

Tektronix®

# 泰克汽车毫米波雷达测试 解决方案

应用文章



# 目录

1. 汽车毫米波雷达背景 .....	3
2. 汽车毫米波雷达的工作原理 .....	4
2.1. 汽车雷达概述 .....	4
2.2 汽车毫米波雷达的工作原理.....	5
3. 汽车毫米波雷达主要测试内容和挑战.....	7
3.1 雷达接收机性能测试 .....	7
3.2 雷达抗干扰能力测试 .....	7
3.3 雷达发射机性能测试 .....	7
3.4 毫米波雷达测试挑战和难点.....	7
4. 泰克汽车毫米波雷达信号产生和分析方案.....	9
4.1 泰克汽车毫米波雷达接收机性能测试方案.....	10
4.1.1 雷达信号产生软件 .....	11
4.1.2 预失真校准 .....	11
4.1.3 泰克雷达信号产生系统指标.....	12
4.2 泰克汽车毫米波雷达抗干扰性能测试方案.....	12
4.3 泰克汽车毫米波雷达发射机测试方案 .....	13
4.3.1 专业的汽车雷达 FMCW 信号分析软件.....	14
4.3.2 发射机雷达信号故障和射频指标测试.....	15
4.3.3 泰克毫米波雷达信号分析系统指标 .....	16
5. 配置列表 .....	17
6. 总结 .....	17

## 1. 汽车毫米波雷达背景

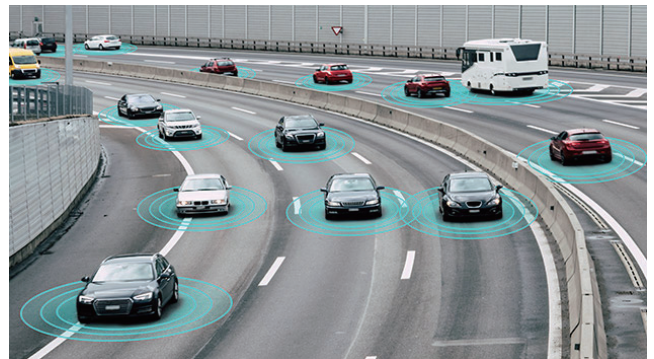
随着现代科学技术的快速发展以及人们生活水平的显著提高，汽车消费每年都在快速增长，汽车保有量迅速增加，汽车安全问题则被普遍的关注，相应的交通事故也急剧上升。大量交通事故数据表明，80%以上的车祸是由于驾驶员操作失误引起的，65%的车辆相撞是追尾事故，其余的属于侧面或者正面相撞。通过对汽车事故的调查统计分析，发现大约一半以上的事故是首尾相撞，这就是说有效的汽车防撞系统能够对大约65%的事故起到阻止作用。同样在高端汽车领域，人们越来越渴望高科技带来的安全与便捷，结合信号处理技术实现汽车自主智能巡航、辅助泊车、汽车防撞雷达等各种系统已经改变了人们对传统汽车电子的认识。毫米波雷达在汽车电子的典型应用有毫米波防撞雷达、自适应巡航、盲区检测、辅助变道等功能。



随着AI的蓬勃发展，汽车的智能化程度在不断提高，对于驾驶的安全性和舒适性也不断提高；毫米波雷达因其探测精度高，硬件体积小，不受天气环境的影响等优点被广泛采用。越来越多的车辆采用一个或者多个毫米波雷达来辅助驾驶员的驾驶操作，以提高驾驶的舒适性和安全性，避免交通事故的发生。

毫米波雷达可以实现自动驾驶多种功能，ADAS采用的传感器主要有摄像头、毫米波雷达、激光、超声波、红外等。毫米波雷达传输距离远，在传输窗口内大气衰减和损耗低，穿透性强，可以满足车辆对全天气候的适应性的要求，并且毫米波本身的特性，决定了毫米波雷达传感器器件尺寸小、重量轻等特性。很好的弥补了摄像头、激光、超声波、红外等其他传感器，在车载应用中所不具备的使用场景。把毫米波雷达安装在汽车上，可以测量从雷达到被测物体之间的距离、角度和相对速度等。利用毫米波雷达可以实现自适应巡航控制（ACC）、前向防撞报警（FCW）、盲点检测（BSD）、辅助停车、辅助变道等高级驾驶辅助系统（ADAS）功能。比较常见的汽车毫米波雷达工作频率在77GHz附近。

毫米波雷达市场空间广阔，由于各国汽车安全标准的不断提高，导致主动安全技术高级驾驶辅助系统（ADAS）近年来呈快速发展趋势。汽车毫米波雷达因为能够全天候工作，已成为汽车电子厂商公认的主流选择，拥有巨大的市场需求。2014年全球汽车毫米波雷达市场出货量在1900万个，据市场研究机构预测，预计到2020年全球汽车毫米波雷达将近7000万个，2015-2020年的年均复合增速约为24%。



## 2. 汽车毫米波雷达的工作原理

### 2.1 汽车雷达概述

汽车防撞雷达主要有超声波雷达、激光雷达、毫米波雷达等类型。不同雷达类型的工作原理不一样，其性能和特点也各有优缺点，不同的雷达可以用于实现不同的功能。

超声波雷达是利用传感器内的超声波产生器发出40kHz的超声波，然后探测经过障碍物反射回来的超声波，根据超声波反射接收的时间差来计算汽车与障碍物的距离。超声波雷达成本低，但探测的距离只有几米，用于泊车系统，而且受天气的影响。

激光雷达是根据激光遇到障碍物后的折返时间，计算目标与自己的相对距离。激光光束可以准确测量视场中物体轮廓边沿与设备间的相对距离，这些轮廓信息组成所谓的点云并绘制出3D环境地图，精度可达到厘米级别，从而提高测量精度。激光雷达具有分辨率高、精度高、抗干扰能力强的优势，主要用于无人驾驶系统，但是激光雷达受天气的影响，在大雪、大雾时功能受到限制，并且价格昂贵。

毫米波雷达是ADAS系统的主要传感器，毫米波雷达频率范围30GHz-300GHz，波长从1mm-10mm，毫米波雷达测距可达200多米，可以对目标进行有无检测、测距、测速以及方位测量。它具有良好的角度分辨能力，可以检测较小的物体。同时，毫米波雷达有极强的穿透率，能够穿过光照、降雨、扬尘、大雾等来准确探测物体，可全天候工作。

	毫米波雷达	激光雷达	摄像头	超声波	红外
远距能力	优	优	一般	差	良
分辨率	高	高	高	低	低
误报率	低	较低	较低	较低	较高
温度适应性	优	优	优	一般	良
黑暗适应性	优	优	一般	优	优
天气适应性	优	一般	一般	一般	一般
灰尘潮湿	优	一般	一般	良	一般
硬件成本	低	高	低	低	低
信号处理复杂度	低	高	高	低	低

从上面的对比可以看出，相比激光雷达，毫米波雷达仍有着强大的优势。激光的波长远小于毫米波 (nm vs mm)，所以雾霾可能导致激光雷达失效。同样的原因，毫米波雷达的探测距离可以轻松超过200米，而激光雷达一般不超过150米，所以对于高速公路跟车场景，毫米波雷达能够做的更好。相比于其他类型的雷达，毫米波雷达穿透雾、烟、灰尘的能力强，具有全天候（大雨天除外）全天时的优点。其缺点是无法识别物体颜色；视场角较小，需要多个雷达组合使用；行人的反射波较弱，难以识别。虽然激光雷达号称无人车的眼睛，近几年也受到了前所未有的追捧，但目前阶段，ADAS及自动驾驶方案选择的主流仍然是毫米波雷达。在无人驾驶时代尚未到来之前，汽车ADAS驾驶员辅助驾驶系统，毫米波雷达将是近几年车载雷达的主流。随着毫米波雷达器件成本近几年大幅降低，也使得它在汽车领域迅速应用起来。

汽车雷达作为驾驶员辅助系统的核心传感器（检测距离、速度）；远距离雷达（LRR）是用来实现自动巡航（ACC），中距离雷达（MRR）用来实现侧向来车报警和车道变道辅助，近距离雷达（SRR）则是用来实现停车辅助、障碍和行人检测。

77GHz 汽车雷达系统属于目前国内外各大汽车公司研究和设计的热点，相比于激光车载雷达、红外线车载雷达以及其他低频段的毫米波车载雷达而言，77GHz 汽车雷达可利用的频谱范围宽、信息容量大、分辨率高、多普勒频移大、测速灵敏度高、抗干扰能力及穿透等离子体的能力强，并且容易实现天线的窄波束和高增益等。

车载毫米波雷达按照不同的分类方式有着不同的划分方法。根据安装工作频率、探测距离、主要功能等三种划分方式。

1) 按照雷达的工作频率划分；可以主要分为两类：24GHz 雷达和 77GHz 雷达，由于 24GHz 雷达在带宽和使用范围上的受限，以及 77GHz 雷达的高带宽，高精度，体积小等优势，越来越多的国家将 77GHz 的频段划分给车载毫米波雷达使用，所以未来 77GHz 雷达会取代 24GHz 雷达。76GHz~81GHz 相比于 24GHz，物体分辨准确度提高 2~4 倍，测速和测距精确度提高 3~5 倍，能检测行人和自行车；且设备体积更小，更便于在车辆上安装和部署；该频段是全球装配永久认可的权威频段，因此更适用于全球车辆平台。采用 MIMO（多输入多输出）阵列扫描技术的 79GHz 成像雷达还可以获得目标的高度信息，从而实现真正意义的毫米波成像，79GHz 成像雷达将成为未来车用的主流，与摄像头、激光雷达结合实现多传感器融合。在未来智能驾驶的发展过程中，将是一个重要的感知手段，多种功能的雷达与多种传感器的技术融合，是实现无人驾驶的必经之路。

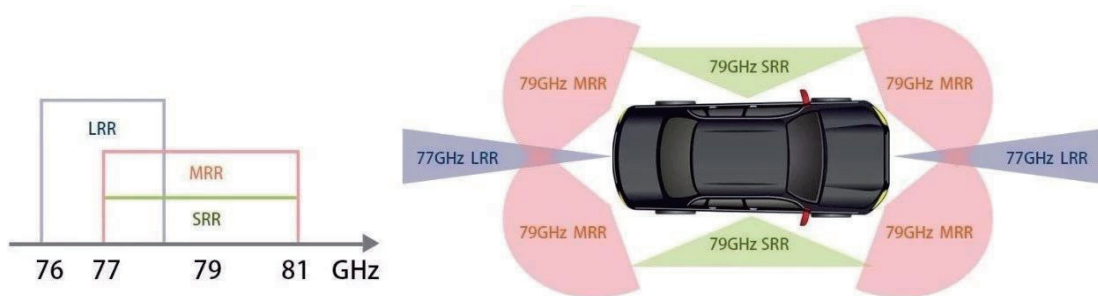
2) 按照雷达的探测距离划分：可分为长距雷达 (LRR)，中距雷达 (MRR)，短距雷达 (SRR)；分别应用在不同的场景实现不同的功能，也可以组合使用，或配合 ADAS 系统，实现多传感器的融合。

3) 按照雷达功能划分可以区分不同应用的雷达：主要的常用功能雷达包括：BSD (Blind Spot Detection-盲点侦测系统)，AEB (Autonomous Emergency Braking-自动紧急制动系统)，FCW (Forward Collision Warning-前向碰撞警告系统)，ACC (Adaptive Cruise Control-自适应巡航系统)。

## 2.2 汽车毫米波雷达的工作原理

毫米波是指波长在 1mm~10mm 的电磁波，其带宽大、分辨率高、天线部件尺寸小，能适应恶劣环境。毫米波雷达中目前使用最广泛的是调频连续波 (FMCW) 的特殊毫米波技术。具体指，雷达连续发射 FMCW 调频信号，以测量距离，角度以及速度，不同于周期性发射短脉冲的传统脉冲雷达系统，车用毫米波雷达，通常采用结构简单成本较低，适合近距离探测。雷达天线向外发出一系列连续调频毫米波，频率随时间按调制电压的规律变化，一般是连续的三角波，也可以是锯齿波。

毫米波雷达通过微带阵列天线向外发射调频连续波 (FMCW)，经目标反射后接收到的回波与发射波存在一个时间差，利用该时间差可计算出目标距离。通过信



号处理器分析发射与反射信号的频率差异，基于多普勒原理，可以精确测量目标相对于雷达的运动速度，进一步通过多目标检测与跟踪算法，实现多目标分离与跟踪。进而结合车身动态信息进行数据处理。经合理决策后，以声、光及触觉等多种方式警告驾驶员，或及时对汽车做出主动干预，减少事故发生几率。工作原理图见图 1。

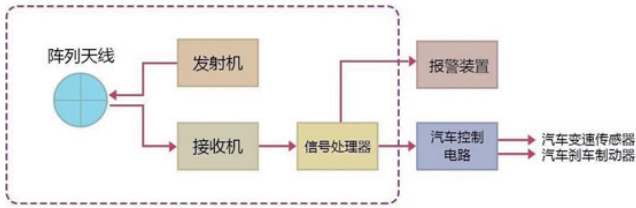


图 1: 汽车雷达工作原理框图

### 1) 雷达测距测速原理

毫米波雷达通过天线向外发射调频连续波 (FMCW)，无线电波经过传播到达目标，然后返回接收天线，接收到目标的反射信号，与本振进行混频出中频信号，通过对中频信号处理，从而获得目标距离和速度信息。对于调频连续波 FMCW 雷达，其发射波的频率是不断变化的，但频率的变化率是一定的，因此雷达主要通过发射信号和反射回波信号做互相关，反射波与发射波形状相同，存在一个时间差  $\Delta t$ ，还包括一个多普勒频移。发射信号与反射信号在某一时刻的频差即为混频输出的中频频率  $f_b$ 。相对运动物体反射信号由于多普勒效应产生频移。在三角波的上升沿与下降沿输出的中频频率分别为  $f_{b+}$ 、 $f_{b-}$ 。

雷达发射信号与反射回波信号见图 2。延时  $\Delta t$  与差拍频率成线性关系，所以通过计算拍频率可以计算回波延时，进而计算出目标的距离，具体公式如下：

$$R = \frac{c\Delta t}{2} = \frac{c \cdot (f_{b-} - f_{b+})}{4K_r} \quad (1)$$

式 (1) 中，R 为目标距离，c 光速， $K_r$  是调频斜率， $f_{b-}$  和  $f_{b+}$  分别为三角波的上升沿与下降沿输出的中频频率。

根据多普勒原理，求出相对目标的相对速度：

$$V = \frac{c}{4f_0} (f_{b-} - f_{b+}) = \frac{\lambda}{4} (f_{b-} - f_{b+}) \quad (2)$$

式 (2) 中，V 为目标相对运动速度， $\lambda$  为波长， $f_{b-}$  和  $f_{b+}$  分别为三角波的上升沿与下降沿输出的中频频率。

通过上面的公式得到目标车辆的距离 R 与相对运动速度 V。不管目标是相对静止还是相对运动，只要求出三角波调制在上升过程和下降过程的中频频率，就可以得到目标的距离和速度信息。

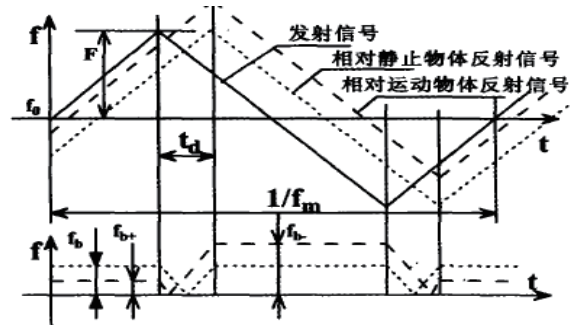


图 2: 发射信号、运动目标与静止目标的反射回波信号

### 2) 雷达目标识别

毫米波雷达的目标识别基本原理是：利用雷达回波中的幅度、相位、频谱和极化等目标特征信息，通过数学上的各种多维空间变换来估算目标的大小、形状等物理特性参数，最后根据大量训练样本所确定的鉴别函数，在分类器中进行识别判决，内容包括目标识别预处理、特征信号提取、特征空间变换、模式分类器及样本学习等模块。其中特征信号提取是指毫米波雷达采集提取其发射的电磁波与目标相互作用产生的各种信息，包括：RCS（雷达散射截面积）以及其他特征参数。

### 3) 雷达目标跟踪

目标跟踪系统有目标信息预处理、目标跟踪处理、目标滤波处理等模块组成。其中目标信息预处理主要包括目标回波的处理、目标检测、点迹凝聚、参数计算等。目标跟踪处理及滤波主要包括目标预测、目标相关、目标滤波等。

### 3. 汽车毫米波雷达主要测试内容和挑战

由于车载雷达关系到驾驶者的生命安全，为了确保汽车防撞雷达的工作稳定、正常、可靠、需要对毫米波雷达进行功能和性能测试。从毫米波雷达的研发、调试、优化、生产、以及安装校准，都需要对雷达性能进行规范化、标准化的检测及诊断，实现对毫米波雷达的发射机性能、回波接收性能以及抗扰能力的测试。毫米波雷达测试方案可以通过下面几个方面进行：

#### 3.1 雷达接收机性能测试

雷达接收端测试主要评估接收机的性能指标，雷达接收端测试需要产生雷达回波信号测试汽车雷达接收端的探测性能，汽车雷达接收到信号后，经过处理算出探测距离、径向速度和雷达散射截面积(RCS)。通过对信号进行精细处理以及与模拟器中的预设值进行比较，可以考察汽车雷达的测距范围与精度、测速范围与精度以及测角范围与精度，同时模拟两个不同距离、速度、角度的目标，可以考察汽车雷达的测距分辨率、测速分辨率和测角分辨率。还需要测试接收机的灵敏度、接收方向图等参数，接收动态范围。

#### 3.2 雷达抗干扰能力测试

汽车雷达抗干扰能力是非常重要的一个指标，干扰信号会使回波信号整体抬升，淹没有用目标信号，使雷达失去探测能力。干扰信号包括汽车雷达互调干扰、警用测速雷达干扰、车流检测雷达干扰信号等。所生成的干扰信号叠加到经处理的回波信号上，上变频后发射出去。需要雷达模拟器来模拟各种干扰信号来验证汽车雷达的抗干扰能力。

#### 3.3 雷达发射机性能测试

主要对车载雷达系统的发射机进行测试，对雷达发送端发出的雷达信号进行分析，从而测试雷达信号的关键参数，比如：发射通道的EIRP(等效全向辐射功率)、带宽、频率、信号周期、功率平坦度、线性调频线性度、线性调频时周期、相位噪声、杂散、调频对时间曲线、线性调频线性度对时间的曲线、功率对时间曲线参数等。

### 3.4 毫米波雷达测试挑战和难点

为了保证汽车的性能和质量，不仅汽车电子供应商需要对汽车雷达进行测试，而且汽车生产厂家也需要评估汽车雷达的性能指标。通过对雷达模块的性能指标的测试验证，可以加快研发和生产进度，提高产品质量，保证汽车驾驶安全。汽车雷达的发展和进步给雷达传感器的测试和验证带来了诸多挑战，简而言之，可以归纳为两大挑战。

#### 1) 满足现代汽车雷达日益增长的技术要求

汽车雷达作为驾驶员辅助系统的核心传感器(检测距离、速度)；远距离雷达(LRR)是用来实现自动巡航(ACC)，中距离雷达(MRR)用来实现侧向来车报警和车道变道辅助，近距离雷达(SRR)则是用来实现停车辅助、障碍和行人检测。第一个挑战的核心是满足测试现代汽车雷达日益增长的技术要求，同时保持或降低生产测试成本。现代雷达传感器通常需要76GHz至81GHz的信号，而且很少有公司具备在此频率范围内构建测试系统的专业知识。更高带宽的传感器提供更高的分辨率，而雷达制造商已经开发了带宽接近4GHz，中心频率为79GHz的传感器，具体指标见下面的表格，这使得测试更具挑战性。

参数	LRR	MRR	SRR
最大发射功率(EIRP)	55dBm	-9dBm/MHz	-9dBm/MHz
频率范围	76-77GHz	77-81GHz	77-81GHz
<b>带宽</b>	<b>600MHz</b>	<b>600MHz</b>	<b>4GHz</b>
探测距离范围 $R_{min} \sim R_{max}$	10~250m	1~100m	0.15~30m
距离分辨率 $\Delta R$	0.5m	0.5m	0.1m
测距精度 $\delta R$	0.1m	0.1m	0.02m
速度分辨 $\Delta v$	0.6m/s	0.6m/s	0.6m/s
测速精度 $\delta v$	0.1m/s	0.1m/s	0.1m/s
测角精度 $\delta \psi$	0.1°	0.5°	1°

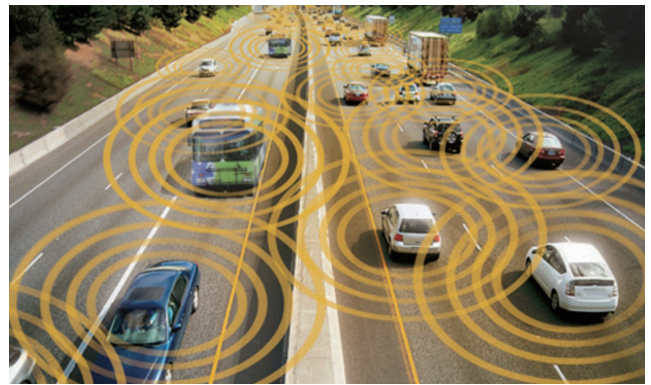
产生宽带毫米波雷达回波并能够模拟复杂电磁环境、干扰和噪声

能够模拟超宽带的雷达信号，汽车雷达的信号是复杂调制信号，调制带宽 4GHz，对于传统的信号源来讲，难以产生超宽带和复杂的调频连续波 FMCW 信号，当前的很多雷达系统需要的多功能、多任务、反干扰等要求，毫米波汽车雷达的使用环境复杂。而且在设计时必须将各种干扰、杂波、噪声等进行考虑，对测试测量带来了一系列的困扰。一般的微波信号源用于产生高纯度的本振信号，但是无法产生复杂的调制信号，一般的任意波发生器由于 DA 速率的限制，也受到了限制。

如何能够方便的验证接收机的性能，产生模拟目标信号信息，控制雷达信号处理器进行角度维搜索。产生模拟目标信号的距离信息，并控制雷达信号处理器进行距离维搜索。产生雷达信号处理器所需的调试信息，能够测试雷达信号处理器输出的各种数字信号和模拟信号。更为重要的是，雷达在实际工作过程中接收到的雷达信号并不是纯净的发射回波，它包含各种杂波和多普勒效应，为了模拟真实的环境，还要在信号上面加干扰加噪声。是否能够生成这些信号要看雷达信号发生器是否专业。而且这些对工程师来说有巨大的工作量，如果有一个集成在信号源上的软件可以方便的设置这些参数，大大的提高工程师的调试效率。

### 3) 需要产生与发射机信号完全一致的回波信号

要产生与发射信号完全一致的回波信号，甚至是要对发射的信号进行“复制”。在利用回波信号对接收机进行测试的时候，工程师为了能够完全模拟回波信号，需要将发射机的信号进行“复制”，这样克隆出来的信号一定是和发射波一致的，但是用什么样的手段进行复制呢？这就要求信号源和采集的设备具备数据兼容的能力，也就是说不如用示波器或者频谱仪采集下来的信号可以用信号源进行“重放”。这些都是对现在的信号仿真系统提出的新要求。



汽车雷达提供商或毫米波器件研制的过程中，要对发射系统、接收系统、雷达组件、芯片、器件、以及单元电路进行测试验证。由于 77GHz 提供了 4GHz 的超高带宽，对信号的产生和测试提供了相当大的挑战。

对毫米波雷达测试对测量系统来说是一种挑战，因为随着频率升高微波器件的衰减会迅速上升，同样就对仪表的接收能力也提出了很高的要求。泰克携手合作伙伴可以给汽车毫米波雷达客户完整的解决方案。



### 4. 泰克汽车毫米波雷达信号产生和分析方案

汽车毫米波雷达收发系统主要包括发射机测试、接收机性能测试、以及抗干扰性能测试，发射机需要信号分析设备评估雷达发射信号的性能指标。接收机需要信号源模拟回波，从 FMCW 信号，到复杂的多目标模拟以及干扰信号生成，甚至多个背景发射机或者存在多种干扰场景下的更加复杂的信号，利用这些复杂信号来验证接收机的性能。泰克提供的汽车毫米波雷达测试与测量解决方案，能够生成、测量和分析毫米波雷达信号，确保传感器无故障运行，保证安全驾驶。

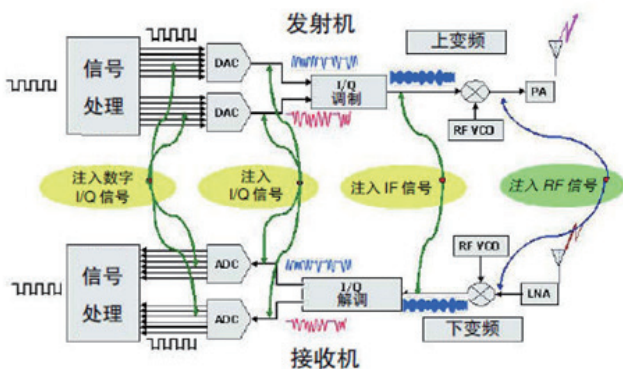


图 1. 汽车毫米波雷达信号测试原理图

泰克超宽带汽车毫米波雷达信号测试方案包括雷达信号产生、雷达信号分析和抗干扰测试，测试系统包括高性能任意波形发生器 AWG70000B 系列、内置本振的上变频器、内置本振的下变频器、高性能示波器 MSO64 或 DPO70000C\DX\SX 系列、实时频谱分析仪、以及相关软件。AWG70000B 系列任意波形发生器产生 FMCW 雷达中频信号，通过上变频器到 76GHz 至 81GHz 毫米波雷达信号，接收到的毫米波雷达信号通过下变频器变到中频，然后利用高性能示波器 MSO64 或 DPO70000C\DX\SX 系列采集雷达中频信号，最后利用 FMCW 雷达信号分析软件分析宽带雷达信号，对于射频性能指标可以利用实时频谱分析仪 RSA1526B

进行验证和测试。并且 AWG70000B 可以与高性能示波器实现整个系统的闭环幅度与相位校准和波形预失真，AWG 还可以对高性能示波器采集的波形数据进行回放。

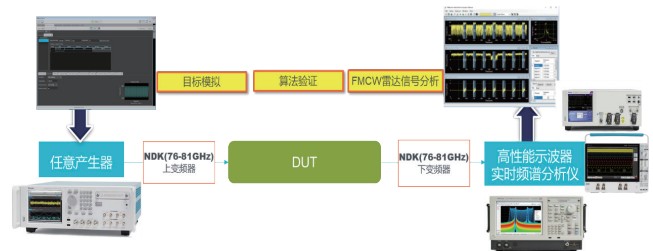


图 2. 泰克汽车毫米波雷达信号测试框图

图 2 为泰克超宽带毫米波雷达信号生成和采集分析处理闭环测试系统框图。SourceXpress 软件生成 FMCW 雷达信号，任意波形发生器通过高速 D/A 输出该信号，然后利用上变频器完成上变频至 76GHz-81GHz 频率及功率调整后送至天线发射出去，下变频器接收到天线的信号后把该射频信号下变频至高速数字荧光示波器 A/D 直接采集的频段范围，泰克高性能实时示波器利用 FMCW 雷达信号分析软件完成对采集的数据进行全面分析，同时在频域 / 时域 / 调制域完成对信号的全面测量。实时示波器采集的波形数据文件同样还可以发送至 SourceXpress 信号生成软件或第三方工具软件进行二次“加工”后，再次交给任意波形发生器生成预失真信号，从而完成信号的闭环测试。



图 3. 毫米波雷达信号测试

### 4.1 泰克汽车毫米波雷达接收机性能测试方案

雷达接收端测试主要评估接收机的性能指标，要验证雷达接收机的性能指标，需要产生毫米波雷达信号来测试汽车雷达接收端的探测性能，所以需要复杂的毫米波雷达信号模拟器。泰克的汽车毫米波雷达信号模拟系统由高性能任意波形发生器 AWG70000B 系列、内置本振的上变频器以及雷达信号生成软件组成，见图 4。从生成 FMCW 雷达信号，到复杂的多目标模拟以及干扰信号生成，甚至多个背景发射机或者存在多种干扰场景下的更加复杂的信号，AWG 都可以轻松产生。

泰克的雷达信号产生系统以泰克的 AWG 任意波形发生器和上变频器作为硬件基础，配合外围的仿真软件、信号生成软件组成了功能强大超宽带毫米波雷达信号仿真系统。



图 4. 超宽带毫米波雷达信号生成

AWG70000B 系列高性能任意信号发生器能够在 DC ~ 20GHz 的频率覆盖范围内产生、校准 20GHz 瞬时带宽的矢量信号，具备业内无可比拟的采样率、带宽和信号保真度，结合 SourceXpress 信号高级 RF/IF/IQ 波形生成和编辑软件，可以轻松产生 FMCW、Pulse 等雷达测试信号，方便的产生超宽带雷达信号。

对于汽车毫米波雷达，频率在 76~81GHz 范围，载波频率大于 20GHz 宽带雷达信号产生，由 Tektronix 公司的任意波发生器 AWG70000B 和第三方 NDK 的上变频器组成，能够在 76GHz ~ 81GHz 的频率覆盖范围内产生、校准 4GHz 瞬时带宽的矢量信号，上变频器内置本振，不需要外接外部本振，这样可以满足 76 GHz ~ 81 GHz 频率范围 4GHz 带宽内测试汽车毫米波雷达信号的需求，并能够仿真各种信号，以进行广泛的汽车雷达测试。



图 5. AWG + 上变频器到 76GHz~81GHz 方案

AWG 关键指标：

	AWG70001B	AWG70002B
采样率可调范围	1.5kS/S~50GS/s	1.5kS/S~25GS/s
最高输出频率	20GHz	10GHz
动态范围	-80dBc	-80dBc
ADC 位数	10bits	10bits
波形存储深度	32G 样点 / 通道	16G 样点 / 通道
模拟带宽	15GHz	13.5GHz
上升时间	<23ps( 采样率 ≤ 25GS/s) <27ps(50GS/s)	<22ps
模拟通道数	1	2
数字通道数	2	4
控制界面	自带显示，触屏控制	自带显示，触屏控制
多台 AWG 同步输出	支持	支持

### 4.1.1 雷达信号产生软件

基于 AWG70000B 系列配合 SourceXpress 中的 Radar plug-in 雷达信号生成插件，可方便的生成丰富而易用的基带 / 中频 / 射频雷达信号。可以利用 Radar plug-in 来产生复杂电磁环境下的雷达信号，实现多雷达目标信号模拟的重要手段，干扰信号模拟，复杂电磁环境模拟等，为接收机的调试提供了有力的工具。还具有模拟复杂信道、任意在波形内加入噪声、干扰、跌落、IQ 不匹配等“非理想”信号功能。通过 SourceXpress 软件中的雷达信号生成插件能够模拟各种雷达信号，从而执行广泛的汽车雷达测试。

#### 雷达信号产生软件特点

- 创建一个或多个脉冲组，形成相参或不相参脉冲串
- 独立定义每个脉冲组
- 定义脉冲间和脉冲内的跳频码型、频率和幅度
- 定义所有脉冲参数，包括开始时间、上升时间、结束时间、下降时间、脉宽、衰落、过冲和波纹
- 使用斜坡或用户自定义轮廓，定义参差 PRI
- 建立自定义脉冲序列，使用 AWG 的序列模式以优化内存、建立更多脉冲串
- 支持各种脉内调制类型，包括 FMMCW, 扫频、步进调频、巴克码、多相码、用户自定义步进调频和代码及自定义调制
- 定义天线波束特性，模拟目标回波
- 模拟多目标雷达信号

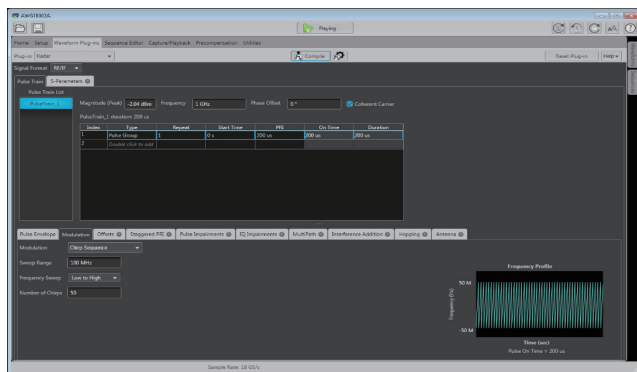


图 6. 产生 FMCW 雷达信号

### 4.1.2 预失真校准

AWG70000B 的 SourceXpress 校准功能可以进行信号预失真处理，使得 AWG 输出的宽带调制信号具有平坦的频响和线性相位响应。此外，还可以校准 fs/2 和 fs 之间的映像，从而为采样不足的信号提供平坦的响应，只需简单的操作就可以完成整个系统的校准。由于独有的在线闭环校准功能，通过简单的参数设置，便快捷地完成信号预失真，保证输出宽带调制信号有很好的平坦度和线性相位响应，完全能够达到宽带调制信号分析和测量的要求。校准软件界面见下图 7。

汽车雷达 FMCW 信号的带宽大于 500MHz，最大可达 4GHz 调制带宽，为保证信号的带内平坦度，需要进行预失真校准。可以利用泰克示波器或频谱仪对信号的幅度和相位进行闭环校准，以获得平坦的频率和线性相位响应。用户均可以通过指定起始和截止频率（射频和中频）或带宽（IQ/IQ 调制器）定义补偿带宽。预补偿插件适用于多种调制波形类型和应用，包括射频、中频或者 IQ 信号等。

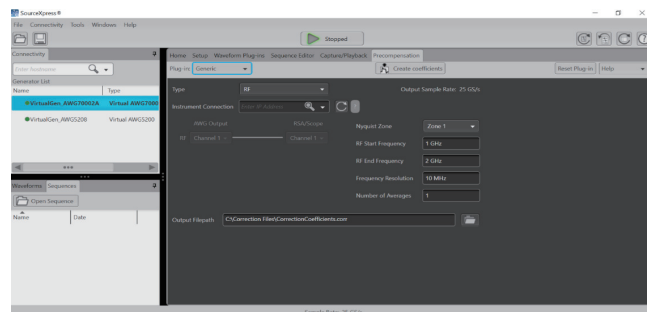


图 7. 预失真校准

从图 8 中，可以看到，校准完成后，AWG 在校准的频带范围内，幅度和相位的补偿情况。校准后可以把 DAC、电缆和 ADC 的幅度起伏和相位失真等影响消除，由于独有的在线闭环校准功能，该系统既可产生高保真宽带矢量信号，也可生成人为损伤信号，甚至是回放其它设备采集到的“真实世界”信号，即可知、可控及可重复地生成各种宽带矢量信号。

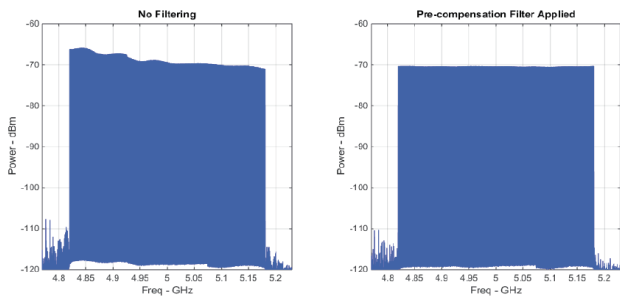


图 8. 预失真校准幅频特性图

### 4.1.3 泰克雷达信号产生系统指标

泰克毫米波雷达信号生成平台由任意波形产生器和内置本振的上变频器以及 SourceXpress 软件组成，主要性能指标如下：

- 1) 频率范围：76GHz~81GHz
- 2) 调制带宽：>4 GHz
- 3) 垂直分辨率：10 位
- 4) 产生雷达 FMCW 等复杂信号产生软件
- 5) 多目标雷达信号和干扰信号生成软件
- 6) 对 2 通道以上配置，可以扩充多个设置
- 7) 上变频器内置本振

### 4.2 泰克汽车毫米波雷达抗干扰性能测试方案

毫米波雷达抗干扰测试，需要产生单音信号、互调干扰，还需要产生复杂环境下各种干扰信号来验证评估雷达的抗干扰能力。

泰克的 AWG7000B 系列配合 SourceXpress 中的复杂电磁环境信号生成插件，产生复杂电磁环境下的雷达信号，模拟更加复杂的测试场景，可以将任意波形作为背景发射机，模拟当今复杂的电磁环境实现多雷达目标信号模拟的重要手段，干扰信号模拟，通信信号模拟，复杂电磁环境模拟等，为接收机的抗干扰能力测试提供了有力的工具，验证汽车雷达接收机的抗干扰能力。

泰克 AWG 中的复杂电磁环境插件可以模拟地面通信信号存在的潜在干扰、可以模拟车载毫米波雷达同类信号间的干扰等各种干扰信号。

#### 复杂电磁环境软件特点

- 模拟多部雷达在时域上的叠加特性
- 模拟复杂电磁环境，多信号和有干扰的情况
- 同时模拟雷达和通信信号同时存在的情况，并可以对背景噪声做设定
- 使用斜坡或用户自定义轮廓，定义参差 PRI
- 定义电波传播的多径特性
- 定义天线波束特性，模拟天线扫描波束特性
- 多部雷达实现快速的波形切换（40ps）

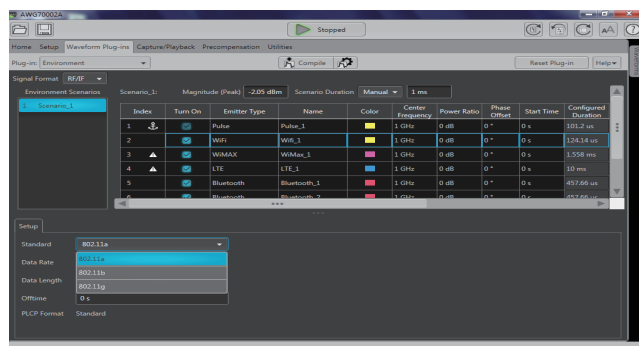


图 9. 复杂电磁环境信号和干扰信号信号生成

利用这个软件可以方便的生成复杂电磁环境中的各种信号，如雷达、噪声、通信、跳频信号、干扰信号、CDMA、UWB 等等，可以使得这些信号同频发出或者同时发出。

软件能产生的信号类型：

- 通用信号（包括数字调制，跳频等）
- UWB
- 雷达
- OFDM
- WIFI
- Wimax
- GSM
- CDMA
- W-CDMA
- DVB-T
- 自定义信号（根据数据文件调入）
- 噪声

这些信号模型都可以用拖拽的方式或者双击鼠标添加到右边的信号库里面，上图已经添加了 4 个信号模型，分别是雷达、噪声、OFDM 和通用信号，只需要通过一次编译，就可以按照设定好的方式将这 4 个信号按照时间顺序发出，当然该软件支持这 4 个信号同频或者同时发出。

这个软件支持可以添加 25 个信号在右边的信号库里面，当然这并不意味着该软件只能支持 25 个信号，其实没一个添加的信号都可以包括若干个相同类型的信号在里面。比如雷达模块添加了以后，可以将雷达模块的高级设定打开如下图所示：

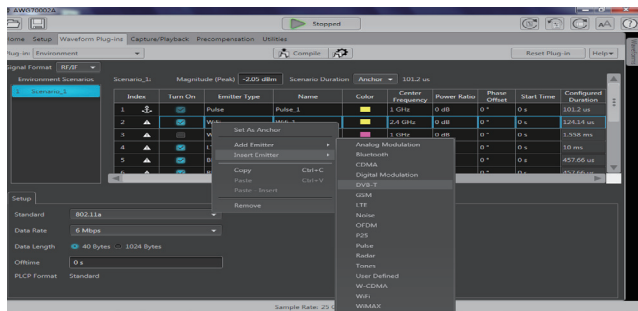


图 10. 复杂电磁环境雷达信号生成

从上图可以看到，在雷达信号库里面，实际上还可以包括若干个雷达信号，而每一个雷达信号都可以设定自己的载频，PRI，脉压方式，参差方式，是否有捷变等等，也可以设定雷达信号是否是同时到达。所以一个信号类型中就可以包括无数个相同类型的信号，模拟复杂电磁环境的真实状态。该软件可以实现数以百万计的信号类型的复杂程度，完全可以满足当前对复杂电磁环境下的汽车雷达信号模拟的需求。

### 4.3 泰克汽车毫米波雷达发射机测试方案

车载雷达系统的发射机进行测试，对雷达发送端发出的雷达信号进行分析，从而测试雷达信号的关键参数。泰克的雷达发射机测试方案以高性能实时示波器和实时频谱分析仪以及内置本振的下变频器作为硬件基础，配合 FMCW 信号分析软件组成了功能强大超宽带毫米波雷达发射机信号采集分析方案。



图 11. 超宽带毫米波雷达信号采集分析

由于雷达系统的复杂性和先进体制的出现，使得雷达发射机的测试变得更加复杂，需要对射频信号分别测试，如峰值功率、相位噪声、雷达信号的时间参数测试。对于宽带的毫米波雷达信号的时域和调制域分析，频谱仪和矢量信号分析仪的带宽都不能满足要求，当前信号分析仪的分析带宽小于 2GHz。对于带宽 4GHz 的超宽带汽车雷达信号而言，显然是不够的。为了能够分析宽带的雷达信号，利用实时示波器结合雷达信号分析软件来分析 FMCW 的线性调频的线性度和线性调频参数等调制域参数。对于射频性能指标仍然利用频谱分析仪进行验证测试。

泰克汽车雷达分析解决方案提供了独特的、专为 76GHz - 81GHz 频段优化内置本振的下变频器，下变频后输出信号范围为 2GHz ~ 7GHz 中频雷达信号通过实时示波器采集，然后利用 FMCW 分析软件进行精确的时域和调制域分析，对于射频指标通过实时频谱分析仪测试，实现了优良的汽车雷达分析解决方案，很大程度提高了分析解决方案的性能。

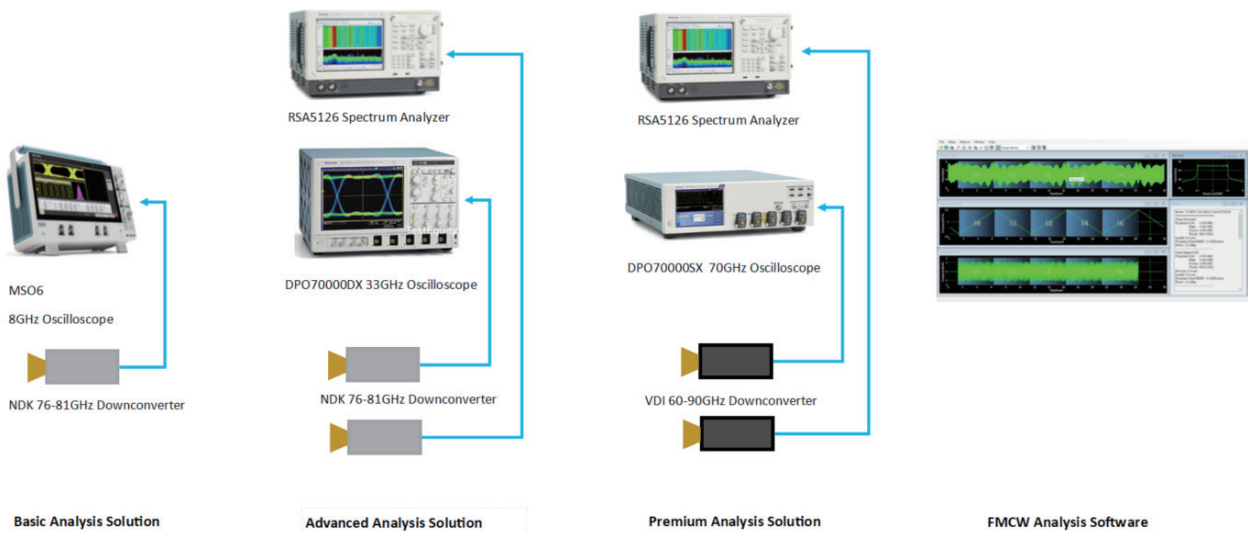


图 12. 下变频器 + 实时示波器 / 实时频谱仪分析 76GHz – 81GHz 雷达信号

泰克的汽车雷达信号分析系统是由内置本振的下变频器、高性能高精度实时示波器和专业的 FMCW 汽车雷达信号分析软件组成。与传统的雷达发射机信号测量平台不同，解决了工程师需要的测试难题。

超宽带毫米波雷达系统信号采集和分析基于泰克的高性能示波器 MSO64 或 DPO7000C\DX\SX 系列平台。其中泰克的 MSO64 高精度示波器具备业内最低的噪声、带宽可达 8GHz、四个输入通道、每通道 25GS/s 采样率、高精度 ADC、垂直分辨率为 12bit。为毫米波超宽带中频信号的采集提供了优异的采集硬件和高精度分析，同时采集平台具备业内最佳的噪声性能，确保了高带宽下，最佳的信号 SNR，为雷达信号测试系统提供优异的接收硬件。

泰克的高性能示波器 MSO64 或 DPO7000C\DX\SX 系列具备四个测量通道，非常适用于针对 MIMO 雷达传感器的多通道测量，以及测量信号的相关性。

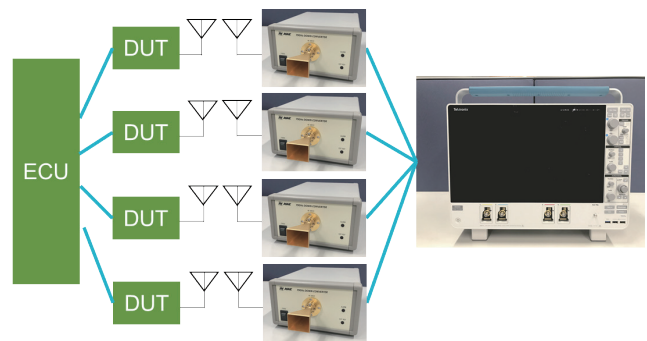


图 13. 下变频器 + 实时示波器 MIMO 雷达传感器的多通道信号分析方案

### 4.3.1 专业的汽车雷达 FMCW 信号分析软件

工程师经常抱怨要花太多的精力放在测试测量和分析上，而实时上工程师不得不花大量的精力去研究如何测试和分析雷达信号，但是没有测试结果的保证，工作是无法进行的。测试是一切研发的基础。即便要花大量的时间在测试上面，现在仍然有许多测试难题没有办法解决。

基于高性能实时示波器，配合强大汽车雷达 FMCW 连续波调频分析软件，可以通过简单的设置就把众多的参数都能够自动的测量出来，这些测量项目包括了频域、时域、调制域的测试项目。

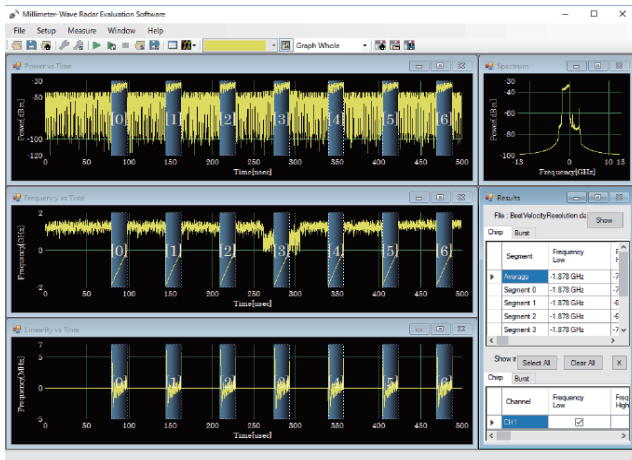


图 14. 毫米波雷达信号分析软件

该软件用来 FMCW 信号分析，自动检测线性调频区段，分析线性调频特点和参数，比如线性调频雷达信号的线性度等。可以帮助您缩短测量和分析所需的时间，不仅适合实验室环境研发，还适合生产应用。该软件既可以在 Windows PC 上运行，也可以在示波器上运行。在结合使用下变频器和高精度示波器，可以实现最佳性能。能帮助雷达研发人员解决问题并提高工作效率。

FMCW 线性调频分析特点

- 简便易用的用户界面，分析和测量波形
- 自动检测线性调频区段
- 开发功能
  - 线性调频线性度
  - 线性调频参数
- 生产功能
  - 快速 OBW 测量
  - 快速最大保持频谱测量
  - 远程命令控制

4.3.2 发射机雷达信号故障和射频指标测试

由于毫米波雷达系统的复杂性，使得雷达发射机的测试变得更加复杂，需要对射频信号分别测试，如峰值功率、相位噪声等射频参数测试需要实时频谱分析仪才能准确测量。发射机发出的 76GHz~81GHz 毫米波雷达信号通过下变频器变频后输出信号范围为 2GHz ~ 7GHz 中频雷达信号，通过实时频谱仪分析信号的射频指标，实现了优良的汽车雷达信号的射频参数分析。

泰克的实时频谱分析仪不但可以测试发射机雷达信号的射频参数指标，还可以对同频和突发瞬态干扰信号的监测。

Segment	Frequency Low	Frequency High	Frequency Center	Frequency Width	Center Frequency Min	Center Frequency Max	Center Frequency Deviation	RMS Frequency Deviation	RMS Frequency Deviation(%)	Max Frequency Deviation	Max Frequency Deviation(%)	Average Frequency	Position	Length	FM Slope	Frequency Error(RMS)	Power
Findings	-1.878 GHz	-7.25 MHz	-942.85 MHz	1.871 GHz	-942.87 MHz	-942.38 MHz	156.18 kHz	1.20 MHz	0.06 %	6.52 MHz	0.35 %	-943.41 MHz	-	18.85 usec	-	1.43 MHz/usec	-35.71 dBm
Segment 0	-1.878 GHz	-7.61 MHz	-942.72 MHz	1.870 GHz	-	-	-	1.21 MHz	0.06 %	6.04 MHz	0.32 %	-943.42 MHz	79.30 usec	18.05 usec	99.89 MHz/usec	1.43 MHz/usec	-35.65 dBm
Segment 1	-1.878 GHz	-6.53 MHz	-942.36 MHz	1.872 GHz	-	-	-	1.20 MHz	0.06 %	6.11 MHz	0.33 %	-943.42 MHz	144.31 usec	18.05 usec	99.89 MHz/usec	1.43 MHz/usec	-35.80 dBm
Segment 2	-1.878 GHz	-6.51 MHz	-942.56 MHz	1.871 GHz	-	-	-	1.20 MHz	0.06 %	6.24 MHz	0.33 %	-943.39 MHz	209.32 usec	18.65 usec	99.89 MHz/usec	1.44 MHz/usec	-35.65 dBm
Segment 3	-1.878 GHz	-7.73 MHz	-942.87 MHz	1.870 GHz	-	-	-	1.23 MHz	0.07 %	6.52 MHz	0.35 %	-943.42 MHz	274.34 usec	18.05 usec	99.89 MHz/usec	1.47 MHz/usec	-35.76 dBm
Segment 4	-1.878 GHz	-7.32 MHz	-942.69 MHz	1.871 GHz	-	-	-	1.19 MHz	0.06 %	6.15 MHz	0.33 %	-943.41 MHz	339.35 usec	18.65 usec	99.89 MHz/usec	1.41 MHz/usec	-35.65 dBm
Segment 5	-1.878 GHz	-7.55 MHz	-942.80 MHz	1.870 GHz	-	-	-	1.20 MHz	0.06 %	6.05 MHz	0.32 %	-943.42 MHz	404.36 usec	18.65 usec	99.89 MHz/usec	1.43 MHz/usec	-35.80 dBm
Segment 6	-1.878 GHz	-7.07 MHz	-942.58 MHz	1.871 GHz	-	-	-	1.21 MHz	0.06 %	6.28 MHz	0.34 %	-943.42 MHz	469.37 usec	18.65 usec	99.89 MHz/usec	1.43 MHz/usec	-35.65 dBm

图 15. 雷达信号分析结果列表

a) 发射机故障的发现和定位

面对越来越复杂的电磁环境，各种信号在在频域上相互重叠，并且信号出现和持续时间呈现随机性。传统非实时频谱仪很难对该复杂电磁环境进行监测，会漏掉很多真实存在的信号。通过采用 DPX<sup>®</sup> 频谱，泰克实时频谱分析仪可以在最大 165MHz 实时带宽范围内，在频域中可显示事件瞬变，带宽超过 165MHz，泰克实时频谱仪具有扫频 DPX 功能，方便在大频宽下查找复杂电磁环境下雷达频谱异常和瞬态干扰以及故障信号，并可以在位图显示中根据发生速率和频次在事件上标出不同颜色，以直观的方式查看瞬变信号行为。观察隐藏在大信号下的小信号、观察瞬态非稳定信号，帮工程师快速找到和发现雷达系统的干扰和故障。

实时频谱仪的功能是完成对雷达系统中工作的稳定信号和各种动态瞬变信号及干扰信号的观测。具备发现瞬态信号和突发信号的能力，具有瞬态信号的捕获能力，以及对信号强大的分析能力。图 16 是发现雷达发射机本振泄露故障问题，利用 DPX 技术可以轻松地发现以往传统方式很难发现的本振泄漏和间断噪声。在 DPX 显示方式下，频谱中存在的问题一幕了然，瞬间就可以正确的得到频谱的概况。而右边的传统显示方式下，非常难以发现频谱中存在的异常问题。

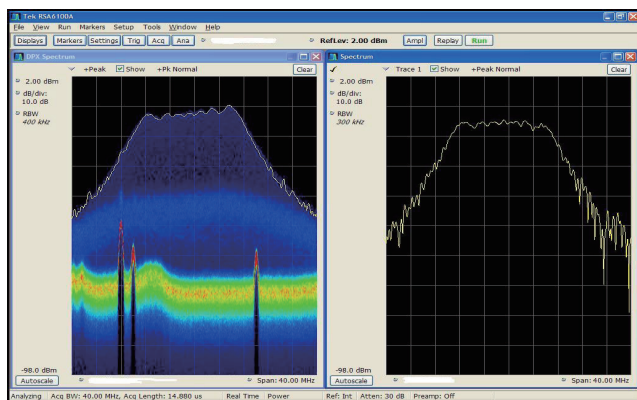


图 16. DPX 发现本振泄露信号。

相位噪声和发射功率测试

工程师还需要对发射机载波信号的发射功率、杂散、相位噪声等参数测量，泰克的实时频谱分析仪可以自动对相位噪声、发射功率、平均功率、峰值功率以及杂散等射频参数进行测量。

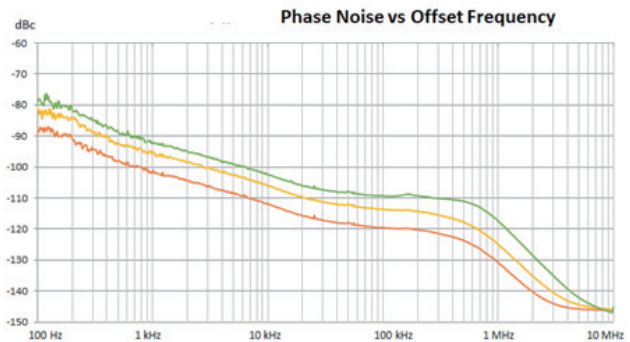


图 17. 实时频谱分析仪相位噪声测试

4.3.3 泰克毫米波雷达信号分析系统指标

泰克毫米波雷达信号分析系统由内置本振的下变频器、实时频谱分析仪、高性能实时示波器以及 FMCW 信号分析软件组成，主要性能指标如下：

- 1) 接收频率范围：76GHz~81GHz
- 2) 分析带宽：>4 GHz
- 3) ADC 硬件垂直分辨率：12 位
- 4) 实时采样率：25GS/s
- 5) 专业的雷达 FMCW 信号分析软件
- 6) 支持 4 通道同时测试
- 7) 下变频器内置本振



## 5. 配置列表

分系统名称	推荐采用仪器名称	参考型号
毫米波 雷达信号 产生单元	任意波形产生器	AWG70001B, 带有 AC 选项
	信号生成软件	SourceXpress RADARNL-SS01
	集成本振的上变 频器 76-81GHz	NDK
毫米波 雷达信号 分析单元	高性能示波器	MSO64-8000 带 Windows 选件 或 DPO70000C/ DX/SX
	信号分析软件	FMCW
	集成本振的下变 频器 76-81GHz	NDK
	喇叭天线	WR12
	实时频谱分析仪	RSA5115B 或 RSA5126B

## 6. 总结

综上所述，泰克为超宽带毫米波雷达信号系统为 4GHz 的带宽在 76~81GHz 频率范围内提供了性能优异的超宽带毫米波雷达信号产生与采集分析系统，为汽车雷达系统的研究和生产提供了高效并且强大有力的硬件实验能力，加速了汽车雷达系统的研究。泰克的超宽带毫米波雷达信号测试方案以其独特的性能和丰富功能实现了已往无法测量的重要项目，简单易用的雷达信号产生软件和 FMCW 雷达信号分析软件完美实现对雷达信号的仿真和分析，大大提高了工程师的工作效率。



泰克官方微信

**如需所有最新配套资料，请立即与泰克本地代表联系！**

**或登录泰克公司中文网站：[www.tek.com.cn](http://www.tek.com.cn)**

**泰克中国客户服务中心全国热线：400-820-5835**

**泰克科技(中国)有限公司**

上海市浦东新区川桥路1227号  
邮编：201206  
电话：(86 21) 5031 2000  
传真：(86 21) 5899 3156

**泰克北京办事处**

北京市朝阳区酒仙桥路6号院  
电子城·国际电子总部二期  
七号楼2层203单元  
邮编：100015  
电话：(86 10) 5795 0700  
传真：(86 10) 6235 1236

**泰克上海办事处**

上海市长宁区福泉北路518号  
9座5楼  
邮编：200335  
电话：(86 21) 3397 0800  
传真：(86 21) 6289 7267

**泰克深圳办事处**

深圳市深南东路5002号  
信兴广场地王商业大厦3001-3002室  
邮编：518008  
电话：(86 755) 8246 0909  
传真：(86 755) 8246 1539

**泰克成都办事处**

成都市锦江区三色路38号  
博瑞创意成都B座1604  
邮编：610063  
电话：(86 28) 6530 4900  
传真：(86 28) 8527 0053

**泰克西安办事处**

西安市二环南路西段88号  
老三届世纪星大厦26层L座  
邮编：710065  
电话：(86 29) 8723 1794  
传真：(86 29) 8721 8549

**泰克武汉办事处**

武汉市洪山区珞喻路726号  
华美达大酒店702室  
邮编：430074  
电话：(86 27) 8781 2760

**泰克香港办事处**

香港九龙尖沙咀弥敦道132号  
美丽华大厦808-809室  
电话：(852) 2585 6688  
传真：(852) 2598 6260

更多宝贵资源，敬请登录：[WWW.TEK.COM.CN](http://WWW.TEK.COM.CN)

© 年泰克科技版权所有，侵权必究。泰克产品受到美国和其他国家已经签发及正在申请的专利保护。本资料中的信息代替此前出版的所有材料中的信息。本文中的技术数据和价格如有变更，恕不另行通告。TEKTRONIX 和 TEK 是泰克科技公司的注册商标。本文中提到的所有其他商号均为各自公司的服务标志、商标或注册商标。

2020年2月

