

# 汽车雷达传感器和拥挤不堪的无线电频谱：城市电子战场？

作者：Sefa Tanis



随着汽车雷达越来越普及，城市环境中拥挤不堪的射频频谱将变成一个电子战场。雷达将面临无意或有意干扰的组合式攻击，设计人员必须像在电子战(EW)中一样实施反干扰技术。

汽车雷达通常会遭受拒绝式或欺骗式干扰。拒绝式干扰会导致盲受害车辆雷达。这种技术会降低信噪比，导致目标检测的概率降低。另一方面，欺骗式干扰会让受害车辆雷达“认为”存在虚假目标。受害车辆雷达失去追踪真实目标的能力，故而受害车辆的行为受到严重影响。

这些干扰可能源于汽车雷达之间的相互干扰，或者是使用廉价硬件简单地强连续波(CW)信号指向受害车辆雷达而故意发生的攻击。

虽然目前的避干扰技术可能足以应对当今的情况，但随着雷达传感器的激增，汽车将需要使用弹性类型的缓解技术，或者此类技术与避干扰方法结合使用。弹性技术包括时频域信号处理或复杂雷达波形。

## 雷达波形

雷达波形是判断传感器在有干扰情况下的性能的关键系统参数之一。当今77 GHz频段的汽车雷达主要使用FMCW型波形。在FMCW雷达中，CW信号在射频段的频率上线性扫描或啁啾。图1显示了一个FMCW chirp序列(CS)波形例子。

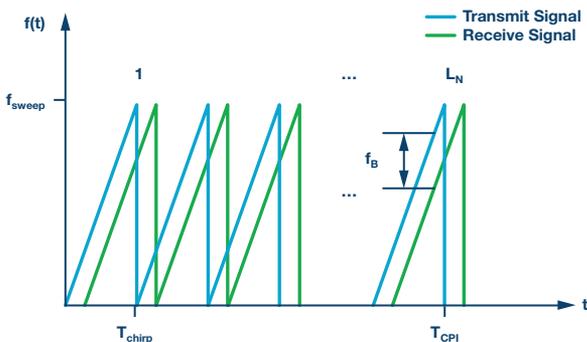


图1. FMCW CS示例

回波信号的频率差 ( $f_B$ , 拍频) 与到目标的距离R成比例，可通过以下关系确定：

$$f_B = \frac{2}{c} \frac{f_{sweep}}{T_{chirp}} R \quad (1)$$

## 干扰的影响

在密集射频环境中，当FMCW雷达传感器在频带的相同部分中工作时，就会发生干扰。一个典型的迎面而来的汽车干扰示例参见图2。

## 拒绝式干扰

落入接收机带宽的任意FMCW型强干扰信号会提高受害雷达的本底噪声。这种拒绝式干扰可能导致小目标（即雷达散射截面(RCS)较小）因为SNR很差而消失。

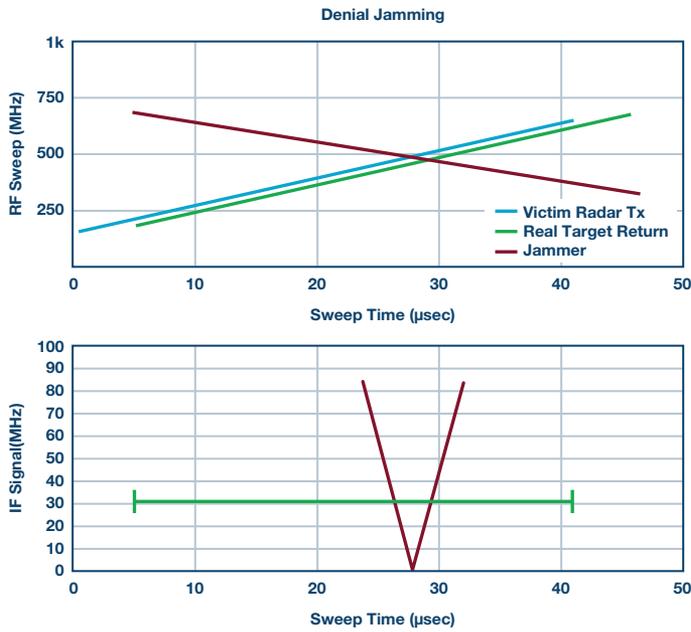
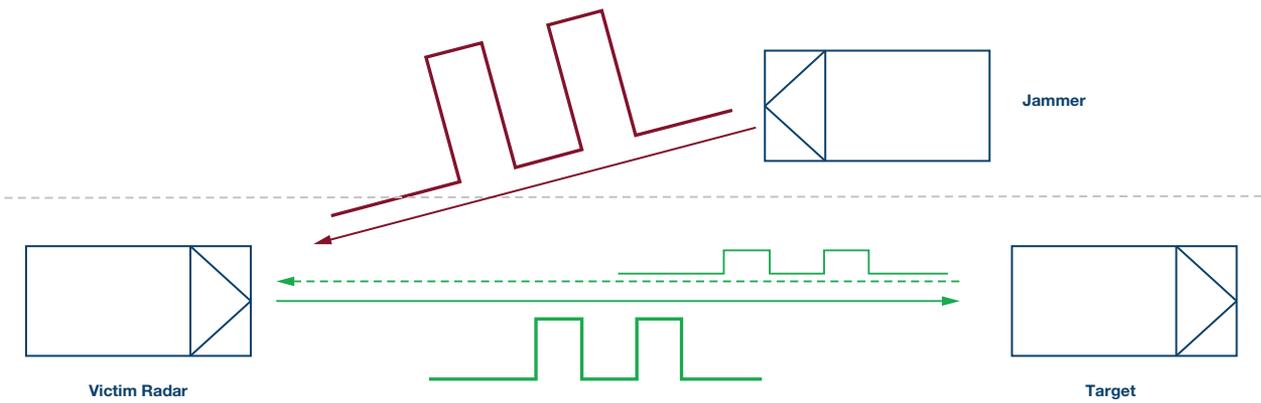
拒绝式干扰也可以是故意为之，简单地将一个强CW信号射向受害车辆FMCW雷达就能做到。对受害雷达的影响类似于FMCW干扰情况（见图4）。

## 欺骗式干扰

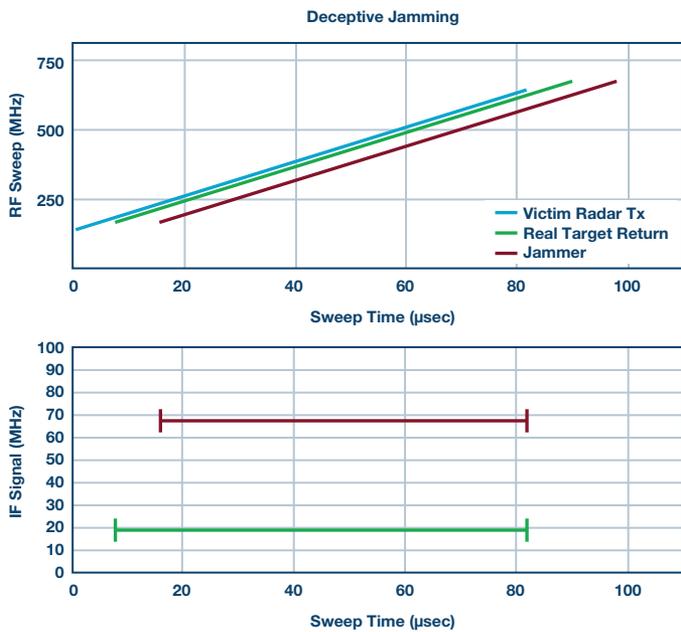
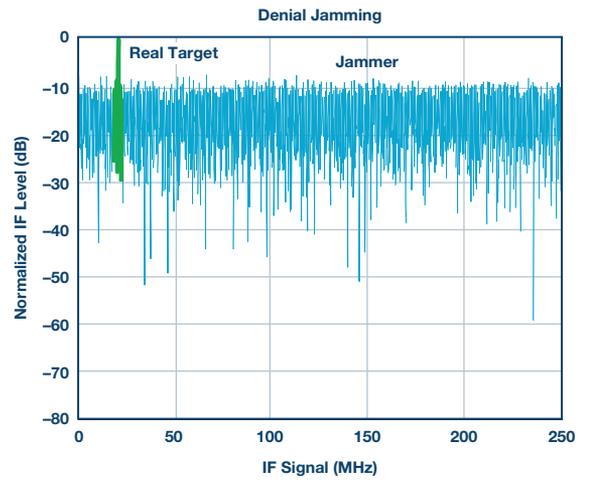
如果干扰信号扫描是同步的，但与受害雷达一同延迟，那么其影响将是在固定距离产生欺骗性假目标。这种技术在电子战干扰机中很常见。类似类型的迎面而来的汽车雷达将成为非故意的干扰机。然而，受害雷达和干扰雷达之间时间对齐的概率将非常小。小于受害雷达最大距离延迟的干扰机延迟偏移看起来可能像真实目标。例如，200 m最大距离要求扫描对齐误差小于 $1.3 \mu s$ 。然而，将复杂的类似电子战的设备安装在迎面而来的汽车平台上，便可故意开展这种欺骗式攻击。

更一般地，欺骗式干扰基于对受害雷达信号的重新传输，不过其延迟和频率发生了系统性改变。这可以是非相干的（这种情况下的干扰机被称为应答器），或是相干的（这种情况下的干扰机被称为中继器）。中继器接收、改变并重新传输一个或多个干扰信号，而应答器是在干扰机检测到目标受害雷达信号时传输一个预定信号。

基于中继器的复杂攻击通常需要数字射频存储器(DRFM)。DRFM能够执行协调距离延迟和多普勒波门拖引攻击。因此，它会维持虚假目标距离和多普勒特性以欺骗受害雷达。



(a.)



(b.)

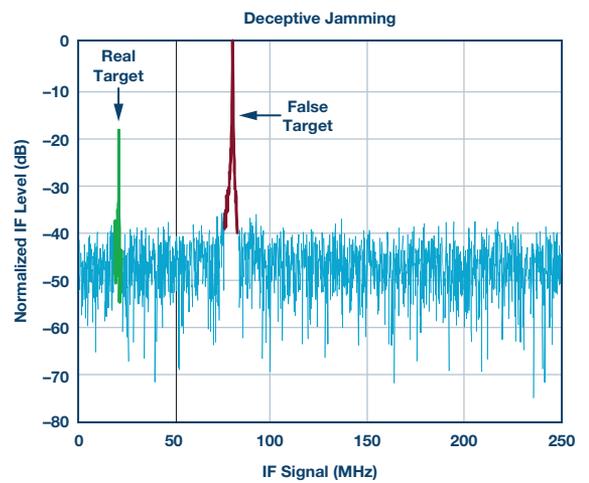


图2. 示例: a) FMCW拒绝式干扰; b) FMCW欺骗式干扰

## 干扰缓解技术

### 基本方法：避免

基本的雷达干扰缓解技术主要依赖于避干扰方法。其目标是降低空间、时间和频率重叠的可能性，例如：

- ▶ 空间：使用较窄的电子扫描波束可以降低干扰风险。远程汽车巡航控制 (ACC) 雷达的典型视野为  $\pm 8^\circ$ 。尽管如此，强干扰信号仍可通过天线旁瓣造成有效干扰。
- ▶ 时间：随机生成 FMCW 啁啾斜率参数以避免周期性干扰。
- ▶ 频谱：随机生成 FMCW 啁啾起始和停止频率，以降低重叠和干扰的概率。

随机化的基本方法会避免与其他雷达意外同步，但在密集射频环境中可能不那么有用。越来越多的雷达传感器需要更复杂的弹性技术来缓解干扰。

### 战略方法：检测并修复

另一种避干扰方法是利用信号处理算法修复接收到的波形。时频域技术可以有效应对拒绝式干扰攻击。在迎面而来的汽车 FMCW 干扰情况下，干扰机扫描所有频率槽的时间非常之短。这种快速时变信号在常规 FFT 域中表现为升高的本底噪声。时频域信号处理技术将该信号转移到另一个域，与 FFT 域相比，在该域中更容易滤除干扰（见图3）。

对于时变信号，短时傅立叶变换 (STFT) 比常规 FFT 能提供更多信息。基于 STFT 的技术可用于消除窄带干扰。STFT 基本上是让一个窗口移动通过信号，获取窗口区间的 FFT。在频域中对信号进行滤波以去除干扰分量，然后将其转换回时域。

图4显示了重叠射频啁啾序列的典型 FMCW 干扰情况，以及由此产生的 STFT 域中的 IF 拍频信号。

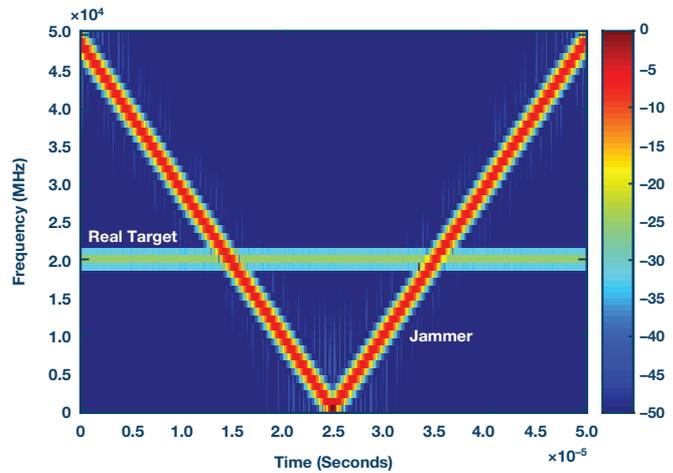
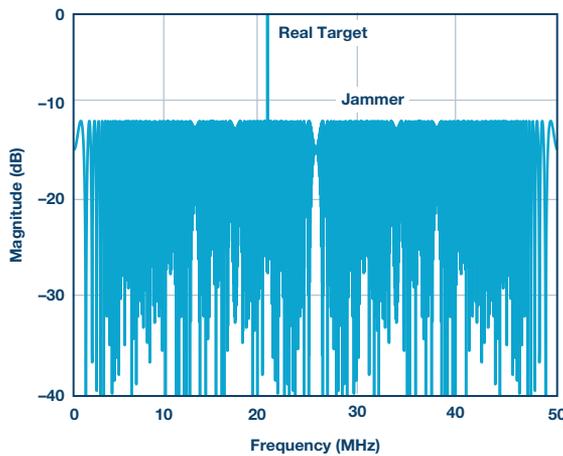


图3. 雷达回波IF波形的FFT和STFT域表示

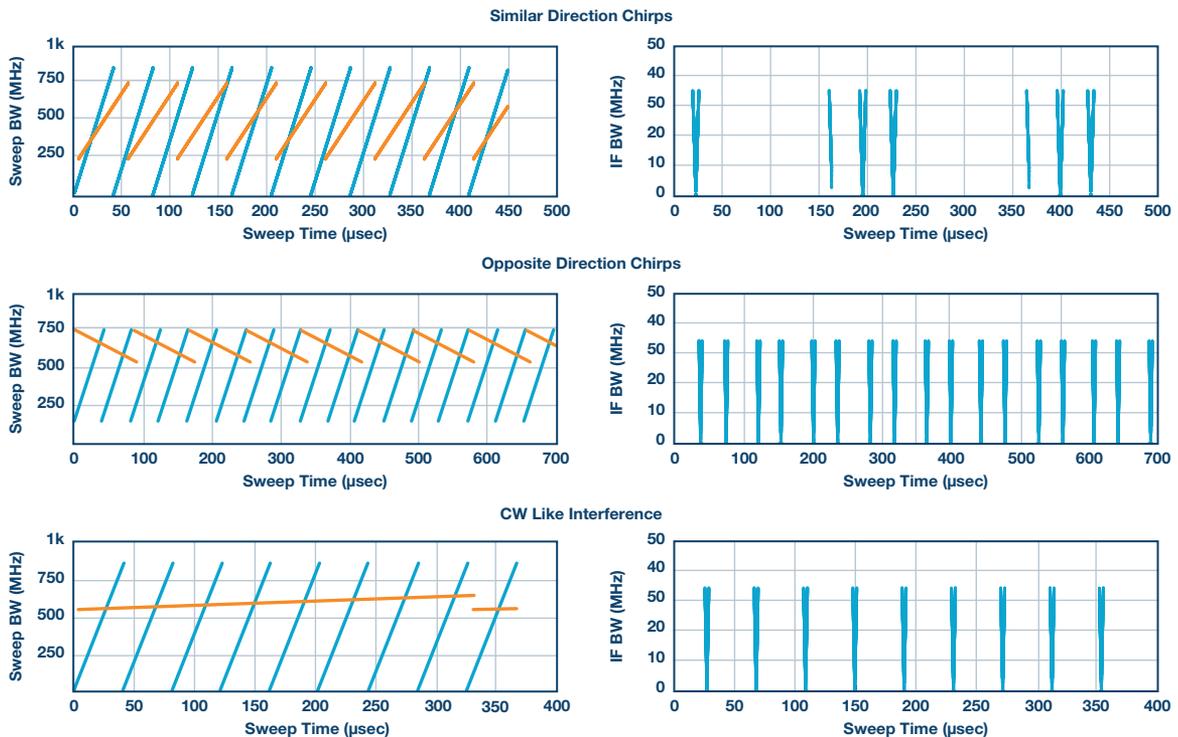


图4. STFT域, 左: FMCW雷达和干扰机, 右: IF域

图4右侧显示了IF域，其为雷达（蓝色）和干扰（橙色）信号混频的最终结果。水平线表示目标，而V形垂直线表示存在干扰信号。

类似或相反方向的干扰FMCW，甚至类似CW的慢速啁啾，对IF信号有类似的影响。在所有这些干扰情况下，快速移动的V形IF信号会提高常规FFT域中的本底噪声，如图3所示。

可以使用基于幅度的屏蔽来滤除STFT域中的干扰信号。当然，前提是受害雷达前端和量化部分具有足够的动态范围来同时线性地处理较强的干扰信号和较小的预期目标信号。参见图5。

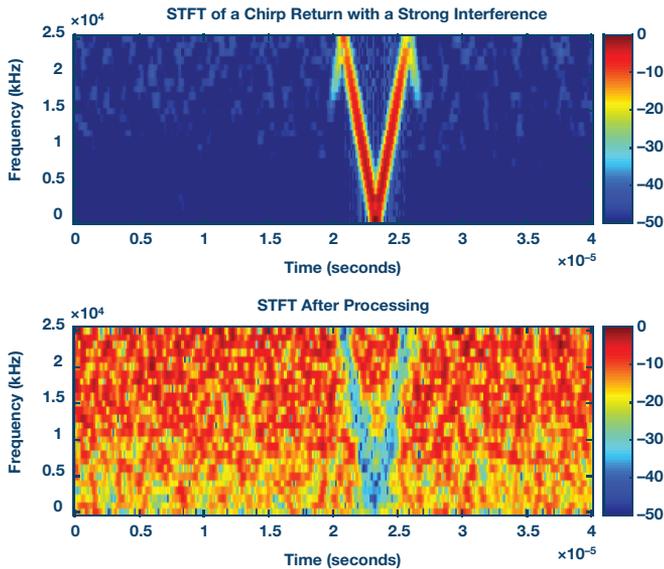


图5. STFT域中基于幅度的屏蔽

图5上方图像显示了一个强干扰信号，而下方图像显示了处理后的STFT。在有强干扰的情况下，如上方图像所示，多个真实目标不可见。在下方图像中，V形干扰信号被消除；当转移回时域时，低SNR目标现在已可辨识。

在拒绝式干扰情况下，可以利用基于STFT的干扰缓解技术来应对强干扰。针对欺骗式干扰攻击，单凭STFT无法验证返回信号是真还是假。

### 加密射频

降低中继器欺骗式干扰攻击影响的基本对策是使用低概率拦截(LPI)雷达波形。LPI雷达的目的是将辐射能量扩散到很宽的频谱上以规避检测，通常采用准随机扫描、调制或跳频序列。FMCW是一种LPI波形。如果将相位编码或加密引入频率啁啾，则可以进一步降低DRFM拦截汽车雷达信号的几率。

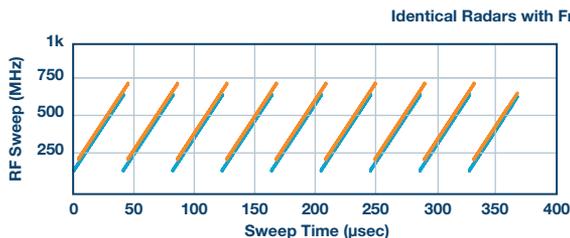


图6. 存在频率偏移和延迟的相同雷达引起的干扰

每个雷达传感器独有的加密射频特征可以验证返回信号的真伪。图6显示了一个使用案例，其中两个相同雷达（安装在不同汽车上）之间有频率偏移和延迟，在受害雷达中产生一个假目标。干扰雷达与受害雷达在时间上是对齐的（相同的啁啾斜率且偏移较短）。

在这种情况下，相位编码FMCW雷达可以提供很高的抗干扰鲁棒性。使用正交码还能让MIMO雷达操作变得可行，从而支持多个波形同时发射。

编码要求：

- ▶ 码长：目标是利用短序列实现最小距离旁瓣电平。1024的PRN序列长度导致峰值旁瓣电平(PSLL)约为30 dB ( $10\log 1024$ )。可以优化发射码和接收滤波器权重，以SNR为代价来改善PSLL。
- ▶ 良好的交互相关特性：为实现传感器之间良好隔离，一个集合的成员的交互相关系数应为零。
- ▶ 抗多普勒效应能力：相位编码雷达性能可能受多普勒频移的影响。二进制码对多普勒效应的耐受能力差。多相码的性能衰减速度比二进制码要慢。
- ▶ 可用的不同码数量：规模大的比较好，可以为每个雷达传感器分配唯一编码。

图7显示了无相位编码的雷达回波。干扰信号显示为一个假目标。当利用PRN序列对发射机FMCW波形进行相位编码时，可以抑制干扰信号，如图8所示。

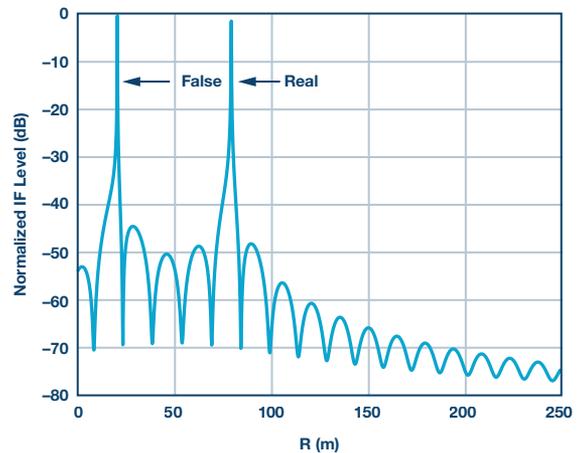


图7. 未对真伪目标进行相位编码的雷达回波



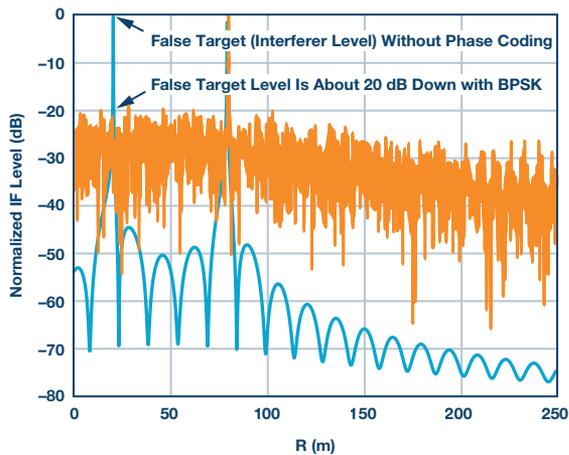


图8. 有和无相位编码的雷达回波

这种方法会影响动态范围。然而，雷达信号处理器可以对几个啁啾信号使用相位编码FMCW以标记假目标，然后切换回正常操作。

### 结论及未来趋势

使用先进信号处理算法和复杂波形生成技术，可以缓解拥挤汽车雷达传感器环境中的干扰。基于STFT的信号处理技术可用于应对拒绝类型的攻击。相位编码FMCW借助处理增益和避免拦截措施，对非相干和相干欺骗式攻击均提供额外的抵御层。表1是对缓解技术的总结。

表1. 基于FMCW的汽车雷达缓解技术

干扰类型	拒绝式		欺骗式	
	另一个雷达传感器或简单的CW发生器	DRF (相干)	应答器 (非相干)	
对受害雷达的影响	SNR不佳	假目标	假目标	
弹性缓解技术	STFT	相位编码FMCW	相位编码FMCW	
缓解原则	修复雷达返回波形	规避检测	编码序列的处理增益	
减缓效果 (预期)	高	中	好	

上述针对汽车雷达的干扰缓解原则也适用于其他雷达传感器环境，例如机器人、道路收费、GPS、无人机着陆或防撞系统。

目前，汽车雷达传感器在非合作模式下运行，彼此之间不通信。虽然合作运作模式需要全行业协调，但雷达传感器之间的仲裁可以帮助解决干扰问题。

包括传感器合作在内的未来雷达概念将是通信节点和雷达传感器的融合。使用复杂波形的未来雷达也可以将信息包含在雷达信号中。同一硬件可以同时用于雷达和通信(RadCom)。

### RadCom: 雷达和通信功能同时执行的单一系统:

- ▶ 多用户能力, 无干扰
- ▶ 利用 OFDM 或类似通信码对雷达信号进行编码, 为在雷达信号中包含信息提供了可能性
- ▶ 基于 OFDM 的雷达发射信号使得二者可以同时进行

ADI公司的5G毫米波收发器信号解决方案具有超过GHz的带宽和波束引导能力，可能成为RadCom系统概念的潜在候选者。

ADI公司在开发最先进雷达传感器和5G毫米波解决方案方面处于独特的地位，为未来的RadCom系统铺平了道路。

### ADI公司Drive360 28 nm CMOS雷达技术:

ADI公司的Drive360™ 28nm CMOS雷达平台支持多种高级信号处理集成，甚至是自定义IP集成，使设计人员能够区分他们的系统，而且配有高集成电源管理辅助芯片。该平台可令一级供应商产品和原厂产品具备优良的性能，而这正是打造可靠的解决方案，将其应用于新兴自动驾驶领域所不可获取的前提条件。

### 5G毫米波

ADI公司借助其独有的位到微波功能，为5G微波作出了诸多贡献。ADI丰富的技术产品系列以及不断进步的RF技术与无线电系统工程的深厚历史相结合，使我们处于领先地位，带领我们的客户为新兴的5G系统开拓新的微波和毫米波频率解决方案。

Sefa Tanis [sefa.tanis@analog.com]是ADI公司高级射频系统工程师，专门从事小型蜂窝收发器的数字预失真算法开发，研究汽车雷达的信号处理技术并评估无线基础设施用封装RF模块中的系统。在2012年加入ADI之前，他曾担任F-16飞机电子战计划AN/ALQ-178 V(5)+的首席射频工程师，该计划由土耳其ASELSAN和北美BAE Systems联合开发。他在电信和防务/航空航天行业的微波产品系统级设计以及算法开发、测试和集成方面拥有超过15年的经验。他于2000年获得土耳其丘库罗瓦大学电气工程学士学位。



Sefa Tanis