



1.2 毫米波雷达

1.2.1 概述

毫米波是一种波长介于 1-10mm 的电磁波，其波长短、频段宽，比较容易实现窄波束，具有分辨率高，不易受干扰等特点。毫米波雷达是采用毫米波对目标进行探测，获取目标的相对距离、相对速度、方位的高精度传感器。

相比于微波制导和光电制导，具有如下优点：

毫米波导引头具有体积小、质量轻、空间分辨率高的特点；

毫米波导引头穿透雾、烟、灰尘的能力强，传输距离远，具有全天候全天时的特点；

毫米波性能稳定，不受目标物体形状、颜色的干扰，能够很好的弥补如红外、激光、超声波、摄像头等其他传感器在车载应用中不具备的使用场景。

在智能驾驶领域，毫米波雷达应用非常广泛，与激光雷达相比，毫米波雷达技术更为成熟，已经广泛应用于汽车的安全系统中。且毫米波雷达成本低，对雨雾、灰尘、光线等不敏感。

车载毫米波雷达的探测距离一般在 150m-250m 之间，有些可以达到 300m，可以满足汽车在高速运动时探测较大范围的需求。车载毫米波雷达的工作频率一般为 24GHz 和 77GHz。



continental 的 ARS-408 雷达示意图

1.2.2 工作原理

1) 基本结构

根据辐射电磁波方式不同，毫米波雷达主要有脉冲体制以及连续波体制两种。不管哪种工作方式的毫米波雷达，其硬件部分大体相同，只有小部分电路模块、电路参数与信号处理算法有所区别，主要部分包括 MMIC 芯片和天线 PCB 板。MMIC 全称前端单片微波集成电路，包括多种功能，如低噪声放大器（LNA），功率放大器、混频器、收发系统等功能；雷达天线高频 PCB 板是将高频 PCB 板集成在普通的 PCB 基板上实现天线的功能，需要在较小的集成空间中保持天线足够的信号强度。



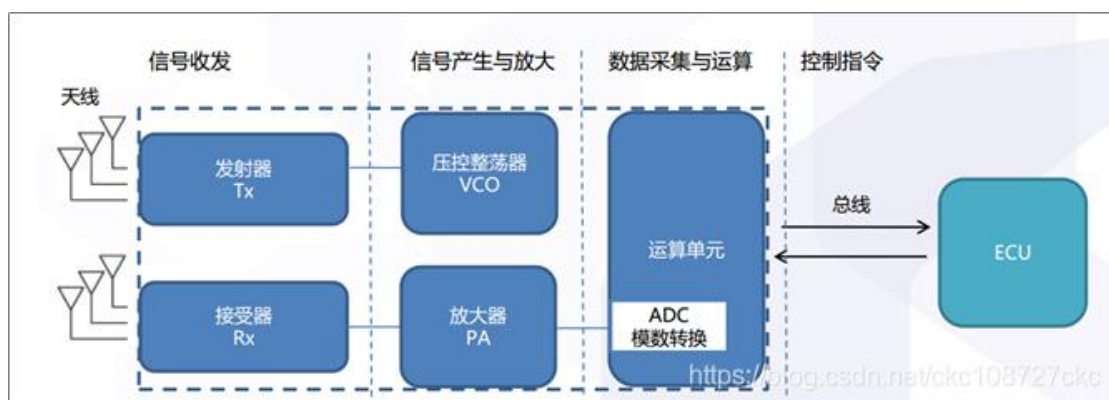
工作方式	脉冲体制 (脉冲多普勒雷达)	连续波体制		
		CW恒频连续波	FSK频移键控连续波	FMCW调频连续波
特点	多用于近距离目标信息测量； 技术比较成熟； 测量过程简单，测量精度较高；	可探测目标速度；	可探测移动目标的位置 与速度信息； 探测时间短，精度高；	能同时测出多个目标的距离和速度 信息，可对目标连续跟踪，系统敏 感性高，错误报警率低； 不易受外界电磁噪声的干扰； 测量距离远，分辨率高；
不足	当目标近距离时，脉冲收发时间短， 需要采用高速信号处理技术，结构要 求复杂，成本大幅上升； 高分辨率需要占用较大带宽； 发射功率限制导致作用距离近；	不能测量距离	不能同时测量 多个目标	所需发射功率低； 成本较低； 信号处理难易程度及实时性可达到 系统要求；



由于可以测量多个目标、分辨率高、信号处理复杂度低、成本低廉、技术成熟等一系列优点，FMCW 雷达是最常用的车载毫米波雷达。FMCW 调频连续波雷达有三种不同调制形式：1）正弦波调制；2）锯齿式波调制；3）三角波调制。对于单个静止物体的测量，锯齿波调制方式即可满足；对于运动物体，多采用三角波调制方式；

2) 工作原理

车载毫米波雷达利用高频电路产生特定调制频率(FMCW)的电磁波，并通过天线向外发射和接收目标反射的电磁波，然后计算发送和接收电磁波的参数以获取目标的物体信息（如相对距离、相对速度、角度、运动方向等），并进行目标追踪和识别分类，进而结合车身动态信息进行数据融合，最终通过中央处理单元（ECU）进行智能处理。大概状态图如下：



3) 毫米波雷达测距、测速、测方位角原理简介

测距：通过给目标连续发送电磁波，然后利用传感器接收从物体返回的电磁波，通过探测电磁波的飞行（往返）时间来获得目标物距离。

测速：根据多普勒效应，通过计算返回接收天线的雷达波的频率变化就可以得到目标相对于雷达的运动速度，简单来说就是相对速度正比于频率变化量。

测方位角：通过并列的接收天线收到同一目标反射的雷达波的相位差来计算得到目标的



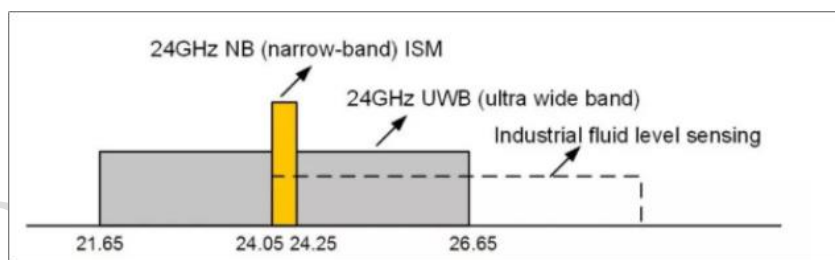
方位角。

1.2.3 毫米波雷达在自动驾驶中的应用

目前，各个国家对车载毫米波雷达分配的频段各有不同，但主要集成在 24GHz 和 77GHz，少数国家（如日本）采用 60GHz 频段，由于 77GHz 相对于 24GHz 的诸多优势，再加之欧洲电信标准化协会（ETSI）和联邦通信委员会（FCC）制定的频谱规则 and 标准，未来车载毫米波雷达的频段会趋同于 77GHz 频段（76-81GHz）。

1) 24GHz 毫米波雷达

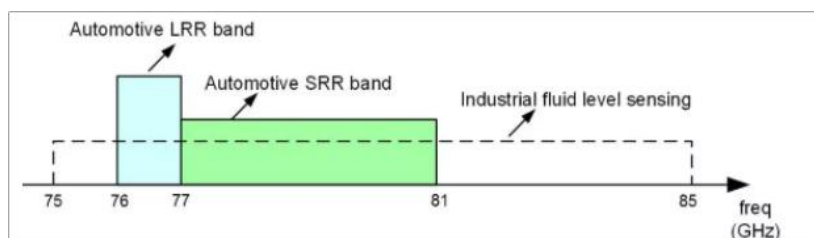
24GHz 毫米波雷达是指频段在 24.0GHz 到 24.25GHz 的雷达。其属于窄带（NB），带宽为 250MHz，常用于工业、科学和医学方面。另外 24GHz 频带还包括一个带宽为 5GHz 的超带宽（UWB）。这个频段的毫米波雷达目前大量用于汽车的盲区检测、辅助变道等，主要用作侧向雷达。24GHz 毫米波雷达主要优点为探测范围光；缺点是频率低，带宽窄，只有 250MHz，探测距离近。



2) 77GHz 毫米波雷达

77GHz 毫米波雷达指的是频段在 76-81GHz 的车载雷达。其中 76-77GHz 频段可用于远程车载雷达，这个频段的频率高，带宽也高，可以达到 800MHz。该频段有等效同性各向辐射功率(EIRP)的优势，可用于前端远程雷达，探测前车与本车的相对距离和相对速度，实现如自适应巡航控制等功能。

77-81GHz 雷达是新加入的短程雷达（SRR）频段，这个频段的最大特点是带宽非常高，可高达 4GHz 的宽扫描带宽，具有非常高的距离分辨率（HRR）。在无人驾驶应用领域，用于区分行人等诸多精细物体比较有价值。



3) 24GHz 与 77GHz 毫米波雷达性能对比

- a) 严格意义上讲，24GHz 毫米波雷达其波长大于 10cm，属于厘米波雷达；
- b) 相比于 24GHz，77GHz 能同时满足高传输功率和宽工作带宽，所以可以用来进行长距离探测和高距离分辨率；



- c) 相比于 24GHz, 77GHz 在物体分辨率、测速、测距精度上具有显著优势;
- d) 相比于 24GHz, 77GHz 雷达体积更小, 其波长不足 24GHz 的三分之一, 所以收发天线面积大幅减小, 整个雷达尺寸有效下降。

4) 4D 毫米波雷达

目前的车载毫米波雷达虽然能够很好的探测目标的相对距离, 但对目标的高度无法探测。这是因为目前的车载毫米波雷达只在二维方向上排布, 再加上多普勒效应, 所以只会输出目标的二维水平坐标和速度信息, 即 X , Y , V 。也被称为 3D 雷达。

目前有一些厂商在水平和垂直方向上均布置了天线, 能够额外实现对物体高度的探测, 输出量为 X , Y , Z 坐标和速度矢量。也就是所谓的 4D 雷达。4D 雷达可以探测出目标的不同高度, 不同水平面上的运动物体。但 4D 雷达研发存在一些问题和难点:

- a) 在有体积要求的毫米波雷达上, 垂直与水平方向天线紧密排布会相互产生严重的信号干扰, 这需要长期的经验积累开发的算法来解决;
- b) 雷达信号接收量大大增加, 对模数转换器 (ADC) 的性能要求将会增加;
- c) 信号处理算法的可靠性、实时性需要保证, 现有的毫米波雷达 ECU 可能无法胜任大规模点云的处理;
- d) 数据存储需求将会加大, 需要额外添置存储单元。

1.2.4 毫米波雷达的优劣势

总结上述, 在车载传感器领域, 毫米波雷达具有独特的优势:

- a) 纵向目标探测距离与速度探测能力强;
- b) 可实现远距离感知与探测;
- c) 对于静态和动态目标均能做出高精度测量;
- d) 相比于摄像头和激光雷达, 毫米波雷达穿透能力强, 受外界干扰比较小。

但毫米波雷达也有其明显的劣势:

- a) 无法成像, 无法进行图像颜色的识别;
- b) 对横向目标敏感度低, 如对横穿车辆检测效果不佳;
- c) 行人反射波较弱, 对行人分辨率不高, 探测距离近;
- d) 对高处物体以及小物体检测效果不佳等。

1.2.5 毫米波雷达性能参数

在选择毫米波雷达时, 通过如下的性能参数进行考核, 包括距离、速度、角度等。

1) 距离

a. 最大探测距离

雷达的作用距离有两种, 一种与发射功率 P_t , 天线增益 G_a , 目标RCS, 接收机灵敏度 $(\text{SNR})_{\text{det}}$ 等参数相关的雷达方程, 具体计算公式如下:



$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_t G_t G_r \sigma \lambda^2 N B T_c}{(4\pi)^3 k T_0 B_n F(\text{SNR})_{\text{det}}}}$$

另一种方法与最大中频带宽 IF_{\max} 相关，计算公式如下：

$$IF_{\max} = K \tau_{\max} = \frac{2KR_{\max}}{c} \rightarrow R_{\max} = \frac{IF_{\max} * c}{2K}$$

最大中频带宽的大小与采样率相关，在 complex 1x 模式下， $IF_{\max} \leq 0.9 * f_s$ ；在 complex 2x 和实采样模式下， $IF_{\max} \leq \frac{0.9 * f_s}{2}$ ；所以也可以用下式来估计最大作用距离：

$$R_{\max} = \frac{f_s * c}{2K} = \frac{f_s * c}{2B/T_c} = \frac{N_{\text{adc}} * c}{2B}$$

b. 距离分辨率

距离分辨率表示距离分辨两个目标的能力，在雷达图像中，当两个目标位于同一方位角时，但与雷达的距离不同时，二者被雷达区分出来的最小距离就是距离分辨率。雷达的距离分辨率是由脉冲的宽度决定的，即可以通过减小脉冲宽度以达到期望的距离分辨率，其表达式如下：

$$\Delta R = \frac{c}{2B}$$

c. 测距精度

测距精度是用来描述雷达对单个目标距离参数估计的准确度，它是由回波信号的信噪比 SNR 决定的：

$$\sigma_R = \frac{c}{3.6B\sqrt{2\text{SNR}}}$$

2) 速度

a. 最大探测速度

目标速度与多普勒频率（即 chirp 之间的相位差）来计算。多普勒频率可以表示为：

$$\Delta \phi = 2\pi f_c \Delta \tau = 2\pi f_c \frac{2 \Delta R}{c} = 2\pi f_c \frac{2vT_c}{c} = \frac{4\pi vT_c}{\lambda}$$

当相位测量不模糊时，即 $|\Delta \phi| < \pi$ ，就可得到最大测量速度：

$$v_{\max} = \frac{\lambda}{4T_c}$$

其中为 chirp 总周期（包括 active chirp time + idle time）。

b. 速度分辨率

速度分辨率表示速度维区分两个同一位置目标的能力。假设一帧传输 N 个 chirp，速度

维频率分辨率为： $\frac{2\pi}{N}$



$$\Delta \phi > \frac{2\pi}{N} \rightarrow \Delta v > \frac{\lambda}{2NT_c} = \frac{\lambda}{2T_f}$$

其中 $T_f = NT_c$ 为有效帧周期，不包含 inter frame time。

c. 测速精度

测速精度表示测量单目标的速度准确率，同样也取决于信噪比。

$$\sigma_v = \frac{\lambda}{3.6NT_{c\sqrt{SNR}}}$$

3) 角度

a. 探测视角范围 FOV

雷达的探测角度是通过 RX 天线间的接收信号相位差(由波程差引起)来计算，相位差为：

$$\omega = \frac{2\pi d \sin \theta}{\lambda}$$

当相位差不模糊时，即 $|\omega| < \pi$ ，得到角度范围：

$$\theta_{max} = \sin^{-1} \frac{\lambda}{2d}$$

b. 角度分辨率（一般指水平分辨率）

角分辨率表示雷达在角度上区分邻近目标的能力，通常以最小可分辨的角度来度量。雷达的角度分辨率取决于雷达的工作波长 λ 和天线口径尺寸 L ，约为 $\lambda/(2L)$ ，具体计算方式如下。比如方位角分辨率为 1.6° ，就是指两个物体在空间上至少相距 1.6° ，才能够被雷达在水平角度上区分开。若两个物体相距小于 1.6° ，那么在角度上两个物体会重合。

假设接收天线个数为 N_{RX} ，角度上频率分辨率为 $\frac{2\pi}{N_{RX}}$ ，则有：

$$\Delta \omega = \frac{2\pi d}{\lambda} [\sin(\theta + \Delta \theta) - \sin \theta] = \frac{2\pi d}{\lambda} \cos \theta \Delta \theta > \frac{2\pi}{N_{RX}}$$

所以有：

$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{N_{RX} d \cos \theta}$$

在实际应用中，一般不用角度分辨率来区分目标。由于距离、速度分辨率较高，目标一般可以在距离、速度维度上就可以区分开。

c. 测角精度

角精度，用于描述雷达对单个目标方位角估计的准确度，角精度也与信噪比相关：

$$\sigma_\theta = \frac{\theta_{3dB}}{1.6\sqrt{2SNR}}$$