

雷达系统和组件测试概要

本应用文档对常见的雷达系统进行了简要阐述，介绍了利用 R&S 测试测量设备进行雷达系统和组件测量的技术与解决方案。

本文档以 R&S Application Notes 1MA 127_1e（英文版）为基础翻译整理而成。



内容:

1 摘要.....	1
2 典型雷达应用和常见雷达类型概论.....	4
典型雷达应用.....	4
雷达频段和应用.....	5
常见雷达类型.....	6
连续波和调频连续波雷达.....	6
简单的脉冲和脉冲多普勒雷达.....	7
脉冲压缩雷达.....	8
捷变频雷达(抑制干扰和改善杂波抑制).....	9
步进跳频频率雷达.....	9
活动目标指示雷达(MTI).....	10
单脉冲雷达.....	10
相控阵雷达.....	11
合成孔径雷达(SAR).....	11
双基地/多基地雷达.....	12
无源雷达.....	12
低截获率雷达.....	12
测量雷达.....	13
多模雷达.....	13
未来雷达技术展望.....	13
3 雷达系统和部件的典型试验.....	13
发射机测试.....	13
使用功率计测量输出功率	
使用频谱分析仪测量脉冲功率和频谱	
使用频谱分析仪进行零扫宽测量(Zero-span)	
时域功率	
信道功率	
占用带宽(OBW)	
使用频谱分析仪和解调选件测试脉冲压缩雷达系统	
简单的接收机测试.....	27
雷达组件测试.....	27
噪声系数.....	28
信号源替代雷达组件.....	29
产生和加载复杂雷达信号.....	31
测量本振的相位噪声(STALOs 和 COHOs).....	33
使用功率计进行功率损耗测试.....	35
放大器测试- 脉冲状态下的 S 参数测试.....	35
脉内单点测量.....	36
脉冲形状测量.....	37
天线测试(近场,远场).....	38
雷达截面测试.....	40
4 R&S 针对雷达测试的仪器.....	42
R&S SMF100A 的微波信号源: 专门针对雷达性能测试的特点	
R&S SMA100A 的信号源:本振源的完美替代	

R&S SMU200A 矢量信号源:多功能宽带数字调制

R&S K6 脉冲序列软件

AFQ100A/B 的任意波形发生器:应对雷达基带信号产生新需求

R&S NRP 功率计:同时处理多达 4 个探头

R&S NRP-Z51/55 功率探头:热敏探头保证了最高的精确度

R&S NRP-Z81 功率探头:脉冲雷达信号功率分析的理想选择

R&S FSU 频谱分析仪系列,高达 67GHz 无需外部混频器的单表解决方案

R&S FSQ40 信号分析仪:矢量分析和频谱分析合二为一

R&S FSUP 信号源分析仪:信号源综合分析的理想选择

矢量网络分析仪

R&S ZVA 系列:无可比拟的测量速度和精度

R&S ZVT8 和 ZVT20:唯一的八端口矢量网络分析仪

5 缩写.....	53
6 参考文献.....	55
7 附加信息.....	55

1 摘要

本应用文档简要介绍了常见雷达系统。介绍了如何利用 R&S 测试测量设备对雷达与组件进行测量的技术与解决方案。

2 典型雷达应用和常见雷达类型概述

典型雷达应用

以下列出了雷达系统的典型应用。

监视

军事、民用航空交通管制、地面、空中、沿海警戒、卫星

搜索和跟踪

军事目标搜索和跟踪

火控

为火控系统提供信息(主要包括目标方位、仰角、距离和速度)。

导航

卫星、航空、航海、陆地导航

汽车

碰撞警告，自适应巡航控制(ACC)，避免碰撞

液位距离测量

液体的液位监控，距离测量等等。

近炸引信

军事用途: 制导武器系统需要一个接近触发引信爆炸弹头

高度计

飞机或太空船的高度计，为民用和军用使用

地形回避

机载军事应用

二次雷达,

异频雷达收发机，接收目标反射的编码信号

气象

避免风暴，变风警告，气象测绘

空间,

军事基地监视、地面测绘，空间环境探索

安全

隐藏武器检测、军事基地监视

3 雷达频段和应用

频带	频段	波长	应用
HF (高频)	3-30MHz	10-100m	海岸雷达系统, 超远程电离层雷达; HF 为“高频 (high frequency)”的缩写
P	<300MHz	1m+	“P”由“previous”而来, 应用于早期雷达系统
UHF (特高频)	300-1000MHz	0.3-1m	远程(例如弹道导弹预警)、地面渗透、植物渗透; UHF 为“特高频 (ultra high frequency)”的缩写
L	1-2GHz	15-30cm	远程空中交通管制和监视; “L”为“长 (long)”的缩写
S	2-4GHz	7.5-15cm	空中交通管制系统、远程气象雷达、海洋的雷达; “S”为“短(short)”的缩写。
C	4-8GHz	3.75-7.5cm	卫星转发器, 位于 X 和 S 波段之间(因此 C 为“折中 (compromise)”的缩写), 气象雷达
X	8-12GHz	2.5-3.75cm	导弹制导雷达、船舶、气象雷达, 中等分辨率测绘, 常用于地面监视; 在美国, 10.525GHz±25MHz 的频段用于机场雷达。命名为 X 波段, 是因为在二战期间此频率用于保密。
Ku	12-18GHz	1.67-2.5cm	高分辨率测绘、卫星高度计; 频率在 K 波段以下(under), 因此为“u”。
K	18-27GHz	1.11-1.67cm	K 波段用于气象学者检测云层及警方侦测超速驾车。K 波段雷达工作在 24.150±0.100GHz。
Ka	27-40GHz	0.75-1.11	测绘, 短程、机场管制; 频率处于 K 波段以上 (above), 因此为“a”; 用于摄像雷达, 用来触发相机拍摄闯红灯车辆的车牌, 工作在 34.300±0.100GHz。
mm	40-300GHz	7.5mm-1mm	毫米波, 细分如下所示。这些代表字母似乎是随机的, 并且不同频率范围对应不同的波导尺寸。不同的组织会采用不同的字母来代表这些不同的波段。
Q	40-60GHz	7.5mm-5mm	用于军事通信
V	50-75GHz	6.0-4mm	非常强烈地被大气层吸收
W	75-110GHz	2.7-4.0mm	76GHz 远程(LRR)和 79GHz 短程(SRR)汽车雷达、高分辨率的气象观测和成像

常见雷达类型

这部分列出常见的雷达系统并简要介绍它们的工作原理。

连续波与调频连续波雷达

固定频率的连续波(CW型)雷达系统可用于测量速度。但是,它不能提供任何距离信息。天线发射某一固定频率的信号。在移动目标(例如汽车)上反射回来的信号产生了多普勒频移。也就是说会在略微偏移的频率上接收到反射信号。通过比较收发信号的频率,我们可以确定目标的径向速度(而不是距离)。基于这个原理,一个典型的应用是交通监测雷达。

雷达移动传感器也是基于相同的原理,但由于可能存在变化的干扰环境,它们还必须具有能够检测缓慢变化场强的能力。

交警使用的超速检测雷达(speed traps)也是采用这种技术。如果一个特定距离的目标超速了,摄影机就拍下照片。



图 1: 现代交通监测雷达

军事上的应用:

连续波雷达也用于目标雷达波束照射。这是一个简明应用:利用一个目标跟踪雷达,雷达波束保持在目标上。制导的防空导弹就是利用此目标的反射。

连续波雷达比较难以被探测到,因此,它们归类为低截获概率雷达。

连续波雷达很适合检测低空飞行的飞机,这些飞机试图通过贴近地面的飞行来克服敌方的防卫。脉冲雷达很难区分地面回波和低空飞机的反射波。连续波雷达克服了这一点,因为它可以忽略那些缓慢变化的地面回波而只对移动目标的反射信号进行精准定位。捕获的信息可再传送给协同作业的脉冲雷达进行进一步的分析和处理[4]。

调频连续波雷达

连续波雷达系统的缺点是由于缺少一个时间参考因而不能用来测量距离。然而,可以利用“调频连续波”雷达产生时间参考来测量静止目标的距离。此方法的原理是:发送一频率呈周期性变化的信号。当接收到回波信号时,就会得到一个类似脉冲雷达的延迟。可以通过比较收发信号的频率来确定延时从而得到距离。可以采用更加复杂的调频模式(如噪声雷达),使得在相同的重复周期内得到最大的无模糊测量距离。然而,

最简单的情况是采用基本的锯齿波或三角波调频,这只能得到相对较小的无模糊测量距离。

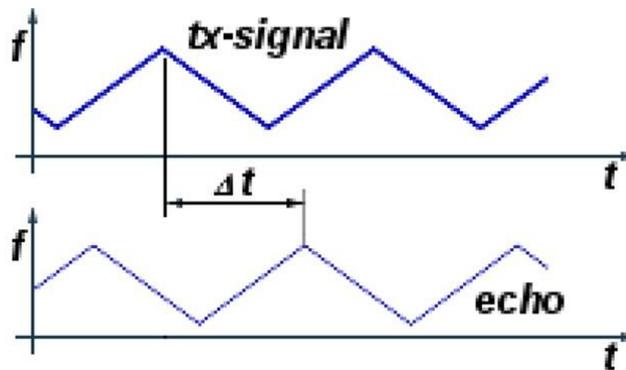


图 2: 调频连续波雷达的基本工作原理。
目标距离是基于发射信号和回波之间的延迟计算得到

此类测距原理有以下应用:例如,在飞机上测量高度(无线高度表)或用地面跟踪雷达来保持固定的离地高度。相比脉冲测量雷达而言,它的优点是可提供连续的测量结果(相对于各种脉冲重复频率下的离散时刻)。

调频连续波雷达也常用于另一些民用的测距应用,如物位指示器。

简单的脉冲和脉冲多普勒雷达

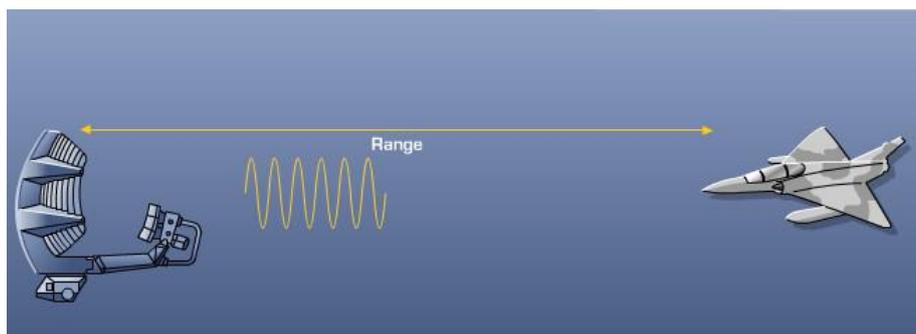


图 3: 一个简单的脉冲雷达系统的基本原理

一个简单的脉冲雷达系统只能通过测量脉冲发送和接收的时间差来提供被测目标的距离信息,它不能确定目标的速度。脉冲宽度决定了空间分辨率。

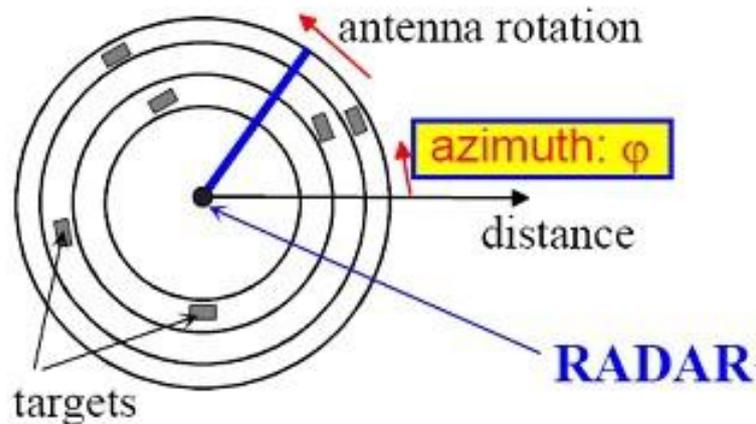


图 4:带旋转天线的雷达系统测量方位角信息

接收脉冲时，每个瞬间旋转天线指向特定的辐射方向，因此可得到方向信息(方位角 φ)。

此类(非相干)雷达设备的主要测试包括：距离精度和分辨率,接收机自动增益控制 (AGC) 处理时间、峰值功率、频率稳定度，本振相位噪声以及所有的脉冲参数。

脉冲多普勒雷达

除了提供目标距离信息（以及方向信息），脉冲多普勒雷达还提供目标径向速度信息，雷达发射机和接收机相参工作时，速度信息就可以从脉冲和脉冲之间的相位变化中获得。通常使用 I/Q 解调的方式。为了避免距离和速度模糊，最新的脉冲多普勒雷达根据需要采用变脉冲重频 (PRF) 的技术，脉冲重复频率变化范围一般从几百 Hz 到 500 KHz。

另外，更为先进的脉冲多普勒雷达系统采用一种“交错”的脉冲重频 (PRF)，即根据探测过程需要，交替变换脉冲重频。要获得脉冲多普勒系统高的性能，需要非常低的本振 (LO) 相位噪声，低的接收机噪声，低的 I/Q 增益相位不平衡度（以避免虚假的目标信息）。

脉冲压缩雷达

传统的脉冲雷达和脉冲多普勒雷达，为了获得高的距离分辨率，需要发射非常短的脉冲，但短脉冲意味着发射的信号能量低，作用距离减小。增加脉冲功率，可以增加作用距离，但发射功率的提高，是很有限的，而且成本会很高。远的作用距离和高距离分辨率之间在实现中存在矛盾。

脉冲压缩体制利用脉冲内的调制，很大程度上解决了作用距离和距离分辨率之间矛盾。充分利用了宽脉冲提供的大的作用距离和短脉冲提供的高分辨率分别带来的好处。并可以使用低的脉冲功率。

通过调制脉冲，在脉冲之间建立时间上的参考，和调频连续波 (FMCW) 的情况类似。常用的调制方式：

- 线性调频
- 非线性调频

- 脉冲相位编码
- 多相调制和时-频编码调制

尽管脉冲压缩雷达具有低脉冲功率时获得远的作用距离和高的分辨率的优点，但也存在一个明显的不足，最短的作用距离受到脉冲宽度的限制，在脉冲发射时间，接收机是阻塞的。在空中交通管制的应用中，由于脉冲压缩雷达这一主要不足，往往采用两种技术，远距离时采用调频脉冲，而近距离时则采用非常短的脉冲，而近距离时，不需要大的发射功率。

—线性调频应用最广泛；

—非线性调频尽管有许多优点，但迄今用的很少；

—脉冲相位编码应用非常广泛，尤其长度为 11 和 13 码元的巴克码（Barker）调制；

—先进的军用雷达系统中，特殊编码的多相调制的脉冲压缩技术的应用正逐步增加。

捷变频雷达（FAR）（抗阻塞干扰和杂波抑制）

跳频是雷达系统对付阻塞干扰和电子对抗（ECCM）的有效方法，通常用在军用雷达技术中。采用 FAR 还具有到杂波抑制的功能。典型参数：小于 1 μ s 的切换时间，X 波段几百 MHz 的跳变带宽，W 波段（95GHz）2GHz 的跳变带宽。

另外一些与 FAR 相关的测量参数包括，频率切换时间、频率跳变序列、切换杂散以及宽带幅度相位稳定性等。

步进跳频雷达

步进跳频雷达多见成像应用，跳频带宽从几百 MHz 到 2GHz，分辨率达到 10cm。

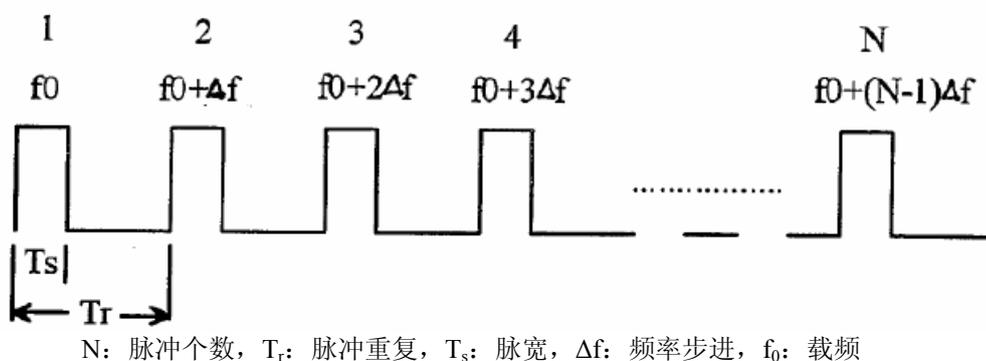


图 5 步进跳频时域示意图

脉冲到脉冲之间，频率以固定步进变化。典型应用一个跳变周期包括 128 个脉冲。步进跳频的优点是，宽带范围内频率跳变获得很宽的带宽，从而获得高的分辨率，而无需很大的瞬时带宽。

由于发射机和接收机的要求很大的射频带宽，这些子系统必须具有非常好的幅度和相位稳定性，以获得高的分辨率。因此，测量脉冲一脉冲之间幅度相位稳定性非常重要。又如捷变频雷达（FAR）一样，本振在跳变过程中的设定时间也是一个重要的测量参数。

活动目标指示雷达 (MTI)

活动目标指示雷达 (MTI) 的基本思想是抑制固定的或慢速运动的目标的反射, 如固定建筑物、山体、云、水波等杂波, 以获取运动目标, 如飞行物、车辆的反射并指示。此时, 由于多普勒效应使得相对于雷达径向运动的目标回波与发射机频率之间产生频差, 这一频差正比于相对径向速度 (对线性调频雷达而言)。对脉冲雷达系统, 运动目标的回波相对于发射信号而言, 产生脉冲之间相位变化。

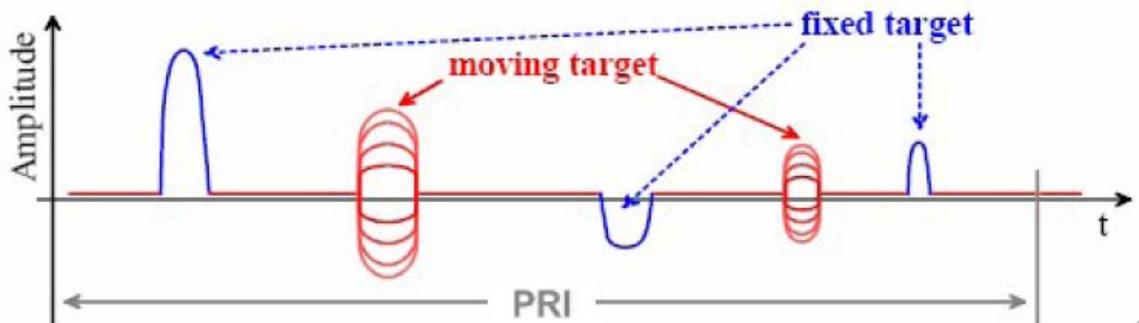


图 6 活动目标指示雷达

MTI 的优化应用, 需要一些经验, 如交错 PRF (脉冲之间的时间间隔可按一定规律变化) 从而避开所谓的盲速。对优化的 MTI 或杂波抑制而言, 重要的测量参数有:

对发射信号脉冲一脉冲之间的幅度相位稳定性; 本振信号的相位噪声和高稳定性, 尤其对测量慢速运动的目标探测而言, 低的相位噪声尤其重要。

单脉冲雷达

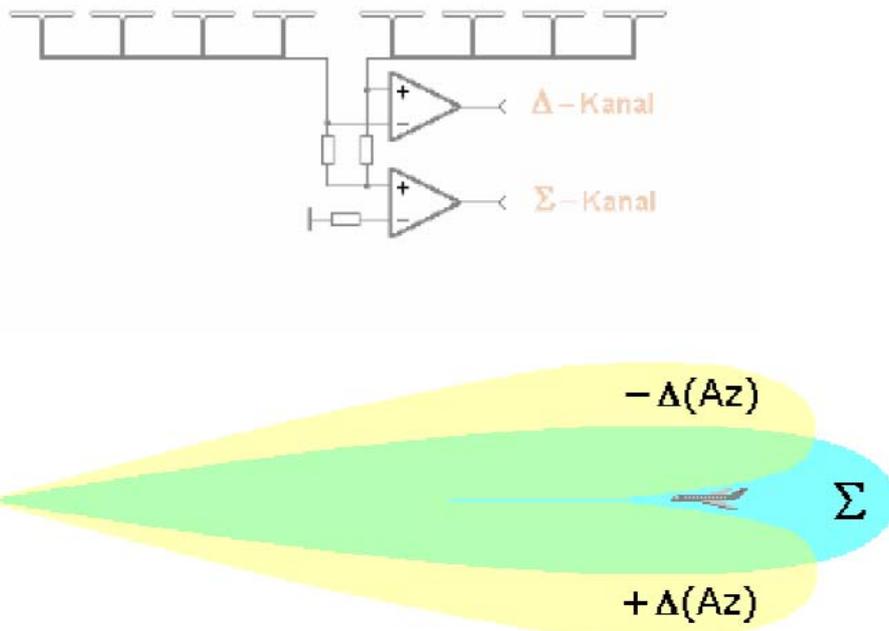


图 7 单脉冲雷达天线

单脉冲雷达系统中, 至少需要采用空间分离的两组天线。通过比较和差通道, 可以定位雷达波束照射范围内的目标。左右通道的反相耦合形成差通道 (ΔAz), 即方位差通道。在指向的方向上, 和通道得到最大值, 同时差通道最小值。由于和通道

(Σ) 和差通道 (Δ) 在一个脉冲回波就可以得到结果。所以，一个脉冲就可足以计算目标位置。（常常将这样组合天线的方式称为单脉冲天线）。

和通道与差通道的比值提供了实际目标的指向和天线轴线（“前视”）的偏离程度，天线前视和目标实际的方位角之间的差别就是大家所熟知的“前视偏向角”。

三维雷达系统中，俯仰角测量采用相同的技术，需要一个俯仰差通道作为第二差通道 (ΔE_1)。

通道之间的一致性，对象单脉冲雷达这样的多通道系统而言至关重要，为此，通常要求相位相参的合成器的相位偏差可调。

相控阵雷达

和反射天线只有一个辐射单元不同，相控阵雷达天线具有几百甚至几千个独立的辐射单元。馈送到每个辐射单元信号的幅度、相位可以分别独立控制，从而可以获得任何所需要的辐射方向形状（方向图）。实际应用中，方向辐射可以在 $\pm 60^\circ$ 范围内调整。与传统机械扫描天线不同，相控阵天线方向图的调整通过改变各单元馈电幅度和相位实现，所需时间非常短，几乎没有延时。

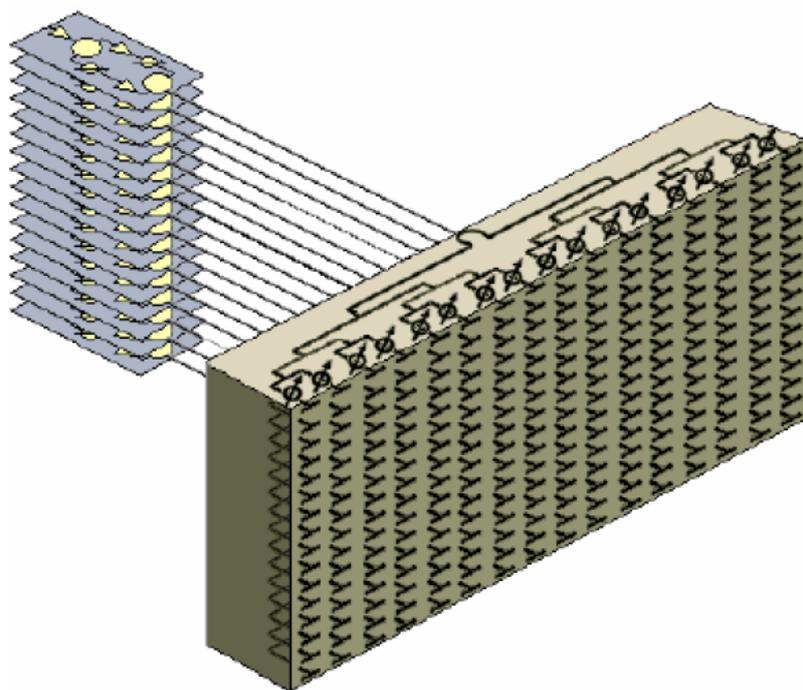


图 8 有源电扫描相控阵天线 (AESA)

相控阵造价非常高，主要应用于军事领域和合成孔径雷达 (SAR) 的卫星应用。有源相控阵 (AESA) 每个辐射单元都有独立的发射/接收模块 (T/R)，而无源相控阵 (PESA) 则使用共同的 RF 信号，每个单元通过移相器进行调整。

对 AESA 而言，不同 T/R 模块的幅相一致性非常重要，需要精确测试和测量。

合成孔径雷达 (SAR)

合成孔径雷达 (SAR)，与真实孔径雷达 (RAR) 一样，都属于成像雷达。此类雷达系统安装于机载或星载平台，通过电磁波扫描地球表面，而获得地面二维图象。

SAR 基本原理是，包含一个沿辐射方向垂直的路径移动的天线，位置全程已知，运动方向通常称为“迹轨方向 (Along Track)”或方位方向，而相应垂直于运动的方

向称为“斜距方向 (Cross Track)”。而所谓“脚印 (footprint)”是指真实孔径照射的区域，所谓“刈幅 (swath)”则指沿运动方向扫过的一个条带。

SAR 让雷达在轨道上运动，并按一定的重复频率发射雷达信号，将连续的不同位置的信号加以综合，增加了时间带宽积。可以等效为天线长度在运动方向增加，等效波束变窄，提高分辨率。在距离方向，SAR 的信号仍可以采用宽带信号，以获得高的分辨率。

沿运动方向的分辨率可以达到真实天线尺寸的一半。真实天线的长度减小一半，分辨率改善一倍。

$$\delta_{Az} = \frac{L_{Az}}{2} \quad [2], [3]$$

斜距方向的分辨率由信号带宽决定，

$$\delta_{sl} = \frac{C_0}{2B_R} \quad (C_0 - \text{光速}) \quad [2], [3]$$

如果需要达到 1m 的分辨率，信号带宽达到 150MHz。现代的 SAR 带宽大于 1GHz，（有时需要 2GHz 带宽），分辨率达到小于 10cm。

信号带宽通常由脉冲压缩获得，如线性调频。更先进的 SAR 采用步进跳频、极化开关，以及其他复杂技术。

双基地/多基地雷达

大多数情况下，雷达发射机和接收机利用同一天线，通过时间上的切换实现多工。这种雷达称作“单基地雷达”，双基地雷达具有一部发射机，而在另外的地点具有一部或多部接收机。收发天线之间相隔很远距离或很大的空间角。单基地雷达通过增加另外的接收机就很容易构成一部多基地雷达。或者，采用两部工作于同频率的单基地雷达构成一部多基地雷达。

多基地雷达收发部分距离很远或具有很大的空间角。这就意味着，在某些情况下，由于目标反射等原因，单基地雷达无法接收到信号时，多基地雷达仍能接收到信号。所以，这种雷达往往应用于气象雷达和军用反隐身雷达。

当系统采用多个分布的接收机时，我们称之为多基地雷达。

无源（被动）雷达

无源（被动）雷达是一种定位技术，不同于传统的雷达，无源雷达不发射电磁波信号，而是接收、跟踪已知的广播发射机、移动电台和其他系统所发射出来的信号照射到目标上后产生的反射和多普勒效应。无源（被动）雷达很难被侦查到，因为它不发射任何信号。这在军事上具有重要应用。另一军事应用是无源（被动）雷达在对隐身飞机探测，目前有源雷达技术对此问题的解决是有限的。

当然，由于无源（被动）雷达无发射机，接收机测量将会是非常复杂。在测量解决方案中，常常包含多路相干的信号源。

低截获率雷达

低截获率 (LPI) 雷达是面向电子战环境发展的军用雷达系统。或多或少地，这种 LPI 雷达，躲过电子情报系统 (ELINT) 的侦测。LPI 雷达采用了如下技术：

- 多基地雷达

- 超低副瓣天线
- 超宽带信号
- 长脉冲
- 低功率
- 无源雷达

测量雷达

测量雷达系统测量评估雷达（如：极化捷变雷达）信号极化信息（水平、垂直、圆极化），以获取更多的目标信息。

校准这一类雷达，需要在常规相干雷达测量基础上，增加必要的极化测量。

多模雷达

现今，许多军用雷达系统需要完成大量的任务，所以必须采用多种模式。

目标搜索和跟踪

- 武器制导
- 高分辨率地面测绘
- 恶劣天气预测
- 电子对抗

在这些应用中，采用不同的脉冲重复频率（PRF）和调制模式。调频脉冲（Chirp）、脉内巴克码（Barker）调制以及复杂调制、AESA 天线、SAR、跳频、变极化等。

测量这样的多模雷达系统是复杂，费用很高的。

未来雷达技术展望

未来，我们期待见到包含有雷达系统和红外系统的多传感器系统，这样可以将各自的优点紧密的连接在一起，以克服各自特定的缺点。

军用机载雷达系统将会不断面临先进战斗机隐蔽偷袭的威胁。今后，一架战斗机既要有隐蔽偷袭功能，又不能在使用机载雷达时暴露自己，这是一对必须要解决的矛盾。解决这个问题可能就是采用双基地雷达，即在飞机上只有发射机或只有接收机。

雷达天线将不再作为一个放在罩子里独立的部件单元，它将和飞机（轮船或其他平台）的几何结构共形。下一代 AESA 机载雷达系统将会有多幅天线阵列，从而获得更大的空间扫描角。

雷达的数据处理部分的速度将大大提高（通过并行处理的方式），以适应处理更高的数据率，从而可得到更高的分辨率。

3 雷达系统和部件的典型测试

这一章将讨论雷达系统和部件的一些典型测试

发射机测试

使用功率计测量输出功率

发射机的输出功率是评估雷达系统性能的关键指标之一，我们必须要进行准确测试，最常用简便的方法就是使用功率计进行测量。

由于雷达系统的发射功率很高（脉冲功率电平可能达到几千瓦或几兆瓦），测量时我们需要使用定向耦合器和衰减器，以确保测量仪器设备的安全。

有许多名词术语用来描述发射机的功率特性，如图 10 和图 11 所示。平均功率是指整个脉冲周期内的积分结果（脉冲重复时间=脉冲打开时间+脉冲关断时间）。对于可变的脉冲宽度或脉冲重复频率（PRF）而言，积分时间必须是整个周期的整数倍。

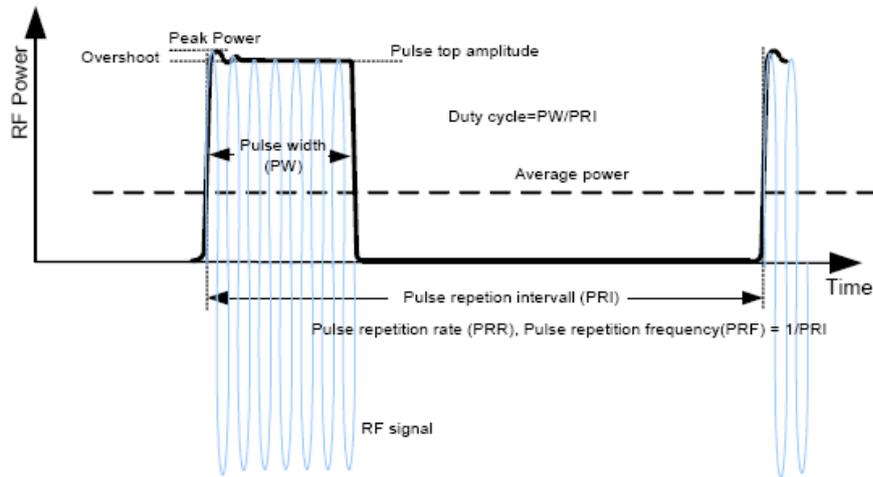


图 10 功率相关的脉冲参数

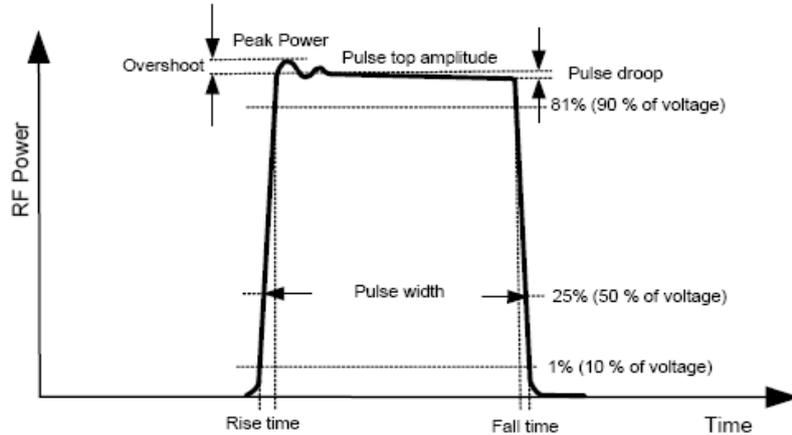


图 11 更多功率相关的脉冲参数

传统的射频功率计用来测量平均功率。例如 R&S NRP-Z51/Z55 高精度热敏探头，频率范围从 DC 到 40GHz。

峰值功率为整个脉冲周期内的最大功率。脉冲功率是指整个脉冲内的平均功率（对整个脉冲内的功率进行积分）。

如果我们知道占空比或脉冲宽度和脉冲重复间隔（PRI），我们能够通过平均功率计算出脉冲功率；或者通过下式估算出脉冲功率（对于非理想脉冲而言）：

$$P_{Pulse} = \frac{PRI}{Pulse_width} * P_{Av}$$

这里：Pav=平均功率，Ppulse=脉冲功率，PRI=脉冲重复间隔

如果脉冲为理想的矩形脉冲，脉冲功率将和峰值功率相等。需要特别注意的是，脉冲的峰值很容易造成功率探头的过载（尤其当占空比非常小的时候）。R&S NRP-Z51/Z55 的最大承受脉冲能量为 10W/uS。

例如：

Pav=20mW（假设采用 R&S NRP-Z51/Z55 功率探头）

PW=1us

$PRI = 1ms$

计算得到脉冲功率 $P_{pulse} = 20W$ （这个数值是该探头能承受的最大脉冲能量的两倍）

对于任何雷达系统而言，脉冲功率指标是最重要的。因此我们就有必要研究各个脉冲的特性。尤其对于变脉宽（或变 PRF）先进雷达系统而言，脉冲特性指标尤为重要，我们需要分析脉冲波形（包括上升沿陡峭程度、过冲、脉冲沉降等）。适合这类测试的仪器设备有：宽带功率计，如具有多功能的 R&S NRP-Z81 功率计；零 SPAN 模式下有很宽中频带宽的频谱仪，相对于功率计而言，它可以获得更加灵活的测量参数。



图 12 可配置各种型号探头的 R&S NRP 功率计，一台主机最多可以连接 4 个探头

R&S NRP-Z81 功率探头基于最新的功率测量技术，它具备了传统峰值功率计的所有测量功能，尺寸非常紧凑，连接功率计主机或 PC 机后可以进行雷达发射机测试。由于雷达脉冲信号测试的精度和测试项目要求较高，R&S NRP-Z81 是这类测试的非常理想选择，它的分析带宽高达 30MHz，非常适合单个脉冲的分析。另外，R&S NRP-Z81 也可以进行精确的平均值功率测量，功率电平范围为：-60dBm-+20dBm，频率范围：50MHz-18GHz。

R&S Power Viewer Plus 是一个使用便利的软件，提供了很多通用的测量功能，如连续平均功率、测量轨迹、统计数据等。可以同时将 4 个探头连接在同一台 PC 电脑的 USB 端口上，4 个不同的测量结果同时显示在软件界面上。

同时还支持各种触发功能（如内部出触发、外部触发、门限触发），确保了正确的测量结果。

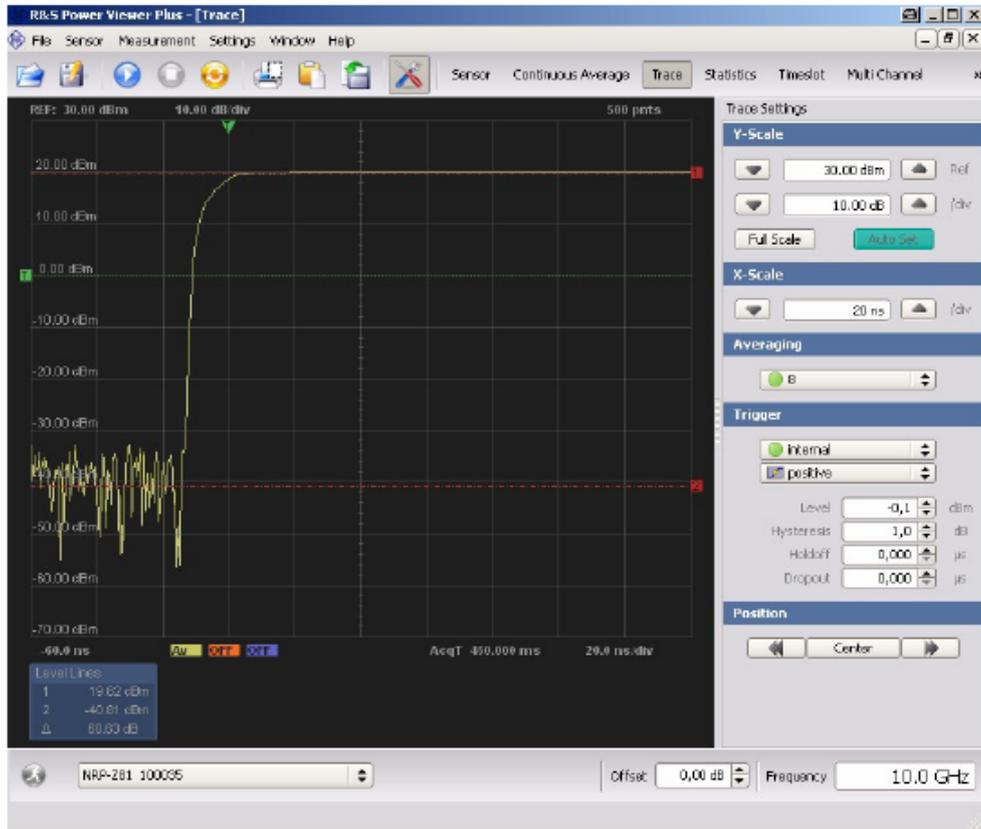


图 13 R&S Power Viewer Plus 的用户界面
 (轨迹显示了功率对时间的关系，使用了 NRP-Z81 功率探头，动态范围大约 60dB)

对于周期信号而言，**Power Viewer Plus** 软件提供了很高的时间显示分辨率。结合 NRP-Z81 功率探头，可以测量得到非常陡峭的时域波形，如图 14 和图 15 所示。这样就可以精确测量脉冲信号的所有相关技术参数。

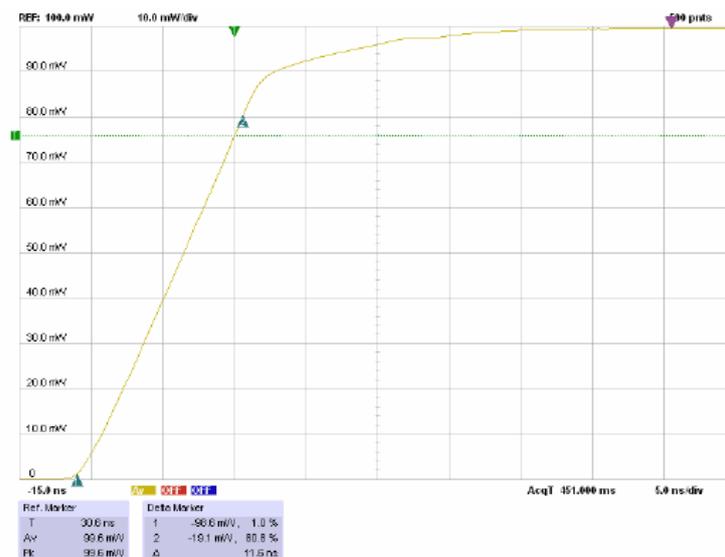


图 14 使用 Power Viewer Plus 软件和 NRP-Z81 功率探头的脉冲上升时间测量
 (上升时间：为从峰值功率的 1% 上升到峰值功率的 81% 所花费的时间)

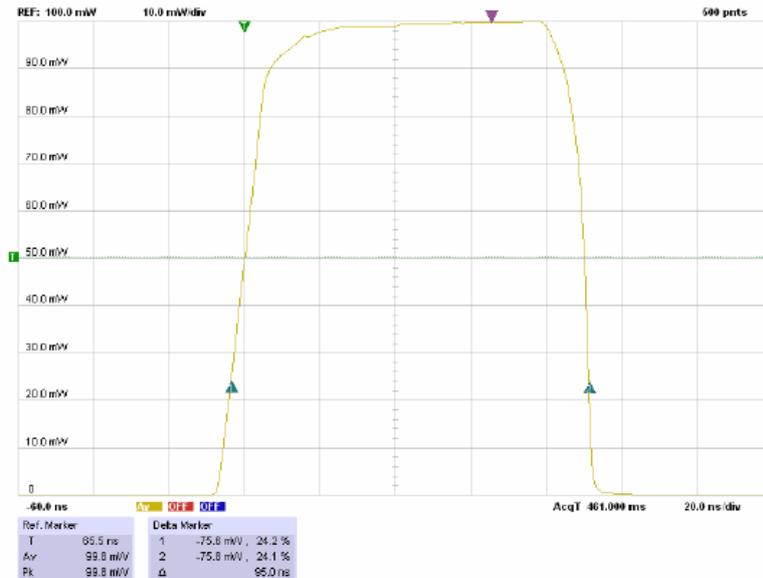


图 15 使用 Power Viewer Plus 软件和 NRP-Z81 功率探头的脉冲宽度测量 (脉冲宽度=95ns, 为峰值功率的 25%处两个功率点之间的时间差)

使用频谱分析仪测量脉冲功率和频谱

频谱仪的优点在于可以测量频域下的功率分量。下图给出了一个例子, 关于检测雷达发射机脉冲谱的对称性。如果发射机的脉冲谱不对称, 将会产生杂散发射, 会导致雷达系统的性能下降。

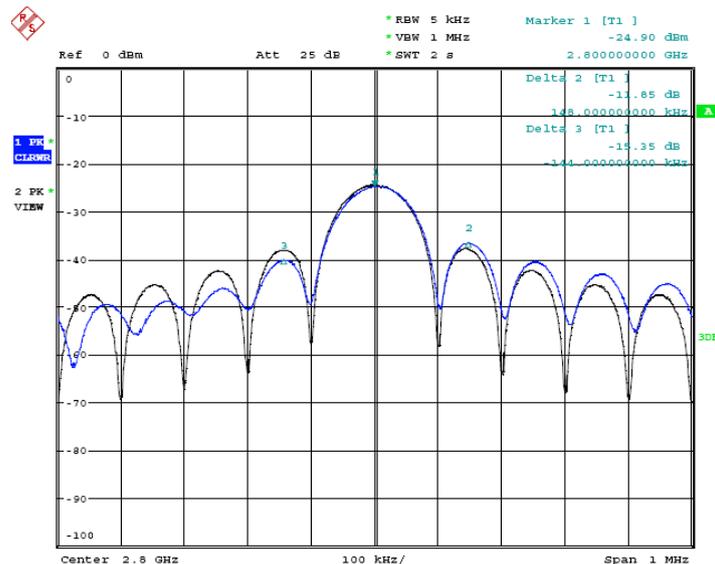


图 16 进行时间调整前后的雷达发射机脉冲频谱 (蓝线为调整前)

用频谱仪对脉冲信号 (尤其是低占空比的脉冲信号, 这类脉冲通常用于雷达系统) 进行测量时, 我们需要了解各种相关的设置, 如 RBW (分辨率带宽)、扫描时间等, 以获得正确的测量结果。

首先看一个简单的脉冲调整 RF 信号的频谱特性 (脉冲宽度为: τ , 脉冲周期为: T)。频谱为间隔为 $1/T$ 的离散谱, 谱线的幅度是由 sinc/x 的包络曲线确定的, 谱线的两边关于中心频率 f_0 对称。谱线的零点位置出现在 $f_0 \pm n \cdot 1/\tau$ 上, $n=1,2,3,\dots$

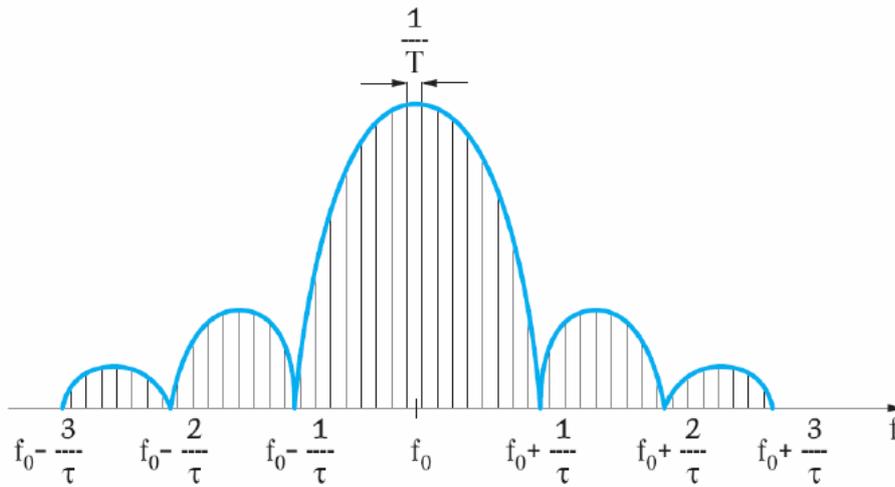


图 17 一个典型脉冲序列的频谱（脉冲宽度为： τ ，脉冲周期为： T ）

使用频谱仪进行测量时，通过调整 RBW 的大小，可以显示脉冲频谱的线状谱或脉冲包络。

当 RBW 的设置远远小于 PRF ($=1/T$) 时，可以显示脉冲线状谱，谱线的间隔等于脉冲周期 ($1/T$)，与扫描时间的设置无关。谱线的高度与 RBW 的设置无关。主谱线 (f_0) 的最大幅度由脉冲退敏因子确定 (PDF)，PDF 由脉冲宽度和脉冲周期的比例决定。

$$PDF = 20 * \log(\tau / T)$$

根据线状谱的显示结果，脉冲信号的峰值功率可以根据下式计算得到：
 峰值功率 = 主谱线的最大读数 - PDF = 主谱线的最大读数 - $20 * \log(\tau / T)$

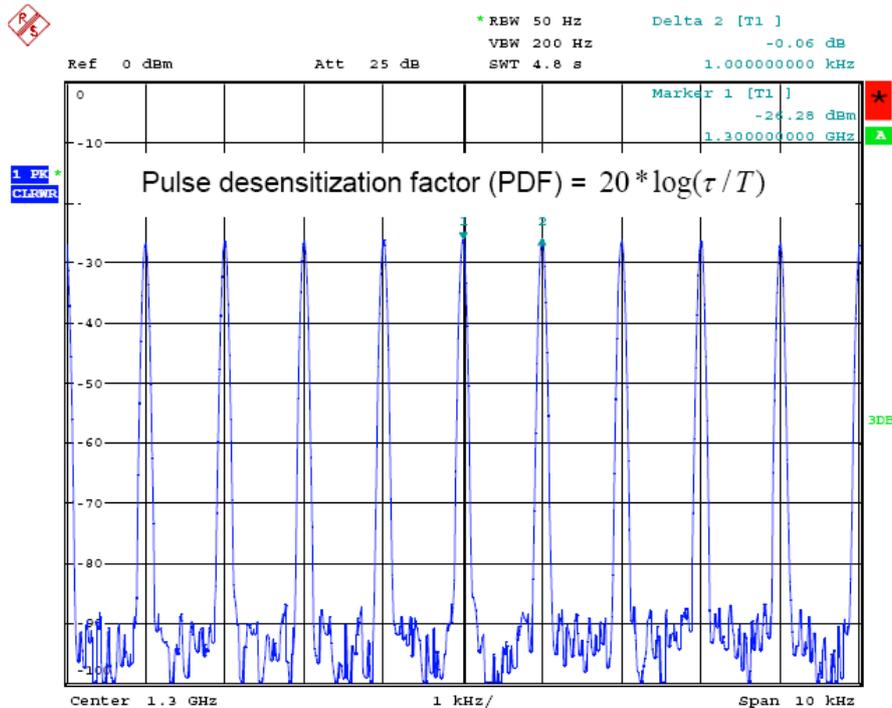


图 18 用 FSU 测量得到的脉冲信号线状谱 ($RBW \ll 1/T$, $1/T=1000\text{Hz}$, $RBW=50\text{Hz}$)

如果我们将 RBW 增加到大于脉冲重复周期时（但同时小于脉冲宽度对应的周期），频谱仪将会显示脉冲包络谱。脉冲包络的幅度随着 RBW 的增加线性增加。将 RBW 增加一倍，脉冲包络幅度将增加 6dB。

注：频谱仪的扫描时间设置必须要大于脉冲重复周期（>100 倍脉冲重复周期），这样可以对每个显示点进行平均。建议使用最大峰值检波器，以便获得清晰的包络显示。

频谱仪包络的脉冲退敏因子（ $PDF_{envelope}$ ）遵循以下公式：

$$PDF_{envelope} = 20 * \log(\tau KB)$$

通过包络谱，我们能够计算脉冲信号的峰值功率，（将一个 marker 点放在最大峰值位置，另一个 delta marker 放在第一个零点位置，得到两者的差值），如下式：

$$\text{峰值功率} = \text{marker 的读数} - PDF = \text{marker 的读数} - 20 * \log(\tau KB)$$

这里 $B=RBW$ ， τ =脉冲宽度， K =由 RBW 类型决定的校正因子（四级滤波器： $K=1.8$ ，五级滤波器， $K=1.73$ ，高斯滤波器 $K=1.5$ ）

图 19 给出了用 FSU 测量的脉冲包络频谱，delta marker 指出了脉冲宽度的周期。

这个图中脉冲宽度等于 50uS。峰值功率能够由下式计算得到：

$$\text{峰值功率} = -12.82\text{dBm} - 20 * \log(50\mu\text{s} * 1.5 * 3\text{kHz}) \text{ dB} = -0.13\text{dBm}$$

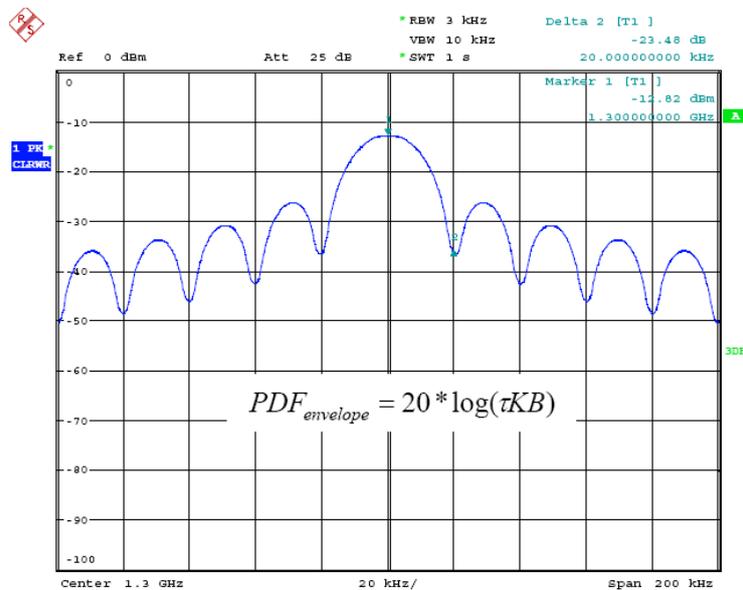


图 19 用 FSU 测量得到的脉冲包络谱（ $1/T \ll RBW < 1/\tau$ ， $1/T=1\text{kHz}$ ， $1/\tau=20\text{kHz}$ ， $RBW=3\text{kHz}$ ）

如果继续将 RBW 增加到大于 $1/\tau$ ，频谱仪将会直接显示脉冲信号的峰值功率，因为脉冲主谱已经全部包在 RBW 内。当然，这时频谱仪将不能显示脉冲包络谱了。

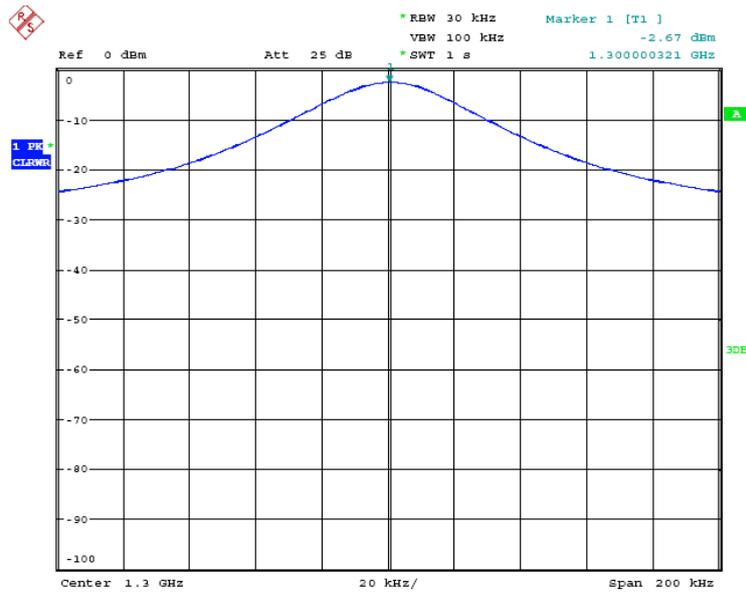


图 20 FSU 测量得到的脉冲频谱 (RBW>1/τ, 1/T=1KHz, 1/τ=20KHz, RBW=30KHz)

使用频谱分析仪进行零扫宽测量

频谱仪除了能够进行频域测量之外，也可以用零频跨进行时域测量。在零频跨模式下，频谱仪作为一台接收机，频率扫描和分辨率带宽固定不变，显示结果类似于示波器，它显示的是时域信号的包络。

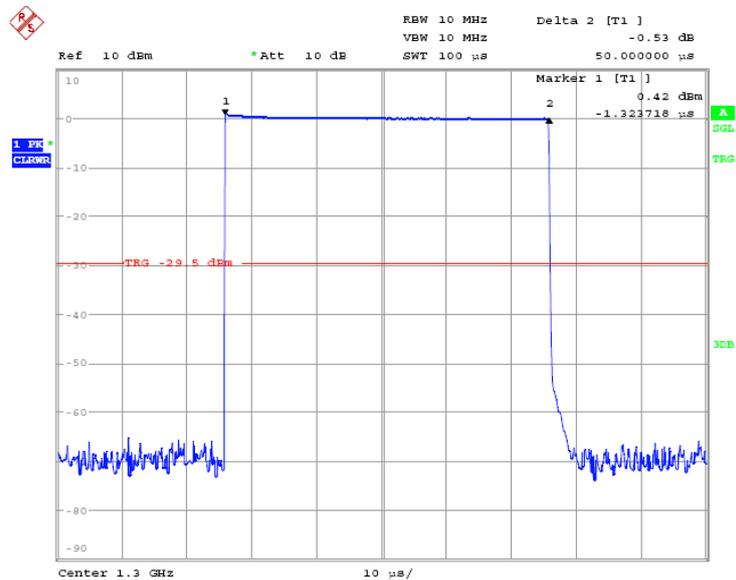


图 21 FSU 频谱分析仪在零频跨模式下的脉冲信号测量结果
(脉冲宽度可以用 marker 和 delta marker 测量)

频谱仪的动态范围远远优于示波器。频谱分析仪（如 FSU）提供了各种触发功能（视频触发、中频功率触发、外部触发等）；同时还可以设置触发时间偏置，这样可以在合适的位置显示稳定的结果。许多重要的脉冲参数，如上升时间、下降时间、脉冲沉降、脉宽变化等参数在零频跨模式下可以很方便测试。

非常关键的一点，分辨率带宽内要包含绝大部分信号功率，应遵从下式：

$$\text{脉冲宽度} > 2/\text{RBW}$$

若要测量脉冲信号的上升沿时间和下降沿时间，频谱仪的设置时间必须要小，应遵从下式：

$$\text{脉冲上升时间} \gg 0.7/\text{RBW}$$

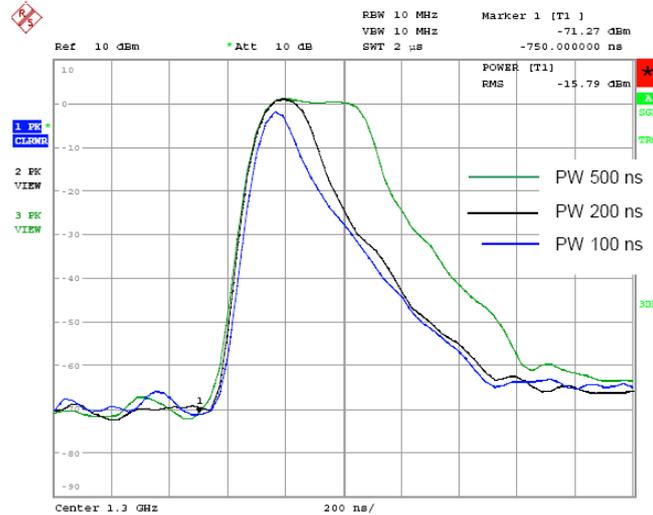


图 22 零频跨下的测量结果 (RBW=10MHz, 脉宽分别为 100 nS、200 nS、500nS)

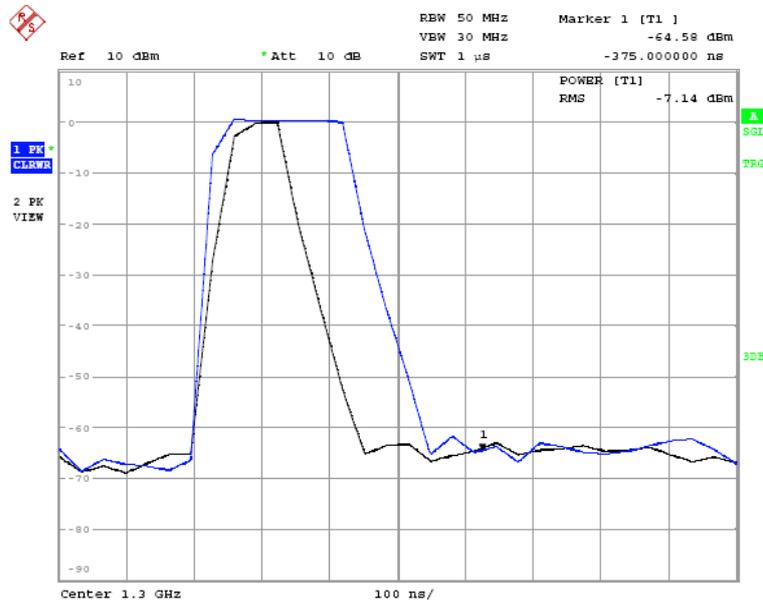


图 23 零频跨下的测量结果 (RBW=50MHz, 脉宽分别为 100 nS、200nS)

R&S FSU 和 R&S FSQ 频谱仪的最大分辨率带宽为 50MHz，足够满足大部分雷达测试，可以精确测量脉冲宽度小至 100ns 的峰值功率。

具体如图 22 和图 23 所示。

配置了 R&S FSQ-B72 和 R&S FSQ-K7 选件后，R&S FSQ 的测量带宽能够扩展到 120MHz，这样可以测量脉冲宽度小于 30nS 的信号峰值功率，如图 24 所示：

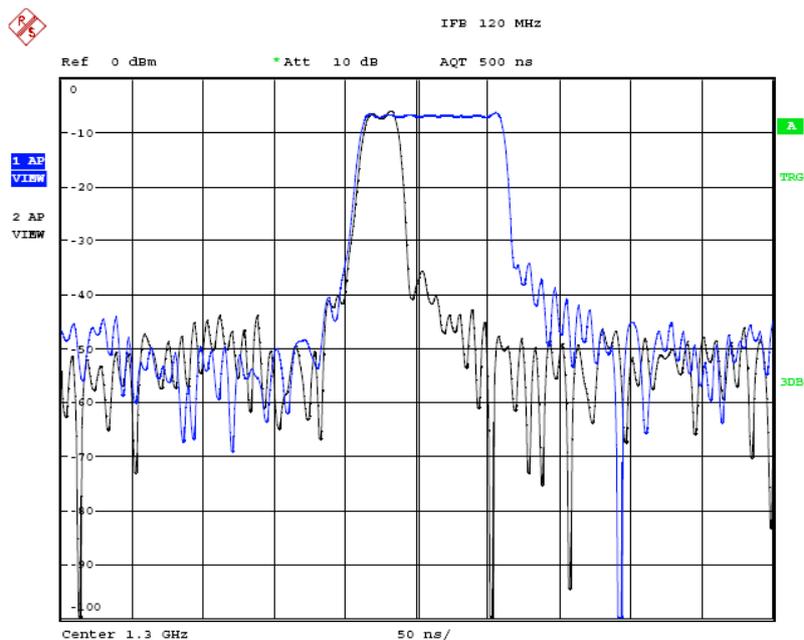


图 24 R&S FSQ 在零频跨条件下的测量结果
 (使用 R&S FSQ-B72 120MHz 带宽扩展选件和模拟解调选件, 30ns 脉宽和 100ns 脉宽)

时域功率

时域功率测量功能可以测量选定时间内的积分功率，这个功能对测量脉冲功率非常有用。脉冲谱的占用带宽必须要小于频谱分析仪的分辨率带宽（R&S FSU/FSQ 的最大带宽为 50MHz），触发方式可以是视频触发、射频功率触发或外部触发。测量的时间间隔由限制线确定（START LIMIT 和 STOP LIMIT），为了确保正确的测量结果需要选择 RMS 检波器。

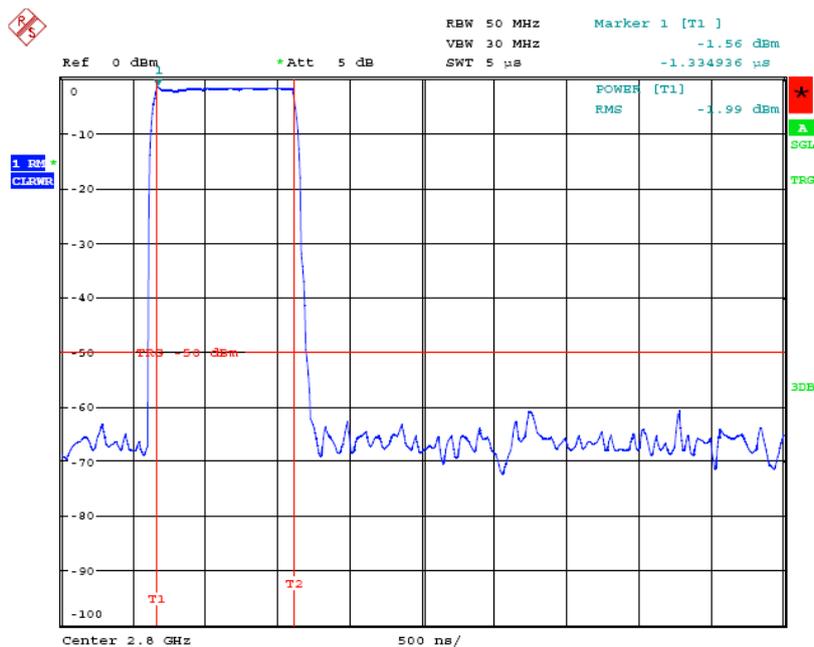


图 25 雷达信号的时域功率测量
 (脉宽: 1μS, 两条红色竖线 T1/T2 给出了积分功率的时间范围)

信道功率

信道功率测量功能用来测量定义频带内的平均功率。该测量是典型的基于带宽积分的方法，也就是当在积分带宽内进行扫频时，频谱仪对功率进行积分。然而，R&S 频谱分析仪使用 RSM 检波器，能够测量与信号形状无关的平均功率（即热功率）。为了正确的测量平均功率，频谱仪的分辨率带宽（RBW）应该小于积分带宽（信道带宽），而视频带宽应该大于等于 RBW 带宽的三倍。R&S 频谱分析仪通过”自动调整设置”保证了最优的参数（RBW, VBW, 检波器）设置。

作为第一条规则，积分带宽（信道带宽）应该设置得足够宽，保证低于最大值 23dB 以内的频谱分量应该包括进来。由带宽限值带来的误差典型值将小于等于 0.1dB。看图 26（大的积分带宽）和图 27（限制积分带宽包含幅度大于 -23dB 的频谱分量）。积分带宽（信道带宽）由红色竖线显示。

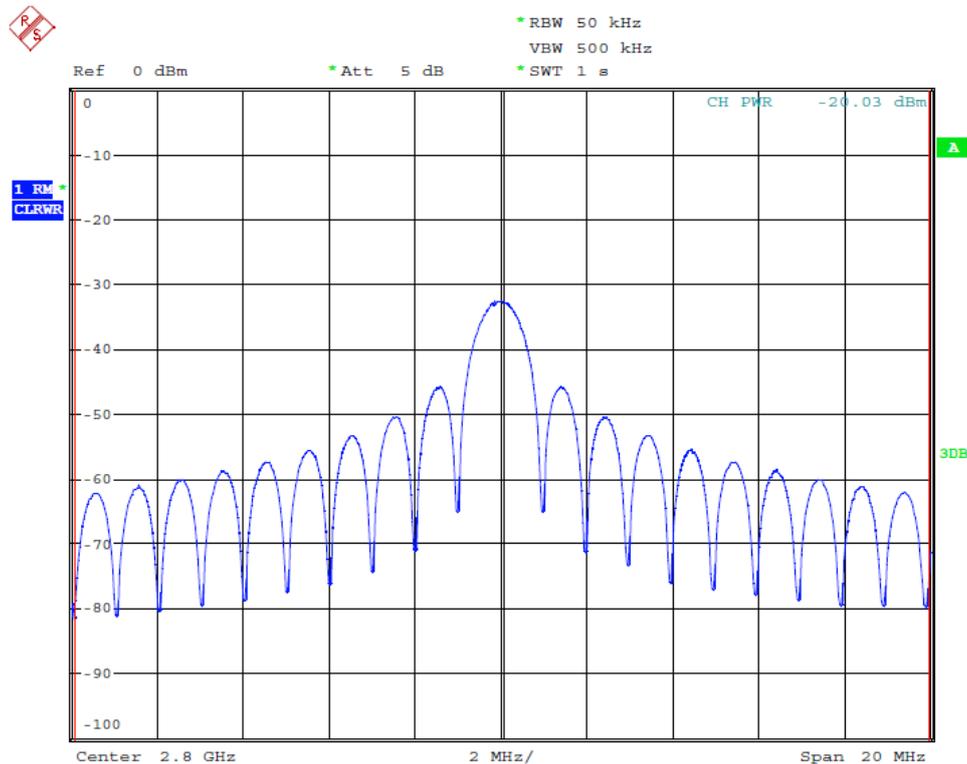


图 26: 脉冲信号（脉宽 1 μ s, PRI 100 μ s, 信道带宽 19.9MHz）信道功率测量

不论当前条件是线状谱还是包络谱，信道功率功能都测量平均功率。

甚至对于带复杂调制的脉冲信号或者可变脉冲宽度或脉冲重复率的脉冲信号，信道功率功能都能正确测量平均功率。图 28 是测量 ASR 雷达信号的详细结果。ASR 信号具有不同的脉冲宽度和非线性 FM 调制的脉冲， $\sin x/x$ 函数不再清晰可见。

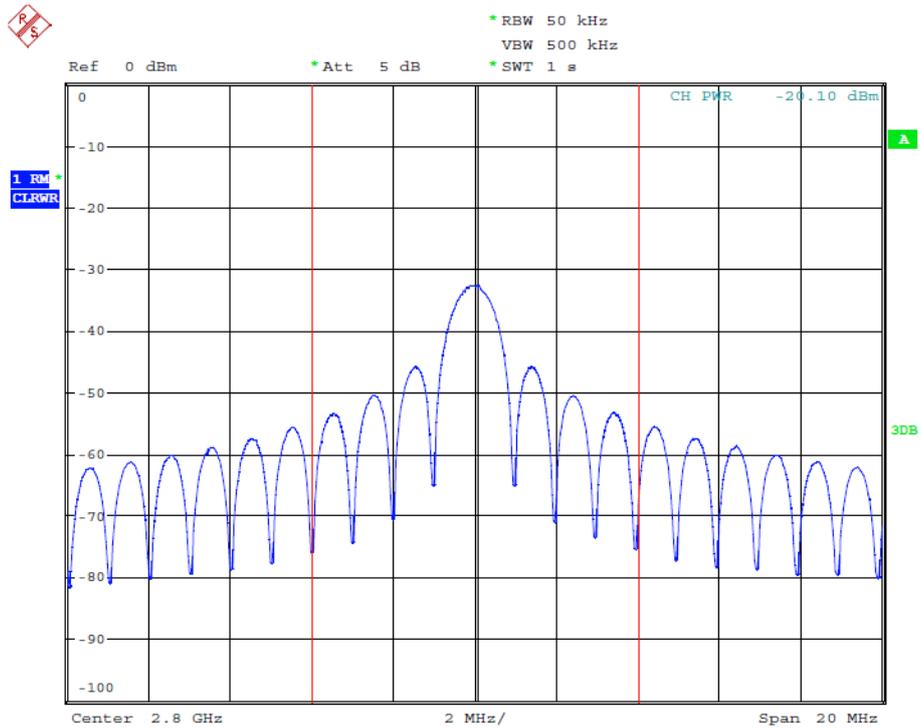


图 27: 信号与上图相同, 采用 8MHz 的信道带宽测量, (包含了低于主瓣 23dB 以内的频谱分量), 与图 26 相比, 结果仅相差不到 0.1dB。

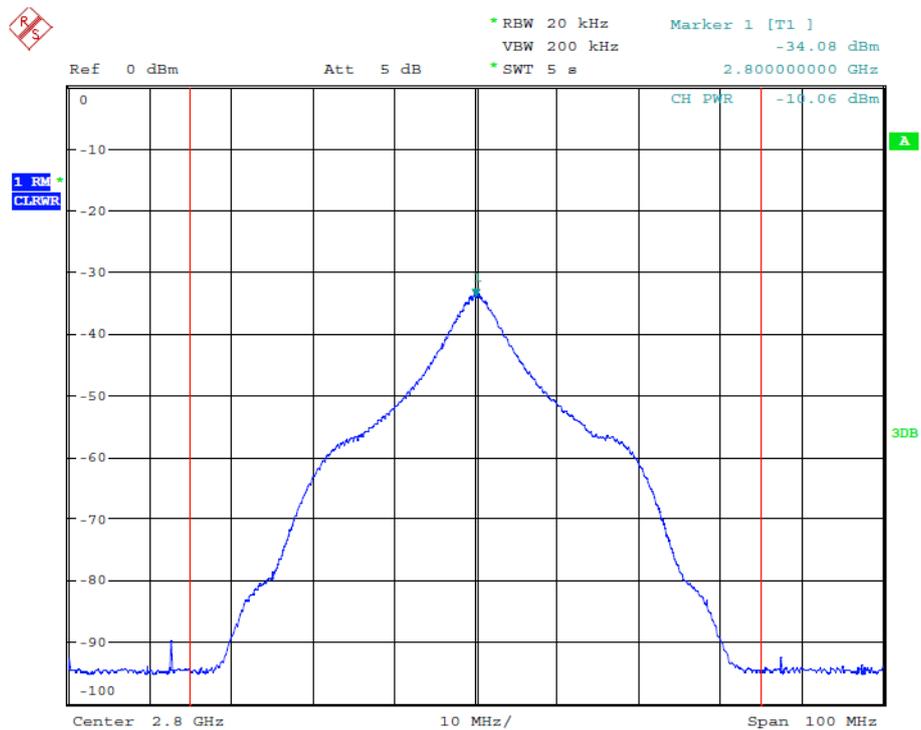


图 28: 复杂 ASR 雷达信号的信道功率测量

占用带宽 (OBW)

R&S 频谱分析仪提供的占用带宽测量功能可以自动测量占用全部功率某一百分比的占用带宽。默认设置下, 占用带宽测量是测量包含总功率 99% 的带宽。图 29 给出了测量例子。

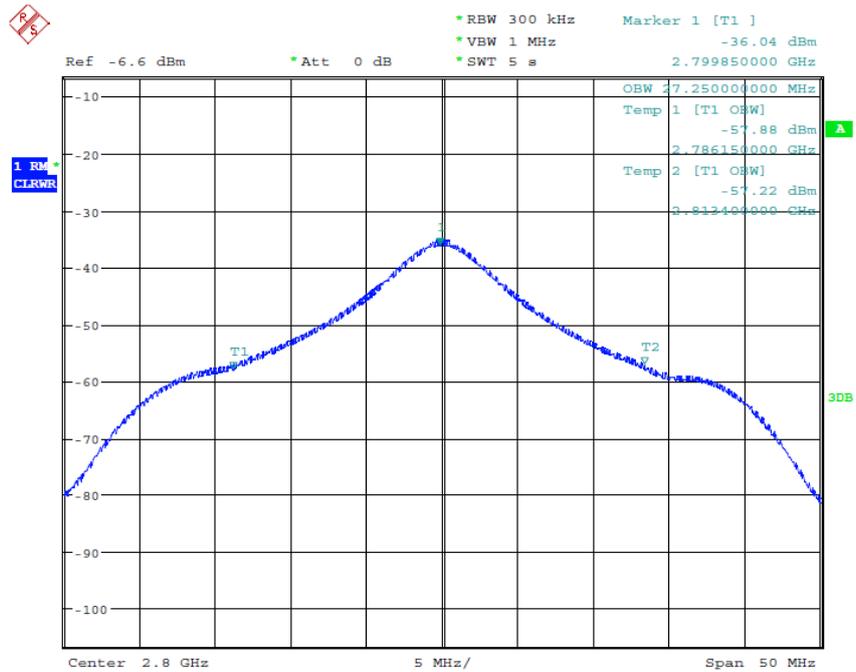


图 29: 使用 R&S FSU 进行 ASR 雷达信号的占用带宽测量: 测量包含总功率 99% 的带宽, 并显示 OBW 值 (这里为 27.25MHz)

使用频谱分析仪和解调选件测试脉冲压缩雷达系统

R&S FSU/FSQ 可以通过 R&S FS-K7 AM/FM/PM 选件完成对脉冲压缩雷达系统的功能检查。因此可以检查使用线性或非线性 FM 技术 (图 30, 图 31) 的雷达发射机。也可以用 PM 解调模式分析 Barker 码相位调制的相位特性 (图 32)。R&S FSU 的解调带宽最大为 10MHz。R&S FSQ 标准配置的最大解调带宽为 28MHz, 使用 R&S FSQ—B72 I/Q 带宽扩展选件, R&S FSQ 的解调带宽甚至可以达到 120MHz, 因此可以处理 60MHz 的频偏 (120MHz 峰峰值)。

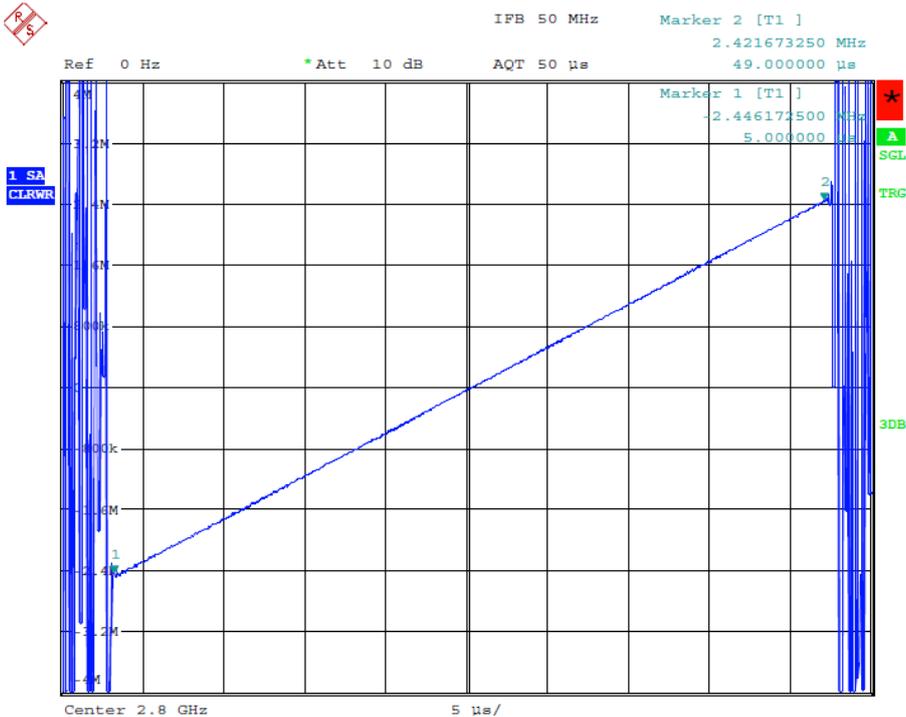


图 30: 用 R&S FSQ 和 R&S FS-K7AM/FM/PM 解调选件测试线性调频雷达发射机的调频线性度

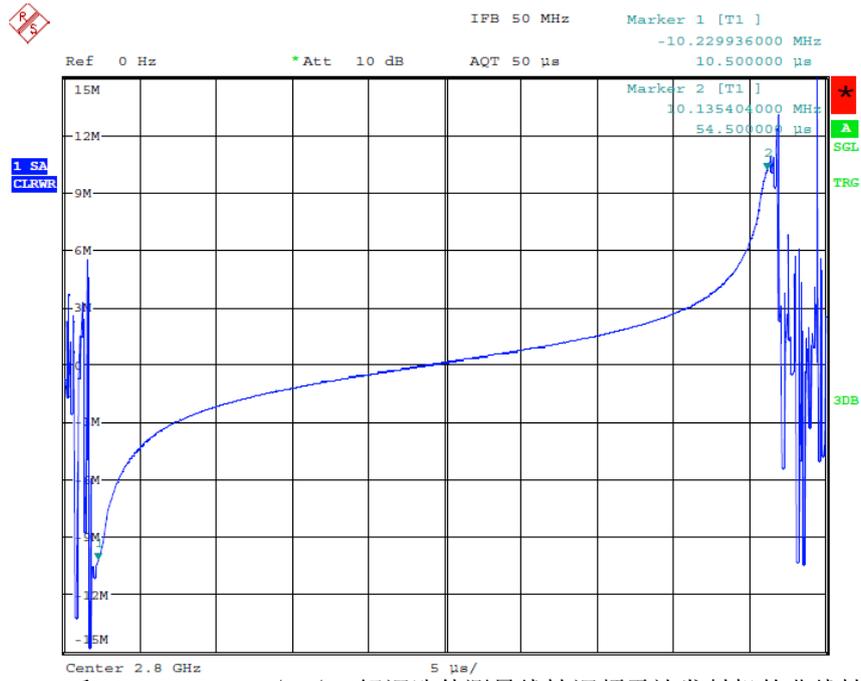


图 31: 使用 R&S FSQ 和 R&S FS-K7 AM/FM/PM 解调选件测量线性调频雷达发射机的非线性特性

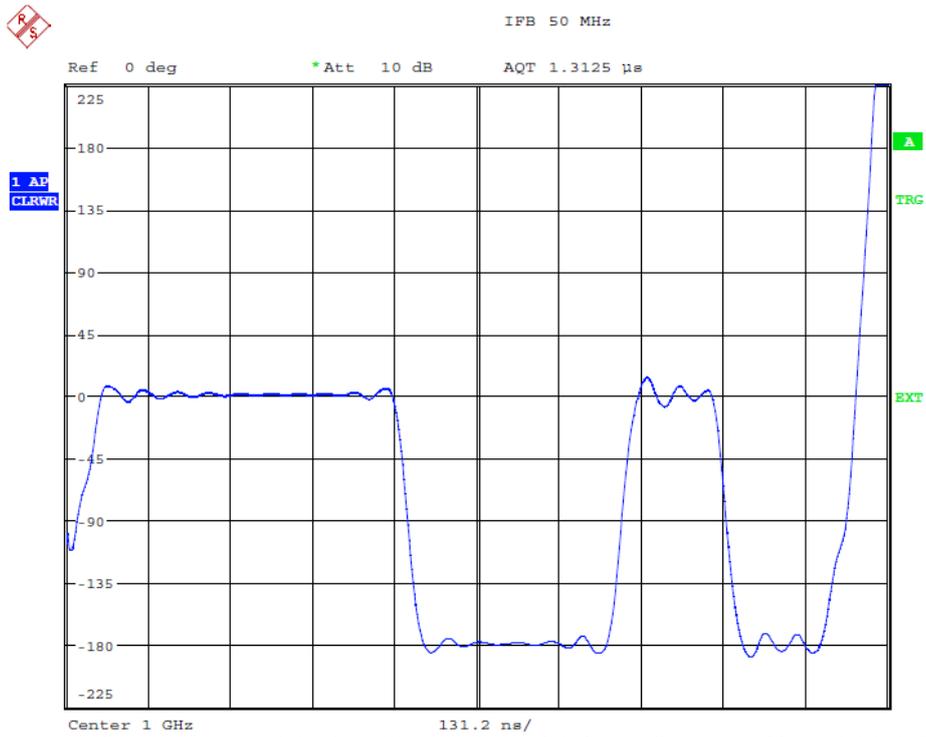


图 32: 用 R&S FSQ 和 R&S FS-K7 选件的模拟 PM 解调功能解调 11 位 Barker 码 PM 调制的雷达发射机信号

简单的接收机测试

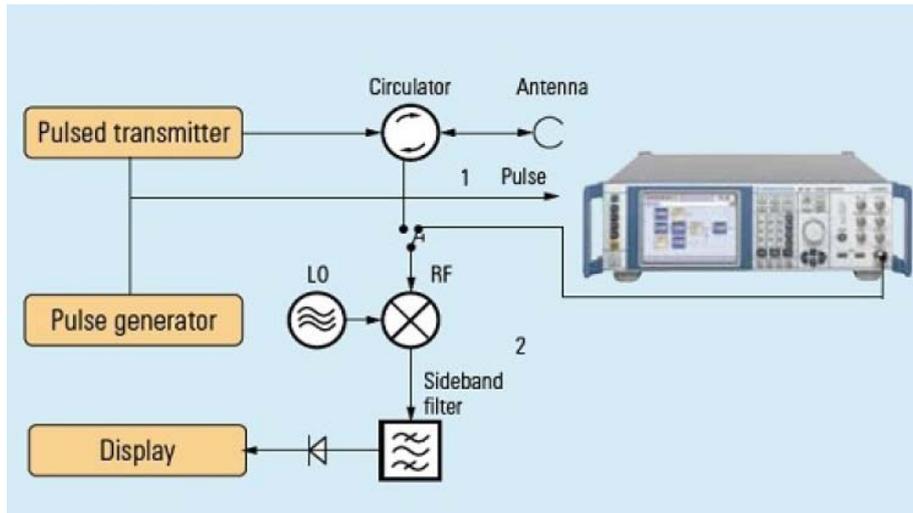


图 33: 用 R&S SMF100A 加旋转天线校准脉冲雷达系统

带旋转天线的脉冲雷达

R&S SMF100A 可以用来模拟带旋转天线的脉冲雷达应用。这里 (图 33)，从脉冲发生器来的外部脉冲被连到 R&S SMF100A 的外脉冲输入接口，作为内部脉冲源和脉冲调制器的触发。为了实现范围和方向的模拟，可以对触发进行延迟，并在雷达设备显示器上检查信号。

雷达组件测试

为了确保雷达系统性能优异，构成该系统的各个模块和部件都需要进行分析和优化。这些包括雷达接收机中放大器的噪声系数测量，振荡器的相位噪声测量，替代其部件和组件以发现雷达系统中的故障，无源部件的衰减测试，有源部件的 S 参数测试 (甚至在脉冲工作条件下测量)，等等。雷达天线的优化需要特别的注意，因为天线需要进行近场或远场的复杂测量。而目标反射特性作为雷达反射截面的一部分进行测试。

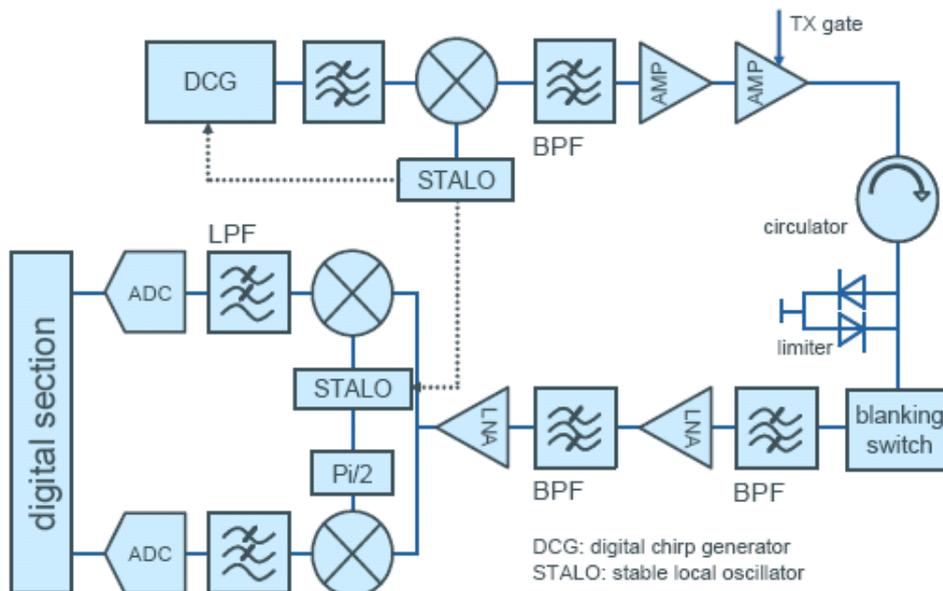


图 34: 雷达系统的典型 (简易) 框图

噪声系数

雷达接收机的噪声很大程度上影响着雷达系统的性能。输入噪声主要取决于输入放大器的噪声（低噪声放大器，LNA）。输入噪声以噪声系数进行表征，如以下公式：

$$NF_{dB} = 10 * \log \frac{Signal/Noise_{input}}{Signal/Noise_{output}}$$

除了噪声外，雷达接收机或低噪声放大器还需要考虑其它的因素，而这些因素在某种程度上是矛盾的，如：

- 相位稳定度
- 幅度稳定度
- 大的动态范围
- 在过载和干扰情况下的快速恢复
- 过载保护

然而，低的噪声系数仍然是上文所提到的因素中重要一项。

罗德与施瓦茨公司的频谱分析仪 R&S FSP, R&S FSU 和 R&S FSQ 系列与噪声源相结合是噪声系数和增益自动测量的理想之选，这归因于它们具有高的灵敏度和电平测量精度。应用固件 R&S FS-K30 使得以上功能可以在这些高性能频谱仪中具备，否则则需要特殊的噪声测量仪器和配置。在频谱仪的工作频率范围内，能够高精度地测量以下参数：

- 噪声系数 dB
- 噪声温度 K
- 增益 dB

除了低噪声放大器，变频模块也可测量。测量结果既可以为图像格式或表格格式。

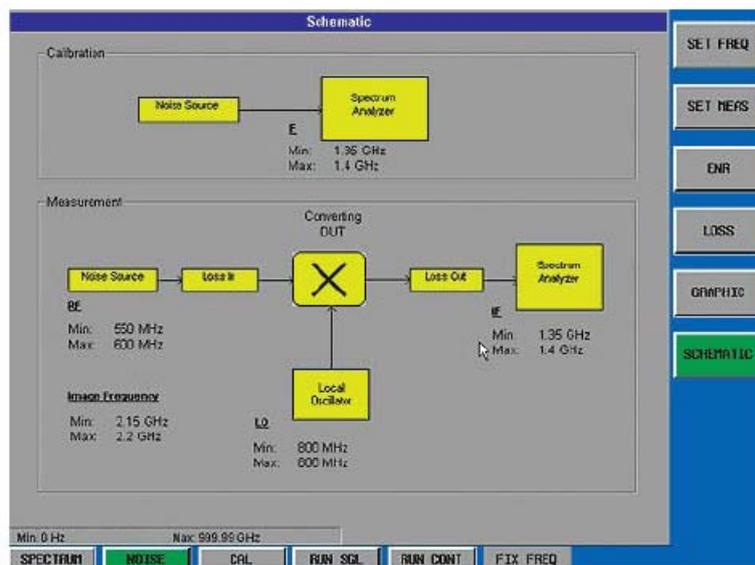


图 35: 在 R&S FS-K30 应用固件中测量变频 DUT 的设置图



图 36: R&S FS-K30 应用固件表格格式的测量结果

信号源替代雷达组件

在雷达系统地研发中，信号源在系统问题查找应用中非常有用。在接下来的内容列举了其中的一些应用。例如，我们可以利用相位噪声极低的信号源如 R&S SMB100A（或甚至更好的 R&S SMA100A）替代本地振荡器，目的是检查本地振荡器由于其相位噪声对系统性能的负面影响有多大（图 37）。

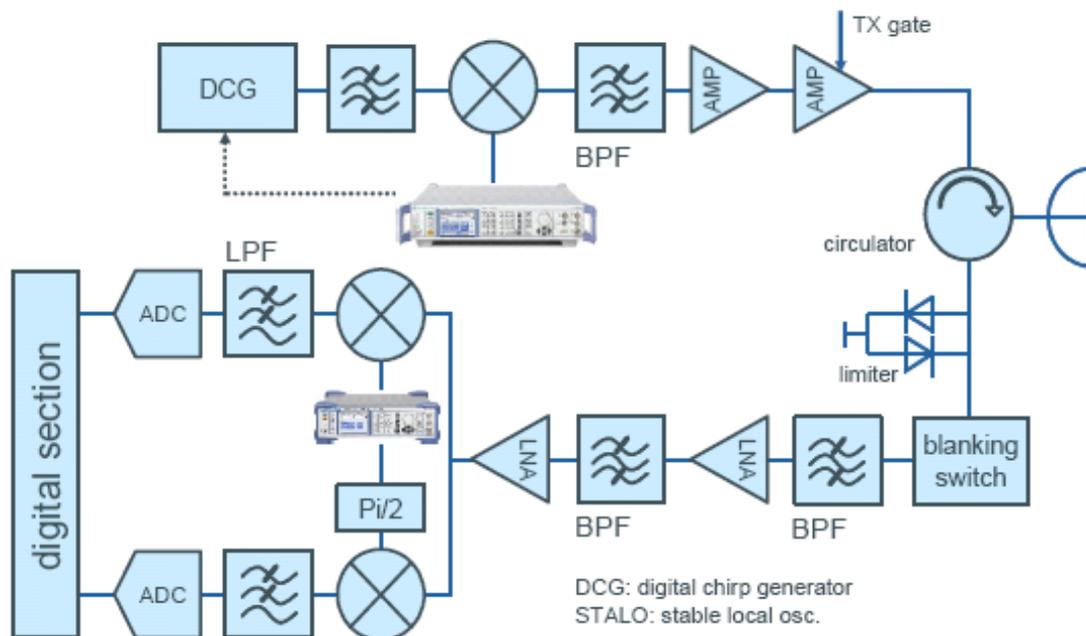


图 37: R&S SMA100A 或 R&S SMB100A 代替 STALO

雷达系统的整个发射机（除功率放大器外）都可以由矢量信号源 R&S SMU200A 替代，由于其能够产生各类复杂调制信号，从而检查系统在信号处理中存在的问题。（图 38）

脉冲雷达系统（无脉冲压缩）或应用脉内线性调频调制（线性 FM Chip 调制）其最大频偏不超 40MHz 时，微波信号源 R&S SMF100A 是高频频率应用的理想之选（43.5GHz）。

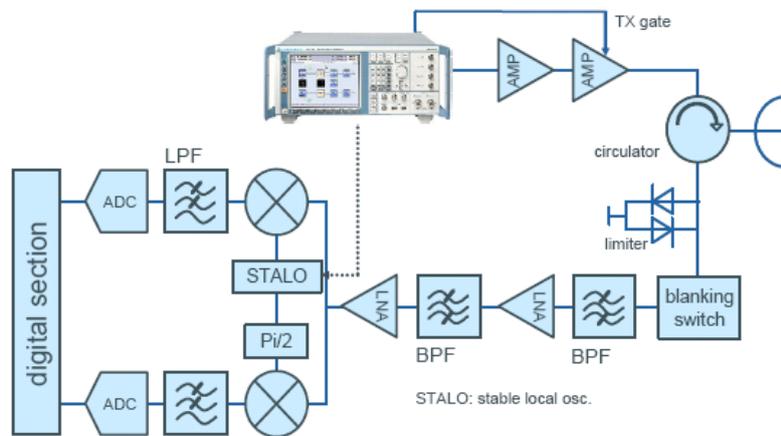


图 38:R&S SMU200A 提供高达 6GHz 的复杂调制替代激励部分

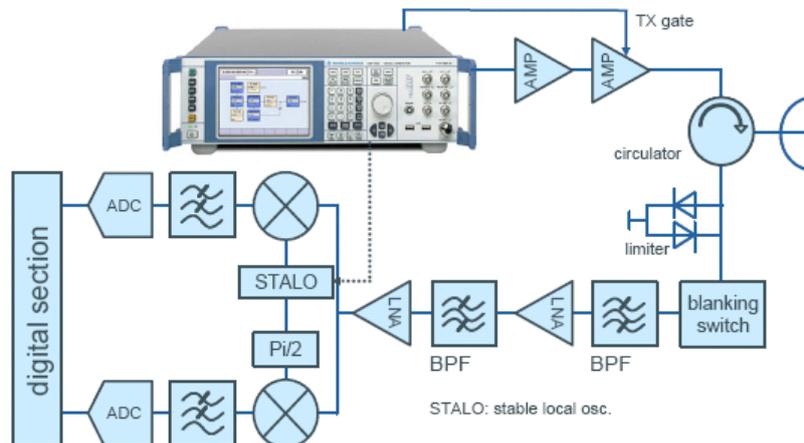


图 39: 频率高达 43.5GHz 的 R&S SMF100A 替代激励部分

雷达系统的接收单元是由不同的复杂功能模块构成，因此一般可以分别测量。这需要的仪器包含调制源 R&S AFQ100A/B，其与矢量信号源 R&S SMU200A 或 R&S SMBV100A 相结合可以产生极宽的宽带信号（大于 500MHz 的射频带宽）和极长的信号序列（高达 1Gsample 的存储容量）（图 40）。

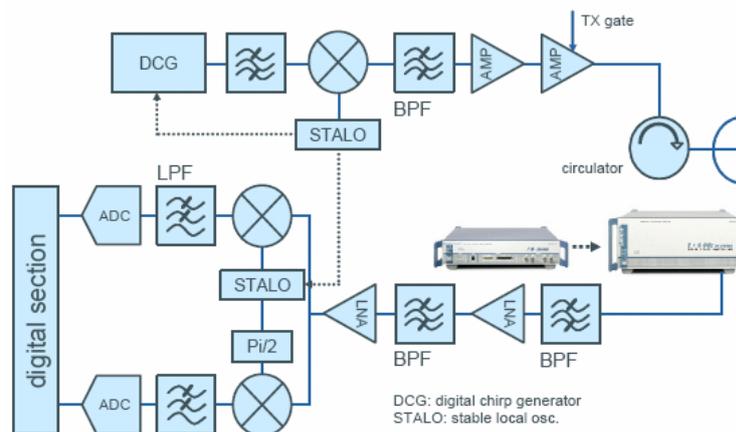


图 40: 采用复杂波形测试接收机

利用 R&S AFQ100A/B 提供宽带和极长的序列信号（真实环境的信号），基带接收单元可以从雷达系统尾部分离开测试。

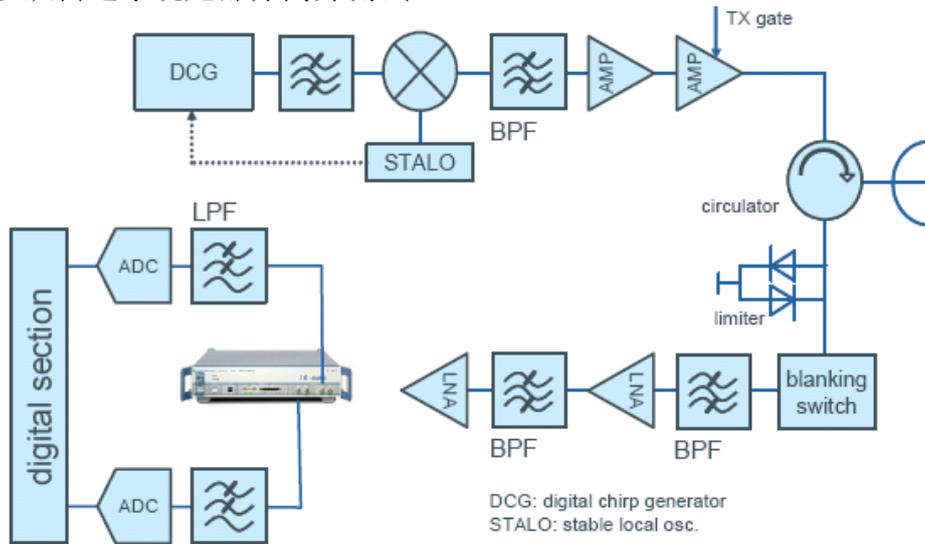


图 41:利用 R&S AFQ100A/B 测试真实环境信号源

产生和加载复杂雷达信号

如图 42 所示，可采用不同的方法加载数据到 R&S 矢量信号源或 R&S I/Q 调制源。

1. R&S K6 脉冲序列产生软件，轻松产生各种脉内复杂调制信号，同时可以直接传送到 R&S 信号源中（见图 43）
2. ARB Toolbox（AN 1GP62）转换已有的 I/Q 信号为 R&S 波形格式，并传送到 R&S 信号源中。
3. R&S Matlab 转换工具箱（AN 1GP60）可通过 GPIB 或 TCP/IP 连接加载从 MATLAB 产生的 IQ 信号到 R&S 信号源中。

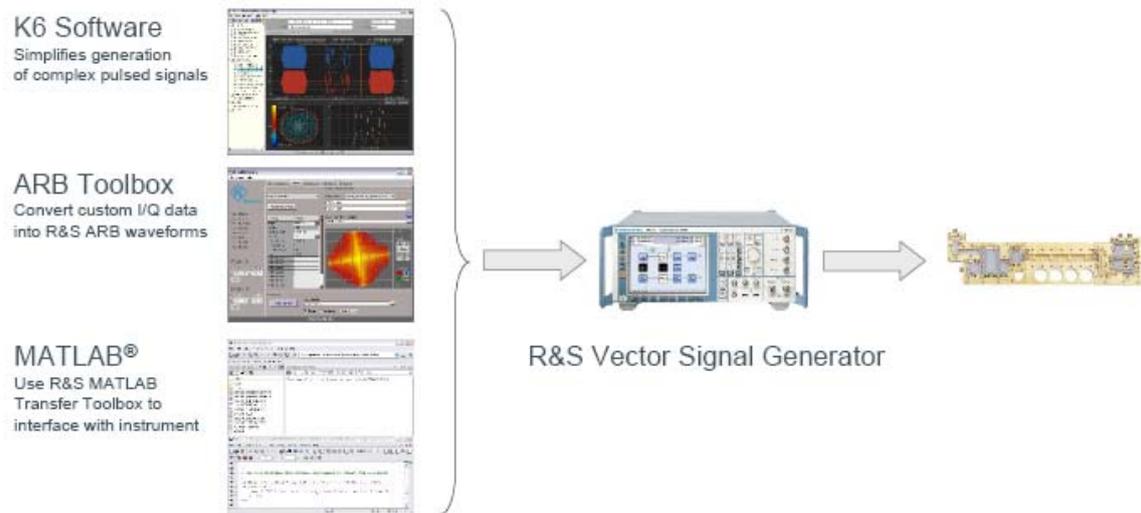


图 42:不同的方法加载数据到任意波形产生器中

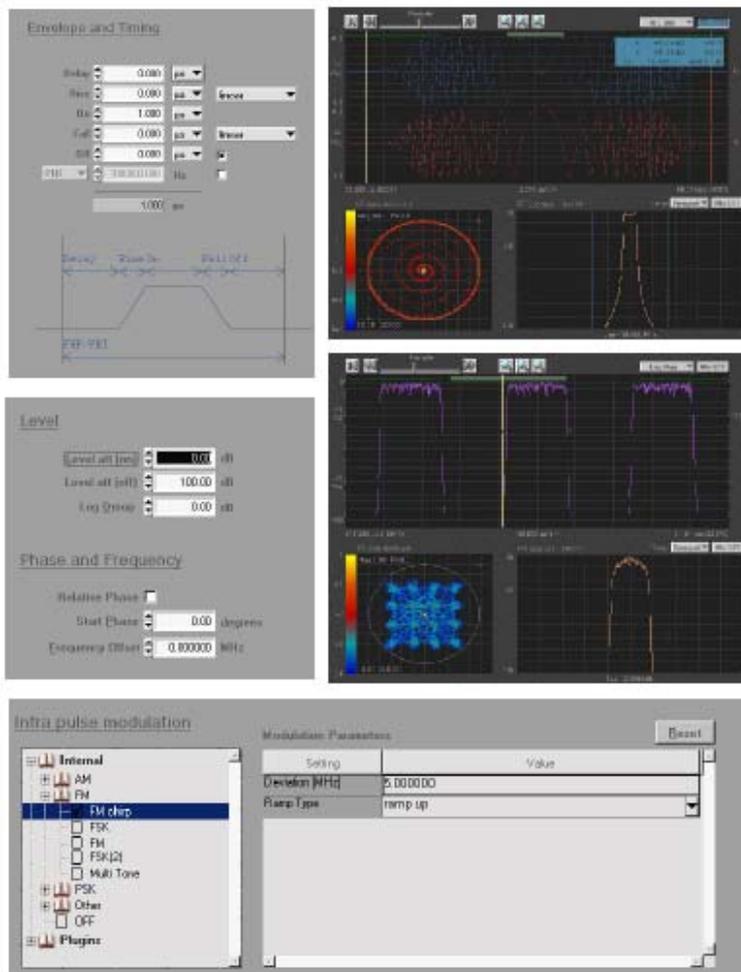


图 43:R&S 脉冲序列产生软件的用户界面和一些设置参数

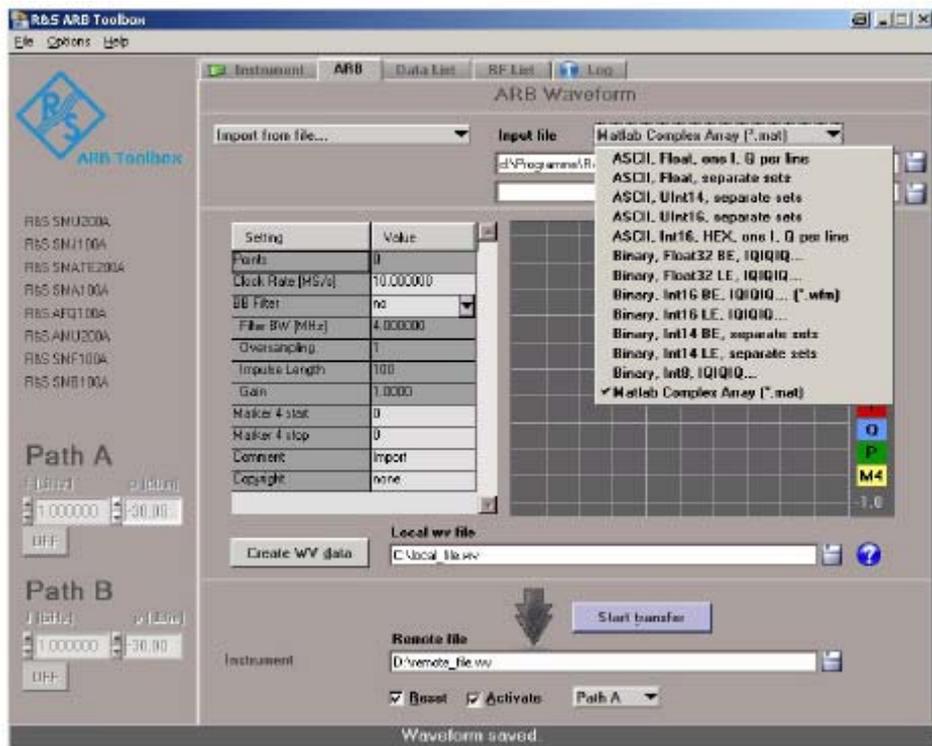


图 44:转换 I/Q 数据到矢量信号源的 R&S ARB Toolbox 软件

微波信号源 R&S SMF100A 的脉冲串选件 R&S SMF-K27（或信号源 R&S SMA100A 的脉冲串选件 R&S SMA-K27）

微波信号源 R&S SMF100A 通过安装脉冲串选件 R&S SMF-K27 可以产生包含抖动或者交错的脉冲（不同间隔长度的脉冲）。这使得 R&S SMF100A 是雷达接收机测量或模拟脉冲雷达信号（无脉冲压缩）的理想选择。脉冲串的产生可以通过简便的编辑器定义，其最长可产生 1023 个独立脉冲。

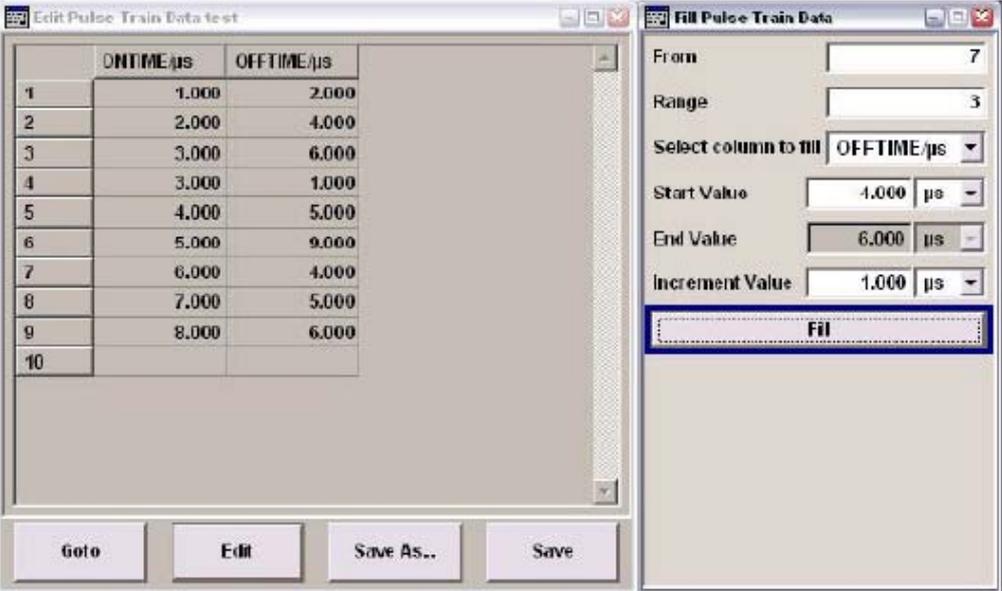


图 45:R&S SMF100A 脉冲串选件 R&S SMF-K27 的用户界面

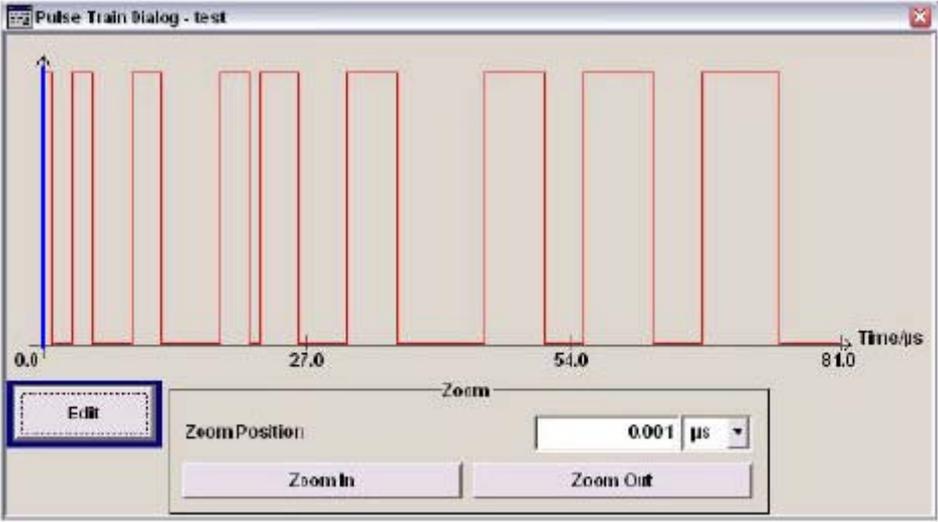


图 46: R&S SMF100A 脉冲串选件 R&S SMF-K27 的脉冲序列参数设定示意图

测量本振（STALO 和 COHO）相位噪声

精准的多普勒速度测量需要考虑相干振荡器（COHO）和稳定的本地振荡器（STALO）的相位噪声特性。在多普勒雷达系统中，用于雷达系统的射频源和其它所有的振荡器，其过大的相位噪声会淹没低速运动的目标信号。在 FMCW 雷达系统中，离雷达系统很近的目标信号也会被淹没。

用作相位噪声测量的仪器，其自身相位噪声特性必须足够的低。罗德与施瓦茨的频谱仪 R&S FSU/R&S FSQ 系列就非常适合此类测试。

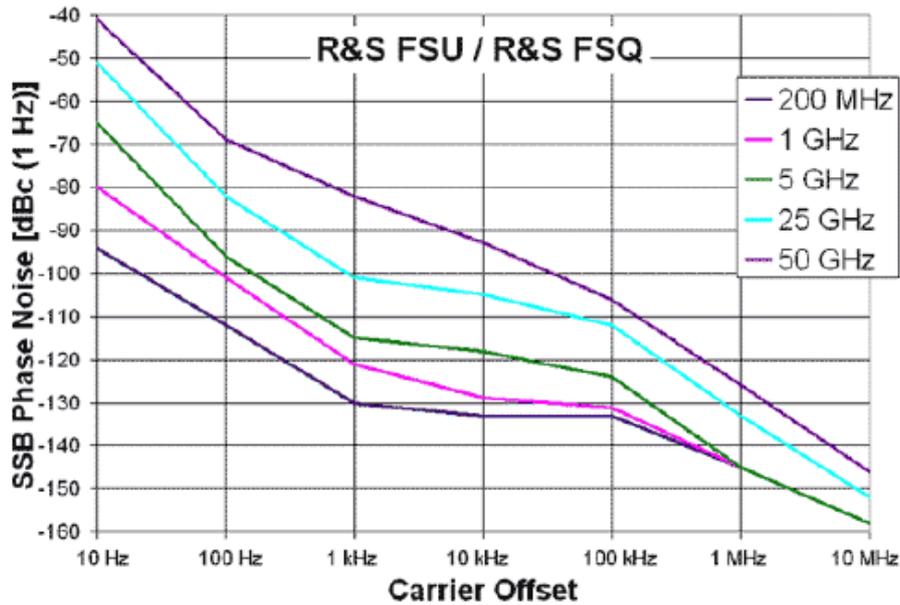


图 47:R&S 频谱仪 R&S FSU/R&S FSQ 系列的固有相位噪声

信号源分析仪 R&S FSUP 提供了极大的测量动态范围，同时具有多样的测量功能。当安装选件 R&S FSUP-B60/B61，信号源分析仪 R&S FSUP 具有两平衡接收通道。基于这对称结构，在两通道间可采用互相关运算，从而消除两参考源的固有相位噪声对测量的影响。这一方法可以应用于 5MHz~50GHz 的频率范围。因此测量的灵敏度得到了很大的提升而不再局限于参考源本身。改善程度取决于运算的次数，10000 次运算可以得到高达 20dB 的灵敏度改善。

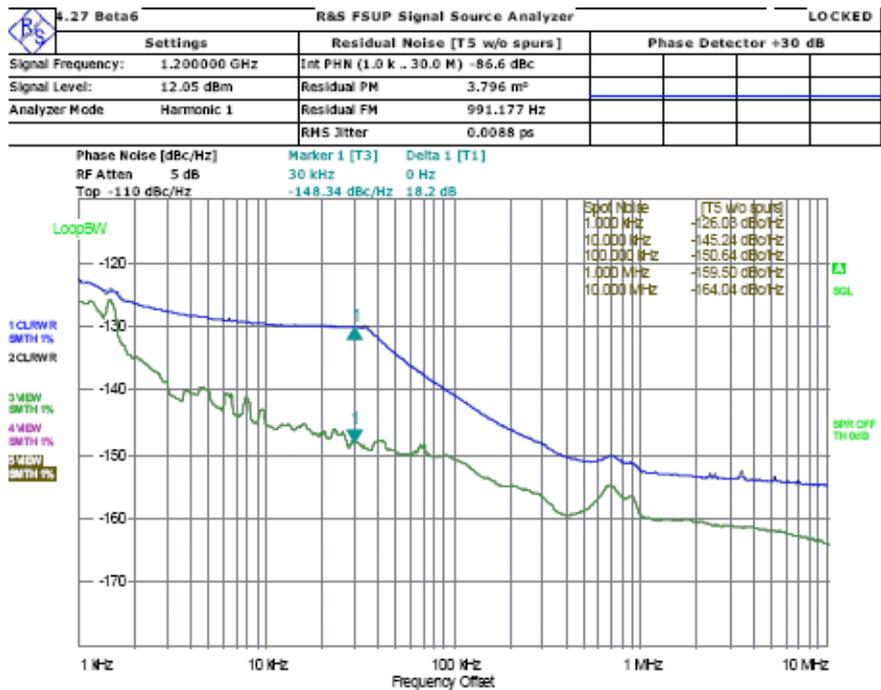


图 48:R&S FSUP 在 L 波段测试时采用互相关选件 R&S FSUP-B60 (绿色曲线) 和不采用互相关 (蓝色曲线) 的灵敏度

信号源分析仪 R&S FSUP 为 COHO/STALO 的测量提供以下广泛的测量功能：

- 以内部或外部参考源的方式，采用鉴相器技术测量相位噪声
- 采用频谱仪直接测量相位噪声
- 测量 COHO/STALO 的其它指标
- 以固定或变化的工作电压测量调谐特性
 - 调谐灵敏度
 - 输出功率相对于频率和工作电压的关系
 - 杂散频率和谐波
 - 频率变换时的瞬态响应

使用功率计进行功率损耗测试

测量插入损耗的一个简单方法是，在一个二端口网络的输入和输出位置分别接一个功率探头（例如测量雷达天线的馈线），这种方式的测量精度比使用网络分析仪要低，但优点是它可以在雷达工作状态下进行测量。

放大器测试-脉冲条件下的 S 参数测试

如放大器这类器件，我们一般评估的参数包括：增益、频率响应、匹配、相位特性，它们都是通过 S 参数计算得到的。S 参数一般都是用矢量网络分析仪在连续波条件下测试得到的，这种测量方式对于那些脉冲调制工作的雷达器件（如雷达发射机的功放）测试而言还不够准确，因为放大器在连续波模式和脉冲模式下的工作状态是不一样的。

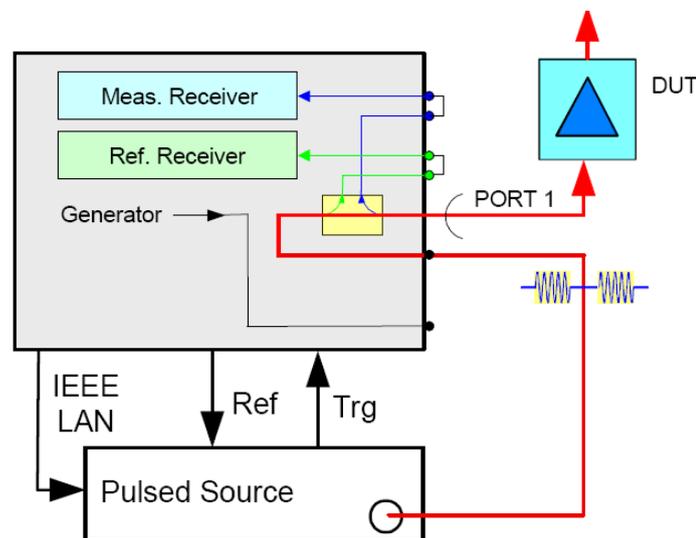


图 49 脉冲 S 参数测试的原理框图
(使用矢量网络分析仪, 如 R&S ZVA 和外置脉冲信号源, 如 R&S SMF100A)

图 49 给出了利用 R&S ZVA 矢量网络分析仪外加一台外部脉冲源（如 R&S SMF100A）进行脉冲 S 参数测量的原理框图。图 50 给出了一个详细的配置框图，关于一个 L 波段雷达功放的脉冲 S 参数测量实例。由于放大器的驱动功率（约 1W）和输出

功率(100W)都很大，需要在放大器的两端分别加耦合器。相关的耦合信号分别馈入 R&S ZVA 相应的各接收机通道，用于测量 S11 和 S22。

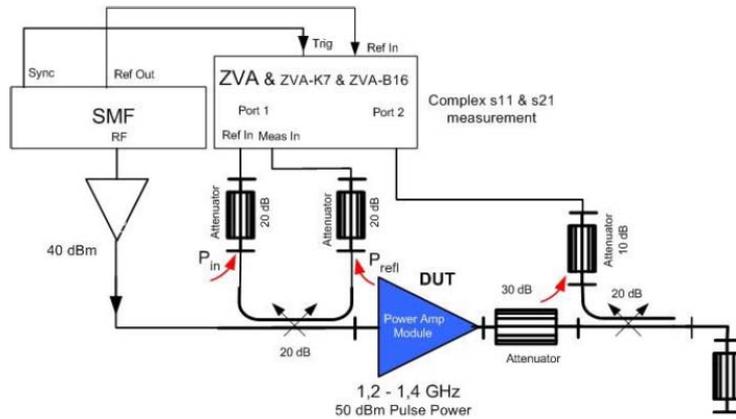


图 50 使用 R&S ZVA 进行 L 波段雷达脉冲功率管测试的配置框图

脉内单点测量

在脉内单点测量模式，ZVA 可以在频域下对每个脉冲的单点进行测量。ZVA 的触发可以设为单点触发，触发时延可以调整。

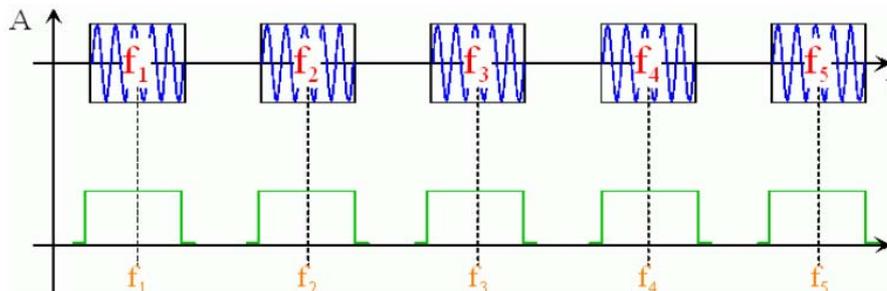


图 51 R&S ZVA 的脉内单点测量模式

(在单点触发模式下，R&S ZVA 在每个脉冲内测量一个点)

图 52 给出了一个 L 波段雷达功率管的脉内单点测量的 S21 特性

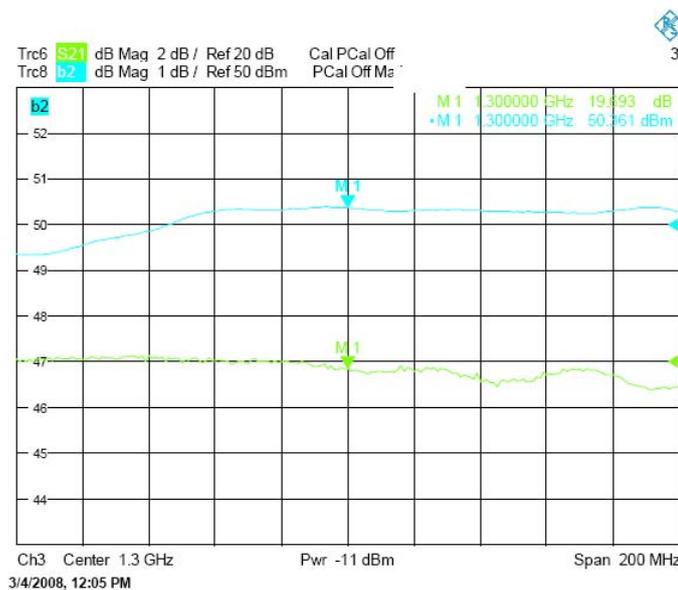


图 52 一个 L 波段雷达功率管的 S21 特性 (使用 R&S ZVA 进行脉内单点测量)

脉冲形状测量

在脉冲轮廓测量模式下，R&S ZVA 可以测量时域下的 S 参数，最大测量带宽达到 30MHz（采样率 80MHz），从而为那些有着很窄脉宽的雷达信号的时域 S 参数测量提供了可能。

在脉冲轮廓测量模式下，R&S ZVA 直接将原始测量数据写入 RAM 中，后续的信号处理（比如滤波）由仪器的软件完成。

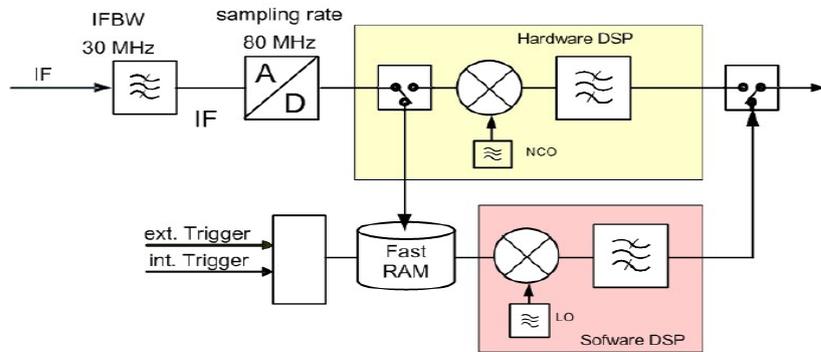


图 53: 使用 R&S ZVA 的高性能脉冲轮廓技术进行快速数据记录

图 54 给出了一个 L 波段雷达功率管的时域 S 参数特性

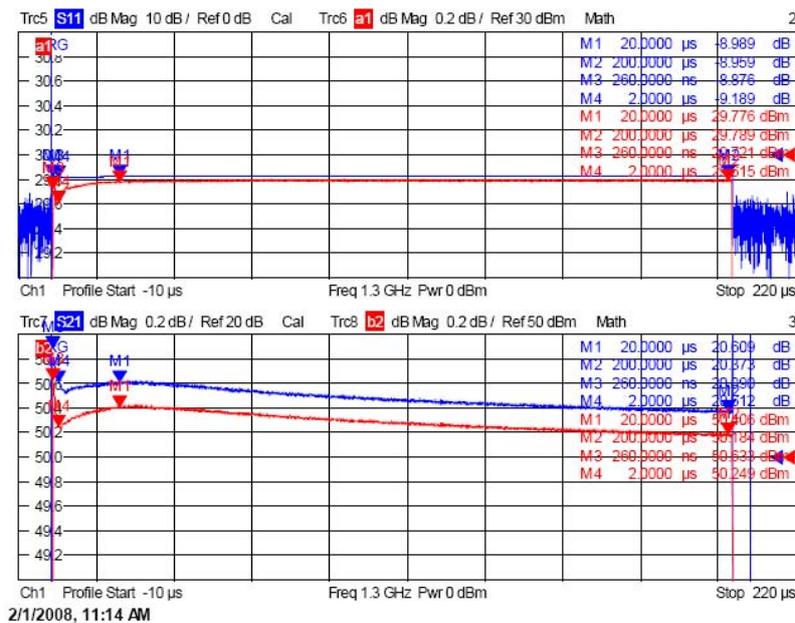


图 54: 脉冲 S11, a1 (输入功率), b2(输出功率)和 S21 的测量结果
(使用 R&S ZVA 矢量网络分析仪对一个 L 波段雷达功率管的时域特性进行测量)

天线测试（近场，远场）

对于雷达系统而言，天线性能是至关重要的。天线的增益指标直接影响雷达的作用范围，其它重要的指标包括：极化、发射和接收天线的匹配、波束宽度、瞄准角偏差（实测的主辐射方向与理想的主辐射方向的偏差）、副瓣抑制、前后比等。天线测量可以用近场和远场两种方式进行，各有优缺点。

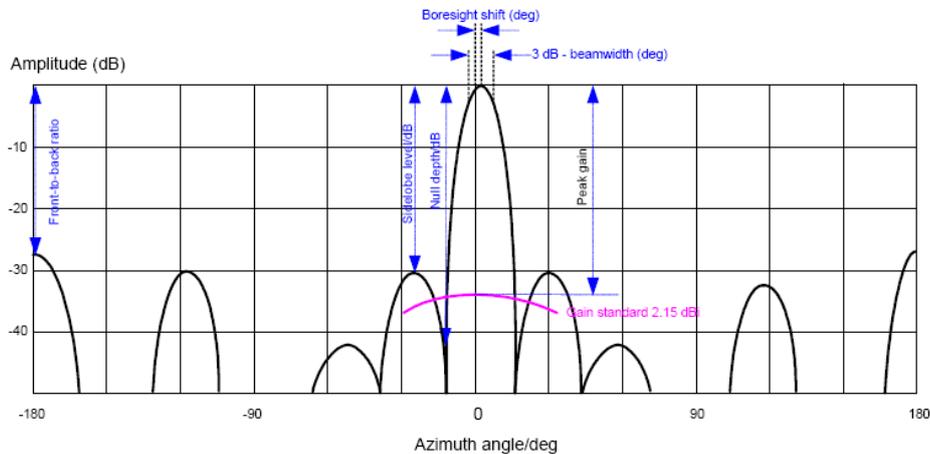


图 55 笛卡尔坐标系下，一副高增益天线的方向图特性（给出了一些重要参数的标注）

远场测量相对简单快捷，但是需要一个很大的场地；近场测量需要复杂的计算，相对远场测试而言更加耗时，但是对场地的需求很小。

图 56 给出了一个上限频率为 2GHz 的典型近场测量配置方案，这个配置采用了 R&S ZVA 矢量网络分析仪。

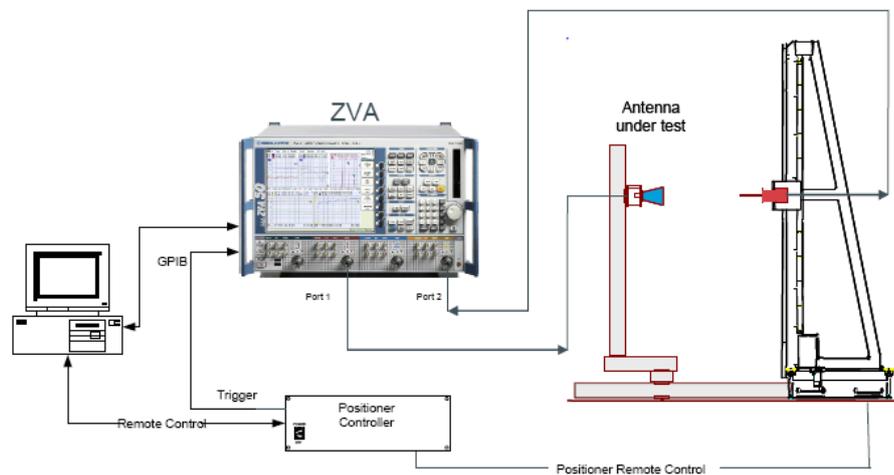


图 56：一个典型的近场天线测量配置框图（使用 R&S ZVA 矢量网络分析仪）

对于微波频段的近场测试配置而言，由于电缆造成的损耗不可忽略。这样就有必要在被测天线和耦合探头两端分别连接混频器，将微波信号直接下变频到中频，R&S ZVA 的一个 channel 可以提供信号作为本振源（LO）。在耦合探头的混频器之前有可能需要一个放大器，以保证其有足够的功率做为本振输入。

雷达截面测试

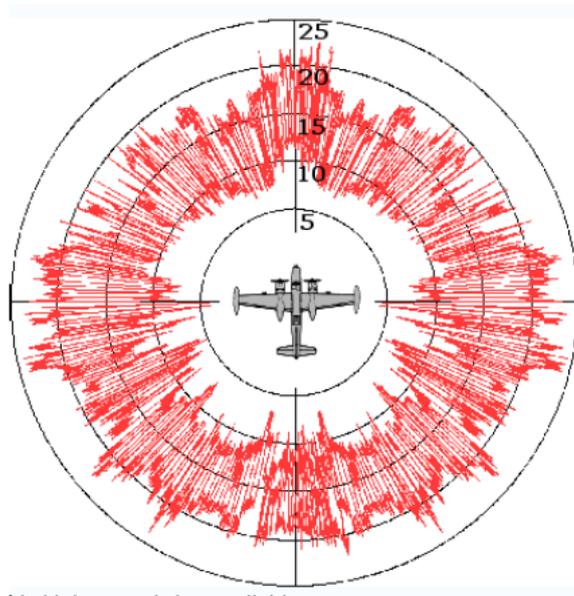


图 59 军用轰炸机的雷达截面

目标的雷达截面（RCS）是指其在不同方向角下的雷达反射特性。对于军用飞机而言，其对雷达探测信号的低反射特性显得非常重要，以确保其尽量不被敌人雷达发现。因此，我们需要分析不同方向角下的目标反射特性，尤其在各种军用飞行器开发的过程中，雷达散射截面测量是非常重要的。

图 60 给出了一个飞行器的雷达截面测试的基本配置框图（同时并行接收同极化和交叉极化两路信号，发射天线的极化可能是水平极化或垂直极化），R&S ZVA 网络分析仪同时并行测量两个极化的接收信号（从目标反射回来的），同时它还可以给发射天线提供信号源，在两个发射天线和 ZVA 端口之间连接了一个 PIN 开关，用于将信号切换给垂直极化天线或水平极化天线。

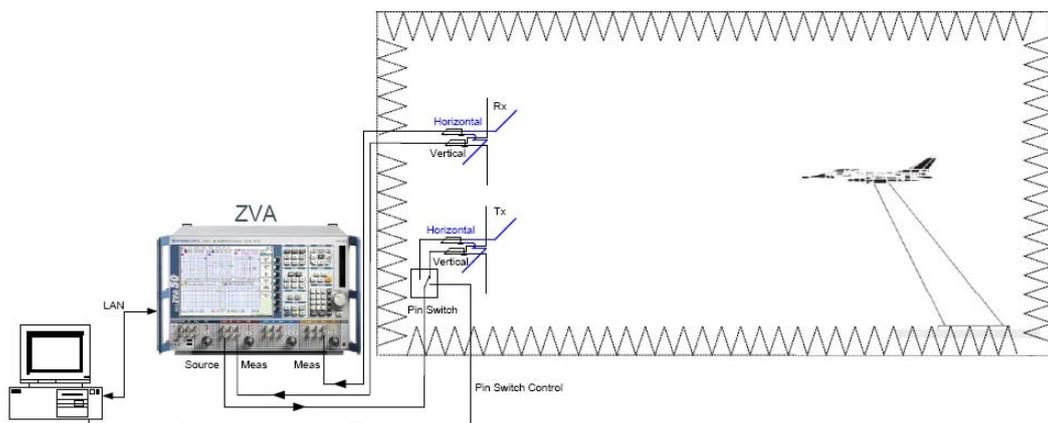


图 60：利用 R&S ZVA 进行飞行器的雷达截面测试的典型配置框图

R&S ZVA 矢量网络分析仪（最高至 50GHz）和 R&S ZVT 多端口网络分析仪（最高至 20GHz）是进行天线和雷达截面测量的理想选择。它们有着优越的性能指标，主要包括：很高的灵敏度（低至-130dBm），很宽的动态范围（高至 145dB），很高的

测量速度（高至 285,000 点/秒），快速的数据传输和灵活的配置功能（直接信号源/接收机通道选项）



图 61: R&S ZVA24 4 端口矢量网络分析仪

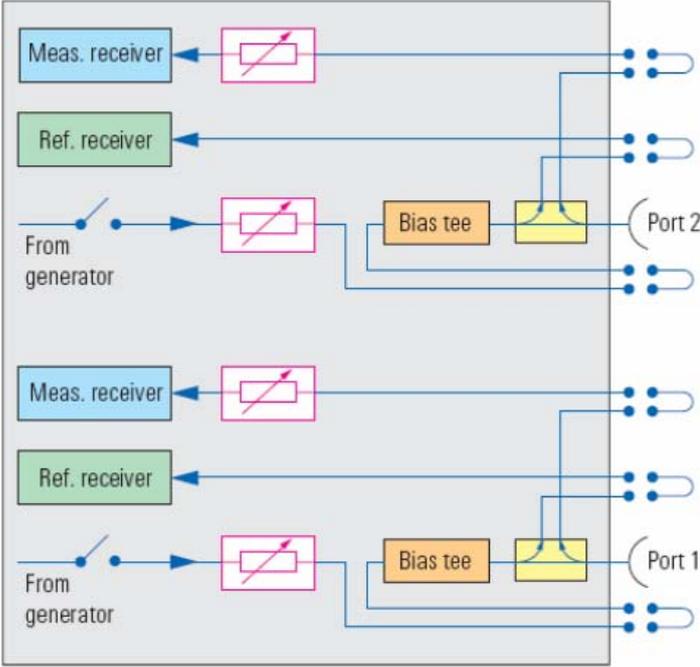


图 62 直接信号源/接收机通道选项（蓝色所示）和信号源/接收机步进衰减器（2 端口 R&S ZVA）

4 R&S 针对雷达测试的仪器

R&S SMF100A 微波信号源：专门针对雷达性能测试的特点



- 频率从 1GHz 到 22GHz 或到 43.5GHz
- 超低相位噪声，优秀的谐波和杂散抑制性能
- 快速的频率和功率稳定时间
- 高达+16dBm 的 RF 功率输出（选件可以至+25dBm）
- 能够灵活的产生单脉冲，双脉冲和脉冲串波形
- 脉内线性调频信号输出，带宽：80MHz。
- 脉冲调制器选件，拥有>80dB 的开关比，<10ns 的上升时间，以及 20ns 的最小脉冲宽度

<http://www.smf.rohde-schwarz.com>

R&S SMA100A 信号源：本振源的完美替代



- 频率从 9kHz 到 3GHz 或 6GHz
- 6GHz 范围内拥有最低的单边带相位噪声指标（典型值：1GHz 载波频率，20kHz 频偏，-140dBc/Hz）
- 高性能脉冲发生器和标准脉冲调制器选件，拥有高达 80dB 的开关比，20ns 的上升/下降时间以及 20ns 的脉宽

<http://www.smf.rohde-schwarz.com>

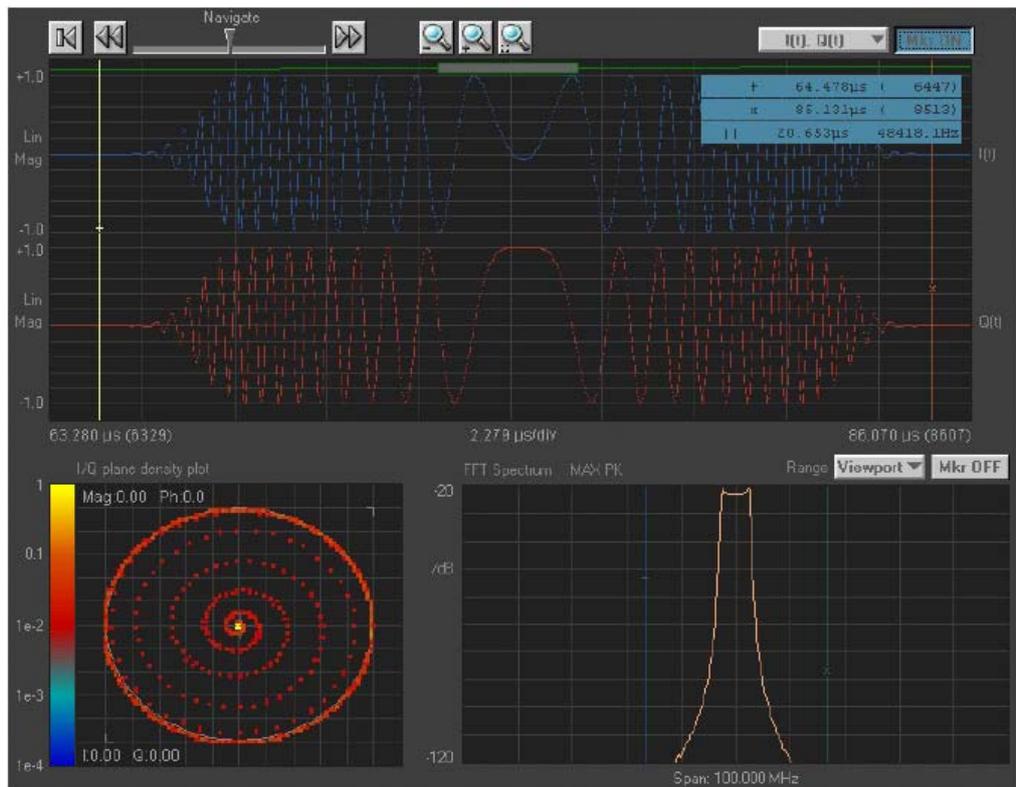
R&S SMU200A 矢量信号源：多功能宽带数字调制



- 频率高达 6GHz
- 可选的第二个 RF 路径频率高达 3GHz
- 内置两个基带发生器
- 丰富多样的内部数字调制样式
- RF I/Q 调制带宽高达 200MHz
- 脉冲调制器
- 非常低的单边带相位噪声
- 高电平重复性误差 <0.05dB
- 高达+19dBm(PEP) 的功率输出，超量程输出+26dBm

<http://www.smf.rohde-schwarz.com>

R&S K6 脉冲序列软件



- 基于 PC 的独立应用程序
- 直观完整的波形显示和分析界面
- 内建脉冲和序列库
- 任意设置脉冲参数，并且能够加入 AM, FM, PM, 数字调制, 线性调频等调制方式
- 通过加入抖动 (jitter) 改变脉冲参数
- 通过插件允许用户对脉冲内容进行授权/加密
- 批量建立多序列和组合多段波形
- 自动向仪器传输波形
- 所有 R&S 任意波形发生器均可使用。(R&S SMU, R&S SMJ, R&S AMU, R&S AFQ)

http://www2.rohde-schwarz.com/file/Software_SMx-K6_v1.0.0.zip

AFQ 100A/B 任意波形发生器：应对雷达基带信号产生的新需求



- 可变时钟速率，最高达 600MHz
- I/Q 带宽最大 264MHz，射频带宽 528MHz
- 与 R&S SMU 组合使用，是复杂宽带雷达信号最理想的工具
- 长信号深存储能力—256Msample 或 1Gsample
- 模拟 I/Q 输出（平衡和不平衡）
- 可选的数字输出

http://www2.rohdeschwarz.com/en/products/test_and_measurement/product_categories/signal_generation/Baseband/AFQ100A.html

R&S NRP 功率计：同时处理多达 4 个功率探头



R&S NRP-Z51/Z55 功率探头：热敏探头保证了最高的精确度

- DC 到 40 GHz
- 高精度的平均功率测量
- 测量范围 1uW 到 100mW
- Γ 修正降低失配误差
- 通过 USB 可以在 PC 上直接控制探头

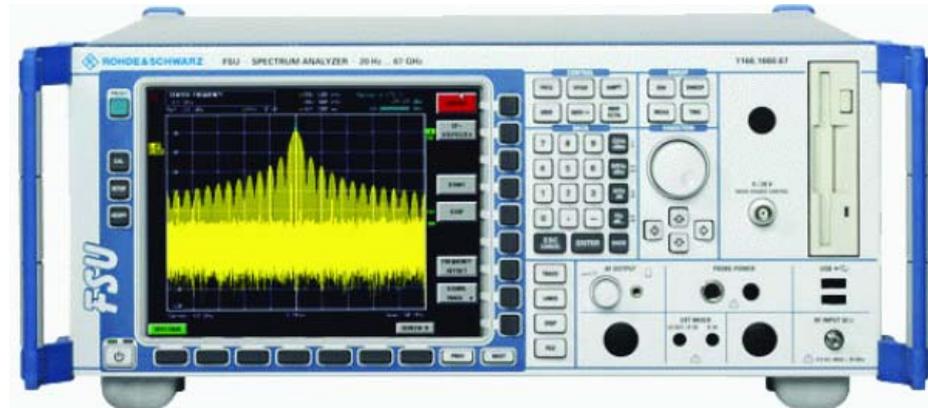
<http://www.nrp.rohde-schwarz.com>

R&S NRP-Z81 功率探头：脉冲雷达信号功率分析的理想选择

- 频率范围从 50MHz 到 18GHz
- 能够分析 30MHz RF 带宽的雷达和通信信号（探头上升时间 <13ns）
- 精确测量调制和非调制信号连续平均功率，从 -60dBm 到 +20dBm。
- 快速的统计分析（10 万点 CCDF 分析只需 25 ms）

http://www2.rohdeschwarz.com/en/products/test_and_measurement/product_categories/power_volt_meter/power_meters/NRP-Z.html

R&S FSU 频谱分析仪系列，高达 67GHz 无需外部混频器的单表解决方案



- 根据需求，可选择频率上限分别为 3, 8, 26.5, 43, 46, 50, 67GHz 型号
- FSU67 是目前频谱分析仪中，唯一没有外部谐波混频器以及它所带来的缺点
- 仪器自控内部 RF 衰减器（0 到 75dB，5dB 步进）避免了因使用谐波混频器而必须手动操作衰减器。
- 参考电平范围（-130dBm 到 +30dBm）远远大于使用谐波混频所能达到的范围
- 是评估雷达，电子战，电子对抗和战场通信系统不可替代的仪器
- 手动模式下可以达到每秒 80 次测量，通过 IEC/IEEE488 可以达到每秒 70 次测量（包括了数据传输时间）
- 1GHz 的噪声底为-158dBm，65GHz 为-130dBm
- 分辨率带宽从 1Hz 到 50MHz
- 总测量不确定度<0.3dB
- 频率分辨率 0.01Hz
- 在频率范围内都拥有很低的相位噪声
- 通过增加一个功率探头，使频谱仪具有 RF 功率计功能
- 众多的分析选件

R&S FSQ40 信号分析仪：矢量信号分析和频谱分析仪合二为一



- 20Hz 到 3.6, 8, 26.5 和 40GHz
- 高性能频谱分析仪和多功能信号分析仪合二为一
- 在零频跨模式下，最大 50MHz 的分辨率带宽，能够分析脉冲信号更多细节
- 最大动态范围 170dB
- 28MHz 解调带宽—选件 B72 120MHz 带宽
- I/Q 数据记录（I/Q 分别 16Msample 的内存，通过选件可增加至 705Msamples）
- 灵活的模拟和数字基带信号分析
- 可选的外部谐波混频器使频率扩展至 110GHz
- 能够解调几乎所有的调制类型

<http://www.fsq.rohde-schwarz.com/>

R&S FSUP 信号源分析仪：信号源综合分析的理想选择



- 最高频率达 8/26.5/50GHz
- 外混频可达到 110GHz
- 灵活的相位噪声测量：
 - 鉴相器法
 - 带互相关算法的鉴相器法
 - 频谱分析仪法
- 完整的晶振测试
 - 相位噪声
 - 瞬态测试
 - 谐波
- 超高的相位噪声测量灵敏度
(频率 1GHz, 10kHz 频偏处达到 -134dBc/Hz)

http://www2.rohdeschwarz.com/en/products/test_and_measurement/product_categories/spectrum_analysis/FSUP.html

矢量网络分析仪

R&S ZVA 系列：无可比拟的测量速度和精度



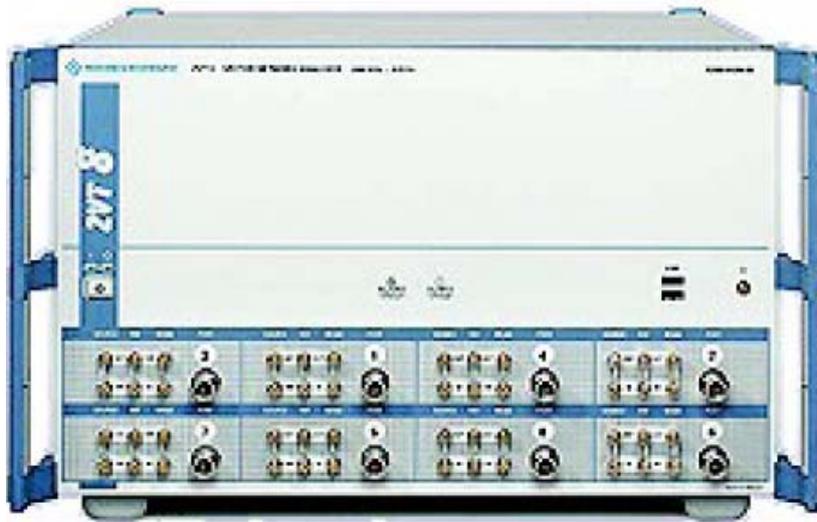
- 最高频率 8, 24, 40 或 50GHz
- 最多四个测试端口
- 行业领先的信号 RF 性能
- 很宽的动态范围内都能够进行快速和精确的测量
 - 测试端口 >135dB
 - 使用直接接入 >145dB
- 分段扫描加快了速度，增加了测试精度和动态范围
- 脉冲包络测量拥有 12.5ns 分辨率和高达 30MHz 的测量带宽
- 脉内取点测量最小脉宽 450ns
- 平行测量技术减少四倍测量时间
- 两个内部相位相参源提供真正差分测量
- 扫描与数据传输同步进行
- 外部器件的快速控制
- 宽动态范围和高灵敏度
 - 动态范围：测试端口 >135dB, 直接接收机输入 >145dB
 - 灵敏度：测试端口 <-115dBm, 直接接收机输入 <-130dBm

脉冲包络测试的行业标准

R&S ZVA 和 ZVT 系列矢网的 ZVA-K7 脉冲测量选件使用宽带检测和快速数据记录保证了高分辨率和快速的脉冲包络测量。

http://www2.rohde-schwarz.com/en/products/test_and_measurement/product_categories/network_analysis/ZVA/Pulsed_Measurements/

R&S ZVT8 和 ZVT20：唯一的 8 端口矢量网络分析仪



- 300kHz 到 8GHz，或 10MHz 到 20GHz
- ZVT20 多达 6 个端口，ZVT8 多达 8 个端口
- ZVT20 内置多达 3 个信号源，ZVT8 最多 4 个
- 动态范围>120dB
- 所有端口输出功率>13dBm
- 功率扫描范围从-40dBm 到 13dBm
- 每端口测量速度 8ms
- 简便的多端口测量设置
- 无限制的通道和轨迹数量
- 能够在器件的每个端口同时进行测试

http://www2.rohdeschwarz.com/en/products/test_and_measurement/product_categories/network_analysis/top_class/ZVT8.html

5 缩写

缩写	意义
AESA	Active Electronically Scanned Array 有源相控阵
ASR	Airport Surveillance Radar 航空预警雷达
ASR-S	Airport Surveillance Radar Mode-S (Mode S is an extension to secondary radar. Mode S makes it possible to query additional information, e.g. the speed of the aircraft.) S模式航空预警雷达（S模式是扩展次级雷达。S模式雷达能够得到附加信息，比如飞机的速度）
COHO	Coherent Local Oscillator 相参本振
ECM	Electronic Counter Measures are a subsection of electronic warfare which includes any sort of electrical or electronic device designed to trick or deceive radar or other sensor systems 电子对抗属于电子战的一部分，是指用电子技术或是电子仪器来欺骗或是干扰雷达或其他探测系统。
ECCM	Electronic Counter Counter Measures describes a variety of practices which attempt to reduce or eliminate the effect of Electronic countermeasures (ECM) 电子反对抗是通过采取多种措施来降低或是消除电子对抗造成的影响
ELINT	Electronic Intelligence (intelligence derived from electromagnetic radiations from foreign sources) 电子情报（情报来自于外界的电磁波辐射）
ESM	Electronic Warfare Support Measures Passive usage of the electromagnetic spectrum to obtain information about enemy forces in the battlefield so as to enable immediate tactical action. Such information can serve as a basis for initiating artillery fire, air attacks or electronic countermeasures, for example. Example: Radar warning receiver in fighter aircraft 电子保证措施是指：在战场上，被动使用电磁频谱来获得敌军信息，进行快速战术行动。这些信息能够作为火炮打击，空中打击和电子对抗的主要根据。
LPI	Low Probability of Intercept 低截获概率
MTI	Moving Target Indication 活动目标显示

PRI	Pulse Repetition Interval (PRI = 1/PRF) 脉冲重复周期
PESA	Passive Electronically Scanned Array 无源相控阵雷达
PDF	Pulse Desensitization Factor 脉冲减敏系数
PRF	Pulse Repetition Frequency (PRF = 1/PRI) 脉冲重复频率
RADAR	Radio Detection and Ranging 雷达
SIGINT	Signals Intelligence (SIGINT) involves gathering information from intercepted radio signals (COMINT, Communication Intelligence) and detecting and analyzing radar signals (ELINT, Electronic Intelligence). 信号情报指通过拦截无线电信号（COMINT，通讯情报），以及侦察和分析雷达信号（ELINT，电子情报）方式来收集情报
STALO	Stable Local Oscillator 稳定本振
RCS	Radar Cross Section “The radar cross section of a target is the (imaginary) area intercepting that amount of power which, when scattered equally in all directions, produces an echo at the radar equal to that from the target.” [1] 雷达截面 “目标雷达截面是（假想的）一块拦截功率区域，当雷达散射波各向相等时，在雷达上接收到的该区域回波相当于整个目标的反射。” [1]

6 参考文献

- [1] Radar Handbook, Second Edition, Merrill Skolnik
- [2] http://de.wikipedia.org/wiki/Synthetic_Aperture_Radar
- [3] <http://keydel.pixelplaat.de/uploads/File/vorlesung07-08/SAR.pdf>
- [4] <http://www.bbc.co.uk/dna/h2g2/C1215>
- [5] <http://www.armedforces.co.uk/releases/raq43f463831e0b7>
- [6] <http://www.pa.op.dlr.de/poldirad/BISTATIC/index.html>
- [7] R&S Power Viewer Plus (part of R&S NRP Toolkit)
- [8] R&S Application Note 1EF48 “Power Measurement on Pulsed Signals with Spectrum Analyzers” www.rohdeschwarz.com/appnote/1EF48.html
- [9] R&S Pulse Sequencer Software to generate complex pulse patterns for R&S SMU200A, R&S SMJ100A, R&S SMATE200A, R&S AFQ100A and R&S AMU200A
- [10] ARB Toolbox (comes along with R&S Application Note 1GP62 “Importing Data in ARB, Custom Digital Modulation and RF List Mode”)
- [11] 1GP60: R&S Transfer Toolbox for Matlab (Rohde & Schwarz Application Note)
- [12] 1EF48: Power Measurement on Pulsed Signals with Spectrum Analyzers (Rohde & Schwarz Application Note)
- [13] Antenna and RCS measurements with Vector Network Analyzers R&S ZVA8/24 and R&S ZVT8 - Data sheet

7 附加信息

欢迎访问罗德与施瓦茨公司网站获取有关应用文档或写邮件提出您的宝贵意见。

customersupport@rohde-schwarz.com

www.rohde-schwarz.com



ROHDE & SCHWARZ GmbH & Co. KG · Mühlhofstraße 15 · D-81671 Munich · Postfach 80 14 69 · D-81614 Munich · Tel (089) 4129 -0 · Fax (089) 4129 - 13777 · Internet: <http://www.rohde-schwarz.com>

This application note and the supplied programs may only be used subject to the conditions of use set forth in the download area of the Rohde & Schwarz website.