

mmWave学习笔记

李东豫 Powered by TI

2019 年 9 月 29 日

目录

1 概述

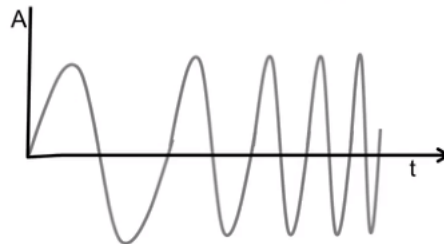
mmWave雷达是近来使用在众多无人驾驶项目中用于建图、避障的高性能传感器，具有分辨率高，不受恶劣天气干扰，隐私性好(想想如果在洗手间安装一个摄像头监控会有多尴尬)的优点。由于Estello无人载具项目开发的需要，我们选择TI的IWR1443毫米波雷达作为载体进行相关学习。

2 mmWave基础知识

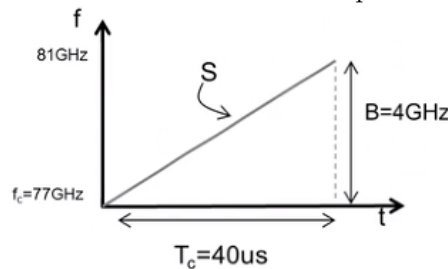
本节将关注mmWave雷达测量距离、角度、速度的原理进行介绍。

2.1 什么是FMCW

FMCW雷达 的核心是一种称为线性调频脉冲(Chirp)的信号。线性调频脉冲是指雷达信号的频率随时间线性增长的正弦波: $f=at$ ，时域波形请见下图



假设线性调频脉冲以频率 f_c 开始，最终以 $f_c + B$ 的频率结束，那么称 B 为线性调频脉冲的带宽。因此我们称其为调频连续波，即FMCW。下图为Chirp频域波形：

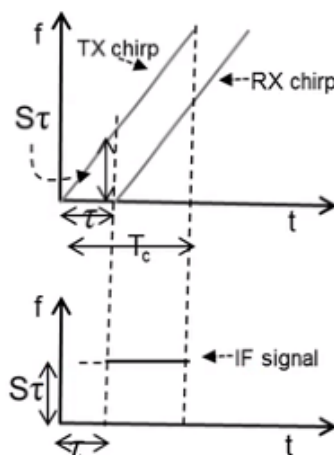


本图例即为IWR1443毫米波雷达的FMCW波形图，其FMCW由初始频率 f_c ，带宽 B ，以及持续时间 T_c 完全确定。其斜率 S 决定了线性调频脉冲的频率每单位时间增长的速率。可见在本图

中，该线性调频脉冲在40us内扫过了4GHz的带宽，则斜率为100MHz/us.请注意：B和S为定义系统性能的重要参数。

2.2 FMCW雷达测距原理

1TX-1RX FMCW雷达 前方的一个物体会产生一个中频信号(IF Signal)。设雷达信号从TX发射到RX天线接收的时间为 τ ，则 $\tau = 2d/c$ ， c 为光速， d 为雷达与障碍物间距。由此产生的IF信号频率恒定，为 $f_{IF} = S = \frac{S2d}{c}$ 。可推测：雷达前方有多个距离不同的物体时，将产生多个IF信号。该IF信号的频率与距离成正比。

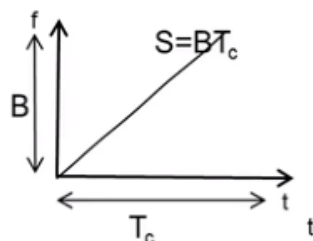


2.2.1 mmWave雷达的分辨率与探测距离

主要是指傅里叶变换对多个距离不同的障碍物所产生的IF信号进行解析时的分辨率。请注意，当两个物体距离过近时，IF信号也会十分接近，进而导致FT无法解析出两个信号的频谱(峰值),进而由频谱混叠导致障碍物数量的误判。

距离分辨率的计算：

问题一： 已知一个与雷达相距 d 的障碍物会使雷达混频器产生频率 $f=S2d/c$ 的IF信号，且只要两个信号的频率差 $\Delta f > 1/T$ ，那么它们就可以被傅里叶变换分辨(观察时间要大于等于信号的一个周期)。计算雷达的距离分辨率：



解： $\Delta f = \frac{S2\Delta d}{c}$; $\Delta f > \frac{1}{T_c}$ ，其中 T_c 为IF信号的持续时间

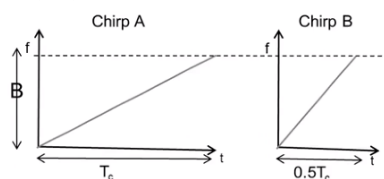
请注意此处忽略FMCW一开始的线性调频脉冲的往返时间 τ

则有： $\frac{S2\Delta d}{c} > \frac{1}{T_c}$

可得 $\Delta d > \frac{c}{2ST_c}$ ，且斜率 S *线性调频脉冲的持续时间 T_c 等于带宽 B

$\therefore \Delta d > \frac{c}{2B}$, $d_{res} = \frac{c}{2B}$

问题二： 如下图所示，若两个雷达的带宽相同，而线性调频脉冲的持续时间不同，哪一个的距离分辨率更好？



解：根据问题一所得结果，他们应具有相同的距离分辨率。

但Chirp A具有更长的IF信号持续时间，因此具有更长的IF信号观测窗口。因此Chirp A的距离分辨率应优于Chirp B.与问题一矛盾。因此引出IF信号的数字化：

IF信号的数字化： 有如下几条信息：

- (1).我们所感兴趣的IF信号的带宽由我们想要的最大探测距离决定： $f_{IF_max} = \frac{S2d_{max}}{c} = \frac{2B}{c}$
- (2).IF信号通常首先经过低通滤波器，后经过ADC输入至DSP被处理
- (3).IF带宽因此被ADC采样率(F_s)限制。 $F_s \geq \frac{S2d_{max}}{c}$

请注意：Nyquist采样定理限定了实信号的采样率应大于等于信号最大频率的2倍，但这里假设基带信号是复信号，因此上式Nyquist采样率为实信号的一半。

∴ADC采样率 F_s 限制了雷达的最大探测距离： $d_{max} = \frac{F_s c}{2S}$

结论：带宽与ADC采样率为影响雷达性能的瓶颈。

由于 $d_{max} = \frac{F_s c}{2S}$, S 与 d_{max} 成正比，可以权衡 S 与 d_{max} ,设计符合应用目的的雷达。

注意：通常雷达倾向于拥有更大的探测距离，因此具有更小的斜率 S 。

回到问题二上，由于A、B的带宽相同，则它们的距离分辨率相同。但由于Chirp A的斜率 S 小于Chirp B的斜率，因此对于相同的最大距离要求 d_{max} ，线性调频脉冲A仅需要一半的IF带宽，因此对其进行采样的ADC具有较小的采样率。因此Chirp A的测量时间较长；线性调频脉冲B仅需要一半的测量时间。

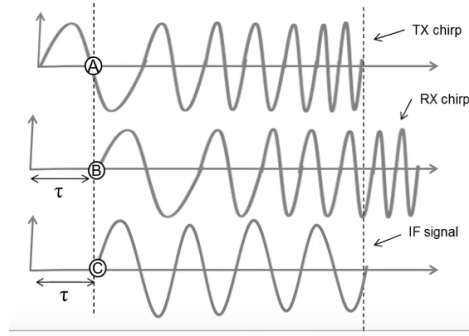
2.2.2 提高mmWave性能方法

1：增大IF信号的长度 T_c ，即拓展两个正弦波的观测窗口。请思考这样做可以分开两个频率相近的正弦波信号的原因。请注意：增大观测窗口同时也潜在地增大了带宽，此带宽称为射频带宽(线性调频脉冲的带宽)，其范围在几GHz到几百MHz之间。直观上即大带宽对应更好的分辨率。

2：提高线性调频脉冲频域的斜率 S 即增大IF带宽(f_{IF_max})，更大的IF带宽等效于更快的线性调频脉冲(即 T_c 更短)，更大的最大探测距离 d_{max}

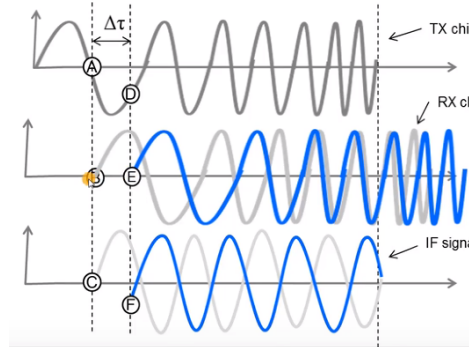
2.3 IF信号的相位

相位可以响应物体极小的位移，雷达正是基于此原理测量速度的变化。首先提醒一下：在傅里叶变换中，单正弦信号的频谱的峰值的相位对应于正弦波的初始相位。



上图中IF信号为TX、RX经过混频器输出的信号 $A\sin(2\pi * ft + \phi_0)$, 其中频率 $f = \frac{S2d}{c}$

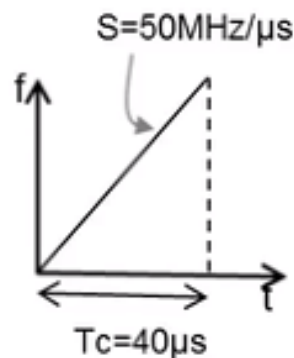
IF信号的相位也会发生相应变化 $\phi_0 = \phi_A + \phi_B$ 则当物体移动后, TX-RX发送接收延迟增加 $\Delta \tau$, 则此时RX的相位不变, TX相位变化为 $(\phi_A + 2\pi f_c \Delta \tau = \frac{4\pi \Delta d}{\lambda})$ 等于IF相位变化。



结论: 即: IF信号 $A\sin(2\pi * ft + \phi_0)$ 的频率随物体间距变化, 其起始相位随物体距离的微小变化 Δd 成线性变化。此处的“微小变化”指相对于雷达的距离分辨率而言的。它必须为若干毫米。

2.3.1 IF信号与物体微小位移的关系

举例: 线性调频脉冲如下图。考虑当雷达前方的物体发生了1mm的位移时, IF信号的变化。(注: 对77GHz雷达, $1\text{mm} = \lambda/4$)



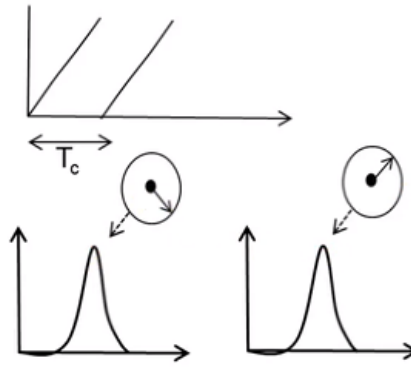
解: 由前面推导: IF信号的相位变化 $\Delta \phi = \frac{4\pi \Delta d}{\lambda} = \pi = 180^\circ$

IF信号的频率变化 $\Delta f = \frac{S2\Delta d}{c} = 333\text{Hz}$

对于观察窗口 $T_c = 40\mu\text{s}$, Δf 对应周期数目为 $\Delta f T_c = 333 * 40 * 10^{-6} = 0.013\text{cycles}$, 如此微小的变化在FFT中体现不出来。

结论: IF信号的相位对物体距离的微小变化量十分敏感, 而频率对其不敏感。

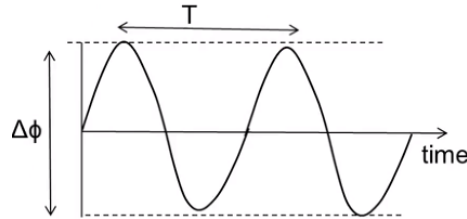
2.3.2 用两个线性调频脉冲测量物体速度 v



以 T_c 为时间间隔发送两个线性调频脉冲，对得到的IF信号进行FFT运算，他们将有相同的峰值但相位不同。测得的相位差 ω 对应于物体的运动 vT_c 。

$$\omega = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}, v = \frac{\lambda \omega}{4\pi T_c}$$

由上式，可知 $\Delta\phi$ 与 Δd 成正比， $\Delta\phi$ 的变化周期 T 也直接反映了震动周期。



补充：

- (1) 由于mmWave雷达对于微小振动敏感，因此也常用来作为电机振动监测、心跳检测等应用的核心部件。
- (2) 当有多个物体恰好与雷达的距离相同，但拥有不同的移动速度。那么距离FFT(Range FFT,即上文中使用的FFT)将只输出单个与此距离 d 对应的峰值。分离方法：多普勒FFT:用于分离多个距离相同但速度不同的物体。

2.4 速度估计

FFT 与一个相量以恒定离散角速度 ω (/次采样)的速率旋转(即每两个样本之间相隔 ω 弧度)，其FFT将在 ω 处产生一个峰值

分辨率的问题： 当一个信号内由两个相量构成时，FFT理应有 ω_1 与 ω_2 两个峰值。

请注意：输入序列的长度越长，FFT的分辨率越高。一般地，一个长度为 N 的序列可以分辨两个角速度差大于 $2\pi/N$ 的信号。

比较连续信号与离散信号的分辨率：

连续信号： $\Delta f = \frac{1}{T}(\text{cycles/sec})$,其中 T 为观察窗口

离散信号： $\Delta\omega = \frac{2\pi}{N}(\text{rad/sample}) = \frac{1}{N}(\text{cycles/sample})$, N 为观测样本数

最大可测量速度 与波长和观察时间有关。当物体远离雷达向远处移动时, $\omega > 0$; 当物体远离雷达向近处移动时, $\omega < 0$ 。考虑 $e^{j\omega}$ 周期为 2π , 当 $|\omega| > 180^\circ = \pi$ 时, 将无法判断物体的运动方向。即:

不产生歧义的速度测量: $|\omega| < \pi$

$$\therefore \frac{4\pi v T_c}{\lambda} < \pi, \text{即 } v < \frac{\lambda}{4T_c}$$

得到:

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

其中 T_c 为两个Chirp间隔。

因此要得到更高的最大可测量速度, 需要由更密集的线性调频脉冲(降低 T_c)

2.4.1 测量距离相同的多个物体的速度

考虑 两个与雷达相距均为 d ,但速度分别为 v_1, v_2 ,它们均向雷达靠近。由于距离相同, Range-FFT的输出将只有一个峰值, 但峰值处的相量相位将具有两个物体的分量。

解决方案 :

发射一系列等间隔的线性调频脉冲 , 而不仅仅是两个Chirps.假设发射 N 个Chirps(通常称它们为1帧), 对一系列相量做Range-FFT,得到的一组Range-FFT总会在相同的位置有一个峰值, 但与这些相量相对应的离散序列有两个旋转相量, 分别为 ω_1, ω_2 , 对应 v_1, v_2 。因此对这个序列的FFT将有两个峰值 ω_1, ω_2 。将其代入下式, 得到两物体的速度:

$$v_1 = \frac{\lambda \omega_1}{4\pi T_c}$$

$$v_2 = \frac{\lambda \omega_2}{4\pi T_c}$$

请注意: 这里的FFT是在线性调频脉冲之间执行的, 通常称为多普勒FFT(doppler-FFT)。

多普勒FFT的速度分辨率 , 即 v_1, v_2 之间的最小间隔可由以下条件给出:

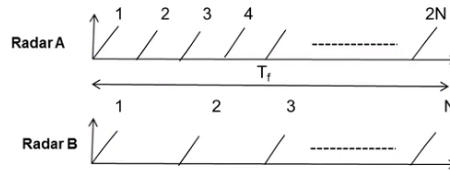
两个物体的速度差为 Δv , 则其角频率差为 $\Delta\omega = \frac{4\pi\Delta v T_c}{\lambda}$

对于序列长度为 N 的FFT,当其角频率差值 $\Delta\omega > \frac{2\pi}{N}$ 时, 可被FFT分辨。

$$\therefore \frac{4\pi\Delta v T_c}{\lambda} > \frac{2\pi}{N}, \text{即 } \Delta v > \frac{\lambda}{2NT_c}$$

即 $v_{res} = \frac{\lambda}{2NT_c} = \frac{\lambda}{2T_f}$, T_f 为帧时间长度。

问题: 两个雷达的帧如下



问: 如何评价两个雷达的最大测量速度 v_{max} 与速度测量精度 v_{res} ?

答: 两个雷达的帧时间长度相同, 且FMCW的带宽相同、斜率 S 相同。则 λ 相同

$$\therefore v_{res} = \frac{\lambda}{2T_f}, \text{ 可得两个雷达速度测量精度 } v_{res} \text{ 相同。}$$

由 $v_{max} = \frac{\lambda}{4T_c}$, 其中 T_c 为两个Chirps之间的时间间隔, 可知Radar A的最大可测量速度较大。

2.5 设计mmWave雷达系统

本节主要目标位设计一个符合制定标准（速度分辨率，最大测量速度等），并粗略了解一些更深层的雷达设计知识。

2.5.1