

mmWave学习笔记

李东豫

2019 年 9 月 28 日

目录

1 概述	1
2 mmWave基础知识	1
2.1 什么是FMCW	1
2.2 FMCW雷达测距原理	2
2.2.1 mmWave雷达的分辨率与探测距离	2
2.2.2 提高mmWave性能方法	3
2.3 IF信号的相位	4
2.3.1 IF信号与物体微小位移的关系	4
2.3.2 用两个线性调频脉冲测量物体速度v	5

1 概述

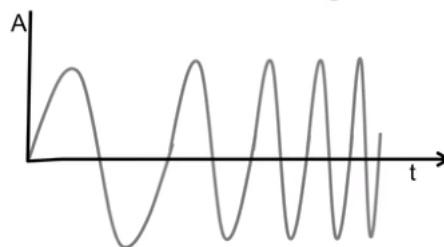
mmWave雷达是近来使用在众多无人驾驶项目中用于建图、避障的高性能传感器，具有分辨率高，不受恶劣天气干扰，隐私性好(想想如果在洗手间安装一个摄像头监控会有多尴尬)的优点。由于Estello无人载具项目开发的需要，我们选择TI的IWR1443毫米波雷达作为载体进行相关学习。

2 mmWave基础知识

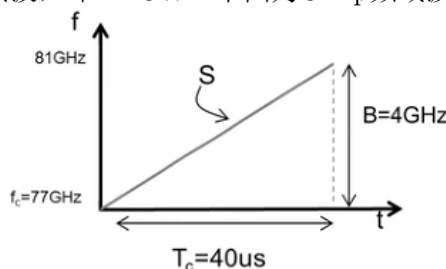
本节将关注mmWave雷达测量距离、角度、速度的原理进行介绍。

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



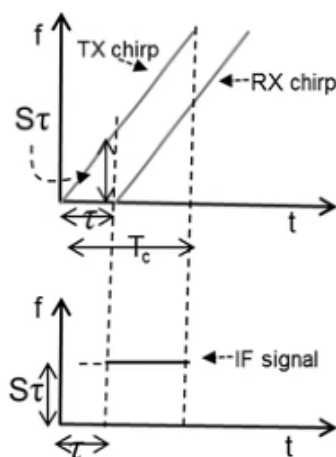
假设线性调频脉冲以频率 f_c 开始，最终以 $f_c + B$ 的频率结束，那么称 B 为线性调频脉冲的带宽。因此我们称其为调频连续波，即FMCW。下图为Chirp频域波形：



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。

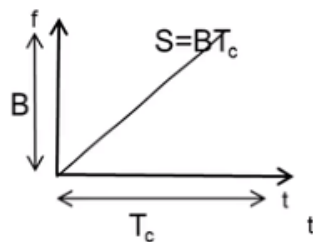


2.2.1 mmWave雷达的分辨率与探测距离

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。

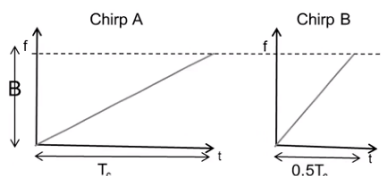
距离分辨率的计算：

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.

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

结论: 带宽与ADC采样率为影响雷达性能的瓶颈。

由于 $d_{max} = \frac{F_sc}{2S}$, 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

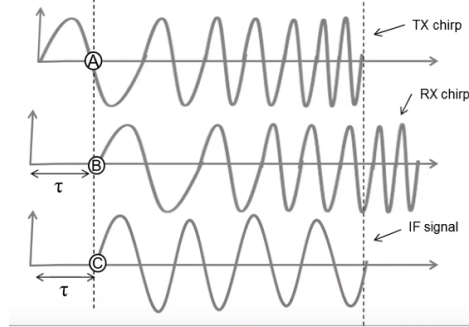
1: 增大IF信号的长度 T_c , 即拓展两个正弦波的观测窗口。请思考这样做可以分开两个频率相近的正弦波信号的原因。请注意: 增大观测窗口同时也潜在地增大了带宽, 此带宽称为射

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}

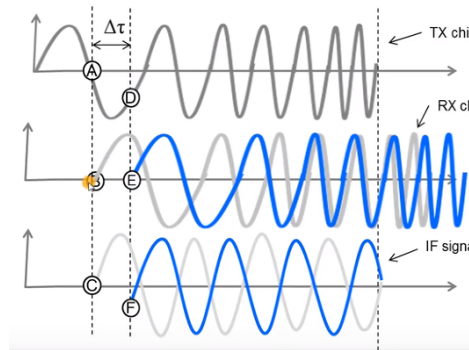
2.3 IF信号的相位

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 $f = \frac{S2d}{c}$

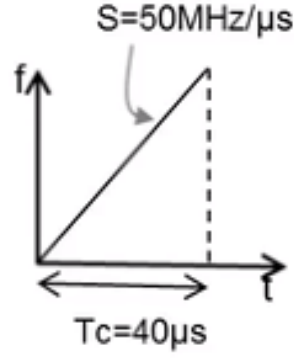
IF信号的相位也会发生相应变化 $\phi_0 = \phi_A + \phi_B$ 则当物体移动后, TX-RX发送接收延迟增加 $\Delta \tau$, 则此时RX的相位不变, TX相位变化为 $(\phi_A + 2\pi f_c \Delta \tau = \frac{4\pi \Delta d}{\lambda})$ 等于IF相位变化。



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, $1\text{mm} = \lambda/4$)



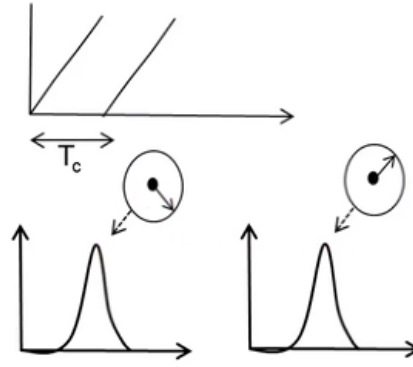
解：由前面推导：IF信号的相位变化 $\Delta\phi = \frac{4\pi\Delta d}{\lambda} = \pi = 180^\circ$

IF信号的频率变化 $\Delta f = \frac{S^2\Delta d}{c} = 333Hz$

对于观察窗口 $T_c = 40\mu s$, Δf 对应周期数目为 $\Delta f T_c = 333 * 40 * 10^{-6} = 0.013cycles$ ，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。

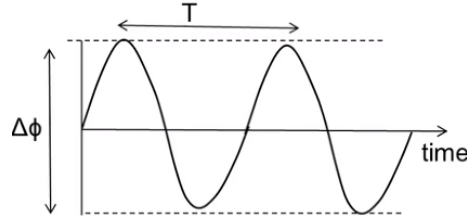
2.3.2 用两个线性调频脉冲测量物体速度v



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。