



24GHz 毫米波雷达应用常见问题

问与答

V1.0



2024.10

矽杰微电子（厦门）有限公司



目录

1. 概述.....	2
2. 毫米波雷达基础知识常见问答.....	3
3. 毫米波雷达应用常见问答.....	22

由于产品升级或其他原因，本文档内容会不定期进行更新，不另行通知。本文档仅作为使用指导，所陈述信息和建议均不构成任何明示或暗示的担保

1. 概述

随着毫米波雷达应用越来越广泛，采用毫米波雷达模块开发产品的用户也越来越多。毫米波雷达模块开发是专业性很强的一门学科，涉及射频微波电路理论及射频微波电路设计开发、天线设计、数字信号处理及雷达算法开发、嵌入式开发等，看似简单的一个毫米波雷达小模块，是一个集合多学科的产品。



用户在使用毫米波雷达时，对于毫米波雷达原理及应用过程中遇到的各种问题，有时会比较茫然无从入手。因此，基于过去几年给客户支持过程中遇到的各种客户的常见问题及应用中的客户疑问，总结了此份《问与答》，涵盖了智能家居领域各种客户所问的常见问题及基础概念。可以帮助用户了解毫米波雷达的概况及应用的各种注意事项，也可以供销售人员学习及了解毫米波雷达的基础知识，更好的进行产品推广。同时也希望借此份《问与答》，减轻一线技术支持人员的工作量，减少对不同客户的相似及重复的问题进行反复的解答教育。

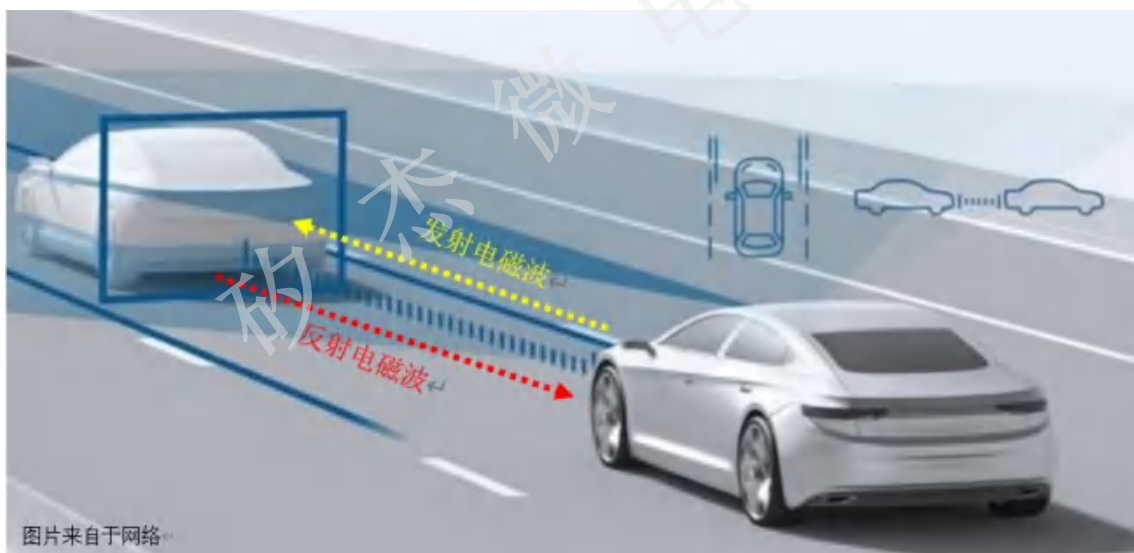
此份问答，仅仅涉及毫米波雷达的皮毛，主要针对的是智能家居、家电、智能照明等物联网相关的应用领域，并不涉及军工、智能驾驶等高阶应用领域。不能构成系统的知识框架，内容也不能涵盖全部的问题。随着我们产品应用的拓展及技术迭代更新，此份《问与答》会不定期的进行更新。如果您在使用矽杰微电子的产品过程中有更多疑问，可以随时联系矽杰微的技术支持。

2. 毫米波雷达基础知识常见问答

问 1. 什么是毫米波雷达？

毫米波雷达是工作在毫米波频段的雷达，通常我们定义的毫米波是指 30GHz–300GHz 频段的电磁波。

雷达的英文为 radar，是 Radio Detection And Ranging 的缩写。雷达发射电磁波之后，经过被测目标反射后由接收机接收，可计算得到目标的参数。对于一发一收的雷达，可获得目标的速度、距离。对于多发多收的雷达，可以获得目标的速度、距离、角度。基于这些参数，上层可以做进一步的处理，便可以实现各种功能用途。广义的毫米波雷达包含车载，工业，军事，通信等各种领域的雷达。本文中我们所说的毫米波雷达通常用于智能照明，智能家居，智能家电，无人机，安防，液位计等消费类领域



问 2. 常用的雷达调制方式

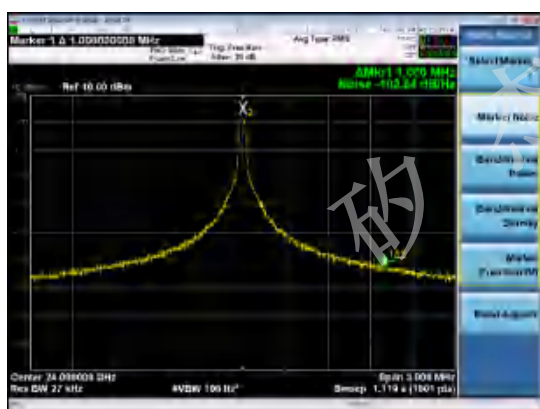
目前最常用的民用雷达都采用连续波（CW）和调频连续波（FMCW）这两种调制方式。连续波多普勒雷达是通过移动物体产生的多普勒频移进行探测，仅采用单频点连续波，电路比较简单。可实现人体移动/微动探测，作为触发应用，或者测速应用。

调频连续波 FMCW 可探测目标的距离速度，可以做静目标测距（例如液位计、物位计、无人机定高等），也可以做动目标测距，作为照明/家电/卫浴触发、人体存在检测等应用。对于多发多收的雷达，采用调频连续波调制，还能检测目标的角度、高度等信息。

除此之外，常见的调制方式还包括 FSK 及脉冲，对于本文所关注的智能家居、家电、智能照明等消费类领域，更常用的还是 CW 及 FMCW。

问 3. 什么是连续波多普勒检测和调频连续波 FMCW

在雷达应用中，我们经常提到连续波多普勒雷达及 FMCW 雷达。从频域上看，连续波多普勒雷达发射的信号是工作在单一频点波形（见下图多普勒频域信号），从时域上看是一个固定振荡频率正弦波。利用多普勒原理，载波频率为 f_1 的信号打到移动物体后，反射信号会叠加多普勒频移 f_2 ，雷达接收机则会接收到 f_1+f_2 或 f_1-f_2 （视目标靠近或远离），通过混频后将移动目标的多普勒频移 f_2 的信号解调出来，就可以算出目标的移动速度。在实际应用中就可实现人体移动/微动探测，可用于人员有无的触发，或者测速应用。



连续波雷达频域信号

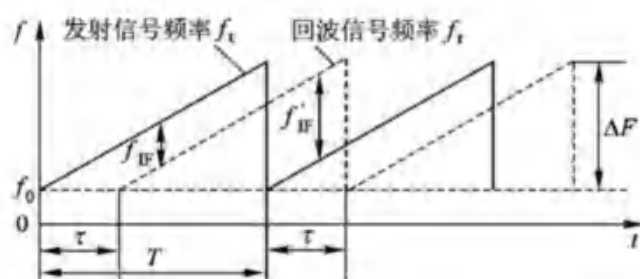
但是连续波多普勒雷达只能检测移动的物体，对于完全静止的物体，则无法检测。同等目标速度下，发射的载波频率越高，产生的多普勒频移也越高，对于微小及慢速的动作，就越容易被电路检出。探测范围只能通过设定信号强度门限进行调节，不同体型不同反射材质都会影响到探测范围。一个简单的例子，胖子相比瘦子对电磁波的反射会大，因此同等条件下，多普勒雷达对胖子的检测范围会更大一些。

调频连续波 FMCW，从频域上看是一个连续的频谱，下图展示的是从 23.7GHz-24.58GHz 的频域信号，占用了约 800MHz 带宽。从频域看，是一个在一段固定时间内，频率从 f_0 以固定频率间隔连续变化到 f_n 的信号。从时域看则是一段形似锯齿的锯齿波。采用 FMCW 调制的雷达，通过比对接收信号及发射信号的频率差，除了速度外，还可以检测目标的距离。并且算法可以实现动目标测距或者静目标测距。根据 f_0 到 f_n 不同的变化形式，可以有锯齿波，三角波，非对称三角波等各种组合。一般最常用的就是锯齿波及三角波。

因为是测距，因此相比多普勒，可以通过距离来设定探测边界，边界更清晰。

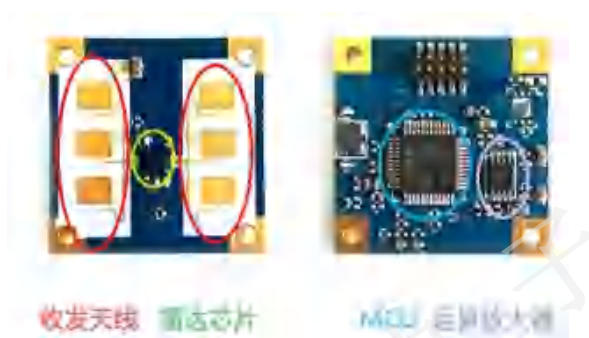


FMCW 频域波形



FMCW 时域波形示意图

问 4. 一个雷达模块包含哪些电路单元？



一个雷达通常由四部分组成：

- ◆ **发射机**——发射经过调制的电磁波。
- ◆ **天线**——将传输线上传播的导行波，变换成在无界媒介（通常是自由空间）中传播的电磁波或进行相反的变换。一般采用微带天线，直接印刷于 PCB。
- ◆ **接收机**——接收被测目标反射回来的电磁波并将其解调为中频信号。发射机与接收机直接集成在雷达芯片中。矽杰微电子的 SRK1101, SRK1201L, 是一颗完整的毫米波雷达前端芯片，将信号直接变换到中频。另外 SRK2401 同时将锁相环集成，无需外挂锁相环。
- ◆ **信号处理单元**——将中频信号进行信号处理后得到相应的目标参数，信号处理单元包含中频滤波器，ADC/DAC，MCU。随着 MCU 集成度的提高，目前我们所采用的 MCU 都是直接集成 ADC/DAC，部分 MCU 同时集成了运放，这样就不需要外置的中频滤波器电路了。

问 5. 无线电频段划分

根据《中华人民共和国无线电频率划分规定》，无线电频率以 Hz（赫兹）为单位，其表达方式为：

- 3000kHz 以下（包括 3000kHz），以 kHz（千赫兹）表示；
- 3MHz 以上至 3000MHz（包括 3000MHz），以 MHz（兆赫兹）表示；
- 3GHz 以上至 3000GHz（包括 3000GHz），以 GHz（吉赫兹）表示。

常用的无线电频谱可见下表：

频带名称	频率范围	波段名称	波长范围
甚低频（VLF）	3-30kHz	甚长波	100-10 千米（km）
低频（LF）	30-300kHz	长波	10-1 千米（km）
中频（MF）	300-3000kHz	中波	1000-100 米（m）
高频（HF）	3-30MHz	短波	100-10 米（m）

上海市嘉定区皇庆路 333 号嘉康园 B3 南楼 5 楼



甚高频 (VHF)	30-300MHz	米波	10-1 米 (m)
特高频 (UHF)	300-3000MHz	分米波	10-1 分米 (dm)
超高频 (SHF)	3-30GHz	厘米波	10-1 厘米 (cm)
极高频 (EHF)	30-300GHz	毫米波	10-1 毫米 (mm)
至高频 (THF)	300-3000GHz	亚毫米波	10-1 丝米 (dmm)

按照严格的规定, 24GHz 实际是处于 3-30GHz 范围内, 属于厘米波范畴, 基于以下两点原因, 业内约定俗成也将 24GHz 称为毫米波: 其一因为真空中 24GHz 的波长是 1.25cm, 非常接近毫米波, 工程师们一般都喜欢四舍五入取整数; 其二是因为设计电路时都有 PCB, 而 PCB 的介电常数都远大于空气及真空, 根据波长公式, 介质中的电磁波波长为 $\lambda_{\epsilon} = \lambda / \sqrt{\epsilon}$, (ϵ 为介电常数)。以 Rogers 板材 R04350B 为例, 该 PCB 板材的介电常数为 3.48, 根据介质中电磁波波长公式计算所得的波长为 6.7mm, 属于毫米波。

问 6. 目前常用的民用雷达模块的频率都有哪些?

5.8GHz, 24GHz, 77GHz, 60GHz (仅在部分国家被允许使用)。需要注意, 5.8GHz 同时开放给 WiFi 使用, 频段非常拥挤, 容易互相干扰。

77GHz 仅开放给汽车雷达使用, 不得用于汽车之外的领域。60GHz 仅在部分国家被开放, 在我国目前暂未开放 60GHz 频段用于民用。

根据国际通信联盟无线电通信局的频谱规定, 24-24.25GHz 是属于 ISM 频段, 应用这个频段无需许可证或费用, 只需要遵守一定的发射功率 (在我国是 20mW), 在全球都可以使用。另外根据中华人民共和国工信部 2019 年第 52 号公告中的《微功率短距离无线电发射设备目录和技术要求》, 24-24.25GHz 属于 H 类设备, 是免检的。因此 24GHz 频段是可以合法使用并且无需额外做无线电认证的, 对于用户产品尤其出口的产品来说, 24GHz 是非常友好的。并且 24GHz 波长短, 电路天线尺寸可以做的小, 同时又具有一定带宽, 可以实现测距测角测速功能, 满足各种场景和需求的应用, 24GHz 在功能拓展上也留有更多潜力, 性价比非常高, 也是最流行的频段。

问 7. 上述这些频段的区别是什么?

主要区别在于载波频率高低、波长及可用带宽。

对于多普勒雷达而言, 多普勒频移公式为 $f_d = \frac{2v}{c} \cdot f_0$, 同等目标运动速度下, 载波频率越高, 产生的多普勒频移就越大, 就越容易被电路解调。举例来说, 对于室内人员微动检测, 假设一个人的原地微动



肢体动作为 0.1 米/秒，那么 5.8GHz 所产生的多普勒频移仅为 3.8Hz，而同等条件下，24GHz 产生的频移为 16Hz，对于硬件滤波器设计及算法解调来说更容易解析，灵敏度更高。

而波长越短，天线的尺寸可以做的越小，实现多发多收及更大的天线阵列数，同时也可以根据场景需求调节天线阵列。

带宽越宽，距离分辨率越高，测距盲区越小，理论公式为 $\Delta R = \frac{c}{2B}$ ，公式中 c 是光速，B 是带宽（单位 Hz）。24GHz 可用带宽为 250MHz，理论距离分辨率和盲区为 0.6 米。当带宽为 1GHz 时，则距离分辨率和盲区为 0.15 米。

从电路设计难度来讲，频率越高，设计难度越大。对板材，加工精度等要求就更高。成本相应也就提高。

问 8. 带宽、盲区、精度和分辨率的区别

带宽是指无线电信号所占用的频率范围，比如 24GHz 频段可用的频率范围是 24G-24.25GHz，带宽为 0.25GHz=250MHz。如上所述，带宽越宽，距离分辨率和盲区就越小。

盲区是针对 FMCW 测距而言，在盲区内，并不意味着雷达无法检测到目标。在盲区内，雷达输出的距离不是物体真实距离，而是盲区距离。比如 24GHz，250MHz 带宽，盲区为 60cm，那么在 60cm 内的物体，雷达输出的距离都会显示 60cm 左右。

精度是指实际距离与探测输出距离的误差，与带宽及算法相关。矽杰的 24GHz 毫米波雷达模块，虽然带宽只采用 200MHz 带宽，但是通过算法插值补偿，其实际探测精度为 +/-10cm 左右。

分辨率是指雷达区分两个目标的能力，与精度不是一个概念。分辨率与带宽相关。250MHz 带宽下，距离分辨率为 60cm，则两个物体间距必须大于 60cm，雷达才能将两个物体区分开。

问 9. 雷达发射功率的单位

在射频微波领域，功率通常都用 dBm 来表征，dBm 与 W 的换算见如下公式：

$$P(\text{dBm}) = 10 \log(\text{功率值 } W / 1\text{mW})$$

例如：按照我国《微功率短距离无线电发射设备目录和技术要求》，24GHz 设备发射功率限值是 20mW，则 $10 \log(20\text{mW} / 1\text{mW}) = 13\text{dBm}$ 。当发射功率为 1W 时，则 $10 \log(1\text{W} / 1\text{mW}) = 30\text{dBm}$ 。

问 10. 什么是 EIRP?

雷达模块在实际使用时，都是带有天线，将信号能量辐射出去，因此从模块角度来说，此时的发射功

率其实都是指 EIRP (*Equivalent Isotropically Radiated Power*, 等效全向辐射功率) 在谈到雷达模块发射功率时, 我们一般指的都是 EIRP。

EIRP=发射机发射功率 P (dBm) + 天线增益 (dB)

例如: 发射机发射口功率 3dBm, 天线增益为 5dB, EIRP=3+5=8dBm。以矽杰微电子典型的人体存在检测雷达 RKB1161G 为例, 其发射功率为 3dBm, 指的就是 EIRP。3dBm 也远低于国家所规定的 13dBm 上限。完全符合无线电规范。

问 11. 我们经常提到的被测目标 RCS 是什么意思?

RCS(Radar Cross Section, 雷达散射截面积) RCS 通常用符号 σ 表示, 单位是 m^2 。它表征了目标在雷达波照射下所产生回波强度的一种物理量, 也同时表征了一个物体可被雷达探测的程度, RCS 越大, 目标越容易被雷达探测到。影响 RCS 的几个因素主要为: 目标材料的电性能、目标的几何外形、目标被雷达波照射的方位、入射场极化形式和接收天线的极化形式。雷达探测距离 R 与雷达发射功率 P_T , 收发天线增益 G_T 、 G_R , 信号波长 λ , 目标的等效截面积 σ 与雷达最大接收能力 P_R 等参数相关, 其计算公式表示为:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_R \cdot (4\pi)^3}}$$

雷达方程

可以从公式中看到, 当一个雷达的发射功率、收发天线增益等都固定时, 雷达的探测距离就由目标的 RCS 决定。在实际应用中, 一个典型的现象就是在测多普勒雷达感应距离时, 胖子比瘦子的感应距离更远, 大人比小孩的感应距离更远, 这就是 RCS 在起作用。下表列出了一些典型物体在 24GHz 下的 RCS 值:

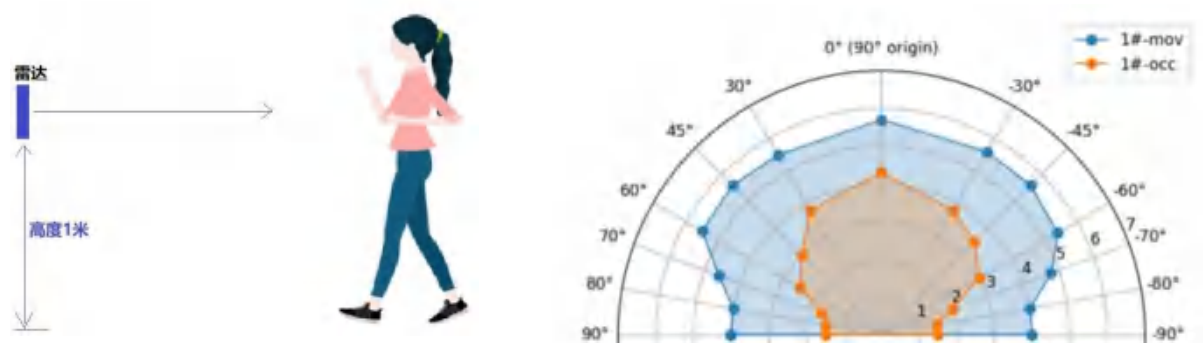
目标	典型 RCS
1 平米的金属板	$>100m^2$
小轿车	$10m^2$
轮船	$>1000m^2$
人体	$0.5 - 1m^2$
树	$>1m^2$

从上述数据可以看到, 人体对于电磁波来说, 并不是一个非常理想的反射目标。而金属对于电磁波的反射非常强, 因此在智能家居应用领域, 一般都建议雷达安装时探测方向避开大面积的金属目标。

问 12. 雷达模块的天线角度与 FOV 的区别

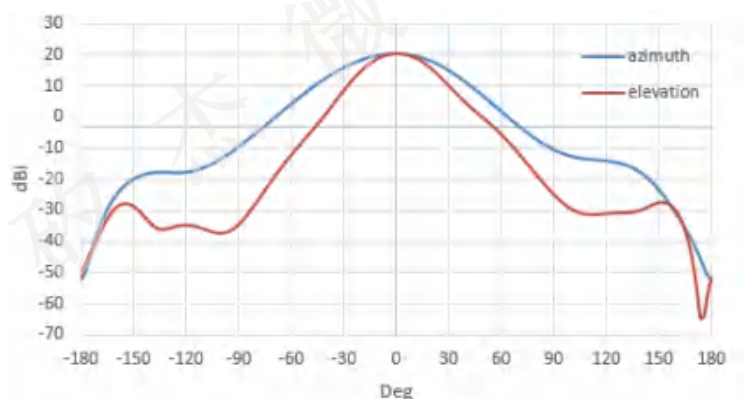
电磁波是以能量场的形式通过天线辐射出去，我们定义天线角度为半功率角，即当天线增益降低为最大增益一半时的角度，也称为天线的半功率波束宽度、3dB 波束宽度。天线的半功率角度是描述天线辐射电磁能量在空间分布的一个重要参数，半功率角度越小说明天线辐射能量越集中。通常天线设计好之后，这个参数就固定了，无法改变。参考半功率波束角度，可以大致推断雷达检测的范围，但并不意味着在天线角度之外，雷达就没有辐射能量了，就完全探测不到目标了，只是辐射的能量更小，检测到的目标信号降低了。为了较为直观的使用户了解一个雷达模块的探测范围，我们通常用 FOV（Field of View）来表示一个雷达模块的探测范围。FOV 通常是通过实测得到的。以室内人体感应雷达来说，不同的测试人员体型、步态模式不同，对应的 RCS 都会有一些偏差，因此测得的 FOV 也会有些许差异。一般手册里给出的 FOV 图，是一个供参考的检测范围。FOV 会随着灵敏度设置不同而改变，也和雷达测试安装方式有关。

下图展示的是一个水平安装场景下，实测的雷达模块 FOV。



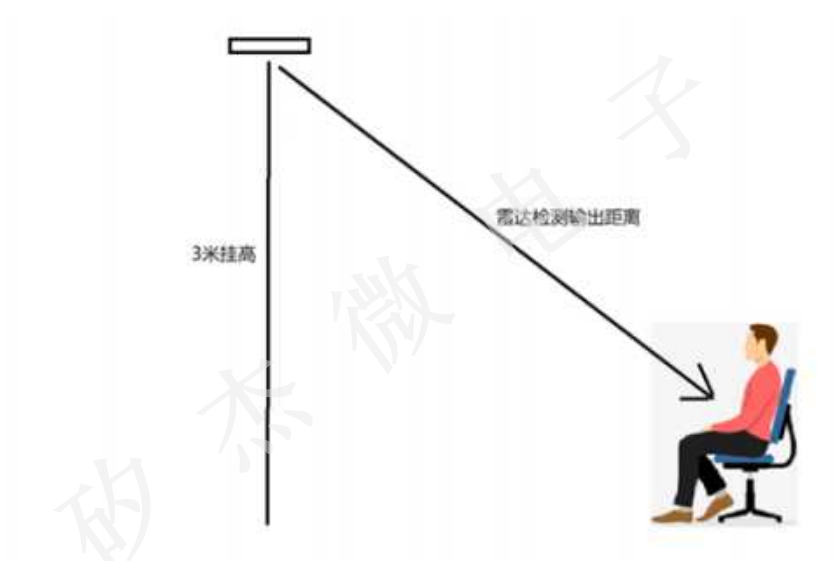
水平安装场景下，雷达的覆盖范围

下图展示的是天线垂直面和水平面的方向角。对比上图雷达模块的 FOV，FOV 与天线角并不完全对应，近端最大检测角度远大于天线的半功率角。另外也可看到在 3dB 角度之外，天线依然有增益但只是增益会随角度增大而逐渐减小。

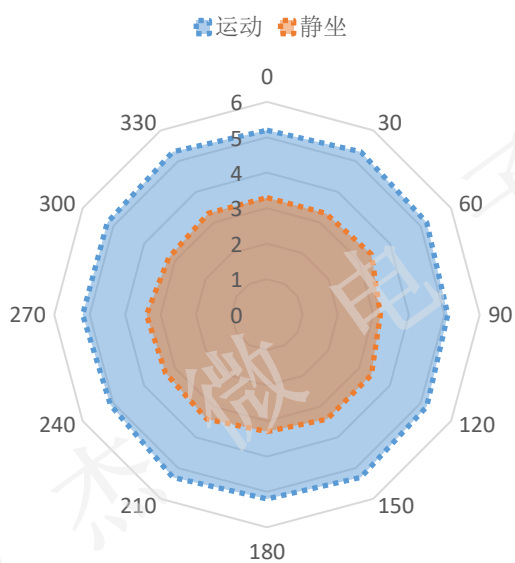


天线方向图

当我们把雷达挂高 3 米进行测试，此时 FOV 的覆盖范围就变成半径 5 米的圆了。此时的 FOV，则与天线方向角的图形，就更没有可比性了。



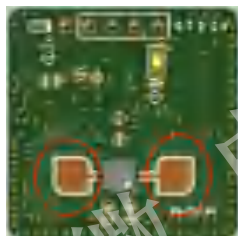
雷达挂高 3 米的应用场景



挂高后的 FOV

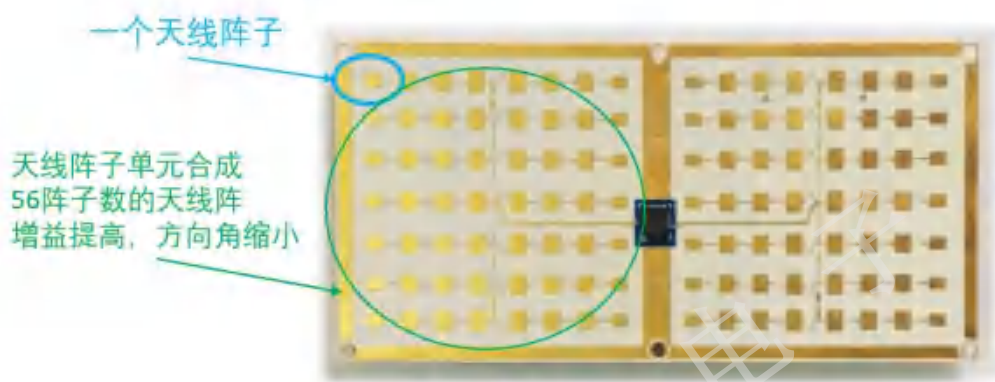
问 13. 天线阵列与阵子

我们现在用的雷达模块，普遍采用微带天线。从外观来看，就是印刷于 PCB 表面的一层金属，见下图红圈内，分别为接收和发射天线。微带天线最小的一个单元，就是如下图红圈内，一般我们以单阵子来称呼它。



可以通过增加天线阵子数，来增加天线增益。当雷达芯片的发射功率固定时，则随着天线增益的提高，模块的 EIRP 就随之提高。 $EIRP = \text{芯片发射功率 (dBm)} + \text{天线增益 (dB)}$ 。但能量是守恒的，所有的发射能量均来自于芯片的发射机，天线增益提高的同时，天线的方向角就会收缩，使辐射的功率集中于一个方向。可以想象一个手电筒，灯珠发出的光源能量是固定的，但是通过将光束集中，可以提高照射的距离，但是光束覆盖的角度就会减小。

以下图的液位计雷达天线为例，收发天线为 56 阵元的微带天线。采用 SRK1201L 雷达芯片，雷达芯片的发射功率为 9dBm，采用该天线阵后， $EIRP = 25\text{dBm}$ 。方向角缩小为 $\pm 7^\circ$ 。

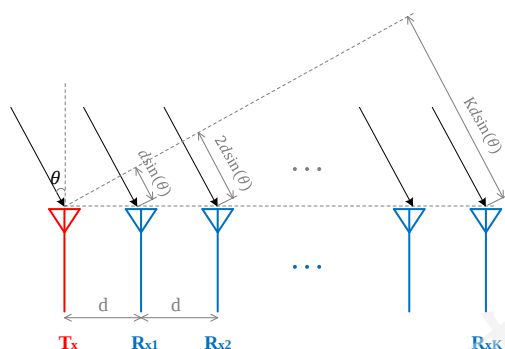


而同样采用 SRK1201L 的另一款模块，采用 4 阵子天线时， $EIRP = 15\text{dBm}$ ，方向角为 $\pm 33^\circ$ 。相比更多阵子的液位计模块，辐射功率降低，方向角扩大。



问 14.一发一收与多发多收的区别？

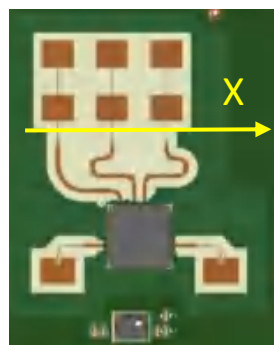
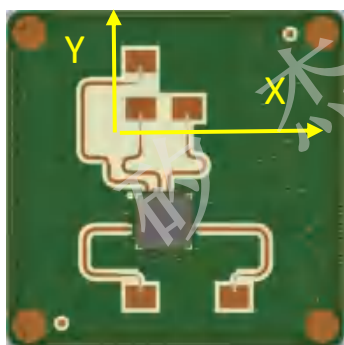
一发一收的雷达，只能做多普勒触发感应、多普勒测速、及 FMCW 测距等应用，对应到实际的应用场景有家电屏幕及各类面板触发、室内人体照明感应、马桶自动开盖、安防触发、人在传感器、液位计、交通测速等应用。这类应用一般不需要目标的角度信息。



而进阶的雷达应用，诸如基于轨迹跟踪安防，家电中的空调风扇跟踪送风，人流量统计等，除了目标的速度距离外，还需要目标的角度信息。此时一发一收的雷达就不能完成上述的功能了，必须用到至少一发两收的雷达。两个接收机之间接收到回波信号存在相位差，通过相位差可以计算出目标的角度。随着通道数的增加，角度分辨率也随之增加。

对于多发多收的雷达架构，以 1T3R 和 2T2R 做对比举例说明，从收发总通道数来看，两者相等。但从测角性能上看，1T3R 只能构建 $1 \times 3 = 3$ 个阵元的虚拟阵列，而 2T2R 可以构建 $2 \times 2 = 4$ 个阵元的虚拟阵列，角分辨率得到提升。从系统硬件架构看，1T3R 需要 3 个 ADC，2T2R 需要 2 个 ADC，但 2T2R 需要多一个发射通道。同时 2T2R 需要考虑波形设计，可以构建比单发增益更高的波形。但是在相同的硬件尺寸下，2T2R 的收发通道间距比 1T3R 小，因此需要注意收发通道间的隔离度，避免发生收发通道之间的泄漏。

另外，以 2 发 3 收为例，下图两个雷达同样都是 2T3R 的架构，左图雷达的接收天线在 XY 轴上分别有两个接收通道，右图的雷达仅在 X 轴上有 3 个接收通道。因此左图的接收架构下，雷达可以同时检测垂直方向的角度信息，而右图的雷达仅能检测水平方向的角度信息。

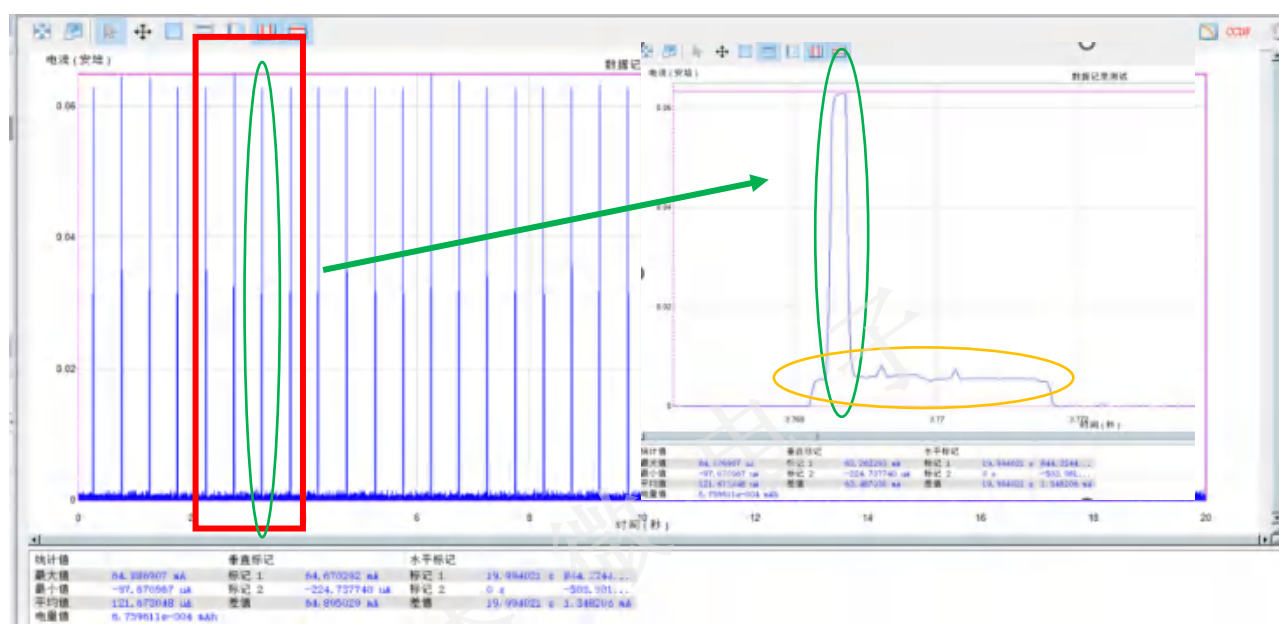


问 15. 毫米波雷达的低功耗是如何实现的？

毫米波雷达在探测时，需要主动发射信号源，通过被测目标反射信号进行目标检测，是一种主动探测型的技术手段。因此，相比热释电红外这种无需自身发生信号源的被动式检测，其功耗就相对比较大。

在很多应用场景中，都需要用到电池供电。此时毫米波雷达的功耗就至关重要。毫米波雷达一般会采用占空比工作方式降低功耗，其原理类似于心脏的工作方式：心脏的一次跳动包括收缩和舒张两个过程。心脏收缩为工作，舒张为休息，实现心脏工作与休息交替进行。毫米波雷达也通过间歇工作方式，将平均功耗降低。以下图实例展示：雷达每秒开启 2 次，每次开启雷达芯片工作时间约 200 μ s，MCU 开启时间约 3ms。雷达芯片工作期内，电流峰值仍然为 65mA 左右，关闭雷达芯片后，MCU 的电流约 8mA 左右，按此条件下的平均电流为 121 μ A 左右。

简单来说，每秒开启的次数越少，每次开启的时间越短，平均电流越低。但是响应会变慢，同时算法也需要根据不同的时间配置做针对性优化，达到电流与性能间的平衡，并非是无限制的减少占空比及检测时间。同时，该工作模式下，并不会减小雷达芯片工作期内的峰值电流。在做电源设计时，需要按系统的峰值电流驱动能力设计，不能直接按平均电流去规划最大电流驱动能力。



上图中，红框内为 2 秒有 4 根电流脉冲，代表 2 秒内雷达开启了 4 次。将单根电流脉冲放大后，可以看到持续约 200 μ s 的峰值电流 65mA，及约 3ms 的 8mA。代表了每次雷达芯片开启 200 μ s，MCU 工作 3ms，然后进入休眠再到下一个工作周期，循环往复。

问 16. 什么是多径效应?

在智能家居场景使用 1 发 2 收或多发多收可测角雷达时, 伴随着真实目标输出的同时, 经常会出现假目标。而造成假目标的主要原因是多径效应。

雷达的多径效应是指雷达电磁波在照射目标时, 由于周围环境的反射, 电磁波的直达波和反射波或多条传播路径回波同时达到接收点而产生的多路径传播效应。多径效应会导致雷达系统的工作不稳定, 降低跟踪目标的精度, 甚至使跟踪失效, 亦或是产生虚假的目标, 从而影响雷达的探测性能, 最终体现在用户端则是体验效果差。

尤其在智能家居应用中, 雷达是在室内使用。环境中各种强反射物体, 比如冰箱, 大屏幕液晶电视, 玻璃幕墙, 镜子等这类表面材质为金属或者电磁波强反射材料, 导致室内环境下, 电磁波的传播路径非常复杂。而现有的应用都要求雷达除了检测人体运动外, 还可以检测人体微动及呼吸信号, 雷达的灵敏度都设置的非常高, 因此室内复杂环境下的多径假目标就更加明显。下图示例中, 展示了在居家环境中, 同一个被测目标下, 电磁波会经过不同路径入射及反射: 蓝色为直射波, 红色、橙色、绿色均是由环境中的液晶电视, 金属冰箱门, 金属座椅桌面等反射的传播路径 (可以将其想象成光束经过多个镜面反射折射后产生光斑虚影)。最终导致雷达输出的结果中产生假目标。



图 电磁波在室内对同一个目标物反射信号的不同路径

下图是实际雷达在使用中，因为多径而产生的假目标。环境中只有 2 个目标，但是因为多径而变成 3 个目标。用户在拿到带有假目标的结果时，会产生系统误判。下图视频截图的是两款不同品牌雷达在同一时刻同一测试位置，雷达的输出。可以看到两者都产生了同样的假目标，因此多径是一个和应用环境相关且普遍存在的现象。

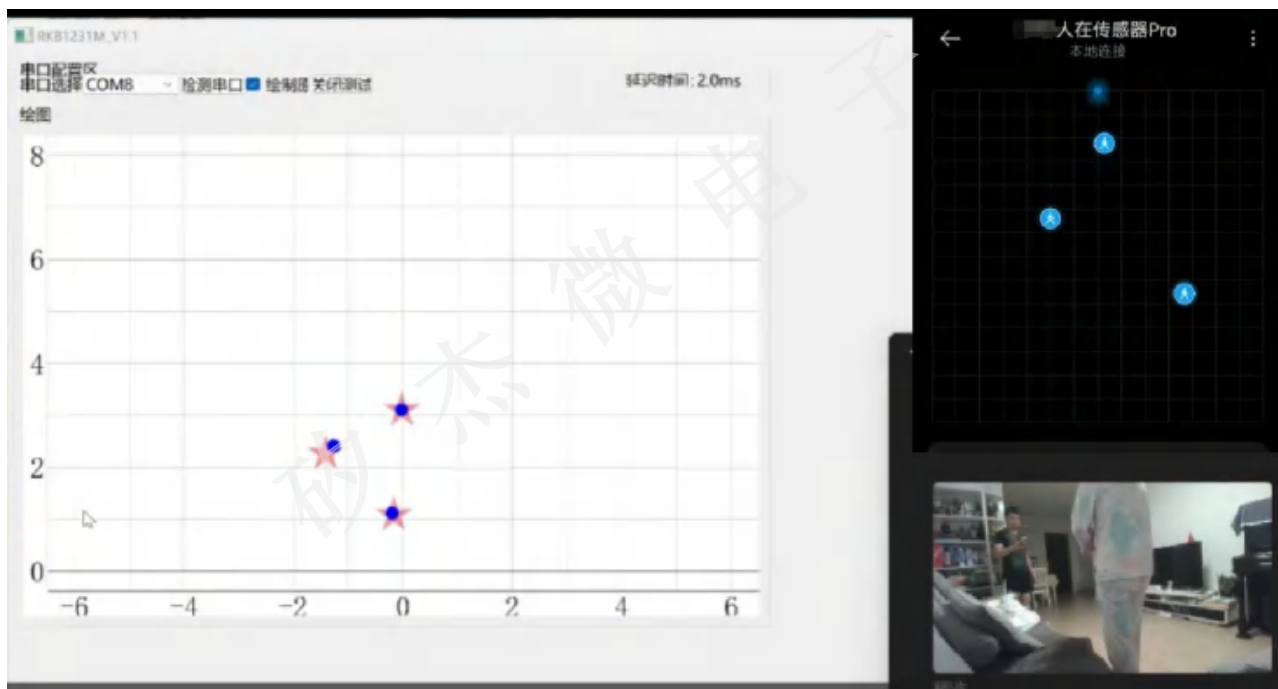


图 不同品牌雷达在同一环境同一时刻测得的假目标

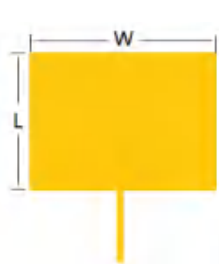
问 17. 毫米波雷达模块的 PCB 板材选取有什么讲究？

我们经常遇到一些客户，想将雷达模块的电路直接画在他们的系统主板上，与主板集成为一体减小剖面节约空间。想法虽然很好，但是需要注意一个问题：PCB 板材。

PCB 板材的特性对微波射频电路的性能至关重要。微波射频电路中会有大量的微带线匹配，对于雷达模块，还涉及微带天线。这些电路的性能都非常依赖于 PCB 板材的性能。板材指标中，会关注介电常数 ϵ_r 及损耗角正切 $\tan\delta$ 。

以矽杰微的 SRK1101A 芯片设计雷达模块为例：芯片射频端口阻抗为 50 欧姆左右，设计的微带天线端口阻抗也为 50 欧姆，通过 50 欧姆渐变线，将天线与芯片射频收发端口连接。

一个简单的微带天线设计公式如下所示：



$$L = \frac{1}{2f_r \sqrt{\epsilon_{\text{reff}}} \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} - 2\Delta L \quad W = \frac{1}{2f_r \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} = \frac{v_0}{2f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}}$$

其中，

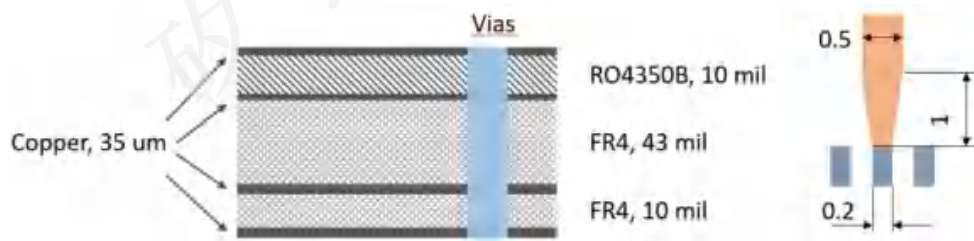
$$\frac{\Delta L}{h} = 0.412 \frac{(\epsilon_{\text{reff}} + 0.3) \left(\frac{W}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{reff}} - 0.258) \left(\frac{W}{h} + 0.8 \right)} \quad \epsilon_{\text{reff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{W} \right]^{-1/2}$$

h 表示介质厚度； W 表示天线的宽度； L 表示天线的长度； ϵ_r 表示介质相对介电常数； f_r 表示谐振频率； ϵ_{reff} 表示有效介电常数。从这个微带天线公式中可以看到，PCB 板材的厚度，介电常数以及宽度长度都会直接影响到天线的谐振频率及端口阻抗。因此在加工中，板材参数的稳定性及加工精度会直接影响到天线的性能。同时，板材介质会对电磁波产生衰减，介质损耗角正切值 $\tan\delta$ 是表征介质中能量损耗的一个参数，它反映了介质对电磁波的吸收和耗散能力。在许多电子设备和通信系统中，介质的损耗是一个重要的参数，而损耗角正切值 $\tan\delta$ 是衡量这种损耗程度的一个重要指标。

下表是典型的微波板材 Rogers4350B 和典型 FR-4 的介电常数及损耗角正切参数，可以看到 Rogers4350B 的损耗角正切比 FR-4 要低一个数量级，并且 R04350B 给出的是在 10GHz 的损耗角正切，而 FR-4 是在 1MHz。一般高性能毫米波雷达会采用 R04350B 等这些微波板材以保证射频性能。FR-4 板材对微波信号的损耗较大，并且不同厂家的 FR-4 板材，这些参数也有所不同，导致批量一致性不佳。

板材	介电常数	损耗角正切
RO4350B	3.48	0.0037@10GHz
FR-4	4.8	0.03@1MHz

下图展示的是一个典型毫米波雷达模块的 PCB 层叠结构。毫米波微带电路需要一个完整的接地平面，因此雷达模块普遍会采用 4 层 PCB 层叠结构。第二层作为第一层射频微带电路及微带天的地平面。第一层与第二层直接采用微波板材，同时根据上述设计公式，会采用一个比较小的板材厚度，以减小微带天线的尺寸。



PCB 层叠结构以及 SRK1101A 在此 PCB 板材及层叠结构下的 TX/RX 端口 50 欧姆阻抗渐变线电路

综合以上因素，如果用户要将雷达电路直接画在系统主板上，为了保证雷达电路的性能，则层叠结构需要采用多层板，同时第一层板材需要选用高频板材。而一般的系统主板尺寸都比较大，为了兼顾雷达电路的性能，不得不将整个系统主板的板材，层叠结构及加工工艺都按照雷达电路的要求实施，使得系统成本大增。同时，如果用户需要在降低成本的前提下采用 FR-4 板材进行设计，就会遇到很多工程问题：板材参数波动导致的天线增益、谐振频率、端口阻抗的波动，最终体现到雷达的一致性变差甚至无法满足性能要求。而很多场合下，用户的主板所采用的 PCB 板材在射频性能上甚至比 FR-4 的规格更低，完全没有可能在这样的条件下去设计出符合性能要求的雷达。

因此目前的主流的方案都是单独采用雷达模块。矽杰微也开发了 RKA1166H 可贴片射频前端板，直接集成了天线。这样用户可以将中频及 MCU 部分的电路画在系统主板上，雷达芯片+天线做一个贴片器件来使用，也可以规避板材的问题。下图是采用 RKA1166H，将雷达电路与系统主板集成的设计案例。



RKA1166H 及系统主板应用示例

问 18：矽杰微的毫米波雷达芯片与其它家的雷达芯片相比，有什么优势？

矽杰的雷达芯片采用锗硅工艺，从芯片射频指标性能来说，其噪声系数和相位噪声更佳。同时因为芯片采用的射频前端架构，输出的是 IQ 信号，IQ 信号的平衡度相比竞品也更优。同时从中频电路硬件设计角度看，中频滤波器也可以根据实际场景需求，进行针对性设计。下面的表格是对目前市面上常见品牌的雷达芯片的一个简单对比，从指标中可以看到矽杰的芯片在噪声系数、相位噪声、IQ 平衡度等几个指标上都是领先于竞品。

	矽典微 S3KM111	隔空 AT24MP1T2RS32A	斯凯瑞利 RC2412	英飞凌 BGT24LTR11	英飞凌 BGT24LTR22	矽杰 SRK1101A	矽杰 SRK1201L
Freq. Range (GHz)	24-24.25	24-24.25	23.5-25	24-24.25	24-24.25	23-25	23-25
TX/RX Channel	1T2R	1T2R	1T2R	1T1R	2T2R	1T1R	1T2R
TX Power (dBm)	12	11 (BPSK)	5	6	5	3	9
VCO PN @ 1 MHz	-97	-92	-100	NA	-85(100kHz)	-96	-102
TX Power Tuning (dB)	12	tunable	unknown	Fixed	24	Fixed	18
Max CG (dB)	31	unknown	unknown	20	25	25	30
Min CG (dB)	15	unknown	unknown	NA	unknown	NA	13
DSB NF (dB)	10.5	12	15	10	5	10	9
IP1dB @ Max Gain (dBm)	unknown	unknown	unknown	-28	-19	-22	-15
IQ imbalance	NOT IQ	unknown	unknown	$\pm 12^{\circ}/1\text{dB}$	$\pm 10^{\circ}/1.5\text{dB}$	$\pm 5^{\circ}/1\text{dB}$	$\pm 5^{\circ}/1\text{dB}$
DC voltage (V) and current (mA)	3.3/64	3-4.2/120	2.3-3.6/90	3.3/60	1.5/170	3.3/70	3.3/230
QFN Package	4x4 32pin	4x4 36pin	5x5 32pin	2.4x2.4 16pin	3.63x3.63 16 ball BGA	2.4x2.4 16pin	5x5 40pin
Integration of PLL, ADC, FFT Acc.	Yes	PLL, 10Mbps 16-bit ADC, Arm Cortex M0+ 104MHz 192KB SRAM+256KB FLASH	PLL, ADC, 32bit core, 40KB SRAM	No	ABB only	No	No

虽然矽杰芯片目前没有集成 MCU 或者加速器，从用户入手难度和对用户的技术要求比其它高集成度芯片而言更高一些，但正因为此，在做低功耗等应用时，具有更高的灵活性，可以根据场景需要配置不同的扫描周期，chirp 数和占空比，并且与低功耗 MCU 的逻辑配合更优，可以实现同等用户体验下更低的功耗。

目前大部分竞品的芯片都是针对智能家居应用设计的，产品仅有 1 发 1 收及 1 发 2 收。而雷达有很大一部分应用是在非智能家居领域。此时矽杰雷达芯片的射频指标和系统电路架构设计的灵活性的优势就体现了。并且除了 1 发 1 收和 1 发 2 收外，矽杰还有 2 发 4 收和 2 发 4 收级联配套芯片。除了智能家居领域，还可以应用在水文、交通、安防、无人机等各种工业应用领域。从广义的雷达应用角度来说，矽杰微的雷达芯片应用范围更广，通过市场的接受度和普及程度，也可以看出矽杰微的雷达芯片的优势。

问 19：矽杰微的毫米波雷达芯片只是一个射频前端，相比现在全集成的芯片方案，是不是落后了？

集成度并非越高越好。从射频性能指标来说，矽杰微采用的是锗硅工艺，其射频性能是远高于 CMOS 等更高集成度的工艺。因此，矽杰微的毫米波雷达芯片除了用在智能家居家电等室内小空间人体探测使用外，还可以用在智能交通，液位计，无人机定高避障等多种工业类场景，可应用的场景更加多元。而大多数目前其它 24GHz 集成 MCU 或者加速器的毫米波雷达芯片，仅能用于智能家居领域。

其次，射频模拟器件的半导体工艺迭代速度比较缓慢。一旦工艺成熟定型，其生命周期非常长久。而数字器件的半导体工艺迭代速度非常快，可参考摩尔定律。因此，在实际应用中，矽杰微的雷达芯片搭配的外置 MCU 的性能可以随着数字器件半导体工艺的进步而一同进步，做成雷达模块的性能可以随着数字器件工艺性能的提升而一起迭代提升。（见下图模块架构示意图，外置 MCU 可随半导体工艺迭代而进步）而全集成的雷达芯片方案，就没有这个升级的可能性，只能停留在当时设计时的半导体工艺和性能水平。一旦有更高性能的需求，除非重新设计芯片，否则就没有升级的可能性。

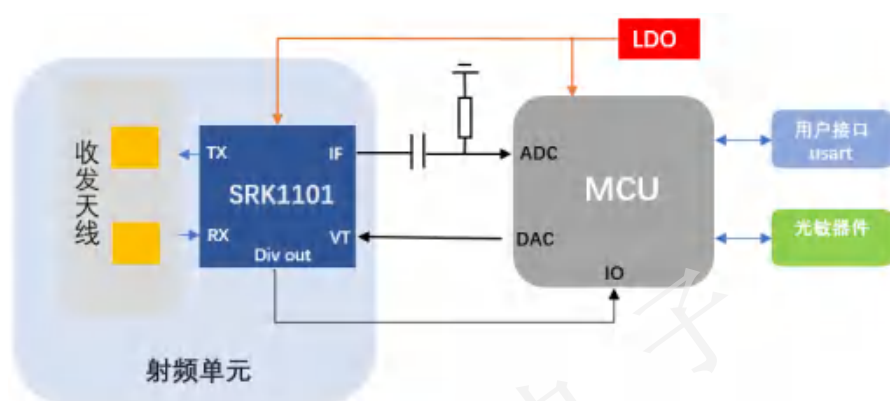


图 采用矽杰毫米波雷达芯片的雷达模块的典型架构示意图

从大多数普通用户角度来看，高集成度意味着模块设计难度低，表面上看是用户自己设计的，但从设计到算法都是黑盒子，用户并没有真正掌握其中的核心技术。并且不同用户设计出来的产品都是一样的，可能仅仅是外型不同，没有自己的特点。到了市场之后，就没有产品区分度可言，最终陷入无尽的价格战。

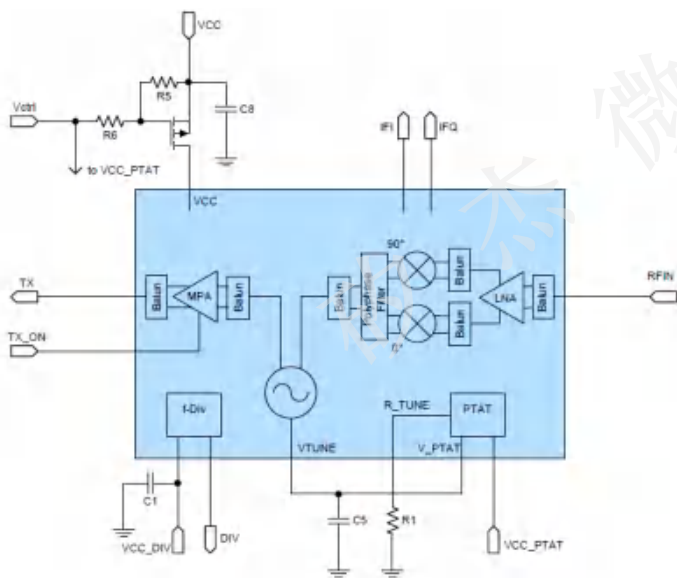
而射频前端+中频 MCU 处理分开设计的入门门槛更高，需要用户更扎实的研发功底。用户可以采用不同的系统方案和架构，可以根据不同产品场景需求设计出具有自家特色的产品。同时从数字器件性能迭代升级空间而言，矽杰微的雷达芯片的射频前端+中频 MCU 分离的架构方案，反而更具有优势。

回到上面的问题，这个问题也是侧面体现了矽杰微雷达芯片的一个优势。

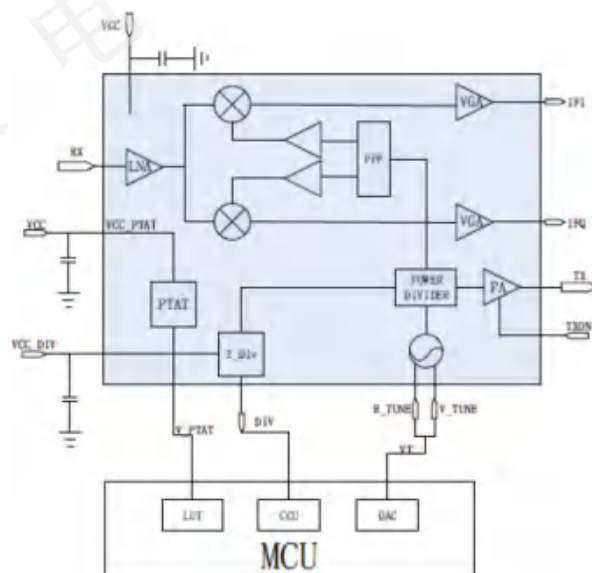
问 20: 矽杰微的 SRK1101A 与英飞凌的 BGT24LTR11N 管脚兼容, 可以直接替换使用吗?

如果不追求极致的性能, 可以直接替换。但是如果要发挥最大性能, 需要注意以下几点:

- R-Tune 连线方式:



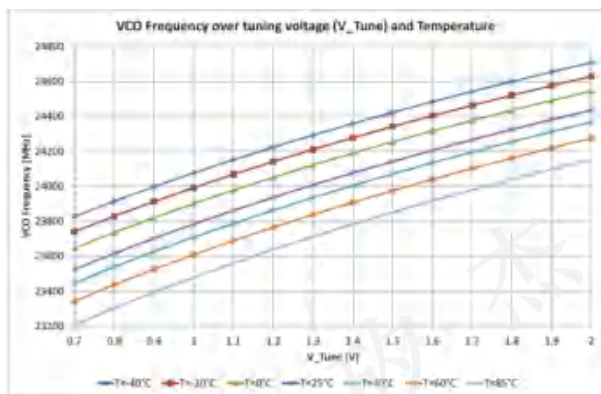
BGT24LTR11 应用电路



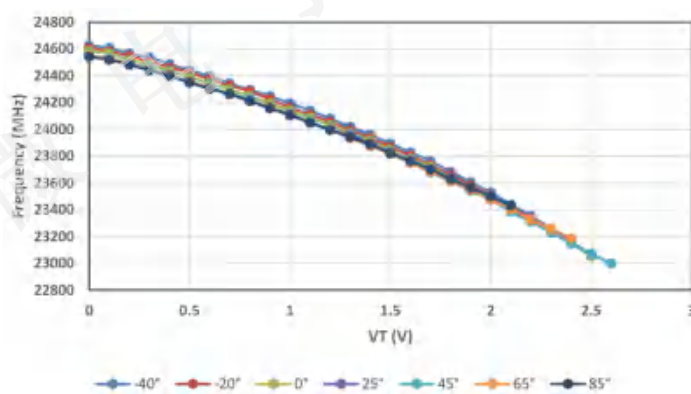
SRK1101 应用电路

英飞凌的 R-Tune 管脚连接电阻到地, 矽杰的 R-Tune 与 V-Tune 连接到一起共同调节 VCO。替换建议: 英飞凌中连接 R-Tune 的到地电阻去掉, 连接到 V-Tune 管脚。

- VCO 斜率:



BGT24LTR11 的 V_{Tune} vs VCO Freq 曲线

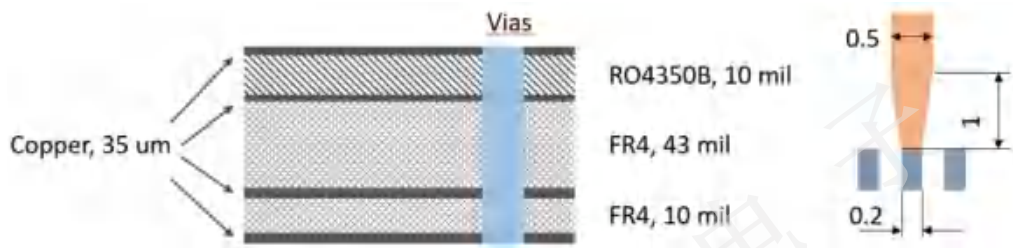


SRK1101 的 V_T vs VCO Freq 曲线

随着 VCO 调谐电压增大, BGT24LTR11 的输出频率逐渐增大, SRK1101 的频率逐渐减小, 斜率相反。

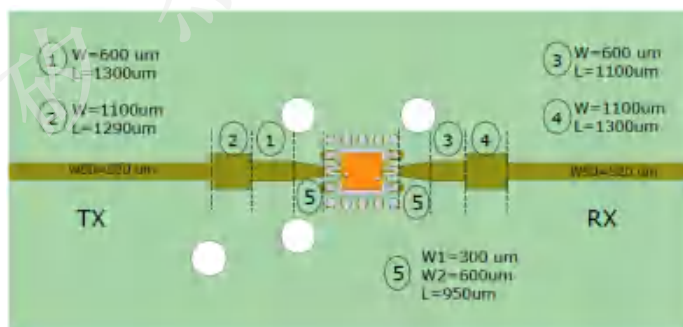
- TX/RX 口端口阻抗不同:

SRK1101 与 BGT24LTR11N 的 TX/RX 口阻抗是不同的。天线与发射机接收机之间需要阻抗匹配以达到最佳的性能，芯片替换会涉及到阻抗电路设计不同的问题。



PCB 层叠结构以及 SRK1101A 在此 PCB 板材及层叠结构下的 TX/RX 端口阻抗匹配电路

上图是 PCB 的层叠结构以及 SRK1101 在此 PCB 板材及层叠结构下的 TX/RX 端口阻抗匹配电路，下图是同等 PCB 板材及层叠结构下的 BGT24LTR11N 的 TX/RX 端口阻抗匹配电路，可以看到两者是不同的。



BGT24LTR11N 的 TX/RX 端口阻抗匹配电路

直接替换芯片，会因为端口阻抗不匹配导致模块性能下降。如果用户无法接受下降后的性能，则需要按照推荐的阻抗匹配电路进行设计，或是根据自己设计的天线阻抗来设计相应的阻抗匹配电路。矽杰微可提供 SRK1101 的 S2P 文件供有射频设计能力的用户设计使用。

问 21：现在很多竞品的雷达芯片都集成了锁相环，矽杰微的 SRK1101A 及 SRK1201L 芯片没有集成锁相环，如何保证工作频点合规？

雷达模块的工作频点由 VCO 的调谐电压 (VT) 决定。虽然 SRK1101A 和 SRK1201L 内部没有集成锁相环，但是内部有分频器输出，该分频器打开后 (DIVCtrl 置为高电平) DIVOUT 引脚输出一个方波信号，信号频率为实际工作频率的 8192 分频。

以 24GHz 工作频率为例，DIV_OUT 方波信号频率为： $24000\text{MHz}/8192=2.9296875\text{ MHz}$ 。通过 MCU 采集并测量 DIVOUT 的频率，可以实时对模块工作频率实现闭环控制，确保雷达模块工作在固定的频率上。

- 工作频点的闭环控制：



软闭环控制流程

控制流程如上图所示：MCU 采集并计算 DIVOUT 的频率，相应的调整 VT 电压值，使模块工作在特定的工作频率上。详细的软件流程实现方式可参考《24GHz 毫米波雷达芯片 SRK1101 应用及模块设计指南》。

3. 毫米波雷达应用的常见问答

问 22. 毫米波雷达现在可以用在哪些领域？

本文中，我们仅从民用领域来讲毫米波雷达的应用场景。目前毫米波雷达在智能家居领域应用场景非常多，并且新的应用也层出不穷，我们无法用文字逐一将其描述，我们仅用两张图，便可以看到毫米波雷达在民用领域的应用范围是多么广泛了。





上面两张图分别展示了毫米波雷达在智能家居及智慧城市中的典型应用场景，这些仅仅具有代表性的雷达应用场景。限于篇幅无法在本文中完整呈现，下图以大纲形式给出目前矽杰微毫米波雷达的典型应用场景。更详细的内容可以参考矽杰微历年的《毫米波雷达产品手册》。



问 23. 毫米波雷达会受温度、光照、水汽、颜色影响吗？

毫米波雷达是通过发射电磁波并接收目标反射电磁波实现对目标的探测，因此不受环境温度、光照强度、水汽、粉尘、目标颜色的影响。可穿透非金属材料的面板，无需开孔。

被测目标的材质，大小，反射面角度等会影响反射信号大小。常见的现象是胖子比瘦子反射的信号更强，金属比其它材质反射的信号更强。被侧面与电磁波发射方向垂直时反射信号会比倾斜时更强。

问 24. 雷达应用中的常见干扰物有哪些？

智能家居雷达普遍采用动目标检测，因此对于运动的物体比较敏感。绿植抖动、窗帘抖动、工作中的洗衣机、风扇、排气扇、空调等带有旋转叶片或工作时会产生较大震动的电器均有可能触发雷达。尤其是人体存在检测雷达，对于肉眼不易察觉的微动，比如安装于卫生间厨房等环境时，吊顶的震动，压缩机震动等都有可能触发雷达导致无人变有人的误报。雷达在安装时应尽量避免正对以上物体。宠物对于雷达来说，也是一个有效目标，雷达也无法过滤宠物的干扰，除非采用多发多收可做点云成像的高分辨率雷达，可从点云特征将宠物外观特征的目标排除。否则常见的 1 发 1 收、1 发 2 收乃至 2 发 4 收的雷达都无法识别过滤宠物。

另外全封闭的狭小空间内，由于电磁波在小空间内的多次反射折射的能量叠加，有可能会抬高底噪影响检测效果。因此在小空间内使用时，建议将雷达的检测距离调小，灵敏度降低。

使用时避免雷达正对强反射物体，比如大面积的金属等，因为金属对电磁波是强反射物体，如果雷达正对强反射物体，可能会导致反射信号过大使得雷达接收机信号饱和而影响检测。而对于多发多收轨迹雷达，强反射物体会产生较大的多径信号，会导致雷达产生假目标。

问 25. 算法可以滤除常见干扰物吗？

如果是雷达的传统算法，ADC 采样后对目标数据进行计算提取目标距离、速度、角度，则没有办法滤除干扰。要进行干扰物的滤除，目前一个共识是采用模式识别的方法。即通过大量的环境数据，AI 学习和提取环境特征得到模型后，再对干扰物进行滤除。按照目前的进展，还未能实现 100%的可靠性。并且在智能家居领域，因为用户对雷达模块的成本要求非常高，很难支持采用高算力的平台。因此，目前所说的可以滤除干扰的算法，都是固定场景有限条件下进行的。或者通过屏蔽干扰物所处位置，或者通过抬高检测阈值进行规避。

另外，有很多用户认为，绿植抖动，排气扇风扇转动，建筑物震动，这些干扰的特征与正常行为的特征

明显不同，应该可以轻松滤除。但是，这个特征，是我们肉眼观察到的特征，是视觉或者体感上的巨大区别。对于电磁波返回的电信号而言，这些干扰物的电信号不是单一的谱线，而是一段复杂的频谱。例如，风扇转动，从肉眼观察，它是一个高速的固定的转动频率。但是从电信号来看，电信号会从不同角度不同位置反射，就包含了很多谐波以及低频分量，是一个连续的频谱，并且这些分量和人体运动及呼吸可能重叠。因此虽然从肉眼或者体征上看，特征非常不同，但电信号特征可能并不如想象的这么单一。

问 26：智能家居雷达为什么不设计成检测静目标，这样不就可以不受环境中运动物体干扰了嘛？

当采用静目标检测时，环境中所有的物体，对雷达来说都是有效目标。此时就需要对环境进行背景校准滤除，将固定的环境背景滤除后，新出现的目标就可以作为有效目标进行输出。但是在智能家居领域，用户的使用环境不是一成不变的，环境中的各种家具设备摆设是随时会变化的。比如桌子椅子的摆放位置会变化，家具的摆放也可能变化位置。一旦原有环境中固定物体的位置发生变化，原先雷达所做的背景校准就失效。要求用户在背景环境变化后手动进行校准是不太可能的。而如果要求雷达能自动进行校准，那么问题来了，雷达并不能知道此时是因为环境背景发生变化，还是环境中有人而产生的背景信号不同。

采用静目标检测后，所面临的问题更大。所以目前智能家居雷达都是采用动目标检测。

问 27. 可以使用 DC-DC 直接给雷达模块供电吗？

毫米波雷达，尤其是测人体存在的雷达，所探测的信号是人体呼吸起伏及微动产生的微小幅度的信号，相比普通的数字及模拟电路，会更容易受到系统中各种干扰源的干扰。例如 DCDC 的开关频率，非隔离电源的开关频率，隔离电源的线圈辐射干扰等。矽杰微的雷达模块都会配有 LDO，以降低外界电源引入的干扰。可以直接用 DCDC 给雷达模块供电。但是需要注意的是，DCDC 输出给雷达模块的电压，一定要保证满足 LDO 的最小输入输出压差要求。以 RKB1161G 为例，模块采用的 LDO 输出电压是 3.3V，那么输入给雷达模块的电压最小不能小于 3.6V，以保证有 0.3V 的最小压差。如果 DC-DC 输出电压也是 3.3V，则 LDO 就不能将 DCDC 的电源纹波等进行抑制了。

有关电源方面的内容，在《矽杰 24GHz 毫米波人体存在检测雷达电源干扰解决方案》这份文档中有更详细的说明。可参考此份文档。

问 28. 外壳设计需要注意哪些事项？

一定不能使用金属材质及有金属镀层的外壳，电磁波无法穿透金属。而含有金属粉的涂层会带来比一般外壳更大的衰减，且与金属粉含量比例相关，同时如果生产时不同批次涂层金属粉含量不一致，会导致衰减不同，对雷达检测的一致性会产生影响。

一般塑料或者 PC 材质的外壳，对电磁波比较友好，引入的衰减不大。较详细的理论分析可参考矽杰微的《毫米波雷达外壳设计注意事项》文档。理论中对于最佳外壳设计所涉及的外壳材料参数比较多，通常很难获取材料的准确化学参数，无法做到准确的仿真计算获取最佳外壳设计。所以在设计之初，如果有外壳面板同材料及厚度的外壳样品，可以先拿样品进行实测，找到最佳间距后再对整机结构外壳进行设计，通常这个间距在 5-6mm 左右，但不绝对。如果结构等已经设计完成，就没有办法了，此时只能依靠雷达的最高灵敏度与实际所需的灵敏度之间的余量来弥补了。

问 29. 常见的通信，比如蓝牙，WIFI 会影响雷达探测吗？

24GHz 毫米波雷达的工作频率与常见的通信频率相距较远，因此极少出现相互干扰的问题。但是在实际应用中，很多产品的通信模块与雷达模块处于同一个 PCB 空间内，间距较小。此时通信模块辐射入雷达的能量较大，通信模块的多次谐波或者雷达模块接收机的非线性产生的谐波混频，有可能生成与有效信号重合的谐波信号而影响雷达检测。因此在整机设计时，雷达模块与通信模块的天线，间距应大于 1.5cm 以上。避免通信模块的天线与雷达模块紧贴。

通信模块与雷达模块分别布置于 PCB 的 Top 及 Bottom 层两面，避免将通信模块与雷达模块布在同一面。通信模块与雷达模块之间的 PCB 空间，尽量铺铜并接地，起到信号隔离作用。



雷达与通信天线间距大于 1.5cm，同时分别布局于 PCB 的 Top 及 Bottom 层，并在模块间铺铜接地。

问 30. EMI 设计注意事项

雷达电路设计和应用中另一个比较重要的内容就是 EMI 设计，电路中出现的令人摸不到头绪的问题，很多都是 EMI 的问题。除了常规的 EMI 设计理论，很多都是工程师在实际应用中遇到问题，通过摸索找到原因及方法后自己总结的设计经验。我们在这里简单的介绍几个较为典型的设计及应用中需要注意的事项，这些事项不仅仅局限于电路设计本身，还包括一部分系统设计和应用场景的问题。

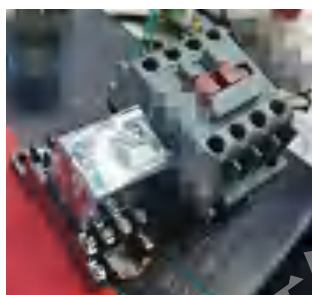
硬件电路设计中遇到的电磁兼容问题，大部分来源于传导干扰与辐射干扰。而传导干扰主要的传输路径为电源、通信接口等这些与其他电路有物理连接的端口。电源部分可参考《矽杰 24GHz 毫米波人体存在检测雷达电源干扰解决方案》的有关说明，及本章内容问 3。

通信接口诸如 SPI、USART 等，如果因为布线不良也会导致串口信号耦合到电源或者雷达的中频信号造成干扰。因此用户在做 PCB 走线设计时，要避免这些信号线与雷达中频信号及雷达电源走线靠的太近或者平行。

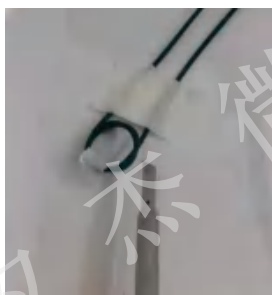
雷达中频信号走线也必须注意与干扰源隔离，尽量以最短路径进入后端比较器电路或者 MCU 采样口，减少被干扰的可能。

传导干扰可以采用示波器等仪器测到，可以找到干扰源头或者传导路径。相比之下，辐射干扰更让人难以捉摸。常见应用中的辐射干扰来源主要是交流变压器的线圈、无线通信模组的辐射、以及雷达模块要控制的整机系统诸如继电器、电机等。

下面我们展示一个典型的交流辐射干扰的测试案例，案例中我们采用比较器雷达模块及交流继电器进行辐射干扰演示。



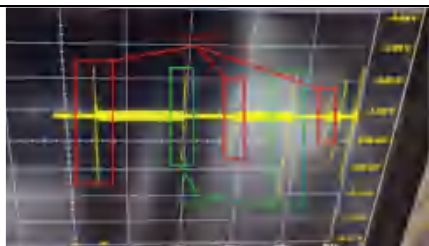
交流继电器



示波器探头靠近火线

左图是我们演示中所用的两款 220V 交流继电器，我们将 220V 交流电通过电源线与继电器连接，并将交流电源线的火线绕圈后从雷达近端经过，测试继电器通断瞬间示波器探头所探测到的火线附近空间信号变化及对雷达的影响。

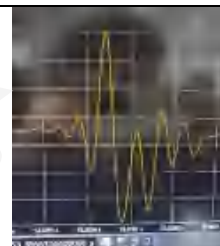
下图（a）是继电器通断瞬间，示波器探头在火线附近测到的脉冲信号；（b）图中红圈内信号是继电器导通时的噪底，绿圈内信号是继电器断开时的噪底；（c）图是脉冲信号展开后的时域波形。



(a)

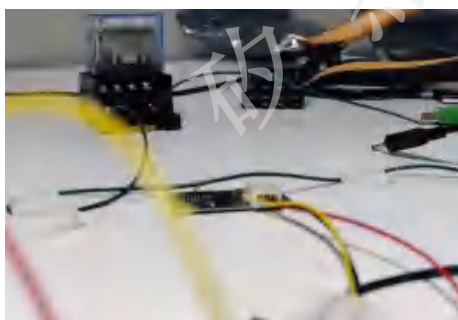


(b)

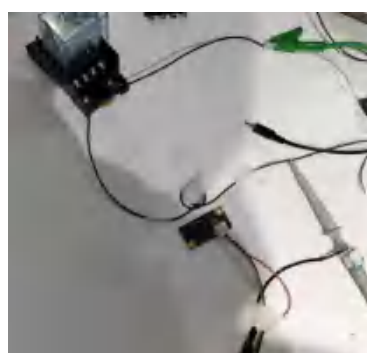


(c)

我们将火线从比较器雷达的中频电路上方近距离穿过以及从雷达模块侧方近距离穿过，见下图。当继电器通断的瞬间，比较器雷达模块会被触发。



火线从比较器雷达上方近距离经过



火线从比较器雷达侧方近距离经过

通过这个示例我们可以看到，一个简单的交流电继电器在通断瞬间在火线上产生的强脉冲信号在近距离处可以干扰雷达，而解决方法也非常简单，将火线远离雷达模块至少约 5cm 即可解决问题。用户在做系统设计时，需要了解自己系统中哪些电路单元会产生强脉冲或者强辐射并将他们屏蔽或者远离雷达，比如雷达模块与交流变压器线圈保持一定空间隔离等等。当然，一般在做整机或系统级设备时，本身也是需要一定的措施来抑制或屏蔽这些强脉冲或强辐射以满足 EMI 的相关标准。现实情况千变万化，这个示例是一个比较极端的例子，因为通常一个系统中强电和弱电会有隔离，很少会出现这种强电走线从弱电系统中近距离穿过的做法。

如果整机设计中，雷达电路附近有金属结构件时，尽量将这些金属结构件接地处理而不要悬空，以避免整机中其它电路可能产生的强电场或空间中的电场在这些悬空的金属件上产生感应电动势。

关于 EMI 设计的注意事项，我们这份问答中也只是蜻蜓点水，需要用户在日常设计和实践中多积累经验。

问 31. 家电产品的电磁兼容测试适用于雷达吗？

毫米波雷达现在已经越来越多的应用于家电产品，而家电厂家对各模组部件有可靠性测试项的要求，其中包括了和电磁兼容相关的一些测试项。毫米波雷达不同于一般的电路部件，它是一种高灵敏度的传感器，且是极低直流电压供电。因此家电产品涉及到一些电磁兼容的测试项，就不一定适用于雷达。家电类产品涉及的电磁兼容测试项主要包括以下几项：

传导骚扰抗扰度（注入电流）（GB/T 17626.6-2017），电快速瞬变/脉冲群抗扰度（GB/T 17626.4-2018），浪涌（GB/T 17626.5-2019），射频电磁场辐射抗扰度（GB/T 17626.3-2023），电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度（GB/T 17626.11-2023）。

上述这些测试项中，除射频电磁场辐射抗扰度外，其余几项均是针对 220V 强电的测试项。雷达模块的供电一般是直流 5V，电流也只有几十毫安，属于极低直流安全电压产品。在上述测试项的国标中也有明确说明：

1. 在传导骚扰抗扰度标准中（GB/T 17626.6-2017）明确规定不适用于电池供电/使用时不接市电的器具，另外如果是交流-直流适配器供电的直流器具也应由交流-直流电源适配器的交流电源输入端上进行测试而不是直接在直流器具上测试，且测试仅适用于大于 3 米的电缆。

表 6 直流电源输入和输出端口

环境现象	试验规定	试验配置
射频电流 共模 1 kHz, 80% 调制	0.15 MHz~230 MHz 1 A (r.m.s) (未调制) (500 欧姆抗)	按 GB/T 17626.6-2017
不适用于由电池供电，使用时不能接到市电的器具。 不适用于用来连接到电池或可充电电池的输入端口。当电池充电时应从器具上拆卸或断开。与交流-直流电源适配器一起使用的具有直流电源输入端口的装置器具应在由制造商规定的交流-直流电源适配器的交流电源输入端上进行测试，或者在没有任何规定的情况下，使用典型的交流-直流电源适配器进行测试。对于打算永久连接的直流输入和输出端口，测试仅适用于大于 3 m 的电缆。		

测试直流电源端口时应使用耦合/去耦网络。

表 7 交流电源输入和输出端口

环境现象	试验规定	试验配置
射频电流 共模 1 kHz, 80% 调制	0.15 MHz~230 MHz 3 A (r.m.s) (未调制) (500 欧姆抗)	按 GB/T 17626.6-2017
对于特低电压的交流电输入和输出端口，这个测试仅适用于制造商功能规范规定的总长度可超过 3 m 的电缆连接的端口。		

2. 在电快速瞬变/脉冲群抗扰度标准中（GB/T 17626.4-2018）规定，交流-直流适配器供电的直流器具也应由交流-直流电源适配器的交流电源输入端上进行测试而不是直接在直流器具上测试，且测试仅适用于大于 3 米的电缆。

5.2 电快速瞬变

电快速瞬变试验根据基础标准GB/T 17626.4—2018和本部分表2~表4中的要求进行；试验是在正、负两个极性上各进行2 min。

表 2 信号线和控制线端口

环境现象	试验规定	试验配置
共模快速瞬变	0.5 kV (峰值) 5/50 ns T/Ta 5 kHz 重复频率	按GB/T 17626.4—2018
仅适用于按制造厂商功能规范规定的总长度可超过3 m的电缆连接的端口。		

表 3 直流电源输入和输出端口

环境现象	试验规定	试验配置
共模快速瞬变	0.5 kV (峰值) 5/50 ns T/Ta 5 kHz 重复频率	按GB/T 17626.4—2018
不适用于尚未连接到电池或可充电电池的输入端口，该电池充电时应从器具上拆卸或断开。与交流-直流电源适配器一起使用的具有直流电源输入端口的装置器具应在制造商规定的交流-直流电源适配器的交流电源输入端上进行测试，或者在没有任何规定的情况下，使用典型的交流-直流电源适配器进行测试。对于打算永久连接的直流输入和输出端口，测试仅适用于大于3 m的电缆。		

- 浪涌(GB/T 17626.5-2019)标准中提出，对于低压的直流输入输出端，如果次级电路（与交流电源端口隔离）不会遭受瞬态过电压，则不用对低压直流输入输出进行浪涌实验。一般雷达模块的供电为5V，从220V下来之后一般会经过多级电压转换，最后通过DCDC或者LDO给模块供电，中间有多级电压转换及稳定电路，不会遭受瞬态过电压。

对低压(电压不大于60 V)直流输入/输出端，如果次级电路(与交流电源端口隔离)不会遭受瞬态过电压(如通过可靠接地和电容滤波的直流次级电路，其纹波的峰峰值小于直流分量的10%)时，则不用对该低压直流输入/输出端进行浪涌试验。

- 电压暂降、短时中断和电压变化的抗扰度标准中(GB/T 17626.11-2023)，测试信号均为交流电，测试对象也都是交流电路。雷达模块的供电多为5V，从220V下来之后一般会经过多级电压转换，最后通过DCDC或者LDO给模块供电，中间有多级电压转换及稳定电路。同时雷达模块遇到电压暂降时，如果直流供电电压降至雷达模块规定的工作电压之下，则会短暂出现雷达失灵或者性能下降。而当出现短时中断时，则雷达会暂时不工作。电压出现变化时，只要不超过雷达规定的电压工作范围，均不会产生影响。因此该项也并不直接适用于雷达模块。

若EUT产生的峰值冲击电流小于标准发生器规定的峰值冲击电流(例如对220 V~240 V电源,其电流为500 A),可采用比标准规定的发生器峰值冲击电流小的发生器进行试验,但应首先测量EUT的峰值冲击电流来予以确认。按照附录A的要求,当采用发生器供电时,应验证测到的EUT峰值冲击电流应小于发生器峰值驱动能力的70%。实际EUT冲击电流应在冷启动和关闭5s后两种状态下按A.3的步骤进行测量。

发生器的开关特性应通过一个具有合适功耗的100 Ω 负载来测量。

用于测量发生器的100 Ω 负载不宜有寄生电感。

上升和下降时间,以及过冲和欠冲,应在相位角90°和270°处,从0%到100%、100%到80%、100%到70%、100%到40%和100%到0%进行切换验证。

相位角的准确度应在0°至360°中以45°为增量的9个相位角上,从0%到100%和100%到0%进行切换检验。且应在相位角90°和180°处,从100%到80%和80%到100%、100%到70%和70%到100%、以及100%到40%和40%到100%进行切换验证。

根据公认的质量保证体系,电压发生器应按规定的时间周期进行重复校准。

附录D提供了关于发生器的电压上升和下降时间以及冲击电流能力的基本原理。

综合上述标准规范,除了射频电磁场辐射抗扰度(GB/T 17626.3-2023)外,家用电器常用的电磁兼容测试项都是针对强电,低压5V直流供电器具无需单独做测试。

问 32: 矽杰微的毫米波雷达可靠性如何?

矽杰微的毫米波雷达模块会做一系列的可靠性测试,测试项一般包括以下几项:

1. 双85: 温度85度/湿度85%施加额定电压,根据不同客户产品需要,最大可运行1000小时双85测试。
2. 低温(-20°C)启动: 在-20度环境下放置2小时,上电后测试模块是否能正常启动工作。后断电10秒,再次上电启动,进行5个循环。
3. 温度循环冲击: 雷达模块在(-10 $\pm$ 2)°C时放置30min,升至(85 $\pm$ 2)°C、相对湿度80%条件下,放置30min,以此为一个循环,共100个循环后,取出后在常温下放置1h后,目测外观,检测功能性能。
4. ESD: 按照+/-4000V及+/-6000V分别测试接头各引脚的接触放电。
5. 跌落: 模块从1米高度跌落至水泥地面三次,检测其外观功能。
6. 盐雾: 按GB/T 2423.17对雷达模块进行24h中性盐雾试验,试验后在自来水下冲洗5min,然后用纯水冲洗并干燥。

以上可靠性测试可覆盖满足大部分家电厂家的环境可靠性测试的要求。并且矽杰微的雷达模块已经在各大家电厂家的产品中大批量使用,在智能家居、照明等产品中大批量使用,可靠性已经经过市场和时间的鉴定。

问 33：毫米波雷达与 5G 通信毫米波的区别？

先说说 5G 通信毫米波。5G 通信毫米波主要使用两段频率，分别是 FR1 频段和 FR2 频段

FR1 频段的频率范围是 450MHz-6GHz，又叫 Sub-6GHz 频段。FR2 频段的频率范围是 24.25GHz-52.6GHz，由于 FR2 覆盖波段之中多数为小于 10 毫米波长的频率，这部分频段因此得名“毫米波（mmWave）”。5G 毫米波载波频率更高，信号带宽更大。以 60GHz 频段为例，每个信道的频谱带宽达到 2.16GHz，相比之下，4G-LTE 频段可用频谱带宽只有 100MHz。说白了就是 5G 毫米波网速很快，比 Sub-6GHz 的 5G 更快。

另外，毫米波受到的频段干扰更少。1.9GHz-6GHz 频段仿佛是拥挤的地铁，Wi-Fi、蓝牙、卫星广播等都“挤”在一起，难免会有“打架”。而毫米波频段就像是无人区飞驰的敞篷跑车，时延极低，容量高，可以同时有更多设备连接。总而言之，5G 毫米波带宽高，时延低，容量高。在日常生活中，5G 毫米波可以帮助你秒速下完蓝光视频、在拥挤的球场享受高速网络。在专业场景，5G 毫米波可以实现工业机器人的远程控制、自主工厂运输、远程医疗等。

在 3GPP 规定的 5G 标准中，无论是 Sub-6GHz 频段和毫米波，都是 5G 标准。两者各有优势，Sub-6GHz 频段覆盖广，信号强且稳定；毫米波速度快，时延低，多人时无需抢信号，然而因为毫米波穿透能力差，采用毫米波信号的 5G 手机几乎可以被任何东西挡住信号，电话亭、一棵树、玻璃、雨伞，只要基站和手机之间有遮挡，可能转个身，网络会立刻回落到 4G。而采用 Sub-6GHz 和毫米波同时覆盖的运营商则相安无事。如果基站覆盖不够完善，分分钟会出现信号被阻挡的情况。想要 5G 毫米波通信体验好，必须建很多基站——几乎每个角落都需要！所以说，两者是互补的关系，而不是迭代的关系。

回到毫米波雷达，目前我们所说的毫米波雷达泛指民用领域的智能应用，包括智能家电家居，照明，自动驾驶，安防等各种智能应用场景，频率以 24GHz 为主（关于国内毫米波雷达的频谱规范可参考前文“问 6”），其应用主要以探测为主而非通信或传输数据。探测距离也在室内 10 米以内范围，属于微功率短距离设备。

问 34：智能家居使用毫米波雷达是否有辐射风险？

首先，要区分电磁辐射和电离辐射。电磁辐射是由电场和磁场相互作用而产生的能量传播，无需介质即可在真空中传播。它包括了一系列具有不同频率和能量的电磁波，如无线电波、微波、可见光、紫外线等。而电离辐射是一切能引起物质电离的辐射总称，其种类很多，高速带电粒子有 α 粒子、 β 粒子、质子，不带电粒子有光子以及 X 射线、 γ 射线。由于电离辐射具有高能量，它可以穿透物质并直接与细胞和组织发生相互作用。当电离辐射与生物体的组织相互作用时，它能够损伤 DNA 分子结构，引起遗传变异和细胞突变。这

些变化可能导致癌症、遗传性疾病和其他健康问题。

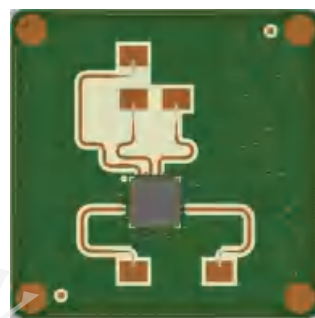
电磁辐射的危害主要与辐射的频率和强度有关。一般情况下，低频电磁辐射（如可见光和无线电波）被认为对人体健康影响较小，无法引起细胞变化和组织损伤。电磁辐射的危害主要与辐射的频率和强度有关。当然，长时间接触高强度电磁辐射可能会产生热效应，导致皮肤灼伤和组织热损伤。

毫米波雷达发射的是电磁波，这种属于电磁辐射而非电离辐射。按照发射功率来看，一般手机的峰值发射功率有 1-2W。WIFI 路由器的发射功率有 100mW。按照我国《微功率短距离无线电发射设备目录和技术要求》规定，24GHz 的发射功率应小于 20mW。因此，单纯从发射功率来看，家用 24GHz 毫米波雷达的发射功率上限也仅为 Wi-Fi 的 1/5，为手机的 1/100，其发射功率实在太低，以至于与其担心毫米波雷达是否有辐射风险，倒不如担心家里 Wi-Fi 是否要关闭，手机是否要关机了。

问 35：毫米波雷达可以区分人和宠物吗？

一发一收和一发两收、一发三收的方案无法区分。但是如果做多通道 MIMO 方案时，可以区分。

仍以右图 2 发 3 收的方案为例，该方案水平安装时，在垂直方向也可以测角度，这就具备了基础的垂直方向的检测能力，就有了从高度区分人和宠物的可能性。但是因为垂直方向的有效接收通道只有 2 个，角度分辨率较低，因此不能精细的检测垂直方向的目标。如果将通道数增加，将带宽增加，使雷达的角度与距离分辨率提高，在足够分辨率的条件下，雷达可以点云成像。但是带来的代价则是硬件成本的提升，



模块体积的增加。另外一个问题就是可用带宽，24GHz 分配的可用带宽是 250MHz。而 60GHz 目前暂不被允许使用。77GHz 只能用于汽车应用。所以在目前的条件下，综合成本、法规等各项因素，虽然技术上可以实现，但是落地产品的代价还是比较大的。

问 36：毫米波雷达可以区分小孩，老人，成年人吗？

同上一个问题一样，增加通道数、带宽使雷达分辨率提高，实现点云成像，是可以区分小孩，成年人的。但是区分老年人可能需要从姿态及行动特征去判断，而无法单纯从点云成像判断。

问 37: 24GHz 毫米波雷达能测多远?

能测多远，不是一个单一的指标。它是由多个指标共同作用下的用户体验。

能测多远取决于 EIRP，接收机增益，接收机灵敏度，算法解调所需的最小信噪比，大气环境，被测目标反射特征等等。如本文前述的 RCS 章节中的公式:雷达探测距离 R 与雷达发射功率 P_T ，收发天线增益 G_T 、 G_R ，信号波长 λ ，目标的等效截面积 σ 与雷达最大接收能力 P_R 等参数相关，其计算公式表示为：

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_T \cdot G_T \cdot G_R \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{P_R \cdot (4\pi)^3}}$$

因此能测多远这个问题，是要结合具体方案和应用场景后才能评估的。就矽杰微的雷达模块而言，如果已知雷达型号，那么可以参考其 FOV 获知该款雷达典型的检测范围。以矽杰微 RKB1161G 为例，其典型的 FOV 如下图，检测移动人体的距离约 6 米。

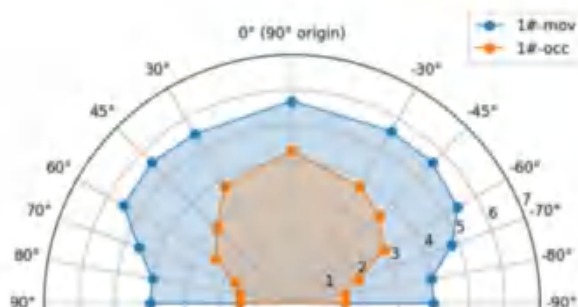


图 RKB1161G 的 FOV

而当用作液位计时，比如 RKA1102K1 及 RKB1178Z，其可测的液面距离最大就可以分别到 50 米和 20 米。因此，24GHz 能测多远这个问题，需要结合具体的方案和场景。

型 号	RKB1178Z	RKA1102K1
尺寸	7 x 7cm	12 x 6cm
频率	24GHz 1.6GHz BW	
功耗	5V/186mA	5V/185mA
3dB 方向角	水平±5.5° 垂直±5.5°	水平±7° 垂直±7°
最大检测距离	20米	50米
误差	±5mm	±3cm
输出格式	串口	
搭载芯片	SRK2401	
工作温度	-25°C~85°C	
调制方式	FMCW	

问 38: 24GHz 是不是要被 60GHz 和 77GHz 取代了

当然不是,从应用角度来说,并不是频率越高越好。以智能家居中的人体存在检测应用举例,目前 24GHz 可以实现挂高 3 米情况下,5-6 米移动检测半径,3-4 米左右存在检测版本,已经足够覆盖大部分室内家居应用场景。在这种场景下,一味的采用更高频率的方案,大幅提高硬件成本的同时,并不能带来更好的用户体验。在 1 发 1 收,1 发 2 收,2 发 4 收等架构下,24GHz 具有不错的用户体验及性能,又有更好的产品价格,作为消费类产品而言有很好的竞争力。

而 60GHz 及 77GHz 的优势在于更大的带宽,以及同等通道数下更小的尺寸。因此更适合于做更多通道数的 MIMO 雷达,辅以大带宽实现更高的分辨率。比如避障,姿态识别,智能驾驶等。如果将这些频率仅仅用作 1 发 1 收,1 发 2 收,完全无法体现出它们的优势,反而增加硬件成本造成浪费。所以 24GHz,60GHz,77GHz 不是相互替代的关系,而是各有优势互补的关系。同时需要注意所在地的无线电规范,国内暂时没有开放 60GHz,而 77GHz 只能用于汽车。

问 39: 和 5.8GHz 相比,24GHz 的优势有哪些?

24GHz 用于人体存在检测和微动检测是具有明显优势的。

1. 24GHz 载波频率更高,同等条件下其回波信号叠加的目标信号频移更高,更容易被电路检测出。在做人体存在和微动检测时,24GHz 就天然的有优势。并且当采用多普勒方案时,24GHz 检测边界的清晰度也比 5.8GHz 高很多。
2. 24GHz 波长更短,天线尺寸更小,而 5.8GHz 为了减小 PCB 面积,采用收发共用天线,通过馈点隔离。这种方式,相比收发独立天线而言,隔离度较差。从检测微弱的存在信号而言,也是不利的。
3. 24GHz 可用带宽更宽,因此从测距角度来说,盲区更小,检测精度更高。
4. 24GHz 还可以做 1 发 2,2 发 4,以及多发多收级联,可测距测角,应用的场景更多元,功能更丰富。例如交通测速,多目标轨迹跟踪,液位计,无人机定高避障等除了人体触发感应外各种应用。而 5.8GHz 目前仅有 1 发 1 收的方案。

当然,并不是说 24GHz 可以完全替代 5.8GHz。就目前行情来说,5.8GHz 做简单的运动人体感应触发的产品,其成本比 24GHz 低很多。对于成本非常敏感的一些照明产品,比如车库灯,走廊灯等这些公共区域人来灯亮的产品,5.8GHz 还是有价格优势的,并且 5.8GHz 相比 24GHz 有更小的空间衰减,在照明挂高检测的场景下,其 FOV 会比 24GHz 也略大一些。

问 40：热释电红外也可以做人体感应，毫米波雷达的优势是什么？

热释电红外传感器是一种基于红外热辐射原理的传感器，通过检测红外线来探测人或物体。它利用热释电效应，将接收到的红外辐射转换成电信号输出。这种传感器具有隐蔽性好、功耗低、价格低廉等优点，但也存在信号幅度小、易受干扰等缺点。我们常见的红外传感器，在实际使用时，就需要被测目标有较大的肢体动作和位移，才能被触发。而毫米波雷达属于主动探测型传感器，需要雷达自己发射电磁波，接收目标反射的电磁波来探测，因此从功耗上说，毫米波雷达的功耗是比红外传感器要高很多的。但是其灵敏度比红外传感器更高，可以做人体存在检测，即使人体静止不动，仅有呼吸或者微小的肢体动作，毫米波雷达也能检测到。

热释电红外使用时不能被遮挡，而毫米波雷达可以穿透除金属之外大部分的面板，比如 ABS, PC, 陶瓷，木板，玻璃等常见的材料。当环境温度过高，接近或超过人体表面温度时，热释电红外传感器对人体的探测效果会进一步下降甚至失灵。或者环境温度有较大波动变化时，比如靠近窗边，空调出风口吹出冷风，而窗口阳光直晒，局部区域有温度的波动，红外传感器也有可能误触发。而毫米波雷达不受环境温度的影响。

另外，热释电为了实现较大的覆盖范围，需要配合使用菲涅尔透镜（见下图）。整个产品就需要在结构上有一个大的凸起。而雷达可以做到不破坏产品表面外观隐蔽安装，对用户产品美观设计更友好。



图 菲涅尔透镜



图 采用矽杰毫米波雷达的某款面板开关产品，无需开孔隐蔽安装，产品外观不受影响

问 41：测试矽杰微的人体存在雷达模块，我都用金属盒子把雷达盖起来了，为什么还是检测输出有人？

人体存在检测雷达是非常灵敏的传感器，可以检测到人体呼吸的微小动作输出有人信号。因此客户在评估雷达模块时，希望模块能快速进入无人状态，于是拿着铁盒子将雷达模块盖住，认为此时雷达信号被铁盒子屏蔽了，应该进入无人状态。

但实际情况是，盖一个铁盒并不能完全屏蔽雷达信号，雷达信号会从桌面泄露并从其它方向反射回来而探测到人体。同时，金属对电磁波的反射极强，近距离将雷达对准金属面时，会造成接收机饱和使信号失真，使接收机做信号对消时，无法将信号对消干净而产生误报。因此盖一个铁盒是一个错误的使雷达快速进入无人的测试方法。正确的方法应为：

1. 找一间空旷无人的会议室或空房间，同时需要注意会议室的墙面不是隔板搭建而是实心墙体，避免信号穿透隔板而探测到隔壁房间的人。雷达对着会议室无人方向静置，同时避免近距离对着房间内可能的强反射物体如镜面，液晶电视，金属窗框等。测试人员离开会议室进行观察。
2. 采用微波暗箱，微波暗箱内部使用的是吸波材料，不会造成信号的反射和泄露。（见下图示意）



图 微波暗箱

问 42：人体存在检测雷达使用时，为何有人误判为无人？

毫米波人体存在检测雷达是通过检测人体呼吸甚至心跳带动的胸腔腹部起伏的微弱运动信号来判断是否有人，其本质仍然是检测动目标，只是这个动目标是非常缓慢和微弱的运动信号。因此，当人员正对雷达时，检测效果最佳。但当人员侧对或者背对雷达时，此时呼吸带来的起伏被遮挡甚至彻底消失，那么对于雷达来说就没有测到有效信号，因此会丢失目标进入无人状态。

一般通过加入一段时间的状态保持延时，来保证即使雷达短暂丢失目标，也不会使系统迅速进入无人状态。或者通过安装，使雷达尽量覆盖有效的探测范围。

另外从雷达参数设置来说，需要看一下是否已经超出雷达存在检测的有效距离。存在检测的有效距离一般都小于运动检测的距离，所以不要将运动检测距离误用于存在检测距离。灵敏度设置也需要看一下，是否用了比较大的门限导致无法探测到弱信号。

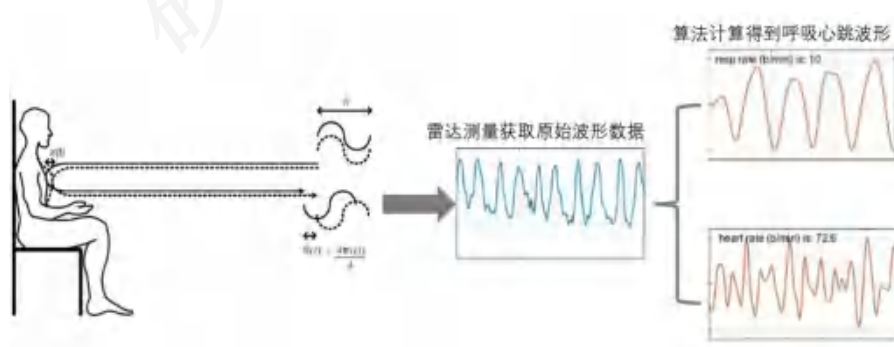


图 人体存在雷达检测呼吸心跳带来的胸腔腹部起伏

问 43：人体存在检测雷达使用时，为何无人误判为有人？

相比有人误判为无人，无人误判为有人的情况就比较复杂了。一般来说有以下几种可能：

1. 环境中运动的物体：雷达是通过检测运动目标输出结果，因此环境中运动物体都会触发雷达进入有人。
2. 环境中存在干扰信号：环境中的未知电磁干扰有可能会将环境底噪抬高，导致模块误判有人。
3. 系统中的干扰信号：系统中的干扰信号，比如电源低频辐射干扰，传导干扰，系统中的脉冲大信号干扰，系统中的强辐射器件，都有可能产生干扰。（可参考《矽杰 24GHz 毫米波人体存在检测雷达电源干扰解决方案》）
4. 不恰当的安装：两个雷达模块近距离正对，模块近距离直接对着大面积金属，或者模块正对各种电器出风口，安装位置自身有震动等。
5. 不恰当的门限设置：模块出厂默认配置一般是按照最高灵敏度设置的，不推荐将门限参数设置的比默认参

数更低。另外如果环境底噪偏高，此时的门限设置应适当抬高。

有关安装方面的事项，可参考“问 52：雷达安装使用时需要注意哪些事项？”

问 44：雷达输出有人状态进行延时有什么作用？

如问题 42 中所提到的，毫米波人体存在检测雷达是通过检测人体呼吸甚至心跳带动的胸腔腹部起伏的微弱运动信号来判断是否有人，其本质仍然是检测动目标，只是这个动目标是非常缓慢和微弱的运动信号。因此在实际使用中，会因为人的姿态等因素导致雷达会断续检测到有人。通过对雷达输出有人状态进行延时保持，来保证即使雷达短暂丢失目标，也不会使系统马上进入无人状态，提升用户体验。

问 45：什么是雷达模块封锁时间？

矽杰微的比较器雷达模块以及 RKB1161G 系列模块中，都有封锁时间。在雷达输出无人状态之后，在封锁时间内，即使有目标移动，雷达也不会输出有人状态。这个设计是避免系统在对无人状态做出反馈时，比如机械继电器断开，系统控制信号切断某些部件的电源，或者进行其它系统操作时，可能会产生瞬间机械震动、脉冲电信号、或者电源瞬态波动，这些信号可能会使雷达再次被触发从而导致系统进入死循环不能退出无人状态。

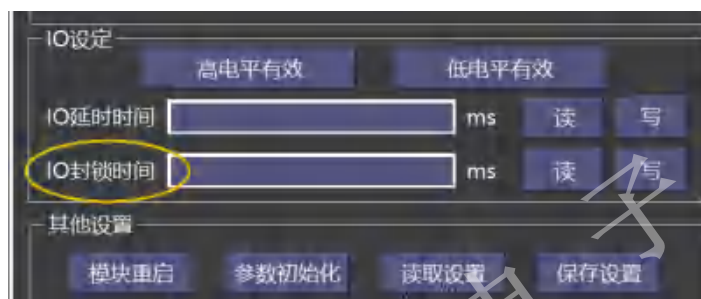
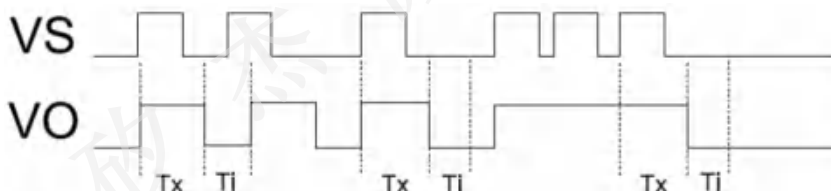


图 RKB1161G 上位机中封锁时间参数设置栏

也可以由如下时序图来理解：

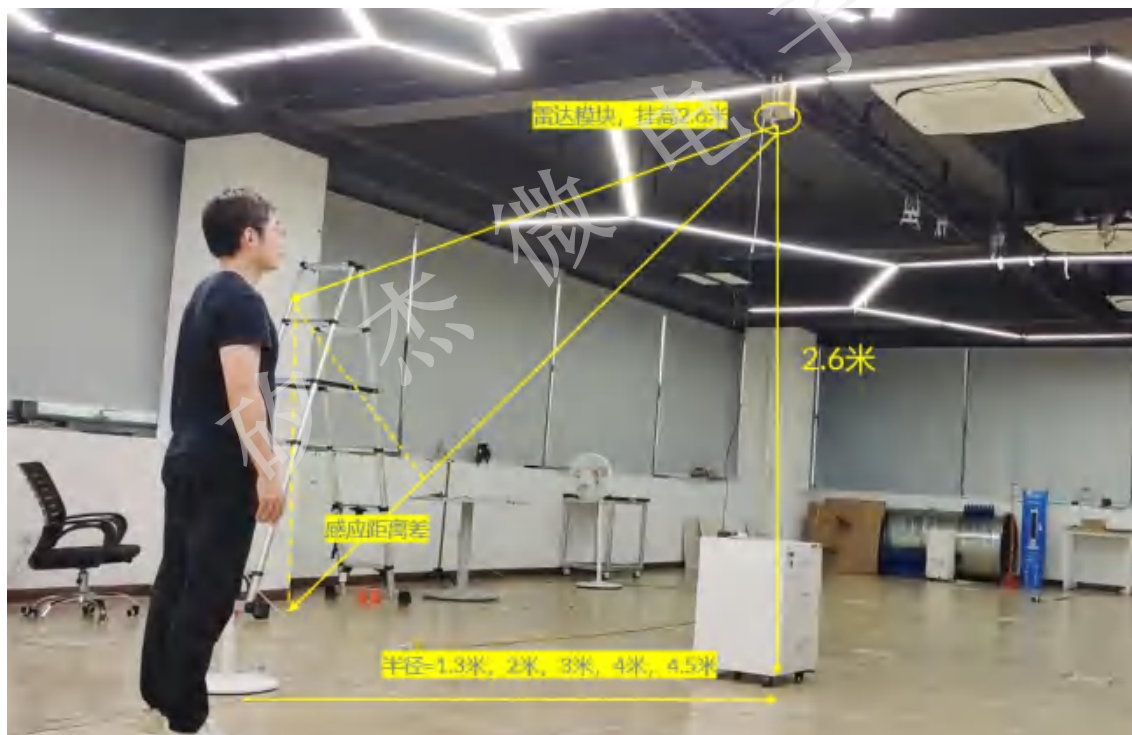


VS 代表探测区域内运动目标，高电平表示有运动，低电平表示静止。VO 为传感器输出高电平信号。对于单次运动触发，TX 表示检测到运动，输出高电平。恢复 0 电平后会进入封锁时间即 Ti，在 Ti 周期里，雷达不响应任何运动。

问 46：吸顶安装时，输出距离为什么不准？

当雷达模块挂高吸顶安装使用时，客户通常的一个想法是可以通过限定距离实现精准的感应半径控制。但在实际使用时会发现，挂高使用时，输出的距离会有一个较大的波动，认为雷达有问题。实际情况其实是这样的：

雷达检测输出的结果是按照最大反射点进行输出。当挂高使用时，因为人体本身存在一定的高度，电磁波在人体的最大反射点是会变化的。可见下图：

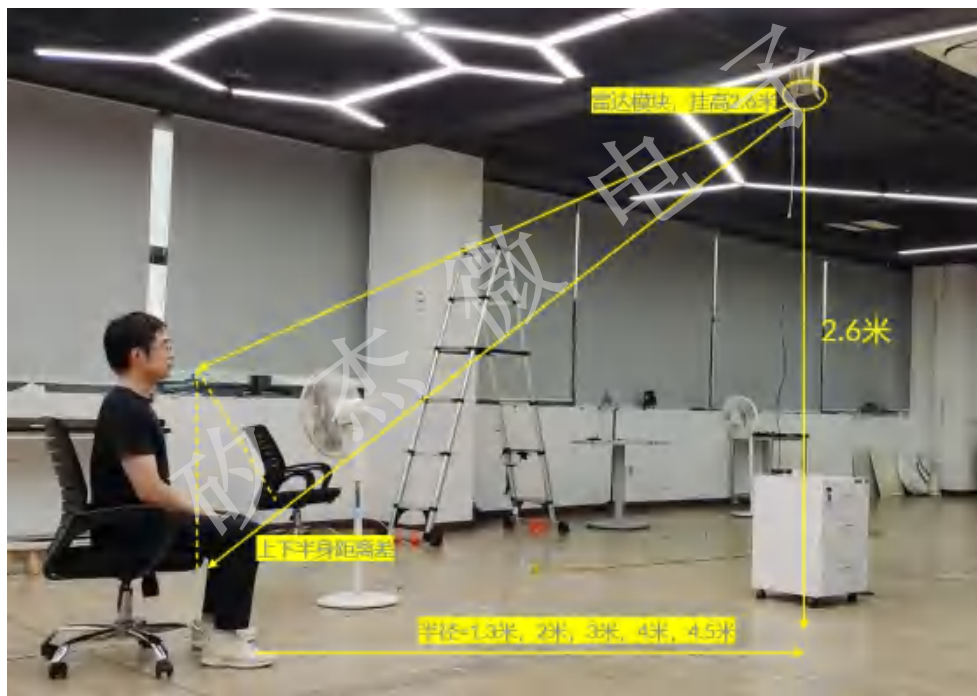


从图中可以看到，电磁波可能从人体上半身反射，也有可能从下半身反射，两个反射点之间根据三角函数的关系会存在一个距离差，这就会导致雷达输出的距离会有波动。测试站立情况下，动下半身时，雷达输出距离偏远，从三角函数来说，是正确的。而检测半径越小时，三角函数对应的上下半身输出距离差就越大，从测试数据来看，符合这个规律（见下图）。

站立(身高1.7米)	
实际半径	雷达显示距离
1.3米	1.6-3米
2米	2.4-3.1米
3米	3.2-3.8米
4米	4.1-4.5米
4.5米	4.8米

图 站姿下，雷达输出距离波动

而当人体是坐姿时，此时人体的高度差变小，由下图三角函数可看到，此时带来的距离波动将会变小。从下图的测试数据中也可以看到，当姿态变为坐姿时，此时雷达输出的距离波动对比站立时会变小。符合三角函数的预期。



坐姿(身高1.2米)	
实际半径	雷达显示距离
1.3米	2.1-2.6米
2米	2.6-3米
3米	3.3-3.6米
4米	4.3-4.5米
4.5米	4.8米

图 坐姿状态下固定距离，雷达输出的距离波动

这里我们提供一组雷达模块挂高吸顶安装时，人员走动触发半径的波动数据，供参考对比。

站立移动(身高1.7米)		坐姿移动(身高1.2米)	两者触发距离差值
雷达设置的距离门限	实际走动触发的半径距离	实际走动触发的半径距离	
4米	3.1-3.4米	3.4-3.6米	0.2
3.5米	2.7-2.9米	2.8-3米	0.1
3米	2.2-2.4米	2.3-2.5米	0.1
2.5米	1.6-1.9米	1.7-2米	0.1
2米	1.2-1.4米	0.8-1米	0.4

图 实测雷达触发的半径波动

问 47：水平安装时，输出距离有波动是怎么回事？

按照矽杰雷达的官方数据，一般 FMCW 人体存在检测的雷达距离误差在 $\pm 20\text{cm}$ 左右。这个是在较为理想的空旷环境测试，以及采用雷达模拟器纯净的信号下测得的数据。

而客户一般拿到雷达后，会直接在办公室工位上拉开些许距离直接测试。此时环境中存在大量的反射物，雷达接收到的信号并非单一的人体反射的信号，而是叠加了多径反射的环境信号，会对测试结果带来一定的影响。另外，即使在空旷环境测试，也会如“问 46”中，因为电磁波在人体反射点并非固定，也会因为反射点的波动带来距离的波动。总之，雷达探测的电磁波不能以激光的概念去理解。并非人在 3 米，就输出稳定的 3 米不会波动。在实际智能家居应用场景中，通常 30cm 的体感波动我们认为都属于正常范围内。

问 48：人体存在检测雷达模块距地面挂高范围值推荐多少？

水平安装时，雷达天线面水平探测人体胸腔躯干位置时的效果是比较好的。因为人体胸腔躯干部位面积最大，信号反射最多，对雷达来说探测最稳定。因此，按照正常 1.5 米-1.8 米身高来算，雷达距地面 1.2 米-1.4 米附近是比较合适的。但如果被测对象是坐着的，那么此时雷达比较好的距离就相应减小。

当挂高吸顶安装应用时，矽杰微的官方测试高度是 3 米。室内应用的高度通常是在 2.5-3 米之间，矽杰微的人体存在雷达都是 OK 的。

一个基本原则，是让雷达尽可能的直接照射到人体胸腔躯干区域。

问 49：多普勒模块的触发边界的波动为什么比 FMCW 大？

多普勒雷达靠目标反射的信号强度作为触发阈值，因此容易受到目标反射特性变化而变化。例如：胖子比瘦子的反射信号更强，因此同等条件下，胖子会比瘦子在更远距离触发。成年人的体型比儿童大，反射信号比儿童强，同等条件下成年人也会在更远距离触发。而同等大小目标，金属材质的目标因其更大的反射特性，也会在更远的距离被触发。即使是同一个目标，随着姿态动作不同，反射信号强度也会有波动，导致每次触发都有一定的前后波动。

而 FMCW 除了信号强度外，还有距离值作为判断条件，因此只要达到信号强度触发门限，在设定的距离上就可以触发，实现更稳定的触发边界。

问 50：为何要避免雷达安装时正对近距离金属物体？

金属对电磁波是强反射目标，雷达近距离对准金属时，发射机的信号大部分将直接反射回接收机，可能会造成接收机饱和而导致信号畸变，产生错误的结果。因此实际使用中，应避免雷达近距离（1-2 米内）正对金属物体，例如：冰箱，镜子，液晶电视屏，金属柜体等。

问 51：我想将雷达模块集成在系统主板上，该怎么设计，矽杰微能提供模块设计资料吗？

如果要将雷达模块集成在主板，最大的问题是 PCB 板材。因为雷达模块采用的都是微波高频板材，用户如果为了将雷达模块集成于主板，则需要将整块主板的 top 层都采用高频板材，这样会提高整机的成本。同时，如果雷达部分的电路量产时产生不良，则整块主板都将报废，也会使得成本提高。因此我们并不推荐用户直接将雷达部分的电路设计集成在主板上，而更推荐采用主板+雷达模块分离的方案。

另外可以参考“问 17”中的 RKA1166H 模块，RKA1166H 是可贴片射频前端板，直接集成了天线。这样用户可以将中频及 MCU 部分的电路画在系统主板上，雷达芯片+天线做一个贴片器件来使用，矽杰微有参考的设计和算法例程供用户学习使用。可参考矽杰微的《24GHz 雷达芯片 SRK1101 应用及电路设计指南》。

问 52：雷达安装使用时，需要注意哪些事项？

由于毫米波技术的物理特性，某些应用场景环境下会出现不太理想的检测结果，或者需要在条件合适的情况下才能得到理想的检测结果。如“问 16”、“问 24”、“问 27”、“问 30”、“问 42”、“问 43”、“问 50”均有提到一些实际应用中遇到的不理想的检测情况及注意事项。

这里再补充几个雷达模块实际使用安装时需要注意的事项，

1. 避免两个雷达近距离天线面对面，避免不了面对面时，距离需拉开 2 米以上。多个模块天线相互平行时，距离拉开 0.5 米以上。
2. 即使是人体存在检测雷达，其检测对象也不是绝对静止的物体。仍然需要有相对运动，由于雷达检测对径向运动的目标更灵敏，因此最佳安装方式是：水平安装>斜向下安装>顶装。
3. 顶装时，最佳的运动方向是上下运动。因此当人体坐在雷达正下方时，会有“灯下黑”效应，即此时雷达探测到的是人的头顶，这个方向没有任何起伏。而当侧对背对雷达时，也同样因为呼吸带动的起伏相对雷达变弱，会导致检测效果下降。
4. 如果雷达水平安装的高度很低，只照射到脚，当人体静止没有腿部动作时，也会导致雷达检测不到人体存在。

5. 矽杰微的雷达模块出厂默认设置的灵敏度已经是高灵敏度档位，不建议用户将灵敏度门限再下调。会增加误报风险。
6. 尽量远离高压交流电源、整流桥、大功率电器驱动电路、大电感、电机、机械继电器开关等带有低频辐射、机械震动的部件。
7. 安装时避免雷达直接正对空调、风扇、洗衣机等工作时会震动以及有自身运动部件的电器。
8. 避免正对晃动的窗帘、绿植。
9. 通风管道、消防管道、排水管道有可能在工作时有肉眼不可见的震动和流动，其运动频率或者谐波频率有可能会落入雷达检测的有效频率内，会导致模块误判有人。
10. 根据实际房间大小调整距离门限和灵敏度。小房间内因为空间狭窄，如果按照最大距离门限及最高灵敏度门限设置，会增加误报的风险。因此在小房间小空间内（例如卫生间、厨房等），根据房间大小设定模块的距离门限，适当降低模块灵敏度。

问 53：毫米波雷达对静电防护等级有多高？

矽杰微的毫米波雷达能通过 $\pm 6000V$ 接触放电的静电测试。仍然建议用户在生产装配过程中做好静电防护，避免在模块转运、拆包拿取、生产装配过程中产生静电损坏。

如果用户需要雷达模块达到更高等级的静电防护，那么模块在设计时就需要加入额外的静电防护设计，会带来成本的提升。用户需要做好成本 VS 性能的平衡。

问 54：为什么人在雷达模块后方，雷达也能感应？

11. 微带天线存在后向泄露，真实世界不存在完美的无泄漏的微带天线。并且智能家居领域应用的雷达受限于 PCB 尺寸，微带天线后向泄露会更明显一些。
12. 雷达模块在实际使用中会有外壳，外壳会对电磁波产生一些反射，导致有部分信号能量从后向反射出去，形成后向感应。
13. 环境中对电磁波也有折射反射，导致在雷达后方也会有环境折射反射回来的信号。

综合上述这些因素，雷达模块的后方一定距离内（一般在一米以内）是会有感应的，属于正常现象。如果用户对后向感应比较在意，那么需要在整机的结构设计和 PCB layout 上做一些规避。例如与雷达模块焊接的主板，在雷达模块的后方留较大面积的铺铜接地以阻挡后向信号。或者在结构外壳上在雷达后方做金属屏蔽等。



问 55：现在毫米波雷达的厂家这么多，矽杰微对比友商，有什么优势？

1. 传感器的下游市场一般具有碎片化和长尾化的特点。为此，矽杰微从成立以来一直坚持灵活性和多样性的特点。
2. 矽杰微选择 BICMOS 锗硅工艺，研发重心是先雷达收发机芯片后数字芯片，通过芯片合封工艺提供多样化全集成产品，可支持开发多种应用场景的算法。
3. 丰富的产品选项及软硬件排列组合，提供定制化产品服务及交付。
4. “问 18”和“问 19”的问题中，也回答了与友商芯片产品相比的优势。