

Zigang Yang and Anil Mani

## 摘要

不同雷达之间的干扰会对雷达功能造成灾难性后果，导致出现漏检、盲点、范围缩小和虚假物体。稳健、可靠的雷达性能需要通过各种方法来识别和减轻干扰，或完全避免干扰。本白皮书介绍了干扰机制和使用专为 TI 系列雷达器件设计的算法和硬件挂钩减轻干扰的方法。

## 内容

1 引言.....	2
2 FMCW 雷达中的干扰类型.....	3
2.1 FMCW 雷达.....	3
2.2 雷达干扰方程式.....	3
2.3 干扰类型.....	4
3 干扰避免.....	8
3.1 标准化：不同雷达的不同频带和时隙.....	8
3.2 并行干扰的不同启动时间.....	8
3.3 感知和避障.....	9
3.4 天线极化.....	10
4 定位和干扰缓解.....	11
4.1 定位.....	11
4.2 缓解.....	13
5 抖动和随机化.....	15
6 结论.....	16
7 参考文献.....	17
8 修订历史记录.....	17

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

本白皮书讨论了雷达间干扰的问题以及如何在 TI 雷达器件中管理干扰问题。随着雷达在汽车和工业环境中部署的数量增加，干扰已成为影响雷达可靠运行的一个主要问题。在这种情况下，一个雷达发射的信号被另一个雷达接收的可能性也随之增加。干扰会导致一系列问题，例如本底噪声降低导致漏检，或在特定范围或方向上出现盲点。在某些情况下，还会产生虚假物体（虚假目标是被雷达发现但实际上不存在的目标）。

本文仅涉及 FMCW 雷达相互干扰的情况。

此处提供的信息涵盖以下主题：

- FMCW 雷达之间产生干扰的机制和不同类型的干扰源。
- 避免干扰和控制干扰的方法，即减少干扰发生的方法以及检测和修复受干扰影响的线性调频脉冲的方法。

## 2 FMCW 雷达中的干扰类型

### 2.1 FMCW 雷达

FMCW 雷达会生成并发射线性调频脉冲，即具有线性斜升频率的信号（请参阅图 2-1）。

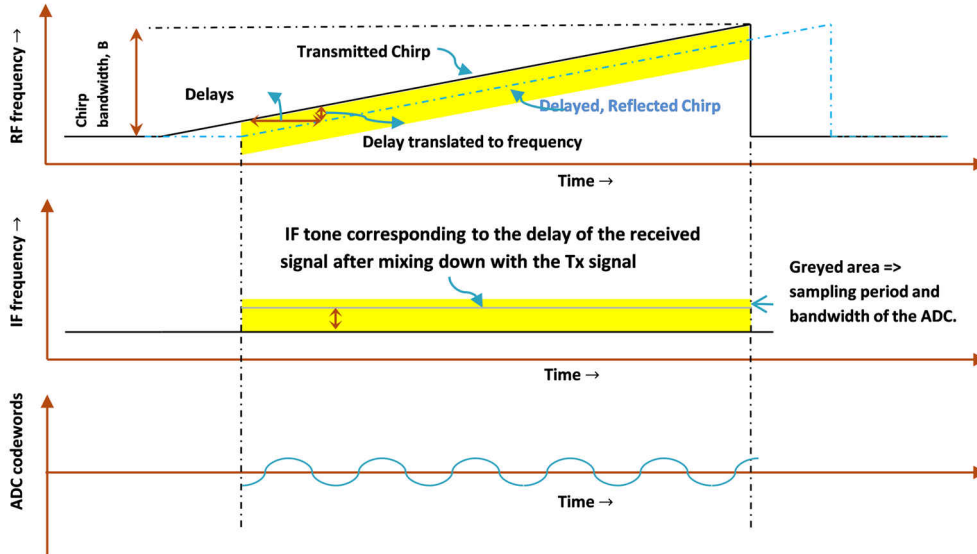


图 2-1. 不同域、射频、中频和 ADC 码字中的 FMCW 雷达功能

这个发射信号在其视场中从目标反射并在接收器上接收。接收到的信号是发射信号的延迟副本。接收到的信号使用发射的信号进行混合，然后进行数字化以创建 ADC 数据。由于反射信号是发射信号的延迟版本，因此混合信号对应于频率与此延迟成正比的正弦曲线。延迟本身与目标的距离成正比。

延迟绝不能为负。因此，给定一个正斜率，所有有效对象都对应于正频率。通过傅里叶变换估算音调频率后，可以估算出延迟。然后使用延迟和光速，可以估算出到目标的距离。因此，接收器可以检测到的最大距离受 IF 带宽的限制。如果目标的频率超过 IF 带宽，则将其滤除。

### 2.2 雷达干扰方程式

首先，我们定义两个术语：受扰对象和干扰源。受扰对象是其接收器会受到干扰源影响的雷达器件。干扰源是一种雷达器件，其发射会影响受扰对象的接收器。

干扰雷达以 dBm 为单位的接收信号强度 ( $P_{\text{Interference}}$ ) 可以使用方程式 1 来计算。

$$P_{\text{Interference}} = P_{\text{tx}} + \text{txAntGain} + \text{rxAntGain} - 10/\log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

其中

- $P_{\text{tx}}$  是干扰源雷达的发射功率（以 dBm 为单位）
- $\text{txAntGain}$  是干扰源雷达的发射天线增益（以 dB 为单位）
- $\text{rxAntGain}$  是受扰雷达的接收天线增益（以 dB 为单位）。

干扰源和受扰对象之间的距离为  $R$ ，平均射频波长为  $\lambda$ 。

方程式 2 中显示了目标的雷达方程式。

$$P_r = P_{\text{tx}} + \text{txAntGain} + \text{rxAntGain} + \text{RCS} - 10/\log_{10} \left( \frac{(4\pi)^3 R^4}{\lambda^2} \right) \quad (2)$$

通过比较这两个方程式可以看出，干扰源的路径损耗影响（即  $R$  的影响）要弱于目标。换言之，即使距离很远，干扰也可能在接收信号中占主导地位。

## 2.3 干扰类型

本节介绍了两种干扰类型：交叉干扰和并行干扰。

### 2.3.1 交叉干扰

如果受扰雷达和干扰雷达具有不同的斜率，则两个线性调频脉冲会彼此交叉。当发生交叉时，受扰雷达会观察到交叉干扰。干扰源的发射信号将与受扰对象的发射信号混合，只有当受扰对象的 IF 带宽存在频率差异时，受扰对象才会观察到干扰源的能量。

图 2-2 中给出了一个示例。当干扰源的线性调频脉冲穿过受扰对象的发射线性调频脉冲时，干扰源线性调频脉冲的能量被观测为快速穿过 IF 带宽的线性调频脉冲。它可以是从零上升到 IF 带宽的恒定斜率（如本例中所示），也可以是从 IF 下降到零频率的斜率（当干扰源的斜率大于受扰对象的斜率时发生）。在时域中，受干扰影响的区域类似于瞬发性波动。

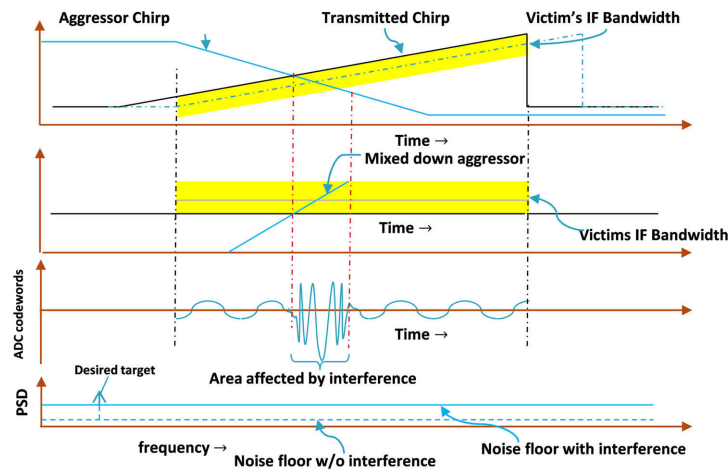


图 2-2. 交叉干扰导致时域信号出现瞬发性波动

最后，在对频域中的 ADC 样本应用傅里叶变换后，这些交叉干扰通常会增加本底噪声、降低强目标的 SNR 和掩蔽弱目标，从而影响检测并产生瞬时盲点。瞬发性波动持续时间 ( $\tau_{\text{Glitch}}$ ) 由受扰对象的 IF 带宽以及受扰对象的斜率 ( $\text{slope}_{\text{victim}}$ ) 和干扰对象的斜率 ( $\text{slope}_{\text{aggressor}}$ ) 决定。方程式 3 中给出了其计算方法。

$$\tau_{\text{Glitch}} = \frac{\text{IF bandwidth}}{|\text{slope}_{\text{aggressor}} - \text{slope}_{\text{victim}}|} \quad (3)$$

瞬发性波动持续时间通常很短。例如，如果 IF 带宽为 12MHz 且斜率差为 40MHz/us，则大约 0.3us 或最终 ADC 输出的四个样本将受到干扰的影响。

### 2.3.2 交叉干扰的性能分析

根据 [1]，相对于热噪声的干扰噪声水平可使用以下公式计算：

$$\text{NoiseInInDB} = P_{\text{Interference}} + 10 \log_{10} \left( \frac{\text{affectedAdcSamp}}{\text{totalNumAdcSamp}} \right) - (-174 + N_F + 10 \log_{10}(\text{BandWidth}_{\text{IF}})) \quad (4)$$

例如，如果干扰源的输出功率为 10dBm，则受扰对象的接收功率可使用以下公式计算：

$$P_{\text{Interference}} = P_{\text{tx}} + \text{txAntGain} + \text{rxAntGain} - 10 \log_{10} \left( \frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2 \quad (5)$$

假设总天线增益 = 14dB，噪声系数 = 14dB。在这种情况下，不同条件下的本底噪声增加的计算方法如表 2-1 所示。

**表 2-1. 本底噪声增加**

受扰对象和干扰源的距离	受影响样本的百分比	77GHz 系统的本底噪声增加	60GHz 时本底噪声增加
1m	1%	24dB	26dB
5m	1%	10dB	12dB
10m	1%	对于带高插入损耗的传输线变压器，1.2dB 的插入损耗可以通过选择 MR19 寄存器的发送幅度选择 ( TXO ) 位的合适设置来补偿	6dB
1m	10%	34dB	36dB
5m	10%	20dB	22dB
10m	10%	14dB	16dB

这是假设受扰对象和干扰源彼此面对时的性能下降。如前所述，当斜率差变小时，受影响的样本数会增加，但发生交叉干扰事件的概率会降低。受影响的帧中的线性调频脉冲更少，因此总体性能不会那么差。

这是应用任何干扰缓解 ( 信号修复技术 ) 之前的本底噪声降级。

### 2.3.3 并行干扰

当干扰源线性调频脉冲和受扰对象线性调频脉冲具有完全相同的斜率时，只有当受扰对象线性调频脉冲与干扰源线性调频脉冲之间的起始时间非常接近，以至于干扰源线性调频脉冲处于受扰对象线性调频脉冲的 IF 带宽内时，才会产生干扰。

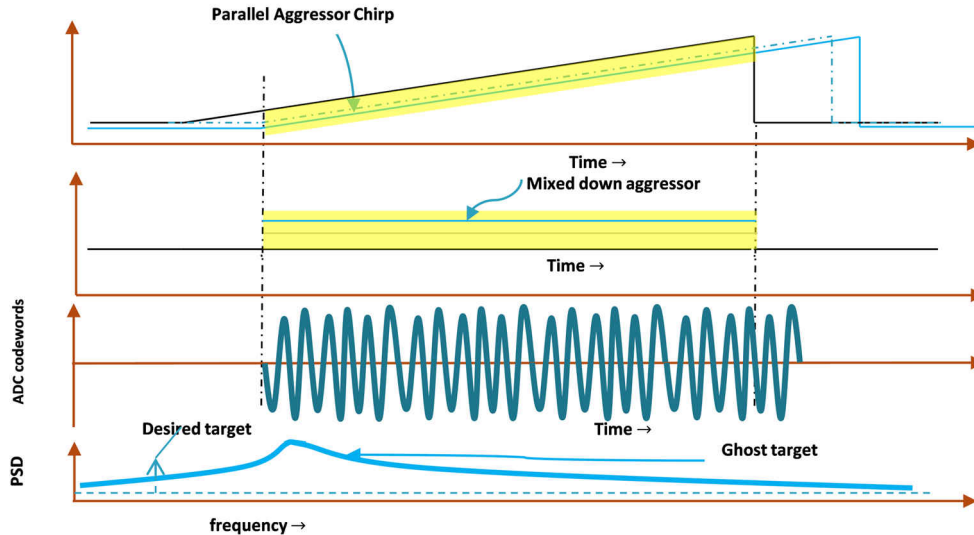


图 2-3. 并行干扰导致出现虚假物体

当与发送器线性调频脉冲混合时，并行干扰信号在 ADC 数据中成为恒定频率音调。在对 ADC 数据应用傅里叶变换后，在傅里叶域中，它成为一个虚假物体。也就是说，它的行为类似于具有随机速度和随机距离的目标。这种类型的干扰称为并行干扰。发生这种干扰时，干扰区域几乎是整个线性调频脉冲。

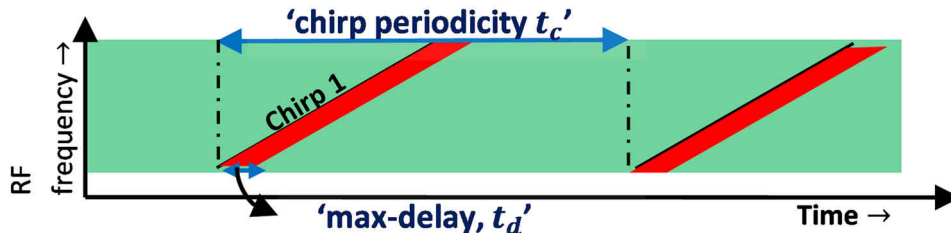


图 2-4. 线性调频脉冲占用频谱时间空间的一小部分

但是，并行干扰的可能性非常小（请参阅图 2-4）。只有当两个雷达几乎同时启动时才会产生干扰，这样干扰源的雷达信号就会出现在受扰雷达的 IF 带宽中。否则，受扰对象的 Rx 会滤除干扰源雷达信号。并行干扰源发生干扰的概率 ( $P_{\text{intf}}$ ) 可使用最大延迟 ( $t_d$ )、线性调频脉冲重复周期性 ( $t_c$ ) 和场景中存在的雷达数 ( $N_r$ ) 来计算，如方程式 6 中所示。

$$P_{\text{intf}} = 1 - \left(1 - \frac{t_d}{t_c}\right)^{N_r - 1} \quad (6)$$

例如，在最大距离为 20 米的超短距离雷达中， $t_d$  为  $0.13 \mu\text{s}$ 。在这种情况下，只有当两个雷达的起始时间相差  $0.13 \mu\text{s}$  以内时才会产生干扰。假设线性调频脉冲持续时间为  $100 \mu\text{s}$ ，且该区域有 10 个雷达在工作，假设占空比为 100%，则发生干扰的概率仅为 1.3%。如果每个雷达的占空比仅为 10%，则发生干扰的概率会进一步显著降低。

当受扰对象和干扰源具有独立的本机振荡器 (LO) 时，即使用户在线性调频脉冲配置中将它们编程为相同的斜率，也很难让它们达到准确的频率斜率。在这种情况下，虚假对象看起来不再像一个清晰的目标，而范围频谱和多普勒频谱都看起来噪音更大，这可用于识别并行干扰情况。

#### 2.3.4 交叉和并行干扰之间的差异

交叉干扰经常发生，但仅影响线性调频脉冲中的少量样本，而并行干扰很少发生，但会影响几乎整个线性调频脉冲；因此，随着线性调频脉冲斜率差变得更小，瞬发性波动会变得更长，但交叉概率会降低。

### 3 干扰避免

如果可能，用户应始终尝试避免干扰。本节介绍避免干扰的方法。

#### 3.1 标准化：不同雷达的不同频带和时隙

第一种方法是标准化。标准化是指频率规划和线性调频脉冲设计以及时隙管理。根据分辨率要求进行频率规划，可让不同的雷达在不同的射频频带中共存。例如，AWR 系列器件有 4GHz 的射频带宽，可分为 2GHz 频带，并由两个雷达同时使用。

另一方面，在没有任何有效线性调频脉冲的情况下，相邻帧之间通常有静默时间。如果雷达系统的占空比为 10%，则可能有 10 个不同的雷达可在时间上分隔开。

图 3-1 显示，在射频频率和时隙中分离的雷达信号不会遇到任何干扰。频率分离易于实现。时隙管理必须具有一个通用的全局计时源，以便所有用户同步到该源。在这种情况下，各个帧足以实现粗略同步。

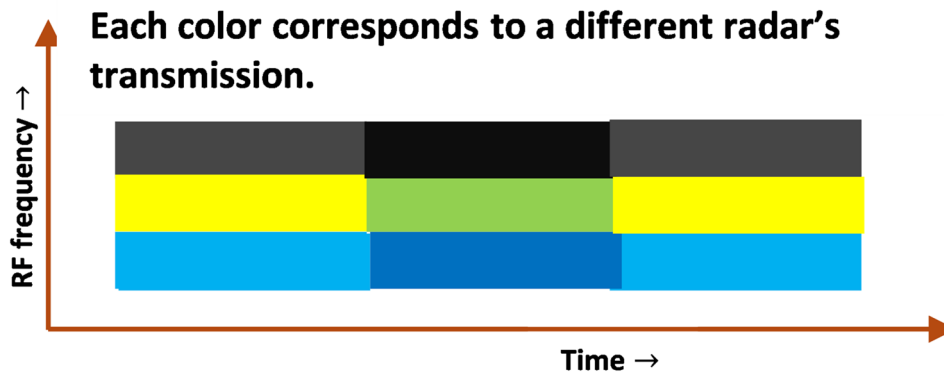


图 3-1. 使用不同的时隙和频隙以避免干扰

另一个用例是特定于方向的预定义频带分离。例如，用户可以为远距离雷达和短距离雷达使用单独的频带，以便它们不会相互干扰。TI 还建议对前置雷达使用不同的频带，对后置雷达使用另一个频带。

#### 3.2 并行干扰的不同启动时间

如果由一家制造商制造所有雷达，则可以将它们制造为同步到同一个时钟，同步到该特定工厂的全局时间。如果每个雷达器件都配置了相同类型的线性调频脉冲和帧，则可能会导致并行干扰。但是，如果每个雷达的帧与全局时间的偏差大约为一微秒左右，以便它们不会干扰其他雷达，那么大量雷达可以在有限的空间和相同的带宽下共存。例如，如果线性调频脉冲时间为 100 微秒，所需的最大距离为 150 米；也就是说，发射时间小于一微秒，那么大约 100 个此类雷达可以在同一带宽下共存。同步还允许帧一个接一个地堆叠，以免干扰其他雷达。



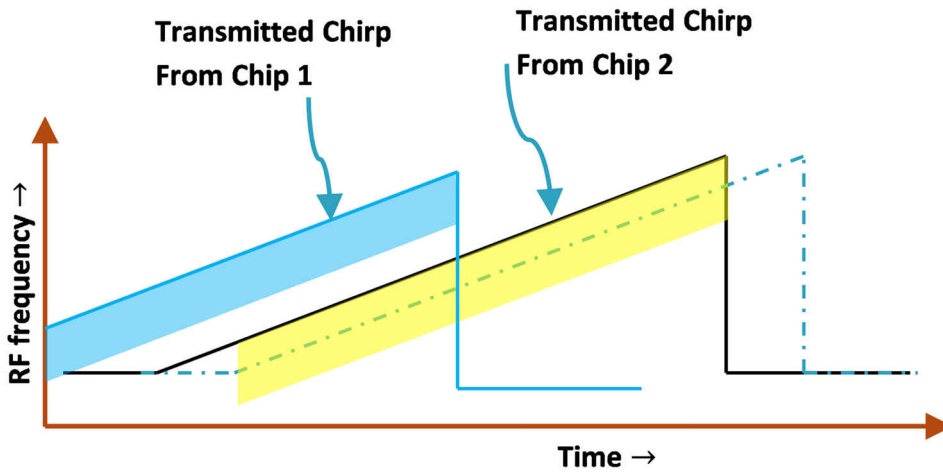


图 3-2. 精确的线性调频脉冲内时隙规划

在靠近放置的雷达之间实现同步的一种简单方法是在 TI 雷达器件中使用主/从模式。在此方案中，一个器件指定为主器件。此器件在发送帧时向从器件生成触发信号。然后从器件会延迟，使用此信号在精确定义的延迟后触发自己的帧。

### 3.3 感知和避障

在没有任何同步的情况下，用户仍可以执行“感知和避障”。在此方案中，器件开始传输信号之前，它会感知频谱。这是通过使接收器处于运行状态且发送器处于关闭状态来实现。

如果没有其他雷达传输信号，则频谱保持静默。ADC 数据应仅显示本底热噪声和噪声系数。另一方面，如果有另一个雷达器件传输信号，则预计 ADC 数据中的峰值对应于发生交叉的点。

XWR 器件可生成每微秒 250MHz 量级的快速线性调频脉冲，从而实现快速扫描。

ADC 数据交叉线性调频脉冲的最大保持量清楚地显示了干扰。在图 3-3 中，干扰源在频率  $f_1$  和  $f_2$  之间发出线性调频脉冲。因此，ADC 输出显示了  $f_1$  和  $f_2$  之间的能量。如果扫描周期足够长，足以覆盖多个帧，则通过所用的不同频带数量来估算干扰源雷达的数量。用户还可以估算线性调频脉冲占用的帧周期带宽。重要的是，用户可以找到可实现无干扰信号传输的干净光谱或时隙。

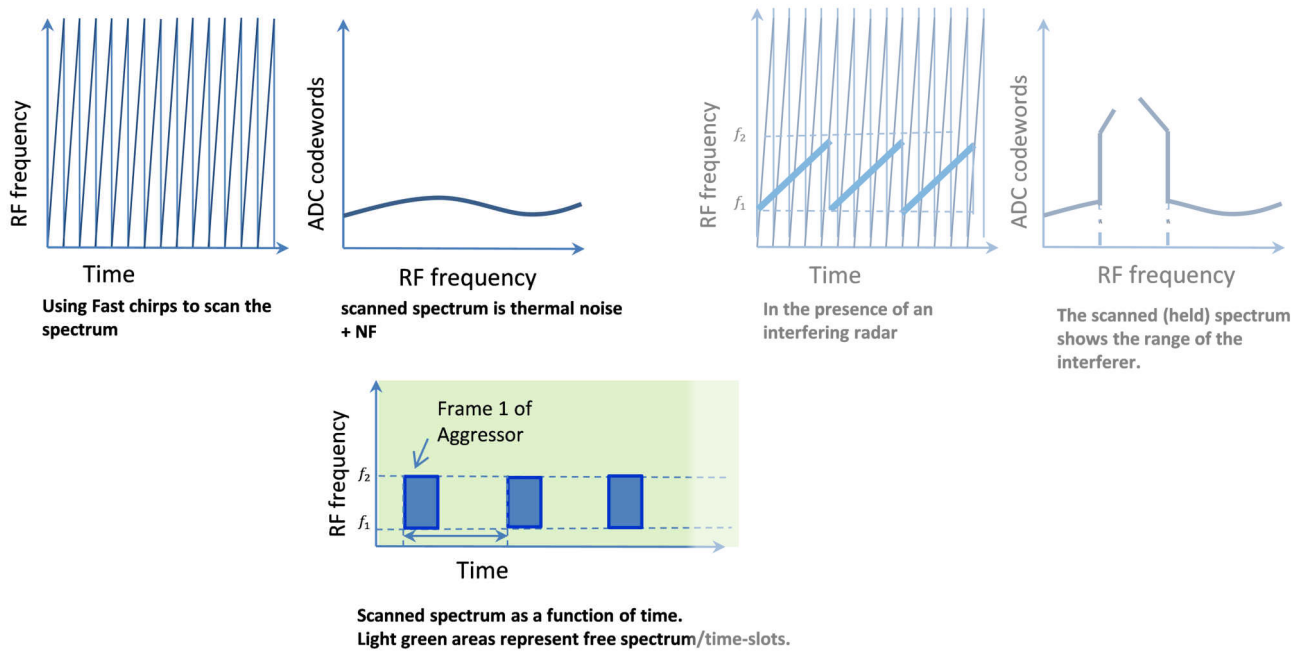


图 3-3. 感知和避障

在识别出干扰源后，雷达可以在干扰源无效的区域开始发送信号。

### 3.4 天线极化

最后一种方法涉及天线的特定极化。例如，此方法对特定的一组天线使用水平极化，对另一组天线使用垂直极化。如果干扰源使用水平极化天线进行传输，而受扰对象使用垂直极化天线作为其接收器，则来自干扰源的信号在受扰对象的天线处衰减（衰减约 10dB）。这种方法需要天线设计方面的专业知识。这是一种有用的方法，但只提供两个不同的选项，即垂直极化和水平极化。此外，这种方法还会增加天线设计的复杂性。

## 4 定位和干扰缓解

在许多情况下，要避免交叉干扰是不可能的。如节 2.3.1 所示，在不进行任何处理的情况下，交叉干扰会增加本底噪声并使较弱的目标遮蔽起来。本节介绍了通过定位和缓解来减少系统性能下降的方法。定位是指查明线性调频脉冲中哪些样本会受干扰影响的过程。

### 4.1 定位

可以通过两种方法之一来实现定位。

- 首先，找出 ADC 数据中的异常值。强交叉干扰看起来像是 ADC 数据中的大型瞬发性波动。例如，如果您要获取线性调频脉冲中每个样本的能量并将其绘制为时间的函数，则在干扰发生交叉的点，线性调频脉冲的第一个样本能量会大幅增加。可以找到并设置合适的阈值，并且可以将超过此能量阈值的样本标记为受干扰影响。图 4-1 显示了示例 ADC 数据（顶部） - 当绘制其绝对值时，瞬发性波动清晰可见（中间），但由于存在较大的低频信号，它与信号没有很明显的区别。但是，如果使用简单的差分滤波器抑制这些低频信号，则产生的信号会使瞬发性波动更加明显。

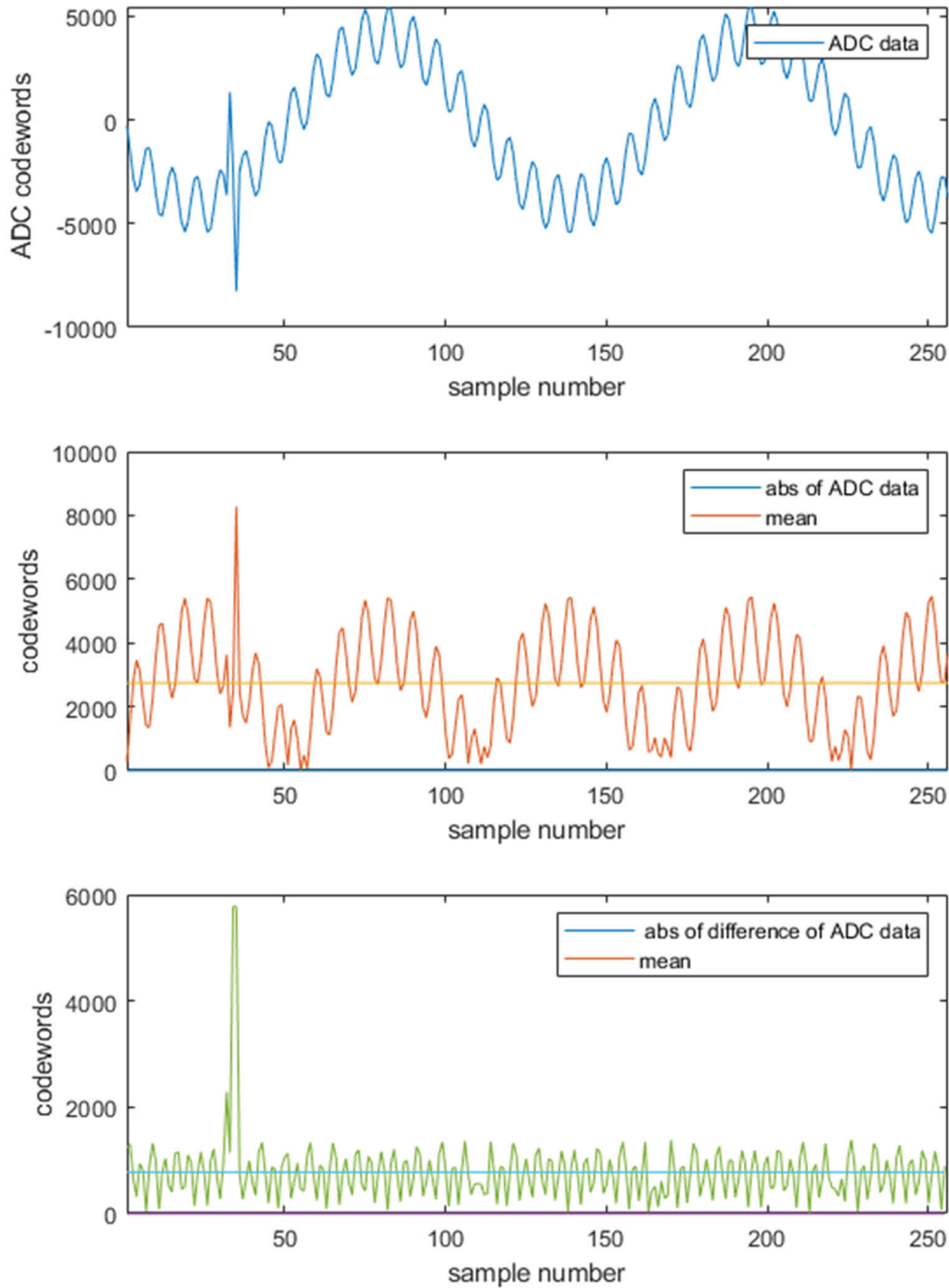


图 4-1. 使用 **abs** 和 **abs-diff** 滤波器检测异常值

- 线性调频脉冲质量指标是根据需要附加到每个线性调频脉冲的附加指标，可使用 XWR 器件的一些高级特性来提供有关干扰的信息。[干扰检测培训视频](#)提供了启用线性调频脉冲质量指标的详细信息。由于 XWR 器件具有复杂的基带，因此它们可以区分正频率和负频率。如[节 2.3.1](#)中所述，延迟不能为负。因此，如果斜率为正，则所有有效对象都具有正频率（即，它们存在于信号频带中）。负频率（图像频带）中的任何信号都可能由干扰引起的。信号和图像频带监视器分别监控这两个频带。如[图 4-2](#)中所示，信号频带（蓝线）比图像频带（红线）更强。但是，当交叉干扰出现时，图像频带的能量会突然上升。此指示器用于定位弱干扰源。

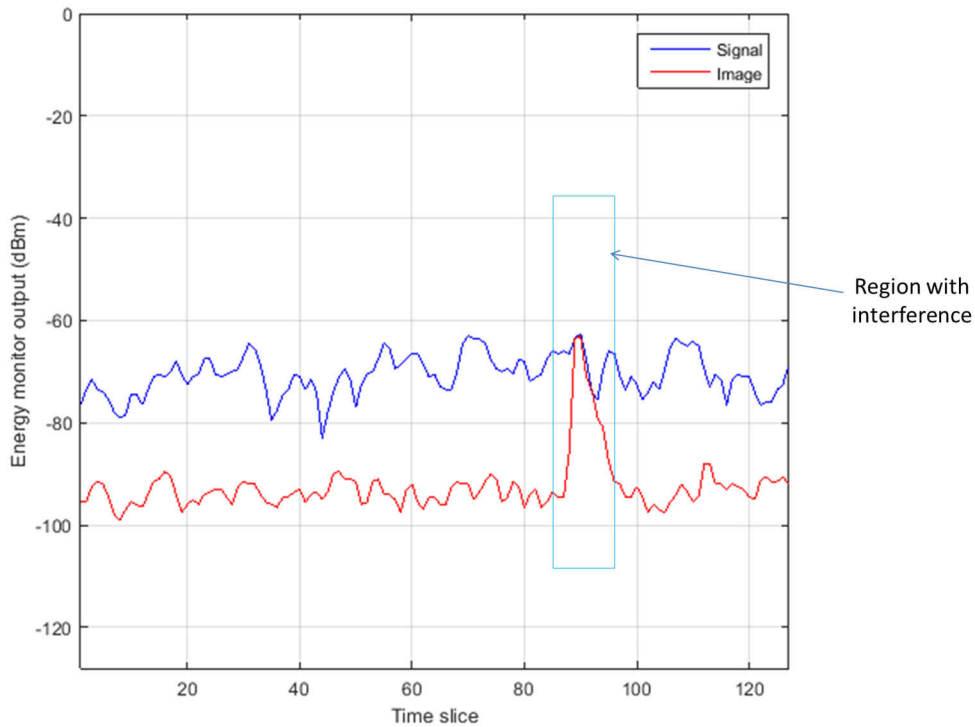


图 4-2. 使用信号和图像频带监视器定位干扰源

## 4.2 缓解

在发现干扰源位置后，我们现在要缓解干扰。此处的缓解指的是使干扰区域得到修复的过程。

简单的缓解方法是将干扰区域替换为零（图 4-3 - 顶部）。然而，这种做法的副作用是产生了可能会掩蔽弱目标的大型旁瓣。一种更好的方法是用窗口来遮蔽。修匀窗口用于将受干扰影响的样本减少到零。这会促成更小的旁瓣和更强的弱目标可检测性（图 4-3 - 中间）。

一种更好的方法是在空白区域执行线性内插，使用发生干扰前的最后一个良好 ADC 样本和干扰周期后的第一个良好 ADC 样本。由于最强的反射体可能更靠近雷达，因此频率较低，这种方法在许多情况下效果很好（图 4-3 - 底部）。

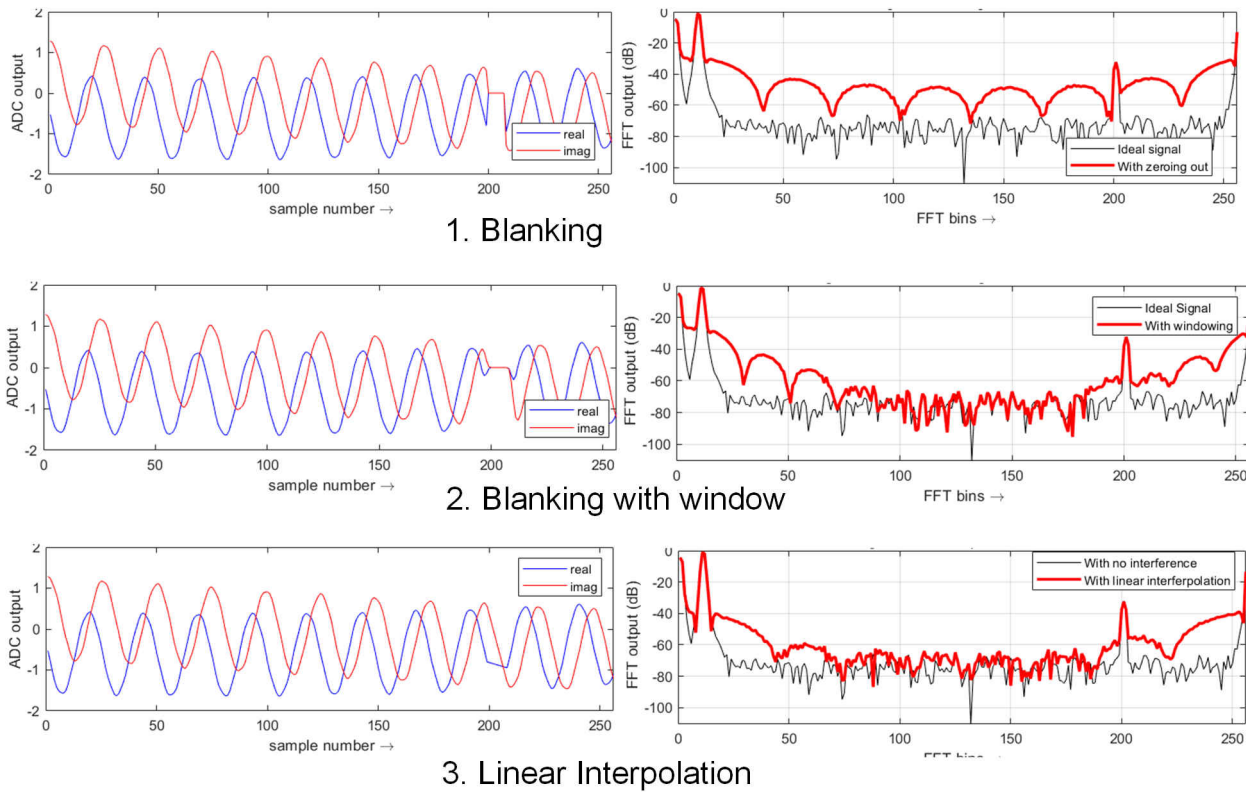


图 4-3. 不同的缓解方法

缓解是一个活跃的研究领域，可能有比此处所述的三个方案更复杂的缓解方案。然而，随着缓解方案变得更加复杂，人们必须权衡所消耗的 MIP 数量与较复杂方案所获得的收益。

## 5 抖动和随机化

当发生并行干扰时，整个线性调频脉冲（或大部分线性调频脉冲）会受到损坏，很难校正。因此，定位和缓解对于并行干扰不是很有用。

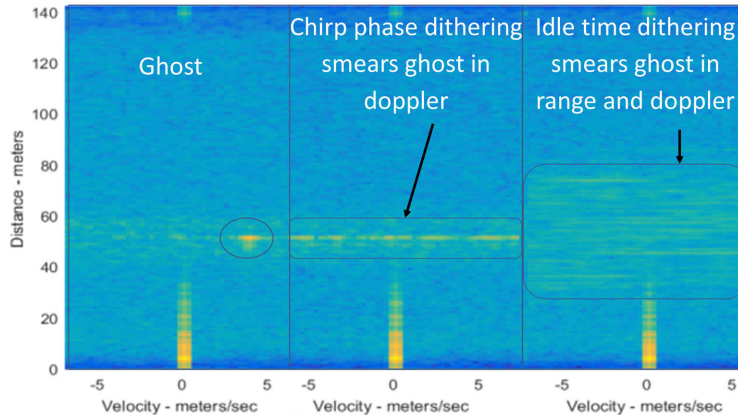


图 5-1. 并行干扰产生的虚假对象通过随机化线性调频脉冲相位进行传播，并随空闲时间抖动进行扩散

并行干扰可通过称为线性调频脉冲抖动（或线性调频脉冲随机化）的过程来削弱。在此过程中，线性调频脉冲的某些参数会根据每个线性调频脉冲进行随机化。例如，线性调频脉冲的相位可以随机化。由于干扰源不知道受扰对象的随机化方案，因此在多普勒处理期间并行干扰信号会分散。线性调频脉冲起始相位可使用每个线性调频脉冲移相器 API 或二进制移相器 API 进行随机化。线性调频脉冲有多个可随机化的其他参数；线性调频脉冲斜率、线性调频脉冲启动频率和线性调频脉冲空闲时间都可以使用线性调频脉冲配置 API 进行随机化。接口控制文档中介绍了这个线性调频脉冲配置 API `rlSetChirpConfig`。

图 5-1 显示了如何通过随机二进制相位调制（即线性调频脉冲相位抖动），将由并行干扰引起的虚假目标在多普勒中传播，并使用线性调频脉冲空闲时间抖动进一步传播。如果未使用随机化选项，则并行干扰显示为虚假物体。如果应用了随机化，则抖动会破坏干扰信号的峰值。随机化的工作原理是破坏不同线性调频脉冲之间的干扰源一致性，从而降低它们在 2D 处理过程中的影响。一帧中的线性调频脉冲数量减少了大约  $10 \log_{10}$ 。当干扰源一致性被破坏时，即可以使用 CFAR 算法来消除与干扰相关的影响。

因为必须应用一些校正，抖动方案在多普勒处理过程中会增加复杂性。例如，可以通过在多普勒处理之前对线性调频脉冲应用相反的相移来校正线性调频脉冲相位抖动。某些抖动方案（例如空闲时间抖动）会在多普勒中引入高本底噪声。

由于雷达器件的振荡器各不相同，没有时钟同步，因此线性调频脉冲起始时间在雷达器件之间有缓慢延迟。例如，两个编程为相同线性调频脉冲配置的雷达器件在本地振荡器频率方面存在 200ppm 的差异。假设线性调频脉冲必须在  $1\mu\text{s}$  内开始看到干扰且帧速率为 0.1s，那么在一帧后，相对线性调频脉冲起始时间大约移动  $20\mu\text{s}$ 。因此，从干扰区离开大约需要 1/20 帧。移动一整个帧大约需要 8 分钟，以确保它返回到干扰区。用户将在 1/20 帧内看到干扰，然后它将消失。

当 LO 变化较小时，例如两个雷达之间的差值为 1ppm 时，返回干扰区域大约需要 27.7 小时；用户将看到 10 帧的干扰，然后它会消失。这样就增加了帧开始随机化的可能性。每帧以随机时间偏移开始。在这种情况下，并行干扰可能仅影响一帧。这样，可以提高最坏情况下的系统性能。

## 6 结论

雷达-雷达干扰是雷达大规模（密集）部署的绊脚石。如果没有考虑到这个问题，会导致检测失败、虚假物体和缩小雷达范围。通过使用随机化、抖动、频率规划以及定位和缓解等不同方案，可以控制干扰和提供强健的性能。



## 7 参考文献

1. Sriram Murali, Karthik Subburaj, Brian Ginsburg and Karthik Ramasubramanian, *Interference Detection in FMCW Radar Using A Complex Baseband Oversampled Receiver*, <https://ieeexplore.ieee.org/document/8378800>

## 8 修订历史记录

### Changes from Revision \* (January 2020) to Revision A (September 2022)

Page

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... 1

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”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功能安全、信息安全、监管或其他要求。

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](#) 或 [ti.com](#) 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。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司