

超越极限的感知： UWB雷达重塑用户体验

引言

超宽带 (UWB) 技术凭借其强大的飞行时间 (ToF) 和到达角 (AoA) 测量能力, 已成为短距离、高精度目标检测与追踪领域的领先技术。然而鲜为人知的是, 同样的UWB系统还能实现先进的雷达感测功能——包括存在检测、运动分析乃至生理监测。这种双重能力使UWB成为跨行业应用的独特解决方案, 能够将精准定位与智能感知融合于单一紧凑平台。

雷达技术长期以来在航空、航运以及汽车安全系统中发挥着关键作用。传统雷达依赖高功率微波信号实现远距离探测; 相比之下, 如今专为短距离、高分辨率任务设计的汽车雷达创新, 为紧凑、高效能的模块铺平了道路。

当前, 一系列全新的感测需求正在涌现; 例如车内儿童遗留检测 (CPD)、驾驶员疲劳监测, 以及室内人员占用追踪等应用场景, 均要求在短短数米范围内实现精准、低功耗的检测。为此, 多种雷达技术——包括调频连续波 (FMCW)、毫米波 (mmWave) 和UWB等——纷纷投入应用, 以满足这些需求。其中, UWB凭借其精度、效率以及在3.1至10.6GHz频段内的运行能力, 脱颖而出。

UWB的精度、范围和稳健性

UWB遵循IEEE 802.15.4a/4z标准, 可在500MHz、1GHz和1.3GHz带宽下实现高分辨率感测与测距。其设计注重抗干扰性与低功耗, 特别适用于便携式及电池供电设备。配备UWB的设备能够对附近物体或其它连接设备实现厘米级感知; 这正是智能手机和现代汽车系统越来越多集成UWB技术的原因。

UWB从设计之初就旨在解决定位中的核心挑战: 精度、多径环境下的可靠性, 以及能效问题。其扩频结构与短时脉冲特性赋予其天然的抗干扰能力, 使其能够在其它技术性能下降的杂乱室内空间中依然表现出色。

对于数字钥匙或无钥匙门禁等测距应用, UWB利用ToF测量两个主动设备之间的信号往返时间。相比基于接收信号强度指示 (RSSI) 的蓝牙或Wi-Fi方法, UWB直接测量信号传播时间而非强度, 因而精度更高。除了测距功能外, UWB还能通过发射雷达

脉冲并解析其反射信号来实现被动环境感知(见图1)。这一能力不依赖于第二个主动设备;相反,UWB系统通过分析来自人员、表面或物体的反射能量来确定运动与存在状态。原本用于精确测距的脉冲结构,如今也可在高级雷达感测中发挥双重作用。

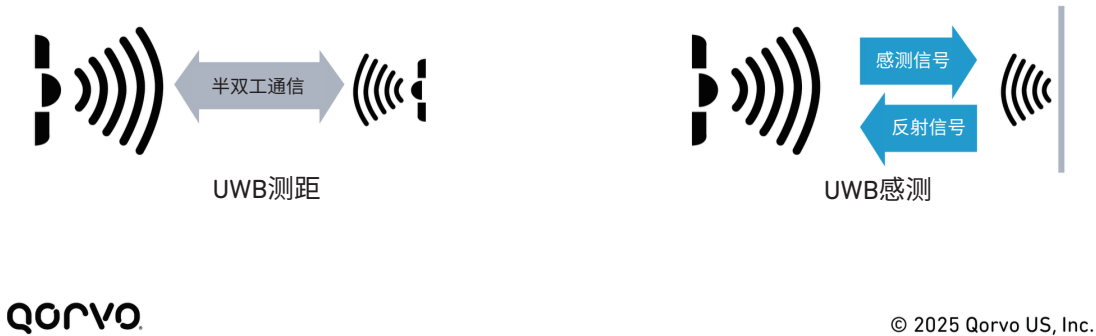


图1: UWB测距与雷达感测对比

UWB雷达感测: 工作原理

UWB雷达感测技术发射短脉冲, 并分析从人员、家具和墙壁等表面与物体反射回的信号。借助对这些反射信号的评估, 先进的算法能够提取ToF和AoA数据, 从而精确确定物体的距离、运动及位置(见图2)。

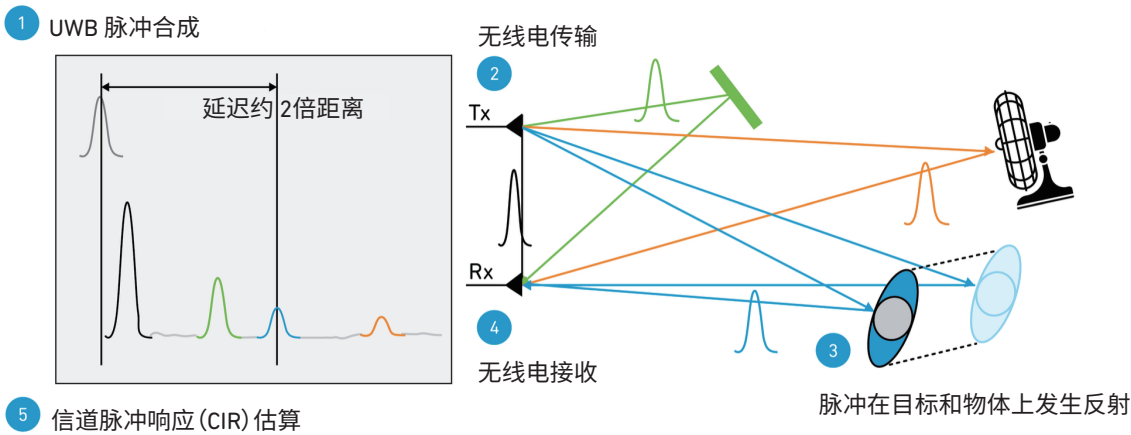


图2: UWB雷达发射并接收多路径信号反射

UWB雷达收发器通过发射一系列已知的短脉冲来工作。当这些脉冲与环境中的物体相互作用时,它们会被反射、吸收或散射。接收器对已知的发射信号和接收信号进行互相关运算,从而生成信道脉冲响应(CIR)。该CIR反映了脉冲信号经过所有传播路径后的综合效应。每条路径都会产生一个独特的分量;多个分量共同构成了环境在时域的“指纹”特征。信道脉冲响应表示接收器接收到的多径信号分量在时域的叠加。除非有互操作性的要求;例如,如果传输与FiRa或车联网联盟(CCC)框架共享,那么单站雷达(即发射器和接收器位于同一位置的雷达)可以采用针对应用优化的调制方案与通信协议。

CIR并非静态不变;当在一段时间内观察多个捕获的帧时,它会随着环境的变化而演变。图3展示了如何通过收集一系列CIR帧来形成CIR矩阵。可对该矩阵应用后处理算法,以滤除静态反射信号(如墙壁或家具的反射信号),仅保留与运动相关的动态信号。CIR可通过时域或频域分析进行处理,来提取有关物体距离、运动和AoA的有用数据。这样,即便是像人的呼吸这样的微小动作,也能被分离并识别出来。

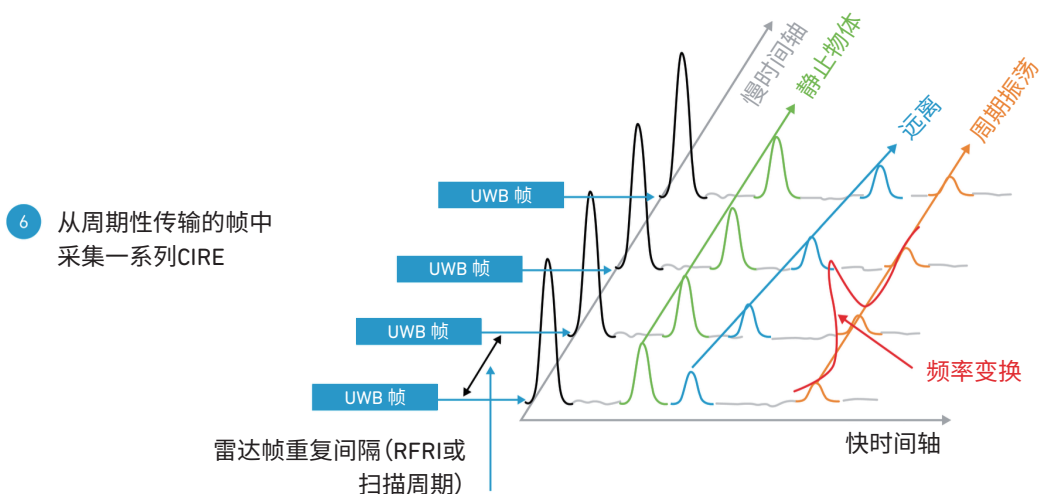
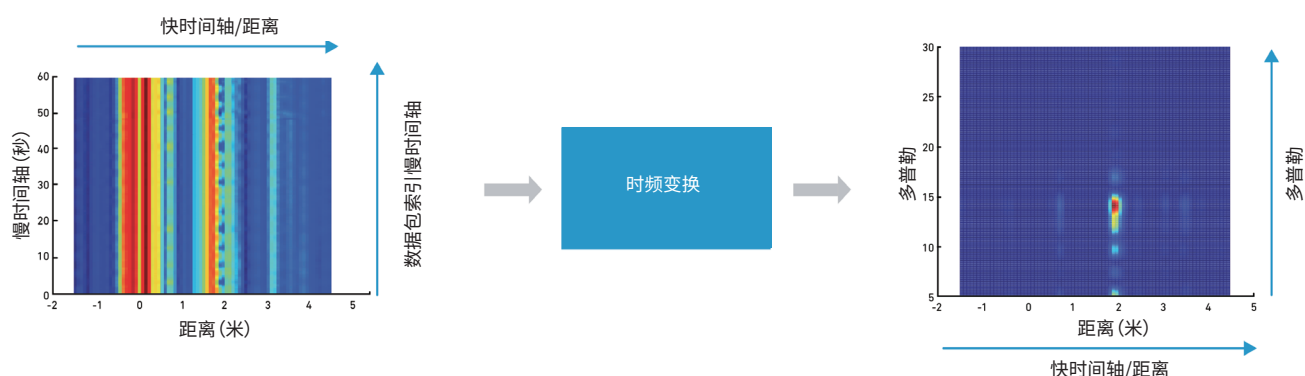


图3: UWB雷达采集一组CIR数据并分析信号变化

相位检测实现实时洞察

部分UWB雷达系统具备在连续CIR测量中保持相位相干性的能力。这使得它们能够通过观察相位随时间的变化, 来追踪微小的周期性运动; 如人的呼吸。仅使用幅度分析难以检测到这些相位偏移, 但利用快速傅里叶变换 (FFT) 等频域工具则可以捕捉到这些偏移, 如图4所示。

相位相干性使UWB雷达非常适合振动分析、存在确认, 以及其它以一致、细微运动为关键指标的应用场景。即使在嘈杂的射频 (RF) 环境中, 周期性运动的连贯性也使得基于FFT的分析能够平均掉噪声, 并分离出有意义的运动信号。



Qorvo

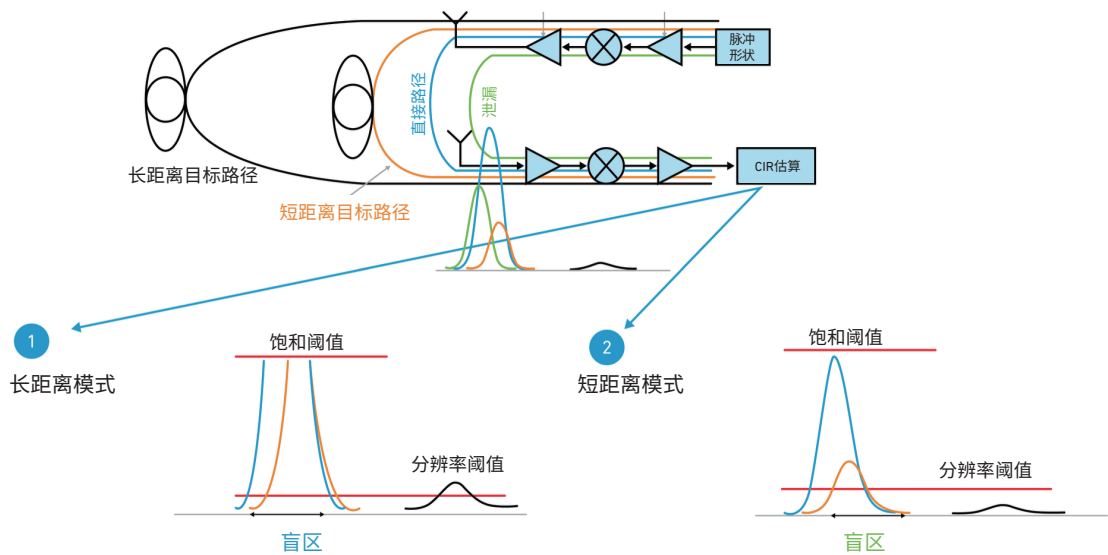
© 2025 Qorvo US, Inc.

图4: 如何利用时频变换从噪声中提取有效信号

CIR和系统架构

单站雷达的一个局限性在于发射天线和接收天线之间存在能量泄漏 (如图5所示); 部分发射能量会直接泄漏到接收路径中。这种泄漏也被称为串扰; 它可能会掩盖早期的反射信号, 并在天线附近形成盲区。一个简单的缓解方法是调整发射和接收增益设置, 以避免信号饱和。虽然这种方法复杂度较低, 但会以牺牲探测范围为代价。为了优化性能, 系统应根据具体应用场景动态选择短距离或长距离工作模式。更先进的方法可能会采用噪声消除技术或高动态范围接收器设计, 在不影响性能的前提下抑制或消除串扰的影响。

UWB雷达系统的精度和分辨率取决于信号的带宽及其功率谱密度 (PSD), 这两者均受脉冲宽度和脉冲形状的影响。更窄的脉冲可提高分辨率, 使雷达能够区分位置相近的物体。按照IEEE 802.15.4a/4z系统标准, 500MHz带宽的脉冲通常会产生2纳秒的脉冲宽度和约30厘米的空间分辨率。这一精度水平适用于大多数消费级和工业级雷达应用。干净的高斯型脉冲形状可减少目标识别操作中因前后波瓣振荡引起的误判。



Qorvo

© 2025 Qorvo US, Inc.

图5: 天线附近因串扰产生的潜在盲区

在此背景下,UWB雷达系统的性能取决于多个因素,如发射信号的功率、增益、天线间的隔离度、脉冲的形状和宽度,以及用于提取相关运动特征的信号处理算法质量。然而,由于单站雷达信号随距离呈四次方反比的路径衰减损耗,而目标反射信号通常极其微弱。要实现可靠的目标检测和精确的目标特征描述,需要具备由稳健RF性能与优化架构所支持的高灵敏度接收器。

低功耗,大影响

UWB雷达感测技术在探测数米范围内的物体时,功耗低于10毫瓦,使其成为智能家居、医疗保健和车载环境中始终开启应用的理想选择。其低功耗特性有助于延长设备电池寿命,同时支持直观的非接触式用户界面。

UWB雷达能够检测微小的周期性运动——如呼吸时胸部的起伏——使其在手势识别、生命体征监测,和睡眠追踪等应用中表现出色。这些应用得益于UWB雷达相位和幅度分辨率的精细颗粒度,即使在亚毫米尺度上也能检测到运动。

参数	UWB雷达	被动红外 (PIR)	毫米波雷达
感测方式	周期性脉冲响应	红外辐射变化	电磁波反射
范围	< 10米	< 5米	> 10米
解决方案尺寸	+	++	++*
解决方案成本	\$	\$	\$\$
功耗	< 10毫瓦	< 10毫瓦	数十毫瓦
测距+雷达	✓	✗	✗
LOS和NLOS传感	✓	✗	受限
微动探测	✓	✗	✓

* 针对需要额外处理的高分辨率60GHz雷达



© 2025 Qorvo US, Inc.

表1: UWB雷达与其它感测技术的对比

与毫米波雷达或被动红外 (PIR) 传感器相比, UWB雷达具有更高的能效、更远的探测距离, 且通常实施成本更低 (见表1); 在穿透墙壁或家具等障碍物时, 以及在不同光照和环境条件下, 均能表现卓越。UWB雷达不依赖视觉输入或温度差异, 这一特性使其在光学或热传感器可能失效的场景中仍能有效工作。

助力未来创新的技术

无论是车内儿童遗留检测、智能家居触发器, 还是医疗保健监护设备, UWB雷达都在推动新一代响应迅速、低功耗感测应用与体验的发展。凭借厘米级定位精度、强大的多径干扰抑制能力, 以及极低的能耗, UWB雷达已不仅仅是一个硬件组件, 更是一个创新平台。得益于其精确测距与感测的双重功能, 超宽带雷达不断拓展无线检测的可能性, 帮助工程师构建不仅更智能, 而且更能感知周围环境的系统。