

# 参考如下：

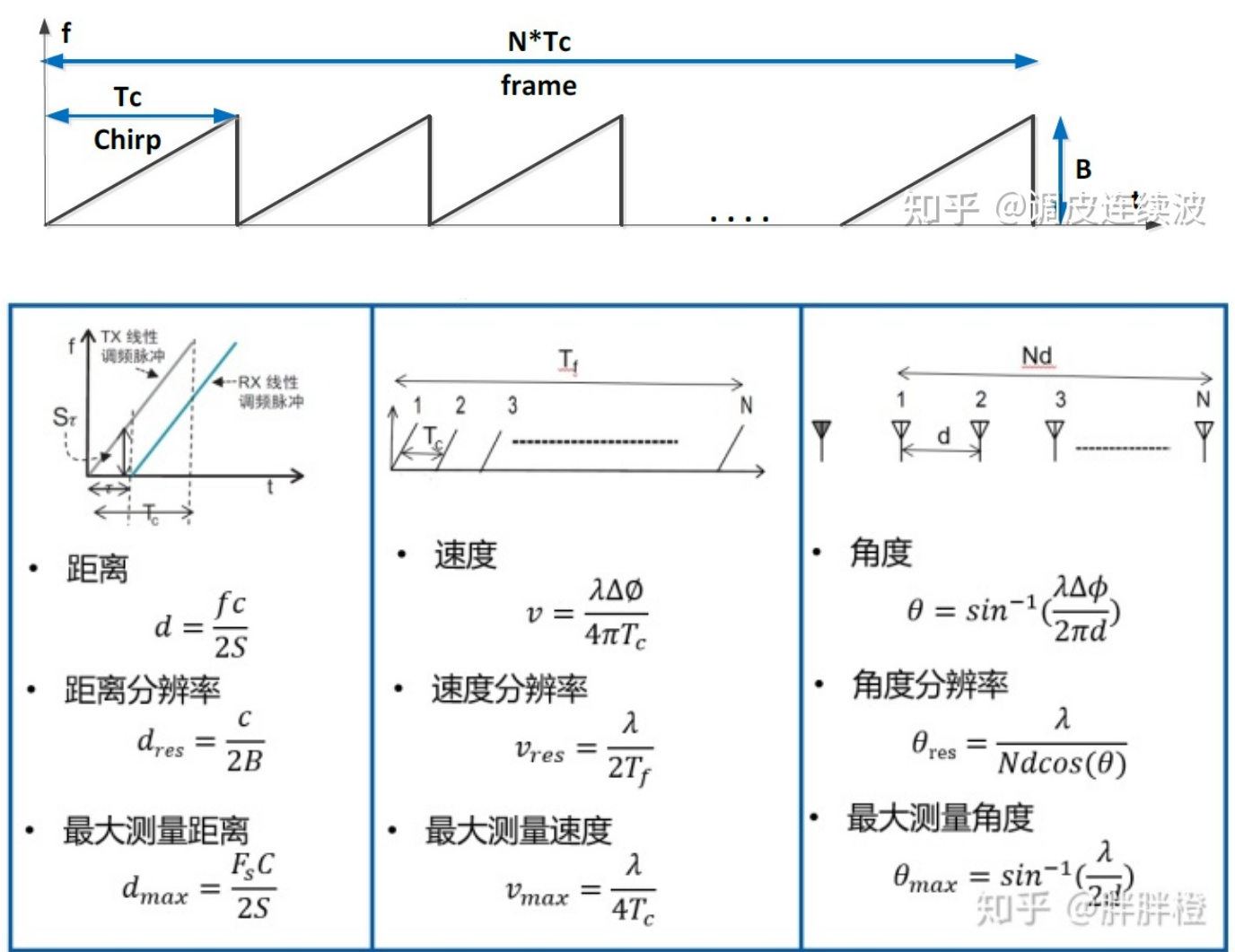
干货 | 毫米波雷达解速度模糊算法-基于AWR1642 汽车雷达

中国剩余定理的完美演绎

## 背景：

1. 当一个物体的移动速度超过了雷达可检测的最大速度时，雷达就不能准确的测量物体的速度，因此要增大雷达可检测的最大速度来准确检测目标的速度

本文分析了基于中国剩余定理、基于多普勒相偏补偿假设和基于目标跟踪假设这三种适合AWR1642 的速度扩展算法，可以克服硬件电路的限制，大幅度提高雷达的最高检测速度。用户可以使用这些方法，在不牺牲其它性能指标的情况下，将AWR1642 雷达的最高检测速度提高到车厂的要求。



中频信号的频率变化为  $f_{IF} = 2dS/c = 2dB/(c * T_c)$

受中射频电路设计难度和成本的制约，毫米波雷达芯片的中频带宽 存在一定的限制，比如TI 的 AWR1642 的 满足公式(5)。超过芯片的中频频率以外的目标反射信号会被低通滤波器抑制，只有满足公式 (6) 的目标才能被检测到

$$F_{IF} = 5\text{ MHz}, \text{ for AWR1642} \tag{5}$$

$$f_{IF} < F_{IF} \tag{6}$$

可以看出，更小的距离分辨率需要更大的扫频带宽(B)，同时从公式(3)可以发现更高的目标检测速度需要更短的chirp 扫频周期(Tc), 这两个需求加起来会导致目标在接收机形成的fIF接近并超过芯片的中频带宽

## 发波配置

雷达系统参数	指标要求	说明
最大距离 $R_{max}$	80 m	雷达可以检测到 $RCS=10\text{ m}^2$ 的目标的最远距离
距离分辨率 $\Delta R$	0.36 m	雷达可以区分出两个目标的最小间隔距离
最高速度 $V_{max}$	$\pm 30\text{ m/s}$	$\pm 108\text{ Km/h}$ ，车辆接近雷达速度为负，车辆远离雷达速度为正
速度分辨率 $\Delta V$	0.52 m/s	在相同距离时，雷达可以区分出两个相同的最小速度连续波

结合dmax和5、6公式,  $S = f * c / (2d)$

要达到80 m 的最大距离，AWR1642 的波形斜率(Slope)不能超过9.375 MHz/us.。

要达到0.36 m 的距离分辨率, 扫频带宽(B)不能小于400MHz。(0.375?还是B取整)

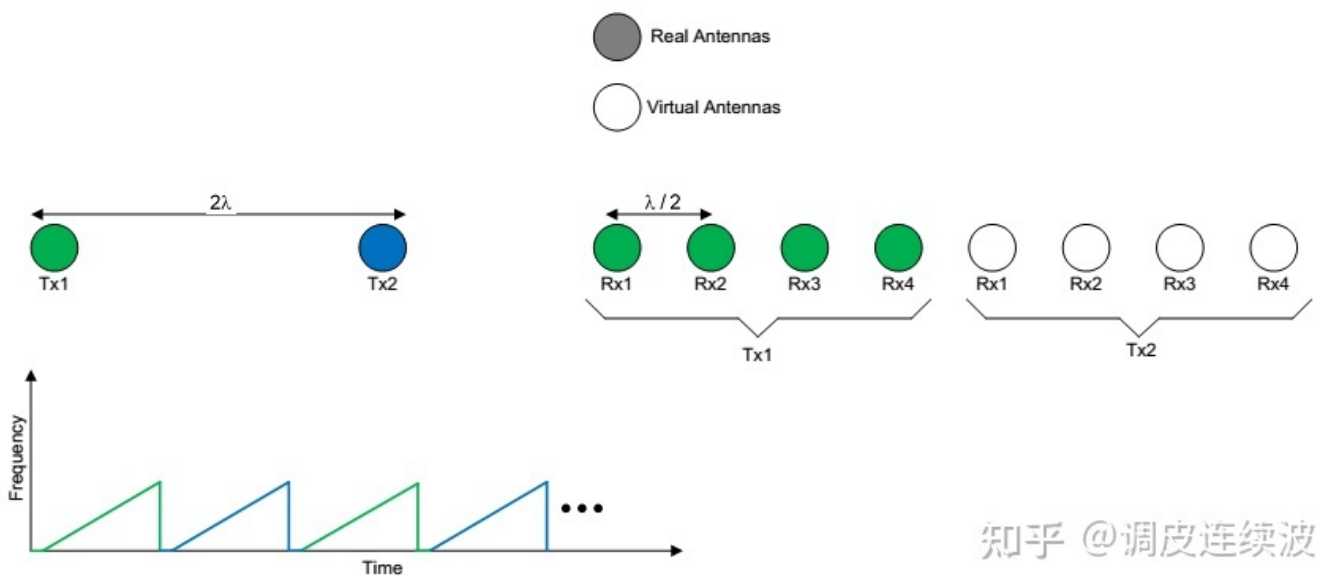
在扫频带宽和波形斜率的限制下，chirp 周期最小只能选择为42.66 us。

这时能实现的最高速度为22.86 m/s, 无法达到30 m/s 的系统要求。

本文将介绍几种速度扩展算法，在公式计算出的最高速度Vmax基础上进行扩展，在不降低其它性能指标的前提下提高雷达可以支持的最高速度。

## 信号处理流程

汽车雷达的信号处理流程和天线的设计密切相关。AWR1642 是一个2T4R 的雷达芯片，如图3 所示以TI 的AWR1642 Boostpack 为代表，一般基于 AWR1642 汽车雷达的天线设计为四根接收天线等间隔 半波长，两根发射天线间隔 2倍波长，

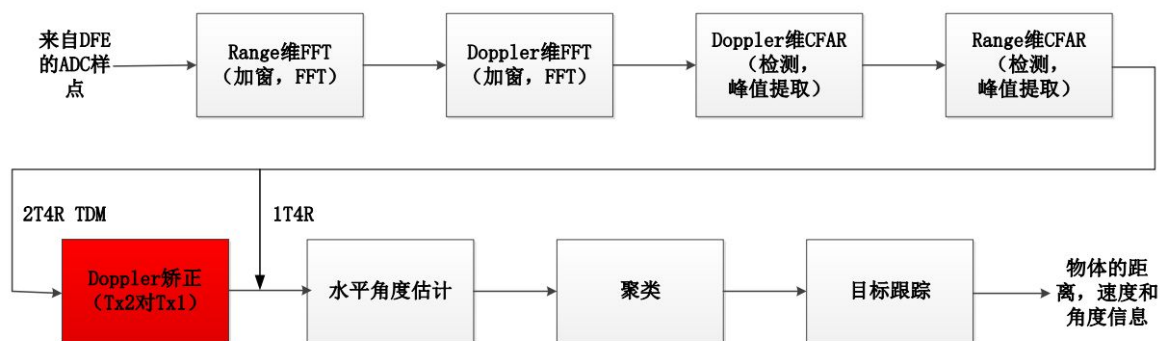


这样的天线设计通常使用下面两种发射波形配置：

1T4R, 使用图3 中Tx1 连续发射chirp, Rx1/2/3/4 作为接收天线, 这种配置是最简单的雷达波形, 适合探测距离比较远, 检测速度要求比较高的场景。

2T4R TDM MIMO, 使用图3 中Tx1 和Tx2 在时间上轮流发射chirp(AB波), Rx1/2/3/4 作为接收天线, 这种配置可以通过虚拟天线算法, 将Rx1/2/3/4 在连续两个chirp 周期内的接收天线数据联合使用, 虚拟出1T8R 的天线阵列以获取更高的角度分辨率。

针对上面介绍的发射波形配置, AWR1642 上的典型信号处理流程如图4 所示。



首先通过距离维(Range)和速度维(Doppler)FFT 计算获得目标距离和速度的二维反射能量剖面(Profile)接着通过特定的目标检测算法(例如CFAR-CA, CFAR-OS 等)分别在距离维和速度维上从噪声中检测获得反射点(即检测目标)

以下(只针对TDM MIMO)

矫正：接收Tx2 的虚天线组相对于接收Tx1 的虚天线组上的多普勒相偏(因为Tx2 和Tx1 虚天线组空口发送时间不同, 累积的多普勒相偏将影响角度估计),

水平角估计：然后采用特定的角度估计算法(例如FFT, MUSIC 等), 通过分析所有接收天线(TDM MIMO 下为虚天线)上对于目标的反射信号峰值相位变化来估计目标的角度。

最后通过聚类算法将属于同一个物体的反射点归为一个簇，再通过对聚类以后的簇进行目标跟踪，可以获得可靠的物体的距离，移动速度和角度。这些信息通过CAN 总线发给车辆的中央处理单元来以实现不同的ADAS 应用。

针对本节介绍的雷达天线波形配置和信号处理链，下面将介绍几种适用的速度扩展算法。

## 基于中国剩余定理的速度扩展算法

可知，雷达可检测的最高速度 $V_{max}$ 和chirp 周期 $T_c$ 成反比，雷达需要支持的 $V_{max}$ 越高， $T_c$ 就需要越小。但受AWR1642 中频带宽限制， $T_c$ 无法设置的过小。这导致如果仅仅通过图4 的常规信号链，很难在AWR1642 上满足汽车雷达的检测速度要求。

当一个目标的实际速度  $V_r$ 大于雷达的最高检测速度  $V_{max}$ 时，通过Doppler 维FFT 得到的速度将发生模糊，我们定义这个模糊速度为  $V_a$ 。目标的模糊速度  $V_a$ 和实际速度  $V_r$ 之间满足公式(7)：

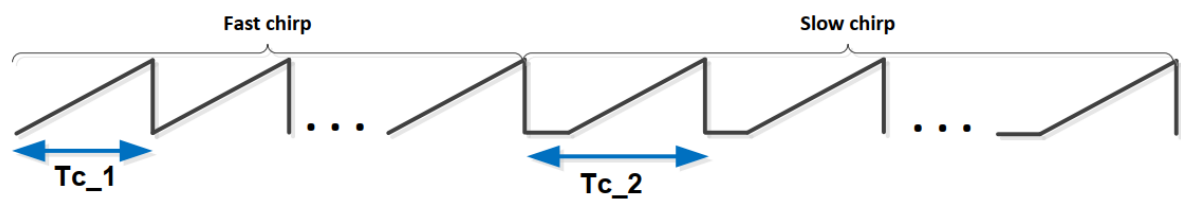
$$V_a = V_r \bmod V_{max} \tag{7}$$

公式(7)告诉我们模糊速度  $V_a$ 是实际速度  $V_r$ 对最高检测速度  $V_{max}$  的余数。

通过公式(3)我们知道最高检测速度  $V_{max}$ 由chirp 周期  $T_c$ 相关。那么如果我们能定义两种不同  $T_c$ 的chirp，这两种chirp 对应的  $V_{max}$ 不同，同一个目标的  $V_r$ 在这两种chirp 下检测得到的  $V_a$ 也不同。

根据中国剩余定理(如果一个自然数对一组互质的因子分别取余数，那么在知道余数和互质因子的情况下，一定可以计算出原始的自然数)，我们能够从这两个chirp 下计算的  $V_a$ 恢复出目标的实际速度  $V_r$ 。中国剩余定理通过余数求解原始自然数的过程是通过求解方程来实现的，在DSP 软件上很难实现。

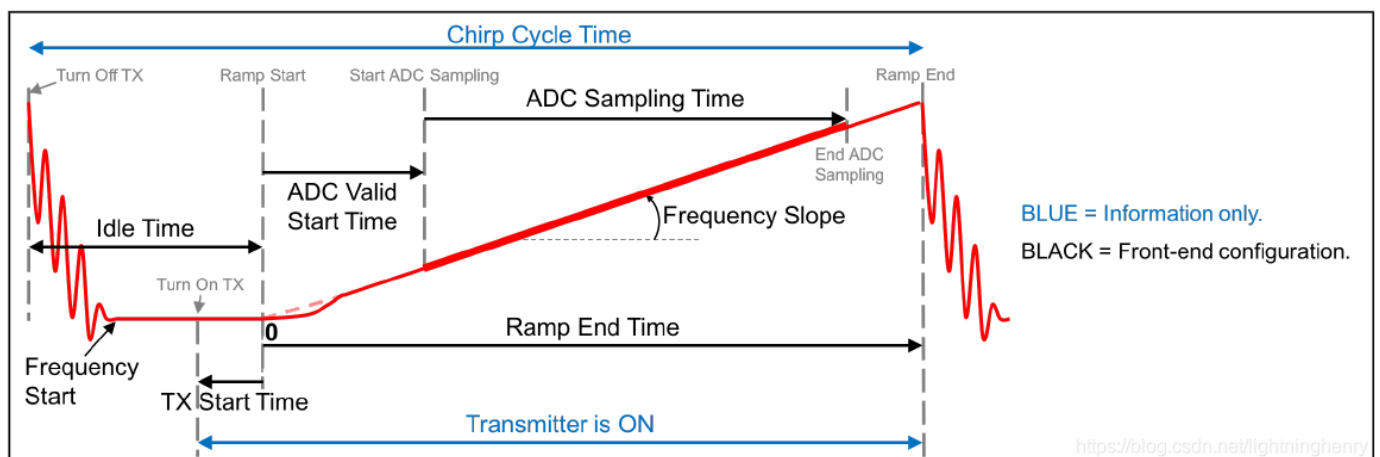
设计了图5 所示的Fast-slow chirp 的波形，并采用一种简单的算法来扩展检测速度。



Fast-slow chirp 的具体参数如表2 所示：



波形参数	Fast chirp	Slow chirp	说明
Idle time (us)	3	14.8	Fast/Slow chirp 使用同一个 profile, 通过设置不同的 Idle time 获得不同的 $T_c$
ADC start time (us)	4.8	4.8	一致
Ramp end time (us)	56	56	一致
Slope (MHz/us)	8	8	一致
Bandwidth (MHz)	408	408	一致, 大于 400MHz, 可以支持 0.36m 的距离分辨率要求
Num of ADC samples	256	256	一致
ADC sampling rate (ksps)	5000	5000	一致
Num of chirps	64	64	一致
Chirp period (us)	59	70.8	根据公式(3), Fast/Slow chirp 支持的最大速度分别为 16.53m/s 和 13.77m/s



从表2 可以看出, 单独的Fast chirp 和Slow chirp 都不能达到30m/s 的最大检测速度。因为Fast chirp 和Slow chirp 的最高检测速度和速度分辨率不同, 物体的实际速度在两种chirp 的2D-FFT 结果中对应的Doppler索引不同。

我们可以根据这个特点, 对物体的实际速度是否超过Fast chirp 的最大检测速度做出假设, 并依照这个假设推算出在Slow chirp 上对应的Doppler 索引, 然后通过Slow chirp 这个Doppler 索引上的目标反射能量值判断之前的假设是否成立。我们对图4 的雷达信号链, 在Doppler 维CFAR 中增加表3 所示的速度扩展算法。表3 中的算法可以支持最高3 倍的速度扩展, 将表2 中波形配置的最高检测速度提高到48 m/s。

#### 速度扩展算法：

- 1: 对 Fast-chirp 进行 Doppler 维 CFAR, 获得目标在速度维上的峰值索引 PeakIdx\_fast, 并记录下峰值能量为 PeakVal\_fast
- 2: 对 PeakIdx\_fast 进行内插, 获得目标的速度为 Vel\_fast
- 3: 假设目标的速度  $V_{hypo}$  分别为  $Vel\_fast - 2 * Vmax\_fast$ ,  $Vel\_fast$ ,  $Vel\_fast + 2 * Vmax\_fast$
- 4: 对于以上三个假设速度  $V_{hypo}$ , 分别计算出其在 Slow-chirp 上对应的速度索引 PeakIdx\_slow\_hypo
- 5: 提取 Slow-chirp 的 2D-FFT 结果在索引 PeakIdx\_slow\_hypo 上对应的能量 PeakVal\_slow\_hypo, 同时记录其左右两个索引上的能量
- 6: 当 PeakVal\_slow\_hypo 大于其左右两个索引上的信号能量, 且与 PeakVal\_fast 的差值小于门限 Threshold, 判定这个假设速度  $V_{hypo}$  为目标实际速度的一个备选值 Vel\_candidate
- 7: 从验证通过的所有备选值 Vel\_candidate 中选出能量最大的一个 Vel\_candidate\_max
- 8: 输出目标的速度 Vel 为 Vel\_candidate\_max

```

%%速度解模糊matlab代码以及解析
clear;
clc;
clear;
outid = 160;
%%
for vid = 1:1:outid
vreal = (vid -outid/2); %定义测试中实际速度vreal范围:-80-80 km/h

Va_res = 0.3; %多普勒维速度分辨率
Va_res_maxv = Va_res *128; %定义多普勒频点数量为128，算出A波最大可检测速度

Vb_res = 0.5; %多普勒维分辨率
Vb_res_maxv = Vb_res *128; %定义多普勒频点数量为128，算出B波最大可检测速度

%模糊速度
Va_binnum = mod(round(vreal/Va_res),128); %四舍五入，对128取余，dopperbin数量
Vb_binnum = mod(round(vreal/Vb_res),128);

    for i = 1:1:10
        %算出目标实际模糊速度
        Vout_real(1,i) = Va_binnum*Va_res + (i-5)*Va_res_maxv;
        Vout_real(2,i) = Vb_binnum*Vb_res + (i-5)*Vb_res_maxv;
    end

min_V = 99;
out_V = 0;

    for i = 1:1:10
        for j=1:1:10
            V_cha = abs(Vout_real(1,i) - Vout_real(2,j)); %算差值
            if(abs(Vout_real(1,i)) < 80) && (abs(Vout_real(2,j)) < 80)
                if(V_cha <min_V)
                    min_V = V_cha; %取速度差值最小
                    out_V = Vout_real(1,i); %取差值最小的速度解
                end
            end
        end
    end
    V_list(vid) = out_V;
end
%%
plot(V_list);

```



Figure 1



文件(F) 编辑(E) 查看(V) 插入(I) 工具(T) 桌面(D) 窗口(W) 帮助(H)

