

# 毫米波雷达传感器基础知识



Cesar Iovescu  
雷达应用经理

Sandeep Rao  
德州仪器 (TI) 雷达系统架构师

## 介绍

---

毫米波 (mmWave) 是一类使用短波长电磁波的特殊雷达技术。雷达系统发射的电磁波信号被其发射路径上的物体阻挡继而会发生反射。通过捕捉反射的信号，雷达系统可以确定物体的距离、速度和角度。

毫米波雷达可发射波长为毫米量级的信号。在电磁频谱中，这种波长被视为短波长，也是该技术的优势之一。诚然，处理毫米波信号所需的系统组件（如天线）的尺寸确实很小。短波长的另一项优势是高准确度。工作频率为 76–81GHz（对应波长约为 4mm）的毫米波系统将能够检测小至零点几毫米的移动。

完整的毫米波雷达系统包括发送 (TX) 和接收 (RX) 射频 (RF) 组件，以及时钟等模拟组件，还有模数转换器 (ADC)、微控制器 (MCU) 和数字信号处理器 (DSP) 等数字组件。过去，这些系统都是通过分立式组件实现的，这增加了功耗和总体系统成本。

其复杂性和高频率要求使得系统设计颇具挑战性。

德州仪器 (TI) 已经克服了这些挑战，并且设计出了基于互补金属氧化物半导体 (CMOS) 的毫米波雷达器件，该器件集成了时钟等 TX-RF 和 RX-RF 组件，以及 ADC、MCU 和硬件加速器等数字组件。TI 的毫米波传感器产品组合中的某些系列集成了 DSP，用于提供额外的信号处理功能。

TI 器件可实现一种称为调频连续波 (FMCW) 的特殊毫米波技术。顾名思义，FMCW 雷达连续发射调频信号，以测量距离以及角度和速度。这与周期性发射短脉冲的传统脉冲雷达系统不同。

## 距离测量

在雷达系统中，其基本概念是指电磁信号发射过程中被其发射路径上的物体阻挡进行的反射。FMCW 雷达系统所用信号的频率随时间变化呈线性升高。这种类型的信号也称为线性调频脉冲。图 1 以幅度（振幅）相对时间的函数，显示了线性调频脉冲信号表示。

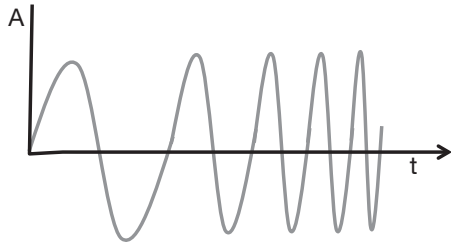


图 1. 线性调频脉冲信号（以振幅作为时间的函数）。

图 2 为同一个线性调频脉冲信号（频率作为时间的函数）。该线性调频脉冲具有起始频率 ( $f_c$ )、带宽 (B) 和持续时间 ( $T_c$ )。该线性调频脉冲的斜率 (S) 捕捉频率的变化率。在例子中图 2 提供的示例中， $f_c = 77 \text{ GHz}$ ， $B = 4 \text{ GHz}$ ， $T_c = 40 \mu\text{s}$ ， $S = 100 \text{ MHz}/\mu\text{s}$ 。

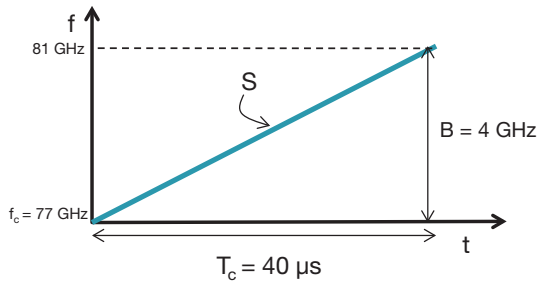


图 2. 线性调频脉冲信号（频率作为时间的函数）。

FMCW 雷达系统发射线性调频脉冲信号，并捕捉其发射路径中的物体反射的信号。图 3 所示为 FMCW 雷达主射频组件的简化框图。该雷达的工作原理如下：

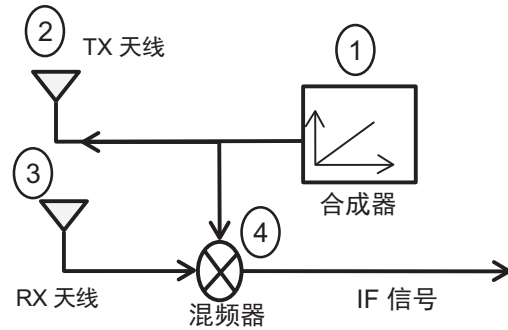


图 3. FMCW 雷达框图。

- 合成器生成一个线性调频脉冲。
- 该线性调频脉冲由发射天线（TX 天线）发射。
- 物体对该线性调频脉冲的反射生成一个由接收天线（RX 天线）捕捉的反射线性调频脉冲。
- “混频器”将 RX 和 TX 信号合并到一起，生成一个中频 (IF) 信号。

混频器是一个电子组件，将两个信号合并到一起生成一个具有新频率的新信号。

对于两个正弦输入  $x_1$  和  $x_2$ （方程式 1 和 2）：

$$x_1 = \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (1)$$

$$x_2 = \sin(\omega_2 t + \phi_2) \quad (2)$$

输出  $x_{out}$  有一个瞬时频率，等于两个输入正弦函数的瞬时频率之差。输出  $x_{out}$  的相位等于两个输入信号的相位之差（方程式 3）：

$$x_{out} = \sin[(\omega_1 - \omega_2)t + (\phi_1 - \phi_2)] \quad (3)$$

混频器的运行方式还可以以图形方式，通过观察作为时间函数的 TX 和 RX 线性调频脉冲频率表示法来加以理解。

下页图 4 中的上图为针对检测到的单个物体的 TX 和 RX 线性调频脉冲作为时间的函数。请注意，该 RX 线性调频脉冲是 TX 线性调频脉冲的延时版本。

延时 ( $\tau$ ) 可通过数学方法推导出方程式 4:

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (4)$$

其中  $d$  是与被检测物体的距离,  $c$  是光速。

要获取混频器输出处作为 IF 信号时间函数的频率表示法, 只要去掉图 4 上半部分中显示的两条线即可。这两条线之间的距离是固定的, 这表示 IF 信号包含一个频率恒定的单音信号。图 4 显示该频率为  $S_{\tau}$ 。IF 信号仅在 TX 线性调频脉冲和 RX 线性调频脉冲重叠的时段 (即图 4 中垂直虚线之间的时段) 有效。

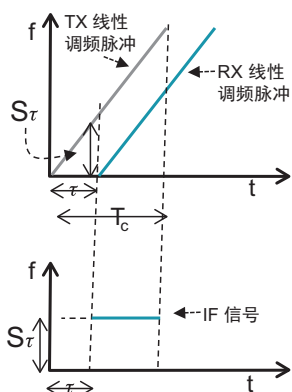


图 4. IF 频率恒定不变。

混频器输出信号作为时间的幅度函数是一个正弦波, 因为它有恒定频率。

IF 信号的初始相位 ( $\phi_0$ ) 是 IF 信号起点对应的时间点 (即图 4 中左侧垂直虚线表示的时间点) 的 TX 线性调频脉冲相位与 RX 线性调频脉冲相位之差。

(方程式 5):

$$\phi_0 = 2\pi f_c \tau \quad (5)$$

通过数学方法, 它可以进一步导入方程式 6:

$$\phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (6)^*$$

总之, 对于与雷达的距离为  $d$  的物体, IF 信号将是一个正弦波 (方程式 7), 因此:

$$A \sin(2\pi f_0 t + \phi_0) \quad (7)^{**}$$

其中  $f_0 = \frac{S_{\tau}}{c}$  和  $\phi_0 = \frac{4\pi d}{\lambda}$ 。

在本介绍性白皮书中, 我们忽略 IF 信号的频率与物体速度的依赖关系。在快速 FMCW 雷达中, 其影响通常非常小, 且在处理完成多普勒 FFT 后, 即可轻松对其进行进一步校正。上述分析均假设雷达仅检测到一个物体。让我们来分析一个检测到若干物体的情形。图 5 显示了接收自不同物体的三个不同的 RX 线性调频脉冲。每个线性调频脉冲的延时都不一样, 延时和与该物体的距离成正比。不同的 RX 线性调频脉冲转化为多个 IF 单音信号, 每个信号频率恒定。

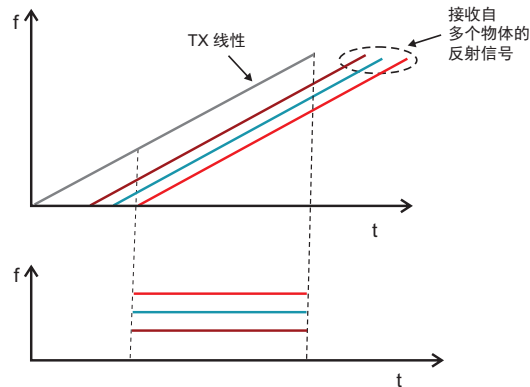


图 5. 针对多个物体检测发射的多个 IF 单音信号。

\* 该方程式是一个近似等式, 仅在斜率和距离足够小时才有效。不过, IF 信号的相位与很小的距离变化呈线性关系 (即  $\Delta\phi = 4\pi \Delta d/\lambda$ ) 仍然是正确的。

\*\* 在本介绍性白皮书中, 我们忽略 IF 信号的频率与物体速度的依赖关系。在快速 FMCW 雷达中, 其影响通常非常小, 且在处理完成多普勒 FFT 后, 即可轻松对其进行进一步校正。

这个包含多个单音信号的 IF 信号必须使用傅里叶变换加以处理，以便分离不同的单音。傅里叶变换处理将会产生一个具有不同的分离峰值的频谱，每个峰值表示在特定距离处存在物体。

### 距离分辨率

距离分辨率是辨别两个或更多物体的能力。当两个物体靠近到某个位置时，雷达系统将不再能够将二者区分开物体。傅里叶变换理论指出，通过延长 IF 信号，可以提高分辨率。

要延长 IF 信号，还必须按比例增加带宽。延长的 IF 信号会产生一个有两个分离峰值的 IF 谱。

傅里叶变换理论还指出，观测窗口 ( $T$ ) 可以分辨间隔超过  $1/T$ Hz 的频率分量。这意味着只要频率差满足方程式 8 中给出的关系，就可以分辨两个 IF 单音信号的

$$\Delta f > \frac{1}{T_c} \quad (8)$$

其中  $T_c$  是观测时间长度。

由于  $\Delta f = \frac{S2\Delta d}{c}$ ，方程式 8 可以表达为

$$\Delta d > \frac{c}{2ST_c} = \frac{c}{2B} \quad (\text{由于 } B = ST_c)。$$

距离分辨率 ( $d_{Res}$ ) 仅取决于线性调频脉冲扫频的带宽 (方程式 9)：

$$d_{Res} = \frac{c}{2B} \quad (9)$$

因此，线性调频脉冲带宽为数 GHz 的 FMCW 雷达将有约为数厘米的距离分辨率 (例如，4GHz 的线性调频脉冲带宽可转化为 3.75cm 的距离分辨率)。

## 速度测量

在本节中，让我们使用相量表示 (距离、角度) 来求一个复数。

### 使用两个线性调频脉冲进行的速度测量

为了测量速度，FMCW 雷达会发射两个间隔  $T_c$  的线性调频脉冲。每个反射的线性调频脉冲通过 FFT 加以处理，以便检测物体的距离 (距离 FFT)。对应于每个线性调频脉冲的距离 FFT 将在同一位置出现峰值，但相位不同。该测得的相位差对应于速度为  $vT_c$  的物体的移动。

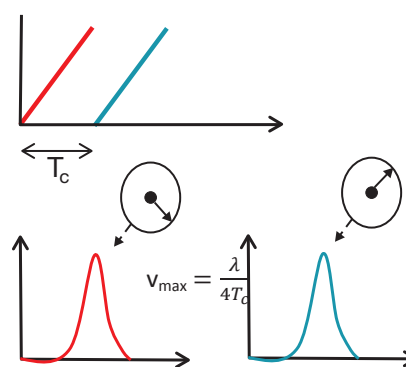


图 6. 双线性调频脉冲速度测量。

相位差通过方程式 6 推导出方程式 10：

$$\Delta\Phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda} \quad (10)$$

可以使用方程式 11 推导速度：

$$v = \frac{\lambda \Delta\Phi}{4\pi T_c} \quad (11)$$

由于速度测量基于相位差，因而会存在模糊性。这种测量仅在  $|\Delta\Phi| < \pi$  时具有非模糊性。使用上述方程式 11 可通过数学方法推导出  $v < \frac{\lambda}{4T_c}$ 。

方程式 12 给出由间隔  $T_c$  的两个线性调频脉冲可以测得的最大相对速度 ( $v_{max}$ )。更高的  $v_{max}$  需要两个线性调频脉冲之间更短传输时间。

$$v_{\max} = \frac{\lambda}{4T_c} \quad (12)$$

### 使用位于同一距离处的多个物体进行的速度测量

如果速度不同的多个移动物体在测量时与雷达的距离相同，则双线性调频脉冲速度测量方法不起作用。这些物体由于与雷达的距离相同，因而会生成 IF 频率完全相同的反射线性调频脉冲。因此，距离 FFT 会产生单个峰值，该峰值表示来自所有这些距离相同的物体的合并信号。简单的相位比较技术将不起作用。

在这种情况下，为了测量速度，雷达系统必须发射两个以上的线性调频脉冲。它发射一组 N 个等间隔线性调频脉冲。这组线性调频脉冲称为线性调频脉冲帧。图 7 显示了一个线性调频脉冲帧随时间变化的频率。

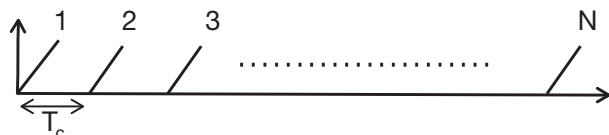


图 7. 线性调频脉冲帧。

下面以两个与雷达的距离相等但速度分别为  $v_1$  和  $v_2$  的两个物体举例说明了处理技术。

距离 FFT 处理反射的一组线性调频脉冲，从而产生一组 N 个位置完全相同的峰值，但每个峰值都有一个不同的相位，包含来自这两个物体的相位成分（来自各个物体的单独相位成分由图 8 中的红色和蓝色相量表示）。

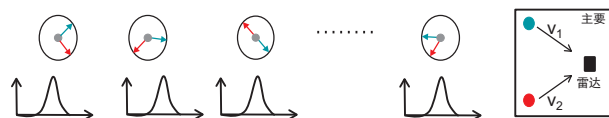


图 8. 反射线性调频脉冲帧的距离 FFT 会产生 N 个相量。

称为多普勒 FFT 的第二个 FFT 在 N 个相量上执行，以分辨两个物体，如图 9 所示。

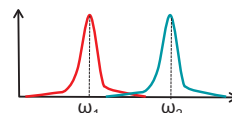


图 9. 多普勒 FFT 可区分这两个物体。

$\omega_1$  和  $\omega_2$  对应于各个物体连续线性调频脉冲之间的相位差（方程式 13）：

$$v_1 = \frac{\lambda \omega_1}{4\pi T_c}, v_2 = \frac{\lambda \omega_2}{4\pi T_c} \quad (13)$$

### 速度分辨率

离散傅里叶变换的理论指出，两个离散频率  $\omega_1$  和  $\omega_2$  在  $\Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 > 2\pi/N$  个弧度/样本时，是可以分辨的。

由于  $\Delta\omega$  也是由以下方程式  $\Delta\phi = \frac{4\pi v T_c}{\lambda}$ （方程式 10）定义的，因而当帧周期为  $(V_{\text{res}}) T_f = N T_c$ （方程式 14），可通过数学方法推导出速度分辨率：

$$v > v_{\text{res}} = \frac{\lambda}{2T_f} \quad (14)$$

雷达的速度分辨率与帧时间 ( $T_f$ ) 成反比。

### 角度检测

#### 角度估算

FMCW 雷达系统可以使用水平面估算反射信号的角度，如图 10 所示。该角度也称为到达角 (AoA)。

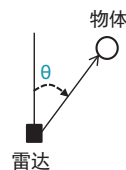


图 10. 到达角。



角度估算基于下面的观测，物体距离的很小变化即可导致距离 FFT 或多普勒 FFT 峰值的相位变化。该结果被用于执行角度估算，该估算使用至少两个 RX 天线，如图 11 所示。物体与两个天线的距离差会导致 FFT 峰值的相位变化。相位变化使您能够估算 AoA。

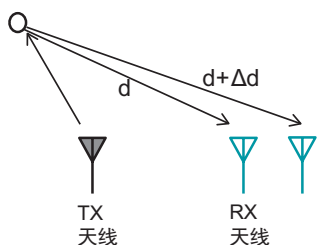


图 11. 估算 AoA 需要两个天线。

在此配置中，相位变化在数学上可以推导出方程式 15：

$$\Delta\phi = \frac{2\pi\Delta d}{\lambda} \quad (15)$$

在假设平面波前的前提下，基本几何显示  $\Delta d = l \sin(\theta)$ ，其中  $l$  是天线之间的距离。因此，到达角 ( $\theta$ ) 可根据使用方程式 16 测得的  $\Delta\phi$  计算出来：

$$\theta = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda\Delta\phi}{2\pi l}\right) \quad (16)$$

请注意， $\Delta\phi$  取决于  $\sin(\theta)$ 。这被称为非线性依赖关系。 $\sin(\theta)$  仅在  $\theta$  的值很小时，才是线性函数的近似值： $\sin(\theta) \sim \theta$ 。

因此，估算准确度取决于 AoA，且在  $\theta$  的值很小时更准确，如图 12 所示。

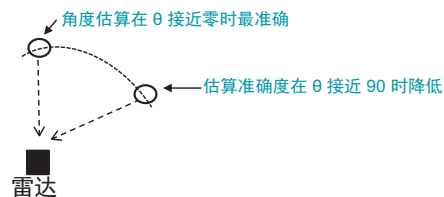


图 12. AoA 估算在值很小时更准确。

## 最大角视场

雷达的最大角视场由雷达可以估算的最大 AoA 来界定。请参阅图 13。

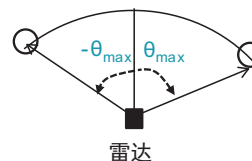


图 13. 最大角视场。

角度的准确测量离不开  $|\Delta\omega| < 180^\circ$ 。如果使用方程式 16，则这对应于  $\frac{2\pi l \sin(\theta)}{\lambda} < \pi$ 。

方程式 17 显示了两个间隔  $l$  的天线可以服务的最大视场：

$$\theta_{max} = \sin^{-1}\left(\frac{\lambda}{2l}\right) \quad (17)$$

两个天线之间的间隔  $l = \lambda/2$  会导致  $\pm 90^\circ$  的最大角视场。

## 德州仪器 (TI) 毫米波传感器解决方案

可以看到，FMCW 传感器通过结合使用射频、模拟和数字电子组件，能够确定附近物体的距离、速度和角度。

图 14 是不同组件的框图。

TI 将 DSP、MCU 以及 TX RF、RX RF、模拟和数字组件集成到 RFCMOS 单芯片中，将创新带入了 FMCW 传感领域。

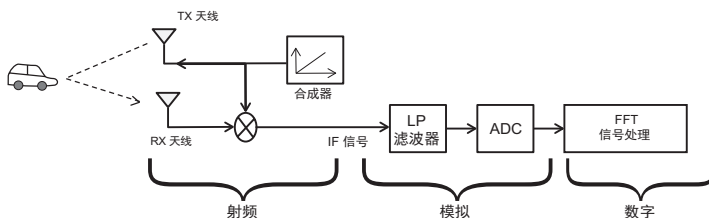


图 14. FMCW 传感器的射频、模拟和数字组件。

TI 推出的 RFCMOS 毫米波传感器可为毫米波射频前端和 MCU/HWA/DSP 处理后端注入灵活性和可编程性，因而比传统基于 SiGe 的解决方案更为出色。基于 SiGe 的解决方案只能存储数量有限的线性调频脉冲，而且在更新实际帧期间的线性调频脉冲和线性调频脉冲包络时需要实时干预，而 TI 推出的毫米波传感器解决方案能够在帧开始前，使用四个配置存储 512 个线性调频脉冲。这种能力使 TI 的毫米波传感器能够轻松使用多个配置进行配置，以便最大限度地从场景中提取有用数据量。各个线性调频脉冲和处理后端可以立即量身定制，以便满足实时应用需求，如更长的距离、更高的速度、更高的分辨率或特定处理算法。

适用于汽车应用的 TI 毫米波传感器产品组合范围广泛，从高性能前端雷达 [AWR1243](#) 传感器到单芯片雷达 [AWR1443](#) 传感器和 [AWR1642](#) 传感器都有。借助 AWR 毫米波产品组合，设计师可以符合高级驾驶员辅助系统 (ADAS) 和自动驾驶安全规定，包括 ISO 26262，从而达到汽车安全完整性等级 (ASIL)-B。

适用于工业应用的 TI 毫米波传感器产品组合包括两个单芯片器件；[IWR1443 毫米波传感器](#) 集成了一个

硬件加速器，用于处理雷达信号，而 [IWR1642 毫米波传感器](#) 使用一个 DSP 来执行必要处理。DSP 可以提供更高的灵活性，而且支持软件集成其他更高级的算法，如跟踪和分类。这些单芯片器件提供对高精度物体数据的简单访问，这些数据包括距离、速度和角度，能够在越来越多的需要高性能和高效率的应用中实现高级传感，例如智能基础设施、工业 4.0 工厂和楼宇自动化产品及自主飞行无人机。

德州仪器 (TI) 为从事工业和汽车毫米波传感器产品的工程师推出了完整的开发环境，其中包括：

- **硬件评估模块**，适用于 [AWR1x](#) 和 [IWR1x](#) 毫米波传感器
- **毫米波软件开发套件 (SDK)**，其中包括实时操作系统 (RTOS)、驱动程序、信号处理库、毫米波应用程序编程接口 (API)、mmWaveLink 和安全性（另行提供）。
- 用于算法开发和分析的 [mmWave Studio](#) 脱机工具，其中包括数据采集、可视化工具和系统估算器。

要了解有关毫米波产品、工具和软件的更多信息，请访问 [www.ti.com/mmwave](http://www.ti.com/mmwave) 并立即开始您的设计。

重要声明：本文所提及德州仪器及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。TI 建议用户在下订单前查阅最新最全面的产品与服务信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的批准、保证或授权。

平台标识是德州仪器 (TI) 的商标。所有其他商标均为其各自所有者的财产。



## 重要声明和免责声明

TI 提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保或其他要求。这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com.cn](https://www.ti.com.cn) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2021 德州仪器半导体技术（上海）有限公司