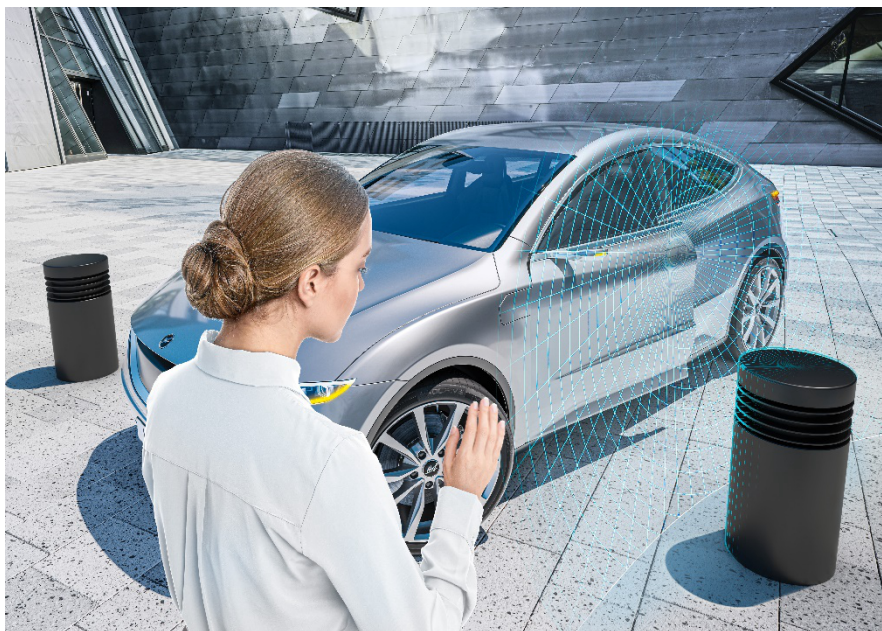


图 3. 挥手打开车门

MIMO 天线阵列如何提升性能

扩展后的车辆进入系统采用了针对脚踢传感器应用优化的虚拟多输入多输出 (MIMO) 天线阵列，以提升角度分辨率。这对于实现精确的位置定位和姿势识别至关重要。

MIMO 系统通过空间分集接收并处理来自不同方向的信号，从而降低干扰并抑制多路径效应，同时能够将目标动作分离出来进行检测。该传感器的感知范围使系统能够在保险杠更宽的区域实现自然操作，即使拖车钩导致传感器无法安装在车辆尾部中央位置，也不会影响使用体验。该算法利用毫米波雷达片上系统提供的信息，将有效用例与误触发用例区分开来。

开发专业知识与高级硬件相结合

Huf 的软硬件开发能力与 TI 的高性能毫米波雷达集成电路 (IC) 相结合，攻克了特定的误触发用例挑战。有效的踢脚动作需要用户在踢脚区域内持续向车辆方向移动脚部，无论用户位于该区域的哪个位置。系统必须将此姿势与其他运动（如猫经过）区分开来，以防止后备箱意外开启或关闭。

TI 的毫米波雷达片上系统使用调频连续波 (FMCW) 信号，并捕获高分辨率距离-多普勒图，从而进行全面分析。Huf 的算法对这些数据进行分析，以优化用户体验，并使其能够在跑车、轿车和 SUV 等各种具有不同保险杠结构的车辆上可靠运行，并能适应暴雨等复杂的外部环境。

高级信号处理与分析

Huf 的软件使用距离-多普勒信息来识别具体的姿势。一次有效的踢脚动作必须在特定的时间段内发生，且与传感器的距离需保持在预设的最大范围内。特定的最小信号强度有助于进行准确分析。

但是，仅靠距离-多普勒热图无法区分有效用例和误触发用例。Huf 的软件引入了其他变量，例如计算所选目标（如雷达传感器探测到的人员）的到达角 (AoA)。

不同使用场景下的 AoA 信号曲线（请参见图 4 和图 5）存在差异。在有效用例中，完成踢脚动作后，AoA 测量值始终会返回初始起点（请参见图 4）；而在误触发用例（例如行人路过车辆）中，起点与终点则完全不同（图 5）。

这是因为在进行主观意图的踢脚动作时，用户并不会沿着车身移动。此外，在触发踢脚动作时，用户的脚通常保持在同一位置不发生位移。

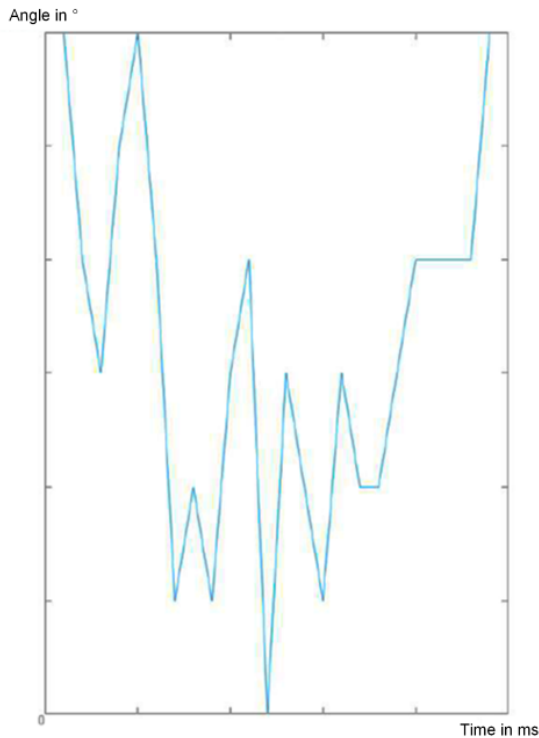


图 4. 到达角：踢脚姿势
(有效用例)

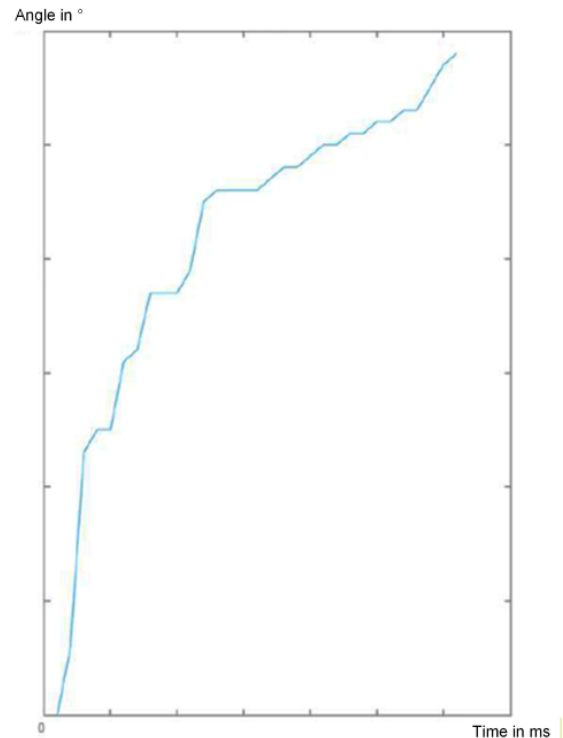


图 5. 到达角：经过
(误触发用例，例如猫从车前经过或球滚过)

AoA 计算可采用两种方法：一种是基于三角函数的飞行时间计算流程，另一种是基于两个相邻天线之间频率偏移的评估方法。

多信号分类 (MUSIC) 或 Capon 方法 (也称为最小方差失真无响应, MVDR) 等算法通常用于角度计算。这些方法确实需要相对较高的计算资源。

TI 的毫米波雷达片上系统通过提供用于快速傅里叶变换 (FFT) 的硬件加速器以及 Cortex-M4F 应用处理器，为 AoA 计算提供支持。该方法可实现快速且高效的角度计算。

硬件加速器独立于主处理器运行，主处理器会分析测量和处理的数据、计算距离-多普勒热图，并通过算法进行计算来实现姿势评估。

结语

从电容式传感器向 79GHz 毫米波雷达传感器技术的转变，不仅提升了脚踢传感器的准确性，还为在车辆更多部位扩展姿势控制功能提供了契机。未来的应用场景可能涵盖空调控制系统、信息娱乐及音频控制。

汽车制造商开始意识到创新的真正潜力，例如 Huf 与 TI 共同开发的成果，这将不断推向精准度的极限，最终为驾驶者和乘客带来更加便捷的体验。

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

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、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